



Centre Universitaire d'EL-Oued
Institut des Sciences et de Technologies
Département de Génie Electrique

Filière : Génie Electrique et Electronique
Spécialité: Réseaux Electriques

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme:

MASTER ACADEMIQUE

Thème :

***Etude comparative entre les différentes
méthodes d'identification du
Filtre Actif Parallèle***

Présenté par :

❖ KHADEM Smail
❖ FERHATI Boubaker

Proposé et Dirigé Par:

Dr. ZELLOUMA Laid

Promotion: 2011/2012

Remerciements

Remerciements à Dieu –le tout puissant– qui nous a aidé à réaliser ce modeste travail.

Nous tenons à remercier notre encadreur Dr. ZELLOUMA laid d'avoir accepté de nous encadrer et de nous suivre durant toute cette période.

Nos remerciements vont aussi au président du jury et aux membres du jury examinateurs qui nous faisons l'honneur de participer au jury de ce travail.

Et enfin nous remercions l'ensemble enseignants de notre promotion, qui nous ont aidé à réaliser ce modeste travail.



Dédicace

Je dédie ce modeste travail

A tous les membres de ma famille grand et petit.

A ma mère avec toute m' affection .

A mon père avec toute ma reconnaissance.

A tous les enseignants qui m'ont aidé de proche ou de loin .

A tous mes amis.

*A tous les étudiants de la faculté en génie électrotechnique surtout les
étudiants de la 2^{ème} mastre RE promotion 2012.*

*A tous ceux qui m'ont aidé, de près ou de loin, même qu'il soit un mot
d'encouragement et de gentillesse.*

A tous ceux que j'aime et qui m'aiment.

A tous ceux qui connaissent KHADEM SMAIL.

KHADEM SMAIL

LISTE DES FIGURES

Figure	Titre	Page
Fig (I.1)	Décomposition d'un signal périodique	8
Fig (I.2)	Le spectre harmonique du courant de charge polluante	10
Fig(I.3)	Diagramme de Fresnel des puissances	13
Fig (I.4)	Structure du pont dodécaphasé	15
Fig (I.5)	Forme de courant et rang d'harmonique	16
Fig (I.6)	Une distribution en étoile permet le découplage par les impédances naturelles et/ou additionnelles.	17
Fig (I.7.a)	Structure du filtre résonant	18
Fig(I.7.b)	Structure du filtre amorti	19
Fig (I 8)	Montage d'un filtre actif parallèle	20
Fig(I.9)	Montage du filtre actif série	21
Fig(I.10)	Combinaison parallèle –série actif (UPQC)	22
Fig (I.11)	Redresseur de tension	24
Fig (I.12)	Redresseur de courant	24
Fig(II.1)	Principe du filtre actif parallèle	26
Fig(II.2)	Courant de source , charge et filtre.	27
Fig(II.3)	Schéma synoptique d'un filtre actif parallèle	27
Fig (II.4)	Schéma du circuit de puissance d'un filtre actif parallèle à structure tension	28
Fig(II.4)	Filtre actif à structure tension.	29
Fig(II.5)	Bande d'hystérésis et signal de commande d'un interrupteur	33
Fig(II.6)	Principe de la commande du courant par hystérésis	33
Fig(II.7)	Principe de commande par MLI	34
Fig(III.1)	Méthode du filtre coupe-bande.	38
Fig(III.2)	Schéma de principe des filtres utilisés pour l'extraction des composantes alternatives de P ou q.	40
Fig(III.3)	Algorithme d'extraction des courants de références par PIRI	42
Fig (III.4)	Méthode du référentiel synchrone	43
Fig(III.5)	Méthode tri-monophasée	45
Fig(IV.1)	Schéma global du système à simuler.	47
Fig(IV.2)	Schéma synoptique d'un réseau triphasé	47
Fig (IV.3)	La charge non linéaire (un pont redresseur)	48
Fig(IV.4)	Présentation schématique d'un onduleur triphasé.	49
Fig(IV.5)	Représentation vectorielle des tensions générées par l'onduleur.	51

Fig (IV.6)	I_{ch} : Courant de charge, I_f : Courant de filtre actif, I_s : Courant de source .	53
Fig (IV.7.a)	Spectre du courant de source avant filtrage	54
Fig(IV.7.b)	Spectre du courant de source après filtrage	54
Fig(IV.8.a)	Courant et tension sans compensation de l'énergie réactive	54
Fig(IV.8.b)	Courant et tension avec compensation de l'énergie réactive.	54
Fig (IV.9)	I_{ch} : Courant de charge, I_f : Courant de filtre actif, I_s : Courant de source.	55
Fig(IV.10.a)	Spectre du courant de source avant filtrage.	55
Fig(IV.10.b)	Spectre du courant de source après filtrage.	55
Fig (IV.11)	I_{ch} : Courant de charge, I_f : Courant de filtre actif, I_s : Courant de source.	56
Fig(IV.12.a)	Spectre du courant de source avant filtrage	56
Fig(IV.12.b)	Spectre du courant de source après filtrage	56
Fig (IV.13)	I_{ch} : Courant de charge, I_f : Courant de filtre actif, I_s : Courant de source	57
Fig(IV.14.a)	Spectre du courant de source avant filtrage	57
Fig(IV.14.b)	Spectre du courant de source après filtrage	57
Fig (IV.15)	I_{ch} : Courant de charge, I_f : Courant de filtre actif, I_s : Courant de source.	58
Fig (IV.16.a)	Spectre du courant de source avant filtrage.	58
Fig(IV.16.b)	Spectre du courant de source après filtrage.	58
Fig(IV.17.a)	Courant et tension sans compensation de l'énergie réactive.	59
Fig(IV.17.b)	Courant et tension avec compensation de l'énergie réactive.	59
Fig (IV.18)	I_{ch} : Courant de charge, I_f : Courant de filtre actif, I_s : Courant de source.	60
Fig(IV.19.a)	Spectre du courant de source avant filtrage.	60
Fig(IV.19.b)	Spectre du courant de source après filtrage.	60
Fig (IV.20)	I_{ch} : Courant de charge, I_f : Courant de filtre actif, I_s : Courant de source.	61
Fig(IV.21.a)	Spectre du courant de source avant filtrage.	61
Fig(IV.21.b)	Spectre du courant de source après filtrage	61
Fig(IV.22)	I_{ch} : Courant de charge, I_f : Courant de filtre actif, I_s : Courant de source .	62
Fig (IV.23.a)	Spectre du courant de source avant filtrage	62
Fig (IV.23.b)	Spectre du courant de source après filtrage	62
Fig (IV.24)	I_{ch} : Courant de charge, I_f : Courant de filtre actif, I_s : Courant de source .	63
Fig (IV.25)	I_{ch} : Courant de charge, I_f : Courant de filtre actif, I_s : Courant de source .	63
Fig (IV.26)	I_{ch} : Courant de charge, I_f : Courant de filtre actif, I_s : Courant de source .	64
Fig (IV.27)	I_{ch} : Courant de charge, I_f : Courant de filtre actif, I_s : Courant de source .	64
Fig (IV.28)	I_{ch} : Courant de charge, I_f : Courant de filtre actif, I_s : Courant de source .	65
Fig (IV.29)	I_{ch} : Courant de charge, I_f : Courant de filtre actif, I_s : Courant de source .	65
Fig (IV.30)	I_{ch} : Courant de charge, I_f : Courant de filtre actif, I_s : Courant de source .	66
Fig (IV.31)	I_{ch} : Courant de charge, I_f : Courant de filtre actif, I_s : Courant de source .	66

LISTE DES SYMBOLES

Symbole	Désignation
D	Puissance déformante
F_p	Facteur de puissance
P	Puissance active (W).
Q	Puissance réactive(VAR).
S	Puissance apparente (VA)
f	Fréquence (Hz)
ω	Pulsation du réseau
I_h	Courant harmonique de rang h (A).
THD _h	Taux de distorsion de rang h.
F_h	Fréquence de la composante harmonique de rang h (Hz)
f_1	Fréquence de la composante fondamentale (Hz)
V_h	Valeur efficace de la tension de l'harmonique de rang h (V).
V_1	Valeur efficace de la tension du fondamental (V).
cos ϕ	Facteur de puissance.
τ_v	taux de déséquilibre de tension
L	Inductance (H).
C	Capacité (F).
R	Résistance(Ω).
FAS	Filtre actif série
FAP	Filtre actif parallèle
V_s	Tension simple de la source (V).
I_{ch}	Courant de la charge (A).
$\tilde{i}_\alpha$ et $\tilde{i}_\beta$	courants perturbateurs dans le repère diphasé (α, β) (A)
$\overline{p}$	Puissance continue liée à la composante fondamentale active du courant (W).
$\overline{q}$	Puissance continue liée à la composante fondamentale réactive du courant
$\tilde{p}$ et $\tilde{q}$	Puissance alternatives liées à la somme des composantes harmoniques du courant.
I_d	courant redressée coté charge (A).
I_f	Courant généré par le filtre actif (A).
V_f	tension de sortie du filtre actif (V).
I_{ref}	courant instantané de référence (A).
R_f, L_f	Résistance et inductance du filtre de sortie (Ω, H).
Z_{cc}	Impédance de court-circuit (Ω)
R_{cc}, L_{cc}	Résistance et inductance de court-circuit(Ω, H).
R_{ch}, L_{ch}	Résistance et inductance de la charge (Ω, H).
I_{cha}	Courant dans la phase a (A).
C_{dc}	La capacité du bus continu(F)
V_{dc}	Tension aux bornes de la capacité (V).

LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Titre	Page
Tableau (I.1)	Engagement EMERAUDE sur les harmoniques de tension (HTA).	11
Tableau (I.2)	Engagement EMERAUDE sur les harmoniques de tension (HTB).	11
Tableau (I.3)	Limitation EMERAUDE des courants harmoniques.	11
Tableau(I.4)	Autre configuration du filtre hybride.	23
Tableau(II.1)	Tensions en sortie de l'onduleur.	30
Tableau(III.1)	les modes de compensation possibles de la commande PIRI.	41
Tableau(IV.1)	Tensions fournies par l'onduleur sous fourmes vectorielles.	51
Tableau(IV.2)	les résultats des simulations des différentes méthodes d'identifications	67
Tableau(IV.3)	Comparaison des différentes techniques de compensation.	68

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE.....	1
----------------------------	---

Chapitre I : Perturbation des réseaux électriques et principes de compensation

2.....	Chapitre IV : Modélisation et simulation numérique
--------	--

Chapitre II : Principe du filtrage actif parallèle

II.1 Introduction.....	26
II.2 Principe de filtre actif parallèle	26
II.3 La partie puissance d'un filtre actif parallèle à structure tension	28
II.3.1 L'onduleur de tension	29
II.3.2 Filtre de découplage.....	31
II.3.3 Système de stockage d'énergie.....	31
II.4 Contrôle des courants du filtre actif (partie commande)	32
II.4.1 Commande par hystérésis.....	32
II.4.2 Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI)	34
II.5 Calcul des paramètres du système (réseau-filtre actif-charge polluante):	35
II.6 Conclusion.....	36

Chapitre III : Méthodes d'identification des courants harmoniques

III.1 Introduction	37
III.2 Généralités sur Les méthodes d'identifications des courants harmoniques	37
III.2.1 Classification des méthodes d'identification	37
III.2.1.1 Méthodes du domaine fréquentiel	37
III.2.1.2 Méthodes du domaine temporel.....	38
III.3 Méthode d'identification du filtre coupe-bande (notch filtre).....	38
III.4 Méthode de la puissance instantanée réelle et imaginaire (PIRI)	39
III.5 Méthode du référentiel synchrone.....	42
III.6 Méthode tri-monophasée	44
II.7 Conclusion	45

Chapitre IV : Modélisation et simulation numérique

IV.1 Introduction	46
IV.2 Schéma synoptique de l'association filtre actif-réseau-charge polluante.....	46
V-3 Modélisation de l'association réseau- Filtre actif- Charge polluante :	47
IV.3 .1 Modélisation du réseau électrique :	47
IV.3.2 Modélisation de la charge polluante (redresseur à diode).....	48
IV.3.3 Modélisation du filtre actif (ou de l'onduleur)	49
IV.3.3.1 Fonction de connections	49
IV.3.3.2 Fonctions de conversions composées	50
IV.3.3.3 Fonctions de conversions simples.....	50
IV.3.3.4 Représentation vectorielle des tensions fournies par l'onduleur	51
IV.4 Paramètres utilisés	52
IV.5 Résultats de la simulation	53
IV.5 .1 Charge RL.....	53
IV.5.1.1 La méthode de la puissance instantanée réelle et imaginaire (PIRI).....	53
IV.5.1.2 La méthode du filtre coupe-bande	55
V.5.1.3 La méthode du référentiel synchrone.....	56
IV.5.1.4 La méthode tri-monophasée	57
IV.5.2 Charge RC	58
IV.5.2.1 La méthode de la puissance instantanée réelle et imaginaire.....	58
IV.5.2.2 La méthode du filtre coupe-bande	60
IV.5.2.3 La méthode du référentiel synchrone	61
IV.5.2.4 La méthode tri-monophasée	62
IV.5.3 Changement de la charge	63
IV.5.3.1 Changement de la charge (RL) ₁ vers (RL) ₂	63
IV.5.3.2 Changement de la charge (RC) ₁ vers (RC) ₂	65
IV.5.4 Discussion des résultats de la simulation	69
IV.5 Conclusion	70
CONCLUSION GENERALE	71

BIBLIOGRAPHIE

INTRODUCTION GENERALE

Depuis de nombreuses années, le distributeur d'énergie électrique s'efforce de garantir la qualité de la fourniture d'électricité. Les premiers efforts se sont portés sur la continuité de service afin de rendre toujours l'accès à l'énergie chez l'utilisateur disponible. Aujourd'hui, les critères de qualité ont évolué avec le développement des équipements où l'électronique de puissance prend une place prépondérante dans les systèmes de commande, mais avec l'utilisation croissante dans l'industrie de systèmes commandés à base des convertisseurs statiques entraînent de plus en plus de problème de perturbation au niveau des réseaux électriques.

En effet, les perturbations provoquées par ces convertisseurs sont bien connue; il s'agit d'une dégradation du facteur de puissance et d'une génération des courants alternatifs non sinusoïdaux riches en harmoniques. Les incidences sont à l'origine de la déformation de la tension, la réduction de la capacité du transport et de l'augmentation des pertes.

Il existe un certain nombre de solutions techniques pour éliminer ou réduire les effets liés à une mauvaise qualité de l'énergie. Il s'agit là d'un domaine très riche tant en innovations qu'en développement.

L'utilisation des dispositifs de filtrage tels que les filtres passifs ditent résonnants et/ou amortis peut empêcher les courants harmoniques de se propager dans les réseaux électriques.

Ces solutions sont très simples, à bas prix, et de grandes efficacités, mais leurs performances dépendent énormément de l'impédance de la source et peuvent mener à une résonance non voulue avec le réseau. De plus, ce type de filtre perd de son efficacité lorsque les caractéristiques de la charge évoluent.

Raison pour laquelle, la solution des filtres actifs de puissance s'est largement développée dans la dernière décennie. Les filtres actifs sont un moyen efficace pour la compensation des harmoniques de courants ou de tensions générés par des charges non linéaires. Ils compensent, en temps réel, les perturbations dues à une charge non linéaire en injectant sur les réseaux, les harmoniques et les réactifs du courant consommés par la charge afin que le réseau ne soit plus capable qu'à fournir un courant sinusoïdal et en phase avec la tension [1].

Néanmoins, il est important de noter que les performances d'un filtre actif sont étroitement liées à l'algorithme utilisé pour déterminer les références harmoniques de courant ainsi que la méthode utilisée pour la poursuite de ces références [2], [3].

A la lumière de ces réflexions préliminaires, nous pouvons maintenant résumer l'objectif ainsi que le contenu de ce travail.

L'objectif de notre travail est d'étudier le filtre actif parallèle et les différentes méthodes d'identifications des courants harmoniques d'une charge polluante, et nous les comparons pour valider l'efficacité de chacune d'elles.

Ce mémoire a été structuré comme suit :

- ❖ Dans le premier chapitre, nous présentons :
 - 1- Les perturbations en courant et en tension des réseaux électriques connectés à des charges dites polluantes.
 - 2- Les origines et les conséquences de cette pollution harmonique.
 - 3- Les solutions classiques et modernes de réduction d'harmoniques.
- ❖ Le deuxième chapitre, sera consacré à la structure du filtre actif parallèle ainsi que son principe de fonctionnement général. Nous ferons présenter ces principaux types de commande.
- ❖ Dans le troisième chapitre, nous avons étudié les différents algorithmes d'identification des courants de référence.
- ❖ Au quatrième chapitre, nous présentons la modélisation de l'ensemble : réseau-charge polluante-filtre actif. Ensuite les résultats de simulation obtenus à partir de l'environnement Matlab Simulink (powersystems).

En fin de ce mémoire nous présentons une conclusion générale de cette étude.

CHAPITRE I

PERTURBATION DES RESEAUX ELECTRIQUES ET PRINCIPES DE COMPENSATION

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 [4], 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 Perturbation

L'énergie électrique est généralement distribuée sous la forme de trois tensions constituant un système sinusoïdal triphasé. Un des paramètres de ce système est la forme d'onde qui doit être la plus proche possible d'une sinusoïde [5].

Afin de bien analyser les pollutions des réseaux électriques et par conséquent, de trouver les meilleures méthodes de dépollution, on va distinguer deux types de perturbations, à savoir les perturbations de courant et celles de tension.

Les courants perturbateurs comme les courants harmoniques, les courants déséquilibrés et la puissance réactive sont majoritairement émis par des charges non linéaires, à base d'électronique de puissance, et/ou déséquilibrées. La puissance réactive peut être aussi consommée par des charges linéaires inductives comme les moteurs asynchrones qui sont largement présents dans les sites industriels.

Les perturbations de tension comme les creux, les déséquilibres et les harmoniques de tension trouvent généralement leurs origines dans le réseau électrique lui-même mais parfois également dans les charges.

Ces types de perturbation ont des effets très néfastes sur les équipements électriques. Ces effets peuvent provoquer des échauffements jusqu'à la destruction totale des équipements [6].

I.3 Caractéristiques des perturbations électriques

L'énergie électrique est délivrée sous forme d'un système triphasé de tension sinusoïdale. Les paramètres caractéristiques de ce système sont les suivants :

1. La fréquence.
2. L'amplitude.
3. La forme d'onde qui doit être sinusoïdale.
4. La symétrie du système triphasé, caractérisée par l'égalité des modules des trois tensions et de leur déphasage relatif [7].

La qualité de la tension peut être affectée, soit du fait de certains incidents inhérents à la nature physique et aux sujétions liées à l'exploitation du réseau, soit du fait de certains récepteurs. Ces défauts se manifestent sous forme de différentes perturbations affectant un ou plusieurs des quatre paramètres précédemment définis. On a donc quatre possibilités distinctes de perturbations :

- ❖ **Les variations de l'amplitude** : il ne s'agit pas des variations lentes de tension qui sont corrigées par les transformateurs de réglage en charge, mais de variations rapides de tension ou de creux de tension. Les creux de tension peuvent être soit isolés, soit plus ou moins répétitifs, de forme régulière ou non.
- ❖ **La dissymétrie du système triphasé** : que l'on appelle déséquilibre [6].
- ❖ **La modification de la forme d'onde** : cette onde n'est alors plus sinusoïdale, et peut être considérée comme représentable par une onde fondamentale à 50 Hz, associée soit à des harmoniques de fréquence multiple entier de 50 Hz, soit même parfois à des ondes de fréquence quelconque.
- ❖ **Les fluctuations de la fréquence à 50 Hz** : elles sont rares et ne sont observées que lors de circonstances exceptionnelles, par exemple certains défauts graves du réseau, au niveau de la production ou du transport.

I.3.1 Les creux de tension

I.3.1.1 Origine des creux de tension

Un creux de tension est une diminution brusque de l'amplitude de la tension pendant un temps allant de 10 millisecondes à quelques secondes. Les creux de tension sont dus, en général, à des défauts dans les réseaux tant publics que particuliers. Ils apparaissent, aussi, lors de manœuvres d'enclenchement mettant en jeu des courants de forte intensité, ou lors du déclenchement d'une protection suite à l'apparition d'un défaut dans le réseau. Il y a deux types de phénomènes à l'origine des creux de tension :

- Les creux provenant du fonctionnement d'appareils à charge fluctuante ou de la mise en service d'appareils appelant un courant élevé au démarrage (moteurs, transformateurs...etc.).
- Les creux liés aux phénomènes aléatoires, comme la foudre ou tous les courts circuits accidentels sur les réseaux de distribution ou les réseaux internes des clients (défaut d'isolation, protection de branches sur les lignes aériennes...etc.).

Une coupure brève est une disparition totale de la tension pendant une courte durée qui n'excède pas 1 minute. Ces coupures sont dues au fonctionnement du système de protection des réseaux aériens évitant ainsi des coupures longues.

I.3.1.2 Conséquences des creux de tension

Les creux de tension sont susceptibles de perturber le fonctionnement de certaines installations industrielles et tertiaires. En effet, ce type de perturbation peut causer des dégradations de fonctionnement des équipements électriques qui peuvent aller jusqu'à la destruction totale de ces équipements.

I.3.1.3 Réglementation

Comme exemple, l'engagement d'EDF à travers le contrat EMERAUDE, se présente sous forme de seuils, les creux de tension étant caractérisés par leur profondeur et leur durée, avec des limites de 30% et de 600 ms, [8].

I.3.2 Le déséquilibre de la tension et du courant

I.3.2.1 Origine du déséquilibre

Le déséquilibre est l'existence simultanée d'amplitudes des tensions ou de déphasages qui ne sont pas identiques dans les trois phases, c'est à dire qu'au moins une des trois tensions diffère des deux autres. Il est dû à l'inégalité des puissances appelées sur chaque phase.

I.3.2.2 Conséquences du déséquilibre

En général le déséquilibre engendre des dégradations des performances des machines électriques, un vieillissement accéléré des isolants, la production de courants de ligne ayant des fréquences non caractéristiques

Il est plus intéressant d'aborder le problème du déséquilibre par type d'équipement. Le déséquilibre d'une installation triphasée peut entraîner un dysfonctionnement des appareils de basses tensions connectés:

- Mauvais fonctionnement d'un appareil monophasé alimenté par une tension très faible (lampe à incandescence qui fournit un mauvais éclairage).
- Destruction d'un appareil monophasé alimenté par une tension trop élevée, il peut être détruit (claquage d'un filament de lampe par surtension).

Concernant les dispositifs triphasés d'électronique de puissance, principalement les ponts redresseurs, le fonctionnement en présence de déséquilibre entraîne l'apparition de composantes harmoniques non caractéristiques, notamment des harmoniques de rang multiple de 3. L'apparition de ces courants harmoniques peut poser des problèmes, comme la génération d'une anti-résonance lors du filtrage de l'harmonique de rang 5. Outre les effets classiques des harmoniques, ces fréquences non caractéristiques peuvent conduire, dans certains cas, au blocage de la commande.

La conséquence des composantes inverses sur les machines tournantes est la création d'un champ tournant en sens inverse du sens de rotation normal, d'où un couple de freinage parasite et des pertes supplémentaires qui provoquent l'échauffement de la machine.

Concernant l'effet du déséquilibre homopolaire, il faut signaler le risque d'échauffement du conducteur neutre dans un réseau BT qui, lorsque le conducteur est d'un diamètre trop faible, peut provoquer une rupture du conducteur ou un incendie.

I.3.2.3 Réglementation

Le déséquilibre en tension est caractérisé par le taux de déséquilibre de tension τ_v donné par le rapport des amplitudes des tensions inverse et directe .

D'après le contrat EMERAUDE, EDF s'engage à fournir aux clients raccordés aux réseaux HTA (1 à 50 kV) et HTB (50 à 130 kV) une tension dont le taux de déséquilibre moyen τ_m ne dépasse pas 2 %. Cependant EDF demandera aux clients qui ne sont pas couverts par ces champs de ne pas provoquer un taux de déséquilibre supérieur à 1 %. [8]

I.3.3 Harmoniques et inter harmoniques

Un harmonique est une composante sinusoïdale d'une onde périodique ou d'une quantité possédant une fréquence qui est multiple entier de fréquence fondamentale.

Les inter harmoniques sont superposés à l'onde fondamentale mais ne sont pas des multiples entier de la fréquence du réseau. L'apparition des inter harmoniques est en augmentation et leurs origines principales sont les convertisseurs de fréquence, les variateurs de vitesse et d'autres équipements similaires de contrôle-commande. [9]

I.3.4 Fluctuations de tension

Les fluctuations de tension sont des variations périodiques ou erratiques de l'enveloppe de la tension. Ce sont des variations brutales de l'amplitude de la tension situées dans une bande de $\pm 10\%$ et se produisent sur un intervalle de temps de quelques centièmes de secondes. Elles sont en particulier dues à la propagation sur les lignes du réseau de courants d'appel importants. L'origine principale de ces courants est le fonctionnement d'appareil dont la puissance absorbée varie de manière rapide, comme les fours à arc et des machines à souder. Ces fluctuations se traduisent par des variations d'intensité, visible au niveau de l'éclairage causant une gêne visuelle perceptible pour une variation de 1% de la tension. Ce phénomène de papillotement est appelé flicker. [9]

I.4 Les harmoniques

L'expansion de l'emploi des charges électroniques non linéaires durant les 30 dernières années a significativement contribué à la propagation des harmoniques dans les systèmes électriques de puissance. Comme ces charges sont indispensables pour différents besoins domestiques et industriels. [10]

Les déformations du courant et de la tension peuvent perturber le fonctionnement normal d'autres équipements électriques. C'est pourquoi, les distributeurs d'énergie ayant la contrainte de fournir une tension sinusoïdale, prennent en charge l'atténuation des perturbations harmoniques au moyen d'installations de forte puissance. Cependant, les nouvelles réglementations internationales imposent aux consommateurs des limites aux harmoniques, engendrées par leurs systèmes, tant en courant qu'en tension. Ainsi, le filtrage des composantes harmoniques est au centre des préoccupations des distributeurs d'une part et des utilisateurs d'énergie électrique d'autre part.

