



**République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur
et de la Recherche scientifique**



**Université Echahid Hama Lakhder d'El-Oued
Faculté des Sciences et de la Technologie**

**Mémoire de Fin d'Étude
En vue de l'obtention du diplôme de**

MASTER ACADEMIQUE

**Domaine : Sciences et Technologie
Filière: Génie Électrique
Spécialité: Commande Électrique**

Thème

**ETUDE ET SIMULATION D'UN
FILTRE ACTIF PARALLEL
A QUATRE FILS**

Réalisé par:

 **SOUFIANE BEN ALI**
 **SADDAM BOUHANAK**

Encadré par:

Dr. LAID ZELLOUMA

Soutenu en Juin 2015

REMERCIEMENTS

*Louange A Dieu Qui Nous A Donne La Foi, Le
Courage, La Patience Et La Volonté Pour
Réaliser Ce Modeste Travail Dans Des
Meilleures Circonstances Et En Bon Etat*

*Nos premiers remerciements iront au Dr. ZELLOUMA LAID pour nous avoir encadrés
durant toute la période d'étude.*

*Nous remercions aussi les membres du Jury d'avoir accepté
de juger notre travail.*

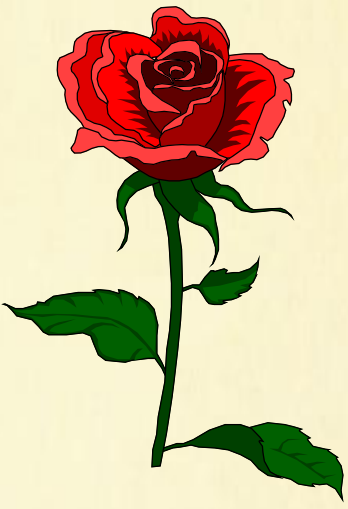
*Nos vifs remerciements vont également à tous nos amis
pour leur soutien moral tout au long de la préparation de
ce mémoire.*

*Nous ne pouvons pas clôturer nos remerciements sans se
Retourner vers les personnes les plus chers à nous ; nos parents
qui ont eu un rôle essentiel et continu dans notre réussite.*

BEN ALI soufiane

BOUHANAK saddam





Dédicaces

Je dédie ce fruit de travail :

*A ma très chère maman, pour sa tendresse, sa bienveillance, son
Encouragement, pour ce qu'elle a fait depuis mon enfance jusqu'à ce jour.*

A mon cher père pour sa générosité, sa bonté, je te remercie

Cher papa du fond du cœur pour tout ce que tu as fait pour moi .

A mes frères et A mes chères sœurs

*Et à tous les membres de ma grande famille qui porte
Le nom de " BEN ALI " .*

A mes amies dans « Union générale étudiante libre EL-OUED »

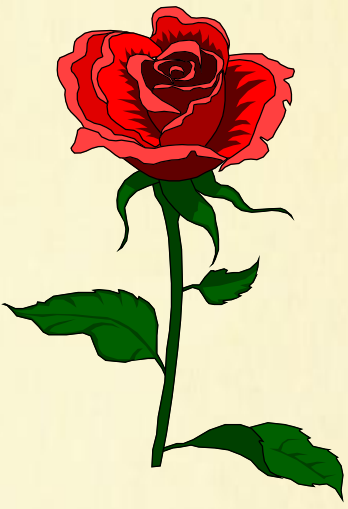
A tous mes amis sans exception en particulier ceux de la promotion 2^{ème}

Année master commande électrique 2015.

En fin à tout ce qui nous aime et qu'on aime

SOUFIANE





Dédicaces

Je dédie ce fruit de travail :

*A ma très chère maman, pour sa tendresse, sa bienveillance, son
Encouragement, pour ce qu'elle a fait depuis mon enfance jusqu'à ce jour.*

A mon cher père pour sa générosité, sa bonté, je te remercie

Cher papa du fond du cœur pour tout ce que tu as fait pour moi .

A mes frères et A mes chères sœurs

*Et à tous les membres de ma grande famille qui porte
Le nom de "BOUHANAK".*

A tous mes amis sans exception en particulier ceux de la promotion 2^{ème}

Année master commande électrique 2015.

En fin à tout ce qui nous aime et qu'on aime

SADDAM



ملخص

لقد أصبحت رداءة التيار الكهربائي في شبكات الجهد المنخفض المتناوب مصدر قلق شديد بسبب زيادة استخدام الحملات الغير الخطية و الملوثة .

تمثل هذه المورقة مساهمة في تحسين نوعية التيار الكهربائي في مثل هذه الشبكات . ندرس المصفي الفعال ذو أربعة خيوط ونستعمل عدة أشكال لهذا المصفي ومختلف أنواع الحملات (متوازنة وغير متوازنة) . يتم الكشف عن التيار الملوث باستعمال مصفي عالي العبور ، وقد أعطى هذا الأخير نتائج ممتازة ، سواء في الحالة العابرة أو السكونية .

أعطت المحاكاة التي أجريت خلال هذا العمل نتائج ممتازة، تدل على أهميته في الترشيح التوافقي للتيار الكهربائي وكذلك في تحسين معامل الاستطاعة.

Résumé

La qualité du courant électrique au niveau des réseaux alternatifs basse tension actuelles est devenue très préoccupante à cause de l'accroissement de l'usage des charges non-linéaire et polluantes.

Ce document est une contribution à l'amélioration de la qualité du courant électrique dans ce type de réseaux. Le filtre Actif Parallèle à Quatre fils est étudié, différentes topologies avec différentes charge (équilibré et déséquilibré) sont examinées. L'identification du courant perturbateur est faite à la base de filtre passe haut, qui ont prouvé de très bonne performance de filtre que ce soit, en régime transitoire ou en régime permanent.

Les simulations effectuées témoignent de l'importance de ce travail au filtrage des harmoniques et à la compensation de l'énergie réactive

Abstract

The electrical current quality at low voltage current alternative networks because a serious concern because of the increased use of non-linear loads and pollutants.

This work is a contribution of improving the quality of electric current in such networks. Four-wire shunt active filter is studied, different topologies with different loads (balanced and unbalanced) are discussed. The control is made at the base of High pass filter, which proved very good filtering performance, either in transient or steady.

The simulations demonstrate the importance of this work is harmonic filtering and reactive power compensation.

sommaire

INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
<u>CHAPITRE I</u>	
<u>perturbations des réseaux électriques et principe de compensation</u>	
I.1 Introduction.....	3
I.2 Perturbations électriques	3
I.2.1 Creux et coupures de tension	3
I.2.2 Fluctuations des tensions	4
I.2.3 Déséquilibre du système triphasé de tension.....	4
I.2.4 Variation de fréquence.....	4
I.2.5 Harmonique et inter harmonique.....	4
I.2.5.1 Source d'harmonique.....	5
I.2.5.2 Conséquence néfastes des harmoniques	5
I.3 Décomposition d'un signal périodique	5
I.4 Grandeurs caractéristiques.....	6
I.4.1 Grandeur harmonique.....	6
I.4.2 Rang de l'harmonique.....	7
I.4.3 Série de Fourier.....	7
I.4.4 Valeur efficace d'une grandeur alternative.....	8
I.4.5 Taux de distorsion d'harmonique.....	8
I.4.6 Spectre d'harmonique (de fréquence).....	8
I.4.7 Charges linéaires et non linéaires.....	9
I.5 Influence des harmoniques sur le facteur de puissance FP	9
I.6 Réglementation de perturbation	11
I.7 Les solutions traditionnelles	12
I.7.1 Transformateur à couplage spécial.....	13
I.7.2 Pont dodécaphasé.....	13
I.7.3 Agir sur la structure de l'installation.....	14
I.7.4 Utilisation d'une inductance (selfs) série	15
I.7.5 Filtres passifs d'harmoniques	15
I.8 Solutions modernes de dépollution	17
I.8.1 filtrage actif.....	17
I.8.1.1 Filtre actif parallèle.....	18
I.8.1.2 Filtre actif série	19
I.8.1.3 Combinaison parallèle série actif.....	20
I.8.1.4 Filtrage hybride	21
I.8.2. Les redresseurs MLI.....	23
I.8.2.1 Redresseur de tension.....	23
I.8.2.2 Redresseur de courant.....	23
I.9 Conclusion	24

CHAPITRE II
Commande du Filtre Actif Parallèle à quatre fils

II.1 Introduction.....	25
II.2. Modélisation et stratégies de commande de l'onduleur	25
II.2.1. Constituants d'un filtre actif parallèle à quatre fils	25
II.2.2. Étude de la partie puissance	26
II.2.2.1. Description d'un onduleur triphasé à trois bras avec condensateurs à point milieu.....	26
II.2.2.2. Description d'un onduleur triphasé à quatre bras	28
II.2.2.3. Filtre de sortie	29
II.2.2.4. Système de stockage d'énergie	30
II.2.3. Étude de la partie commande-contrôle	31
II.2.3.1. Détermination des courants harmoniques de référence	31
II.2.3.1.1. Présentation de la méthode de puissances instantanées	31
II.2.3.1.2. Filtres d'extraction.....	34
II.2.3.1.3. Schémas de l'identification par la méthode de puissances instantanées.....	35
II.2.3.1.4. les courants des harmoniques identifiés [$i_a^* \cdot i_b^* \cdot i_c^*$] Matlab-Similink	36
II.2.3.2 Contrôle de l'onduleur par hystérésis	37
II.3 Conclusion.....	37

CHAPITRE III
Simulation de l'ensemble réseau, charge polluante et FAP à quatre fils

III.1 Introduction.....	38
III.2 Schéma de simulation	39
III.2.1 Schéma de charges équilibrées	39
III.2.2 Schéma de charges déséquilibrées	39
III.2.3 Paramètres de la simulation.....	40
III.2.4 Résultat de simulation sous Matlab-Similink	40
III.2.4.1 Cas de charge équilibrée	40
III.2.4.1.a- Le courbe avant filtrage	41
III.2.4.1.b - Les courbes après filtrage	42
III.2.4.2 Cas de charges déséquilibrées	44
III.2.4.2.a- Les courbes avant filtrage	44
III.2.4.2.b- Les courbes après filtrage	47
III.3. Conclusion	52

CONCLUSION GÉNÉRALE	53
Bibliographique	

LISTE DES SYMBOLES

F	Fréquence
F_h	Fréquence de la composante harmonique de rang h
f_1	Fréquence de la composante fondamentale
Y_1	La valeur efficace de la composante fondamentale
Y_n	Les valeurs efficaces exactes des différentes composantes harmoniques
THD	Taux de Distorsion Harmonique
D	Puissance Déformante
P	Puissance active
Q	Puissance réactive
S	Puissance apparente
F_p	Facteur de puissance
I_f	Valeur efficace du courant injecté par le FAP
I_h	Valeur efficace du Courant harmonique du rang h
I_l	Valeur efficace du courant injecté par le FAP
V_1	Valeur efficace de la tension de l'harmonique de rang h
V_h	Valeur efficace de la tension du fondamental
V_f	Tension simple efficace à la sortie du filtre
p	indice de pulsation
L	Inductance
C	Capacité
R	Résistance
IGBT	Insolâtes Gâte Bipolaire Transistor
MLI	modulation de largeurs d'impulsions
FAP	Filtre actif parallèle
FAS	Filtre actif série
R_s	Résistance du réseau côté source (Ω).
L_s	Inductance côté source (H).
R_c	Résistance côté de charge (Ω).
L_c	Inductance côté source (H).
L_f	Inductance de filtre
C_{dc}	Condensateur du bus continue
I_s	Courant du source
I_f	Courant du filtre
I_h	Courant harmonique de la charge
I_n	le courant du neuter
$i_{\alpha}^*, i_{\beta}^*, i_c^*$	le courant d'identifie
$i_{c\alpha}, i_{c\beta}, i_{cc}$	le courant de line
$\tilde{p}, \tilde{q}$	Composantes Alternatives de la puissance réelle et imaginaire respectivement
$\alpha - \beta$	Axes du repaire de Concordia
V_{fmax}	La valeur maximale de la tension à l'entrée de l'onduleur
V_{smax}	La valeur maximale de la tension simple au point de raccordement du filtre
ΔT	La période de variation du courant du filtre
τ	le taux d'ondulation admissible
Wh	la pulsation du rang h
V_{dc}	source continu de tension
$V_{an}, V_{\beta n}, V_{cn}$	les tensions simples de ligne
Ti	Etat de l'interrupteur i (ouvert ou fermé)

LISTE DES FIGURES

Figure	Titre	Page
Fig(I.1)	Décomposition d'un signal périodique	6
Fig(I.2)	Le spectre des harmoniques du courant de charge polluante	9
Fig(I.3)	Diagramme de Fresnel des puissances	10
Fig(I.4)	structure du pont dodécaphasé	13
Fig(I.5)	Forme de courant et rang d'harmonique	14
Fig(I.6)	Une distribution en étoile permet le découplage par les impédances naturelles et/ou additionnelles	15
Fig(I.7.a)	Structure du filtre résonant	16
Fig(I.7.b)	Structure du Filtre amorti	17
Fig(I.8)	Montage d'un filtre actif parallèle	19
Fig(I.9)	Montage du filtre actif en série	19
Fig(I.10)	Combinaison parallèle –série actif (UPQC)	20
Fig(I.11)	Redresseur de tension	23
Fig(I.12)	Redresseur de courant.	24
Fig(II.1)	Principe du filtrage actif parallèle d'un réseau triphasé à quatre fils.	25
Fig (II.2)	Filtre actif parallèle à trois bras avec condensateurs à point milieu pour un réseau triphasé à quatre fils.	26
Fig(II.3)	Filtre actif parallèle à quatre bras pour un réseau triphasé à quatre fils	28
Fig (II.4)	Filtres d'extraction	34
Fig (II.5)	Identification par la méthode des puissances instantanées.	35
Fig(II.6)	Principe de la commande par hystérésis	35
Fig (II.7)	Courant harmonique identifiés	36
Fig(II.8)	Principe de la commande par hystérésis	37
Fig(III.1)	Schéma de charges équilibrées	39
Fig(III.2)	Schéma de charges déséquilibrées	39
Fig(III.3)	Courant de source Sans filtrage	41
Fig(III.4)	Courant de neutre Sans filtrage	41
Fig(III.5)	Spectre d'harmonique du courant de source Sans filtrage	42
Fig(III.6)	Courant de source après filtrage	42
Fig(III.7)	Courant de neutre après filtrage	43
Fig(III.8)	Spectre d'harmonique du courant de source après filtrage	43
Fig(III.9)	Courant de source (phase 1 sans filtrage)	44
Fig(III.10)	Spectre d'harmonique (phase 1 sans filtrage)	44
Fig(III.11)	Courant de source (phase 2 sans filtrage)	45
Fig(III.12)	Spectre d'harmonique (phase 2 sans filtrage)	45
Fig(III.13)	Courant de source (phase 3 sans filtrage)	46
Fig(III.14)	Spectre d'harmonique (phase 3 sans filtrage)	46
Fig(III.15)	Courant de neutre (sans filtrage)	47
Fig(III.16)	Courant de source (phase 1 avec filtrage)	47
Fig(III.17)	Spectre d'harmonique (phase 1 avec filtrage)	48
Fig(III.18)	Courant injecté par filtre actif (phase 1)	48
Fig(III.19)	Courant de source (phase 2 avec filtrage)	48
Fig(III.20)	Spectre d'harmonique (phase 2 avec filtrage)	49
Fig(III.21)	Courant injecté par filtre actif (phase 2)	49
Fig(III.22)	Courant de source (phase 3 avec filtrage)	50
Fig(III.23)	Spectre d'harmonique (phase 3 avec filtrage)	50
Fig(III.24)	Courant injecté par filtre actif (phase 3)	51
Fig(III.25)	Courant du neutre (avec filtrage)	51

LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Titre	Page
Tab (I.1)	Engagement EMERAUDE sur les harmoniques de tension (réseaux HTA).	11
Tab (I.2)	Engagement EMERAUDE sur les harmoniques de tension (réseaux HTB).	11
Tab (I.3)	Limitation EMERAUDE des courants harmoniques.	12
Tab (I.4)	Autre configuration du filtre hybride.	24
Tab (II.1)	Tensions générées par l'onduleur de tension à trois bras avec condensateurs à point milieu.	27
Tab (II.2)	Tensions générées par l'onduleur de tension à quatre bras.	29
Tab(III.1)	Paramètres du système étudié.	40
Tab(III.2)	THD des courants de source.	52

La pollution harmonique est l'une des préoccupations principales des spécialistes dans le domaine du génie électrique ces trente dernières années.

Si au début de leur apparition, les harmoniques étaient essentiellement causés par la saturation des circuits magnétiques, aujourd'hui c'est plutôt les charges non linéaires à base d'électronique de puissance qui en sont la cause principale. En effet, de nos jours, on trouve les systèmes à base d'électronique de puissance dans la production d'énergie, comme l'excitation des alternateurs, le couplage au réseau des sources de productions décentralisées à travers une interface d'électronique de puissance. Dans la distribution d'énergie, on trouve des systèmes de compensation et d'optimisation de puissance. Finalement, chez le récepteur final, les charges sont alimentées à travers des redresseurs, gradateurs, . . . etc. Il ne faut surtout pas cerner le problème de la pollution harmonique autour des charges industrielles, car quelques charges domestiques monophasées comme le matériel informatique, téléviseur, climatisation ou l'éclairage fluorescent sont plus polluantes. Ces charges non linéaires absorbent des courants non sinusoïdaux, et par conséquent engendrent des harmoniques dont la circulation dans le réseau cause une dégradation de l'onde de tension et augmente les pertes de puissance, sans oublier la perturbation au fonctionnement normal de certains équipements, voir même le risque de destruction.

Pour garantir les normes de qualité, le filtrage actif d'harmoniques, et en particulier le filtrage shunt a prouvé son efficacité comme une alternative aux solutions traditionnelles basées sur les filtres passifs, en raison notamment de la bande passante et la flexibilité. Au cours des dernières années, plusieurs travaux ont été réalisés et sanctionnés par des réalisations pratiques de tels systèmes, mais la majorité des cas pour des systèmes triphasés à trois fils (sans distribution du fil neutre), or, il se trouve que dans les réseaux basse tension, le fil neutre est souvent distribué, ce qui fait apparaître des composantes homopolaires (harmonique 3 et ces multiples impaires), notamment à cause des charges non linéaires monophasées. A cet effet, le filtre actif à quatre fils est plus adéquat, du fait de la distribution du quatrième fil, qui permet de compenser le courant du neutre.

Deux solutions peuvent être envisagées pour la création du quatrième fil.

La première consiste à utiliser un onduleur à quatre bras, et la seconde utilise un onduleur à trois bras conventionnel mais avec un bus continu dont le point milieu sert de point neutre connecté au neutre du réseau. Si la première structure est la plus utilisée dans la littérature parce qu'elle offre la meilleure optimisation du bus continu, la seconde structure est plus préférable de point de vue économique car elle réduit le nombre de semi-conducteurs.

INTRODUCTION GENERALE

Le présent travail traite avec la dépollution harmonique par un filtre actif à quatre fils, et plus spécialement, le filtre à quatre fils à base d'un onduleur à trois bras. Ce travail a pour objectif, la mise en œuvre et la contribution au contrôle de ce type de structure appliquée au filtrage actif dans les réseaux de distribution à quatre fils. Le contrôle-commande du filtre actif est souvent déterminant pour l'objectif de compensation de tous les harmoniques indésirables. Ce contrôle comporte trois parties essentielles, à savoir, l'identification des perturbations harmoniques qui consiste en la séparation des harmoniques dans les courants absorbés par la charge non linéaire, la régulation de la tension continue aux bornes du bus continu de l'onduleur, et le contrôle des courants injectés dans le réseau. La qualité de filtrage sera déterminée ainsi par la qualité de contrôle de ces trois paramètres qui fera l'objet de notre préoccupation principale dans cette mémoire.

La présentation de ce manuscrit est étalée sur trois chapitres : le premier chapitre sera consacré au recensement des perturbations qui peuvent apparaître dans un réseau électrique basse tension, leurs causes et leurs conséquences ainsi que les normes visant à diminuer leurs proliférations. Nous rappelons aussi les solutions de dépollution existantes, tant traditionnelles que modernes.

Dans le deuxième chapitre nous avons présentes la définition et la structure de filtre actif parallèle à quatre fils, cette structure partagée à deux parties qui sont la partie de puissance et la partie de commande-contrôle, la partie de puissance est représentée par l'onduleur de tension, système stockage l'énergie et filtre de sortie, et la deuxième partie qui est la commande –contrôle représentée par la commande d'onduleur et l'identification des courants perturbés.

