

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE DE M'SILA  
FACULTE DES SCIENCES ET SCIENCES DE L'INGENIEUR  
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME  
D'INGENIEUR D'ETAT EN GENIE ELECTROTECHNIQUE

**OPTION : ELECTROMECHANIQUE**

***THEME***

---

**ETUDE COMPARATIVE DE LA COMPENSATION DES HARMONIQUES  
PAR DES FILTRES ACTIFS ET PASSIFS**

---

**Proposé et dirigé par :**

**Monsieur : CHOUAF Fethi**

**Présenté par :**

**SEGHIRI Mohamed Amine**

**GUEMRA Messaoud**

Année Universitaire: 2006/2007

# DÉDICACE

Je dédie ce modeste travail à mes **chers parents**, merci pour tous les sacrifices consentis afin de me permettre d'être ce que je suis ;  
Je leur exprime humblement ma profonde gratitude et mon attachement éternel.

À mes chères sœurs

À mes chers frères **lakhda**,  
À mes grands parents, et mes tantes.

À mes frères **MESSAOUD** et **HABIB** qui m'ont soutenu pendant les périodes les plus difficiles de la réalisation de ce travail, vous êtes mon symbole de patience, et courage,  
Que vous trouvez ici, le témoignage de ma profonde affection et mon entière reconnaissance.

À mes chères amies : **MEDJAHED** , **hmida**, **ben,mohamed** ,**youssef** , **salime** ,**terek Ahmed** ,**walide bilal** ;**madmod**, **farid** ,**ayache** ,**sidahmed**  
**Amire madjide**.. merci

**Seghiri Med amine**

# REMERCIEMENTS

Mes sincères remerciements :

À :

Monsieur : **chouaf fethi** ; Directeur de ce travail,  
Qu'il trouve ici l'expression de ma profonde gratitude pour son aide et surtout pour sa patience et son affection.

À :

Tous les membres du jury, qui m'ont fait l'honneur d'assister et de juger ce travail, qu'ils trouvent ici le témoignage de ma vive reconnaissance.

À :

Tous les enseignants qui m'ont aidé durant mon cursus :

et surtout mille mercis à **M. koudja**.

### Notation

$S$	.....	Puissance apparente
$P$	.....	Puissance active
$Q$	.....	La puissance réactive
$D$	.....	La puissance déformante ou de distorsion
$\Phi$	.....	Angle de déphasage
$F_p$	.....	Facteur de puissance
$DPF$	.....	Facteur de déplacement de la puissance
$V_h$	.....	Tension harmonique
$I_h$	.....	Courant harmonique
$Z_h$	.....	Impédance polluante
$F.A.P$	.....	Filtre actif parallèle
$F.A.S$	.....	Filtre actif série
$f$	.....	La fréquence
$I_{ch}$	.....	Courant de charge
$U_d$	.....	Tension continu de redresseur
$I_d$	.....	Courant continu de redresseur
$V_1, V_2, V_3$	.....	Les tensions simples du réseau triphasé
$m$	.....	L'indice de modulation
$r$	.....	Coefficient de réglage
$V_A, V_B, V_C$	.....	Tensions alternatives de l'onduleur
$I_A, I_B, I_C$	.....	Courant alternative de l'onduleur
$K_1, K'_1$	.....	L'interrupteur de l'onduleur
$\omega$	.....	Pulsation de réseau
$H_5$	.....	Harmonique de rang
$I_{ref}$	.....	Courant de référence
$Q$	.....	Nombre de phase
$E$	.....	La tension continu de l'onduleur
$U_{ref}$	.....	La tension référence
$U_p$	.....	La tension porteuse
$S(t)$	.....	Le signal –MLI-résultant

# SOMMAIRE

<b>INTRODUCTION GÉNÉRALE.....</b>	<b>1</b>
<b>CHAPITRE I : Généralité sur les filtres</b>	
<b>Introduction.....</b>	<b>3</b>
<b>I.1 Origine des harmoniques .....</b>	<b>3</b>
<b>I.2 Conséquences des harmoniques .....</b>	<b>3</b>
<b>Effets instantanés.....</b>	<b>3</b>
<b>Effets à moyen et long terme.....</b>	<b>3</b>
<b>I.3 Solutions de dépollution des réseaux électriques .....</b>	<b>4</b>
<b>I.3.a Solutions de dépollution traditionnelles.....</b>	<b>4</b>
<b>I.3.a.1 Dépollution des courants perturbateurs.....</b>	<b>5</b>
<b>I.3.a.2 Rééquilibrage des courants du réseau électrique.....</b>	<b>5</b>
<b>I.3.a.3 Compensation de la puissance réactive .....</b>	<b>6</b>
<b>I.3.a.4 Compensation des courants harmoniques.....</b>	<b>6</b>
<b>I.3.a.5 Dépollution des tensions perturbatrices .....</b>	<b>6</b>
<b>I.3.a.6 Le filtrage passif.....</b>	<b>7</b>
<b>I.3.b Solutions de dépollution modernes .....</b>	<b>8</b>
<b>I.3.b.1 Dépollution des courants perturbateurs.....</b>	<b>8</b>
<b>I.3.b.2 Filtre actif .....</b>	<b>9</b>
<b>Le filtre actif parallèle.....</b>	<b>9</b>
<b>Le filtre actif série.....</b>	<b>10</b>
<b>La combinaison parallèle -série actifs.....</b>	<b>10</b>
<b>Combinaison hybride active et passive.....</b>	<b>11</b>
<b>Le filtre actif série avec des filtres passifs parallèles.....</b>	<b>11</b>
<b>Le filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles ..</b>	<b>12</b>
<b>Le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle.....</b>	<b>12</b>
<b>Conclusion .....</b>	<b>13</b>

## CHAPITRE II : Les différentes charges polluantes

INTRODUCTION.....	14
II.1 Interharmonique .....	14
II.2 Appareils générateurs des harmoniques .....	14
II.2.a Etude d'une charge polluante (variateur de vitesse).....	15
II.2.b Etude d'une charge polluante (redresseur à diode triphasé).....	17
II.2.b.1 Etude de la tension redressé.....	18
II.2.b.2 La tension redressé.....	20
II.2.b.3 La valeur moyenne de tension redressé.....	20
II.2.b.4 Expression de courant.....	21
II.2.b.5 Etude de courant.....	21
II.2.b.6 Les courant .....	22
II.3 Développement en série de Fourier (courant harmonique).....	24
II.3.a Décomposition en série de Fourier pour le pont Hédaphéd .....	25
II.3.b Le courant d'entréd de redresseur .....	26
II.3.c La valeur efficace du courant fondamental .....	26
II.3.d La valeur efficace du courant harmonique .....	27
Conclusion .....	31

## CHAPITRE III : Compensation active des harmoniques

Introduction .....	32
III.1 La stratédie d'identification .....	32
III.2 La médthode d'identification des courants perturbateurs .....	32
III.3 Principe de la médthode de la puissance instantanéd .....	33
III.4 Schéma de principe de la médthode d'identification .....	36
III.4.a Schéma symbolique de l'onduleur .....	39
III.4.b Propriété de l'onduleur .....	39
III.4.c Domaine d'utilisation .....	39
III.4.c.1 Principe gédnérale de fonctionnement .....	39
III.4.c.2 Structure de l'onduleur de tension .....	40
III.4.d Modèdle de commande de l'onduleur de tension .....	41
III.4.e Stratédie de commande des onduleurs.....	43
III.5 Commande MLI .....	43

<b>III.5.a Principe de filtre actif parallèle .....</b>	<b>45</b>
<b>III.5.b Simulation de filtre actif .....</b>	<b>46</b>
<b>III.5.c Résultat de simulation .....</b>	<b>48</b>
<b>Conclusion .....</b>	<b>50</b>

## **CHAPITRE IV : Compensation passive des harmoniques**

<b>Introduction .....</b>	<b>51</b>
<b>IV.1 Principe de filtrage passif .....</b>	<b>51</b>
<b>IV.2 Conception des filtres passifs .....</b>	<b>52</b>
<b>IV.3 Inductance anti-harmonique .....</b>	<b>52</b>
<b>IV.4 Les types de filtrage passif .....</b>	<b>53</b>
<b>IV.4.a Filtre résonant .....</b>	<b>54</b>
<b>IV.4.b Filtre amorti .....</b>	<b>59</b>
<b>IV.5 Inconvénients des filtres passifs .....</b>	<b>61</b>
<b>IV.6 Calcul des filtres passifs .....</b>	<b>61</b>
<b>IV.7 Minimisation de la tension harmonique (Vh) .....</b>	<b>64</b>
<b>IV.8 Résultat de simulation Conclusion .....</b>	<b>66</b>
<b>Conclusion .....</b>	<b>70</b>
<b>CONCLUSION GENERALE .....</b>	<b>71</b>

## INTRODUCTION GENERALE

Depuis plusieurs années, les convertisseurs statiques (redresseurs, gradateurs) prolifèrent tant dans les équipements industriels que domestiques. Par exemple, ces dispositifs sont fréquemment employés dans la régulation de vitesse de moteurs à courant continu et alternatif, ainsi que dans les alimentations des ordinateurs. Ils sont également utilisés dans les variateurs de lumière, les régulations de systèmes de chauffage électrique et les variateurs de vitesse des moteurs universels (lave-linge, aspirateurs, outillages électroportatifs,...). L'utilisation de ces convertisseurs statiques dans les installations de conversion d'énergie électrique a considérablement contribué à améliorer les performances et l'efficacité de ces systèmes. En revanche, ils ont participé à détériorer la "qualité" du courant et de la tension des réseaux de distribution. En effet, ces systèmes consomment des courants non sinusoïdaux, même s'ils sont alimentés par une tension sinusoïdale : ils se comportent comme des générateurs de courants harmoniques. Par l'intermédiaire de l'impédance de court-circuit du réseau, les courants harmoniques déforment la tension de celui-ci.

Les déformations du courant et de la tension peuvent perturber le fonctionnement normal d'autres équipements électriques.

C'est pourquoi, les distributeurs d'énergie ayant la contrainte de fournir une tension sinusoïdale, prennent en charge l'atténuation des perturbations harmoniques au moyen d'installations de forte puissance.

Cependant, les nouvelles réglementations internationales imposent aux consommateurs des limites aux harmoniques, engendrées par leurs systèmes, tant en courant qu'en tension. Ainsi, le filtrage des composantes harmoniques est au centre des préoccupations des distributeurs d'une part et des utilisateurs d'énergie électrique d'autre part.

L'objet de ce travail se rapporte essentiellement aux techniques aptes à satisfaire les normes définies dans les réglementations.

Dans un premier temps, le 1<sup>er</sup> chapitre met en évidence les effets nocifs engendrés par les charges non linéaires et la nécessité, pour se conformer aux normes, de minimiser ces perturbations. Les différents moyens actuellement développés (renforcement de la puissance de court-circuit, filtrage passif, filtrage actif).

Ainsi on a présenté dans le 2<sup>ème</sup> chapitre, les charges polluantes, et avec la décomposition en série de fourrier on a pu avoir les formes des rangs d'harmoniques.

Dans le 3<sup>ème</sup> chapitre, on a pu voir la méthode d'identification des courants harmoniques. Alors on a choisi le filtre actif parallèle car il semble que le filtre actif parallèle à structure tension est la solution la plus pertinente pour la dépollution des réseaux de distribution d'énergie.

Dans le 4<sup>ème</sup> chapitre, on a utilisé le filtrage passif pour la compensation des harmoniques, on utilise le filtre d'ordre 5 et 7 avec les différentes formes de courant de compensation.

Et enfin on détermine par une comparaison entre compensation active et passive des harmoniques.

## I. Introduction

Dans ce chapitre nous allons donner un aperçu sur l'ensemble des origines des harmoniques, leurs conséquences et les différentes structures des filtres passifs et actifs.

### I.1. Origine des harmoniques

Le progrès des équipements électriques utilisant des convertisseurs statiques a entraîné des courants perturbateurs dans les réseaux électriques.

Ces équipements électriques sont considérés comme des charges non linéaires émettant des courants dont les fréquences sont des multiples entiers de la fréquence fondamentale, ou parfois à des fréquences quelconques, ce qui a donné naissance ce qu'on appelle les courants harmoniques.

Le passage de ces courants harmoniques dans les impédances du réseau électrique peut entraîner des tensions harmoniques aux points de raccordement et alors polluer les consommateurs alimentés par le même réseau électrique.

Les différents secteurs industriels concernés sont aussi bien du type secondaire (utilisation des gradateurs, des redresseurs, des variateurs de vitesse...), que du type tertiaire (informatique ou éclairage dans les bureaux, commerces,...) ou domestique (téléviseurs, appareils électroménagers en grand nombre). [1] [2]

### I.2. Conséquences des harmoniques

**Effets instantanés** : ils créent des perturbations dans le fonctionnement des appareils de protection et de commutation.

**Effets à moyen et long terme**: ils engendrent l'échauffement des matériels électriques, et causent un vieillissement prématuré de ceux-ci.

Tableau des effets harmoniques

<b>MATERIEL ELECTRIQUE</b>	<b>EFFETS DE LA POLLUTION HARMONIQUE</b>
<b>Machines tournantes (moteurs triphasés, alternateur)</b>	<i>Echauffements supplémentaires. Couples oscillatoires qui provoquent des vibrations et du bruit.</i>
<b>Transformateurs</b>	<i>Echauffements supplémentaires. Pertes dans le fer. Risque de saturation.</i>
<b>Câbles</b>	<i>Augmentation des pertes surtout dans le câble de neutre où s'ajoutent les harmoniques de rang 3.</i>
<b>Electronique de puissance</b>	<i>Troubles de fonctionnement.</i>
<b>Condensateurs</b>	<i>Vieillessement prématuré.</i>
<b>Dispositifs de protection (fusibles, disjoncteurs)</b>	<i>Déclenchement intempestif.</i>
<b>Compteurs d'énergie</b>	<i>Erreurs de mesure.</i>
<b>Téléviseurs</b>	<i>Déformation de l'image et du son.</i>
<b>Lampes à décharge</b>	<i>Risque de vieillissement prématuré.</i>

Tableau des effets harmoniques

### **I.3. SOLUTIONS DE DEPOLLUTION DES RESAUX ELECTRIQUES**

Afin de compenser toutes les perturbations, séparées en deux types : courant et tension, deux groupes de solution de dépollution, traditionnelle et moderne, vont être étudiés.

L'approche de la dépollution la mieux adaptée à notre objectif de recherche sera détaillée par la suite. [3] [4]

#### **I.3. a SOLUTIONS DE DEPOLLUTION TRADITIONNELLES**

Suivant les types de perturbation, courant et tension, deux solutions traditionnelles de dépollution sont analysées. [4]

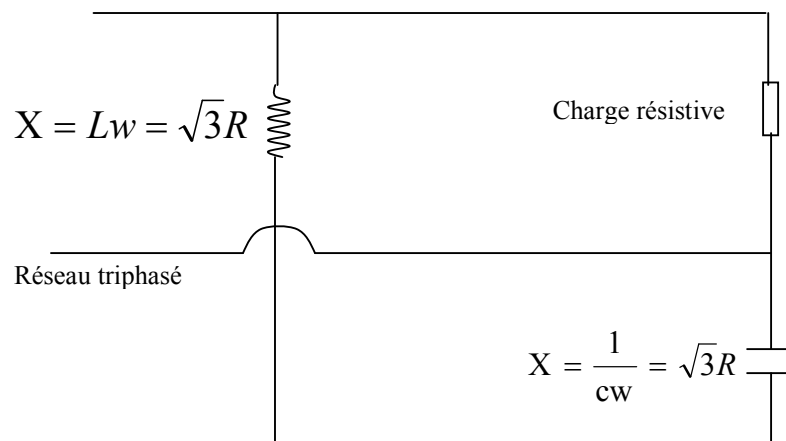
### I. 3.a.1 DEPOLLUTION DES COURANTS PERTURBATEURS

Afin de dépolluer les réseaux électriques de ce type de perturbation, plusieurs solutions ont été introduites dans ce thème.

### I.3.a.2. REEQUILIBRAGE DES COURANTS DU RESEAU ELECTRIQUE

Puisque les courants déséquilibrés dans un réseau électrique basse tension résultent généralement des charges monophasées et biphasées mal réparties, la première solution est la répartition égale des charges sur les trois phases.

Une autre solution est l'installation d'un compensateur passif composé d'inductance et de condensateur. La Fig.I.1. montre ce compensateur. Ce montage permet de présenter à 50 Hz une impédance équilibrée. Cependant, ce montage provoque un fort déséquilibre pour des fréquences différentes de 50 Hz, avec des résonances qu'il faut éviter d'exciter à proximité d'un générateur d'harmoniques. [4]



**FIG (I.1) :** un compensateur passif

### **I.3.a.3. COMPENSATION DE LA PUISSANCE REACTIVE**

La puissance réactive est majoritairement consommée par les moteurs asynchrones et plus récemment par des dispositifs à base d'électronique de puissance. Différentes méthodes de compensation sont utilisées pour relever le facteur de puissance.

La plus simple consiste à placer des batteries de condensateurs en parallèle avec le réseau. L'inconvénient de cette méthode réside dans le fait que la puissance réactive fournie par les condensateurs est constante et qu'elle ne s'adapte pas à l'évolution du besoin. [4] [6]

### **I.3.a.4. COMPENSATION DES COURANTS HARMONIQUES**

Plusieurs solutions existent pour limiter la propagation et l'effet des harmoniques dans les réseaux électriques :

L'augmentation de la puissance de court-circuit du réseau et l'utilisation de convertisseurs peu polluants qui ont pour effet de l'utilisation de dispositifs de filtrage pour réduire la propagation des harmoniques produits par des charges non linéaires.

Le filtrage consiste à placer en parallèle sur le réseau d'alimentation une impédance de valeur très faible autour de la fréquence à filtrer et suffisamment importante à la fréquence fondamentale du réseau. Parmi les dispositifs de filtrage les plus répandus, on distingue le filtre passif résonnant Fig: (I.1.a) et le filtre passif amorti ou passe-haut Fig: (I. 1.b).

### **I.3.a.5. DEPOLLUTION DES TENSIONS PERTURBATRICES**

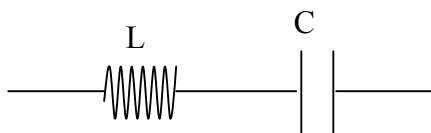
Les tensions perturbatrices dans un réseau électrique basse tension sont principalement les creux de tension, les tensions harmoniques et les tensions déséquilibrées. Ces deux dernières sont généralement causées par la circulation des courants harmoniques et/ou déséquilibrés. [6]

Pour dépolluer les réseaux électriques de ces deux types de perturbation, on peut limiter la circulation des courants perturbateurs en utilisant les solutions traditionnelles présentées précédemment dans le cas des perturbations de courant.

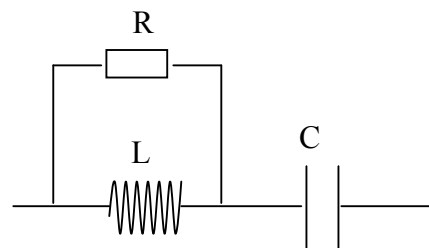
Quant aux creux de tension, la solution la plus fréquente dans les milieux sensibles (hôpitaux, sites industriels...etc.) est d'utiliser des groupes électrogènes qui se substituent au réseau électrique. Mais la limitation de la puissance de ces groupes ainsi que la qualité médiocre de l'énergie électrique fournie reste un problème. [7] [8]

### I.3.a.6. FILTRAGE PASSIF

Le principe consiste à insérer en amont de la charge un ou plusieurs circuits accordés sur les harmoniques à rejeter. Ainsi pour filtrer un courant à une fréquence particulière, un filtre résonant série LC est placé en parallèle sur le réseau Fig:(I.1.a) Cependant, ce type de filtre est très sélectif Aussi, pour atténuer toute une bande de fréquences, un filtre passe-haut du second ordre Fig:(I.1.b) est préférable. Le dimensionnement de ces filtres dépend des harmoniques à éliminer, des performances exigées, de la structure du réseau et de la nature des récepteurs Il est en général plus aisé et moins coûteux de rejeter, par cette technique, les harmoniques de rang élevé que celles de rang faible, et le filtrage reste une technique délicate. En effet, les variations de l'impédance du réseau peuvent détériorer les performances du filtre. [8]



**Fig:(I.1. a)** Filtre LC Résonnant  
Résonnant



**Fig:(I.1. b)** Filtre passe haut

Le filtre résonnant est un filtre très sélectif. Il peut se connecter en parallèle avec d'autres filtres résonnants. Le filtre passe-haut compense les harmoniques supérieurs ou égaux à sa fréquence propre. Peut se connecter en parallèle avec d'autres filtres résonnants.

Ces dispositifs sont utilisés pour empêcher les courants harmoniques de se propager dans les réseaux électriques. Ils peuvent aussi être utilisés pour compenser la puissance réactive.

Malgré leur large utilisation dans l'industrie, ces dispositifs peuvent présenter beaucoup d'inconvénients : manque de souplesse à s'adapter aux variations du réseau et de la charge, équipements volumineux, problèmes de résonance avec l'impédance du réseau

### **I.3.b. SOLUTIONS DE DEPOLLUTION MODERNES**

Les solutions de dépollution traditionnelle ne répondant plus ont l'évolution des réseaux électriques et des charges a protégé, comme nous venons de le décrire précédemment, d'autres solutions modernes ont été proposées.

#### **I.3.b.1. DEPOLLUTION DES COURANTS PERTURBATEURS**

La première solution de dépollution consiste à fabriquer la charge la moins polluante possible, comme le pont redresseur dodécaphasé, de manière à réduire le taux d'émission d'harmoniques. Les appareils ont prélèvement sinusoïdal sont aussi proposés pour la compensation des harmoniques et de la puissance réactive.

Cependant, ces solutions entraînent un coût supplémentaire et demandent plus que le savoir-faire habituel pour les mettre en œuvre. De plus, ces solutions ne résolvent pas les problèmes causés par les charges polluantes qui existent sur le marché. Afin d'accompagner l'évolution des contraintes du fournisseur et du consommateur sans imposer un changement aux installations, une famille de filtres actifs parallèles a été proposée comme une solution de dépollution des perturbations en courant.[ 6] [9]

### I.3.b.2. FILTRES ACTIFS

L'apparition de nouveaux composants semi-conducteurs, comme les thyristors et les transistors, a permis d'envisager de nouvelles solutions de compensation des perturbations des réseaux électriques. Les filtres actifs constituent une alternative intéressante aux solutions classiques. Flexibles car auto adaptatif, ils viennent s'ajouter à des structures déjà existantes de convertisseurs. Ils peuvent également être utilisés comme complément aux solutions traditionnellement dépollution. Le rôle d'un filtre actif est de compenser en temps réel les perturbations, en tout ou en partie, présentes dans les réseaux électriques.