I.4.1 Décomposition d'un signal périodique

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

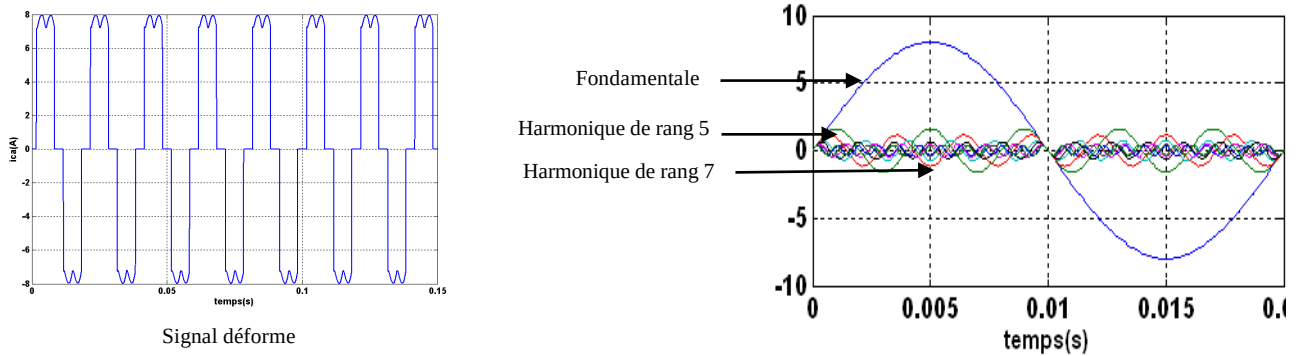


Fig (I.1) :Décomposition d'un signal périodique

I.4.2 Origines des harmoniques

L'augmentation sensible du niveau de la pollution harmonique du réseau électrique est une conséquence de la prolifération des convertisseurs statiques .En effet, ces convertisseurs sont considérés comme des charges non linéaires émettant des courants harmoniques .Ces courants harmoniques dans les impédances du réseau électrique peuvent entraîner des tensions harmoniques aux points de raccordement et alors polluer les consommateurs alimentés par le même réseau électrique.

I.5 Grandeurs caractéristiques

I.5.1 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 [5].

I.5.2 Rang de l'harmonique

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

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

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

I.5.3 Série de Fourier

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

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

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

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

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

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 [11].

I.5.4 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 :

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

Notons qu'en présence d'harmoniques, les appareils de mesure doivent avoir une bande passante élevée (> 1 kHz).[10]

I.5.5 Taux de distorsion

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

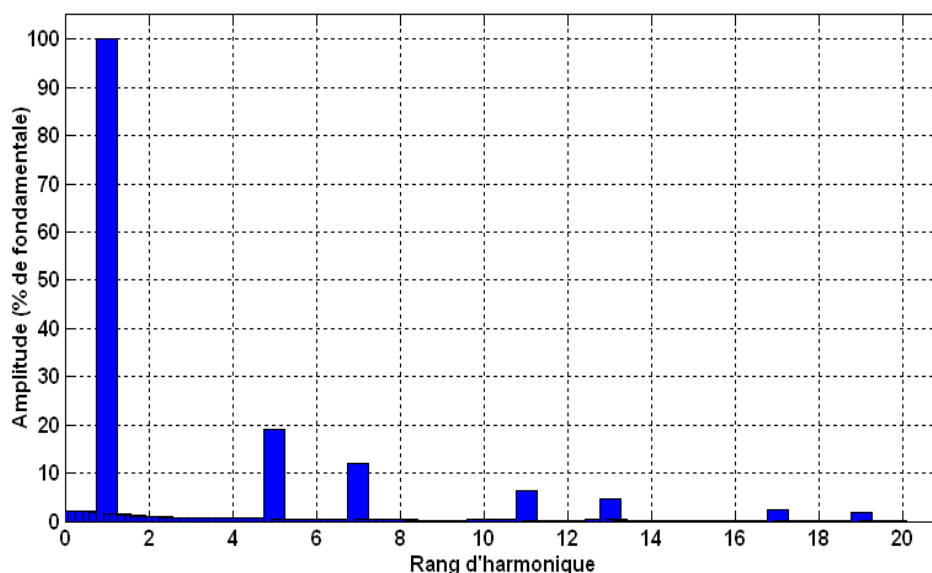
$$THD(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n Y_n^2}}{Y_1} \times 100 \quad (I.5)$$

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

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

I.5.6 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)) [10].



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

I.5.7 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.6 Réglementation

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_1 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
le THD global de tension ne dépassant pas 8 %.				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 que 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 est inférieur à 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 Conséquences des harmoniques

Les courants harmoniques, qui se propage dans les réseaux électriques, déforment l'allure du courant de la source et polluent les consommateurs alimentés par les mêmes réseaux. On peut classer les effets engendrés par les harmoniques en deux types [12] :

- ✧ Les effets instantanés
- ✧ Les effets à terme

I.7.1 Effets instantanés

Ils apparaissent immédiatement dans certains appareillages :

- ❖ Défauts de fonctionnements de certains équipements électriques: en présence d'harmoniques, la tension et le courant peuvent changer plusieurs fois de signe dans une demi-période. Les appareils, dont le fonctionnement est basé sur le passage à zéro des grandeurs électrique peuvent être affectés.
- ❖ Trouble fonctionnel des micro-ordinateurs: les effets sur ces équipements peuvent se manifester par la dégradation de la qualité de l'image et par des couples pulsatoires , des moteur d'entraînement de disque.
- ❖ Les perturbations et la dépollution dans les systèmes électrique : certains appareils de mesure et les compteurs d'énergie à induction présentent des dégradations de mesures et des erreurs de lecteur supplémentaires en présence des harmoniques.
- ❖ Vibrations et bruits: les courants harmoniques génèrent également des vibrations et des bruits acoustiques, principalement dans les appareils électromagnétiques.

I.7.2 Effets à terme

Ils se manifestent après une exposition plus ou moins longue à la perturbation harmonique. L'effet le plus important est de nature thermique, Il se traduit par un échauffement

Il conduit à une fatigue prématurée du matériel des lignes et amène à un déclassement des équipements :

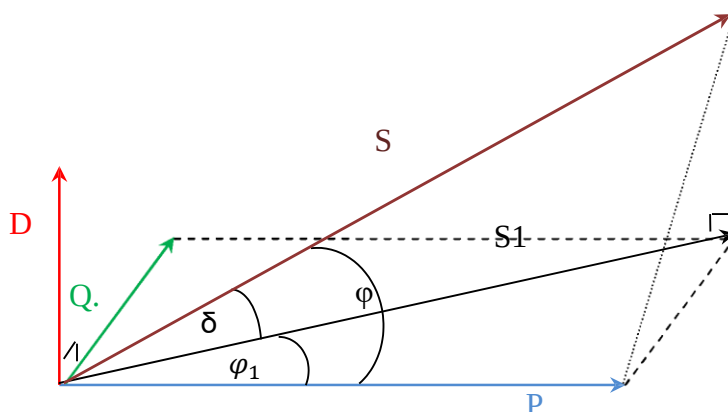
- ❖ Échauffement des câbles et des équipements : ces effets peuvent être à moyen terme (de quelques secondes à quelques heures) ou à long terme (de quelques heures à quelques années) et concernent les câbles qui peuvent être, le siège de suréchauffements du neutre et les éléments bobinés (transformateurs, moteurect).
- ❖ Échauffement des condensateurs : l'échauffement est causé par les pertes dues au phénomène d'hystérésis dans le diélectrique, les condensateurs sont donc sensibles aux surcharges, qu'elles soient dues à une tension fondamentale trop élevée ou à la présence d'harmoniques. Ces échauffements peuvent conduire au claquage.
- ❖ Échauffements des pertes supplémentaires des machines et des transformateurs : Échauffements causés par les pertes dans les stators des machines et principalement dans leurs circuits rotoriques (cages, amortisseurs, circuits magnétisants) à cause des différences importantes de vitesse entre les champs tournants inducteurs harmoniques et le rotor.

Les harmoniques génèrent aussi des pertes supplémentaires dans les transformateurs, par effet joule dans les enroulements, accentuées par l'effet de peau et des pertes par hystérésis et courant de Foucault dans les circuits magnétiques.

I.8 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, tel que $I = I_f + I_h$.



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

En présence des harmoniques ,la puissance apparente S est composée de trois parties comme le montre l'équation suivante:

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

Où Q : la puissance réactive associée au courant fondamental.

D : la puissance déformante due aux harmoniques du courant.

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

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

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

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

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

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

I .9 Les solutions traditionnelles de dépolluions

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.[12].

1.9.1 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.9.2 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 $\frac{2\pi}{m_C \cdot p}$.

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 dodécaphasé, 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.

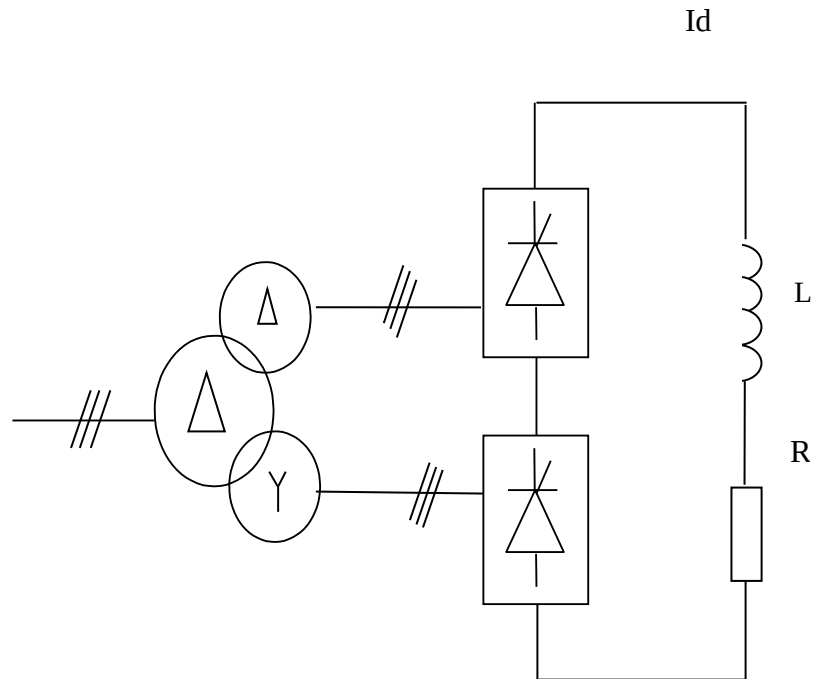


Fig (I.4) : Structure du pont dodécaphasé

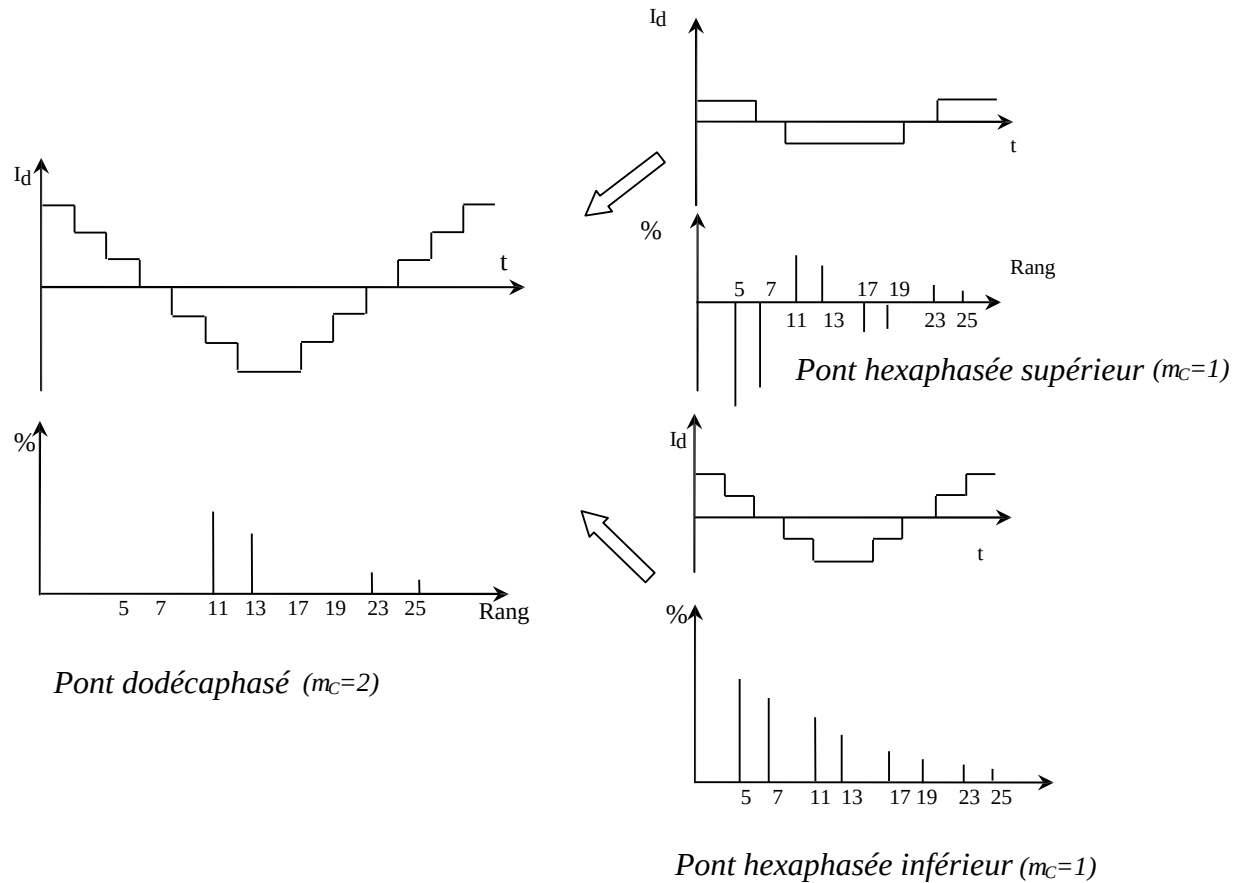


Fig (I.5) : Forme des courants et rang des harmoniques

Cette solution provoque un encombrement lors de la commande ce qui limite son utilisation [11].

I.9.3 Surdimensionnement des installations électriques

Cette stratégie consiste à surdimensionner les équipements du réseau de telle sorte à supporter les surtensions produites par les harmoniques [7].

I.9.4 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 [10].

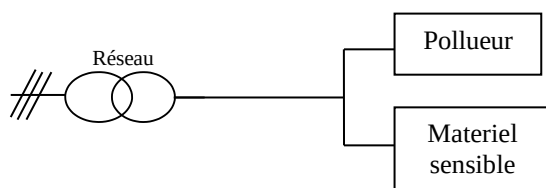
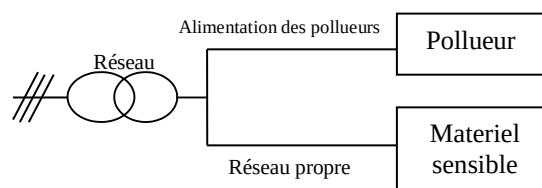
a) Solution à éviter**b) Solution à préconiser**

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

I.9.5 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 [13].

I.9.6 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 [10].

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 toute harmonique à fréquence voisine de celle de la résonance.
- ❖ La forte dépendance de l'impédance et de la fréquence du réseau.
- ❖ Equipements volumineux [9].

I.9.6.1 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) .

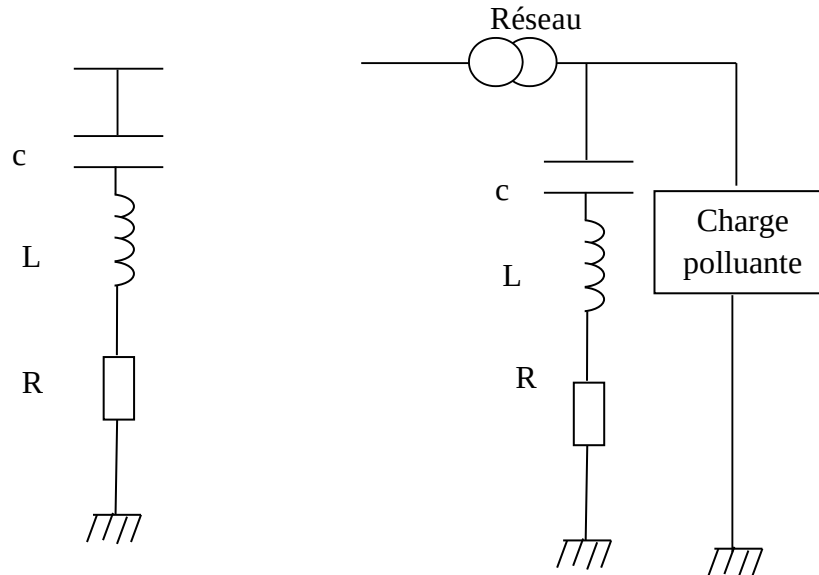


Fig (I.7.a) : Structure du filtre résonant

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} harmoniques. [14].

I.9.6.2 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 $h=13$) [10].

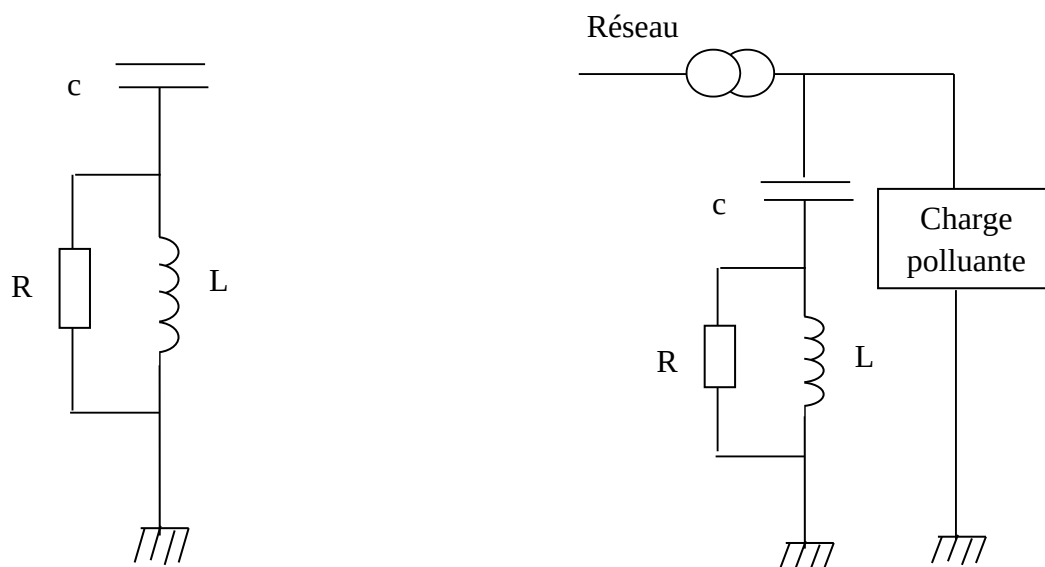


Fig (I.7.b) :Structure du filtre amorti

I.10 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 [6].

I.10.1 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

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

I.10. 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 [13].

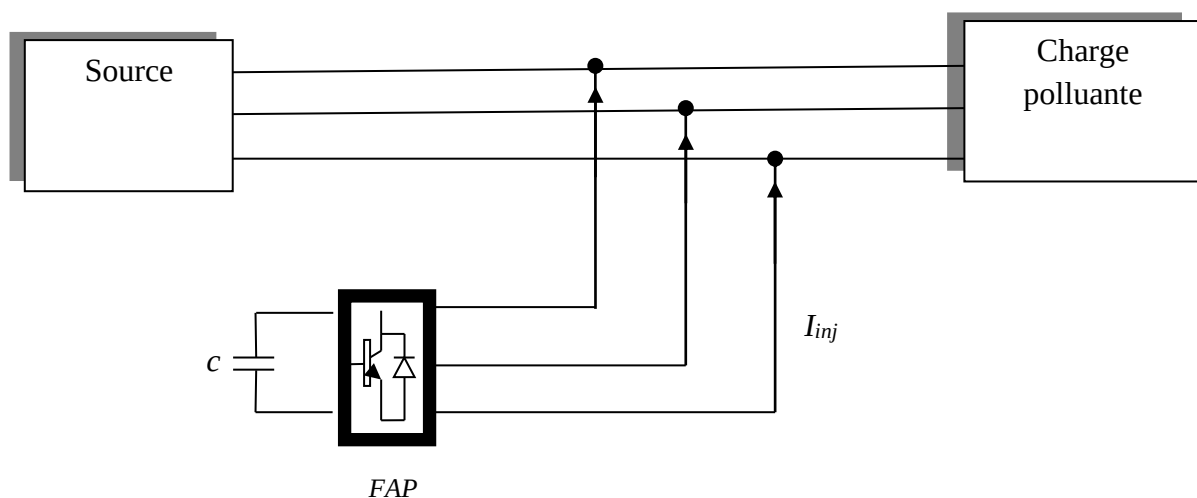
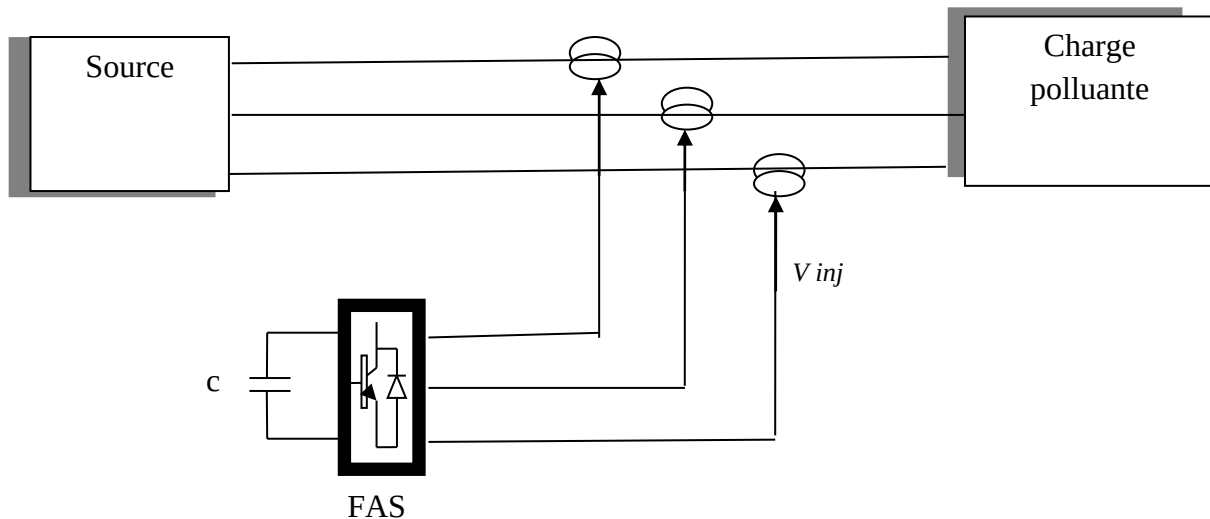


Fig (I .8) : Montage d'un filtre actif parallèle

I.10.1.2 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.

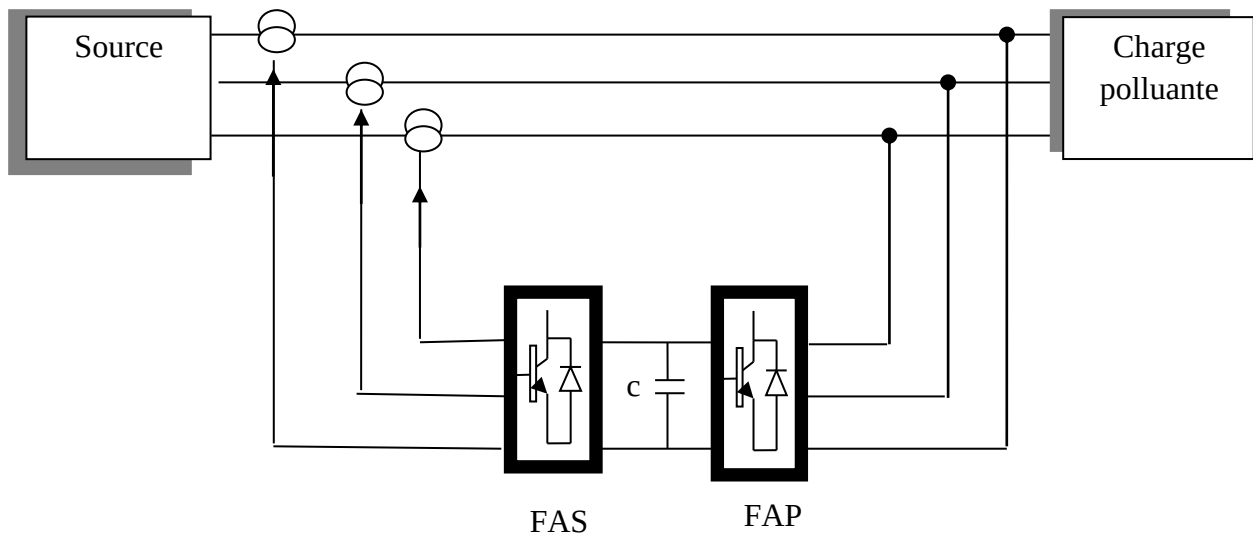


Fig(I.9) :Montage du filtre actif en série

I.10.1.3 Combinaison parallèle série actif

C'est une solution de compensation universelle basée sur le fonctionnement simultané des filtres actifs parallèle et série figure (I.10).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 [6], [9].



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

I.10.1.4 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 [15], 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.*

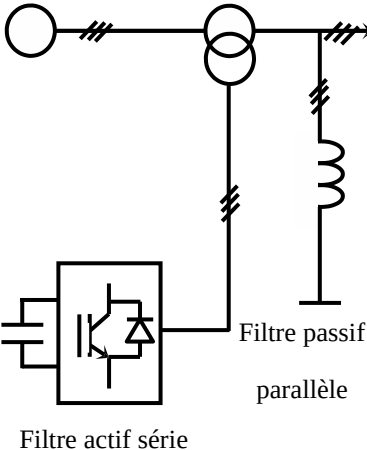
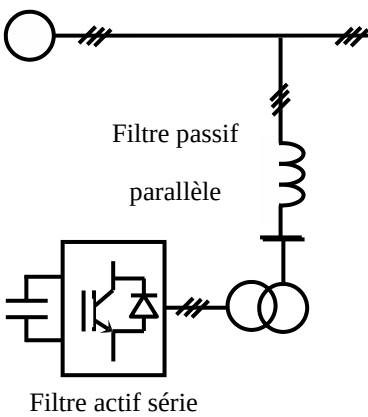
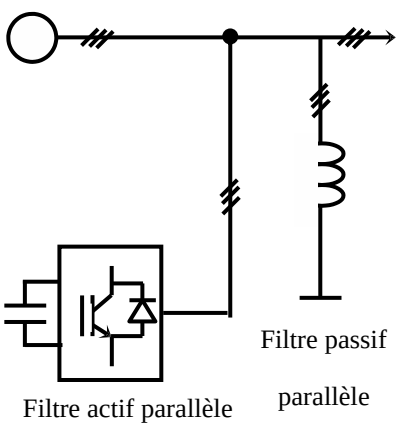
Filtre actif série avec des filtres passifs parallèle.	Filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèle	Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle
 Il empêche les courants harmoniques de circuler vers le réseau et les oblige à passer par les filtres passifs raccordés à leurs fréquences.	 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 travers est plus faible. De plus, le FAS est à l'abri d'un éventuel court-circuit de la charge.	 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 (I.4) :Autre configuration du filtre hybride

I.10.2 Les redresseurs 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 [10].

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

I.10.2.1 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 [16].