Dans le troisième chapitre on se propose d'étudier la simulation de l'ensemble réseau, charge non linéaire déséquilibrée, filtre actif parallèle à quatre fils sous l'environnement Matlab Simulink. On donne ensuite les résultats de simulations obtenus.

I.1. Introduction

Depuis quelques années, les mesures de puissance et de la qualité du réseau électrique prennent beaucoup d'importance. Parallèlement, il existe un besoin croissant pour une meilleure qualité et une plus grande fiabilité du réseau électrique. Par conséquent, l'utilisation accrue, dans l'industrie, des systèmes commandés à base d'électronique de puissance provoque de plus en plus des problèmes de perturbation au niveau des réseaux électriques [1], tels que les distorsions harmoniques, les déséquilibres, le papillotement, les coupures brèves, les creux de tension, les surtensions temporaires, les variations de fréquence et de tension, et les surtensions transitoires. En outre, ces perturbations peuvent générer des nuisances, pannes ou des dégâts par l'affectation d'un ou plusieurs paramètres de la tension du réseau électrique suivants: la fréquence, l'amplitude, la symétrie des tensions triphasées et la forme de l'onde.

Dans ce chapitre nous allons étudier les principales perturbations affectant la qualité de l'onde électrique, notamment les harmoniques pour les quelles on s'intéresse particulièrement. Nous parlerons également de leurs origines, des conséquences. Nous discuterons ensuite les solutions envisagées pour pallier aux problèmes liés aux perturbations harmoniques, en particulier le filtrage actif.

I.2. Perturbations électriques

L'énergie électrique est délivrée sous forme de tension, caractérisée par sa fréquence, son amplitude et sa forme d'onde qui doit être sinusoïdale. La qualité de la tension peut être affectée, soit par des perturbations aléatoires à caractère accidentel, soit par des perturbations existantes en permanence ou pendant des instants de durées bien déterminées. Ces perturbations sont classées comme suit :

I.2.1. Creux et coupures de tension

Le creux de tension est une diminution de son amplitude (entre 10% à 90% de la tension nominale) pendant un temps de 10 millisecondes jusqu'à quelques secondes. Les creux de tension sont dus en général à des défauts dans les réseaux publics ou ceux des utilisateurs.

Ils apparaissent aussi lors des manœuvres d'enclenchement mettant en jeu des courants de fortes intensités (moteurs, transformateurs, etc.).

Une coupure brève est une disparition totale de la tension pendant une courte durée qui n'excède par une minute. Ces coupures sont dues au fonctionnement du système de protection des réseaux aériens évitant ainsi des coupures longues. [2][20][21][22][23]

I.2.2. Fluctuations de tension

Les fluctuations de tension sont des variations périodiques ou erratiques de l'enveloppe de la tension qui se produisent à des intervalles de temps de quelques centièmes de secondes. L'amplitude de la tension doit se situer dans une bande de $\pm 10\%$ de sa valeur nominale. Ces fluctuations entraînent des variations de flux lumineux pour les lampes à incandescence créant un papillotement de la lumière. [2]

I.2.3. Déséquilibre du système triphasé de tension

Lorsque les trois tensions ne sont pas identiques en amplitude et/ou ne sont pas décalées d'un angle de 120° les unes par rapport aux autres, elle pariera de déséquilibre du système triphasé. Un réseau électrique triphasé équilibre alimentant un récepteur électrique triphasé non équilibre conduit à des déséquilibres de tension dus à la circulation des courants non équilibrés dans les impédances du réseau.

I.2.4. Variation de fréquence

Les réseaux de distributions ou de transports ont une fréquence constante, sa variation est très rare sauf dans des circonstances exceptionnelles, comme dans le cas de certains défauts graves sur le réseau. Dans les conditions normales d'exploitations, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle de $50 \text{ Hz} \pm 1\%$. [2]

I.2.5. Harmonique et inter harmonique

Les harmoniques sont une superposition à l'onde fondamentale (50Hz) des ondes sinusoïdales mais de fréquences multiples entier du fondamental. La principale source de la présence des harmoniques dans les réseaux électriques est l'utilisation intensive des convertisseurs statiques.

Les inter harmoniques sont superposés à l'onde fondamentale mais ne sont pas des multiples entiers de la fréquence du réseau.

I.2.5.1. Source d'harmonique

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

I.2.5.2. Conséquence néfastes des harmoniques

Les tensions et les courants harmoniques ont des effets indésirables et néfastes sur le fonctionnement, la rentabilité et la durée de vie de certains équipements électriques [3]:

- Alternateurs : pertes supplémentaires dans les enroulements statoriques et dans les amortisseurs liés à la circulation des courants harmoniques.
- Lignes : pertes ohmiques supplémentaires.
- Transformateurs : pertes supplémentaires dans les enroulements par effet Joule et dans le noyau par courant de Foucault.
- Moteur à courant alternatif : pertes supplémentaires dans le fer et dans les enroulements plus réchauffement du moteur.
- Condensateur de puissance : pertes diélectrique supplémentaires conduisant aux vieillissement rapide du condensateur.
- Equipement de l'électronique de puissance : dysfonctionnement lié à la déformation de la tension.

I.3. Décomposition d'un signal périodique

Un signal déformé se compose généralement de plusieurs harmoniques. Les courbes de la figure (I.1) nous montrent la décomposition d'un signal périodique en série de Fourier.

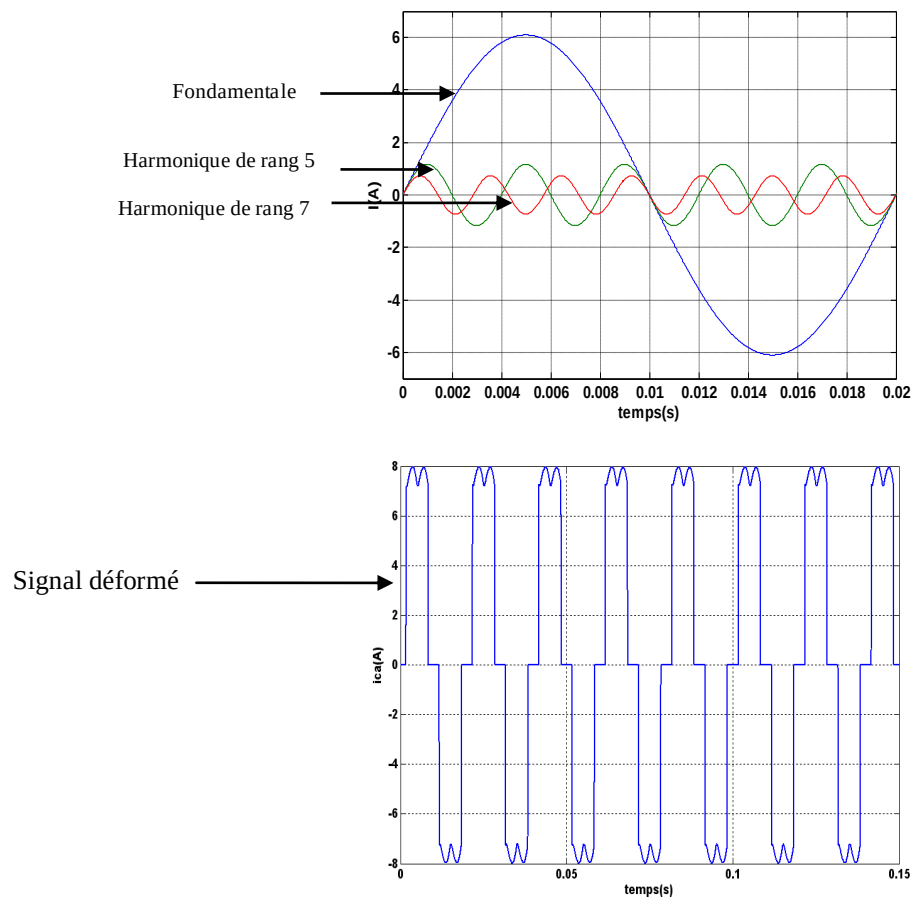


Fig (I.1): Décomposition d'un signal périodique.

I.4. Grandeurs caractéristiques

I.4.1. Grandeur harmonique

C'est l'une des composantes sinusoïdales de la variation du grandeur physique possédant une fréquence multiple de celle de la composante fondamentale. L'amplitude de l'harmonique est généralement de quelques pour cent de celle du fondamental. [4]

I.4.2. Rang de l'harmonique

C'est le rapport de sa fréquence f_n à celle de la fondamentale (généralement la fréquence industrielle, 50 ou 60 Hz) :

$$n = f_n / f_1 \quad (\text{I.1})$$

Par principe, le fondamental f_1 a le rang un. [5]

I.4.3. Série de Fourier

Ceci revient à dire que : « tout signal périodiques de période $T = 1/f$, peut se décomposer en une somme infinie des termes sinus et cosinus de fréquences multiples de f ». Mathématiquement, cela s'écrit :

$$s(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \quad (\text{I.2})$$

la valeur a_0 représente la valeur moyenne de $s(t)$.

On calcule les coefficients a_n et b_n avec les formules suivantes :

$$a_n = \left(\frac{2}{T}\right) \cdot \int_0^T S(t) \cdot \cos(n\omega t) dt \quad \text{et} \quad b_n = \left(\frac{2}{T}\right) \cdot \int_0^T S(t) \cdot \sin(n\omega t) dt \quad (\text{I.3})$$

De plus, il existe quelques pré-requis qui permettent de ne pas faire de calculs inutiles :

- si la fonction est symétrique par glissement, la valeur a_0 est nulle.
- si la fonction est paire, les coefficients b_n sont nuls.
- si la fonction est impaire, les coefficients a_n sont nuls.
- si la fonction possède une symétrie sur ses deux demi-périodes, les termes d'indice pairs sont nuls. [5]

I.4.4. Valeur efficace d'une grandeur alternative

Il y a identité entre l'expression usuelle de cette valeur efficace calculée à partir de l'évolution temporelle du grandeur alternative ($y(t)$) et l'expression calculée à partir de son contenu harmonique :

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

Notons qu'en présence d'harmoniques, les appareils de mesure doivent avoir une bande passante élevée ($> 1 \text{ kHz}$). [6]

I.4.5. Taux de distorsion d'harmonique

Le taux de distorsion est un paramètre qui définit globalement la déformation du grandeur alternative.

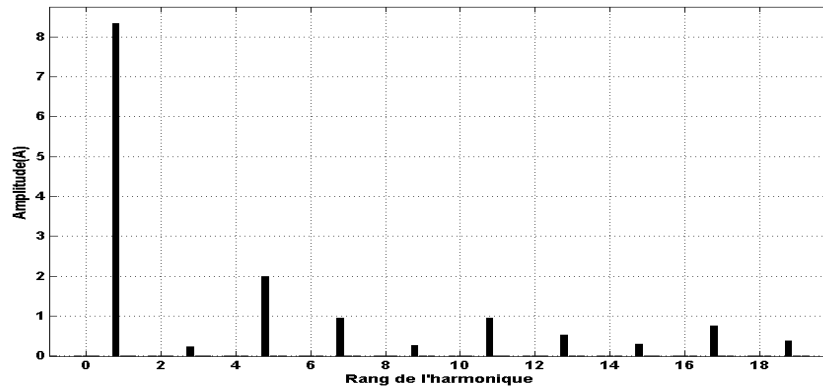
$$\text{THD}(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n Y_n^2}}{Y_1} \times 100 \quad (\text{I.5})$$

Y_1 : La valeur efficace de la composante fondamentale (du courant ou de la tension).

Y_n : Les valeurs efficaces exactes des différentes composantes harmoniques (du courant ou de la tension).

I.4.6. Spectre d'harmonique (de fréquence)

C'est la représentation de l'amplitude des harmoniques en fonction de leur rang, la valeur des harmoniques étant généralement exprimée en pourcentage du fondamental par un histogramme (figure (I.2)). [5]



Fig(I.2) :Le spectre des harmoniques du courant de charge polluante.

I.4.7. Charges linéaires et non linéaires

Les récepteurs peuvent être classés en deux familles principales :

- les récepteurs linéaires (ou charges linéaires).
- les récepteurs non-linéaires (ou charges non-linéaires).

Une charge est dite linéaire si est alimentée par une tension sinusoïdale, elle consomme un courant sinusoïdal. Cependant, le courant et la tension peuvent être déphasés. Les charges linéaires couramment utilisées sont constituées de résistances, de capacités et d'inductances.

Une charge est dite non-linéaire si l'on alimente une charge non linéaire par une tension sinusoïdale, le courant circulant dans cette charge n'est plus sinusoïdal. Ce courant peut être décomposé en une composante fondamentale et des harmoniques.

I.5. Influence des harmoniques sur le facteur de puissance FP

Normalement, pour un signal sinusoïdal le facteur de puissance est donné par le rapport entre la puissance active P et la puissance apparente S.

En présence des harmoniques, la puissance apparente S est composée de trois parties active P, réactive Q et déformante D, cette dernière est la puissance provoquée par les courants harmoniques, comme montre l'équation suivante :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (I.6)$$

Où Q : la puissance réactive associée au courant fondamental.

D : la puissance déformante due aux harmoniques du courant.

P : la puissance active.

S : la puissance apparente.

$$\text{Où } P = 3.U.I_1 \cos(\varphi_1) \quad (\text{I.7})$$

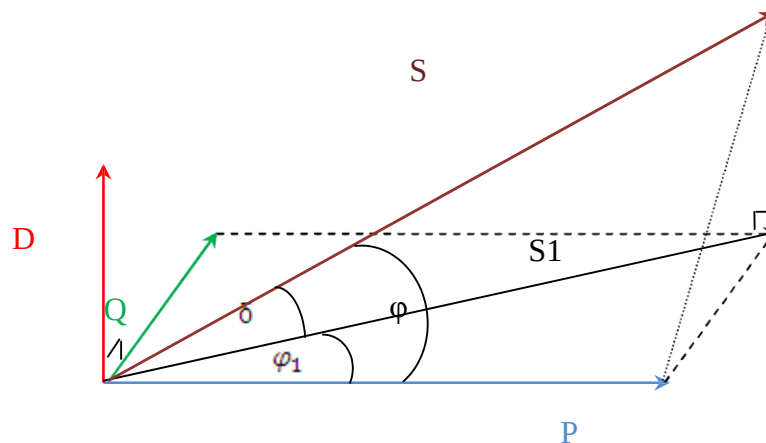
φ_1 : représente le déphasage entre le courant fondamental et la tension.

$$Q = 3.U.I_1 \sin(\varphi_1) \quad (\text{I.8})$$

$$\text{Et, } D = 3.U.I_1 \cdot \sqrt{\sum_{h=2}^n I_h^2} \quad (\text{I.9})$$

Finalement le facteur de puissance F_p est donné par l'expression [9]:

$$F_p = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad (\text{I.10})$$



Fig(I.3) : Diagramme de Fresnel des puissances.

I.6. Réglementation de perturbation :

D'après le contrat EMERAUDE d'EDF, les deux parties (fournisseur et récepteur) doivent s'engager à respecter les normes limitant les perturbations harmoniques.

De son côté, EDF s'engage à ce que les taux individuels de tension harmonique, exprimés en pourcentage de la tension fondamentale $V(t)$ pour les réseaux HTA (1 à 50 kV), ne dépassent pas les seuils donnés dans le tableau ci-dessous:

Harmoniques pairs		Harmoniques impairs			
		multiple de 3		non multiple de 3	
$V_h/V_1(\%)$	Rang	$V_h/V_1(\%)$	Rang	$V_h/V_1(\%)$	Rang
2	2	5	3	6	5
1	4	1,5	9	5	7
0,5	6 à 24	0,5	15 et 21	3,5	11
<i>le THD global de tension ne dépassant</i>				3	13
				2	17
				1,5	19,23 et 25

Tableau (I.1): Engagement EMERAUDE sur les harmoniques de tension (réseaux HTA).

Concernant les réseaux HTB (plus de 50 kV), EDF s'engage à ne pas dépasser les seuils donnés dans le suivant :

Harmoniques pairs		Harmoniques impairs			
		multiple de 3		non multiple de 3	
$V_h/V_1(\%)$	Rang	$V_h/V_1(\%)$	Rang	$V_h/V_1(\%)$	Rang
1,5	2	2	3	2	5 et 7
1	4	1	9	1,5	11 et 13
0,5	6 à 24	0,5	15 et 21	1	17 et 19
le THD global de tension ne dépassant pas 3 %.				0,7	23 et 25

Tableau (I.2) : Engagement EMERAUDE sur les harmoniques de tension (réseaux HTB).

Les règles de limitation des courants harmoniques recommandées aux clients par EDF à travers le contrat EMERAUDE sont données dans le tableau ci-dessous:

$I_h / I_1(\%)$	Rangs paires	$I_h / I_1 (\%)$	Rangs impaires
2	2	4	3
1	4	5	5 et 7
0,5	>4	2	9
		3	11 et 13
		2	> 13

Tableau (I .3) : Limitation EMERAUDE des courants harmoniques.

Les limitations en tension harmonique qui les clients d'EDF doivent les respecter sont :

Pour un harmonique pair : $\frac{V_h}{V_1} = 0.6 \%$.

Pour un harmonique impair : $\frac{V_h}{V_1} = 1 \%$.

Pour le taux de distorsion globale de tension : THD <1,6 %.

Il est d'usage de dire que, dans les installations industrielles, les tensions harmoniques dont le THD inférieur de 5% ne produisent pas d'effet notable. Entre 5% et 7% on commence à observer des effets, et pour plus de 10% les effets sont quasi certains .

Concernant la puissance réactive, EDF autorise ses clients à en consommer, sans être facturé, jusqu'à 40% de la puissance active absorbée. Cela se traduit, pour des charges linéaires, par un facteur de puissance $\cos\varphi = 0,928$ ou par un angle de phase $21,8^\circ$. [6]

I.7. Les solutions traditionnelles

Ce sont des techniques qui doivent être connues par tous les électriciens. Elles apportent une solution facile et rapide pour certains cas de perturbations bien localisées et utilisent des composants passifs (inductances, condensateurs, transformateurs) et/ou des branchements qui modifient le schéma de l'installation. [6][26][23]

I.7.1. Transformateur à couplage spécial

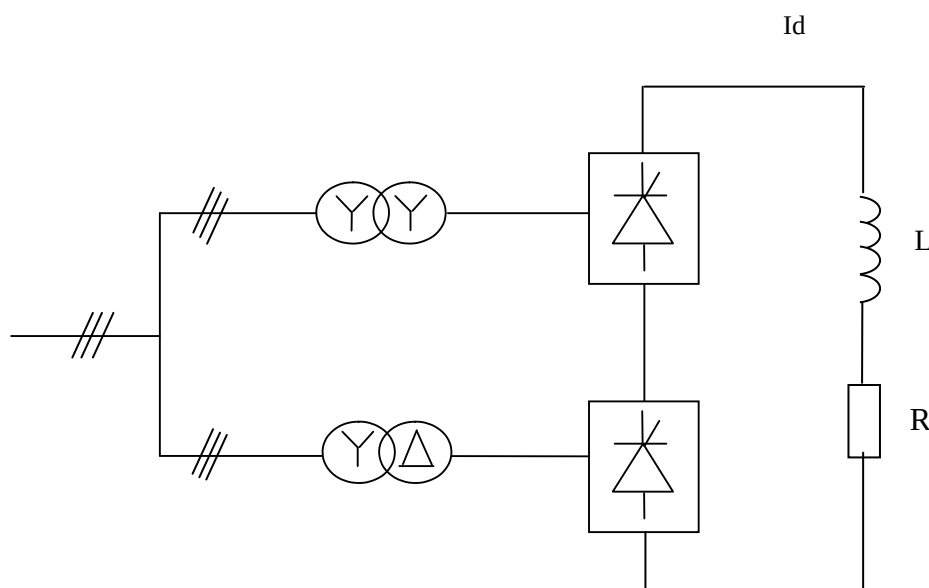
Il s'agit de limiter la circulation des courants harmoniques à une partie aussi petite que possible de l'installation à l'aide de transformateurs à couplage approprié. L'utilisation d'un transformateur d'isolement, de rapport 1/1 à couplage triangle-étoile ou triangle zigzag, empêche la propagation des courants harmoniques de rang 3 et leurs multiples circulant dans le neutre, ce procédé n'a aucun effet sur les autres rangs harmoniques.

I.7.2. Pont dodécaphasé

La structure dodécaphasé présente des caractéristiques très intéressantes par rapport à celle hexaphasée. Cependant, le nombre de semi-conducteurs utilisés et le transformateur à deux enroulements au secondaire rendent cette solution onéreuse.

Un convertisseur composé de (m_c) convertisseur triphasé élémentaire à indice de pulsation p , sera à indice de pulsation n tel que $n = m_c \cdot p$, si les convertisseurs élémentaires sont alimentés par des tensions dont les déphasages sont en progression arithmétique de $\frac{2\pi}{m_c p}$.