Dans cette partie du chapitre, nous allons introduire les principales structures, proposées dans ce thème, à savoir les filtres actifs parallèles, série, combiné parallèle-série et les structures hybrides actif passif. [6] [9]

#### LE FILTRE ACTIF PARALLELE LE (F.A.P)

Le filtre actif connecté en parallèle sur le réseau, comme le montre la Fig: (I.2), est le plus souvent commandé comme un générateur de courant. Il injecte dans le réseau des courants perturbateurs égaux à ceux absorbés par la charge polluante, mais en opposition de phase avec ceux-ci. Le courant côté réseau est alors sinusoïdal. Ainsi l'objectif du filtre actif parallèle consiste à empêcher les courants perturbateurs. (harmoniques, réactifs et déséquilibrés), produits par des charges polluantes, de circuler à travers l'impédance du réseau, située en amont.[10]

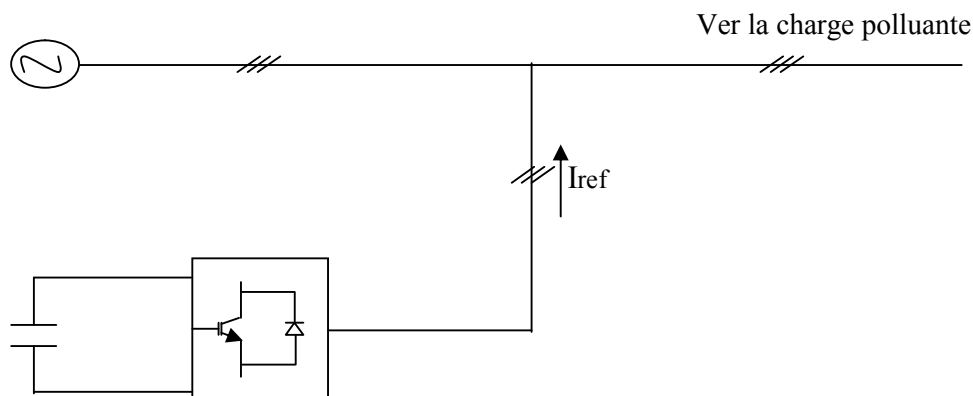


Fig:(I.2) : Filtre actif parallèle

### LE FILTRE ACTIF SERIE (F.A.S)

Le filtre actif série se comporte dans ce cas, comme le montre la Fig: (I.3), comme une source de tension qui s'oppose aux tensions perturbatrices (creux, déséquilibre, harmonique) venant de la source et également à celles provoquées par la circulation des courants perturbateurs à travers l'impédance du réseau. Ainsi la tension aux bornes de la charge à protéger est purement sinusoïdale.

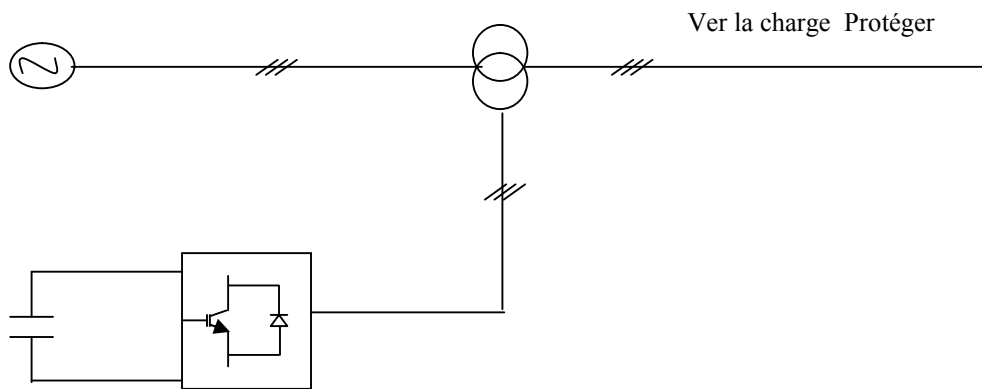


Fig:(I.3) : Filtre actif série

### LA COMBINAISON PARA LLELE-SERIE ACTIFS

La combinaison parallèle série active, (harmoniques, réactifs et déséquilibrés), produits par des charges polluantes, de circuler à travers l'impédance du réseau, située en amont [ 9]

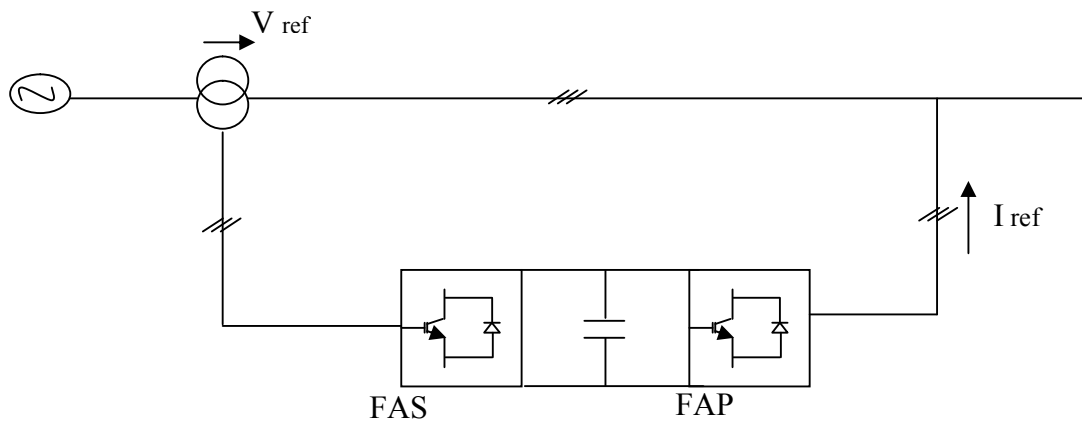


Fig: (I.4) : Filtre actif parallèle série actif

### COMBINAISON HYBRIDE ACTIVE ET PASSIVE

Afin de réduire le dimensionnement et par conséquent le prix des filtres actifs, l'association de filtres actifs de faible puissance a des filtres passifs peut être une solution. Dans ce cas, les filtres passifs ont pour rôle d'éliminer les harmoniques prépondérants permettant de réduire le dimensionnement des filtres actifs qui ne compensent que le reste des perturbations. Plusieurs configurations ont été présentées dans ce chapitre, les plus étudiées étant :

Le filtre actif série avec des filtres passifs parallèles le filtre actif série connectée en série avec des filtres passifs parallèles le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle.

#### FILTRE ACTIF SERIE AVEC DES FILTRES PASSIFS PARALLELES

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 Fig: (I.5).

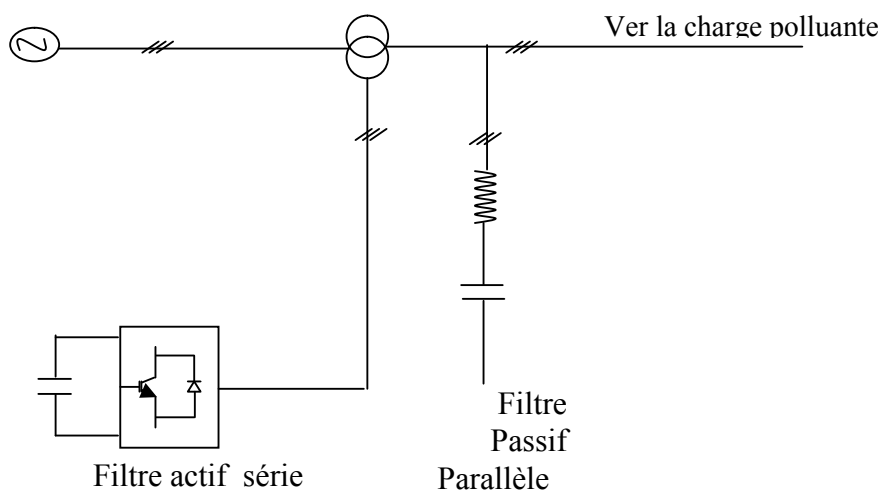
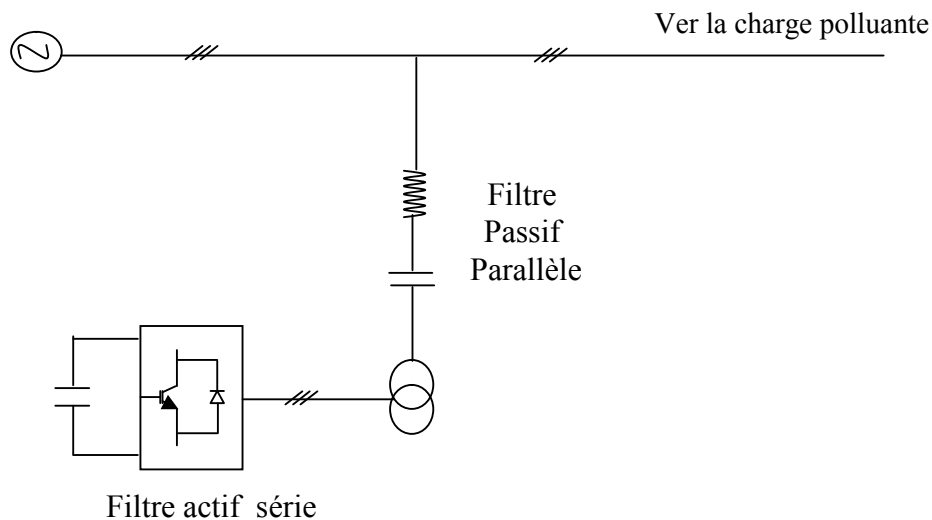


FIG (I. 5) : filtre actif série avec des filtres passif parallèles

## LE FILTRE ACTIF SERIE CONNECTE EN SERIE AVEC DES FILTRES PASSIFS PARALLELES

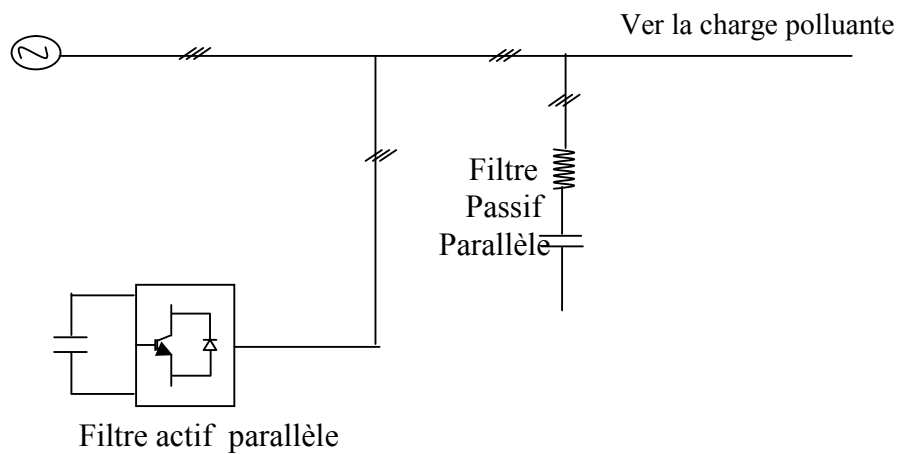
Le principe de fonctionnement de cette configuration, présentée en Fig:(I.6), est la même que la précédente avec l'avantage de réduire encore le dimensionnement du filtre actif série car le courant qui le traverse est plus faible. De plus, le filtre actif série est à l'abri d'un éventuel court-circuit de la charge. [11] [10]



**Fig:(I.6)** : filtre actif série connecte en série avec des filtres passifs parallèles

### Le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle

Le rôle du filtre actif parallèle dans cette configuration, montrée en F:(I.7. ), est la compensation des courants harmoniques basses fréquences émises par la charge polluante. Le filtre passif accordé sur une fréquence élevée, élimine les harmoniques hautes fréquences Compris ceux créés par le filtre actif parallèle. Ce type de filtrage a déjà été appliqué à la compensation des courants harmoniques émis par un cycloconvertisseur de forte puissance. [12]



**FIG (I.7)** : filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle

## CONCLUSION

Nous avons vu dans ce chapitre les conséquences des harmoniques, nous nous sommes intéressés et présentés les solutions traditionnellement et modernes actuels pour les réduire.

Alors nous avons vu toutes les installations équipées d'un compensateur d'harmoniques ont d'excellentes performances sur une large gamme d'applications.

## II.1.INTRODUCTION

Les courants électriques dans les réseaux électriques sont de type périodique, mais pas toujours sinusoïdaux. Par décomposition en série de Fourier, on distingue entre la composante fondamentale (à la fréquence du réseau) de ces courants, et les courants harmoniques qui viennent s'ajouter à la composante fondamentale pour donner au courant sa forme non sinusoïde. Les centrales électriques générant des tensions parfaitement sinusoïdales, les courants harmoniques sont la présence d'une charge électrique non linéaire dans un réseau électrique.

Dans le cadre de la décomposition en série de Fourier d'un signal périodique, un courant électrique est décomposé en un signal sinusoïdal à la fréquence du réseau, et la somme (en général infinie) de signaux sinusoïdaux, de fréquence 2, 3, 4, 5, n fois la fréquence du réseau. Cas particulier de l'harmonique de rang 2, en général les charges du réseau sont symétriques. Dans ces conditions les harmoniques de rang 2 sont sensées être nulles. Cas particulier de l'harmonique de rang 3, C'est le cas le plus fréquent. Il est généré entre autre par les ordinateurs, les téléviseurs ou autres équipements électroniques. [13][12]

Ils sont particulièrement néfastes pour les réseaux électriques triphasés en raison des courants de neutre importants alors produits. [12]

## II.1.INTERHARMONIQUES

L'appellation d'inter harmonique renvoie à des harmoniques de rang non entier. De telles harmoniques sont fréquentes dans les fours à arc, mais peuvent aussi être générés par des systèmes électroniques de puissance, elle n'absorbe pas un courant sinusoïdal de 50Hz

## II.2.APPAREILS GENERATEUR D'HARMONIQUES

On considérait souvent abusivement que les générateurs d'harmoniques étaient essentiellement industriels.

Or des mesures sur le réseau électrique français, ont montré que le moment où le réseau est le plus pollué par les harmoniques est le dimanche soir, c'est à dire à un instant où les industries tournent au ralenti, mais où les téléviseurs sont massivement allumés !

Les téléviseurs ou les ordinateurs sont les principaux émetteurs d'harmoniques. En effet, ces appareils comportent des filtres capacitifs composés de diodes, bobines et condensateurs qui perturbent la tension du réseau. Le rôle de ces filtres est de transformer une tension alternative délivrée par le réseau en une tension continue. Étant donné le nombre de ces équipements dans chaque foyer et leur longue période d'utilisation dans une journée, ces appareils domestiques émettent un courant et une tension harmonique qui va perturber la tension sinusoïdale du réseau, même s'ils ne consomment pas une puissance importante.

- **Dans l'industrie:** Variateur de vitesse pour moteurs, Redresseur, Hacheur, Soudeuses Four à arc utilisé dans la métallurgie.

- **Dans les usages domestiques:** Lampe basse consommation dite à économie d'énergie (alimentation électronique), tubes fluorescents tous les appareils électroménagers comportant une alimentation à découpage (TV, magnétoscope, ordinateur,...).

### II.2.a) étude d'une charge polluante ( variateur de vitesse)

On relève à l'oscilloscope le courant circulant dans une phase reliée à un variateur de vitesse comme l'indique le schéma de principe. On obtient le résultat suivant:

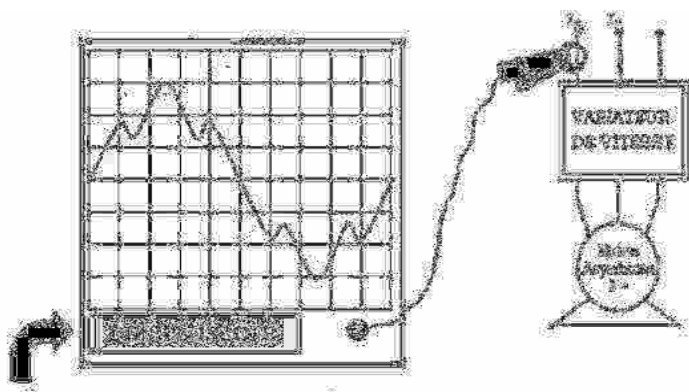
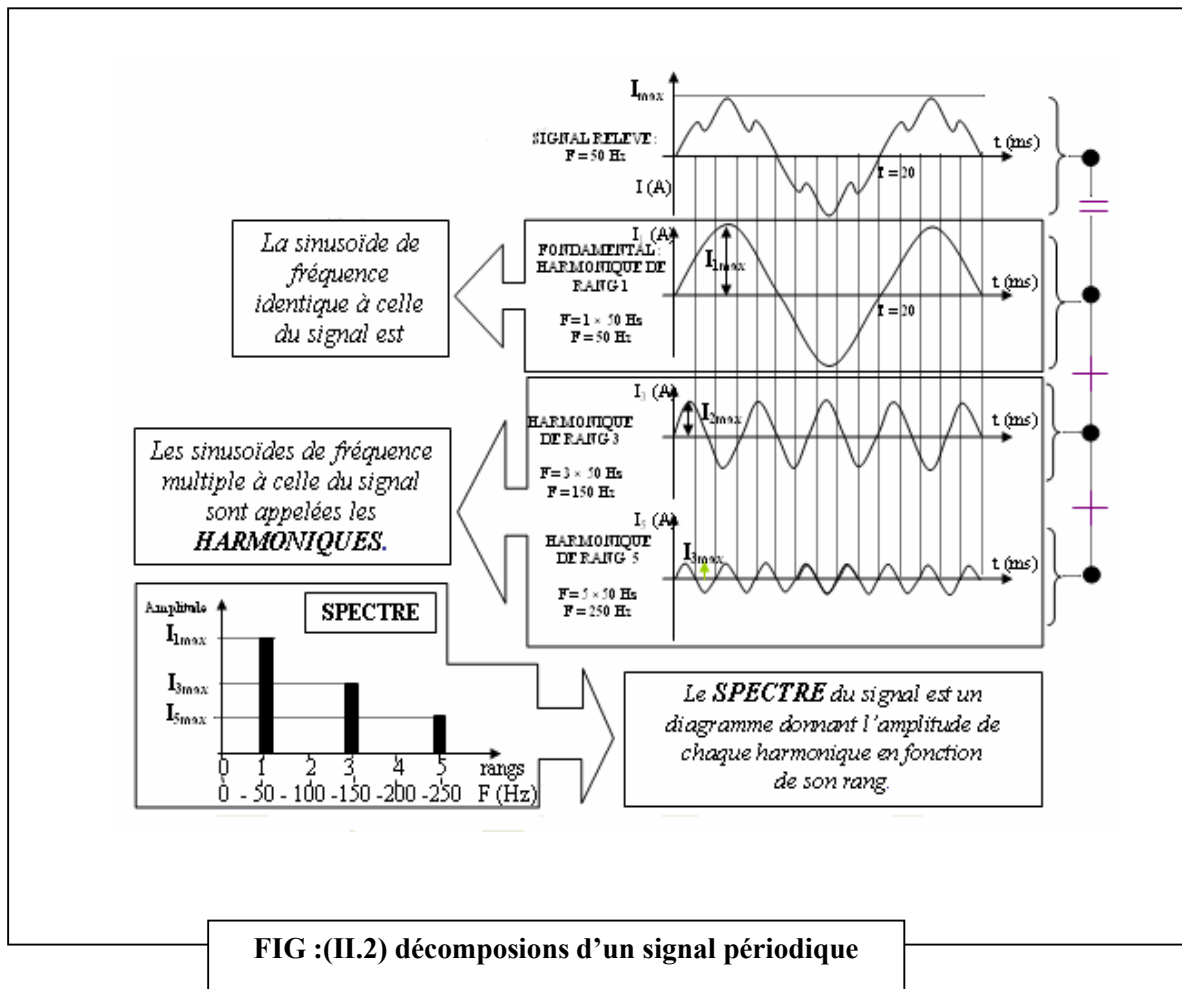


Fig:(II.1.) Un courant harmonique crée par un variateur de vitesse.

Ce signal périodique peut se décomposer en une grandeur continue (si le signal n'est pas alternatif), plus une somme de grandeurs sinusoïdales de fréquences, multiples de celle du signal.