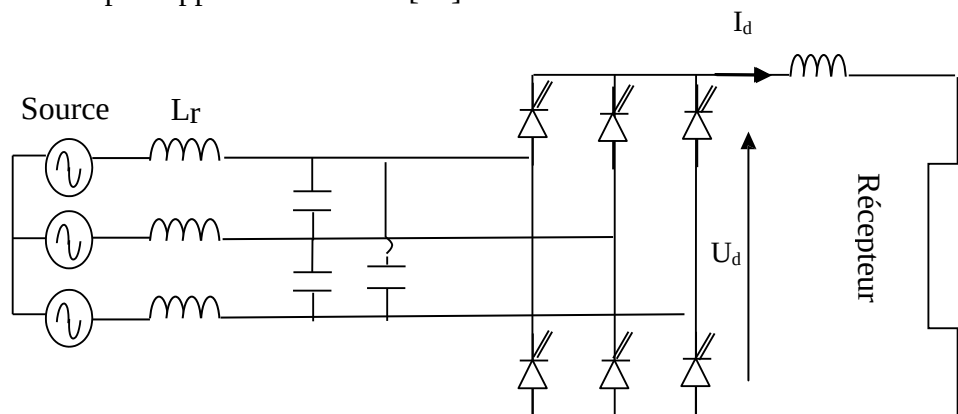


Fig (I.11) : Redresseur de tension

I.10.2.2 Redresseur de 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. [10].

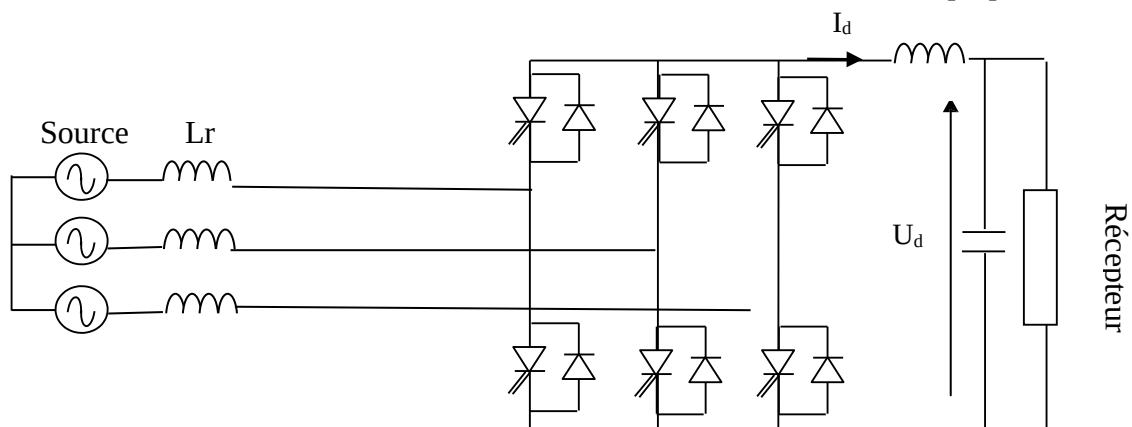


Fig (I.12) : Redresseur de courant

I.11 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 dysfonctionnement 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 qui sera l'objet de ce mémoire.

CHAPITRE II

PRINCIPE DU FILTRAGE ACTIF PARALLELE

II.1 Introduction

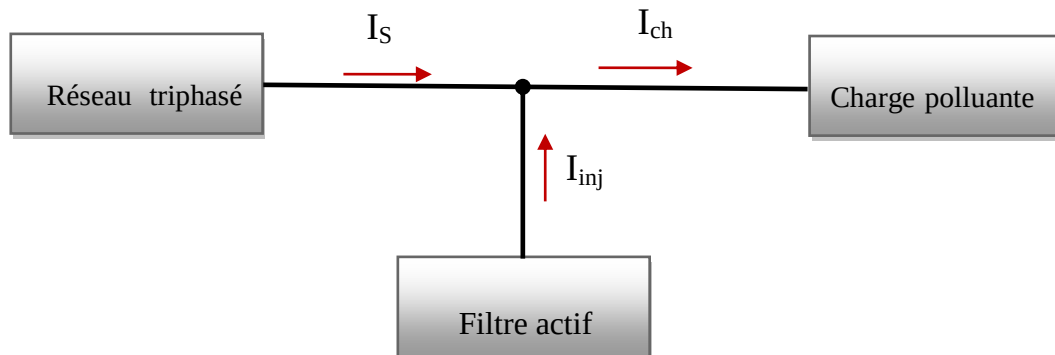
Le filtrage actif parallèle de puissance (FAP) est une solution moderne et adéquate permettant de remédier aux perturbations en courant. Ce compensateur peut être utilisé pour compenser les courants harmoniques, les courants déséquilibrés et le fondamental réactif. Il s'insère entre le réseau et la charge non linéaire. Les performances d'un filtre actif parallèle dépendent en grande partie du type de modulation mis en œuvre pour la commande des interrupteurs, du dimensionnement des éléments de couplage au réseau et du système de stockage (généralement capacitif), de la dynamique des algorithmes d'extraction et de contrôle des courants.[8]

Les objectifs de ce chapitre sont de comprendre la structure du filtre actif parallèle ainsi que son fonctionnement général. Nous examinerons le rôle des multiples éléments le composant et aussi, nous nous ferons présenter ces principaux types de commande.

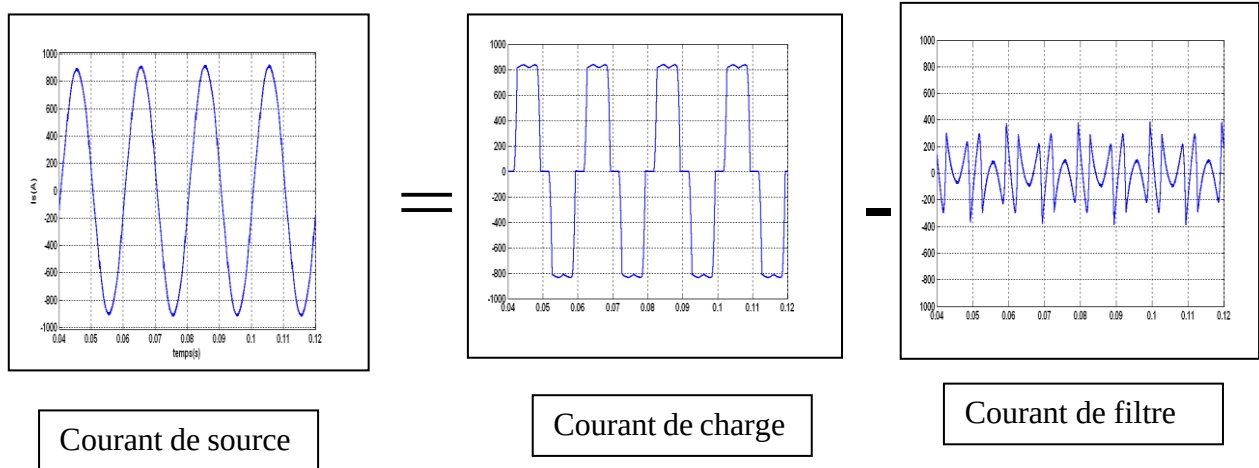
II.2 Principe de filtre actif parallèle

Ce filtre est le plus souvent commandé comme un générateur de courant, il génère des courants harmoniques, en opposition de phase avec le réseau, afin que la somme avec ceux-ci soit nulle. On obtient alors des courants alternatifs au niveau du réseau. Il permet donc de supprimer au point de raccordement tous les harmoniques de courants de charge non linéaire.

En générale, le filtre actif parallèle est utilisé pour la dépollution des réseaux BT et MT. Son impédance totale vis à vis de la source et de la charge lui confère une bonne auto-adaptabilité avec les performances appréciables [10]. Sa structure est la suivante :



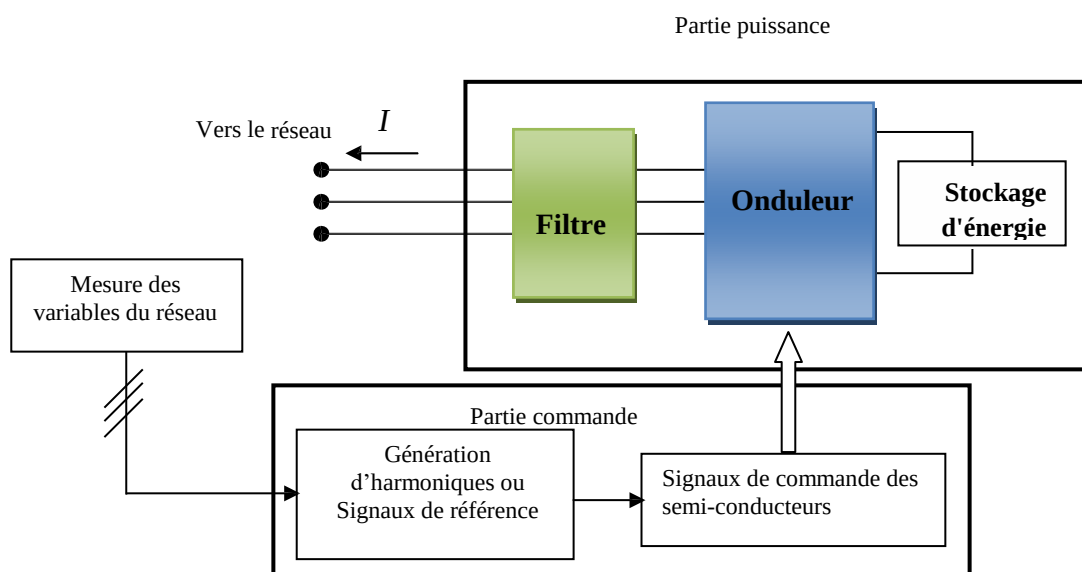
Fig(II.1) : Principe du filtre actif parallèle



Fig(II.2) : Courant de source, charge et filtre.

Nous distinguons donc deux types de filtres actifs parallèles, le filtre actif à structure tension et le filtre actif à structure courant. Nous nous intéressons uniquement au filtrage actif parallèle à structure tension.

Le filtre actif se compose de deux parties distinctes: La partie puissance et la partie commande. La partie puissance est constituée d'un élément de stockage d'énergie, d'un pont onduleur triphasé et d'un filtre de sortie généralement du premier ordre. Pour la partie commande, on a le bloc d'identification des courants de références, le contrôle des courants injectés au réseau ainsi que la commande des interrupteurs.



Fig(II.3) : schéma synoptique d'un filtre actif parallèle

II.3 La partie puissance d'un filtre actif parallèle à structure tension

Le schéma du circuit de puissance d'un filtre actif parallèle à structure tension est donné sur la figure (II.4) On y distingue trois éléments [15]:

- un onduleur de tension.
- un filtre de découplage.
- un élément de stockage capacitif.

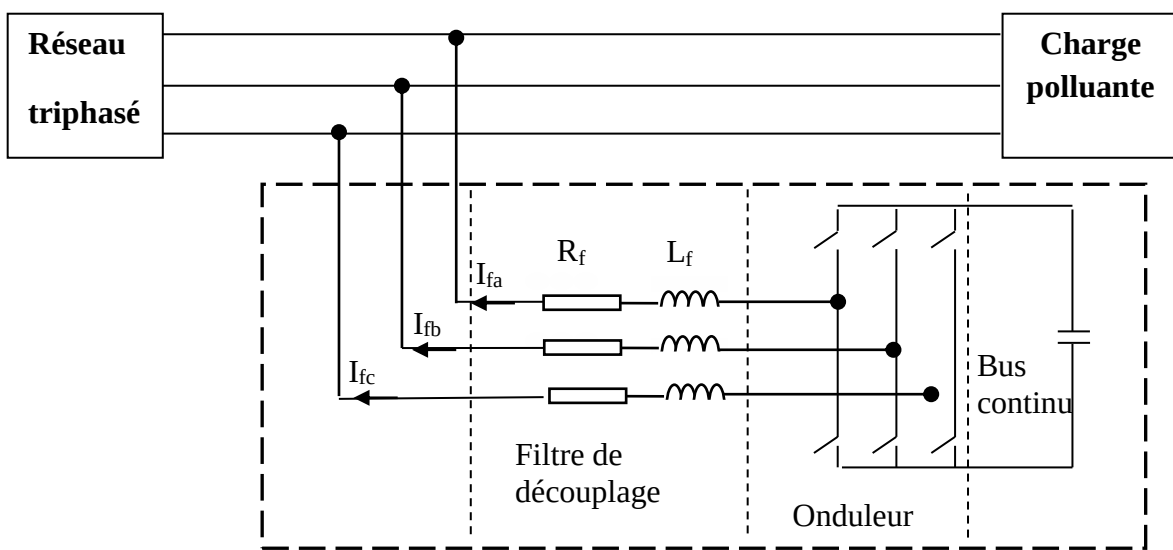


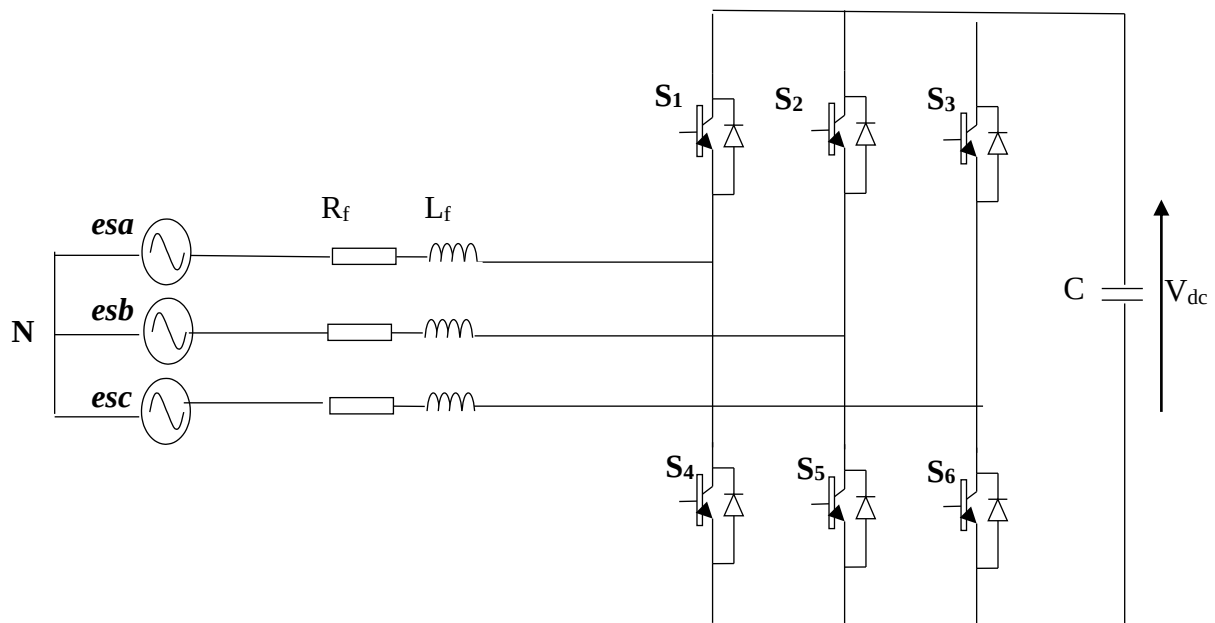
Fig (II.4) : schéma du circuit de puissance d'un filtre actif parallèle à structure tension

La figure (II.5) présente le filtre actif à structure tension où l'onduleur de tension est connecté en parallèle sur le réseau via un filtre de découplage (L_f , R_f). La capacité C se comporte comme une source de tension continue. La tension V_{dc} aux bornes du condensateur doit être positive et maintenue constante par la commande. Ses fluctuations doivent être faibles d'une part pour ne pas dépasser la limite en tension des semi-conducteurs constituant les interrupteurs et d'autre part pour ne pas dégrader les performances du filtre actif.

II.4. 1 L'onduleur de tension

L'onduleur triphasé est constitué d'interrupteurs bidirectionnels en courant. Ils sont réalisés par des semi-conducteurs commandables à l'ouverture et à la fermeture (de type IGBT dans la majorité des cas) montés en antiparallèle avec une diode. Pour cette structure, on doit respecter les contraintes suivantes :

- A un instant donné, un seul interrupteur d'un même bras doit conduire afin d'éviter tout court-circuit de la source de tension,
- Le courant de ligne doit toujours trouver un chemin possible d'où la mets-en antiparallèle de diodes au niveau des interrupteurs.



Fig(II.5) : Filtre actif à structure tension

En théorie, nous commandons les deux semi-conducteurs d'un même bras de façon complémentaire : la conduction de l'un entraîne le blocage de l'autre. Avec cette hypothèse, l'ouverture et la fermeture des interrupteurs de l'onduleur de la figure(II.5) dépendent de l'état de trois signaux de commande (T_1 , T_2 , T_3), définis ci-dessous :

$$T_1 = \begin{cases} 1 & S_1 \text{ fermé et } S_4 \text{ ouvert} \\ 0 & S_4 \text{ fermé et } S_1 \text{ ouvert} \end{cases}$$

$$T_2 = \begin{cases} 1 & S_2 \text{ fermé et } S_5 \text{ ouvert} \\ 0 & S_5 \text{ fermé et } S_2 \text{ ouvert} \end{cases}$$

$$T_3 = \begin{cases} 1 & S_3 \text{ fermé et } S_6 \text{ ouvert} \\ 0 & S_6 \text{ fermé et } S_3 \text{ ouvert} \end{cases}$$

En pratique, les deux semi-conducteurs d'un même bras ne doivent jamais conduire en même temps afin d'éviter de court-circuiter la source de tension ; il faut donc générer un temps d'attente, également appelé temps mort, entre la commande au blocage d'un interrupteur et la commande à l'amorçage de l'autre interrupteur du même bras. Ainsi, à partir des états des interrupteurs présentés par les variables T_1 , T_2 et T_3 , on obtient huit cas possibles pour les 3 tensions de sortie du filtre actif V_{fi} (référencées par rapport au point de mi-tension continue), comme le montre le Tableau (II.1)[2],[6].

V_{fa}	V_{fb}	V_{fc}	T_1	T_2	T_3	Cas N°
0	0	0	0	0	0	0
$2V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	1	0	0	1
$-V_{dc}/3$	$2V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	0	1	0	2
$V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$	$-2V_{dc}/3$	1	1	0	3
$-V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	$2V_{dc}/3$	0	0	1	4
$V_{dc}/3$	$-2V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$	1	0	1	5
$-2V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$	0	1	1	6
0	0	0	1	1	1	7

Tableau (II.1):Tensions en sortie de l'onduleur.

II.4.2 Filtre de découplage

Le but du filtre de découplage est de permettre la connexion de l'onduleur de tension au réseau électrique qui est très souvent considéré comme une source de courant qui génère des courants harmoniques à partir de la différence des tensions entre la sortie du pont onduleur et le réseau [4]. Ce filtre est un filtre qui limite certes la dynamique du courant mais réduit en même temps la propagation sur le réseau électrique des composantes dues aux commutations.

Dans ce travail, nous avons utilisé un filtre entre l'onduleur et le réseau électrique qui se compose d'une inductance L_f de résistance interne R_f , comme le montre la figure (II.5). Notons toutefois que des filtres de découplage du troisième ordre, de type L-C-L, pourraient également être utilisés. Dans notre étude, nous emploierons ce filtre du premier ordre. [2],[6].

II.4.3 Système de stockage d'énergie

Le stockage de l'énergie du côté continu se fait souvent par un système de stockage capacitif représenté par un condensateur C_{dc} qui joue le rôle d'une source de tension continue V_{dc} . Le choix des paramètres du système de stockage (V_{dc} et C_{dc}) se répercute sur la dynamique et sur la qualité de compensation du filtre actif parallèle. En effet, une tension V_{dc} élevée améliore la dynamique du filtre actif. De plus, les ondulations de la tension continue V_{dc} , causées par les courants engendrés par le filtre actif et limitées par le choix de C_{dc} , peuvent dégrader la qualité de compensation du filtre actif parallèle. Ces fluctuations sont d'autant plus importantes que l'amplitude du courant du filtre est grande et que sa fréquence est faible. Le condensateur du côté continu a deux fonctionnalités principales :

Maintenir la tension avec un faible taux d'ondulation en régime permanent, être un réservoir qui sert à fournir la différence d'énergie de la charge et la source durant le régime transitoire.

En régime permanent, la puissance active fournie par la source doit être égale à la puissance active absorbée par la charge plus une faible puissance active qui sert à compenser les pertes dans le filtre. La tension du côté continu peut être maintenue à une valeur de référence désirée.

Néanmoins, quand les conditions de charge changent, la puissance transite entre la source et la charge est perturbée et la différence d'énergie est compensée par le condensateur du côté continu ce qui éloigne cette tension de sa référence. Pour satisfaire les fonctionnalités du filtre actif, la valeur maximale du courant de référence doit être ajusté proportionnellement à l'énergie

fournie par la source. Si la tension aux bornes du condensateur a été régulée et a atteint sa tension de référence, l'énergie fournie par la source est supposée être égale à l'énergie consommée par la charge. La valeur maximale du courant de référence est obtenue par régulation de la tension cotée continue.[17]

II.5 Contrôle des courants du filtre actif (partie commande)

Les performances du filtre actif et notamment la diminution du THD du courant de source sont certes liées aux performances de la génération des références de courants harmoniques, mais dépendent également de la stratégie de commande de l'onduleur de tension (poursuite des références de courant). [2]

Pour maintenir le courant à la sortie du filtre actif autour de sa référence, trois techniques de commande peuvent être utilisées :

- La commande par hystérésis.
- La commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI).
- La commande par MLI vectorielle .

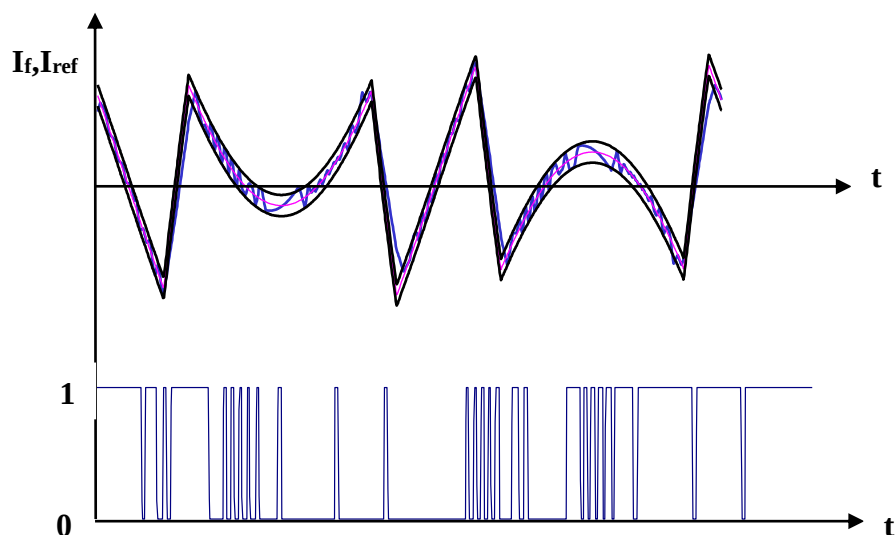
L'objectif de la commande, que se soit à MLI ou par hystérésis, est de générer les ordres d'ouverture/fermeture des interrupteurs de manière à ce que le courant du filtre actif soit le plus proche de sa référence [15].

II.5.1 Commande par hystérésis

La commande par hystérésis appelée tout ou rien, utilise l'erreur existante entre le signal de référence et la mesure du signal de sortie. L'erreur est comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis ,une règle pratique consiste à la prendre à 5% du courant nominal[15] . Chaque sortie de ce gabarit entraîne un changement de configuration des interrupteurs figure (II.7). Ce système de contrôle est caractérisé par une fréquence de commutation variable. La mise en œuvre de cette stratégie de contrôle est relativement simple.

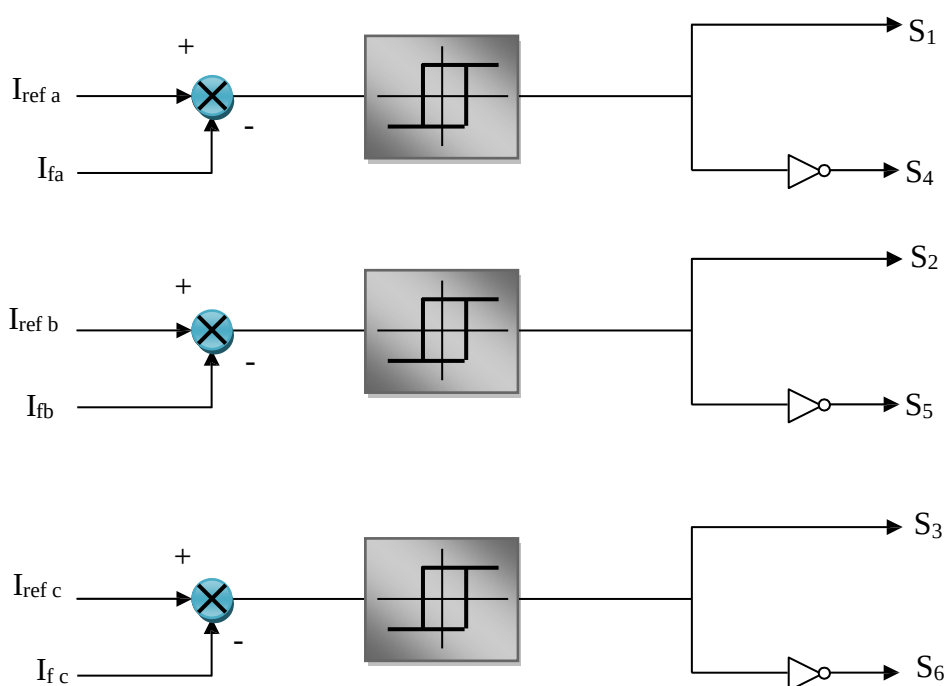
Le choix de la bande d'hystérésis doit tenir compte d'un certain nombre de condition liées au fonctionnement de l'onduleur, parmi lesquelles la fréquence de commutation admissible pour les composants semi-conducteurs.

Dans notre mémoire on va utiliser ce type de commande car les performances de compensation par la commande hystérésis sont meilleures, en dynamique et en statique[8].



Fig(II.6) : Bande d'hystérésis et signal de commande d'un interrupteur

Le schéma synoptique de la commande des courants du filtre actif par des régulateurs à hystérésis est donné par la figure (II.7) :

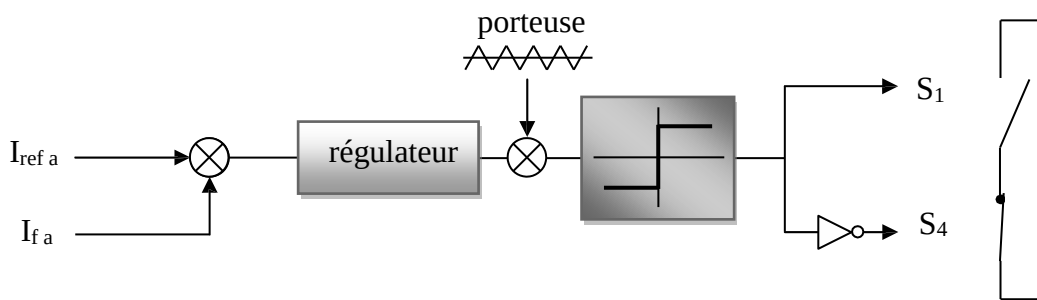


Fig(II.7) : Principe de la commande du courant par hystérésis.