La figure (I.4) illustre un exemple pour $p=6$ (pont de graëtz) et $m_c=2$, soit un convertisseur à indice de pulsation égale à 12. Ce convertisseur appelé dodécaphsé, est le plus utilisé (cas des puissances importantes) dans la mesure où le déphasage de $\pi/6$ est facilement obtenu par un couplage étoile-triangle et étoile-étoile d'un transformateur à double enroulement au secondaire.



Fig(I.4):structure du pont dodécaphsé.

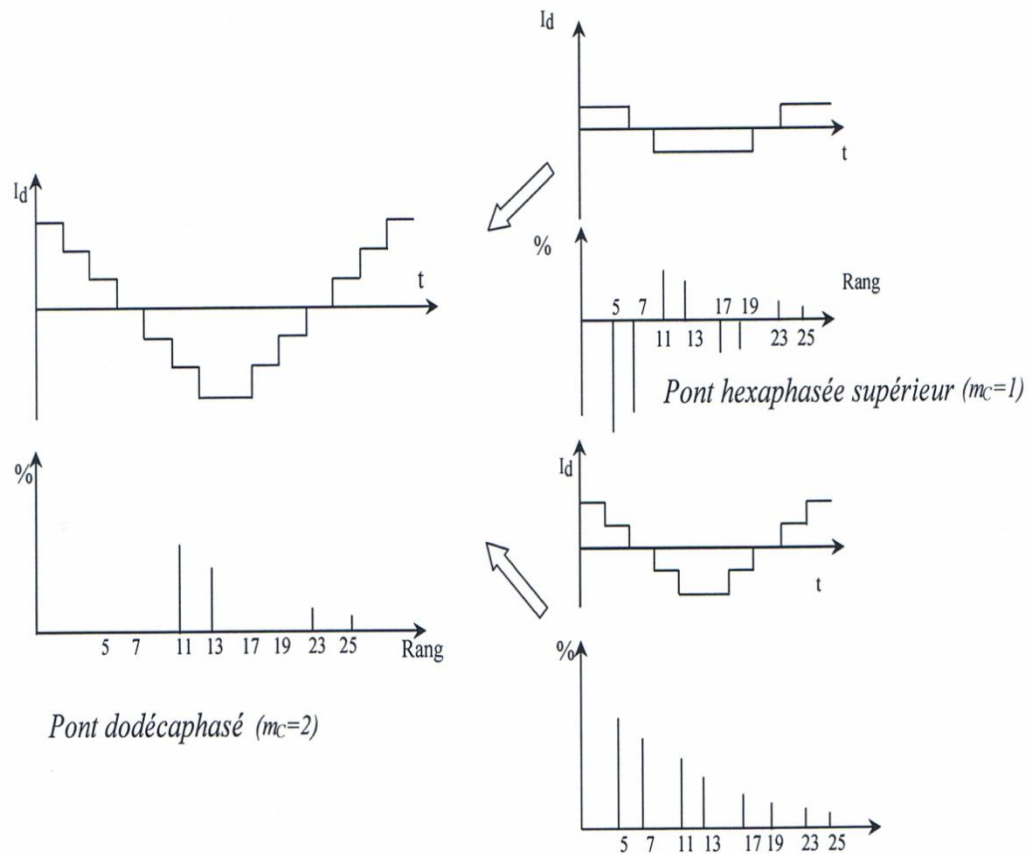
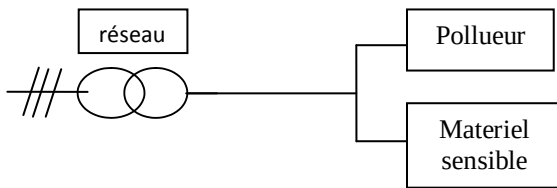
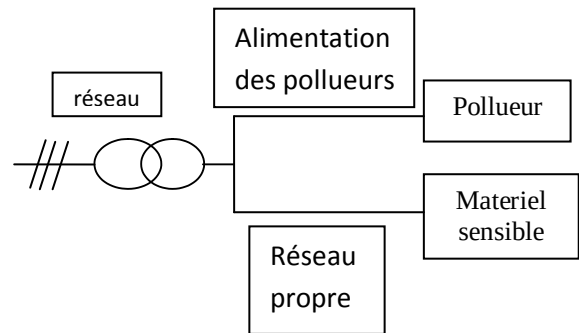


Fig (I.5) : Forme de courant et rang d'harmonique.

Cette solution provoque un encombrement lors de la commande ce qui limite son utilisation . [7]

I.7.3. Agir sur la structure de l'installation

Il faut éviter de connecter un récepteur sensible en parallèle avec un pollueur (figure (I.6)). Une alimentation par câble distinct est préférable. [5]

a) Solution à éviterb) Solution à préconiser

Fig(I.6) :Une distribution en étoile permet le découplage par les impédances naturelles et/ou additionnelles.

I.7.4. Utilisation d'une inductances (selfs) série

Cette solution est utilisée pour les entraînements à vitesse réglable (variateurs de vitesse) et les redresseurs triphasés, elle consiste à introduire une inductance série en amont d'une charge non linéaire. La self a cependant une efficacité limitée. Il faut en installer une par charge non linéaire. La distorsion en courant est divisée approximativement par deux. [8]

I.7.5. Filtres passifs d'harmoniques

Le principe est de « piéger » les courants harmoniques dans des circuits LC, accordés sur les rangs d'harmoniques à filtrer, donc il se comporte comme un court-circuit pour l'harmonique considéré. Un filtre comprend donc une série de « gradins » qui correspondent tous à un rang d'harmonique. Les rangs 5 et 7 sont les plus couramment filtrés. On peut installer un filtre pour une charge ou pour un ensemble de charges.

Sa conception nécessite une étude approfondie du réseau électrique et un travail de conception de bureau d'étude. Le dimensionnement dépend du spectre harmonique de la charge et de l'impédance de la source d'énergie. [5]

Cette solution est la plus simple et la moins chère mais sans doute, elle n'est pas la plus efficace. L'efficacité de ces filtres se trouve dégradée par la présence de certains facteurs :

- Insuffisante habilité à couvrir une large bande de fréquence qui nécessite l'installation de plusieurs filtres.
- Naissance de résonances séries et parallèles avec le réseau qui conduit à l'amplification de tout harmonique à fréquence voisine de celle de la résonance.
- La forte dépendance de l'impédance et de la fréquence du réseau.
- Equipements volumineux. [9]

➤ Filtre résonant :

Il est constitué par la mise en série d'une inductance, d'une résistance, et d'un condensateur la figure (I.7.a) .

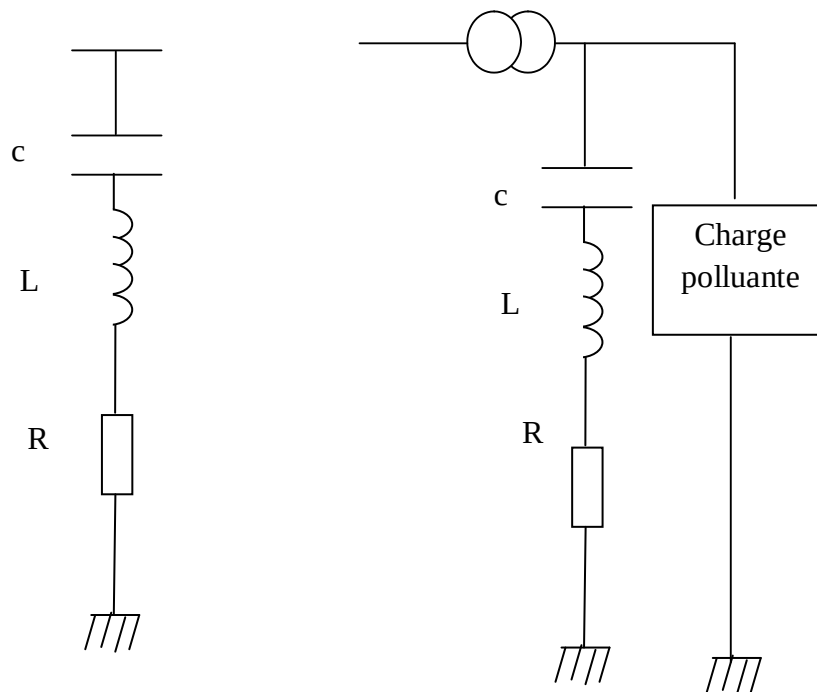


Fig (I.7.a) Structure du filtre résonant.

Ce type de filtre est caractérisé par l'emplacement de trois filtres, deux pour les harmoniques d'ordre inférieurs et un filtre pour les harmoniques d'ordre supérieurs, c'est-à-dire pour un pont triphasé nous avons besoin d'un filtre passe bas pour le cinquième et l'autre pour le septième harmonique et d'un filtre passe haut pour tous les harmoniques au-delà de 11^{ème}. [10]

➤ Filtre amorti :

La figure (I.7.b) montre le montage de ce type de filtre, ainsi que son impédance en fonction de la fréquence. En plus de difficulté de dimensionnement des filtres et à coût globale donné, ce type n'est efficace que si le rang d'harmonique à éliminer est suffisamment élevé (à partir de $h=13$). [5]

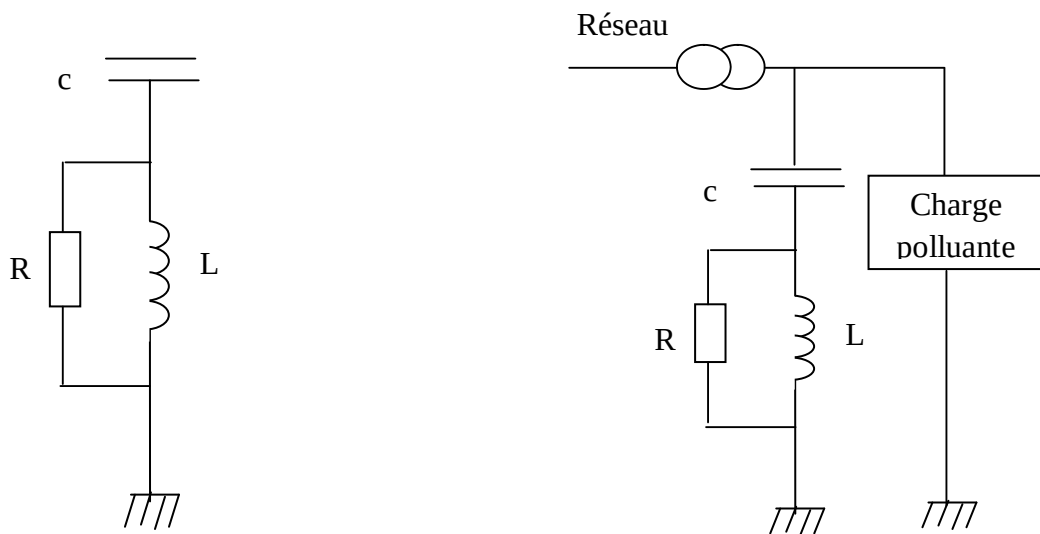


Fig (I.7.b) Structure du Filtre amorti.

I.8. Solutions modernes de dépollution

Pour fournir aux consommateurs une bonne qualité de l'énergie électrique, même dans les conditions de fonctionnement les plus perturbées, les filtres actifs et les redresseurs MLI sont proposés comme des solutions avancées de dépollution des réseaux électriques.

En effet, ces solutions peuvent s'adapter aux évolutions de la charge et du réseau électrique et ceci sans toucher aux installations du fournisseur d'énergie et du consommateur. [11]

I.8.1. filtrage actif

Deux raisons principales ont conduit à concevoir une nouvelle structure de filtrage moderne et efficace appelée filtre actif. La première raison est due aux inconvénients inhérents des solutions traditionnelles de dépollution qui ne répondent pas plus à l'évolution des charges et des réseaux électriques. En effet, les méthodes dites "classiques" de filtrage ou de dépollution des réseaux électriques présentent un certain nombre d'inconvénient. Le plus important d'entre eux

est sans doute le fait d'être sensible aux évolutions de l'environnement. Ils voient leur efficacité baisser avec les variations des perturbations (variation des fréquences et des amplitudes des harmoniques).

La seconde raison fait suite à l'apparition de nouveau composant à commutation forcée, comme les transistors bipolaires, les thyristors GTO et les transistors IGBT qui ont permis de réaliser de nouvelles structures qui permettent le contrôle de la forme d'onde de la phase du courant d'entrée. Le but de ces filtres est de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à compenser les perturbations responsables de la dégradation des performances des équipements et installations électriques. Ainsi le filtrage actif tend à annuler les courants harmoniques en injectant dans la source perturbatrice des courants harmoniques d'amplitudes identiques, mais en opposition de phase à l'aide d'un pont onduleur. A cet effet, une mesure du courant de la charge non linéaire permet de connaître le courant à fournir.

Nous citerons les configurations possibles des filtres actifs :

- harmoniques, les déséquilibres et les creux de tension. Le filtre actif parallèle (FAP) : conçu pour compenser toutes les perturbations de courant comme les harmoniques, les déséquilibres et la puissance réactive.
- La combinaison parallèle série actif : solution universelle pour compenser toutes les perturbations en courant et en tension.

Le filtre actif série (FAS): conçu pour compenser toutes les perturbations de tension comme les harmoniques, les déséquilibres et les creux de tension.

I.8.1.1. Filtre actif parallèle

Il est appelé aussi compensateur shunt, il est connecté en parallèle sur le réseau de distribution figure (I.8). Il est habituellement commandé comme un générateur de courant. Son principe est d'injecter dans le réseau électrique des courants harmoniques I_{inj} égaux à ceux absorbés par la charge non linéaire mais en opposition de phase, de telle sorte que le courant fourni par le réseau I_s soit sinusoïdale et en phase avec la tension simple correspondante. Ainsi, il empêche les courants harmoniques, réactifs et déséquilibrés de circuler à travers l'impédance du réseau. Par conséquent, Il améliore le taux de distorsion en courant et en tension. [8][17][25]

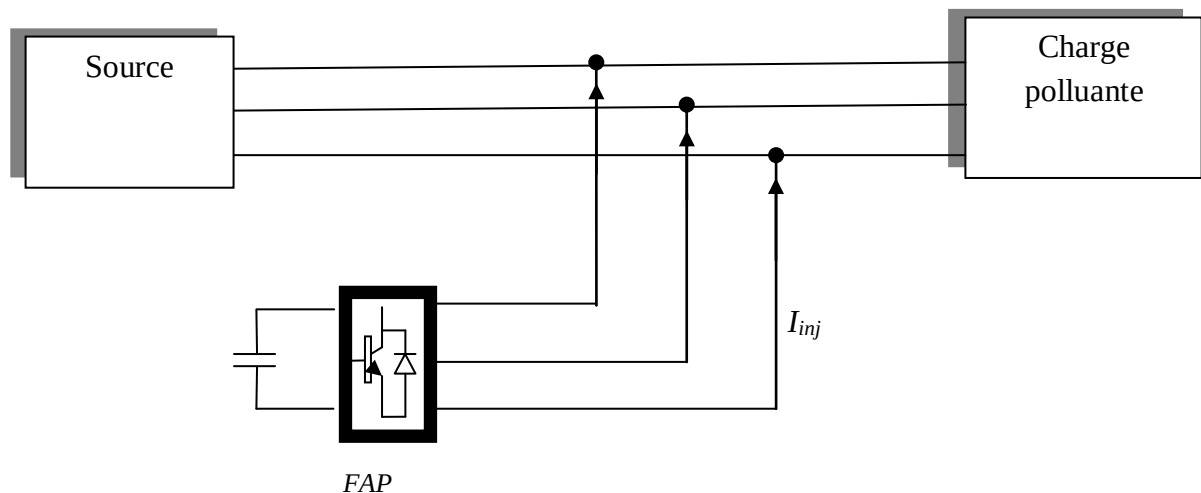
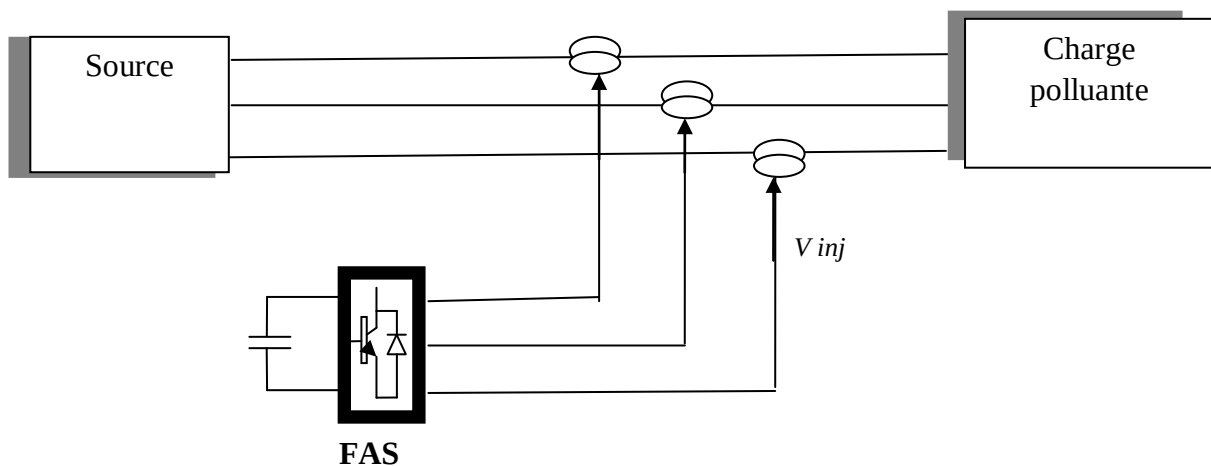


Fig (I.8) Montage d'un filtre actif parallèle.

I.8.1.2. Filtre actif série

Le filtre actif série est connecté en série sur le réseau comme le montré la figure (I.9). Il se comporte comme une source de tension qui engendre des tensions harmoniques dont la somme avec la tension du réseau est une onde sinusoïdale.

Il est destiné à protéger les installations qui sont sensibles aux tensions perturbatrices (harmoniques, creux, déséquilibrés) provenant de la source et également celles provoquées par la circulation des courants perturbateurs à travers l'impédance du réseau. Cette structure est proche, dans le principe, à des conditionneurs de réseau. Toutefois, cette topologie présente quelques difficultés et inconvénients lors de sa mise en œuvre, elle ne permet pas de compenser les courants harmoniques consommés par la charge.

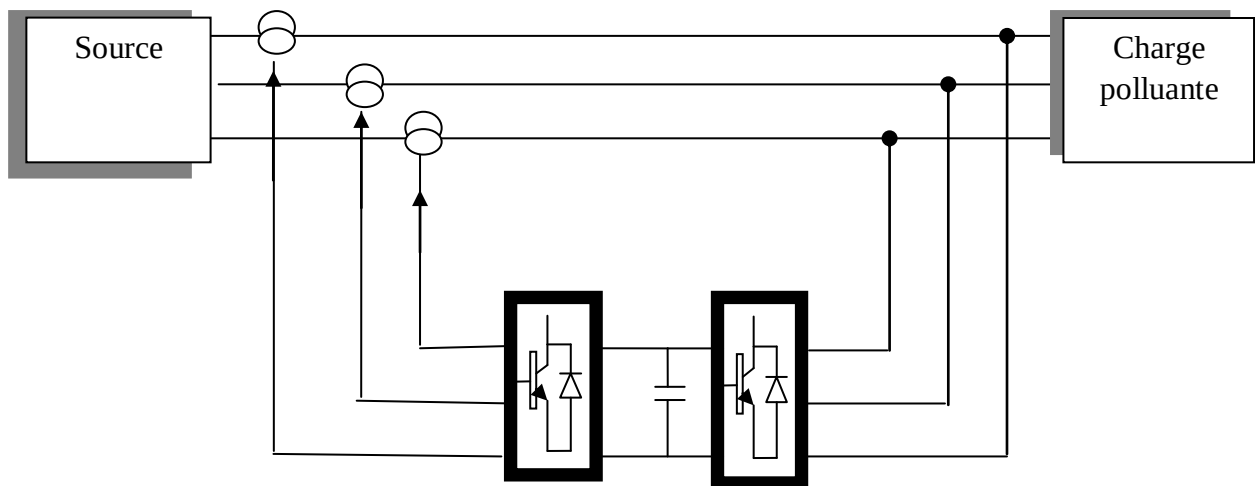


Fig(I.9) Montage du filtre actif en série .