### II .2. b Etude d'une charge polluante (Redresseur à diode triphasé)

Nous utilisons le pont triphasé à diodes alimenté par un système de tension sinusoïdales triphasées, schématisé par la Fig (II.3.):

Les tensions simples des réseaux triphasés équilibrés directs sont :

$$\begin{cases} V_1 = V_m \sin(\omega t - \varphi) \\ V_2 = V_m \sin(\omega t - \varphi - \frac{2\pi}{3}) \\ V_3 = V_m \sin(\omega t - \varphi - \frac{4\pi}{3}) \end{cases} \quad (\text{II.1})$$

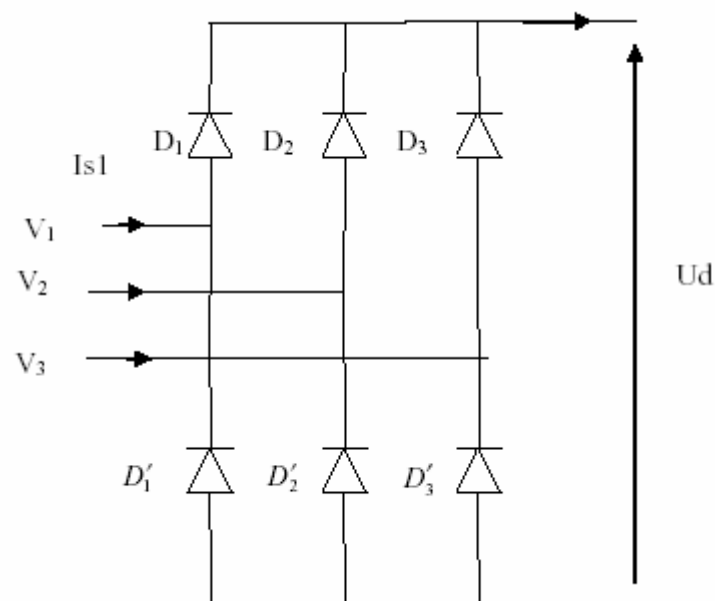


Fig:( II.3.) redresseur à diode triphasé

### II.2.b.1 Etude de la tension redressée

Deux diodes d'un même bras ne peuvent conduire simultanément. Lorsque  $D_1$  conduit, l'une des deux diodes  $D'_2$  et  $D'_3$  conduit également. Il en vient que  $D_1$  conduit lorsque  $V_1$  est supérieur à  $V_2$  et  $V_3$ , ou encore :

$$V_1 = \text{Max}(V_j), j = 1, 2, 3.$$

Le même raisonnement conduit aux conditions suivantes :

$$D_i \text{ Conduit si } V_i = \text{Max}(V_j), i = 1, 2, 3; j = 1, 2, 3$$

$D'_i$  Conduit si  $V_i = \text{Min}(V_j), i = 1, 2, 3; j = 1, 2, 3.$

Pendant chaque séquence de conduction, la tension  $U_d$  à la sortie du redresseur est :

$$U_d = \text{Max}(V_j) - \text{Min}(V_j), j = 1, 2, 3.$$

Pour:  $0 < \alpha < \pi/6$  on a  $V_3 > V_1 > V_2$

$$V_3 \text{ Plus positive} \Rightarrow V_{D_3} > 0 \Rightarrow D_3 \text{ passant}$$

$$\Rightarrow U_d^+ = V_3$$

$V_2$  Plus négative  $\Rightarrow V_{D'_2} > 0 \Rightarrow D'_2$  passant

$$\Rightarrow U_d^- = V_2$$

Donc :  $U_d = \text{Max}(V_i) - \text{Min}(V_i)$

$$U_d = U_d^+ - U_d^- = V_3 - V_2 = U_{32}$$

Pour :  $\pi/6 < \alpha < \pi/2$  on a  $V_1 > V_3 > V_2$

$$V_1 \text{ Plus positive} \Rightarrow D_1 \text{ conduit} \Rightarrow U_d^+ = V_1$$

$$V_2 \text{ Plus négatifs} \Rightarrow D'_2 \text{ conduit } U_d^- = V_2$$

$$U_d = \text{Max}(V_i) - \text{Min}(V_i)$$

Donc :

$$U_d = U_d^+ - U_d^- = V_1 - V_3$$

$$U_d = \max(V_i) - \min(V_i) = U_{13}$$

Pour:  $r/2 < 0 < 5r/6$   $V_1 > V_2 > V_3$

$$U_d^+ = V_1$$

$$U_d^- = V_3$$

$$U_d = \text{Max}(V_i) - \text{Min}(V_i)$$

donc:

$$U_d = U_d^+ - U_d^- = V_1 - V_3 = U_{23}$$

Pour:  $7r/6 < 0 < 9r/6$   $V_2 > V_3 > V_1$   $V_2$  plus positifs  $\Rightarrow D_2$  Conduit  $\Rightarrow U_d^+ = V_2$

$V_1$  plus négatif  $\Rightarrow D_1'$  Conduit  $\Rightarrow U_d^- = V_1$

$$\text{Alors: } U_d = U_d^+ - U_d^- = V_2 - V_1 = U_{21}$$

pour:  $9r/6 < 0 < 11r/6$   $V_3 > V_2 > V_1$

$$U_d^+ = V_3$$

$$U_d^- = V_1$$

$$\text{Donc: } U_d = U_d^+ - U_d^- = V_3 - V_1 = U_{31}$$

Pour:  $11r/6 < 0 < 13r/6$   $V_3 > V_1 > V_2$

Alors:  $V_3$  plus positive  $\Rightarrow D_3$  conduit  $\Rightarrow U_d^+ = V_3$

$V_2$  plus négatif  $\Rightarrow D_2'$  conduit  $\Rightarrow U_d^- = V_2$

$$U_d = \text{Max}(V_i) - \text{Min}(V_i)$$

$$U_d = U_d^+ - U_d^- = V_3 - V_2 = U_{32}$$

**II.2.b.2 La tension redressée:**

$$U_d = \begin{cases} U_{12} \text{ pour } \theta \left[ \frac{\pi}{6} \frac{\pi}{2} \right] \\ U_{13} \text{ pour } \theta \left[ \frac{\pi}{2} \frac{5\pi}{6} \right] \\ U_{23} \text{ pour } \theta \left[ \frac{5\pi}{6} \frac{7\pi}{6} \right] \\ U_{21} \text{ pour } \theta \left[ \frac{7\pi}{6} \frac{9\pi}{6} \right] \\ U_{31} \text{ pour } \theta \left[ \frac{9\pi}{6} \frac{11\pi}{6} \right] \\ U_{32} \text{ pour } \theta \left[ \frac{11\pi}{6} \frac{13\pi}{6} \right] \end{cases}$$

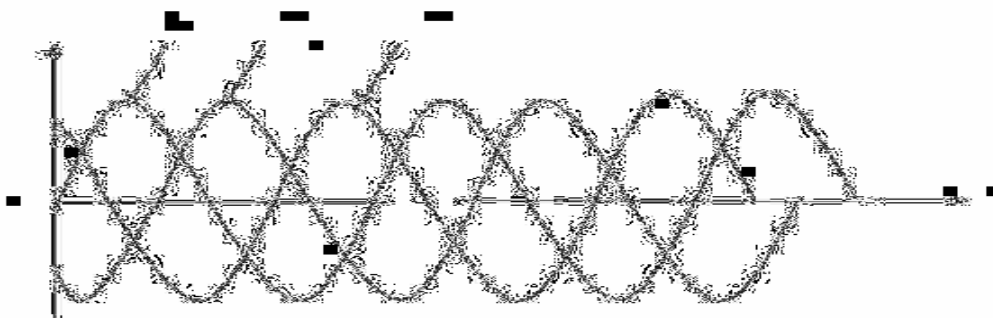
**II.2.b.3 La valeur moyenne de tension redressée:**

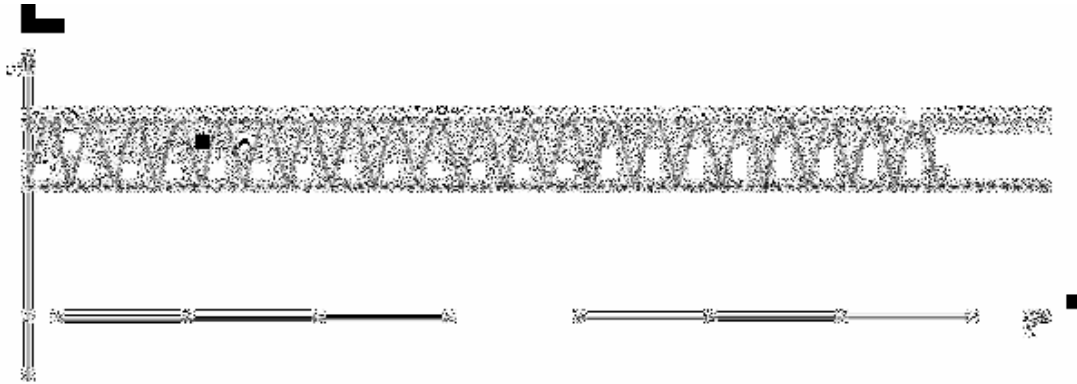
$$\overline{U_d} = \frac{1}{\frac{\pi}{3} - \frac{\pi}{6}} \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{2}} U_{12}(\theta) d\theta = \frac{3}{\pi} \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{2}} (V_1 - V_2) d\theta = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_n$$

Pour q phases:

$$\overline{U_d} = \frac{2q}{\pi} V_m \sin \frac{\pi}{q}$$

Les tensions triphasées à l'entrée et celle à la sortie du redresseur sont représentées par la





#### II.2.b.4 Expression de courant:

$$RI_d + L \frac{dI_d}{dt} = U_d$$

$$I_d(t) = A \exp\left(\frac{-t}{\tau}\right) + \frac{U_d}{R}$$

$$\tau = \frac{L}{R}$$

$$I_d(0) = I_d(\max)$$

$$I_d(\max) = \frac{U_d}{R}$$

#### II.2.b.5 Etude de courant:

Chaque enroulement secondaire est connecté à deux diodes. Il est parcouru par  $I_d$  pendant l'intervalle  $(T/6)$  ou la diode de premier groupe débite, et par  $(-I_d)$  pendant l'intervalle de durée  $(T/6)$  ou c'est celle du second groupe qui conduit.

Donc les courant de ligne  $I_1, I_2, I_3$  fournis par le transformateur sont donnés par la loi de Kirchhoff:

$$I_1 = i_{D1} - i_{D'1} \quad I_2 = i_{D2} - i_{D'2} \quad I_3 = i_{D3} - i_{D'3}$$

Ainsi

$$I_i = +I_d, \text{ quand } D_i \text{ conduit; } i=1, 2, 3$$

$$I_i = -I_d, \text{ quand } D'_i \text{ conduit; } i=1, 2, 3$$

### II.2.b.6 Les courants ont donc pour valeur efficace:

$$(I_{eff})^2 = \frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt$$

$$(I_{eff})^2 = \frac{1}{T} \left( \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{5\pi}{6}} (I_d)^2 dt + \int_{\frac{7\pi}{6}}^{\frac{11\pi}{6}} (I_d)^2 dt \right) \quad \text{---}$$

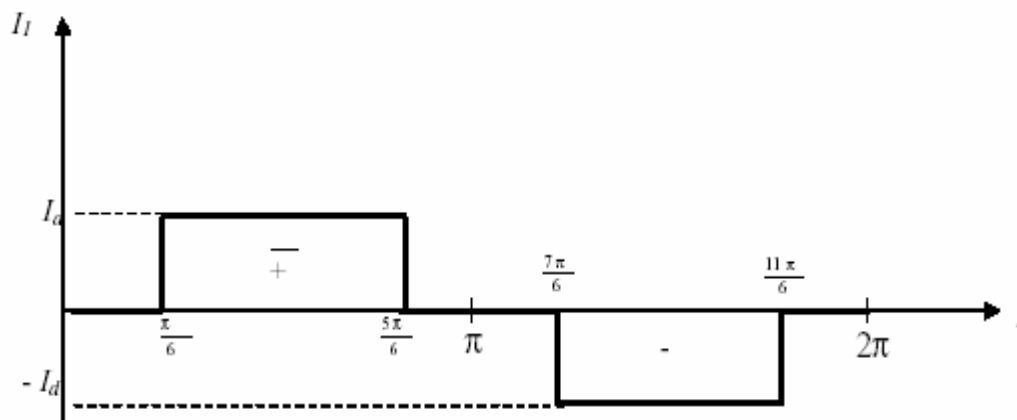
$$(I_{eff})^2 = \frac{1}{2\pi} \left[ I_d^2 \left( \frac{5\pi}{6} - \frac{\pi}{6} \right) + I_d^2 \left( \frac{11\pi}{6} - \frac{7\pi}{6} \right) \right]$$

$$(I_{eff})^2 = \frac{I_d^2}{2\pi} \left[ \frac{4\pi}{6} + \frac{4\pi}{6} \right] = I_d^2 \frac{4}{6}$$

Alors

$$I_{eff} = I_d \sqrt{\frac{2}{3}}$$

Un réseau alimentant un montage redresseur fournit à celui-ci courant presque rectangulaire.



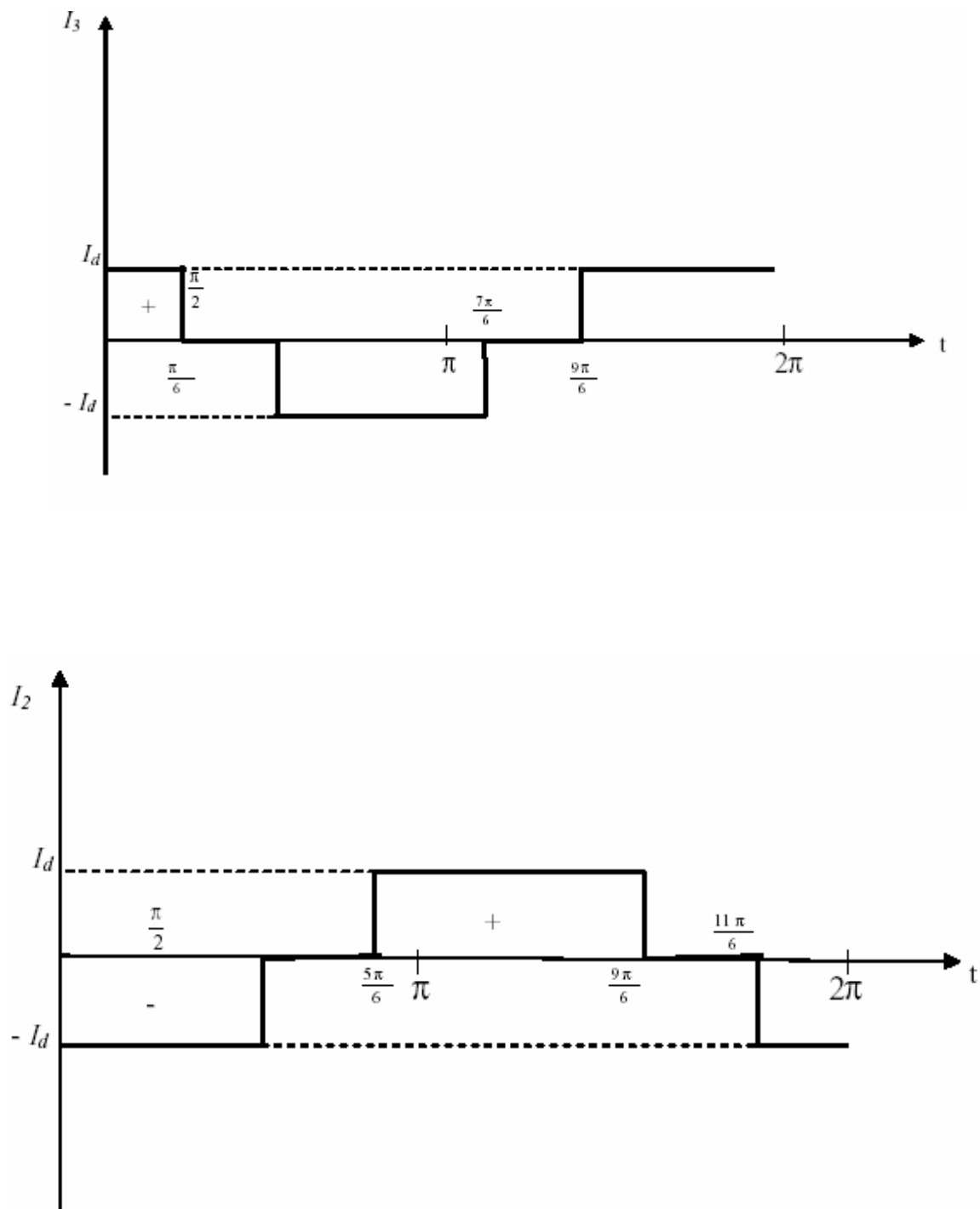


Fig:(II.4.) Courant rectangulaire  $I_3$

En réalité la forme des ondes de courant n'est pas rectangulaire (créneau), mais ont une forme ondulée due à la présence d'une inductance en aval avec le redresseur.

$$I_1 \begin{cases} I_d \cdot \text{si.} \frac{\pi}{6} \leq wt \leq \frac{5\pi}{6} \\ -I_d \cdot \text{si.} \frac{7\pi}{6} \leq wt \leq \frac{11\pi}{6} \\ 0 \text{ ailleurs} \end{cases}$$

### II.3. Développement en série de Fourier (courant harmonique)

Fourier a démontré, que toute fonction périodique  $y(t)$  non sinusoïdale de fréquence ( $F$ ) peut être décomposée en une somme infinie de fonctions périodiques sinusoïdales dont les fréquences sont des multiples de la fréquence fondamentale. Le courant de phase peut être décomposé en une série de Fourier comme suit :

$$I(t) = \frac{a_0}{2} \sum_{n=1}^{n=\infty} (a_n \cos(nwt) + b_n \sin(nwt))$$

Pour les coefficients:

$$\begin{cases} a_0 = \frac{2}{T} \int_0^T I(t) dt \\ a_n = \frac{2}{T} \int_0^T I(t) \cos(nwt) dt \\ b_n = \frac{2}{T} \int_0^T I(t) \sin(nwt) dt \end{cases}$$

Pour  $n = 1$  : correspond au fondamental.

Pour  $n = 2$  : correspond au 2<sup>ème</sup> harmonique.

$n = 3$  : correspond au 3<sup>ème</sup> harmonique.

•

•

•

•

$n = n$  : correspond au n<sup>ème</sup> harmonique.

Pour le cas de courant parfaitement lisse c'est à dire fonctionnement avec une inductance infinie, on aura la décomposition suivante:

### II.3.a Décomposition en série de Fourier pour le pont hexaphé

Donc:  $a_0 = a_n = 0$  puisque ;  $I(t)$  est **impair**

donc  $a_0 = a_n = 0$  puisque ;

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_0^T I(t) dt = \frac{2}{T} \left( \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{5\pi}{6}} I_d d\omega t + \int_{\frac{7\pi}{6}}^{\frac{11\pi}{6}} -I_d d\omega t \right) = \frac{I_d}{3T} (5\pi - \pi - 11\pi + 7\pi) = 0$$

$$\begin{aligned} a_n &= \frac{2}{T} \int_0^T I(t) \cos(n\omega t) dt \\ &= \frac{2I_d}{T} \left( \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{5\pi}{6}} \cos(n\omega t) d\omega t - \int_{\frac{7\pi}{6}}^{\frac{11\pi}{6}} \cos(n\omega t) d\omega t \right) = 0 \end{aligned}$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T I(t) \sin(n\omega t) dt \quad \text{et} \quad T = 2\pi$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T I(t) \sin(n\omega t) dt$$

$$T = 2\pi$$

**Donc:**

$$b_0 = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} i(t) \sin(nwt) dwt$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{5\pi}{6}} I_d \sin(nwt) dwt + \frac{1}{\pi} \int_{\frac{7\pi}{6}}^{\frac{11\pi}{6}} (-I_d) \sin(nwt) dwt$$

Après le calcul on trouve :

$$b_n = \begin{cases} 0.si(n).paire \\ (\frac{4I_d}{n\pi}) \cos(\frac{n\pi}{6}).si(n).impair \\ 0.si(n).multiplede3 \end{cases}$$

**Alors:**

$$n = 1, [5,7], [11,13], [17,19], [23,25].....[6k - 1,6k + 1], \text{ etk} = 1,2,3...$$

$$i(t) = \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{4I_d}{n\pi} \cos(\frac{n\pi}{6}) \sin(nwt)$$

$$i(t) = \frac{4I_d}{\pi} \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{1}{n} \cos(\frac{n\pi}{6}) \sin(nwt)$$

$$i(t) = \sum b_n \sin(wt)$$

**II.3.b Le courant d'entrée du redresseur est donné par la relation suivante**

$$I(t) = 2I_d \frac{\sqrt{3}}{\pi} \left[ \sin(nwt) + \frac{1}{5} \sin(5nwt) + \frac{1}{7} \sin(7nwt) + \frac{1}{11} \sin(11nwt) + \frac{1}{13} \sin(13nwt)..... \right]$$

$$I_{\text{eff}} = I_d \sqrt{\frac{3}{2}}$$

**II.3.c La valeur efficace de courant fondamental:**

$$I_{\text{eff}} = 2I_d \frac{\sqrt{3}}{\pi} \sin(nwt)$$

$$I_{\text{eff}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\int_0^{2\pi} (2I_d \frac{\sqrt{3}}{\pi} \sin(wt))^2 dwt}$$

$$I_{\text{eff}} = I_d \frac{\sqrt{6}}{\pi}$$

**II.3.d La valeur efficace de courant harmonique:**

$$I_{\text{heff}} = I_{\text{ef}} - I_{\text{leff}}$$

$$I_{\text{heff}} = I_d \sqrt{\frac{2}{3}} - I_d \frac{\sqrt{6}}{\pi}$$

$$I_{\text{keff}} = 0.24I_d$$

Exemple sur un redresseur : on utilisant le logiciel matlab, on a réalisé ce Schéma qui représente un redresseur triphasé comme une charge polluante, en étudiant les différentes courbes de tensions et de courants en variant les paramètres de la charge.

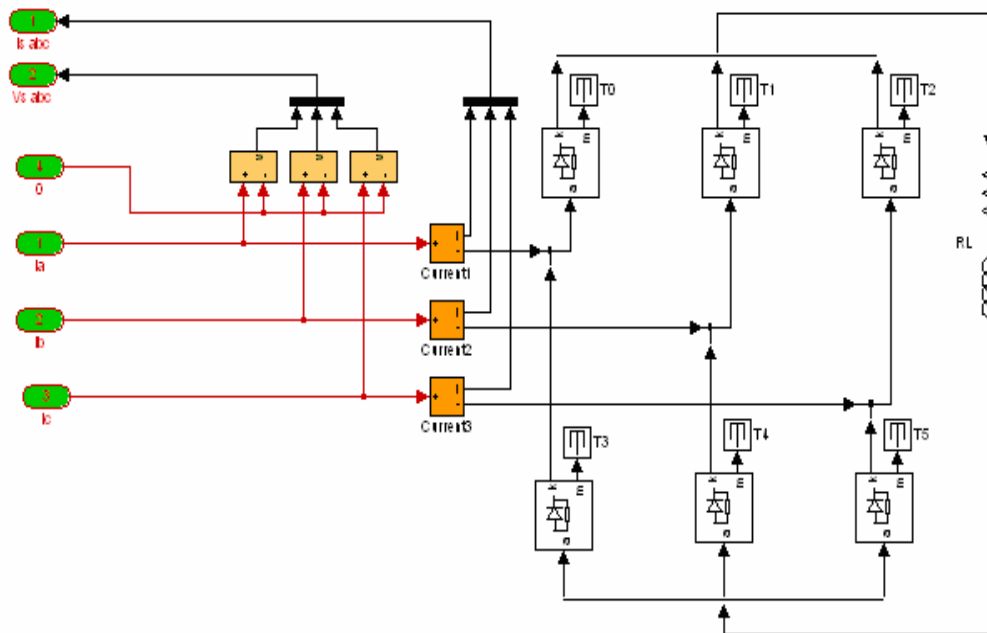


Fig :(II.5) schéma d'un redresseur triphasé

Un système triphasé fourni par le réseau.