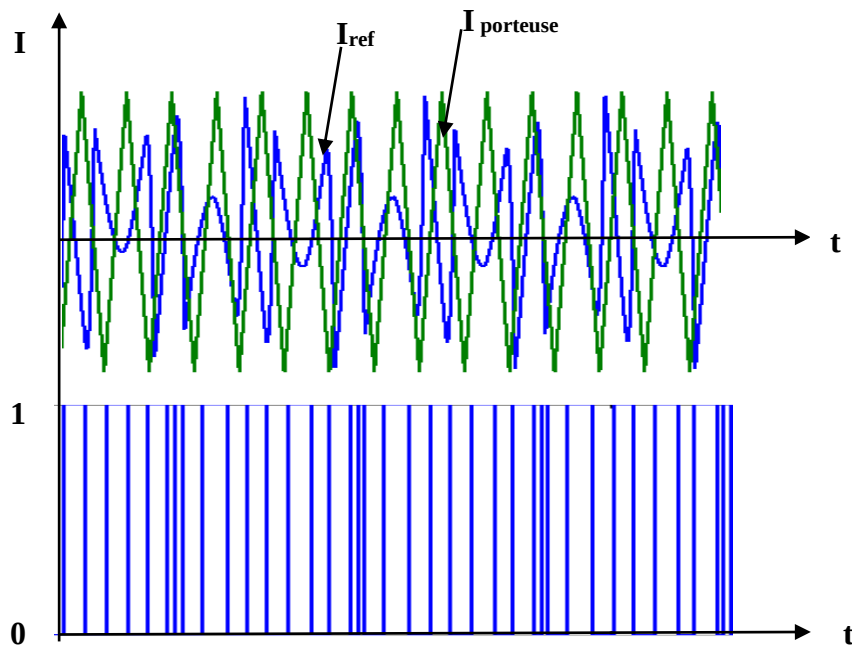
II.5.2 Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI)

La technique de commande par MLI : **la commande par modulation de largeur d'impulsion** résout le problème de la maîtrise de la fréquence de commutation en fonctionnant avec une fréquence fixe facile à filtrer en aval de l'onduleur.

La plus simple et la plus connue des modulations de largeur d'impulsion est sans doute la MLI à échantillonnage naturel, dite *MLI intersective*. Cette technique de commande met en œuvre d'abord un régulateur qui détermine la tension de référence de l'onduleur (modulatrice) à partir de l'écart entre le courant mesuré et sa référence. Cette dernière est ensuite comparée avec un signal triangulaire (porteuse à fréquence élevée fixant la fréquence de commutation). La sortie du comparateur fournit l'ordre de commande des interrupteurs. Le Schéma de principe est donné par la figure (II.8).[15]



Fig(II.8) : Principe de commande par MLI



Fig(II.9) : Signal de commande et référence

II.6 Calcul des paramètres du système (réseau-filtre actif-charge polluante):

Le réseau a pour puissance apparente nominale S_n et tension efficace simple V_n (la tension efficace composée $U_n = \sqrt{3} V_n$).

$$\text{Le courant nominale } I_n \text{ est égal donc à: } I_n = \frac{S_n}{\sqrt{3} U_n} = \frac{S_n}{3 V_n} \quad (\text{II.1})$$

$$\text{L'impédance nominale du réseau est donnée par : } Z_n = \frac{U_n^2}{S_n} \quad (\text{II.2})$$

$$\text{L'impédance } Z_{cc} \text{ de court-circuit du réseau est généralement égal à 2\% de } Z_n \text{ cette impédance est exprimée en complexe : } Z_{cc} = R_{cc} + jL_{cc}\omega \quad (\text{II.3})$$

La résistance de court-circuit R_{cc} a pour valeur 10% de La réactance du court-circuit $L_{cc}\omega$.

$$Z_{cc} = R_{cc} + jL_{cc}\omega = R_{cc} + j10. R_{cc} = R_{cc} \cdot (1 + j10) \quad (\text{II.4})$$

En module:

$$|Z_{cc}| = \sqrt{101} R_{cc} \Rightarrow R_{cc} = \frac{1}{\sqrt{101}} |Z_{cc}| \quad (\text{II.5})$$

Et par la suite:

$$L_{cc}\omega = 10. \frac{1}{\omega\sqrt{101}} |Z_{cc}| \quad (\text{II.6})$$

Avec: $\omega = 2\pi \cdot f$

f : est la fréquence du fondamental ($f=50$ HZ).

Les simulations montrent que pour obtenir une bonne THD et une meilleure dynamique, Z_f doit varier entre 4 et 8 fois Z_{cc}

$$Z_f = 4 Z_{cc} = R_f + jL_f\omega \quad (\text{II.7})$$

De (II.3), (II.5), (II.6) et (II.7). On déduit les valeurs de R_f et L_f

$$R_f = 4 R_{cc} = 4 \frac{1}{\sqrt{101}} |Z_{cc}| \quad (\text{II.8})$$

$$L_f = 4 L_{cc} = 4.10 \frac{1}{\omega\sqrt{101}} |Z_{cc}|. \quad (\text{II.9})$$

La capacité du condensateur est donnée par :

$$C_f = \frac{I_h}{\varepsilon V_{dc} \omega_h} \quad (II.10)$$

Où:

I_h : l'amplitude du courant harmonique le plus faible à compenser .

ε : le taux d'ondulation de la tension V_{dc} , généralement égal à 5% .

ω_h : la pulsation de l'harmonique du rang le plus élevé à compenser .

La tension redressée par le redresseur constituée des diodes mises en antiparallèle avec les IGBTs est donnée par :

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{6}V_{eff}}{\pi} \quad (II.11)$$

La tension de référence doit être légèrement supérieure à V_{dc} que le filtre puisse débiter sur le réseau . [18]

II.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons d'abord étudié le filtre actif parallèle à structure tension, connecté en parallèle sur le réseau afin d'injecter les courants permettant d'éliminer la pollution harmonique des charges non linéaires. Nous avons identifié les différents éléments de la structure qu'on a divisée en deux grandes parties : partie puissance et partie commande.

Enfin, nous avons présenté deux types de contrôle du courant du filtre actif : le contrôle par modulation de largeurs d'impulsions ou MLI et le contrôle par hystérésis .

CHAPITRE III

METHODES D'IDENTIFICATION DES COURANTS HARMONIQUES

III.1 Introduction

L'identification des harmoniques est une étape très importante dans le processus de compensation active. En effet, le système de commande, même s'il est très efficace, ne pourra pas à lui seul effectuer des corrections suffisantes si les harmoniques parasites sont mal identifiées. Pour cette raison, de nombreuses méthodes d'identification ont été développées dans la littérature [9].

III.2 Généralités sur les méthodes d'identification des courants harmoniques

Les méthodes d'identifications déterminent les perturbations qui agissent sur le courant, laquelle identification servira à générer les références nécessaires aux régulateurs. Une boucle externe d'identification des perturbations du courant est utilisée. La sortie de cette boucle est l'entrée de la boucle interne de contrôle (référence de courant).

III.2.1 Classification des méthodes d'identification

La qualité du filtrage réside dans l'efficacité de la méthode utilisée pour l'identification des courants harmoniques. Les méthodes d'identification sont classées en deux groupes : « méthodes du domaine fréquentiel et méthode du domaine temporel ». [15]

III.2.1.1 Méthodes du domaine fréquentiel

Ce type d'approche utilise la transformation de Fourier rapide, pour extraire les harmoniques du courant de charge. Cette méthode est particulièrement adaptée aux charges dont le contenu harmonique varie lentement. Elle présente également l'avantage de sélectionner chaque harmonique individuellement et permet ainsi de ne compenser que les courants harmoniques prépondérants. Cependant, cette méthode nécessite des calculs lourds afin d'identifier ces courants harmoniques. Pour cette raison, les méthodes fréquentielles ne sont pas utilisées en pratique car la charge polluante peut généralement varier rapidement au cours du temps. [19]

III.2.1.2 Méthodes du domaine temporel

Les méthodes du domaine temporel permettent une réponse plus rapide et requièrent moins d'opérations que les méthodes précédentes. Le principe de ce type de méthodes est la séparation du fondamental ou de certains harmoniques du reste des harmoniques par filtrage.

Dans ce chapitre, nous ferons une étude détaillée de quatre méthodes d'identification que nous présentons leurs algorithmes de calcul.

III.3 Méthode d'identification du filtre coupe-bande (notch filtre)

C'est le plus simple des algorithmes du calcul des courants de référence, comme l'illustre le diagramme représenté sur la figure (III.1).

Dans ce type de commande le courant de charge est filtré par un filtre coupe-bande qui parfois est appelé filtre « notch ». Ces filtres coupe-bande éliminent la composante fondamentale tout en laissant passer les composantes harmoniques. Ils ont, par conséquent, la même fréquence de coupure. Le courant de référence ainsi créé permet la génération des signaux de commande des semi-conducteurs de l'onduleur [20].

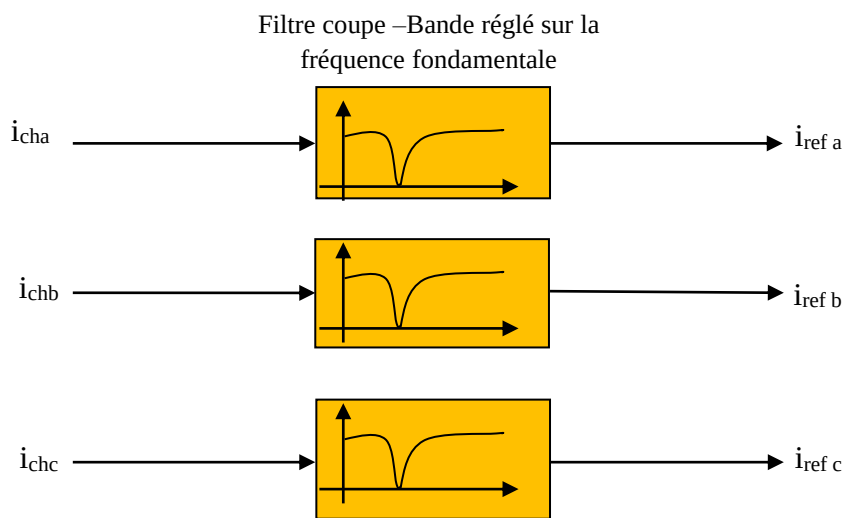


Fig (III.1) : Méthode d'identification du filtre coupe-bande.

Cette méthode possède les quelques caractéristiques suivantes :

- ❖ Elle s'applique sans problème aux systèmes monophasé, biphasé ou triphasé, équilibré ou non.
- ❖ Possède un bon temps de réponse lors de régime transitoire.

- ❖ Le nombre d'harmoniques compensé dépend de la bande passante du semi-conducteur composant l'onduleur du filtre actif.
- ❖ Méthode de calcul simple.

III.4 Méthode de la puissance instantanée réelle et imaginaire (PIRI)

La méthode des puissances instantanées introduite par H. Akagi exploite la transformation de Concordia des tensions simples et des courants de ligne, afin de calculer les puissances réelle et imaginaire instantanées. La composante fondamentale est transformée en une composante continue et les composantes harmoniques en composantes alternatives. Cette transformation est nécessaire si nous voulons que l'élimination de la composante continue soit facile à mettre en œuvre. Son principe est énoncé comme suit [20]:

Soient respectivement les tensions simples et les courants de ligne d'un système :

$$[V_s] = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad [I_{ch}] = \begin{bmatrix} i_{cha} \\ i_{chb} \\ i_{chc} \end{bmatrix} \quad (\text{III.1})$$

La transformation $\alpha, \beta, 0$ triphasées permet d'écrire les relations suivantes:

$$\begin{bmatrix} V_o \\ V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{III.2})$$

$$\begin{bmatrix} i_o \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{cha} \\ i_{chb} \\ i_{chc} \end{bmatrix} \quad (\text{III.3})$$

Les composantes avec l'indice (o) représentent les séquences homopolaires du système triphasé de courant et de tension.

Les puissances réelles et imaginaires instantanées, respectivement p et q sont données par la relation suivante :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_\alpha & V_\beta \\ -V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{III.4})$$

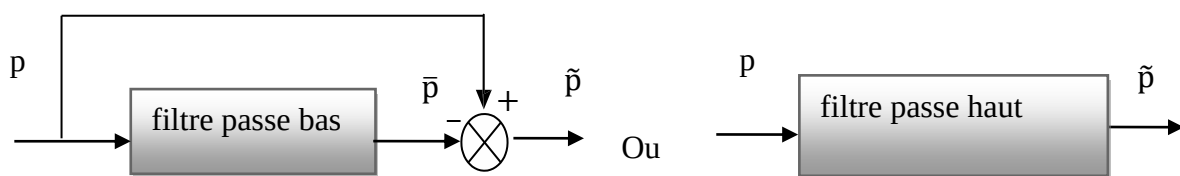
La puissance q ne représente pas la puissance instantanée conventionnelle (puissance réactive) dans le sens où elle est le résultat du produit d'une tension définie sur un axe en quadrature, contrairement à la puissance réactive qui ne considère que la fréquence fondamentale. La puissance imaginaire prend en compte toutes les composantes harmoniques du courant de la tension. C'est pour cette raison que ce nouveau concept est appelé « puissance imaginaire instantanée ».

Les puissances p et q peuvent être décomposées comme suit :

$$p = \bar{p} + \tilde{p} \quad \text{et} \quad q = \bar{q} + \tilde{q}$$

Où dans le cas sinusoïdal : $\bar{p}$ la partie continue liée à la composante fondamentale active du courant et $\bar{q}$ la partie continue liée à la composante fondamentale réactive du courant. Alors que $\tilde{p}$ et $\tilde{q}$ sont les parties fluctuantes liées à la sommes des composantes perturbatrices du courant et de la tension.

Un filtre passe bas dans l'espace des puissances permet de séparer la composante fondamentale (autrement dit la partie continue), des composantes perturbatrices (la partie alternative). Deux filtres sont nécessaires, le premier pour isoler la partie $\bar{p}$ de la puissance active instantanée, le second pour isoler la partie $\bar{q}$ de la puissance réactive instantanée. Les deux filtres sont dimensionnés en tenant compte de la décomposition fréquentielle des puissances dans le repère diphasé. Cette séparation peut être réalisée en utilisant l'un des deux méthodes suivantes :



Fig(III.2) : Schéma de principe des filtres utilisés pour l'extraction des composantes alternatives de P ou q .

La fréquence d'accord de ce filtre (passe bas) 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. C'est ce qui nous a amené à faire un compromis entre la performance dynamique et la performance basses fréquences.

L'inverse de l'équation (III.4) de la puissance active et réactive permet d'établir la relation (III.5) des courants I_α et I_β :

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (\text{III.5})$$

En remplaçant les puissances p et q par leurs parties continues et alternatives, on obtient

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{p} \\ 0 \end{bmatrix}}_{\text{Courant Actif}} + \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{q} \end{bmatrix}}_{\text{Courant réactif}} + \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix}}_{\text{Courants Harmoniques}} \quad (\text{III.6})$$

Avec $\Delta = v_\alpha^2 + v_\beta^2$.

Suivant la fonction que nous donnons au filtre actif de puissance, nous pouvons compenser soit les harmonique de courant et l'énergie réactive ou uniquement l'un des deux .Le tableau suivant résume les modes de compensation possibles .[21]

	Compensation des harmoniques de courant	Compensation de l'énergie réactive	Compensation des harmoniques de courant et de l'énergie réactive
Paramètre de contrôle	$p_f = \bar{p}$ et $q_f = \bar{q}$	$p_f = 0$ et $q_f = \bar{q}$	$p_f = \bar{p}$ et $q_f = q$

Tableau (III.1) : les modes de compensation possibles de la commande PIRI

Si nous voulons compenser les harmonique de courant le calcul des courants perturbateurs dans le repère diphasé (α, β) est donnée par :

$$\begin{bmatrix} \tilde{i}_\alpha \\ \tilde{i}_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (\text{III.7})$$

Grace à la Transformation de Concordia inverse, les parties alternatives des puissances permettent de déduire les courants perturbateurs triphasés. Ces courants représentent les perturbations et deviennent les courants de référence qui sont à injecter en opposition de phase sur le réseau électrique pour éliminer les harmoniques.

$$\begin{bmatrix} i_{\text{refa}} \\ i_{\text{refb}} \\ i_{\text{refc}} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{i}_\alpha \\ \tilde{i}_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{III.8})$$

Le bloc fonctionnel ci-dessous, explique et résume d'une façon implicite le procédé de calcul des courants de référence par cette méthode.

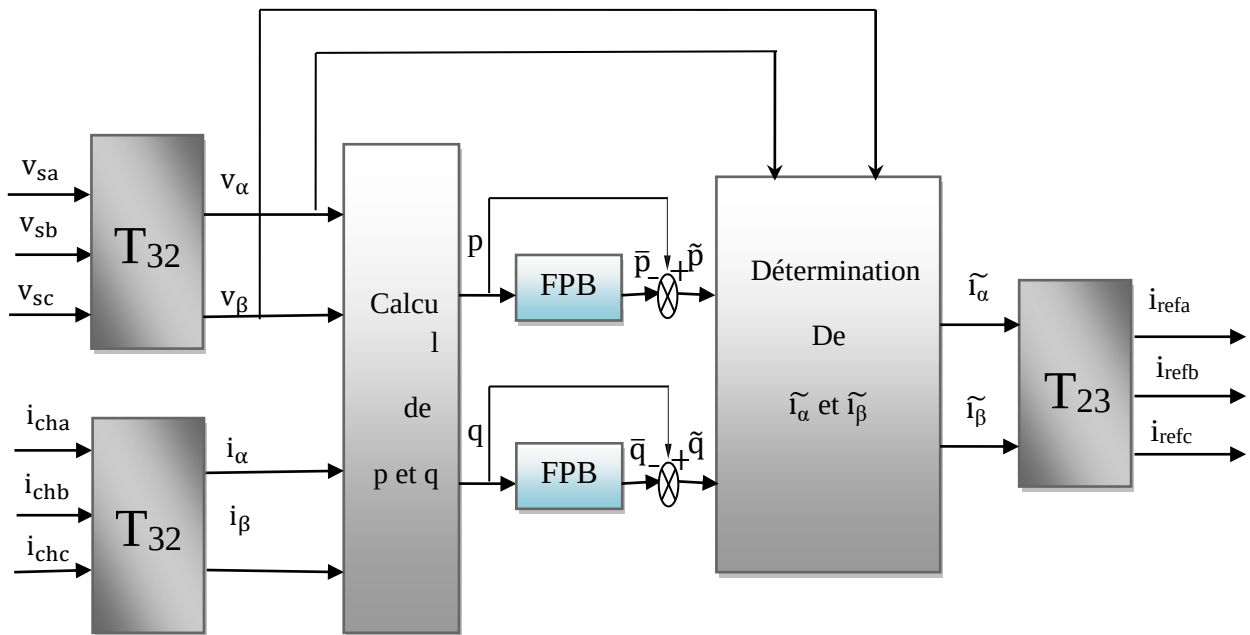


Fig (III.3) : Algorithme d'extraction des courants de références par PIRI

Cette méthode possède les caractéristiques suivantes :

- La méthode des PIRI classique utilise un filtre passe bas pour séparer les composantes des puissances active et réactive et a besoin d'un système d'extraction de la tension direct du réseau électrique.
- Elle n'est pas applicable pour les systèmes monophasés.
- La tension du réseau doit être saine (sinusoïdale et équilibrée), sinon la méthode des puissances instantanées PIRI n'est pas applicable puisque la tension du réseau est perturbée et/ou déformée, et afin de généraliser d'application de la méthode PIRI que nous avons adoptée à tout type de tension.

III.5 Méthode du référentiel synchrone

Cette méthode a été introduite par Bhattacharya, elle exploite également la transformation de Concordia mais elle appliquée uniquement aux courants de ligne $i_{cha}(t)$, $i_{chb}(t)$, $i_{chc}(t)$. Ensuite, une seconde transformation est opérée pour passer des courants de ligne en d-q, ce qui permet de transformer la composante fondamentale du courant en une composante continue et composantes harmoniques du courant en des composantes alternatives [21]. Son principe est énoncé ci-après.

La transformation des coordonnées $a-b-c$ du courant en coordonnées $d-q$ et ce, à l'aide de la transformée de Park, En générant à l'aide d'une PLL les signaux $\cos(\theta)$ et $\sin(\theta)$ à partir de la tension " fondamentale" du réseau,.

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \sin\theta & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{cha} \\ i_{chb} \\ i_{chc} \end{bmatrix} \quad (III.9)$$

L'élimination de la composante continue est réalisée par l'ajout d'un filtre FPH ou FPB (Fig(II.2)) . L'obtention du courant de référence s'obtient en effectuant la transformation inverse de Park toujours en synchronisme avec la fréquence du réseau [19], ceci est représenté par la figure (III.4).

$$\begin{bmatrix} i_{refa} \\ i_{refb} \\ i_{refc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin\theta & \cos\theta \\ \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{i}_d \\ \tilde{i}_q \end{bmatrix} \quad (III.10)$$

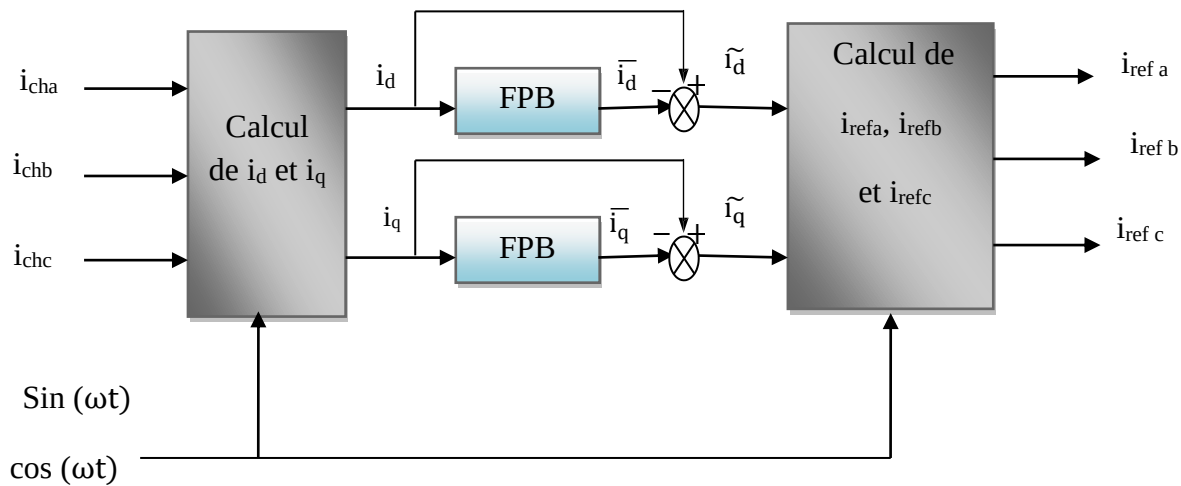


Fig (III.4) : Méthode du référentiel synchrone

Cet algorithme possède les quelques caractéristiques suivantes [20]:

- Tout comme la méthode des puissances instantanées, cette méthode est inhérente aux systèmes triphasés.
- Elle peut être appliquée aussi bien aux systèmes triphasés équilibrés qu'aux systèmes triphasés avec neutre, déséquilibrés.
- Elle est basée sur des valeurs instantanées, ce qui lui donne de bons temps de réponse dynamique.
- Le nombre d'harmoniques compensé dépend de la bande passante de semi-conducteurs composant l'onduleur du filtre actif.

- Méthode de calcul simple.
- Découplage net entre le fondamental et les composantes harmoniques.
- l'algorithme est assez complexe et exige un circuit PLL pour fonctionner correctement.

III.6 Méthode tri-monophasée

La méthode tri monophasé que nous avons développée, permet de traiter les trois phases de manière indépendante. Le principe est basé sur l'estimation de l'amplitude de la composante fondamentale active i_{chfa} et de composante fondamentale réactive i_{chfr} du courant i_{cha} absorbé par la charge [22], [07] Elle est applicable aux systèmes monophasés et triphasés, pour les courants harmoniques générés par la charge.

Considérons le courant i_{cha} absorbé par la charge non-linéaire sur la première phase, il est exprimé par:

$$i_{cha}(\theta_s) = \sum_{n=1}^{\infty} (i_{ch} \sin(h \cdot \theta_s - \varphi_1)) = i_{cha} \cdot \sin(\theta_s - \varphi_1) + \sum_{h=2}^{\infty} i_{cha} \sin(h \cdot \theta_s - \varphi_h) \quad (III.11)$$

Avec : $\theta_s = \omega t$

On rappelle que la composante fondamentale de la tension au point de raccordement du filtre actif sur la première phase, est définie par:

$$e_{sa}(t) = \sqrt{2} \cdot E \cdot \sin(\theta_s) \quad (III.12)$$

En multipliant L'équation (III.11) respectivement par $\sin(\theta_s)$ et $\cos(\theta_s)$ nous obtenons:

$$i_{cha}(\theta_s) \sin(\theta_s) = \frac{i_{cha}}{2} \cdot \cos(\varphi_1) - \frac{i_{cha}}{2} \cdot \cos(2\theta_s - \varphi_1) + \sin(\theta_s) \sum_{h=2}^{\infty} i_{cha} \sin(h \cdot \theta_s - \varphi_h) \quad (III.13)$$

$$i_{cha}(\theta_s) \cos(\theta_s) = -\frac{i_{cha}}{2} \cdot \sin(\varphi_1) + \frac{i_{cha}}{2} \cdot \sin(2\theta_s - \varphi_1) + \cos(\theta_s) \sum_{h=2}^{\infty} i_{cha} \sin(h \cdot \theta_s - \varphi_h) \quad (III.14)$$

D'après les relations (III.13) et (III.14) nous constatons que seules les composantes continues sont proportionnelles respectivement à l'amplitude du courant fondamentale actif et à l'amplitude du courant réactif. Les premières composantes alternatives ont une fréquence égale à deux fois la fréquence du réseau. Ces dernières seront donc filtrées à l'aide d'un filtre passe-bas.