I.8.1.3. Combinaison parallèle série actif

C'est une solution de compensation universelle basée sur le fonctionnement simultané des filtres actifs parallèle et série figure (I.8).Donc, elle possède les avantages cumulés des filtres actifs parallèles et série. Cette nouvelle topologie est appelée combinaison parallèle série actif ou en anglais Unified Power Quality Conditioner(UPQC).

Un filtre actif série placé en amont du filtre actif parallèle, comme il est montré dans la figure (I.10), permet de dépolluer la source des tensions perturbatrices; or s'il est placé en aval, il permet d'isoler la charge de la source perturbée. [11] [9]



Fig(I.10).Combinaison parallèle –série actif (UPQC).

I.8.1.4. Filtrage hybride

Afin de réduire le dimensionnement et par conséquent le prix des filtres actifs, l'association de filtres actifs de faible puissance à des filtres passifs peut être une solution. Dans ce cas, les filtres passifs ont pour rôle d'éliminer les harmoniques prépondérants permettant de réduire le dimensionnement des filtres actifs qui ne compensent que le reste des perturbations.

Plusieurs configurations ont été présentées dans la littérature [12][24], les plus étudiées étant:

- Le filtre actif série avec des filtres passifs parallèles.
- Le filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles.
- Le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle.

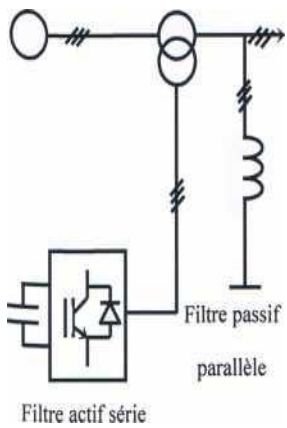
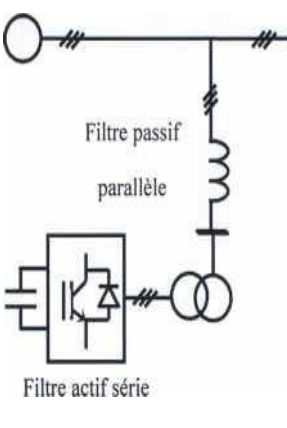
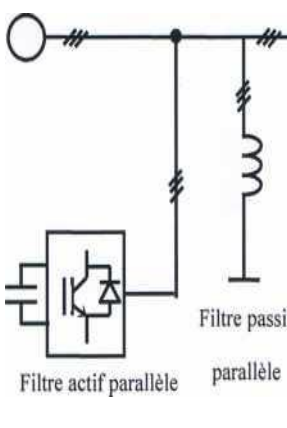
Filtre actif série avec des filtres passifs parallèle.	Filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèle	Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle
 Filtre actif série Filtre passif parallèle Il empêche les courants harmoniques de circuler vers le réseau et les oblige à passer par les filtres passifs raccordés à leurs fréquences.	 Filtre passif parallèle Filtre actif série Il a le même principe que la combinaison d'avant avec l'avantage de réduire encore le dimensionnement du FAS car le courant qui le traverse est plus faible. De plus, le FAS est à l'abri d'un éventuel court-circuit de la charge.	 Filtre passif parallèle Filtre actif parallèle Il a le rôle de compenser des courants harmoniques basses fréquences émis par la charge polluante. Le filtre passif accordé sur une fréquence élevée, élimine les courants harmoniques hautes y compris ceux créés par le filtre actif parallèle. Ce type déjà été appliqué à la compensation des courants harmonique émis par un cycloconvertisseur de forte puissance.

Tableau (1.4) : Autre configuration du filtre hybride.

I.8.2. Les redresseurs à MLI

Ce sont des convertisseurs à modulation de largeurs d'impulsions, 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. [5]

On distingue deux structures, la structure courant et la structure tension. Elles sont développées dans les paragraphes ci-après.

I.8.2.1. Redresseur de tension

Son schéma de principe est présenté sur la figure (I.11). Les composantes de puissance disponibles (IGBT, GTO) étant unidirectionnels en courant, le courant I_d le sera également unidirectionnels. La réversibilité en puissance s'effectue par l'inversion de la tension redressée U_d . Le contrôle de la puissance réactive est obtenu par action sur la phase du courant réseau par rapport à la tension.[13]

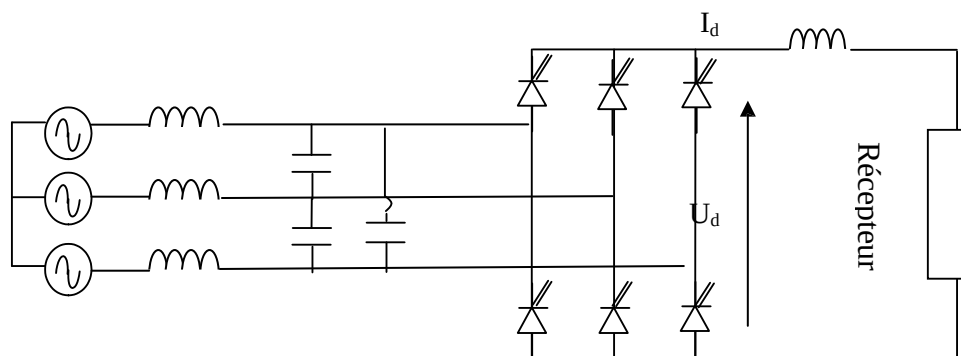


Fig (I.11) Redresseur de tension.

I.8.2.2. Redresseur du courant

La tension U_d étant unidirectionnelle, la réversibilité de la puissance active est assurée par le courant I_d , qui est bidirectionnel. Le contrôle de la puissance réactive est réalisé par action indirecte sur la phase du fondamental de courant du réseau.

Les inductances L_r servent dans la figure (I.12) à découpler le convertisseur de réseau car les deux réseaux alternatifs et continus sont tous deux sources de tension. [5]

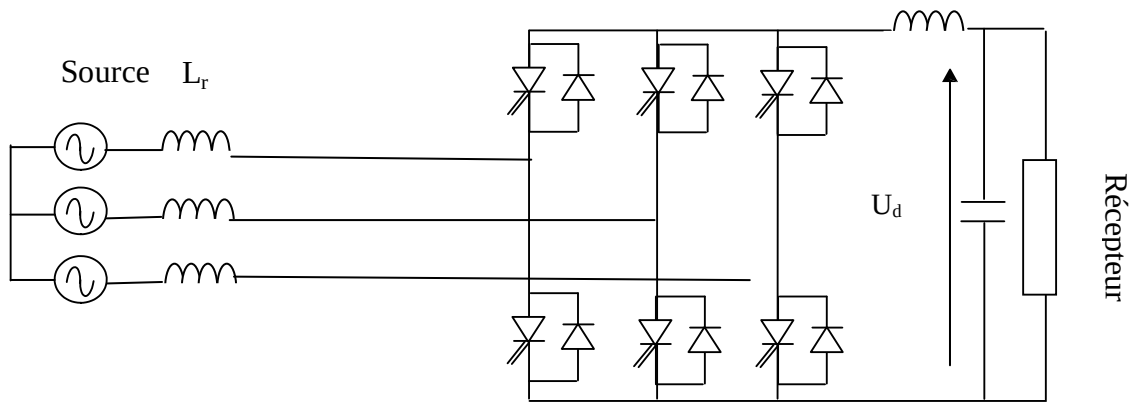


Fig (I.12): Redresseur du courant.

I.9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes origines des perturbations affectant les réseaux électriques et les solutions de dépollution existantes. Ces perturbations étant néfastes pour les installations électriques à cause des dysfonctionnements éventuels qu'ils peuvent engendrer. Par conséquent, leur compensation est amplement souhaitée pour des raisons technico-économiques.

Nous avons s'intéressé dans la suite aux solutions modernes tel que le filtre actif parallèle à quatre fil qui sera l'objet de ce mémoire.

II.1. Introduction

Pour réduire les harmoniques au niveau de la source nous proposons dans ce travail le filtrage actif parallèle à quatre fils, et ses avantages, tel que l'adaptation aux variations de la charge.

Dans ce chapitre nous allons présenter deux topologies différentes des filtres actifs, pour compenser les harmoniques de courants générés par les charges non-linéaires reliées à un réseau électrique à quatre fils. Cela permettra d'envisager le cas des charges monophasées et éventuellement déséquilibrées. Une description des différents constituants du filtre actif parallèle est nécessaire. Nous étudions en détail la méthode des puissances réelle, imaginaire et homopolaire instantanées.

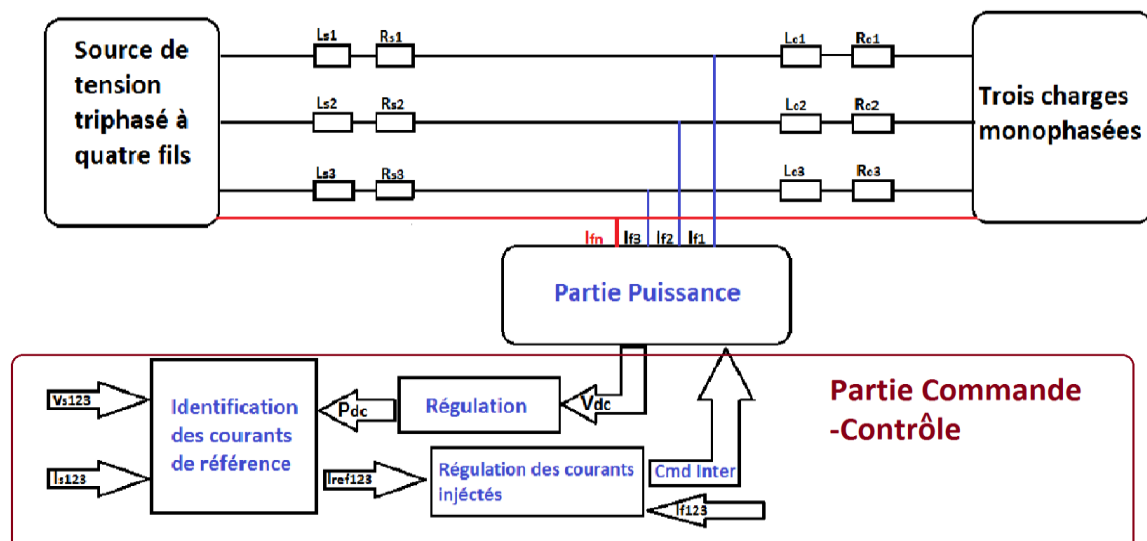
II.2. Modélisation et stratégies de commande de l'onduleur

II.2.1. Constituants d'un filtre actif parallèle à quatre fils

Un filtre actif parallèle à quatre fils est essentiellement constitué de deux parties (Voir la figure II.1) :

- Partie commande – contrôle.
- Partie puissance.

Ces deux parties vont être détaillées dans les deux sections qui suivent :



Fig(II.1) : Principe du filtrage actif parallèle triphasé à quatre fils.

II.2.2. Étude de la partie puissance

Dans cette section nous sommes intéressés à la partie puissance du FAP dont les composants sont les suivants :

- L'onduleur à quatre fils,
- Le filtre de couplage,
- Le système de stockage de l'énergie.

II.2.2.1. Description d'un onduleur triphasé à trois bras avec condensateurs à point milieu

La première topologie de filtre actif est constituée de six interrupteurs réversibles en courant commandés à la fermeture et à l'ouverture (transistors bipolaires, IGBT, thyristors ou GTO) en antiparallèle avec une diode. Ils forment les trois bras d'un onduleur triphasé. Un quatrième bras est constitué de deux condensateurs dont le point milieu est relié au neutre du réseau électrique, comme l'illustre la figure (II.2).[25][18]

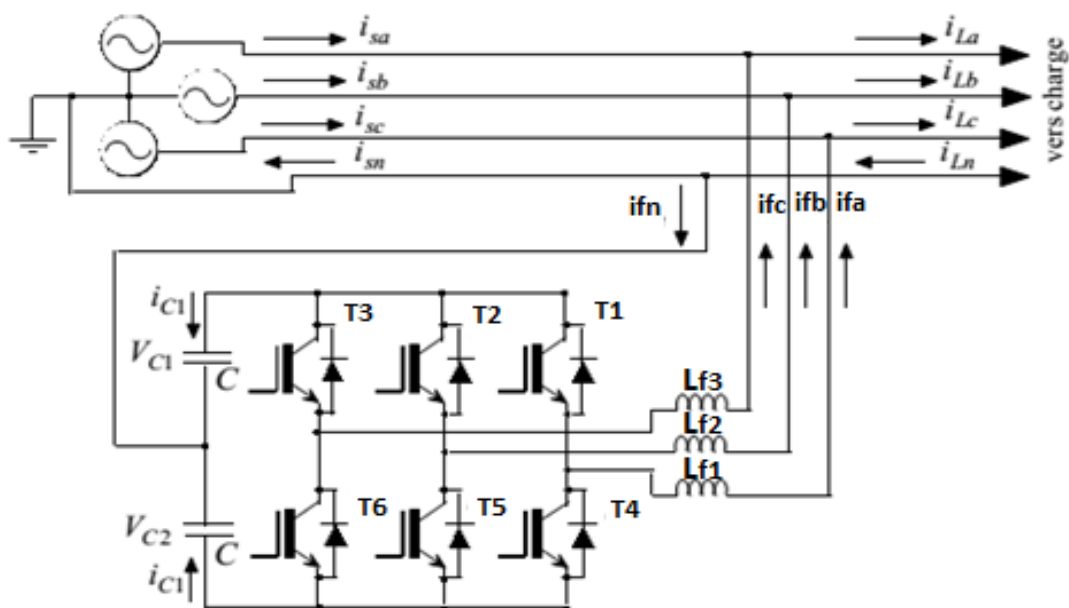


Fig (II.2) : Filtre actif parallèle à trois bras avec condensateurs à point milieu.

Les états de commutation pour ce type d'onduleur sont présentés dans le tableau (II.1):

k	T ₃	T ₂	T ₁	V _{f3}	V _{f2}	V _{f1}
0	0	0	0	-V _{dc} /2	-V _{dc} /2	-V _{dc} /2
1	0	0	1	-V _{dc} /2	-V _{dc} /2	V _{dc} /2
2	0	1	0	-V _{dc} /2	V _{dc} /2	-V _{dc} /2
3	0	1	1	-V _{dc} /2	V _{dc} /2	V _{dc} /2
4	1	0	0	V _{dc} /2	-V _{dc} /2	-V _{dc} /2
5	1	0	1	V _{dc} /2	-V _{dc} /2	V _{dc} /2
6	1	1	0	V _{dc} /2	V _{dc} /2	-V _{dc} /2
7	1	1	1	V _{dc} /2	V _{dc} /2	V _{dc} /2

Tab (II.1) : Tensions générées par l'onduleur de tension à trois bras avec condensateurs à point milieu.

Cette topologie contient huit combinaisons de commande possibles. Ces états de commutations sont obtenus en utilisant les expressions suivantes [14] :

$$V_{f1} = T_1 \frac{V_{dc}}{2} - (1-T_1) \frac{V_{dc}}{2} \quad (\text{II.1})$$

$$V_{f2} = T_2 \frac{V_{dc}}{2} - (1-T_2) \frac{V_{dc}}{2} \quad (\text{II.2})$$

$$V_{f3} = T_3 \frac{V_{dc}}{2} - (1-T_3) \frac{V_{dc}}{2} \quad (\text{II.3})$$

Avec :

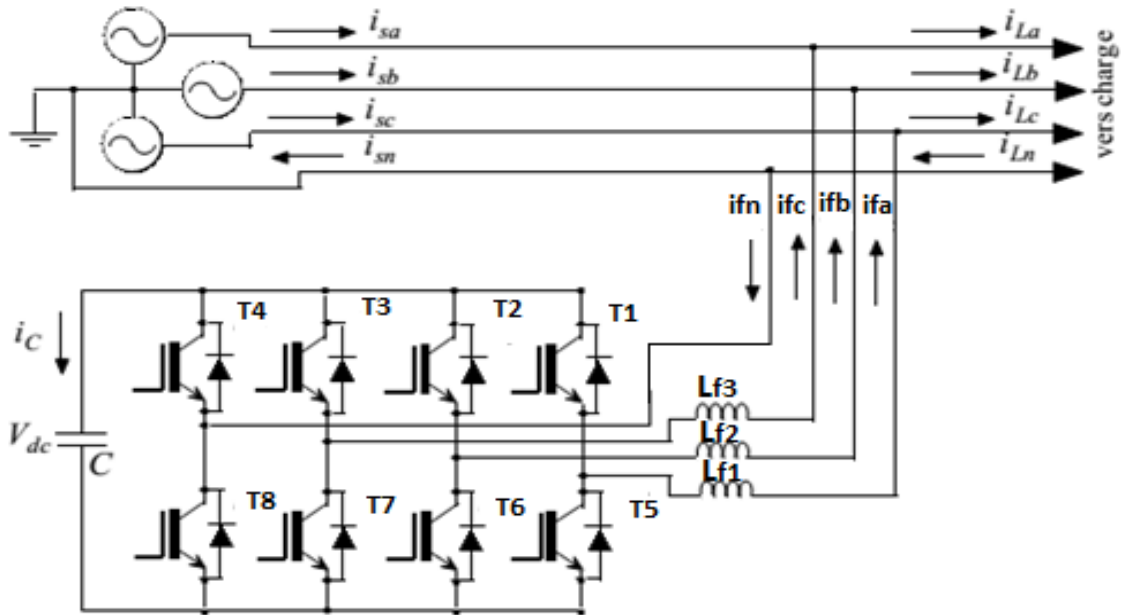
T_i = 1 si T_i est fermé.

T_i = 0 si T_i est ouvert.

i = 1 à 3.

II.2.2.2. Description d'un onduleur triphasé à quatre bras

Dans cette topologie, nous utilisons un onduleur comprenant quatre bras constitués de huit interrupteurs réversibles en courant comme l'illustre la figure (II.3). Cette configuration a été proposée afin d'éviter le recours à un élément de stockage à point milieu comme celle de la configuration précédente.[25]



Fig(II.3) : Filtre actif parallèle à quatre bras pour un réseau triphasé à quatre fils.

Les états de commutation pour ce type d'onduleur sont présentés dans le tableau (II.2). Ils sont obtenus grâce aux expressions suivantes [14] :

$$V_{f1} = (T_1 - T_4)V_{dc} \quad (II.4)$$

$$V_{f2} = (T_2 - T_4)V_{dc} \quad (II.5)$$

$$V_{f3} = (T_3 - T_4)V_{dc} \quad (II.6)$$

Et

$$i_{dc} = T_1 i_{fa} + T_2 i_{fb} + T_3 i_{fc} - T_4 i_{fn} \quad (II.7)$$

k	T ₄	T ₃	T ₂	T ₁	V _{f3}	V _{f2}	V _{f1}
0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	1	0	0	V _{dc}
2	0	0	1	0	0	V _{dc}	0
3	0	0	1	1	0	V _{dc}	V _{dc}
4	0	1	0	0	V _{dc}	0	0
5	0	1	0	1	V _{dc}	0	V _{dc}
6	0	1	1	0	V _{dc}	V _{dc}	0
7	0	1	1	1	V _{dc}	V _{dc}	V _{dc}
8	1	0	0	0	-V _{dc}	-V _{dc}	-V _{dc}
9	1	0	0	1	-V _{dc}	-V _{dc}	0
10	1	0	1	0	-V _{dc}	0	-V _{dc}
11	1	0	1	1	-V _{dc}	0	0
12	1	1	0	0	0	-V _{dc}	-V _{dc}
13	1	1	0	1	0	-V _{dc}	0
14	1	1	1	0	0	0	-V _{dc}
15	1	1	1	1	0	0	0

Tab (II.2) : Tensions générées par l'onduleur de tension à quatre bras.

II.2.2.3. Filtre de sortie

Le filtre de sortie est un filtre passif utilisé pour connecter l'onduleur de tension au réseau . Il est dimensionné pour satisfaire les deux critères suivants :

- Assurer la dynamique du courant du filtre défini par :

$$\frac{d_{if}}{dt} = \frac{d_{ih}}{dt} \quad (\text{II.8})$$

Où

i_f : Courant du filtre.

i_h : Courant harmonique de la charge.

- Empêcher les composantes dues aux commutations de se propager sur le réseau électrique. [14]

Pour satisfaire ces deux conditions, on utilise un filtre de premier ordre, composé d'une inductance L_f avec une résistance interne R_f , une petite valeur de cette inductance assure la dynamique du courant. Contrairement, une valeur relativement grande de celle-là empêche les composantes dues aux commutations de se propager sur le réseau. En négligeant la résistance de ce filtre de couplage on obtient :

$$\left(\frac{d_{if}}{dt}\right)_{max} = \frac{V_{fmax} - V_{smax}}{L_f} \quad (II.9)$$

Avec

V_{fmax} : La valeur maximale de la tension à l'entrée de l'onduleur.

