

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



UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA  
FACULTE DES HYDROCARBURES ET  
DE LA CHIMIE



**LABORATOIRE DE RECHERCHE SUR L'ELECTRIFICATION  
DES ENTREPRISES INDUSTRIELLES  
(LREI)**

## MEMOIRE

PRESENTE PAR :

*Mr. KOUZOU ABDELLAH*

EN VUE DE L'OBTENTION DU TITRE DE  
**MAGISTER EN GENIE ELECTRIQUE**  
OPTION : Equipements Electriques Industriels

**THEME**

**COMPENSATION ACTIVE DES PERTURBATIONS DANS UN  
RESEAU BASSE TENSION**

**Membres de Jury:**

<i>M. M. Zelmat</i>	<i>Professeur à Univ. Boumerdes</i>
<i>M. I. Habi</i>	<i>Chargé de Cours à Univ. Boumerdes</i>
<i>M. R. Azouaou</i>	<i>Chargé de Cours à Univ. Tizi Ouzou</i>
<i>M. I. Ouahdi</i>	<i>Maître de Conférence à Univ. Boumerdes</i>
<i>M. D. Mahi</i>	<i>Maître de Conférence à Univ. Laghouat</i>

<i>Président</i>
<i>Rapporteur</i>
<i>Examineur</i>
<i>Examineur</i>
<i>Examineur</i>

BOUMERDES 2004

## REMERCIEMENTS

A l'issue de ce travail, je tiens à exprimer toute ma gratitude à l'ensemble des personnes qui ont contribué chacune à leur manière, à l'accomplissement de ce mémoire.

Je voudrais tout d'abord exprimer toute ma reconnaissance à Mr Habi Idir pour son encadrement, pour son humanisme et sur tous les conseils avisés qu'il a su me prodiguer tout au long de la période de préparation de ce mémoire.

J'adresse également mes sincères remerciements à M. Zelmat Mimoune, professeur à L'université de Boumerdès, à M. Ouahdi Idris, Maître de conférence à l'université de Boumerdes, M. Azouaou Rabah Chargé de cours à l'université de Tizi Ouzou et M Mahi Djilali maître de conférences à l'université de Laghouat, pour m'avoir fait l'honneur d'accepter de faire partie de mon jury et pour leurs sages conseils.

Je tiens à remercier aussi Pr R. Kennel directeur du Laboratoire de commandes et entraînement des machines à l'université de Wuppertal (Allemagne) pour son accueil, son encouragement, ses conseils, et qui a su se rendre disponible malgré ses charges de responsabilité.

Mes reconnaissances et mes remerciements vont également aux membres de l'équipe du laboratoire EMAD à l'université de Wuppertal en Allemagne, surtout M. S. Pawel.

Avant de terminer, je voudrais dédier ce mémoire à mes parents. Spécialement à mon cher père qui malheureusement n'a pas pu voir la fin de ce mémoire qu'il a vécu avec tellement de joie anticipée. Je veux que tu saches Elhadj Lakhder que j'ai senti ta présence très proche et que tes conseils et tes souvenirs m'ont toujours guidé dans ma vie. Aussi à ma mère, Nakhla, pour le soutien et les encouragements qu'une mère seule peut apporter. Un grand merci aussi à ma femme, Freiha pour son encouragement, patience et compréhension infinie. Finalement je tiens à remercier mes chers frères et sœurs.

Enfin à mes amis et mes collègues qui ont partagé dans mon quotidien mes espoirs et mes inquiétudes, qui m'ont réconforté dans les moments difficiles et avec qui j'ai partagé d'inoubliables instants de détente, je vous remercie tous chaleureusement.

## ABSTRACT

The present work deals with the study of the active compensations of different disturbances in low voltage power system. Recently several methods for limitation and elimination of disturbances and harmonic pollution in power system have been widely investigated. This problem rapidly intensifies with the increasing amount of electronic equipment (computer, radio, TV sets, telecommunication etc.) and power electronics systems, mainly in industrial equipment. This equipment, a nonlinear load, is a source of current harmonics, which produces increase of reactive power and power losses in transmission lines. The harmonics also cause electromagnetic interference and, sometimes, dangerous resonances. They have negative on the control and automatic equipment, protection systems, and other electrical sensitive loads, resulting in reduced reliability and availability. Moreover, nonlinear loads and non-sinusoidal currents produce non-sinusoidal voltages drops across the network impedances, so that non-sinusoidal voltages appear at several points of the mail line, especially in the PCC (Point of Common Connection), it brings out a lot of problems in the power system, mainly overheating of line, transformers and generators due to the iron losses. In this work we present the active compensations for the whole above mentioned problems. To compensate for current disturbances, we use a Shunt Active Power Filter, which consists of an element of energy storage (DC-link), a VSI and an outer passive filter. The control algorithm used is the Instantaneous Reactive Power called the pq theory, we have discussed the use of this strategy, its drawbacks. We proposed a PLL system to allow to this strategy to work under unbalanced power system voltage or under distorted voltages and even in the case of unbalanced and distorted power system voltages. To compensate for Voltage sags, swells and partial or total collapse of one or more phases we use a Series Active Power Filter. In this work we propose a compensation technique that uses a Series Active Power Filter to eliminate the presence of voltage unbalance in a three-phase a power supply, to eliminate the drop voltage in the line produced by the harmonic currents generated by nonlinear loads or in other word to eliminate the propagation of currents harmonics to travel towards the source of the power supply, finally to regulate the positive sequence voltage to a nominal value. In the end of this work we present a combined system which contains the tow Active Power Filters above mentioned coupled via a DC-link, this system is a promised solution; we called this type a Unified Power Quality Conditioner.

## S O M M A I R E

<b>Introduction Générale.....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre I : Perturbations électriques dans les réseaux basses tensions: origines, conséquences et solutions .....</b>	<b>4</b>
<b>I.1 Introduction.....</b>	<b>5</b>
<b>I.2 Les différents types des perturbations électriques.....</b>	<b>6</b>
<b>I.2.1. Perturbations harmoniques en courant et en tension.....</b>	<b>7</b>
I.2.1.1 Origines des harmoniques.....	11
I.2.1.2 Conséquences des harmoniques.....	11
I.2.1.3 Réglementation.....	12
I.2.1.3.1 La norme EN 5016 .....	13
I.2.1.3.2 La norme IEC 61000.....	13
I.2.1.3.3 ANSI/IEEE 519-1992.....	15
I.2.1.3.4 Le Contrat EMERAUDE d'EDF.....	15
I.2.2 Déséquilibre du courant et de la tension.....	15
I.2.2.1 Origine du déséquilibre.....	15
I.2.2.2 Conséquences du déséquilibre.....	16
I.2.2.3 Réglementation.....	16
I.2.2.3.1 EN 50160 .....	16
I.2.2.3.2 Contrat EMARAUDE .....	16
<b>I.2.3 Creux de tension.....</b>	<b>17</b>
I.2.3.1 Origine des creux de tension.....	17
I.2.3.2 Conséquences des creux de tension.....	17
I.2.3.3 Réglementation.....	17
<b>I.2.3.3.1 EN 50160.....</b>	<b>18</b>
I.2.3.3.2 Contrat MARAUDE.....	18
I.2.4 Fluctuation Rapide de la tension.....	18
I.2.4.1 Origine de la fluctuation rapide de la tension.....	
I.2.4.2 Conséquences des « Flickers ».....	19
<b>I.3 Compensation des perturbations dans un réseau électrique de distribution.....</b>	<b>19</b>
<b><i>I.3.1 Solutions de compensation classiques.....</i></b>	<b>19</b>
I.3.1.1 Compensation des courants perturbateurs.....	19
<b><i>I.3.1.1.1 Rééquilibrage des courants du réseau électrique.....</i></b>	<b>20</b>
<b><i>I.3.1.1.2 Compensation de la puissance réactive.....</i></b>	<b>21</b>
<b><i>I.3.1.1.2 Compensation de la puissance réactive.....</i></b>	<b>22</b>
<b><i>I.3.1.1.2 Compensation de la puissance réactive.....</i></b>	<b>22</b>

I.3.1.1.3 Compensation des courants harmoniques.....	22
I.3.1.2 Compensation des tensions perturbatrices.....	23
I.3.2 Solutions de compensation modernes.....	24
I.3.2.1 Dépollution des courants perturbateurs.....	25
I.3.2.2 Dépollution des tensions perturbatrices.....	26
I.3.2.3 Filtres actifs de puissance.....	26
I.3.2.3.1 Le filtre actif parallèle (F.A.P).....	
I.3.2.3.2 Le filtre actif série (F.A.S).....	27
I.3.2.3.3 La combinaison parallèle-série active (UPQC).....	
I.3.2.3.4 Combinaison hybride active et passive.....	
I.3.2.3.5 Le filtre actif série avec des filtres passifs parallèles.....	27
I.3.2.3.6 Le filtre actif série connecté avec des filtres passifs parallèles.....	
I.3.2.3.7 Le filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles.....	30
I.4 Conclusion.....	31
Chapitre II:Etude comparative des stratégies d'identification des perturbations des courants.....	31
II.1 Introduction.....	32
<b>II.2 Rappels des principaux travaux sur les Filtres actifs.....</b>	<b>32</b>
II.2.1 Les travaux d'Agaki et al.....	38
II.2.2 Les travaux de Bhattachyaria et al.....	43
II.2.3 Les travaux de Enslin et al.....	49
II.2.4 Les travaux de Watanabe et al.....	52
II.3 Calcul des puissances sous le régime non-sinusoïdal.....	57
II.4 Stratégies de commande.....	58
II.4.1 La théorie p-q (La théorie de la puissance instantanée).....	63
II.4.2 Algorithme du Repère de Référence Synchronisée (SRF).....	
II.4.3 Algorithme de la Détection synchronisée.....	
II.4.4 Algorithme Fryze-Bucholz-Depenbrock (FBD).....	67
II.4.5 La méthode de Fourier.....	68
II.4.6 La méthode Sinusoïdale Généralisée de Fryze.....	69
II.5 CONCLUSION.....	69
Chapitre III: Compensation des perturbation des courants par le filtre actif parallèle.....	70
III.1 Introduction.....	74
III.2 Description générale du F.A.P.....	74
III.2.1 Structure générale.....	79
III.2.2 Partie Puissance.....	
III.2.2.1 Onduleur de tension (VSI : Voltage source inverter).....	80





# INTRODUCTION GENERALE



## 1. Introduction

Ces dernières décennies, l'utilisation croissante dans l'industrie des équipements d'électronique de puissance et d'informatique contribuent à la dégradation de la qualité de l'énergie dans le réseau électrique. En effet, les convertisseurs statiques (les redresseurs, les gradateurs, les cycloconvertisseurs) prolifèrent tant dans les équipements industriels que domestiques. Principalement l'utilisation de ces convertisseurs 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. 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, la circulation de ces mêmes courants perturbés va également provoquer des harmoniques et des déséquilibres de tension, lesquels vont se superposer à la tension nominale du réseau électrique. Des incidents du type « coups de foudre » ou un brusque démarrage d'une machine tournante à forte puissance peuvent causer une chute soudaine et importante de tension. On nommera ce type d'incident : creux de tension.

Plusieurs solutions ont été présentées dans la littérature pour dépolluer les réseaux électriques de tout type de perturbation de courant et de tension à savoir :

- Les harmoniques ;
- Les déséquilibres ;
- Les composantes réactives ;
- Les creux de tension

Devant cette situation gênante des perturbations dans les réseaux électriques, surtout les réseaux basse tension, des normes de qualité de plus en plus contraignantes doivent être imposées aux fournisseurs et aux consommateurs. Actuellement la solution de compensation de toutes ces perturbations, la plus adaptée, est le filtrage actif, offrant une grande flexibilité de compensation, tout en restant dans les limites technico-économiques.

Dans le cadre de ce mémoire, notre objectif consiste en l'application du filtre actif parallèle et du filtre actif série pour la compensation des différentes perturbations. Pour se faire notre mémoire est divisée en quatre parties.

La première partie présente la description des différentes perturbations en courant et en tension dans un réseau basse tension, leurs origines, leurs conséquences et les réglementations. Nous présenterons également les solutions traditionnelles et modernes de compensation et, plus en détail, les différentes structures de filtrage actif.

Dans la seconde partie, nous présentons un résumé des principaux travaux réalisés dans le domaine des filtres actifs, les définitions des différentes puissances instantanées sous un régime non sinusoïdal en courant et en tension et ensuite une présentation détaillée des différentes stratégies d'identification des perturbations des courants pollueurs, avec simulation de chacune de ces méthodes sous les différentes perturbations. En conclusion une étude comparative est faite pour le choix d'un algorithme qui sera utilisé pour la commande du filtre actif parallèle présenté dans la troisième partie.

La troisième partie est consacrée à l'étude de la structure des deux parties du filtre actif parallèle (partie puissance et partie commande). Nous présentons le rapport des puissances apparentes du filtre et de la charge, afin d'arriver d'une part à un choix technico-économique optimal, et de voir d'autre part la faisabilité du filtre actif parallèle pour assurer la compensation. La méthode d'identification utilisée est la théorie pq. Finalement nous présentons des critiques concernant la méthode d'identification utilisée.

Dans la quatrième partie de ce mémoire, nous allons présenter le filtre actif série pour la compensation des perturbations de tension. Nous traitons la structure du filtre actif série, l'algorithme d'identification des perturbations en tension et en courant, le rapport des puissances apparentes du filtre et de la charge. Nous présentons des simulations pour des perturbations sévères. Enfin, nous proposons une représentation de la structure combinée du filtre actif parallèle et du filtre actif série UPQC.

# **C H A P I T R E I**

## **PERTURBATIONS ELECTRIQUES DANS LES RESEAUX BASSES TENSIONS Origines, Conséquences et Solutions**

## CHAPITRE I

### Les perturbations Dans les réseaux de distribution Les origines, les conséquences et les solutions

#### I.1 Introduction :

Depuis de nombreuses années le distributeur d'énergie électrique s'efforce de garantir la qualité de la fourniture d'électricité. Les premiers efforts se sont portés sur la continuité de service afin de rendre toujours disponible l'accès à l'énergie chez l'utilisateur. Aujourd'hui, les critères de qualité ont évolué avec le développement des équipements, où l'électronique de puissance prend une place prépondérante dans les systèmes de conversion de l'énergie, la commande et le contrôle. De ce fait, l'énergie électrique, fournie à travers le réseau de distribution aux différents clients utilisateurs doit garder la tension à une valeur acceptable dans les normes aux bornes de chaque point de connexion des utilisateurs du réseau.

Il apparaît évident que la qualité de cette énergie dépend de celle de la tension au point de livraison. Cette tension subit généralement beaucoup de perturbations de deux origines distinctes [1]:

- Les perturbations causées par le passage, dans les réseaux électriques, des courants perturbateurs comme les courants harmoniques, déséquilibres et réactifs.
- Les perturbations de tensions causées par des tensions perturbatrices comme les tensions harmoniques, les déséquilibrées, les creux de tension et les surtensions.

Aujourd'hui, la situation au niveau des réseaux alternatifs basses tensions est devenue très préoccupante. La qualité du courant électrique dans les installations commerciales et électriques se dégrade incontestablement. Outre les perturbations extérieures telles que les coupures, les creux et les pointes provoquées par la commutation et par les phénomènes atmosphériques, il existe aussi des causes intrinsèques spécifiques à chaque site, dues à une utilisation conjuguée de charges linéaires et non linéaires. Un déclenchement intempestif des dispositifs de protection, des déséquilibres en tension et en courant, une diminution du facteur de puissance, des surcharges harmoniques, des niveaux élevés de distorsion des tensions et des courants, et l'augmentation de la température dans les conducteurs et les générateurs « causée par les différentes perturbations » sont autant des facteurs contribuant à détériorer la qualité et la fiabilité d'un réseau alternatif basse tension [2].

Dans la première partie de ce chapitre, nous étudierons les caractéristiques générales des perturbations électriques. Ainsi, nous détaillerons les origines, les conséquences matérielles et les limites tolérées et imposées par les normes internationales de ces perturbations.

Dans une deuxième partie, nous présenterons et comparerons des solutions de compensation de ces perturbations généralement proposées dans la littérature. Nous pourrions ainsi adopter la compensation active la plus adéquate. La dernière partie de ce chapitre sera

consacrée à la présentation des différents montages des filtres actifs. Nous évoquerons ainsi les principes et la mise en œuvre de ces structures modernes de compensation.

## I.2 Les différents types des perturbations électriques

Les tensions d'un réseau électrique constituent un système alternatif triphasé, sauf dans des cas à utilisation particulière, les paramètres d'un tel système sont les suivants [1,3] :

- la fréquence,
- l'amplitude (ou la valeur efficace) des trois tensions,
- la forme d'onde qui doit être la plus proche possible d'une sinusoïde,
- la symétrie du système triphasé, caractérisée par l'égalité des modules des trois tensions et de leur déphasage relatif.

La qualité de la tension peut être affectée, soit du fait de certains incidents inhérents à la nature physique et aux sujétions liées à l'exploitation du réseau, soit du fait de certains récepteurs sensibles (surtout les charge non-linéaires) qui dégradent la qualité du courant dans le réseau et aussi la qualité de la tension, Ces perturbations affectant un ou plusieurs des quatre paramètres précédemment définis. On a donc quatre possibilités distinctes de perturbations :

- les fluctuations de la fréquence à 50 Hz : elles sont rares et ne sont observées que lors de circonstances exceptionnelles, par exemple certains défauts graves du réseau, au niveau de la production ou du transport;
- les variations de l'amplitude : il ne s'agit pas des variations lentes de tension qui sont corrigées par les transformateurs de réglage en charge, mais de variations rapides de tension ou de creux de tension se présentant souvent sous forme d'à-coups brusques. Les creux de tension peuvent être soit isolés, soit plus ou moins répétitifs, de forme régulière ou non;
- la modification de la forme d'onde de la tension : cette onde n'est alors plus sinusoïdale, et peut être considérée comme représentable par une onde fondamentale à 50 Hz, associée soit à des harmoniques de fréquence multiple entier de 50 Hz, soit même parfois à des ondes de fréquence quelconque;
- la dissymétrie du système triphasé : que l'on appelle déséquilibre. On peut, en plus, mentionner un type particulier de perturbations difficile à classer puisqu'il concerne tout à la fois l'amplitude et la forme d'onde : ce sont les variations transitoires d'amplitudes dont la durée est inférieure à 10 ms.

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

Les courants perturbateurs comme les courants harmoniques, les courants déséquilibrés et la puissance réactive sont majoritairement émis par des charges non linéaires, à base d'électronique de puissance, et/ou déséquilibrées. La puissance réactive peut être aussi consommée par des

charges linéaires inductives comme les moteurs asynchrones qui sont largement présents dans les sites industriels.

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

Ces types de perturbation ont des effets très néfastes sur les équipements électriques. Ces effets peuvent aller des échauffements ou de l'arrêt des machines tournantes jusqu'à la destruction totale de ces équipements.

## I.2.1. Perturbations harmoniques en courant et en tension

### I.2.1.1 Origine des harmoniques

Les convertisseurs électroniques et l'électronique de puissance ont donné naissance à de nombreuses applications nouvelles, offrant aux clients un confort, une flexibilité et une efficacité inégalables. Mais leur prolifération au cours de la dernière décennie est devenue préoccupante et se trouve à l'origine de problèmes dont le nombre ne cesse de croître : ces charges électroniques polluent non seulement le réseau de distribution de courant alternatif, mais elles sont apparemment aussi très sensibles à la distorsion de la tension [2].

Ces équipements électriques sont considérés comme des charges non linéaires émettant des courants harmoniques dont les fréquences sont des multiples entiers de la fréquence fondamentale, ou parfois à des fréquences quelconques [1].

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 perturbations évoquées ci-dessus sont bien comprises, et découlent directement de la prolifération des charges qui consomment un courant non sinusoïdal, appelées « charges non linéaires ». Ce type de charge est utilisé pour assurer la conversion, la variation et la régulation du courant électrique dans les installations commerciales (informatique ou éclairage dans les bureaux,...), industrielles (utilisation des gradateurs, des redresseurs, des variateurs de vitesse...) et résidentielles (téléviseurs, appareils électroménagers en grand nombre) [1],[2].

La perspective d'un retour rapide aux conditions des charges linéaires est illusoire. De récentes études ont démontré que la consommation de courant non linéaire va augmenter de façon très abrupte dans les prochaines années.

Il existe aussi une autre perturbation harmonique qui s'appelle les inter harmoniques (Voire AnnexeI) qui sont des signaux non multiple de la fréquence industrielle. Les variateurs de vitesses pour machines asynchrones, les fours à arc sont les principaux générateurs d'inter harmoniques[4-12].

### I.2.1.2 Conséquences des harmoniques [1,2,3,13,14,15,16]

De nombreux effets des harmoniques sur les installations et les équipements électriques peuvent être cités. Les effets les plus importants sont l'échauffement, l'interférence avec les réseaux.

- L'échauffement : Les pertes totales par effet Joule sont la somme de celles du fondamental et des harmoniques :

$$P_{\text{pertes}} = \sum_{h=1}^{\infty} I_h^2 R \quad (\text{I.1})$$

avec  $I_h$  le courant harmonique de rang  $h$  qui représente le fondamental pour  $h=1$ , et  $R$  la résistance traversée par le courant  $I_h$ . Les harmoniques augmentent aussi les pertes fer (pertes par courants de Foucault). Ils prennent de l'importance dans les matériels utilisant les circuits magnétiques (moteurs, transformateurs...). Ce sont des effets à termes qui se traduisent par une fatigue prématurée amenant à un déclassement des équipements. Ces pertes supplémentaires occasionnées par la présence des courants harmoniques réduisent remarquablement le rendement des équipements tels que les moteurs, les transformateurs,....

- Le vieillissement des isolants est souvent dû à une contrainte en tension consécutive à la présence de la tension harmonique, et donc à une augmentation locale du courant de fuite, ou encore à l'échauffement exagéré dans les conducteurs. Le plus spectaculaire de ce type d'effet est la destruction d'équipement (condensateur, disjoncteur...).
- L'interférence dans les systèmes de télécommunication : Le couplage électromagnétique entre les réseaux électriques et de télécommunication peut provoquer des interférences. L'importance de ces interférences est fonction de l'amplitude et de la fréquence des courants électriques ainsi que de l'importance du couplage électromagnétique entre les réseaux. Dans le cas de résonance, une partie des réseaux de télécommunication peut être rendue inutilisable. On parle ici de compatibilité Electromagnétique (C.E.M) afin de caractériser l'aptitude d'un appareil, ou d'un dispositif, à fonctionner normalement dans un environnement électromagnétique sans produire lui-même des perturbations nuisibles aux autres appareils ou dispositifs.
- Dysfonctionnement de certains équipements électriques : En présence des harmoniques, la tension ou/et le courant peut changer plusieurs fois de signe dans une demi-période, par conséquent, les équipement sensibles au passage par zéro de ces grandeurs électriques sont perturbés.
- Le risque d'excitation de résonance : Ces sont des effets instantanés, les équipements constitués de capacités ou d'inductances peuvent avoir des fréquences de résonance proches de celles des fréquences de résonance. Ce n'est pas le cas lorsque des batteries de capacité sont raccordées au réseau pour relever le facteur de puissance, les fréquences de résonance peuvent devenir assez faibles, et coïncider ainsi avec celles des harmoniques engendrés par les convertisseurs statiques. Dans ce cas, il y aura des phénomènes d'amplification d'harmoniques, il peut apparaître des surtensions ou des surintensités qui puissent détériorer les câbles, les transformateurs, les systèmes de protection, les batteries de capacité....

Différentes grandeurs sont définies pour chiffrer ces perturbations. Parmi celles-ci les plus utilisées sont :

- le taux harmonique de rang  $h$  :

$$THh = \frac{f_h}{f_1} \quad (\text{I.2})$$

Ou  $f_h$  représente la composante harmonique de rang  $h$ ,  $f_1$  représente la composante fondamentale,

- le taux global de distorsion harmonique : On caractérise la pollution d'un réseau de manière globale par le taux de distorsion harmonique en tension ou en courant :

$$TDH = 100 \cdot \sqrt{\sum_2^{\infty} \frac{f_h^2}{f_1^2}} \quad (I.3)$$

En général, les harmoniques pris en compte dans un réseau électrique sont inférieurs à 2500 Hz (rang 50), ce qui correspond au domaine des perturbations basses fréquences au sens de la normalisation. Les harmoniques de fréquence plus élevées sont fortement atténuées par l'effet de peau et par la présence des Inductances de lignes. De plus, les appareils générant des harmoniques ont, en grande majorité un spectre d'émission inférieur à 2500 Hz, c'est la raison pour laquelle le domaine d'étude des harmoniques s'étend généralement de 100 à 2500 Hz c'est-à-dire des rangs 2 à 50 [1].

- le facteur de puissance :

Normalement, pour un signal sinusoïdal le facteur de puissance est donné par le rapport entre la puissance active  $P$  et la puissance apparente  $S$ . Les générateurs, les transformateurs, les lignes de transport et les appareils de contrôle et de mesure sont dimensionnés pour la tension et le courant nominaux. Une faible valeur du facteur de puissance se traduit par une mauvaise utilisation de ces équipements.

Dans le cas où il y a des harmoniques, une puissance supplémentaire appelée la puissance déformante ( $D$ ), apparaît comme le montre la définition donnée par C. Budeanu et approuvée par un groupe de travail IEEE en 1977[17,18].

C. Budeanu a eu donné les définitions des puissances dans le cas périodique non-sinusoidal :

La puissance active dans le cas périodique non-sinusoidal est définie par :

$$P = \sum_n P_n = \sum_n U_n I_n \cos \Phi_n \quad (I.4)$$

Où :  $U_n$  et  $I_n$  sont les valeurs RMS ( Real Mean Square) de la tension et du courant harmonique d'ordre  $n$ , et  $\Phi_n$  est le déphasage entre eux. La puissance réactive est définie par :

$$Q = \sum_n Q_n = \sum_n U_n I_n \sin \Phi_n \quad (I.5)$$

Cependant, ces définitions ne sont pas conformes à l'équation de triangle des puissances :

$$S^2 = P^2 + Q^2 \quad (I.6)$$



La puissance apparente est définie par :

$$S^2 = U^2 I^2 = \sum_n U_n^2 \sum_n I_n^2 \tag{I.7}$$

Alors :

$$S^2 = \sum_n U_n^2 \sum_n I_n^2 \geq \left( \sum U_n I_n \cos \Phi_n \right)^2 + \left( \sum U_n I_n \sin \Phi_n \right)^2 \tag{I.8}$$

Donc une quantité nommée la puissance déformante est ajoutée par C. Budeanu selon l'équation suivante :

$$D^2 = S^2 - P^2 - Q^2 \tag{I.9}$$

On peut donc écrire la puissance apparente de la manière suivante :

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \tag{I.10}$$

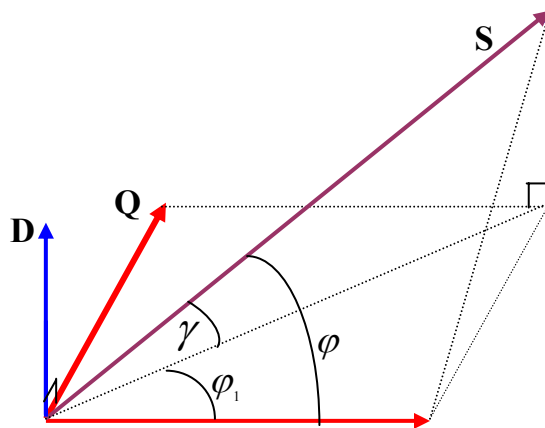


Fig. I.1 : Diagramme de Fresnel de la puissance déformante

La puissance déformante se compose principalement des produits croisés de la tension et du courant harmonique de différents ordres et sera réduite à zéro si les harmoniques sont réduits à zéro, c.-à-d. aux conditions sinusoïdales.

$$D^2 = \sum \prod_{\substack{i=2 \\ j=2 \\ i \neq j}}^{\infty} U_i^2 I_j^2 \tag{I.11}$$

Si uniquement le courant est non-sinusoidal alors :

$$D = U_1 \sqrt{\sum_2^{\infty} I_h^2} \tag{I.12}$$

L'inconvénient majeur de cette définition est que si il n'est pas sûr que le facteur de puissance sera égal à l'unité si la puissance réactive (par cette définition) est réduite à zéro et que la puissance réactive peut être totalement compensée en insérant des composants inductifs ou capacitifs.

- Le facteur de puissance (F.P.) devient :

$$F.P = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} = \cos \varphi \cdot \cos \gamma \tag{I.13}$$

On voit bien que les harmoniques affectent aussi le facteur de puissance.

### I.2.1.3 Réglementation

La qualité du courant électrique devient donc une préoccupation importante pour les distributeurs d'énergie et pour leurs clients ; ils adoptent donc, les uns comme les autres, la philosophie et les limites proposées par la norme.

#### I.2.1.3.1 La norme EN 50160

Il donne Les caractéristiques de tension de l'électricité fournie par le système de distribution public », cette réglementation est publiée par CENELEC (European Committee for Electrotechnical Standardization) défini les caractéristiques principales de la basse et moyenne tension fournie par le réseau public de distribution au PCC (point commun de couplage) [19] :

Tab.I.1 : Réglementation EN de la tension au PCC.

Les harmoniques impaires				Harmoniques paires	
Non multiple de 3		Multiple de 3			
Ordre	$U_h/U_1$ (%)	Ordre	$U_h/U_1$ (%)	ordre	$U_h/U_1$ (%)
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,5	6...24	0,5
13	3	21	0,5		
17	2				
19	1,5				
23	1,5				
25	1,5				

## I.2.1.3.2 La norme IEC 61000

Tab.I.2 : IEC 61000 « International Electrotechnical Commission » standards [4,5,20]

Les harmoniques impaires				Harmoniques paires	
Non multiple de 3		Multiple de 3			
Ordre	$U_h/U_1$ (%)	Ordre	$U_h/U_1$ (%)	ordre	$U_h/U_1$ (%)
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,3	6	0,5
13	3	21	0,2	8	0,5
17	2	>21	0,2	10	0,5
19	1,5			12	0,2
23	1,5			>12	0,2
25	1,5				
>25	$0,2+0,5 \times 25/n$				

Les limites de la distorsion harmonique de tension sont données en trois classes selon la catégorie du réseau :

Classe 1 : S'applique aux réseaux protégés, il a les niveaux les plus bas de compatibilité (inférieurs à celui des réseaux publics). Elle concerne l'utilisation des dispositifs et les équipements très sensibles aux perturbations électriques, les instrumentations technologique des laboratoires, certaines systèmes automatiques, équipements de protection et ordinateurs spécifiques, etc.

Classe 2 : S'applique au PCC et les points de connections internes dans l'environnement industriel en général, elle s'applique aussi au réseaux publique.

Classe 3 : Est seulement applicable aux points internes de raccordement des environnements industriels. Le niveau de possibilités est plus grand que celui de la classe 2 pour certaines perturbations. Cette classe devrait toujours être considérée toutes les fois qu'une de ces conditions est rencontrée :

- La plupart des charges alimentées par des convertisseurs statiques ;
- Les machines de soudage ;
- Actionneur à grande puissance et à démarrage très fréquent ;
- Les charges à variation rapide.

Tab.I.3 : Taux de distorsion total permissible des tension

	classe1	classe2	classe3
THD	5%	8%	10%

I.2.1.3.3 ANSI/IEEE 519-1992 [21,22]

Tab.I « Les limites de distorsion des harmoniques »

La distorsion maximale du courant harmonique en % de IL						
Les harmoniques individuelles (les harmoniques impaires)						
ISC/IL	<11	11<h<17	17<h<23	23<h<33	h>33	THD
<20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20-50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50-100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100-1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Les harmoniques paires sont limitées à 25% des harmoniques impaires ainsi, citées

I.2.1.3.4 Le Contrat EMERAUDE d’EDF [1]

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

De son côté, EDF s’engage à ce que les taux individuels de tension harmonique, exprimés en pourcentage de la tension fondamentale V1 pour les réseaux HTA (1 à 50 kV), ne dépassent pas les seuils donnés dans le tableau ci-dessous.

Tab.I.4 « Engagement EMARAUDE sur les harmoniques de tension (réseau HTA) »

Harmoniques impaires				Harmoniques paires	
Non multiple de 3		Multiple de 3			
Rang	$U_h/U_1$ (%)	Rang	$U_h/U_1$ (%)	Rang	$U_h/U_1$ (%)
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,5	6 à 24	0,5
13	3	21	0,5		
17	2	Le THD global de tension ne dépassant pas 8 %			
19	1,5				
23	1,5				
25	1,5				

Tab.I.5 : « Engagement EMARAUDE sur les harmoniques de tension (réseau HTB) »

Harmoniques impaires				Harmoniques paires	
Non multiple de 3		Multiple de 3			
Rang	$\frac{U_h}{U_1}(\%)$	Rang	$\frac{U_h}{U_1}(\%)$	Rang	$\frac{U_h}{U_1}(\%)$
5 et 7	2	3	2	2	1,5
11 et 13	1,5	9	1	4	1
17 et 19	1	15 et 21	0,5	6 à 24	0,5
23 et 25	0,7	Le THD global de tension ne dépassant pas 3 %			

Tab.I.6 : Les règles de limitation des courants harmoniques recommandées aux clients par EDF

Rangs impairs	$\frac{I_h}{I_1}(\%)$	Rangs pairs	$\frac{I_h}{I_1}(\%)$
3	4	2	2
5 et 7	5	4	1
9	2	>4	0,5
11 et 13	3		
>13	2		

Les limitations en tension harmoniques que les clients de l'EDF doivent respecter sont :

- Pour une harmonique paire :  $\frac{U_h}{U_1}(\%) \leq 0.6\%$  .
- Pour une harmonique impaire :  $\frac{U_h}{U_1}(\%) \leq 1\%$  .
- Pour le taux de distorsion global de tension :  $THD \leq 1.6\%$  .

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

Concernant la puissance réactive, EDF autorise ses clients à en consommer, sans être facturé, jusqu'à 40% de la puissance active absorbée. Cela se traduit, pour des charges linéaires, par un facteur de puissance 0,928 ou par un angle de phase 21,8°[25].

## I.2.2 Déséquilibre du courant et de la tension

### I.2.2.1 Origine du déséquilibre

Le déséquilibre du système triphasé s'observe lorsque les trois tensions ne sont pas égales en amplitude et/ou déphasées de  $120^\circ$  les unes par rapport aux autres. Un récepteur triphasé électrique qui n'est pas équilibré et que l'on alimente par un réseau triphasé équilibré conduit à des déséquilibres de tension dus à la circulation de courants non équilibrés dans les impédances du réseau. Ceci est fréquent pour les récepteurs monophasés basse tension. Mais cela peut également être engendré, à des tensions plus élevées, par des machines à souder, des fours à arc ou par la traction ferroviaire [1].

### I.2.2.2 Conséquences du déséquilibre

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

- Mauvais fonctionnement d'un appareil monophasé alimenté par une tension très faible (lampe à incandescence qui fournit un mauvais éclairage),
- L'augmentation de l'échauffement des machines asynchrones, l'existence de couple inverse créée par les composantes inverses issues du déséquilibre.
- Destruction d'un appareil monophasé alimenté par une tension trop élevée, il peut être détruit (claquage d'un filament de lampe par surtension).
- Dégradation prématurée des machines.
- Concernant les dispositifs triphasés d'électronique de puissance principalement les ponts redresseurs, le fonctionnement en présence de déséquilibre entraîne l'apparition de composantes harmoniques non caractéristiques, notamment des harmoniques de rang multiple de 3. L'apparition de ces courants harmoniques peut poser des problèmes, comme la génération d'une anti-résonance lors du filtrage de l'harmonique de rang 5. Outre les effets classiques des harmoniques, ces fréquences non caractéristiques peuvent conduire, dans certains cas, au blocage de la commande.
- Concernant l'effet du déséquilibre homopolaire, il faut signaler le risque d'échauffement du conducteur neutre dans un réseau BT qui, lorsque le conducteur est d'un diamètre trop faible, peut provoquer une rupture du conducteur ou un incendie.

### I.2.2.3 Réglementation

La quantification du phénomène fait appel à la décomposition de la composante fondamentale selon les composantes symétriques de Fortescue. On définit un degré de déséquilibre inverse  $\tau_{vi}$  donné par le rapport des amplitudes des tensions inverse et directe :

$$\tau_{vi} = \frac{U_i}{U_d} \quad (I.14)$$

et le déséquilibre homopolaire de tension :

$$\tau_{v0} = \frac{U_0}{U_d} \quad (I.15)$$

### I.2.2. 3.1 EN 50160 : [19]

La norme EN50160 fixe le taux de déséquilibre inverse admissible à 2 % sur les valeurs efficaces calculées sur 10 minutes pour 95 % du temps d'une semaine.

#### I.2.2.3.2 Contrat EMERAUDE :[1]

D'après le contrat EMERAUDE, EDF s'engage à fournir, aux clients raccordés aux réseaux HTA (1 à 50 kV) et HTB (50 à 130 kV), une tension dont le taux de déséquilibre moyen ne dépasse pas 2 %.

Le fournisseur EDF, à travers le contrat EMERAUDE, permet aux clients de s'alimenter au réseau électrique sans réserve pour des charges perturbatrices inférieures ou égales à :

- 500 kVA pour une puissance de court-circuit de 40 MVA de 1 à 50 kV,
- 4 MVA pour une puissance de court-circuit de 400 MVA de 63 à 90 kV
- 15 MVA pour 1500 MVA de puissance de court-circuit à 225 kV.

Cependant EDF demandera aux clients qui ne sont pas couverts par ces champs de ne pas provoquer un taux de déséquilibre supérieur à 1 %.

## I.2.3 Creux de tension

### I.2.3.1 Origine des creux de tension

Un creux de tension est une diminution brusque de la tension de fourniture. Cette diminution, située entre 90% et 10% de la tension nominale, est suivie du rétablissement de la tension après un court laps de temps. Un creux de tension peut durer de 10 ms à 3 mn.[1,23]

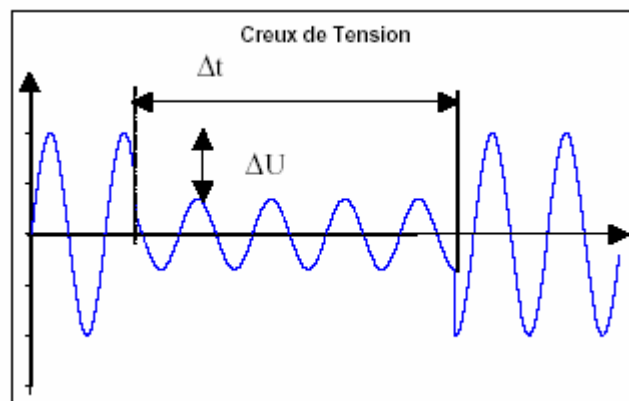


Fig. I.2 : perturbation du creux de tension

Il est caractérisé par :

- sa profondeur  $\Delta U$  ;
- sa durée  $\Delta t$ .

La plupart des appareils électriques admettent une coupure totale d'alimentation d'une durée inférieure à 10 ms. Il y a deux types de phénomènes à l'origine des creux de tension :

- ceux provenant du fonctionnement d'appareils à charge fluctuante ou de la mise en service d'appareils appelant un courant élevé au démarrage (moteurs, transformateurs...etc.),

- ceux liés aux phénomènes aléatoires, comme la foudre ou tous les courts-circuits accidentels sur les réseaux de distribution, ou les réseaux internes des clients (défaut d'isolation, blessure de câble, projection de branches sur les lignes aériennes).

Une coupure brève est un cas particulier du creux de tension, sa profondeur est supérieure à 90 % et elle est caractérisée uniquement par sa durée (inférieure à 3 minutes). On observe un plus grand nombre de creux de tension et de coupures sur les réseaux aériens que sur les réseaux souterrains du fait des intempéries (excepté, bien entendu, s'ils sont raccordés sur le même départ). Les creux de tension sont caractérisés par leur amplitude et par leur durée. Ils sont monophasés, biphasés ou triphasés suivant le nombre de phases concernées.

### I.2.3.2 Conséquences des creux de tension

Les creux de tension sont susceptibles de perturber le fonctionnement de certaines installations industrielles et tertiaires. En effet, ce type de perturbation peut causer des dégradations de fonctionnement des équipements électriques qui peuvent aller jusqu'à la destruction totale de ces équipements. Le Tableau I.7 résume les conséquences néfastes causées par les creux de tension sur quelques matériels industriels et tertiaires sensibles.[23,24]

### I.2.3.3 Réglementation

#### I.2.3.3.1 EN 50160 :[19]

La norme EN50160 fixe la diminution de la tension à une valeur située entre 1 et 90 % de la tension nominale pendant une durée de  $\frac{1}{2}$  période à 50 Hz soit 10 ms jusqu'à une minute. La mesure d'un creux de tension s'effectue par la détermination de la valeur efficace de la tension toutes les  $\frac{1}{2}$  périodes (avec recouvrement d'une  $\frac{1}{2}$  période).

Une coupure brève est un cas particulier du creux de tension. Sa profondeur est supérieure à 90 % et elle est caractérisée uniquement par sa durée (inférieure à 3 minutes). Les coupures longues sont supérieures à 3 minutes.

#### I.2.3.3.2 Contrat EMERAUDE :[1]

L'engagement d'EDF, à travers le contrat EMERAUDE, se présente sous forme de seuils, les creux de tension étant caractérisés par leur profondeur et leur durée, avec des limites de 30% et de 600 ms [1], comme le montre la Fig. I.3.

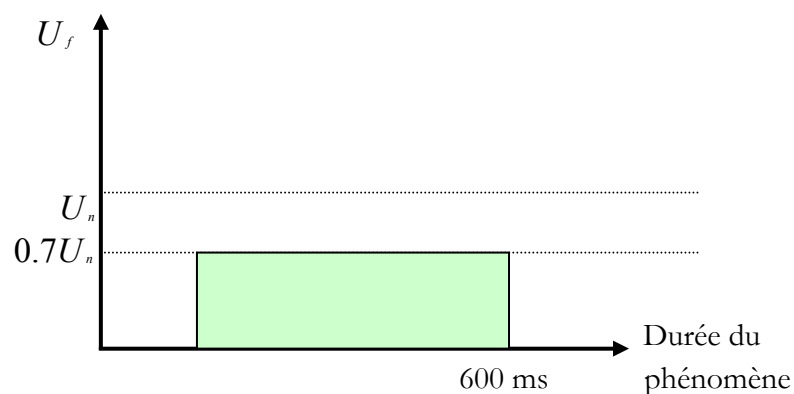


Fig. I.3 : Les limites sur les creux de tension



Tab.I.7: Conséquences des creux de tension sur des équipements électriques sensibles [1,23,24]

Types d'appareils	Conséquences néfastes
Eclairage	Moins de luminosité, extinction et réallumage (lampes à arc)
Systèmes à base d'électronique de puissance	Arrêt du dispositif
Dispositifs de protection	Ouverture des contacteurs
Moteurs asynchrones	Ralentissements, décrochage, surintensité au retour de la tension
Moteurs synchrones	Perte de synchronisme, décrochage et arrêt du moteur
Variateurs de vitesse pour un moteur à courant continu	<ul style="list-style-type: none"> <li>• En mode onduleur : destruction des protections</li> <li>• En mode redresseur : ralentissement de la machine</li> </ul>
Variateurs de vitesse pour un moteur asynchrone	Ralentissement, décrochage, surintensité au retour de la tension, destruction éventuelle de matériel au niveau du convertisseur

## I.2.4 Fluctuation Rapide de la tension

La fluctuation rapide de la tension est une diminution de la valeur efficace de la tension de moins de 10 %. La tension est modulée en amplitude par une enveloppe dont la fréquence est comprise entre 0.5 et 30 Hz.

### I.2.4.1 Origine de la fluctuation rapide de la tension

- Propagation sur les lignes du réseau d'appels de courants importants à la mise en service ou hors service d'appareil dont la puissance varie de manière rapide (les moteurs à démarrages fréquents,...) ;

- Perturbations engendrées par les fours à arc et les machines à souder : Le principe du four à arc est de faire fondre de la ferraille par circulation de très forts courants (plusieurs dizaines de milliers d'Ampères) en créant un arc électrique entre elle et une électrode au potentiel (d'environ 1000 Volts). Le procédé est performant, mais engendre des perturbations sur le réseau électrique qui l'alimente. En effet, l'arc électrique étant de nature instable, le courant appelé par le four varie très fortement en amplitude et en phase, ce qui entraîne des fluctuations de tension à des fréquences globalement comprises entre 1 et 30 Hertz. Or, dans cette gamme de fréquences, l'œil est très sensible aux papillotements de l'éclairage dus à ces fluctuations de tension. Le phénomène est appelé "flicker".

### I.2.4.2 Conséquences des « Flicker »[7-10]

Les conséquences de la fluctuation rapide de la tension s'observent essentiellement sur les lampes à incandescence où elle provoque un papillotement du flux lumineux (Flicker). Cette gêne visuelle est perceptible pour une variation de 1 % de la tension.

### I.3 Compensation des perturbations dans un réseau électrique de distribution

Ils existent deux solutions afin de compenser toutes les perturbations, en courant et en tension :

- Solutions classiques (anciennes méthodes) ;
- Solutions modernes (méthodes récentes à base d'électronique de puissance).

#### I.3.1 Solutions de compensation classiques

Suivant le type de perturbation, courant et tension, deux solutions classiques de compensation sont analysées.

##### I.3.1.1 Compensation des courants perturbateurs

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

###### I.3.1.1.1 Rééquilibrage des courants du réseau électrique

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

Il existe une solution classique par la mise en place d'un compensateur passif composé d'inductance et de condensateur, selon la figure suivante :

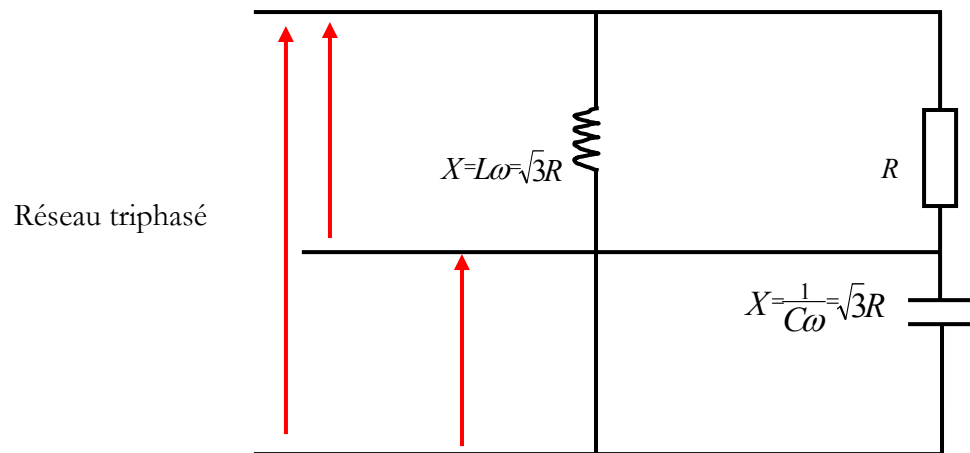


Fig. I.4 : Compensateur de déséquilibre, appelé montage de Steinmetz [25].

Ce montage est calculé à une fréquence bien déterminée, dans notre cas c'est la fréquence du réseau [25].

###### I.3.1.1.2 Compensation de la puissance réactive

La puissance réactive est majoritairement consommée par les moteurs asynchrones et plus récemment par des dispositifs à base d'électronique de puissance. Le but des méthodes de

compensation est d'améliorer le facteur de puissance. La solution classique 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 [1]. D'autres inconvénients prépondérants seront discutés par la suite.

### I.3.1.1.3 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 diminuer la distorsion harmonique,
- l'utilisation de dispositifs de filtrage pour réduire la propagation des harmoniques produits par des charges non linéaires.

Le principe de filtrage consiste à placer en amont un ou plusieurs circuits accordés sur les harmoniques à rejeter. Ainsi, pour filtrer un courant à une fréquence particulière, un filtre résonant série RLC est placé en parallèle sur le réseau ( Fig.I.5). Cependant, ce type de filtre est très sélectif. Aussi, pour atténuer toute une bande de fréquence, un filtre passe-haut du second ordre (Fig.I.6) est préférable. De cette façon, les courants provenant de la source perturbatrice sont écoulés dans le filtre et n'entrent pas, ou très peu dans le réseau. La partie qui pénètre dans le réseau dépend des performances du filtrage [1,14,26].

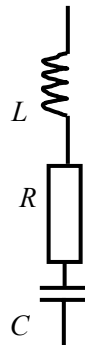


Fig. I.5 : Filtre passif résonant

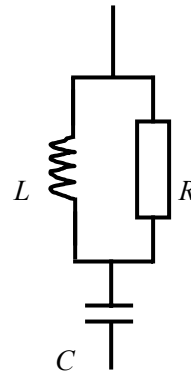


Fig. I.6 : Filtre passif amorti

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 celle de rang faible [26].

Ces dispositifs de filtrage peuvent aussi être utilisés pour compenser la puissance réactive. Malgré leur large utilisation dans l'industrie, ces dispositifs peuvent présenter beaucoup d'inconvénients :[1]

- s'adaptent mal aux variations du réseau et de la charge,
- équipements volumineux,
- problèmes de résonance avec l'impédance du réseau.

- Problèmes d'anti-résonance, si le réseau est peu chargé.

Le tableau I. donne des valeurs typiques d'un système utilisant des filtres passifs pour l'élimination du 5<sup>ème</sup>, 7<sup>ème</sup>, 11<sup>ème</sup>, 13<sup>ème</sup> harmoniques et un filtre passe haut à partir de la fréquence 850 Hz.

Tab.I . Les paramètres des filtres passifs [27]

	L(mH)	C(μF)	R(mΩ)	kVAR
Système	2.8	-	-	
Filtre du 5 <sup>ème</sup> harmonique	, ± 2%	42.8 ± 3%	760	13800
Filtre du 7 <sup>ème</sup> harmonique	5.85 ± 2%	36.4 ± 3%	630	10200
Filtre du 11 <sup>ème</sup> harmonique	3.07 ± 2%	27.8 ± 3%	520	7800
Filtre du 13 <sup>ème</sup> harmonique	2.19 ± 2%	27.8 ± 3%	440	7800
Filtre passe haut (17 <sup>ème</sup> harmonique)	1.28 ± 2%	27.8 ± 3%	25000	7800

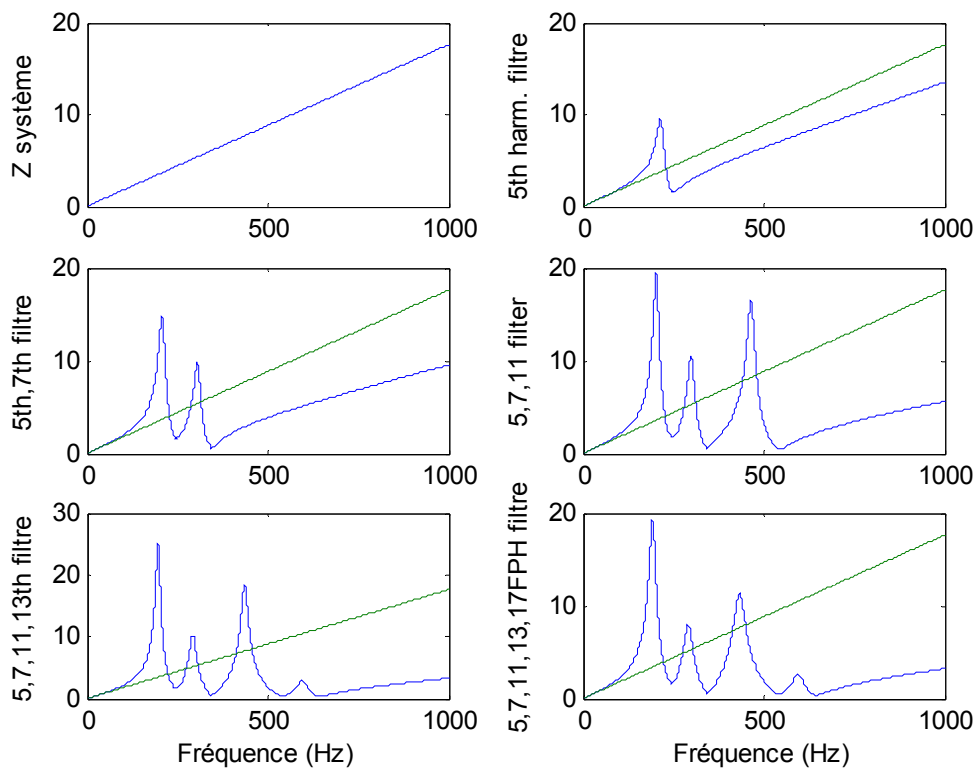


Fig. I.7 : La valeur de l'impédance avec et sans filtres passifs

### I.3.1.2 Compensation des tensions perturbatrices

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

Pour les deux derniers types de perturbation, la solution est de limiter la circulation des courants perturbateurs en utilisant les solutions traditionnelles présentées précédemment.

La solution classique contre les creux de tension et les surtension, dans un réseau de distribution sensible (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 restent un problème. Il faut donc une solution plus satisfaisante du côté fournisseur d'énergie et utilisateur.

### I.3.2 Solutions de compensation modernes

Les solutions de dépollution traditionnelles ne répondent plus à l'évolution des réseaux électriques et des charges à protéger, comme nous venons de le décrire précédemment, d'autres solutions modernes ont été proposées.

#### I.3.2.1 Dépollution 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 à 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 [1,15,28].

Aujourd'hui, et afin d'accompagner l'évolution des contraintes du fournisseur et du consommateur, les récents progrès en matière de technologie de l'électronique de puissance apportent une capacité sans précédent de compensation et de correction de la distorsion harmonique générée par les charges non linéaires, sans imposer un changement aux installations. Le principe de compensation est basé sur l'injection, au point de connexion, du courant harmonique absorbé par la charge.

Cette seconde génération de Compensateur Actif utilise les technologies les plus récentes, telles que IGBT et DSP. Il en résulte une compacité et une compétitivité inégalées, combinées avec des taux de réduction des harmoniques exceptionnels.

Ce nouveau compensateur actif révolutionnaire est sans doute le plus facile à utiliser, le plus flexible, le plus efficace et le plus rentable, avec une capacité de compensation satisfaisante de courants harmoniques [2].

#### I.3.2.2 Dépollution des tensions perturbatrices

Actuellement il existe plusieurs solutions de compensation contre les perturbations de tension, par exemple la compensation des creux de tension et les surtensions brèves se basent sur l'utilisation de dispositifs de compensation à réserve d'énergie comme les ASIs (Alimentation Sans Interruption). Ces dispositifs sont branchés en série entre le réseau polluant et les charges à protéger afin d'assurer une fourniture de l'énergie électrique même pendant les creux de tension ou les coupures brèves. Le problème est que ces dispositifs sont limités en puissance, et qui n'ont pas une grande flexibilité pour qu'ils puissent toujours s'adapter face aux perturbations de tension [27].

Afin de réaliser une solution flexible universelle de dépollution de toutes les perturbations de tension des réseaux électriques, les creux de tension, les surtensions transitoires et brèves et la distorsion de la forme d'onde, une famille de filtres actifs séries a été proposée.

### I.3.2.3 Filtres actifs

L'apparition de nouveaux composants semi-conducteurs, comme les thyristors GTO et les transistors IGBT, a permis d'envisager de nouvelles solutions de compensation des perturbations du réseau électrique. Les filtres actifs constituent une alternative intéressante aux solutions classiques, flexibles et auto-adaptatifs, ils viennent s'ajouter à des structures déjà existantes de convertisseurs. Ils peuvent également être utilisés comme complément aux solutions traditionnelles de 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 [1,14,32].

Dans cette partie du chapitre, nous allons introduire les principales structures, proposées dans la littérature, à savoir les filtres actifs parallèle, série, combiné parallèle-série et les structures hybrides actif-passif.

#### I.3.2.3.1 Le filtre actif parallèle (F.A.P)

Le filtre actif shunt est un onduleur (de courant ou de tension) à base de MLI, connecté en parallèle directement ou via un transformateur shunt avec un filtre de sortie de type L, LC, ou LCL, ainsi présentant des filtre passe bas limitant la propagation des composantes de hautes fréquence. On le contrôle de manière à ce qu'il injecte dans le réseau le courant nécessaire à la compensation des harmoniques de la charge polluante : il agit comme une source réglable d'harmoniques de courants. 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 (F.A.P) 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 du point de connexion du filtre actif. De plus, le filtre shunt peut amortir les résonances parallèles dues à l'interaction entre un filtre passif et l'impédance du réseau [1,14,32].

Les premiers principes de fonctionnement des filtres actifs parallèles ont été présentés dans la littérature dès le début des années 1970. En 1976, une première famille de filtre actif parallèle a été conçue à partir d'onduleurs à transistors de puissance commandés en MLI. Le but principale étaient pour compenser les harmoniques générées par les charges non linéaires, le problème rencontré Dans cette époque était de trouver des interrupteur semi-conducteur capables de fonctionner aux fréquences de commutation nécessaire pour la fourniture des tensions satisfaisantes à la création des courants de compensation.

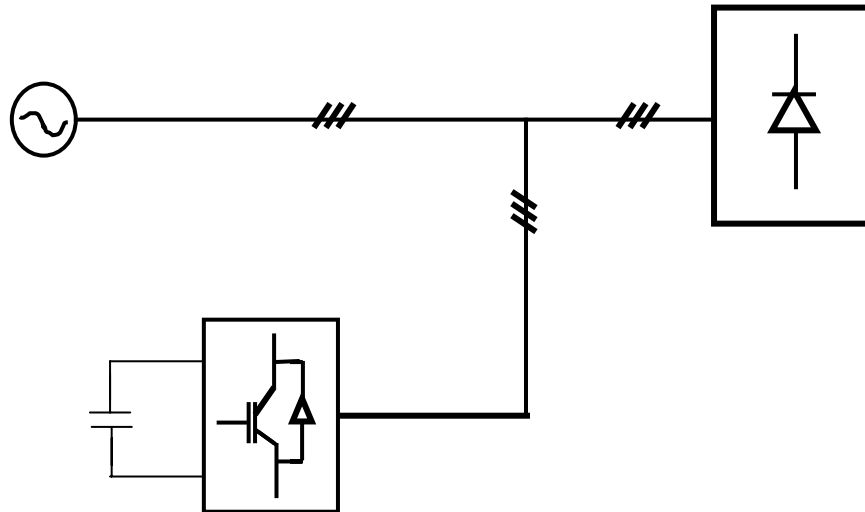


Fig. I.7 : Topologie du filtre actif shunt

Dès 1977, il a été conçu le premier prototype de filtre actif parallèle à base de thyristors à commutations naturelles pour la compensation de courant harmonique. Cependant, l'application des onduleurs à base de thyristor a tout de suite posé le problème de la génération non désirée de composantes injectées sur le réseau à la fréquence de commutation. La même raison a également empêché l'utilisation de compensateurs statiques parallèles à thyristors, lesquels avaient été conçus pour la compensation conjointe de la puissance réactive et des courants déséquilibrés.

Au cours des années 1980, des progrès importants dans le domaine des semi-conducteurs ont permis de développer de nouveaux composants de puissance associant hautes fréquences de commutation et fortes puissances. Profitant de ces avancées, et de l'avènement des interrupteurs de puissance du type GTO et IGBT, de nombreux onduleurs de puissance, commandés en MLI ou en hystérésis, ont pu être conçus en vue de répondre aux contraintes industrielles de conception des filtres actifs parallèles. Ainsi, ces derniers ont commencé à être commercialisés et installés à travers le monde, et plus spécialement dans les pays les plus industrialisés comme le Japon. Ces premiers prototypes ne compensaient alors que les perturbations harmoniques de courant. Suite à ces premiers développements, d'autres types de filtre actif parallèle ont pu être réalisés pour compenser à la fois la puissance réactive, et/ou les harmoniques et les déséquilibres de courant.