Après le filtrage, on obtient :

$$[i_{cha} \sin(\theta_s)]_{\text{filtre}} = \frac{i_{cha}}{2} \cos(\varphi_1) \quad (III.15)$$

$$[i_{cha} \cos(\theta_s)]_{\text{filtre}} = -\frac{i_{cha}}{2} \sin(\varphi_1) \quad (\text{III.16})$$

On peut alors reconstituer le courant fondamental en multipliant respectivement les deux expressions précédentes par $2\sin(\theta_s)$ et $2\cos(\theta_s)$:

$$i_{chaf} = i_{cha} \cos(\varphi_1) \sin(\theta_s) - i_{cha} \sin(\varphi_1) \cos(\theta_s) = i_{chafa} + i_{chafr} = i_{cha} \sin(\theta_s - \varphi_1) \quad (\text{III.17})$$

La figure ci-dessous illustre l'algorithme d'extraction du courant fondamental selon la méthode tri-monophasée.

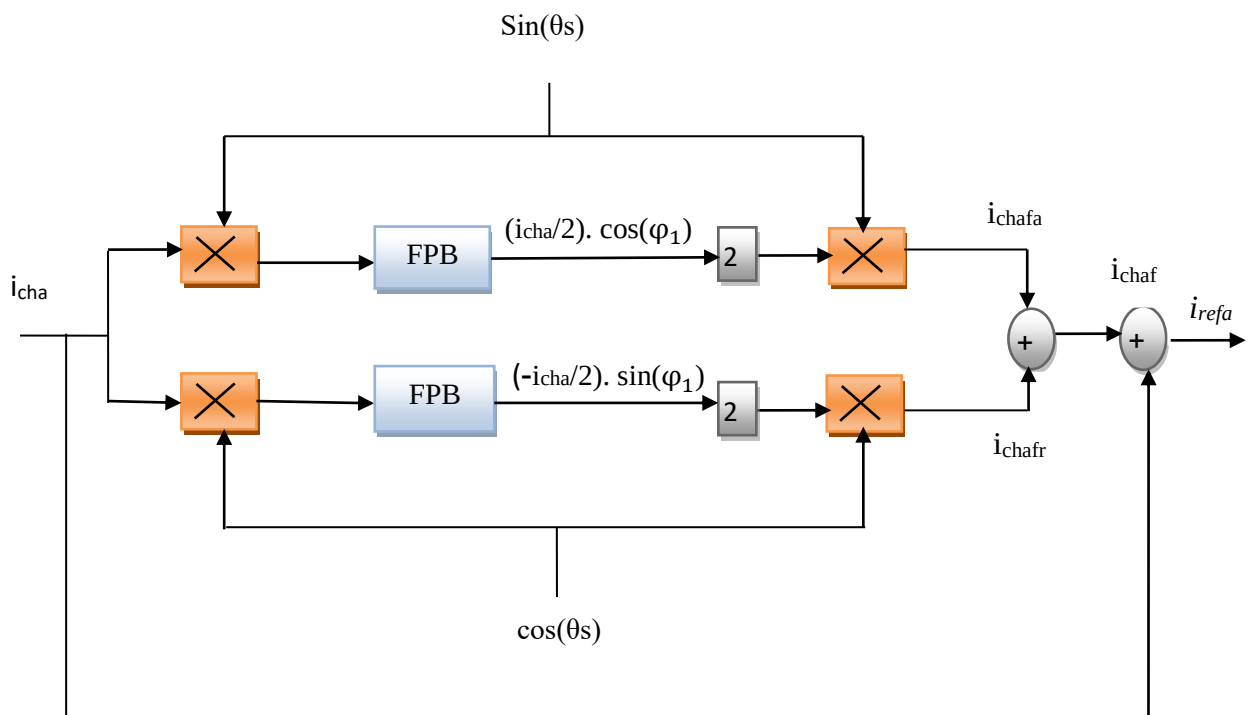


Fig (III.5) : Méthode tri-monophasée

II.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les quatre méthodes d'identification pour l'extraction des courants harmoniques à partir de la connaissance de différentes composantes du courant absorbé par la charge non linéaire. Par conséquent, dans la suite de notre mémoire, nous présenterons les résultats de simulation d'un filtre actif parallèle avec ces différentes méthodes d'identification des courants harmoniques d'une charge polluante à partir de l'environnement Matlab .

CHAPITRE IV

MODELISATION ET SIMULATION NUMERIQUE

IV.1 Introduction

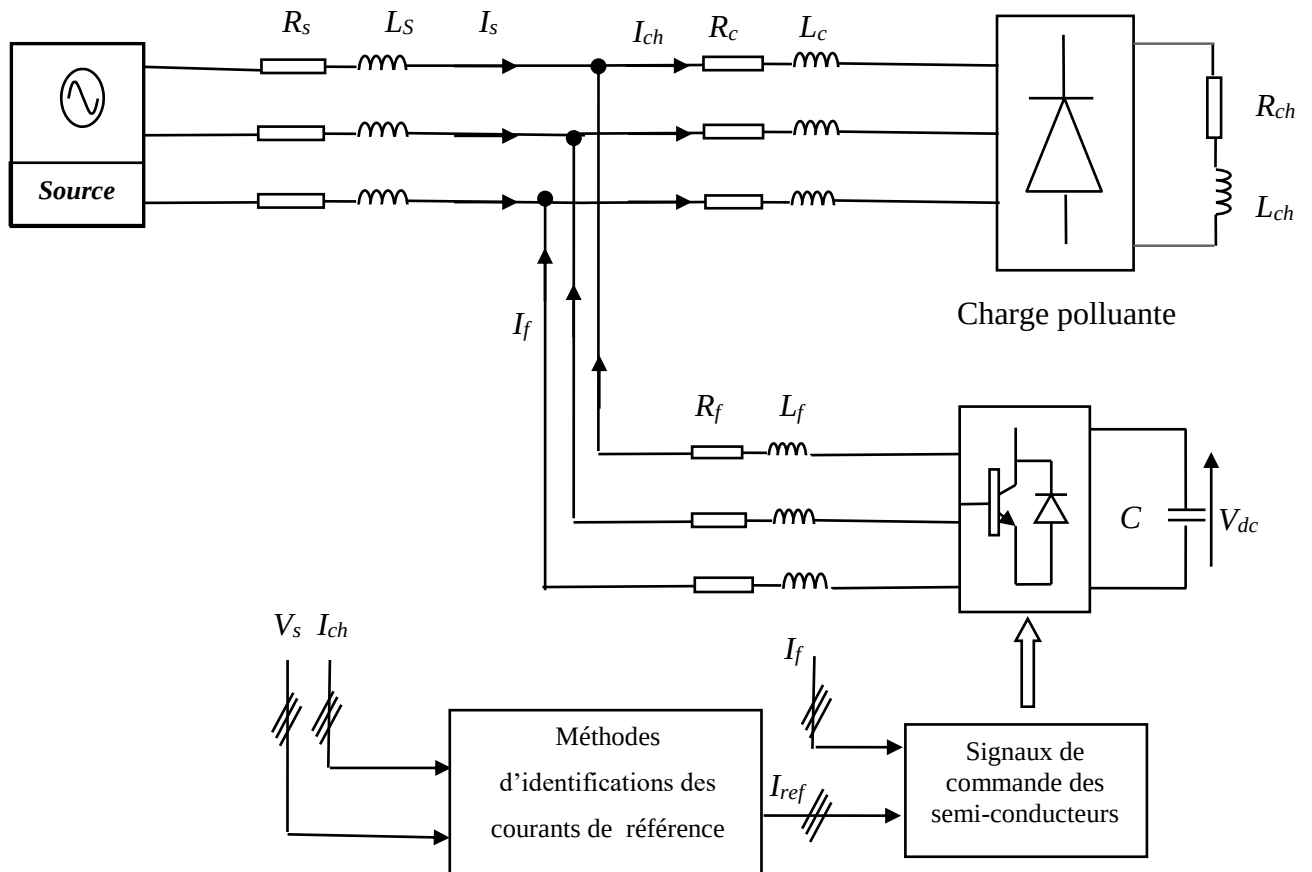
Aujourd'hui la simulation numérique est l'outil le plus fiable dans presque tous les domaines. Elle permet, d'analyser et donner une vue bien précise sur les systèmes avant d'entamer la partie réalisation.

Dans ce chapitre, nous allons présenter une analyse par simulation numérique sous l'environnement **Matlab- Simulink** de l'ensemble : réseau – redresseur - filtre actif, avec les quatre méthodes d'identification en comparant les résultats obtenus.

IV.2 Schéma synoptique de l'association filtre actif-réseau-charge polluante

Le filtre actif parallèle n'est rien d'autre qu'un onduleur de tension commandé en courant qui possède une source dite flottante (condensateur) et qui est connecté au réseau perturbé par un filtre inductif.

La structure générale d'un filtre actif parallèle peut se résumer sous la forme décrite dans la figure (IV.1) [8]

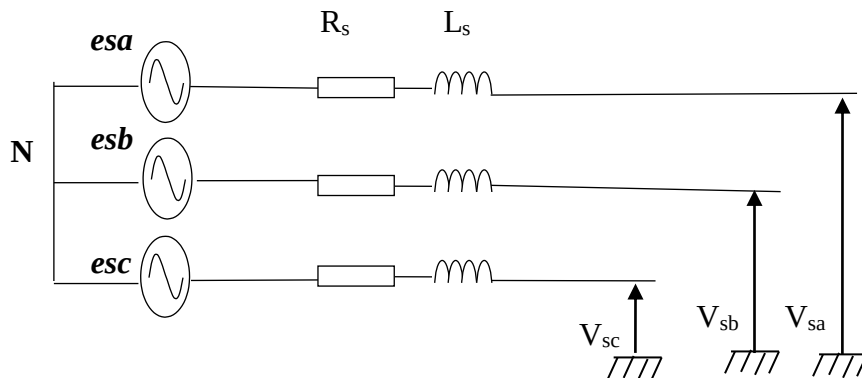


Fig(IV.1): Schéma global du système à simuler

V-3 Modélisation de l'association réseau- Filtre actif- Charge polluante :

IV.3 .1 Modélisation du réseau électrique :

Le réseau, est assimilable à une source de tension sinusoïdale en série avec une impédance, d'où la représentation du réseau par un système de force électromotrice sinusoïdale (F.E.M.S) triphasées équilibrées en série avec une impédance, figure (IV.2)



Fig(IV.2) : Schéma synoptique d'un réseau triphasé

$$\begin{cases} e_{sa} = E \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t) \\ e_{sb} = E \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ e_{sc} = E \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (\text{IV.1})$$

IV.3.2 Modélisation de la charge polluante (redresseur à diode)

Il s'agit de considérer le cas d'une source triphasée alimentant un redresseur pont triphasé à six diodes. Le pont triphasé de nature charge non linéaire alimente une charge RL . La figure suivante, montre le schéma de principe du circuit considéré.

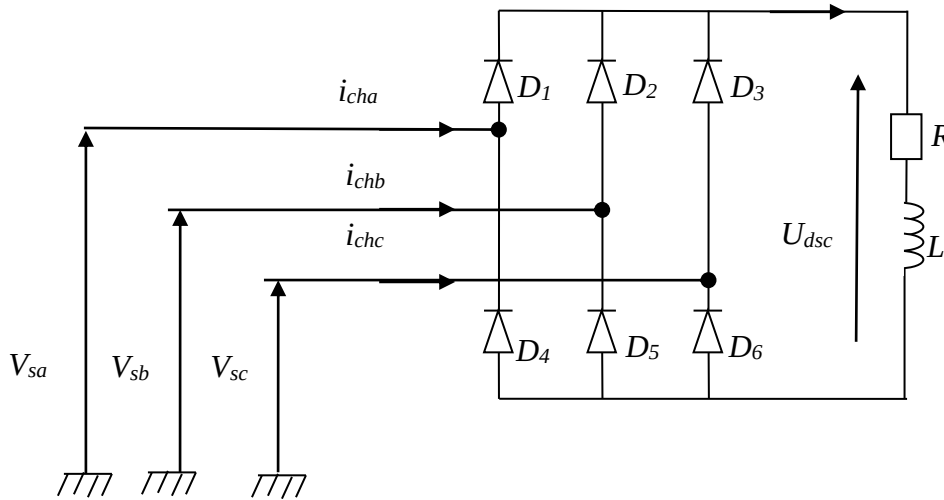


Fig (IV.3) : La charge non linéaire (un pont redresseur)

Une charge non linéaire, constituée par un pont redresseur, génère les harmoniques de courants d'ordre $6n \pm 1$ ou n est le rang de harmonique ($n=1,2,3,\dots,n$), et absorbe l'énergie réactive. Cependant, le courant de la charge i_{ch} consommé par ce pont redresseur, peut être décomposé en série de Fourier, comme le décrit les équations suivantes :

$$i_{cha} = I_1 \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t - \varphi) +$$

$$\sum_{n=2}^{\infty} (I_{6n-1} \sqrt{2} \cdot \sin((6n-1)(\omega t - \varphi_{n-1})) + I_{6n+1} \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(6n+1)(\omega t - \varphi_{n+1})) \quad (\text{IV. 1})$$

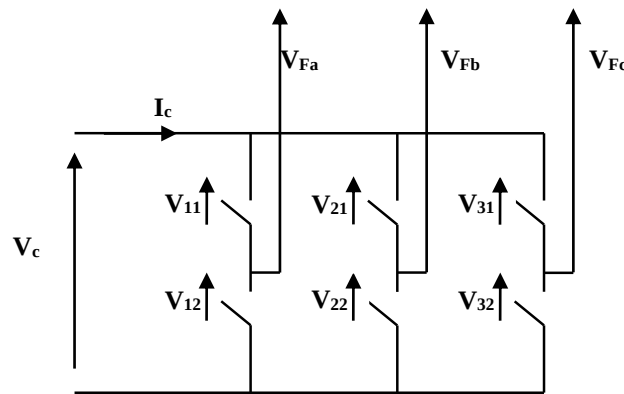
i_{chb} et i_{chc} décalés respectivement de $\frac{2\pi}{3}$ et $\frac{4\pi}{3}$ par rapport à $i_{cha}(t)$

Et le courant de la source est exprimé par :

$$I_{ch} = I_1 \sqrt{2} \left[\sin(\omega t) - \frac{1}{5} \sin(5\omega t) - \frac{1}{7} \sin(7\omega t) + \frac{1}{11} \sin(11\omega t) + \frac{1}{13} \sin(13\omega t) - \frac{1}{17} \sin(17\omega t) - \frac{1}{19} \sin(19\omega t) + \dots \dots \dots \right] \quad (IV.2)$$

IV.3.3 Modélisation du filtre actif (ou de l'onduleur)

Dans notre étude, on choisit un onduleur de tension commandé en courant. Ce dernier est constitué de trois bras dont chacun est constitué de deux cellules, contenant chacune un interrupteur bicommandable (MOSFET), aux bornes duquel est monté une diode en antiparallèle, la cellule ainsi définie forme un interrupteur bidirectionnel figure (IV.4) [13].



Fig(IV.4) : Présentation schématique d'un onduleur triphasé

IV.3.3.1 Fonction de connexions

Soit $i = 1, 2, 3$

$j = 1, 2$

On associe à chaque interrupteur une fonction F_{ij} dite de connexion, tel que :

$$F_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si l'interrupteur est fermé} \\ 0 & \text{si l'interrupteur est ouvert} \end{cases}$$

D'où

$$\begin{cases} I_{ij} = F_{ij} \cdot V_c \\ V_{ij} = (1 - F_{ij}) \cdot V_c \end{cases}$$

Tel que I_{ij} représente le courant qui traverse l'interrupteur kij et V_{ij} la tension aux bornes de ce dernier [20].

IV.3.3.2 Fonctions de conversions composées

Soit V_{Fab} , V_{Fbc} , V_{Fca} les tension composées délivrées par l'onduleur.

$$\begin{cases} V_{Fab} = V_{21} - V_{11} \\ V_{Fbc} = V_{31} - V_{21} \\ V_{Fca} = V_{11} - V_{31} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} V_{Fab} = (F_{11} - F_{21}) \cdot V_c \\ V_{Fbc} = (F_{21} - F_{31}) \cdot V_c \\ V_{Fca} = (F_{31} - F_{11}) \cdot V_c \end{cases}$$

D'où

$$\begin{bmatrix} V_{Fab} \\ V_{Fbc} \\ V_{Fca} \end{bmatrix} = V_c \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_{11} \\ F_{21} \\ F_{31} \end{bmatrix} = V_c \cdot \begin{bmatrix} F_{ab} \\ F_{bc} \\ F_{ca} \end{bmatrix}$$

Les fonctions de conversions composées sont :

$$\begin{cases} F_{ab} = F_{11} - F_{21} \\ F_{bc} = F_{21} - F_{31} \\ F_{ca} = F_{31} - F_{11} \end{cases}$$

IV.3.3.3 Fonctions de conversions simples

Dans l'hypothèse que les tensions simples V_{Fa} , V_{Fb} , V_{Fc} forment un système triphasé équilibré nous avons :

$$\begin{bmatrix} V_{Fa} \\ V_{Fb} \\ V_{Fc} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{Fab} \\ V_{Fbc} \\ V_{Fca} \end{bmatrix}$$

D'où

$$\begin{bmatrix} V_{Fa} \\ V_{Fb} \\ V_{Fc} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} V_c \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_{11} \\ F_{21} \\ F_{31} \end{bmatrix} = V_c \cdot \begin{bmatrix} F_a \\ F_b \\ F_c \end{bmatrix}$$

Les fonctions de conversion simples s'écrivent alors :

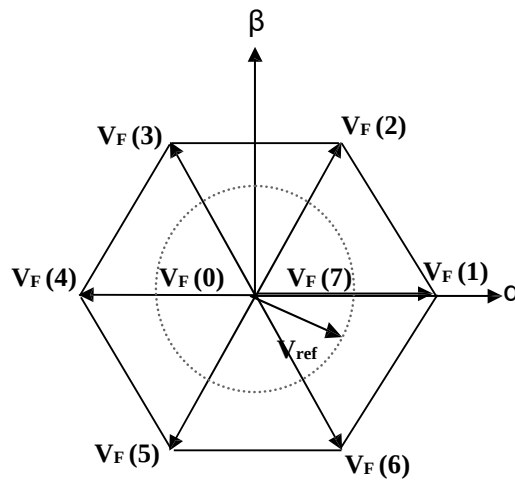
$$\begin{cases} F_a = \frac{1}{3} \cdot (2 \cdot F_{11} - F_{21} - F_{31}) \\ F_b = \frac{1}{3} \cdot (-F_{11} + 2 F_{21} - F_{31}) \\ F_c = \frac{1}{3} \cdot (-F_{11} - F_{21} + 2 F_{31}) \end{cases}$$

IV.3.3.4 Représentation vectorielle des tensions fournies par l'onduleur

Dans le plan biphasé (α, β) en considérant $V_F(k)$ le vecteur correspondant aux tensions de l'onduleur, les huit cas possibles du vecteur $V_F(k)$ sont donnés par la figure(IV.5) [13].

K	0	1	2	3	4	5	6	7
Mod(V_f)	0	$\sqrt{\frac{2}{3}} V_c$	$\sqrt{\frac{2}{3}} V_c$	$\sqrt{\frac{2}{3}} V_c$	$\sqrt{\frac{2}{3}} V_c$	$\sqrt{\frac{2}{3}} V_c$	$\sqrt{\frac{2}{3}} V_c$	0
Arg(V_f)		0	$\pi/3$	$2.\pi/3$	π	$4.\pi/3$	$5.\pi/3$	

Tableau(IV.1): Tensions fournies par l'onduleur sous fourmes vectorielles.



Fig(IV.5) : Représentation vectorielle des tensions générées par l'onduleur.

Où : V_{ref} représente la tension de référence que doit produire l'onduleur pour pouvoir créer les courants perturbateurs identifiés. Ceci signifie que l'onduleur n'est capable de fournir des tensions égales aux tensions de référence que si le vecteur formé par ces derniers reste à l'intérieur de l'hexagone montré dans la figure IV.5 .

L'onduleur est lié au réseau par un filtre inductif L_f , parce que deux sources de tensions ne peuvent être directement connectées.

Où

$$\begin{bmatrix} V_{Fa} \\ V_{Fb} \\ V_{Fc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} + R_f \cdot \begin{bmatrix} I_{Fa} \\ I_{Fb} \\ I_{Fc} \end{bmatrix} + L_f \cdot \frac{d}{dt} \cdot \begin{bmatrix} I_{Fa} \\ I_{Fb} \\ I_{Fc} \end{bmatrix}$$

Et:

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{sa} \\ e_{sb} \\ e_{sc} \end{bmatrix} - R_s \cdot \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} + L_s \cdot \frac{d}{dt} \cdot \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix}$$

Avec

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} : \text{Tension aux points de raccordement.}$$

$$\begin{bmatrix} I_{Fa} \\ I_{Fb} \\ I_{Fc} \end{bmatrix} : \text{Courants délivrés par l'onduleur}$$

$$\begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} : \text{Courants fournis par le réseau.}$$

IV.4 Paramètres utilisés [13]

Paramètres de la source

$$R_s = 0.5 \cdot 10^{-3} \Omega$$

$$L_s = 15 \cdot 10^{-6} \text{H}$$

Paramètres du filtre actif

$$V_{dc} = 700 \text{ V},$$

$$R_f = 5 \cdot 10^{-3} \Omega$$

$$L_f = 150 \cdot 10^{-6} \text{ H}$$

Paramètres de la charge

Charge RL

$$R_{ch} = 0.6 \Omega$$

$$L_{ch} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ H}$$

Charge RC :

$$R_{ch} = 1 \Omega$$

$$C_{ch} = 3.5 \cdot 10^{-3} \text{ F}$$

$$R_c = 1.2 \cdot 10^{-3} \Omega$$

$$L_c = 50 \cdot 10^{-6} \text{ H}$$

Commande hystérésis

$$\Delta I = \pm 10 \text{ A}$$

IV.5 Résultats de la simulation

Les courants des phases (i_a , i_b , i_c) sont d'allures identiques (i_b et i_c décalés respectivement de $\frac{2\pi}{3}$ et $\frac{4\pi}{3}$ par rapport à i_a), nous présentons les résultats de simulation pour une seule phase.

IV.5.1 Charge RL

IV.5.1.1 La méthode de la puissance instantanée réelle et imaginaire (PIRI)

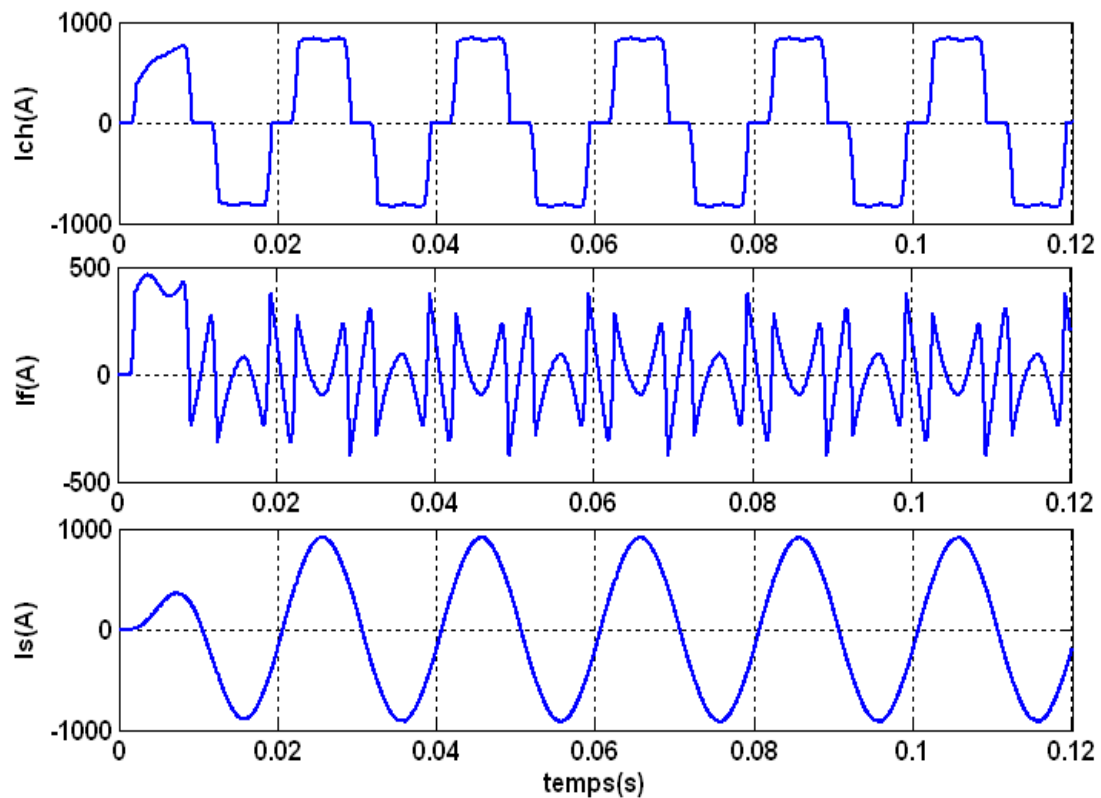


Fig (IV.6): I_{ch} : Courant de charge, I_f : Courant de filtre actif, I_s : Courant de source.

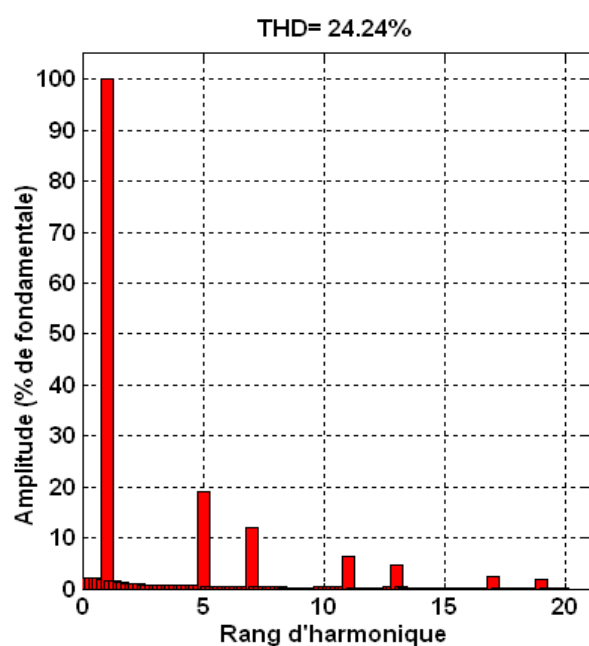


Fig (IV.7.a): Spectre du courant de source avant filtrage.

