



**Faculté Sciences de l'ingénieur
Département Electrotechnique**

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de MAGISTER

Filtrage actif parallèle des harmoniques du courant générés par un pont redresseur triphase non commandé

Option

COMMANDE DES MACHINES ELECTRIQUES

Par

ZELLOUMA LAID

DIRECTEUR DE MEMOIRE: Mr. N.E. DEBBACHE Prof UNIVERSITE ANNABA

DEVANT LE JURY

| | | | |
|----------------------|------------------------|-----------|--------------------------|
| PRESIDENT | : Mr. S. SAAD | MC | UNIVERSITE ANNABA |
| EXAMINATEUR | : Mr. H. LABAR | MC | UNIVERSITE ANNABA |
| MEMBRE INVITE | : Mr. A. OMEIRI | CC | UNIVERSITE ANNABA |

Année 2006

.
()
-) **SIMULINK MATLAB**
(-
.
.
%72.37
%4.39
.% 3.85 **%23.53**
%5
.
(2 -1 2 -1 2 -1)

ABSTRACT

Static converters generate non sinusoidal currents and absorb reactive power. These perturbations (harmonics) are the origin of many problems and affect electrical equipments connected to the power supply.

In this work an active power filter is used to eliminate harmonics generated by a non linear load (uncontrolled three phase bridge rectifier) with RL and RC load.

A simulation by MATLAB SIMILINK of power supply, active power filter and a non linear load using two type of control strategies (hystérésis and PWM technique). The instantaneous power method (p-q theory) is applied to calculate and identify harmonic current.

Spectral analyses before and after filtering harmonic is carried out in order to compare the results and determine power active filter efficiency.

The total harmonic distortion (THD) is 72.37% before using shunt active filter; this is reduced to 4.39% for RC load. Concerning RL load, the THD was 23.53%, is reduced to 3.85% after using shunt active filter.

The obtained results show a significant harmonic current reduction and the active filter auto-adaptivity to load variation ($RL1-RL2$; $RC1-RC2$; $RL1-RC2$).

This active filter is efficient and has show a good filtering characteristics, reducing harmonic to a value under 5% satisfying the international recommendation.

RESUME

Les convertisseurs statiques absorbent des courants non sinusoïdaux et consomment généralement de la puissance réactive. Ces deux phénomènes nouveaux sur le réseau électrique ont engendrés un certain nombre de problèmes allant du dysfonctionnement d'un équipement jusqu'à sa destruction.

Dans ce travail, on a traité l'élimination par un filtre actif parallèle des harmoniques générées par un pont redresseur triphasé non commandé, dans deux cas de charge *RL* et *RC*.

Une simulation par MATLAB SIMULINK de l'ensemble réseau, filtre actif, et charge, pour deux stratégies de commande, hystérésis et MLI à échantillonnage naturel est effectuée. La méthode des puissances instantanées ('p-q'theory) est utilisée pour calculer et identifier le courant harmonique. Une analyse spectrale avant et après filtrage est obtenue pour comparer les résultats et déterminer l'efficacité du filtre actif.

La *THD* du courant de charge avant filtrage est de 72,37% à été réduite après filtrage à 4,39% côté réseau pour une charge *RC*. Pour la charge *RL*, la *THD* avant filtrage est de 23.53% et à été réduite à 3.85%.

Ces résultats montrent une atténuation significative des harmoniques du courant et l'auto- adaptivité du filtre aux variations de la charge (*RL1-RL2* ; *RC1-RC2* ; *RL1-RC2*).

Ces résultats montrent aussi l'efficacité et les bonnes performances du filtre actif parallèle de puissance, qui a réduit la *THD* à une valeur inférieur à 5% correspondant aux recommandations et normes internationales.

REMERCIEMENTS

Je remercie en premier lieu dieu tout puissant pour m'avoir donné la force et la volonté d'accomplir ce modeste travail.

Je voudrais tout d'abord exprimer toute ma reconnaissance à **Mr N.E.DEBBACHE** Professeur à l'université d'Annaba et **Mr A.OMEIRI** chargé de cours à l'université d'Annaba pour leurs encadrements.

Je remercie les messieurs : **S.SAAD** Maître de conférence à l'université d'Annaba, **A.E.CHAGHI** Docteur à l'université de Batna et **M^{eme} L.BOUTRAA** chargé de cours à l'université de Batna pour leurs aide aux moments à l'élaboration de ces programmes de simulation.

Je remercie également à tous les membres de jury pour l'honneur qu'ils me font en acceptant de participer au jury, en l'occurrence :

Monsieur **S. SAAD** Maître de conférence à l'université d'Annaba.

Monsieur **H. LABAR** Maître de conférence à l'université d'Annaba.

Monsieur **A. OMEIRI** Chargé de cours à l'université d'Annaba.

Liste des Tableaux

| Tableau | Titre | Page |
|----------------|---|-------------|
| Tableau (I-1) | L'ensemble des matériels électriques perturbés par la pollution harmonique. | 10 |
| Tableau (II-1) | Comparaison entre le filtre actif et le filtre passif. | 19 |
| Tableau (II-2) | Comparaison entre le filtre actif parallèle et le filtre actif série. | 20 |
| Tableau (V-1) | Tensions fournies par l'onduleur sous formes vectorielles. | 44 |
| Tableau (V-1) | Les valeurs des éléments construisant la structure étudiée. | 46 |

Liste des Figures

| Figure | Titre | Page |
|----------------|--|------|
| Figure (I-1) | Décomposition d'un signal périodique 50 Hz en série de Fourier | 5 |
| Figure (II-1) | Forme des courants absorbés. | 13 |
| Figure (II-2) | Montage en série (a) ou en parallèle (b) des deux redresseurs. | 13 |
| Figure (II-3) | Branchement d'un filtre résonant. | 14 |
| Figure (II-4) | Branchement d'un filtre amorti. | 15 |
| Figure (II-5) | Sources des harmoniques de tension et de courant. | 16 |
| Figure (II-6) | Filtre actif parallèle (compensateur de courant). | 17 |
| Figure (II-7) | Filtre actif série (compensateur de tension). | 18 |
| Figure (II-8) | Filtre actif série et filtre passif parallèle. | 20 |
| Figure (II-9) | Filtre actif série connecté en série avec un filtre passif parallèle. | 21 |
| Figure (II-10) | Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle. | 21 |
| Figure (III-1) | Schéma de principe d'un filtre actif. | 22 |
| Figure (III-2) | Exemple de formes d'ondes. | 23 |
| Figure (III-3) | Structure générale d'un filtre actif parallèle. | 24 |
| Figure (III-4) | Structure tension. | 25 |
| Figure (III-6) | Structure d'un onduleur de tension triphasé. | 26 |
| Figure (III-7) | Principe de la commande des courant par hystérésis. | 27 |
| Figure (III-8) | Principe de commande par MLI. | 28 |
| Figure (III-9) | Schéma de principe d'onduleur monophasé commandé par MLI sinus-triangle. | 29 |

| Figure | Titre | Page |
|-----------------|--|-------------|
| Figure (III-10) | Diagramme du système du filtre actif. | 30 |
| Figure (III-11) | Schéma bloc pour calculer le courant de référence. | 31 |
| Figure (III-12) | Schéma bloc pour contrôler le courant. | 32 |
| Figure (III-13) | Phase de conduction pour $i_c > 0$. | 33 |
| Figure (III-14) | Phase de conduction pour $i_c < 0$. | 34 |
| Figure (IV-1) | Schéma de principe de la méthode d'identification des puissances instantanées. | 39 |
| Figure (IV-2) | Boucle de régulation de la tension continue. | 41 |
| Figure (IV-3) | Schéma de la régulation des courants du filtre actif parallèle. | 42 |
| Figure (V-1) | Schéma synoptique de l'association filtre actif-réseau-charge polluante. | 45 |
| Figure (v-2) | Schéma synoptique d'un réseau triphasé. | 46 |
| Figure (V-3) | Schéma synoptique d'un pont redresseur. | 47 |
| Figure (V-4) | Présentation schématique d'un onduleur triphasé. | 47 |
| Figure (V-5) | Représentation vectorielle des tensions générées par l'onduleur. | 50 |

Liste des symboles

| Symbole | Désignation |
|-------------------------------------|--|
| THD | Taux de distorsion harmonique |
| P | Puissance active |
| S | Puissance apparente |
| Q | Puissance réactive |
| D | Puissance déformante |
| I_h | Courant harmonique |
| F_p | Facteur de puissance |
| H5, H7 | Harmonique de range 5 et 7 |
| I_{ch} | Le courant de charge |
| U_d | La tension continue du redresseur |
| I_d | Le courant continu du redresseur |
| R_d, L_d | L'impédance du redresseur |
| V_{ch} | La tension de charge |
| f | Fréquence |
| ω | Pulsation du réseau |
| f_p | Fréquence de la porteuse |
| r | Le coefficient de réglage |
| V_{s-f} | Composante fondamentale de la tension d'alimentation |
| V_{s-h} | Composante harmonique de la tension d'alimentation |
| Z_s | Impédance de la source |
| Z_{charge} | Impédance de la charge |
| I_{ch-h} | Composante harmonique du courant créé par la charge |
| m | L'indice de modulation |
| V_p | l'amplitude de la porteuse |
| K | Régulateur proportionnel |
| I_f | Le courant du filtre |
| I_{ref} | Le courant de référence a la sortie de bloc d'identification |
| V_{dc} | Tension de référence aux bornes de la source flottante |
| $e_{1, 2, 3}$ | Le système de f.e.m.s triphasé du réseau |
| $V_{s1, s2, s3}$ | Les tensions aux points de raccordement |
| i_{Fa}, i_{Fb}, i_{Fc} | Courants fournis par le filtre actif |
| L_{cc} | Inductance de court circuit |
| R_{cc} | Résistance de court circuit |
| Z_{cc} | Impédance de court circuit |
| X_c | Grandeur liée à la charge polluante |
| X_F | Grandeur liée au filtre actif |

SOMMAIRE

| | |
|---|----|
| Introduction générale | 1 |
| Chapitre I Naissance des harmoniques et leurs effets sur le réseau d'alimentation | |
| I-1 Introduction..... | 3 |
| I-2 Définition..... | 4 |
| I-3 Décomposition d'un signal..... | 4 |
| I-4 Notion des charges..... | 6 |
| I-5 Origines et sources des harmoniques..... | 6 |
| I-5-1 Emission en tension..... | 6 |
| I-5-1-1 Alternateurs..... | 6 |
| I-5-1-2 Transformateurs..... | 7 |
| I-5-1-3 Alimentations statiques ininterrompibles (ASI)..... | 7 |
| I-5-2 Emission en courant..... | 7 |
| I-5-2-1 Le redresseur triphasé à thyristors..... | 7 |
| I-5-2-2 Les charges non linéaires passives..... | 7 |
| I-6 Effet des harmoniques..... | 8 |
| I-7 Différents types d'effets..... | 9 |
| I-7-1 Les effets instantanés..... | 9 |
| I-7-2 Les effets différés..... | 9 |
| I-7-2-1 Effets à court terme..... | 9 |
| I-7-2-2 Effets à moyen et long terme..... | 10 |
| I-8 Pertes supplémentaire dues aux harmoniques..... | 11 |
| I-9 Conclusion..... | 11 |
| Chapitre II Méthodes d'élimination des harmoniques | |
| II-1 Introduction..... | 12 |
| II-2 Transformateur à couplage spécial..... | 12 |
| II-3 Inductances (selfs) série..... | 12 |
| II-4 Augmentation de l'indice de pulsation du convertisseur..... | 12 |
| II-5 Solution de filtrage..... | 14 |
| II-5-1 Filtrage passif..... | 14 |
| II-5-1-1 Filtre résonant..... | 14 |
| II-5-1-2 Filtre amorti..... | 15 |
| II-5-2 Inconvénients des filtres passifs..... | 16 |
| II-5-3 Filtrage actif..... | 16 |
| II-5-3-1 principe..... | 16 |
| II-5-3-2 Filtrage actif parallèle..... | 17 |
| II-5-3-3 Filtrage actif série..... | 18 |
| II-5-4 Avantages des filtres actifs..... | 19 |
| II-5-5 Filtre hybride..... | 20 |
| II-5-5-1 Le filtre actif série avec des filtres passifs parallèles..... | 20 |
| II-5-5-2 Le filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles..... | 21 |
| II-5-5-3 Le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle..... | 21 |
| II-6 Conclusion..... | 22 |

Chapitre III Le filtre actif parallèle

| | |
|---|----|
| III-1 Introduction..... | 22 |
| III-2 Principe du filtre actif parallèle..... | 22 |
| III-3 Structure d'un filtre actif parallèle..... | 23 |
| III-3-1 Structure tension..... | 24 |
| III-3-2 Structure courant..... | 25 |
| III-4 Généralité sur les onduleurs..... | 26 |
| III-4-1 Onduleur de tension triphasé..... | 26 |
| III-4-2 La commande de l'onduleur..... | 27 |
| III-4-2-1 Commande par hystérésis..... | 27 |
| III-4-2-2 Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI)... | 27 |
| III-4-2-3 Principe de MLI sinus-triangle..... | 28 |
| III-5 Conclusion..... | 29 |

Chapitre IV Identification des courants harmoniques et régulation

| | |
|---|----|
| IV-1 Introduction..... | 30 |
| IV-2 La méthode d'identification des courants perturbés..... | 30 |
| IV-1-2-1 Généralités sur les méthodes d'identification..... | 30 |
| IV-1-2-2 Principe du fonctionnement de la méthode des puissances instantanées..... | 31 |
| IV-1-2-2-1 Généralités sur les puissances instantanées..... | 31 |
| IV-1-2-2-2 Calcul des courants perturbateurs..... | 33 |
| IV-1-2-2-3 Algorithme d'identification..... | 34 |
| IV-3 Régulation..... | 35 |
| IV-3-1 Régulation de la tension continue..... | 35 |
| IV-3-2 La régulation du courant du filtre actif parallèle..... | 36 |
| IV-4 conclusion..... | 38 |

Chapitre V Modélisation et simulation numérique

| | |
|--|-----------|
| V-1 Introduction..... | 39 |
| V-2 Schéma synoptique de l'association filtre actif- réseau- charge polluante..... | 40 |
| V-3 Modélisation de l'association réseau- Filtre actif- Charge polluante..... | 41 |
| V-3-1 Modélisation du réseau..... | 41 |
| V-3-2 Modélisation de la charge polluante (Redresseur Triphasé)..... | 41 |
| V-3-3 Modélisation du filtre actif (ou de l'onduleur)..... | 42 |
| V-4 Description globale de la simulation..... | 46 |
| V-4-1 Commande Hystérésis..... | 46 |
| V-4-1-1 Charge R-L..... | 46 |
| V-4-2-2 Charge R-C..... | 48 |
| V-4-2 Commande MLI..... | 49 |
| V-4-2-1 Charge R-L..... | 49 |
| V-4-2-2 Charge R-C..... | 50 |
| V-5 Changement de la charge..... | 51 |
| V-5-1 Commande hystérésis..... | 51 |
| V-5-1-1 Changement de la charge (RL1 => RL2)..... | 51 |
| V-5-1-2 Changement de la charge (RC1 => RC2) | 52 |
| V-5-1-3 Changement de la charge (RL1 => RC2)..... | 53 |
| V-5-2 Commande MLI..... | 54 |
| V-5-1-1 Changement de la charge (RL1 => RL2)..... | 54 |
| V-5-1-2 Changement de la charge (RC1 => RC2) | 55 |
| V-5-1-3 Changement de la charge (RL1 => RC2)..... | 56 |
| V-6 Conclusion..... | 57 |
| Conclusion générale..... | 58 |
| Bibliographie | |

INTRODUCTION GENERALE

Ces dernières années, l'utilisation des convertisseurs statiques dans les systèmes de conversion d'énergie électrique a considérablement contribué aux progrès réalisés aux niveaux des performances et de l'efficacité de ces systèmes.

Les convertisseurs statiques absorbent des courants non sinusoïdaux même s'ils sont alimentés par des tensions sinusoïdales. Ils se comportent alors comme des générateurs de courants harmoniques et consomment généralement de l'énergie réactive. Le réseau quant à lui est parfaitement adapté à des courants sinusoïdaux. Ces deux phénomènes nouveaux sur le réseau ont engendré un certain nombre de perturbations allant du dysfonctionnement d'un équipement jusqu'à la destruction d'une partie des équipements connectés.

Pour faire face à ce problème, la solution classique qui est connue depuis bien longtemps consiste en l'utilisation des filtres passifs. Cette solution est la plus répandue et pratiquement la plus simple et la moins chère mais elle présente deux inconvénients majeurs. Le premier est lié au phénomène de résonance avec le réseau qui est à l'origine de l'amplification de tout harmonique à fréquence voisine de celle du réseau. Le deuxième inconvénient est la dépendance des performances du filtre passif aux caractéristiques du réseau sur lequel il est connecté.

Cependant, les progrès remarquables réalisés au cours des dernières années, dans le domaine des semi-conducteurs de puissance entièrement commandables, les thyristors et les transistors en particulier, a permis de concevoir des dispositifs d'élimination des harmoniques auto-adaptables appelés compensateurs actifs d'harmoniques, ou encore filtre actif dont l'objectif est l'élimination des problème intrinsèques des filtres passifs.

L'objectif de ce travail étant le filtrage actif des harmoniques des réseaux électriques. Comme les principales sources de l'existence des perturbations sont les charges non linéaires dont les plus utilisables sont les convertisseurs statiques raccordés aux réseaux qui les perturbent en injectant des courants harmoniques, les filtres actifs parallèle permettant de contrôler les courants semblent être plus adaptés à la compensation, ce qui a été choisi pour notre étude.

Le travail présenté dans ce mémoire concerne particulièrement l'étude par simulation d'un filtre actif parallèle à structure tension destiné à compenser les courants harmoniques générés par une charge non-linéaire dans un premier temps sur un réseau triphasé trois fils.

La conception et la mise en marche du filtre actif dépendent de quatre facteurs :

- Le circuit de puissance du filtre actif.
- La loi de commande ou la méthode de modulation employée (MLI, hystérésis, etc....)
- La méthode utilisée pour le calcul des courants harmonique (courant de références) qui est la partie importante.
- Schéma de régulation pour que le filtre actif s'adapte aux variations de la charge.

Dans ce mémoire le travail est réalisé sur l'ensemble réseau, charge non linéaire (pont triphasé non commandé), filtre actif et schéma de régulation.

Cette thèse comporte cinq chapitres, structurée comme suit :

Au premier chapitre nous analyserons les naissances des harmoniques et leurs effets sur le réseau d'alimentation.

Le second chapitre traite les différentes solutions de filtrage traditionnelle et moderne de réduction de ces perturbations. Finalement, nous détaillerons les avantages, inconvénients.

Dans la troisième chapitre nous avons traité le filtre actif parallèle à base d'onduleur de tension à deux principes de commande hystérésis et MLI.

Dans la quatrième chapitre nous avons étudié les différentes méthodes d'identification des courants harmoniques, celle choisit pour notre étude étant la méthode des puissances actives et réactives instantanées.

Au dernier chapitre, la modélisation de l'ensemble, réseau-charge polluante-filtre actif, est d'abord présenté, puis les résultats de simulation obtenus à partir des deux programmes sous l'environnement Matlab Simulink (powersystems). Finalement, pour compléter cette simulation, un cas particulier de charge polluante sera également traité.

CHAPITRE I

NAISSANCE DES HARMONIQUES ET LEURS EFFETS SUR LE RESEAU D'ALIMENTATION

I-1 Introduction

L'un des phénomènes les plus influents sur la qualité de l'énergie électrique distribuée au consommateur est le phénomène des harmoniques. Idéalement, l'électricité serait distribuée sous une forme de tension sinusoïdale parfaite d'amplitude et de fréquence constante. En pratique, l'opération du système électrique d'alimentation et l'utilisation de l'énergie électrique par les consommateurs provoquent différentes dérivations qui fait que le signal de courant obtenu est différent du signal sinusoïdal idéal que l'on appelle fondamental.

Lorsque l'on connecte sur le réseau des convertisseurs tels que les redresseurs et les cyclo-convertisseurs, on est confronté à différents problèmes.

Ces charges non linéaires, sont génératrices de courant harmonique qui est caractérisé par un facteur de puissance mauvais.

I-2 Définition

Un harmonique est défini comme étant une composante sinusoïdale d'un signal périodique, ayant une fréquence multiple de l'onde fondamentale. Le domaine des fréquences qui correspond à l'étude des harmoniques est généralement compris entre 100 Hz et 2000 Hz (entre les harmoniques de rangs $h=2$ et $h=40$). Il peut exister dans la tension des réseaux des sous harmoniques [1].

L'amplitude de rang 1 est appelée la composante fondamentale du signal électrique périodique; dans notre cas c'est la (50 Hz ou 60 Hz). L'harmonique d'ordre zéro correspond à la composante directe du signal, l'amplitude de chaque harmonique est inversement proportionnelle à son ordre.