#### I.3.2.3.2 Le filtre actif série (F.A.S)

Ce type de compensateur, connecté en série sur le réseau de distribution, via un transformateur série. Il est commandé de manière à présenter une impédance minimale à la fréquence fondamentale et une résistance de valeur aux fréquences harmoniques. Il se comporte comme un dispositif d'isolation bloquant ainsi la circulation des courants harmoniques de la charge polluante vers la source et de la source d'alimentation vers les autres charges : il opère comme une source contrôlable d'harmoniques qui s'oppose aux tensions perturbatrices (creux, déséquilibre, harmonique) venant de la source et également à celles provoquées par la circulation

des courants perturbateurs venant de la charge polluante. Ainsi la tension aux bornes de la charge à protéger est purement sinusoïdale.[1,14,29,30,32].

En 1976 [28], une famille de filtres actifs séries avec des onduleurs à transistors contrôlés en MLI a été présentée. Un compensateur statique pour le rééquilibrage de la tension du réseau électrique a été proposé en 1985. La génération, par l'onduleur à thyristors, des composantes non désirées, ayant une faible fréquence de commutation, a découragé l'avancement pratique de cette solution. En 1990[31], un compensateur de tension à base d'onduleur de tension triphasé a été proposé pour compenser le déséquilibre de tension de réseau électrique. D'autres articles ont introduit le problème des creux de tension et la solution de compensation par le compensateur actif série[1].

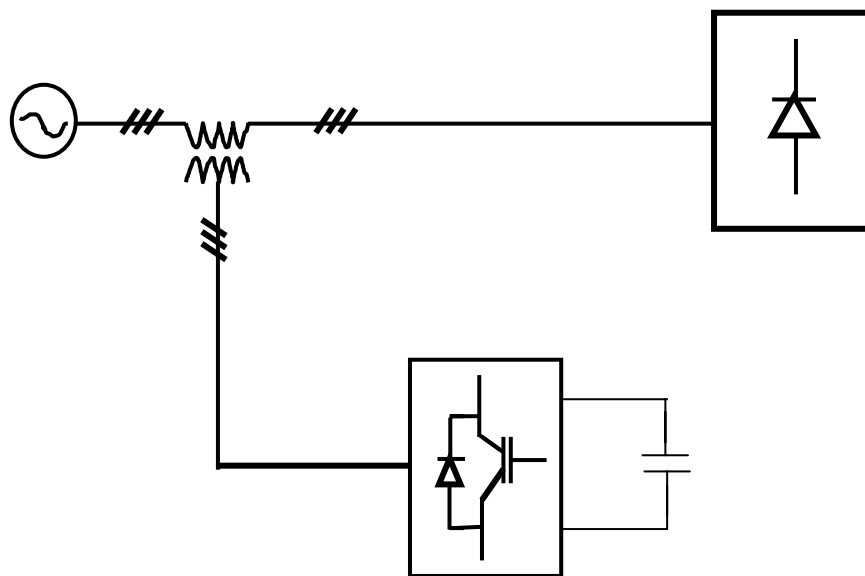


Fig. I.8 : Topologie du filtre actif série

### I.3.2.3.3 La combinaison parallèle-série actifs (UPQC)

La topologie universelle ou la structure série-shunt est l'association, via un condensateur de stockage, du filtre actif série et du filtre actif shunt. Cette structure, dénommée Conditionneur universel de la qualité d'onde ou UPQC (Unified Power Quality Conditionner), correspond au Régulateur de puissance universel (UPFC) en distribution.

Dans cette structure, la fonction du filtre série est d'isoler les harmoniques et de compenser la puissance réactive et la variation/déséquilibre de tension due au Flicker, alors que l'objectif du filtre shunt est de compenser les harmoniques et/ou les composantes négatives des courants et de réguler la tension de la liaison continue.

Profitant des avantages des deux filtres actifs, l'UPQC assure un courant et une tension sinusoïdaux du réseau électrique à partir d'un courant et d'une tension perturbés de celui-ci [29,30,32].



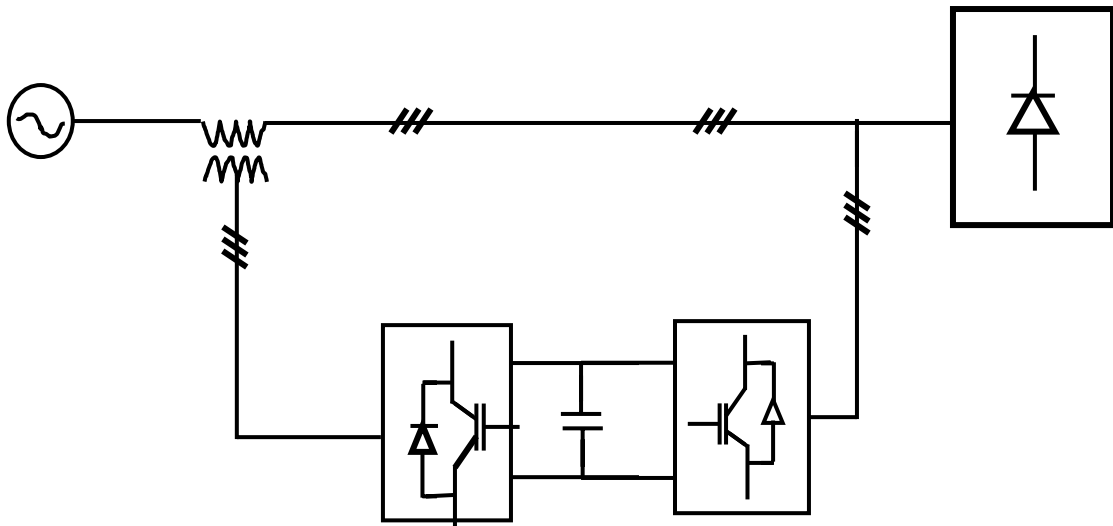


Fig. I.9 : Topologie de l' UQPF

#### I.3.2.3.4 Combinaison hybride active et passive

La topologie hybride est une structure qui associe le filtre actif (série ou shunt) au filtre passif shunt. La structure hybride est née du besoin de l'amélioration du rendement et de la réduction des coûts (réduire le dimensionnement) des filtres actifs à topologie simple [29,30].

Dans cette structure hybride, le filtre passif est constitué de 1 ou 2 groupes d'éléments LC accordés aux basses fréquences ( 5 et 7) et d'un second ensemble d'éléments LC accordé aux hautes fréquences. 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 [1,32].

Plusieurs configurations ont été présentées dans la littérature, les plus étudiées étant :

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

#### I.3.2.3.5 Le filtre actif série avec des filtres passifs parallèles

Le rôle du filtre actif série dans ce cas est d'empêcher les courants harmoniques de circuler vers le réseau et de les obliger à passer par les filtres passifs raccordés à leurs fréquences [32].

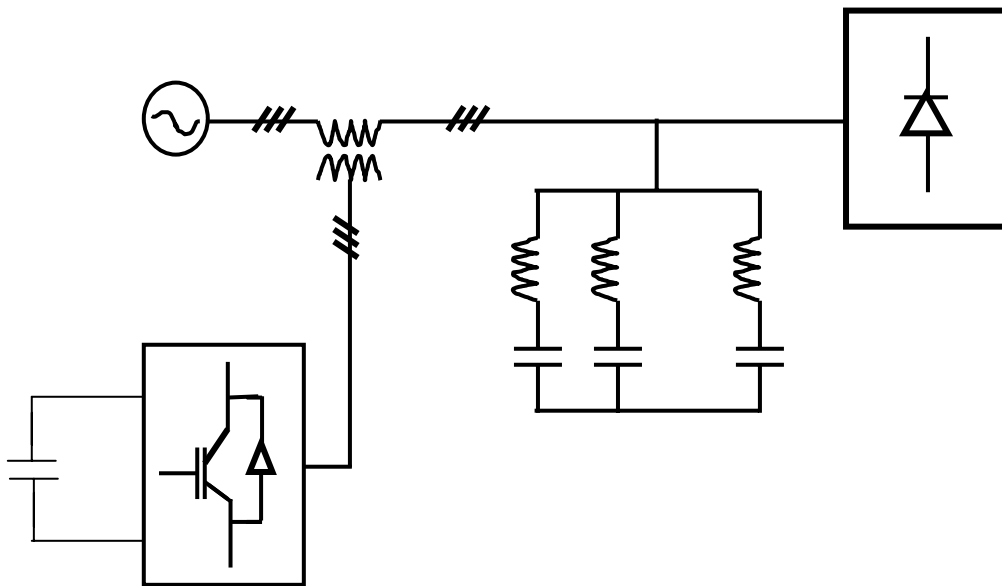


Fig. I.10. : Topologie du Filtre hybride : actif série avec filtre passif parallèle

#### I.3.2.3.6 Le filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles

Ce montage a un avantage économique par rapport au précédent, on remarque dans ce cas que le courant généré par le filtre actif est réduit, ce que implique la réduction du dimensionnement de l'onduleur constituant le filtre actif, ainsi que l'unité de stockage de l'énergie du côté DC. De plus, le filtre actif série est à l'abri d'un éventuel court-circuit de la charge[32].

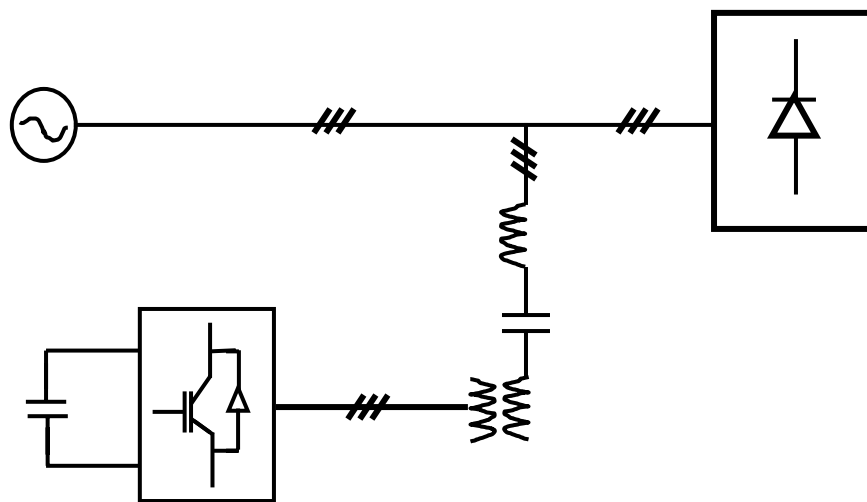


Fig. I.11 : Topologie du filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle

#### I.3.2.3.7 Le filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles

Le rôle du filtre actif parallèle dans cette configuration, montrée en Fig. I.11, est la compensation des courants harmoniques basses fréquences injectés par la charge polluante. Tandis que le filtre passif est monté en parallèle entre la charge, le filtre actif est accordé sur une fréquence élevée, à fin d'assurer l'élimination des composantes harmoniques à fréquence élevée y compris celles générées par le phénomène de commutation du filtre actif parallèle. Ce type de

filtrage a déjà été appliqué à la compensation des courants harmoniques émis par un cycloconvertisseur de forte puissance [1.32].

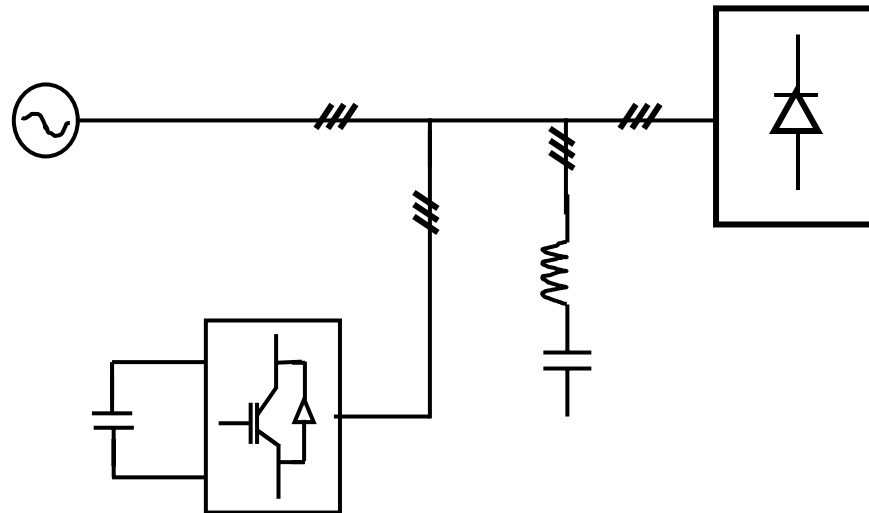


Fig. I.12 : Topologie du filtre actif shunt en parallèle avec un filtre passif

#### IV. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté différents types de perturbations affectant l'onde de tension du réseau électrique. Comme nous avons pu le constater, les harmoniques et les déséquilibres de courant et de tension, les creux de tension et un facteur de puissance relativement faible ont des effets néfastes sur les équipements électriques. Ces effets peuvent causer des échauffements et des dégradations du régime de fonctionnement jusqu'à la destruction totale de ces équipements.

Dans nos jours plusieurs solutions modernes sont proposées pour la compensation des différentes perturbations dans les réseaux électriques. Les solutions classiques à base de filtres passifs deviennent de plus en plus des solutions qui ne répondent pas aux exigences des normalisations et l'évolution de la charge non linéaire, elles sont souvent pénalisées en termes d'encombrement et de résonance.

Actuellement le filtrage actif présente une solution plus adaptée aux différentes charges non linéaires et linéaires. On trouve les filtres actifs parallèles et séries, et leur combinaison. Dans cette thèse nous étudions en premier temps le filtre actif parallèle pour la compensation des différentes perturbations générées par les courants, même sous une source de tension non équilibrée et/ou déformée. Ces solutions sont peu encombrantes et n'occasionnent aucune résonance avec les éléments passifs du réseau et font preuve d'une grande flexibilité face à l'évolution du réseau électrique et de la charge polluante.

Dans la deuxième partie nous abordons le filtre actif série pour la compensations des perturbation en tension du réseau et l'empêchement de l'écoulement des courants polluants venants de la charge d'arriver au réseau.

Dans cette partie introductive nous avons présentés les différentes structures du filtrage actif, combinée et hybride les plus répandues. Toujours les utilisateurs et les concepteurs

cherchent des solutions de compensation pour trouver un compromis entre l'efficacité de compensation et le coût.

C'est ainsi que dans l'objectif d'améliorer la qualité de l'énergie électrique qui doit être conforme aux nouvelles contraintes normatives, nous étudierons, dans les chapitres suivants, les différentes méthodes d'identification utilisées dans le domaine temporelles pour la commande des filtres actifs parallèles .

En conclusion, le filtrage actif de puissance constitue, dans le domaine des réseaux industriels, une spécialité d'importance croissante du fait du développement rapide des systèmes à base d'électronique de puissance. En même temps, ils sont délicats à maîtriser pour des motifs techniques et économiques. Pour chaque cas d'alimentation, il convient d'analyser correctement, en respectant les règles de l'art, les différents aspects du problème avant de choisir une solution dont la pertinence dépend de l'expérience et de la sagacité du concepteur.

**CHAPITRE II**

**ETUDE COMPARATIVE DES STRATEGIES  
D'IDENTIFICATION DES PERTURBATIONS  
DES COURANTS**

## CHAPITRE II

### Etude comparative des stratégies d'identification des perturbations des courants

#### II.1 INTRODUCTION

Ce chapitre traite les grandes approches concernant le problème d'identification de la source perturbatrice dans un réseau électrique, et les différentes stratégies de commande du compensateur active ainsi appelé filtre actif de puissance « Active Power Filter » en vertu d'assurer d'une manière générale, les besoins essentiels de compensation des différentes perturbations dégradants la qualité d'énergie.

On rappelle premièrement les principaux travaux effectués dans le domaine du filtrage actif de point de vue des stratégies de commandes.

Dans la deuxième partie, on développe un modèle généralisé représentant la puissance fournie par une source de tensions déséquilibré et polluée, alimentant une charge non linéaire.

Dans la troisième partie on représente les algorithmes de contrôle les plus utilisés, et pour analyser les performances de chaque stratégie, on simule chaque une d'elle sous les différentes perturbations à savoir :

- Une source de tensions équilibrées non polluées avec une charge non-linéaire ;
- Une source de tensions déséquilibrées non polluées avec une charge non-linéaire ;
- Une source de tensions équilibrées et polluées avec une charge non-linéaire ;
- Une source de tensions déséquilibrées et polluées avec une charge non-linéaire.

Ensuite une conclusion comparative entre les différentes stratégies de commande. Parmi ces stratégies, on sélectionne une qui sera utilisée pour la commande du filtre actif parallèle étudié dans le chapitre III.

#### II.2 Rappels des principaux travaux sur les Filtres actifs

##### II.2.1 - Les travaux d'Akagi et al. [35-51]

Avec plus d'une vingtaine d'articles scientifiques, ce groupe a profondément marqué l'ensemble des recherches effectuées dans le domaine des filtres actifs de puissance. Il a tout d'abord proposé le formalisme de la théorie  $p-q$  (ou IRPT-*Instantaneous Reactive Power Theory*) et son application comme stratégie de contrôle aux FA. Il a ensuite contribué à la classification des différentes structures de filtres actifs, à l'approfondissement de l'étude de leurs caractéristiques de filtrage et de la stratégie de compensation, au développement et à l'implantation des 2 principales stratégies de contrôle que sont les théories IRPT et SRF (*Synchronous Reference Frame*), auxquelles il a associé la méthode de compensation par gain constant K (CGC). Les principaux apports de

leurs travaux, outre la célèbre théorie  $p-q$ , sont l'ajout de l'analyse théorique de la stratégie de compensation et des caractéristiques de filtrage, l'extension de l'objectif des filtres au réglage de la tension par compensation de la puissance réactive, et la compensation des phénomènes de déséquilibre et du flicker.

### II.2.2 - Les travaux de Bhattachyaria et al. [52-57]

Ce groupe a tout d'abord adapté la théorie du SRF pour l'utiliser comme stratégie de contrôle aux 3 principaux filtres actifs hybrides, pour ensuite approfondir l'étude du filtre hybride série. Leurs travaux ont conduit sur le fait qu'en présence de distorsions de tensions, les puissances réelles déformantes en jeu (c. continu ou harmoniques – puissances résultantes du produit de tensions et de courants non sinusoïdaux) ne peuvent pas être extraites par le filtre passe-haut du contrôleur IRPT: ce qui résulte en la présence d'harmoniques dans le courant de source. C'est ce qui leur fait dire que, selon leur expérience, il n'y a que le contrôleur à base de SRF qui puisse accomplir la parfaite isolation harmonique en présence de toutes situations de pollution.

Enfin, ils ont exprimé les difficultés liées à l'utilisation du contrôleur à base du filtre Notch et de son manque d'efficacité. Comparé à celui équipé de la théorie  $p-q$ , le contrôleur basé sur la théorie SRF a montré d'après eux, de meilleures performances.

### II.2.3 - Les travaux de Enslin et al. [58-61]

Le groupe d'Enslin et al a été essentiellement orienté sur la topologie hybride du filtre shunt-série dénommé le PQM (*Power Quality Manager*). Le PQM a été équipé de 3 Stratégies de contrôle : le filtrage harmonique, le réglage de la puissance réactive et la compensation du *flicker*. Selon eux, les résultats de leurs travaux sont satisfaisants aussi bien pour l'isolation des harmoniques de courants que pour le réglage de des harmoniques de courants que pour le réglage de la tension, démontrant ainsi la faisabilité technique par la réalisation (en laboratoire) d'un prototype du PQM. Pour un même niveau de filtrage des harmoniques, la puissance nominale du PQM serait inférieure à celle d'un simple filtre actif; et pour une même fonction de réglage de tension, la puissance nominale du PQM serait inférieure à celle du STATCOM. L'équipe était en train de travailler sur un prototype de PQM de 100kVA qui sera installé dans le réseau de distribution d'ESKOM près d'un édifice abritant des équipements qui sont des perturbateurs électriques.

### II.2.4 - Les travaux de Watanabe et al. [62-64]

Outre le groupe d'Akagi au Japon, celui de Bhattachyaria aux USA et celui d'Enslin en Afrique du Sud qui ont marqué la recherche dans le domaine des FA, on pourrait citer aussi le groupe de Watanabe et al. En 1993 ce groupe présente un article [62] analysant en détail les déférentes sens physique des puissances de la théorie IRPT, ils ont développés d'autre stratégies de commande dans le domaine de l'APF, des FACTS et le STATCOM.

## II.3 Calcul des puissances sous le régime non – sinusoïdal

Beaucoup de définitions ont été formulées pour caractériser la puissance non-active pour des formes d'onde non sinusoïdales dans les systèmes électriques, mais il y'avait pas une théorie

unique universellement adopté comme une norme pour la puissance non-active. La plupart des théories formulées, ont eu un type particulier de compensation à l'esprit, qui a influencé sur le développement des définitions. On peut résumer l'état d'art des définitions des puissances dans le cas du régime non sinusoïdal. [65]

- 1927 C. Budeanu : définition des puissances active, réactive et déformante ;
- 1931 S. Fryze : la théorie initial du courant orthogonal ;
- 1950 F. Buchholz : la théorie de la puissance apparente ;
- 1972 W. Shepherd et P. Zkikhani : définition de la puissance réactive dans le domaine fréquentiel ;
- 1973 D.Sharon : définition de la puissance réactive dans le domaine fréquentiel ;
- 1976 Groupe de travail IEC : pas des résultats official, mais seulement l'adaptation de la théorie de C. Budeanu ;
- 1980 N .L. Kuster et W.J.M. Moore : définition de la puissance inductive et la puissance capacitive ;
- 1983 H. Akagi et al : la puissance réactive instantanée « Théorie p-q » ;
- 1985 L.S. Czarnecki : définition de la puissance réactive dans le domaine fréquentiel ;
- 1988 J.H.R. Enslin et J.D Van Wyk : définitions porté sur les signaux non périodiques monophasé ;
- 1991 A. Ferrero et G. Superti-Furga : La puissance de Park ;
- 1992 J.L. Willems : Généralisation de la théorie p-q multiphase ;
- 1993 M. Depenbrock : courant orthogonal polyphasé (la méthode FBD) ;
- 1994 L. Rossetto et P. Tenti : les courants orthogonaux instantanés ;
- 1996 F.Z. Peng et J.S. Lai : la puissance réactive instantanée généralisée ;
- 1996 A. Nabae et T. Tanaka : définition des puissances dans les coordonnées polaires ;
- 1996 le groupe de travail IEEE : normalisation de la puissance au régime non sinusoïdal ;
- 2000 F.Z. Peng : La puissance non active généralisée ;
- 2001 F. Blaabjerg et al : introduction de la théorie p-q-r.

Ce qui nous intéresse dans notre travail est de trouver un formalisme des puissances instantanées (Active, Réactive et Déformantes) dans le cas général présenté par une source de tension déséquilibrée et polluée débite sur une charge déséquilibrée non linéaire.

Les équations généralisées des puissances ainsi obtenues sont très importantes pour éclaircir les caractéristiques des puissances instantanées, qui sont très utiles pour comprendre et pour construire les algorithmes de contrôle du filtre actif série ou shunt.

On peut présenter les tensions et les courants par les équations suivantes :

$$e_k(t) = \sum_{i=1}^{\infty} \sqrt{2} e_{ki} \sin(\omega_i t + \phi_{ki}) \quad ; k = a, b, c \quad (\text{II.1})$$

$$i_k(t) = \sum_{i=1}^{\infty} \sqrt{2} i_{ki} \sin(\omega_i t + \psi_{ki}) \quad ; k = a, b, c \quad (\text{II.2})$$



La transformation des composantes symétriques est appliquée pour chaque harmonique des courants et des tensions des phases a , b et c pour la détermination des composantes directe, inverse et homopolaire.

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_+ \\ V_- \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.3})$$

$$a = 1 \angle 120^\circ = e^{j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

(+) composante directe, (-) composante inverse, (0) composante homopolaire.

La transformation inverse est donné par :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_0 \\ V_+ \\ V_- \end{bmatrix} \quad (\text{II.4})$$

Les équations temporelles équivalentes peuvent être dérivé de l'équation (II.4), on peut réécrire les tensions et les courant en termes de ces composantes symétriques dans le domaine temporel, on aura :

Les tensions :

$$\begin{cases} V_{an}(t) = \sqrt{2}V_0 \sin(\omega_n t + \phi_{0n}) + \sqrt{2}V_{+n} \sin(\omega_n t + \phi_{+n}) + \sqrt{2}V_{-n} \sin(\omega_n t + \phi_{-n}) \\ V_{bn}(t) = \sqrt{2}V_0 \sin(\omega_n t + \phi_{0n}) + \sqrt{2}V_{+n} \sin(\omega_n t + \phi_{+n} - \frac{2\pi}{3}) + \sqrt{2}V_{-n} \sin(\omega_n t + \phi_{-n} + \frac{2\pi}{3}) \\ V_{cn}(t) = \sqrt{2}V_0 \sin(\omega_n t + \phi_{0n}) + \sqrt{2}V_{+n} \sin(\omega_n t + \phi_{+n} + \frac{2\pi}{3}) + \sqrt{2}V_{-n} \sin(\omega_n t + \phi_{-n} - \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (\text{II.5})$$

Les courants :

$$\begin{cases} I_{an}(t) = \sqrt{2}I_0 \sin(\omega_n t + \phi_{0n}) + \sqrt{2}I_{+n} \sin(\omega_n t + \phi_{+n}) + \sqrt{2}I_{-n} \sin(\omega_n t + \phi_{-n}) \\ I_{bn}(t) = \sqrt{2}I_0 \sin(\omega_n t + \phi_{0n}) + \sqrt{2}I_{+n} \sin(\omega_n t + \phi_{+n} - \frac{2\pi}{3}) + \sqrt{2}I_{-n} \sin(\omega_n t + \phi_{-n} + \frac{2\pi}{3}) \\ I_{cn}(t) = \sqrt{2}I_0 \sin(\omega_n t + \phi_{0n}) + \sqrt{2}I_{+n} \sin(\omega_n t + \phi_{+n} + \frac{2\pi}{3}) + \sqrt{2}I_{-n} \sin(\omega_n t + \phi_{-n} - \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (\text{II.6})$$

Un des avantages de cette décomposition et la possibilité d'analyser un système triphasé déséquilibré à l'aide de la somme de trois systèmes équilibrés.

Ces tensions et courants de (II.5), (II.6) peuvent remplacer les tensions et les courants de (II.1), (II.2). En utilisant la transformation d'Edite Clark, on obtient les expressions suivantes des courants et tensions dans le repère  $\alpha, \beta, 0$ .

Les tensions dans le repère  $\alpha, \beta, 0$  sont :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{\alpha} = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{3} V_{+n} \sin(\omega_n t + \phi_{+n}) + \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{3} V_{-n} \sin(\omega_n t + \phi_{-n}) \\ V_{\beta} = \sum_{n=1}^{\infty} -\sqrt{3} V_{+n} \cos(\omega_n t + \phi_{+n}) + \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{3} V_{-n} \cos(\omega_n t + \phi_{-n}) \\ V_0 = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{6} V_{0n} \sin(\omega_n t + \phi_{0n}) \end{array} \right. \quad (\text{II.7})$$

Les courants dans le repère  $\alpha, \beta, 0$  sont :

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{\alpha} = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{3} I_{+n} \sin(\omega_n t + \phi_{+n}) + \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{3} I_{-n} \sin(\omega_n t + \phi_{-n}) \\ I_{\beta} = \sum_{n=1}^{\infty} -\sqrt{3} I_{+n} \cos(\omega_n t + \phi_{+n}) + \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{3} I_{-n} \cos(\omega_n t + \phi_{-n}) \\ I_0 = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{6} I_{0n} \sin(\omega_n t + \phi_{0n}) \end{array} \right. \quad (\text{II.8})$$

Il est à noter que les composantes directes et inverses contribuent dans les tensions et courants dans le repère  $\alpha, \beta, 0$ , tandis que la composante homopolaire ne se présente que dans la composant de la séquence homopolaire (0).

La puissance réelle  $P$ , la puissance réactive imaginaire et la puissance de la séquence homopolaire  $P_0$  sont définies par [35,40,41,42].

$$\begin{bmatrix} p_0 \\ p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_0 & 0 & 0 \\ 0 & V_{\alpha} & V_{\beta} \\ 0 & -V_{\beta} & V_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ I_{\alpha} \\ I_{\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{II.9})$$

On peut calculer  $p_0$ ,  $p$  et  $q$  en utilisant les tensions et les courants génériques en fonction des composantes symétriques de (II.7),(II.8). Pour mieux visualiser la relation entre les

définitions conventionnelles des puissances et les nouvelles puissances, ces puissances sont représentées par deux termes :

- Les valeurs moyennes (  $\bar{p}$  ,  $\bar{q}$  et  $\bar{p}_0$  ) ;
- Les puissances oscillantes (  $\tilde{p}$  ,  $\tilde{q}$  et  $\tilde{p}_0$  ).

➤ La puissance active moyenne  $\bar{p}$  :

$$\bar{p} = \sum_{n=1}^{\infty} 3V_{+n} I_{+n} \cos(\varphi_{+n} - \psi_{+n}) + \sum_{n=1}^{\infty} 3V_{-n} I_{-n} \cos(\varphi_{-n} - \psi_{-n}) \quad (\text{II.10})$$

➤ La puissance active oscillante :

$$\begin{aligned} \tilde{p} = & \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq n}}^{\infty} \left[ \sum_{n=1}^{\infty} 3V_{+m} I_{+n} \cos((\omega_m - \omega_n)t + \phi_{+m} - \psi_{+n}) \right] + \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq n}}^{\infty} \left[ \sum_{n=1}^{\infty} 3V_{-m} I_{-n} \cos((\omega_m - \omega_n)t + \phi_{-m} - \psi_{-n}) \right] + \\ & \sum_{m=1}^{\infty} \left[ \sum_{n=1}^{\infty} -3V_{+m} I_{-n} \cos((\omega_m + \omega_n)t + \phi_{+m} + \psi_{+n}) \right] + \sum_{m=1}^{\infty} \left[ \sum_{n=1}^{\infty} -3V_{-m} I_{+n} \cos((\omega_m + \omega_n)t + \phi_{-m} + \psi_{+n}) \right] \end{aligned} \quad (\text{II.11}).$$

La puissance réactive moyenne  $\bar{q}$  :

$$\bar{q} = \sum_{n=1}^{\infty} -3V_{+n} I_{+n} \sin(\varphi_{+n} - \psi_{+n}) + \sum_{n=1}^{\infty} 3V_{-n} I_{-n} \sin(\varphi_{-n} - \psi_{-n}) \quad (\text{II.12})$$

➤ La puissance réactive oscillante :

$$\begin{aligned} \tilde{q} = & \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq n}}^{\infty} \left[ \sum_{n=1}^{\infty} -3V_{+m} I_{+n} \sin((\omega_m - \omega_n)t + \phi_{+m} - \psi_{+n}) \right] + \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq n}}^{\infty} \left[ \sum_{n=1}^{\infty} 3V_{-m} I_{-n} \sin((\omega_m - \omega_n)t + \phi_{-m} - \psi_{-n}) \right] + \\ & \sum_{m=1}^{\infty} \left[ \sum_{n=1}^{\infty} -3V_{+m} I_{-n} \sin((\omega_m + \omega_n)t + \phi_{+m} + \psi_{+n}) \right] + \sum_{m=1}^{\infty} \left[ \sum_{n=1}^{\infty} -3V_{-m} I_{+n} \sin((\omega_m + \omega_n)t + \phi_{-m} + \psi_{+n}) \right] \end{aligned} \quad (\text{II.13}).$$

➤ La puissance moyenne de la séquence homopolaire :

$$\bar{p}_0 = \sum_{n=1}^{\infty} 3V_{0n} I_{0n} \sin(\varphi_{0n} - \psi_{0n}) \quad (\text{II.14})$$

➤ La puissance oscillante de la séquence homopolaire :

$$\tilde{p}_0 = \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq n}}^{\infty} \left[ \sum_{n=1}^{\infty} 3V_{0m} I_{0n} \cos((\omega_m - \omega_n)t + \phi_{0m} - \psi_{0n}) \right] + \sum_{m=1}^{\infty} \left[ \sum_{n=1}^{\infty} -3V_{0m} I_{0n} \cos((\omega_m + \omega_n)t + \phi_{0m} - \psi_{0n}) \right] \quad (\text{II.15})$$

Ces expressions des puissances montrent les relations entre les puissances conventionnelles et le concept des puissances actives et réactives instantanées, pour l'instant, il est possible de voir que la puissance active fondamentale d'un système triphasé ( $3VI \cos(\varphi)$ ) est un terme de la puissance moyenne  $\bar{p}$ , d'autre part la puissance réactive triphasée ( $3VI \sin(\varphi)$ ) est incluse dans  $\bar{q}$ . Tous les harmoniques dont les courants et les tensions peuvent contribuer dans les valeurs moyennes  $\bar{p}$  et  $\bar{q}$  s'ils ont les mêmes fréquences et la même séquence (directe ou inverse) (II.10),(II.12).

Malheureusement, la présence de plus d'une harmonique et/ou des composantes d'autre séquence produisent  $\tilde{p}$  et  $\tilde{q}$ , selon (II.11) et (II.13). D'autre part la séquence (homopolaire) :

$$p_0 = \bar{p}_0 + \tilde{p}_0 \tag{II.16}$$

Produit toujours une partie oscillante, même si on a uniquement  $V_{01}$  et  $I_{01}$ .

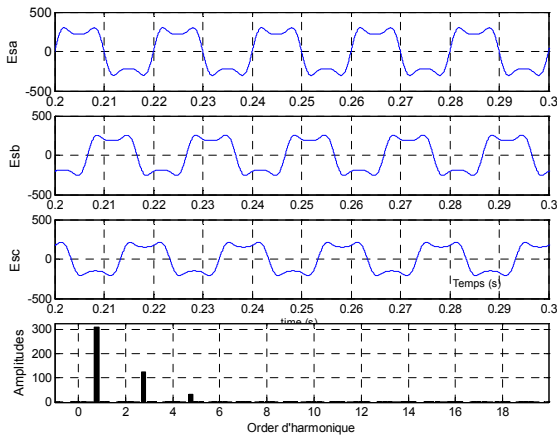


Fig II.1 : Tensions d'alimentation

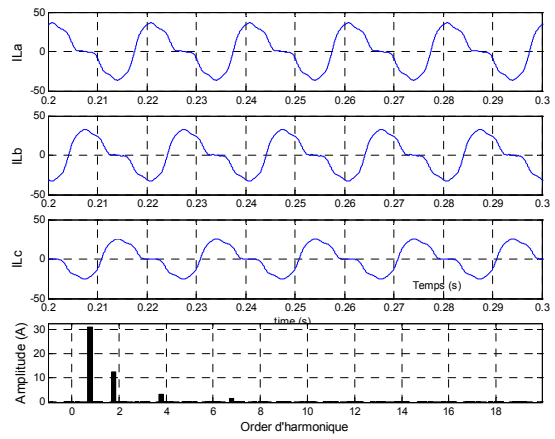


Fig II.2 : Les courants générés par la charge

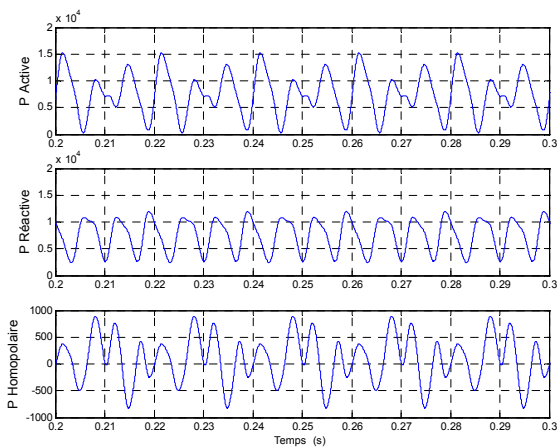


Fig II.3 : Les puissances instantanées

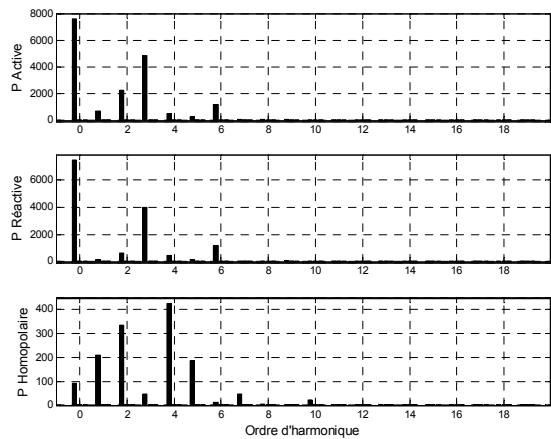


Fig II.4 : Les spectres en fréquence des amplitudes des puissances instantanées

## II.4 Stratégies de commande

### II.4.1 La théorie p-q (La théorie de la puissance instantanée)

En 1983 Akagi et al [35,40,41,42] ont proposé « La théorie généralisée de la puissance réactive instantanée dans les réseaux triphasés », aussi connue comme la théorie de la puissance instantanée ou la théorie p-q. Elle est basée sur le calcul des valeurs instantanées des puissances dans un système triphasé avec ou sans fil neutre, elle est valable aux régimes permanent et transitoire, aussi pour les formes d'onde de tension et de courant générées.

Cette théorie utilise la transformation algébrique de « Edite Clark » pour transformer les systèmes triphasés des courants et des tensions présentés dans le repère a,b,c vers un nouveau repère  $\alpha, \beta, 0$  de la manière suivante :

➤ Les composantes de tension :

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.17})$$

➤ Les composantes de courant :

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.18})$$

Dans un repère a, b, c la puissance instantanée active est donnée par :

$$P_3(t) = v_a \cdot i_a + v_b \cdot i_b + v_c \cdot i_c \quad (\text{II.19})$$

De même dans le repère  $\alpha, \beta, 0$  :

$$P_{\alpha\beta 0}(t) = v_\alpha \cdot i_\alpha + v_\beta \cdot i_\beta + v_0 \cdot i_0 \quad (\text{II.20})$$

Il est à noter que la transformation utilisée est orthogonale, elle garde la puissance invariante dans les deux repères, c à d :

$$P_3(t) = P_{\alpha\beta 0}(t) \quad (\text{II.21})$$

Où :

$$P = v_\alpha \cdot i_\alpha + v_\beta \cdot i_\beta = p_\alpha + p_\beta \quad \text{la puissance instantanée réelle ;} \quad (\text{II.22})$$

$$P_o = v_o \cdot i_o \quad \text{la puissance instantanée de la séquence homopolaire.} \quad (\text{II.23})$$

Une des avantages issue de cette transformation est la séparation des séquences homopolaire de courant ou de tension.

Akagi et al [35,40,41,42] propose la définition suivante de la puissance imaginaire instantanée :

$$q = v_\alpha \cdot i_\beta - v_\beta \cdot i_\alpha \quad (\text{II.24})$$

Cette puissance peut s'écrire dans le repère a,b,c de la manière suivante :

$$q(t) = -\frac{1}{\sqrt{3}}[(v_a - v_b) \cdot i_c + (v_b - v_c) \cdot i_a + (v_c - v_a) \cdot i_b] \quad (\text{II.25})$$

Cette expression est bien connue pour la mesure de la puissance réactive conventionnelle dans les systèmes triphasés.

La puissance  $q$  a une signification plus large que la puissance réactive habituelle. En effet, contrairement à la puissance réactive, qui ne considère que la fréquence fondamentale, la puissance imaginaire prend en compte toutes les composantes harmoniques de courant et de tension. C'est pourquoi on lui donne une autre dénomination « puissance imaginaire » avec comme unité le *volte-ampère imaginaire (VAI)*. [35,40,62,63]. Cette puissance est indépendante des composantes homopolaire.

A partir des relations (II.22) et (II.24) , nous pouvons établir la relation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{II.26})$$

Ces puissances sont décomposées en trois termes dans le cas général:

$$p = \bar{p} + \tilde{p} + \hat{p} \quad (\text{II.27})$$

$$q = \bar{q} + \tilde{q} + \hat{q} \quad (\text{II.28})$$

- $\bar{p}$  : est une composante continue liée à la composante fondamentale active du courant et de la tension; elle s'écoule de la source vers la charge.
- $\bar{q}$  : une puissance continue liées à la composante fondamentale réactive du courant et de la tension ; elle s'écoule de la source vers la charge.
- $\tilde{p}$  ,  $\tilde{q}$  : Sont les puissances alternatives liées aux composantes de hautes fréquences ( $\geq 150$  Hz ), ces deux puissances s'interchangent entre la source et la charge non linéaire.
- $\hat{p}$  ,  $\hat{q}$  : sont les puissances de faible fréquence ( $150 \text{ Hz} > f > 0.9 \text{ Hz}$  ) correspondent aux sous-harmoniques et aux composantes des séquences négatives des systèmes triphasés due à la fluctuation de la charge et les systèmes de soudage à arc....etc.

Ce qui nous intéresse c'est d'extraire les composantes  $\tilde{p}$ ,  $\tilde{q}$ , connaissant les fréquences des puissances instantanées, on peut utiliser un filtre passe haut avec une fréquence de coupure ( 150 Hz) , comme indique la figure suivante.



Fig. II.5 : Principe de séparation des composantes alternatives de puissances

L'ordre du filtre passe-bas dans le filtre passe-haut définit la dynamique et l'efficacité d'atteindre l'objectif de compensation. Des filtres de puissance du quatrième ou cinquième ordre ont été proposés. L'inconvénient majeur d'utilisation d'un filtre d'ordre élevé et le temps de calcul plus long, mais dans notre cas ce temps est relativement très faible en contre part la précision de séparation des composantes alternatives est remarquablement très élevée [50].

Dans notre étude on a choisi deux filtres d'ordre 4 et d'ordre 5. Les relations suivantes donnent les expressions générales des fonctions de transferts d'un filtre passe-bas d'ordre 4 et 5.

✓ Filtre d'ordre 4 :

$$G_{LP}(s) = \frac{\omega_c^4}{s^4 + 2.613 \omega_c s^3 + 3.414 \omega_c^2 s^2 + 2.613 \omega_c^3 s + \omega_c^4} \quad (II.29)$$

✓ Filtre d'ordre 5 :

$$G_{LP}(s) = \frac{\omega_c^5}{s^5 + 3.236 \omega_c s^4 + 5.263 \omega_c^2 s^3 + 5.263 \omega_c^3 s^2 + 3.236 \omega_c^4 s + \omega_c^5} \quad (II.30)$$

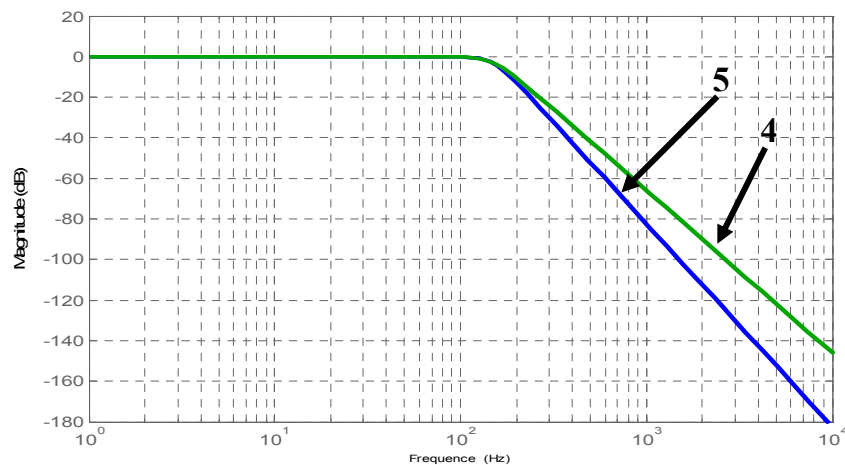


Fig. II.6 : Les gains des filtres passe bas

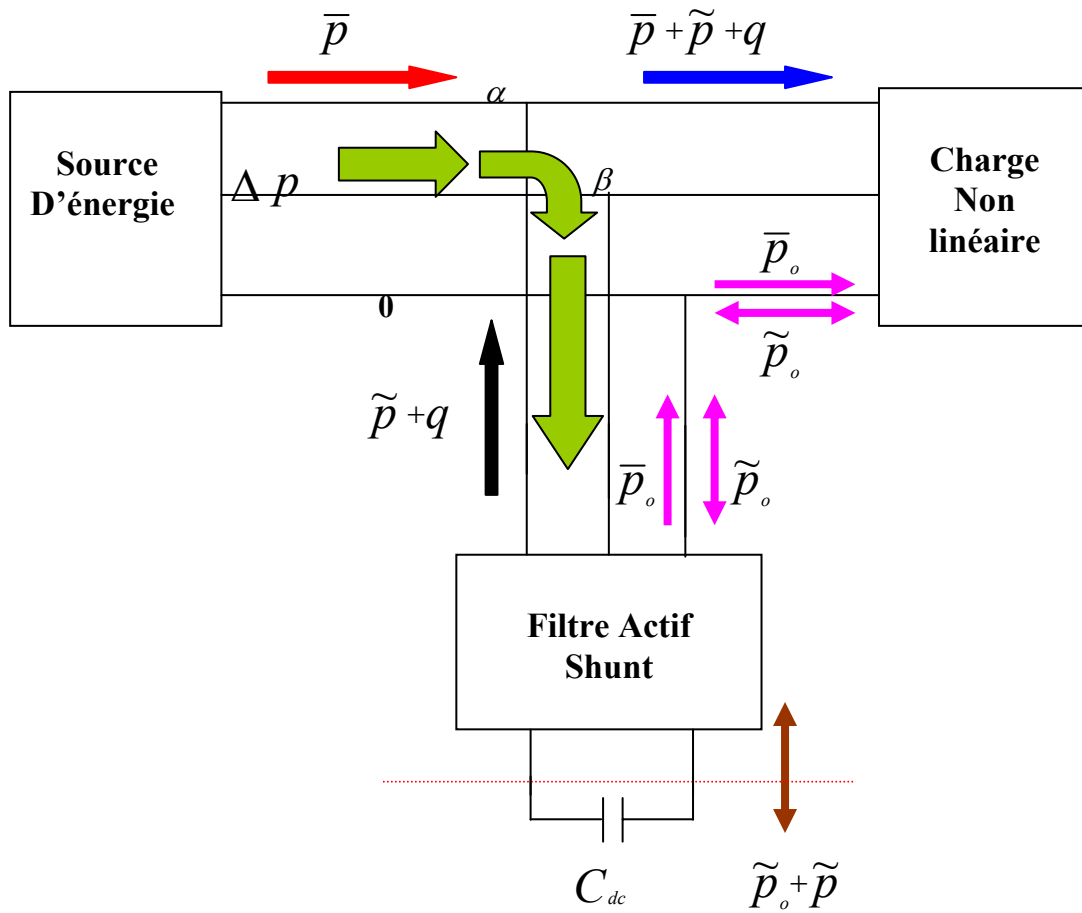


Fig. II.7 : Ecoulement des puissance dans le repère de Clark

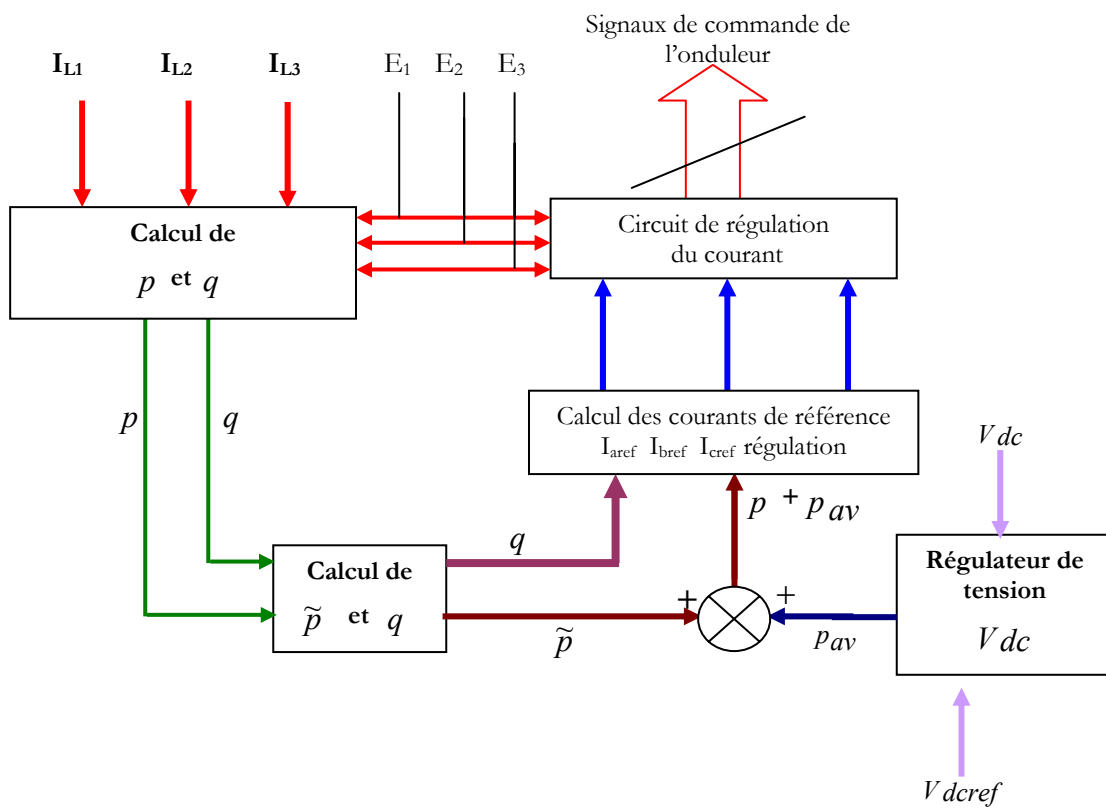


Fig. II.8 : Schéma block du principe de fonctionnement de la théorie pq



Résultat de simulation de la théorie pq pour l'identification des courants de référence pour la dépollution des courants de la source (unité de mesure A, V, W, VAR)

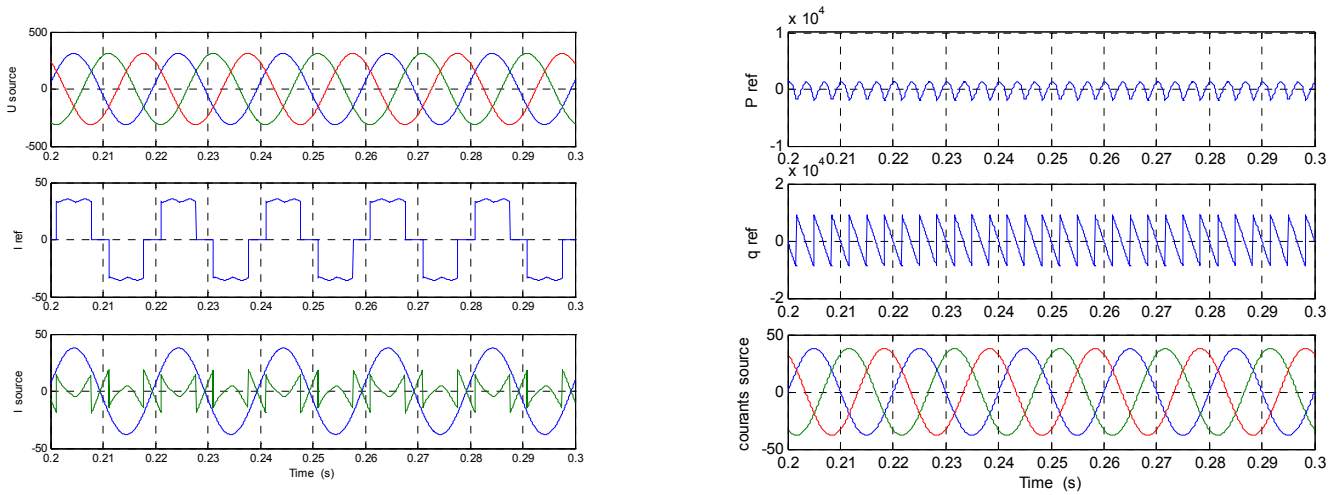


Fig II.9 Cas 1 : Source de tension équilibrée non polluée

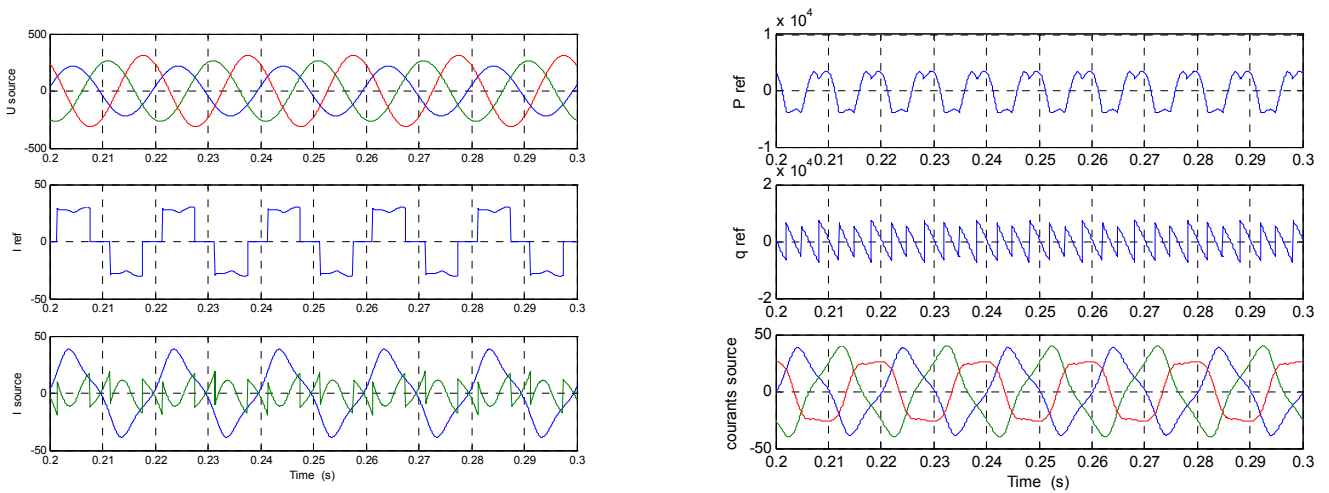


Fig II.10 Cas 2 : Source de tension déséquilibrée non polluée

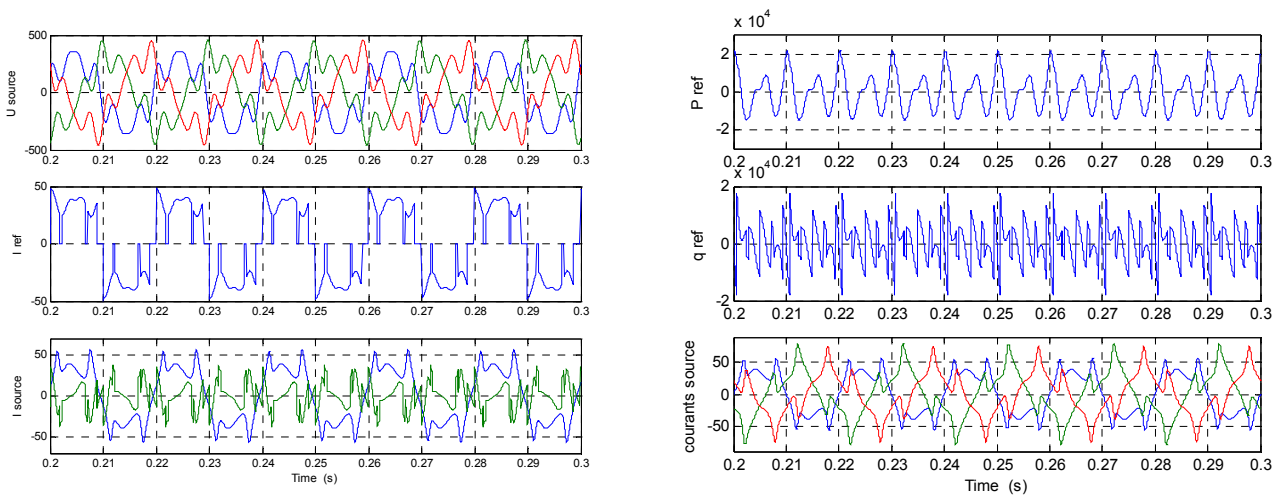


Fig II.11 Cas 3 : Source de tension équilibrée et polluée

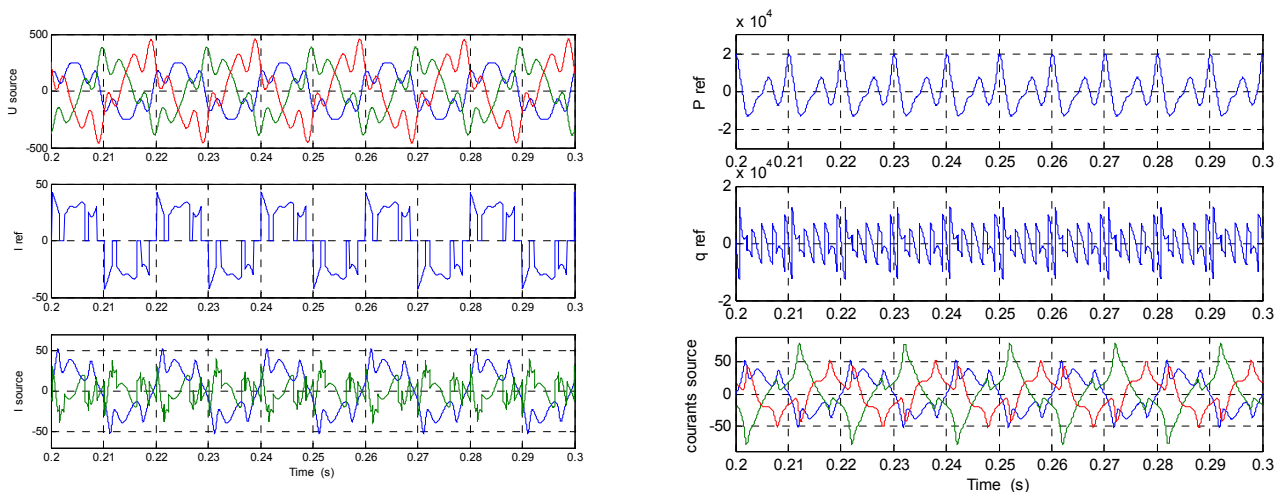


Fig II.12 Cas4 : Source de tension déséquilibrée et polluée

### II.4.2 Algorithme du Repère de Référence Synchronisée (SRF)[55,67,68,69]

L'algorithme **SRF** (Synchronous Reference Frame) est une méthode qui fait intervenir la transformation de **Park**, en passant par l'application de la transformé de **Clarck** sur les courants de la charge non linéaire et les tensions de la source d'alimentation. Suivant les équations suivantes :

$$\begin{bmatrix} I_{L\alpha} \\ I_{L\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{La} \\ I_{Lb} \\ I_{Lc} \end{bmatrix} \quad (II.31)$$

$$\begin{bmatrix} e_{s\alpha} \\ e_{s\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{sa} \\ e_{sb} \\ e_{sc} \end{bmatrix} \quad (II.32)$$

Cependant les composantes des courants de la charge dans le repère dq s'obtient par la transformé de Park, tel que l'angle de transformation est  $\theta$  qui représente l'angle instantané du vecteur de tension de la composante fondamentale directe.

$$\begin{bmatrix} I_{Ld} \\ I_{Lq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{L\alpha} \\ I_{L\beta} \end{bmatrix} \quad (II.33)$$

avec :

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{e_{s\beta}}{e_{s\alpha}} \right) \quad (II.34)$$

Ainsi les courants  $I_{Ld}$  et  $I_{Lq}$  sont décomposés en deux termes, continu et oscillatoire :

$$I_{Ld} = \tilde{I}_{Ld} + I_{Ld,dc} \quad (\text{II.35})$$

$$I_{Lq} = \tilde{I}_{Lq} + I_{Lq,dc} \quad (\text{II.36})$$

Pour la compensation des perturbations on a deux cas à envisager :

- Compensation des harmoniques : Dans ce cas on utilise deux filtres passe-bas pour séparer les composantes continues des courants selon les deux axes d et q :

$$\tilde{I}_{Ld} = I_{Ld,dc} + I_{Ld,h} \quad (\text{II.37})$$

$I_{Ld,dc}$  : Fondamentale suivant l'axe d, c'est une valeur continue.