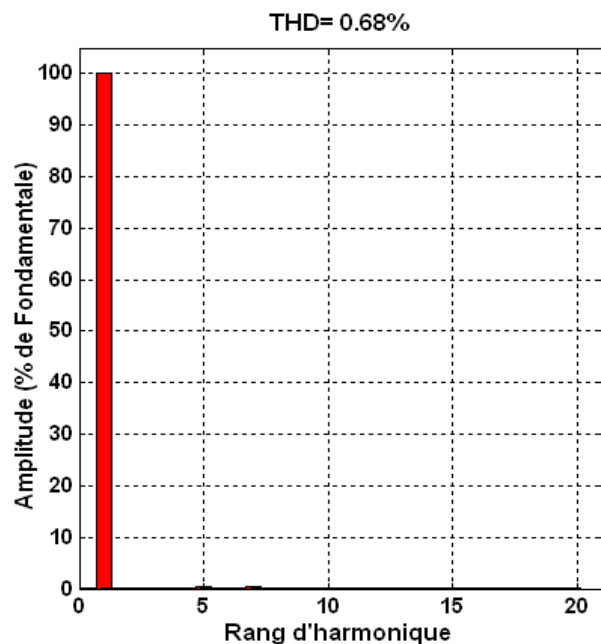
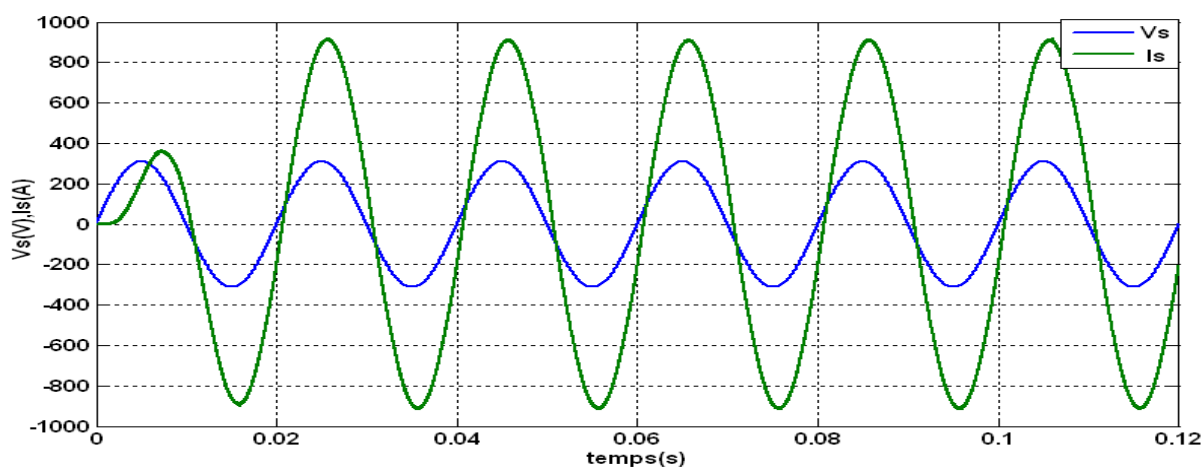
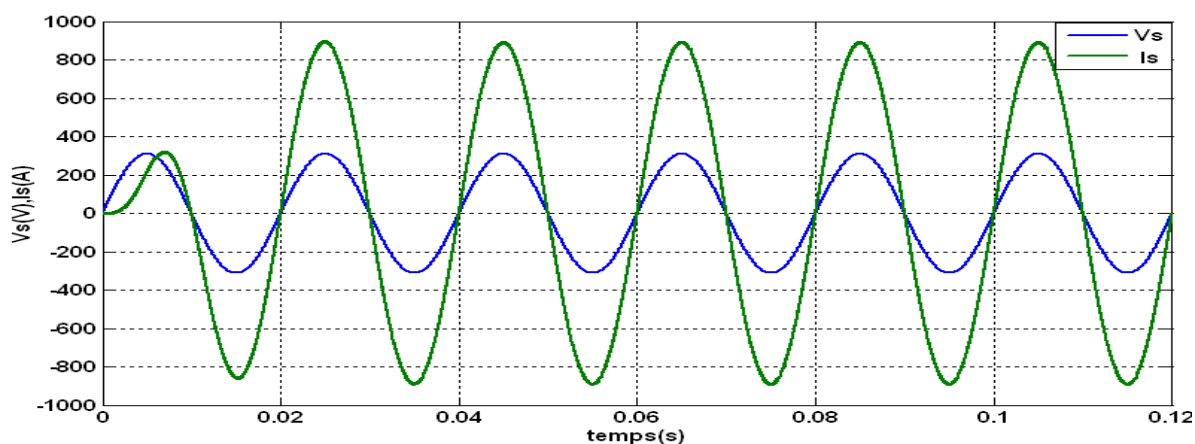


Fig (IV.7.b): Spectre du courant de source après filtrage

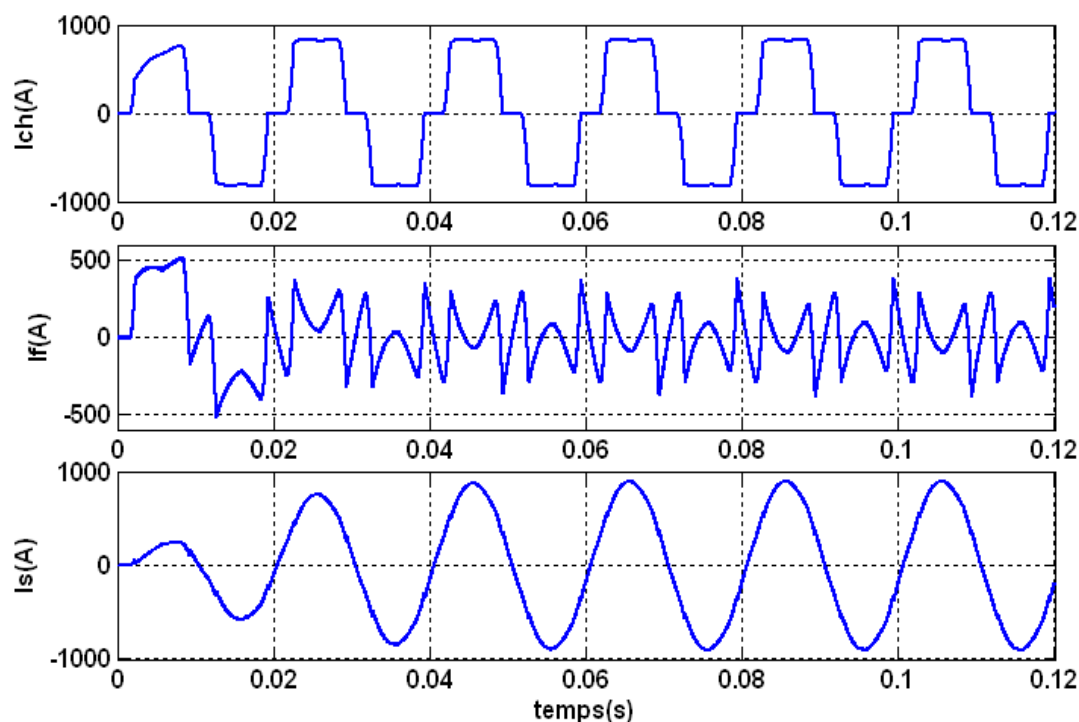


Fig(IV.8.a) : Courant et tension sans compensation de l'énergie réactive



Fig(IV.8.b) : Courant et tension avec compensation de l'énergie réactive

IV.5.1.2 La méthode du filtre coupe-bande



Figure(IV-9): I_{ch} : Courant de charge, I_f : Courant de filtre actif, I_s : Courant de source.

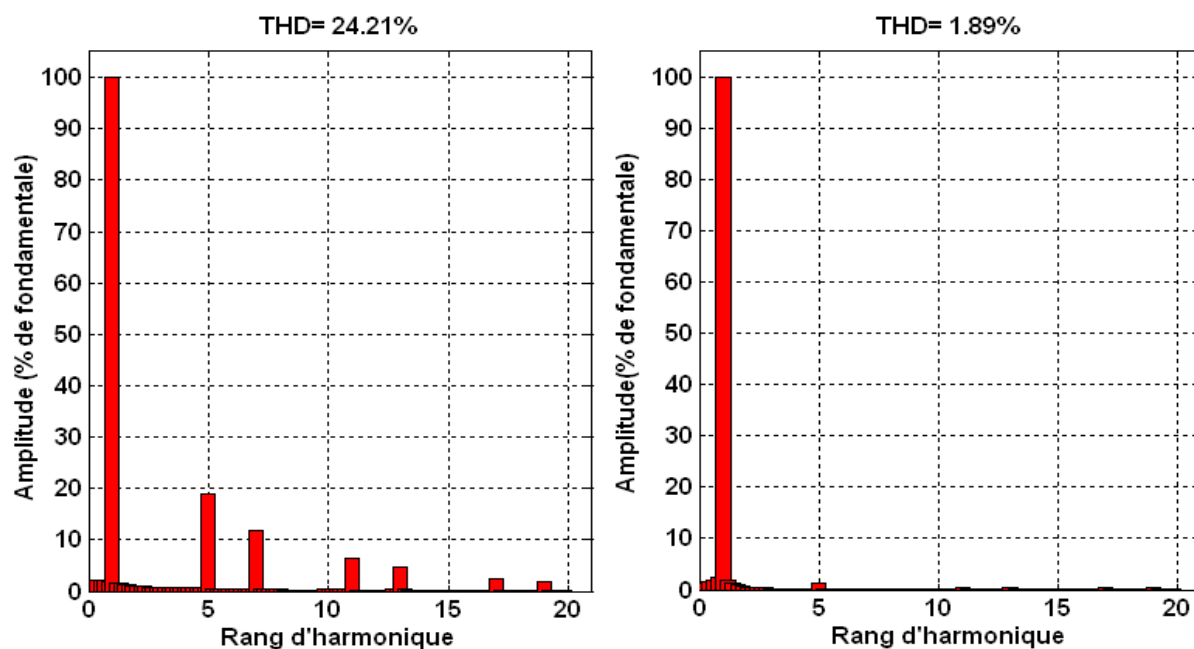


Fig (IV-10.a): Spectre du courant de source avant filtrage.

Fig (IV-10.b): Spectre du courant de source après filtrage

IV.5.1.3 La méthode du référentiel synchrone

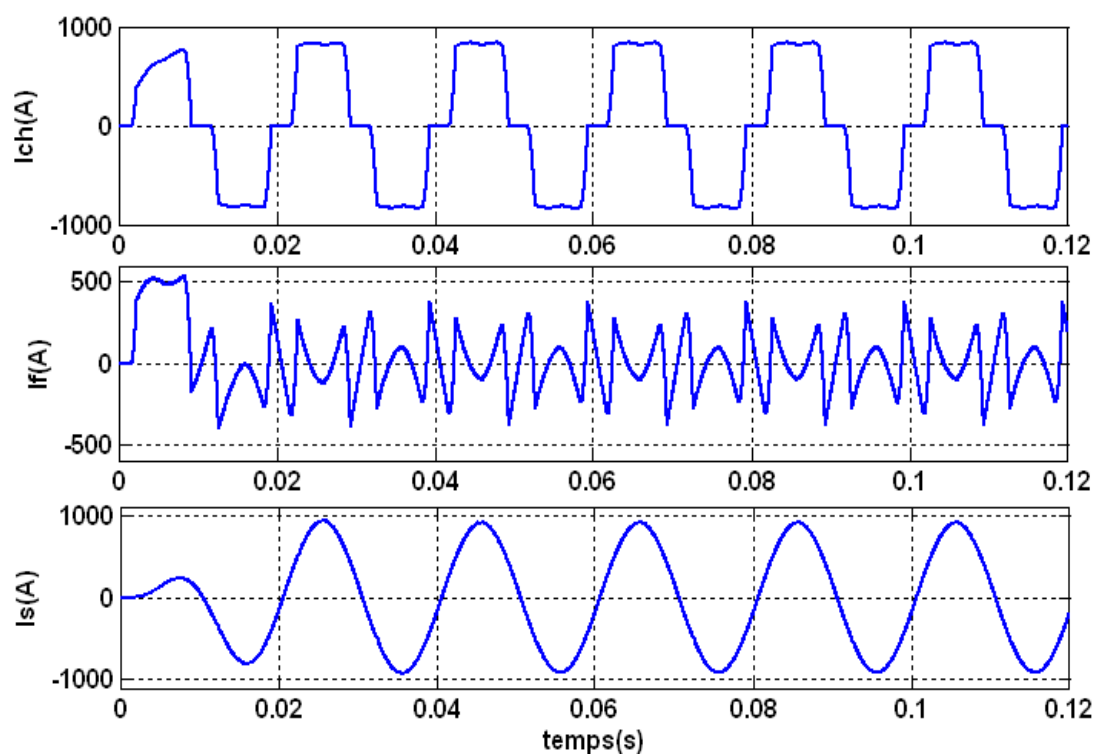


Fig (IV.11): I_{ch} : Courant de charge, I_f : Courant de filtre actif, I_s : Courant de source.

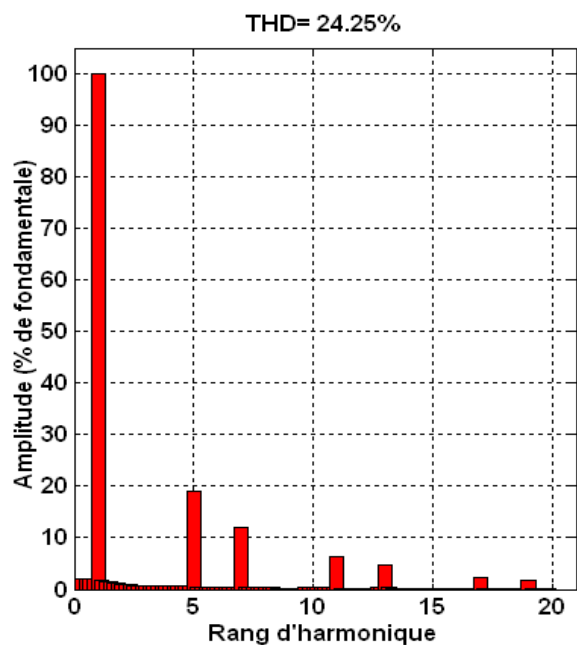


Fig (IV.12.a): Spectre du courant de source avant filtrage.

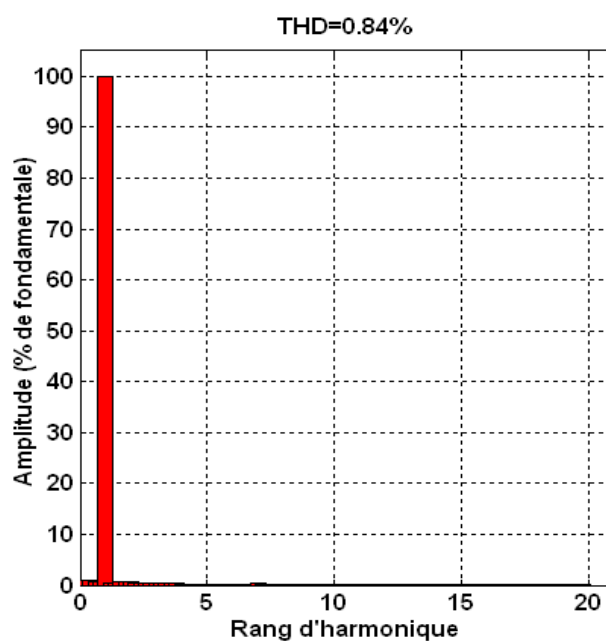


Fig (IV.12.b): Spectre du courant de source après filtrage

IV.5.1.4 La méthode tri-monophasée

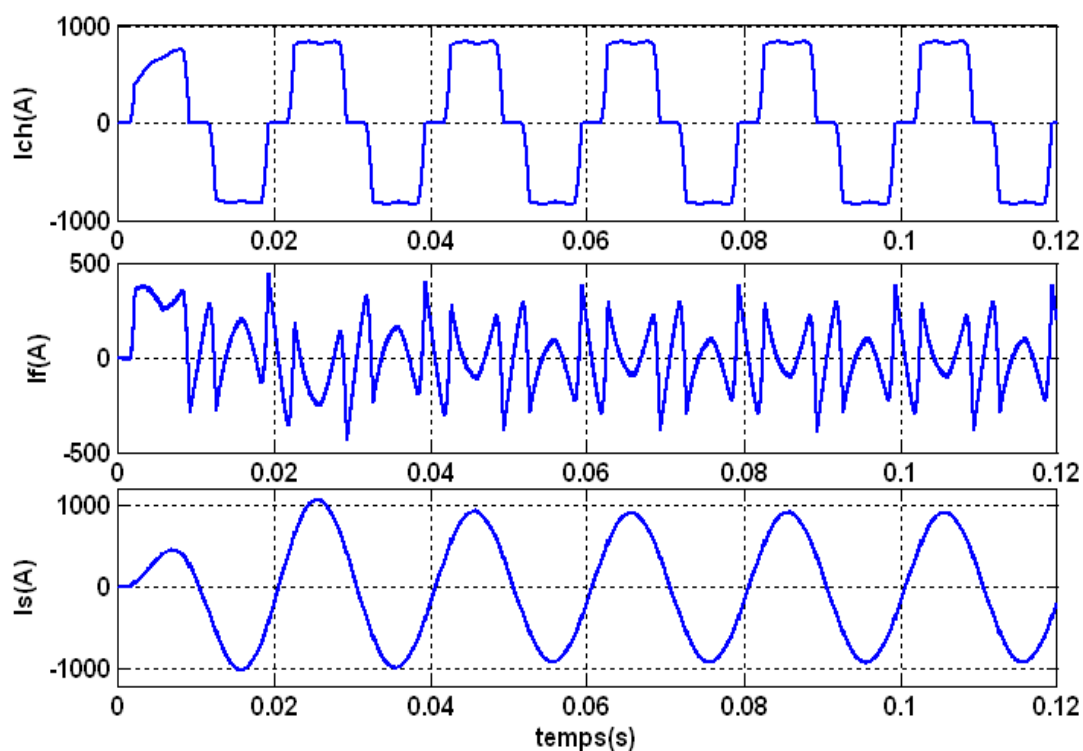


Fig (IV.13): I_{ch} : Courant de charge, I_f : Courant de filtre actif, I_s : Courant de source.

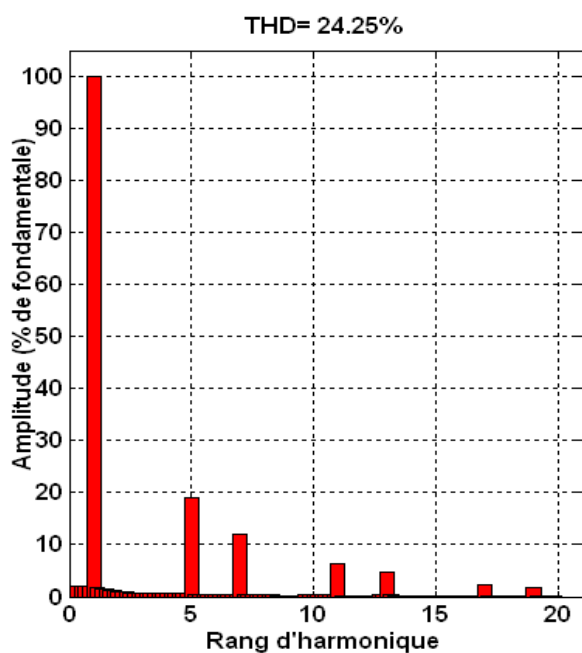


Fig (IV.14.a): Spectre du courant de source avant filtrage.

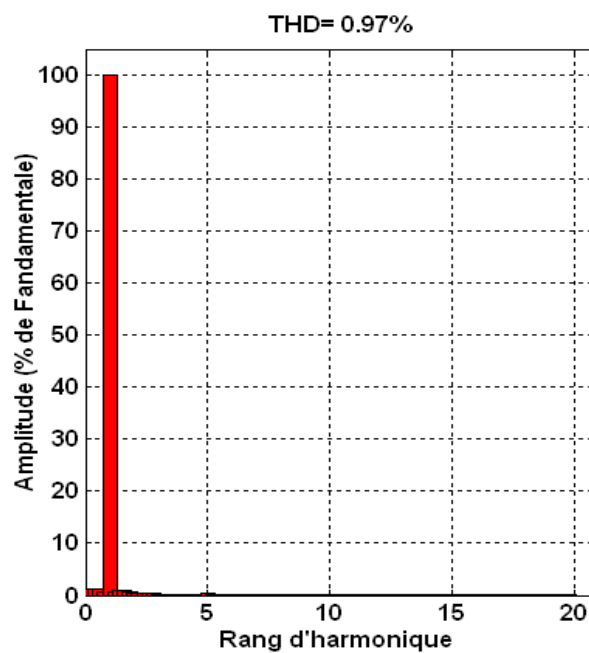
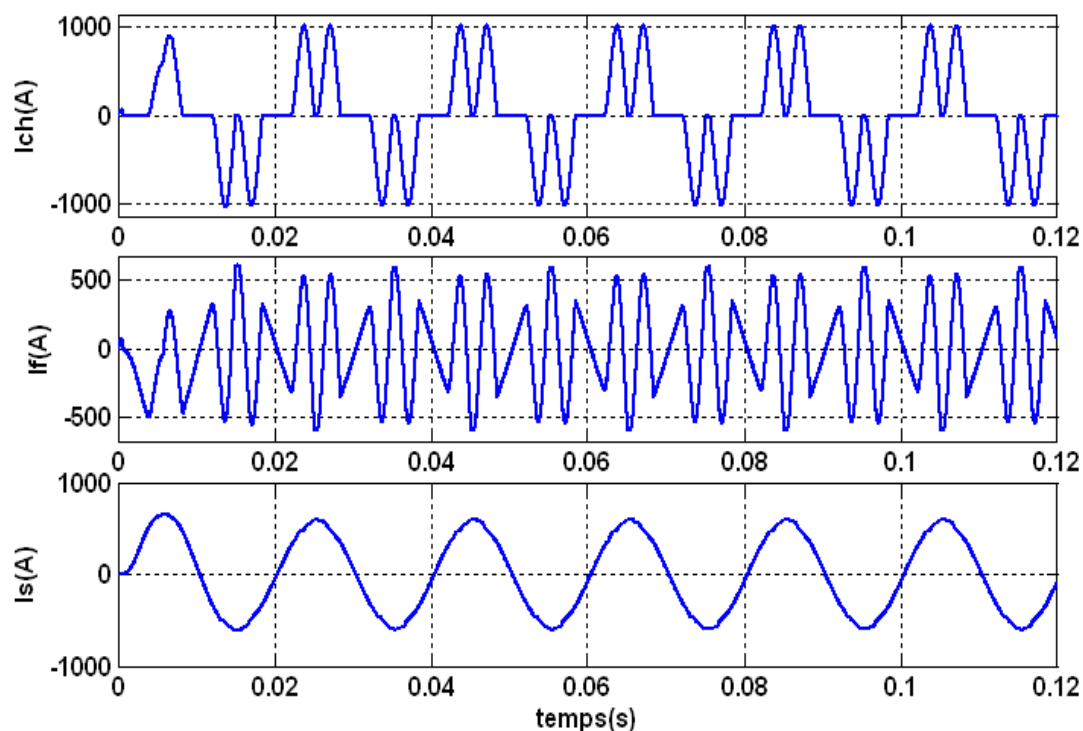


Fig (IV.14.b): Spectre du courant de source après filtrage

IV.5.2 Charge RC

IV.5.2.1 La méthode de la puissance instantanée réelle et imaginaire



Fig(IV.15): I_{ch} : Courant de charge, I_f : Courant de filtre actif, I_s : Courant de source.

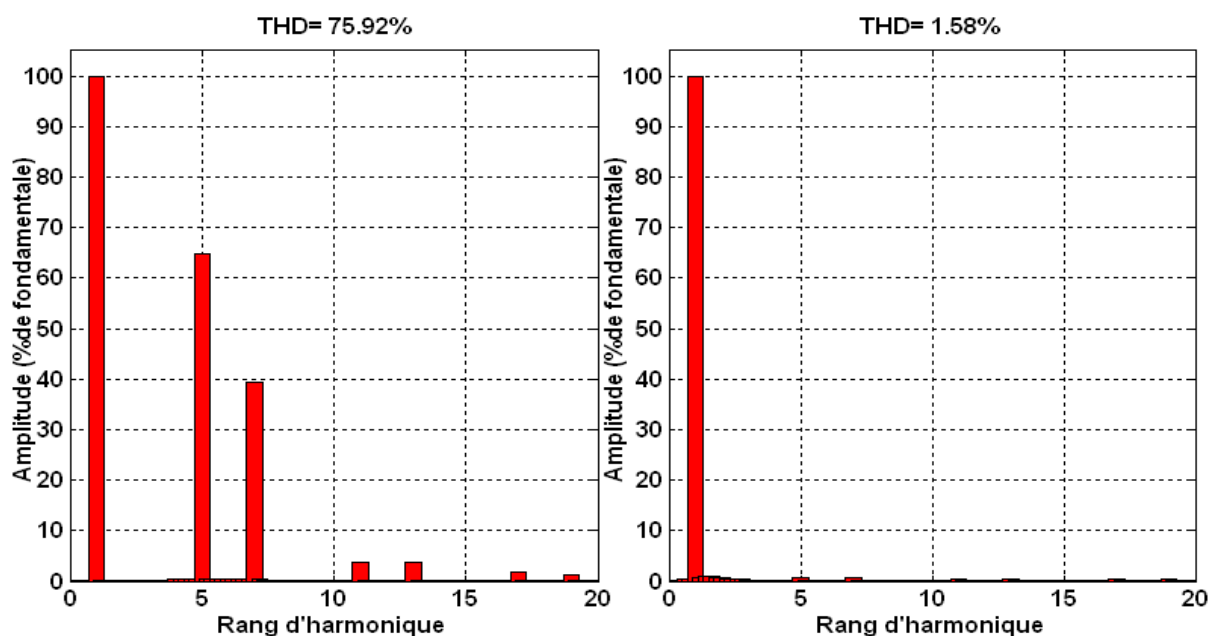
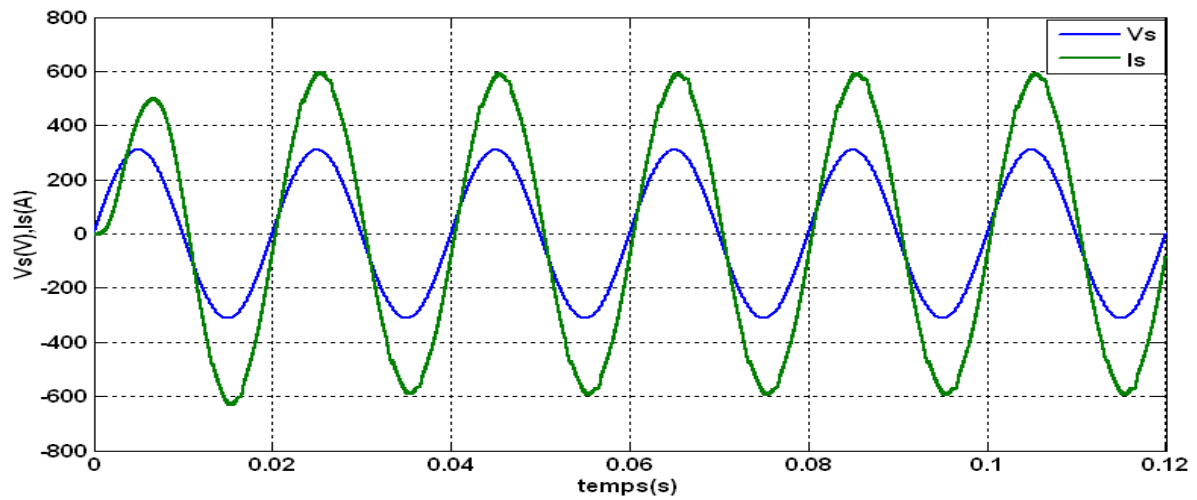
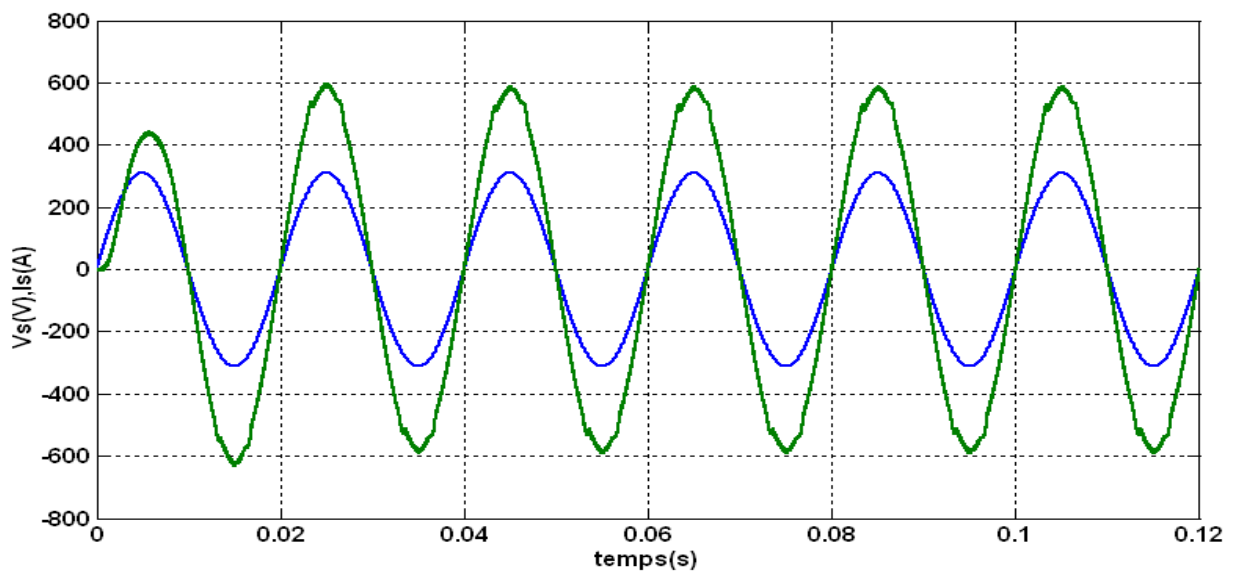


Fig (IV.16.a): Spectre du courant de source avant filtrage.