Les premiers rangs harmoniques tel que (5,7) ont des amplitudes élevées, d'où l'importance des courants injectés, raison pour laquelle il faut limiter ces harmoniques dans les normes. L'amplitude de l'harmonique de rang (h) du côté de la source est donnée par :

$$I_h = I_1/h \quad (\text{I-1})$$

h : harmonique d'ordre h

I_1 : amplitude du courant fondamentale

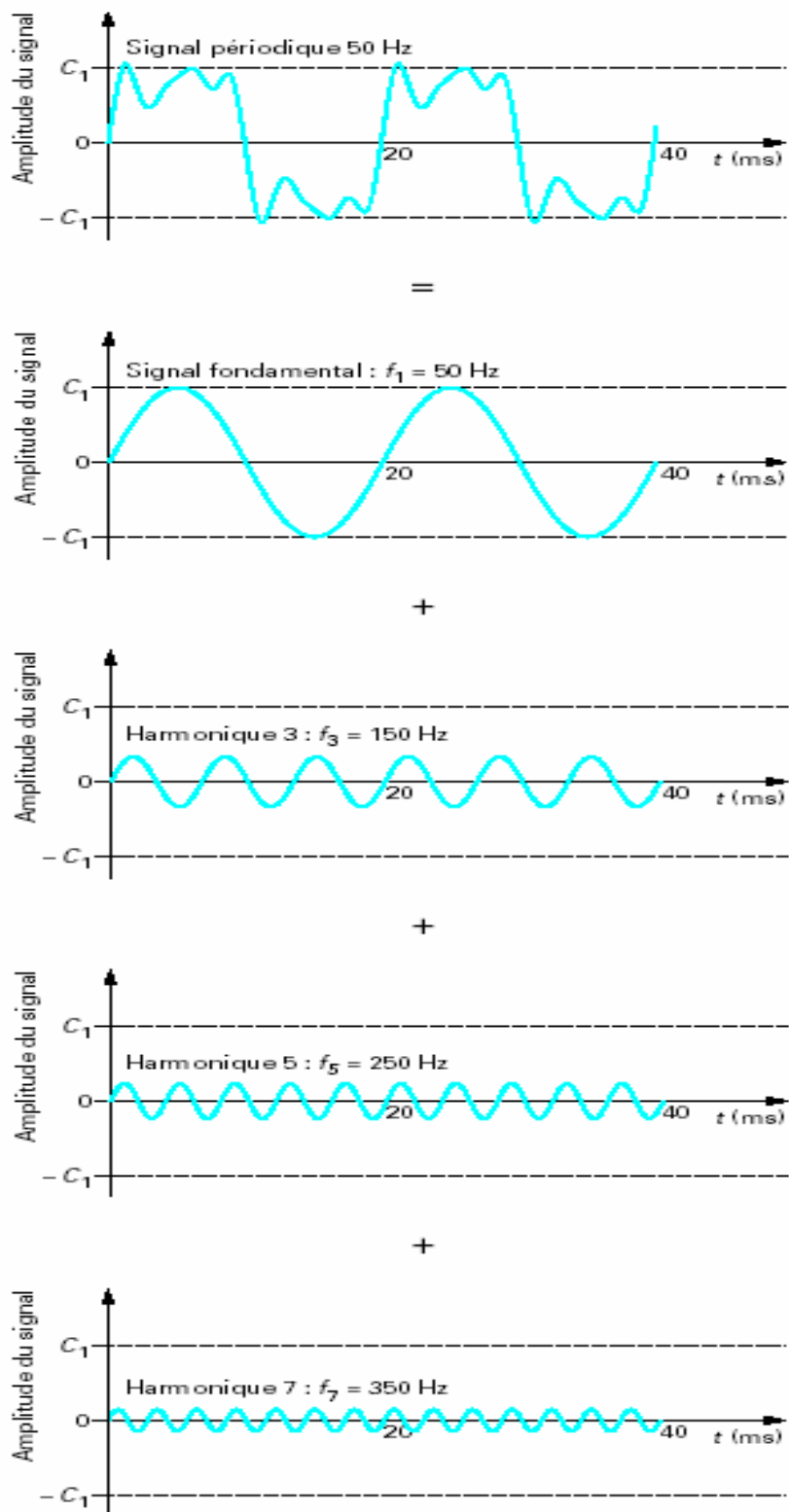
I_h : amplitude de l'harmonique de rang (h)

I-3 Décomposition d'un signal

L'analyse de Fourier permet de quantifier la distorsion harmonique d'un signal. Un signal périodique (tension ou courant) de forme quelconque et de fréquence f_0 se décompose en une somme de signaux sinusoïdaux dont chacun a une fréquence, dite harmonique, qui est un multiple entier de la fréquence fondamentale f_0 .

Ce multiple est appelé rang harmonique. Un exemple de cette décomposition est donné sur la figure(I-1). L'amplitude d'une composante harmonique est généralement exprimée en pourcentage de la grandeur fondamentale correspondante, c'est le taux d'harmoniques [21;25].

$$\text{THD}_i = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2} \quad (\text{I-2})$$



C_1 : la valeur maximale.

Figure(I-1): Décomposition d'un signal périodique 50 Hz en série de Fourier.

I-4 Notion des charges

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, 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 lorsque la relation entre la tension et le courant n'est plus linéaire. Un tel récepteur alimenté par une tension sinusoïdale, consomme un courant non-sinusoïdal. Par la suite, nous nous restreindrons aux charges non-linéaires triphasées, qui consomment un courant périodique, de même période que celle de la tension [18].

Cette classe de charges englobe les convertisseurs statiques (gradateurs, redresseurs), les circuits magnétiques saturés, les lampes, ...

I-5 Origines et sources des harmoniques

Dans le plupart des cas, les harmoniques de tensions ou de courants présentes sur les réseaux électriques proviennent de l'utilisation des charges non linéaires, tels que les convertisseurs statiques.

I-5-1 Emission en tension

L'émission harmonique en tension due aux matériels de réseaux entre pour une faible part, et avec des taux généralement faible, dans la distorsion du réseau. Elle est due aux imperfections de construction (dissymétrie, distribution non sinusoïdale du champ dans les alternateurs, saturation des circuits magnétiques...) des bobinages des machines tournantes, des moteurs, des transformateurs.

I-5-1-1 Alternateurs

Les alternateurs des centrales de production fournissent une tension d'alimentation qui contient très peu d'harmoniques ($< 0.5\%$). Le contenu harmonique de la tension générée par les alternateurs est lié à la qualité du bobinage et des pièces polaires qui assurent la forme sinusoïdale de l'onde. Sur un groupe électrogène, le taux de distorsion harmonique en tension est généralement inférieur à 5% à vide est inférieur à 1% lorsque le groupe électrogène débite à pleine puissance sur une charge linéaire.

I-5-1-2 Transformateurs

Les transformateurs peuvent être générateurs de tensions harmoniques lorsqu'ils fonctionnent en régime saturé. Sur les réseaux, le taux de distorsion harmonique en tension dû à ces appareils reste toujours inférieur au pourcent.

I-5-1-3 Alimentations statiques ininterrompibles (ASI)

Ces dispositifs ont des performances très intéressantes pour la protection du matériel contre les creux de tension et les coupures. En revanche, ils ont parfois des limitations dans le domaine harmonique qu'il convient de connaître pour bien les maîtriser. En effet, le réseau protégé alimente généralement des charges non linéaires comme du matériel informatique.

Pour une ASI d'une puissance de 80KVA, le taux de distorsion harmonique en tension est inférieur à 4% pour une charge linéaire, est inférieur à 7% pour une charge non linéaire.

En générale, le taux de distorsion harmonique en tension diminue avec l'augmentation de la puissance de L'ASI.

Il faut bien noter qu'en charge, le taux de tension harmonique est dû essentiellement aux courant harmonique créés par les charges non linéaires qui sont alimentées par L'ASI.

I-5-2 Emission en courant

Les charges non linéaires consomment un courant qui n'est pas sinusoïdale. Elles représentent les principales sources d'émission en courants harmoniques sur les réseaux.

On peut distinguer 7 différents types de « charges perturbatrices élémentaires » chez l'utilisateur, dont 4 constitués de montages électroniques :

- le redresseur monophasé à filtre capacitif, le gradateur monophasé, le redresseur triphasé à thyristors, le redresseur triphasé à diodes et filtre capacitif, et 3 autres ne comportant pas d'électronique, que l'on nomme charges passives.
- les moteurs asynchrones, les lampes, les appareils à arc électrique.

I-5-2-1 Le redresseur triphasé à thyristors

Le redresseur triphasé à thyristors, ou pont de graetz, constitue l'un des montages de l'électronique de puissance les plus répandus dans le secteur industriel. Il représente 55% de la puissance des matériels électroniques de puissance. Dans le domaine de la vitesse variable, les redresseurs triphasés à thyristors sont la principale source de pollution harmonique dans le secteur industriel.

I-5-2-2 Les charges non linéaires passives

On distingue trois types de charges passives non linéaires. Ce sont, d'une part, les lampes et les petits moteurs dans les secteurs tertiaire, domestique et industriel et, d'autre part, les fours à arc dans le secteur industriel.

- **Les lampes :**

Deux types de lampes produisent des courants harmoniques :

Les lampes fluorescentes et les lampes à vapeur haute pression. Elles représentent les deux tiers de la puissance consommée par l'éclairage. La génération d'harmoniques dans ces lampes est liée à la nature fortement non linéaire du phénomène entraînant l'illumination, ainsi qu'à la présence d'un ballast.

- **Les appareils à arc électrique :**

Les appareils à arc électrique regroupent les fours à arc à courant alternatif, dont la puissance peut atteindre plusieurs dizaines de MW, et les machines de soudure à l'arc, à courant alternatif ou continu [1].

I-6-Effet des harmoniques :

Les effets des harmoniques les plus connus et les plus spectaculaires sont la destruction de condensateurs ou de disjoncteurs sous l'effet de forts courants harmoniques amplifiés par des résonances. Ce phénomène est généralement observable sur des réseaux internes d'usines alimentant des convertisseurs statiques et en présence de condensateurs installés sans précautions.

Un autre phénomène, de plus en plus rencontré, est l'échauffement des transformateurs et des conducteurs de neutre sous l'effet des courants harmoniques de rang 3.

Les installations industrielles, soumises à des tensions harmoniques inférieures à 5% de la tension fondamentale ne produisent pas d'effets notables. Entre 5% et 7%, on commence à observer des effets, de 7% à 10%, ces effets sont fréquents, et pour plus de 10%. Les effets sont quasi certains [1].

I-7 Différents types d'effets

On distingue deux grands types d'effets.

I-7-1-Les effets instantanés :

Les effets instantanés concernent les appareils produisant une image électronique (écrans d'ordinateurs, télévisions), les appareils produisant un son censé être de bonne qualité (chaîne HI-FI, téléphonique) ou la précision des appareils de mesure. En présence d'harmoniques, on peut observer une altération des caractéristiques du signal de sortie de l'appareil exposé. Il faut noter que ce phénomène apparaît essentiellement pour des forts niveaux de tension harmonique ou pour des rangs élevés.

I-7-2 Les effets différés

Les effets différés sont souvent liés à un suréchauffement plus ou moins important. Ces effets sont dus essentiellement à deux phénomènes :

- L'échauffement des conducteurs ou des composants traversés par les courants harmoniques.
- Le vieillissement des isolants. Il peut être dû soit à une contrainte en tension consécutive à la présence de tensions harmoniques, et donc à une augmentation locale des courants de fuite, soit à l'échauffement exagéré provoqué par l'échauffement des conducteurs.

Les effets différés peuvent être classés en fonction du délai avant détérioration on distingue les effets :

I-7-2-1 Effets à court terme

Ils concernent essentiellement deux types de matériels :

- Les composantes à faible constante de temps thermique comme les étages d'alimentation des appareils électroniques.
- Les éléments susceptibles d'entrer en résonance ou situés sur le trajet d'un courant amplifié par une résonance, comme les condensateurs, les disjoncteurs ou les petits transformateurs.

I-7-2-2 Effets à moyen et long terme

Pour les effets à moyen ou long terme, on trouve les câbles qui peuvent être le siège de suréchauffement du neutre, les organes de sectionnement, les matériels bobinés comme les transformateurs ou les moteurs.

Pour les effets à moyen terme, il y a en général des niveaux de tension harmoniques significatifs sur le réseau qui permettent un diagnostic relativement aisé.

Les effets à long terme concernent tous les types de matériels et sont liés à la présence de niveaux harmoniques moins importants. Ils se traduisent par un vieillissement prématuré des moteurs, des transformateurs, des câbles, des parasurtenseurs [1;21].

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

Tableau(I-1): L'ensemble des matériels électriques perturbés par la pollution harmonique.

I-8 Pertes supplémentaire dues aux harmoniques

- **Les pertes joule** sont uniquement liées au courant harmonique qui circule dans les éléments du réseau, la valeur des pertes varie selon l'impédance harmonique rencontrée.
- **Les pertes fer** supplémentaires sont liées à la présence de tensions harmoniques ou des courants harmoniques. Elles comprennent les pertes par hystérésis et les pertes par courants de Foucault. Elles prennent leur importance dans les matériels utilisant les circuits magnétiques (moteurs, transformateur...) [1;21].

I-9 Conclusion

La pollution harmonique inquiète au plus haut point les producteurs, les distributeurs ainsi que les grands utilisateurs de l'énergie électrique, surtout avec la croissance extraordinaire de l'utilisation de convertisseurs générateurs d'harmoniques qui rentrent dans plusieurs applications. Si cet état de fait persiste, sans qu'un plan de dépollution ne soit envisagé, les niveaux de compatibilité seront dépassés d'une manière certaine. Aussi une réglementation de prévention et de répression (économique) doit être élaborée afin de «contraindre» les grands utilisateurs et les fabricants de convertisseurs à respecter les limites d'injection harmoniques sur les réseaux électriques, cela permettra d'assurer un niveau de compatibilité en tout point du réseau.

CHAPITRE II

METHODES D'ELIMINATION DES HARMONIQUES

II-1 Introduction

Il existe aujourd'hui toute une panoplie de matériels et de solutions pour l'atténuation des harmoniques ; tous présentant cependant des inconvénients et des avantages.

II-2 Transformateur à couplage spécial

Cette solution empêche la propagation des courants harmoniques de rang 3 et de leurs multiples. Il s'agit d'une solution centralisée pour un ensemble de charges monophasées. Elle n'a cependant aucun effet sur les autres rangs d'harmoniques (H5, H7, etc...).

Cette solution limite, au contraire, la puissance disponible de la source et augmente l'impédance de ligne. Il en résulte une augmentation de la distorsion en tension dû aux autres rangs harmoniques [32].

II-3 Inductances (selfs) série

Cette solution, utilisée pour les entraînements à vitesse réglable (variateurs de vitesse) et les redresseurs triphasés, consiste à introduire une inductance série en amont d'une charge non linéaire. La self a cependant efficacité limitée. Il faut en installer une par charge non linéaire. La distorsion en courant est divisée approximativement par deux [32].

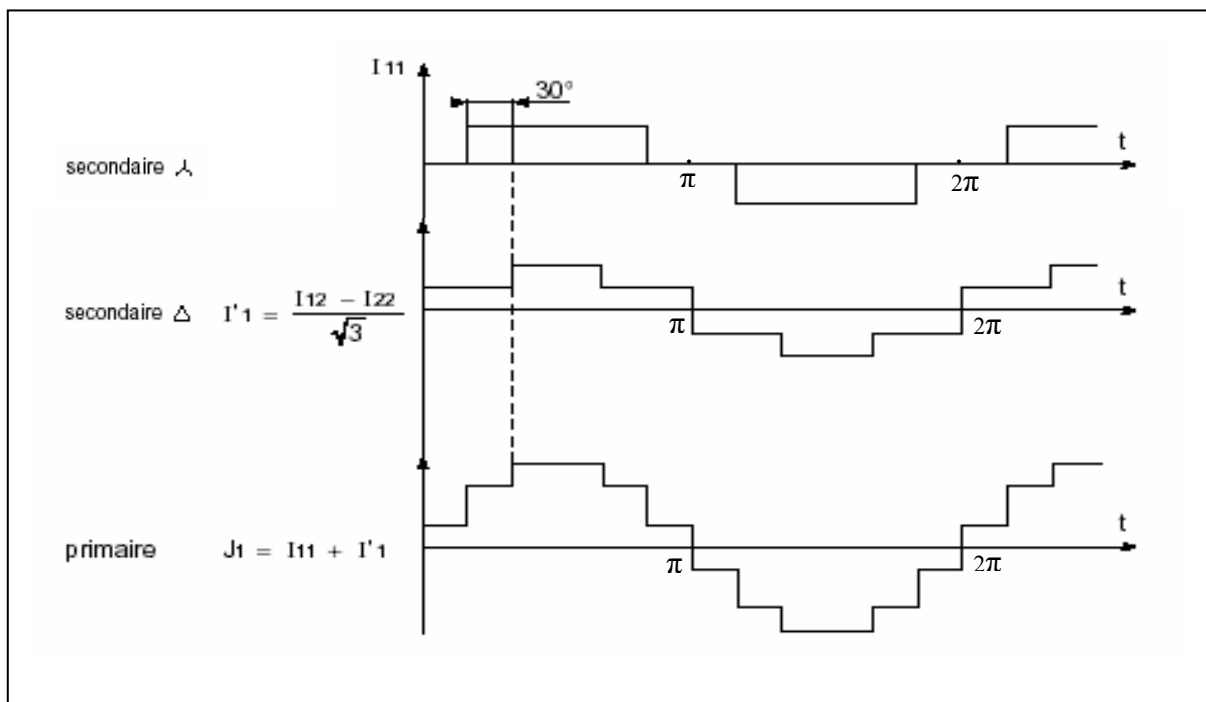
II-4 Augmentation de l'indice de pulsation du convertisseur

Oui le principe consiste à utiliser un transformateur à deux secondaires délivrant des tensions décalées de 30° entre elles, chacun de ces secondaires alimentant un redresseur en pont de Graëtz qui réalise un redressement hexaphasé.

Les redresseurs doivent fournir des courants continus identiques afin que les courants alternatifs qu'ils prélèvent sur les secondaires des transformateurs aient les mêmes valeurs. Dans ces conditions, il y a une recombinaison des courants harmoniques, générés par chacun des redresseurs au primaire du transformateur et le calcul montre que les harmoniques de rang $6k \pm 1$ avec k impair sont éliminés [27].

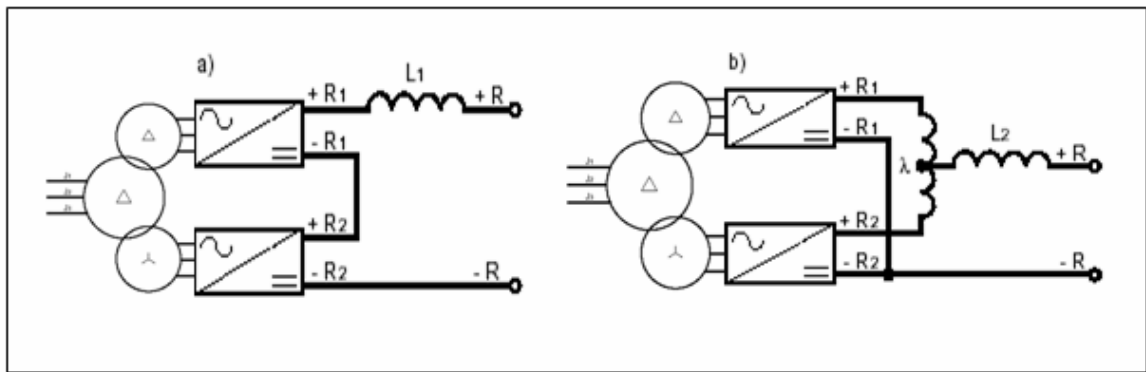
C'est le cas en particulier pour les harmoniques 5 et 7 dont les amplitudes théoriques sont les plus importantes. Les harmoniques 11 et 13 sont conservés tandis que les harmoniques 17 et 19 sont éliminés. Les harmoniques restants sont donc de rang $12k \pm 1$ avec k entier naturel.

La figure(II-1) donne le courant absorbé par le primaire du transformateur à partir des courants délivrés par les deux secondaires [27].



Figure(II-1): Forme des courants absorbés.

Le courant de ligne a une forme beaucoup plus proche d'une sinusoïde que le courant obtenu avec un seul redresseur. Les deux redresseurs peuvent être connectés en série ou en parallèle.



Figure(II-2): Montage en série (a) ou en parallèle (b) des deux redresseurs.

II-5 Solution de filtrage

Si une charge non-linéaire est connectée au réseau de tension, de concevoir un système qui restreint la dissipation des composantes harmoniques.

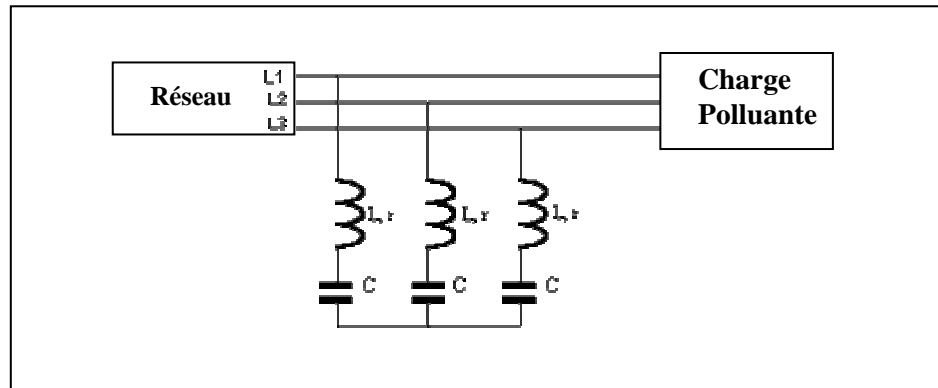
Deux types de solutions sont envisageables. La première consiste à utiliser des convertisseurs statiques peu ou moins polluants, tandis que la seconde réalise un filtrage des composantes harmoniques.

II-5-1 Filtrage passif

Le principe d'un filtre passif est de modifier localement l'impédance du réseau, de façon à dériver les courants harmoniques et à diminuer les tensions harmoniques là où c'est nécessaire. On associe des éléments capacitifs et inductifs de manière à obtenir une résonance série accordée à une fréquence choisie. Il existe deux classes de filtres passifs (résonant, amorti) permettant de réduire les harmoniques [1].