V_{smax} : La valeur maximale de la tension simple au point de raccordement du filtre.

Pour des petites variations du courant du filtre, on obtient :

$$\left(\frac{\Delta_{if}}{\Delta T}\right)_{max} = \frac{V_{fmax} - V_{smax}}{L_f} \quad (II.10)$$

Avec $\Delta T = \frac{1}{f_{ond}}$: La période de variation du courant du filtre.

En supposant la variation maximale du courant du filtre égale à 25 % de la valeur maximale du courant du réseau, la valeur de l'inductance de couplage est donnée par [14]:

$$L_f = \frac{V_{fmax} - V_{smax}}{0.25 i_{smax} f_{ond}} \quad (II.11)$$

II.2.2.4. Système de stockage d'énergie

Le stockage de l'énergie du côté continu se fait souvent par un système de stockage capacitif représenté par les deux condensateurs qui jouent le rôle de deux sources de tension continue. Dans les applications de compensation d'harmoniques, une tension V_{dc} élevée améliore la dynamique du filtre actif, par ailleurs, le critère commun pour le choix de la capacité C_{dc} est en générale la limitation des ondulations de la tension continue. Ces ondulations sont d'autant plus élevées que les harmoniques à compenser sont de basses fréquences et d'amplitudes importante

sou la capacité est faible. Un dimensionnement adéquat de la capacité peut-être établi à partir d'un courant type que doit générer le filtre actif, ceci n'est pas toujours facile à réaliser car on ne connaît pas souvent tous les harmoniques qu'on doit compenser, ainsi une méthode plus simple pour le dimensionnement consiste à calculer la capacité à partir du courant harmonique du rang le plus faible I_h . [8][15]

$$C_{dc} = \frac{I_h}{\tau V_{dc} \omega_h} \quad (\text{II.12})$$

Avec τ le taux d'ondulation admissible généralement 5% de V_{dc} et ω_h la pulsation du rang h .

II.2.3. Étude de la partie commande-contrôle

II.2.3.1. Détermination des courants harmoniques de référence

La charge polluante absorbe un courant constitué d'une composante fondamentale et de composantes harmoniques. Le but du filtrage actif est la génération de courants harmoniques de même amplitude mais en opposition de phase avec ceux absorbés par la charge. Ainsi, le courant absorbé au réseau sera sinusoïdal. Il est nécessaire d'identifier avec précision les courants harmoniques de la charge polluante.

Le choix de la méthode utilisée pour isoler la composante harmonique du courant de charge est un facteur déterminant quant aux performances obtenues par le filtre actif (précision, dynamique, ...) [15]. Parmi toutes les méthodes présentées dans la littérature, Dans ce mémoire nous avons étudié la méthode de puissances instantanées.

II.2.3.1.1. Présentation de la méthode de puissances instantanées

Cette méthode introduite par, exploite la transformation de Concordia de tensions simples et courants de ligne, afin de calculer les puissances réelle, imaginaire et homopolaire instantanées. Elle permet de transformer la composante fondamentale en une composante continue et les composantes harmoniques en composantes alternatives. Cette transformation est nécessaire si nous voulons éliminer facilement la composante continue. Le principe de la méthode de puissances réelle, imaginaire et homopolaire instantanées est énoncé ci-dessous :

Soient respectivement les tensions simples et les courants de ligne d'un système triphasé avec homopolaire, V_{an} , V_{bn} , V_{cn} et i_{ca} , i_{cb} , i_{cc} . La transformation de Concordia permet de ramener ce système triphasé des axes 1-2-3 aux axes α - β -0, comme le montre les deux relations suivantes [14] :

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \\ V_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & \frac{-1}{2} & \frac{-1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} \quad (\text{II.13})$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & \frac{-1}{2} & \frac{-1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \\ i_{cc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.14})$$

La composante homopolaire de la tension source n'est pas nécessaire, nous pouvons écrire alors :

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & \frac{-1}{2} & \frac{-1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} \quad (\text{II.15})$$

Remarque : Il est à noter que le courant du neutre i_n et le courant homopolaire i_0 sont liés par la relation ci-dessous :

$$i_n = i_{ca} + i_{cb} + i_{cc} \quad (\text{II.16})$$

$$i_0 = \frac{1}{\sqrt{3}} (i_{ca} + i_{cb} + i_{cc}) = \frac{1}{\sqrt{3}} i_n \quad (\text{II.17})$$

Dans le repaire de Concordia, la puissance réelle et la puissance imaginaire sont données par la matrice suivante :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_\alpha & V_\beta \\ -V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{II.18})$$

$$\text{donc : } \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (\text{II.19})$$

Pour compenser les harmoniques de courants on applique le mode suivant :

$$p = \tilde{p} \text{ et } q = \tilde{q}$$

$\tilde{p}$ et $\tilde{q}$: Composantes Alternatives de la puissance réelle et imaginaire respectivement.

$$\text{donc : } \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (\text{II.20})$$

Nous remarquons de ces équations que dans les expressions de i_α et de i_β la puissance homopolaire est absente.

Nous prenons :

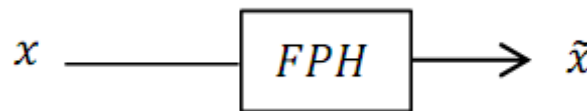
$$i_\alpha^* = i_\alpha, i_\beta^* = i_\beta, \text{ et pour l'homopolaire : } i_0^* = i_0$$

Maintenant, il est aisé de remonter aux courants de référence par la transformation inverse de Concordia:

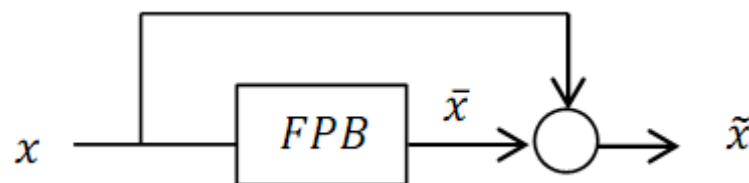
$$\begin{bmatrix} i_a^* \\ i_b^* \\ i_c^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{-1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{-1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha^* \\ i_\beta^* \\ i_0^* \end{bmatrix} \quad (\text{II.21})$$

II.2.3.1.2. Filtres d'extraction

Les deux types de filtre d'extraction sont présentés à la figure suivante :



-a- Filtre Passe Haut.



-b- Filtre Passe Bas.

Fig (II.4) :Filtres d'extraction.

Comme cela est exposé dans la littérature, ces filtres d'extraction permettent d'obtenir une élimination plus ou moins satisfaisante de la composante continue, car leurs caractéristiques concernant le résidu harmonique sont différentes. Ils n'ont pas donné entière satisfaction car :

- Pour obtenir une extraction satisfaisante, le régime dynamique est lent. En générale, la fréquence de coupure est choisie assez basse, entre 5 Hz et 35 Hz, ce qui engendre alors une instabilité du filtre actif lors de variations rapides de la charge.

- Dans le cas contraire, si l'on choisit une fréquence de coupure plus élevée, la précision de la détermination de la composante alternative est altérée et peut s'avérer insuffisante. [14]

II.2.3.1.3. Schémas de l'identification par la méthode de puissances instantanées

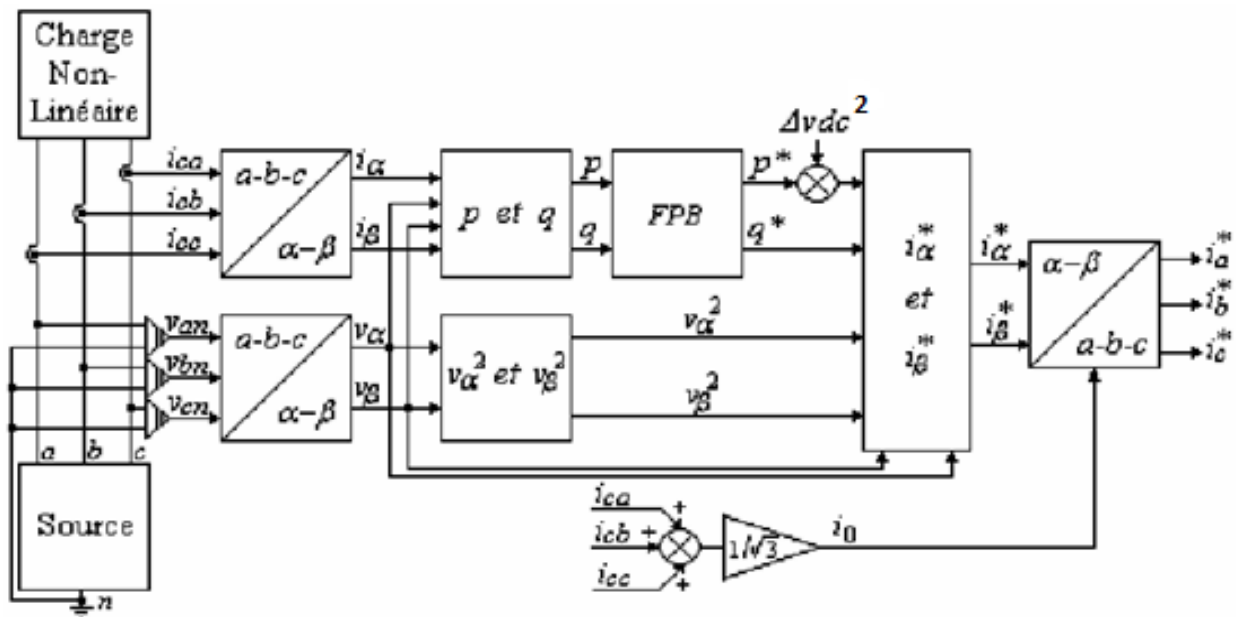


Fig (II.5) : Identification par la méthode des puissances instantanées.

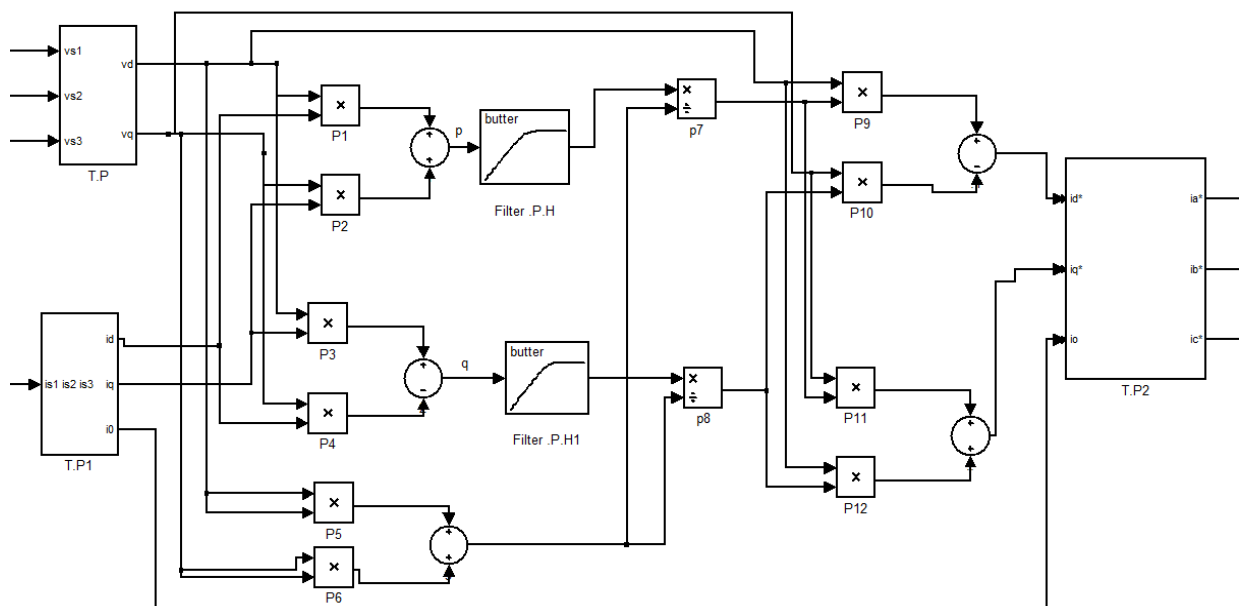
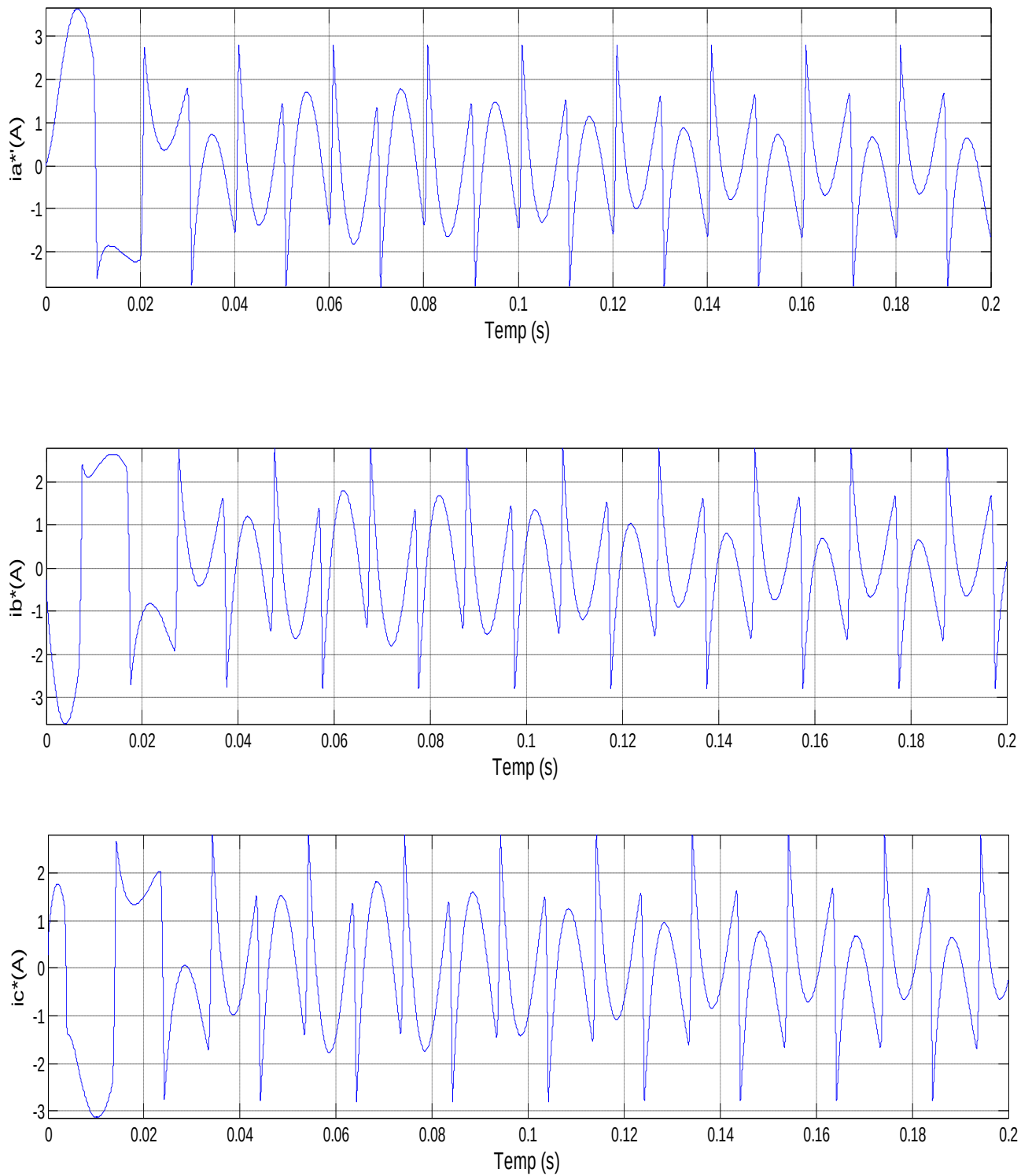


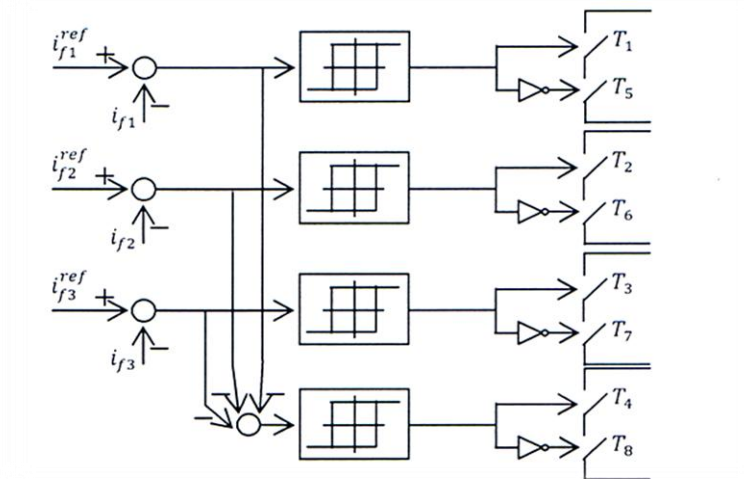
Fig (II.6) : Identification par la méthode des puissances instantanées sous Matlab- Simulink.

II.2.3.1.4. les courants des harmoniques identifiés sous Matlab-Similink**[i_a^* , i_b^* , i_c^*] :****Fig (II.7) : les Courants harmoniques identifiés.**

II.2.3.2. Contrôle de l'onduleur par hystérésis

La commande conventionnelle par hystérésis est très couramment utilisée de par sa simplicité d'utilisation et sa robustesse. En fait, cette stratégie assure un contrôle satisfaisant du courant sans exiger une connaissance poussée du modèle du système à contrôler ou de ses paramètres. La figure (II.8) expose son principe qui consiste à établir dans un premier temps le signal d'erreur, différence entre le courant de référence i_a^* et le courant produit par l'onduleur i_a .

Cette erreur est ensuite comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis afin de fixer les ordres de commande des interrupteurs. Cette commande présente cependant un inconvénient majeur : elle ne permet pas de contrôler la fréquence de commutation des semi-conducteurs, d'où la présence d'un nombre important d'harmoniques dans les courants générés. [8][1]



Fig(II.8): Principe de la commande par hystérésis.

II.3.Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre la définition et la structure de filtre actif parallèle à quatre fils, cette structure partagée à deux parties : la partie de puissance et la partie de commande-contrôle, la partie de puissance est représentée par l'onduleur de tension, système stockant l'énergie et filtre de sortie, et la deuxième partie qui est la commande-contrôle représentée par la commande d'onduleur, l'identification des courants perturbés, plusieurs méthodes commandent sur l'onduleur, Dans ce chapitre nous choisissons la commande par hystérésis.

III.1. Introduction :

Un système d'électronique de puissance est un ensemble de conversion d'énergie qui contient les organes suivants :

- Source d'énergie.
- Convertisseur statique.
- Charge réceptrice.
- Dispositif de commande du convertisseur.

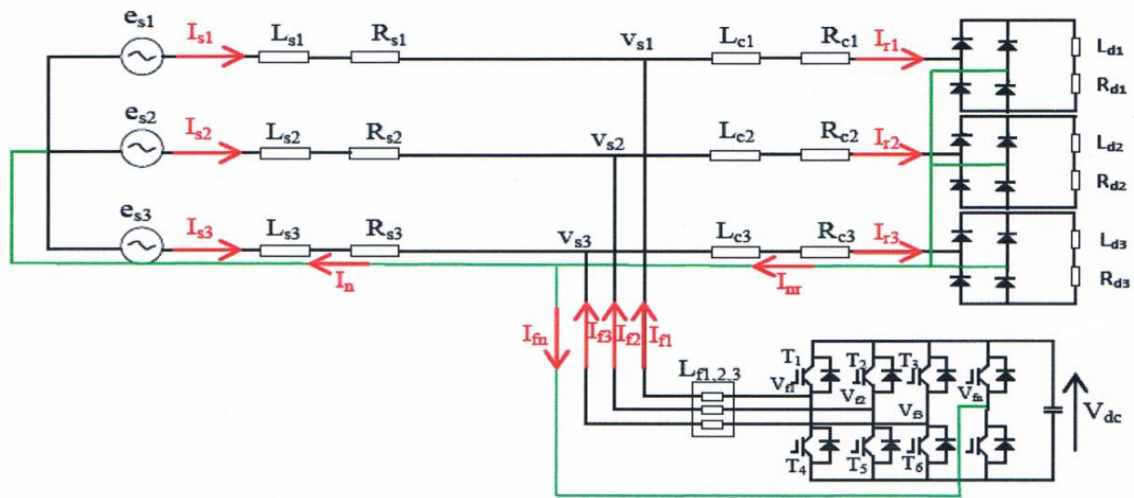
Il est caractérisé par le non linéarité des semi-conducteurs constituant le convertisseur et par la présence de sous-ensembles à la fois hétérogènes et fortement interdépendants.