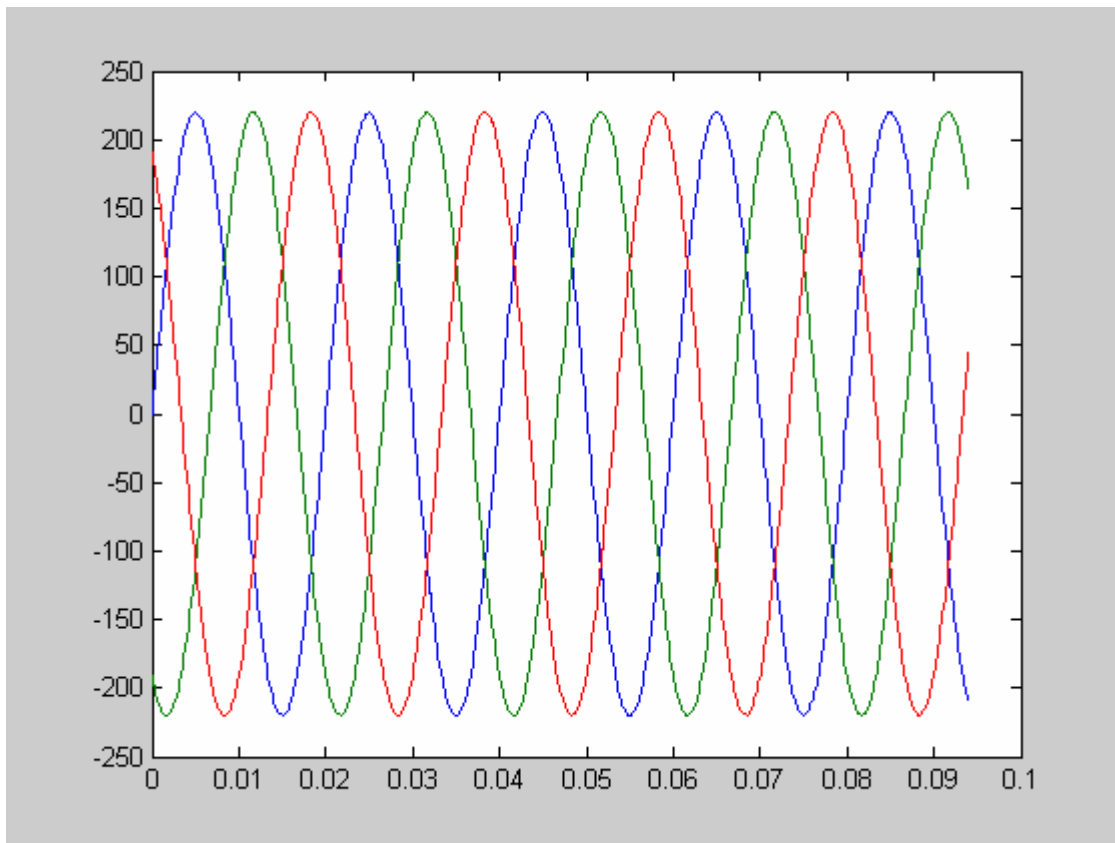


Fig: (II.6.) Le système triphasé

Pour une charge de  $R=18$ ,  $L=155.6 \text{ e-3}$ ,  $C=\text{inf}$

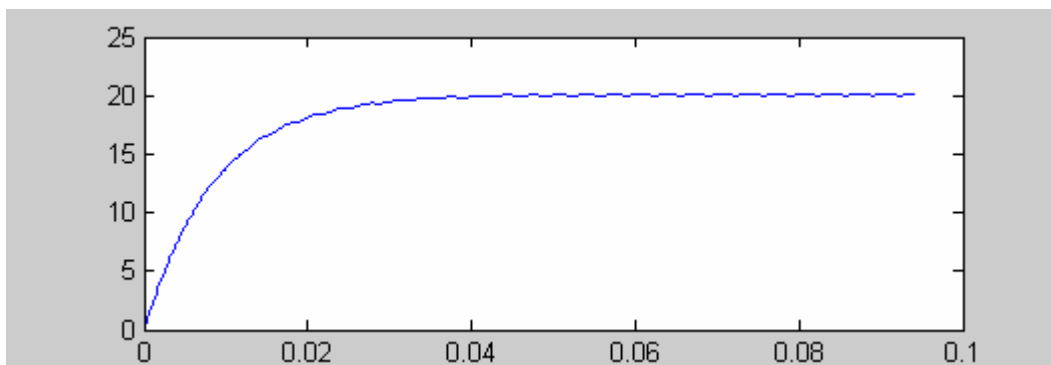


Fig:(II.7.)Courant redressé

Les courants harmoniques des trois phases

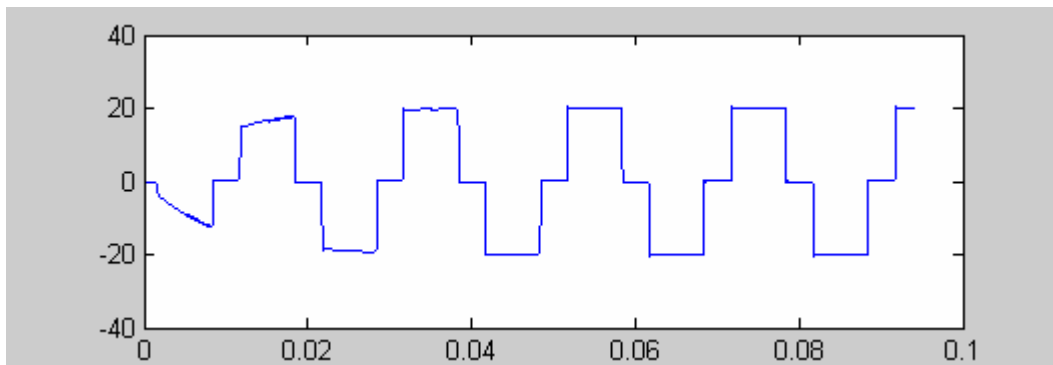


Fig: (II.8.) Courant harmonique de la première phase

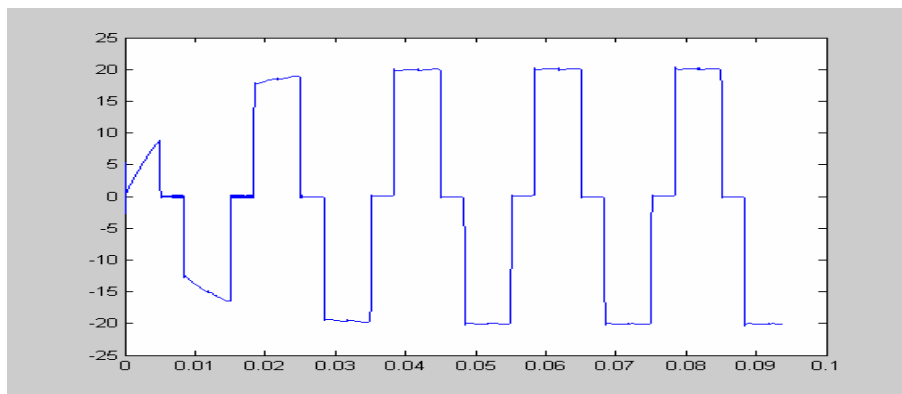


Fig: (II.9.) courant de la deuxième phase

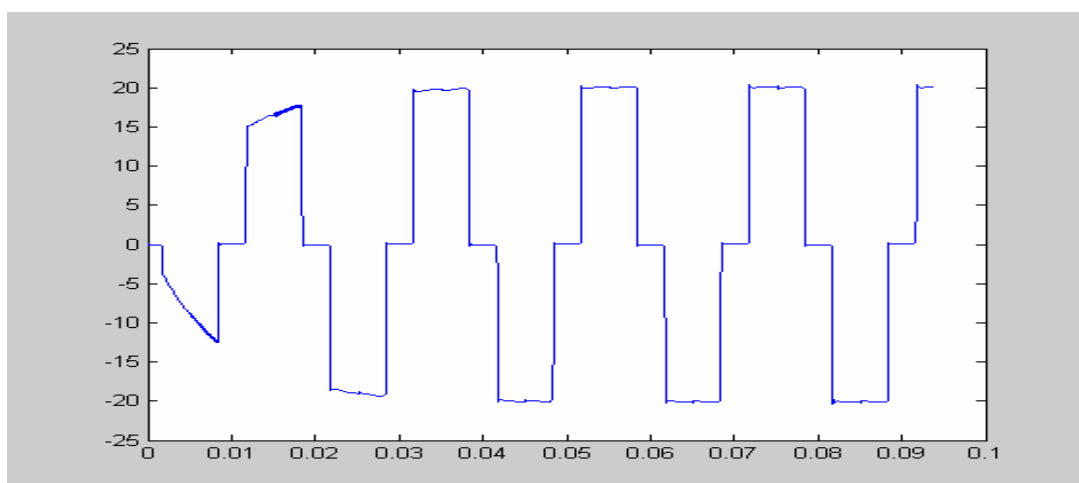


Fig: (II.10.) courant de la troisième phase

Pour une charge de  $R=29$ ,  $L=155.6 \text{ e-}3$ ,  $C=\text{inf}$

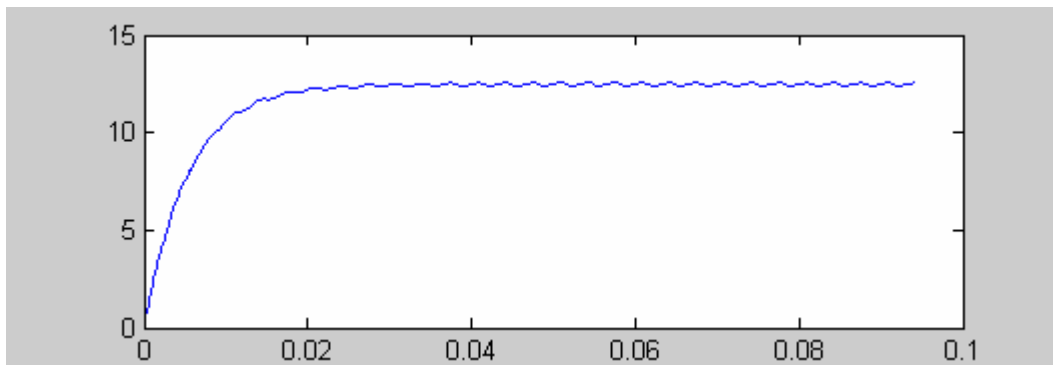


Fig : (II.11.) courant sorti de la deuxième charge

Les courants harmoniques des trois phases

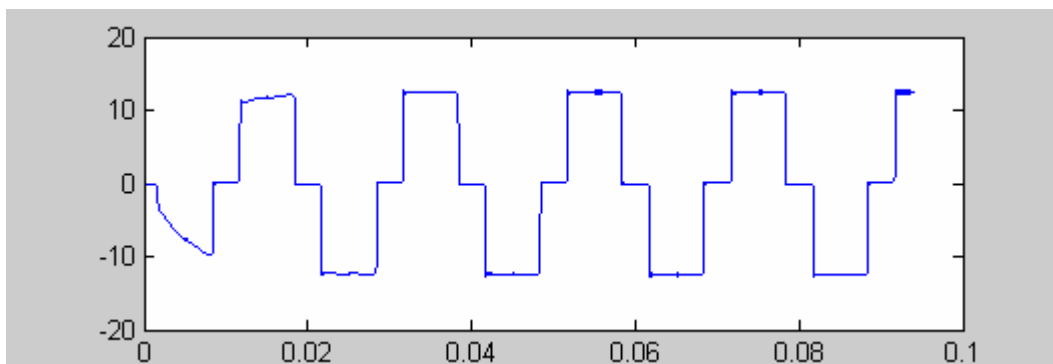


Fig: (II .11.) courant de la première phase

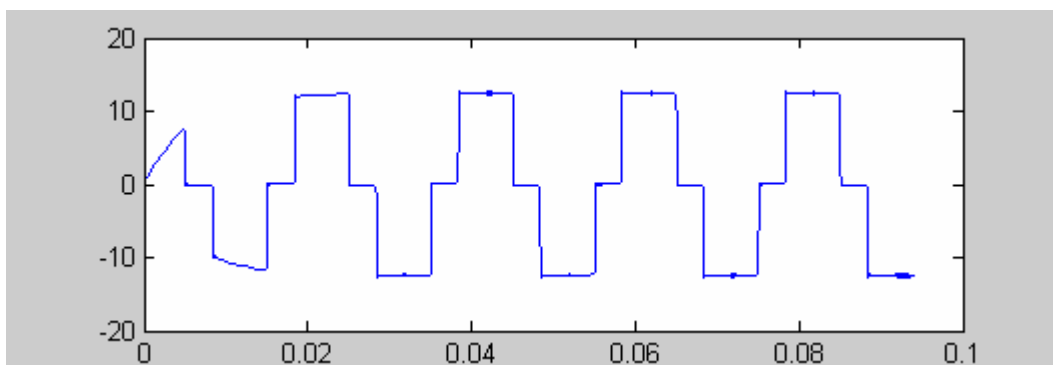


Fig: (II.12.) courant de la deuxième phase

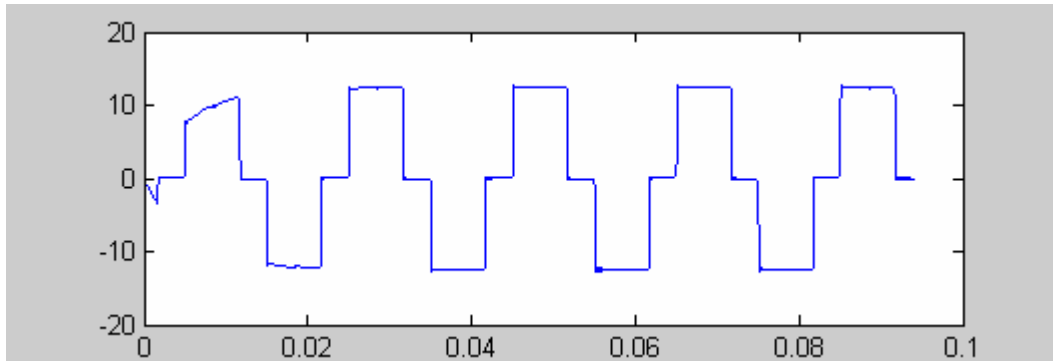


Fig: (II13.) Courant de la troisième phase.

### Conclusion :

Dans ce chapitre nous sommes intéressés aux convertisseurs statiques et plus particulièrement aux redresseurs triphasés, ces derniers sont en partie à l'origine de la pollution harmonique, et on a montré dans ce chapitre les différents courants harmoniques émis par ces charges non linéaires dans le réseau électrique.

**Introduction**

Dans ce chapitre, on va discuter sur l'identification des courants harmoniques ainsi que la commande d'un onduleur avec la simulation d'un filtre actif.

**III.1. La stratégie d'identification**

La stratégie de commande se base sur la détection des courants perturbateurs dans le domaine temporel. Il existe trois possibilités d'identification des courants perturbateurs.

- 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 utilisée pour le filtre actif parallèle pour compenser les courants perturbateurs causés par les charges polluantes. Cette méthode de détection sera employée dans cette étude. [11] [16]

**III.2. La méthode d'identification des courants perturbés**

Les différentes méthodes d'identification du courant perturbateur, peuvent être regroupées en deux familles.

- a) 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.
- b) 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. [17]

Récemment, des nouvelles méthodes d'identification ont été présentées pour donner le choix de compenser un, plusieurs ou voir même tous les types des 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 et ne garantit pas une compensation parfaite de la puissance réactive. [14]

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 travail.

En effet, afin de pouvoir compenser les courants harmoniques, les courants déséquilibrés et la puissance réactive conjointement ou individuellement. [13]

### III.3. Principe de la méthode de la puissance instantanée

La notion de puissance réactive instantanée a été introduite par H.AKAGI afin de déterminer la consigne à donner aux filtrages triphasés. Cette notion, sa signification physique et sa qualité comme critère de filtrage, a donné lieu à des nombreux avantages.

Nous limiterons ici à l'établissement de l'expression la plus usuelle de cette puissance et à la présentation du principe d'élaboration des références des filtres actifs triphasés qui permettent de l'annuler. [12]

La transformation de CLARKE permet d'obtenir un système triphasé de tension ( $V_A, V_B, V_C$ ) ou de courant ( $i_A, i_B, i_C$ ) de somme nulle un vecteur caractérisé par projections ( $v_\alpha$ , et  $v_\beta$ ) ou ( $i_\alpha$  et  $i_\beta$ ) sur deux axes perpendiculaires  $\alpha, \beta$  :

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}$$

Si on coïncide les axes  $\alpha$  et  $\beta$  avec les axes réels et imaginaires du plan complexe, les systèmes triphasés des tensions et des courants s'écrivent :

$$\mathbf{V} = \mathbf{V}_\alpha + \mathbf{J}\mathbf{V}_\beta \text{ et } \mathbf{i} = \mathbf{i}_\alpha + \mathbf{J}\mathbf{i}_\beta$$

On déduit que la puissance apparente complexe :

$$\mathbf{S} = \mathbf{V} \mathbf{I}^t \quad \text{Où : } \mathbf{i}^t \text{ le vecteur transposé de } \mathbf{i} \text{ donc :}$$

$$\mathbf{S} = (\mathbf{V}_\alpha + \mathbf{J}\mathbf{V}_\beta)(\mathbf{i}_\alpha - \mathbf{J}\mathbf{i}_\beta)$$

$$\mathbf{S} = (\mathbf{V}_\alpha \mathbf{i}_\alpha + \mathbf{V}_\beta \mathbf{i}_\beta) + \mathbf{j}(\mathbf{V}_\beta \mathbf{i}_\alpha - \mathbf{V}_\alpha \mathbf{i}_\beta)$$

Par identification avec l'expression :

$$\mathbf{S} = \mathbf{P} + \mathbf{j} \mathbf{q}$$

La puissance active instantanée :

$$\mathbf{P} = (\mathbf{V}_\alpha \mathbf{i}_\alpha + \mathbf{V}_\beta \mathbf{i}_\beta)$$

La puissance réactive instantanée :

$$\mathbf{Q} = \mathbf{j}(\mathbf{V}_\beta \mathbf{i}_\alpha - \mathbf{V}_\alpha \mathbf{i}_\beta)$$

Chacune de ces puissances peut être décomposée en un terme P ou Q correspondant à sa valeur moyenne et un terme  $\tilde{p}$  ou  $\tilde{q}$  correspondent à sa fluctuation.

$$\mathbf{P} = \mathbf{P} + \tilde{p} \quad ; \quad \mathbf{q} = \mathbf{Q} + \tilde{q}$$

- $P$  une puissance continue liée à la composante fondamentale active du courant et de la tension.
- $Q$  une puissance continue liée à la composante 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.

Quand le réseau triphasé alimente une charge et un filtre active, la répartition des différentes puissances permet de définir la fonction de conversion du filtre.

$$S_{\text{réseau}} = S_{\text{charge}} + S_{\text{filtre}}$$

S'écrit :

$$\begin{cases} \mathbf{p}_R = \mathbf{p}_{ch} + \mathbf{p}_F \\ \mathbf{q}_R = \mathbf{q}_{ch} + \mathbf{q}_F \end{cases}$$

Et donc

$$\begin{cases} \mathbf{P}_R = \mathbf{P}_{ch} + \mathbf{P}_F \\ \mathbf{Q}_R = \mathbf{Q}_{ch} + \mathbf{Q}_F \end{cases} \quad \begin{cases} \tilde{\mathbf{p}}_R = \tilde{\mathbf{p}}_{ch} + \tilde{\mathbf{p}}_F \\ \tilde{\mathbf{q}}_R = \tilde{\mathbf{q}}_{ch} + \tilde{\mathbf{q}}_F \end{cases}$$

Si l'on veut que la puissance réactive instantanée  $q_R$  et la puissance active fluctuante  $p_R$  prise au réseau soient nulle le filtre actif devra être tel que

$$\mathbf{q}_R = \mathbf{0} \text{ donc } \mathbf{q}_F = \mathbf{q}_{ch}$$

$$(\nu_{\beta F} i_{\alpha F} - \nu_{\alpha F} i_{\beta F}) = (\nu_{\alpha ch} i_{\beta ch} - \nu_{\beta ch} i_{\alpha ch})$$

$$\tilde{\mathbf{p}}_R = \mathbf{0} \text{ donc: } \tilde{\mathbf{q}}_F = -\tilde{\mathbf{q}}_{ch}$$

$$p_F = P_F + p_F \tilde{\phantom{p}} = P_F + P_{ch} - p_{ch}$$

$$(\nu_{\alpha F} i_{\alpha F} - \nu_{\beta F} i_{\beta F}) = (P_F + P_{ch} - \nu_{\beta ch} i_{\alpha ch} - \nu_{\alpha ch} i_{\beta ch})$$

Les consignes  $\nu_{\alpha F}$ ,  $\nu_{\beta F}$ ,  $i_{\alpha F}$ ,  $i_{\beta F}$ , sur les tensions et les courants de sortie du filtre active s'obtiennent donc à partir de  $P_F$ ,  $P_{ch}$ ,  $\nu_{\alpha ch}$ ,  $\nu_{\beta ch}$ ,  $i_{\alpha ch}$ ,  $i_{\beta ch}$

Ainsi dans le cas d'un filtre actif parallèle, si les tensions du réseau sont aussi celles aux bornes du filtre de la charge, on a

$$P_F = v_{\alpha F} i_{\alpha F} + v_{\beta F} i_{\beta F} = P_F + P_{ch} - p_{ch}$$

$$q_F = v_{\beta} i_{\alpha F} - v_{\alpha F} i_{\beta F} = q_{ch}$$

D'où :

$$i_{\alpha F} = \frac{P_F + P_{ch} - p_{ch} - q_{ch} \left\{ \frac{v_{\beta}}{v_{\alpha}} \right\}}{v_{\alpha} \left[ 1 + \left( \frac{v_{\beta}}{v_{\alpha}} \right)^2 \right]}$$

$$i_{\beta F} = \frac{P_F + P_{ch} - p_{ch} - q_{ch} \left\{ \frac{v_{\alpha}}{v_{\beta}} \right\}}{v_{\alpha} \left[ 1 + \left( \frac{v_{\alpha}}{v_{\beta}} \right)^2 \right]}$$

On peut aussi calculer le courant à partir de la forme matricielle du courant suivant

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v_{\alpha} & v_{-\beta} \\ v_{\beta} & v_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v_{\alpha} & v_{-\beta} \\ v_{\beta} & v_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \overline{Q} \end{bmatrix} + \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v_{\alpha} & v_{-\beta} \\ v_{\beta} & v_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix}$$

Courant actif

courant réactif

courant harmonique.