Fig (IV.16.b): Spectre du courant de source après filtrage



Fig(IV.17.a) : Courant et tension sans compensation de l'énergie réactive



Fig(IV.17.b) : Courant et tension avec compensation de l'énergie réactive

IV.5.2.2 La méthode du filtre coupe-bande

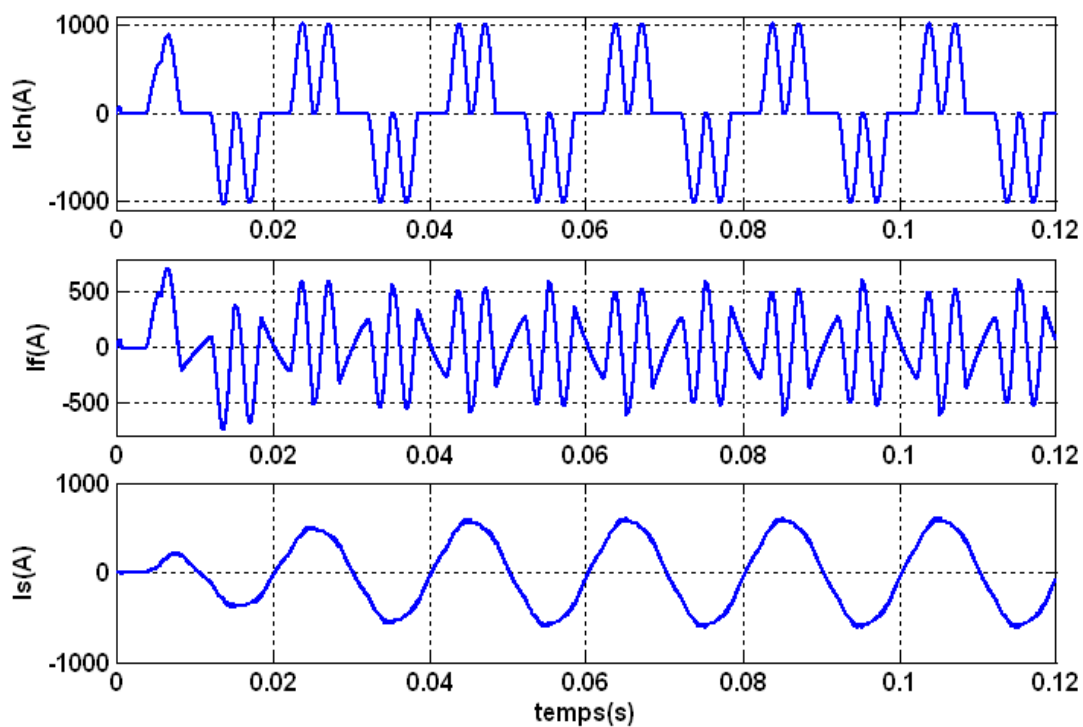


Fig (IV-18): I_{ch} : Courant de charge, I_f : Courant de filtre actif, I_s : Courant de source.

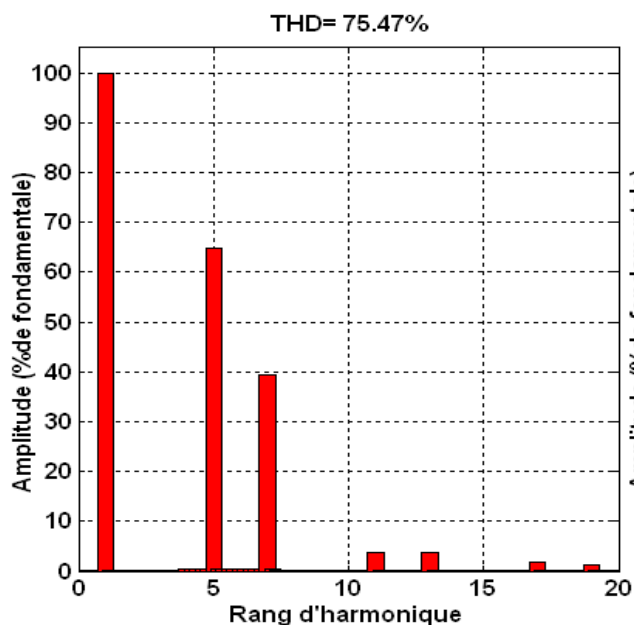


Fig (IV.19.a): Spectre du courant de source avant filtrage

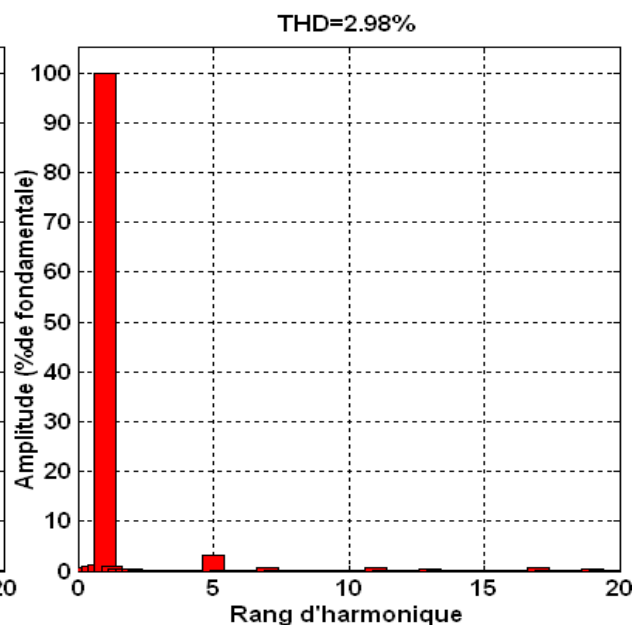


Fig (IV.19.b): Spectre du courant de source après filtrage

IV.5.2.3 La méthode du référentiel synchrone

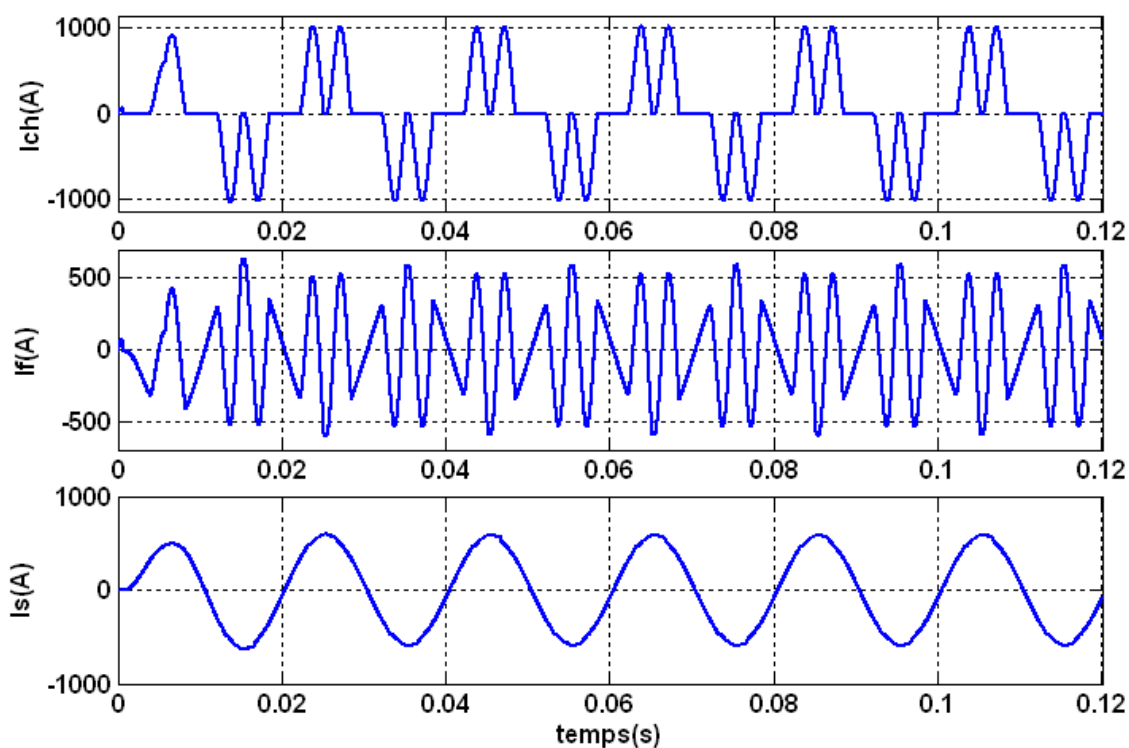


Fig (IV.20): I_{ch} : Courant de charge, I_f : Courant de filtre actif, I_s : Courant de source.

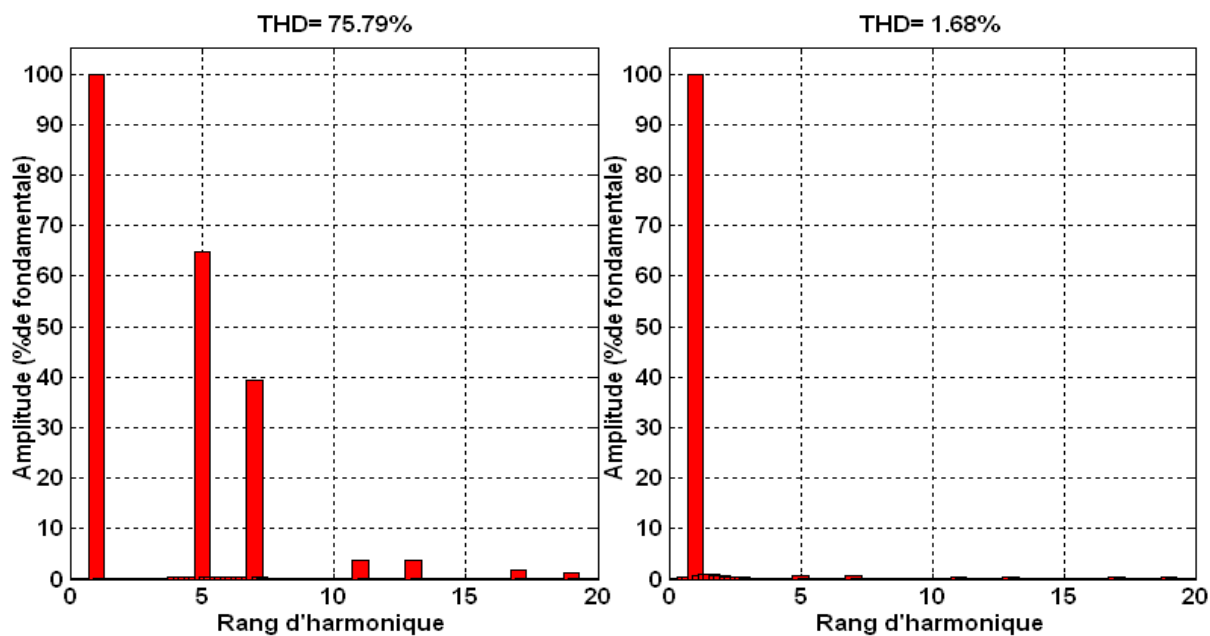
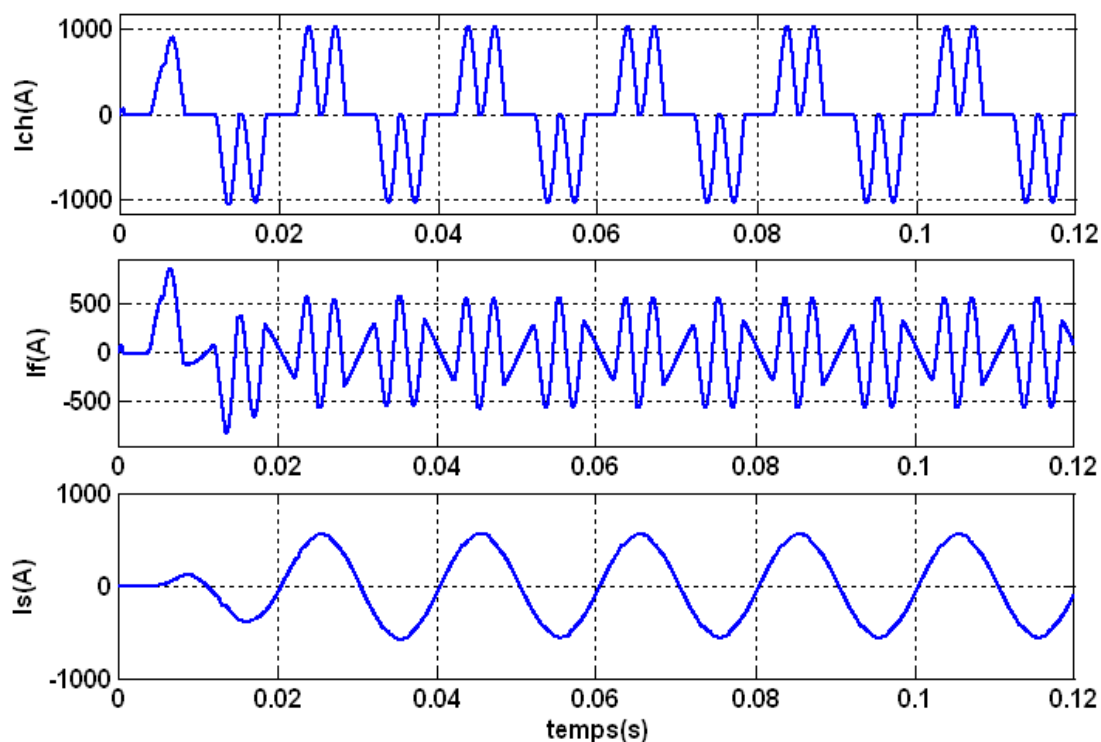


Fig (IV.21.a): Spectre du courant de source avant filtrage.

Fig (IV.21.b): Spectre du courant de source après filtrage

IV.5.2.4 La méthode tri-monophasée



Fig(IV.22): I_{ch} : Courant de charge, I_f : Courant de filtre actif, I_s : Courant de source.

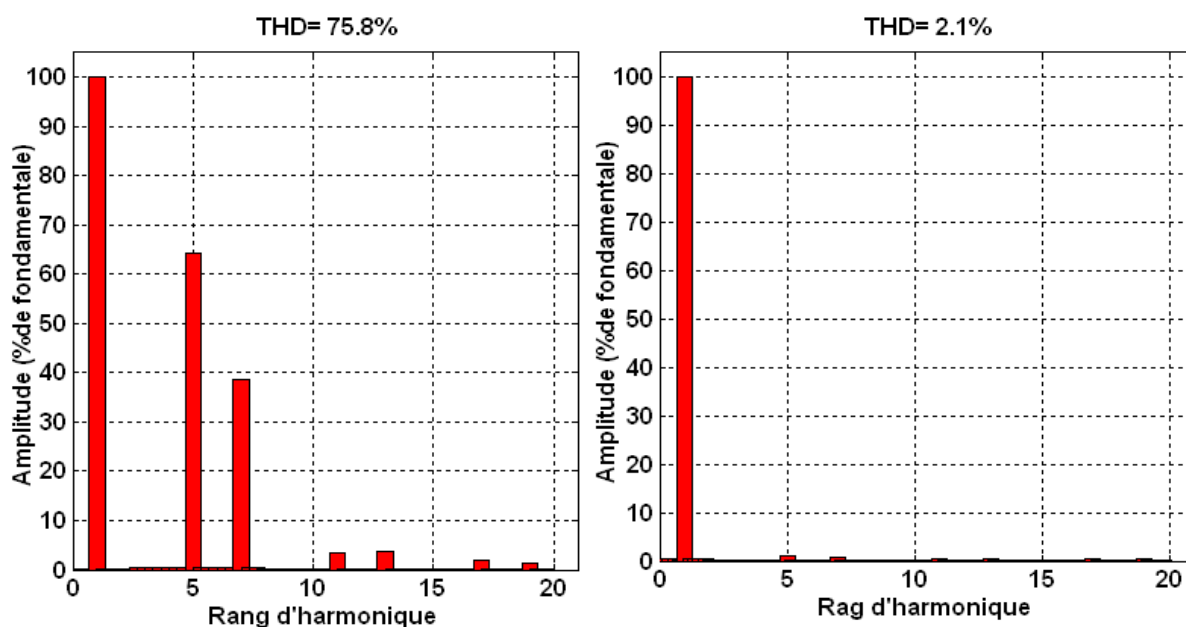


Fig (IV.23.a): Spectre du courant de source avant filtrage

Fig (IV.23.b): Spectre du courant de source après filtrage

IV.5.3 Changement de la charge

IV.5.3.1 Changement de la charge $(RL)_1$ vers $(RL)_2$

IV.5.3.1.1 La méthode de la puissance instantanée réelle et imaginaire

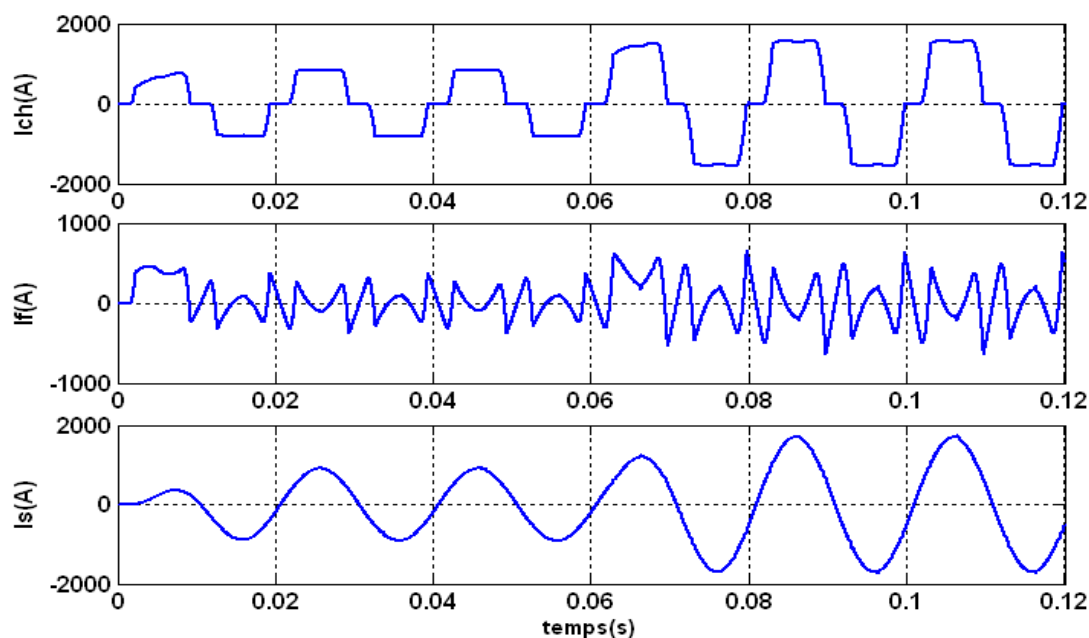


Fig (IV.24): I_{ch} : Courant de charge, I_f : Courant de filtre actif, I_s : Courant de source.

IV.5.3.1.2 La méthode du filtre coupe-bande

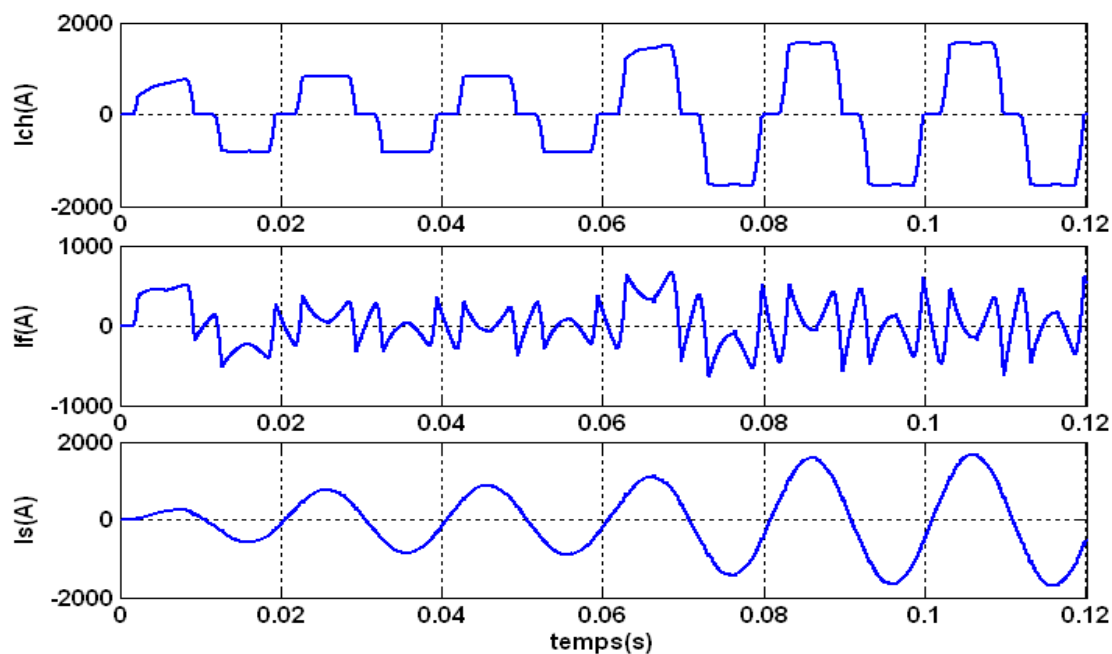
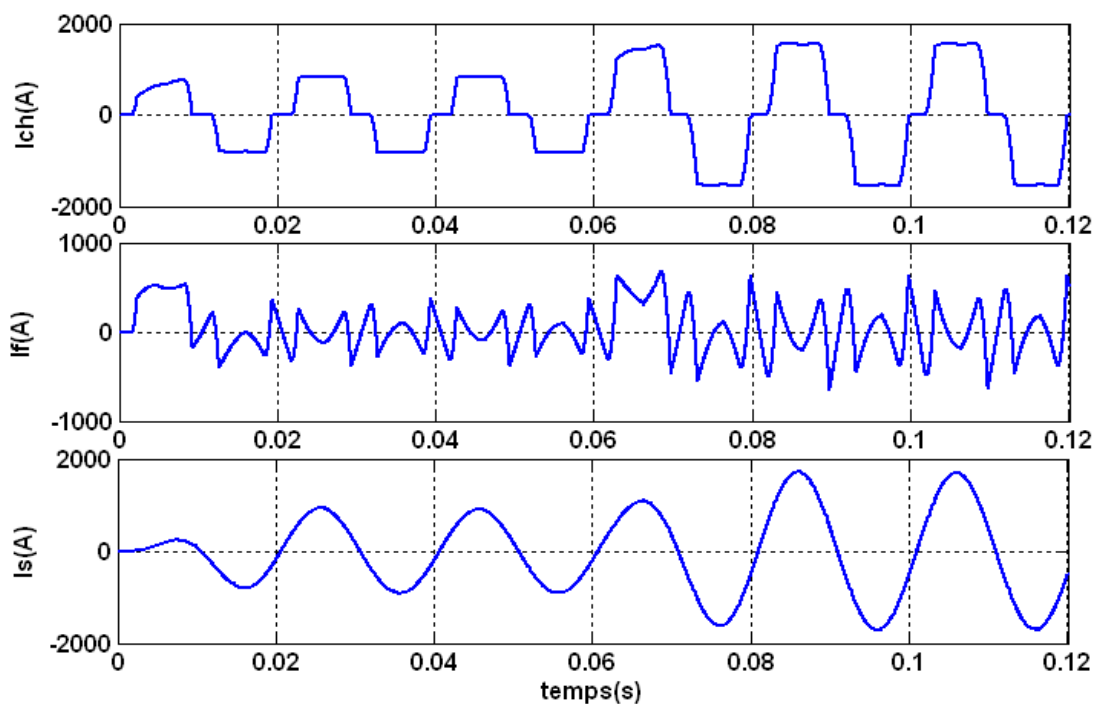


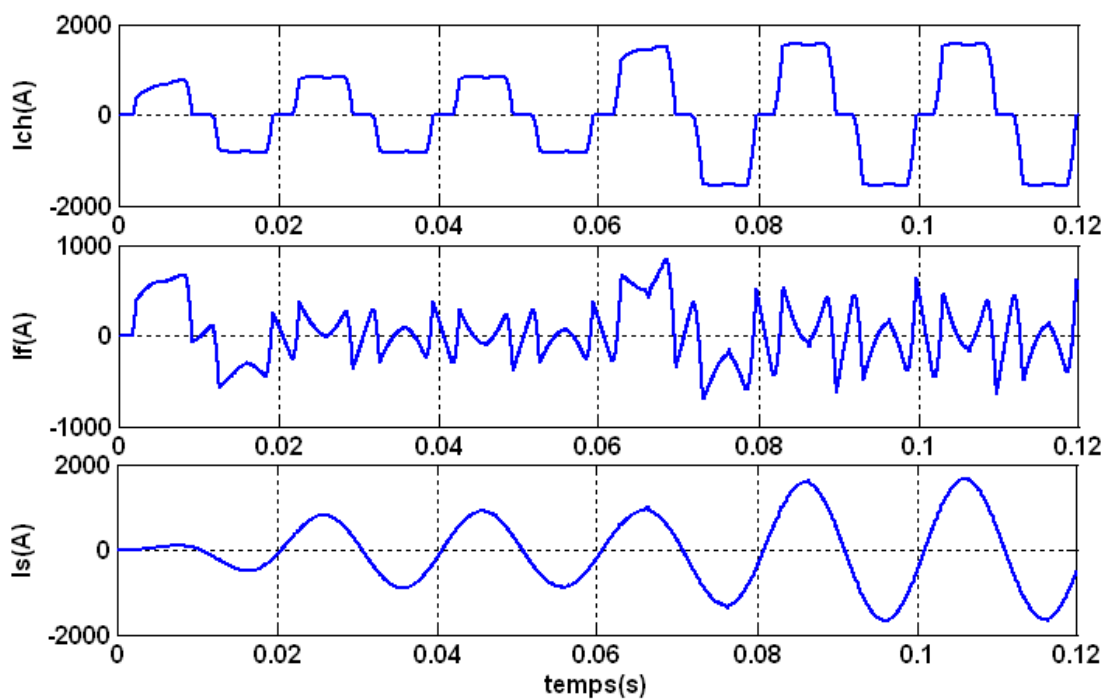
Fig (IV.25): I_{ch} : Courant de charge, I_f : Courant de filtre actif, I_s : Courant de source.