L'étude analytique de ce système est difficile et ne peut être menée, pour un point de fonctionnement donné, qu'avec des hypothèses simplificatrices importantes. C'est pour cette raison que la simulation numérique est devenue l'outil indispensable de l'étude de ces systèmes.

Dans ce chapitre on propose d'étudier la simulation de l'ensemble réseau, charges polluantes, deux redresseurs monophasés, filtre actif parallèle à quatre fils sous l'environnement Matlab-Simulink. On donne ensuite les résultats de simulation obtenus.

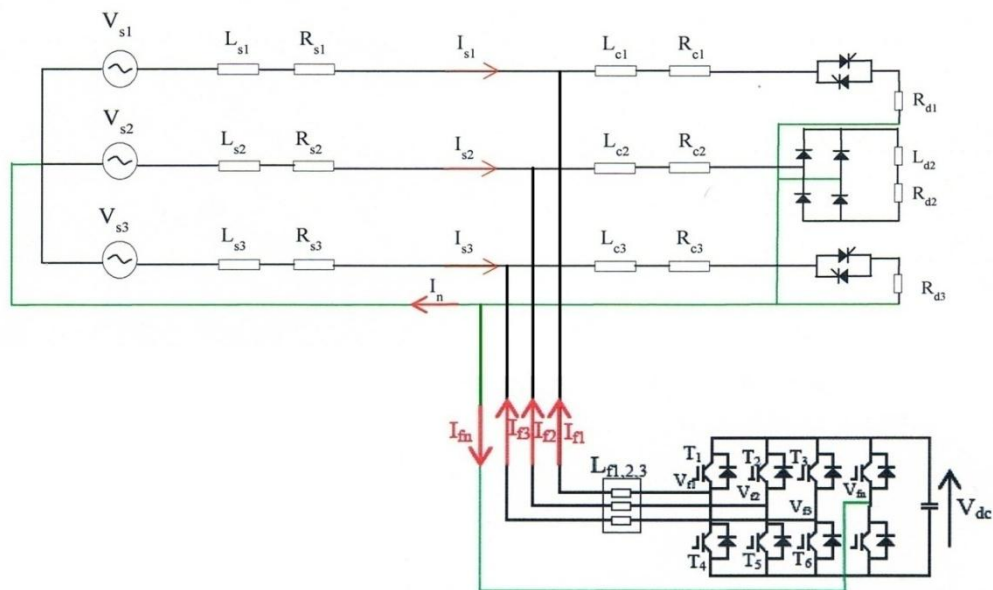
III.2. Schéma de simulation :

III.2.1. Schéma de charges équilibrées :



Fig(III.1) : Schéma de charges équilibrées.

III.2.2. Schéma de charges déséquilibrées :



Fig(III.2) : Schéma de charges déséquilibrées.

III.2.3. Paramètres de la simulation

Pour simuler le modèle de l'association filtre actif-réseau-charge polluante du la figure(III.1) sous Matlab-Simulink, on a utilisé les paramètres suivant :

Les valeurs par phase de ces paramètres sont présentées au tableau ci-dessous :

E_{smax} [V]	F[Hz]	L_s [mH]	R_s [Ω]	L_c [mH]	R_c [m Ω]	L_f [mH]	V_{dc} (V)
$110\sqrt{2}$	50	2.3	0.42	1	1	3	300

Tab(III.1) : Paramètres du système étudié.

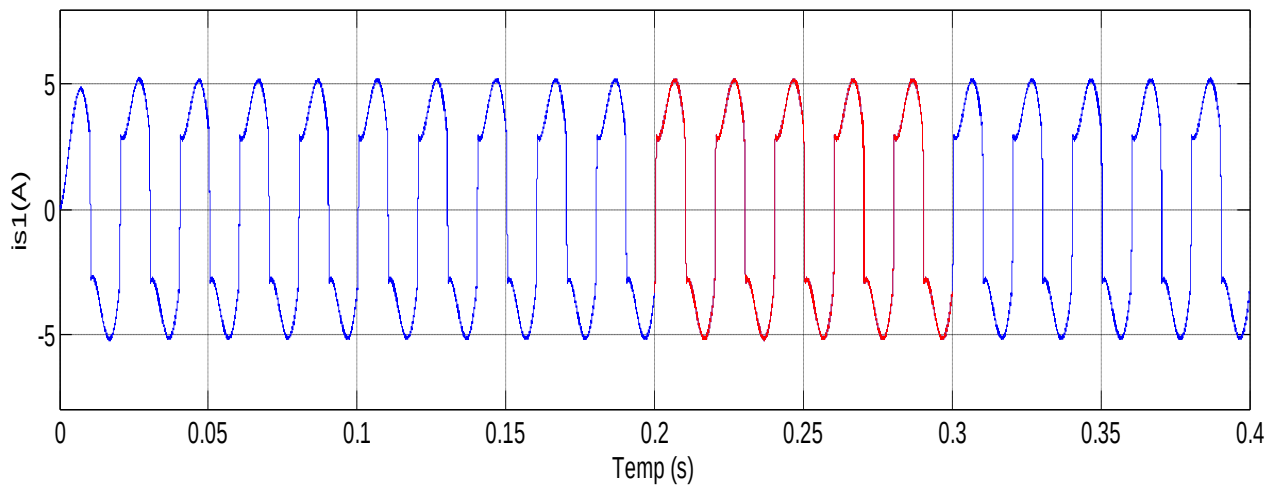
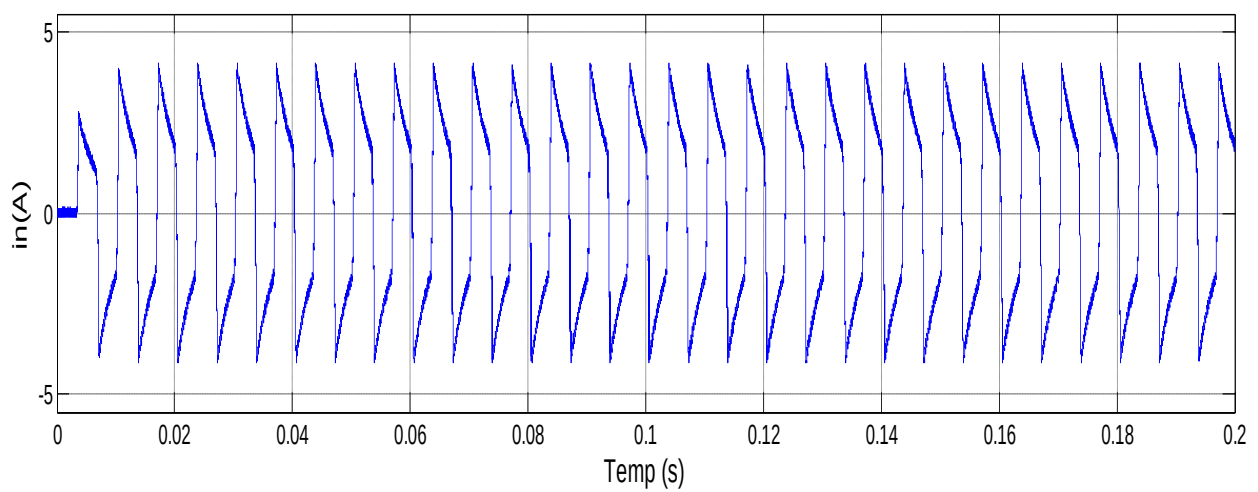
Pour les charges, nous étudions les deux cas suivants :

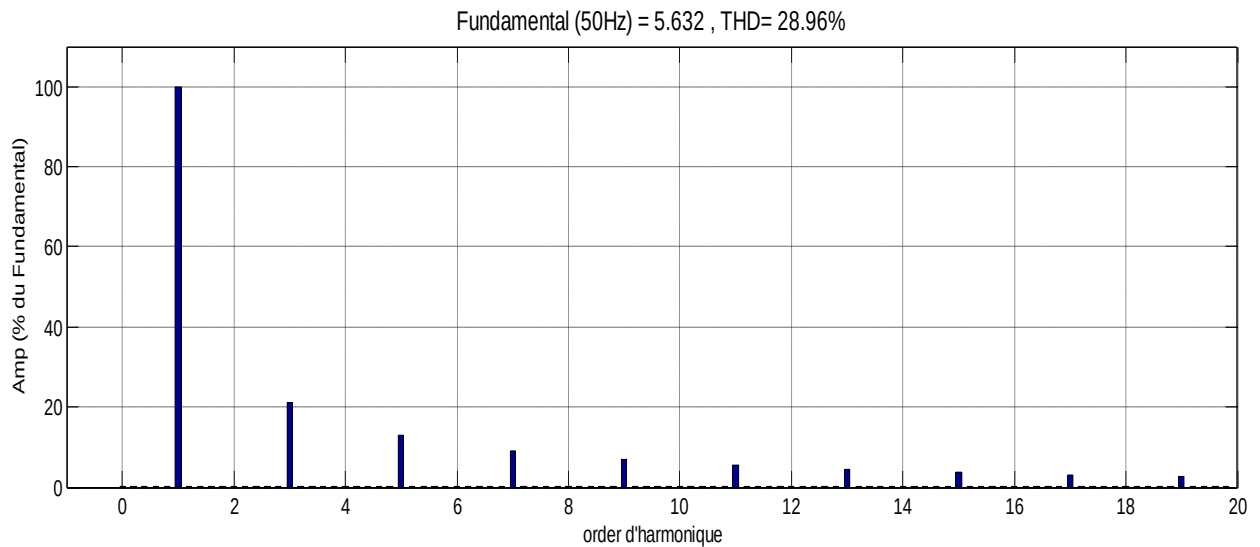
- Cas ou les trois charges sont identiques : $R_{d1} = R_{d2} = R_{d3} = 26\Omega$; $L_{d1} = L_{d2} = L_{d3} = 90\text{mH}$.
- Cas ou les trois charges sont différentes : $R_{d1} = 26\Omega$, $R_{d2} = 15\Omega$, $R_{d3} = 30\Omega$; $L_{d1} = 90\text{mH}$, $L_{d2} = 100\text{mH}$, $L_{d3} = 85\text{mH}$.

III.2.4. Résultats des simulations sous Matlab-Simulink :

III.2.4.1. Cas de charge équilibrée :

Dans ce premier cas nous avons pris un système de charges équilibré, c'est la raison pour laquelle nous ne tracerons que la courbe du courant de source de la phase 1, ainsi que le spectre d'harmonique de cette phase, les deux autres phases ont la même courbe de courant et le même spectre d'harmonique que ceux de la première phase. Les résultats des simulations du système étudié sont présentés sur les figures suivantes :

a- Les courbes avant filtrage :**Fig(III.3):** Courant de source avant filtrage.**Fig(III.4):** Courant de neutre avant filtrage.

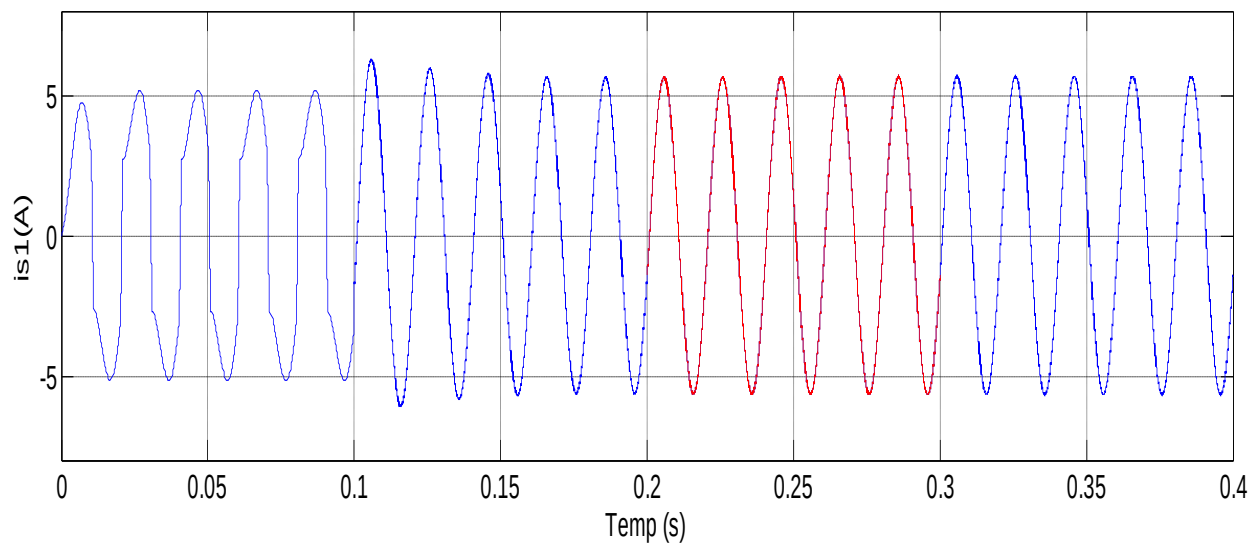


Fig(III.5): Spectre d'harmonique du courant de source avant filtrage.

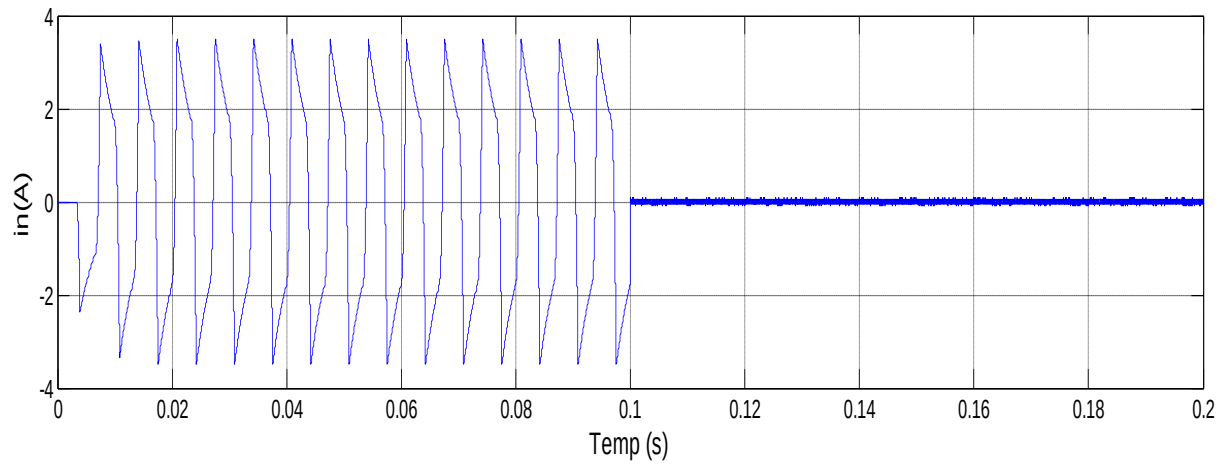
Le taux de distorsion d'harmonique a été mesuré sur 5 périodes (colorés en rouge), Le THD = 28.96%.

b- Les courbes après filtrage :

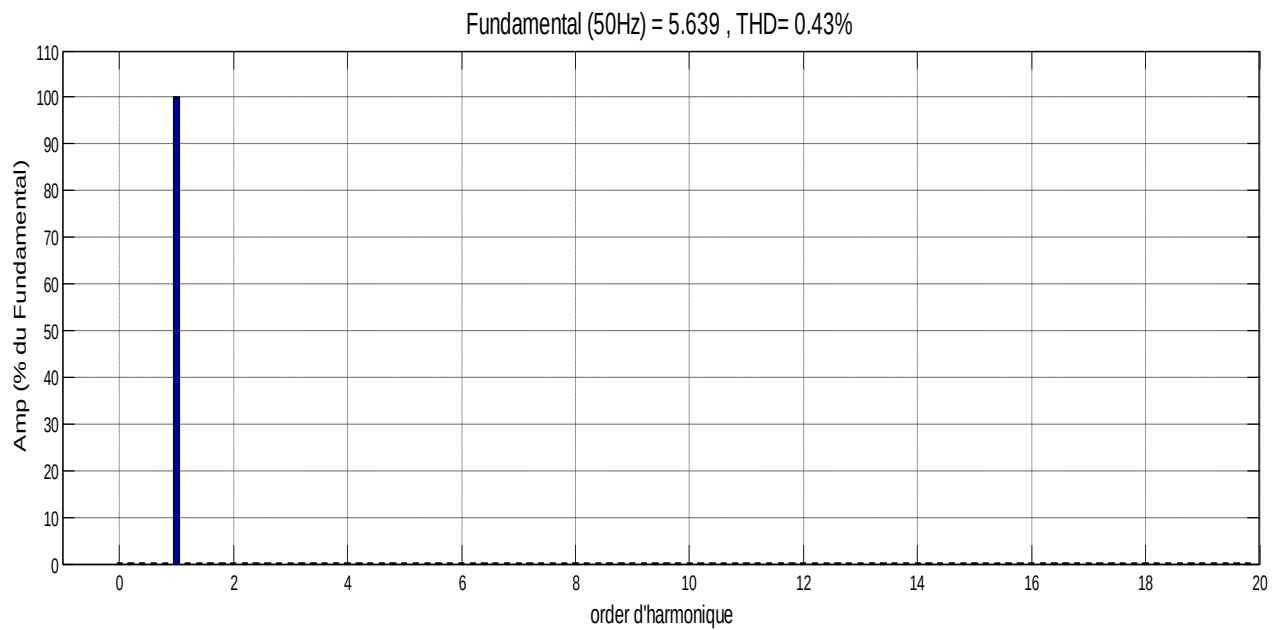
A l'instant ($t=0.1$ s) on injecte le courant de FAP.



Fig(III.6): Courant de source après filtrage.



Fig(III.7): Courant de neutre après filtrage.



Fig(III.8): Spectre d'harmonique du courant de source après filtrage.

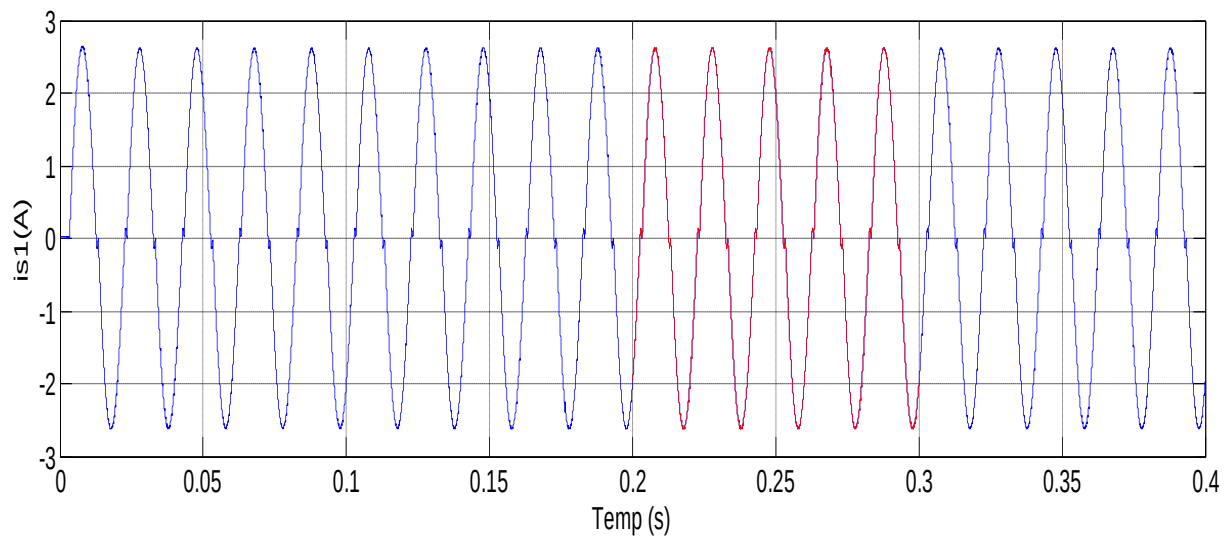
Le taux de distorsion d'harmonique a été mesurée sur 5 périodes (colorés en rouge), Le THD = 0.43%.