II-5-1-1 Filtre résonant

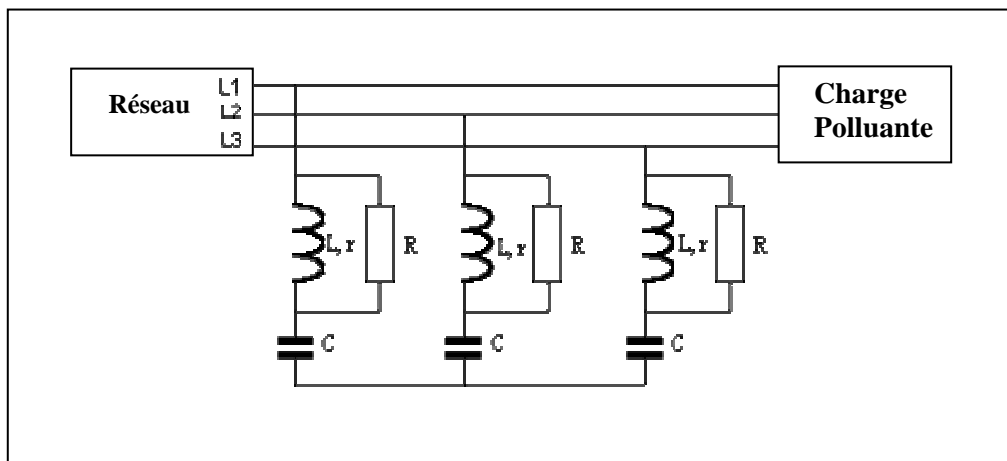
Le filtre résonant est constitué d'un condensateur monté en série avec une inductance. Ces éléments sont placés en dérivation sur l'installation et accordés sur un rang d'harmonique à éliminer. L'impédance de cet ensemble est très faible pour sa fréquence d'accord, et se comporte ainsi comme un court circuit pour l'harmonique considéré [1].



Figure(II-3): Branchement d'un filtre résonant.

II-5-1-2 Filtre amorti

Un filtre amorti se compose d'une capacité en série avec un ensemble constitué de la mise en parallèle d'une inductance et d'une résistance appelée résistance d'amortissement. Il est utilisé lorsque les performances demandées ne sont pas trop élevées. On utilise souvent pour filtrer simultanément les plus hautes fréquence du spectre et non une fréquence particulière, c'est un filtre passe haut [1].



Figure(II-4): Branchement d'un filtre amorti.

II-5-2 Inconvénients des filtres passifs

Le filtrage passif est intéressant par le principe mais a d'importants inconvénients :

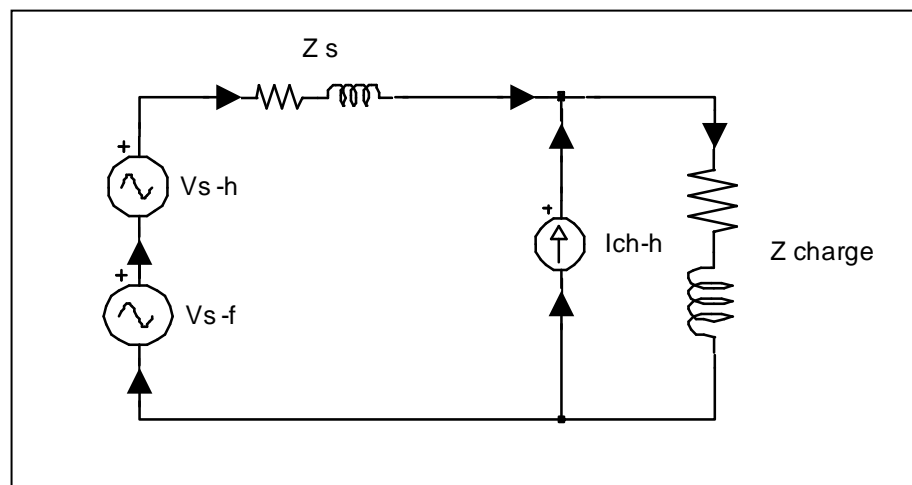
- La variation de l'impédance de la source influe considérablement sur les caractéristiques de filtrages.
- La résonance parallèle entre le filtre passif et la source produit des amplifications de courants harmoniques du côté de la source à des fréquences spécifiques.
- Le fonctionnement en parallèle de plusieurs filtres passifs accordés sur un rang théoriquement égal, entraîne la circulation de courants harmoniques très importants qui provoquent rapidement leur destruction.
- La présence d'un filtre harmonique raccordé à un réseau d'un niveau de tension donné nécessite de déconnecter tous les condensateurs raccordés au même réseau sous peine de destruction.

Pour pallier à cela l'idée est de faire du filtrage actif [1;21;22].

II-5-3 Filtrage actif

II-5-3-1 Principe

En plus des éléments (R, L, C) propres aux filtres passifs, les filtres actifs comprennent des convertisseurs de puissance. Ce sont des sources de courant ou de tension qui éliminent les perturbations harmoniques en injectant en série ou en parallèle sur le réseau des courants, des tensions, ou les deux à la fois, en opposition par rapport aux perturbations existantes : courants harmoniques créés par la charge (I_{ch-h}), ou tensions harmoniques présentes sur le réseau (V_{s-h}) (figure(II-5)).



Figure(II-5): Sources des harmoniques de tension et de courant.

V_{s-f} : composante fondamentale de la tension d'alimentation.

V_{s-h} : composante harmonique de la tension d'alimentation.

Z_s : impédance de la source.

Z_{charge} : impédance de la charge.

I_{ch-h} : composante harmonique du courant créé par la charge.

II-5-3-2 Filtrage actif parallèle

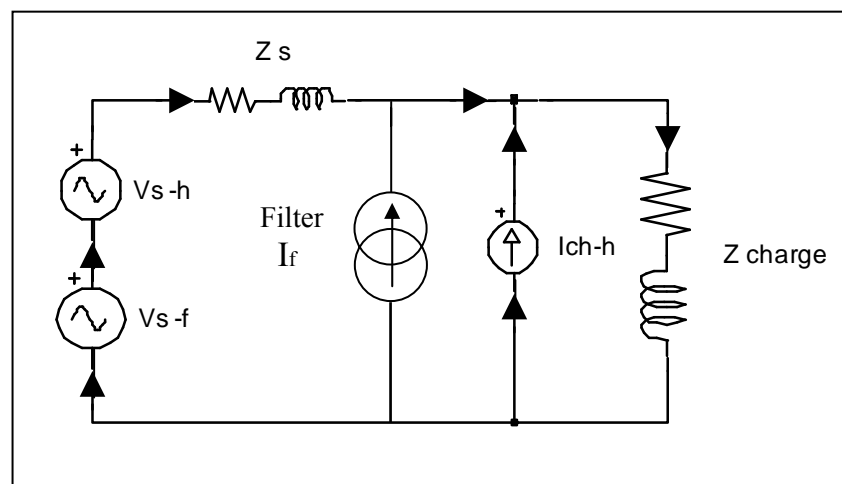
Le filtre actif peut être placé en parallèle avec la charge. On parle alors de filtre shunt ou parallèle. Il existe deux types de fonctionnement pour un filtre actif parallèle [1-21].

- compensation des courants harmoniques.
- compensation des tensions harmoniques

• Filtre compensateur de courant

Le filtre actif parallèle compensateur de courant, injecte un courant (I_f) qui s'oppose au courant harmonique émis par la charge (I_{ch-h}). Le courant (I_s) est alors sinusoïdal. L'ensemble charge/filtre se présente alors comme une charge qui n'absorbe qu'un courant sinusoïdale.

S'il y a peu de tensions harmoniques préexistantes coté source, on obtient une tension coté charge sinusoïdale puisque la chute de tension harmonique dans l'impédance du réseau est nulle.



Figure(II-6): Filtre actif parallèle (compensateur de courant).

- **Filtre compensateur de tension**

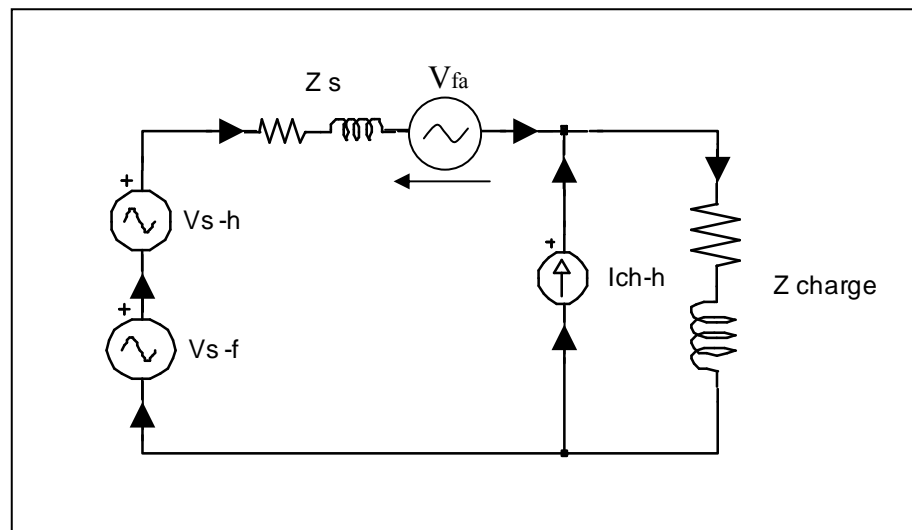
Ce filtre a pour rôle de maintenir sinusoïdale la tension à ses bornes, c'est à dire du côté de la charge, quelque soit le courant émis par la charge et quelle que soit la qualité de la source de tension.

Le filtre injecte un courant harmonique à travers l'impédance (Z_s) de façon à créer à ses bornes une chute de tension harmonique que permet de régler la tension harmonique aux bornes de la charge (V_{ch-h}).

Cette stratégie de filtrage convient lorsque l'impédance (Z_s) est suffisamment grande. En effet le dimensionnement en courant du filtre actif dépende du rapport V_{s-h}/Z_s [1;21].

II-5-3-3 Filtrage actif série

Le filtre série fonctionnant en compensateur de tension fournit une tension (V_{fa}) qui s'oppose à la tension harmonique (V_{s-h}) venant du côté source et à la chute de tension harmonique $Z_s \cdot I_{ch-h}$ due à la charge non linéaire. On arrive ainsi à limiter la tension harmonique V_{ch-h} aux bornes de la charge. Le filtre actif est parcouru par la totalité du courant de charge, mais il ne supporte en fonctionnement normal que la tension harmonique (V_{fa}) qui est généralement d'amplitude faible [1;21].



Figure(II-7): Filtre actif série(compensateur de tension).

II-5-4 Avantages des filtres actifs

Le filtre actif offre de nombreux avantages.

- Il s'adapte automatiquement à l'évolution des charges et du réseau :
 - Il peut compenser plusieurs rangs harmoniques (dans la limite de sa bande passante).
 - Il ne passe pas en surcharge lorsque le courant harmonique à compenser dépasse le dimensionnement du filtre actif. Il limite son émission de compensation harmonique aux maximums de ses capacités, mais il n'y a aucun risque de destruction.
- Le risque de résonance entre filtre et impédance du réseau qui existe avec le filtre passif est supprimé.

Un compensateur actif peut protéger des condensateurs de compensation par élimination des courants harmoniques générés par une charge. De même, un compensateur actif de tension de type série peut protéger des condensateurs ou des filtres passif contre une distorsion de tension provenant du réseau amont.

La compensation de l'énergie réactive à 50Hz est possible mais elle est coûteuse par rapport à une solution passive [1;21;22].

| | Filtre passif | Filtre actif |
|---|--|--|
| Action sur les courants harmoniques | Nécessite un filtre pour chaque fréquence (encombrant) | Agit simultanément sur plusieurs fréquences |
| Influence d'une variation de fréquence | Efficacité réduit | Aucune conséquence |
| Influence d'une modification de l'impédance | Risque de résonance | Aucune conséquence |
| Influence d'une augmentation de courant | Risque de surcharge et de détérioration | Aucune risque de surcharge, mais efficacité diminuée |
| Ajout de matériel (augmentation de charge) | Nécessite des modification sur le filtre, dans certaines cas | Aucune problème |
| Action sur les harmoniques suivant leur ordre | Très difficile | Possible, grâce au paramétrage |
| Modification de la fréquence fondamentale | Modification impossible | Possible, grâce à la reconfiguration |
| Encombrement | Important | Faible |
| Poids | Important | Faible |

Tableau(II-1): Comparaison entre le filtre actif et le filtre passif.

| | Filtre actif parallèle | Filtre actif série |
|--------------------------------------|--|--|
| Circuit de puissance du filtre actif | Onduleur de tension à MLI avec boucle de courant | Onduleur de tension à MLI sans boucle de courant |
| Filtre actif fonctionnant comme | Source de courant I_{af} | Source de tension V_{af} |
| Type de charge non linéaire | Redresseurs à diodes ou à thyristors à charge inductive et cycloconvertisseurs | Redresseurs à diodes à charge capacitive au côté continu |
| Fonction additionnelle | Compensation de la puissance réactive | Régulation de la tension alternative |

Tableau(II-2): comparaison entre le filtre actif parallèle et le filtre actif série.

II-5-5 Filtre hybride

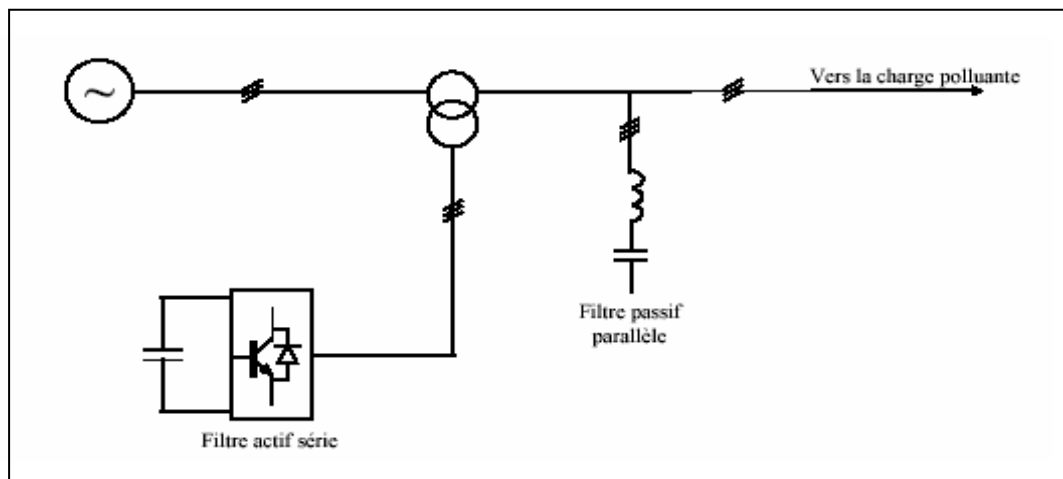
Le filtrage mixte ou hybride résulte de l'association d'un filtre passif et d'un filtre actif. L'intérêt des filtres mixtes est que le filtre passif prend en charge la compensation d'une grande partie des harmoniques; le filtre actif maintient les performances de filtrage en fonction de l'évolution de la charge et du réseau. Ainsi la puissance de convertisseur qui constitue le filtre actif est fortement diminuée grâce aux éléments passifs. Ces structures permettent donc, d'optimiser le rapport performance/coût et d'avoir une meilleure tenue en tension.

On a plusieurs structures de filtre mixte. Par exemple :

- *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 [16].*

II-5-5-1 Le filtre actif série avec des filtres passifs parallèles

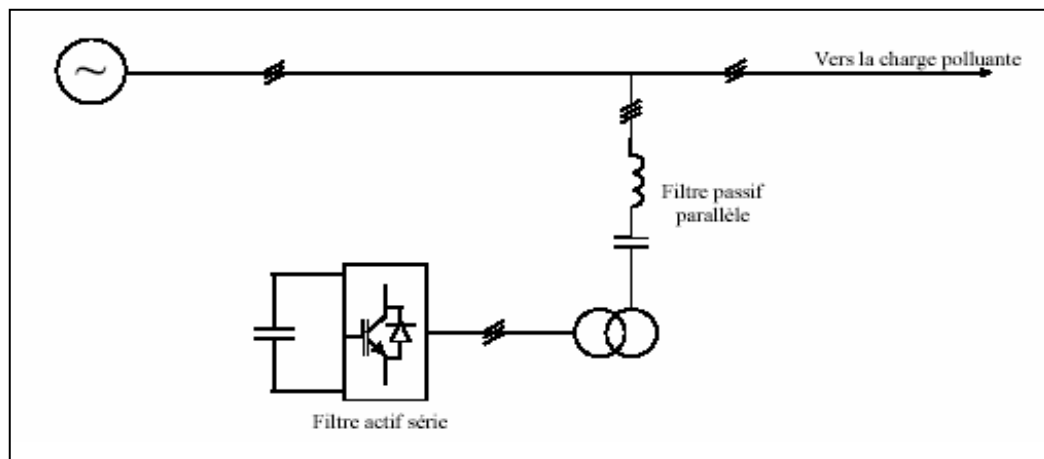
Le rôle du *filtre actif série* dans ce cas est d'empêcher les courants harmoniques de circuler vers le réseau et de les obliger à passer par les filtres passifs raccordés à leurs fréquences comme le montre la figure(II-8) [16].



Figure(II-8): Filtre actif série et filtre passif parallèle.

II-5-5-2 Le filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles

Le principe de fonctionnement de cette configuration, présentée en figure(II-9), est la même que la précédente avec l'avantage de réduire encore le dimensionnement du *filtre actif série* car le courant qui le traverse est plus faible. De plus, le *filtre actif série* est à l'abri d'un éventuel court-circuit de la charge [16].

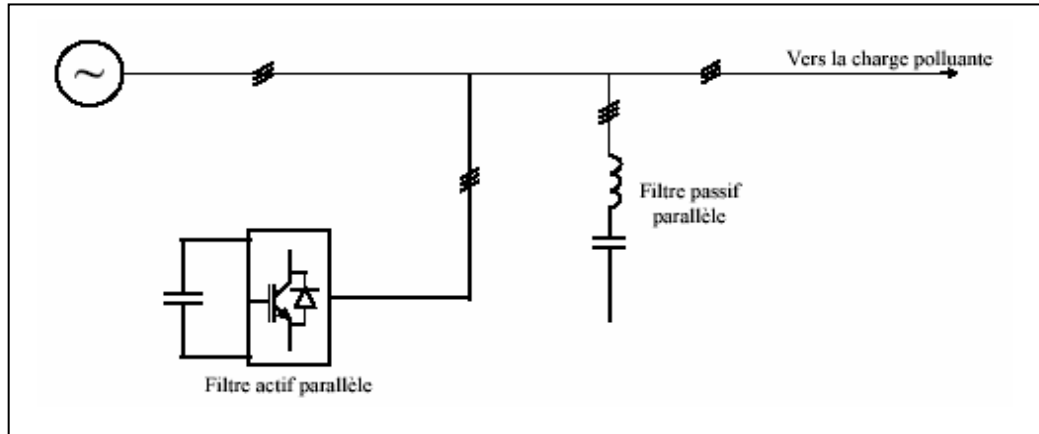


Figure(II-9): Filtre actif série connecté en série avec un filtre passif parallèle.

II-5-5-3 Le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle

Le rôle du *filtre actif parallèle* dans cette configuration, montrée en figure(II-10), est la compensation des courants harmoniques basses fréquences émis par la charge polluante. Le filtre passif accordé sur une fréquence élevée, élimine les harmoniques hautes fréquences.

Ce type de filtrage a déjà été appliqué à la compensation des courants harmoniques émis par un cycloconvertisseur de forte puissance [16].



Figure(II-10): Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle.

II-6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté plusieurs solutions traditionnelles et modernes de dépollution ont été présentées. La solution classique à base de filtres passifs est souvent pénalisée en termes d'encombrement et de résonance. De plus, les filtres passifs ne peuvent pas s'adapter à l'évolution du réseau et aux charges polluantes. Aujourd'hui les filtres actifs sont non seulement utilisées pour la compensation d'harmoniques, mai aussi pour la compensation du déséquilibre de charges sur les réseaux.

Dans ce mémoire, nous intéressons aux filtres actifs parallèles pour compenser les harmoniques de courant générés par des charges non-linéaires (redresseurs à diodes).

CHAPITRE III

LE FILTRE ACTIF PARALLELE

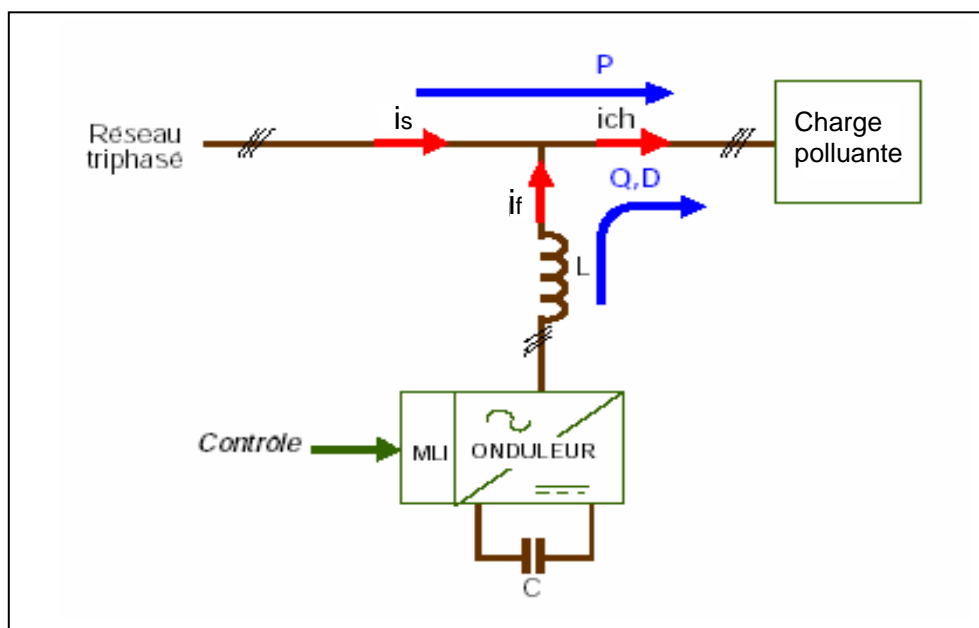
III-1 Introduction

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

Le filtre actif est un onduleur de tension à MLI qui traite l'élimination des harmoniques. Il doit donc, absorber des courants éliminant les harmoniques créée par le pont redresseur. Cette structure à pour vocation d'éliminer de façon active tout ou une partie des harmoniques de courant, l'utilisation des onduleurs pour filtrage actif, suppose l'emploi des fréquences de découpages très supérieure aux fréquences harmoniques que l'on veut éliminer.