$I_{Ld,h}$  : La somme des harmoniques suivant l'axe d.

$$\tilde{I}_{Lq} = I_{Lq,dc} + I_{Lq,h} \quad (\text{II.38})$$

$I_{Lq,dc}$  : Fondamentale suivant l'axe q, c'est une valeur continue.

$I_{Lq,h}$  : La somme des harmoniques suivant l'axe q.

Si on choisit la fréquence de coupure du filtre bas égale à celle du réseau, les composantes continues seront séparées, ils ne restent que les composantes harmoniques. Alors les courants de références selon d et q se représentent de la manière suivante :

$$I_{Ld}^* = I_{Ld,h} \quad (\text{II.39})$$

$$I_{Lq}^* = I_{Lq,h} \quad (\text{II.40})$$

Les courants de référence suivant les axes  $\alpha$  et  $\beta$  sont :

$$\begin{bmatrix} I_{L\alpha}^* \\ I_{L\beta}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{Ld}^* \\ I_{Lq}^* \end{bmatrix} \quad (\text{II.41})$$

Finalement les courants de référence suivant les axes a, b et c :

$$\begin{bmatrix} I_{La}^* \\ I_{Lb}^* \\ I_{Lc}^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & \frac{-1}{2} & \frac{-1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{-\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{L\alpha}^* \\ I_{L\beta}^* \end{bmatrix} \quad (\text{II.42})$$

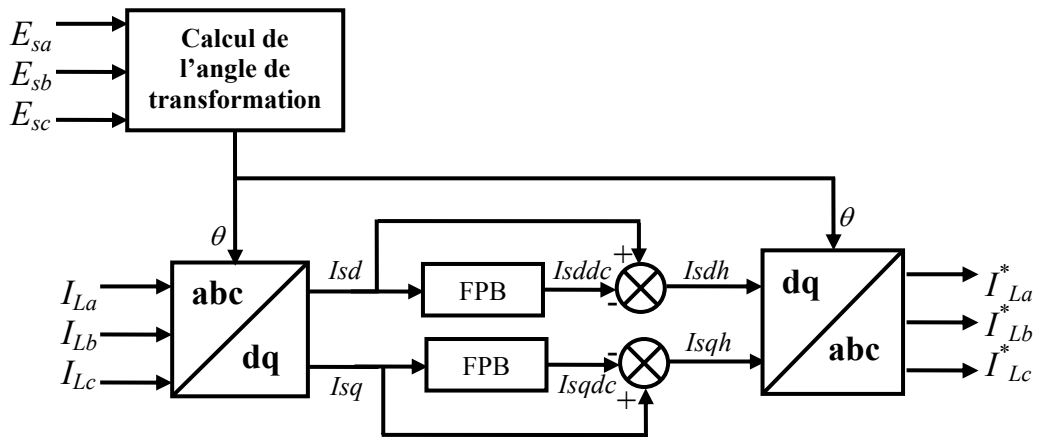


Fig. II.13 : Schéma de calcul du courant de références suivant les axes a, b et c

- Compensation des harmoniques et régulation de la tension continue du côté DC du filtre actif. Comme dans le cas de la théorie p-q on doit tenir compte des pertes dans le convertisseur du filtre actif qui sont dues principalement au phénomène de commutation et la perte de puissance du côté continue. la régulation et le maintien de la tension coté continue du FA se fait à travers le filtre lui-même. Pour avoir une bonne régulation de la tension DC on doit ajouter le courant nécessaire au courant de référence suivant l'axe d. on à utiliser un régulateur (PI) avec une anti-saturation « Anti-windup » .

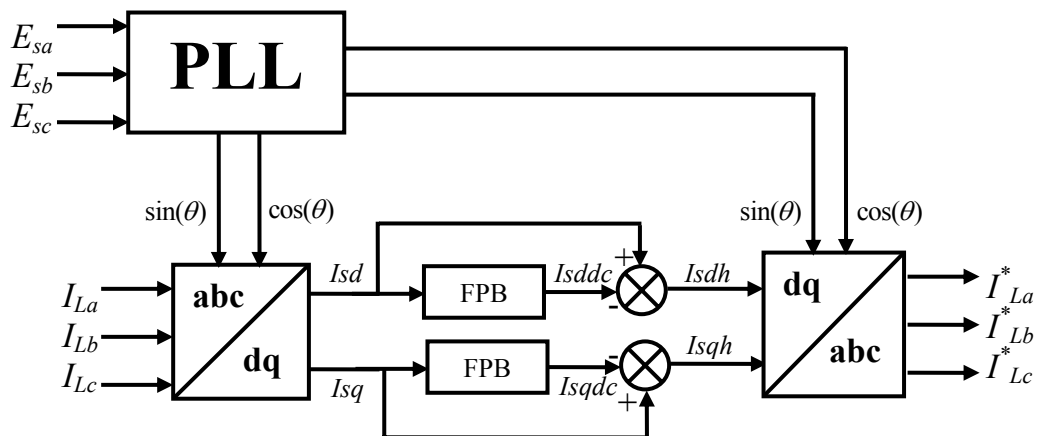


Fig. II.14 : Calcul des courants de référence en tenant compte de régulation du coté DC

L'angle de phase  $\theta$  (angle utilisé dans la matrice de transformation), doit être déterminé de façon à avoir les signaux de référence synchronisés avec les composantes fondamentales des tensions de phases. Dans la plus part des cas pratiques, cet angle est déterminé à partir d'un circuit PLL (Phase Locked Loop) (boucle à Verrouillage de phase). Les tensions  $e_{sa}$ ,  $e_{sb}$  et  $e_{sc}$  sont mesurées pour le calcul de la composante de tension suivant l'axe q de la manière suivante :

$$e_{sq} = \begin{bmatrix} \sin(\theta) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{sa} \\ e_{sb} \\ e_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.43})$$

quand l'angle  $\theta$  est égal à l'angle de phase du vecteur de tension, la composante fondamentale suivant l'axe q est égale à zéro, donc on peut ajuster l'angle  $\theta$  par le contrôle de la tension fondamentale suivant l'axe q pour qu'elle soit nulle.

La méthode SFR a les mêmes perspectives et conception que la méthode p-q, à l'exception quelle est plus efficace si la source de tension contient des distorsions harmoniques, ces fluctuations n'influent pas sur la performance de cette méthode, mais le temps de calcul augmente.

D'après l'algorithme SRF issue une autre méthode dite Transformation dq Multiple [67]. Le principe de cette méthode est la transformation des courants (qui sont fonction du temps) à un système de repère tournant à la fréquence harmonique  $f_h$ . Dans ce cas la composante harmonique h est représenté dans ce repère par une quantité DC. Cette composante peut être filtrée par un filtre passe-bas puis il sera transféré à un repère de référence stationnaire. Si plusieurs composantes harmoniques doivent être compensées, on doit utiliser une transformation pour chaque harmonique.

Par exemple les harmoniques résultantes d'une tension redressée par un redresseur triphasé en pont de Gratz se trouvent dans le tableau II.1 :

Tab. II.1 : Les harmoniques générées par un pont de Gratz

Séquence	Harmoniques
Positive	1,7,13,19,25.....
Négative	5,11,17,23.....

On peut utiliser la méthode Transformation dq Multiple pour la compensation des harmoniques 5,7,11 et 13 selon la Fig. II.15 :

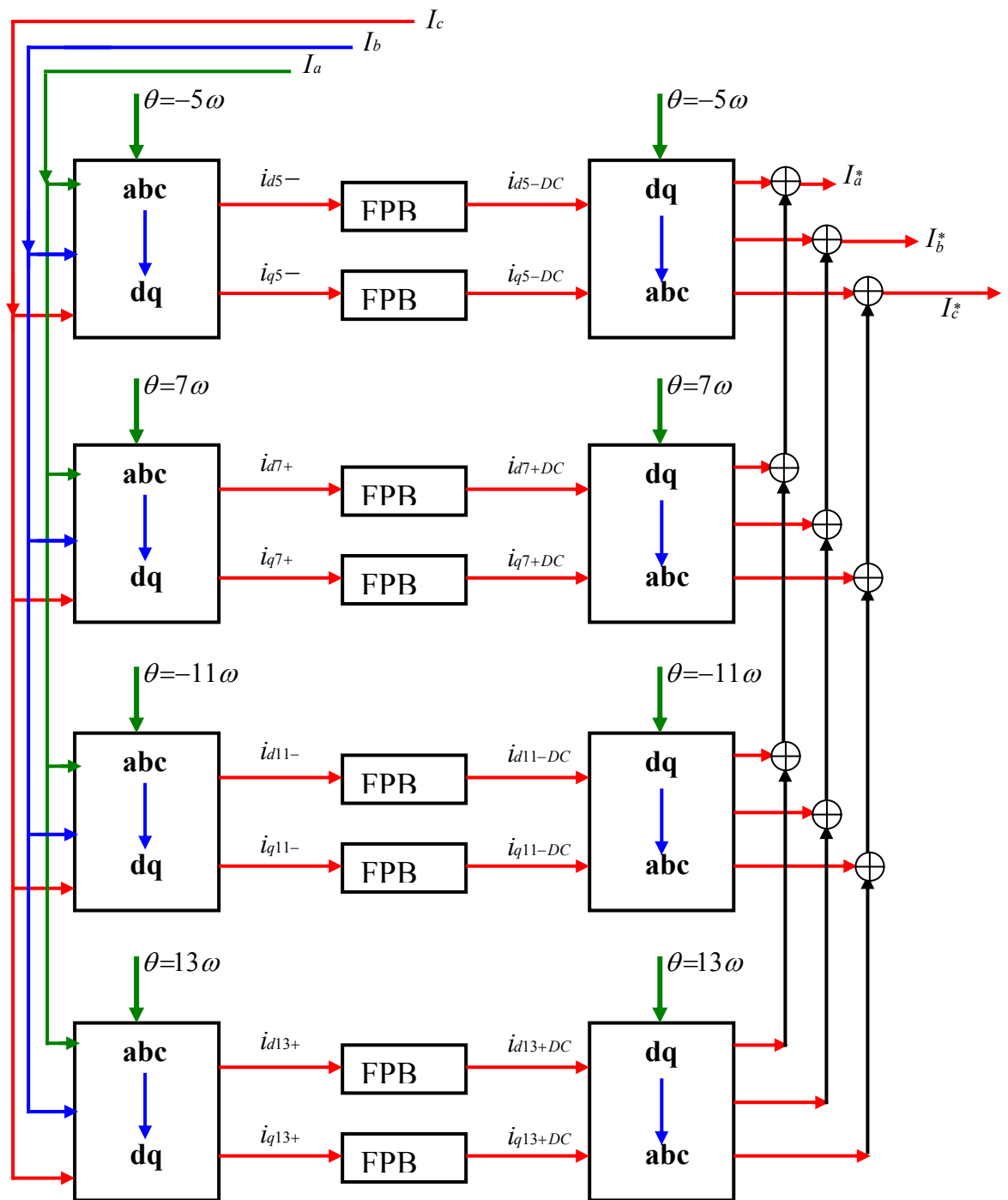


Fig. II.15 : Schéma de principe de l'algorithme Transformation dq Multiple

Résultat de simulation (unité de mesure A, V)

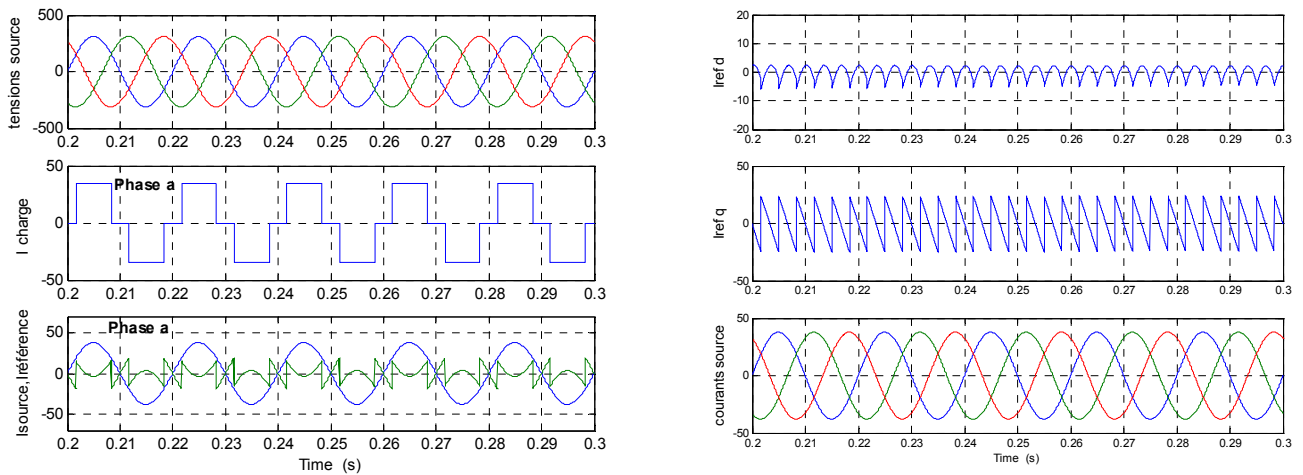


Fig. II.16 : Cas1 : Source de tensions équilibrée non polluée

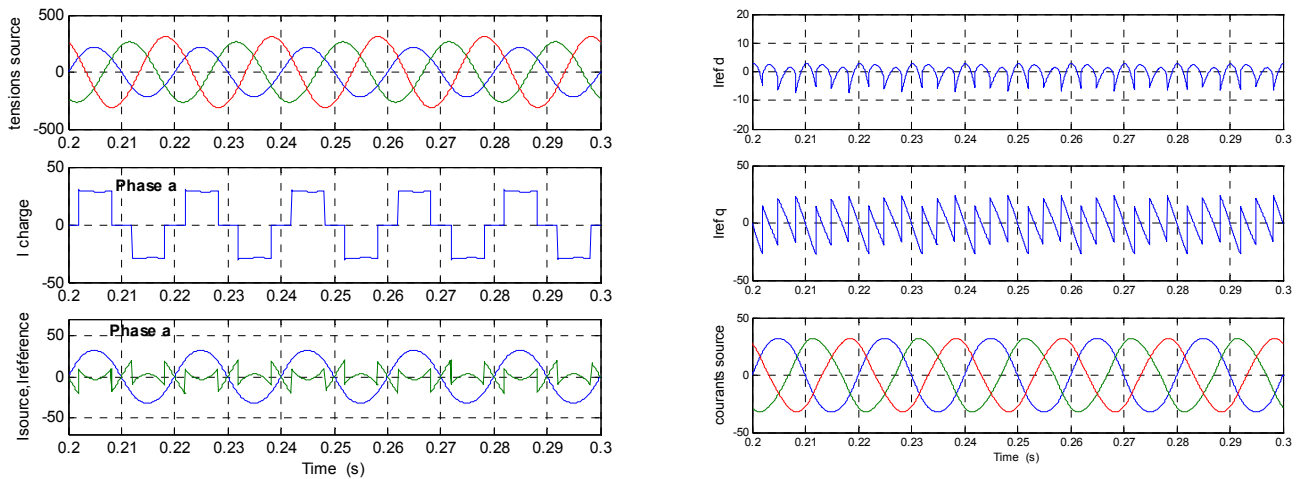


Fig. II.17 : Cas2 : Source de tension déséquilibrée non polluée

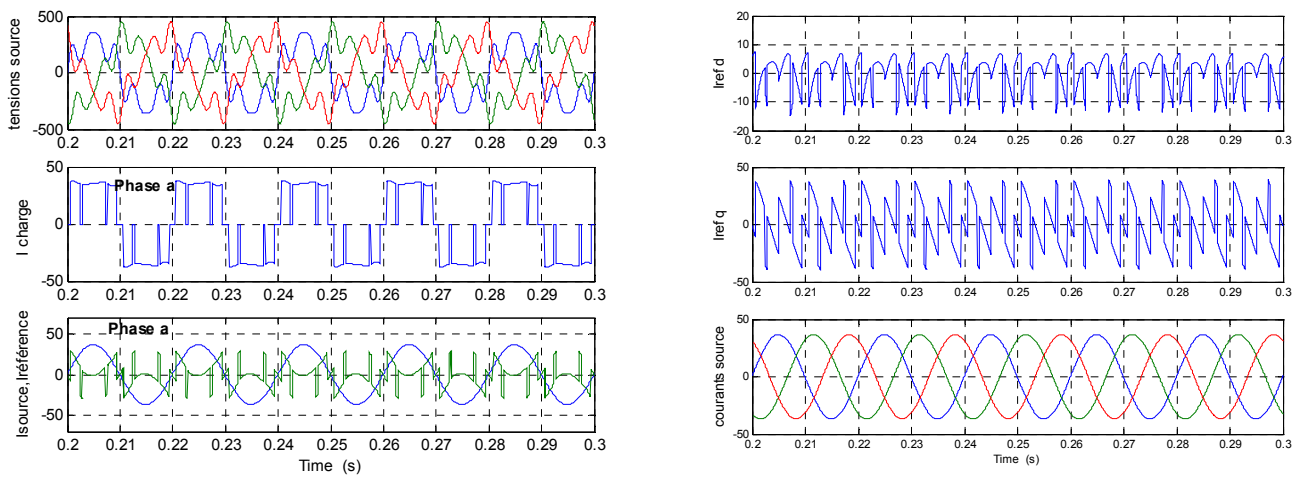


Fig. II.18 : Cas3 : Source de tension équilibrée et polluée

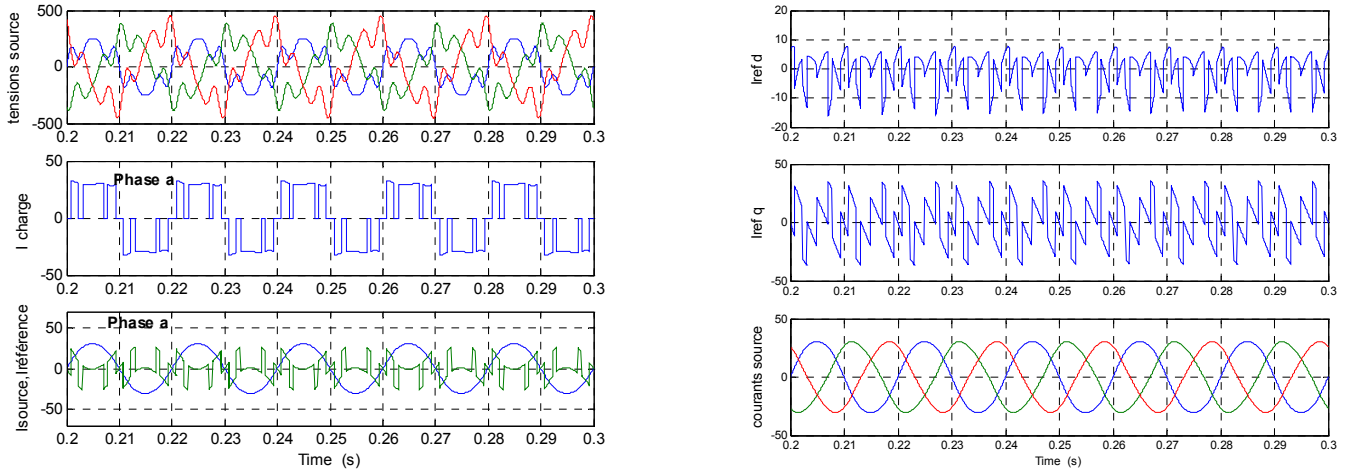


Fig. II.19 : Cas 4 : Source de tensions déséquilibré et polluée

### II.4.3 Algorithme de la Détection Synchronisée [67,68,70]

Dans cet algorithme les trois courants de la source d'alimentation sont supposés d'être équilibrés après la compensation c à d :

$$\hat{I}_{Sa} = \hat{I}_{Sb} = \hat{I}_{Sc} \tag{II.44}$$

Où,  $\hat{I}_{Sb}$  et  $\hat{I}_{Sc}$  sont les amplitudes des courants de la source après compensation.

La puissance réelle consommée par la charge est :

$$p = \begin{bmatrix} e_a & e_b & e_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{La} \\ I_{Lb} \\ I_{Lc} \end{bmatrix} \tag{II.45}$$

la puissance réelle est constituée de deux termes :

$$p = p_{dc} + \tilde{p} \tag{II.46}$$

- $p_{dc}$  : la composante continue de  $p$  qui représente sa valeur moyenne (la puissance active).
- $\tilde{p}$  : une puissance oscillatoire représentant l'échange de la puissance entre la source et la charge dont la valeur moyenne est nulle.

Pour séparer la composante continue, on utilise un filtre passe-bas, ensuite la puissance  $p_{dc}$  est distribuée sur les trois phases tel que :



$$\begin{aligned}
 P_a &= \frac{P_{dc} E_a}{E_{tot}} \\
 P_b &= \frac{P_{dc} E_b}{E_{tot}} \\
 P_c &= \frac{P_{dc} E_c}{E_{tot}}
 \end{aligned}
 \tag{II.47}$$

où  $E_a$ ,  $E_b$  et  $E_c$  les amplitudes des tensions des trois phases de la source d'alimentation.

$$E_{tot} = E_a + E_b + E_c
 \tag{II.48}$$

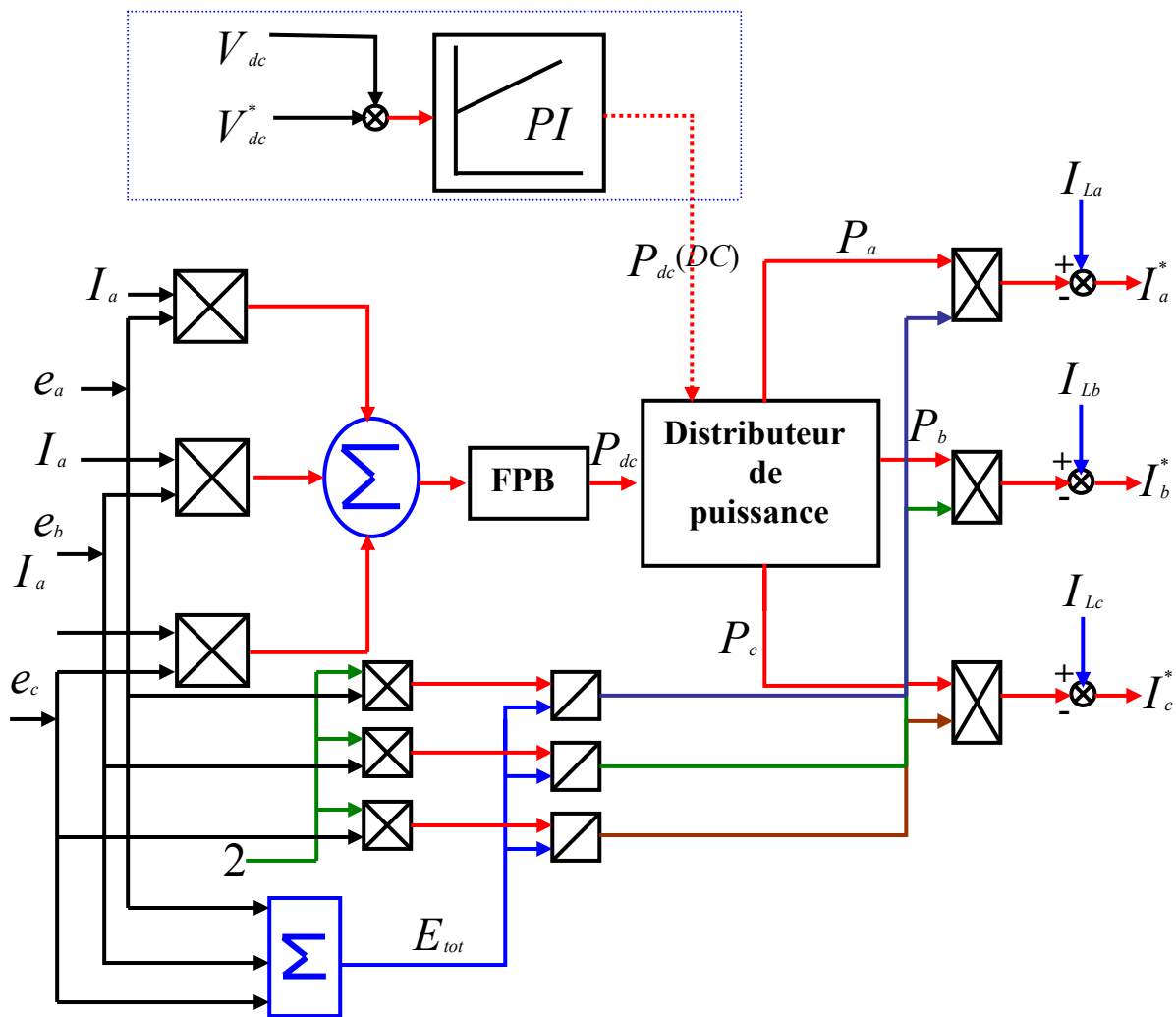


Fig. II.20 : Schéma block de l'algorithme de détection synchrone

Les courants de la source désirés peuvent être calculer par :

$$I_{Sa} = \frac{2 e_a P_a}{E_a^2}$$

$$I_{Sb} = \frac{2 e_b P_b}{E_b^2}$$

$$I_{Sc} = \frac{2 e_c P_c}{E_c^2}$$
( II.49 )

Les courants de compensation de référence sont obtenus par :

$$I_a^* = I_{La} - I_{Sa}$$

$$I_b^* = I_{Lb} - I_{Sb}$$

$$I_c^* = I_{Lc} - I_{Sc}$$
( II.50 )

Résultat de simulation (unité de mesure A, V, W)

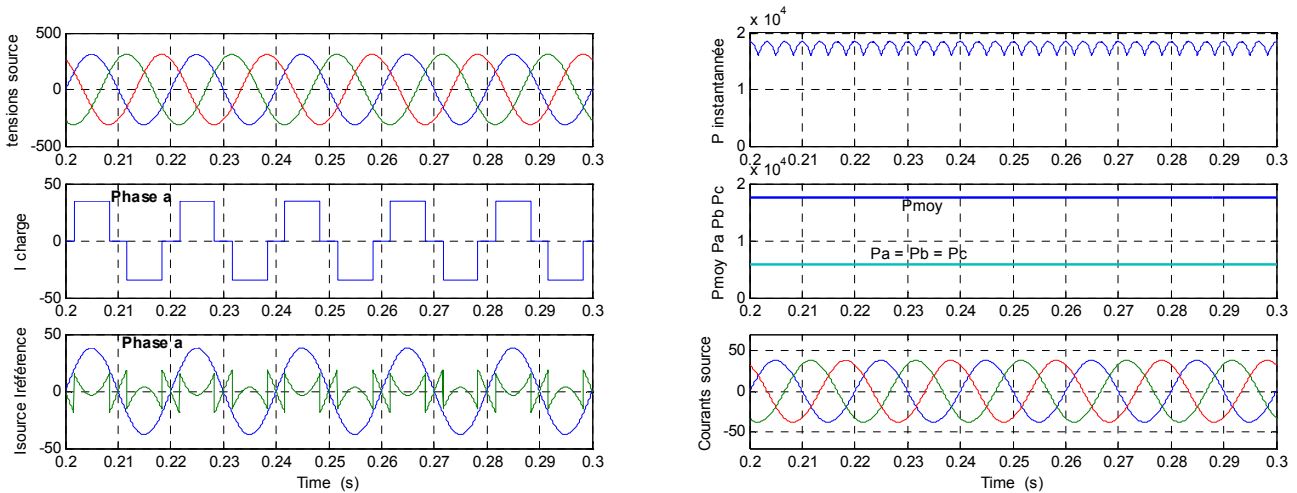


Fig. II.21 : Cas 1 : Source de tensions équilibrée et polluée

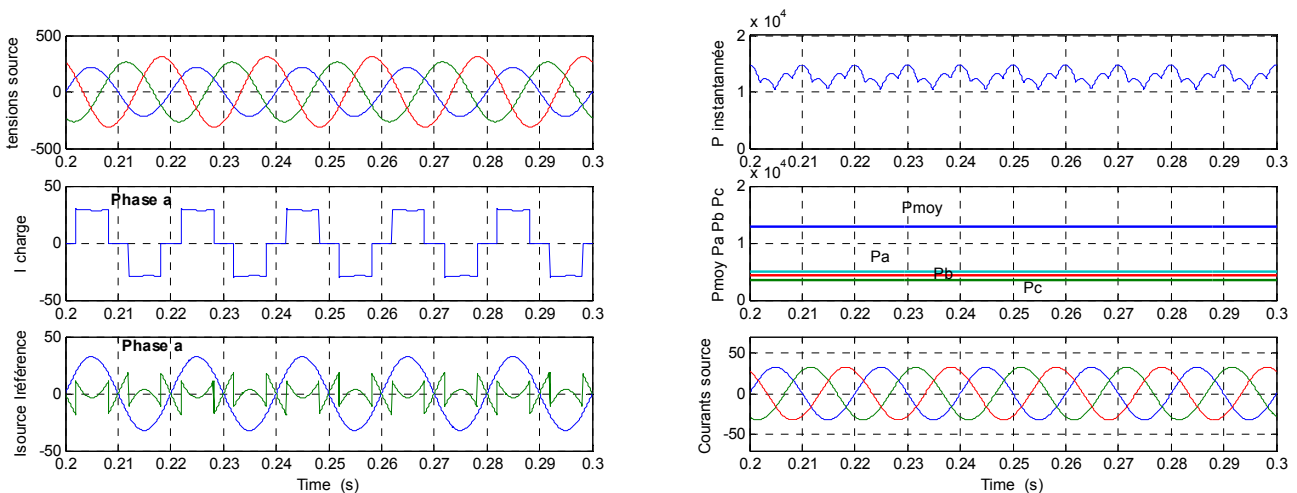


Fig. II.22 : Cas 2 : source de tensions déséquilibrée non polluée

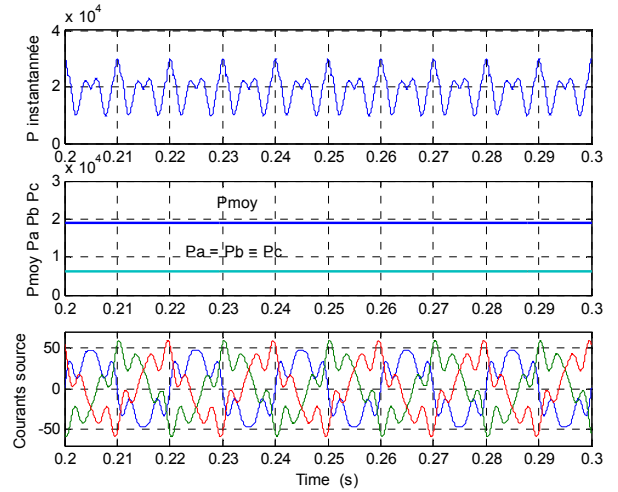
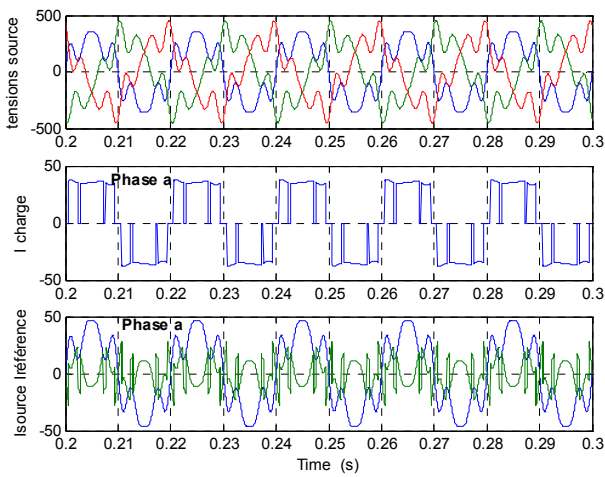


Fig. II.23 : Cas 3 : Source de tension équilibrée et polluée

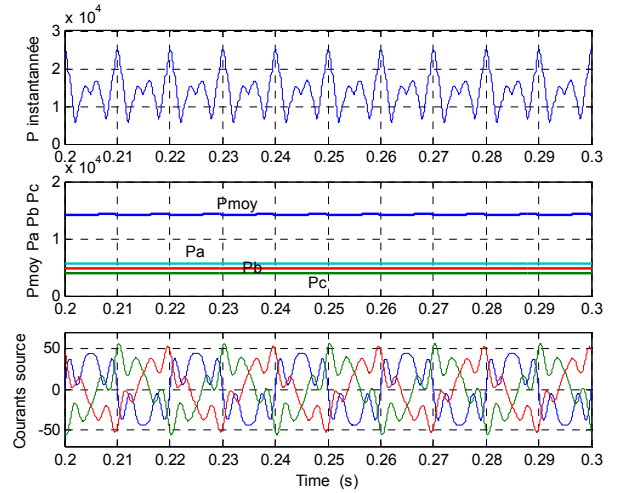
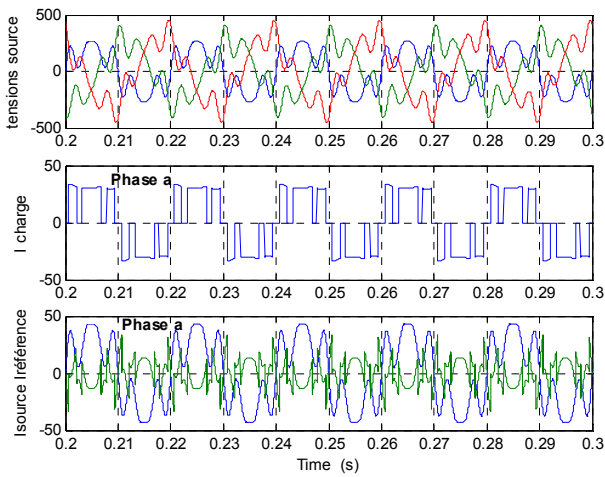


Fig. II.24 : Cas 4 : Source de tensions déséquilibrée et polluée

### II.4.4 Algorithme Fryze-Bucholz-Depenbrock (FBD)[67,68,71,72]

L'algorithme FBD essaye de reformer les courants de la source  $I_{Sa}$ ,  $I_{Sb}$  et  $I_{Sc}$  dans le but qu'ils soient proportionnels aux tensions de la source  $e_{Sa}$ ,  $e_{Sb}$  et  $e_{Sc}$  (pour que la charge vue de la source soit linéaire), cette méthode repose sur la mesure des tensions de la source et les courants de la charge pour la détermination d'une conductance équivalente :

$$G_i = \frac{\overline{e_{Si} I_{Li}}}{\overline{e_{Si} e_{Si}}} \quad \text{Avec } i = a, b, c \quad (II.51)$$

Où :

$$\overline{e_{Si} I_{Li}} = \frac{1}{T} \int_T e_{Si} I_{Li} dt = P \quad (II.52)$$

$$\overline{e_{Si} e_{Si}} = \frac{1}{T} \int_T e_{Si} e_{Si} dt = \frac{E_i^2}{2} \quad (II.53)$$

Avec :

- $P$  : la valeur moyenne dans la phase  $i$  (c'est la puissance active consommée par la charge) ;

- $E_i$  : l'amplitude de la phase  $i$ .

Le courant minimum demandé par la charge dans la phase  $i$  est :

$$I_{L,\min i} = G_i e_{Si}(t) \tag{II.54}$$

Pour avoir un facteur de puissance unitaire, la différence des courants doit être compensée, par conséquent le filtre actif injecte dans chaque phase les courants suivants :

$$\begin{aligned} I_{Fa} &= I_{La} - G_a \cdot e_{Sa}(t) \\ I_{Fb} &= I_{Lb} - G_b \cdot e_{Sb}(t) \\ I_{Fc} &= I_{Lc} - G_c \cdot e_{Sc}(t) \end{aligned} \tag{II.55}$$

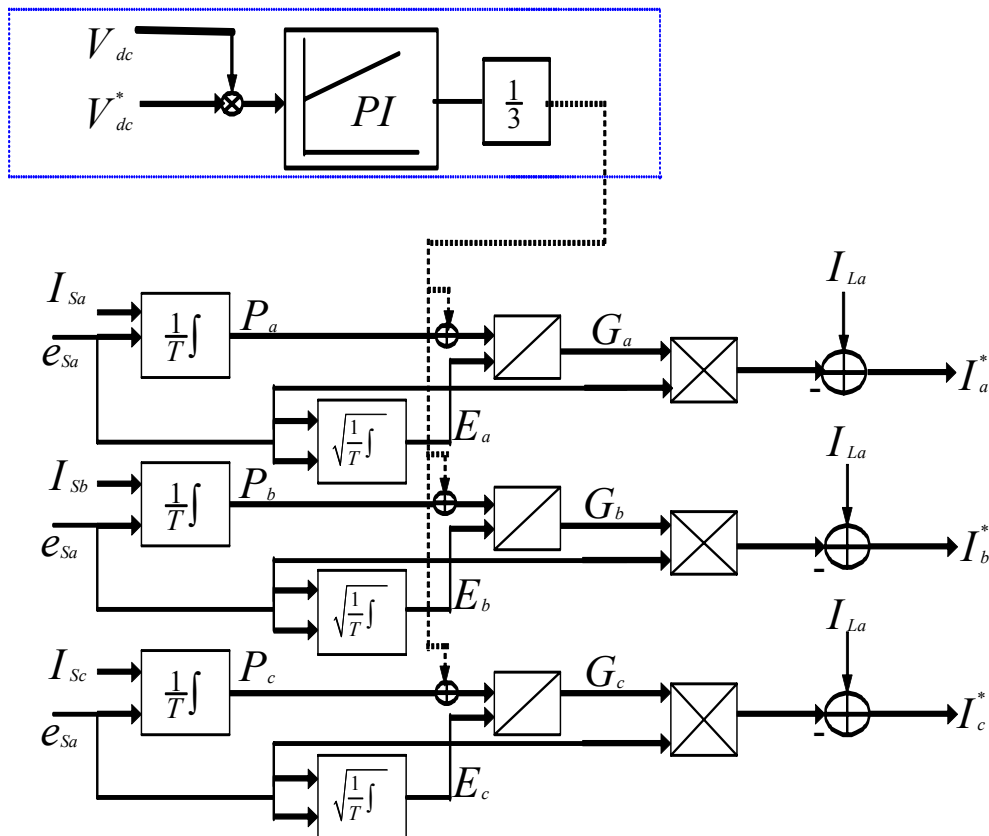


Fig. II.25 : Schéma block de l'algorithme FBD

Résultat de simulation (unité de mesure A, V  $\frac{1}{\Omega}$ )

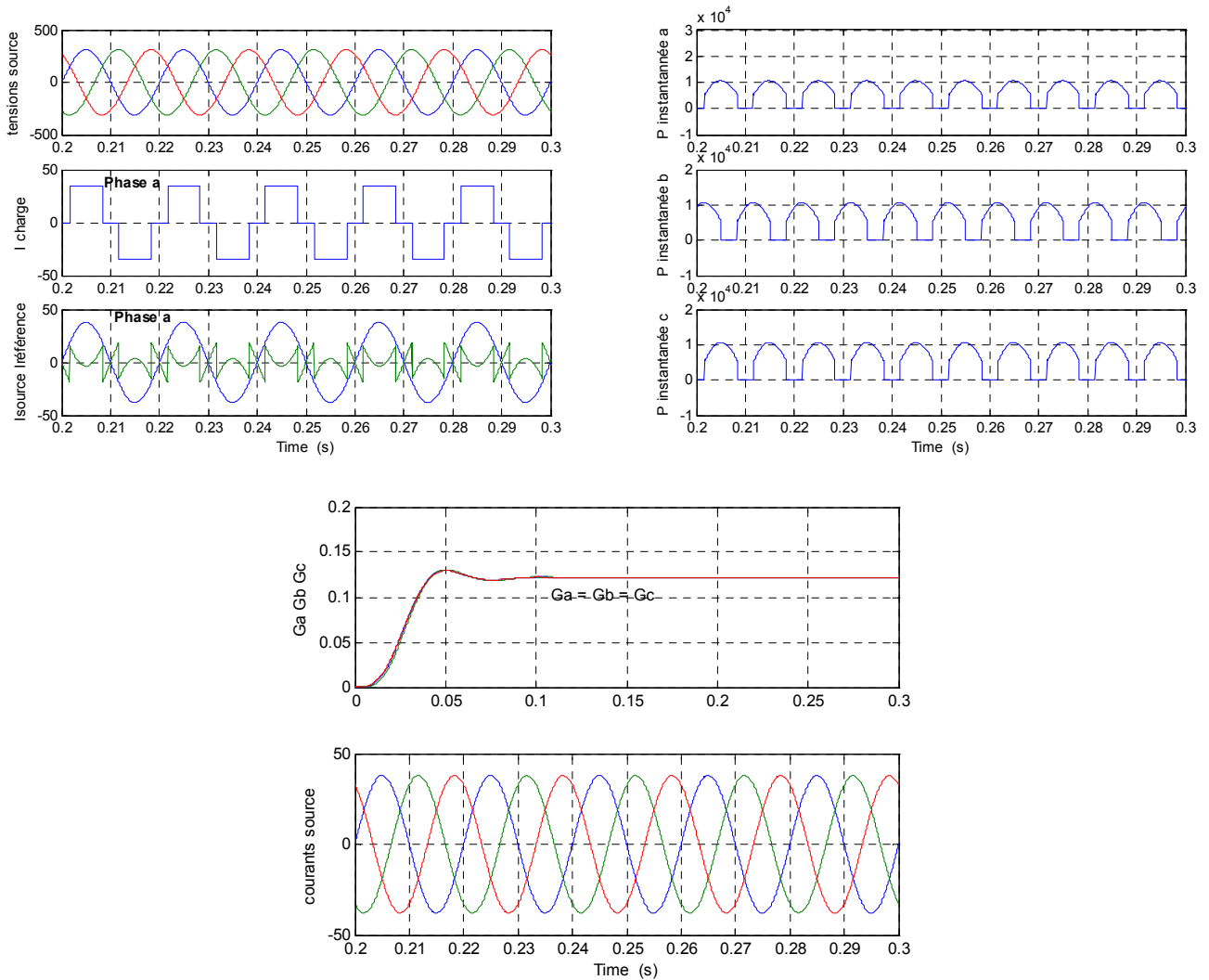
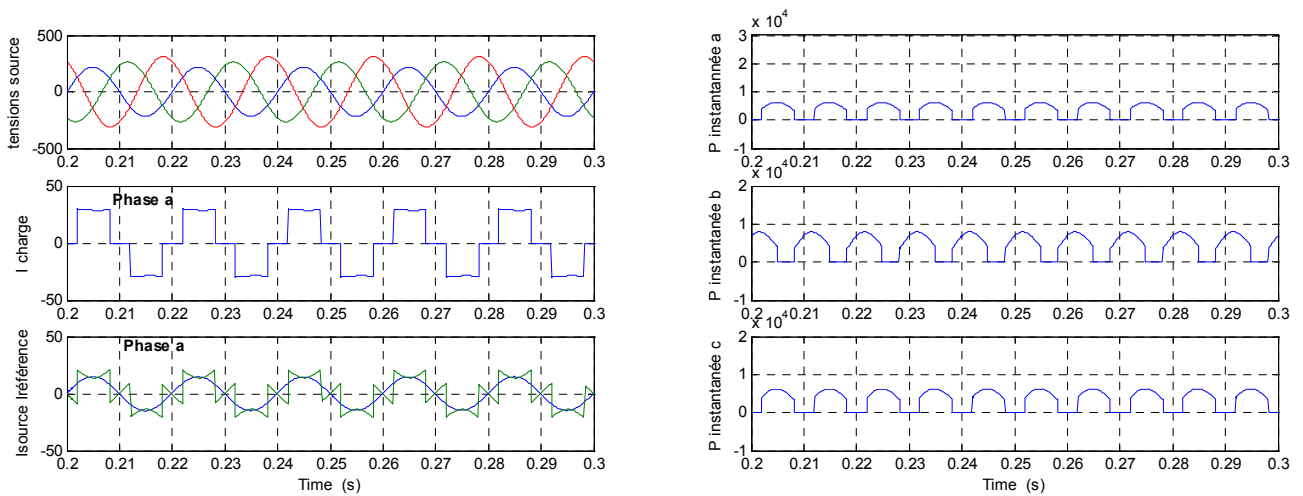


Fig. II.26 : Cas 1 : source de tensions équilibrée non polluée



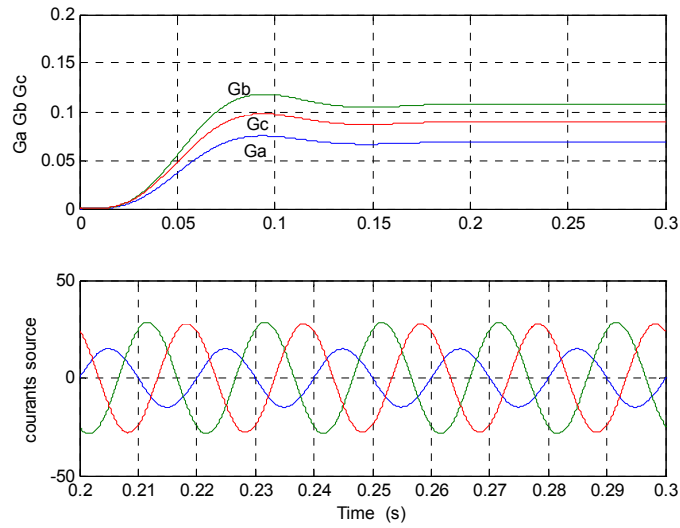


Fig. II.27 : Cas 2 : Source de tensions déséquilibrée non polluée

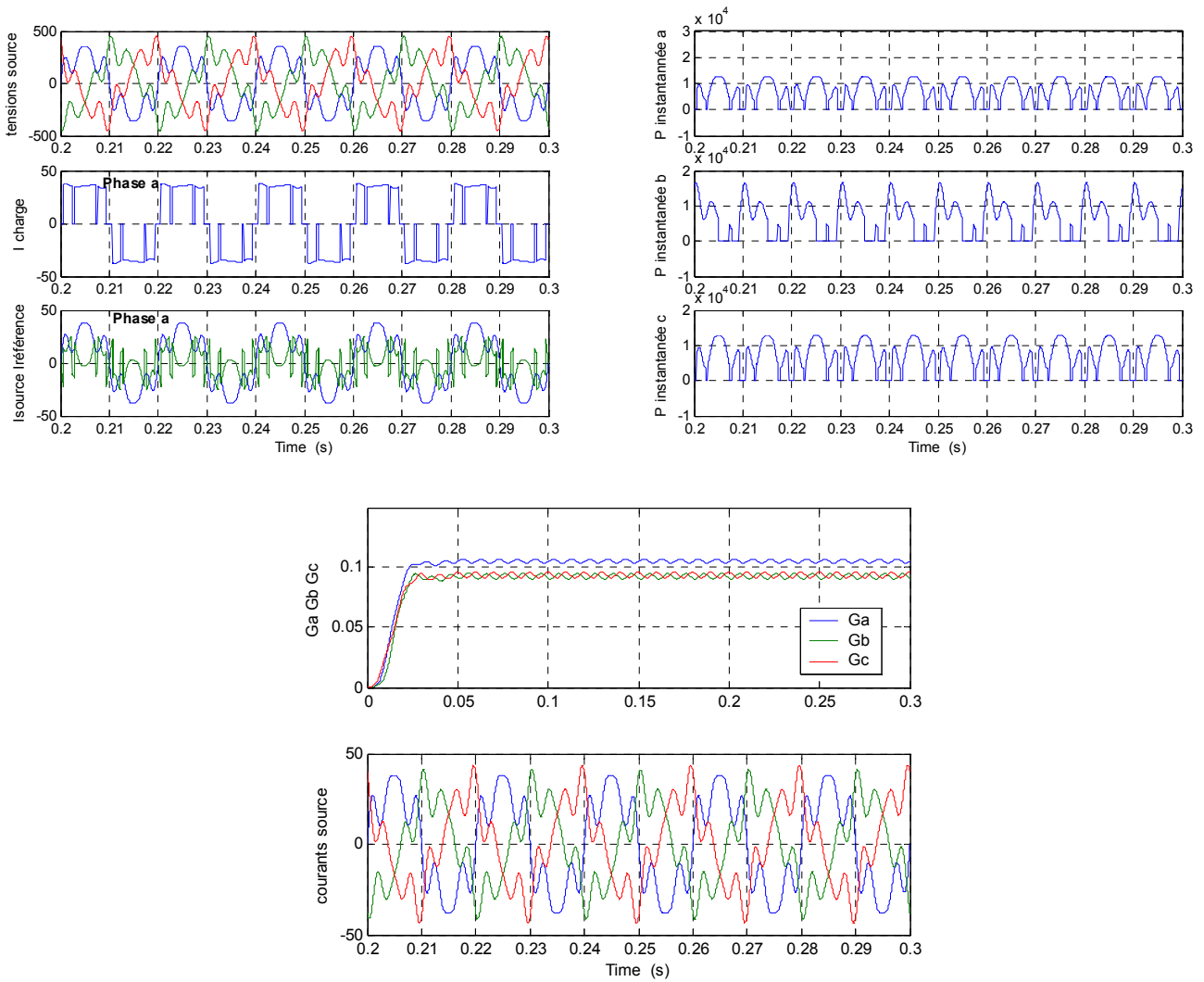


Fig. II.28 : Cas 3 : Source de tensions équilibrée et polluée

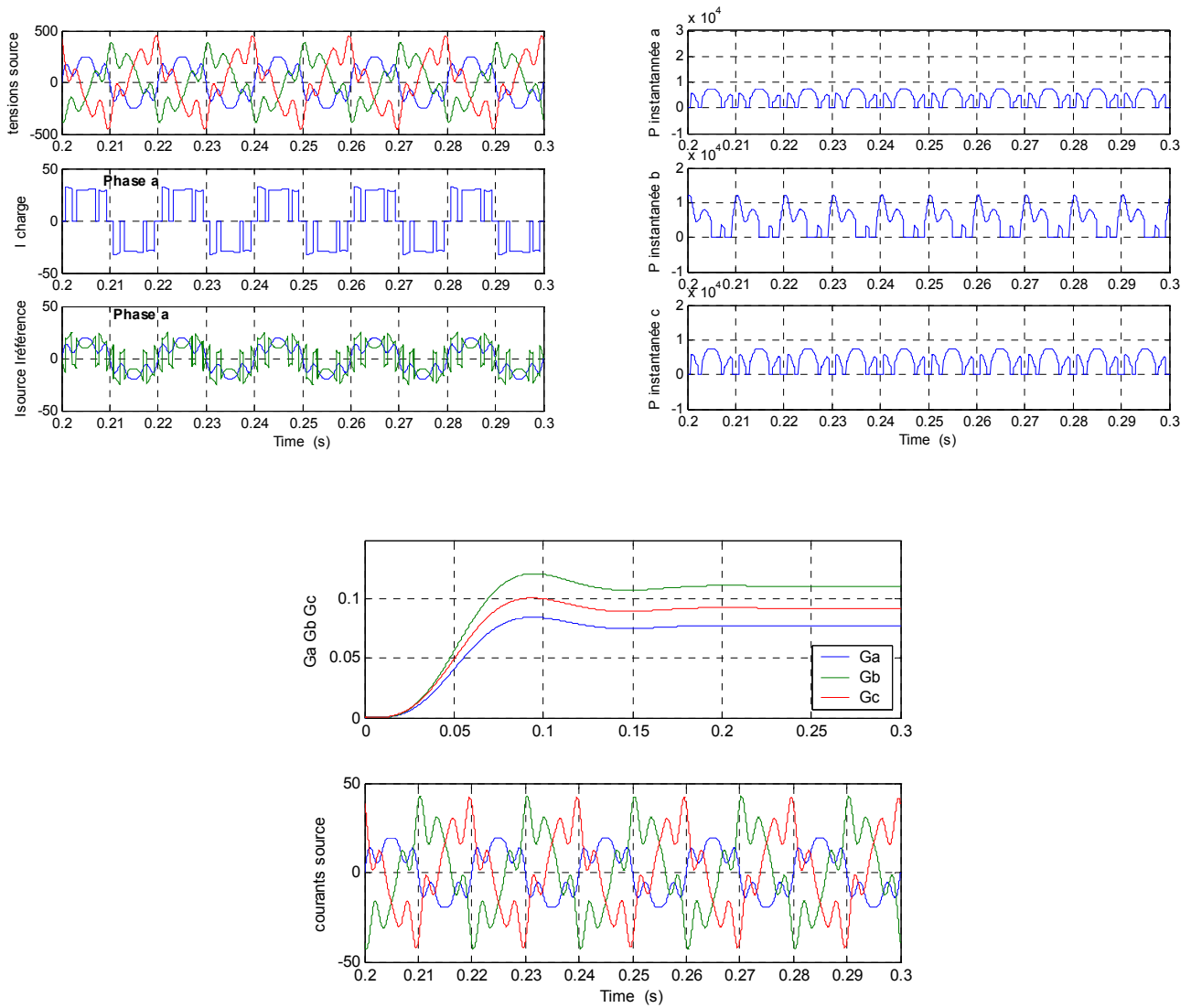


Fig. II.29 : Cas 4 : Source de tensions déséquilibrée et polluée

### II.4.5 La méthode de Fourier

Le résultat de la transformation de Fourier est un spectre continu de fréquence d'une fonction dans le domaine temporelle. La transformation discrète équivalente s'appelle la transformation de Fourier discrète (DFT). Pour les applications du filtre actif les courants de source ou de charge sont mesurés à des intervalles égaux avec une fréquence  $f_s$  ensuite les spectres des courants sont calculés par le DFT :

$$I[k] = \sum_{n=1}^{\infty} i[n] e^{j \frac{2\pi k n}{N}} \quad (\text{II.56})$$

$$k = 0, 1, 2, \dots, N-1$$

Le spectre en fréquence du courant  $I[k]$  représente les valeurs de tous les harmoniques de la fréquence fondamentale à la fréquence d'ordre  $N-1$ , le nombre des prélèvements du courant pendant une période du fondamentale est :

$$N = \frac{f_s}{f_0} \quad (\text{II.57})$$

À l'aide de l'équation d'Euler on peut écrire les spectre en fréquence selon :

$$\bar{I}[k] = \sum i[n] \cos\left(\frac{2\pi k n}{N}\right) - j \sum i[n] \sin\left(\frac{2\pi k n}{N}\right) \quad (\text{II.58})$$

De cette équation on peut déterminer les harmoniques, qu'on a besoin de compenser. La transformé inverse de la DFT est utilisé pour générer les courants de références dans le domaine temporelle, ces courants sont utilisés ensuite pour fournir les signaux de commande du VSI. Un avantage de la transformée DFT est que tous les harmoniques puissent être identifiés individuellement, par conséquent les harmoniques qu'on désire à compenser peuvent être sélectionnés et compensés. En outre cette méthode peut être mis en application dans un système monophasé aussi bien que dans un système polyphasé.

Cependant l'inconvénient majeur de cette méthode, c'est qu'une grande puissance de calcul est exigée. Spécialement, dans un système polyphasé le spectre de fréquence doit être calculé pour chaque phase. D'autre part, si tous les harmoniques doivent être compensés seulement l'amplitude du fondamental doit être déterminée, ainsi en économisant le temps de calcul. Bien que réduisant rigoureusement la puissance de calcul exigée, la méthode DFT exige toujours des processeurs très puissant. Un autre inconvénient est celui qu'en conditions transitoires les harmoniques ne peuvent pas être exactement détectés rapidement, parce que le spectre est calculé à partir des échantillons du cycle précédent du fondamental. Dans les produits commerciaux le DFT n'est pas appliqué dans les filtres d'harmoniques, dû à ces inconvénients.



### II.4.6 La méthode Sinusoïdale Généralisée de Fryze[73]

Cette méthode propose un nouvel algorithme de commande pour surmonter quelques inconvénients des autres méthodes, la transformation de Clark n'est plus employée et les définitions de puissance de la théorie pq ne sont pas utilisées directement. Les concepts appris de cette théorie sont employés dans une méthode de minimisation du courant.

Cette méthode utilise les courants de ligne abc, en évitant la transformation de Clarke, ainsi les courants mesurés de la charge non linéaire, ensemble avec un circuit de synchronisation robuste (circuit de commande à boucle de verrouillage PLL) forment un contrôleur concis pour le filtre actif shunt. Le contrôleur proposé force le filtre actif shunt à compenser le courant de charge, pour que les courants absorbés de la source deviennent sinusoïdaux et équilibrés, c à d ils sont constitués seulement des composantes fondamentales de la séquence directe, même sous la présence d'une tension de source déformée et/ou déséquilibrée.

Le circuit PLL peut atteindre un point stable de fonctionnement seulement si l'entrée  $p_3$  du régulateur PI a une valeur moyenne nulle ( $\bar{p}_3=0$ ) et que la partie oscillante à basse fréquence est minimisée. On peut écrire la puissance instantanée triphasée sous la forme :

$$p_3 = \bar{p}_3 + \tilde{p}_3 \tag{II.59}$$

la puissance moyenne triphasée est donnée par :

$$\bar{p}_3 = V_{+1} I_{+1} \cos(\omega t) \tag{II.60}$$

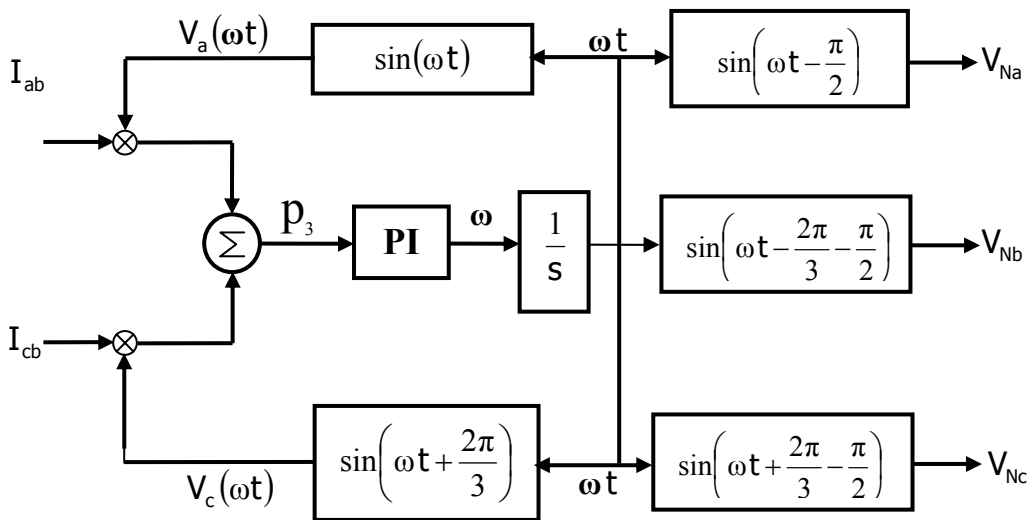


Fig. II.30 : Principe de la PLL proposée

Un point de fonctionnement stable est trouvé seulement si la phase  $\omega$  est égale à la fréquence du système (correspondant à la composante fondamentale directe) et le signal de rétroaction correspondant au signal de la tension auxiliaire  $v_a(\omega t)$  devient orthogonal à la composante

fondamentale de la séquence direct du courant de la charge  $\dot{i}_a$ . Cependant, si le point où  $\dot{i}_a$  est déphasé par rapport à  $v_a(\omega t)$  atteint  $90^\circ$ , le system PLL n'est pas encore stable.