III.2.4.2.Cas de charges déséquilibrées :

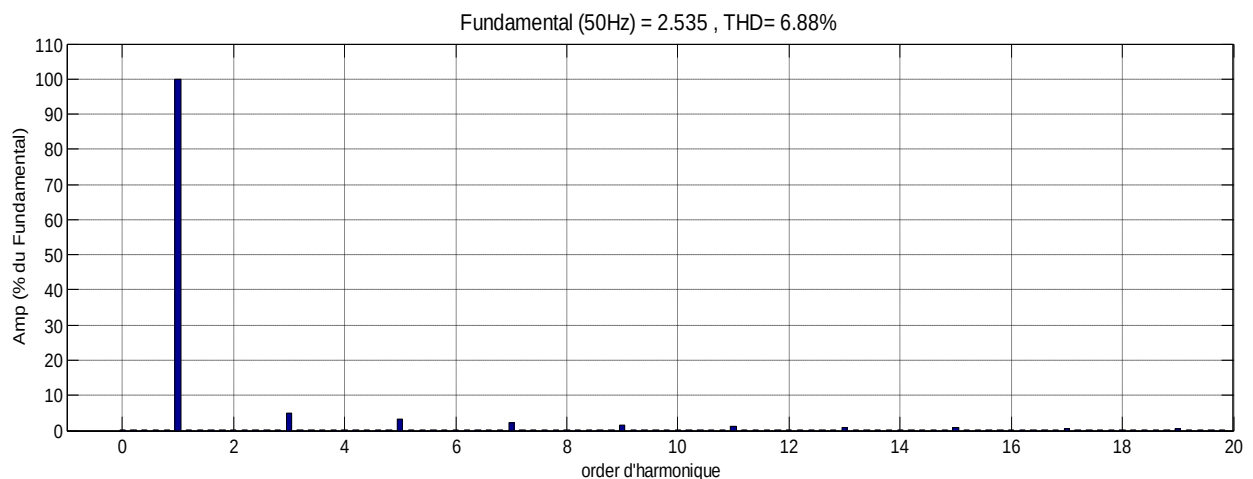
Dans ce deuxième cas nous avons pris un système de charges déséquilibré, c'est la raison pour laquelle nous ne tracerons que les courbes du courant de source de chaque phase, ainsi que les spectres des harmoniques du chaque phases, Les résultats de simulation du système étudié sont présentés sur les figures suivants :

a- Les courbes Sans filtrage :

Phase1



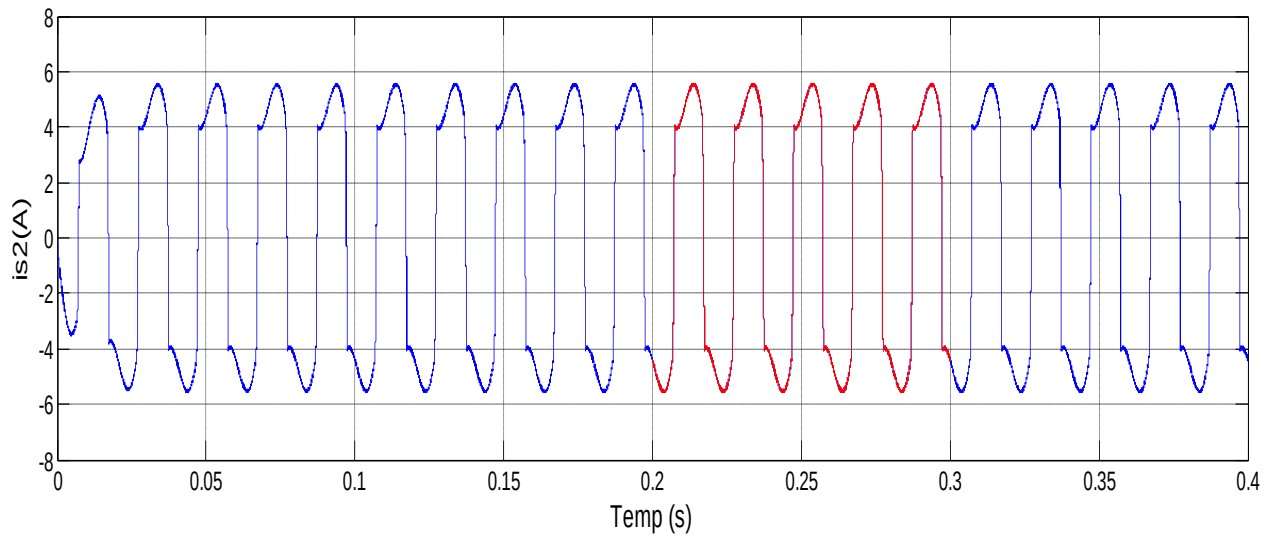
Fig(III.9): Courant de source (phase 1 avant filtrage).



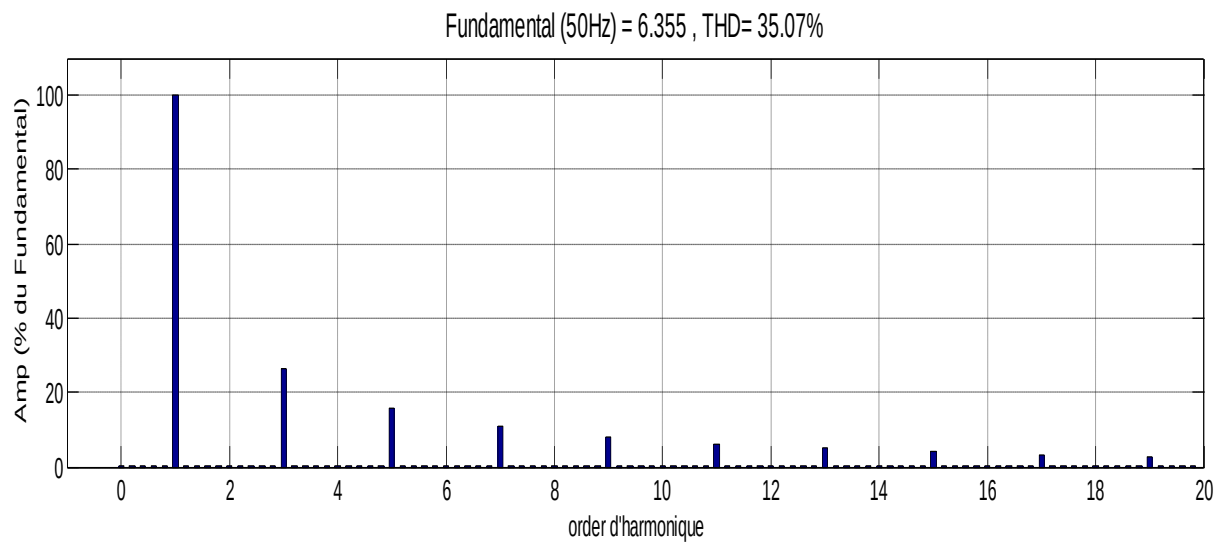
Fig(III.10): Spectre d'harmonique (phase 1 avant filtrage).

Dans la phase 1 le taux de distorsion d'harmonique a été mesurée sur 5 périodes (colorés en rouge), le THD = 6.88 %.

 Phase2



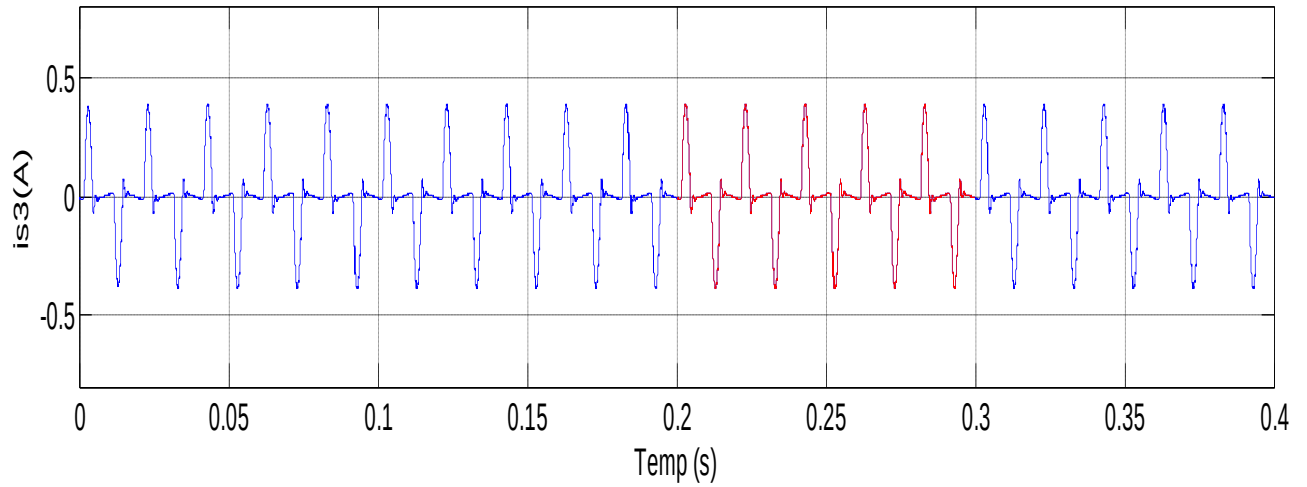
Fig(III.11): Courant de source (phase 2 avant filtrage).



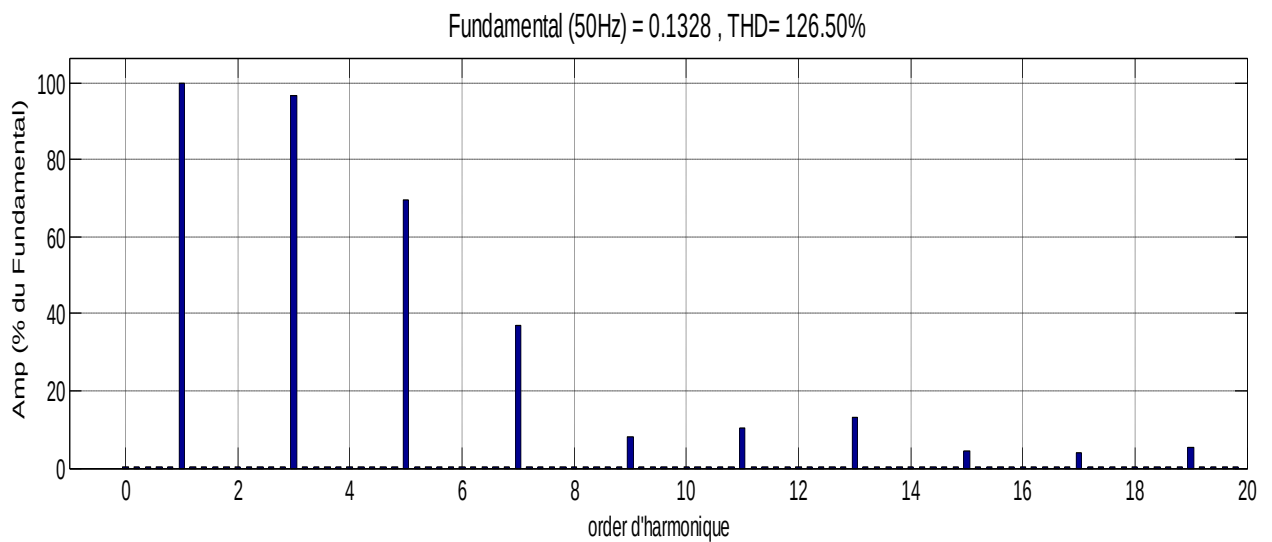
Fig(III.12): Spectre d'harmonique (phase 2 avant filtrage).

Dans la phase 1 le taux de distorsion d'harmonique a été mesurée sur 5 périodes (colorés en rouge), le THD = 35.07 %.

Phase3



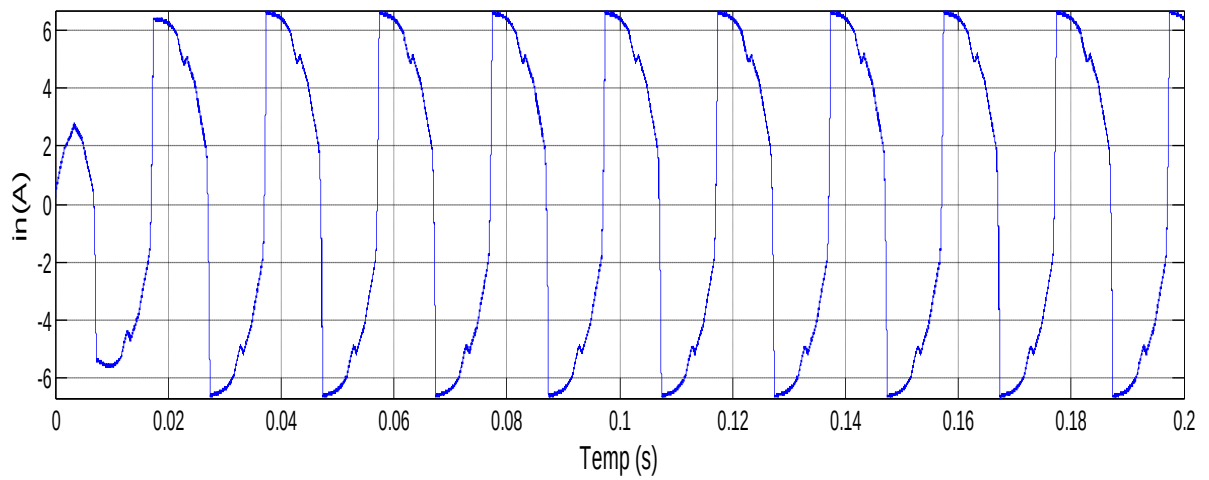
Fig(III.13): Courant de source (phase 3 avant filtrage).



Fig(III.14): Spectre d'harmonique (phase 3 avant filtrage).

Dans la phase 1 le taux de distorsion d'harmonique a été mesurée sur 5 périodes (colorés en rouge), le THD = 126.50 %.

fil neutre

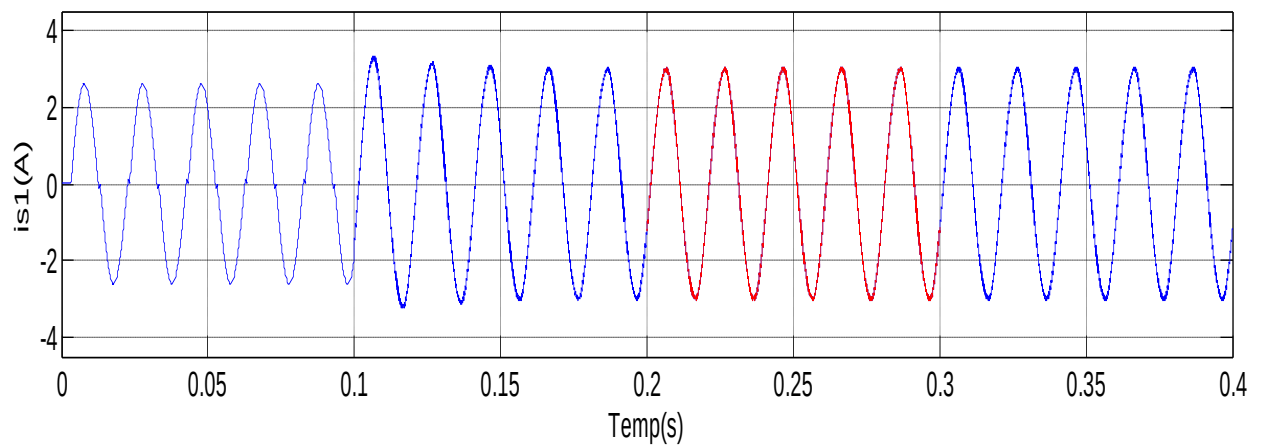


Fig(III.15): Courant de neutre (avant filtrage).

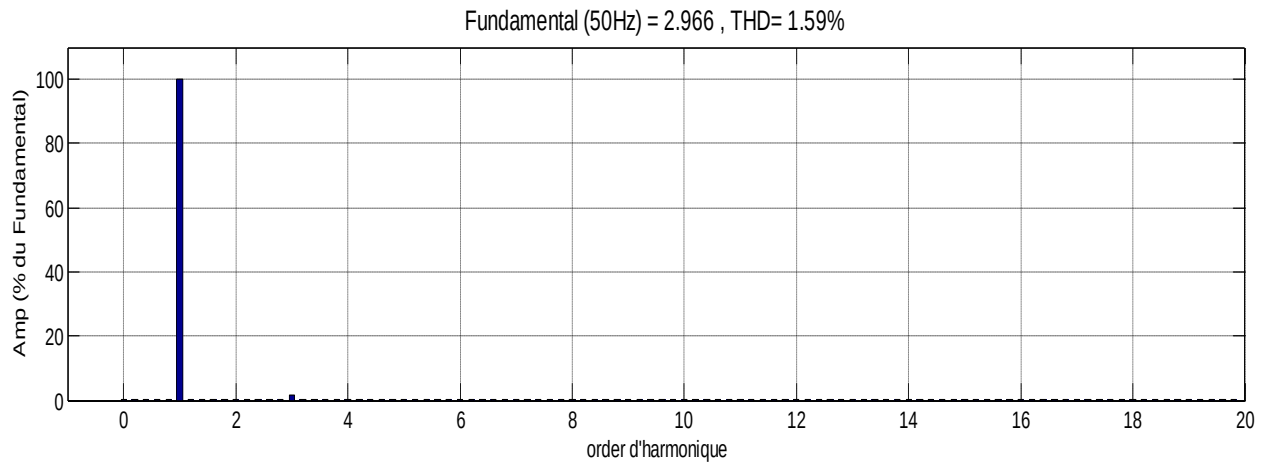
b- Les courbes après filtrage :

A l'instant ($t=0.1$ s) on injecte le courant de FAP.

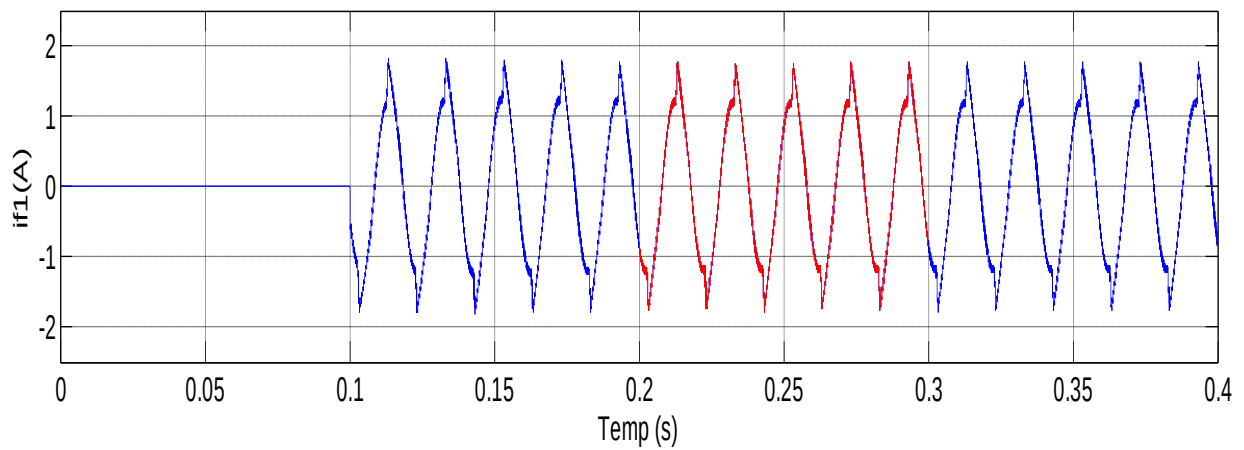
Phase1



Fig(III.16): Courant de source (phase 1 après filtrage).



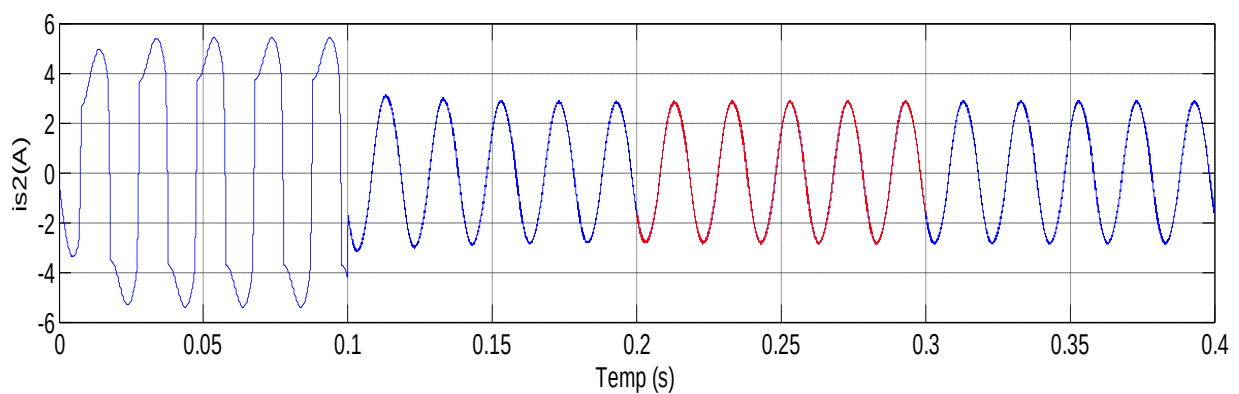
Fig(III.17): Spectre d'harmonique (phase 1 après filtrage).