III-2 Principe du filtre actif parallèle

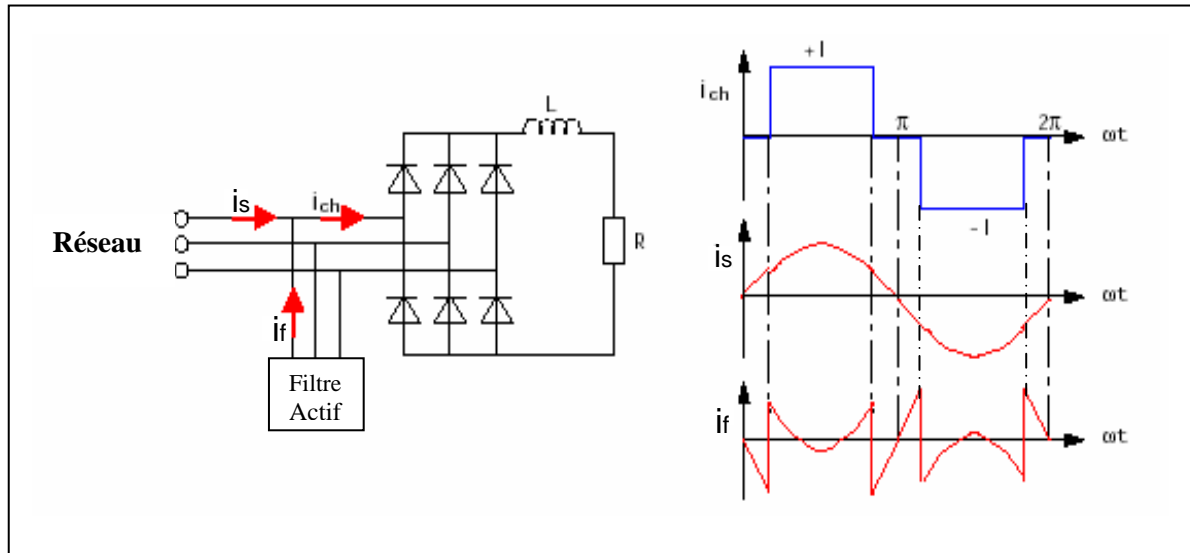
Le principe du filtre actif parallèle consiste à générer des harmoniques en opposition de phase à ceux existant sur le réseau. Ceci peut être schématisé sur la figure(III-1) [33].



Figure(III-1): Schéma de principe d'un filtre actif.

- **Exemple de formes d'ondes avec**

Charge constituée d'un pont de diodes débitant sur un circuit RL.



Figure(III-2): Exemple de formes d'ondes.

Alors que le courant absorbé par la charge polluante est non sinusoïdal, le courant fourni par le filtre actif est tel que le courant absorbé du réseau soit sinusoïdal [33].

III-3 Structure d'un filtre actif parallèle

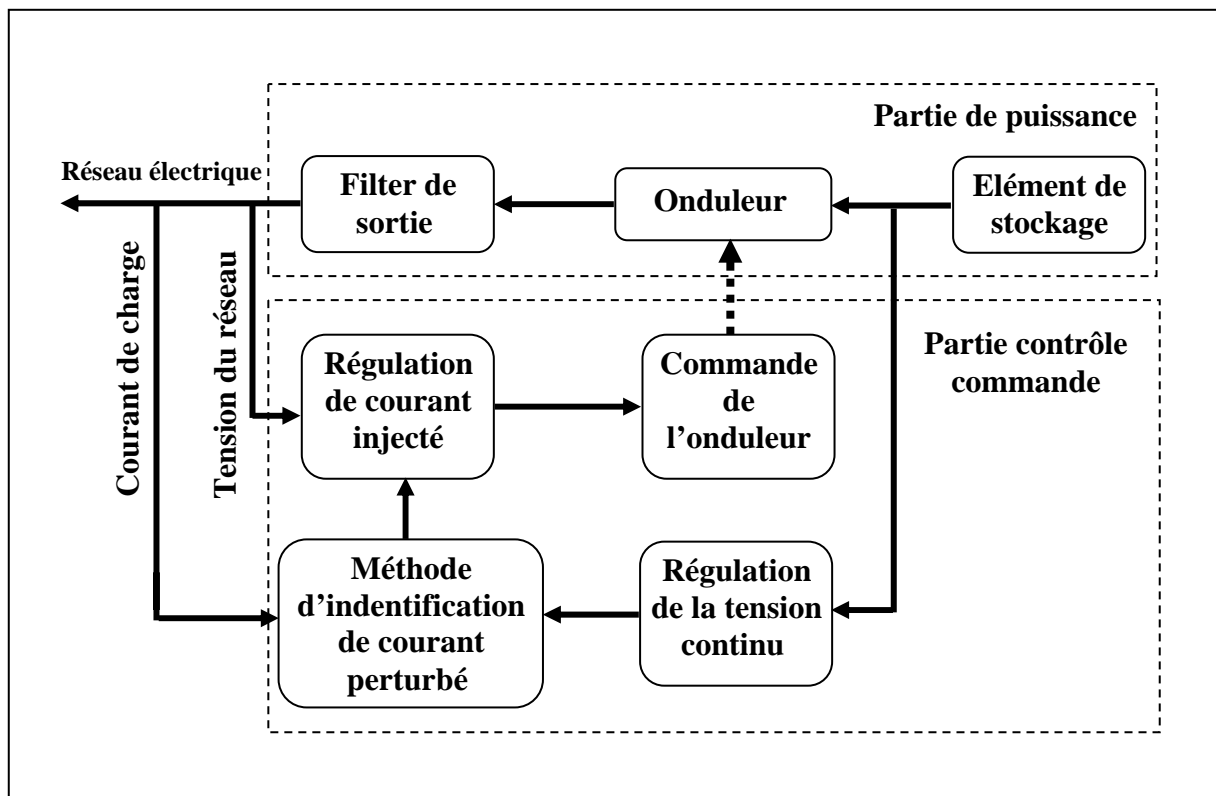
La structure générale du filtre actif parallèle, est présentée dans la figure(III-3) sous la forme de deux blocs: la partie puissance et la partie contrôle-commande.

➤ **La partie puissance est constituée**

- D'un onduleur à base d'interrupteurs de puissance, commandables à l'amorçage et au blocage (GTO, IGBT, etc....) avec des diodes en antiparallèle.
- D'un circuit de stockage d'énergie.
- D'un filtre de sortie.

➤ **La partie contrôle-commande est constituée**

- La méthode d'identification des courants perturbés.
- La régulation de la tension continue appliquée aux éléments de stockage d'énergie.
- La régulation du courant injecté sur le réseau à partir de l'onduleur de tension.
- La commande de l'onduleur de tension [16].

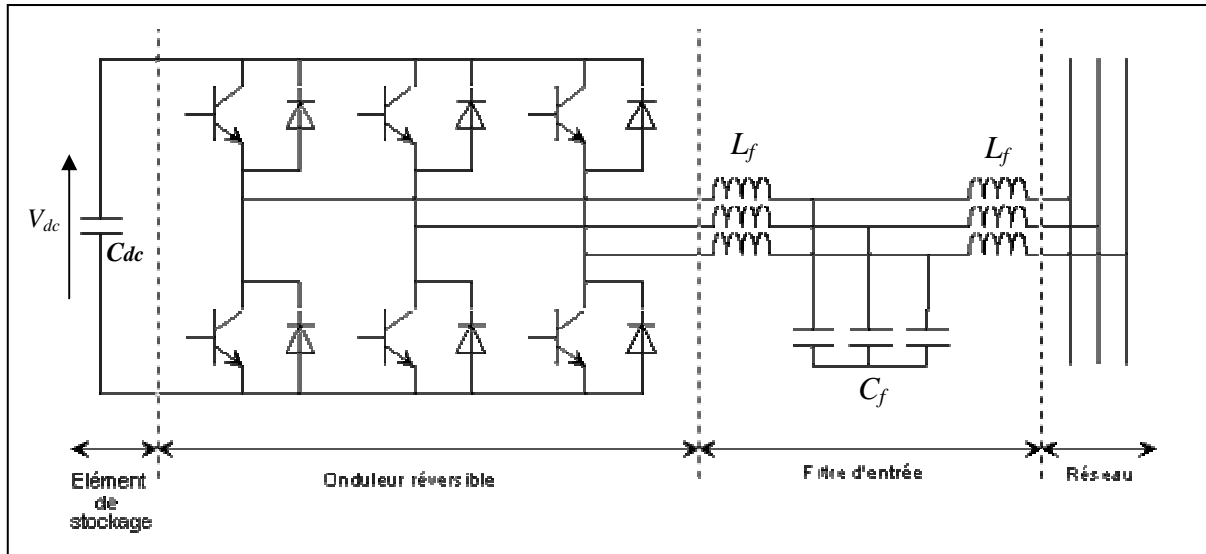


Figure(III-3): Structure générale d'un filtre actif parallèle.

III-3-1 Structure tension

L'onduleur de tension connecté en parallèle au réseau est illustré par la figure(III-4). Le condensateur C_{dc} joue le rôle d'une source de tension continue. La tension à ses bornes V_{dc} doit être positive et maintenue quasiment constante. Ses fluctuations doivent être faibles d'une part pour ne pas dépasser la limite en tension des semi-conducteurs constituant les interrupteurs, d'autre part pour ne pas dégrader les performances du filtre actif.

L'onduleur de tension est relié au réseau par l'intermédiaire d'un filtre. Deux rôles sont dévolus à ce filtre: d'une part transformer les variations de tension V_f en variations de courant, d'autre part filtrer les fréquences de commutation des bras d'onduleur. Les interrupteurs de l'onduleur sont réversibles en courant. Ils sont constitués de semi-conducteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture en anti-parallèle avec une diode [2;18].



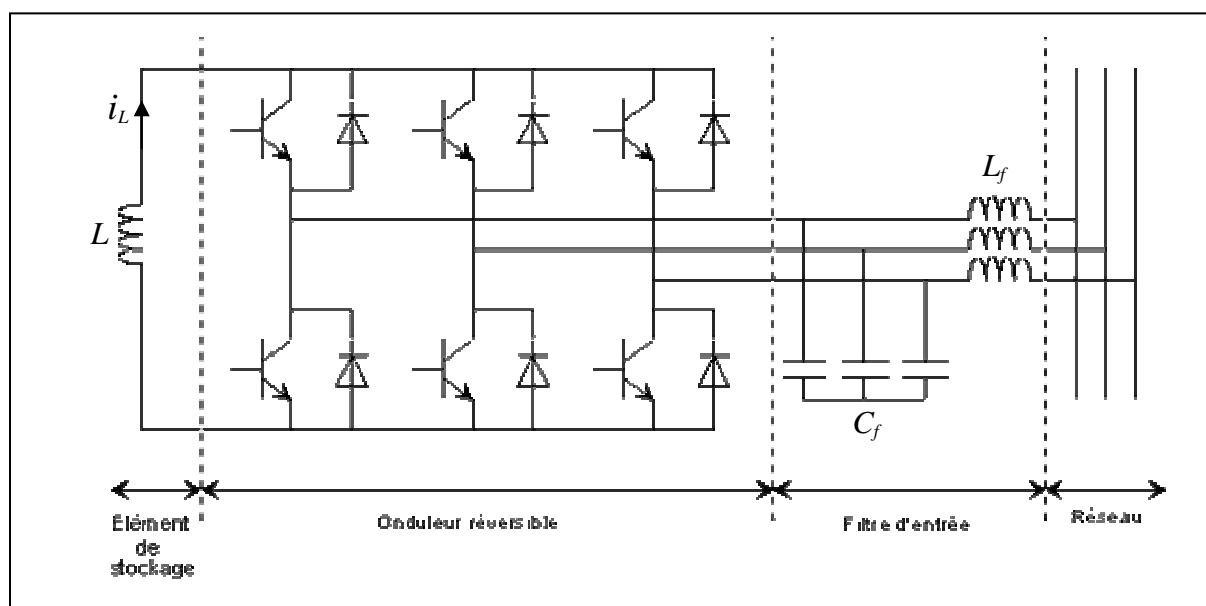
Figure(III-4): Structure tension.

III-3-2 Structure courant

La figure(III-5) représente le schéma de principe d'un onduleur de courant. L'inductance joue le rôle d'une source de courant continu. Le courant i_L traversant cette inductance est maintenu quasiment constant pour ne pas dégrader les performances du filtre actif.

L'onduleur de courant est relié au réseau par l'intermédiaire d'un filtre passe-bas du second ordre constitué d'une inductance L_f et d'une capacité C_f .

Les interrupteurs sont unidirectionnels. Ils sont formés par des transistors commandés à l'ouverture et à la fermeture. Ceux-ci ne pouvant supporter de tension inverse, ils nécessitent une diode en série [2;18].



Figure(III-5): Structure courant.

III-4 Généralité sur les onduleurs

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion continu-alternative à partir d'une source de tension continu, grâce à des semi-conducteurs. En reliant chacune des bornes du récepteur tantôt à l'une, tantôt à l'autre borne d'entrée, on peut obtenir entre les bornes du récepteur une tension positive, ou négative.

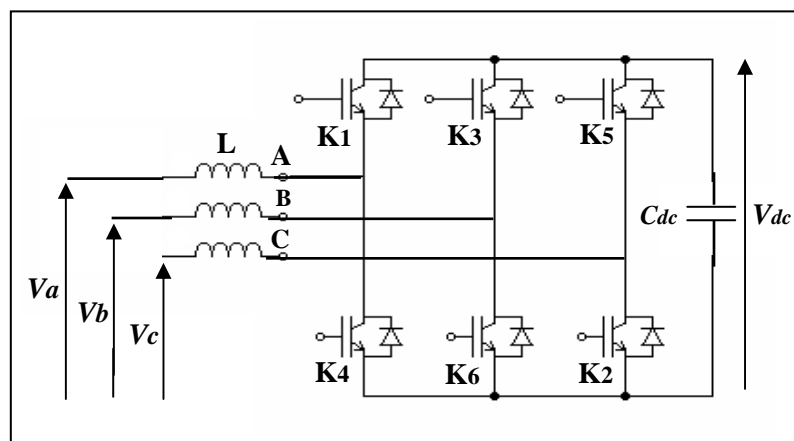
Par une séquence adéquate de commande de semi-conducteur, il est donc possible de produire à la sortie du convertisseur une tension alternative de valeur moyenne nulle. Cette tension peut comporter un ou plusieurs créneaux par alternance suivant qu'il s'agit d'une commande à un créneau par alternance, ou d'une commande de modulation de largeur d'impulsions.

L'onduleur est dit autonome quand il détermine lui même la fréquence et la forme d'onde de la tension alternative fournie au récepteur. Par contre, pour l'onduleur non autonome, c'est le réseau qui lui impose la forme d'onde de la tension délivrée ainsi que la fréquence [16;34].

III-4-1 Onduleur de tension triphasé

On appelle onduleur de tension, un onduleur alimenté par une source de tension continue, c'est à dire par une source d'impédance interne négligeable; sa tension U n'est pas affectée par la variation du courant i qui la traverse. La source continue impose la tension à l'entrée de l'onduleur et donc à sa sortie.

On peut obtenir la tension triphasé en groupant trois demis ponts monophasés, la figure(III-6) représente un onduleur triphasé de tension. Il se compose de trois bras à interrupteurs réversible en courant, commandés à la fermeture et à l'ouverture, réalisés à partir d'un (thyristor, transistor) et d'une diode en antiparallèle [16;34].



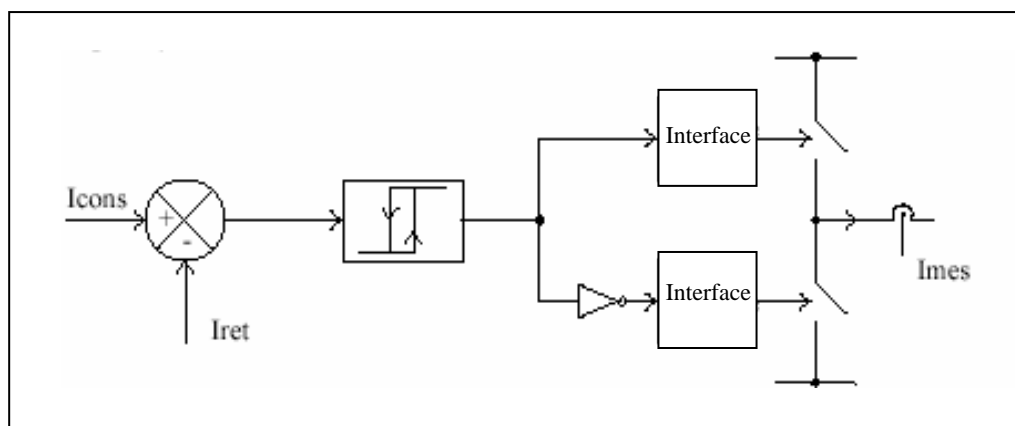
Figure(III-6): Structure d'un onduleur de tension triphasé.

III-4-2 La commande de l'onduleur

Le but de la commande de l'onduleur est de permettre la meilleure reproduction des courants de référence, à travers les ordres de commande appliqués aux interrupteurs de puissance. Les deux principales familles de commande des convertisseurs statiques sont : la commande par hystérésis et la commande par modulation de largeur d'impulsion MLI.

III-4-2-1 Commande par hystérésis

La commande par hystérésis, appelée aussi commande en tout ou rien, est une commande non linéaire qui utilise l'erreur existant entre le courant de référence et le courant produit par l'onduleur, cette erreur est comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis.



Figure(III-7): Principe de la commande des courant par hystérésis.

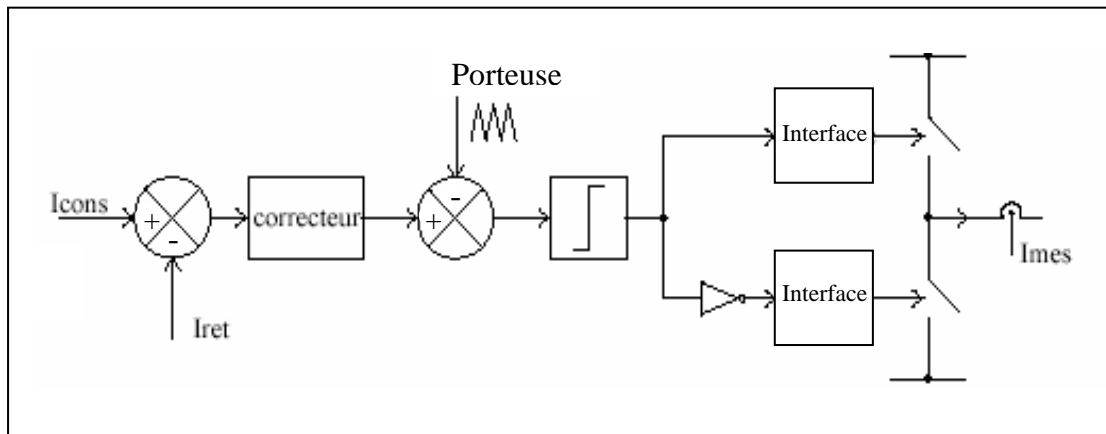
Dés que l'erreur atteinte la bande inférieure ou supérieure, un ordre de commande est envoyé de manière à rester à l'intérieur de la bande. La simplicité, comme le montre la figure(III-7), est le principal avantage de cette technique. En revanche, les commutations évoluant librement à l'intérieur de la bande d'hystérésis, on ne peut pas maîtriser correctement le spectre haute fréquence dû aux fréquences de commutations.

Ce problème peut être résolu par une autre stratégie de commande qui peut être proposée, à savoir la commande par hystérésis modulée. Mais dans cette stratégie de commande, il est difficile de définir la largeur de la bande de l'hystérésis [16;17].

III-4-2-2 Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI)

Pour résoudre les problèmes précédents, nous introduisons une deuxième famille de commande de l'onduleur, c'est la technique de commande par MLI, qui résoud le problème de la maîtrise de la fréquence de commutation.

La plus simple et la plus connue des modulations de largeur d'impulsion est sans doute la MLI à échantillonnage naturel. Cette technique de commande met en œuvre d'abord un régulateur qui détermine la tension de référence de l'onduleur 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(III-8).



Figure(III-8): Principe de commande par MLI.

D'autres techniques de MLI existent également dans la littérature comme la MLI à échantillonnage régulier où on peut distinguer deux méthodes :

- La MLI à échantillonnage régulier symétrique où la référence est échantillonnée à chaque période de la porteuse.
- La MLI à échantillonnage régulier asymétrique où la référence est échantillonnée à la demi- période de la porteuse.

Plus récemment, nous avons vu apparaître une technique de commande, dite commande à modulation vectorielle. Cette dernière diffère des techniques présentées précédemment par le fait qu'elle ne s'appuie pas sur des modulations appliquées à chacun des interrupteurs [16;17].

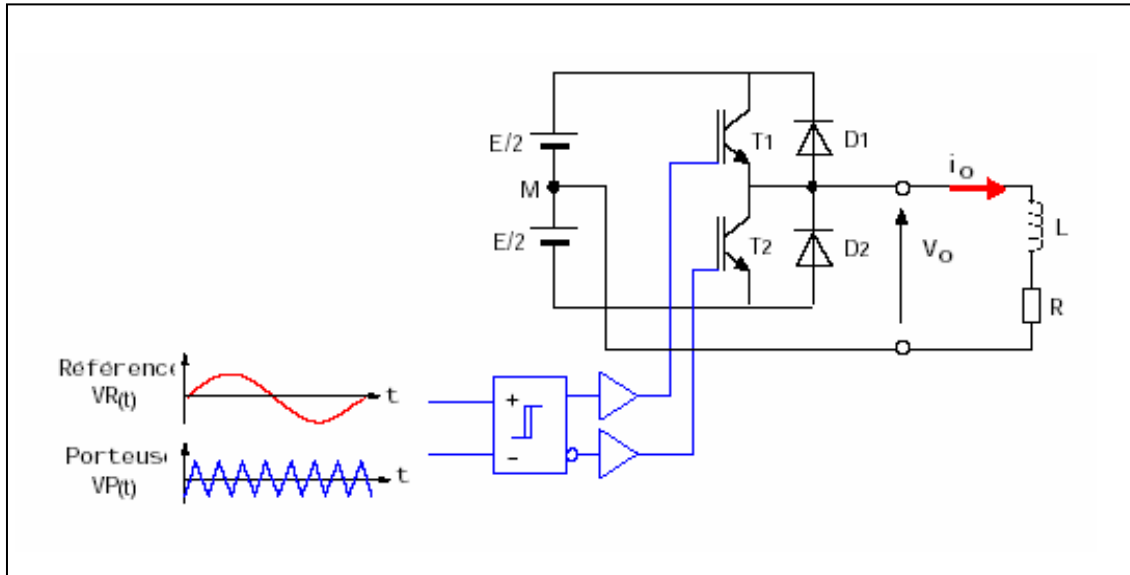
III-4-2-3 Principe de MLI sinus-triangle

Le signal de commande des interrupteurs est généré à partir de la comparaison du signal de référence sinusoïdal, (de fréquence $f_0=1/T_0$) et du signal de modulation triangulaire ou porteuse (de fréquence $f_d = 1/T_d$).