IV.5.3.1.3 La méthode du référentiel synchrone



Fig(IV.26): I_{ch} : Courant de charge, I_f : Courant de filtre actif, I_s : Courant de source..

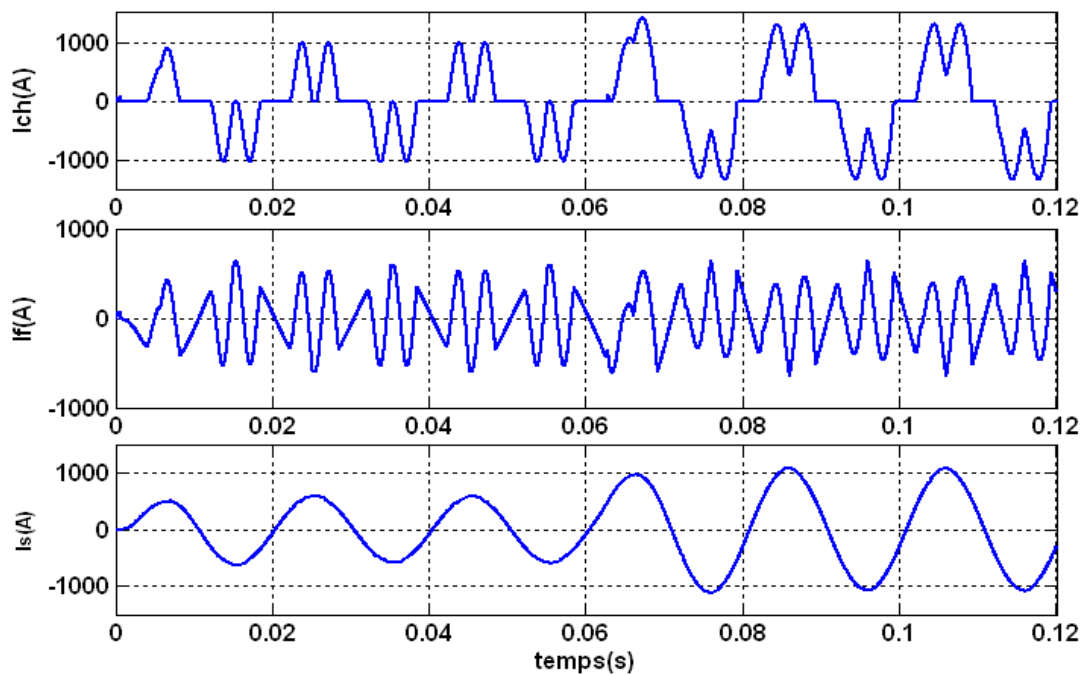
IV.5.3.1.4 La méthode tri-monophasée



Fig(IV.27): I_{ch} : Courant de charge, I_f : Courant de filtre actif, I_s : Courant de source.

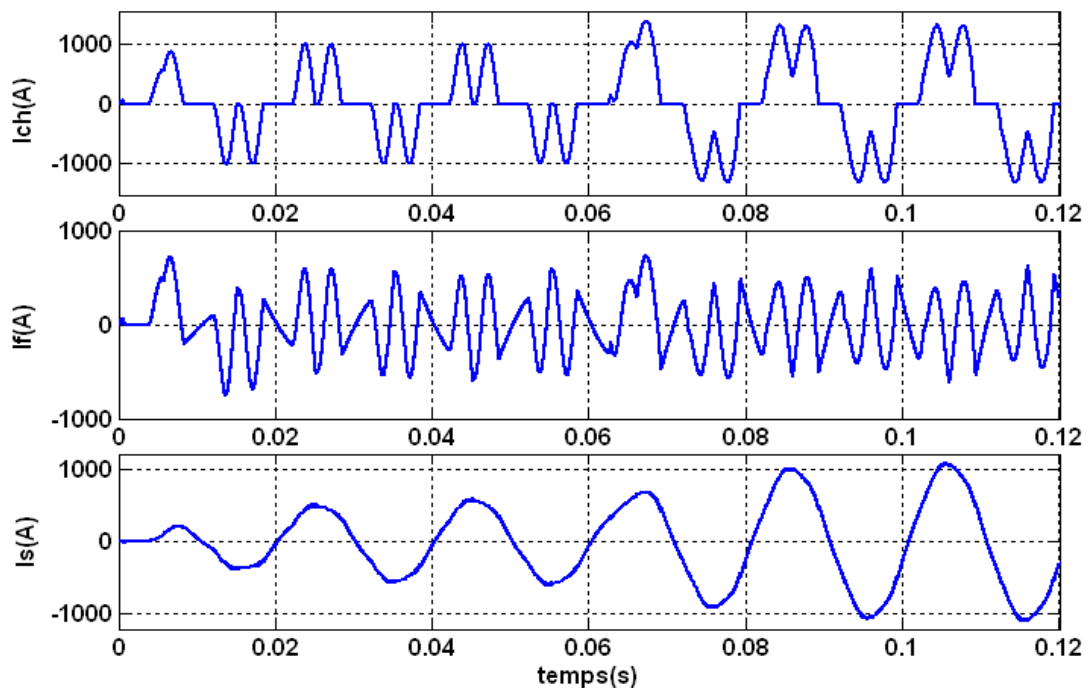
IV.5.3.2 Changement de la charge $(RC)_1$ vers $(RC)_2$

IV.5.3.2.1 La méthode de la puissance instantanée réelle et imaginaire(PIRI)



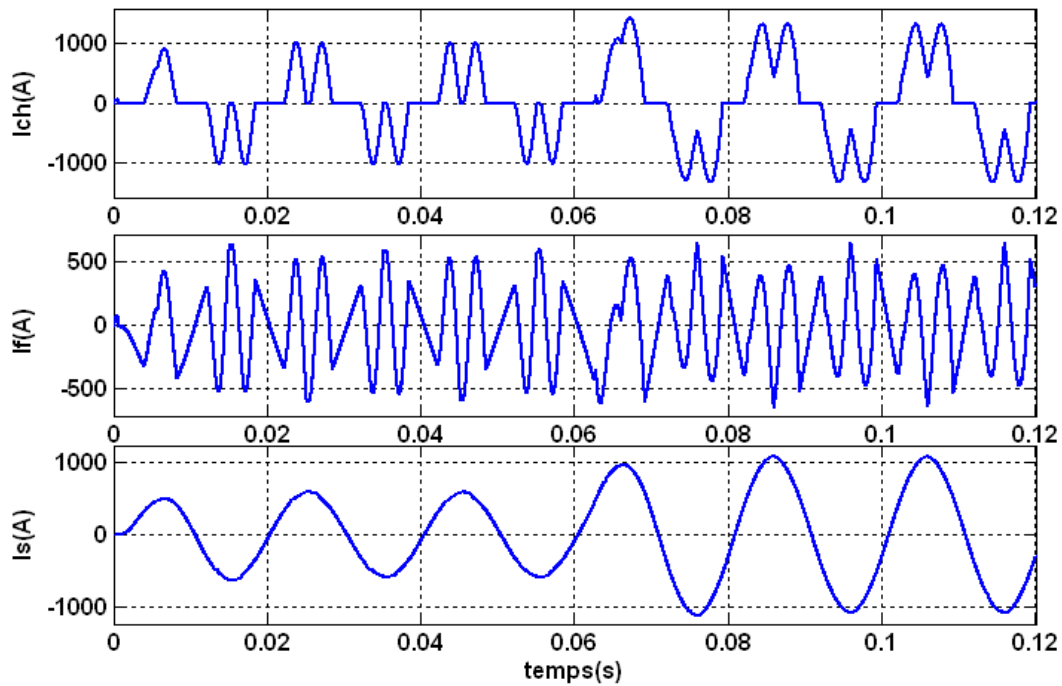
Fig(IV.28): I_{ch} : Courant de charge, I_f : Courant de filtre actif, I_s : Courant de source..

IV.5.3.2.2 La méthode du filtre coupe-bande



Fig(IV.29): I_{ch} : Courant de charge, I_f : Courant de filtre actif, I_s : Courant de source.

IV.5.3.2.3 La méthode du référentiel synchrone



Fig(IV.30) I_{ch} : Courant de charge, I_f : Courant de filtre actif, I_s : Courant de source.

IV.5.3.2.4 La méthode tri-monophasée

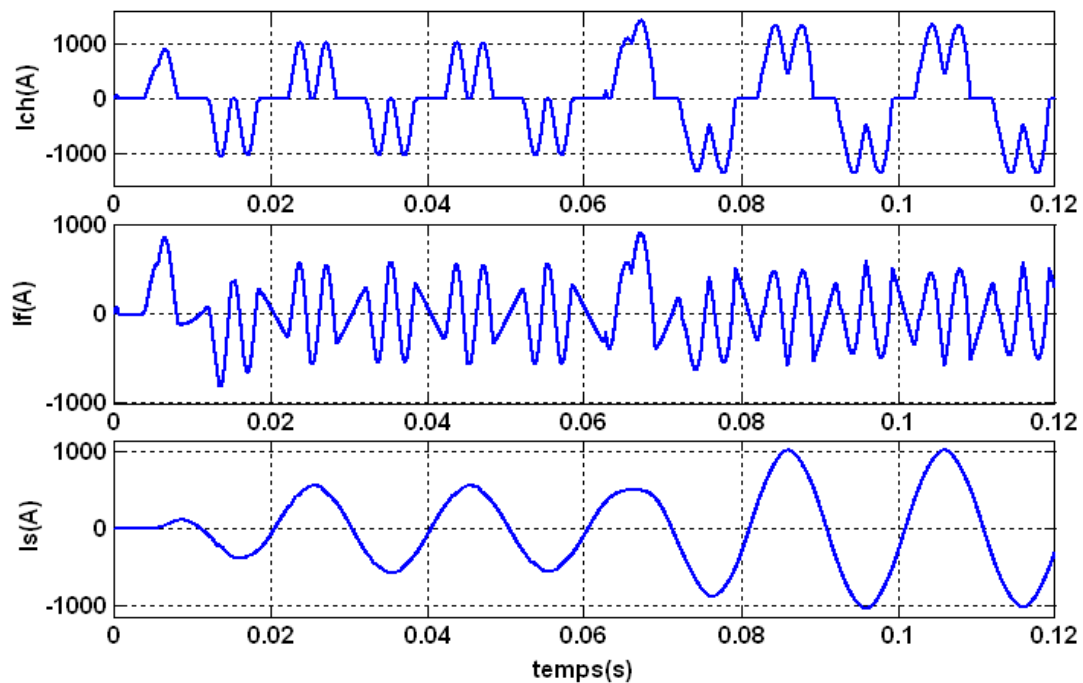


Fig (IV.31): I_{ch} : Courant de charge, I_f : Courant de filtre actif, I_s : Courant de source.

Le tableau(IV.2) regroupe les résultats des simulations :

Charge RL		
Méthodes d'identification	THD%avant filtrage	THD%après filtrage
PIRI classique	24.24%	0.68%
Coupe-bande	24.21%	1.89%
Référentiel synchrone	24.19%	0.84%
Tri-monophasée	24.25%	0.97%
Charge RC		
Méthodes d'identification	THD% avant filtrage	THD% après filtrage
PIRI classique	75.92%	1.58%
Coupe-bande	75.45%	2.98%
Référentiel synchrone	75.79%	1.68%
Tri-monophasée	75.81%	2.1%

Tableau(IV.2): les résultats des simulations des différentes méthodes d'identification.

Les résultats obtenus montrent aussi l'efficacité et les bonnes performances du filtre actif parallèle avec ces différents algorithmes de commande qui a réduit la *THD* à une valeur inférieure à 5% correspondant aux recommandations et normes internationales

Afin de comparer les méthodes d'identifications, nous avons choisi quelques critères de comparaison pour les quatre méthodes. Nous avons évalué ces techniques sur les critères suivants :

- ✖ Nécessite ou pas de la présence d'une méthode d'extraction des tensions;
- ✖ Nécessite ou pas d'une transformation des courants;
- ✖ Qualité de compensation d'harmoniques.
- ✖ Utilisation pour les systèmes triphasés;
- ✖ Utilisation pour les systèmes monophasés;
- ✖ Nombre des filtres utilisés pour la séparation des composantes du courant;
- ✖ Performance au niveau du temps de réponse.

Le tableau (IV.3) récapitule ces différents critères pour chaque méthode d'identification.

Coupe-bande	Tri-monophasée	PIRI	Référentiel synchrone
Mesure de la tension			
Non	Non	Oui	Non
Besoin d'une transformation du courant			
Non	Non	Oui	Oui
Qualité de compensation			
Moins bonne	Bonne	Bonne	Bonne
Valable pour un système monophasé			
Oui	Oui	Non	Non
Valable pour un système triphasé			
Oui	Oui	Oui	Oui
Temps de réponse			
Moins bonne	Bonne	Bonne	Bonne
Nombre des filtres utilisés			
3	6	2	2
Exigence de circuit PLL			
Non	Oui	Oui	Oui

Tableau(IV.3): Comparaison des différentes techniques de compensation.

La méthode des PIRI classique utilise deux filtres passe bas pour séparer les composantes des puissances active et réactive et a besoin d'un système d'extraction de la tension directe du réseau électrique. L'inconvénient le plus évident de la méthode PIRI est qu'elle s'exécute mal dans des conditions non équilibrées de tension d'alimentation, parce que l'algorithme suppose que les tensions d'alimentation sont sinusoïdales et équilibrées et elle n'est pas applicable pour les systèmes monophasés par temps la méthode du filtre coupe bande est utilisable pour les systèmes monophasés et triphasés. Elle ne nécessite pas la décomposition de la tension ni la transformation des courants. La technique tri-monophasée s'applique sur les courants comme la méthode du filtre coupe bande. Elle ne nécessite pas la tension réseau mais effectue une transformation sur les courants de charge afin de fournir les composantes du courant

fondamental. La méthode tri-monophasé apparait comme la plus couteuse car elle utilise six filtre passe bas pour séparer les composantes du courant.

La méthode référentiel synchrone des courants travaillant dans le repère DQ, effectue l'identification des courants dans le repère a deux dimensions. Elle exige un circuit PLL pour fonctionner correctement. Comme la méthode des PIRI Elle n'est pas applicable pour les systèmes monophasés.

IV.5.4 Discussion des résultats de la simulation

❖ Compensation avec la méthode PIRI

Les figures (IV.6) et (IV.15) présentent la forme du courant du réseau électrique avant et après la compensation pour les charges RL et RC respectivement. Les premières sous-figures montrent la forme du courant pollué (coté charge). Les secondes sous-figures montrent les courants harmoniques identifiés, qui seront ensuite réinjectés dans le réseau électrique via le système de commande. La forme du courant dépollue (coté source) est montré dans les troisièmes sous-figures. Le THD coté source est ramené de 24.24% à 0.68% (pour la charge RL) comme il est montré dans la figure (IV.7) et de 75.92% à 1.68 % (pour la charge RC) comme il est montré dans la figure (IV.16).

❖ Compensation avec la méthode du filtre coupe-bande

Les figures (IV.9) et (IV.18) présentent la forme du courant du réseau électrique avant et après la compensation pour les charges RL et RC respectivement. Les premières sous-figures montrent la forme du courant pollué (coté charge). La seconde sous-figure montre les courants harmoniques identifiés, qui seront ensuite réinjectés dans le réseau électrique via le système de commande. La forme du courant dépollue (coté source) est montré dans la troisièmes sous-figure.

La forme du courant du réseau y est désormais sinusoïdale et exempt de plupart des perturbations harmoniques. Le THD coté source qui était au départ de 24.21% à 1.89% (pour la charge RL) comme il est montré dans la figure (IV.10) et de 75.45% à 2.98% (pour la charge RL) comme il est montré dans la figure (IV.19).

❖ Compensation avec la méthode du référentiel synchrone

Les figures (IV.11) et (IV.20) présentent la forme du courant du réseau électrique avant et après la compensation pour les charges RL et RC respectivement. Les premières

sous-figures montrent la forme du courant pollué (coté charge) . Les secondes sous-figure montrent les courants harmoniques identifié, qui seront ensuite réinjectés dans le réseau électrique via le système de commande. La forme du courant dépollue (coté source) est montré dans la troisièmes sous-figure. Le THD coté source est ramené de 24.19% à 0.84 % (pour la charge RL) comme il est montré dans la figure (IV.12) et de 75.23% à 1.68% (pour la charge RC) comme il est montré dans la figure (IV.21).

❖ Compensation avec la méthode tri-monophasé

Les figures IV.13. et IV.22 présentent la forme du courant du réseau électrique avant et après compensation pour les charges RL et RC respectivement. Les premières sous-figures montrent la forme du courant pollué (coté charge). Les secondes sous-figure montrent les courants harmoniques identifié, qui seront ensuite réinjectés dans le réseau électrique via le système de commande. La forme du courant dépollue (coté source) est montré dans la troisièmes sous-figure.

Le THD coté source est ramené de 24.25% à 0.97% (pour la charge RL) comme il est montré dans la figure (IV.14) et de 75.81% à 2.1 % (pour la charge RC) comme il est montré dans la figure (IV.23).

Le filtrage actif avec compensation de l'énergie réactive consiste à éliminer les harmoniques pour avoir un courant de source sinusoïdal et rendre le déphasage entre le courant et la tension du réseau nul comme il est montré dans les figures (IV.8. b) et (IV. 17.b).

Les figures (IV.24) jusqu'à (IV.31) présentent la rapidité de compensation du filtre actif lors d'un changement de la charge (RL et RC) on peut dire que le filtre actif parallèle adapte avec la variation de la charge.

IV.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats du simulation des quatre méthodes d'identification pour l'extraction des courants harmoniques à partir de la connaissance de différentes composantes du courant absorbé par la charge non linéaire. Le courant I_s est quasi sinusoïdal, néanmoins des pics apparaissant pendant les commutations

CONCLUSION GENERALE

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre de la recherche de nouvelles solutions pour l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique dans le réseau électrique.

Dans ce mémoire, en premier lieu nous avons mis en évidence les effets liés à la connexion des dispositifs d'électronique de puissance sur la qualité de l'énergie. Ensuite nous avons proposé les solutions qui permettant de remédier chaque type de perturbation.

Le second chapitre est plus particulièrement dédié à l'étude du : Le filtre actif parallèle à structure tension et son fonctionnement général. Deux stratégies de commande pour contrôler les courants du filtre actif. La commande hystérésis et la commande MLI. A partir de ce travail nous avons trouvé que la commande hystérésis est robuste et simple à mettre en œuvre, par rapport aux autres technique de commande cependant sa fréquence de commutation est variable et incontrôlable. Par contre, en commande MLI, la fréquence de commutation peut être imposée et les simulations montrent que les performances de compensation par la commande hystérésis sont meilleures, en dynamique et en statique, comparées à celles de la commande par MLI.

Par la suite, nous avons développé les quatre techniques pour l'extraction des harmoniques du courant et nous avons présenté les caractéristiques de chaque méthode.

La structure complète du filtre actif parallèle a été simulée a partir du logiciel Matlab. Des comparatifs entre les quatre méthodes d'identifications des courants de références a été effectuée. Les résultats des simulations montre les performances d'un filtre actif sont étroitement liées à l'algorithme utilisé pour déterminer les références harmoniques de courant.

La méthode d'identification des courants harmoniques par l'intermédiaire des calculs des puissances réelle et imaginaire instantanées offre un meilleur compromis entre l'efficacité, la souplesse et la simplicité d'implantation, et permet d'identifier un plus grand nombre de perturbations en courant, tels que les courants harmoniques et réactif et présente de bonnes caractéristiques face aux variations de la charge non-linéaire.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] **L. DUVERGER**, «Etude de stratégies de commande d'un filtre actif de type parallèle en vue d'assurer la compensation des harmoniques et déséquilibre », *Mémoire du projet de fin d'études, Université Catholique de Louvain*, 2006.
 - [2] **M.M. ABDUSALAM**, «Structures et stratégies de commande des filtres actifs parallèle et hybride avec validations expérimentales », *Thèse de doctorat, Université Nancy-I*, 2008.
 - [3] **S. RAHMANI, K. AL-HADAD, and H.Y. KANAAN**, «A comparative study of shunt hybrid and shunt active power filters for single – phase applications: simulation and experimental validation », *Mathematic and Computers in Simulation*, Vol. 71, pp. 345-359, 2006.
 - [4] **Canadian National Power Quality Survey**: Frequency of Industrial and Commercial Voltage Sags; D.O Koval, M.B Hughes; *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 33, No. 3, MAY/JUNE 1997, Page(s):622- 627.
 - [5] **C. COLLOMBET, J. LUPIN et J. SCHONEK**. «Perturbations harmoniques dans les réseaux pollués, et leur traitement». *Cahier Technique Schneider Electric n° 152, septembre 1999*.
 - [6] **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.
 - [7] **T. GHENNAM** «Etude et réalisation d'un compensateur actif de puissance commandé par DSP». *Thèse de magister. Ecole militaire polytechnique*, 2005.
 - [8] **F.MEKRI** «Commande robuste des conditionneurs Actifs de puissances ». *Thèse de doctorat, Université des sciences et de la technologie d'Oran* , 3 novembre 2007
 - [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] **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
 - [11] **I. ETXEBERRIA-OTADUI**. «Sur les systèmes de l'électronique de puissance dédiés à la distribution électrique –application à la qualité de l'énergie». *Thèse de doctorat. L'institut national polytechnique de Grenoble*, 26 septembre 2003.
-

- [12] **B.Szabados**, «Répercussions sur le réseau électrique de l'alimentation des convertisseurs de grande puissance », *RGE*, Vol.12, pp.791-796,1984.
 - [13] **L.ZELLOUMA** « Filtrage actif parallèle des harmoniques du courant générés par un pont redresseur triphasé non commandé». *Thèse de magister*. Université badji mokhtar annaba, 2006.
 - [14] **L. MRABET** «Étude par simulation d'un filtre actif parallèle de puissance pour la compensation des courants harmoniques génères par un pont redresseur triphasée ». *Thèse de magistère. L'université Badji Mokhtar Annaba*, 2000.
 - [15] **S. A. TADJER** « Étude d'un système de compensation d'harmonique en Utilisant un générateur photovoltaïque ». *Thèse de magister, L'université m'hamed bougara-boumerdes*, 2008.
 - [16] **N. GHASSOULI 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.
 - [17] **M. MAGRAOUI** «validation de techniques de commande d'un filtre actif parallèle». *Mémoire de la maîtrise,Université du québec* ,Septembre 2007.
 - [18] **L.ZELLOUMA** « Contribution à l'étude du filtrage des harmoniques des réseaux des distribution à l'aide de filtre actif». *Thèse de doctorat. Université badji mokhtar annaba*, 2010.
 - [19] **Sh. KARIMI**, «Continuité de service des convertisseurs triphasés de puissance et prototypage "FPGA in the loop":application au filtre actif parallèle», *Thèse de doctorat*, l'Université Henri Poincaré, Nancy-I,2009
 - [20] **S. BEAULIEU**, «Étude et mise au point d'un filtre actif d'harmoniques en vue d'améliorer la qualité de l'alimentation électrique », *Mémoire de la maîtrise, Université du Québec*, Mai 2007.
 - [21] **M.C. BENHABIB**, «Contribution à l'étude des différentes topologies et commandes des filtres actifs parallèles à structure tension : modélisation, simulation et validation expérimentale de la commande », *Thèse de doctorat, Université Nancy-I*, 2004.
 - [22] **N.BRUYANT**, «Etude et commande généralisées de filtres actifs parallèles, compensation global ou sélective des harmoniques, régime équilibré ou déséquilibré», *Thèse de doctorat, l'université de Nantes*, 1999.
-

RESUME

Ces dernières années , l'utilisation des convertisseurs statique est en fort progression .Ces convertisseur absorbent des courants non sinusoïdale au réseau . Ils se comportent alors comme des générateurs de courants harmonique, provoquant des dysfonctionnement au niveau des équipements électriques .les développement récent des semi conducteurs de puissance entièrement commandables électriques , tel que les IGBT a permis à la conception de nouvelle structure, comme les filtres actifs de puissance pour minimiser ces courants harmoniques,

Dans cette mémoire on a étudié la compensation des harmoniques générées par un pont redresseur triphasé non commandé par un filtre actif parallèle, dans deux cas de charge RL et RC .

Nous avons utilisé différentes méthodes d'identifications des courants harmoniques d'une charge polluante, et nous avons les comparé pour valider l'efficacité de chacune d'elles.

Les résultats de la simulation l'efficacité et les bonnes performances du filtre actif parallèle avec ces différents algorithmes de commande qui permet une réduction importante des harmoniques du courant et a réduit la THD à une valeur inférieur à 5% correspondant aux recommandations et normes internationales. La méthode d'identification instantanées des puissances réelle et imaginaire est la plus performante, et la plus adaptée à identifier d'autre types de perturbation (courant harmonique , puissance réactive).