En ce moment, une éventuelle perturbation peut augmenter légèrement la fréquence de système (la fréquence du  $\dot{i}_{ab}$  et  $\dot{i}_{cb}$ ), provoque l'incréméntation de la vitesse de rotation du  $I_{+1}$  par rapport aux signaux de la tension de rétroaction  $v_a(\omega t)$  et  $v_c(\omega t)$ . Par conséquent,  $\cos(\phi)$  devient supérieure à  $90^\circ$ , ceci entraîne une valeur moyenne négative de la puissance moyenne ( $\bar{p}_3 \pi 0$ ) ce qui fait diminuer  $\omega$  en provoquant la diminution de l'angle de déphasage. Ce principe fondamental caractérisant le circuit PLL peut être exploité pour composer les fonctions sinusoïdales nécessaires.

$$\begin{cases} V_{Na} = \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \\ V_{Nb} = \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3} - \frac{\pi}{2}\right) \\ V_{Nc} = \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3} - \frac{\pi}{2}\right) \end{cases} \quad (\text{II.61})$$

Ces composantes de tension ont des amplitudes unitaires et ont la même fréquence que  $I_{+1}$ . Comme mentionné, la stratégie de commande proposée a pour objectif de compenser les courants de charge afin de garantir des courants équilibrés et sinusoïdaux dans le réseau d'alimentation. Dans ce cas-ci, la différence entre le courant fondamental de la séquence positive et le courant réel de charge comporte tous les composantes du courant de charge qui devrait être compensée. Pour déterminer entièrement la composante de la séquence directe du courant de la charge, son amplitude est représentée par la conductance dynamique, qui devrait également être calculée. Les valeurs instantanées de la composante fondamentale directe du courant de charge peuvent être déterminées en multipliant les " tensions auxiliaires " résultantes du circuit PLL par le signal  $\bar{G}_e$  c'est-à-dire,

$$\begin{aligned} i_{pa} &= \bar{G}_e \cdot v_{Na} = \bar{G}_e \cdot \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \\ i_{pb} &= \bar{G}_e \cdot v_{Nb} = \bar{G}_e \cdot \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3} - \frac{\pi}{2}\right) \\ i_{pc} &= \bar{G}_e \cdot v_{Nc} = \bar{G}_e \cdot \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3} - \frac{\pi}{2}\right) \end{aligned} \quad (\text{II.62})$$

Pour réaliser une expression valide pour  $\bar{G}_e$  les fondements appris de la théorie pq sont introduits dans un algorithme de commande basé sur la méthode de minimisation. Les expressions générales des puissances en termes de composants symétriques, présentés dans les équations (II.10 à II.15), peuvent aider à clarifier l'explication suivante. Seulement une puissance réelle (active) constante est développée, si les composantes fondamentales de la séquence directe du système des tensions et des courant de la charge sont considérées et que le déphasage entre eux est nul. Si les deux systèmes sont orthogonaux entre eux, seulement une puissance (réactive) imaginaire constante est développée. D'autre part, le courant générique de charge peut être minimisé (compensé) en déterminant sa partie active donnée par :

$$\begin{aligned} i_{wa} &= G_e \cdot v_a \\ i_{wb} &= G_e \cdot v_b \\ i_{wc} &= G_e \cdot v_c \end{aligned} \quad (II.63)$$

où  $v_a$ ,  $v_b$  et  $v_c$  sont les tension des phase de la source,  $G_e$  une variable réelle représentant une conductance réelle déterminée par :

$$G_e = \frac{P_3}{\|v_{somme}\|^2} = \frac{v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c}{v_a^2 + v_b^2 + v_c^2} \quad (II.64)$$

$i_a$ ,  $i_b$  et  $i_c$  sont les courant de charge,  $i_{wa}$ ,  $i_{wb}$  et  $i_{wc}$  sont les courants minimisés (actifs) qui transfèrent la même énergie que celle transférée par les courant de charge.

$$p_3 = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c = v_a i_{wa} + v_b i_{wb} + v_c i_{wc} \quad (II.65)$$

Pour à cette raison, on les appelle les courants actifs, où ces compléments sont appelés les courant non-actifs :

$$\begin{aligned} i_{qa} &= i_a - i_{wa} \\ i_{qb} &= i_b - i_{wb} \\ i_{qc} &= i_c - i_{wc} \end{aligned} \quad (II.66)$$

Maintenant, si  $v_a$ ,  $v_b$  et  $v_c$  dans (II.64) sont remplacées par les signaux  $v_{Na}$ ,  $v_{Nb}$  et  $v_{Nc}$  issus à partir du PLL, une nouvelle conductance  $G_e$  est obtenue et à partir de laquelle la conductance  $\overline{G_e}$ , nécessaire dans (II.62), peut être déterminée. Si dans l'équation (II.63) on remplace les tensions par  $v_{Na}$ ,  $v_{Nb}$  et  $v_{Nc}$ ,  $G_e$  par  $\overline{G_e}$  les équations (II.62) et (II.63) sont alors équivalentes.

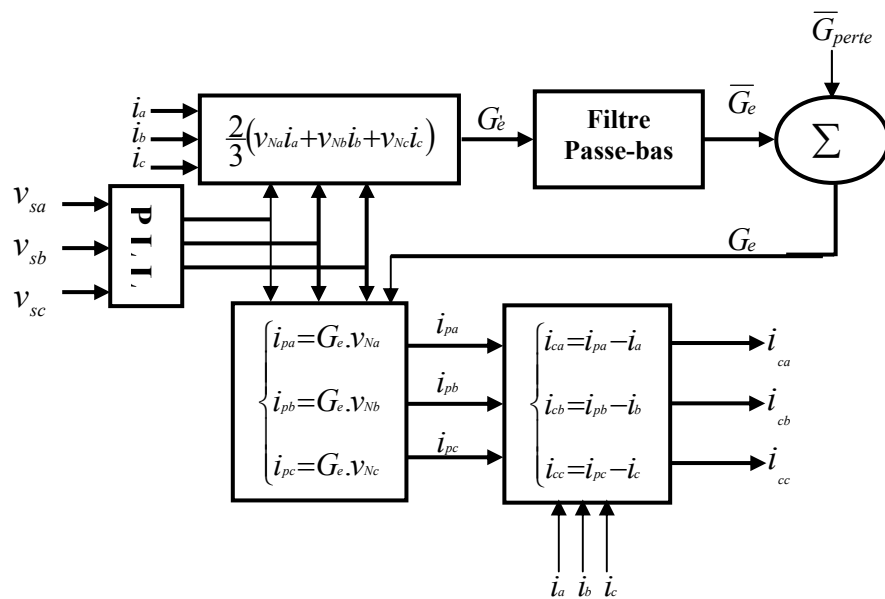


Fig. II.31 : Principe de la méthode SGF

On peut avoir la simplification :

$$\|v_{somme}\|^2 = v_{Na}^2 + v_{Nb}^2 + v_{Nc}^2 = \frac{3}{2} \quad (\text{II.67})$$

Donc, la conductance instantanée modifiée devient :

$$G_e = \frac{2}{3} (v_{Na} i_a + v_{Nb} i_b + v_{Nc} i_c) \quad (\text{II.68})$$

on tire deux points très intéressants :

- la valeur de  $G_e$  contient uniquement la composante fondamentale de la séquence positive ;
- les signaux  $v_{Na}$ ,  $v_{Nb}$  et  $v_{Nc}$  sont en phase avec les composantes fondamentales de  $i_a$ ,  $i_b$  et  $i_c$ , il n'y a pas une composante moyenne de la puissance imaginaire ;
- la valeur moyenne de  $G_e$  représente la conductance  $G_e$  de l'équation (II.62).

Pour assurer la stabilité du DC-link du filtre actif shunt à une valeur constante égale à la valeur de référence  $V_{DCref}$ , il faut qu'une partie de la puissance active soit absorbée du réseau à travers le VSI pour compenser les pertes en puissance dans les interrupteurs semi-conducteurs utilisés. Généralement, il existe certaines fluctuations de la tension  $V_{DC}$  autour de la valeur de référence, la régulation de la tension DC-link est assuré par un régulateur PI comme presque tous les autres méthodes utilisées dans le domaine de la compensation avec le filtre actif shunt, ce régulateur utilise la partie de la tension responsable de la création de l'énergie correspondant aux pertes ainsi mentionnées, dans ce cas c'est la composante continue de la différence entre la tension de référence et celle mesurée aux bornes du DC-link, pour cela on doit utiliser un filtre passe-bas, pour extraire la composante continue correspond à l'entrée du régulateur PI. La sortie du PI présente une conductance équivalente aux pertes  $G_{perte}$ , la conductance de compensation utilisée dans l'algorithme ainsi expliquée est :

$$G_c = \bar{G}_e + G_{perte} \quad (\text{II.69})$$

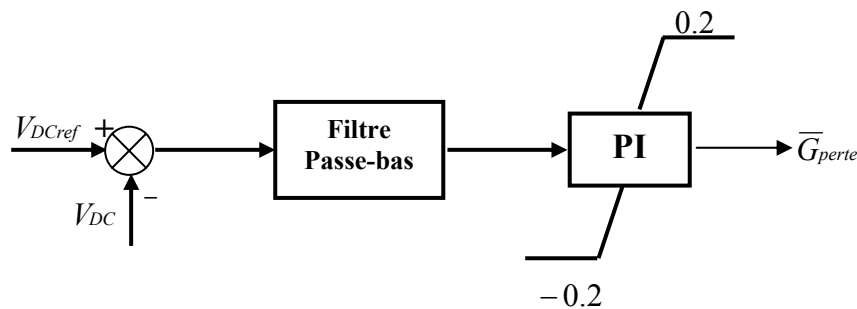


Fig. II.32 : Principe de la régulation du DC-Link

Résultat de simulation (unité de mesure A, V  $\frac{1}{\Omega}$ )

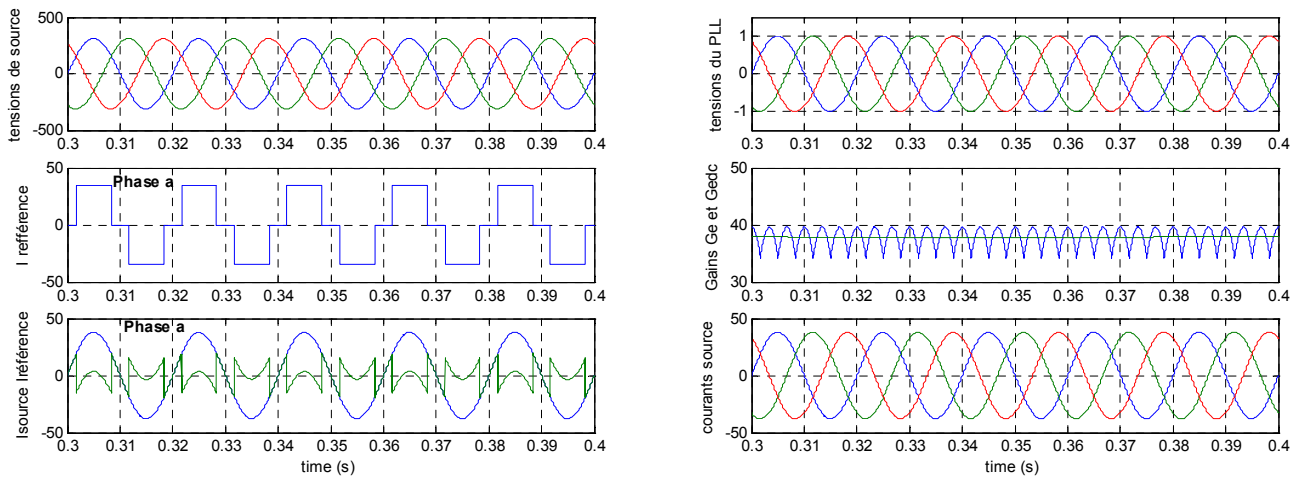


Fig. II.33 : Cas 1 : Source de tensions équilibrée non polluée

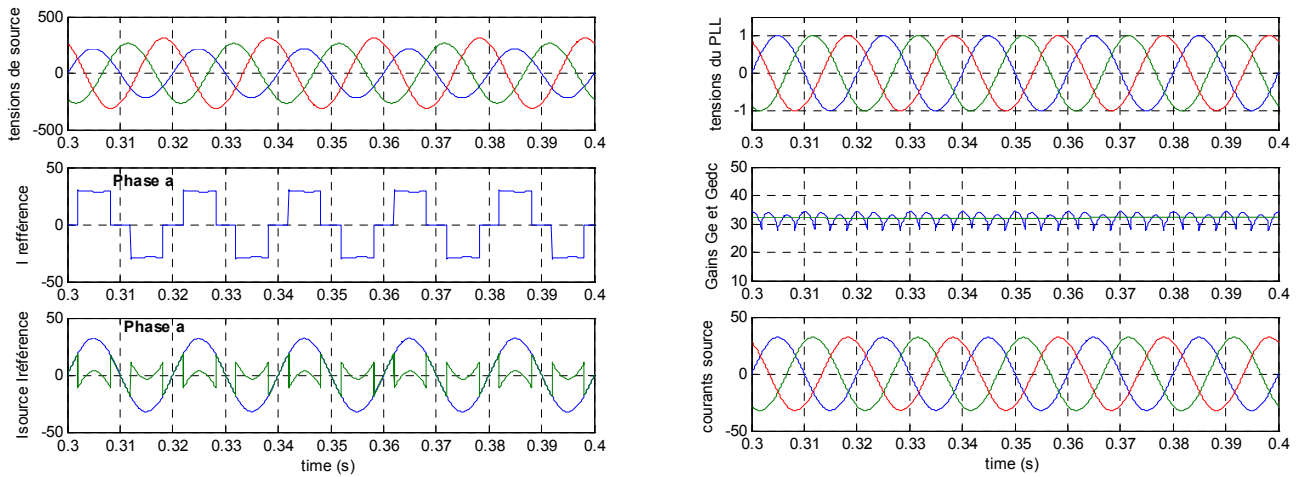


Fig. II.34 : Cas 2 : Source de tensions déséquilibrée non polluée

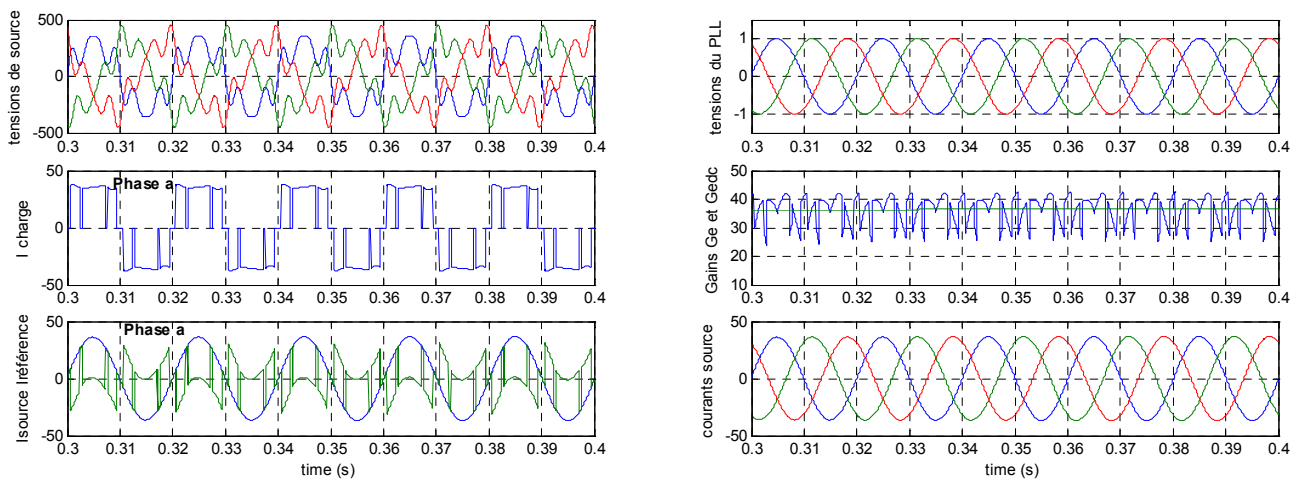


Fig. II.35 : Cas 3 : Source de tensions équilibrée et polluée

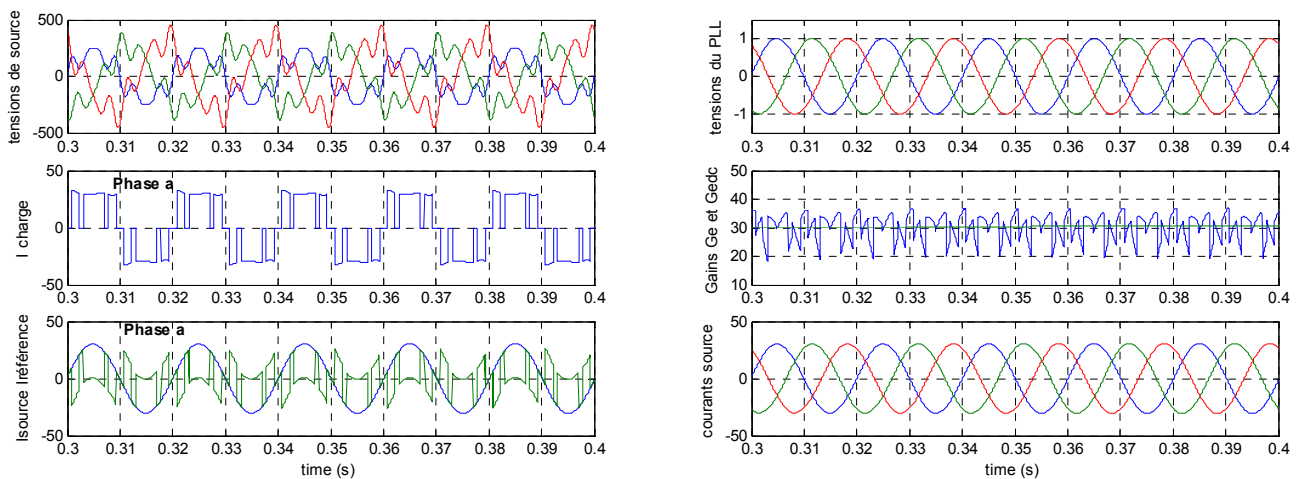


Fig. II.36 : Cas 4 : Source de tensions déséquilibrée et polluée

## II.5 CONCLUSION

L'étape de compensation d'un filtre actif peut être réalisée par une multitude de différents moyens. Le choix final devrait dépendre de l'application, du type de charge non linéaire, et de la source d'alimentation disponible. Les méthodes décrites ci-dessus sont juste un échantillon de certains des schémas les plus populaires, et sont comparées plus en détail ci-dessous. La première comparaison a été basée sur, si la méthode pourrait être appliquée dans des circuits analogiques ou elle exigerait une exécution numérique. L'exécution analogique aura comme conséquence une réponse beaucoup plus rapide. L'élément compensateur doit poursuivre en permanence le changement du courant non linéaire pour qu'il puisse injecter un courant de compensation avec une polarité opposée à la partie du courant provoquant la perturbation du courant dans la charge non linéaire. Le retard engendré par le processus A/D et le temps de calcul de l'algorithme numérique va retarder la poursuite du compensateur, cela donne l'apparition des transitions dans le courant de la source. Cependant, il est difficile de mettre en application des calculs complexes en forme analogique, ainsi la mise en application des réalisations numériques, telles que le DSP, sont souvent employées. Le tableau suivant donne une comparaison des méthodes de compensation.

La méthode de la théorie pq a l'avantage d'être assez simple pour mettre en application sous forme analogique puisqu'elle a besoin seulement des opérations de multiplication, division et de filtrage simple. L'inconvénient le plus évident de la méthode pq est qu'il s'exécute mal dans des conditions non équilibrées de tension d'alimentation, parce que l'algorithme suppose que les tensions d'alimentation sont équilibrées et sinusoïdales. Un avantage de la méthode SRF est qu'il s'exécute bien avec n'importe quelle forme de tension et/ou n'importe quelle formes d'onde du courant. Un inconvénient est que l'algorithme est assez complexe et exige un circuit PLL pour fonctionner correctement. Dans la méthode SDA, l'exécution est bonne pour les conditions de la tension d'alimentation en cas de déséquilibre. Un inconvénient de cette méthode est qu'il suppose que les courants dans chaque phase sont égaux, ou que la charge est équilibrée.

Tab. II.1 : comparaison des stratégies de commande

La méthode	Analogique	digitale	avantages	inconvénient
La théorie pq	oui	oui	simple	Bonne pour des tensions sinusoïdales uniquement
SRF	non	oui	Utilisé pour une source déséquilibrée avec/sans distorsion	Exige un circuit PLL
FBD	non	oui		
SDA	oui	oui	Utile pour une source déséquilibré	Suppose que les courants dans les phases sont équilibrés
SGF	non	oui	Utilisé pour une source déséquilibrée avec/sans distorsion	Exige un circuit PLL

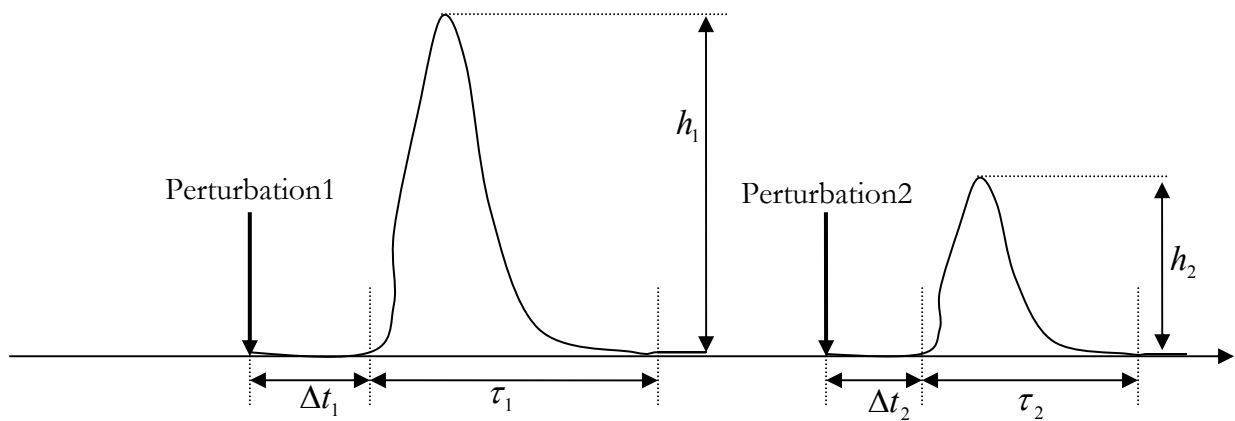


Fig.II.37 : Variation du taux de distorsion harmonique du courant de phase

Les résultats des simulations obtenues pour une séquence de perturbations à trois niveaux de distorsion harmonique totale du courant de charge :

- Phase 1 : de 1 – 2 s THD = 31 % ;
- Phase 2 : de 2 – 4 s THD = 38.5 % ;
- Phase 3 : de 4 – 5 s THD = 57 %

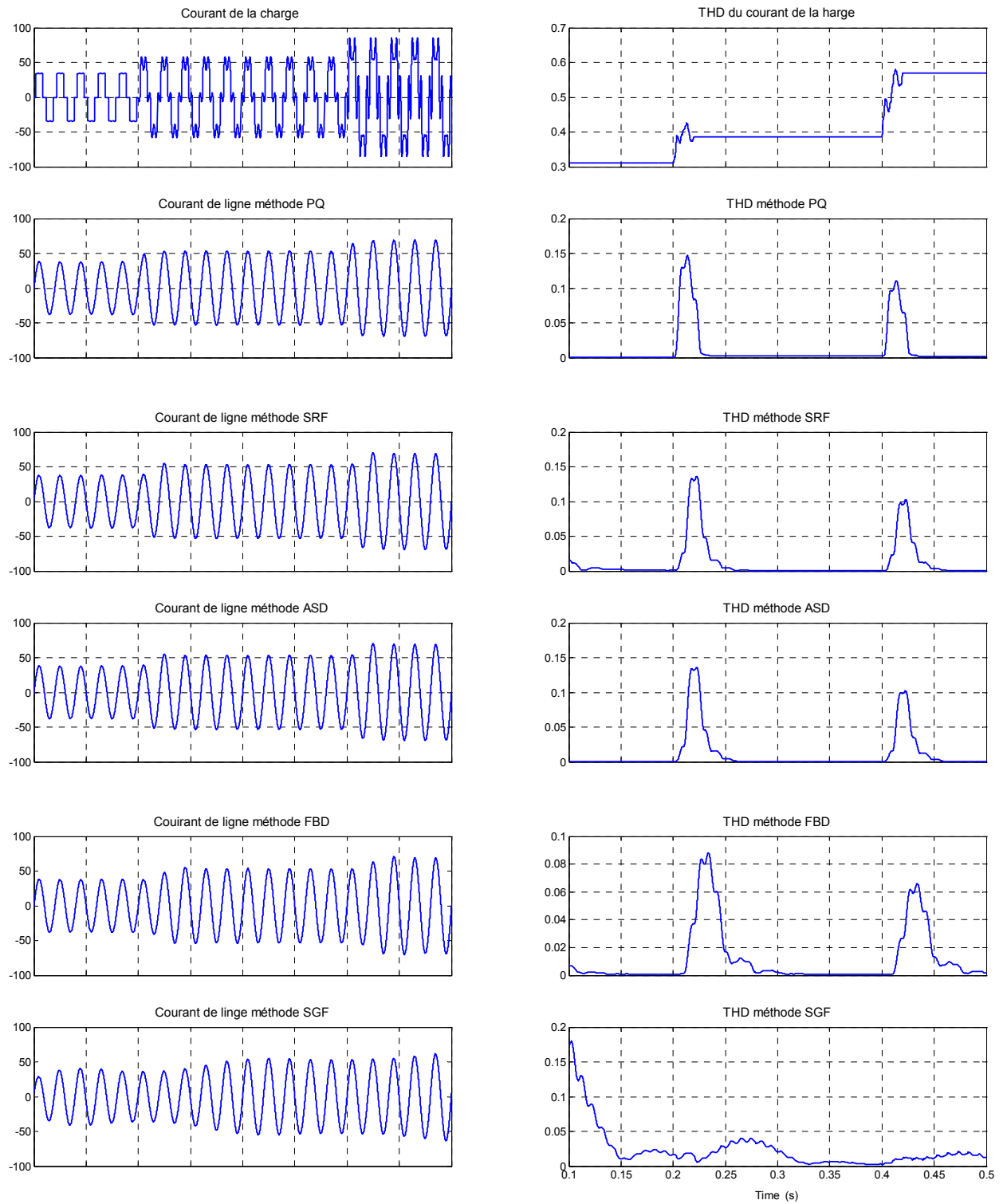


Fig. II.38 : Représentation temporelle comparative des courant de ligne après compensation et ces THD pour les différentes stratégie de commande



Selon Fig. II.37 et Fig. II.38 Les différentes variables paramétriques pour chaque méthode de compensation sont représentées dans le Tab. II. .

Tab. II.2 : Résultat de simulation des variables pour chaque méthode (temps en ms)

$h_1$	$\Delta t_1$	$\tau_1$		$\Delta t_2$	$\tau_2$	$h_2$
PQ	0.0055	0.03	0.15	0.007	0.03	0.12
SRF	0.008	0.06	0.13	0.008	0.06	0.10
ASD	0.006	0.06	0.14	0.0075	0.06	0.10
FBD	0.0095	0.11	0.08	0.0011	0.11	0.07
SGF	0.002	0.18	0.04	0.0025	0.250	0.02

Ces résultats montrent l'efficacité de la méthode de compensation PQ avec une souplesse incomparable confirmée un temps de réponse réduit et une implantation simple pour retourner au régime sinusoïdal.

D'après ces comparaisons on préfère l'utilisation de cette méthode pour l'identification des différentes perturbations pour la commande des filtres actifs de puissance présentés dans cette thèse.

## **C H A P I T R E   I I I**

# **COMPENSATION DES PERTURBATIONS DES COURANTS PAR LE FILTRE ACTIF PARALLELE**

## CHAPITRE III

### Compensation des perturbations des courants Filtre Actif Parallèle

#### III-1 Introduction

Les principes de filtrage actif parallèle a été présenté par Gyugyi *et al.*[28], en 1976. La figure III-1 récapitule les concepts de base du filtrage actif parallèle shunt. Il a été considéré que les courants harmoniques peuvent surgir principalement en raison des facteurs suivants:

- charges non linéaires;
- tensions harmoniques dans le système de production de l'énergie (source).

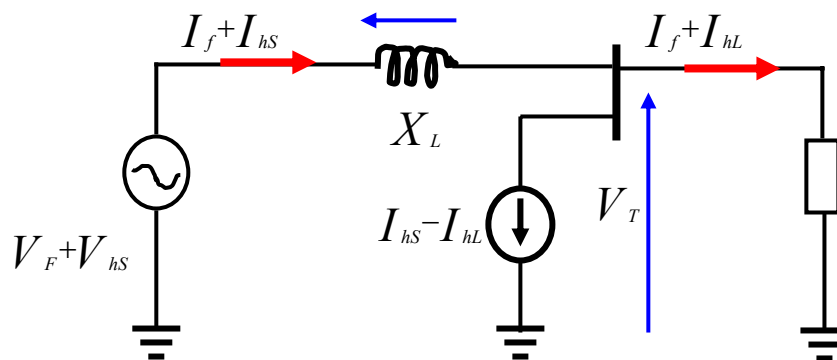


Figure. III.1 : Principe de compensation du F.A.P

Le facteur (a) et le facteur (b) sont représentés respectivement par  $I_{hL}$  et  $I_{hS}$  Fig. III.1. Il à été montré qu'un *filtre actif parallèle* peut compenser la distorsion harmonique de la source ( $I_{hS}$ ) et de la charge ( $I_{hL}$ ). Cependant, cette approche peut augmenter fortement la puissance nominale du *filtre actif parallèle*. Une autre solution pour compenser les harmoniques du courant  $I_{hS}$  et d'utiliser le filtre actif série.

Le filtre actif shunt peut être commandé proprement d'une manière à avoir une caractéristique de compensation très sélective. En d'autres termes, il est possible de choisir quel courant devrait être compensé (ou éliminé) des  $I_{hS}$  et/ou des  $I_{hL}$ . Normalement, les filtres actifs sont employés pour compenser *seulement* les harmoniques existant dans le courant de charge (Facteur a) [ 35,74,75,76,77,78,79]. Les objectifs que nous nous sommes fixés dans ce chapitre devront nous permettre d'améliorer les performances de compensation du filtre actif shunt dans le cas de conditions des perturbations du courant sévères, à savoir :

- La présence des harmoniques dans le courant de charge ;
- La présence des harmoniques dans la source d'alimentation ;
- La présence du déséquilibre dans le courant de charge ;
- Un facteur de puissance relativement faible (compensation de la puissance réactive) ;
- Une source de tension déséquilibrée (compensation du courant seulement).

Dans le but d'atteindre ces objectifs, on va au préalable étudier la structure générale du filtre actif shunt.

## III-2 Description générale du F.A.P

### III-2-1 Structure générale

La structure générale du filtre actif parallèle se présente en deux parties :

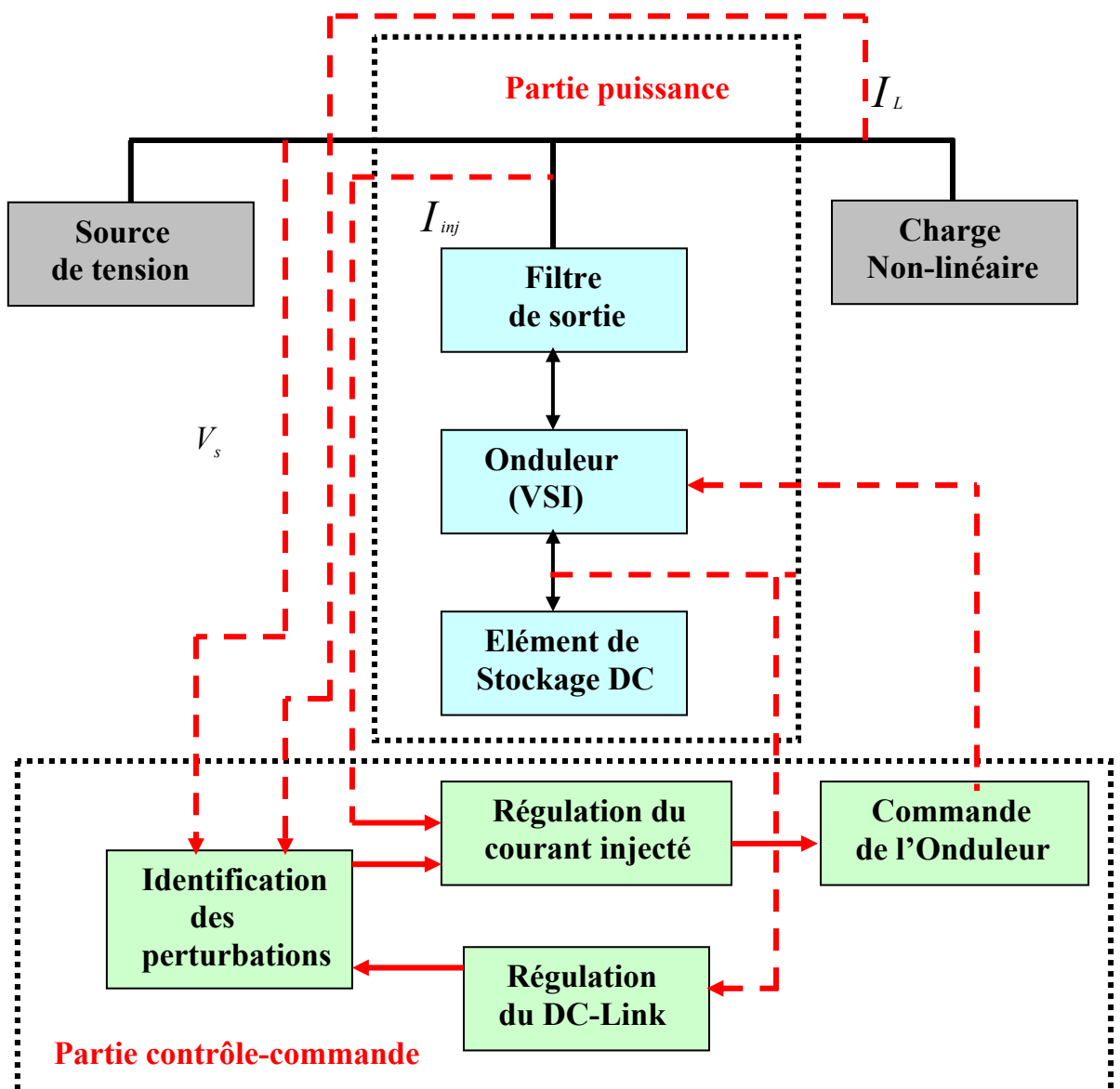


Fig. III.2 : Structure générale du F.A.P

- **La partie puissance** est constituée essentiellement du convertisseur statique qui représente la source du courant de compensation, contenant un onduleur de tension (VSI), un filtre de sortie et une source DC.
- **La partie contrôle-commande** constitue par trois éléments essentiels :
  - ✓ Elément d'identification des perturbations ;
  - ✓ Eléments de régulation (régulation du courant de compensation et de l'énergie stockée dans la batterie du DC-Link) ;
  - ✓ Elément de commande de l'onduleur.

### III-2-2 Partie Puissance

#### III-2-2-1 Onduleur de tension (VSI : Voltage source inverter) :

Principalement l'onduleur de base utilisé est un onduleur à deux niveaux, il se compose de trois bras à interrupteur réversibles en courant, commandés à la fermeture et à l'ouverture à base du semi-conducteur ( GTO ou IGBT ) avec des diodes antiparallèles Fig III.3. Il est semblable aux onduleurs utilisés pour la commande des moteurs à courant alternatif. Cependant, dans le cas du filtre actif shunt se comporte comme une source de courant non sinusoïdale, il doit avoir une fréquence de commutation  $f_{com}$  très élevée afin de reproduire avec précision le courant de compensation [80].

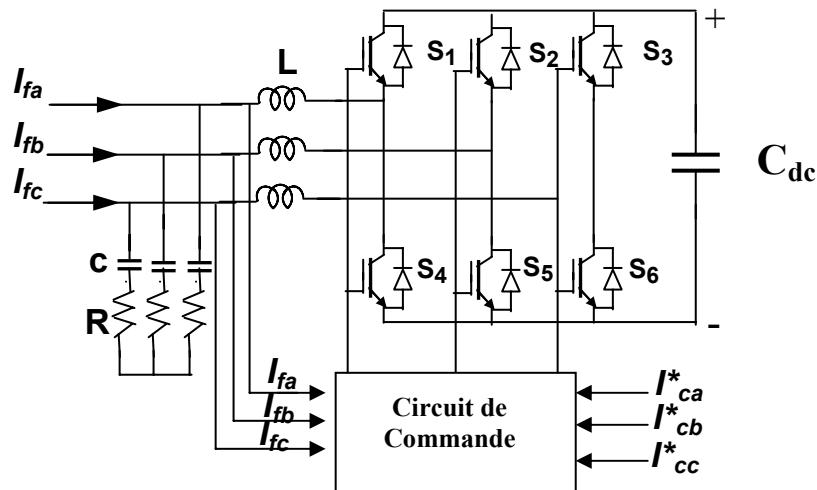


Fig. III.3 : Circuit de puissance du FAP

La comparaison critique entre le VSI et le CSI n'est pas un objectif de notre travail. On peut préférer le CSI ( Fig. III.4 ) dû à sa robustesse [1,14,76] ou le VSI dû à ses faibles pertes et son coût initial réduit [1,14,42]. De nos jours, pratiquement presque tous les filtres actifs déjà commercialisés utilisent des VSI[42] (Fig.III.5, Fig.III.6).

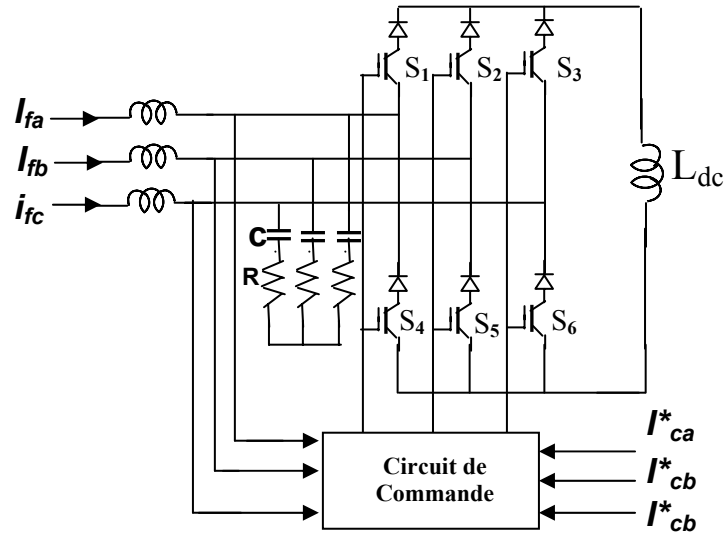


Fig. III.4 : Circuit de puissance du FAP

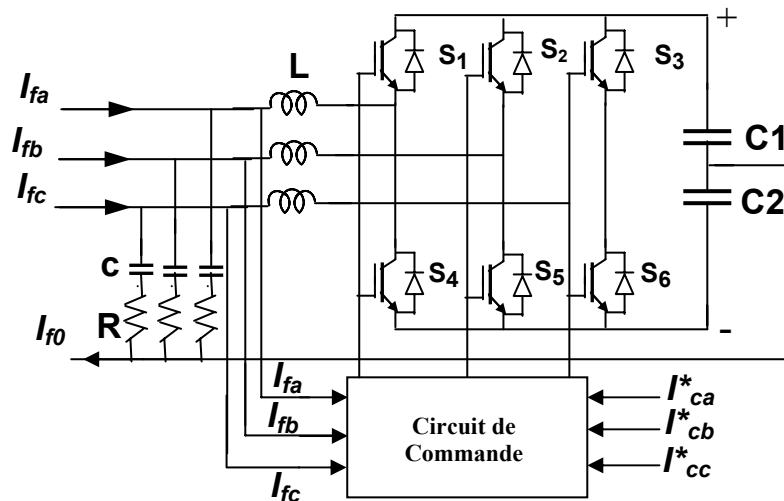


Fig. III.5 : Convertisseur de tension du FAP avec condensateur à point milieu

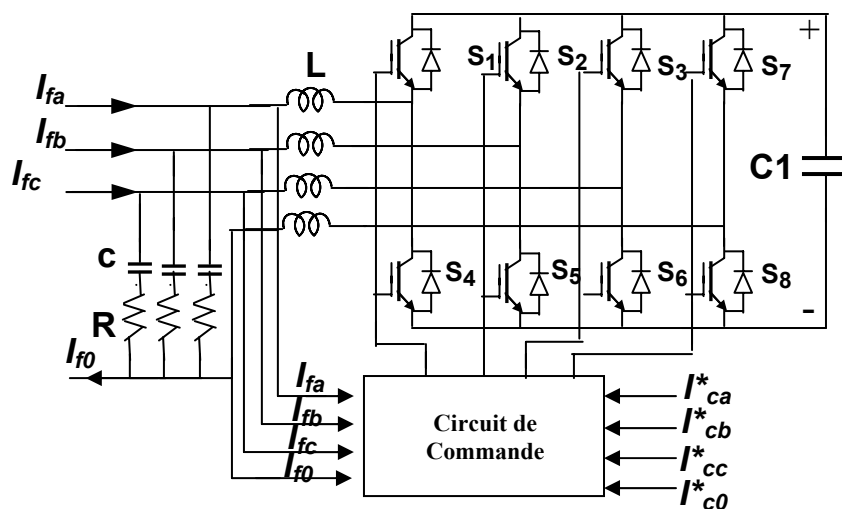


Fig. III.6 : Convertisseur de tension VSI du FAP à quatre bras

Cette structure du filtre actif parallèle ne permet pas la fermeture simultanée des semi-conducteurs d'un même bras sous peine de court-circuiter le condensateur de stockage. Par contre, ils peuvent être tous les deux ouverts (pendant un temps mort). La continuité des courants est alors assurée par la mise en conduction d'une des diodes d'un même bras [1].

En pratique, nous commandons les deux semi-conducteurs d'un même bras de façon complémentaire : la conduction de l'un entraîne le blocage de l'autre. En réalité, le mode, où les semi-conducteurs d'un même bras sont tous les deux fermés, n'existe que durant les commutations. C à d :

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{S}_4 \\ \overline{S}_5 \\ \overline{S}_6 \end{bmatrix} \quad (\text{III.1})$$

Afin d'éviter un court-circuit à cause du délai de blocage des interrupteurs, il faut insérer sur un même bras, un temps d'attente, également appelé temps mort, entre la commande de blocage d'un interrupteur et la commande d'amorçage de l'autre. Avec l'hypothèse des commutations instantanées, ce mode de fonctionnement ne sera pas pris en compte et par conséquent, aucun risque de court-circuiter le condensateur n'est à craindre.

### III-2-2-2 Tension de sortie du VSI

L'ouverture et la fermeture des interrupteurs de l'onduleur de la Fig. II-3 dépendent de l'état des signaux de commande  $(S_1, S_2, S_3)$ , comme défini ci-dessous :

$$\begin{aligned} S_1 &= \begin{cases} 1 & T_1 \text{ fermé et } T_4 \text{ ouvert} \\ 0 & T_1 \text{ ouvert et } T_4 \text{ fermé} \end{cases} & S_1' &= \begin{cases} 1 & T_1 \text{ ouvert et } T_4 \text{ fermé} \\ 0 & T_1 \text{ fermé et } T_4 \text{ ouvert} \end{cases} \\ S_2 &= \begin{cases} 1 & T_2 \text{ fermé et } T_5 \text{ ouvert} \\ 0 & T_2 \text{ ouvert et } T_5 \text{ fermé} \end{cases} & S_2' &= \begin{cases} 1 & T_2 \text{ ouvert et } T_5 \text{ fermé} \\ 0 & T_2 \text{ fermé et } T_5 \text{ ouvert} \end{cases} \\ S_3 &= \begin{cases} 1 & T_3 \text{ fermé et } T_6 \text{ ouvert} \\ 0 & T_3 \text{ ouvert et } T_6 \text{ fermé} \end{cases} & S_3' &= \begin{cases} 1 & T_3 \text{ ouvert et } T_6 \text{ fermé} \\ 0 & T_3 \text{ fermé et } T_6 \text{ ouvert} \end{cases} \end{aligned} \quad (\text{III.2})$$

Ainsi, on pourra exprimer huit cas possibles de tension de sortie du filtre actif Vf (référées au neutre n de la source), selon les valeurs prises par les interrupteurs :

$$[S_1, S_2, S_3] = \{(0,0,0), (0,0,1), (0,1,0), (0,1,1), (1,0,0), (1,0,1), (1,1,0), (1,1,1)\} \quad (\text{III.3})$$

Dans le cas d'utilisation des convertisseurs PWM, Le système de commande vectoriel peut être utilisé pour obtenir la commande indépendante de la puissance active et réactive. Récemment la théorie de la commande vectorielle est appliquée pour l'analyse et la commande des convertisseurs liée au réseau, aujourd'hui cette théorie est largement utilisée pour la commande des convertisseurs statique en PWM [19][4].

Ce type de commande utilise la représentation des tensions et courant dans un repère  $\alpha, \beta$  à référence complexe. La théorie p-q expliquée en II-4-1 utilisée pour l'identification des courants de référence est basée sur cette représentation.

Pour une bonne représentation de la tension de sortie de l'onduleur, on peut utiliser le plan biphasé  $\alpha, \beta$  en considérant  $V_f$  le vecteur correspondant aux tensions de l'onduleur, les huit cas possibles du vecteur  $V_f$  sont donnés par la (Fig. III.4).

Tableau III-1 « Les tension des trois phases du VSI »

$V_f(i)$	$V_{f\alpha}$	$V_{f\beta}$	$V_{fModule}$
$V_f(0)$	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
$V_f(1)$	$\frac{2}{3}V_{dc}$	$-\frac{1}{3}V_{dc}$	$\sqrt{\frac{2}{3}}V_{dc}$
$V_f(2)$	$-\frac{1}{3}V_{dc}$	$\frac{2}{3}V_{dc}$	$\sqrt{\frac{2}{3}}V_{dc}$
$V_f(3)$	$\frac{1}{3}V_{dc}$	$\frac{1}{3}V_{dc}$	$\sqrt{\frac{2}{3}}V_{dc}$
$V_f(4)$	$-\frac{1}{3}V_{dc}$	$-\frac{1}{3}V_{dc}$	$\sqrt{\frac{2}{3}}V_{dc}$
$V_f(5)$	$\frac{1}{3}V_{dc}$	$-\frac{2}{3}V_{dc}$	$\sqrt{\frac{2}{3}}V_{dc}$
$V_f(6)$	$-\frac{2}{3}V_{dc}$	$\frac{1}{3}V_{dc}$	$\sqrt{\frac{2}{3}}V_{dc}$
$V_f(7)$	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

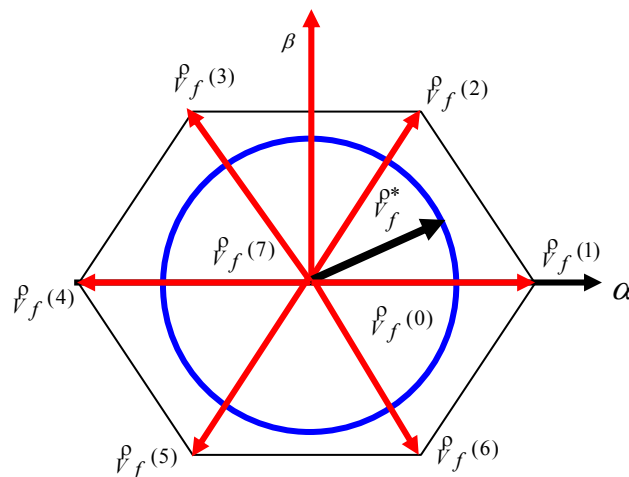


Fig. III.7 : Représentation vectorielle des tensions de sortie du VSI



Où  $V_f^{p*}$  représente la tension de référence que doit produire l'onduleur pour pouvoir créer les courants perturbateurs identifiés. Ceci signifie que l'onduleur n'est capable de fournir des tensions égales aux tensions de référence que si le vecteur formé par ces derniers reste à l'intérieur de l'hexagone montré dans la (Fig. III.4) [48].

### III-2-3 Filtre de Sortie du F.A.P

Le filtre de sortie du F.A.P, qui rend le VSI comme étant une source de courant dont la forme d'onde est liée rigidement à la tension fournie par l'onduleur, est un filtre passif passe-bas utilisé pour connecter le VSI au point de connexion PCC ( Commun connection point) entre le réseau et la charge, il existe principalement deux types de ce filtre. Ce filtre doit dimensionné d'une façon optimale pour satisfaire les deux critères suivants [1,81,82,83] :

- Assurer la dynamique du courant :

$$\frac{d}{dt} I_{hl} = \frac{d}{dt} I_{inj} \quad (III.4)$$

$I_{hl}$  le courant harmonique de la charge,  $I_{inj}$  le courant injecté par le F.A.P à travers le filtre de sortie ;

- Empêcher les composantes dues aux commutations de se propager sur le réseau électrique.(Elimination des composantes de haute fréquence).

Ils existent trois types du filtre de sortie :

- Filtre du premier ordre dit filtre L ;
- Filtre du deuxième ordre dit filtre LC ;
- Filtre du troisième ordre dit filtre LCL.

Le rôle du filtre de sortie du filtre actif est de réduire le contenu en harmonique à haute fréquence du courant, provoquée par l'opération de commutation dans le VSC, par conséquent on peut obtenir un courant injecté par le filtre actif shunt très proche de la référence.

#### III-2-3-1 Le filtre de troisième ordre (LCL)

D'après la figure III.8 on obtient les équations suivantes :

$$i_{ck} = i_{1k} - i_{2k} \quad (III.5)$$

$$u_k - u_{ck} = R_{1k} i_{1k} + L_{1k} \frac{di_{1k}}{dt} \quad (III.6)$$

$$u_{ck} - e_k = R_{2k} i_{2k} + L_{2k} \frac{di_{2k}}{dt} \quad (III.7)$$

Avec :  $k = \overline{1, 3}$  .

$$i_{1k} = \begin{bmatrix} i_{11} \\ i_{12} \\ i_{13} \end{bmatrix}, \quad i_{2k} = \begin{bmatrix} i_{21} \\ i_{22} \\ i_{23} \end{bmatrix}, \quad u_{ck} = \begin{bmatrix} u_{c1} \\ u_{c2} \\ u_{c3} \end{bmatrix}, \quad u_k = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix}, \quad e_k = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} \quad (III.8)$$

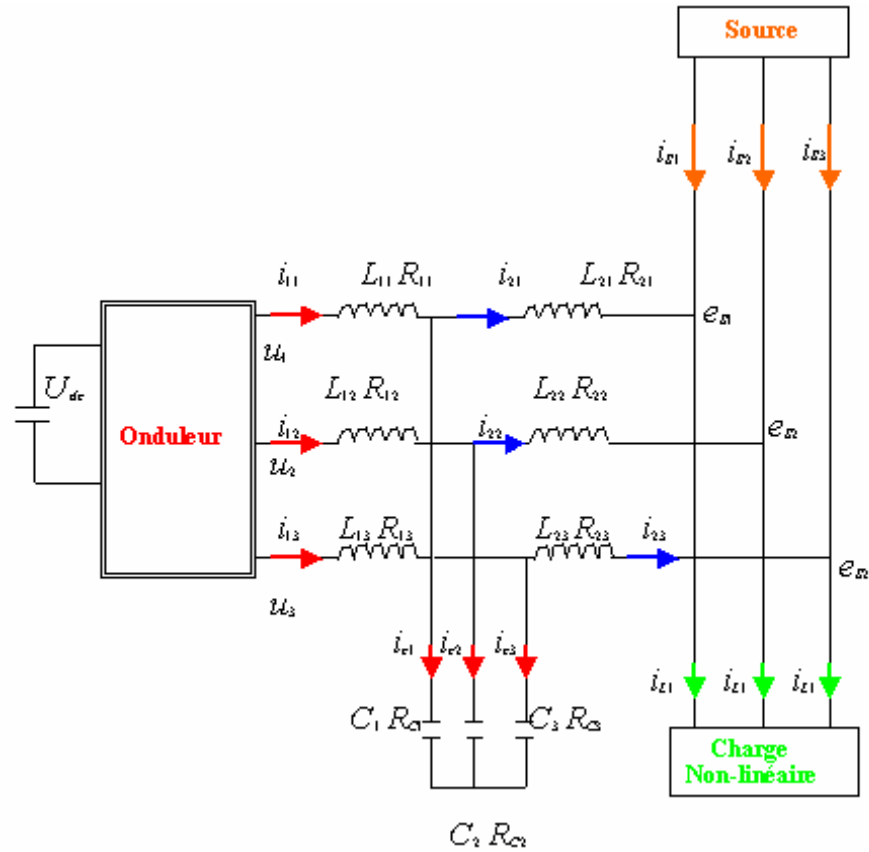


Fig. III.8 : Filtre passif de sortie type LCL

On peut écrire ces équations de la manière suivante :

$$\frac{di_{1k}}{dt} = -\frac{R_{1k}}{L_{1k}} i_{1k} + \frac{1}{L_{1k}} (u_k - u_{ck}) \quad (III.9)$$

$$\frac{du_{ck}}{dt} = -\frac{1}{C_k} (i_{1k} - i_{2k}) + R_{ck} \frac{d}{dt} (i_{1k} - i_{2k}) \quad (III.10)$$

$$\frac{di_{2k}}{dt} = -\frac{R_{2k}}{L_{2k}} i_{2k} + \frac{1}{L_{2k}} (u_{ck} - e_k) \quad (III.11)$$

La représentation d'état du filtre LCL s'écrit :

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (III.12)$$

Tel que :

$$x = \begin{bmatrix} i_{1k} \\ u_{ck} \\ i_{2k} \end{bmatrix}, \quad u = \begin{bmatrix} u_{1k} \\ e_k \end{bmatrix} \quad (III.12)$$

D'ou :

$$\begin{bmatrix} i_{1k} \\ u_{ck} \\ i_{2k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 \\ A_{21} & 0 & A_{23} \\ 0 & A_{44} & A_{43} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{1k} \\ u_{ck} \\ i_{2k} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & 0 \\ B_{21} & B_{22} \\ 0 & B_{32} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{1k} \\ e_k \end{bmatrix} \quad (III.13)$$

$A_{LCL}$   $B_{LCL}$

D'autre part :

$$y = Cx + Du \quad (III.14)$$

Avec :

$$y = i_{2k}; \quad C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (III.15)$$

C'est à dire :

$$\begin{bmatrix} i_{21} \\ i_{22} \\ i_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{1k} \\ u_{ck} \\ i_{2k} \end{bmatrix} \quad (III.16)$$

La fonction de transfert du filtre est alors :

$$G(s) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} (sI - A_{LCL})^{-1} \cdot B_{LCL} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (III.17)$$

Pour la phase a on aura :

$$\begin{bmatrix} i_{11} \\ u_{c1} \\ i_{21} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{11}}{L_{11}} & -\frac{1}{L_{11}} & 0 \\ \frac{1}{C_1} - \frac{R_{c1}R_{11}}{L_{11}} & -R_{c1} \left[ \frac{1}{L_{11}} + \frac{1}{L_{21}} \right] & \frac{R_{c1}R_{21}}{L_{21}} - \frac{1}{C_1} \\ 0 & \frac{1}{L_{21}} & -\frac{R_{21}}{L_{21}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{11} \\ u_{c1} \\ i_{21} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{11}} & 0 \\ \frac{R_{c1}}{L_{11}} & \frac{R_{c1}}{L_{21}} \\ 0 & -\frac{1}{L_{21}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ e_1 \end{bmatrix} \quad (III.18)$$

$A_{LCL}$   $B_{LCL}$

La fonction de transfert de la phase a du filtre passe bas LCL est obtenue par :

$$G_1(s) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} (SI - A_{LCL})^{-1} B_{LCL} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{III.19})$$

Finalement (Annexe) on obtient :

$$G_1(s) = \frac{b_1 s + b_0}{a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0} \quad (\text{III.20})$$

Avec :

$$b_0 = -\frac{R_{c1} R_{11}}{L_{21} L_{11}^2} + \frac{1}{L_{21} L_{11} C_1} + \frac{R_{c1} R_{11}}{L_{11}^2 L_{21}} ; \quad b_1 = \frac{R_{c1}}{L_{21} L_{11}} ; \quad (\text{III.21})$$

$$a_0 = \frac{R_{c1} R_{21} R_{11}}{L_{11} L_{21}} \left( \frac{L_{11} + L_{21}}{L_{11} L_{21}} \right) + \frac{R_{11}}{L_{11} L_{21} C_1} - \frac{R_{c1} R_{21} R_{11}}{L_{11} L_{21}^2} - \frac{R_{c1} R_{21} R_{11}}{L_{11}^2 L_{21}} + \frac{R_{21}}{L_{11} L_{21} C_1} ; \quad (\text{III.22})$$

$$a_1 = \frac{R_{c1} R_{21}}{L_{21}} \left( \frac{L_{11} + L_{21}}{L_{11} L_{21}} \right) + \frac{1}{L_{21} C_1} - \frac{R_{c1} R_{21}}{L_{21}^2} + \frac{R_{11} R_{21}}{L_{11} L_{21}} + \frac{R_{11} R_{c1}}{L_{11}} \left( \frac{L_{11} + L_{21}}{L_{11} L_{21}} \right) + \frac{R_{c1} R_{11}}{L_{11}^2} - \frac{1}{L_{11} C_1} ; \quad (\text{III.23})$$

$$a_2 = R_{c1} \left( \frac{L_{11} + L_{21}}{L_{11} L_{21}} \right) + \frac{R_{11}}{L_{11}} + \frac{R_{21}}{L_{21}} ; \quad a_3 = 0 \quad (\text{III.24})$$

Cas particulier : si on néglige les résistances dans chaque phase, et si on suppose que les trois bras du filtre sont identiques on aura :

$$G(s) = \begin{bmatrix} G_a(s) \\ G_b(s) \\ G_c(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{11} L_{12} C_1} \\ s \left( s^2 + \frac{L_2 + L_1}{L_{11} L_{12} C_1} \right) \\ \frac{1}{L_{11} L_{12} C} \\ s \left( s^2 + \frac{L_{12} + L_{11}}{L_1 L_2 C} \right) \\ \frac{1}{L_1 L_2 C} \\ s \left( s^2 + \frac{L_2 + L_1}{L_1 L_2 C} \right) \end{bmatrix} \quad (\text{III.25})$$

L'atténuation introduite par le filtre LCL est effective uniquement si le filtre est proprement atténué, ce problème est résolu par l'insertion d'une résistance en série avec la capacité Cf, à condition que les pertes dans cette résistance soient modérées.