- **Caractéristique**

Deux paramètres caractérisent la commande :

- L'indice de modulation : $m = fd/fo$, avec $m \gg 1$.
- Le coefficient de réglage : $r = V_{Rmax} / V_{Pmax}$, Généralement r est compris entre 0 et 1 [33].



Figure(III-9): Schéma de principe d'onduleur monophasé commandé par MLI sinus-triangle.

III-5 Conclusion

Nous avons présenté et défini, dans ce chapitre, la plupart des éléments constituant la structure du filtre actif parallèle. Cette structure a été partagée en deux parties à savoir la partie puissance et la partie contrôle-commande. Le choix des éléments de la partie contrôle-commande, tels que la méthode d'identification des courants perturbés, la commande de l'onduleur et la régulation de la tension continue, de même que ceux de la partie puissance, comme l'onduleur, l'élément de stockage et filtre de sortie ont été fixés.

Nous avons présenté aussi les deux stratégies de commande de l'onduleur, hystérésis et MLI, couramment utilisées dans les applications des filtres actifs. La commande hystérésis est très simple et très rapide tandis que sa fréquence instantanée des commutations n'est pas contrôlable.

CHAPITRE IV

IDENTIFICATION DES COURANTS HARMONIQUES ET REGULATION

IV-1 Introduction

La stratégie de commande se base sur la détection des courants perturbateurs dans le domaine temporel. Trois possibilités d'identification des courants perturbateurs ont déjà été proposées [16].

- *identification à partir de la détection du courant de la charge polluante.*
- *identification à partir de la détection du courant de la source.*
- *identification à partir de la détection de la tension de la source.*

La première méthode est la plus appropriée au filtre actif parallèle installé par le consommateur pour compenser les courants perturbateurs causés par ses charges polluantes. C'est pourquoi cette méthode de détection sera employée dans ce travail.

IV-2 La méthode d'identification des courants perturbés

IV-2-1 Généralités sur les méthodes d'identification

Les différentes méthodes d'identification de courant perturbateur peuvent être regroupées en deux familles d'approche.

La première utilise la transformée de Fourier rapide dans le domaine fréquentiel, pour extraire les harmoniques du courant. Cette méthode est bien adaptée aux charges où le contenu harmonique varie lentement. Elle donne aussi l'avantage de sélectionner les harmoniques individuellement. Il est à noter que cette méthode nécessite une grande puissance de calcul.

La deuxième famille est basée sur le calcul des puissances instantanées dans le domaine temporel. Certaines de ces méthodes se basent sur le calcul des puissances harmoniques de la charge non linéaire. D'autres peuvent être utilisées pour compenser à la fois les courants harmoniques et la puissance réactive, en se basant sur la soustraction de la partie fondamentale active du courant total.

Récemment, des nouvelles méthodes d'identification ont été présentées pour donner le choix de compenser un, plusieurs ou voire même tous les types de courants perturbateurs. En effet, en se basant sur la régulation de la tension continue et sur celles du réseau électrique aux points de raccordement, nous pouvons compenser à la fois tous les courants perturbateurs, tout en offrant la possibilité de réguler la tension de la charge. Cette méthode, qui ne peut être implantée que numériquement, ne garantit pas une compensation parfaite de la puissance réactive, de même que la régulation de tension n'assure pas toujours une bonne qualité à la tension de la charge [16].

Enfin, la méthode d'identification la plus utilisée est celle appelée méthode des puissances réelles et imaginaires instantanées. Cette méthode offre l'avantage de choisir la perturbation à compenser avec précision, rapidité et facilité d'implantation. Pour toutes ces raisons nous avons retenu cette méthode d'identification pour le reste de notre étude. En effet, afin de pouvoir compenser les courants harmoniques, les courants déséquilibrés et la puissance réactive conjointement ou individuellement, cette méthode nous a semblé la mieux appropriée.

IV-2-2 Principe du fonctionnement de la méthode des puissances instantanées

IV-2-2-1 Généralités sur les puissances instantanées

En présence des harmoniques, la puissance apparente est composée de trois parties: active (P), réactive (Q) et déformante (D) comme le montre la relation (IV-1).

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (\text{IV-1})$$

Cette méthode exploite la transformation $\alpha\text{-}\beta$ pour obtenir les puissances réelles et imaginaires. Notons par (V_α, V_β) et (I_α, I_β) les composantes orthogonales du repère $\alpha\text{-}\beta$ associées respectivement aux tensions de raccordement du *filtre actif parallèle* (V_s) et aux courants absorbés par les charges polluantes (I_s). La transformation $\alpha\text{-}\beta\text{-}0$ triphasée permet d'écrire, la relation des tensions suivante :

$$\begin{bmatrix} V_o \\ V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{S1} \\ V_{S2} \\ V_{S3} \end{bmatrix} \quad (\text{IV-2})$$

Et la relation des courants ci-dessous :

$$\begin{bmatrix} I_o \\ I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{S1} \\ I_{S2} \\ I_{S3} \end{bmatrix} \quad (\text{IV-3})$$

Les composantes avec l'indice (0) représentent les séquences homopolaires du système triphasé de courant et de tension.

La puissance active instantanée, notée $P(t)$, est définie par la relation suivante :

$$\begin{aligned} P(t) &= V_{S1} I_{S1} + V_{S2} I_{S2} + V_{S3} I_{S3} = p(t) + p_0(t) \\ p(t) &= V_\alpha I_\alpha + V_\beta I_\beta \\ p_0(t) &= V_o I_o \end{aligned} \quad (\text{IV-4})$$

Avec $p(t)$ la puissance réelle instantanée, $p_0(t)$ la puissance homolaire instantanée.

L'avantage de la transformation α - β -0 est la séparation des séquences homopolaires du système triphasé de courant ou de tension. De la même manière, la puissance imaginaire instantanée peut s'écrire sous la forme suivante :

$$q(t) = -\frac{1}{\sqrt{3}} [(V_{S1} - V_{S2}) I_{S3} + (V_{S2} - V_{S3}) I_{S1} + (V_{S3} - V_{S1}) I_{S2}] = V_\alpha I_\beta - V_\beta I_\alpha \quad (\text{IV-5})$$

A partir des relations (IV-4) et (IV-5), nous pouvons établir la relation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & V_{s\beta} \\ -V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{IV-6})$$

Dans le cas général, chacune des puissances p et q comporte une partie continue et une partie alternative, ce qui nous permet d'écrire l'expression ci-dessous :

$$\begin{cases} p = \bar{p} + \tilde{p} \\ q = \bar{q} + \tilde{q} \end{cases} \quad (\text{IV-7})$$

Avec :

- \bar{p} une puissance continue liée à la composante fondamentale active du courant et de la tension.
- \bar{q} une puissance continue liée à la composante fondamentale réactive du courant et de la tension.
- \tilde{p} et \tilde{q} des puissances alternatives liées à la somme des composantes perturbatrices du courant et de la tension [16].

IV-2-2-2 Calcul des courants perturbateurs

En inversant la relation (IV-6), nous pouvons recalculer les courants dans le repère $\alpha\text{-}\beta$ comme le montre l'équation (IV-8) :

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{V_{s\alpha}^2 + V_{s\beta}^2} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (\text{IV-8})$$

En considérant les équations (IV-7) et (IV-8), nous pouvons séparer le courant dans le repère $(\alpha\text{-}\beta)$ en trois composantes, active et réactive à la fréquence fondamentale et les harmoniques. Ceci conduit à:

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{p} \\ 0 \end{bmatrix}}_{\text{Courant actif}} + \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{q} \end{bmatrix}}_{\text{Courant réactif}} + \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix}}_{\text{Courants harmoniques}} \quad (\text{IV-9})$$

Avec $\Delta = V_{s\alpha}^2 + V_{s\beta}^2$ supposé constant dans l'hypothèse d'une tension sinusoïdale équilibrée du réseau électrique.

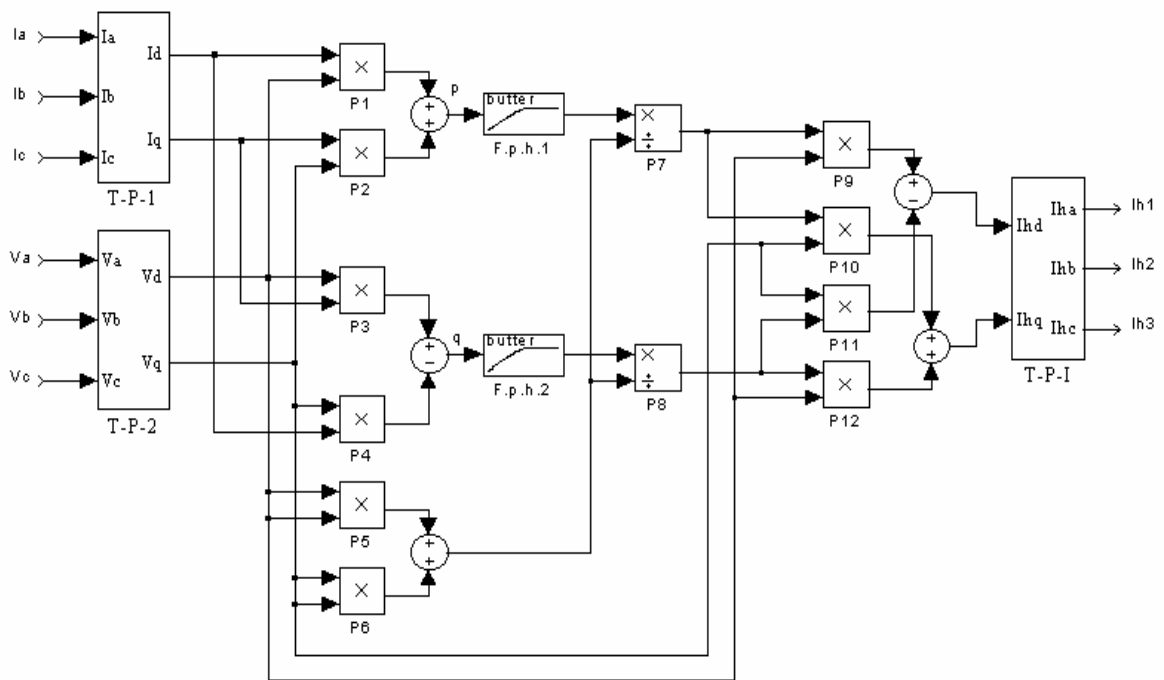
Cette expression montre donc que l'identification des différentes composantes du courant dans le repère $(\alpha\text{-}\beta)$ revient à séparer des termes continus des puissances réelle et imaginaire instantanées. Les courants perturbateurs triphasés qui représentent les courants identifiés, *dits courants de référence* (I_{ref}), sont calculés à partir de la transformation $(\alpha\text{-}\beta)$ inverse donnée par la relation (IV-10) :

$$\begin{bmatrix} I_{ref1} \\ I_{ref2} \\ I_{ref3} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{\alpha} \\ I_{\beta} \end{bmatrix} \quad (IV-10)$$

avec I_{α} , I_{β} courants perturbateurs calculés dans le repère $\alpha\text{-}\beta$ à partir des courants réactifs et harmoniques de la relation (IV-9) [16-19-22].

IV-2-2-3 Algorithme d'identification

Finalement, l'algorithme d'identification que nous avons défini peut être représenté par le synopsis de la figure(IV-1). Par souci de simplification, nous décrirons les matrices des relations (IV-2 et IV-3), après avoir enlevé les composantes homopolaires.



Figure(IV-1): Schéma de principe de la méthode d'identification des puissances instantanées.

Dans cette figure, nous avons présenté le schéma de l'algorithme d'identification des courants harmoniques, qui est constitués essentiellement, par des blocs de la matrice de transformation ($\alpha\text{-}\beta$), des filtres passe haut afin d'enlever les composantes continue des puissances, et les différents blocs de calcul du courant harmonique [16;19;22].

IV-3 Régulation

IV-3-1 Régulation de la tension continue

La tension moyenne V_{dc} aux bornes du condensateur doit être maintenue à une valeur fixe. La principale cause susceptible de la modifier sont les pertes dans le filtre actif (interrupteurs et filtre de sortie). La régulation de la tension moyenne aux bornes du condensateur de stockage d'énergie doit se faire par l'adjonction des courants fondamentaux actifs dans les courants de référence. La sortie du régulateur P_c s'ajoute, à un signe près, à la puissance active perturbatrice \tilde{p} et donne lieu à un courant fondamental actif corrigeant ainsi V_{dc} . La puissance P_c représente la puissance active nécessaire pour maintenir la tension V_{dc} égale à la valeur de la tension de référence souhaitée (V_{dcref}). Le régulateur employé ici est un régulateur proportionnel simple (K_c).

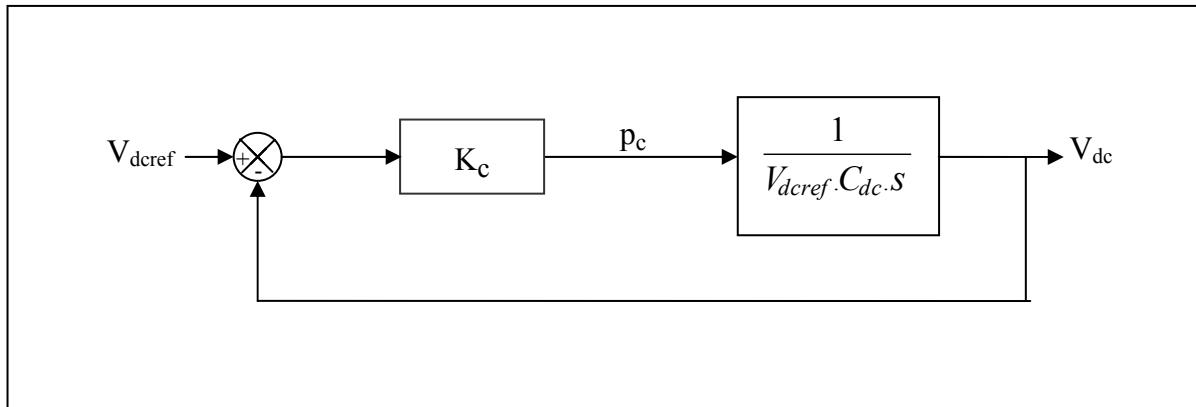
En négligeant les pertes de commutations dans l'onduleur ainsi que l'énergie stockée dans l'inductance du filtre de sortie, la relation entre la puissance absorbée par le filtre actif et la tension aux bornes du condensateur peut s'écrire sous la forme suivante :

$$P_c = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} C_{dc} \cdot V_{dc}^2 \right) \quad (\text{IV-11})$$

Notons que la relation (IV-11) est non linéaire. Pour des faibles variations de la tension V_{dc} autour de sa référence V_{dcref} , elle peut être linéarisée à travers les relations suivantes :

$$\begin{aligned} p_c &= C_{dc} \cdot V_{dcref} \frac{d}{dt} (V_{dc}) \\ \Rightarrow V_{dc}(s) &= \frac{P_c(s)}{V_{dcref} C_{dc} s} \end{aligned} \quad (\text{IV-12})$$

A partir de la relation (IV-12), et en prenant en compte le régulateur proportionnel (K_c), la boucle de régulation de la tension continue peut être représentée par le schéma de la figure(IV-2). Le choix du paramètre K_c aura pour objectif d'obtenir un temps de réponse minimal [16;19;22].



Figure(IV-2): Boucle de régulation de la tension continue.

IV-3-2 La régulation du courant du filtre actif parallèle

En négligeant les effets de la capacité C_{dc} et des résistances du filtre de sortie sur le courant de référence I_{inj} (pour les harmoniques basses fréquences qui sont loin de la fréquence de commutation), nous pouvons écrire la relation suivante caractérisant le courant du filtre actif I_{inj} .

$$L_f \frac{d}{dt} I_{inj} = V_f - V_s \quad (IV-13)$$

Notons par ΔI_f la différence entre le courant de référence et le courant mesuré à partir de la relation suivante :

$$\Delta I_f = I_{ref} - I_{inj} \quad (IV-14)$$

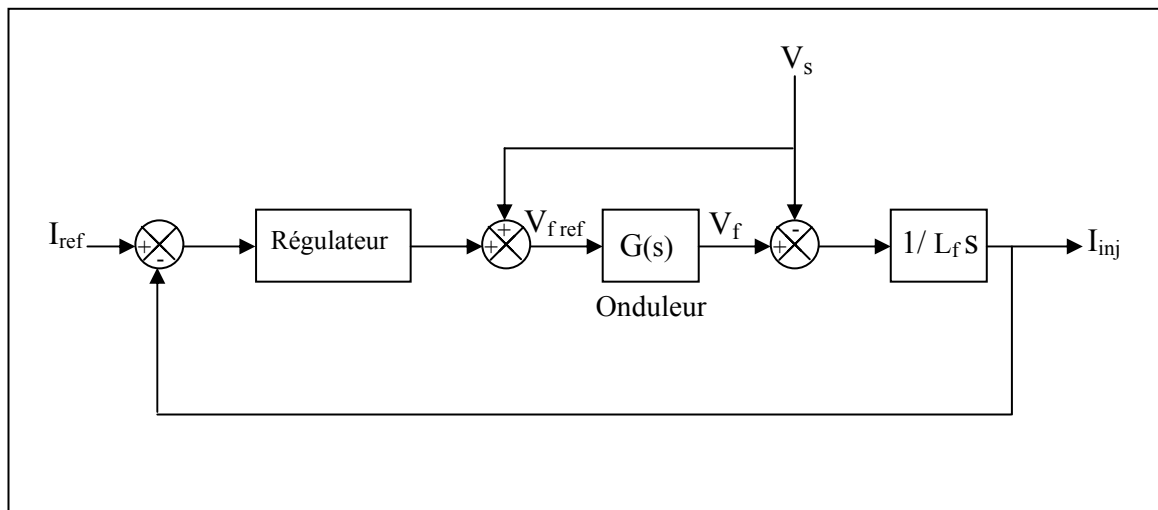
A partir des équations (IV-13) et (IV-14), nous obtenons l'expression ci-dessous :

$$L_f \frac{d}{dt} \Delta I_f = (V_s + L_f \frac{d}{dt} I_{ref}) - V_f \quad (IV-15)$$

Le premier terme de la partie droite de la relation (IV-15) peut être défini comme tension de référence (V_{fref}), ce qui nous donne l'expression suivante :

$$V_{fref} = V_s + L_f \frac{d}{dt} I_{ref} \quad (IV-16)$$

L'écart entre V_{fref} et V_f produit alors une erreur sur le courant. Selon la relation (IV-16), la tension de référence est composée de deux termes à fréquences différentes. Le premier représente la tension du réseau V_s directement mesurable. Le second est égal à la chute de tension aux bornes de l'inductance L_f , lorsque celle-ci est traversée par un courant égal à celui de la référence. Ce terme doit être élaboré par un régulateur de courant, comme le montre la figure(IV-3).



Figure(IV-3): Schéma de la régulation des courants du filtre actif parallèle.

Dans ce schéma, $G(s)$ représente l'onduleur qui peut être modélisé par la relation suivante :

$$G(s) = K \frac{1}{1 + \tau.s} \quad (\text{IV-17})$$

$$K = \frac{V_{dc}}{2V_p}$$

Avec V_{dc} la tension côté continu de l'onduleur, V_p l'amplitude de la porteuse triangulaire et (τ) représentant le retard causé par le calcul des courants perturbateurs.

Le régulateur doit satisfaire les objectifs généraux de la régulation ainsi que les contraintes liées au rejet des perturbations [16;19;22].

IV-4 Conclusion

La méthode d'identification des courants harmoniques par l'intermédiaire des calculs des puissances réelle et imaginaire instantanées est la plus performante, la facile à réaliser et surtout la plus adaptée à identifier d'autres types de perturbation (déséquilibre du courant, puissance réactive).

Enfin, la difficulté d'assurer une bonne qualité de compensation, à partir d'un filtre de sortie du premier ordre avec un régulateur du courant.