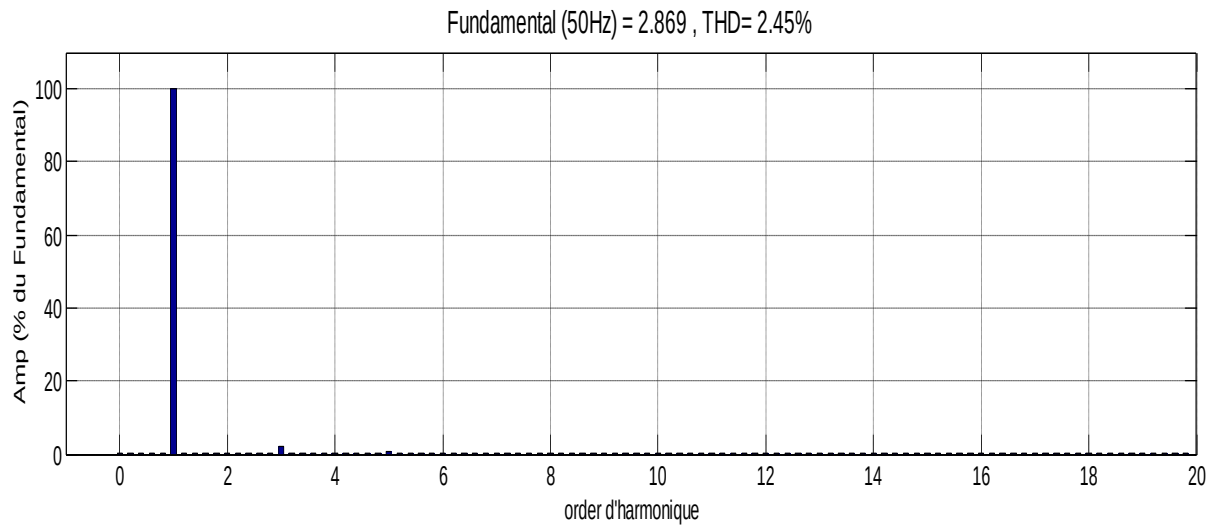
Fig(III.18) : Courant injecté par filtre actif (phase 1).

Dans la phase 1 le taux de distorsion d'harmonique a été mesurée sur 5 périodes (colorés en rouge) , le THD = 1.59 %.

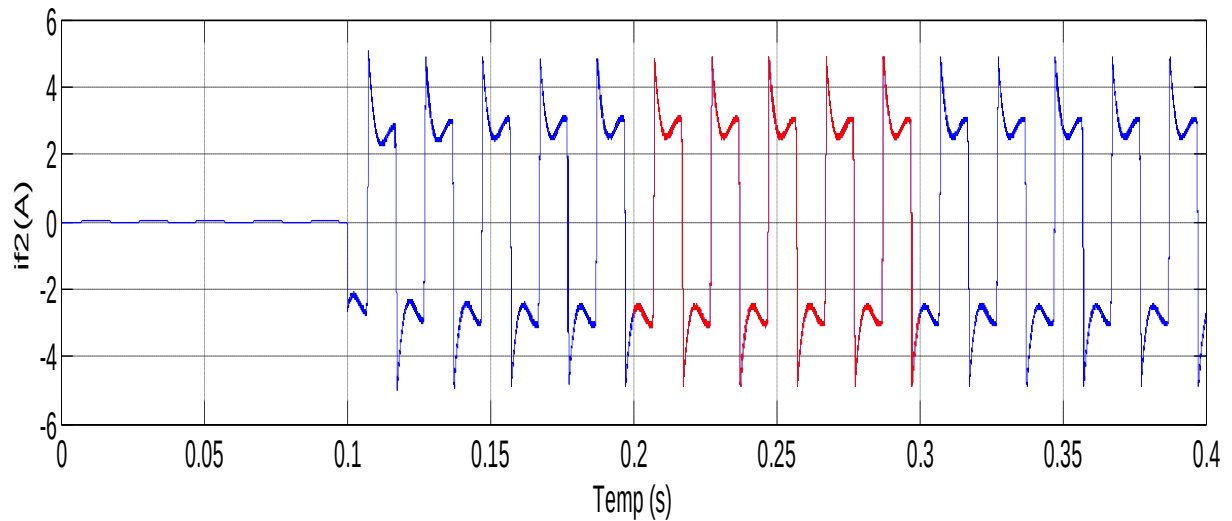
Phase2



Fig(III.19): Courant de source (phase 2 après filtrage).

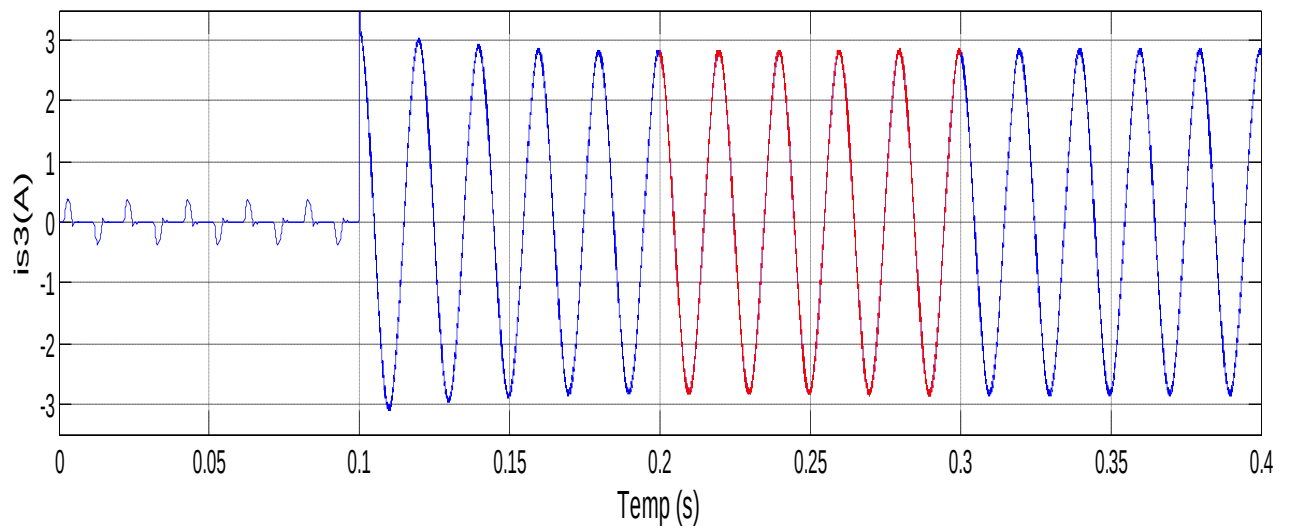
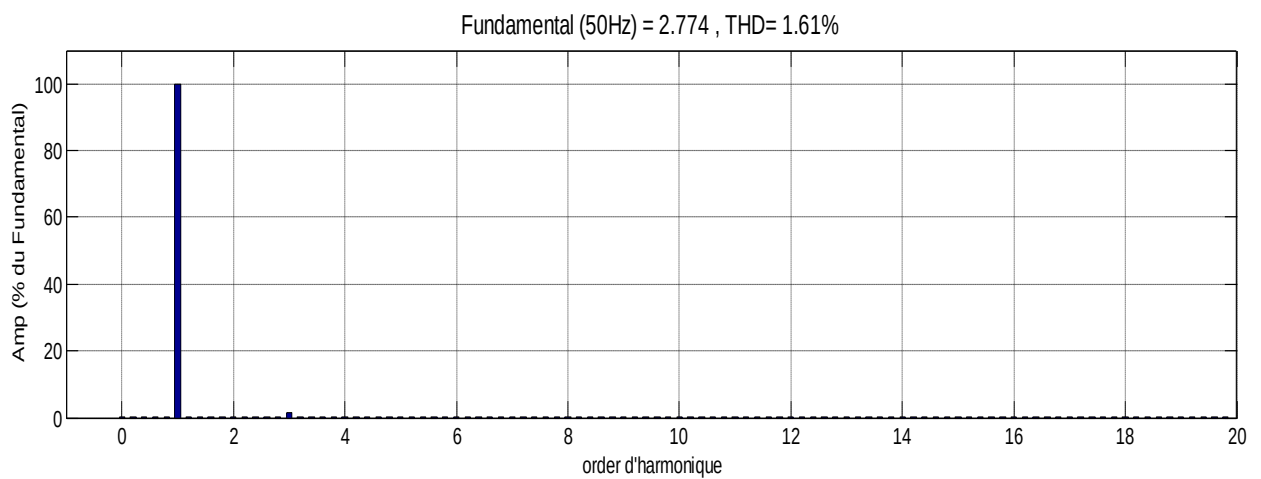


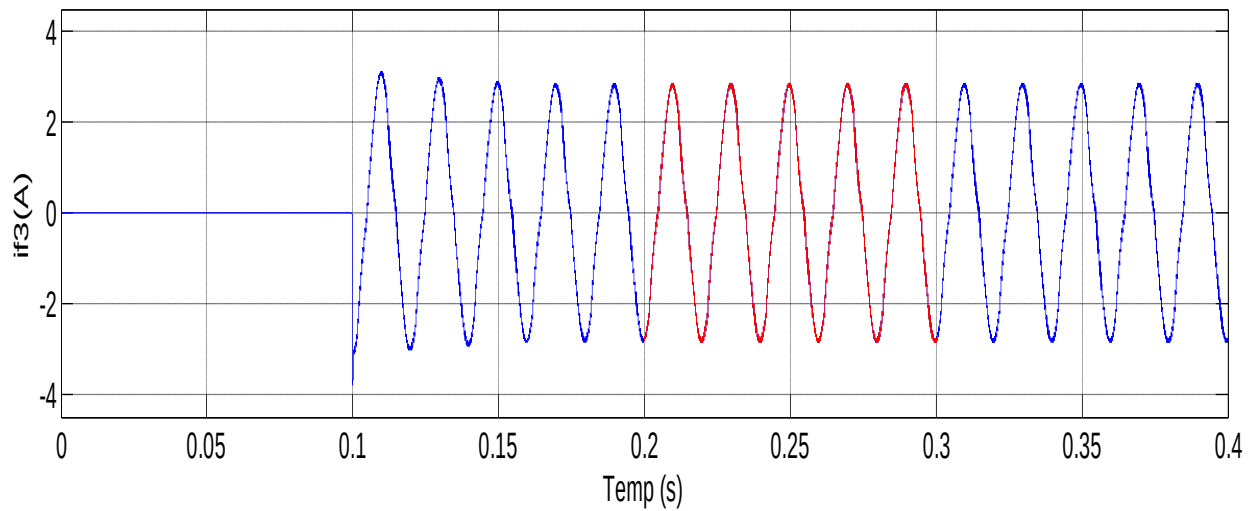
Fig(III.20): Spectre d'harmonique (phase 2 après filtrage).



Fig(III.21): Courant injecté par filtre actif (phase 2).

Dans la phase 2 le taux de distorsion d'harmonique a été mesurée sur 5 périodes (colorés en rouge) , le THD = 2.45 %.

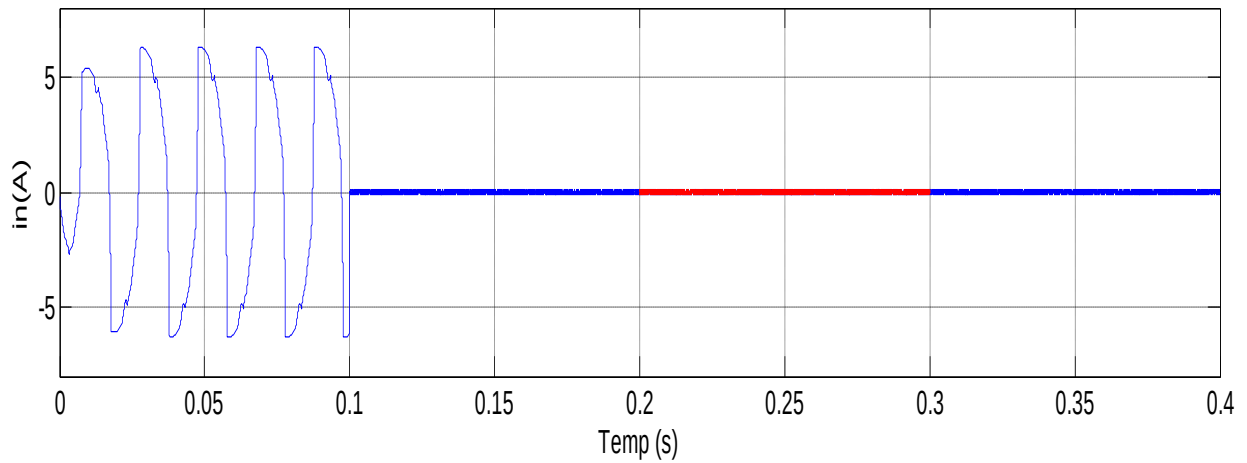
 Phase3**Fig(III.22):** Courant de source (phase 3 après filtrage).**Fig(III.23):** Spectre d'harmonique (phase 3 après filtrage).



Fig(III.24): Courant injecté par filtre actif (phase 3).

Dans la phase 3 le taux de distorsion d'harmonique a été mesurée sur 5 périodes (colorés en rouge), le THD = 1.61 %.

 **fil neutre**



Fig(III.25): Courant du neutre (après filtrage).

Dans la figure (III.25) Nous remarquons que le courant du neutre devient nul après le filtrage.

III.3. Conclusion :

D'après les résultats de simulation nous remarquons que :

les courants du côté source sont sinusoïdaux presque dépourvus d'harmonique, et leurs THDs sont présentés dans le tableau suivant :

charges équilibrées			
THD [%]	Phase 1	phase2	phase3
THD [%] avant filtrage	28.96		
THD [%] après filtrage	0.43		
charges déséquilibrées			
THD [%]	Phase 1	phase2	phase3
THD [%] avant filtrage	6.88	35.07	126.50
THD [%] après filtrage	1.59	2.45	1.61

Tab(III.2) : THD des courants de source.

- le courant du neutre côté source est aussi filtré, il est devenu pratiquement nul.

Ce travail a été consacré à l'application et l'amélioration des performances d'un filtre actif shunt à quatre fils pour l'amélioration de la Qualité de l'énergie dans un réseau électrique de distribution à basse tension avec du fil neutre, avec objectif de maintenir un système de courants triphasé du côté de source sinusoïdal et équilibré ou d'autres termes, découpler les perturbations causées par les charges non linéaire du réseau amont.

On a étudié le contrôle de ce filtre actif pour identifier les courants harmoniques, on a choisi la méthode des puissances réelles et imaginaires instantanées qui donne de bons résultats en régime dynamique et en régime statique. Le principe de commande pour contrôler le courant du filtre « hystérésis » sont étudiés. La commande hystérésis est très simple à mettre en œuvre mais dans ce type de commande la fréquence instantanée de commutations n'est pas contrôlable.

En dernier on a étudié la simulation de l'ensemble réseau, charge non linéaire et le filtre actif parallèle à quatre fils sous l'environnement Matlab Simulink. D'après les résultats de simulation nous remarquons que les courants du côté source sont sinusoïdaux presque dépourvus d'harmonique et le courant dans le fil neutre côté source est devenu nul.



BIBLIOGRAPHIES

- [1] **L. ZELLOUMA** « Contribution à l'étude du filtrage des harmoniques des réseaux de distribution à l'aide du filtre actif » Thèse de doctorat. Université badji mokhtar annaba, 2010.
- [2] **L. MORAN et J. DIXON** « Power Electronics Handbook », Academic Press, Chapter 39 pp.1-36, 2007.
- [3] **H. AKAGI, Y. KANAZAWA, A. NABAE** «Generalized theory of the instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components », IEEE Trans . Ind . Appl , vol. IA-20, No.9,pp. 652-630,May/June 1984.
- [4] **C. COLLOMBET, J. LUPIN et J. SCHONEK** «Perturbations harmoniques dans les réseaux pollués, et leur traitement».Cahier Technique Schneider Electric n° 152, septembre 1999.
- [5] **S .BOUGUERRA et I.BOURENNANE** « filtrage actifs parallèles des réseaux électriques avec compensation de l'énergie réactive ». mémoire d'ingénieur d'état en génie électrotechnique, Université de m'sila,2007.
- [6] **B. SZABADOS** «Répercussions sur le réseau électrique de l'alimentation des convertisseurs de grande puissance », RGE, Vol. 12, pp. 791-796,1984.
- [7] **T. GHENNAM** «Etude et réalisation d'un compensateur actif de puissance commandé par DSP». mémoire de magister. Ecole militaire polytechnique, 2005.
- [8] **L. ZELLOUMA** « Filtrage actif parallèle des harmoniques du courant générés par un pont redresseur triphasé non commandé». mémoire de magister. Université badji mokhtar annaba, 2006.
- [9] **D. OULD ABDESLAM** «Techniques neuromimétiques pour la commande dans les systèmes électriques : application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basse tension». Thèse de doctorat. Université de Haute-Alsace, U.F.R, 2005
- [10] **L. MRABET** «Étude par simulation d'un filtre actif parallèle de puissance pour la compensation des courants harmoniques génères par un pont redresseur triphasée ». mémoire de magistère. L 'université Badji Mokhtar Annaba, 2000.
- [11] **M.A.E. ALALI.**« Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension ».Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur - Strasbourg I, 12 Sep 2002.

- [12] **S.A.TADJER** « Étude d'un système de compensation d'harmonique en Utilisant un générateur photovoltaïque ». mémoire de magister, L'université Mohamed bougara- boumerdes, 2008.
- [13] **N.GHASOULI et N.RAOUACHE** «Application du filtrage actif parallèle sur une charge dynamique non linéaire», mémoire d'ingénieur d'état en génie électrotechnique Université de m'sila, 2007.
- [14] **MAHNI TEDJANI** «Stratégies de commande d'un filtre active parallèle à quater fils» mémoire de Magister en électrotechnique , Université de biskra -2012 .
- [15] **H.FARID**, «Commande robuste d'un filtre active shunt à quatre file » Mémoire de magester , Université de batna 2008.
- [16] **B. SINGH et K. AL-HADDAD** « A Review of Active Filters for Power Quality Improvement ». IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 46, n° 5, p. 960-971, 1999.
- [17] **H. AKAGI**, « Active Harmonie Filters », IEEE, vol. 93, n°12, p. 2128-2141, 2005.
- [18] **Y. PAL et A. SWARUP**, « A Review of Compensating Type Custom Power Devices for Power Quality Improvement », Conférence on Power System Technology and IEEE Power India Conférence (POWERCON), p. 1-8, 2008.
- [19] **I. EXEBERRIA-OTADUI**, « Evaluation of Différent Stratégies for Sériés Voltage Sag Compensation », IEEE, P. 1797-1802, 2002.
- [20] **f. FORNANI, R. PROCOPIO and H. J. BOLLEN**, « SSC Compensation Capability of Unbalanced Voltage Sags », IEEE Transaction on Power Delivery, Vol 20, N°03, p 2030-2037, July 2005.
- [21] **B.HOUARI**, « Contrôle des Puissances Réactives et des Tension dans un Réseau de Transport au Moyen de Dispositifs FACTS (SVC) », Mémoire de magister, Université de Sidi Bel-Abbaes, 23 Janvier 2008.
- [22] **H. KOUARA**, « Application d'un Filtre Actif Série au Contrôle de la Tension d'un Réseau Basse Tension », Mémoire de magistère, Université de Batna, p. 5-8, 2006.
- [23] **A.ELMITWALLY et A.S.ABDELKADER** «Neural network Controlled three – phase Four Wire shunt active power filter ».Generation ,IEE Proceedings on transmission and Distribution , vol.147.n°2.p.87-92,2000.

- [24] **A.HAMIDI,S.RAHMANI and K.AI-HADAD** « fellow ,A New Hybrid Series Active filter configuration to composte voltage sag , swell ,voltage and currant harmonics and Reactive power »,IEEE International symposium on Industrial Electronics (ISIE 2009)Seoul Olympic Parktel, Seoul , Korea,2009.
- [25] **A.HAMIDI** « contribution à l’Etude du filtre hybrides de puissance Utilisé pour améliore la qualité de l’énergie dans les réseau électrique de distribution » Thèse de doctorat ,Ecole de technologie supérieure –Québec, canada ,2010.
- [26] **S. SAAD et L. ZELLOUMA**, « Fuzzy logic controller for three-level shunt active filter compensating harmonics and reactive power », ELSEVIER, Electric Power Systems Research Vol.79, pp.1337–1341,2009.