Avec

$=v+v$

$$\Delta = v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2$$

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 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 inverse de **CLARKE**.

### III.4. Schéma de principe de la méthode d'identification

Finalement, l'algorithme d'identification que nous avons défini peut être représenté par le schéma de la Fig (III.4.)

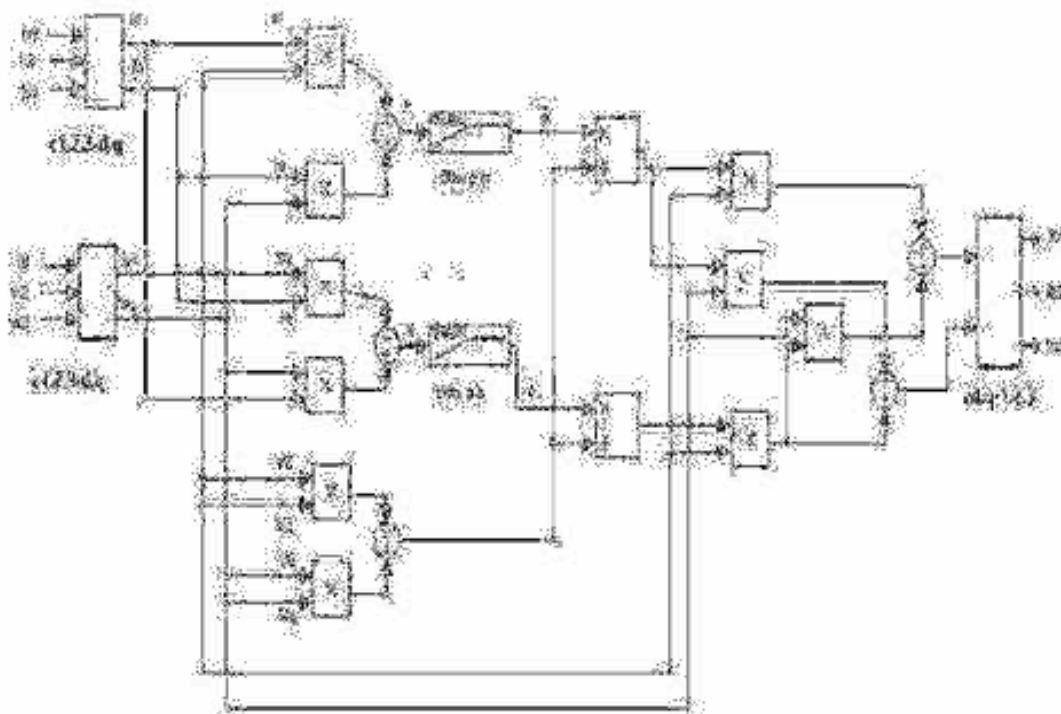


Fig (III.4.) : Schéma du courant identifié

On a appliqué la méthode d'identification des courants harmoniques sur notre redresseur, dont on vient d'étudier et on a pu avoir des courbes de courant harmonique identifié pour chaque phase.

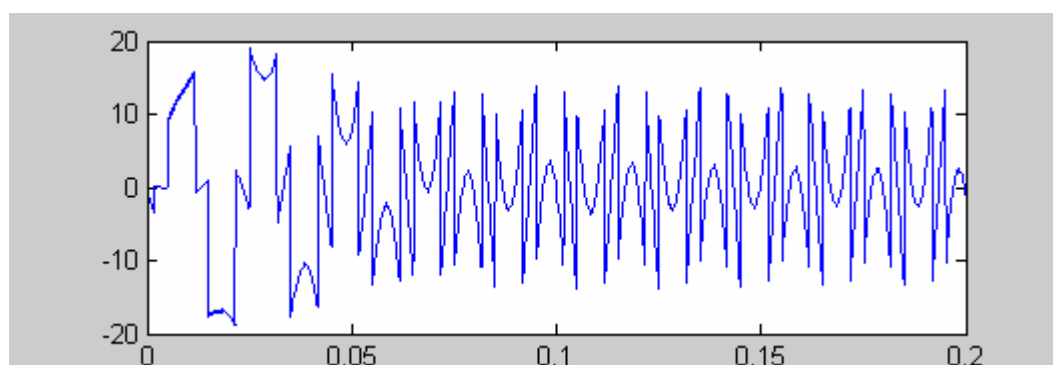
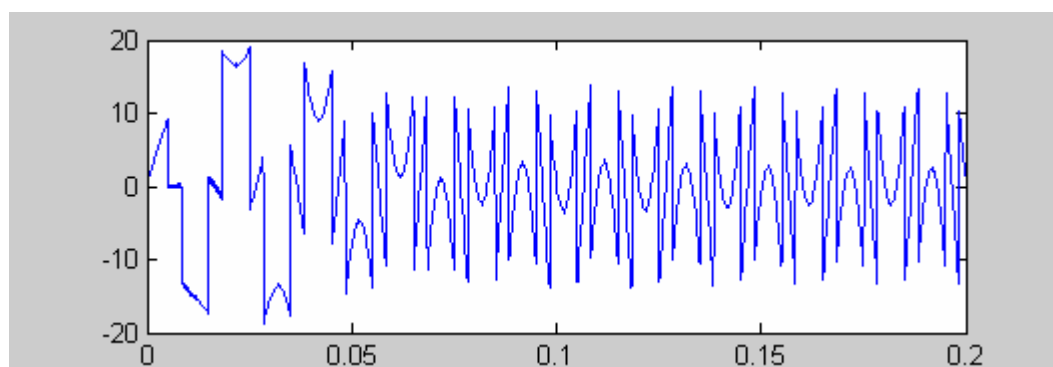
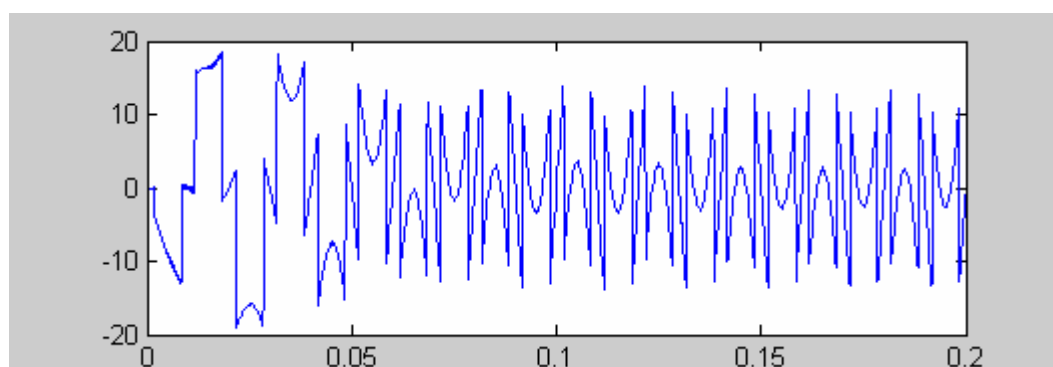


Fig:(III.4.a) Courant identifié de la première phase



**Fig: (III.4.b) Courant identifiant de la deuxième phase**



**Fig: (III.4.c) Courant identifiant de la troisième phase**

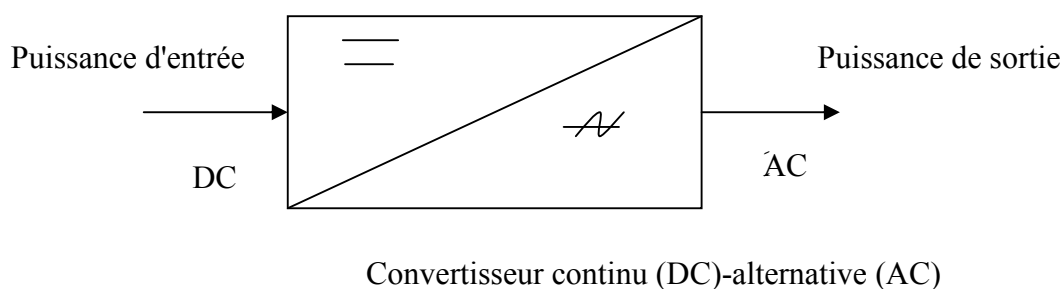
Après avoir utiliser la méthode d'identification des courants harmoniques, on a passé pour la commande du filtre actif, pour cela il nous faut une idée générale sur le principe de fonctionnement de l'onduleur et plus particulièrement sur l'onduleur MLI.

Dans ce chapitre, on va présenter la modélisation, respectivement, d'onduleur de tension triphasé. Grâce aux progrès récents dans la technologie des composants de puissance à semi-conducteur, notamment l'IGBT et l'IGCT , les onduleurs de tension à modélisation de largeur d'impulsion MLI constituent désormais la configuration standard dans la commande des moteurs à courant alternatif de faible et de moyenne puissances.

### Définition

Un onduleur est un convertisseur statique assurant le convertisseur continu - alternatif, alimenté en continu, il modifie la façon périodique, les connections entre l'entrée et la sortie et permet l'obtention d'alternatif à la sortie.

### III.4.A Schéma symbolique de l'onduleur



**Fig: (III.4.A) schéma de principe de l'onduleur**

### III.4.B Propriété de l'onduleur

Un onduleur autonome dépend essentiellement de la nature du générateur et de récepteur entre les quels il est monté.

Cela conduit rite à distinguer:

- Les onduleurs de tension alimentés par une source de tension continue.
- Les onduleurs de courant alimenté par une source de courant continue.

La nature de la source est définie au point de vu des commutations. La nature de la source de tension continue imposée celle du récepteur de courant alternatif.un onduleur de courant alimente un récepteur de tension. [19]

### III.4.C.Domaine d'utilisation

Les onduleurs de tension à fréquence fixe sont utilisés, par exemple, pour réaliser des alimentations des sécurités, on s'efforce alors de maintenir la tension de sortie constante, quelle que soit la charge. Les onduleurs des tensions à fréquence variable servent à réaliser des entraînements à vitesse variable avec moteur à courant alternatif.

#### III.4.C.1 Principe générale de fonctionnement

Il existe trois types d'onduleurs monophasés.

- 1) L'onduleur avec transformateur de sortie à point milieu (souvent appelé push-pull),
- 2) L'onduleur avec diviseur capacitif à l'entrée (souvent appelé onduleur en demi-pont).
- 3) L'onduleur en pont (ou en pont complet). Les deux premiers ne nécessitent que deux -

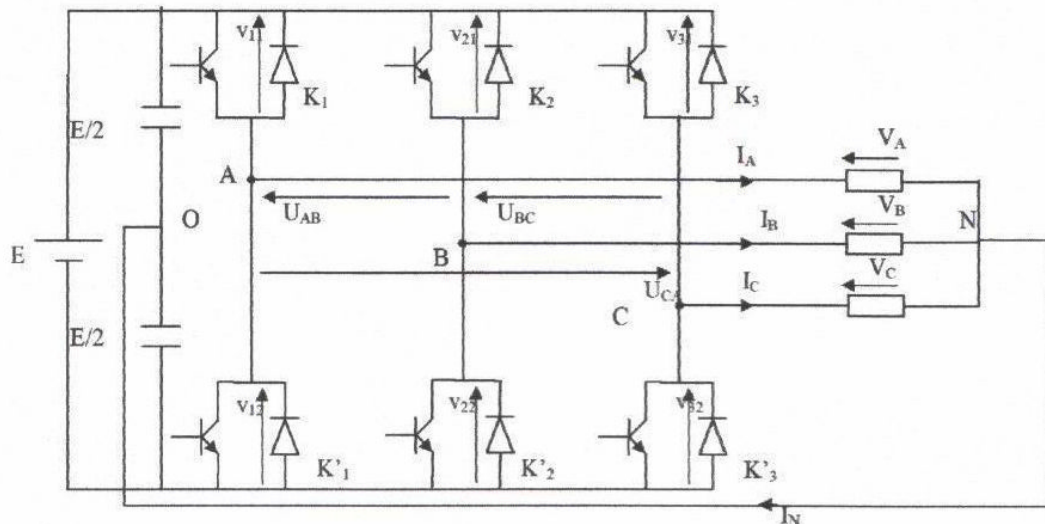
interrupteurs mais il faut existe un point milieu, soit du cote de l'entrée continue, soit du cote de la sortie alternative, l'onduleur en pont complet nécessite quatre interrupteurs,[19]

### III.4.C.2 Structure de l'onduleur de tension:

On peut réaliser un onduleur triphasé en groupant trois onduleurs monophasés de l'un ou l'autre, il suffit de déclarer d'un tiers de période les commandes des trois phases.

La Fig(III.4.C.2) représente un onduleur triphasé formé de trois demi-ponts monophasé et utilisent un diviseur capacitif commun. Chacune des tensions de sortie est égale tantôt à  $(+U/2)$ , tantôt à  $(-U/2)$ . Les interruptions fonctionnent comme en monophasé, la seule différence est que le courant arrivant au point milieu du diviseur est  $I_n$  telle que.

$$I_n = I_a + I_b + I_c$$



**Fig:(III.4.C.2) Onduleur de tension triphasé à créneau par alternance.**

La présence de neutre relie à la source est indispensable si le récepteur est déséquilibrée tout particulièrement s'il comporte des charges monophasées montées entre phase et neutre.

Si le récepteur triphasé et équilibré (moteur triphasé par exemple), on peut supprimer la liaison entre le point neutre 'N' de la charge et le point milieu 'O' du diviseur capacitif, donc supprimer celui-ci on obtient alors l'onduleur de tension en pont triphasé .

### III.4.D Modèle de commande de l'onduleur de tension

Les interrupteurs  $K_1$  et  $K_1$ ,  $K_2$  et  $K_2$ ,  $K_3$  et  $K_3$  doivent être complémentaires deux à deux, quelque soit la loi de commande à adopter, il est possible d'établir des relations générales que nous utiliserons la commande MLI quels que soient les courants, les interrupteurs imposent les tensions entre les bornes de sortie A, B, C et le point milieu (fictif) 'o' de la source de tension.

$$V_A - V_O = E/2 \Rightarrow K_1 \text{ fermé, } -E/2 \Rightarrow K_1 \text{ ouvert}$$

$$V_B - V_O = E/2 \Rightarrow K_2 \text{ fermé, } -E/2 \Rightarrow K_2 \text{ ouvert}$$

$$V_C - V_O = E/2 \Rightarrow K_3 \text{ fermé, } -E/2 \Rightarrow K_3 \text{ ouvert}$$

Les interrupteurs imposent donc les tensions composées à la sortie et de l'onduleur ainsi pour la première de ces tensions.

$$V_A - V_B = (V_A - V_O) - (V_B - V_O) = E \quad \text{Si } K_1 \text{ fermé et } K_2 \text{ ouvert}$$

$$V_A - V_B = (V_A - V_O) - (V_B - V_O) = 0 \quad \text{Si } K_1 \text{ et } K_2 \text{ fermés}$$

$$V_A - V_B = (V_A - V_O) - (V_B - V_O) = -E \quad \text{Si } K_1 \text{ ouvert et } K_2 \text{ fermé}$$

$$V_A - V_B = (V_A - V_O) - (V_B - V_O) = 0 \quad \text{Si } K_1 \text{ et } K_2 \text{ ouverts}$$

Son point neutre étant isolé, si le récepteur est équilibré on peut passer des tensions composées aux tensions simples  $V_A$ ,  $V_B$ ,  $V_C$  à la sortie de l'onduleur.

Pour que, quelques soient leurs formes des ondes, les trois courants  $I_a$ ,  $I_b$ ,  $I_c$ , aient une somme nulle, il faut que les trois fondamentaux aient une somme nulle et qu'il en soit de même pour les divers harmoniques. Si le récepteur est équilibré, ces trois phases présentent la même impédance pour le fondamental ainsi que pour les divers harmoniques, les produits impédances 'Z' courant c'est-à-dire les tensions ont une somme nulle pour les fondamentaux, ainsi que les systèmes harmoniques successifs, on ajoutant toutes ces sommes on obtient la somme nulle des trois tensions.

$$p_{V_c} = 1/3(V_c - V_A) - 1/3(V_b - V_C)$$

A cause de l'équilibre du récepteur:

$$1/3(V_A - V_b) - 1/3(V_c - V_A) = 2/3 V_A - 1/3 V_b - 1/3 V_c = V_A - 1/3(V_A + V_B + V_c) = V_A$$

$$\text{Et } V_A = 1/3(V_A - V_B) - 1/3(V_c - V_A) \text{ Et de même: } V_B = 1/3(V_B - V_C) - 1/3(V_A - V_B)$$

$$\frac{1}{3}(V_A - V_b) - \frac{1}{3}(V_c - V_A) = \frac{2}{3}V_A - \frac{1}{3}V_b - \frac{1}{3}V_c$$

$$= V_A - \frac{1}{3} \cdot (V_A + V_B + V_C) = V_A$$

Et

$$V_A = \frac{1}{3}(V_A - V_B) - \frac{1}{3}(V_C - V_A)$$

Et de même

$$V_B = \frac{1}{3}(V_B - V_C) - \frac{1}{3}(V_A - V_B)$$

On obtient finalement:

$$V_A = \frac{1}{3} \cdot [2 \cdot (V_A - V_0) - (V_B - V_0) - (V_C - V_0)]$$

$$V_B = \frac{1}{3} \cdot [-(V_A - V_0) + 2 \cdot (V_B - V_0) - (V_C - V_0)]$$

$$V_C = \frac{1}{3} \cdot [-(V_A - V_0) - (V_B - V_0) + 2 \cdot (V_C - V_0)]$$

Si  $V_{A0}$ ,  $V_{B0}$  et  $V_{C0}$  sont les tensions d'entrée de l'onduleur (valeurs continues), alors  $V_A$ ,  $V_B$  et  $V_C$  sont les tensions de sorties de cet onduleur (valeurs alternatives). Par conséquent, l'onduleur de tension peut être modélisé par une matrice  $[T]$  assurant le passage continu alternatif (*DC-AC*).

Alors:  $[V_{AC}] = [T] \cdot [V_{DC}]$

Avec :

$[V_{AC}] = [V_A \ V_B \ V_C]$  : Tensions alternatives équilibrées.

$[V_{DC}] = [V_{A0} \ V_{B0} \ V_{C0}]$  : Tensions continues. **S1= ou (exclusif) i=1, 2, 3 (commutation supposée idéale).  $[T]=1/3$**

$$S_i = \begin{cases} 1 \\ \text{ou (exclusif)} \quad i = 1, 2, 3 \text{ (commutation supposée idéale).} \\ 0 \end{cases}$$

$$[T] = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix}$$

Ainsi l'onduleur est modélisé par, cette matrice de transfert [T].

### III.4.E Stratégie de commande des onduleurs

#### Introduction

Les onduleurs de tension peuvent être pilotés suivant plusieurs stratégies. A faible fréquence, ils sont pilotés en pleine onde, le signal de commande sera à la fréquence de la tension désirée à la sortie, et la source continue doit être réglable (à l'aide d'un redresseur à thyristor ou d'un hacheur). A fréquence élevée, ils sont pilotés en modulation de largeur d'impulsion. Cette dernière stratégie permet de régler à la fois l'amplitude et la fréquence en gardant la source continue constante (pont à diode. [18])

A fin de produire une tension de sortie proche de la sinusoïde, différentes stratégies de commande ont été proposées par des différents auteurs pour l'onduleur de tension.

1. Commande à pleine onde;
2. Commande avec MLI;
3. Commande par bande à hystérésis.

Nous étudions la stratégie de commande **MLI** :

### III.5. LA COMMANDE MLI

La modalisation de largeur d'impulsion triangulo-sinusoidal est réalisée par la comparaison d'une onde modulée basse fréquence (tension de référence dans notre cas courant harmonique identifiée par la méthode de puissance instantanée), avec une onde porteuse haute fréquence de forme triangulaire.

Les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersection entre la porteuse et la modulante, la fréquence de commutation des interrupteurs est fixée par la porteuse.

En triphasé, 3 références sinusoïdales déphasées de  $\frac{2\pi}{3}$  à la même fréquence comme

A la sortie de l'onduleur, la tension n'est pas purement sinusoïdale, l'intensité du courant ne le soit pas aussi, donc elle comporte des harmoniques, seules responsables de parasites ce qui engendre des pertes supplémentaires.

Cette MLI sert à remédier à ces problèmes et elle a les avantages suivantes

- 1)-variation de la fréquence de la tension de la sortie,

- 2)-élimination de certaines harmoniques de tension ,
- 3)-elle repousse les harmoniques vers des fréquences,

### La porteuse

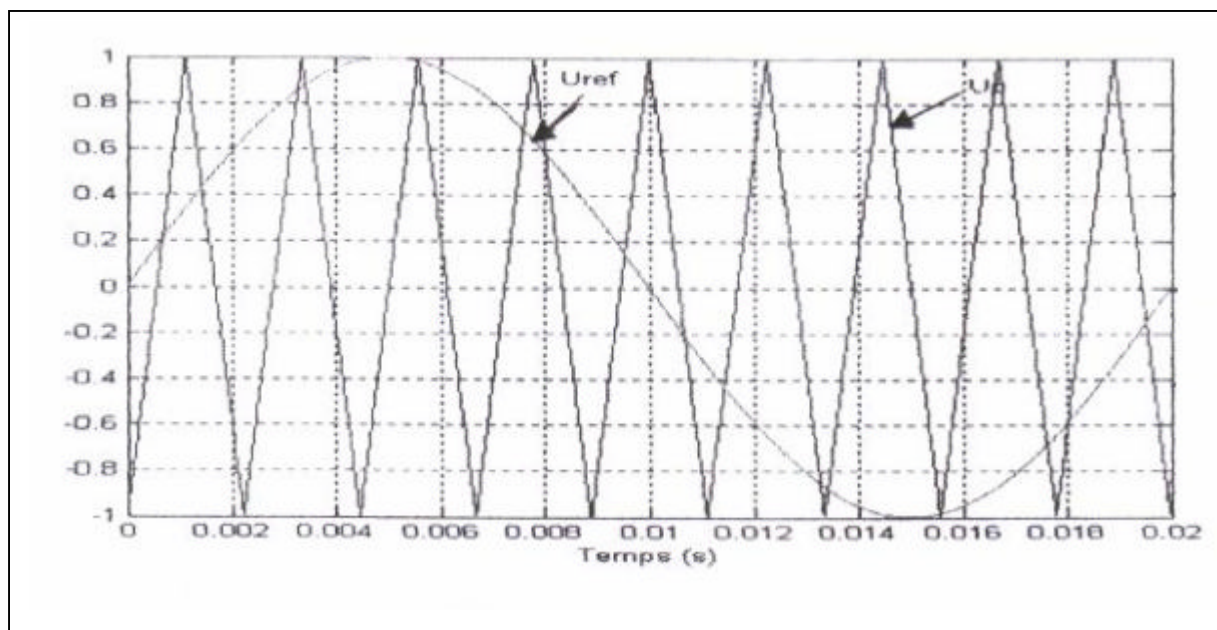


Fig: (III.5.) principe de la commande MLI

### Propriétés

Pour optimiser la MLI, on utilise deux paramètres caractérisant cette commande :

**m** : l'indice de modulation, c'est le rapport de la fréquence de la porteuse  $f_p$  sur celle du référence  $f_{ref}$ .

$$\left[ m = f_p / f_{ref} = T_{ref} / T_p \right]$$

**r** : le taux de la modulation (le coefficient de réglage en tension), c'est le rapport des amplitudes de tension de la référence  $V_{mref}$  sur celle de la porteuse  $V_{mp}$ .

$$\left[ r = V_{mref} / V_{mp} \right]$$

Généralement on préfère l'onduleur de tension en tant que filtre actif de puissance parallèle parce qu'il présente de faibles puissances du côté continu et pour son le

filtre actif de puissance analysée dans ce chapitre sont basées sur l'onduleur de tension à MLI connecté au réseau.