La perte dans les résistances insérées est :

$$P_d = R \sum_{i=1}^3 \sum_h (i_{f1i}(h) - i_{f2i}(h))^2 \tag{III.26}$$

Si les courants injectés par les trois phases de l'onduleur sont équilibrés on aura :

$$P_d = 3R \sum_h (i_{f1i}(h) - i_{f2i}(h))^2 \quad \text{Avec : } i=1,2,3. \tag{III.27}$$

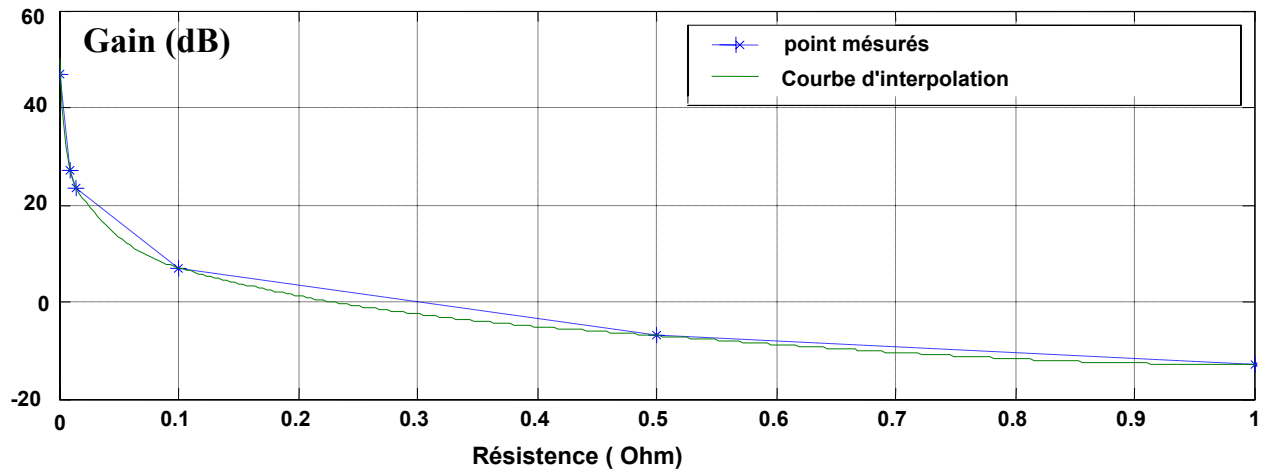


Fig. III.9 : Le gain à la fréquence de résonance en fonction de R d'atténuation du filtre LCL

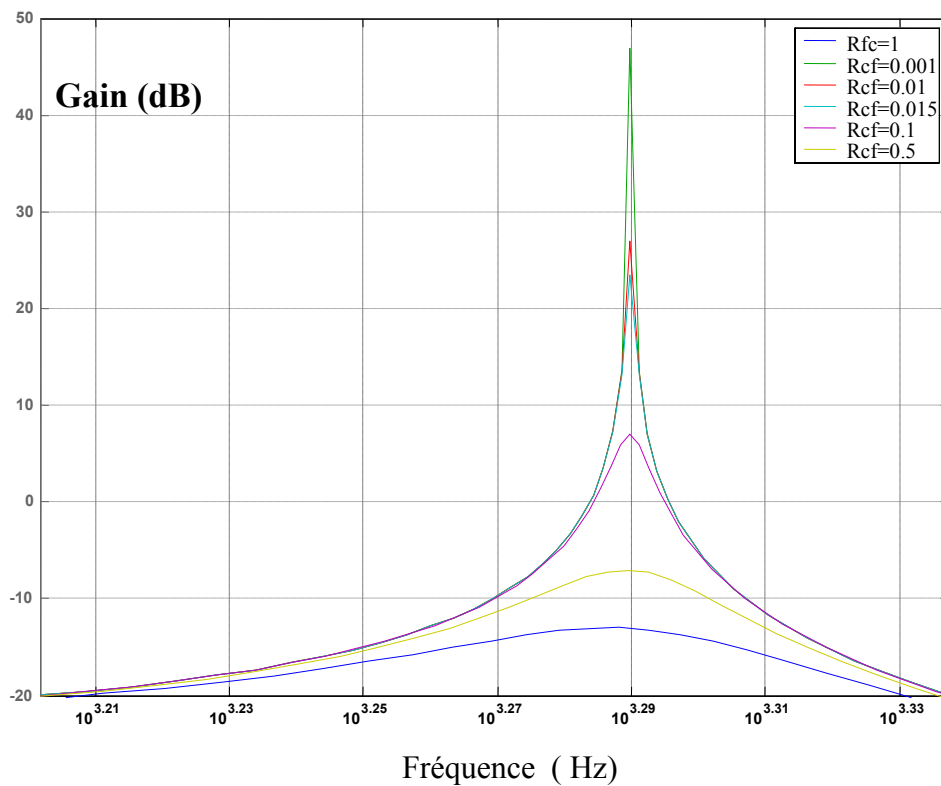


Fig.III.10 : Les caractéristiques d'atténuation de la résistance inséré avec la capacité du filtre LCL

III-2-3-2 Filtre du premier ordre (Filtre L)

Le rôle du filtre est de réduire les harmoniques de haute fréquence contenus dans le courant fournie par le VSI, ces courants sont dues à l'opération de commutation des interrupteur à semi-conducteur, par conséquent le courant injecté peut suivre exactement le courant de référence. Le filtre L est constitué par des inductances misent en série dans chaque phase de sortie du VSI.

Les équations différentielles représentant ce filtre sont :

$$u_{fk} - e_k = L_k \frac{d}{dt} i_k + R_k i_k \quad \text{Où} \quad k=a,b,c \tag{III.28}$$

Ou sous la forme suivante :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_1}{L_1} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R_2}{L_2} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R_3}{L_3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_1} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{fa} \\ u_{fb} \\ u_{fc} \\ e_{sa} \\ e_{sb} \\ e_{sc} \end{bmatrix} \tag{III.29}$$

La fonction de transfert globale est :

$$G(s) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} (sI - A_L)^{-1} B_L [1 \quad 1 \quad 1] \tag{III.30}$$

D'où :

$$G(s) = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_1} \frac{1}{s + \frac{R_1}{L_1}} \\ \frac{1}{L_2} \frac{1}{s + \frac{R_2}{L_2}} \\ \frac{1}{L_3} \frac{1}{s + \frac{R_3}{L_3}} \end{bmatrix} \tag{III.31}$$

Si on néglige les résistances internes des inductances on obtient :

$$G(s) = \begin{bmatrix} \frac{1}{s L_1} \\ \frac{1}{s L_2} \\ \frac{1}{s L_3} \end{bmatrix} \quad (\text{III.32})$$

### III.2.3.3 Dimensionnement des filtres de sortie du filtre actif parallèle de puissance

Le choix des paramètres du filtre passif de sortie du filtre actif de puissance dépendant de degré d'atténuation, afin de réduire les composants à haute fréquence des courants de ligne, les signaux d'entrée du filtre sont les tensions de l'onduleur de tension ayant les spectres de fréquence présentés dans Fig. III.11. Cependant la norme IEC 1000-3-4 impose que les harmoniques d'ordre supérieures à 33 doivent avoir une amplitude inférieure à 6% de l'amplitude nominale du courant.

$$\text{Si } h \geq 33 \rightarrow I_h \leq 0.6\% \text{ de } I_n \quad (\text{III.33})$$

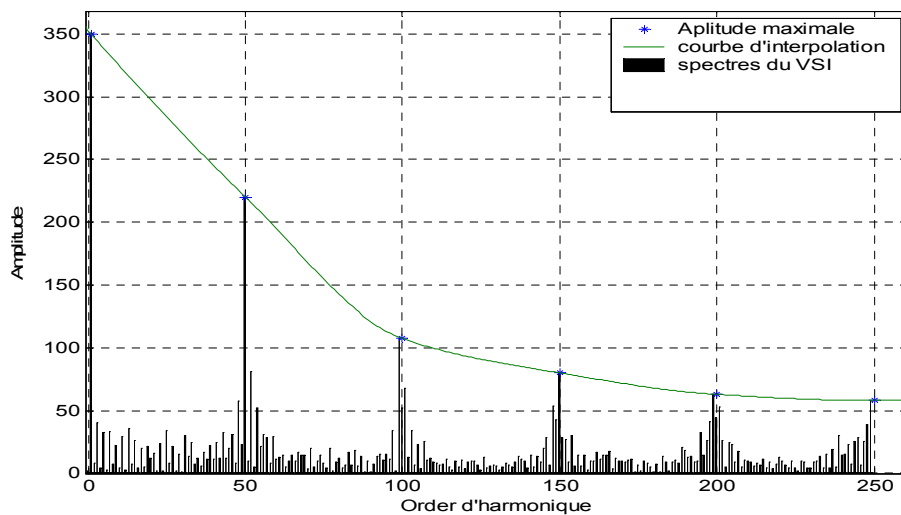


Fig. III.11 : Spectre de fréquence des composantes de tension du VSI

La fonction de transfert du filtre LCL pour une phase est :

$$G(s) = \frac{1}{L_1 L_2 C} \frac{1}{s \left( s^2 + \frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C} \right)} \quad (\text{III.34})$$

Il est clair que plusieurs combinaisons des paramètres de filtre,  $L_1, L_2$  et  $C$  peut accomplir la contrainte d'élimination des contenus en harmonique de haute fréquence du courant de ligne.

On peut écrire cette fonction dans le domaine fréquentielle :

$$G(jhw) = \frac{1}{L_1 L_2 C} \frac{1}{jhw \left( -(hw)^2 + \frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C} \right)} \quad (\text{III.35})$$

Le gain pour l'harmonique d'ordre  $h$  est :

$$|G(jhw)| = \frac{1}{L_1 L_2 C} \frac{1}{hw \left| -(hw)^2 + \frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C} \right|} = \left| \frac{I_{fh}}{U_{fh}} \right| \quad (\text{III.36})$$

L'inductance  $L_1$  est remplacée dans l'équation précédente en fonction de  $L_2$  et l'index  $r$  représentant le rapport entre  $L_1, L_2$  tel que :

$$L_1 = r \cdot L_2 \quad (\text{III.37})$$

En reportant l'équation (III.37) dans (III.36), puis en résout la nouvelle équation en fonction de  $L_2$ , on obtient :

$$L_2 = \max_h \left\{ \frac{r+1}{2rC(h\omega)^2} + \sqrt{\left[ \left( \frac{r+1}{2rC(h\omega)^2} \right)^2 + \frac{U_{fh}}{rC(h\omega)^3 I_{fh}} \right]} \right\} \quad (\text{III.38})$$

La valeur de  $r$  se trouve autour de la valeur de 2 [83,84].



Par la même méthode on peut faire le choix du filtre L :

$$L = \max_h \left( \frac{U_{fh}}{h\omega I_{fh}} \right) \quad (\text{III.39})$$

Où :

$U_{fh}$  La valeur efficace de la composante d'ordre  $h$  de la tension de sortie de l'onduleur.

$I_{fh}$  La valeur efficace du courant d'ordre maximal qu'il faut éliminer par le filtre.

Pour le condensateur il a été trouvé qu'un courant réactif à vide de 5 % du courant nominal de ligne est considéré raisonnable.

$$C = 0.05 C_{base} \quad (\text{III.40})$$

$$C_{base} = \frac{P_n}{\omega_n \cdot E_n^2} \quad (\text{III.41})$$

Où :  $P_n$  la puissance active absorbée par les filtres dans les conditions nominales ;

$E_n$  La tension efficace nominale du réseau.

Ces calculs devraient respecter les limites suivantes sur les valeurs des paramètres :

- è- La valeur de condensateur est limitée par la diminution tolérable du facteur de puissance à la puissance nominale (généralement moins de 5 %).
- é- la valeur totale de l'inductance soit inférieure à 10% pour limiter la chute de tension lors du fonctionnement.
- ê- la fréquence de résonance devrait être incluse dans un intervalle entre dix fois la fréquence de ligne et la moitié de la fréquence de commutation, pour ne pas créer des problèmes de résonance dans les spectres d'harmonique de basse et haute fréquence.
- ë- l'atténuation due à la résistance  $R_c$  ne peut pas être trop basse pour éviter l'oscillation et les pertes ne peuvent pas être trop élevées pour ne pas réduire l'efficacité du filtre.

D'autres facteurs sont utilisés pour vérifier l'efficacité du filtre :

è- au basse fréquence :

- le taux total de la distorsion harmonique THD ;
- Facteur de puissance PF ;
- La valeur moyenne de l'erreur absolue de la tension DC du DC-link.

é- au haute fréquence :

- Le courant harmonique le plus grande à la fréquence de commutation ;
- La valeur efficace des harmonique de haute fréquence ( $h > 50$ ).

### III.2.3.4 Comparaison entre le filtre L et LCL

Les caractéristiques avantageuses du filtre LCL comparées au filtre L sont trouvées dans les courbes représentant les réponses en fréquence Fig. III. . Les paramètres de filtre sont obtenus à partir des expressions III.36 Et III.37. Donnant le choix optimal des paramètres des deux filtres LCL et L. Par conséquent, les deux filtres accomplis la contrainte du courant harmonique.

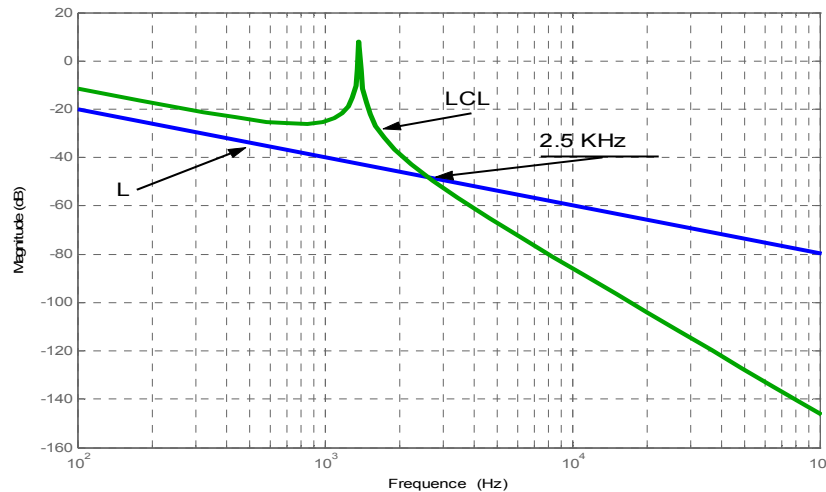


Fig. III.12 : Le gain en fréquence des filtre LCL et L

Dans la région à haute fréquence ( $> 2,5$  kHz), l'atténuation augmente avec 60 dB/décade pour le filtre LCL comparé au 20 dB/décade pour le filtre L. Les courants harmoniques de haute fréquence sont mieux atténués par le filtre LCL, la distorsion harmonique à haute fréquence est ainsi plus faible pour le cas du filtre LCL.

Dans la région de basse fréquence ( $< 1$  kHz), la pente des réponses en fréquence sont les deux 20 dB/décade. Ceci implique que le filtre LCL peut être considéré comme une inductance virtuelle égale à  $L_1 + L_2$ . Cependant, la différence dans l'atténuation indique que la somme  $L_1 + L_2$  est plus petite que l'inductance du filtre L. En conséquence, la chute de tension à travers le filtre LCL, provoqué par les harmoniques du courant injectés, est inférieure à celle dans le cas du filtre L. C'est l'avantage principal du filtre LCL, qui est particulièrement important dans les applications des filtres actifs de puissance.

En outre, la faible chute de tension dans le filtre LCL implique que la tension exigée de DC-link est inférieure. Alors, une plus grande marge de semi-conducteur peut être obtenue, c.-à-d. le rapport de la tension de fonctionnement et de la tension nominale des interrupteurs semi-conducteurs.

Les inconvénients principaux du filtre LCL sont la haute ondulation du courant dans l'inductance intérieure  $L_1$  et le plus grand nombre des capteurs requis pour la commande. La haute ondulation du courant dans  $L_1$  a comme conséquence l'augmentation des pertes de fer, c.-à-d. l'hystérésis et les pertes de courant de Foucault, qui implique l'utilisation des noyaux de fer stratifiés minces ou même des noyaux en poudre de fer. Le plus grand nombre des capteurs exige des conditions sur les signaux de contrôle et de commande. D'autre part, l'alimentation des condensateurs du filtre de sortie en puissance réactive doit être adaptée par le

convertisseur quant à interdit le passage des courants réactifs du réseau vers ces dernières quand l'unité de filtrage fonctionne dans des conditions sans charge non linéaire ou à réseau vide.

### III.2.4 Système de stockage d'énergie

Dans notre étude on utilise les onduleurs de tension comme étant des compensateurs des perturbations. Cette opération ne peut être réalisée sans l'existence d'une source de tension continuée à son entrée du côté continu. La source de tension doit avoir la flexibilité d'être rechargée en permanence pour qu'elle puisse représenter un système à stockage de l'énergie et à tension de faible fluctuation. L'élément de stockage de l'énergie se fait souvent par un système de stockage capacitif représenté par un condensateur  $C_{dc}$  qui joue le rôle d'une source de tension continue  $V_{dc}$ . Le choix des paramètres du système de stockage ( $V_{dc}$  et  $C_{dc}$ ) se répercute sur la dynamique et sur la qualité de compensation du filtre actif parallèle. En effet, une tension  $V_{dc}$  élevée améliore la dynamique du filtre actif. De plus, les ondulations de la tension continue  $V_{dc}$ , causées par les courants engendrés par le filtre actif sont limitées par le choix de  $C_{dc}$ , et peuvent dégrader la qualité de compensation du filtre actif parallèle.

D'une manière générale la fluctuation de la tension continue est donnée par :

$$\Delta U_{dc-\max} = \frac{1}{C_{dc}} \cdot \max \left\{ \int I_{dc} dt \right\} \quad (\text{III.42})$$

$$I_{dc} = \sum_2^{\infty} I_h + I_{\text{pertes}} \quad (\text{III.43})$$

Si on néglige la composante due aux pertes par conduction et par commutation dans l'onduleur  $I_{\text{pertes}}$  on obtient :

$$\Delta U_{dc-\max} = \frac{1}{C_{dc}} \cdot \max \left\{ \sum_2^{\infty} \frac{I_h}{\omega_h} \right\} \quad (\text{III.44})$$

Nous pouvons calculer la capacité  $C_{dc}$  à partir de la relation suivante :

$$C_{dc} \geq \frac{\max \sum_2^{\infty} \frac{I_h}{\omega_h}}{\varepsilon U_{dc0}} \quad (\text{III.45})$$

Tel que :

$$\varepsilon\% = \frac{\Delta U_{dc-\max}}{U_{dc0}} \quad (\text{III.46})$$

$U_{dc0}$  : est la tension de référence aux bornes du système de stockage.

Des méthodes ont été proposées pour la détermination de la valeur du condensateur de stockage. Ces méthodes présentent des cas particuliers de la méthode qu'on a proposée.

- La première méthode se base sur le calcul de l'énergie fournie par le filtre actif pendant une demi période de la pulsation de puissance liée aux deux premiers harmoniques (5 et 7 pour un pont redresseur de Graetz) En choisissant un taux d'ondulation acceptable, généralement de l'ordre de 5% de  $U_{dc}$ , nous pouvons calculer la capacité  $C_{dc}$  à partir de la relation suivante :

$$C_{dc} = \frac{V_s \sqrt{I_5^2 + I_7^2 - 2I_5 I_7 \cos(5\alpha - 7\alpha)}}{2\varepsilon \omega U_{dc0}^2} \quad (\text{III.47})$$

Avec  $V_s$  la tension simple du réseau,  $I_b$  le courant harmonique du rang  $b$  et  $\alpha$  l'angle d'allumage des thyristors du pont Graetz.

- La deuxième méthode, plus simple, se base sur la mesure du courant harmonique  $I_b$  du rang le plus faible. La capacité  $C_{dc}$  se calcule de la façon suivante [85]:

$$C_{dc} = \frac{I_b}{\varepsilon U_{dc0} \omega_b} \quad (\text{III.48})$$

avec  $\omega_b$ , la pulsation la plus faible des harmoniques à compenser.

### III-3 La partie contrôle commande

#### III-3-1 Régulation de la tension continue

La tension moyenne  $V_{dc}$  aux bornes du condensateur doit être maintenue à une valeur fixe. La principale cause susceptible de la modifier est les pertes dans le filtre actif (interrupteurs et filtre de sortie). La régulation de la tension moyenne aux bornes du condensateur de stockage d'énergie doit se faire par l'adjonction des courants fondamentaux actifs dans les courants de référence. La sortie du régulateur  $P_{dc}$  s'ajoute, à un signe près, à la puissance active perturbatrice  $P_{dc}$  et donne lieu à un courant fondamental actif corrigeant ainsi  $V_{dc}$  (Fig. III.7). La puissance  $P_{dc}$  représente la puissance active nécessaire pour maintenir la tension  $V_{dc}$  égale à la valeur de la tension de référence souhaitée  $V_{dc-ref}$ .

Le régulateur employé ici est un régulateur proportionnel simple (Kc) avec une action de filtrage au préalable sur la tension mesurée  $V_{dc}$ , réalisée par un filtre passe-bas du deuxième ordre de manière à atténuer les fluctuations à 300 Hz.

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

$$P_{dc} = \frac{dE_{dc}}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{2} C_{dc} V_{dc}^2 \right) \quad (\text{III.49})$$

Notons que la relation (III.49) est non linéaire. Pour des faibles variations de la tension  $V_{dc}$  autour de sa référence  $V_{dc-ref}$ , elle peut être linéarisée à travers la série de Taylor.

On suppose :

$$f(V_{dc}) = V_{dc}^2 \tag{III.50}$$

C'est une fonction algébrique non linéaire alors autour du point d'équilibre  $(f_0, V_{dc-ref})$  défini par :

$$f_0 = f(V_{dc-ref}) \tag{III.51}$$

On a alors le terme :

$$f(V_{dc}) = f(V_{dc-ref}) + \left[ \frac{\partial f(V_{dc})}{\partial V_{dc}} \right]_{V_{dc-ref}} (V_{dc} - V_{dc-ref}) + \dots \tag{III.52}$$

Tronqué après le terme du première ordre. On applique ce principe sur l'équation (III.49) on aura :

$$P_{dc} = C_{dc} \cdot V_{dc-ref} \frac{d}{dt}(V_{dc}) \tag{III.53}$$

Appliquons la transformée de Laplace à la dernière équation nous aurons :

$$V_{dc}(s) = \frac{P_{dc}(s)}{V_{dc-ref} C_{dc} s} \tag{III.54}$$

A partir de la relation (III.54), et en prenant en compte le régulateur proportionnel (Kc), la boucle de régulation de la tension continue peut être représentée par le schéma de la Fig. III.11. Le choix du paramètre Kc aura pour objectif d'obtenir un temps de réponse minimal afin de ne pas nuire à la dynamique du filtre actif.

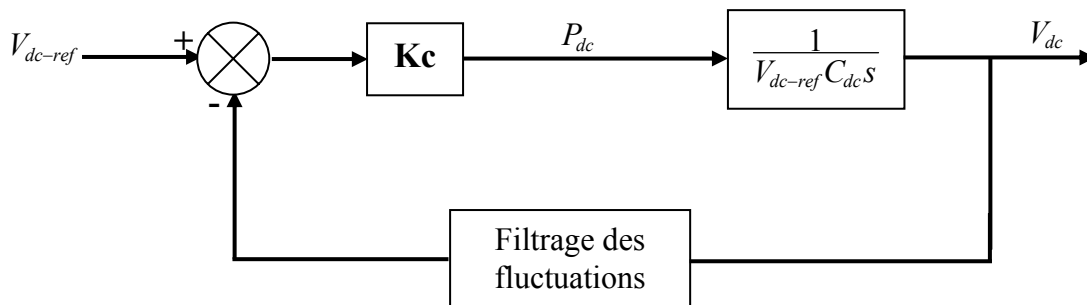


Fig. III.13 : Régulation de la tension aux bornes du condensateur  $C_{dc}$

### III-3-2 La régulation de courant injecté par le filtre actif

Le choix du régulateur de courant injecté du filtre actif parallèle se fait en fonction des objectifs de régulation et de l'ordre du filtre de sortie.

Pour simplifier l'étude, on remplace les éléments semi-conducteurs constituant le VSI par des interrupteurs simples, on prend la tension du DC-link égale à  $V_{dc}$ , les tensions de sortie

sont définis en fonction de  $V_{dc}$  et de l'état des deux interrupteurs constituant le bras correspondant  $S_a$ ,  $S_b$ ,  $S_c$  de la manière suivante :

$$\begin{aligned} V_a(k) &= S_a V_{dc} \\ V_b(k) &= S_b V_{dc} \\ V_c(k) &= S_c V_{dc} \end{aligned} \quad (\text{III.55})$$

Le mode de commutation de l'onduleur est résumé dans le tableau suivant :

Tab. III.2 : Mode de commutation des interrupteurs de l'onduleur

$k$	a	b	c	$S_a$	$S_b$	$S_c$
0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	2/3	-1/3	-1/3
2	0	1	0	-1/3	2/3	-1/3
3	1	1	0	1/3	1/3	-2/3
4	0	0	1	-1/3	-1/3	2/3
5	1	0	1	1/3	-2/3	1/3
6	0	1	1	-2/3	1/3	1/3
7	1	1	1	0	0	0

Les équations différentielles représentant le comportement du courant délivré par le filtre actif sont :

$$\begin{aligned} L_f \frac{di_{fa}}{dt} &= S_a V_{dc} + e_{sa} \\ L_f \frac{di_{fb}}{dt} &= S_b V_{dc} + e_{sb} \\ L_f \frac{di_{fc}}{dt} &= S_c V_{dc} + e_{sc} \end{aligned} \quad (\text{III.56})$$

On peut écrire ces équations d'une manière générale :

$$\begin{aligned} L_f \frac{di_{fa}}{dt} &= V_a(k) + e_{sa} \\ L_f \frac{di_{fb}}{dt} &= V_b(k) + e_{sb} \\ L_f \frac{di_{fc}}{dt} &= V_c(k) + e_{sc} \end{aligned} \quad (\text{III.57})$$

Avec  $V_a(k)$ ,  $V_b(k)$ ,  $V_c(k)$  des tension discrète représentant les différentes possibilités de la tension à la sortie de l'onduleur du filtre actif  $\{V(0), V(1), V(2), V(3), V(4), V(5), V(6), V(7)\}$ . Notre intérêt est de rendre l'erreur nul entre le courant de la référence issue de la stratégie de commande et le courant injecté par le VSI dans le réseau.

$$\begin{aligned} \Delta i_{fa} &= i_{refa} - i_{fa} \\ \Delta i_{fb} &= i_{refb} - i_{fb} \\ \Delta i_{fc} &= i_{refc} - i_{fc} \end{aligned} \tag{III.59}$$

On substitue l'équation (III.59) dans l'équation (III.58) on aura :

$$\begin{aligned} L_f \frac{d\Delta i_{fa}}{dt} &= \left( L_f \frac{di_{refa}}{dt} + e_{sa} \right) - V_a(k) \\ L_f \frac{d\Delta i_{fb}}{dt} &= \left( L_f \frac{di_{refb}}{dt} + e_{sb} \right) - V_b(k) \\ L_f \frac{d\Delta i_{fc}}{dt} &= \left( L_f \frac{di_{refc}}{dt} + e_{sc} \right) - V_c(k) \end{aligned} \tag{III.60}$$

Les termes entre parenthèses représentant les tensions de références appliquées au VSI.

$$\begin{aligned} V_{f-refa} &= L_f \frac{di_{refa}}{dt} + e_{sa} \\ V_{f-refb} &= L_f \frac{di_{refb}}{dt} + e_{sb} \\ V_{f-refc} &= L_f \frac{di_{refc}}{dt} + e_{sc} \end{aligned} \tag{III.61}$$

L'écart entre  $V_{f-refi}$  et  $V_i(k)$  produit alors une erreur sur le courant.

D'après l'équations (III.61) on remarque que  $V_{f-refi}$  est composée de deux termes à des fréquences différentes.

- 1-  $e_{si}$  présente la tension au point de connexion du APF à la fréquence du réseau.
- 2-  $V_{Lfi} = L_f \frac{di_{refi}}{dt}$  est une chute de tension aux bornes de l'inductance  $L_f$  du filtre de sortie, riche en harmoniques. Cette chute de tension égale à la chute de tension réelle si  $\Delta i_{fi} = 0$ . On élabore ce terme par un régulateur de courant PI.

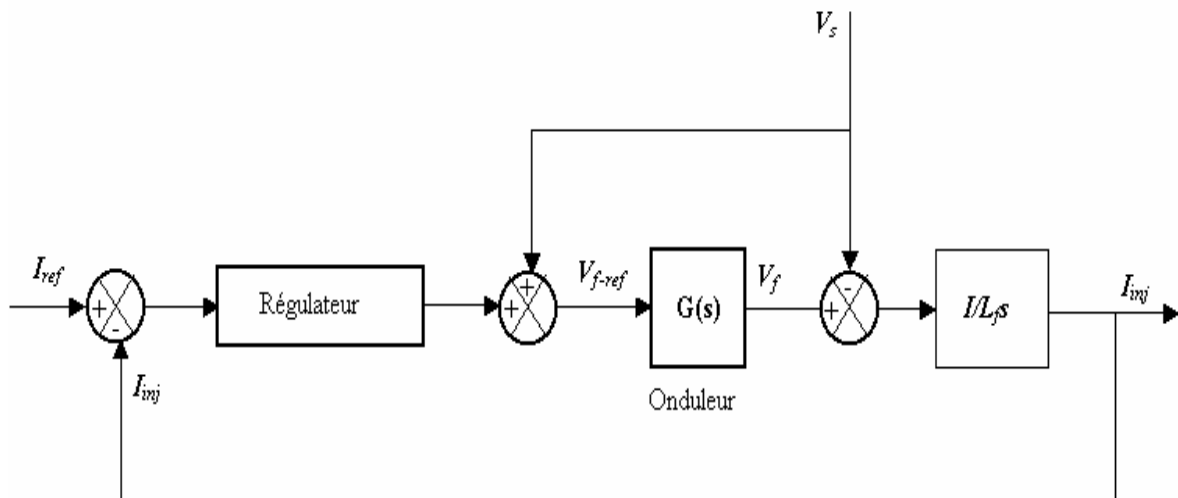


Fig. III.14 : Schéma de régulation du courant injecté par le filtre actif parallèle

### III-3-3 La commande de l'onduleur[1]

Le but de la commande de l'onduleur est de permettre la meilleure reproduction des courants perturbés de référence, à travers les ordres de commande appliqués aux drivers interrupteurs de puissance. Les deux principales familles de commande des convertisseurs statiques sont :

- la commande par hystérésis,
- la commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI).

#### III-3-3-1 Commande par hystérésis

La commande par hystérésis, appelée aussi commande en tout ou rien, est une commande non linéaire qui utilise l'erreur existant entre le courant de référence et le courant produit par l'onduleur]. L'erreur est comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis. Dès que l'erreur atteinte la bande inférieure ou supérieure, un ordre de commande est envoyé de manière à rester à l'intérieur de la bande.

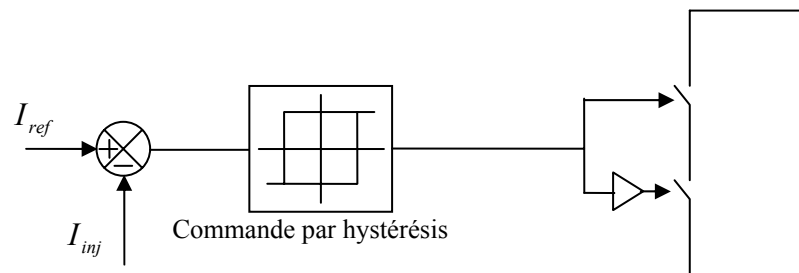


Fig. III.15 : Principe de la commande par hystérésis

#### III-3-3-2 Commande par modulation de largeur d'impulsion

La technique de commande par MLI résout le problème de la maîtrise de la fréquence de commutation en fonctionnant avec une fréquence fixe facile à filtrer en aval de l'onduleur. La plus simple et la plus connue des modulations de largeur d'impulsion est sans doute la MLI à échantillonnage naturel, dite MLI intersective. Cette technique de commande met en œuvre d'abord un régulateur qui détermine la tension de référence de l'onduleur (modulatrice) à partir de l'écart entre le courant mesuré et sa référence. Cette dernière est ensuite comparée avec un signal triangulaire (porteuse à fréquence élevée fixant la fréquence de commutation). La sortie du comparateur fournit l'ordre de commande des interrupteurs.

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

Finalement, nous avons choisi, dans la suite de notre étude, la technique de commande à MLI à échantillonnage naturel. Cette technique représente en réalité la MLI analogique et pourra être employée dans la partie de simulation profitant en cela de sa facilité de modélisation.



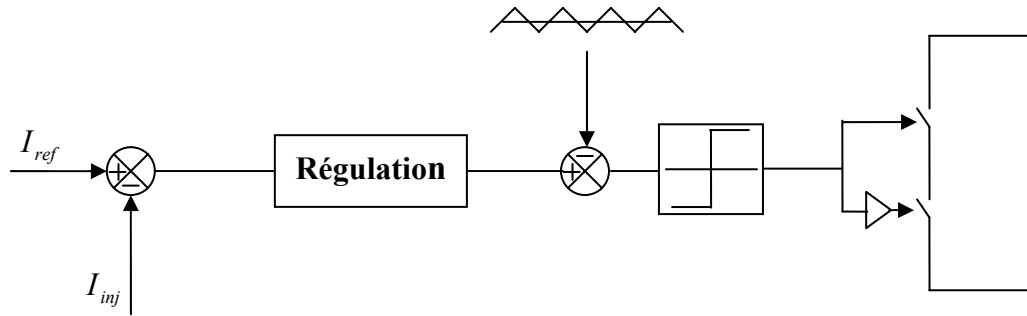


Fig III.16 : Principe de la commande MLI

### III-4 - Puissance apparente du filtre actif shunt

L'évaluation de la puissance apparente d'un filtre actif shunt nécessaire pour la compensation des perturbations, va nous permettre de juger l'utilisation du filtre du point de vue énergétique et technique.

Pour arriver à un choix rationnel, nous devons connaître au préalable les valeurs de tension et de courant que doit supporter chaque élément semi-conducteur constituant l'onduleur. Généralement, ces interrupteurs sont choisis pour supporter individuellement la tension continue  $V_{dc}$  du côté DC-link et la valeur crête du courant du filtre actif injecter vers le réseau  $I_{inj}$ , tout en tenant compte des composantes dues aux commutations [85]. Notre intérêt dans cette étude est de trouver le rapport entre la puissance apparente de la charge et la puissance apparente que doit fournir le filtre actif pour atteindre l'objectif de compensation.

#### III-4-1 Compensations des courants harmoniques

Une charge non linéaire ayant une puissance apparente  $S_{ch}$ , peut être décomposée en trois termes orthogonaux :

- La puissance active  $P_{ch}$  ;
- La puissance réactive  $Q_{ch}$  ;
- La puissance déformante  $D_{ch}$ .

Tel que :

$$S_{ch} = \sqrt{P_{ch}^2 + Q_{ch}^2 + D_{ch}^2} \quad (\text{III.62})$$

$$S_{ch} = 3V_s I_{ch} \quad (\text{III.63})$$

$V_s$  : représente la tension efficace de la source ;

$I_{ch}$  : La valeur efficace du courant demandé par la charge non linéaire.

$$i_{ch} = i_{fond} + \sum_{k=2}^{\infty} i_k = i_{fond} + i_h \quad (\text{III.64})$$

$i_h$  : Est le courant harmonique généré par la charge non linéaire,  $i_k$  est l'harmonique d'ordre  $k$ . La valeur efficace du courant harmonique est :

$$I_h = \sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} I_k^2} \quad (\text{III.65})$$

$$I_{ch} = \sqrt{I_{fond}^2 + I_h^2} \quad (\text{III.66})$$

La puissance apparente fournie par le filtre est :

$$S_f = D_{ch} = 3V_s I_h \quad (\text{III.67})$$

Le rapport des puissances est le quotient de la puissance apparente du filtre et la puissance apparente de la charge, est donné par l'expression :

$$RAP_h = \frac{S_f}{S_{ch}} = \frac{I_h}{I_{ch}} \quad (\text{III.68})$$

On peut l'écrire en fonction du  $I_{fond}$  et  $I_{ch}$  de la manière suivante :

$$RAP_h = \sqrt{1 - \left(\frac{I_{fond}}{I_{ch}}\right)^2} \quad (\text{III.69})$$

La relation entre le taux de distorsion harmonique et le rapport de puissance est donnée par :

$$RAP_h = \frac{\tau_h^2}{\sqrt{1 + \tau_h^2}} \quad (\text{III.70})$$

On aura aussi la relation :

$$\tau_h = \sqrt{1 - \left(\frac{I_{ch}}{I_{fond}}\right)^2} \quad (\text{III.71})$$

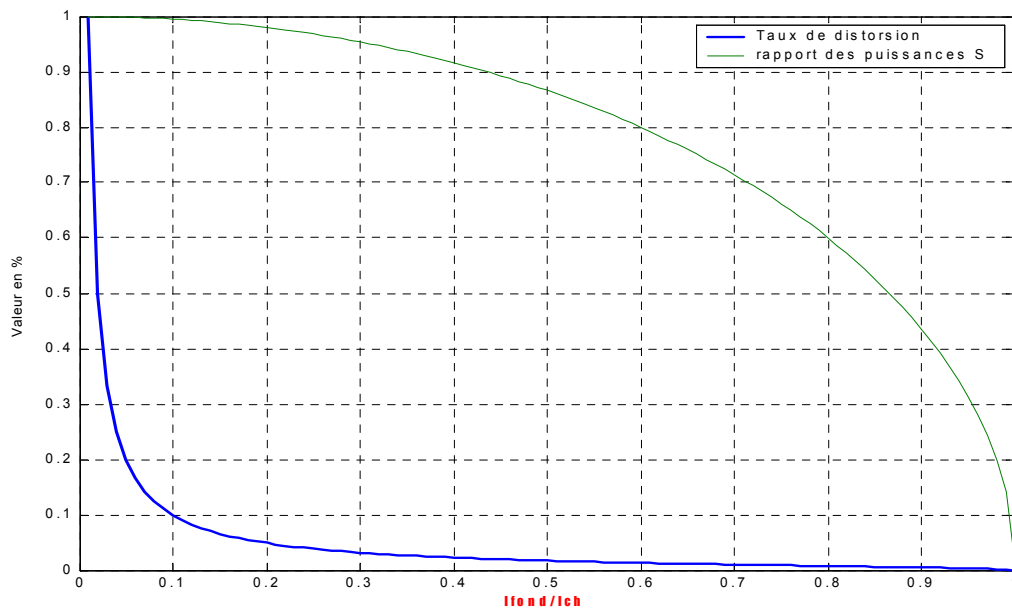


Fig. III.17 : Variation du rapport des puissances et le taux de distorsion harmonique  
En fonction du rapport entre le courant fondamental et le courant de charge

On prend le cas d'une charge non linéaire typique, c'est un redresseur en pont de grätz commandé. La valeur efficace du courant de charge côté AC est donnée par :

$$I_{ch} = \sqrt{\frac{2}{3}} I_d \cos(\alpha) \quad (\text{III.72})$$

La valeur efficace du fondamentale est :

$$I_{fond} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d \cos(\alpha) \quad (\text{III.73})$$

$I_d$  : le courant direct fourni par le redresseur dans la charge qu'il alimente,  $\alpha$  l'angle d'amorçage ou du début de conduction des éléments semi-conducteur constituant les bras de l'onduleur. En reportant les relations (III.72),(III.73) dans (III.69) on obtient le rapport des puissances donné par l'expression suivante :

$$RAP_h = \frac{\sqrt{\pi^2 - 9}}{\pi} \cos(\alpha) = 0.2939 \cos(\alpha) \quad (\text{III.74})$$

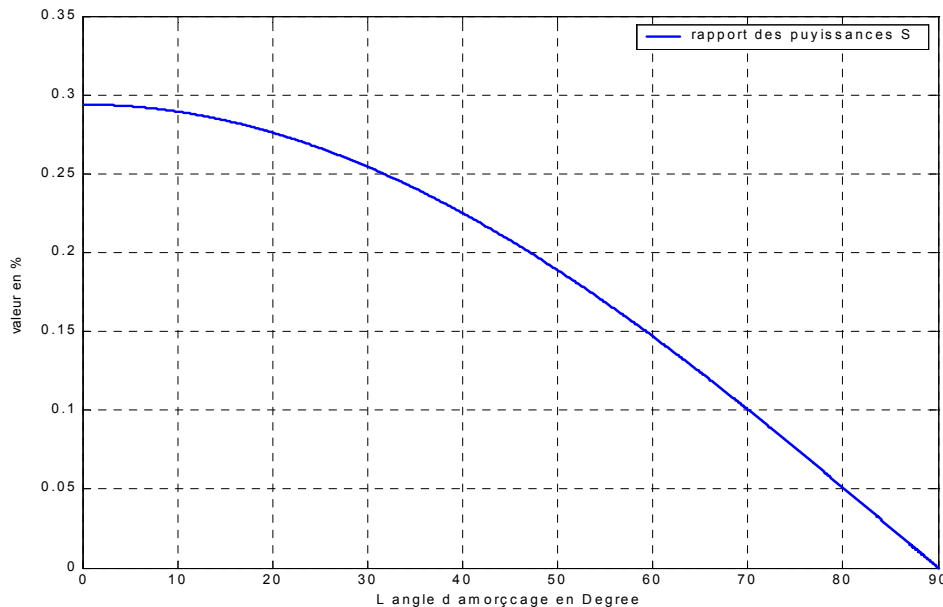


Fig. III.18. Rapport des puissances en cas de la compensation des harmoniques

Pour  $\alpha = 0$  le rapport est maximal, le filtre actif injecte une puissance apparente  $S_f = 29.4\%$  de la puissance de la charge, pour un courant dépourvu des harmonique le filtre injecte une puissance de 0% de la puissance apparente de charge, si le fondamental du courant de charge est nul, le filtre injecte la puissance totale demandée par la charge, l'écoulement de la puissance de la source est nulle. On remarque d'après la figure que le rapport des puissances diminue avec l'augmentation de  $\alpha$  ce que implique la diminution des harmoniques générés par la charge non linéaire.

### III-4-2 Compensation des courants harmoniques et de la puissance réactive

Dans ce cas, le rapport des puissances est calculé à partir de la relation suivante :

$$RAP_{h-q} = \frac{S_f}{S_{ch}} = \frac{\sqrt{Q_{ch}^2 + D_{ch}^2}}{3V_s I_{ch}} \quad (\text{III.75})$$

Alors :

$$RAP_{h-q} = \frac{\sqrt{(3V_s I_h)^2 + (3V_s I_1 \sin(\alpha))^2}}{3V_s I_{ch}} \quad (\text{III.76})$$

En reportant les équations (III.72) et (III.73) dans l'équation (III.76), on obtient l'expression suivante :

$$RAP_{h-q} = \cos(\alpha) \sqrt{1 - \frac{9}{\pi^2} \cos^2(\alpha)} \quad (\text{III.77})$$

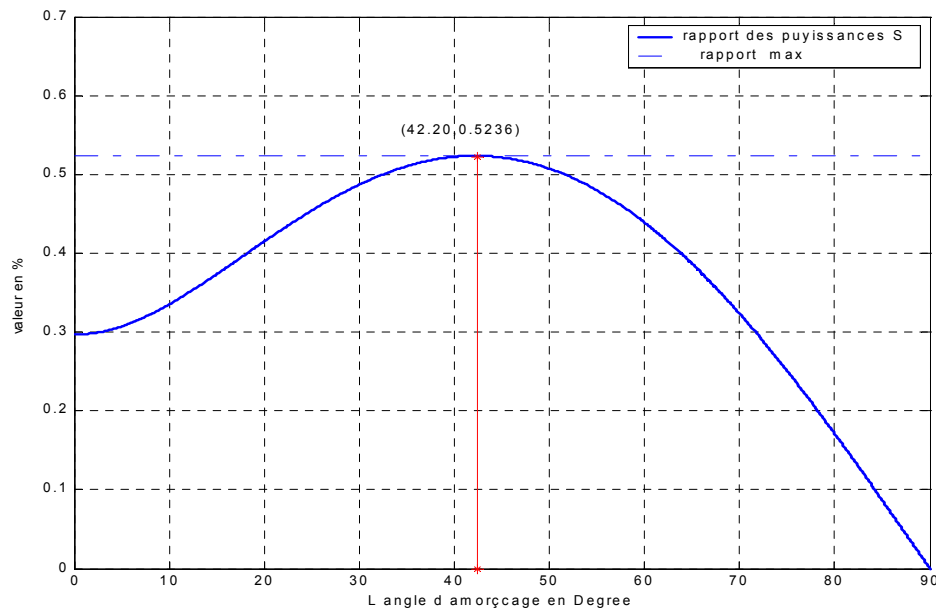


Fig. III.19. Rapport des puissances en cas de la compensation des harmoniques et de la puissance réactive

A partir de la Fig. III.19, on remarque qu'on a le même rapport de puissance que celui obtenu dans le cas de compensation des harmoniques uniquement. D'autre par, le rapport des puissances atteint un maximale de valeur 0.5236 ( $S_f = 52.36 \% S_{ch}$ ) qui correspond à un angle d'amorçage égale à 42.2°.

D'après les résultats requis on peut dire que la compensation de la puissance réactive est faisable pour le filtre actif shunt, d'une manière générale on doit tenir en compte les contrainte technico-économique pour l'utilisation du filtre actif shunt pour chaque cas de compensation, le cas étudié dans ce mémoire, correspond à une charge spécifique, autrement peut être on aura d'autre contraintes qui vont imposer des limites pour la compensation.

### III-4-3 Compensation des harmoniques, de la puissance réactive et du déséquilibre du courant de charge.

Dans ce cas le filtre actif shunt doit fournir aussi une autre puissance correspond à la puissance créée par la composante inverse (séquence négative), qui est responsable du déséquilibre. On suppose que le courant déséquilibré est créée par une charge linéaire connectée en parallèle avec le pont de grätz, notre système de distribution est constitué par trois fils, ce que implique que l'unique source de déséquilibre est la composante inverse.

Le rapport de puissance est donné par l'expression suivante :

$$RAP_{h\_q\_i} = \frac{\sqrt{D_{ch}^2 + Q_{ch}^2 + S_i^2}}{S_{ch}} \quad (\text{III.78})$$

D'où :

$$RAP_{h\_q\_i} = \frac{\sqrt{(3V_s I_h)^2 + (3V_s I_1 \sin(\alpha))^2 + (3V_s I_i)^2}}{3V_s I_{ch}} \quad (\text{III.79})$$

En reportant la relation (III.72). (III.73) dans (III.79) on obtient l'expression du rapport des puissances apparentes suivantes :

$$RAP_{h\_q\_i} = \cos(\alpha) \sqrt{1 - \frac{9}{\pi^2} (1 - \sin^2(\alpha)) + \frac{9}{\pi^2} \left(\frac{I_i}{I_1}\right)^2} \quad (\text{III.80})$$

On remarque que le rapport des puissance apparente est une fonction a deux variable, l'angle d'amorçage  $\alpha$  et le rapport entre le courant inverse et le courant fondamental  $\frac{I_i}{I_1}$ , on suppose le variable  $M_i = \frac{I_i}{I_1}$  de tel sorte qu'on peut avoir une courbe du rapport des puissance pour chaque valeur de  $M_i$ .

On à tracé six courbes pour les valeurs de  $M_i = \{ 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1 \}$ , alors on peut utiliser le filtre actif shunt pour compenser les perturbations générées par les harmoniques, la puissance réactive et le déséquilibre dans le courant absorbé par la totalité de la charge tout en restant dans les contraintes technico-économique. La flexibilité de compensation garantie par le filtre actif, ouvre le voile pour les chercheurs de proposer des stratégies de contrôle et des modèles de puissance plus souple et adaptable pour tous types de perturbations.

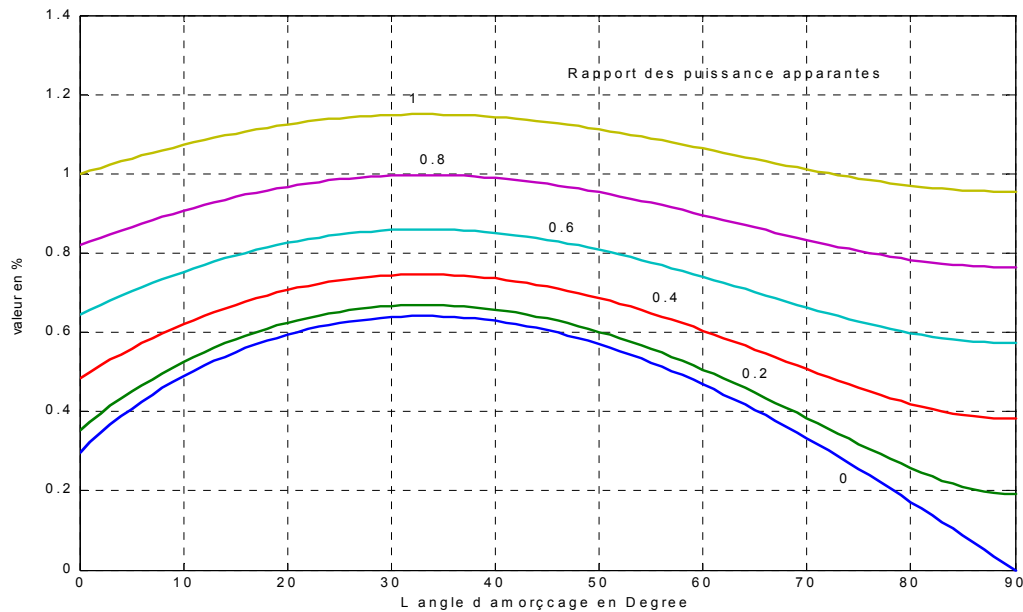


Fig. III.20 : Rapport des puissances en fonction de l'angle d'amorçage et rapport de déséquilibre

## III-5 Résultats de Simulation

### III-5-1 Compensation dans un milieu des tensions équilibrées non polluées

#### III-5-1-1 Compensation des courants harmoniques

Dans ce cas l'objectif du filtre actif parallèle est la compensation des courants harmoniques générés par une charge non linéaire constituée par un pont de Graetz triphasé alimentant une charge R L. La Fig. III.21 présente la compensation du courants harmoniques, on remarque que le courant de référence identifié à partir de la stratégie de commande est superposé avec le courant injecté par le filtre actif dans le réseau, un choix convenable de la valeur de l'inductance du filtre de sortie permet d'éliminer le déphasage entre ces composantes, ce que améliore les performances du filtre. Le courant dans la source est sinusoïdale avec une enveloppe due à la fréquence de commutation, les pics existants sont dus à la valeur élevée du dérivé du courant causé par la variation brusque de ce dernier.

La Fig. III.22 présente la variation du courant dans la partie continue de L'onduleur avec une valeur moyenne nulle, la puissance  $P_{dc}$  absorbé du réseau permet de compenser la puissance fournie par le filtre pour assurer une bonne compensation, ainsi la tension aux bornes de Cdc oscille autour de la valeur de référence. L'analyse spectrale de fréquence prouve la bonne compensation, les composantes harmonique le plus prépondérante sont éliminées Fig III.24, 25,26 , Le THD du courant de la charge est de 31%, et de 5% côté réseau après compensation, ce qui confirme la bonne qualité de filtrage remarquée dans l'analyse temporelle.

Les puissances de référence identifiées par la stratégie de commande étaient :

$$\begin{cases} p_{ref} = \tilde{p} - P_{pertes} - P_c \\ q_{ref} = 0 \end{cases} \quad (III.81)$$

Avant compensation les puissances écoulées de la source vers la charge sont :

$$\begin{cases} p_s = p_{dc} + \tilde{p} \\ q_s = 0 \end{cases} \quad (III.82)$$

Dans ce cas la puissance que doit fournir le filtre actif parallèle est la puissance due aux composantes oscillatoires  $\tilde{p}$  alors :

$$S_f = D = \tilde{p} \tag{III.83}$$

Après compensation :

$$\begin{cases} p_s = p_{dc} + p_{perte} + p_c \\ q_s = 0 \end{cases} \tag{III.84}$$

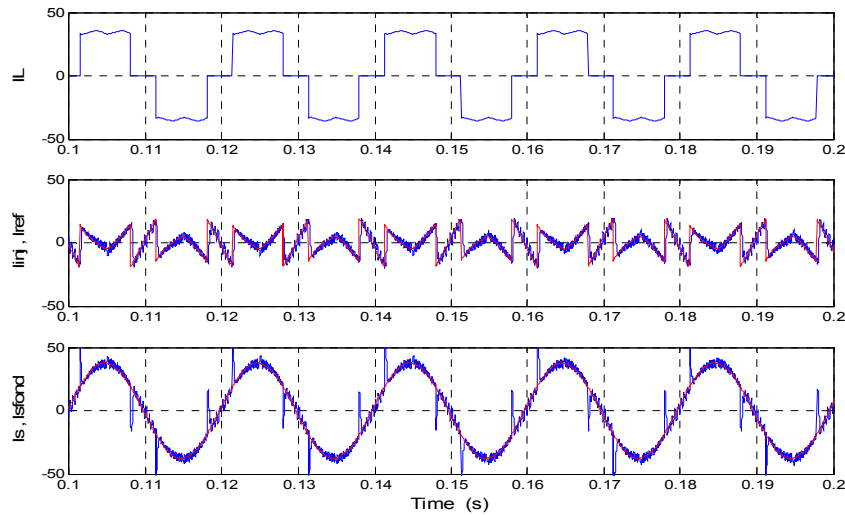


Fig. III.21 : Représentation de la compensation du courant harmonique en (A)

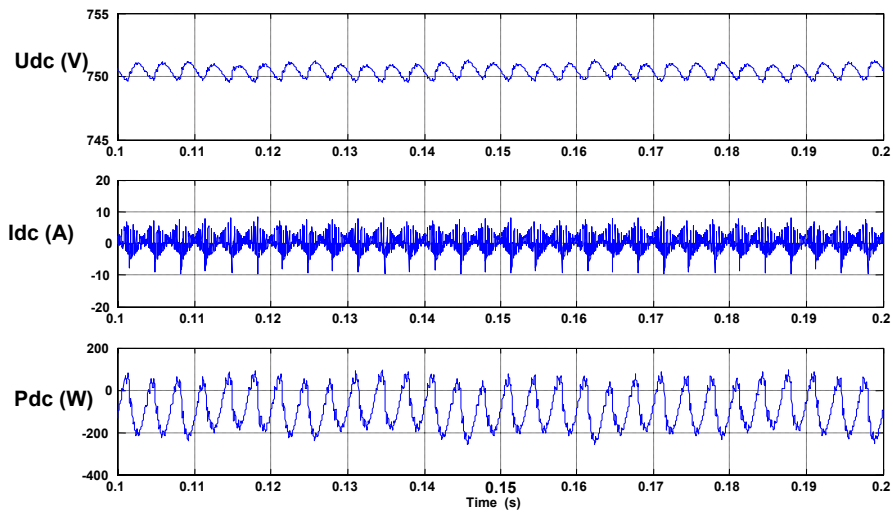


Fig. III.22. : Comportement du DC\_Link pour la compensation des courants harmoniques

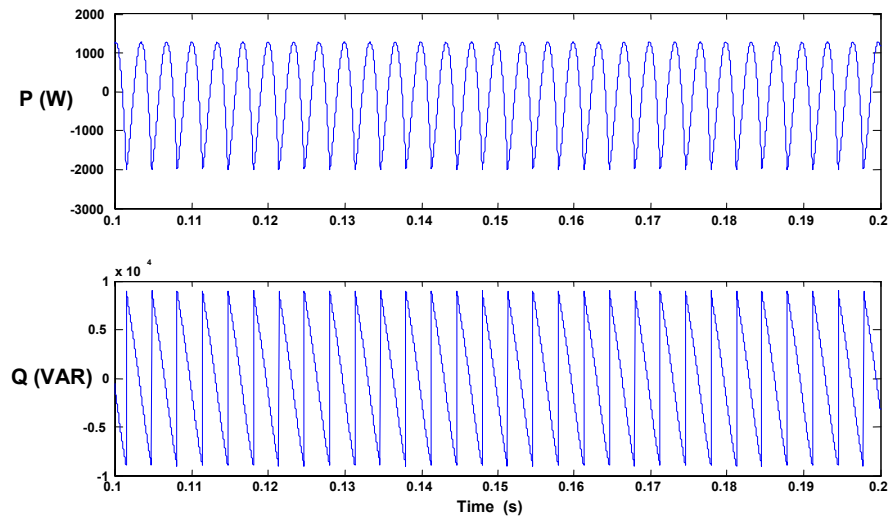


Fig. III.23 : Les puissances de référence

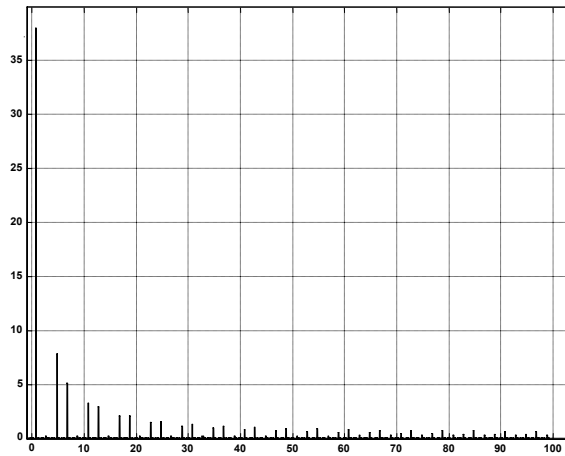


Fig. III.24 : Spectres de fréquence du courant de la charge en (A)

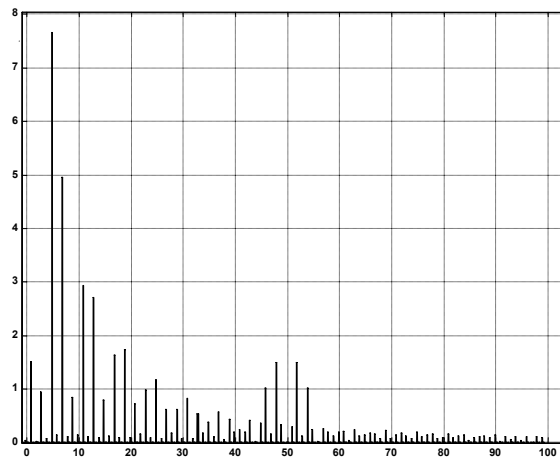


Fig. III.25 : Spectres de fréquence du courant injecté en (A)



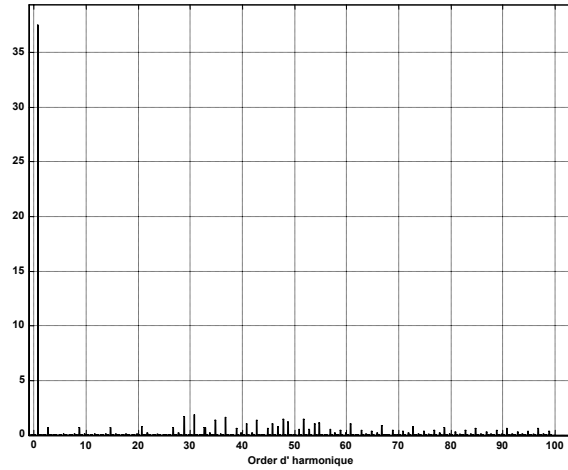


Fig. III.26 : Spectres de fréquences du courant de la source en (A)

### III-5-1-2 Compensation de la puissance réactive

Dans ce cas, L'objectif du filtre actif parallèle est la compensation de la puissance réactive demandée par une charge linéaire triphasée constituée par trois charge équilibrées (R,L) dans chaque phases, La Fig. III.27 montre le déphasage entre la tension de la source et le courant absorbé par la charge avant et après compensation dans la phase a,

Un courant injecté superposé avec le courant de référence identifié par la stratégie de commande, le courant dans la source est sinusoïdale et en phase avec la tension témoigne une compensation parfaite de la puissance réactive, ce qui confirme la bonne qualité de filtrage remarquée dans la représentation temporelle. Le courant obtenu contient aussi des composantes de haute fréquence dues à la fréquence de commutation. Il est à noter que la compensation de la puissance réactive est limitée par la contrainte de dimensionnement.