CHAPITRE V

MODELISATION ET SIMULATION NUMERIQUE

V-1 Introduction

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

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

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

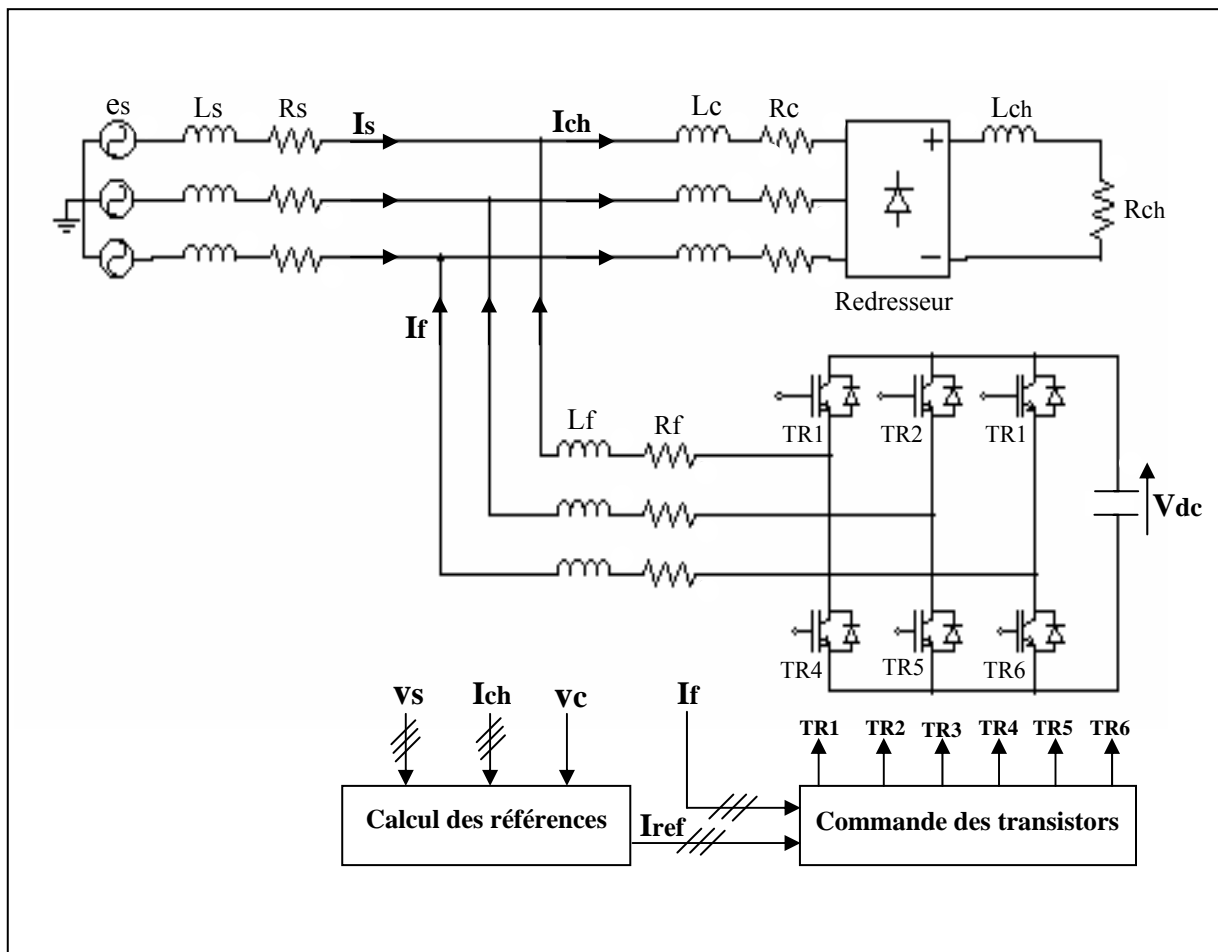
L'étude analytique de ce système est difficile et ne peut être menée, pour un point de fonctionnement donné, qu'avec des hypothèses simplificatrices importantes. C'est pour cette raison que la simulation numérique est devenue l'outil indispensable de l'étude de ces systèmes.

Dans ce chapitre on se propose d'étudier la simulation de l'ensemble réseau, redresseur, filtre actif sous l'environnement **Matlab Simulink** avec lequel on met au point deux programmes de simulation. On donne ensuite les résultats de simulations obtenus. Finalement, pour compléter cette simulation, un cas particulier de charge polluante sera également traité [19].

V-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 figure(V-1) donne le schéma synoptique de l'association filtre actif-réseau-charge polluant [20].



Figure(V-1): Schéma synoptique de l'association filtre actif-réseau-charge polluante.

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

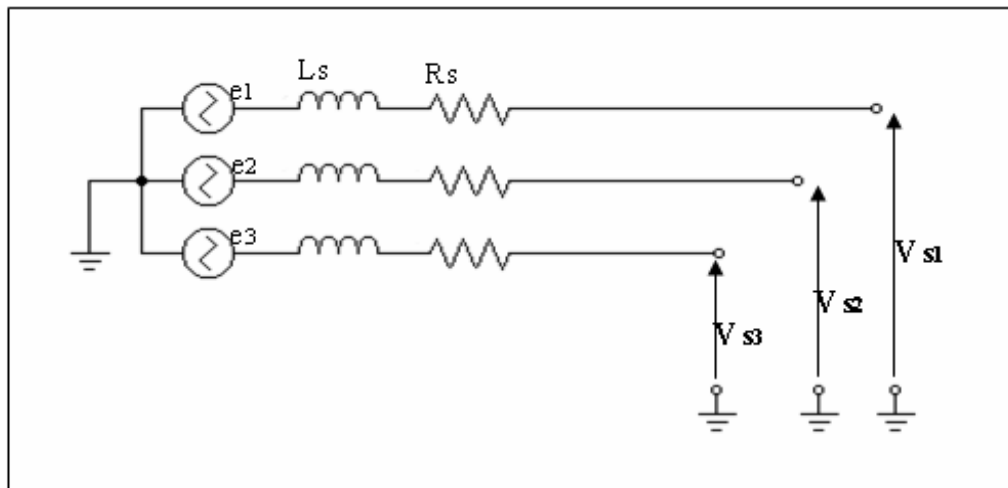
La modélisation d'un système revient à trouver les équations mathématiques qui décrivent son fonctionnement [20].

V-3-1 Modélisation du réseau

Le réseau est assimilable à une source de tension sinusoïdale en série avec une impédance, dite de court circuit, d'où la représentation du réseau par un système de F.E.M triphasées équilibrées en série avec une impédance (figure(V-2)) [19;20].

$$\begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} = \sqrt{2} \cdot E \cdot \begin{bmatrix} \sin(\omega t) \\ \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (\text{V-1})$$

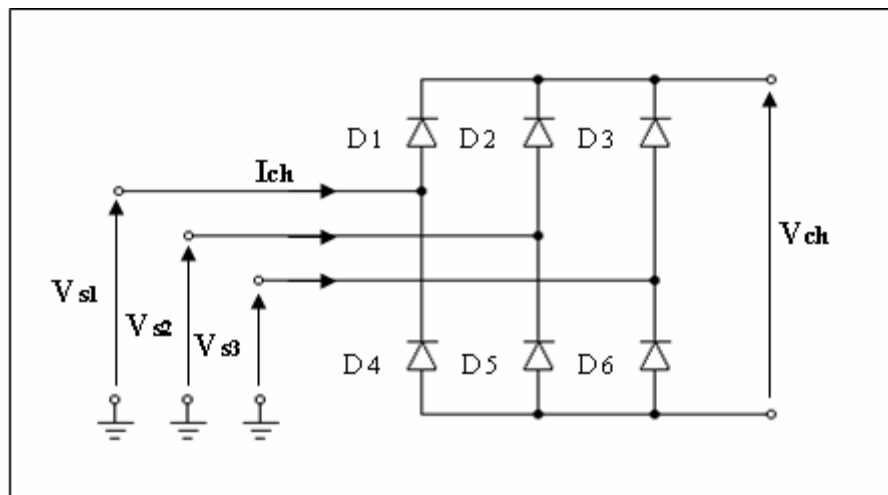
$$Z_s = R_s + jL_s\omega \quad (\text{V-2})$$



Figure(v-2): Schéma synoptique d'un réseau triphasé.

V-3-2 Modélisation de la charge polluante (Redresseur triphasé)

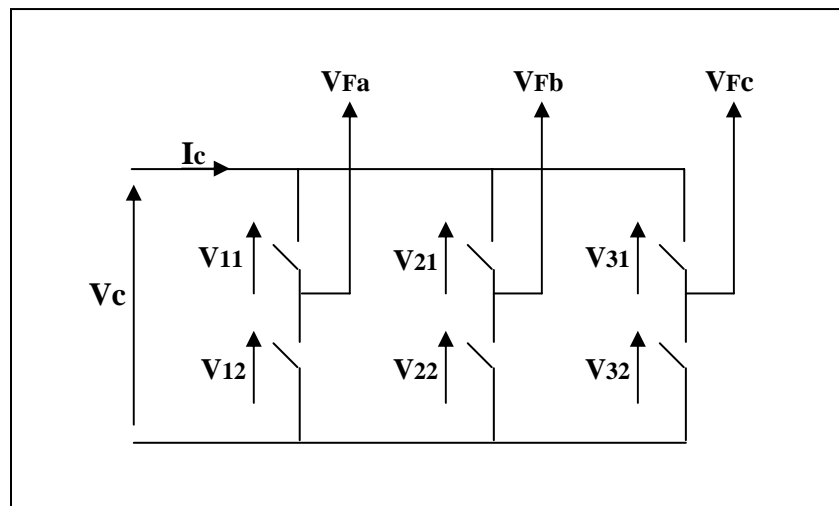
Pour tester le filtre actif on a opté pour une charge polluante qui est un pont redresseur triphasé, représenté sur la figure(V-3), ce dernier génère des harmoniques de courants de l'ordre $6k \pm 1$. Cette charge est modélisé comme étant des sources de courants parfaites (les semi-conducteurs sont considérés parfaits) [19;20].



Figure(V-3): Schéma synoptique d'un pont redresseur.

V-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 montée une diode en antiparallèle, la cellule ainsi définie forme un interrupteur bidirectionnel (figure(V-4)) [19].



Figure(V-4): Présentation schématique d'un onduleur triphasé.

- **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

$$\begin{cases} \dot{i}_{ij} = F_{ij} \cdot \dot{i}_c \\ V_{ij} = (1 - F_{ij}) \cdot V_c \end{cases} \quad (\text{V-3})$$

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

- **Fonctions de conversions composées :**

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

$$\begin{cases} V_{Fab} = V_{21} - V_{11} \\ V_{Fbc} = V_{31} - V_{21} \\ V_{Fca} = V_{11} - V_{31} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} V_{Fab} = (F_{11} - F_{21}) \cdot V_c \\ V_{Fbc} = (F_{21} - F_{31}) \cdot V_c \\ V_{Fca} = (F_{31} - F_{11}) \cdot V_c \end{cases} \quad (\text{V-4})$$

D'où

$$\begin{bmatrix} V_{Fab} \\ V_{Fbc} \\ V_{Fca} \end{bmatrix} = V_c \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_{11} \\ F_{21} \\ F_{31} \end{bmatrix} = V_c \cdot \begin{bmatrix} F_{ab} \\ F_{bc} \\ F_{ca} \end{bmatrix} \quad (\text{V-5})$$

Les fonctions de conversions composées sont :

$$\begin{cases} F_{ab} = F_{11} - F_{21} \\ F_{bc} = F_{21} - F_{31} \\ F_{ca} = F_{31} - F_{11} \end{cases} \quad (\text{V-6})$$

- **Fonctions de conversions simples**

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

$$\begin{bmatrix} V_{Fa} \\ V_{Fb} \\ V_{Fc} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{Fab} \\ V_{Fbc} \\ V_{Fca} \end{bmatrix} \quad (V-7)$$

D'où

$$\begin{bmatrix} V_{Fa} \\ V_{Fb} \\ V_{Fc} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot V_c \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{11} \\ F_{21} \\ F_{31} \end{bmatrix} = V_c \begin{bmatrix} F_a \\ F_b \\ F_c \end{bmatrix} \quad (V-8)$$

Les fonctions de conversion simples s'écrivent alors :

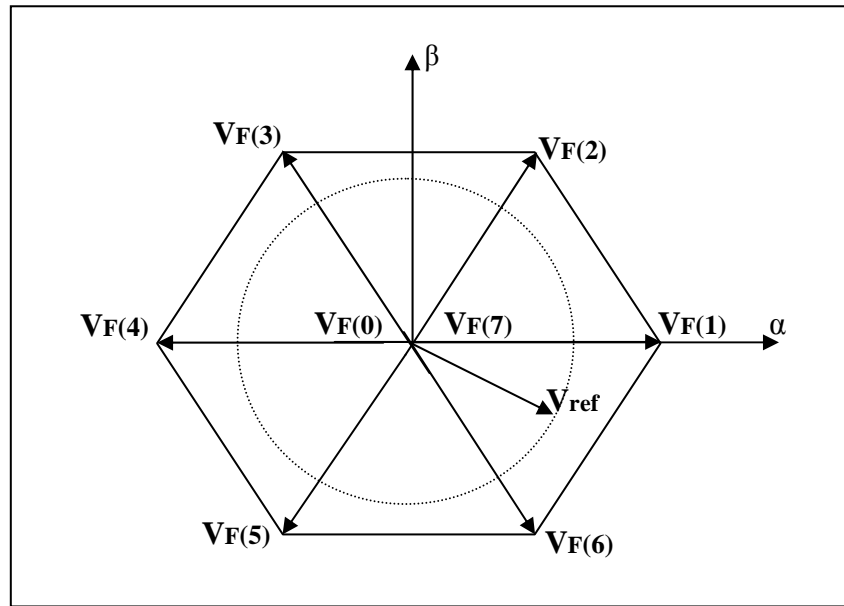
$$\begin{cases} F_a = \frac{1}{3} \cdot (2F_{11} - F_{21} - F_{31}) \\ F_b = \frac{1}{3} \cdot (-F_{11} + 2F_{21} - F_{31}) \\ F_c = \frac{1}{3} \cdot (-F_{11} - F_{21} + 2F_{31}) \end{cases} \quad (V-9)$$

- **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(V-5) [19].

| 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(V-1): Tensions fournies par l'onduleur sous formes vectorielles.



Figure(V-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(V-5).

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

$$\begin{bmatrix} V_{Fa} \\ V_{Fb} \\ V_{Fc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{S1} \\ V_{S2} \\ V_{S3} \end{bmatrix} + R_f \cdot \begin{bmatrix} I_{Fa} \\ I_{Fb} \\ I_{Fc} \end{bmatrix} + L_f \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{Fa} \\ I_{Fb} \\ I_{Fc} \end{bmatrix} \quad (V-10)$$

$$\begin{bmatrix} V_{S1} \\ V_{S2} \\ V_{S3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} - R_{cc} \cdot \begin{bmatrix} I_{S1} \\ I_{S2} \\ I_{S3} \end{bmatrix} - L_{cc} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{S1} \\ I_{S2} \\ I_{S3} \end{bmatrix} \quad (V-11)$$

Avec :

$$\begin{bmatrix} V_{S1} \\ V_{S2} \\ V_{S3} \end{bmatrix} \text{ Tension aux points de raccordement.}$$

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

$$\begin{bmatrix} I_{S1} \\ I_{S2} \\ I_{S3} \end{bmatrix} \text{ Courants fournis par le réseau.}$$

Les valeurs des éléments caractérisant l'ensemble réseau-filtre actif et charge polluante sont regroupées dans le tableau(V-2).

| |
|---|
| Réseau électrique |
| $V_s = 220 \text{ V}, f = 50 \text{ Hz}, (R_s = 0.5 \text{ m}\Omega, L_s = 15 \text{ }\mu\text{H})$ |
| Charge polluante |
| Puissance 400 KVA ,($R_d = 0.6 \text{ }\Omega, L_d = 2 \text{ mH}$),($R_c = 1.2 \text{ m}\Omega, L_c = 50 \text{ }\mu\text{H}$) |
| Filtre parallèle |
| $V_{dc} = 740 \text{ V}, C_{dc} = 8.8 \text{ mF}, (R_f = 5 \text{ m}\Omega, L_f = 150 \text{ }\mu\text{H})$ |
| Commande hystérésis |
| $\Delta I = \pm 20 \text{ A}$ |
| Commande MLI |
| $F_p = 10 \text{ kHz}$ |

Tableau(V-2): Les valeurs des éléments construisant la structure étudiée.

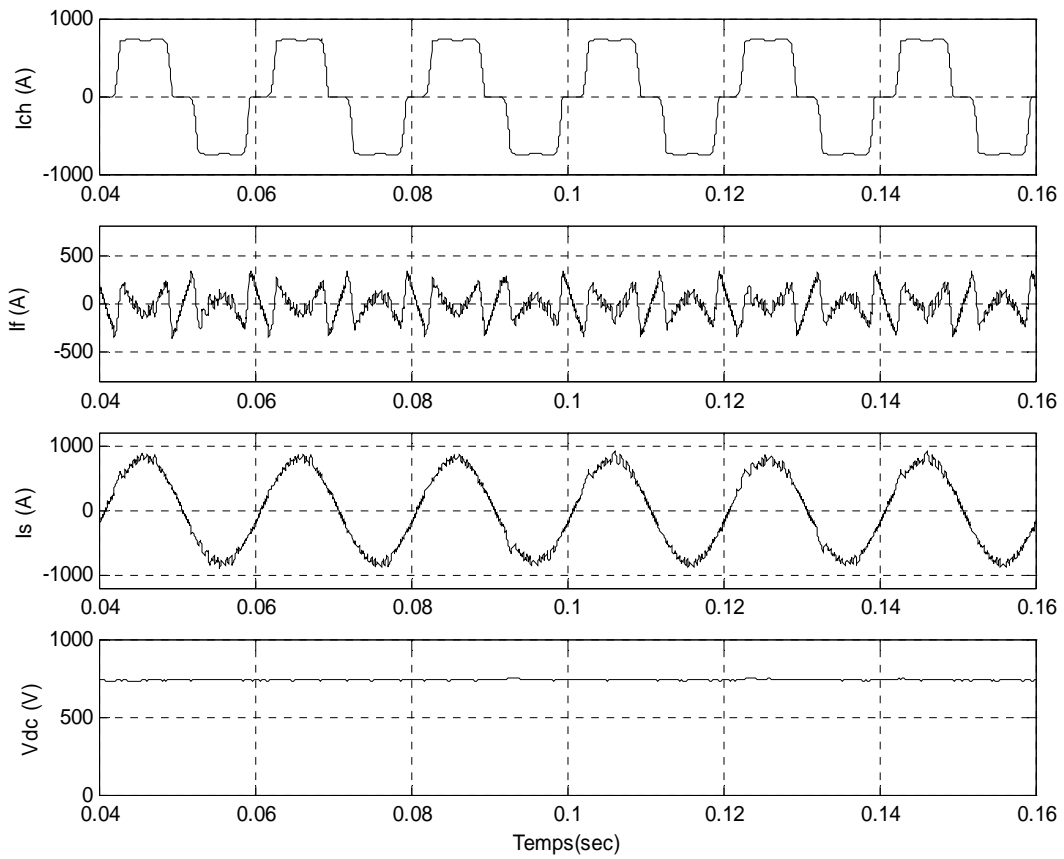
V-4 Description globale de la simulation

Les programmes de simulation développés, permettent de visualiser sur un intervalle de temps donné l'évolution des courants et des tensions dans les différentes branches du circuit de la figure(V-1). Ils simulent également la commande du filtre actif selon les deux principes, MLI et hystérésis.

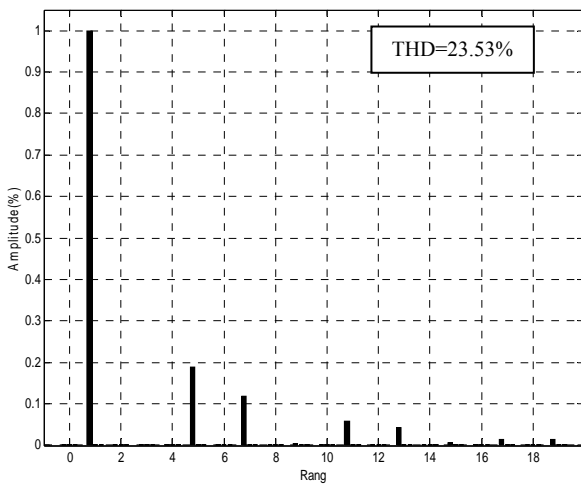
V-4-1 Commande Hystérésis

V-4-1-1 Charge R-L

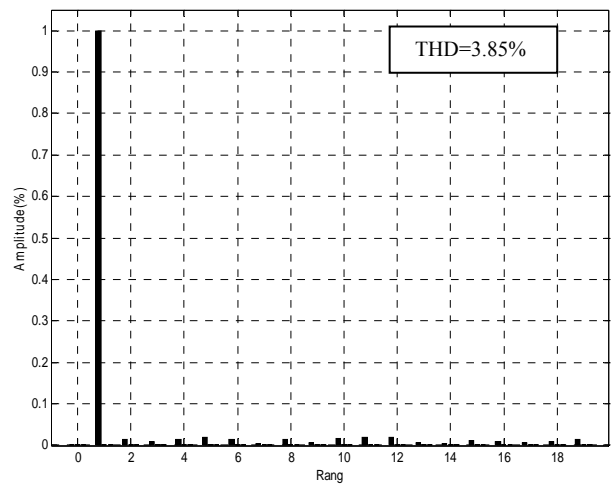
La figure(V-6) montre les résultats obtenus avec la commande Hystérésis dans le cas où le pont à diodes alimente une charge de type RL. Les performances du filtre actif en commande Hystérésis dépendent de l'inductance de découplage L_f , de la tension aux bornes du condensateur V_c et de la largeur de la bande d'hystérésis ($\Delta I = \pm 20$).



Figure(V-6): I_{ch} : Courant de charge, I_f : Courant de filtre actif, I_s : Courant de source, V_{dc} : Tension aux bornes du condensateur.