### **III.5.a Principe du filtre actif parallèle**

Connectés sur un réseau alimentant des charges polluantes, ces structures ont pour vocation, dans une configuration parallèle. Élimine de façon active, tout ou partie des harmoniques de courant harmonique. [10]

La Fig (III.6.) : montre la structure de filtre actif parallèle réalisé à partir d'un onduleur de tension. Selon le mode de commande retenu, on pourra traiter uniquement les composantes harmoniques et/ou la puissance réactive.

Dans ce travail, l'onduleur traite seulement la compensation harmonique. Il doit donc absorber des courants compensant les harmoniques créent par le récepteur polluant.

La particularité de ce montage est que l'onduleur de tension possède une source continue flottante constituée par un condensateur. La tension ( $e_{dc}$ ) de cette source doit obligatoirement être régulée et l'on est amené à munir le filtre d'une boucle de tension.

Les éventuelles variations de ( $e_{dc}$ ) provoquent l'apparition de courant filtré dans le filtre permettant d'injecter ou de prélever de l'énergie dans le condensateur  $c_{dc}$ , pour contrôler l'état de charge. A l'équilibre, seul la consigne harmonique est présente. L'utilisation des onduleurs dans ces applications de filtrage actif suppose l'emploi de fréquences de découpage très supérieures harmonique que l'on veut éliminer.

Le développement et la commercialisation d'un filtre actif sont liés à son prix de revient et son encombrement. Il apparaît donc important, désormais, d'étudier le dimensionnement des filtres actifs et plus particulièrement le dimensionnement des éléments

III.5.b Simulation du filtre actif

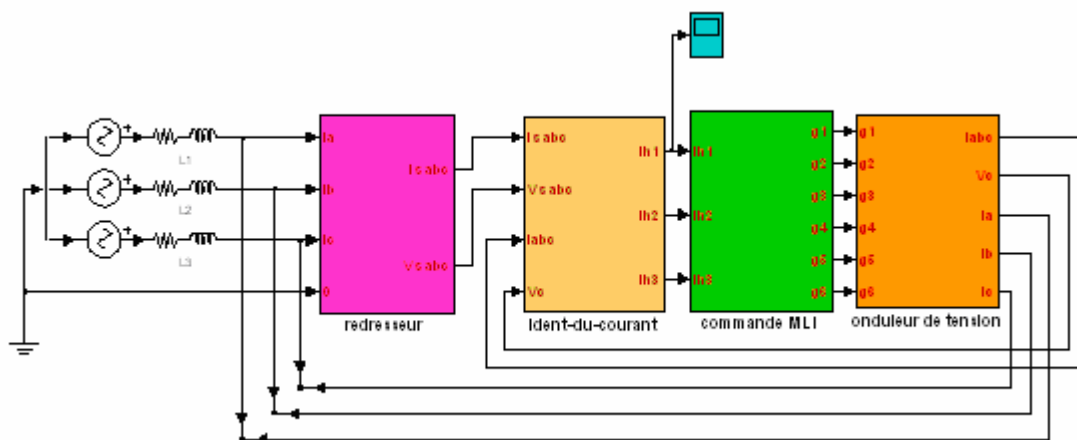


Fig (III.6.) structure générale du filtre actif.

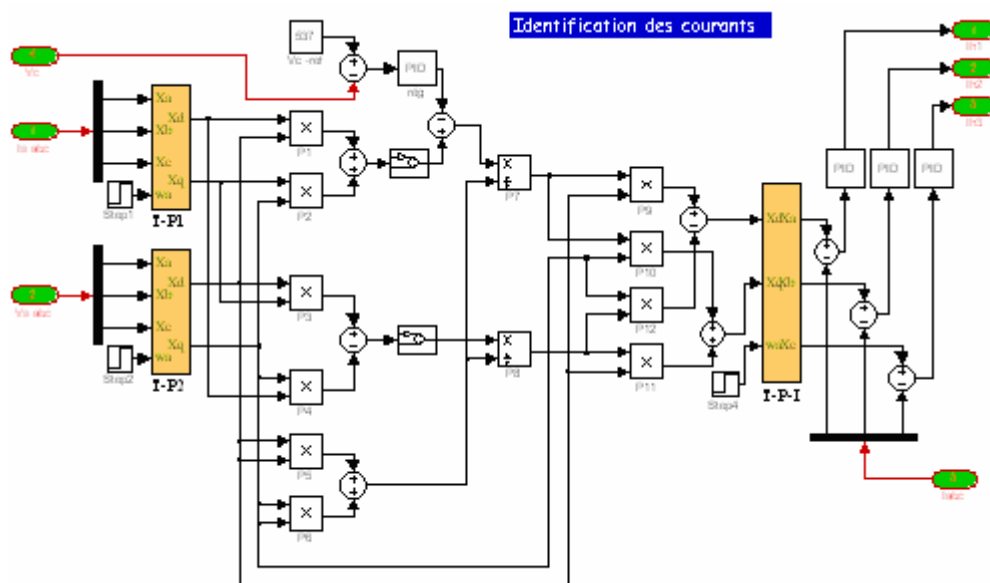


Fig (III.7.) Onduleur de courant.

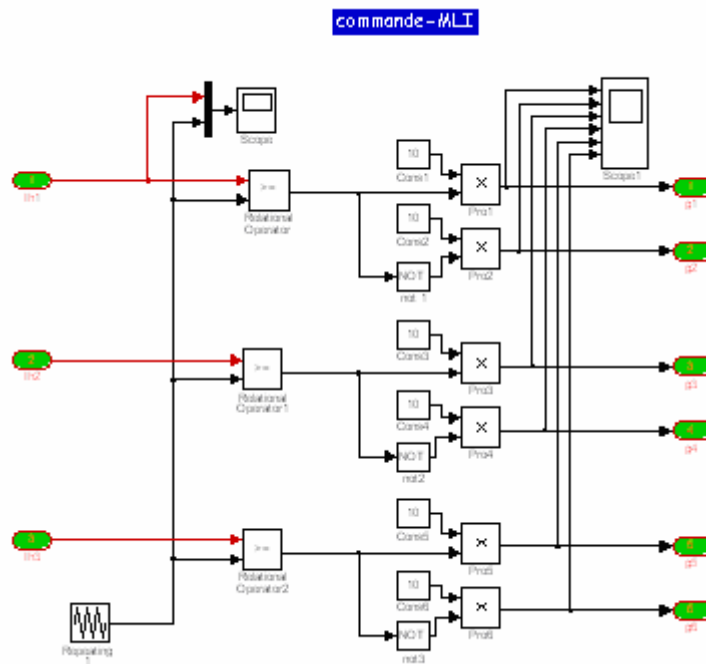


Fig (III.8.) Onduleur MLI.

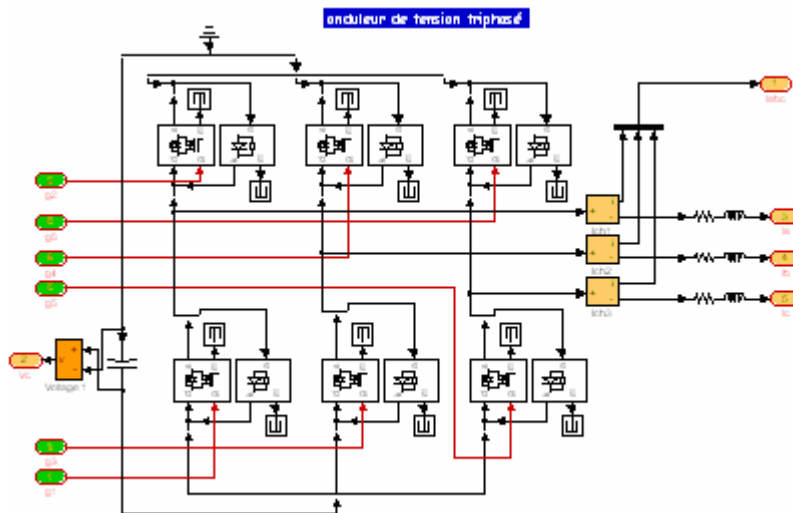
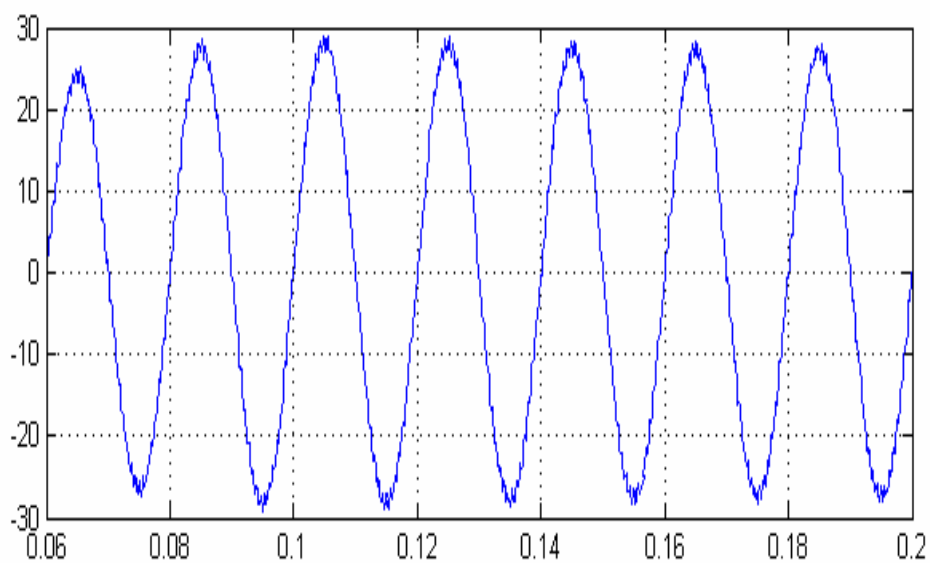
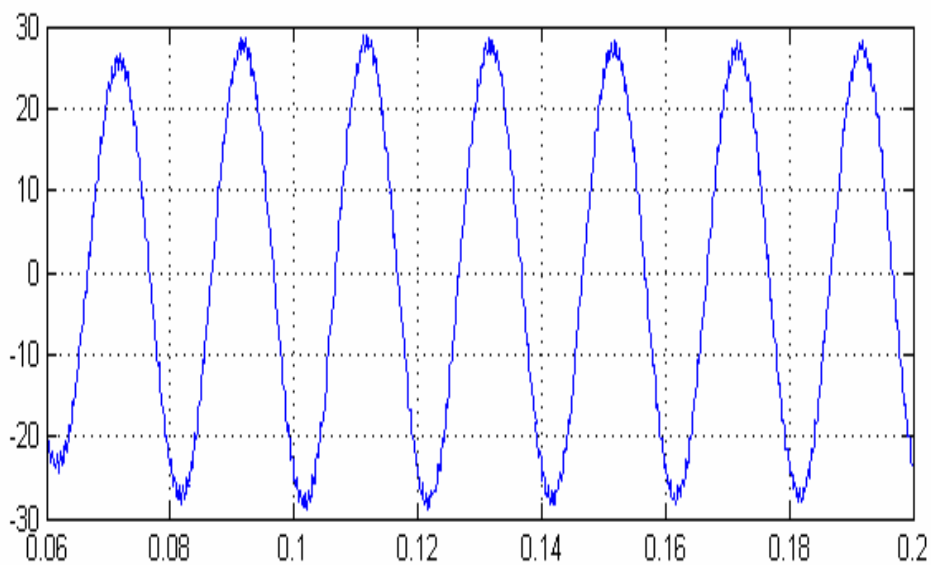
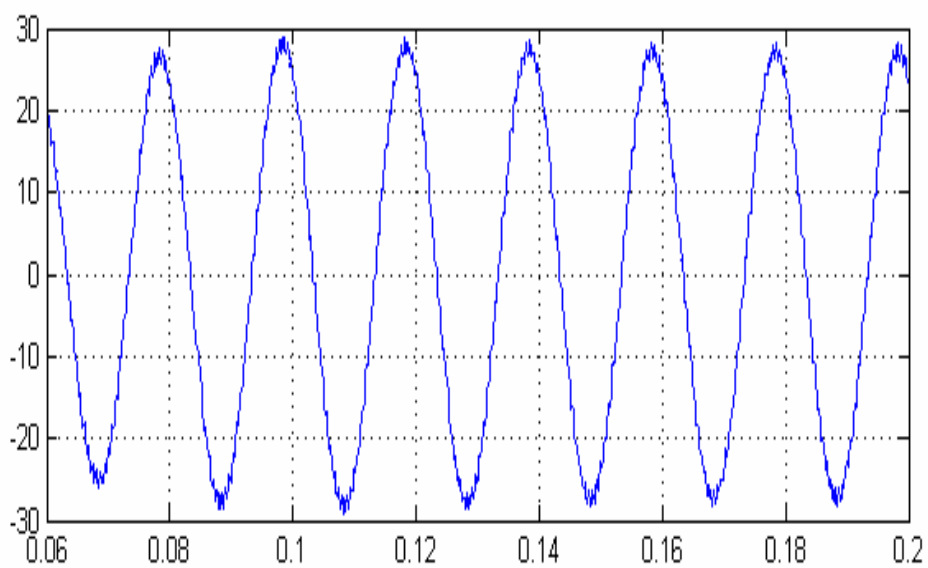


Fig (III.9.) onduleur de tension

## III.5.c Résultat de simulation

Fig(III.10.) : Courant final du filtrage  $I_L(1)$ .Fig(III.11.) : Courant final du filtrage  $I_L(2)$ .



Fig(III.12.) : Courant final du filtrage  $I_L(3)$ .

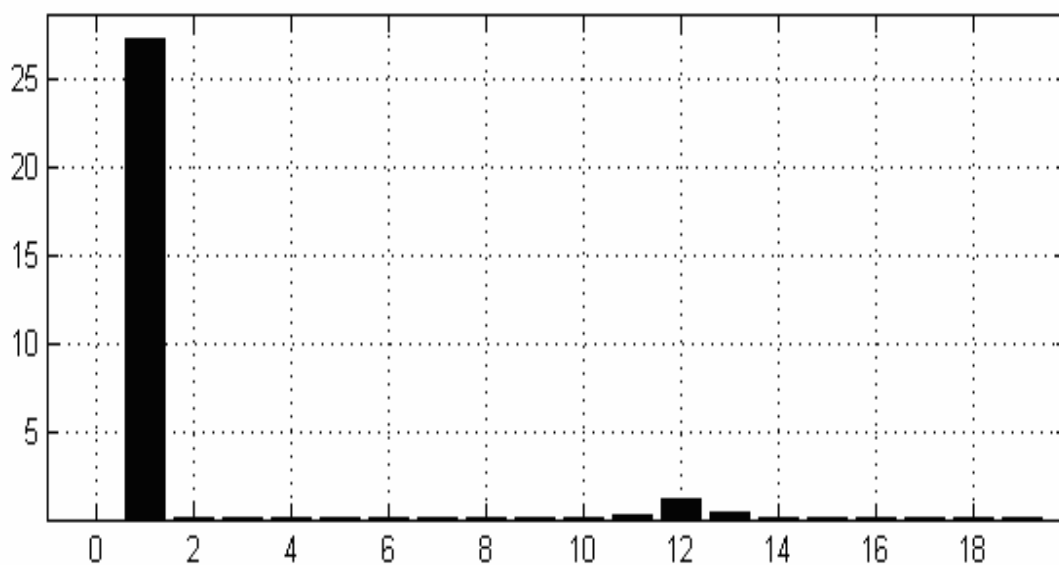


Fig (III.13.) : Spectre de courant final du filtrage

## **Conclusion**

Dans ce chapitre, On a vu le courant harmonique sortant de la charge va être identifiée avec la méthode d'identification des courants perturbateurs. Ce dernier sera l'opposer du courant harmonique du réseau, dont le filtre actif va l'injecter sur le réseau, ce dernier à son rôle élimine le courant harmonique, et tout ce l' à l'aide de l'onduleur, (modélisation de large impulsion).

## INTRODUCTION

Plusieurs solutions existent pour limiter la propagation et l'effet des harmoniques dans les réseaux électriques, et dans ce chapitre on passe pour présenter et étudier la solution plus fréquemment mise en œuvre est le filtrage passif pour réduction des harmoniques. Ce filtrage consiste à placer en parallèle sur le réseau d'alimentation une impédance de valeur très faible autour de la fréquence à filtrer et suffisamment importante à la fréquence fondamentale du réseau Fig: (IV.1.). [3]

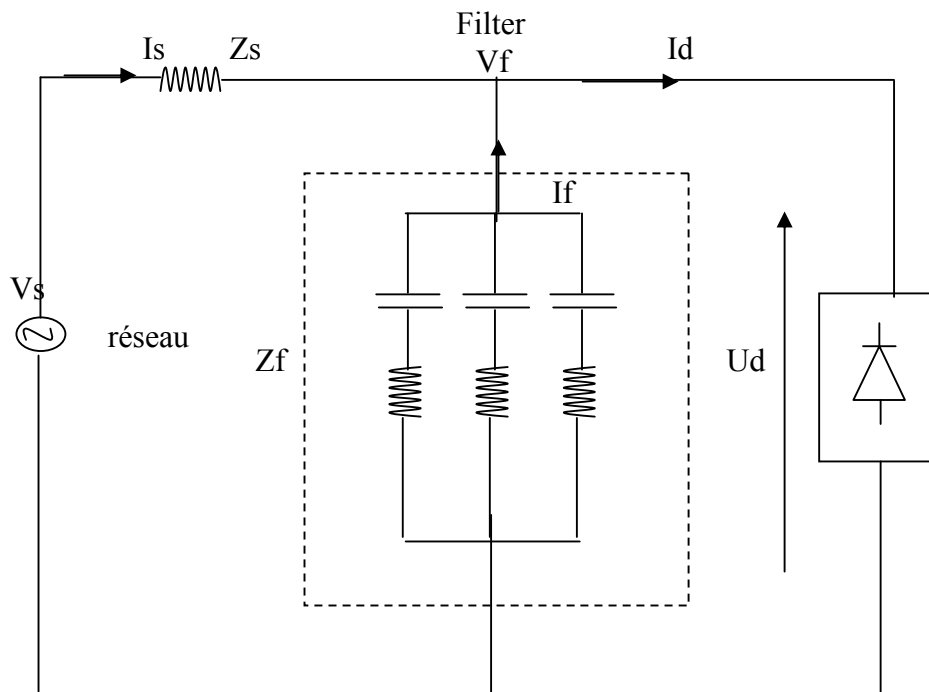


Fig : (IV.1.) l'emplacement du filtre passif.

#### IV.1. PRINCIPE DE FILTRAGE PASSIF

Le principe d'un filtre passif est de modifier localement l'impédance du réseau, de façon à dévier 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 sur une fréquence choisie. [3]

#### IV.2. CONCEPTION DES FILTRES PASSIFS

Un filtre passif est utilisé pour:

- Réduire les harmoniques au minimum possible.
- Fournir une puissance réactive à une fréquence fondamentale.
- Atteindre ces objectifs en même temps avec un prix minimum, à la fréquence

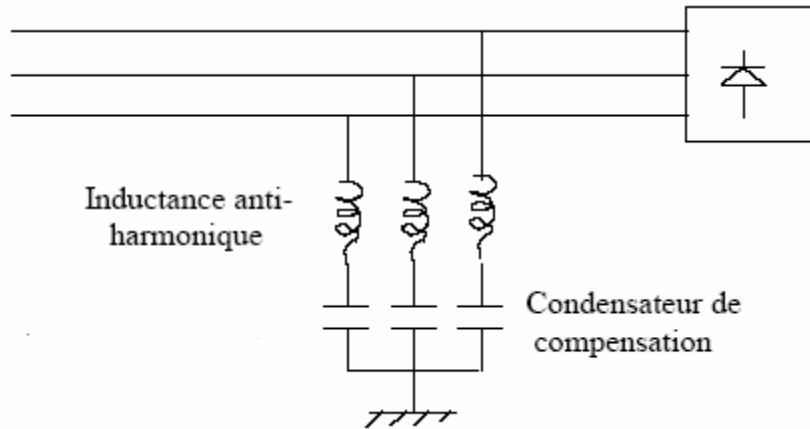
fondamentale, le filtre a une impédance capacitive. Il crée de la puissance réactive, ce réactif sert à compenser le réactif absorbé par le convertisseur. Malheureusement le réactif créé est constant, alors que celui absorbé est variable, d'où un problème de choix de la charge pour laquelle la compensation est réalisée. [5]

#### IV.3. INDUCTANCE ANTI-HARMONIQUE

Cette première solution consiste à installer une inductance en série avec les condensateurs de compensation sur chaque branche monophasée Fig : (IV.2). Ce type de filtre se comporte comme un court-circuit à sa fréquence d'accord. Ce dispositif a pour objectif essentiel de protéger les batteries de condensateurs d'une surintensité due aux harmoniques. Il a en outre pour effet de réduire les tensions harmoniques aux bornes de ces condensateurs. Il permet souvent de réduire les valeurs d'impédance harmonique du réseau. [5] [12]

Ce type de filtre présente une résonance parallèle (anti-résonance) avec l'inductance du réseau sur lequel il est raccordé, on l'accorde sur une fréquence inférieure à celle de la

première injection de courant harmonique (250HZ en générale).