Les puissances de référence identifiées par la stratégie de commande sont :

$$\begin{cases} p_{ref} = -p_{pertes} - p_c \\ q_{ref} = q_{dc} \end{cases} \quad (III.85)$$

Avant compensation les puissances écoulées de la source vers la charge sont :

$$\begin{cases} p_s = p_{dc} + p_{pertes} + p_c \\ q_s = q_{dc} \end{cases} \quad (III.86)$$

Dans ce cas la puissance que doit fournir le filtre actif parallèle est la puissance réactive nécessaire pour la charge :

$$S_f = q = q_{dc} \quad (III.87)$$

Après compensation :

$$\begin{cases} p_s = p_{dc} + p_{perte} + p_c \\ q_s = 0 \end{cases} \quad (III.88)$$

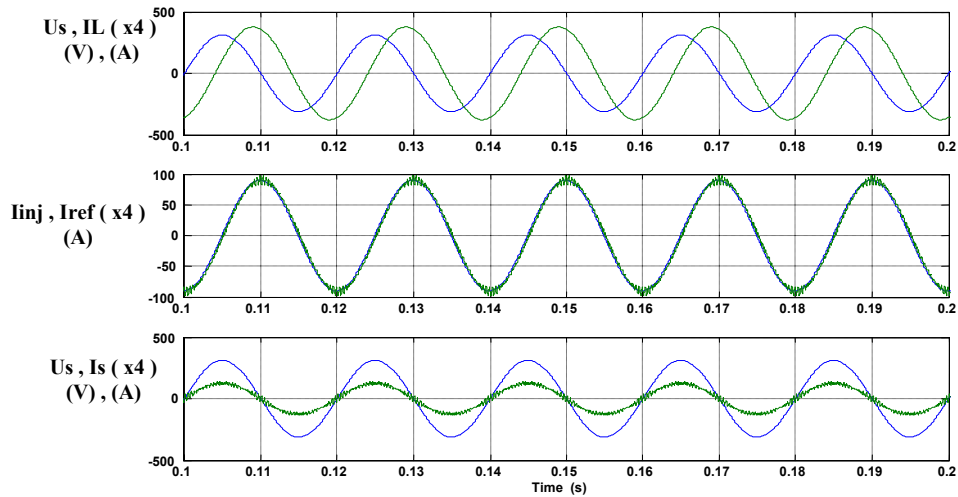


Fig. III.27 : Représentation temporelle de la compensation de la puissance réactive

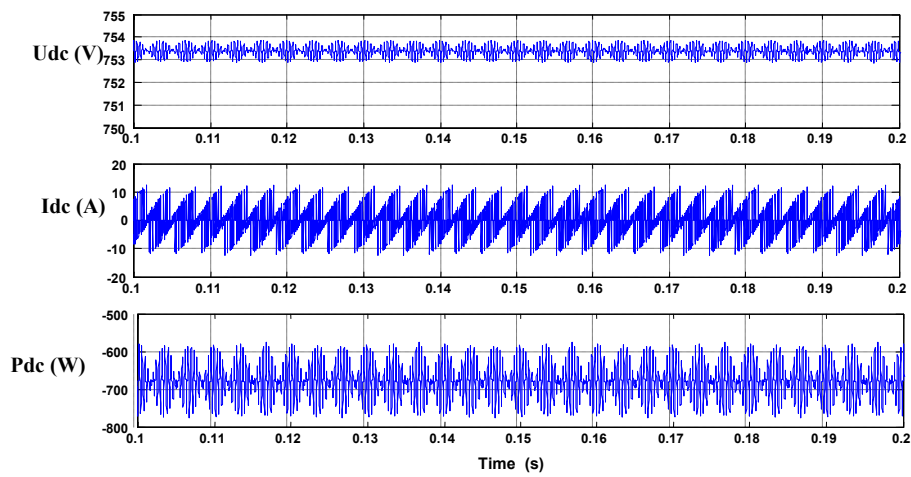


Fig. III.28 : Représentation temporelle de  $U_{dc}$ ,  $I_{dc}$  et  $p_{dc}$

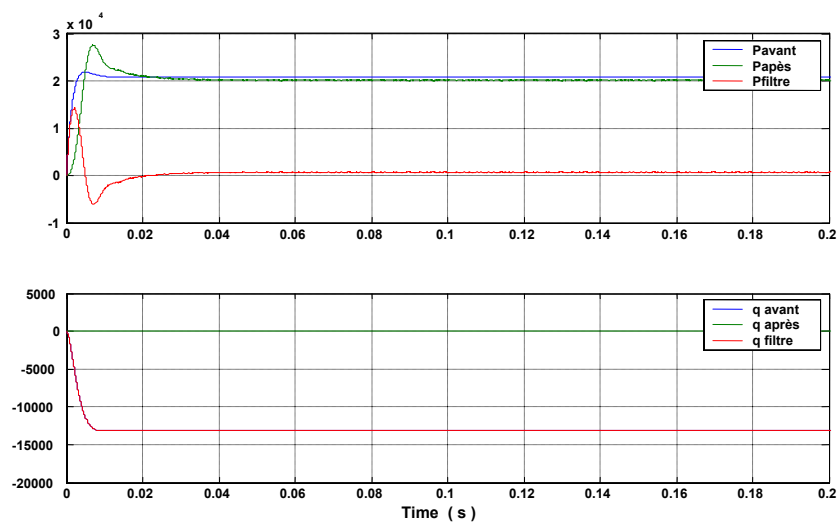


Fig. III.29 : Représentation des puissances avant et après perturbation. En (W) et (VAR)

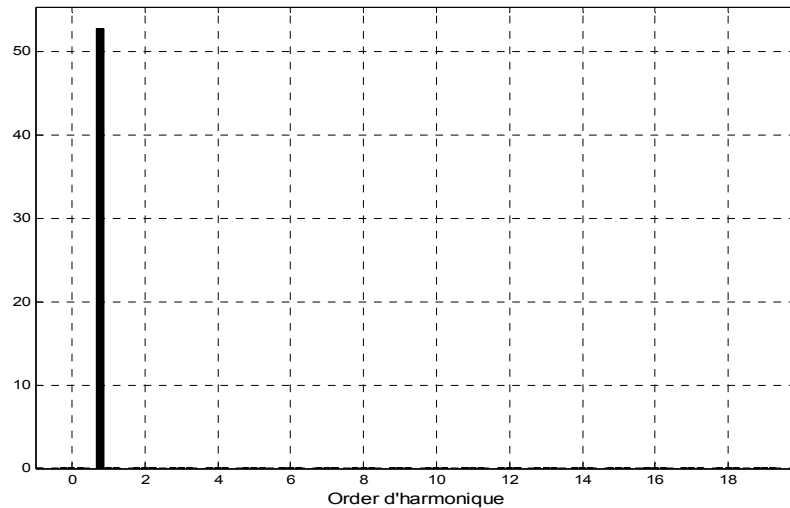


Fig. III.30 : Représentation spectrale du courant de la source avant compensation en (A)

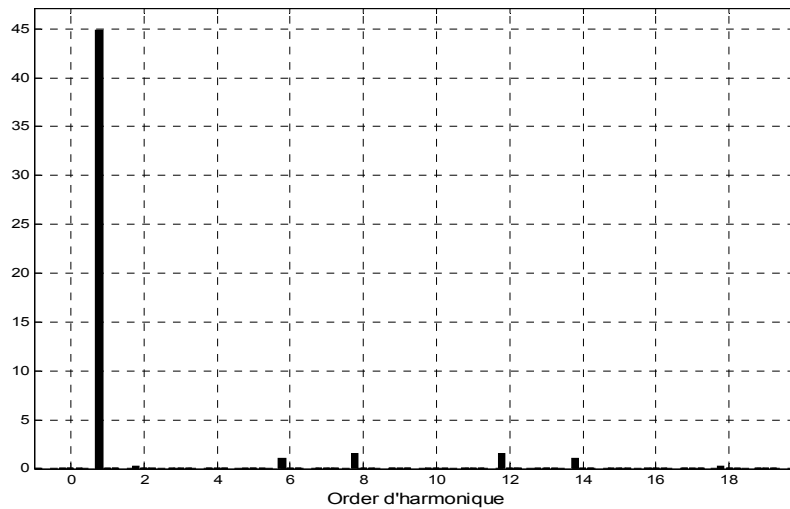


Fig. III.31 : Représentation spectrale du courant de la source après compensation en (A)

### III-5-1-3 Compensation des courant harmoniques, de la puissance réactive et du déséquilibre dans le courant de charge.

Le filtre actif parallèle à pour objectif de compenser les composantes suivantes :

- Les courant harmoniques ;
- La puissance réactive ;
- Le déséquilibre dans le courant de charge.

Dans ce cas la charge est composée de deux parties :

- un pont redresseur triphasé avec un angle d'amorçage égale à zéro, produisant les courants harmoniques. Cette charge est connectée à l'instant  $t = 0$  s Fig III.30 ;
- une charge linéaire triphasée ( $R, L$ ) déséquilibrée est considérée comme étant l'origine de la puissance réactive et le déséquilibre. Cette charge est connectée à l'instant  $t = 0.15$  s. Fig.III.30-31

Le résultat de simulation montre l'efficacité du filtre proposé pour la compensation des perturbations citées avec une grande performance et un temps de réponse pratiquement très faible marquant la flexibilité du filtre actif parallèle. On trouve aussi la superposition des courants identifiés et les courants injectés, ainsi la superposition des courants dans la source estimés et celles obtenus après compensation. Toujours on remarque l'existence des composantes de haute fréquence qui sont dues essentiellement à la fréquence de commutation. Dans la Fig. III.35 le courant dans la partie continue a toujours une valeur moyenne nulle, montrant que la puissance active délivrée par le filtre égale à celle absorbé à partir du réseau.

D'autre part on remarque la diminution de la tension  $U_{dc}$  aux bornes de la partie continue lors de la connection de la charge linéaire déséquilibré, et l'établissement rapide de cette valeur autour la valeur de référence, ceci montre la bonne régulation pour maintenir la tension à une valeur de référence sans la nécessité d'un autre moyen pour le chargement de l'élément de stockage de l'énergie, on remarque aussi l'augmentation de la puissance absorbée à partir du réseau pour convaincre la diminution causé par la nouvelle charge. Finalement la Fig. III.36 montre que le déphasage entre le courant dans la phase a et la tension de la même phase est nulle, prouve la bonne compensation de la puissance réactive, le déphasage avant compensation était  $72^\circ$ .

On peut dire que le courant dans la source est équilibrée est quasiment sinusoïdale dépourvue des harmoniques, la charge vue de la source est purement linéaire, résistive et équilibrée.

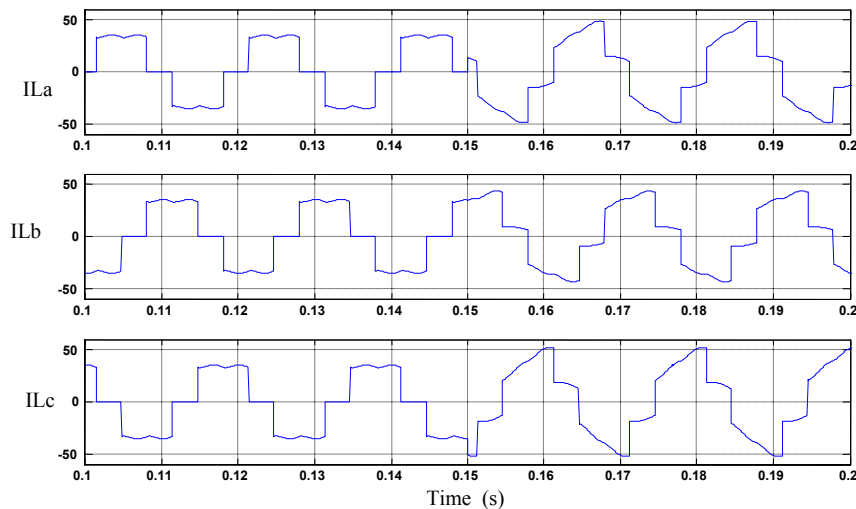


Fig. III.32 : représentation temporelle du courant de la charge en (A)

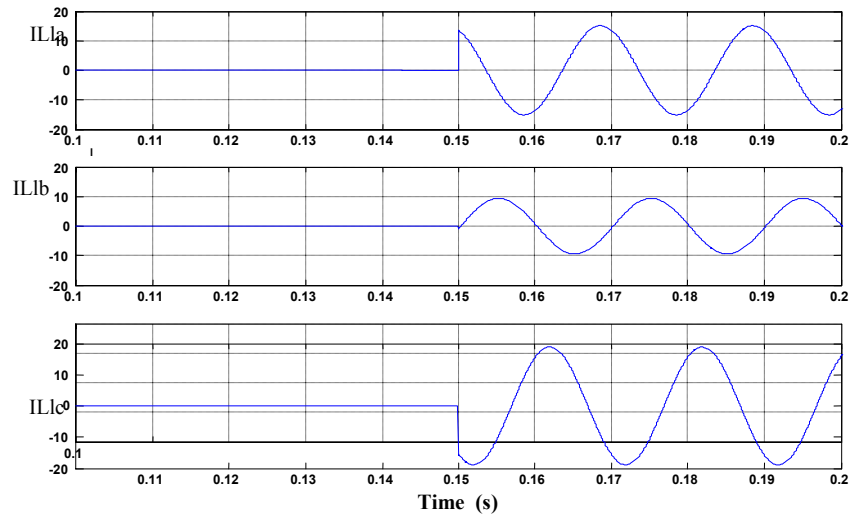


Fig. III.33 : Représentation temporelle du courant de la charge linéaire en (A)

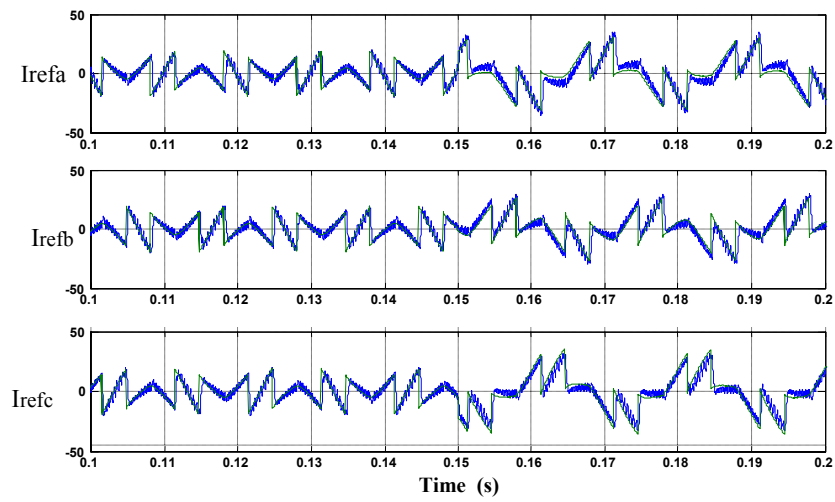


Fig. III 34: représentation temporelle des courant identifiés et injectés en (A)

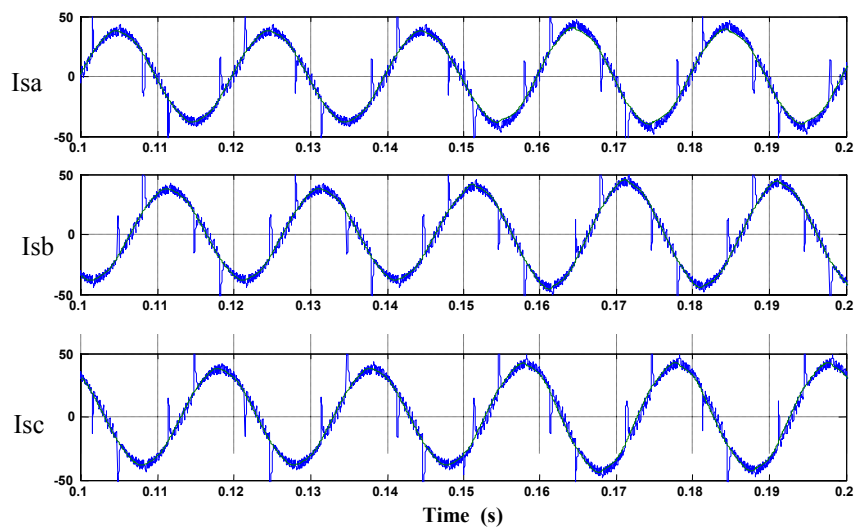


Fig. III.35 : Représentation temporelle des courant de la source en (A)

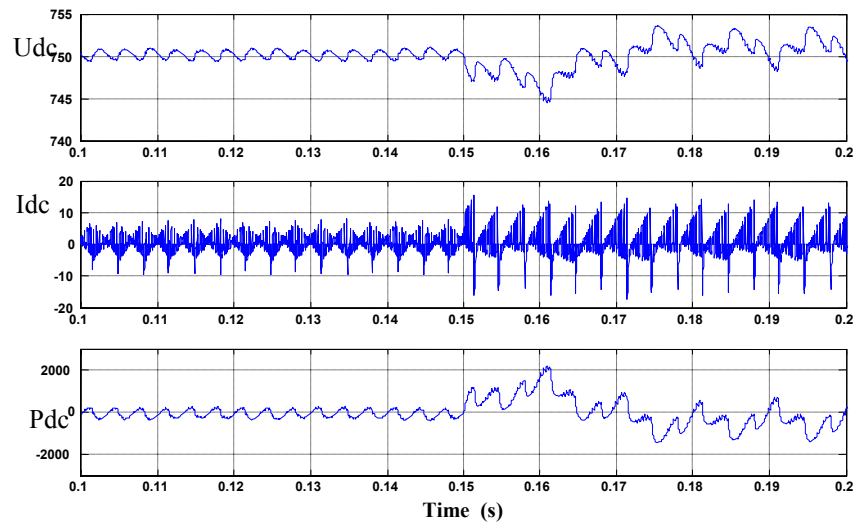


Fig. III.36 : Représentation temporelle de  $U_{dc}$  (V) ,  $I_{dc}$  (A) et  $p_{dc}$  (W)

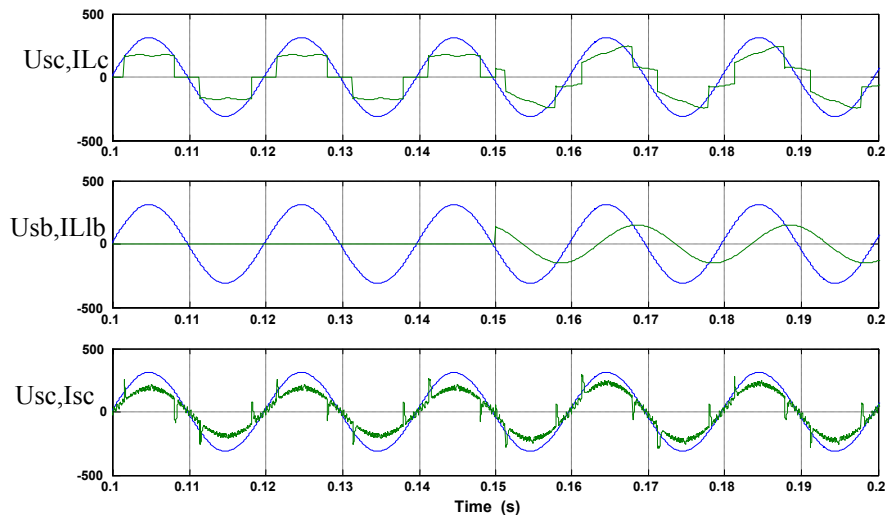


Fig. III.37 : Représentation temporelle comparative entre tensions et courants en (4xA), (V)

### III-5-2 Compensation dans un milieu déséquilibré et/ou pollué [89]

On a vu dans la section (II.4.1) que la méthode d'identification des références des puissances instantanées ne fonctionne pas si la source d'alimentation n'est pas équilibré et saine sinusoïdale. Pour surmonter ce problème et afin de valider le fonctionnement de filtre actif parallèle sous les différentes contraintes de déséquilibres et pollution de la tension du réseau électrique, on propose un système à base de PLL (Phase Locked Loop ou boucle à verrouillage de phase), permet d'extraire la composante fondamentale de la séquence directe utilisée pour l'identification des courants de référence selon les différentes perturbations produits par la charge.

## III-5-2-1 Principe de fonctionnement de la PLL

La PLL sert à séparer la composante fondamentale du système direct d'un système triphasé déséquilibré et pollué quelconque. Son principe de fonctionnement basé sur une transformation d'un système de tension  $V_{sa}$ ,  $V_{sb}$ ,  $V_{sc}$  à un système à trois composante direct, quadrature et homopolaire, en utilisant la transformé de Park à base d'un angle estimé  $\hat{\theta}$ . Le circuit PLL est verrouillé si  $\hat{\theta} \neq \theta$ , où  $\theta$  est l'angle de la tension du réseau.

Dans le cas général d'un système des tensions polluées et équilibrées on aura :

$$\begin{cases} V_{sa}(t) = \sum_{i=1}^{\infty} \sqrt{2} V_{am,i} \sin(\theta_i + \phi_{ai}) \\ V_{sb}(t) = \sum_{i=1}^{\infty} \sqrt{2} V_{bm,i} \sin\left(\theta_i + \phi_{bi} - \frac{2\pi}{3}\right) \\ V_{sc}(t) = \sum_{i=1}^{\infty} \sqrt{2} V_{cm,i} \sin\left(\theta_i + \phi_{ci} + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (\text{III.89})$$

Ou en fonction des composantes symétriques on obtient :

$$\begin{cases} V_{sa}(t) = \sqrt{2} V_0 \sin(\omega_n t + \phi_{0n}) + \sqrt{2} V_{+n} \sin(\omega_n t + \phi_{+n}) + \sqrt{2} V_{-n} \sin(\omega_n t + \phi_{-n}) \\ V_{sb}(t) = \sqrt{2} V_0 \sin(\omega_n t + \phi_{0n} - \frac{2\pi}{3}) + \sqrt{2} V_{+n} \sin(\omega_n t + \phi_{+n} - \frac{2\pi}{3}) + \sqrt{2} V_{-n} \sin(\omega_n t + \phi_{-n} + \frac{2\pi}{3}) \\ V_{sc}(t) = \sqrt{2} V_0 \sin(\omega_n t + \phi_{0n} + \frac{2\pi}{3}) + \sqrt{2} V_{+n} \sin(\omega_n t + \phi_{+n} + \frac{2\pi}{3}) + \sqrt{2} V_{-n} \sin(\omega_n t + \phi_{-n} - \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (\text{III.90})$$

On utilise la transformation de Park :

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ V_{s0} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\hat{\theta}) & \cos(\hat{\theta} - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\hat{\theta} + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\hat{\theta}) & -\sin(\hat{\theta} - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\hat{\theta} + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{III.91})$$

Après transformation on aura :

$$V_{sd} = \sqrt{3} \left[ \sum_{n=1}^{\infty} -V_{+n} \sin(\hat{\theta} - \theta_n) + \sum_{n=1}^{\infty} V_{-n} \sin(\hat{\theta} + \theta_n) \right] \quad (\text{III.92})$$

$$V_{sq} = -\sqrt{3} \left[ \sum_{n=1}^{\infty} V_{+n} \cos(\hat{\theta} - \theta_n) - \sum_{n=1}^{\infty} V_{-n} \cos(\hat{\theta} + \theta_n) \right] \quad (\text{III.93})$$

On propose d'écrire ces tensions de la manière suivante :

$$V_{sd} = V_{sdf} + \tilde{V}_{sd} \quad (\text{III.94})$$

$$V_{sq} = V_{sqf} + \tilde{V}_{sq} \quad (\text{III.95})$$

Et avec :

$$V_{sdf} = V_{sdf+} + V_{sdf-} = \sqrt{3} \left\{ -V_{+1} \sin(\hat{\theta} - \theta) + V_{-1} \sin(\hat{\theta} + \theta) \right\} \quad (III.96)$$

$$V_{sqf} = V_{sqf+} + V_{sqf-} = \sqrt{3} \left\{ -V_{+1} \cos(\hat{\theta} - \theta) + V_{-1} \cos(\hat{\theta} + \theta) \right\} \quad (III.97)$$

Où :

$V_{sdf}$  : La composante fondamentale directe ;

$\hat{V}_{sd}$  : Les harmoniques de la composante directe ;

$V_{sqf}$  : La composante fondamentale quadratique ;

$\hat{V}_{sq}$  : Les harmoniques de la composante quadratique ;

$V_{sdf+}$  : La composante fondamentale directe due à la composante symétrique positive ;

$V_{sdf-}$  : La composante fondamentale directe due à la composante symétrique négative ;

$V_{sqf+}$  : La composante fondamentale quadrature due à la composante symétrique positive ;

$V_{sqf-}$  : La composante fondamentale quadrature due à la composante symétrique négative ;

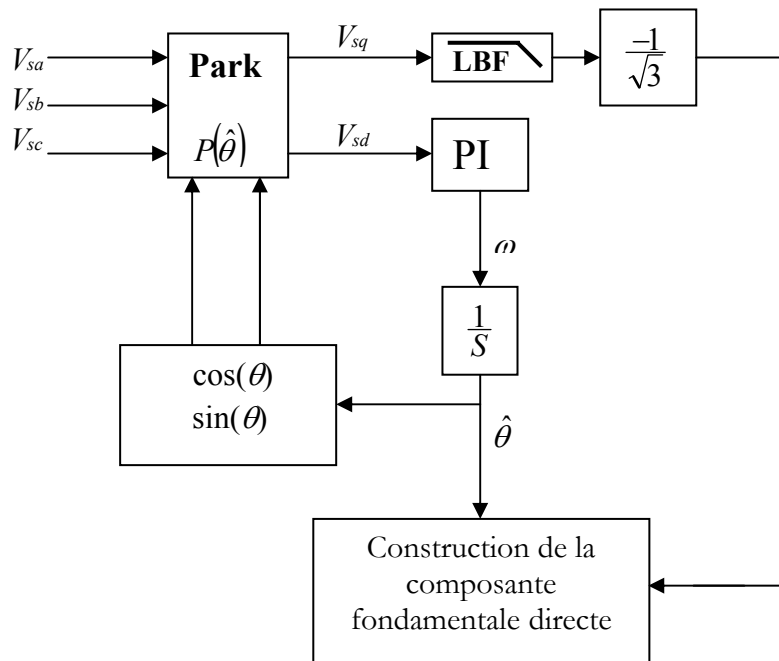


Fig. III. 38 : Principe de fonctionnement de la PLL

Le rôle du PLL est d'extraire les composante  $V_{sdf+}$  et  $V_{sqf+}$  est de faire égaliser l'angle estime à l'angle du fondamental de la tension du réseau ( $\hat{\theta} = \theta$ ), Si la tension du réseau est sain sinusoïdale et équilibre on aura :

$$V_{sd} = 0 \quad (III.99)$$

$$V_{sq} = -\sqrt{3}V_{+1} \quad (III.100)$$

De l'équation (III.99), on remarque que pour obtenir, dans le même temps, l'angle et l'amplitude de la composante directe de tension, la tension directe  $V_{sd}$  doit être nulle. Cela implique que la tension directe de référence  $V_{sd-ref}$  soit nulle. Le PLL garde toujours l'erreur entre  $V_{sd-ref}$  et  $V_{sd}$  nul, on peut utiliser un régulateur PI pour satisfaire cette condition. En



utilisant la transformation inverse de Park, on aura la tension fondamentale de la composante directe (positive).

### III-5-2-2 Simulation sur le fonctionnement de la PLL

#### Cas 1. Une source de tensions déséquilibrées

On prend le cas de déséquilibre en amplitude et en phase. Le cas simulé présente un déséquilibre biphasé en amplitude et un déséquilibre triphasé en phase.

La Fig.III.39 montre la bonne estimation de  $\hat{\theta}$  et  $\sin(\hat{\theta})$ . La Fig.III.40 montre la bonne régulation du PI. La tension de sortie de la PLL dans la phase a rejoint le fondamentale de la séquence positive dans un temps égale à 0.07s. Ce temps est réduit dans le cas réel à presque 20 ms. Finalement les tensions de sortie sont équilibrées en amplitude et en phase.

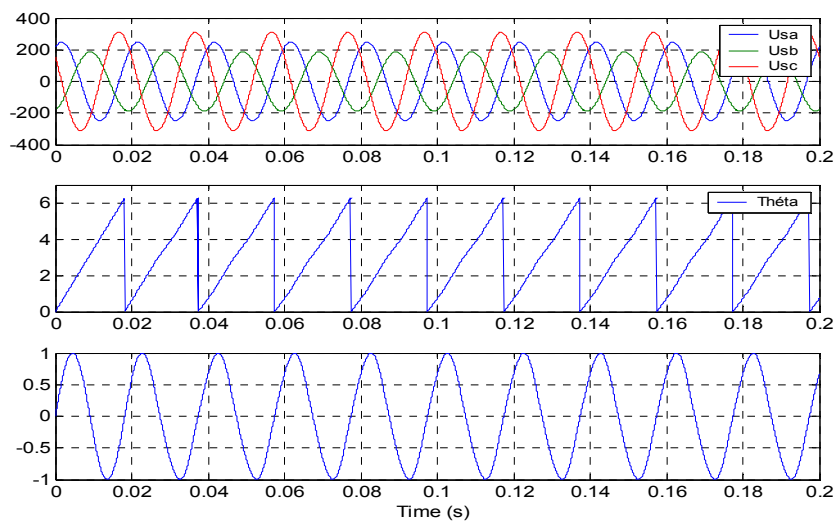


Fig. III.39 : représentation de  $\hat{\theta}$  (rad) ,  $\sin(\hat{\theta})$  et les tensions de la source (V).

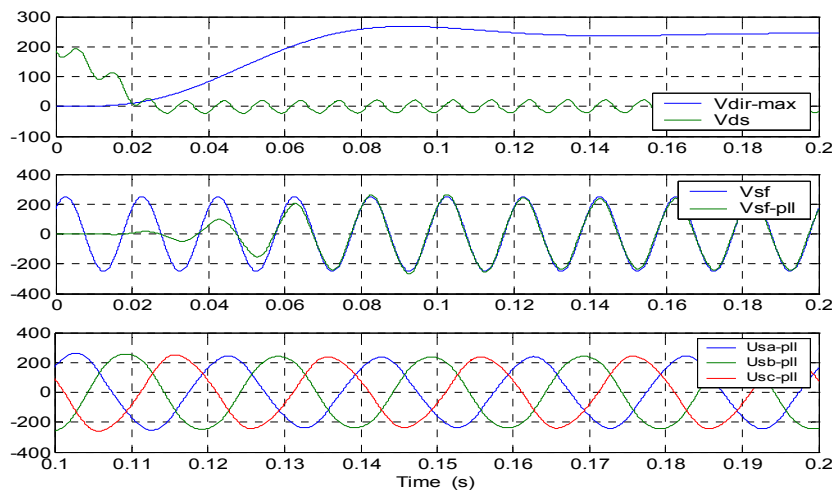


Fig. III.40 : Représentation de la détection des tensions fondamentales en (V).

Cas 2. Une source de tensions déséquilibrées et polluées

On prend le cas des tensions contenant deux composantes harmonique d'ordre 5 et 7 d'amplitude 0.3% et 0.25% de l'amplitude du fondamentale de chaque tension. Les tensions sont ici déséquilibrées en amplitude et en phase.

La Fig.III.41 montre la bonne estimation de  $\hat{\theta}$  et  $\sin(\hat{\theta})$ . La Fig.III.42 montre la bonne régulation du PI. La tension de sortie de la PLL dans la phase a rejoint le fondamentale de la séquence positive dans un temps égale à 0.07s. Ce temps est réduit dans le cas réel à presque 20 ms. Comme le cas précédent. Ici la tension  $V_{sd}$  subit une fluctuation remarquable, avec une valeur moyenne nulle. Finalement les tensions de sortie sont équilibrées en amplitude et en phase.

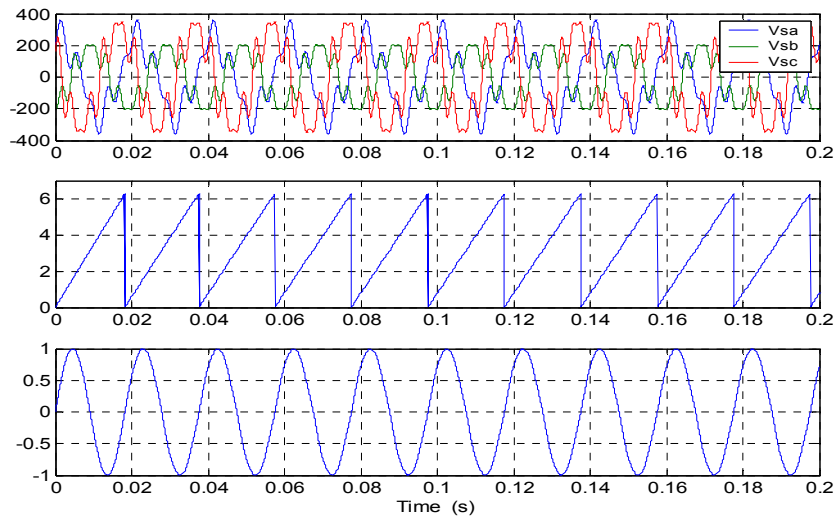


Fig. III.41 : représentation de  $\hat{\theta}$  (rad) ,  $\sin(\hat{\theta})$  et les tensions de la source (V).

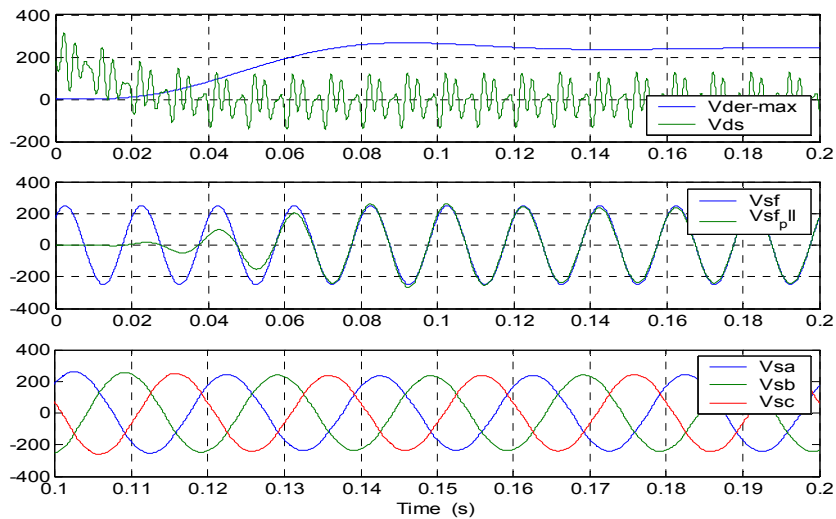


Fig. III.42 : Représentation de la détection des tensions fondamentales en (V)

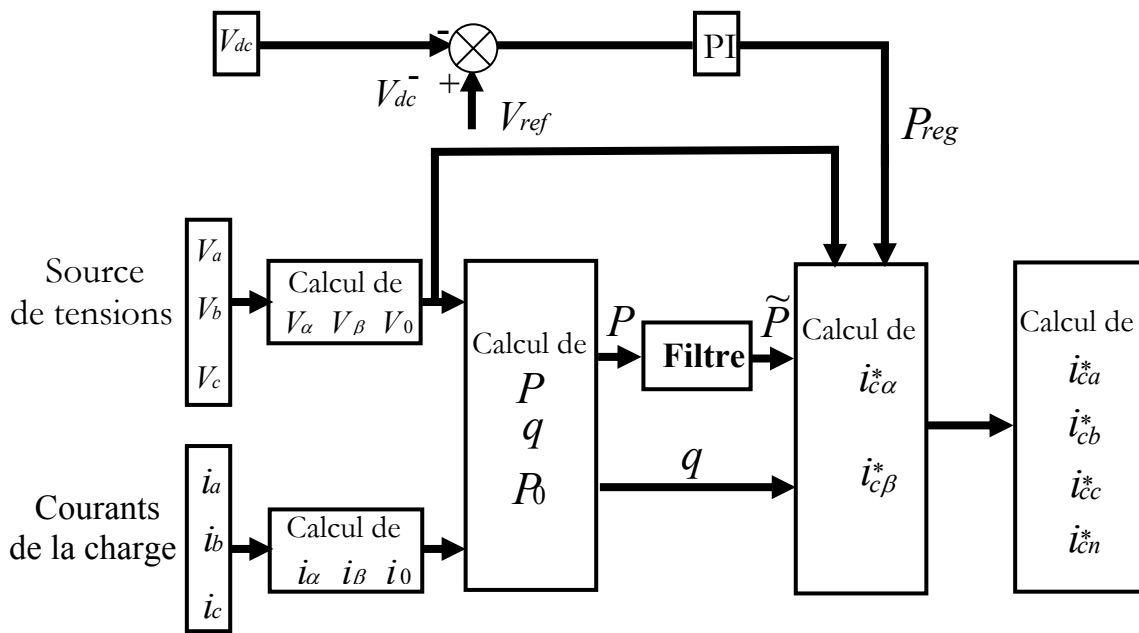


Fig. III.43 : Principe de compensation des harmoniques et de la puissance réactive

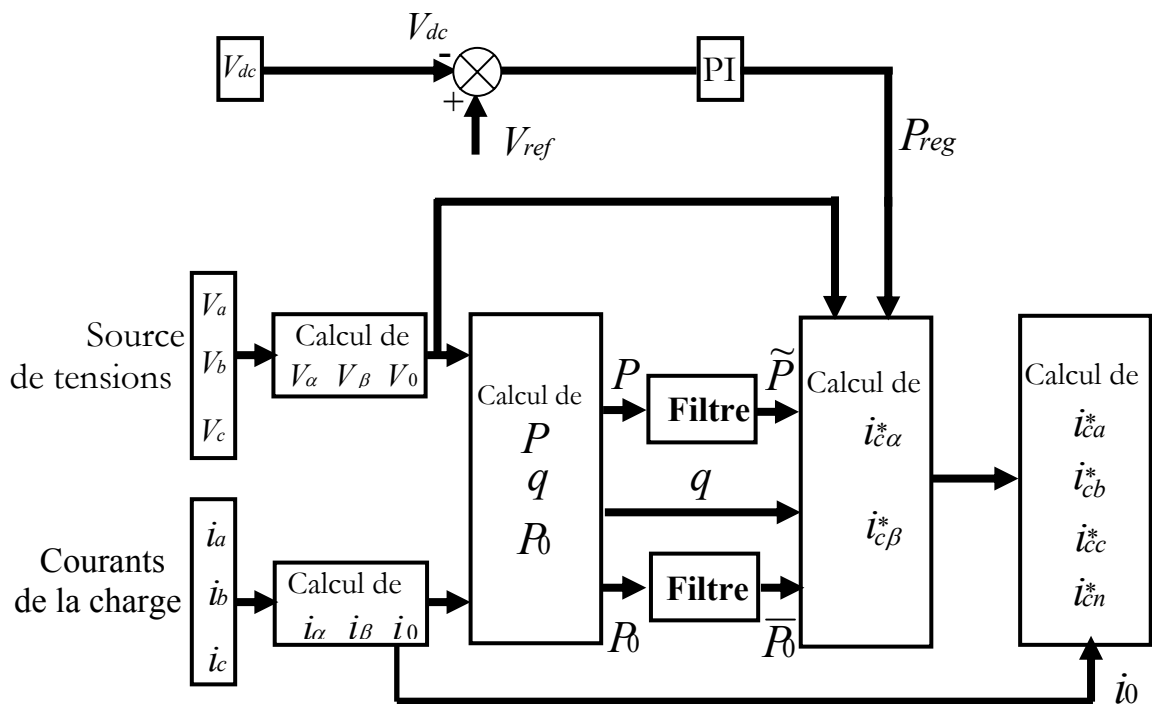


Fig. III.44 : Principe de compensation des courants déséquilibrés

## III-5-2-3 Compensation dans un milieu de tensions déséquilibrées

On propose d'écrire les tensions du réseau de la forme suivante :

$$\begin{cases} V_{sa} = k_1 V \cos(\omega t + \gamma_1) \\ V_{sb} = k_2 V \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \gamma_2\right) \\ V_{sc} = k_3 V \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \gamma_3\right) \end{cases} \quad (\text{III.101})$$

Si le système de tensions est équilibré on aura :

$$\begin{aligned} k_1 &= k_2 = k_3 = 1 \\ \gamma_1 &= \gamma_2 = \gamma_3 = 0 \end{aligned} \quad (\text{III.102})$$

Dans le cas général de déséquilibre l'amplitude du fondamentale de la séquence directe est :

$$V_{f+} = \frac{V}{3} \sqrt{(k_1 \cos \gamma_1 + k_2 \cos \gamma_2 + k_3 \cos \gamma_3)^2 + (k_1 \sin \gamma_1 + k_2 \sin \gamma_2 + k_3 \sin \gamma_3)^2} \quad (\text{III.103})$$

Avec un angle de phase :

$$\text{tg}(\varphi_{f+}) = \frac{k_1 \sin \gamma_1 + k_2 \sin \gamma_2 + k_3 \sin \gamma_3}{k_1 \cos \gamma_1 + k_2 \cos \gamma_2 + k_3 \cos \gamma_3} \quad (\text{III.104})$$

Tel que :

$$\begin{cases} V_{sf+a} = V_{f+} \cos(\omega t + \varphi_{f+}) \\ V_{sf+b} = V_{f+} \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \varphi_{f+}\right) \\ V_{sf+c} = V_{f+} \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \varphi_{f+}\right) \end{cases} \quad (\text{III.105})$$

Pour valider notre étude on va prendre les paramètres suivants :

$$\begin{aligned} V &= 220 \sqrt{2} \\ \begin{cases} k_1 = 0.8 \\ k_2 = 0.6 \\ k_3 = 1.0 \end{cases} & \begin{cases} \gamma_1 = \frac{\pi}{3} \\ \gamma_2 = \frac{\pi}{4} \\ \gamma_3 = \frac{\pi}{6} \end{cases} \end{aligned} \quad (\text{III.106})$$

Théoriquement les paramètres de la composante fondamentale sont :

$$\begin{aligned} V_{f+} &= 0.7798 V = \\ \text{tg}(\varphi_{f+}) &= 0.9567 \Rightarrow \varphi_{f+} = 43.73^\circ \end{aligned} \quad (\text{III.107})$$

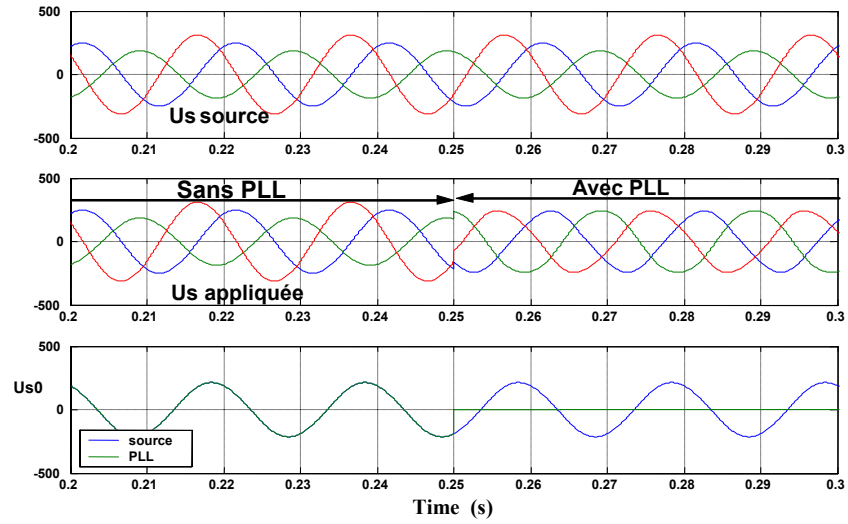


Fig. III.45 : Représentation tensions de la source et les tensions du PLL en (V)

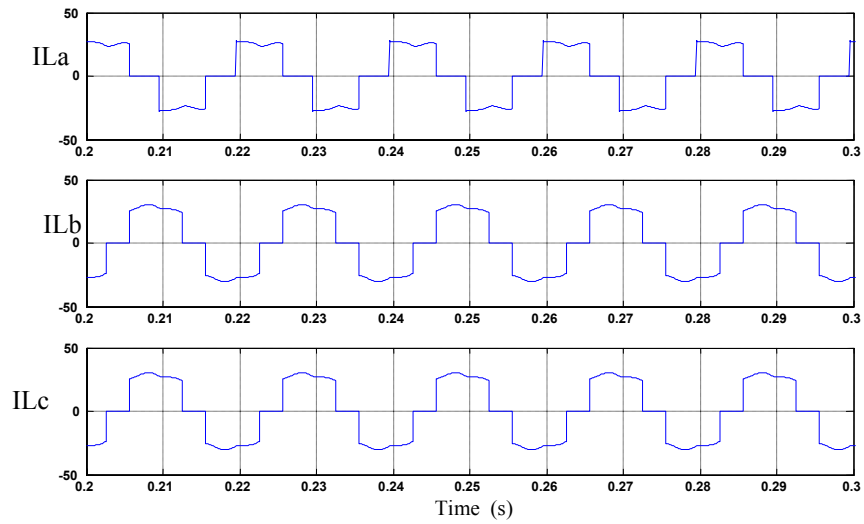


Fig. III.46 : Représentation temporelle du courant de la charge en (A)

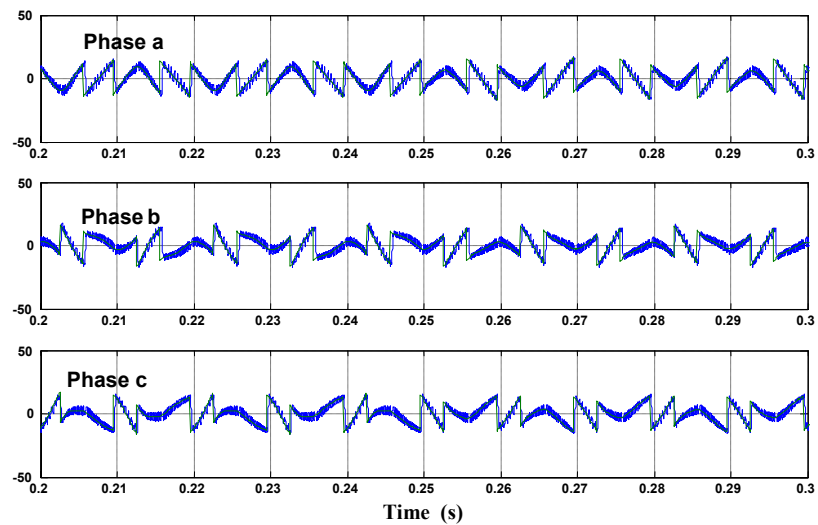


Fig. III.47 : Représentation temporelle des courants injectés et identifiés en (A)

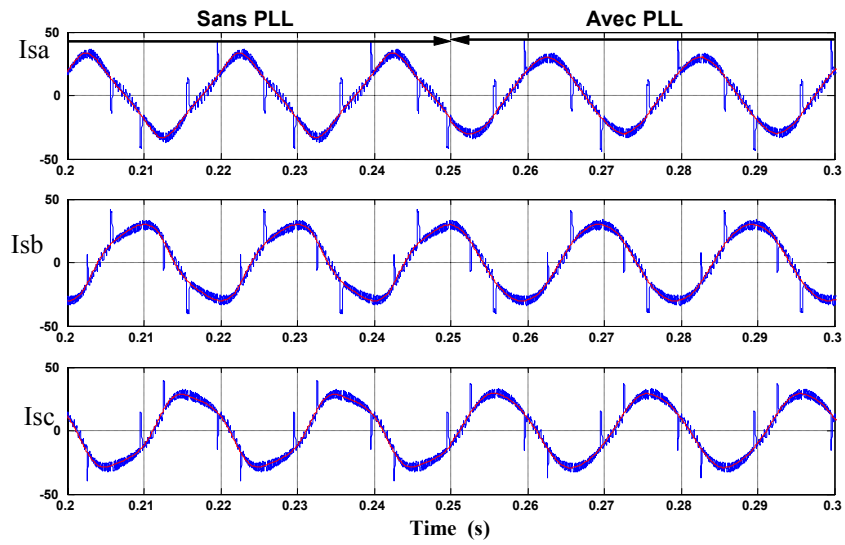


Fig. III.48 : Représentation temporelle des courants de la source en (A)

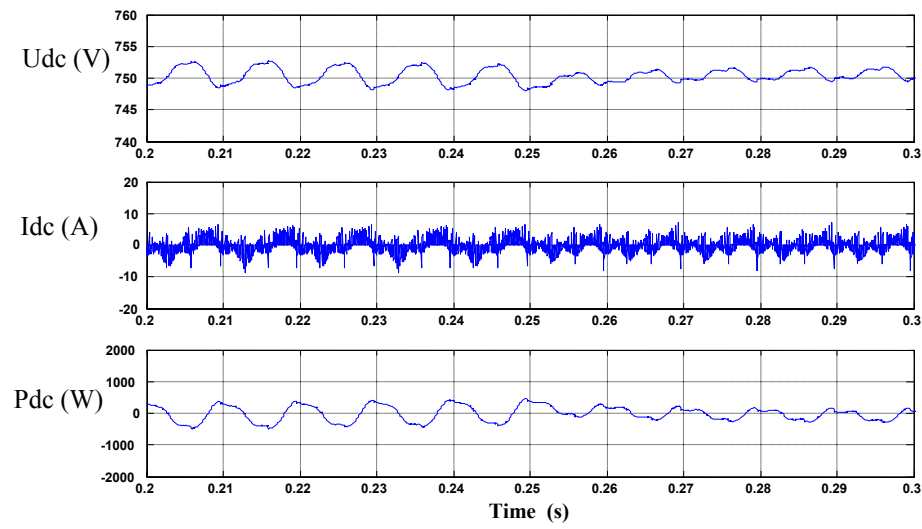


Fig. III.49: Comportement du DC\_Link

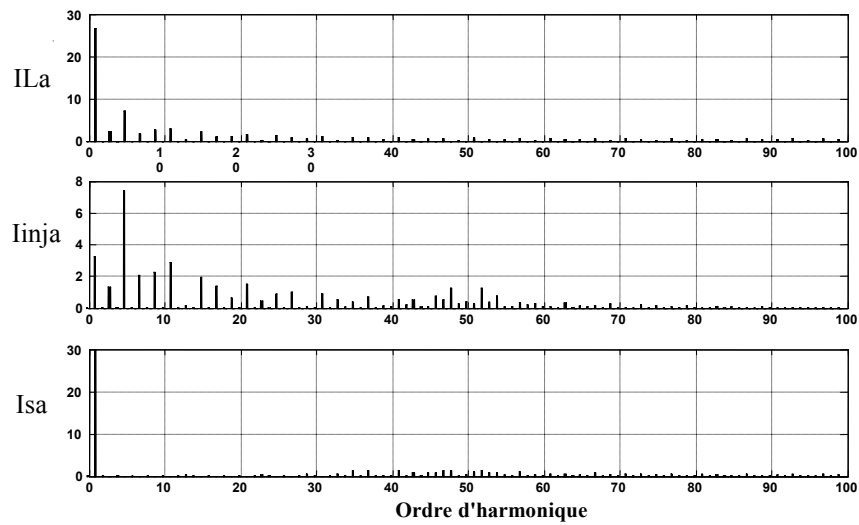


Fig. III.50: Les spectres de fréquence des courant, de la charge, injecté et de la source en (A).

III-5-2-4 Compensation dans un milieu de tensions déséquilibrées

On propose d'écrire les tensions du réseau de la forme suivante :

$$\begin{aligned}
 V_{sa} &= 0.8 V \left\{ \sin\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right) + 0.35 \sin 5\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right) + 0.15 \sin 7\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right) \right\} \\
 V_{sb} &= 0.6 V \left\{ \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3} + \frac{\pi}{4}\right) + 0.35 \sin 5\left(\theta - \frac{2\pi}{3} + \frac{\pi}{4}\right) + 0.15 \sin 7\left(\theta - \frac{2\pi}{3} + \frac{\pi}{4}\right) \right\} \\
 V_{sc} &= V \left\{ \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3} + \frac{\pi}{6}\right) + 0.35 \sin 5\left(\theta + \frac{2\pi}{3} + \frac{\pi}{6}\right) + 0.15 \sin 7\left(\theta + \frac{2\pi}{3} + \frac{\pi}{6}\right) \right\}
 \end{aligned} \tag{III.108}$$

Théoriquement les paramètres de la composante fondamentale sont :

$$V_{f+} = 0.7798 V = \quad , \quad \text{tg}(\varphi_{f+}) = 0.9567 \Rightarrow \varphi_{f+} = 43.73^\circ \tag{III.109}$$

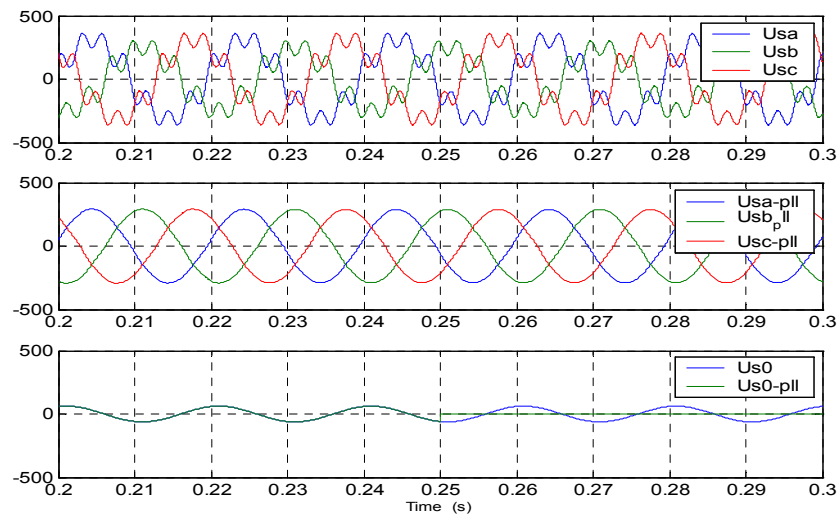


Fig. III.51 : Représentation temporelle tensions de la source et les tensions du PLL en (V)

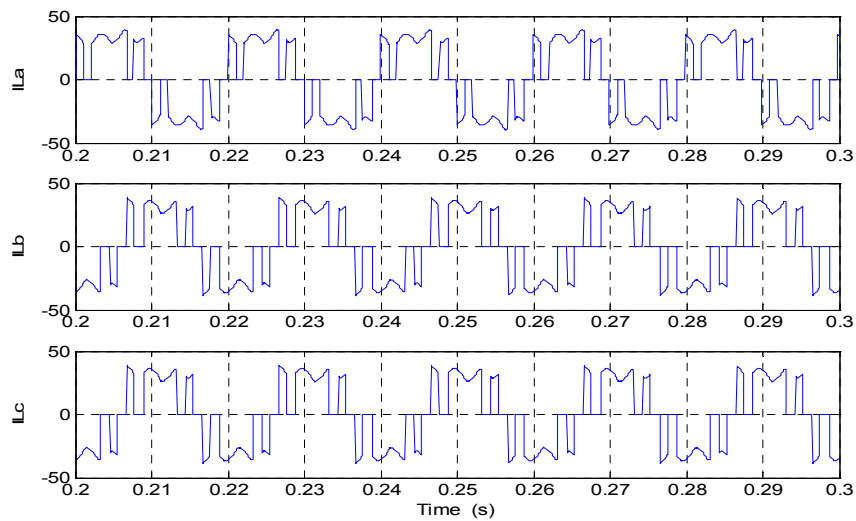


Fig. III.52 : Représentation temporelle du courant de la charge en (A)

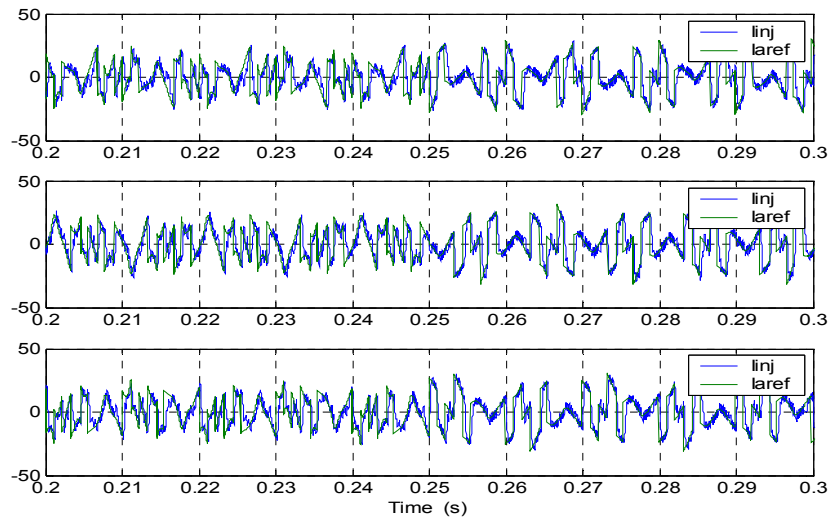


Fig. III.53 : Représentation temporelle des courants injectés et identifiés en (A)

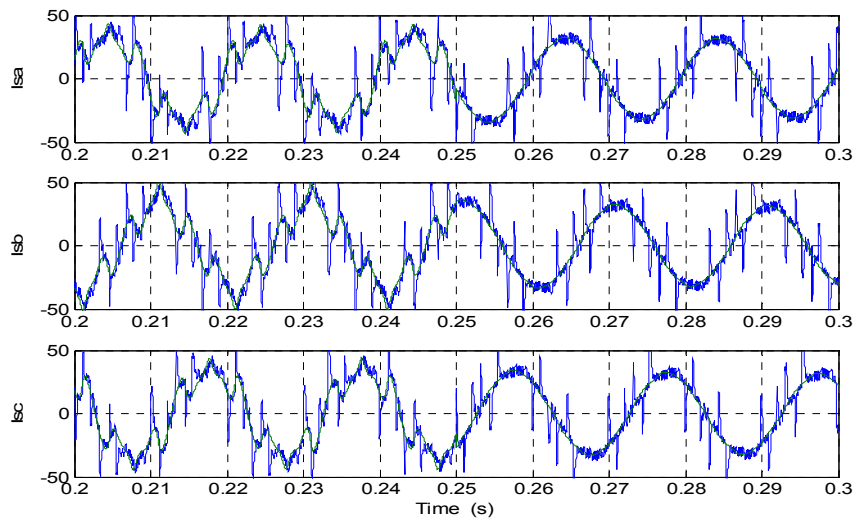


Fig. III.54 : Représentation temporelle des courants de la source en (V)

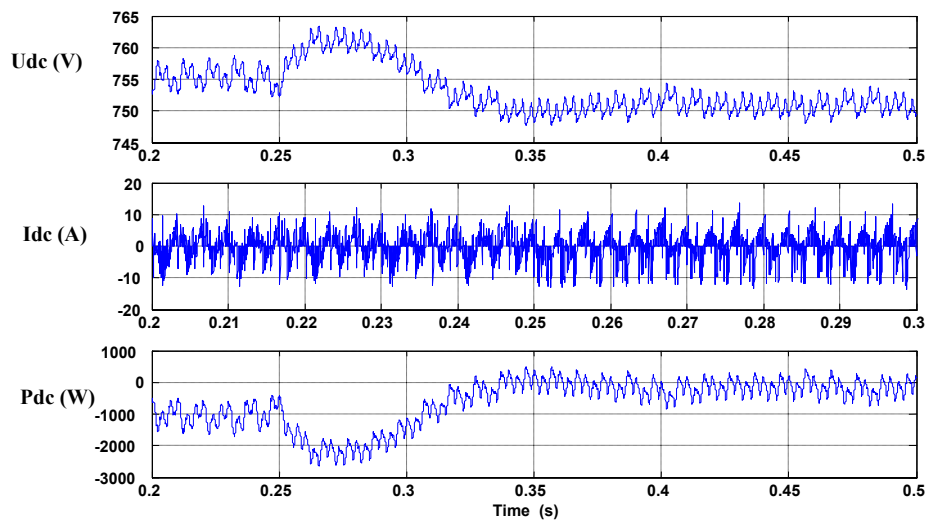


Fig. III.55 : Comportement du DC\_Link



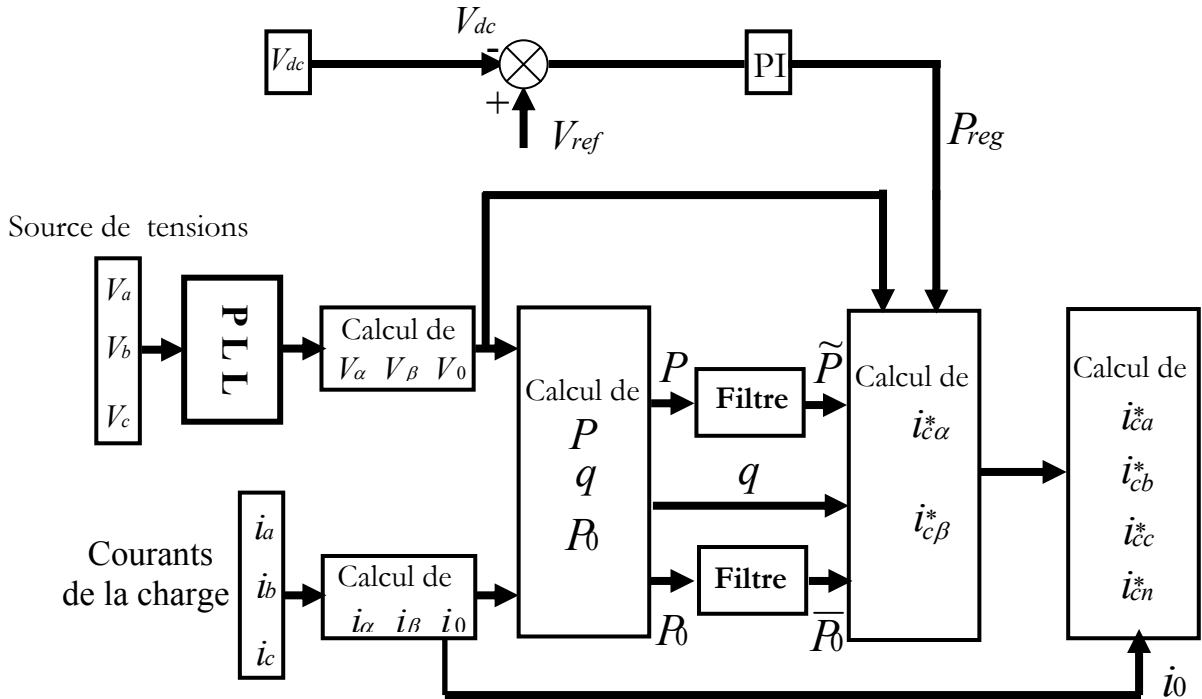


Fig. III.56 : Principe de compensation dans un milieu perturbé

III-5-3 Quelques Problèmes de la Théorie pq [88]

III-5-3-1 Compensation de la composante homopolaire

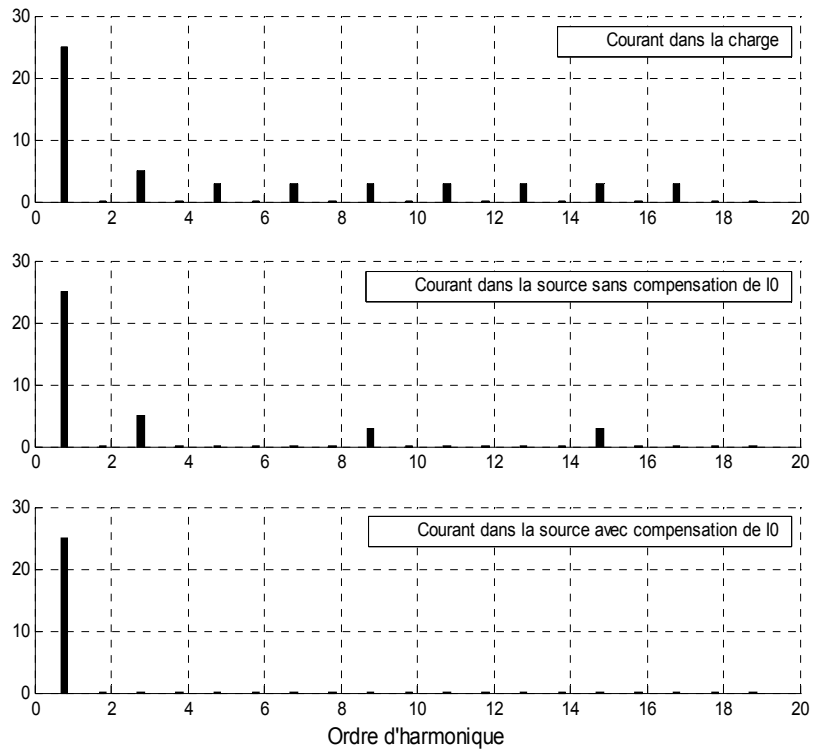


Fig. III.57 : Représentation spectrale de la compensation de  $I_0$  (A)

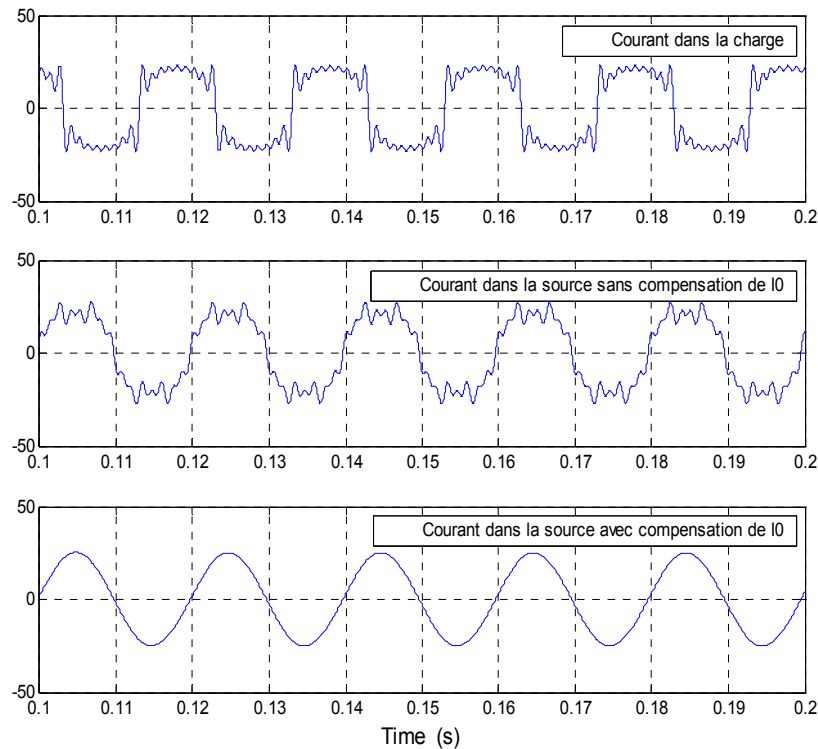


Fig. III.58 : Représentation temporelle de la compensation de  $I_0$  en (A)

### III-5-3-2 Les courants cachés

Dans la théorie pq, on rencontre un phénomène très remarquable lors de la génération des courants de compensation. Ce phénomène se traduit par l'apparition des courants à des fréquences différentes de la fréquence existant initialement dans le courant pollué de la charge. Or, notre but est la compensation des harmoniques dans ce dernier.