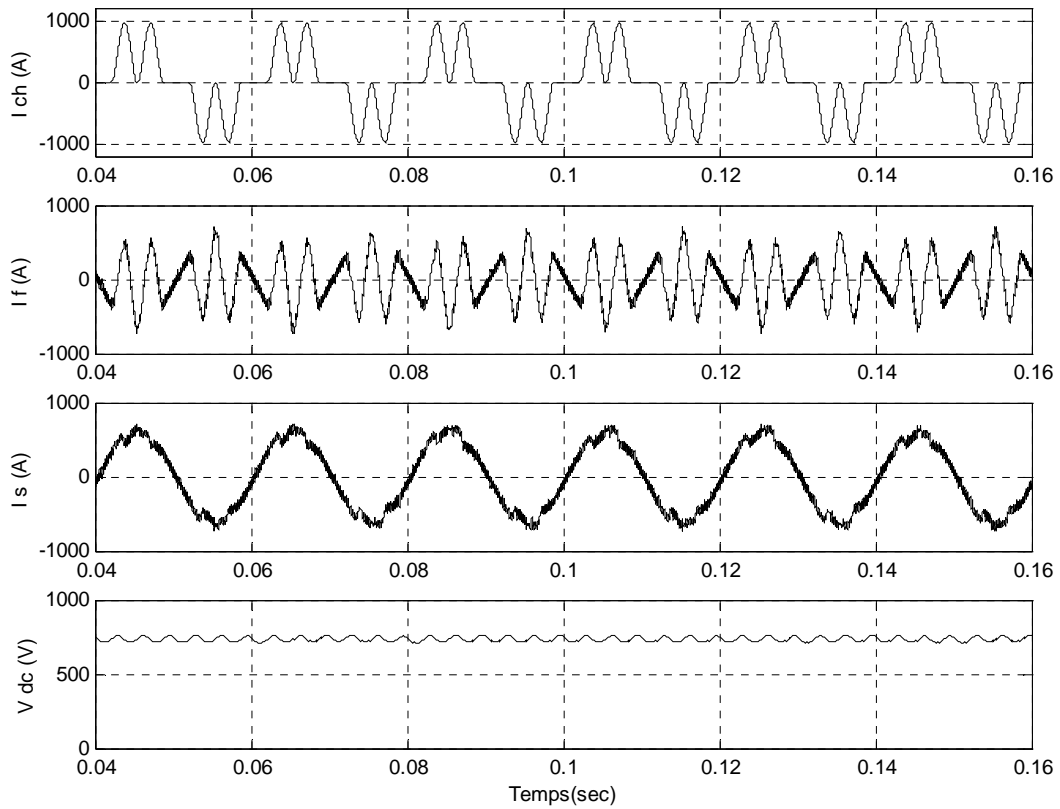
Figure(V-7-a): Spectre du courant source avant filtre.



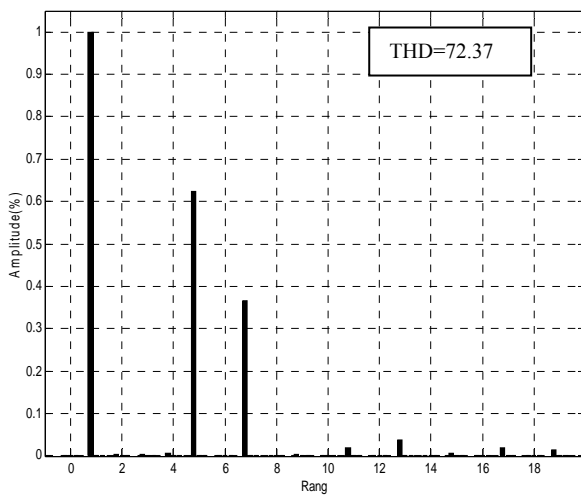
Figure(V-7-b): Spectre du courant source après filtre.

V-4-1-2 Charge R-C

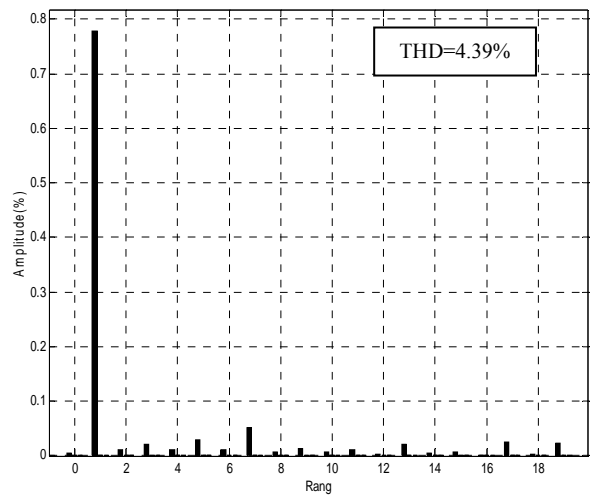
La figure(V-8), montre les résultats obtenus par la méthode hystérésis dans le cas d'une charge RC.



Figure(V-8): I_{ch} : Courant de charge, I_f : Courant de filtre actif, I_s : Courant de source, V_{dc} : Tension aux bornes du condensateur.



Figure(V-9-a): Spectre du courant source avant filtre.

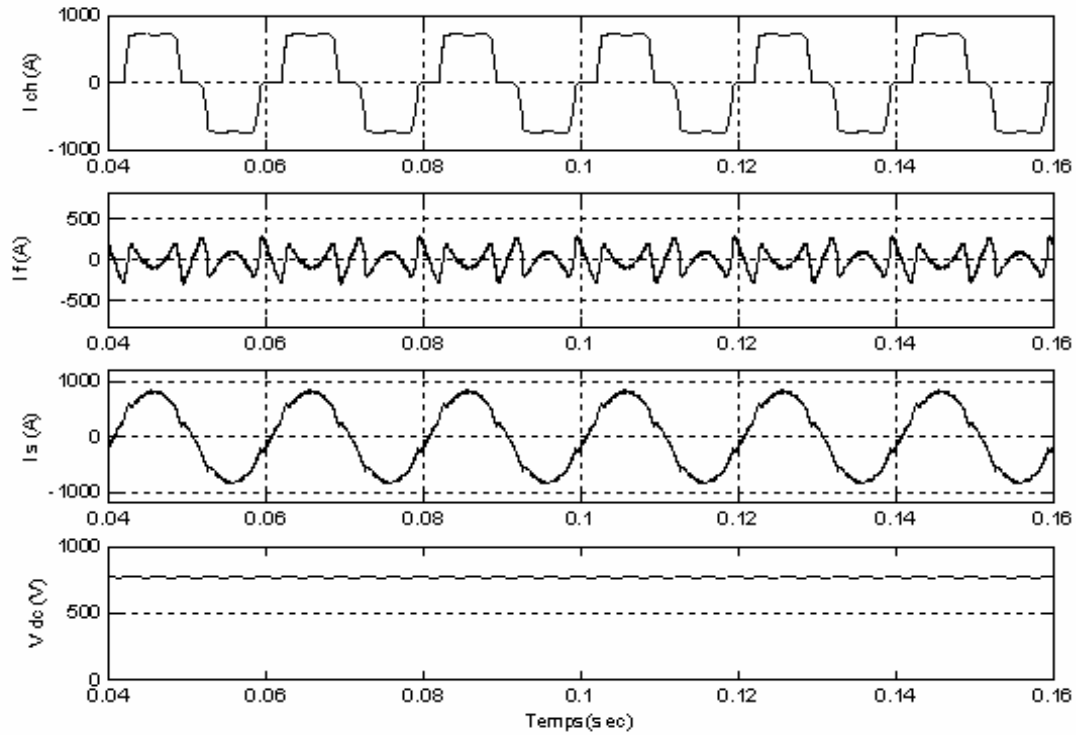


Figure(V-9-b): Spectre du courant source après filtre.

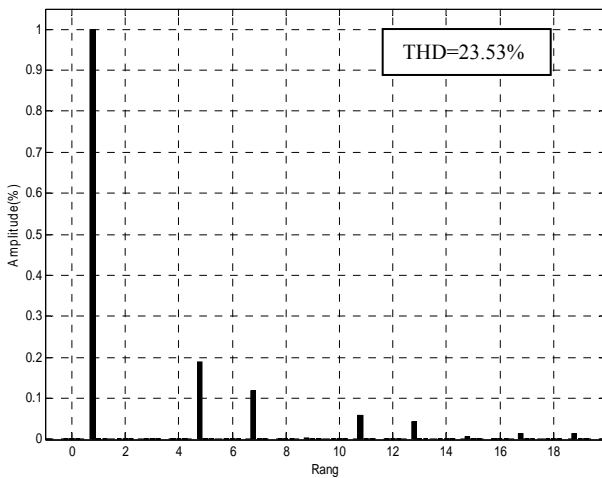
V-4-2 Commande MLI

V-4-2-1 Charge R-L

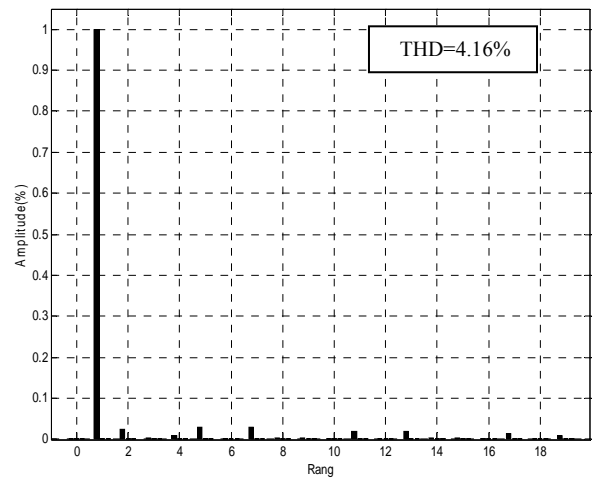
La figure(V-10), montre les résultats obtenus par la commande MLI dans le cas où le pont à thyristors alimente une charge de type RL. La fréquence de commutation a été fixée à une valeur de $f=10\text{KHz}$.



Figure(V-10): I_{ch} : Courant de charge, I_f : Courant de filtre actif, I_s : Courant de source, V_{dc} : Tension aux bornes du condensateur.



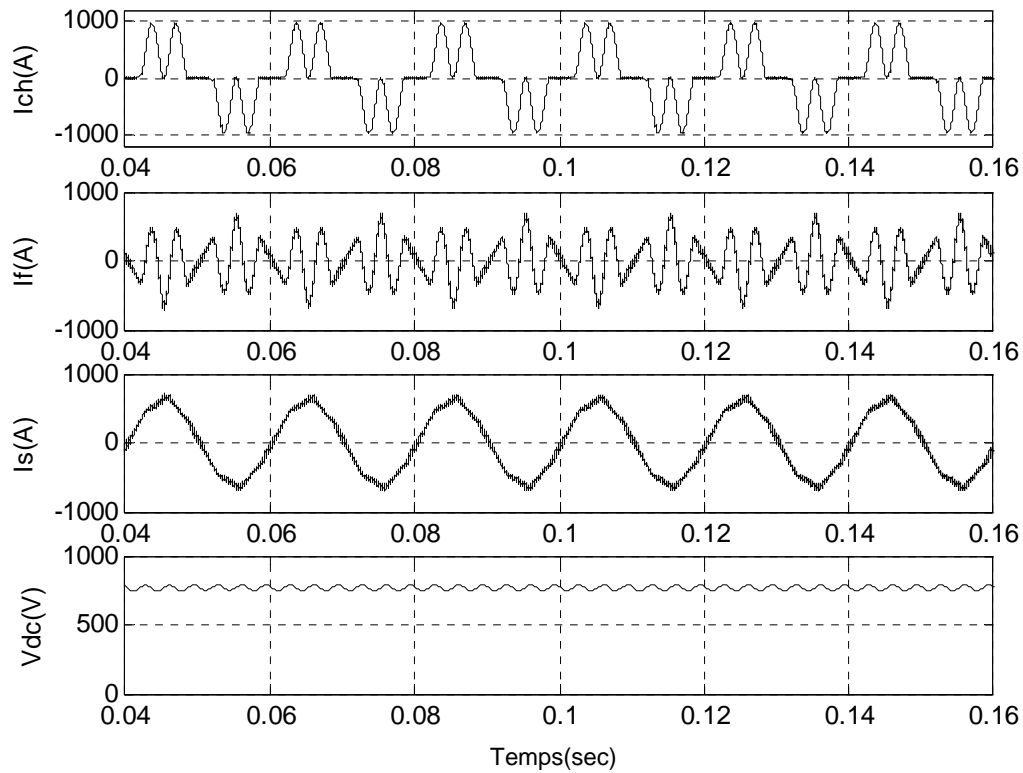
Figure(V-11-a): Spectre du courant source avant filtre.



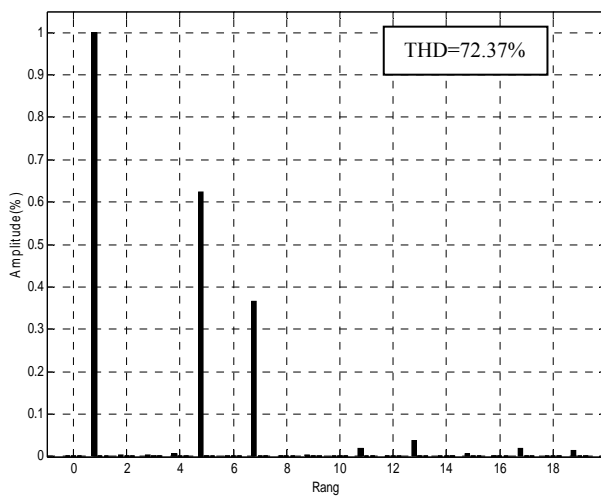
Figure(V-11-b): Spectre du courant source après filtre.

V-4-2-2 Charge R-C

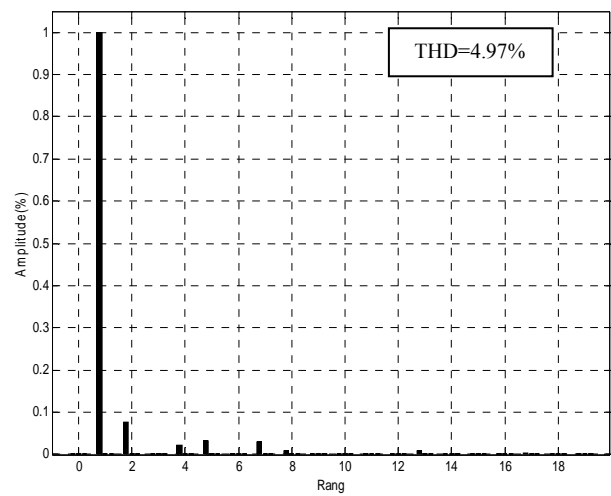
La figure(V-12), montre les résultats obtenus par la commande MLI dans le cas d'une charge Rc. Pour obtenir une bonne performance du filtre, il a fallut ajouter la valeur de l'inductance du filtre du découplage à 50 μ H.



Figure(V-12): I_{ch} : Courant de charge, I_f : Courant de filtre actif, I_s : Courant de source, V_{dc} : Tension aux bornes du condensateur.



Figure(V-13-a): Spectre du courant source avant filtre.



Figure(V-13-b): Spectre du courant source après filtre.

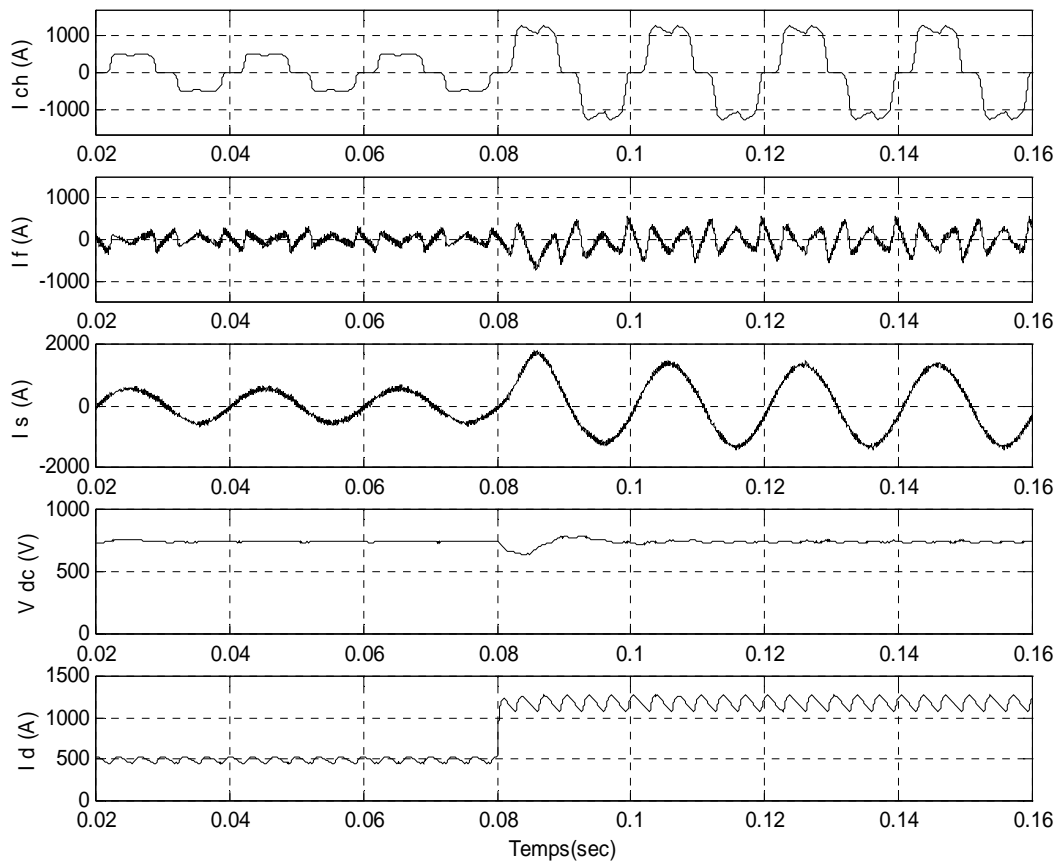
V-5- Changement de la charge

Dans ce cas, on étudie la compensation du courant harmonique et de la puissance réactive consommés par la charge non linéaire. La rapidité de compensation du filtre actif est étudiée lors d'un changement du courant de la charge non linéaire.

V-5-1 Commande hystérésis

V-5-1-1 Changement de la charge (RL1 => RL2)

La figure (V-14) présente l'analyse temporelle de la phase I du courant de la charge (I_{ch}), des courants identifié (I_{ref}) et injecté (I_{inj}) superposés, du courant du réseau après filtrage (I_s) et de la tension continue (V_{dc}). On remarque que la boucle de régulation de la tension continue arrive à poursuivre sa référence de ($V_{dcref} = 750 V$).



Figure(V-14): I_{ch} : Courant de charge.

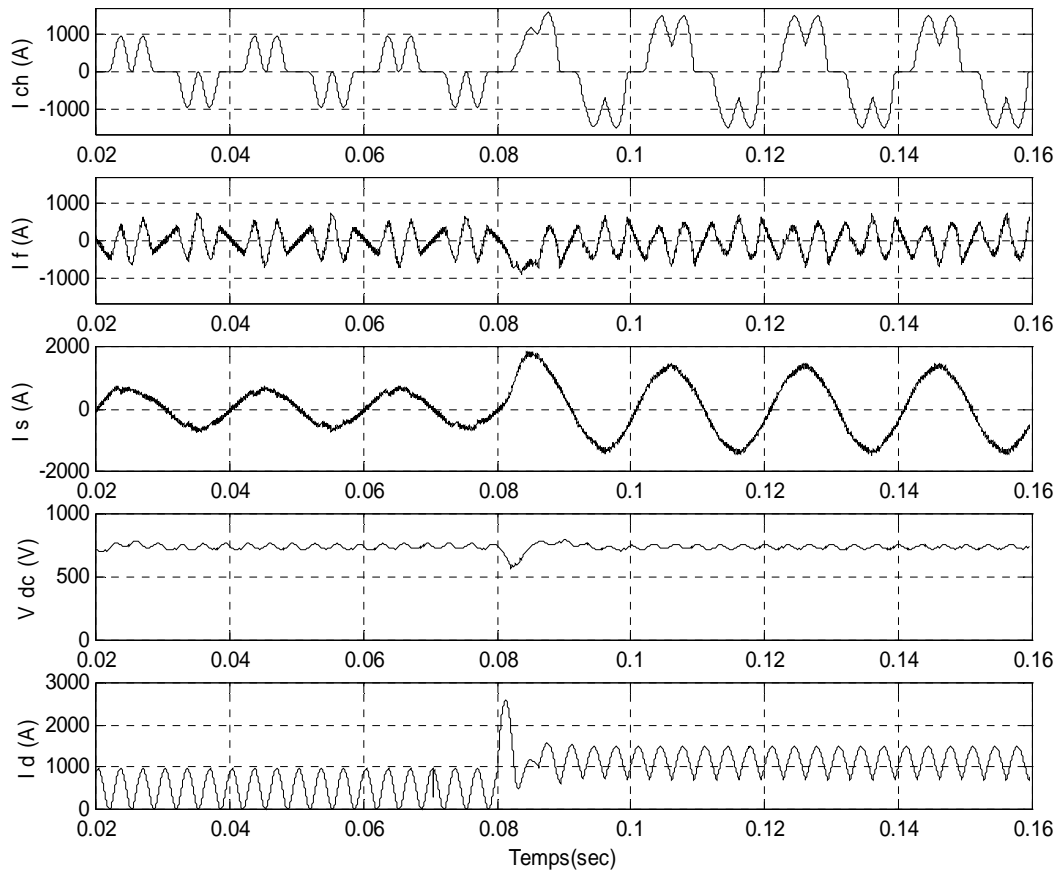
I_f : Courant de filtre actif.

I_s : Courant de source.

V_{dc} : Tension aux bornes du condensateur.

I_d : Courant redressé.

V-5-1-2 Changement de la charge (RC1 => RC2)



Figure(V-15): I_{ch} : Courant de charge.