**Fig : (IV.2.) Raccordement d'une inductance anti-harmonique.**

Les inductances anti-harmoniques accordées à une fréquence supérieure à 175Hz. Peuvent cependant poser des problèmes vis-à-vis des signaux de télécommandes centralisés. D'autre part l'installation d'inductances anti-harmoniques accroît la tension permanente à 50Hz aux bornes des condensateurs, qui doivent donc être dimensionnés en conséquence. Cette surtension est d'autant plus importante que la fréquence d'accord du filtre est basse.

#### IV.4. LES TYPES DE FILTRAGE PASSIF

Le filtrage consiste à placer en parallèle sur le réseau d'alimentation une impédance de valeur très faible autour de la fréquence à filtrer et suffisamment importante à la fréquence fondamentale du réseau. Parmi les dispositifs de filtrage les plus répandus, on distingue le filtre passif résonnant Fig: (IV.3.a) et le filtre passif amorti ou passe-haut Figure (IV.3.b) Le filtre résonnant est un filtre très sélectif. Il peut se connecter en parallèle

avec d'autres filtres résonnants.

Le filtre passe-haut compense les harmoniques supérieurs ou égaux à sa fréquence propre. Il peut se connecter en parallèle avec d'autres filtres résonnants.

Ces dispositifs sont utilisés pour empêcher les courants harmoniques de se propager dans les réseaux électriques. Ils peuvent aussi être utilisés pour compenser la puissance réactive.

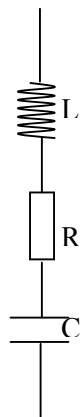


Fig : (IV.3.a) : Filtre passif résonnant

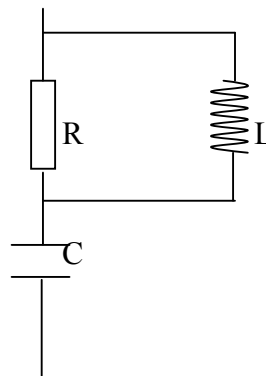


Fig (IV.3.b) : Filtre passif amorti

Malgré leur large utilisation dans l'industrie, ces dispositifs peuvent présenter beaucoup d'inconvénients :

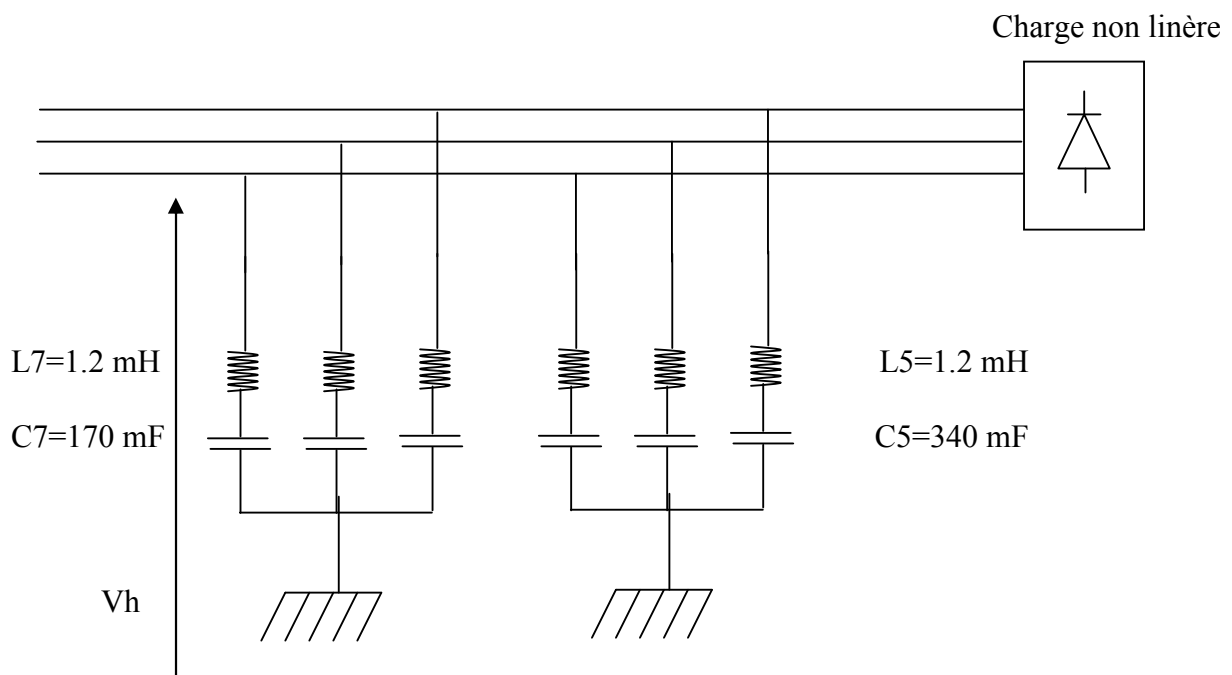
- Manque de souplesse à s'adapter aux variations du réseau et de la charge,
- Équipements volumineux,
- Problèmes de résonance avec l'impédance du réseau.

#### IV.4.A FILTRE RESONANT

A l'inverse d'une inductance anti-harmonique, un filtre résonnant a pour objet de présenter une impédance très faible au passage d'un courant harmonique à un rang déterminé. [4]

La constitution d'un filtre résonant est semblable à celle d'un ensemble inductance Anti harmonique plus condensateur de compensation. Trois différences existent cependant: [5]

- Le facteur de qualité d'un filtre résonant est élevé, l'accord du filtre est donc très pointu.
- On installe souvent plusieurs filtres résonants en parallèle, correspondant aux différents rangs harmoniques à filtre Fig : (IV.4.).
- Un filtre est calculé au cas par cas alors qu'une inductance anti-harmonique est un élément standard.

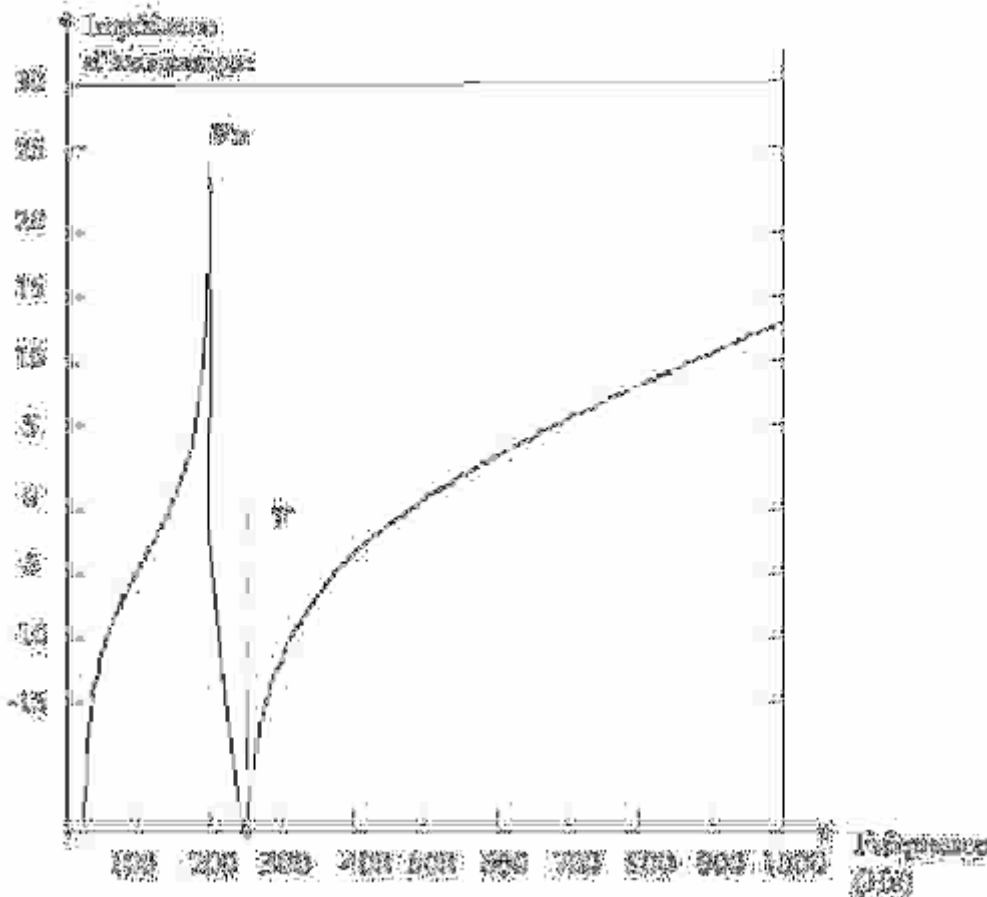


**Fig : (IV.4.) : Installation de filtre résonant**

Les filtres résonants présentent l'inconvénient d'être sensibles aux variations de l'inductance (due à la qualité de réalisation) ou de la capacité (due au vieillissement ou à la température), ce qui entraîne un désaccord de l'ensemble. Cette dérive est plus marquée pour les filtres utilisant des condensateurs de faible capacité. [14]

A fin d'ajuster la fréquence du filtre à la mise en service, l'inductance doit être munie de prises de réglage.

L'installation d'un filtre résonant donne naissance pour le réseau à une impédance harmonique dont l'allure est représentée dans le cas présent Figure (IV.5.a), la fréquence d'accord correspond au rang harmonique 5.



**Fig: (IV.5.) : Impédance de c filtre résonant**

Dans le cas présent, la fréquence d'accord correspond au rang 5 c'est-à-dire 250Hz, on remarque qu'à la fréquence de résonance l'impédance est très faible; ce qui dérive les courants harmoniques vers le filtre.

A une fréquence légèrement inférieure à la fréquence de résonance on observe, un accroissement important, une résonance parallèle dite (anti-résonance). Cette dernière est

due à l'impédance du filtre ( $Z_f$ ) en parallèle avec l'impédance de la source ( $Z_s$ ).

Lorsqu'on veut filtrer un rang harmonique élevé il faut toujours prendre garde à ce que l'anti-résonance n'amplifie pas les rangs harmoniques les faibles ; c'est pourquoi lorsqu'on utilise des filtres accordés sur des rangs harmoniques différents, par exemple 5,7,11, leur mise en service doit se faire par ordre croissant aux rangs harmoniques filtrés et inversement lors de la mise hors service. La présence de résonance au sein d'un réseau électrique entraîne certain nombre de risques vis-à-vis des perturbations harmoniques.

Signifie, en cas de résonance parallèle dans un réseau, que les condensateurs peuvent être soumis à de fortes tensions harmoniques et se détériorer. Cette situation est typique d'un réseau de distribution ou d'un réseau interne d'usine ou la source de courant est une installation d'électronique de puissance.

La performance d'un filtre résonnant est caractérisée par la tension harmonique entre ses bornes  $V_{fh}$ . Cette tension se calcule à partir du courant harmonique  $I_{dh}$  traversant l'impédance du réseau  $Z_s$  en parallèle avec l'impédance  $Z_f$  du filtre, calculées à une fréquence  $h$  fois celle du fondamental : [5]

$$V_{fh} = \frac{Z_f \cdot h \cdot Z_s}{Z_f + h \cdot Z_s} I_{dh} \dots\dots\dots 1$$

Or au voisinage de l'accord, le module de  $Z_f$  s'écrit :



$$\dots\dots\dots 2$$

Avec :

$$Q = \frac{L \omega_1 h}{r} \dots\dots\dots 3$$

: Coefficient de qualité de l'inductance série.

$$\delta = \frac{\Delta \omega}{\omega_1} \dots\dots\dots 4$$

: Précision d'accorde.

Comme:  $Z_F \ll Z_s$ , on obtient:

$$V_{Fh} = Z_F I_{dh} \dots\dots\dots 5$$

Le filtre sera plus performant avec Q grand et d Faible. Il faut noter qu'il existe toujours une antirésonance pour un rang  $h_a$  inférieur à celui de l'accorde= due à l'inductance  $L_s$  du réseau.



Les filtres passe-haut, beaucoup moins sélectifs, atténuent les harmoniques supérieurs ou voisins de leur rang d'accord. FIG : (IV.6.) représente l'évolution de leur impédance en fonction de la fréquence. Avec un amortissement plus important, les filtres passe- haut présentent des performances moins bonnes que celles des filtres résonnants. En revanche, les conséquences d'une variation de la capacité ou de la fréquence sont plus limitées.

**IV.4.b 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 en sont pas trop élevées, on l'utilise souvent pour filtrer simultanément les plus hautes fréquence du spectre, et non une fréquence particulière, c'est un filtre passe haut. Le schéma monophasé équivalent à de l'installation d'un tel filtre est montré ci-dessous. [4]Il est moins sensible aux variation de ses éléments (capacité, inductance, et résistance) qu'un filtre résonant. La résistance

d'amortissement influe légèrement sur la fréquence d'accord. Les filtres amortis d'ordre 2 sont les plus répandus. Il existe également des filtres amortis d'ordre 3 qui comportent deux éléments capacitifs par phase au lieu d'un.

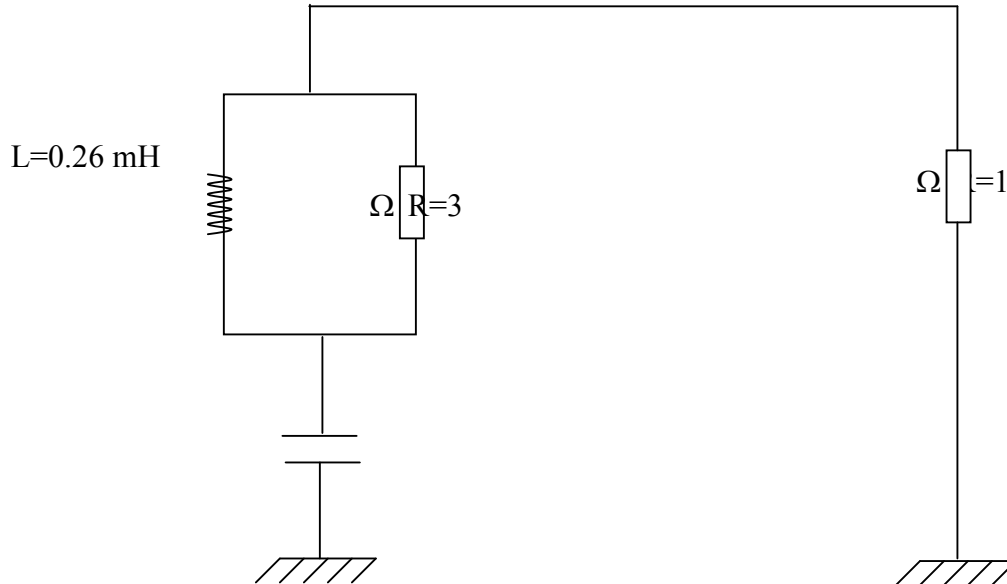
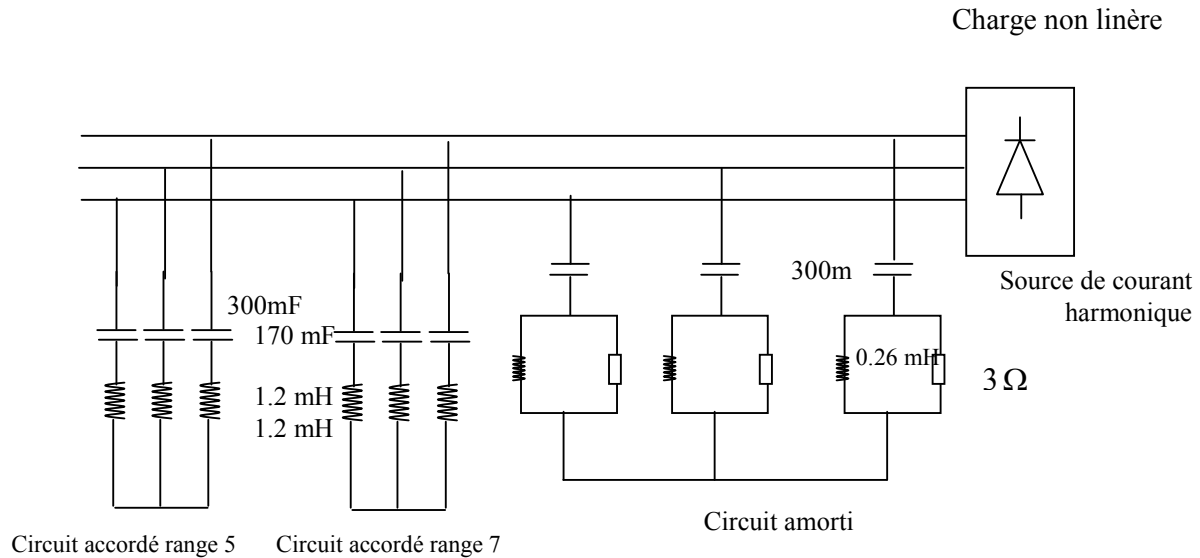


FIG : (IV.6.) filtre amorti.

#### - CIRCUITS ACCORDE

Souvent on associe aux filtres résonants un filtre amorti pour filtrer simultanément les plus hautes fréquences du spectre. La Fig : (IV.6.a), montre le schéma d'un filtre passif relié à un réseau électrique.



**FIG : (IV.7.) : circuits accordés sur les rangs harmoniques (5, 7,)**

On utilise les circuits accordés sur les rangs harmoniques (5, 7,11) parce que ce sont les harmoniques qui ont des amplitudes respectivement élevée dans le spectre de fréquence.

En pratique, lorsqu'un besoin de filtrage devient nécessaire, il est courant de mettre en œuvre des filtres résonant accorés sur les premières ranges harmoniques (5.7) ou les injection de courant sont importantes. Un filtre amorti pour limiter l'impédance harmonique sur le réseau du spectre ( $>11$ ).

L'anti-résonance des filtres provoque une amplification des ranges harmonique inférieure à la fréquence de résonance du filtre. La valeur de l'impédance du réseau à la fréquence d'anti- résonance, conditionne fortement l'allure de la courbe de l'impédance en fonction de fréquence.

On accorde donc le premier à la première fréquence d'injection (généralement 250HZ) de façon à ne pas faire coïncider avec la fréquence d'anti-résonance. [11] [14] [15]

#### IV.5. INCONVENIENTS DES FILTRES PASSIFS :

Le filtre passif entre en résonance série avec la source, ce qui fait apparaître une distorsion de tension, qui donne naissance à un excès de courant harmonique qui peuvent passer à travers le filtre passif, et le détruire.[3]

La variation des l'impédance de la source influe considérablement sur les caractéristiques de filtrage. 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 entraîne la circulation de courants harmoniques très importants qui provoquent rapidement leur destruction. Ce cas est inévitable si l'on considère que la fréquence d'accord varie lentement avec le vieillissement des condensateurs. <<Il faut donc absolument éviter de raccorder des filtres harmoniques de même rang sur un même réseau >>.

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.

#### IV.6. CALCULE DES FILTRES PASSIFS

Un circuit accorde (RLC) à une impédance :

$$Z=R+J(LW-1/CW).....6$$

Z : impédance complexe du circuit

R : résistance

LW : réactance inductive

CW : réactance capacitive

A sa fréquence de résonance son impédance se réduit à une petite valeur soit R.

Car , la fréquence indicative devient égale à la réactance, et on peut écrire.

$$LW=1/Cwr.....7$$

$\omega_r$  est la fréquence de résonance, elle est égale à :

$$\omega_r = 2\pi f_r \dots\dots\dots 8$$

Tel que :

$\omega_r$  est la pulsation de résonance.

$f_r$  est la fréquence de résonance, elle est égale à :

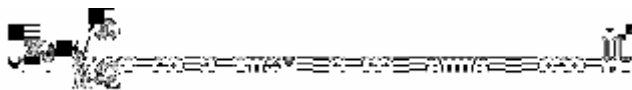


La réactance inductive ou capacitive qui correspond à cette fréquence est :

$$X_c = \omega_r = 1/\omega_r C$$

D'où :

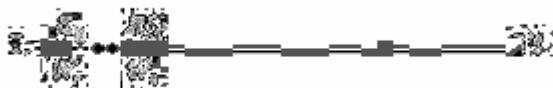
$$\omega_r^2 LC = 1 \dots\dots\dots 10$$



Dans le cas d'un filtre résonance, les facteurs de qualité est défini comme étant le

$$Q = \frac{X_r}{R_r} \dots\dots\dots 12$$

Par conséquent, la capacité et l'inductance respective du filtre en fonction de Q sont :



En pratique un filtre résonant n'est pas exactement accordé sur une fréquence harmonique à cause de :

- ✚ la variation dans la fréquence fondamentale (50Hz).Ce qui fait varier proportionnellement les fréquences harmoniques.
- ✚ Une variation dans la valeur de capacité (C) et de la valeur de l'inductance (L) due aux vieillissements et l'échauffement de ces éléments.
- ✚ Le désaccord initial cause par les tempérances de fabrication de L et C. Les performances d'un filtre sont, largement détermines a partir de son facteur de qualité (Q) et sa déviation relative de la fréquence (d ) défini par l'équation suivant :

$W = w_r (1 \pm d) \dots\dots\dots 15$

Une variation de 2% dans la valeur de L et C (due aux tolérances de fabrication), provoque

- ✚ le même désaccord qu'une variation de 1% de la fréquence du système.
- ✚ La déviation relative de fréquence (d ) peut être exprimer en fonction des variations de L et C.



$\frac{\Delta\omega}{\omega}$  : Représente la variation relative de la pulsation.

L'impédance du filtre peut être expreme en fonction du facteur de qualité et de laïcisation relative de la fréquence.



Pour les petite déviation de fréquence ou (d )est <<1 on peut écrire :

$$Z_f \cong R(1 + j2\delta Q) \dots\dots\dots 18$$

Cette équation montre que l'impédance du filtre à sa fréquence de résonance peut être diminuée, en fonction diminuant la valeur de (R).

#### IV.7. MINIMISATION DE LA TENSION HARMONIQUE (VH)

La tension harmonique est donnée par :

$$V_h = Z_{eq} I_h \dots\dots\dots 19$$

$Z_{eq}$  : l'impédance équivalente du filtre et de la source.

$I_h$  : le courant harmonique.