Généralement le courant généré par une charge non linéaire est de la forme suivante :

$$\begin{aligned}
 i_{ak}(t) &= \sqrt{2}I_k \sin(k\omega t + \varphi_k) \\
 i_{ak}(t) &= \sqrt{2}I_k \sin\left(k\omega t + \varphi_k + \sigma \frac{2\pi}{3}\right) \\
 i_{ak}(t) &= \sqrt{2}I_k \sin\left(k\omega t + \varphi_k - \sigma \frac{2\pi}{3}\right)
 \end{aligned}
 \tag{III.110}$$

avec  $k = 1..n$ ,

$$\sigma = \begin{cases} +1 \rightarrow \text{séquence négative} \\ -1 \rightarrow \text{séquence positive} \end{cases}
 \tag{III.111}$$

La transformé de Clarke de ces courants est :

$$\begin{aligned}
 i_{\alpha k}(t) &= \sqrt{3}I_k \sin(k\omega t + \varphi_k); \\
 i_{\beta k}(t) &= \sqrt{3}I_k \sigma \cos(k\omega t + \varphi_k).
 \end{aligned}
 \tag{III.112}$$

Les composantes de Clarke des tensions équilibrées et saines sinusoïdale sont :

$$\begin{aligned} v_\alpha(t) &= \sqrt{3}V \sin(\omega t) ; \\ v_\beta(t) &= -\sqrt{3}V \cos(\omega t) \end{aligned} \quad (\text{III.113})$$

D'où les puissances active et imaginaire instantanées :

$$\begin{aligned} p_k &= -3\sigma V_m I_k \cos((k + \sigma)\omega t + \varphi_k) ; \\ q_k &= -3V_m I_k \sin((k + \sigma)\omega t + \varphi_k) . \end{aligned} \quad (\text{III.114})$$

Les puissances ont uniquement des composantes oscillantes de  $(k + \sigma)$  fois la fréquence fondamentale. D'après la théorie pq :

$$\text{Suivant l'axe } \alpha \quad : \quad i_{\alpha k} = i_{\alpha p k} + i_{\alpha q k} = \frac{v_\alpha}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} p_k + \frac{v_\beta}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} q_k \quad (\text{III.115})$$

$$\text{Suivant l'axe } \beta \quad : \quad i_{\beta k} = i_{\beta p k} + i_{\beta q k} = \frac{v_\beta}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} p_k + \frac{-v_\alpha}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} q_k \quad (\text{III.116})$$

Après substitution des équations (III.113),(III.114) dans l'équations (III.115)(III.116) on obtient :

$$i_{\alpha p k} = -\frac{\sqrt{3}}{2} \sigma I_k [\sin((k + \sigma + 1)\omega t + \varphi_k) - \sin((k + \sigma - 1)\omega t + \varphi_k)] \quad (\text{III.117})$$

$$i_{\alpha q k} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_k [\sin((k + \sigma + 1)\omega t + \varphi_k) + \sin((k + \sigma - 1)\omega t + \varphi_k)] \quad (\text{III.118})$$

$$i_{\beta p k} = \frac{\sqrt{3}}{2} \sigma I_k [\cos((k + \sigma + 1)\omega t + \varphi_k) + \cos((k + \sigma - 1)\omega t + \varphi_k)] \quad (\text{III.119})$$

$$i_{\beta q k} = -\frac{\sqrt{3}}{2} I_k [\cos((k + \sigma + 1)\omega t + \varphi_k) - \cos((k + \sigma - 1)\omega t + \varphi_k)] \quad (\text{III.120})$$

Après ces équations on peut noter deux points intéressants :

- ❖  $i_{\alpha p k}, i_{\alpha q k}, i_{\beta p k}, i_{\beta q k}$  contiennent une composante harmonique d'ordre  $(k + \sigma + 1)/(k + \sigma - 1)$  cette composante n'était pas dans le courant de la source original.
- ❖ La composante harmonique d'ordre  $(k + \sigma + 1)/(k + \sigma - 1)$  dans l'axe  $\alpha$   $i_{\alpha p k}$  est égale a la composante harmonique  $(k + \sigma + 1)/(k + \sigma - 1)$  de  $i_{\alpha q k}$  avec un signe inverse, à l'état normal la somme des deux est nulle, ces composantes n'apparient pas dans le courant de source. Même chose est valable pour l'axe  $\beta$  pour les courants  $i_{\beta p k}, i_{\beta q k}$ .

Si l'idée est de compenser les courants dépendamment de  $\tilde{p}$  et  $\tilde{q}$ , en utilisant la théorie pq, il est possible de définir les courants de compensation en utilisant le gain  $K_p$  et  $K_q$  selon les équations suivantes :

$$\begin{aligned} i_{\alpha kc} &= K_p i_{\alpha p k} + K_q i_{\alpha q k} \\ i_{\beta kc} &= K_p i_{\beta p k} + K_q i_{\beta q k} \end{aligned} \quad (\text{III.121})$$

Dans ce cas le courant de la source est :

$$\begin{aligned} i_{\alpha s} &= i_\alpha + i_{\alpha kc} \\ i_{\beta s} &= i_\beta + i_{\beta kc} \end{aligned} \quad (\text{III.122})$$

$K_p, K_q$  représentent le gain du filtre utilisé pour extraire la puissance oscillante. Si  $K_p = K_q$  les composantes harmonique d'ordre  $(k + \sigma + 1)/(k + \sigma - 1)$  des courants seront éliminé. Si  $K_p \neq K_q$  les courant harmonique d'ordre  $(k + \sigma + 1)/(k + \sigma - 1)$  apparient

dans le courant de la source, ces courants n'étaient pas dans le système d'origine, pour cela on les appelle les courants cachés « Hidden currents ».

On remarque que la moitié de la composante d'ordre  $k$  produit la puissance oscillante réelle, qu'est responsable de l'énergie oscillante écoulee entre la source et la charge. L'autre partie ne contribue pas au transfert de l'énergie, il produit uniquement la puissance réactive (imaginaire) oscillante  $\tilde{q}$ .

Dans le processus de filtrage la mauvaise situation est arrivé quant la théorie pq est, utilisé pour compenser la puissance  $\tilde{q}$  seulement ou  $\tilde{p}$  seulement ou une partie de l'une des deux. Dans ce cas la composante harmonique d'ordre  $(k + \sigma + 1)/(k + \sigma - 1)$  « hidden current » des  $i_{\alpha pk}$ ,  $i_{\beta pk}$  ne sont pas éliminés par l'harmonique  $(k + \sigma + 1)/(k + \sigma - 1)$  des  $i_{\alpha qk}$ ,  $i_{\beta qk}$  respectivement. Il est important de noter que dans ce cas, les composantes harmoniques d'ordre  $(k + \sigma + 1)/(k + \sigma - 1)$  sont de la séquence négative/positive, le type des courants cachés sont à des fréquences élevées/basses.

Quand uniquement  $\tilde{q}$  est utilisée pour le filtrage des courants, le courant de la source après compensation va contenir des composantes du courant caché, en principe, il n'est pas possible de dire que ça est mauvais ou bon. Ce qu'on peut vraiment dire, que la puissance imaginaire dans la source est nulle.

Quand uniquement  $\tilde{p}$  est utilisé pour le filtrage du courant, le courant de la source après compensation va contenir les courants cachés, comme dans le cas précédent. L'objectif dans cas est d'éliminer l'énergie due à la puissance oscillante réelle.

Si l'objectif du filtre est d'éliminer partiellement ou tous les composantes harmonique d'ordre  $(k + \sigma + 1)/(k + \sigma - 1)$  sans l'introduction des courants cachés, la puissance réelle et la puissance imaginaire doivent être compensé avec un gain  $K_p = K_q$ .

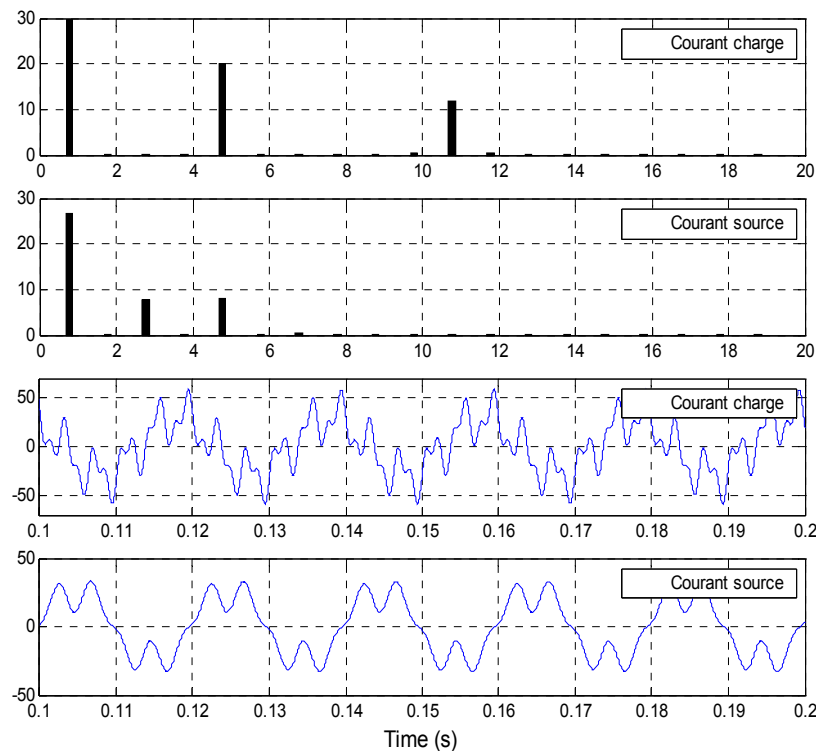


Fig. III.59: Représentation temporelle de la compensation harmonique d'une partie de  $\tilde{p}$  en (A)

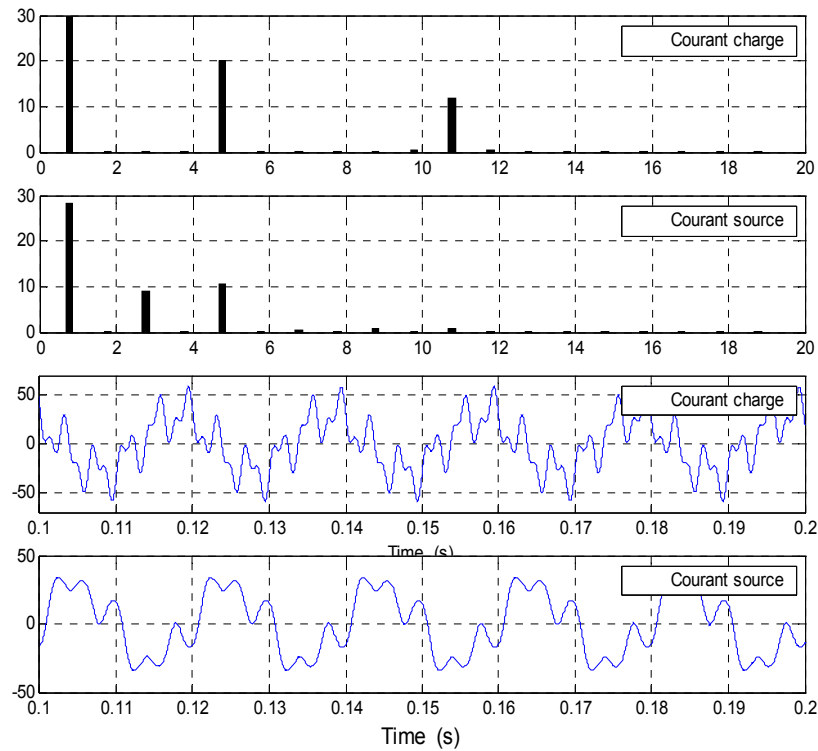


Fig. III.60 : Représentation temporelle de la compensation harmonique d'une partie de  $q$  en (A)

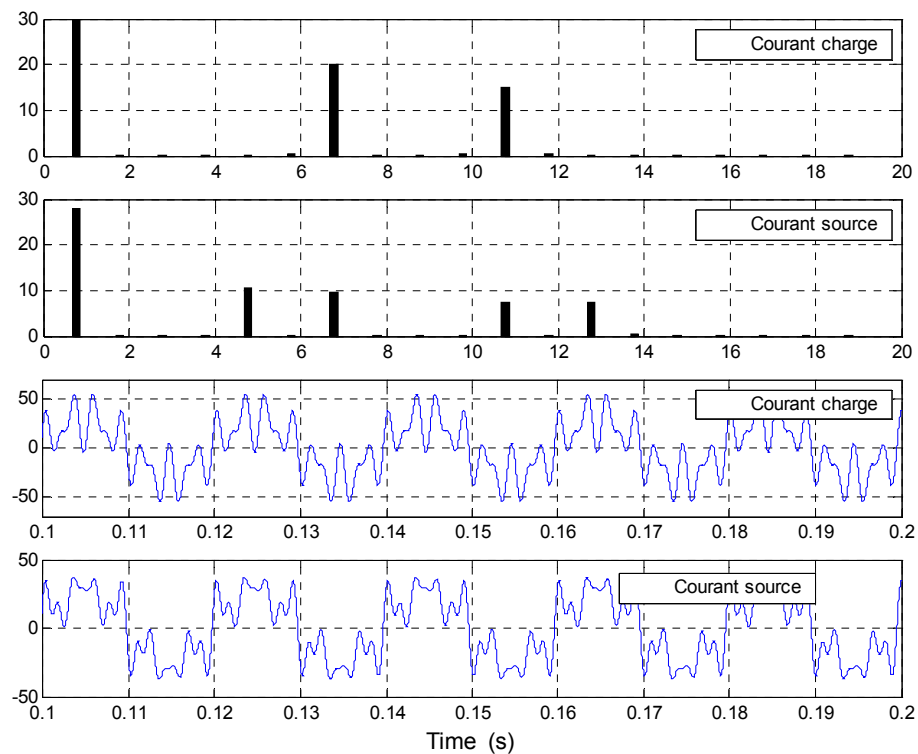


Fig. III.61 : Représentation temporelle de la compensation harmonique de  $\tilde{p}$  en (A)

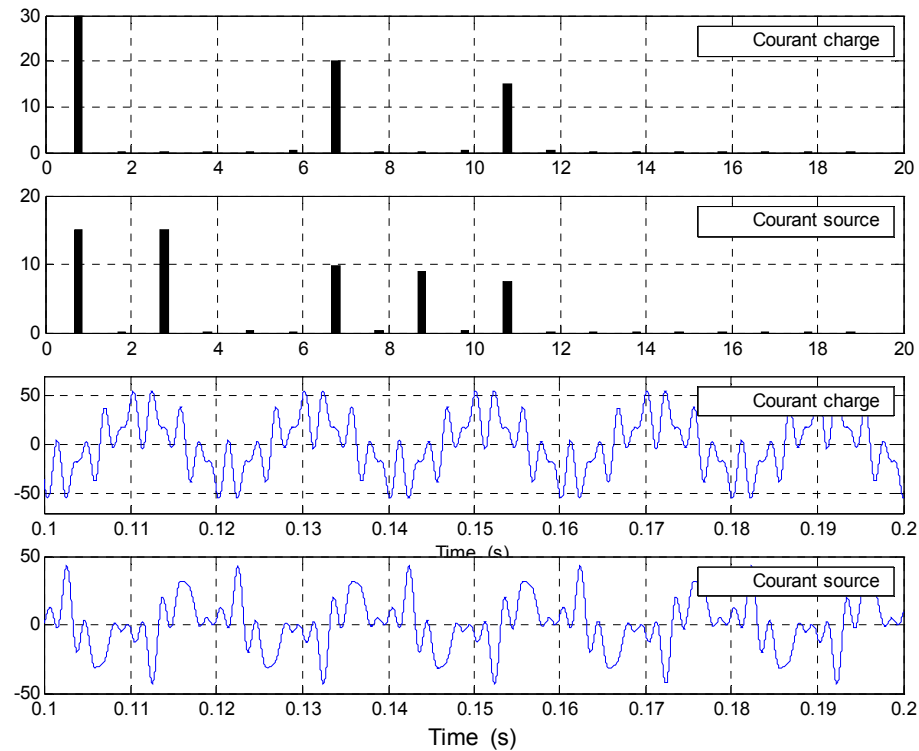


Fig. III.62 : Représentation temporelle de la compensation harmonique de  $q$  en (A)

### III.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présentés le filtre actif parallèle comme un compensateur très efficace contre les différentes perturbations provoquées par les charges polluées, à savoir :

- Les composantes harmoniques injectées par la charge ;
- Les courants réactifs générés par la charge ;
- Le déséquilibre dans les courants de la charge.

Le filtre actif parallèle permet face à ces perturbations d'injecter dans le réseau au PCC les composantes suivantes :

- Les courants harmoniques de la charge en opposition de phase ;
- Les courants réactifs ;
- La composante homopolaire et inverse des courants de la charge.

On a trouvé que le dimensionnement du filtre actif parallèle repose sur l'objectif de compensation. La méthode d'identification utilisée la théorie pq, donne une grande flexibilité et bonne précision avec un temps de réponse relativement très faible. L'inconvénient majeur de cette méthode qu'elle n'était pas adaptée au cas d'une tension déséquilibrée et/ou déformée du réseau.

Pour résoudre ce problème on a proposé l'utilisation d'un système à base de PLL dont le rôle est d'extraire la composante fondamentale de la séquence directe de la tension du réseau, cette composante sera utilisée dans la méthode d'identification pour la détermination des composantes de perturbation.

On a essayé de lever le voile sur un problème existant dans la méthode d'identification, ce sont les courants cachés. Si cette méthode est utilisée pour compenser uniquement la partie oscillante de la puissance active ou la puissance réactive ou une partie de l'une d'eux, on trouve dans le courant de ligne d'autres composantes harmoniques qui n'étaient pas présentes dans le courant de la charge à compenser.

Afin de résoudre le problème du déphasage entre le courant identifié et le courant injecté, qui aura comme conséquence de dégrader la qualité de compensation du filtre actif parallèle, on construit une boucle de régulation dont le rôle est de garder la superposition entre ces deux courants en minimisant le déphasage.

Dans ce chapitre on a présenté le dimensionnement des paramètres du filtre de sortie du filtre actif parallèle dans le but d'atténuer les composantes de haute fréquence qui sont dues principalement à la fréquence de commutation.

Finalement et afin de valider la méthode d'identification proposée pour assurer une bonne compensation du filtre actif parallèle face aux différentes perturbations, plusieurs simulations réalisées sur Simulink/Matlab ont été effectuées. La bonne qualité de compensation des courants harmoniques, le courant de déséquilibre, et la composante réactive ont été observées, même dans les conditions extrêmes de fonctionnement dans les milieux de tensions perturbées. On peut dire que nous avons atteint les objectifs que nous nous étions fixés.

## **C H A P I T R E I V**

### **COMPENSATION DES PERTURBATIONS DES TENSIONS PAR LE FILTRE ACTIF SERIE**



## CHAPITRE IV

### Compensation des perturbations des tensions

#### Filtre Actif Série

##### IV-1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est de contribuer à l'amélioration des performances de compensation des perturbations en tension existant dans la source d'énergie électrique, ou dans le réseau d'alimentation. Cet objectif est assuré à partir d'une structure de filtre actif série.

##### IV-2 Structure générale du filtre actif série

Le filtre actif série est une solution pour protéger les différentes charges sensibles des perturbations de tension du réseau électrique, tels que le déséquilibre, les creux de tension et les harmoniques causées par la déformation de l'onde de tension. D'autre part le filtre actif série empêche les courants harmoniques de s'écouler vers la source. Il s'insère en série entre le réseau perturbé et la charge à protéger par l'intermédiaire d'un transformateur d'injection de tension (voir la section I-3-3-2). On trouve actuellement plusieurs structures de filtre actif série [86,87]. La structure la plus utilisée est présentée sur la Fig. IV.1. Cette structure est composée d'une partie puissance et d'une partie contrôle-commande.

##### IV 2-1 Partie puissance

La partie puissance est constituée d'un onduleur de tension triphasé à commande MLI, d'éléments de stockage d'énergie avec un système d'alimentation *DC*, d'un filtre de sortie de deuxième ordre, et de trois transformateurs monophasés d'injection de tension.

##### IV-2-1-1 Onduleur de tension (VSI)

Comme nous l'avons déjà expliqué dans le Chapitre III, l'onduleur de tension fournit à sa sortie une tension en créneau suivant la référence identifiée par la stratégie de commande. Dans le cas du filtre actif série la source de la tension cotée continue doit être rechargée en permanence par une source autonome. Il n'y a pas d'écoulement de puissance du réseau vers le côté continu comme le cas du filtre actif parallèle. La liaison *DC* – *AC* de l'onduleur exige de respecter certaines règles de fonctionnement [1,80] :

- la source de tension aux bornes de l'onduleur ne doit jamais être court-circuitée, les deux interrupteurs d'un même bras doivent donc avoir deux commandes complémentaires,

- la source de courant côté alternatif ne doit jamais être en circuit ouvert, le courant circulant doit toujours trouver un chemin libre d'où la mise en antiparallèle des diodes avec les interrupteurs.

L'onduleur de tension employé se compose de six interrupteurs repartis, d'une façon symétrique, sur trois bras à interrupteurs commandés à la fermeture et à l'ouverture (IGBT, GTO,IGCT) avec des diodes en antiparallèle Fig. IV.2.

#### IV-2-1-2 Elément de stockage de l'énergie DC

L'élément de stockage d'énergie le plus utilisé du côté continu du filtre actif série est le système de stockage à deux condensateurs avec un point milieu (Cdc1, Cdc2) (Split capacitor). Ces deux parties du condensateur sont complémentaires de telle sorte que la tension mesurée aux bornes du système présente une fluctuation minimale. D'autre par le point milieu est connecte au point commun des trois transformateurs d'injection, ce qui a permet d'avoir trois phases indépendantes du *filtre actif série* fonctionnant comme un demi pont.

Pour avoir une tension stable et maximale en amplitude à la sortie de l'onduleur, il faut que les deux tensions continues aux bornes de chaque demi condensateur  $V_{dc}/2$  soient maintenues dans une plage bien spécifiée autour d'une valeur de référence. Pour cela plusieurs solutions sont envisageables :

- une alimentation *DC* à partir d'un redresseur à diodes, triphasé ou monophasé alimenté par le réseau électrique directement [1,80], chaque condensateur aura la valeur crête de la tension simple du réseau. Ce montage nécessite des valeurs élevées des capacités de stockage pour éviter toutes perturbations éventuelles dans le réseau, toute en restant limité par les contraintes du courant dans les éléments de puissance du redresseur ;
- une alimentation *DC* indépendant à partir des accumulateurs d'énergie. Ils sont utilisés pour alimenter les condensateurs de stockage d'énergie [87]. Cette solution nécessite une batterie d'accumulation de forte énergie. L'inconvénient majeur de ce système est l'instabilité de la tension à cause de la décharge de ce dernier;
- une alimentation *DC* à partir de l'utilisation des super-condensateurs ou des supraconducteurs peut être envisagée [87].
- Une alimentation à partir d'une source d'énergies renouvelables. tel que les cellules solaires et les générateurs éoliens.

Afin d'assure une bonne compensation de tous les types des creux de tension de profondeur  $x\%$  et de durée  $t$ . Le filtre actif série doit fournir, à travers ces condensateurs de stockage, l'énergie donnée par l'expression suivante [1] :

$$\Delta W = \frac{i.P}{3} \cdot \frac{x}{100} \cdot \Delta t \quad (IV.1)$$

Avec  $P$ , la puissance active de la charge à protéger et  $i$  le nombre des phases perturbées.

La variation d'énergie dans un condensateur pendant la compensation du creux de tension est Égale à :

$$\frac{1}{2} \cdot C_{dc} \cdot (V_{dc0}^2 - V_{def}^2) \quad (\text{IV.2})$$

La chute de tension aux bornes de chaque condensateur pendant la période de décharge est :

$$\Delta V_{dc} = V_{dc0} - V_{def} \quad (\text{IV.3})$$

Cette chute de tension, nous a permet de dimensionner la valeur de la capacité. Donc, pour pouvoir compenser un creux de tension de profondeur  $x\%$ , la chute de tension aux bornes de chaque condensateur doit rester inférieure à  $(1-x)\%$ . Cela revient à dire qu'il faut assurer que la tension continue aux bornes du condensateur soit supérieure à la tension de référence (tensions perturbatrices identifiées) [1].

#### IV-2-1-3 Filtre de sortie

Le filtre de sortie du filtre actif série est un filtre passif du deuxième ordre comme le montre la (Fig. IV.2), Ce filtre avec les éléments du transformateur d'injection constitue un filtre passif du troisième ordre comme le filtre de sorite du filtre actif parallèle ( Voir III-2-3-1).

La fonction de transfert de la phase a sans tenir compte des éléments du transformateur est donnée par :

$$G_a(s) = \frac{b_1s + b_0}{a_2s^2 + a_1s + a_0} \quad (\text{IV.4})$$

Avec :

$$\begin{aligned} b_0 &= 1 ; & b_1 &= 0 ; & a_0 &= 1 ; \\ a_1 &= R_f \cdot L_f ; & a_2 &= L_f \cdot C_f ; \end{aligned}$$

La fonction du transfert due aux perturbations est donnée par :

$$G_{ap}(s) = \frac{b_{11}s + b_{10}}{a_2s^2 + a_1s + a_0} \quad (\text{IV.5})$$

Avec :

$$b_{11} = L_f ; \quad b_{10} = R_f$$

Tel que :

$$V_{inja}(s) = G_a(s)V_{sf} + G_{ap}(s)I_{Lf} \quad (\text{IV.6})$$

L'ensemble onduleur et filtre de sortie se comportant comme une source de tension, le filtre de sortie sert d'une part à atténuer les composantes dues aux commutations de l'onduleur, d'autre part à connecter le filtre actif au réseau électrique.

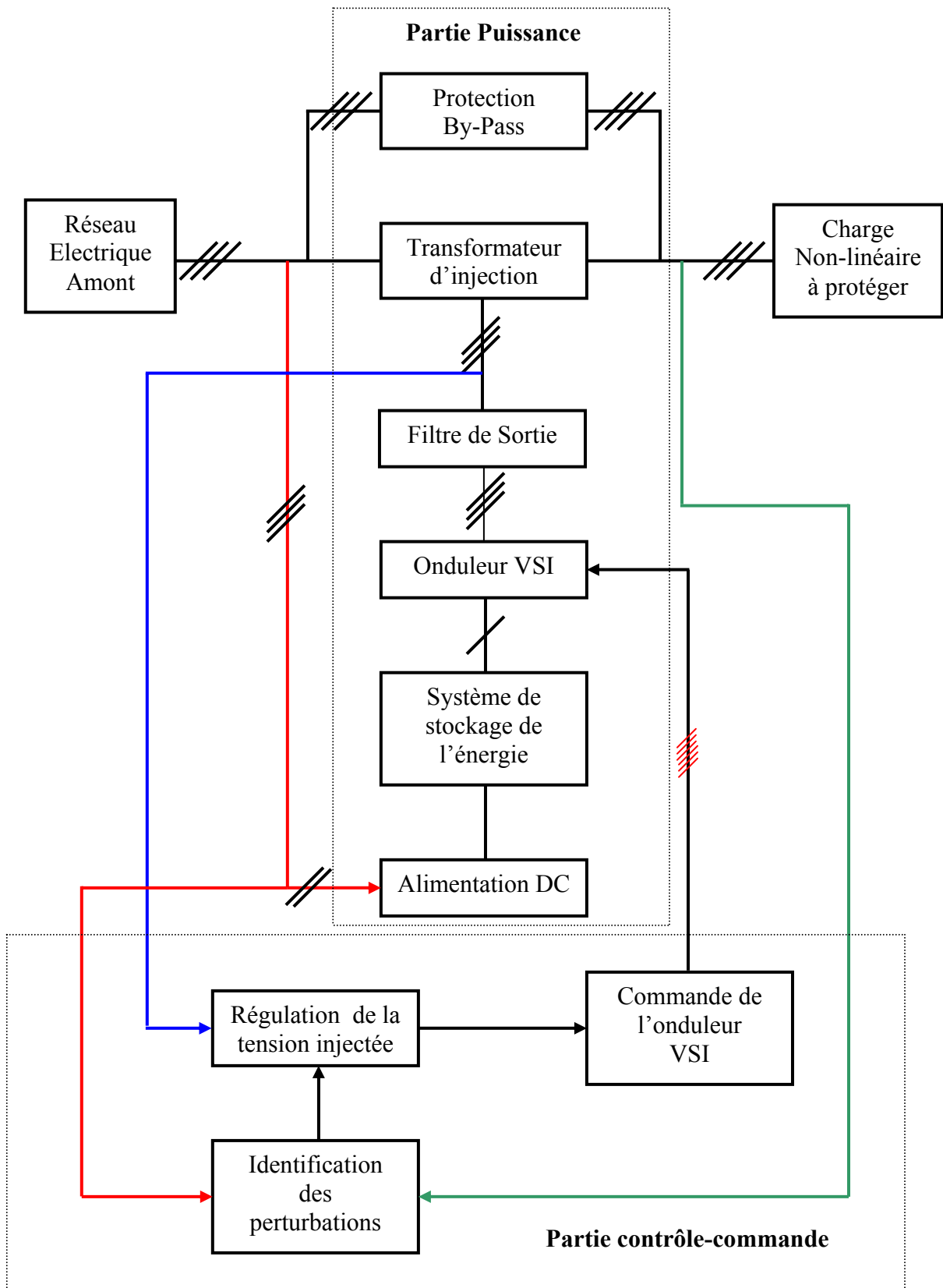


Fig. IV.1 : Structure générale du filtre actif série

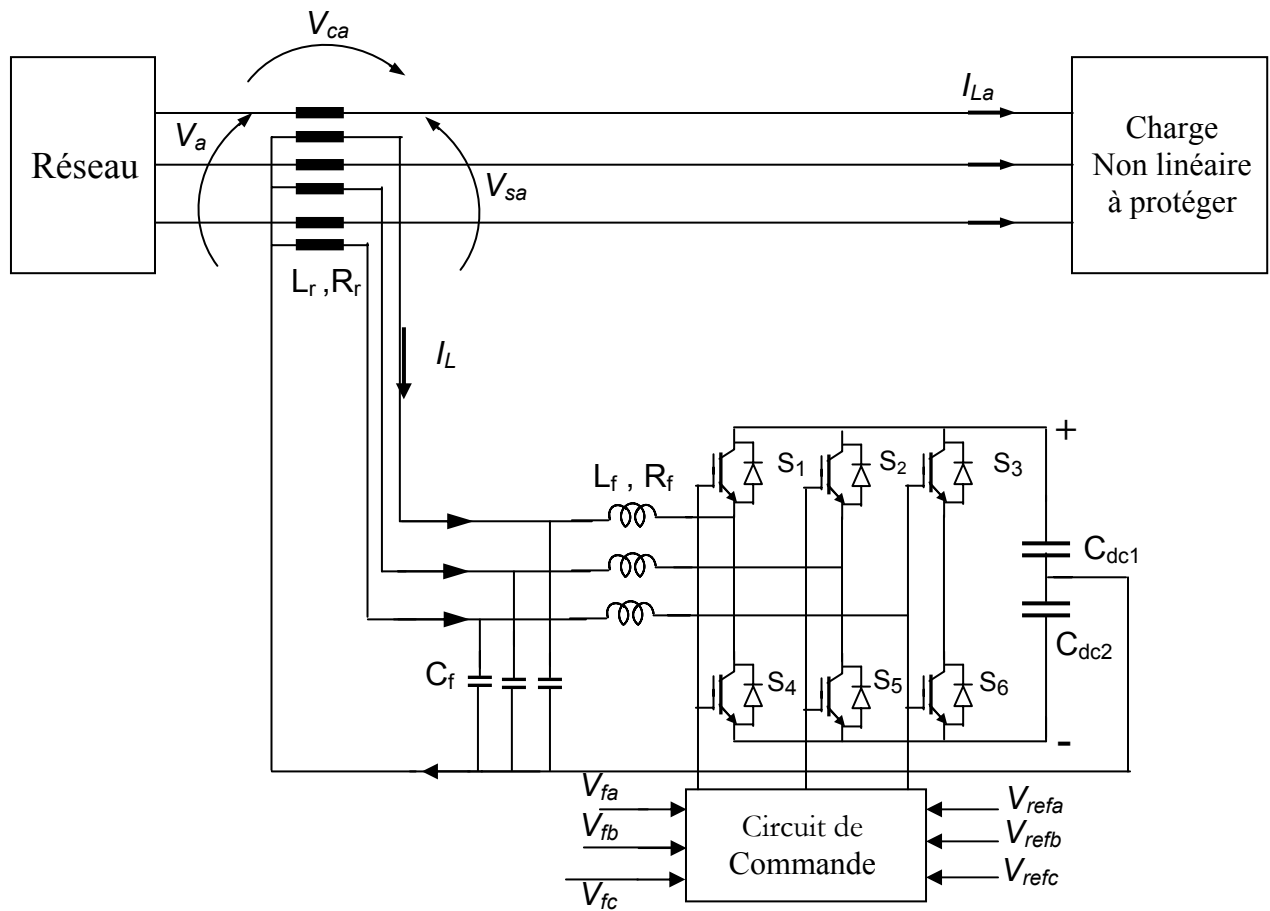


Fig. IV.2 : Partie puissance du filtre actif série

#### IV-2-1-4 Transformateur d'injection

Les transformateurs d'injection de tension permettent d'injecter en série avec le réseau électrique et avec le taux de transformation souhaité la tension produite par l'onduleur, comme le montre la (Fig. IV.2). Ces transformateurs permettent aussi d'isoler la source (réseau électrique en avant) du courant pollué venant de la charge non linéaire. Grâce aux caractéristiques magnétiques de saturation, ces transformateurs contribuent à la protection du *filtre actif série* contre les défauts côté charge, pour les courant de court-circuit en aval côté charge on prévoit un système by-pass, constitué par une impédance variante, par deux thyristors en antiparallèle en série avec une petite résistance, et par des transformateurs à circuit magnétique saturable.

Les inconvénients d'utilisation de ces transformateurs sont leurs coûts élevés et la chute de tension occasionnée par leurs inductances de fuite. Pour surmonter ce problème on peut utiliser trois onduleurs de tension monophasés avec trois sources continues indépendantes. Cette solution augmentant l'énergie nécessaire pour compenser les mêmes creux de tension, un *filtre actif série* avec un onduleur multicellulaire et un seul bus continu a été proposé [1,87].

## IV-2-2 La partie contrôle-commande

Cette partie comporte l'identification des tensions perturbatrices, la régulation des tensions injectées et la commande des interrupteurs de l'onduleur, souvent en MLI, comme le montre la (Fig. IV.1).

### IV-2-2-1 Commande de l'onduleur

L'onduleur de tension est commandé en MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion). Le signal d'entrée  $V_{entrée}$  (modulatrice) est comparé avec un signal triangulaire  $V_p$ , porteuse, à une fréquence déterminée fixant la fréquence de commutation de l'onduleur, comme le montre la (Fig.IV.3).

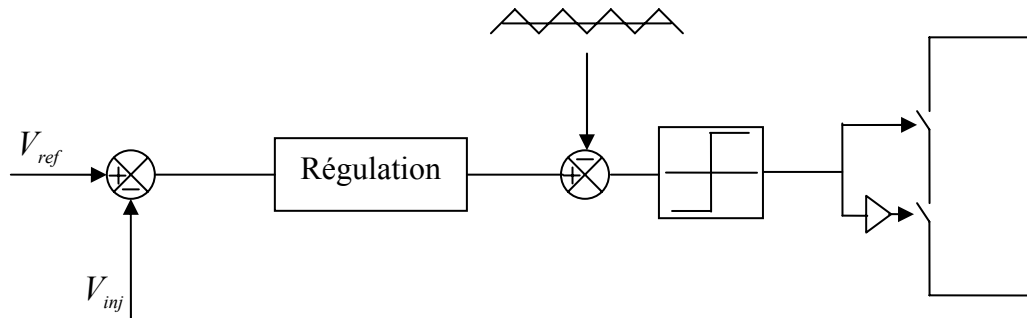


Fig IV.3 : Principe de la commande MLI

### IV-2-2-2 Identification des perturbations

La méthode d'identification sert à calculer les tensions perturbatrices qui sont injectées par l'onduleur, en opposition de phase, pour dépolluer la tension aux bornes de la charge à protéger. Ces tensions perturbatrices représentent les tensions déséquilibrées et harmoniques, et les creux de tension. Plusieurs méthodes d'identification ont déjà été proposées dans la littérature. La plupart des méthodes sont basées sur le calcul des composantes symétriques dans le repère de Park ( $d,q$ ), nécessitant une bonne connaissance du réseau électrique en présence d'harmoniques de tension.

D'autre part, la complexité de ces calculs rend plus difficile leur implantation. C'est pour ces raisons que nous proposons une méthode d'identification des tensions perturbatrices basée sur l'utilisation du système à base de PLL « Boucle à verrouillage de phase » déjà utilisé dans la section (II-4-6) pour la compensation des courant pollués générés par une charge non linéaire. Cette méthode est expliquée en détail dans la section (IV-3).

### IV-2-2-3 Régulation des tensions injectées

Après avoir identifié les tensions perturbatrices et afin d'assurer une injection rapide, précise et robuste de ces tensions, plusieurs méthodes de régulation de la tension de sortie de l'onduleur ont été proposées dans la littérature.

La commande PWM en tension doit permettre au filtre actif série de générer une tension non sinusoïdale, selon les références  $V_{refa}$ ,  $V_{refb}$  et  $V_{refc}$ , qui puissent varier largement en fréquence

et en amplitude. La technique conventionnelle PWM – sinusoïdal peut être n'est pas suffisante à cause de l'atténuation inhérente d'amplitude [80], en plus, le filtre de sortie du filtre actif série dans le coté AC du convertisseur provoque un déplacement de phase dans les tensions de compensation  $V_{fa}$ ,  $V_{fb}$  et  $V_{fc}$ . Pour cela on utilise un boucle de régulation avec chaîne de retour, en utilisant les valeurs actuelles  $V_{fa}$ ,  $V_{fb}$  et  $V_{fc}$  pour minimiser la déviation entre les valeurs de références et les valeurs actuelles selon la Fig IV.4:

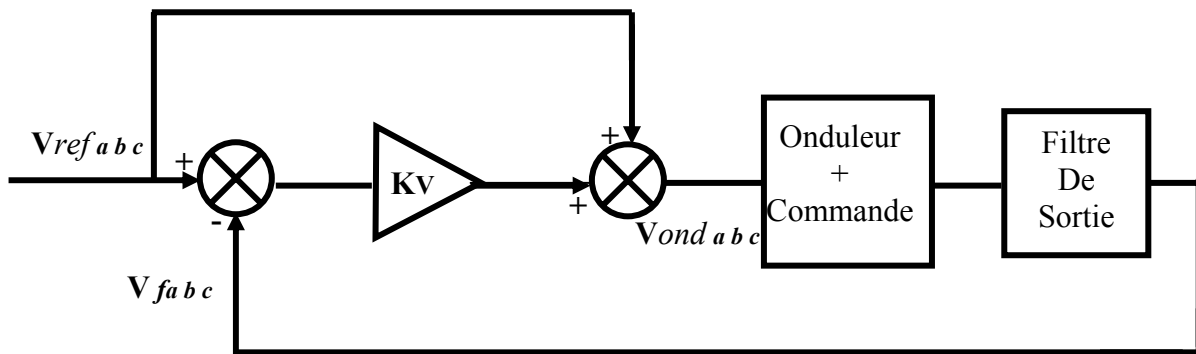


Fig. IV.4 : Boucle de régulation de la tension injectée

Le gain  $K_v$  multiplie l'erreur entre la référence et la valeur actuelle, on le prend le plus grand que possible, avec la considération que les nouvelles valeurs de référence données par la commande PWM – sinusoïdal sont calculées par les expressions suivantes :

$$\begin{aligned} V_{onda} &= V_{ca}^* + K_v \cdot (V_{ca}^* - V_{fa}) \\ V_{ondb} &= V_{cb}^* + K_v \cdot (V_{cb}^* - V_{fb}) \\ V_{ondc} &= V_{cc}^* + K_v \cdot (V_{cc}^* - V_{fc}) \end{aligned} \quad (IV.7)$$

Cette valeur ne doit pas dépasser l'amplitude de l'onde triangulaire de la porteuse. (Fig.IV.3) Compensation des perturbations par le filtre actif série

### IV-3 Compensation des perturbations de tension par le filtre actif série

#### IV-3-1 Principe de compensation du FAS

Le but principal du Filtre actif série, qu'on propose, est la compensation des harmoniques et les déséquilibres existant dans la tension du réseau, d'autre part le FAS doit compenser toutes les anomalies dans chaque phase et qui ne fait pas partie de la composante fondamentale de la séquence positive de la tension du réseau. Les tensions conventionnelles de (Fig.IV.2) permettent d'écrire la relation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{ca} \\ V_{cb} \\ V_{cc} \end{bmatrix} \quad (\text{IV.8})$$

Où dans le cas général :

$$V_k = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} V_{kn} \sin(\omega n t + \varphi_{kn}) \quad k = a, b, c \quad (\text{IV.9})$$

Les composantes de la tension qui ne correspondent pas à la composante fondamentale du séquence positive et qui doivent être compensées peuvent être calculer par :

$$\begin{bmatrix} V_{ca}^* \\ V_{cb}^* \\ V_{cc}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{saf+} \\ V_{sbf+} \\ V_{scf+} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (\text{IV.10})$$

$V_{saf+}$ ,  $V_{sbf+}$  et  $V_{scf+}$  sont les valeurs instantanées du fondamentale de la composante directe des tension  $V_{sa}$ ,  $V_{sb}$ ,  $V_{sc}$ , ces tension peuvent être obtenues à l'aide d'un circuit PLL.

Il est à noter que par cette approche,  $V_{ca}^*$ ,  $V_{cb}^*$  et  $V_{cc}^*$  sont utilisées comme des tensions de référence), le filtre actif série ne compense pas la puissance réactive ( $\bar{q}$ ) due à la composante fondamentale. Si nous voulons la compensation de cette composante, les tension  $V_{saf+}$ ,  $V_{sbf+}$  et  $V_{scf+}$  doivent être décomposées à ces composantes actives et réactives, les composantes réactive sont alors ajoutées aux tensions  $V_{ca}^*$ ,  $V_{cb}^*$  et  $V_{cc}^*$ .

### IV-3-2 La stratégie de commande du filtre actif série

On peut mettre en application un algorithme de commande très intéressant pour l'atténuation du phénomène de résonance et l'assurance de la stabilité du système représentant le filtre actif série. L'idée de base consiste en l'addition d'une résistance série pour les courants harmoniques qui s'écoulent de la source vers la charge [87] sans affecter le courant fondamental qui circule dans le filtre actif série.

Une caractéristique nécessaire et importante de cette algorithme de contrôle est la nécessité d'une source d'énergie dans la partie DC du FAS, pour qu'il puisse se comporte comme une résistance harmonique série. Cet inconvénient est automatiquement résolu si on utilise un système combiné d'un filtre actif série et filtre actif parallèle. Le filtre actif parallèle sert à maintenir la tension aux bornes de la partie DC autour d'une valeur de référence, en absorbant du réseau l'énergie nécessaire. Dans cet algorithme les courants de ligne  $I_{sa}$ ,  $I_{sb}$  et  $I_{sc}$  à travers le filtre actif série sont mesurés, puis ces composantes harmoniques  $I_{ha}$ ,  $I_{hb}$  et  $I_{hc}$  sont calculées (Fig.IV.5). On utilise un circuit PLL pour extraire la composante fondamentale de la séquence



positive, qui sera utilisée dans la suite du calcul de cet algorithme. Les tension et les courants sont transformés en  $V_{s\alpha+}$ ,  $V_{s\beta+}$ ,  $I_{s\alpha+}$  et  $I_{s\beta+}$ , si le système des courants n'est pas équilibré on aura aussi la composante  $I_{s0}$ .

$$\begin{bmatrix} I_{s\alpha} \\ I_{s\beta} \\ I_{s0} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} \quad (IV.11)$$

Les composantes  $p_h$  et  $q_h$  :

$$\begin{bmatrix} p_h \\ q_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{\alpha f+} & V_{\beta f+} \\ -V_{\beta f+} & V_{\alpha f+} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{s\alpha} \\ I_{s\beta} \end{bmatrix} \quad (IV.12)$$

Tel que :

$$\begin{cases} p_h = \bar{p}_h + \tilde{p}_h \\ q_h = \bar{q}_h + \tilde{q}_h \end{cases} \quad (IV.13)$$

On a déjà expliqué ces termes des puissances dans le cas du régime non sinusoïdal (II.3). On peut extraire les composantes oscillantes  $p_h$  et  $q_h$  par l'utilisation d'un filtre passe haut avec une fréquence de coupure aussi basse que possible afin que  $\tilde{p}_h$  et  $\tilde{q}_h$  contiennent toutes les harmoniques et le déséquilibre en courant due à la composante fondamentale de la séquence négative ( $I_{sf-}$ ), qui génère des puissances oscillantes  $p_h$  et  $q_h$  à la fréquence double (100 Hz), pour cela on utilise un filtre passe-bas de Butterworth de 4<sup>ème</sup> ordre avec une fréquence de coupure égale à 50 Hz. Après filtrage on calcule les composantes  $I_{h\alpha}$  et  $I_{h\beta}$  par :

$$\begin{bmatrix} I_{h\alpha} \\ I_{h\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{V_{\alpha f+}^2 + V_{\beta f+}^2} \begin{bmatrix} V_{\alpha f+} & -V_{\beta f+} \\ V_{\beta f+} & V_{\alpha f+} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\tilde{p}_h \\ -\tilde{q}_h \end{bmatrix} \quad (IV.14)$$

D'ou les courant de référence :

$$\begin{bmatrix} I_{ha} \\ I_{hb} \\ I_{hc} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -I_{h0} \\ I_{h\alpha} \\ I_{h\beta} \end{bmatrix} \quad (IV.15)$$

Ces courants sont multipliés par un coefficient  $K_r$  représentant la résistance harmonique série fictive, pour produire les tensions de références  $V_{ha}$ ,  $V_{hb}$  et  $V_{hc}$  :

$$\begin{bmatrix} V_{ha} \\ V_{hb} \\ V_{hc} \end{bmatrix} = K_r \begin{bmatrix} I_{ha} \\ I_{hb} \\ I_{hc} \end{bmatrix} \quad (IV.16)$$

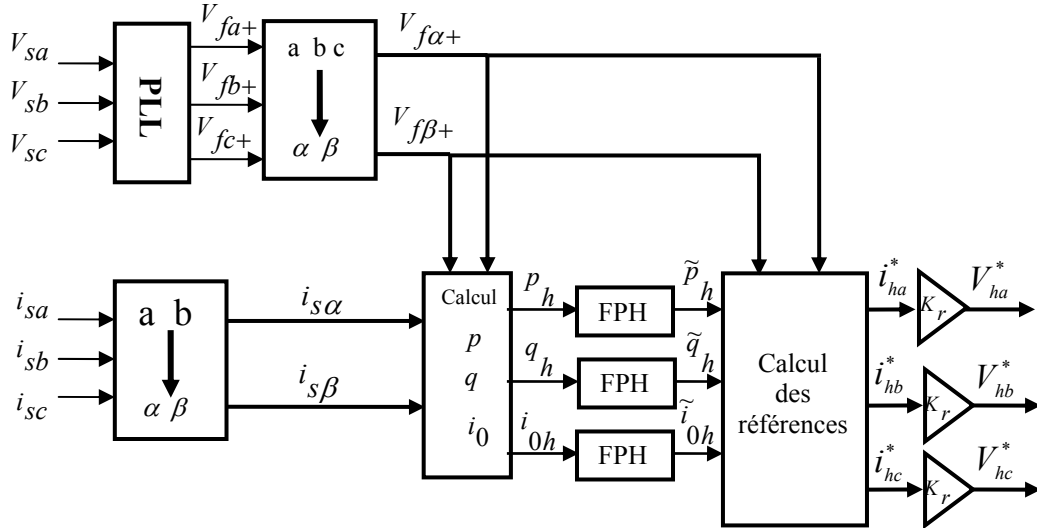


Fig. IV.5 : Schéma block de la compensation des courant harmoniques générés par la charge

Les tensions obtenues  $V_{ha}$ ,  $V_{hb}$  et  $V_{hc}$  sont ajoutées aux tensions  $V_{ca}^*$ ,  $V_{cb}^*$  et  $V_{cc}^*$  pour former les tensions de compensation.

$$\begin{bmatrix} V_{refa} \\ V_{refb} \\ V_{refc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{ca}^* \\ V_{cb}^* \\ V_{cc}^* \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{ha} \\ V_{hb} \\ V_{hc} \end{bmatrix} \quad (IV.17)$$

Les nouvelles tensions de références dans [IV.17] forcent le filtre actif série de compenser toutes les harmoniques et les déséquilibres de tension qui se trouvent dans les tensions  $V_{sa}$ ,  $V_{sb}$ ,  $V_{sc}$ .

Pour avoir une compensation complète des tensions, on doit ajouter une composante directe afin que les tensions appliquées aux bornes de la charge après compensation soient égales aux tensions normalisées. Cette composante est une tension de réglage calculée de la manière suivante :

$$\begin{bmatrix} V_{rega} \\ V_{regb} \\ V_{regc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{norma} \\ V_{normb} \\ V_{normc} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_{fa+} \\ V_{fb+} \\ V_{fc+} \end{bmatrix} \quad (IV.18)$$

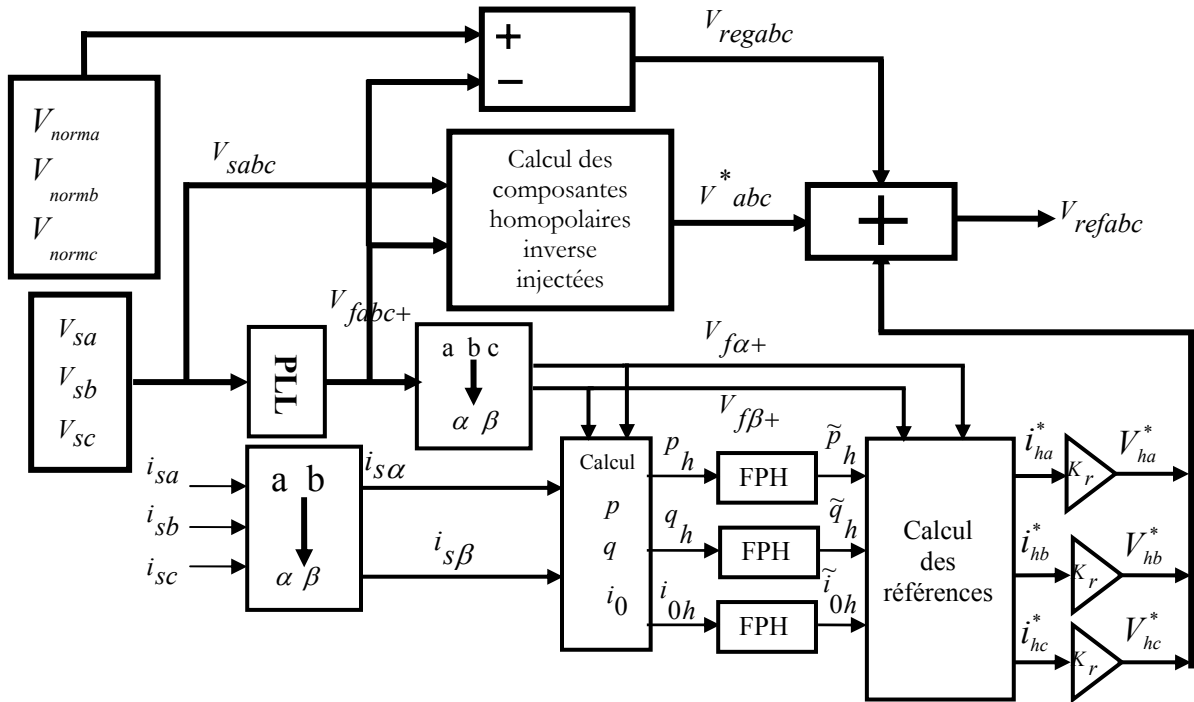


Fig. IV.6 : Compensation des perturbation en tensions et courants sur la tension au PCC

#### IV.4 Puissance apparente du filtre actif série

Pour évaluer la puissance apparente du filtre actif série, on va étudier les composantes de tension perturbatrices injectées. Afin d'atteindre cet objectif on propose d'étudier un cas généralisé de déséquilibre de tensions du réseau.