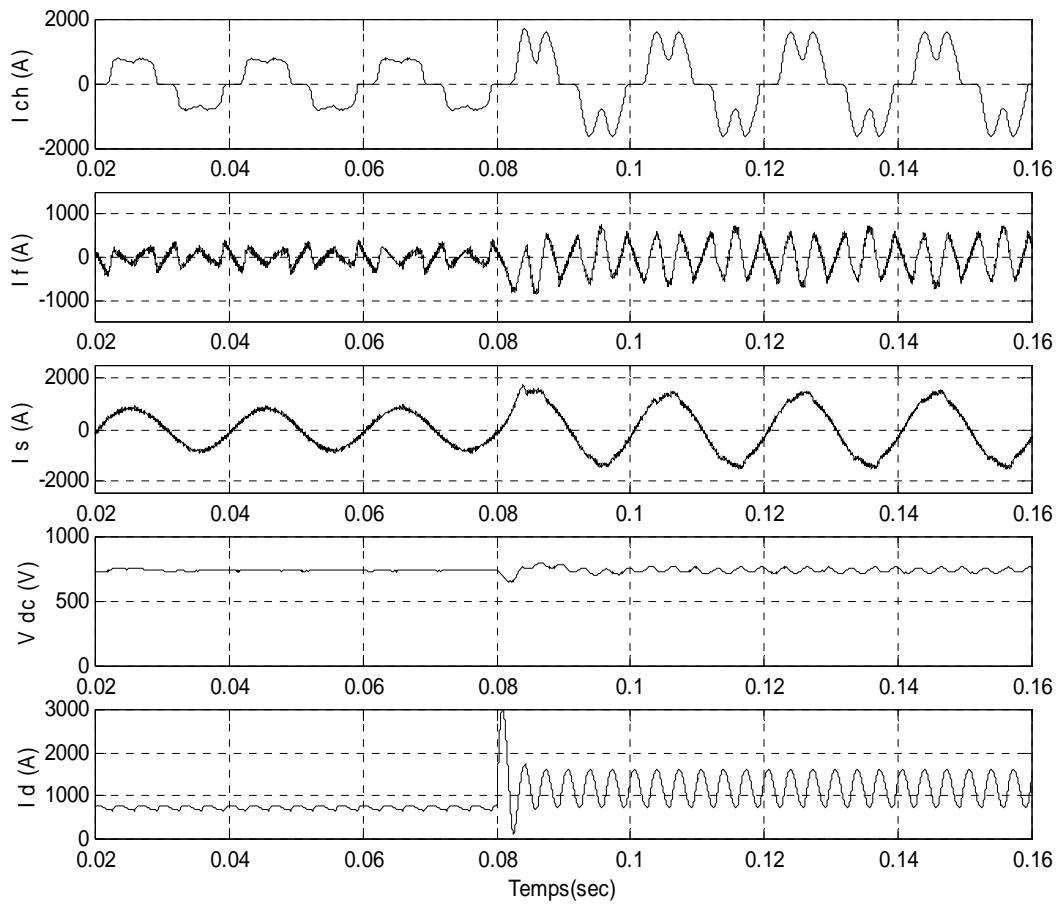
I_f : Courant de filtre actif.

I_s : Courant de source.

V_{dc} : Tension aux bornes du condensateur.

I_d : Courant redressé.

V-5-1-3 Changement de la charge (RL1 => RC2)



Figure(V-16): I_{ch} : Courant de charge.

I_f : Courant de filtre actif.

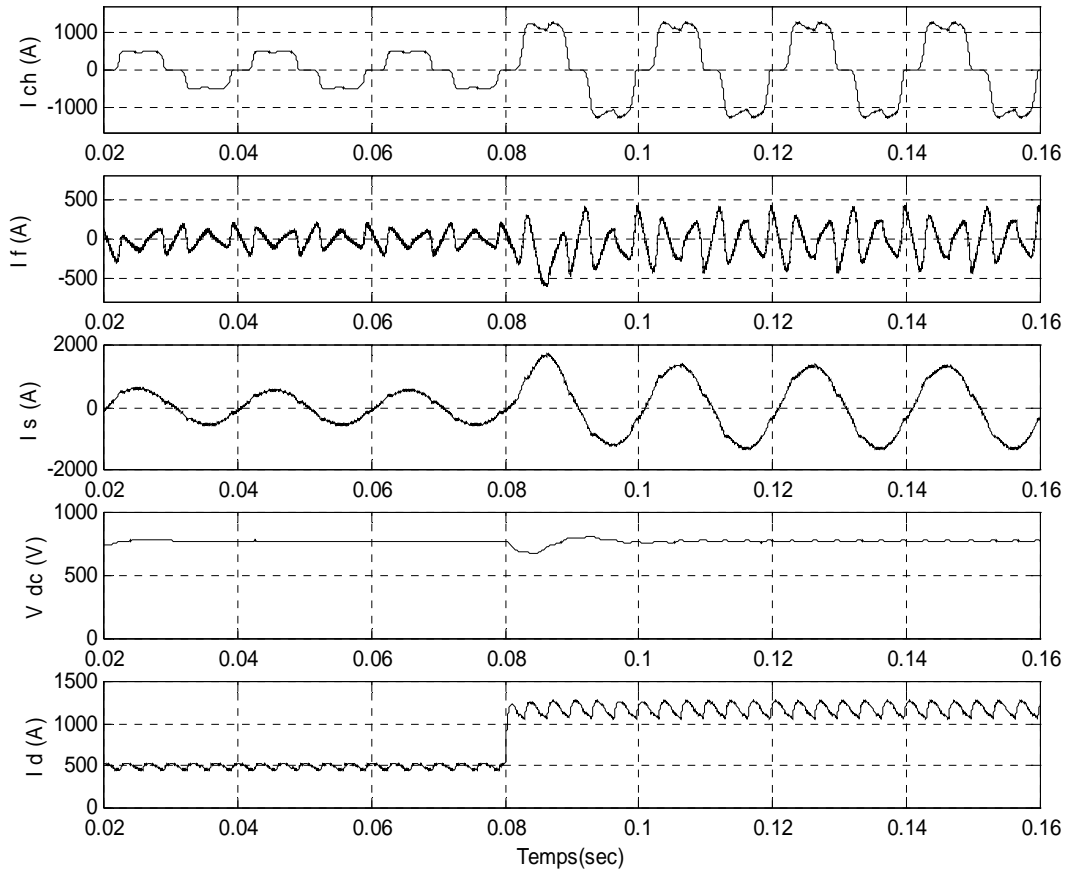
I_s : Courant de source.

V_{dc} : Tension aux bornes du condensateur.

I_d : Courant redressé.

V-5-2 Commande MLI

V-5-2-1 Changement de la charge (RL1 => RL2)



Figure(V-17): I_{ch} : Courant de charge.

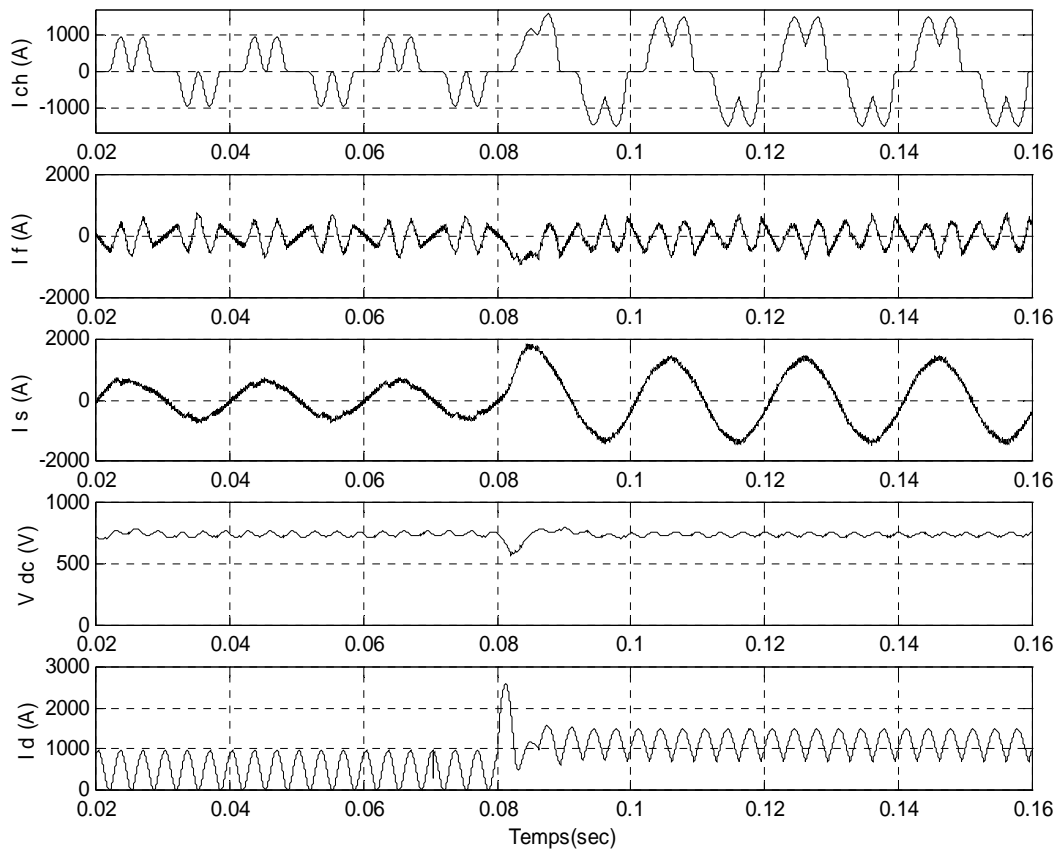
I_f : Courant de filtre actif.

I_s : Courant de source.

V_{dc} : Tension aux bornes du condensateur.

I_d : Courant redressé.

V-5-2-2 Changement de la charge (RC1 => RC2)



Figure(V-18): I_{ch} : Courant de charge.

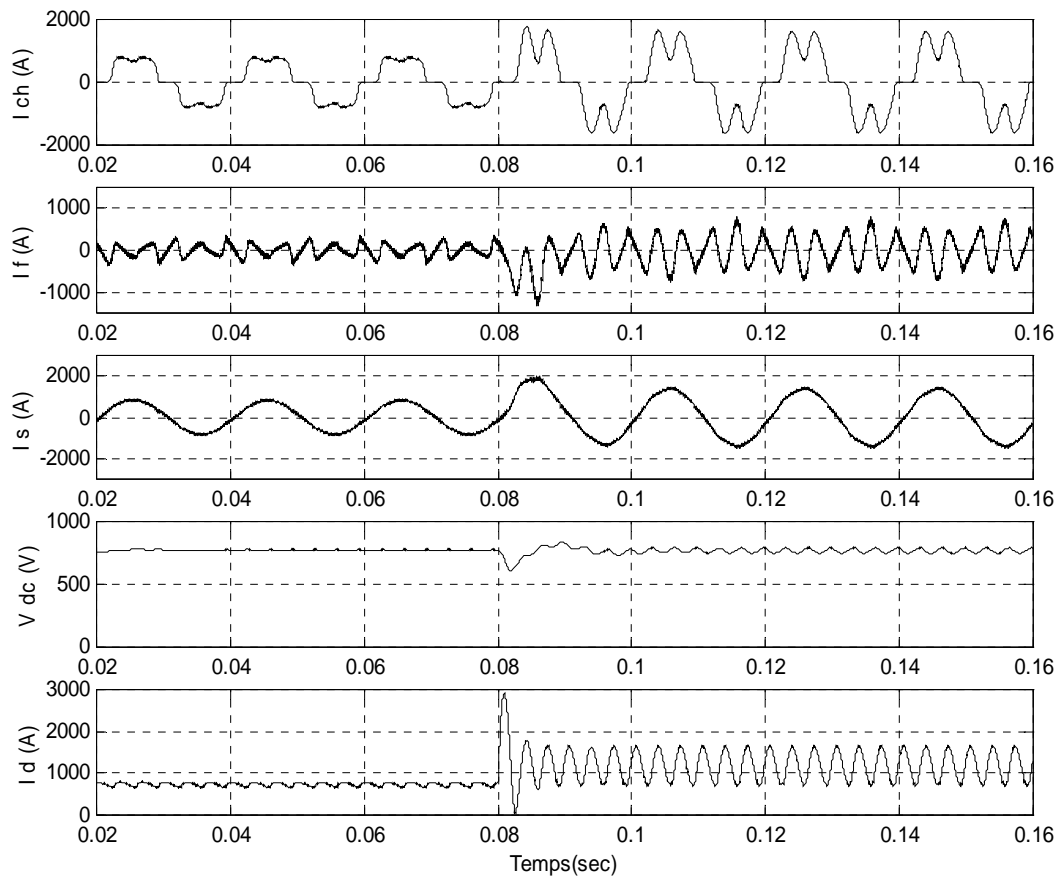
I_f : Courant de filtre actif.

I_s : Courant de source.

V_{dc} : Tension aux bornes du condensateur.

I_d : Courant redressé.

V-5-2-2 Changement de la charge (RL1 => RC2)



Figure(V-19): I_{ch} : Courant de charge.

I_f : Courant de filtre actif.

I_s : Courant de source.

V_{dc} : Tension aux bornes du condensateur.

I_d : Courant redressé.

Le tableau(V-3) complète et regroupe les résultats des simulations

| Commande | Charge | THD%avant filtrage | THD%après filtrage |
|---------------------|------------|--------------------|--------------------|
| Commande hystérésis | Charge R-L | 23.53% | 3.85% |
| Commande MLI | Charge R-L | 23.53% | 4.16% |
| Commande hystérésis | Charge R-C | 72.37% | 4.39% |
| Commande MLI | Charge R-C | 72.37% | 4.97% |

Tableau(V-3): Les résultats des simulations.

Les résultats obtenus montrent l'efficacité et les bonnes performances du filtre actif parallèle de puissance, qui a réduit la THD à une valeur inférieure à 5% correspondant aux recommandations et normes internationales [35;36].

V-6 Conclusion

Dans un temps on a présenté le principe de simulation en électronique de puissance. On s'est plus particulièrement intéressé au développement des programmes de simulation des montages donnés.

Dans un second temps, on a mis au point deux programmes de simulation, facilité par le logiciel Matlab Simulink. Les résultats obtenus ont permis de confirmer les principes de commande du filtre actif développés au chapitre III. De plus ils sont comparables à ceux trouvés en [16] par Mohamad Alaa Eddin Alali.

La simulation d'un cas particulier de charge polluante capacitive permet de compléter les études effectuées par ces deux programmes. Puisque dans ce cas l'évolution des courants de la charge durant les commutations est moins rapide par rapport au cas de la charge fortement inductive, les résultats sont relativement meilleurs.

Le courant I_s est quasi sinusoïdal. Néanmoins des pics apparaissent pendant les commutations dans le redresseur. Ces déformations de la forme d'onde du courant injecté dans le réseau sont plus importantes dans le cas de la commande MLI. Elles sont l'effet du déphasage entre le courant réel généré par le filtre actif et sa référence.

Sur les figure(V-7) et figure(V-11) sont comparés les spectres du courant injecté sur le réseau avant et après l'installation du filtre actif. Avec l'une ou l'autre commande, le filtre actif permet une réduction importante des harmoniques du courant. Toutefois, l'efficacité du filtre actif est meilleure avec la commande hystérésis.

CONCLUSION GENERALE

Dans ce mémoire on s'est intéressé à l'étude des différentes possibilités de filtrage actif des harmoniques des réseaux électriques.

Dans un premier temps, après l'analyse des perturbations harmoniques et leurs effets sur le réseau électrique, on a présenté les solutions traditionnelles pour les réduire, notamment le filtrage passif. Le filtrage actif est une nouvelle solution pour la dépollution harmonique.

Un filtre actif peut être connecter sur le réseau en série ou en parallèle et avoir deux structures électrotechniques différentes : tension ou courant. En raison de simplicité de sa commande, presque la totalité des filtres dans le monde sont de structure tension, c'est la raison principale pour laquelle on a retenu cette structure.

On a ensuite étudié le contrôle de ce filtre actif. Pour identifier les courants harmoniques, on a choisi la méthode des puissances réelles et imaginaire instantanées que donne de bon résultats en statique et en dynamique. Les deux principes de commande pour contrôler le courant du filtre, MLI et hystérésis, sont étudiés. La commande hystérésis est très simple à mettre en œuvre mais dans ce type de commande la fréquence instantanée de commutations n'est pas contrôlable. Par contre, en commande MLI, la fréquence des commutations peut être imposée et par conséquent le filtrage passif des harmoniques dues au découpage est plus simple.

On a mis au point deux programmes de simulation.

En dernier en exploitant ces deux programmes, on a optimisé les paramètres d'un filtre actif associé à une charge polluante de 400 KVA. Avec ce filtre, le THD des courants dans la source réduit, pour un point de fonctionnement considéré comme étant typique, de 23.53 % à 4.16 % dans le cas de la commande par MLI et à 3.85 % avec la commande hystérésis (pour une charge RL).

BIBLIOGRAPHIE

- [1] **Thierry Deflandre et Philippe Maurs,**
« Les harmoniques sur les réseaux électriques »,
Direction des Etude et Recherche en France -Edition EYROLLES -1998.
- [2] **C. Lott, O. Lapierre, H. Pouliquen et S. Saadate,**
« Filtrage actif des harmoniques en courant et en tension des réseaux électriques:
modélisation, simulation numérique et expérimentation », Dec1997, PP.2433-2457.
- [3] **L. Moller,**
« Problèmes techniques posés par le raccordement convertisseurs de grande
puissance », Revue EDF, N°2 ,1985.
- [4] **H. Akagi,**
« New trends in active filter », EPE'95, vol.0, 1995, PP.17-26.
- [5] **H. Akagi,**
« Controle strategy and site selection of a shunt active filter for damping of harmonic
propagation in power distribution systems », IEEE Trans. On power delivery, Vol.12,
N°1,1997, PP. 354-363.
- [6] **L. Malesani, L. Rossetto, P. Tenti,**
« Active filter for reactive power and harmonics compensation »,IEEE-PESC'86-power
Electronics Spec.Conf,86CH2310-1, PP.321-330.
- [7] **L. Gyugyi et E.C. Strycular,**
« Active AC Power Filters », In Proc. IEEE IAS Annual Meeting, 1976,Vol. 19-C,
PP. 529-535.
- [8] **F. Z Peng, H. Akagi et A. Nabae,**
« A study of active power filter using quad-series voltage PWM converters for
harmonic compensation », IEEE Trans. On power Elec, Vol.5, N°1, Jan. 1990,
PP.9-15.
- [9] **M. Aredes, K. Heumann,**
« Three phase wire shunt active filter control strategies », IEEE Trans. On power Elec,
Vol.12, N°2, 1997.
- [10] **N. Zunga, A. Polio,**
« Shunt active power filter synthesizing resistive », IEEE Trans. On power Elec,
Vol.17, N°2, 2002.
- [11] **M.A.E. Alali, S. Saadate, Y.A. Chapuis, F. Braun,**
« Control and analysis of series and shunt active filters with SABER », IPEC 2000,
Tokyo, Japan, April 2000, PP. 1467-1472.
- [12] **H. Liahng Jou, H. Yung Chu, J. Chang Wu,**
« A novel active power filter for reactive power compensation and harmonic
suppression »,INT. J. Electronics, Vol.75, N°3,1993, PP.577-587.

- [13] **H. Akagi, A. Nabae and S. Atoh,**
« Control strategy of active power filters using multiple voltage-source PWM converters », IEEE Trans. on Industry applications, vol. IA-22, 1986, PP. 460-465.
- [14] **G. Alarcon, C. Nunez, V. Cardenas, M. Olivier,**
« Design and implementation of a 3-phase series active filter to compensate voltage disturbance », CIEP-2000, October 2000, Acapulco, Mexico, P. 93-98.
- [15] **L.A. Moràn, I. Pastorini, J. Dixon, R. Wallace,**
« A fault protection scheme for series active power filters », IEEE Trans. on power electronics, vol.14, N°5, September 1999, PP. 928-938.
- [16] **Mohamad Alaa Eddin Alali,**
« Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension », Thèse de Doctorat de l'Université de Louis Pasteur – Strasbourg, 12 Septembre 2002
- [17] **Abdelaziz Chaghi,**
« Contribution au contrôle du courant sur un réseau de distribution électrique Application d'un compensateur actif », Thèse de Doctorat de l'Université de Batna, 2004.
- [18] **Thierry Gouraud,**
« Identification et rejet de perturbations harmoniques dans des réseaux de distribution électrique », Thèse de Doctorat de l'Ecole Centrale de Nantes, 7 Janvier 1997.
- [19] **Boutraa Leila,**
« Filtrage actif des harmoniques des réseaux électriques », Thèse de Magister de l'Université de Batna, 2005.
- [20] **Ould-Ouali Samy Hassani,**
« Etude et réalisation d'un filtre actif parallèle commandé par Logique Floue », Thèse de Magister de l'Ecole Militaire Polytechnique, 9 Janvier 2002.
- [21] **Bouzit Ali,**
« Filtrage hybride des harmoniques générés par un pont redresseur non commandé », Thèse de Magister de l'Université de Annaba, 2001.
- [22] **Chouaf Fathi,**
« L'adaptation du filtre actif parallèle aux variations de la charge », Thèse de Magister de l'Université de Annaba, 2004.

- [23] **Girard Philippe**,
« Filtrage actif série et passif parallèle », Rapport Final de Projet de Fin d'Etude,
3^e année option EPC, Mars 1994.
- [24] **R. Calvas**,
« Les perturbations électriques en BT », Cahier Technique n° 141.
- [25] **C. Collombet, J.-M. Lupin et J. Schonek**,
« Perturbations harmoniques dans les réseaux et leur traitement »,
Cahier Technique n° 152.
- [26] **J.-N. Fiorina**,
« Onduleurs et harmoniques (cas des charges non linéaires) »,
Cahier Technique n° 159 .
- [27] **J.-N. Fiorina**,
« Harmoniques en amont des redresseurs des ASI », Cahier Technique n° 160.
- [28] **G. Thomasset**,
« La conception des réseaux industriels en HT », Cahier Technique n° 169.
- [29] **E. Bettega, J.-N. Fiorina**,
« Harmoniques : convertisseurs propres et compensateurs actifs »,
Cahier Technique n° 183.
- [30] **Philippe Ferracci**,
« La qualité de l'énergie électrique », Cahier technique n° 199.
- [31] **Jacques Schonek**,
« Les singularités de l'harmonique 3 », Cahier technique n° 202.
- [32] **Serge Bernard, Gérard Trochain**,
« Compensation des courants harmoniques générés par les ordinateurs grâce à un
compensateur actif d'harmoniques révolutionnaire » Cahier technique n° 128.
- [33] **P. Ladoux, G. Ollé**,
« Compensateur d'harmoniques et de puissance réactive », Publication RESELEC 2002.
- [34] **Z. Laid, B.-S. Salem**,
« Etude et réalisation d'un onduleur monophasé utilisant la technique PWM à base
" MOSFET" », Mémoire d'ingénieur de l'Université de Biskra, 2004.
- [35] **H. Akagi**,
« New trends in active filters for power conditioning », IEEE Trans.
on Industry applications, vol.32, No. 6, pp. 1312-1322, November/December 1996.
- [36] **H. Akagi**,
« Active Filters and energy storage systems for power conditioning in Japan »,
IEEE, Tokyo, JAPAN, pp. 80-88.