Cela veut dire que pour diminuer la tension harmonique, il ne faut pas diminuer seulement

l'impédance du filtre ; mais il faut diminuer l'impédance équivalente du filtre et de la source.

$$V_h = Z_{hf} Z_{hs} / (Z_{hf} + Z_{hs}) I_h = I_h / (Y_{hf} + Y_{hs}) \dots\dots 20$$

$Z_{hf}$  : impédance harmonique d'ordre (h).

$Z_{hs}$  : impédance harmonique du réseau (impédance de la source).

$Y_{hf}$  : admittance du filtre

$Y_{hs}$  : admittance du réseau (source)

L'admittance du filtre peut être écrite sous la forme :

$$Y_f = 1/Z_f = G_f + jB_f \dots\dots\dots 21$$

$G_f$  : la conductance du filtre.

$B_f$  : la susceptance du filtre.

De l'équation (20) on peut écrire :

L'admittance approximative du filtre, en fonction du facteur de qualité et du coefficient de

déviaton

de fréquence est donnée par l'expression suivante :



La conductance, et la susceptances du filtre en fonction du facteur de qualité et le coefficient de déviaton relative de fréquence est données respectivement par les deux formules suivantes :

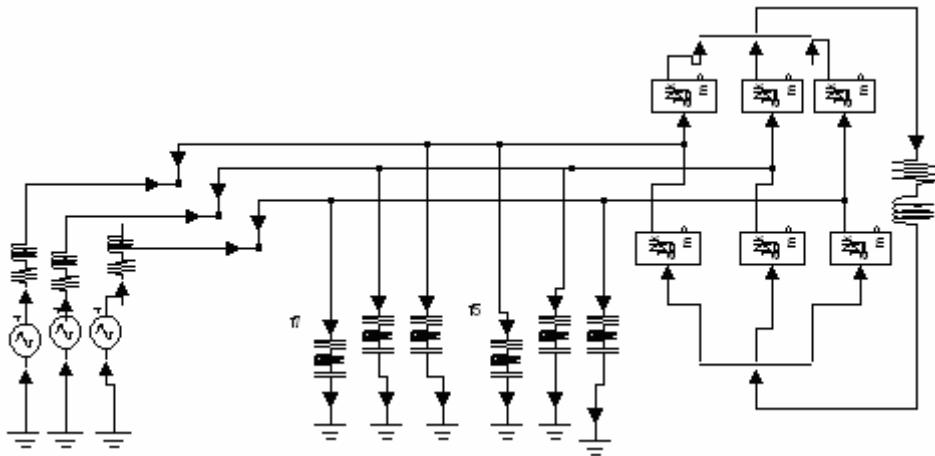


Fig : (IV.8.) deux filtres injectés sur le réseau du rang (5.7)

IV.8. RESULTAT DE SIMULATION

On a commencer par le filtre d' harmonique.

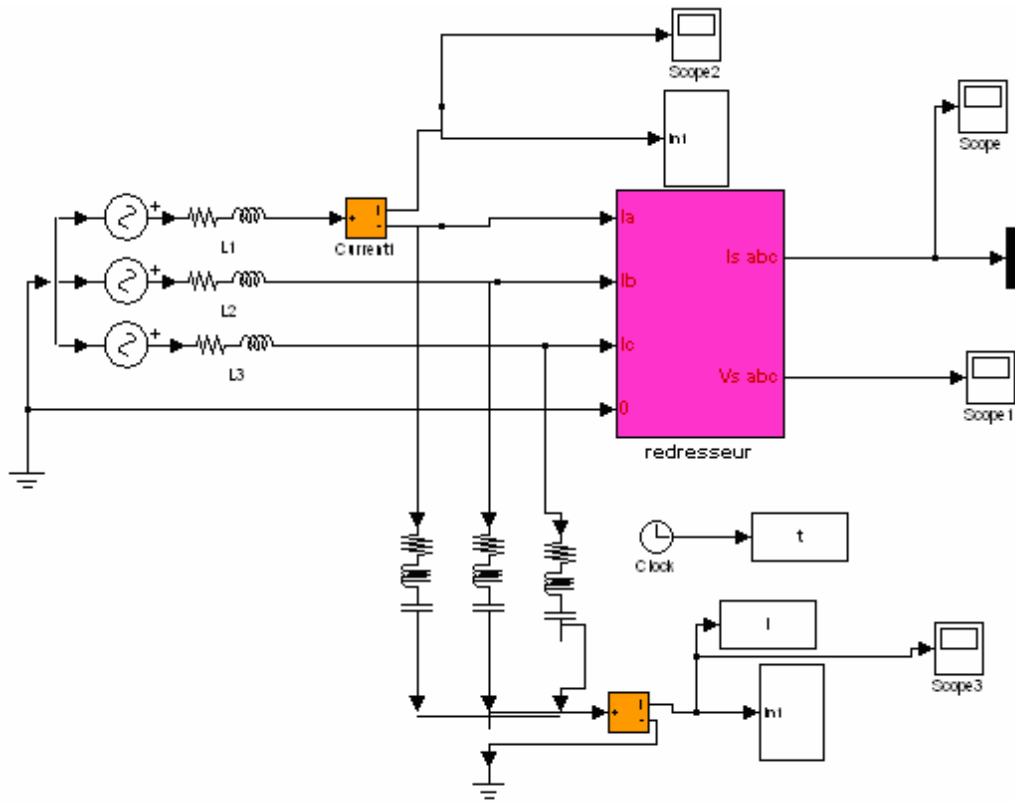


Fig: (IV.9.) Un filtre passif raccordé dans le réseau.

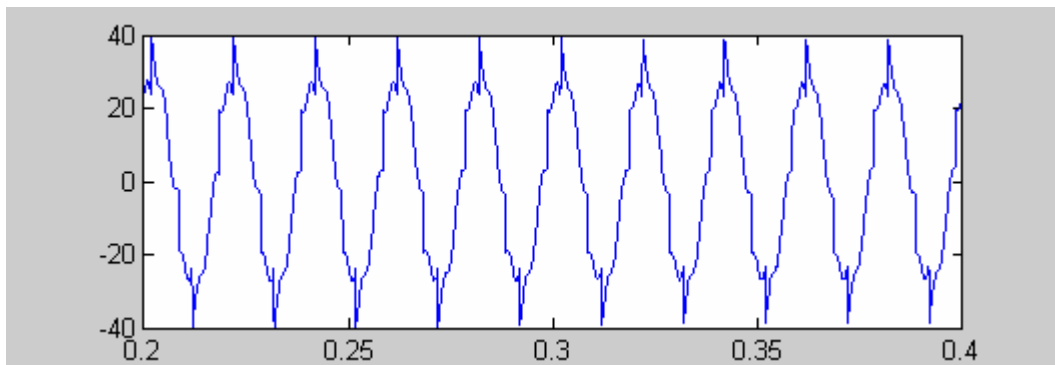
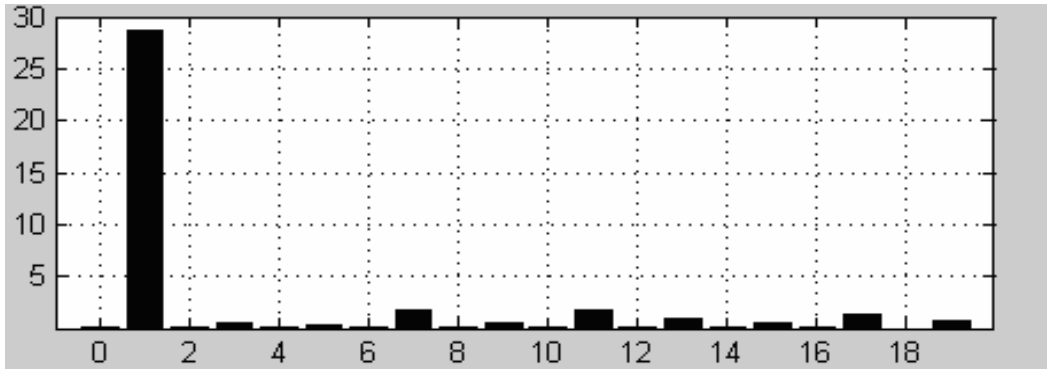
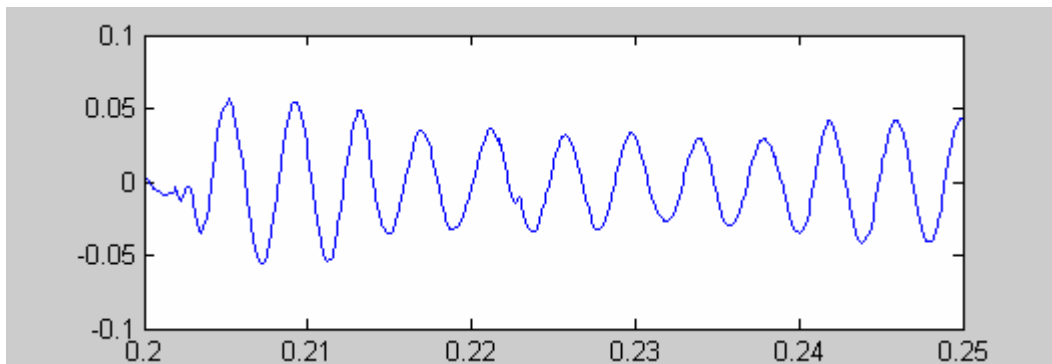


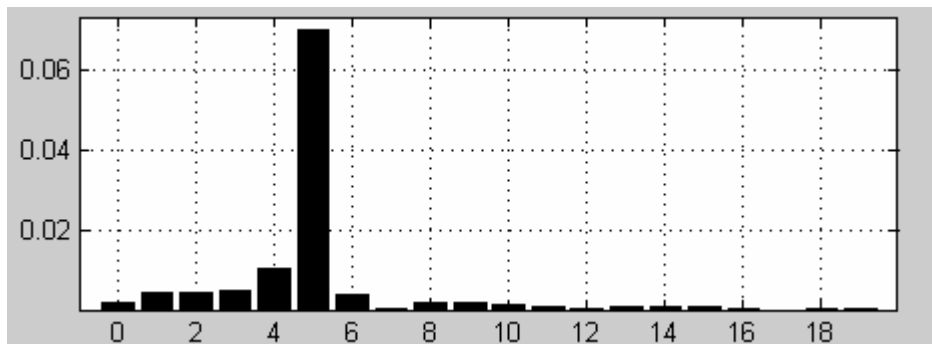
Fig:(IV.10.) La forme de courant harmonique après le filtrage d'harmonique 5.



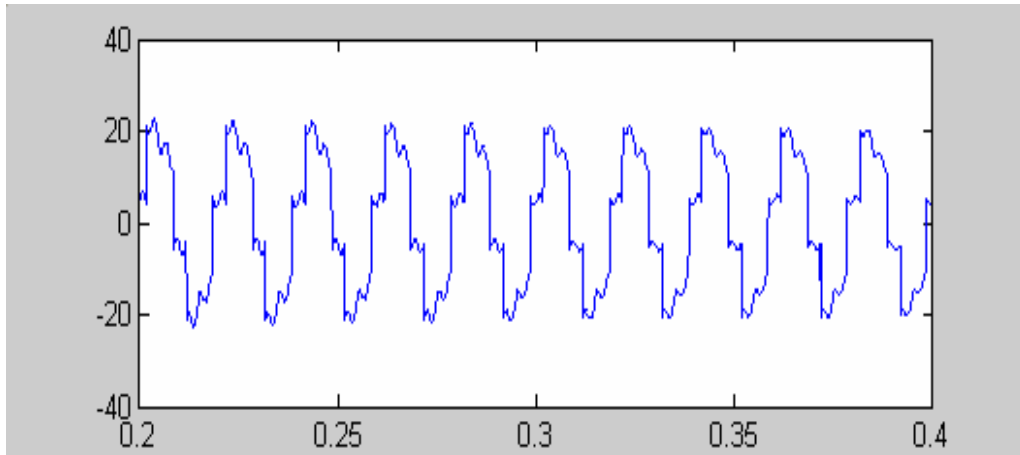
**Fig: (IV.11.) Le filtre passif élimine l'harmonique du rang 5**



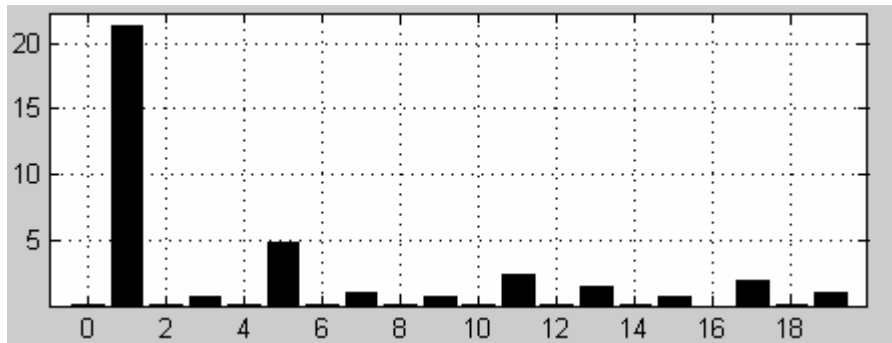
**Fig : (IV.12.)La forme de courant harmonique de rang 5 absorbé par le filtre 5**



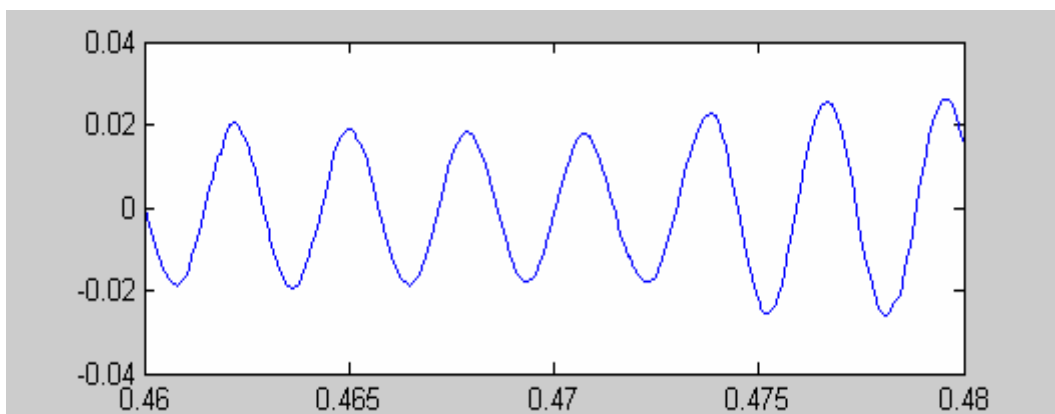
**Fig: (IV.13.) le filtre passif absorbe l'harmonique du rang 5**



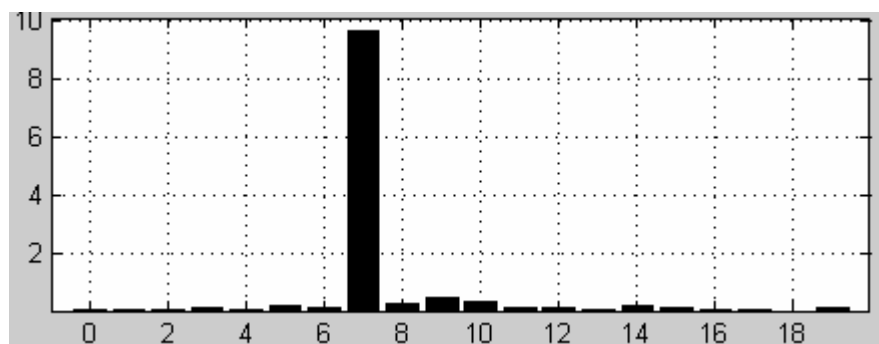
**Fig: (IV.14.) La forme de courant avec l'absence d'harmonique de rang 7**



**Fig : (IV.15.) Le filtre passif élimine l'harmonique du rang7**



**Fig (IV.13) La forme du courant harmonique du rang7**



**Fig : (IV.15.) Le filtre passif absorbe le courant harmonique du rang 7**

d'après cette étude sur le filtre passif et actif on a pu faire une petite comparaison qui se trouve dans le tableau suivant :

	Filtre passif	Compensation active d'harmoniques
Action sur les courants harmoniques	Nécessite un filtre pour chaque Fréquence (encombrant)	Agit simultanément sur plusieurs Fréquences.
Influence de Variation De fréquence	Efficacité réduite	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.	Aucun risque de surcharge mais Efficacité diminuée.
Ajoute de matériel (augmentation de charge)	Nécessite des modifications sur le filtre, dans certains cas	Aucun problème si I-conditionneur > I-harmonique de charge
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

## Conclusion

D'après le chapitre quatre on a conclu que les actions des filtres passifs sur les courants harmoniques nécessite un filtre pour chaque fréquence. Il est facile à réaliser et non Coûteux, mais d'après les courbes de simulation, il ne s'adapte pas avec la variation de La charge.



## CONCLUSION GENERALE

D'après cette étude sur le filtre actif et passif, on a pu déduire une petite comparaison entre ces deux derniers. L'action du filtre passif sur les courants harmoniques nécessite un filtre pour chaque fréquence c'est à dire: il devient le nombre des filtres encombrants contrairement au filtre actif, la compensation de celui-ci agit simultanément sur plusieurs fréquences.

En passant pour l'influence de variations de fréquence, le filtre passif a une efficacité réduite d'où on peut prétendre la présence des courants harmoniques dans le réseau non absorbé par le filtre passif.

Par rapport au filtre actif, aucune conséquence c'est à dire le filtre actif est renforcé par la méthode d'identification des courants harmoniques qui sert à connaître toutes les variations de fréquence, aussi le filtre passif marque un risque de résonance à cause à l'influence de l'impédance mais pour le filtre actif aucune conséquence.

Lors d'une augmentation de courant, le filtre passif risque de surcharge et de détérioration à cause de sa faible résistance qui a été placée pour absorber les courants harmoniques.

Pour le filtre actif, on a constate aucun risque de surcharge malgré son efficacité diminuée.

L'augmentation de charge nécessite des modifications sur le filtre passif dans certains cas et pour le filtre actif aucun problème.

Maintenant, on passe sur leurs actions sur les harmoniques selon leurs ordres. Il est très difficile pour les filtres passifs mais il est possible pour le filtre actif grâce au paramétrage.

La modification de la fréquence fondamentale 50HZ est impossible pour le filtre passif et très passible pour le filtre actif grâce à la reconfiguration de tous cela, on constate que l'utilisation du filtre passif est très encombrante contrairement au filtre actif, c'est à dire on marque un poids très important en cours d'utilisation du filtre passif et un faible poids pour le filtre actif.

Le filtre passif est moins coûteux par rapport au filtre actif et le filtre passif est facile de réaliser contrairement au filtre actif.

Aussi le filtre actif il est efficace pour la compensation des courants harmoniques et l'énergie réactive.



**Bibliographie**

- [1] M.Alaa Eddin Alali  
( Contribution à l'étude des compensateurs Actifs des Réseaux Electriques basse tension ) ( Automatisation des systèmes de puissance électriques ) ( Ecole doctorale science pour l'ingénieur) 12 septembre 2002 Thèse de doctorat
- [2] [www.google.com](http://www.google.com)  
Internet : <http://www.abb.com/cmotors&drives>  
Guide technique N° 6
- [3] [www.google.com](http://www.google.com)  
Institut Schneider formation / MDG9A1521/05-99
- [4] Site Internet [www.google.com](http://www.google.com)  
Lycée edouard Belin 70000 BTS Electrotechnique
- [5] [www.google.com](http://www.google.com)  
Vive les harmonique.htm
- [6] M.Mokhtar  
( MATLAB 5.2 & 5.3 et simulink 2&3 pour étudiants et ingénieurs )  
(Edition springer 2000 )
- [7] (<http://www.sielec.ac-aix-marseille.fr/cours/bonnet/diod.htm>)  
Récupérée de (<http://fr.wikipedia.org/wiki/Diode>)
- [8] .B.NOURDINE  
( Identification d'un courant harmonique généré par une charge non linéaire )  
Année Universitaire : 2004 / 2005  
Thèse d'ingénieur d'université M<sup>ed</sup> Boudiaf de M'sila
- [9] .L.ch. Brahim et M.Raouf  
( Etude et simulation d'un moteur Asynchrone alimenté par un onduleur de tension )  
M'sila : 2004 / 2005
- [10] .Z.Ameur et Z .nourdine  
(Etude par simulation d'un moteur asynchrone alimenté par un onduleur de tension )  
(Multi niveaux) M'sila 2003 / 2004
- [11] M. leila  
(Etude par simulation d'un filtre active parallèle de puissance pour la compensation de courant harmonique généré par un pont redresseur triphasé)  
Thèse de magistère de l'université de baji mokhtar Annaba
- [12] Thierry deflandre Philipe mauras  
(Electricité de France –direction des études et recherche )  
Ingénieur – chercheur au service étude de réseau

- [13] **B. salim**  
(Commande directe de puissance d'un convertisseur AC/AD triphasé sans capteur de tension )  
thèse de magistère de (Ecole militaire polytechnique) Algérie 2005
- [14] **j. phys. III France 7 (1997) 2433-2457**  
Filtrage active des harmoniques en courant et en tension des réseau électriques :  
modélisation simulation numérique et expérimentation  
CEGELEC-DEI, 3 avenue des trois chenes, 90018 Belfort, France
- [15] **G. tarek**  
Systèmes d'entrainements électrique  
Ecole militaire polytechnique  
Thèse : de magistère ( étude de réalisation d'un compensateur actif de puissance commandé par un DSP ) en 2004
- [16] **A. kamel Alouane**  
Génie électrique  
Thèse : ( doctorat de M.N.P.L contribution a l'étude de filtrage d'harmonique des réseau de distribution a l'aide de l'association de filtre actif et passif parallèle) 31-01-1995
- [17] site Internet : [www.yahoo.fr](http://www.yahoo.fr)  
[www.alpestechnologies.com-E-mail com@alpestechnologie.com](mailto:www.alpestechnologies.com-E-mail_com@alpestechnologie.com)  
P.A.E le Glaisins-7, Rue des Bouvières-B.P 332 74943 Annecy-Le vieux cedex  
France
- [18] site Internet : [www.google.com](http://www.google.com)  
Directeur technique Dafoss Drives (7, Rue Roger Rennequin 78190 Trappes )  
Tél : 0130165200
- [19] **.D.Abdelghani et L. saber**  
(commande MLI d'un redresseur multi niveau ) M'sila 2004 / 2005