Un système de tension à déséquilibre triphasé peut être représenté par :

$$\begin{aligned} V_{sa} &= k_1 V_m \cos(\omega t + \gamma_1) \\ V_{sb} &= k_2 V_m \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \gamma_2\right) \\ V_{sc} &= k_3 V_m \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \gamma_3\right) \end{aligned} \quad (IV.19)$$

Ou sous la forme suivante :

$$\begin{aligned}
 V_{sa} &= k_1 V_m e^{j(\omega t + \gamma_1)} = k_1 V e^{j\gamma_1} \\
 V_{sb} &= k_2 V_m e^{j\left(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \gamma_2\right)} = a^2 k_2 V e^{j\gamma_2} \\
 V_{sc} &= k_3 V_m e^{j\left(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \gamma_3\right)} = a k_3 V e^{j\gamma_3}
 \end{aligned} \tag{IV.19}$$

Les composantes symétriques sont obtenues à partir de la relation suivante :

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_+ \\ V_- \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} \tag{IV.20}$$

On obtient :

$$\begin{aligned}
 V_0 &= \frac{V}{3} \cdot [k_1 e^{j\gamma_1} + a^2 k_2 e^{j\gamma_2} + a k_3 e^{j\gamma_3}] \\
 V_+ &= \frac{V}{3} \cdot [k_1 e^{j\gamma_1} + k_2 e^{j\gamma_2} + k_3 e^{j\gamma_3}] \\
 V_- &= \frac{V}{3} \cdot [k_1 e^{j\gamma_1} + a k_2 e^{j\gamma_2} + a^2 k_3 e^{j\gamma_3}]
 \end{aligned} \tag{IV.21}$$

Ou sous la forme trigonométrique suivantes :

$$\begin{aligned}
 V_0 &= \frac{V}{3} \left[ \left( k_1 \cos \gamma_1 - \frac{k_2}{2} \cos \gamma_2 - \frac{k_3}{2} \cos \gamma_3 + \frac{\sqrt{3}}{2} k_2 \sin \gamma_2 - \frac{\sqrt{3}}{2} k_3 \sin \gamma_3 \right) + \right. \\
 &\quad \left. + j \left( k_1 \sin \gamma_1 - \frac{k_2}{2} \sin \gamma_2 - \frac{k_3}{2} \sin \gamma_3 - \frac{\sqrt{3}}{2} k_2 \cos \gamma_2 + \frac{\sqrt{3}}{2} k_3 \cos \gamma_3 \right) \right] \tag{IV.22}
 \end{aligned}$$

$$V_+ = \frac{V}{3} [(k_1 \cos \gamma_1 + k_2 \cos \gamma_2 + k_3 \cos \gamma_3) + j(k_1 \sin \gamma_1 + k_2 \sin \gamma_2 + k_3 \sin \gamma_3)] \tag{IV.23}$$

$$\begin{aligned}
 V_- &= \frac{V}{3} \left[ \left( k_1 \cos \gamma_1 - \frac{k_2}{2} \cos \gamma_2 - \frac{k_3}{2} \cos \gamma_3 - \frac{\sqrt{3}}{2} k_2 \sin \gamma_2 + \frac{\sqrt{3}}{2} k_3 \sin \gamma_3 \right) + \right. \\
 &\quad \left. + j \left( k_1 \sin \gamma_1 - \frac{k_2}{2} \sin \gamma_2 - \frac{k_3}{2} \sin \gamma_3 + \frac{\sqrt{3}}{2} k_2 \cos \gamma_2 - \frac{\sqrt{3}}{2} k_3 \cos \gamma_3 \right) \right] \tag{IV.24}
 \end{aligned}$$

Des auteurs proposent de calculer les tensions de références nécessaires pour dépolluer la tension de la source des composantes inverse et homopolaire, la transformation inverse des composantes symétrique est exprimée de la manière suivante :

$$\begin{bmatrix} V_{refa} \\ V_{refb} \\ V_{refc} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -V_0 \\ 0 \\ -V_- \end{bmatrix} = -\frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & 1+a^2 & 1+a \\ 1+a & 2 & 1+a^2 \\ 1+a^2 & 1+a & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{IV.25})$$

Généralement on a trois cas de déséquilibre :

Cas 1 : Déséquilibre monophasé

$$\begin{aligned} k_1 = k \quad , k_2 = k_3 = 1 ; \\ \gamma_1 = \gamma \quad , \gamma_2 = \gamma_3 = 0. \end{aligned}$$

On obtient :

$$V_+ = \frac{V}{3} (k \cos \gamma + 2 + jk \sin \gamma) \quad (\text{IV.26})$$

$$V_- = V_0 = \frac{V}{3} (k \cos \gamma - 1 + jk \sin \gamma) \quad (\text{IV.27})$$

Cas 2 : Déséquilibre biphasé

$$\begin{aligned} k_1 = k_2 = k \quad , k_3 = 1 ; \\ \gamma_1 = \gamma_2 = \gamma \quad , \gamma_3 = 0. \end{aligned}$$

On obtient :

$$V_+ = \frac{V}{3} (2k \cos \gamma + 1 + j2k \sin \gamma) \quad (\text{IV.28})$$

$$V_0 = \frac{V}{3} \left[ \left( \frac{k}{2} \cos \gamma - \frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2} k \sin \gamma \right) + j \left( \frac{k}{2} \sin \gamma - \frac{\sqrt{3}}{2} k \cos \gamma + \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \right] \quad (\text{IV.29})$$

$$V_- = \frac{V}{3} \left[ \left( \frac{k}{2} \cos \gamma - \frac{1}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2} k \sin \gamma \right) + j \left( \frac{k}{2} \sin \gamma + \frac{\sqrt{3}}{2} k \cos \gamma - \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \right] \quad (\text{IV.30})$$

Cas 3 : Déséquilibre triphasé

$$\begin{aligned} k_1 = k_2 = k_3 = k & \quad ; \\ \gamma_1 = \gamma_2 = \gamma_3 = \gamma & \end{aligned}$$

On obtient :

$$V_+ = kV(\cos \gamma + j \sin \gamma) \quad (\text{IV.31})$$

$$V_- = V_0 = 0 \quad (\text{IV.32})$$

#### IV.4.1 Calcul du rapport de la puissance apparent du filtre actif série

La puissance apparente du filtre actif série est composée de quatre puissances apparentes :

- Puissance apparente de la composante directe

$$S_d = 3 (V_{reg}) I_L = 3 (\overset{V}{V}_{dés} - \overset{V}{V}_d) I_L \quad (\text{IV.33})$$

- Puissance apparente de la composante inverse

$$S_{fi} = 3 V_- I_L \quad (\text{IV.34})$$

- Puissance apparente de la composant homopolaire

$$S_{f0} = 3 V_0 I_L \quad (\text{IV.35})$$

- Puissance apparente des harmoniques de la charge

$$S_{fh} = K_r (V_{ha} + V_{hb} + V_{hc}) I_L = K_r V_h I_L \quad (\text{IV.36})$$

La puissance apparente du filtre est :

$$S_f = \sqrt{S_{fd}^2 + S_{fi}^2 + S_{f0}^2 + S_{fh}^2} \quad (\text{IV.37})$$

En pratique on ne tient pas compte de la puissance apparente des harmoniques de la charge. Donc on peut écrire la puissance apparent avec l'expression suivante :

$$S_f = \sqrt{S_{fd}^2 + S_{fi}^2 + S_{f0}^2} \quad (\text{IV.38})$$

Le rapport de la puissance apparent du filtre actif série par rapport de la puissance apparent de la charge donne :

$$Rap = \frac{S_f}{S_{ch}} = \sqrt{\frac{S_{fd}^2 + S_{f-}^2 + S_{f0}^2}{S_{ch}^2}} \quad (IV.39)$$

D'où :

$$Rap = \frac{S_f}{S_{ch}} = \sqrt{\left(1 - \frac{V_+}{V_L}\right)^2 + \left(\frac{V_-}{V_L}\right)^2 + \left(\frac{V_0}{V_L}\right)^2} \quad (IV.40)$$

Le rapport est calculé suivant le cas de déséquilibre.

#### IV.4.2 Rapport des puissance apparentes : Cas1 Déséquilibre monophasé

$$Rap_1 = \sqrt{\left(1 - \frac{V_+}{V_L}\right)^2 + \left(\frac{V_-}{V_L}\right)^2 + \left(\frac{V_0}{V_L}\right)^2} \quad (IV.41)$$

$$Rap_1 = \frac{1}{3} \sqrt{(15 + 3k^2 - 6\sqrt{k^2 + 4 + 4k \cos \gamma})} \quad (IV.42)$$

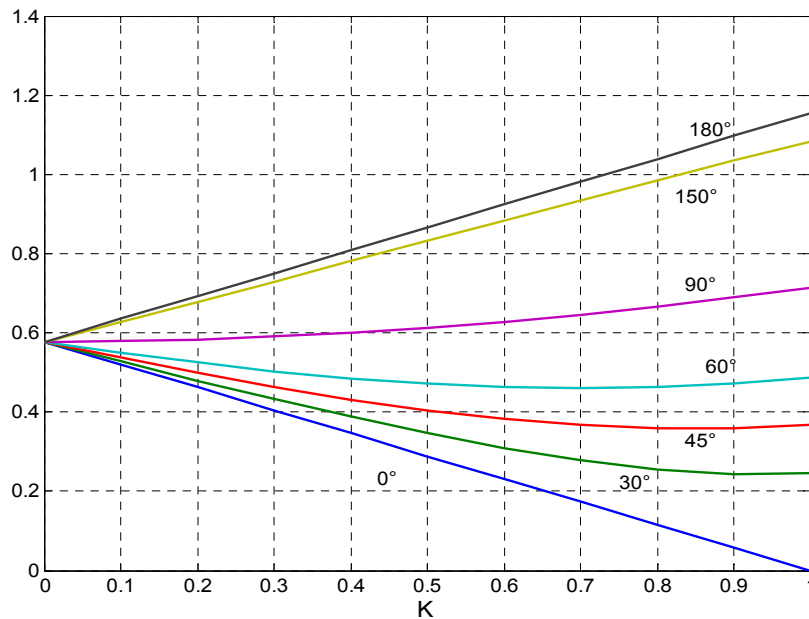


Fig.IV.7 : Rapport des puissances apparente pour le déséquilibre monophasé

IV.4.3 Rapport des puissances : Cas2 Déséquilibre biphasé :

$$Rap_2 = \sqrt{\left(1 - \frac{V_+}{V_L}\right)^2 + \left(\frac{V_-}{V_L}\right)^2 + \left(\frac{V_0}{V_L}\right)^2} \tag{IV.43}$$

$$Rap_2 = \frac{1}{3} \sqrt{(12 + 6k^2 - 6\sqrt{4k^2 + 1 + 4k \cos \gamma})} \tag{IV.44}$$

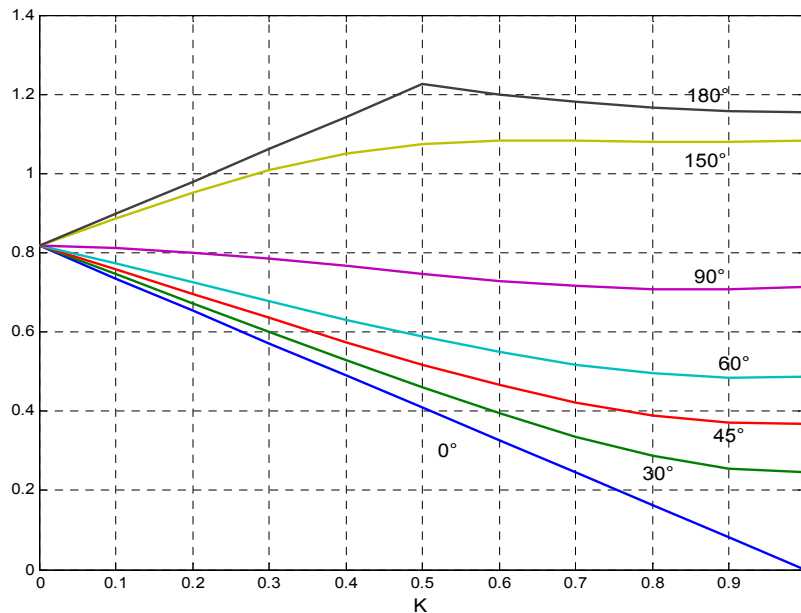


Fig. IV.8 : Rapport de la puissance apparente, cas de déséquilibre biphasé

$$Rap_3 = \frac{1}{3} \sqrt{(15 + 3k^2 - 6\sqrt{k^2 + 4 + 4k \cos \gamma})} \tag{IV.45}$$

IV.4.5 Rapport des puissances : Cas 3 Déséquilibre triphasé

$$Rap_3 = \sqrt{\left(1 - \frac{V_+}{V_L}\right)^2} = 1 - k \tag{IV.46}$$



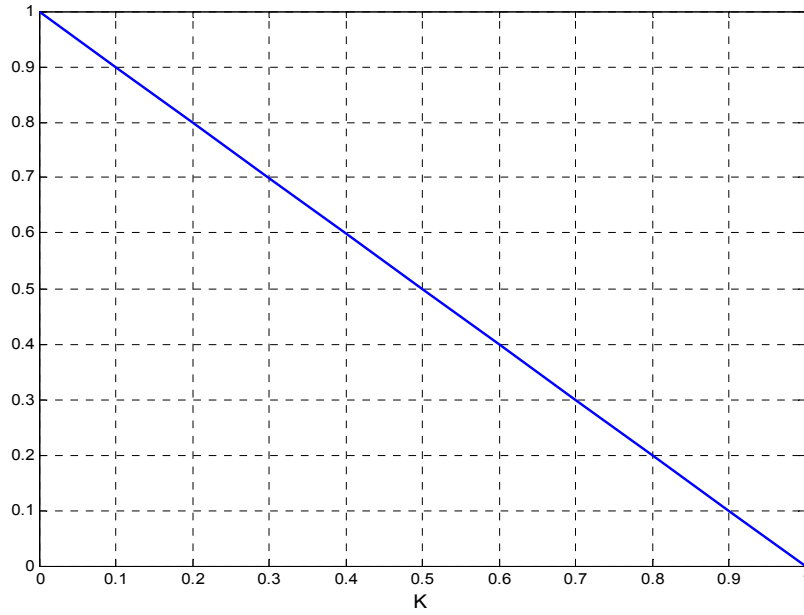


Fig. IV.9 : Rapport de la puissance apparente cas de déséquilibre triphasé

### IV.5 Résultats de simulation

Dans l'objectif de valider la stratégie de commande utilisée, on présente ici deux cas généraux de perturbation des tensions.

#### IV.5.1 Cas des tensions déséquilibrées

Dans ce cas  $k_1, k_2, k_3$  ne sont pas égaux.

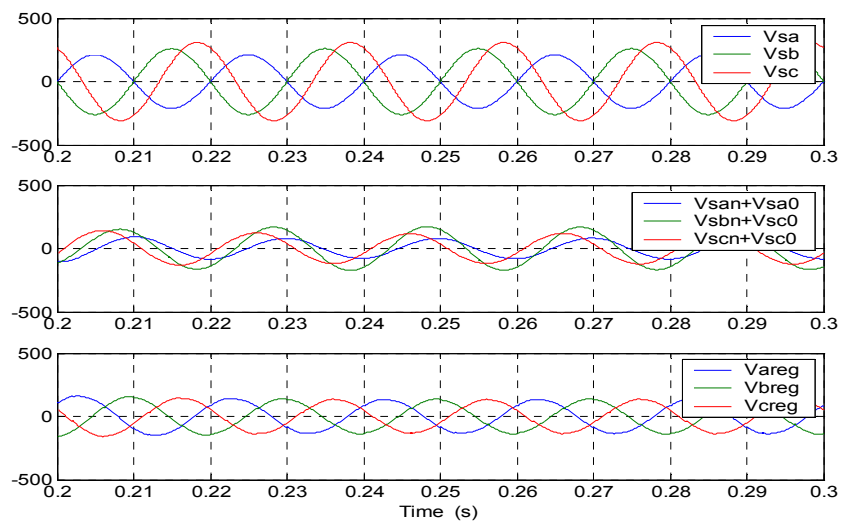


Fig. IV.10 : Présentation temporelle des tensions : du réseau, perturbatrices et de réglages en (V)

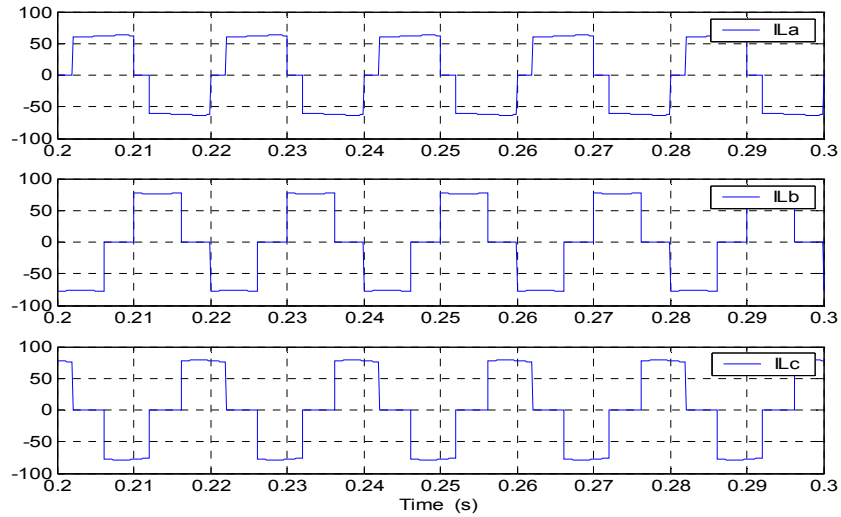


Fig. IV.11 : Les courants générés par la charge non linéaire en (A)

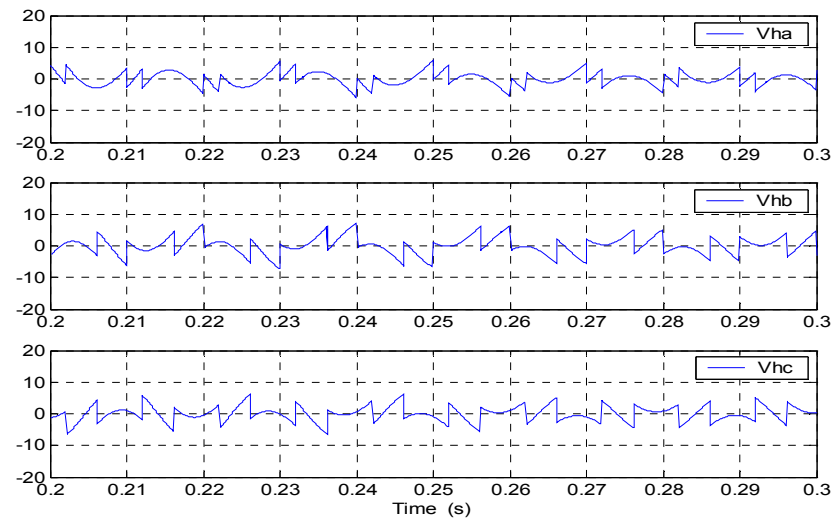


Fig. IV.12 : Les tensions de références en (V)

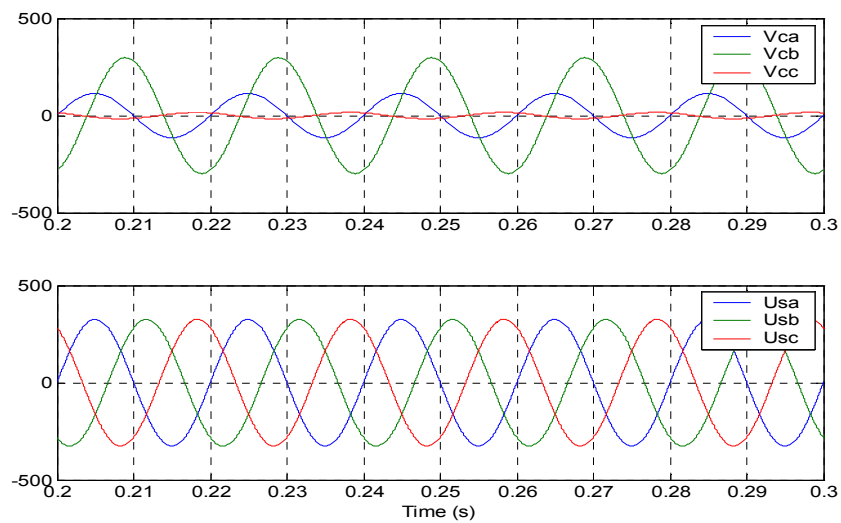


Fig. IV.13 : Les tensions de compensation et les tensions du réseau après compensation en (V)

### IV.5.2 Cas des tensions polluées et déséquilibrées

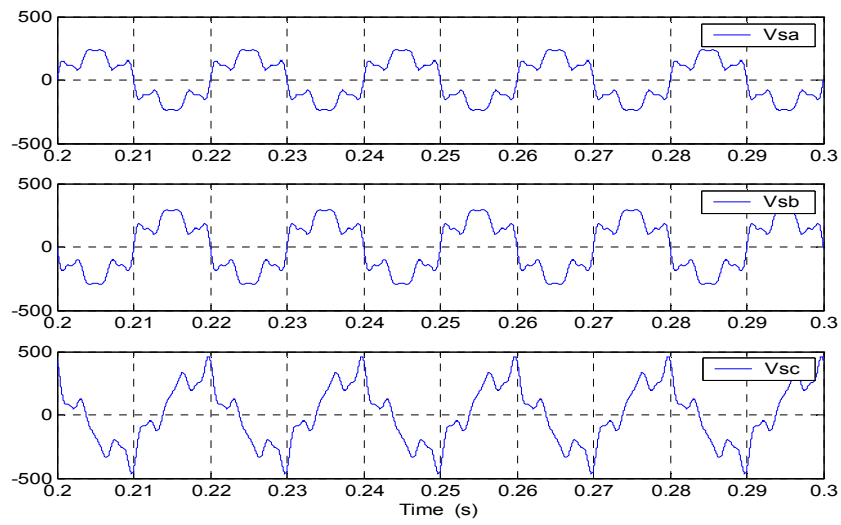


Fig. IV.14 : Les tensions du réseau en (V)

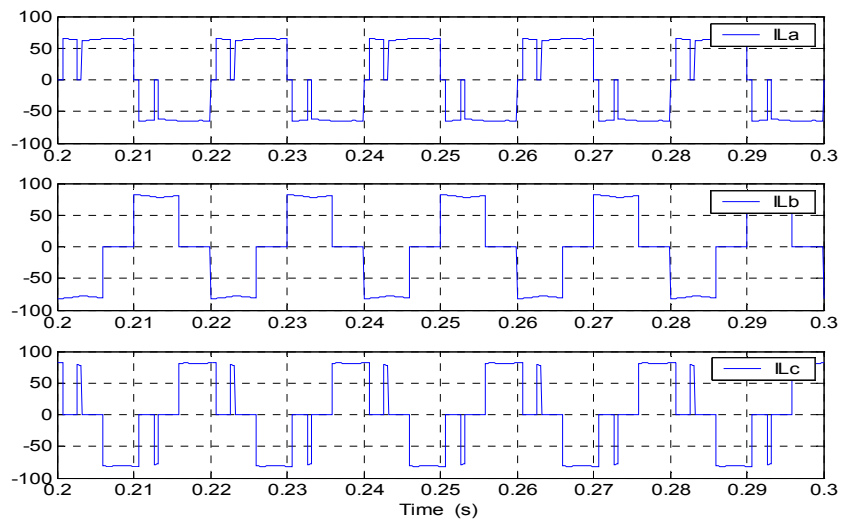


Fig. IV.15 : Les courants de la charge en (A)

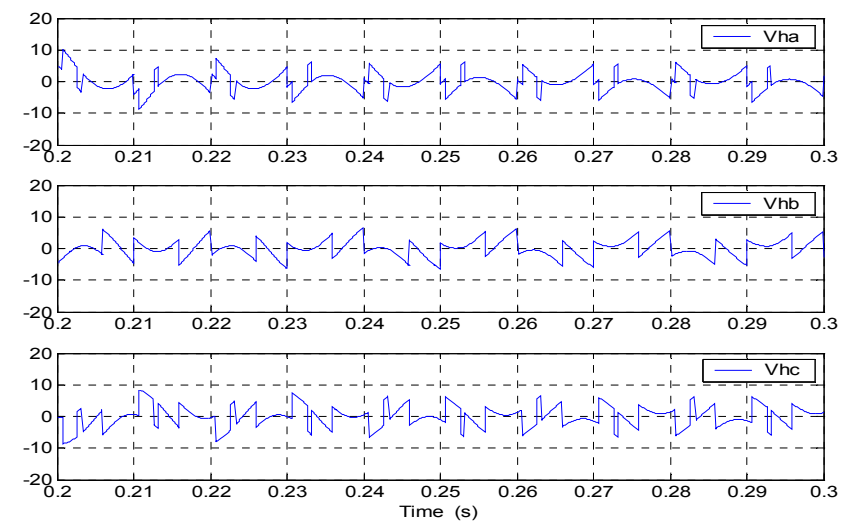


Fig. IV.16 : Les tensions de référence en (V)

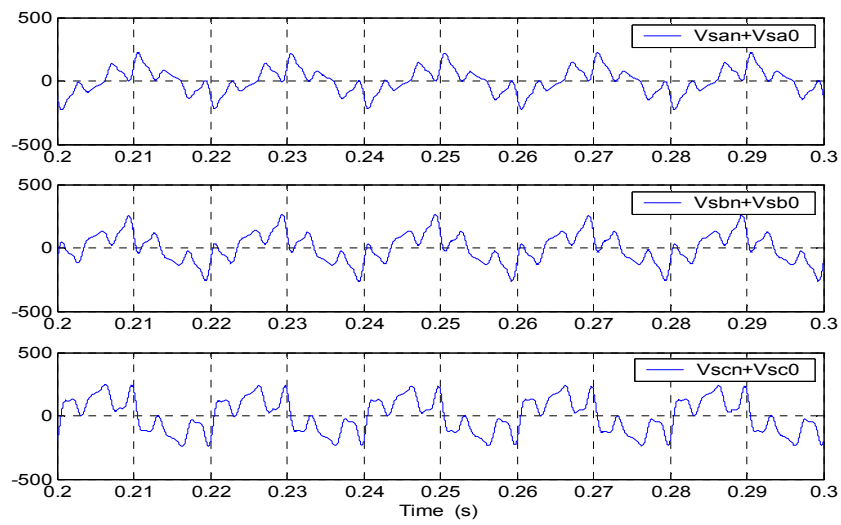


Fig. IV.17 : Les tensions perturbatrices en (V)

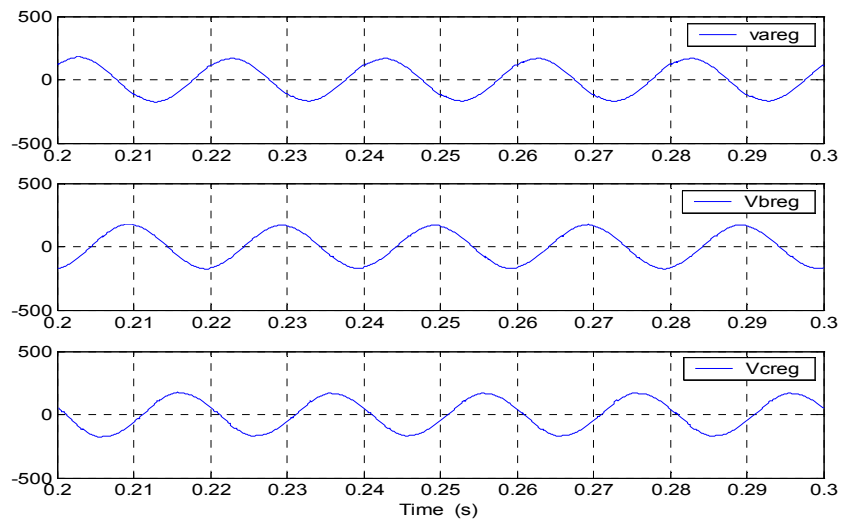


Fig. IV.18 : Les tensions de réglages en (V)

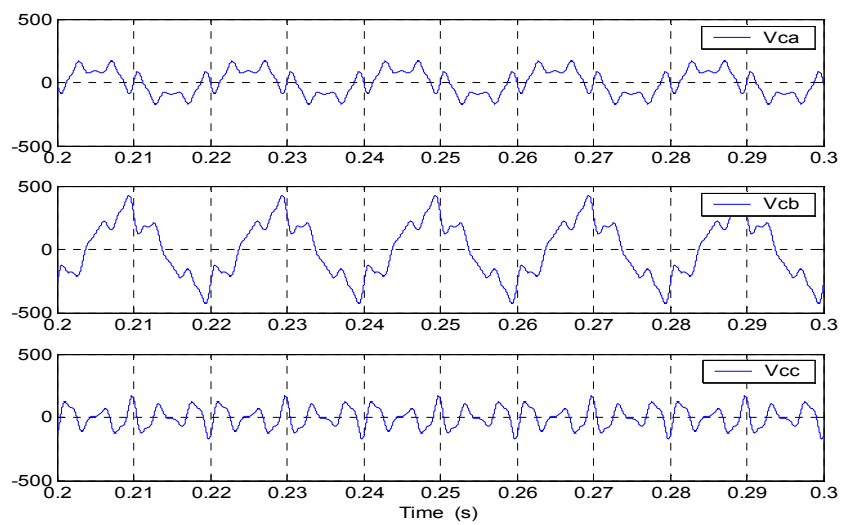


Fig. IV.19 : Les tensions de compensation en (V)

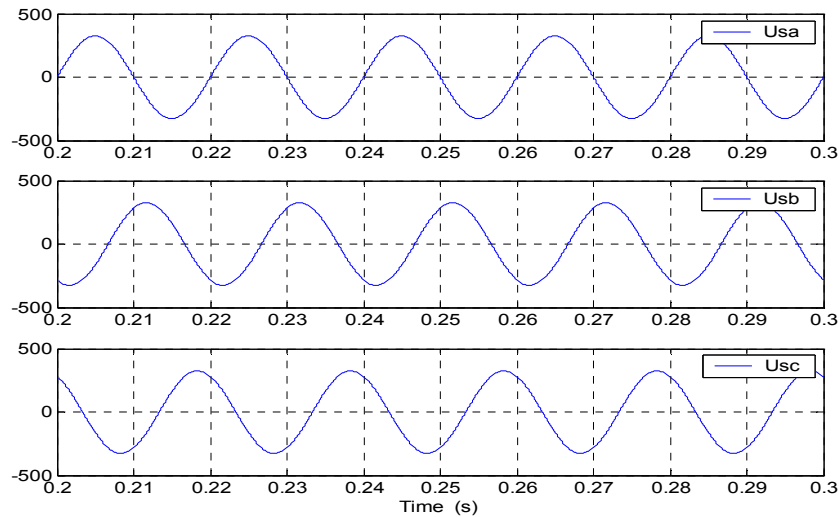


Fig. IV.20 : Les tensions du réseau après compensation en (V)

## IV.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un filtre actif série très efficace pour la dépollution des réseaux électriques de toutes perturbations de tension, tels que les différents modes de déséquilibre, les creux de tension, les harmoniques venant de la charge non linéaire et même les perturbations harmoniques dans la tension de la source. Afin de réaliser une bonne compensation, nous avons proposé une méthode d'identification simple, souple et efficace pour tous types de perturbation. Cette méthode d'identification est présentée pour être utilisée pour la génération des tensions de référence dans les cas les plus sévères de perturbation.

La méthode proposée est basée sur l'utilisation d'un système à PLL, Ce dernier est présenté dans la section (II.4.6), déjà utilisé dans la méthode SGF pour la détermination des courants perturbateurs.

Le filtre de sortie du filtre actif série, est un filtre de deuxième ordre, son rôle est l'élimination des composantes harmoniques de haute fréquence injectées par le filtre dans le primaire du transformateur d'injection.

Pour en savoir de la puissance apparente du filtre actif série, nous avons fait une étude généralisée pour les perturbations de déséquilibre ou creux de tension monophasé, biphasé et triphasé. Les expressions obtenues du rapport de puissance apparente du filtre actif et la puissance demandée par la charge, montrent les limites d'utilisation de ce dernier, pour la compensation des perturbations de tension.

Le problème de déphasage, déjà observé dans la régulation du courant, est résolu par l'utilisation d'une boucle de régulation. Ce problème est déjà étudié dans le cas du filtre actif parallèle.

Enfin, deux simulations ont été effectuées sur Simulink/Matlab afin de valider la fonctionnalité des méthodes du filtre actif série compensant toutes les perturbations de tension. Les résultats obtenus montrent l'efficacité de ce type de compensateur.

D'après l'étude des deux types du filtre actif de puissance (parallèle et série) pour la compensation des perturbations en courant et en tension. Afin de bénéficier des avantages de ces

deux types de compensateur, il nous a paru intéressant d'introduire la combinaison de ces deux derniers. L' UQPF est le compensateur regroupent ces deux filtre où les méthodes d'identification sont les mêmes. C'est l'un des perspectives de ce mémoire.

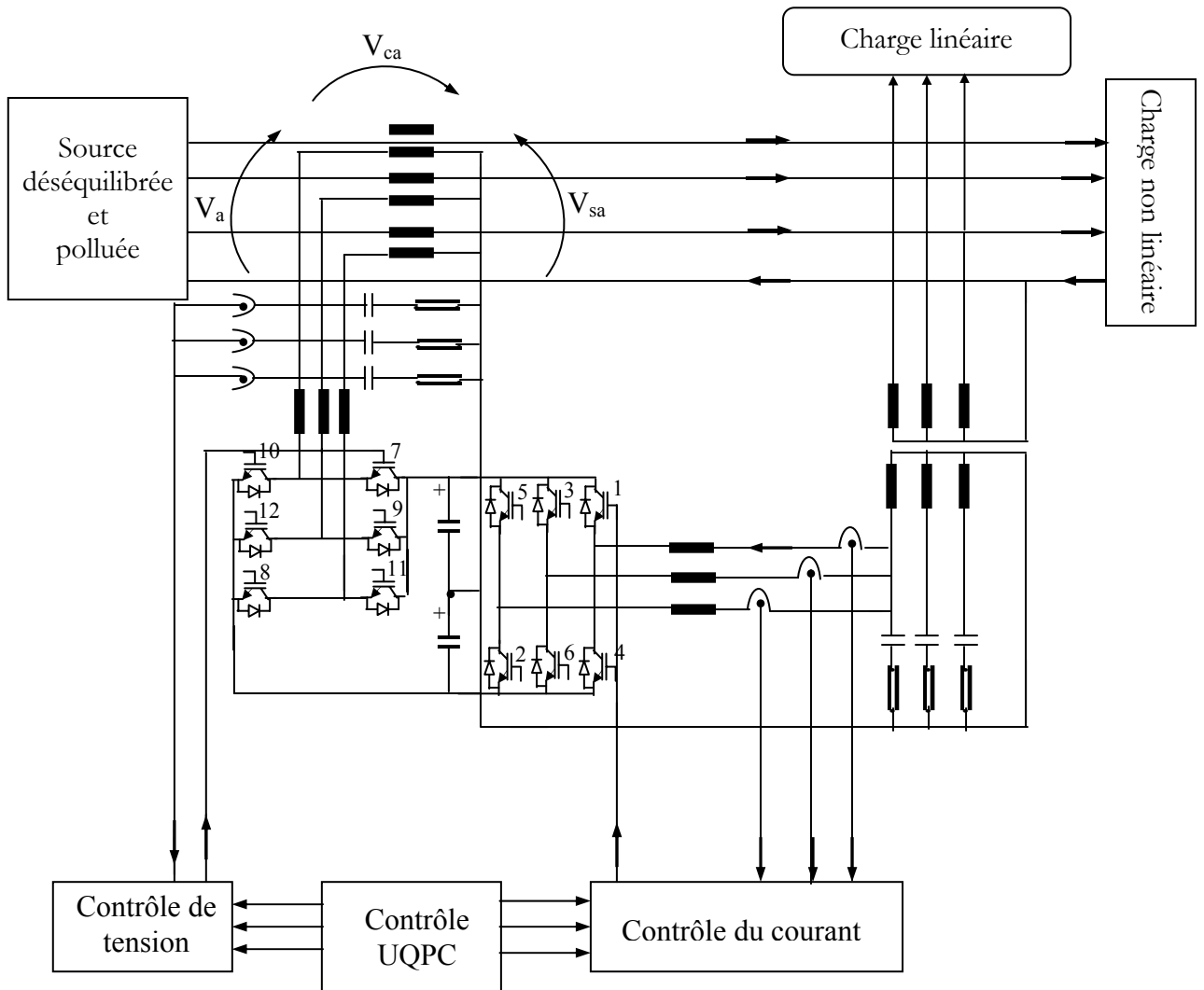


Fig. IV.21 : Structure de l'UQPC

**CONCLUSION GENERALE  
ET PERSPECTIVES**

## Conclusion Générale

Ce travail a porté sur l'étude des filtres actifs de puissance parallèle et série pour la compensation des différentes perturbations dans les réseaux basse tension. L'objectif du filtre actif parallèle est de compenser les perturbations du courant générées par les charges dites non linéaires tels que les courants harmoniques, les courants réactifs et le déséquilibre du courant même dans le cas des charges linéaires. L'objectif du filtre actif série est de compenser les perturbations de tension au PCC (Point of Common Connection) telles que le déséquilibre en tension, les creux de tension, la déformation de la forme d'onde de la tension au PCC due à la déformation de la tension de source et les chutes de tension résultant de la circulation des courants harmoniques et des courants déséquilibrés.

Nous avons exposé les différents travaux présentés dans le domaine des filtres actifs de puissance, l'état d'art des définitions des puissances dans le régime non sinusoïdal, une représentation généralisée des puissances active, réactive et homopolaire qui sera très utile dans la suite de notre travail et pour éviter l'ambiguïté des définitions des puissances dans le régime non sinusoïdal qui pose un problème jusqu'à nos jours.

Les principales stratégies d'identification et de calcul de référence les plus répandues (théorie pq, SRF, FOS, SDA, SGF) ont été présentées. Une étude comparative de ces stratégies a été faite en se basant sur les résultats de simulation pour les différentes perturbations, le temps de réponse, l'implantation pratique, Le THD, la complexité du calcul. Cette étude nous a conduit à la sélection de la théorie pq, qui a été utilisée dans la suite du travail.

Pour réaliser une bonne atténuation des composantes dues à la fréquence de commutation contenues dans les courants injectés, on a fait une étude comparative entre les filtres de sortie du filtre actif parallèle de type L et LCL. Cette étude a été complétée par un calcul d'optimisation pour le choix des paramètres de ces deux filtres.

Le problème qui a été posé est la régulation du courant injecté par le filtre actif. Pour cela nous avons proposé une boucle de contrôle basée sur un régulateur classique de type PI.

Pour avoir une tension constante du côté DC de l'onduleur on a utilisé un régulateur PI qui sert à ajouter en permanence la quantité de puissance active nécessaire afin de maintenir la tension du côté DC autour de sa valeur de référence.

Pour surmonter le problème des tensions déséquilibrées et/ou polluées au point PCC qui fait limiter l'application de la théorie pq, on a proposé un système PLL (Phase Locked Loop).

A l'aide de la structure de commande et de contrôle proposée nous sommes arrivés à compenser toutes les perturbations, même si la tension au PCC est polluée et/ou déséquilibrée. Nous pensons que les résultats de simulation obtenus ont montré l'efficacité du système proposé.

Dans le cas du filtre actif série, L'objectif est de compenser les perturbations dans la tension au PCC de type harmonique et/ou déséquilibre. Pour cela nous avons proposé une stratégie d'identification et de construction des tensions de référence dans le cas général pour la compensation des harmoniques de tension, du déséquilibre et des chutes de tension



harmoniques causées par les charges non linéaires. Les résultats de simulation montrent l'efficacité de cette stratégie.

Finalement on a proposé la structure combinée du filtre actif parallèle et le filtre actif série, dans le but de pouvoir assurer les compensations des perturbations des courants et des tensions. En même temps on a évité le problème de la source continue du filtre actif série. Cette solution est prometteuse dans le domaine du filtre actif de puissance.

Notre étude permettra d'ouvrir la brèche pour nombreuses orientations de recherche dans le domaine du filtrage actif. Les perspectives de recherche que nous voyons à travers notre travail sont les suivantes :

- Sur le plan de l'identification des différentes perturbations : Actuellement le domaine temporel est le plus riche, le domaine fréquentiel est moins utilisé à cause du temps de calcul nécessaire qui est très élevé, mais on peut penser à trouver d'autres algorithmes d'identification dans d'autres domaines tels que les réseaux de neurone qui restent limités par leur implantations hardware.
- Sur le plan d'électronique de puissance : la recherche peut s'orienter vers l'amélioration de la structure de l'onduleur de puissance utilisé dans les filtres actifs de puissance. On pourrait envisager l'utilisation des onduleurs multi-niveaux, l'utilisation des interrupteurs semiconducteurs améliorés, l'utilisation des filtres actifs dans les réseaux moyenne tension et même les réseau haute tension.
- Sur le plan de la commande : plusieurs travaux peuvent faire suite à notre travail, afin d'améliorer les limites d'applications du filtre actif de puissance et d'augmenter ces performances. Pour avoir une bonne poursuite des courants/tensions issus des algorithmes d'identification des courants/tensions injectés on peut compléter ou améliorer notre travail par l'utilisation des régulateurs très avancés dans le but d'éliminer l'erreur d'amplitude et le déphasage entre les signaux de référence et les signaux injectés, tels que les régulateurs flous, les régulateurs classiques avancés RST,  $H_\infty$  ...etc.
- Dans le plan de la commande en temps réel : nous pouvons utiliser l'outil informatique ou certain processeurs pour améliorer la vitesse de poursuite des perturbations du filtre actif de puissance tel que (Les DSP, les ASICs et les PLDs).
- Nous pouvons penser à exploiter les principes du filtre actif de puissance shunt tel que, le chargement des batteries de puissance qu'on peut connecter du côté du Dc-link pour l'utiliser dans d'autres applications en parallèle. On peut utiliser aussi l'énergie renouvelable telle que l'énergie solaire ou l'énergie éolienne comme une source continue surtout pour le filtre actif de puissance série. On peut penser également à l'utilisation du principe du filtre actif de puissance pour réaliser des redresseurs actifs de puissance dans le but d'avoir un facteur de puissance unitaire et un courant de source ayant une forme d'onde sinusoïdale sans l'utilisation du filtre actif shunt.

## BIBLIOGRAPHIE

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] M.A.E. Allali, “ Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électrique basse tension ”, Thèse de Doctorat, ULP Strasbourg I. 12 sept 2002.
- [2] Serge Bernardo, Gérard Trochan, “ Compensation des courants harmoniques générés par les ordinateurs grâce à un compensateur actif d'harmoniques révolutionnaire ”, MGE, UPS SYSTEMS, MGE0128FRI- 01/2000.
- [3] Eric Félice, “ Perturbations harmoniques : Effets, origine, mesures, diagnostic, remèdes ”, Dunod, Paris 2000.
- [4] CEI/IEC 61000-2-1:1990, “Electromagnetic Compatibility”, Part 2: Environment, Sect. 1: Description of the environment – Electromagnetic environment for low- frequency conducted disturbances and signalling in public power supply systems", First Edition, 1990-05
- [5] IEC 61000-2-2, “Compatibility levels for low frequency conducted disturbances and signalling in public low voltage power supply systems”, Second Edition, Sept. 2000.
- [6] IEEE Interharmonic Task Force Working Document, Draft 3. On line available at <http://grouper.ieee.org/groups/harmonic/iharm/docs> . Jul. 14, 2001
- [7] R. Yacimini, “Power System Harmonics, part 4 Interharmonics”, Power Engineering Journal, vol.10, no.4, Aug. 1996, pp.185-193
- [8] E.J. Delaney and R.E. Morrison, “Minimisation of Interharmonic Current from a Current Source A.C. Drive by Means of a Selective D.C. Side Active Filter”, IEEE Trans. On Power Delivery, vol. 10, no. 3, July, 1995, pp.1584-1590.
- [9] D. Gallo, R. Langella, and A. Testa, “On the Processing of Harmonics and interharmonics in Electrical Power Systems”, Proceedings of IEEE PES Winter Meeting 2000, Vol.3, pp.1581-1586
- [10] M. B. Rifai, T. H. Ortmeyer and W. J. McQuillan, “Evaluation of Current Interharmonics from AC Drives”, IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 15, no. 3, Jul. 2000, pp. 1094-1098
- [11] L. Tang, D. Mueller, “ analysis of DC arc furnace operation and Flicker by 187 Hz Voltage Distorsion ”, Presented at IEEE-PES 1993 Summer meeting July 18-22, 1993, Vacouver, BC.
- [12] R .F. Chu , J.J. Burns, “ Impact of Cycloconverter Harmonics”, IEEE Trans on Ind Appl, vol. 25, no. 3 May/June 1989, pp.427-435.
- [13] IEC, “ Reactive power in nonsinusoidal situations.”. vol. Report TC 25/wg7.1975.
- [14] T. Gouraud. “ Identification et rejet des perturbations harmoniques dans des réseaux de distribution électrique ”. Thèse de Doctorat, Ecole Doctorale de Nantes, 07/01/1997.
- [15] Javerzac .L et Ott.R, “ La normalisation de l'électricité,” Revue Générale d'électricité, Avril 1995, pp.165-21.
- [16] Subjak.J , McQuilkin.J “ Harmonics Causes, effects, measurements and analysis : update ,” IEEE Trans on Ind. Appl., vol. 26, n°6, November/December 1990, pp.1034-1042.
- [17] C. Budeanu. “ Reactive and fictitious powers ”. Rumanian National Institute N°. 2, 1927.
- [18] R. Atseneau and t al , “ Pratical Definitions for Powers in System with Nonsinusoidal Waveforms and Unbalanced Loads : A Discussion”, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 11, No. 1, pp. 79-101, Jan 1996.

- [19] CENELEC NE/EN 50160, “Caractéristiques de la tension fournie par les réseaux de distribution”, Nov, 1994.
- [20] CEI/TEC 61000-2-4 “Compatibility levels in industrial plants for low-frequency conducted disturbances”, 1st. Ed. 1994-05.
- [21] ANSI/IEEE, “Standard dictionary for power of electrical & electronics terms”,USA, ANSI/IEEE, 1977.
- [22] IEEE Standard 519-1992 “IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems”, 1992.
- [23] F. De Chateaufieux, “Creux de tension et coupures brèves”, Note EDF, Groupe de Travail UIE power quality, Guide sur la qualité de l’électricité pour l’alimentation des installations industrielle, partie 2, HR- 22/96/045.a, 1996.
- [24] P. Meynaud. “Qualité de la tension dans les réseaux électriques – creux de tension, flicker et harmoniques”, Technique de l’ingénieur, traité Génie électrique,D4260, pp. 1-25,1990.
- [25] P. Meynaud, P. Pene, G. Desquilbet, “Déséquilibre de tension”, Note EDF, 96NR00003, 1996.
- [26] A. Ressay, “Problèmes et Impacts des harmoniques sur les réseaux d’énergie électrique”, Séminaire sur les perturbations harmoniques,8 Avril 2001,Sonelgaz-RD.
- [27] D.Rivas, L.Moran, J.W.Dixon, J.R.Espinoza, “Improving passive filter Compensation Performance With Active techniques”, IEEE, Trans., On Ind.Electronics, Vol.50,no 1.February 2003.
- [28] L. Gyugyi , E.C. Strycula, “Active AC Power Filter”, IEEE/IAS Annual Meeting, pp.529-535, 1976.
- [29] O. B. Amadou, A. O. Barry, “Analyse des filtres actifs par la méthode de la compensation par impédances harmoniques”, Partie I. Rapport n° Ireq –2000-11c, juin 2000.
- [30] O. B. Amadou, A. O. Barry, “Analyse des filtres actifs par la méthode de la compensation par impédances harmoniques”, Partie II. Rapport n° Ireq –2000-111c, juin 2000.
- [31] L. Moran, P.D. Ziagaz, G. Joos “Three phase solid state voltage compensator system,” Can. J.Elect.Comp.Eng, vol. 15, no. 1, pp. 27-35, 1990.
- [32] M. EL-Habrouk, M.K.Darwish and P. Mehta, “Ative Power Filters: Areview”, IEE Pro.-Eletr. Power Appl., Vol. 147, No. 5, September 2000.
- [33] B. Singh, K. Al-haddad,, A. Chandra, “A Review OF Active Filters for Power Quality Improvement”, IEEE Trans, on Ind, Electronics, Vol.46, No. 5, October 1999.
- [34] Erih W. Gunther et al, “Interharmonics in Power Systems”,IEEE Interharmoni Task Fore, igré 36.05/IRED 2C02 Voltage Quality Working Group, 12/1/97.
- [35] H. Akagi, Y. Kanazawa, A. Nabae, “Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising switching Devices without Energy Storage Components”, IEEE Trans. on Industry Application, Vol. IA-20, No. 3,May/June 1984.
- [36] F.Z.Peng, H. Akagi, A. Nabae “Compensation characteristics of the combined System of Shunt Passive and Serie Ative Filters”, IEEE Trans on Inds Applic. 1989
- [37] H. Akagi, Y. Tsukamoto, A. Nabae, “Analysis and Design of an Active Power Filter Using Quad- Series Voltage Source PWM Converters”, IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 26, No.1, Jan/Feb. 1990.

- [38] F. -Z. Peng, H. Akagi, A. Nabae, "A New Approach to Harmic Compensation in Power Systems- A Combined System Shunt Passive and Series Active Filters", IEEE Trans. on Industry Applic. Vol. 26, No.6, Nov./Dec. 1990.
- [39] H. Fujita, H. Akagi, "A Practical Approach to Harmic Compensation in Power Systems – Series Connection of Passive and Active Filters", IEEE Trans. On Industry Applications, Vol. 27, No.6, Nov./Dec. 1991.
- [40] H. Akagi, A. Nabae, "The p-q Theory in Three-Phase Systems under Non Sinusoidal Conditions", ETEP, Vol. 3, No. 1, Jan/Feb. 1993.
- [41] H. Akagi, "Control Strategy and Site Selection of a shunt Active Filter for Power Electronics", Vol.9, No. 3, May 1994
- [42] H. Akagi, "Trends in Active Power Line conditioners", IEEE, Vol. 9, N). 3, May 1994.
- [43] H. Akagi, H. Fujita, "A New Power Line for Harmonic Compensation in Power Systems", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 10, No. 3, July 1995.
- [44] H. Akagi, "New Trends in Active Filters for Power Conditioning", IEEE Trans. On Industry Applications, Vol. 32, No.6, Nov. / Dec. 1996.
- [45] H. Akagi, "Trends in Active Power Line Conditioners, IEEE Trans. On Damping of Harmonic Propagation in Power Distribution Systems", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 12, No. 1, Jan. 1997.
- [46] H. Fujita, H. Akagi, "The Unified Power Quality Conditioner: The Integration of Series and Shunt Active Filters", IEEE . Trans on Power Electronics, Vol. 13, N°. 2, Marh 1998
- [47] F. Zheng, H. Akagi, "Application Issues of Active Power Filters", IEEE Industry Applications Magazine, Sept. / Oct. 1998
- [48] F. Zheng, H. Akagi, "A Shunt Active filter Based on Voltage Detection for Harmonic Termination Of a Radial Power Distribution Line", IEEE Trans. On Ind. Appli., Vol. 35, No. 3, May/June 1999.
- [49] H. Fujita, T. Yamazaki, H. Akagi " A Hybrid Active Filter For Damping of Harmonic Resonance in Industrial Power Systems", IEEE Transaction On Power Electronics, Vol. 15, No.2, March 2000.
- [50] H. Akagi, A. Nabae, S. Atoli, "Control Strategy of Active Power Filters using Multiple Voltage Source PWM Converters", IEEE Trans on Ind. Appl., Vol. IA-22, pp. 460-465, 1986
- [51] H. Akagi, Y. Tsukamoto. A.Nabae " Analysis and Design of an Active Filter Using Quad-series voltage source converters", *IEEE Trans. on Industry Appl.*, Vol. 26, no. 1, 1990, pp. 93-98.
- [52] S. Battacharya, D. M. Divan, B. B. Banerjee, "Control And Reduction of Terminal Voltage Total Harmonic Distorsion (THD) In A Hydrid Series Active and Parallel Passive Filter System", IEEE Conf. 1993.
- [53] S. Battacharya, D. M. Divan, "Active Filter Solutions For Utility Interface of Industrial Loads", IEEE Conf. , 1995.
- [54] S. Battacharya, D. M. Divan, "Design and Implementation of Hybrid Series Active Filter System", IEEE Conf. , 1995.
- [55] S. Battacharya, D. M. Divan, "Synchronous Frame Based Controller Implementation For Series Active Filter System", IEEE Conf. , 1995.
- [56] S. Battacharya, D. M. Divan, B. B. Banerjee, "Parallel Ative Filter System Implementation and Design Issues for Utility Interface of Adjustable Speed Drive Systems", IEEE Conf. 1996.

- [57] Po-Tai Cheng, S. Battacharya, "Line Harmonics Reduction in High-power Systems Using Square-Wave Inverters-Based Dominant Harmonic Active Filter", IEEE Trans. On Power Electronics. Vol. 14, N° 2, Mai 1999.
- [58] A. van Zyl, J. H. R. Enslin, R. Spée, "Converter-based Solution to Power Quality Problems on Radial Distribution Lines", IEEE Conf. 1995.
- [59] A. van Zyl, J. H. R. Enslin, R. Spée, "A New Unified Approach to Power Quality Management", IEEE Trans. on Power Electronics", Vol. 11, No. 5, Sept 1996.
- [60] A. van Zyl, J. H. R. Enslin, R. Spée, "Converter-based Solution to Power Quality Problems on Radial Distribution Lines", IEEE Trans. on Industry Applications Vol. 32, No.6, Nov./Dec. 1996.
- [61] J. H. R. Enslin, J. D. Van Wyk, M. Naude, "A New philosophy for power Electronic Converter as Fictitious Power Compensators", IEEE Trans. Power Electronics. Vol. 5, N°. 1, Jan. 1990, pp. 88-97.
- [62] E.H.Watanabe, R. M. Stephan, M. Aredes, "New Concepts of Instantaneous Active and reactive Powers in Electrical Systems with Generic Loads", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 8, N°. 2, Apr. 1993, pp.697-703.
- [63] M. Aredes, E.H.Watanabe, "New Control Algorithms for Series and Shunt Three phase Four wire Active Power Filter", IEEE Trans. Power Delivery, Vol.10, N°. 3, July. 1995, pp.1649-1656.
- [64] M. Aredes, K. Heumann, E.H.Watanabe, J. Hafner, "A Three phase Four wire Active Power Filter Using six IGBTs", COBEP'95- Brazilian Conf. Power Electronics, Sao Paulo, Brazil, De. 1995.
- [65] Yan Xu, Leon.M.Tolbert et al, "Compensation based non active Power Definitions", IEEE Power Electronics Letters, Vol. 1, No 2, June 2003.
- [66] Leonm.Tolbert, T. Habetler, "Comparison of time-Based Non Active Power Definitions for Active Filtering", IEP, Mexico, Acapulco, October 15/19, 2000, pp. 73-79.
- [67] J. Jacobs, D.O. Detjen, R.W. DeDoncker, "An Overview of Methods to Determine the Harmonics in Three Phase Systems", IEEE Young Researcher SEPE. Leuven. Belgium. 2002.
- [68] L. Leslie, T. Nergaard, "Time Domain Compensation Methods for Three Phase Shunt Active Filters", ECE 5984, USA .2002.
- [69] C. E. Lin, L. Chen, L. Huang, "Calculating Approach and Implementation for Active Filters in Unbalanced Three phase System Using Synchronous Detection Method", In Pro, IEEE IEON'92, 1992, pp.374-380.
- [70] Victor Valouh, C.E. Lin, C-Lin Chen, "Synchronous Detection Method For Three Phase Three wire System in Reactive and Harmonic Power compensation", Proc, Nat, on. Roc(A). Vol. 23.N°. 3, 1999. pp 429-435.
- [71] Depenbrock M. Skudelny H.CH, "Dynamic Compensation of Non-active Power Using the FBD-Method", IEEE Second International Workshop on Power Definitions and Measurements under Non-Sinusoidal Conditions, Stress, Italy, 1993.
- [72] C. L. Chen, C. E. Lin, C.L. Huang, "An Active Filter For Unbalanced Three-phase System Using Synchronous detection Method", in Pro, IEEE PES'94, 1994, pp 1451-1455.
- [73] M. Aredes, L. F. Monteiro, "A Control Strategy for Shunt Active Filter", XIV Congresso Brasileiro de Automatica, Natal-RN, 2-5 Decembre 2002.

- [74] H.Kawahira, T. Nakamura, S. Nakazawa. M. Mimoura, "Active Power Filter", IPEC'83-Int. Power Electronics Conf., Tokyo, Japan, 1983, pp. 981-992.
- [75] L. Malesani, L. Rossetto, P. Tenti, "Active Filter for Reactive Power and Harmonics Compensation", IEEE-PESC'86 – Power Electronics Spec.Conf., 86CH2310-1, pp.321-330.
- [76] Y. Hayashi, N. Sato, K. Takahashi, "A Novel Control of a Current-Source Active Filter for ac Power System Harmonic Compensation", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 27, no.2, Mar./Apr. 1991, pp. 380-385.
- [77] M. Kohata, T. Shiota, S. Atoh, "Compensator for Harmonics and Reactive Power Using Static Induction Thyristors," EPE'87 – Eur. Conf Power Electronics Appl., Genoble, France, 1987, pp. 1265-1270.
- [78] S.-Y. Choe, K. Heumann, "Harmonic Current Compensation Using Three-Phase current source converter", EPE'91 – Eur. Conf. Power Electronics Appl., vol.3, Firenze, Italy, 1991, pp. 3.006–3.011.
- [79] I. Takahashi, A. Nabae, "Universal Power Distortion Compensator of Line Commutated Thyristor Converter", in *Proc. IEEE Ind. Appl. Ann. Meeting*, 1980, pp. 858-864.
- [80] Mauricio Aredes, "Active Power Line Conditioners", Thèse de doctorat, Technische univervstat Berlin ,D83, 11 Marz 1996.
- [81] M.Lindgren, "Modeling and control of voltage Source converters connected to the Grid converter", PHD Thèsis ,chalmers university of technology, Gothenburg, Sweden, September 1998.
- [82] M.Lindgren, "Filtering and Control of a Grid-Connected voltage source converter", Licentiate's thesis, chalmers university of technology, Gothenburg, Sweden, September 1996.
- [83] Martin Bojrup "Advanced Control of Active Filters in a Battery Charger Application", Ph.D. Thesis, Dept, IEA, LTH, Sweden, 1999.
- [84] V. Blasko, V. Kaura. "A Novel Control to Actively Damp Resonance in Input LC Filter of Three phase Voltage Source Inverter", IEEE Trans. On Ind. Application. Vol. 33. No. 2. 1997. pp. 542-550.
- [85] M.A.E Allali, S. Saadate, Y.A. Chapuis, F. Braun, "Energetic study of a shunt active conditioner compensating current harmonics, power factor and unbalance", EPE-PEMC 2000, Kosic, Slovak Republic, vol. 5, pp. 211\_216, September 2000
- [86] G. Alarcon, C. Nunez, V. Cardenas, M. Olivier, "Design and implementation of a 3-phase series active filter to compensate voltage disturbance", CIEP-2000, October 2000, Acapulco, Mexico, P. 93-98.
- [87] A.J. Visser, T. Mouton, J.H.R. Enslin, "Directed-coupled cascaded multilevel sag compensator", IEEE 31st annual power electronics specialists conference, 18-23 June 2000 Galway, Ireland.
- [88] A.Kouzou, I. HAbi, "Application of the pq Theory in Specific Operations with Shunt Active Power Filter", ICEEE International Conference, Laghouat. 24-26 April/2004.
- [89] A.Kouzou, I. HAbi, B.S.Khalidi "Application of the pq Theory with Shunt Active Power Filter under Unbalanced or/and Distorted Power system Voltage", ELECONC International Conference, Saida, 4-5 Mai 2004.

# ANNEXES



## ANNEXE I

### Les inter-harmoniques

#### 1. Définition

Selon la normalisation IEC-61000-2-1[4] les inter-harmoniques sont définis par : « *entre les harmoniques du courant et tension, d'autres fréquences sont observées et qui ne sont pas des multiples entiers de la fréquence fondamentale, il peuvent apparaître comme des fréquences discrètes ou comme un spectre à large bande* », d'autre part une ébauche récente redéfinit l'inter-harmoniques en tant que « *toute fréquence qui n'est pas un multiple entier de la fréquence fondamentale* » [5] , Le groupe de travail IEEE sur les inter-harmoniques a adopté la définition du CEI et recommandé l'inclusion de l'inter-harmoniques pour la prochaine révision du IEEE 519 [6]. Des nombreux travaux ont été publiés discutant plusieurs sujets tels que les sources , les impacts, la mesure des inter-harmoniques, ainsi que les valeurs limites et la réduction des inter-harmoniques [7,10]. Cependant, les difficultés de trouver avec précision les fréquence et les amplitudes des inter-harmoniques , gardent toujours ce champ avec beaucoup de questions.

Selon la fréquence on peut définir :

- La fréquence des harmoniques :  $f_h = h * f_1$  ;
- La fréquence des inter-harmoniques :  $f_h \neq h * f_1$  ;
- La fréquence des sub harmoniques :  $f_h \neq 0$  et  $f_h < f_1$  .

Où :  $f_1$  est la fréquence du fondamentale,  $h$  est un entier strictement positif,

#### 2. Origines des inter-harmoniques

Les principales origines des inter-harmoniques sont :

- La source principale des inter-harmoniques est le cycloconvertisseur, utilisé actuellement dans plusieurs applications industrielles. En effet les courants injectés dans le réseau par un cycloconvertisseur ont un type unique de spectre, la fréquence des courant injectés est :

$$f = (p_1.m \pm 1)f_1 \pm p_2.n.f_0 \quad (\text{AI.1})$$

Tandis que les courant injectés par redresseur à p section ont la fréquence :

$$f = (p.n \pm 1)f_1 \quad (\text{AI.2})$$

- Où :
- $p_1$  : les nombres de calottes dans la section du redresseur ;
  - $p_2$  : Nombre des sections de la sortie du cycloconvertisseur ;
  - $n$  et  $m$  : des entiers qui ne puissent égale à 0 simultanément ;
  - $f_0$  : Fréquence de sortie du cycloconvertisseur.

- les convertisseurs statiques de fréquence. Ces convertisseurs transforment la tension d'alimentation a une tension alternative ayant une fréquence supérieur ou inférieur de la

fréquence d'alimentation. Ils se composent de deux parties, d'un redresseur et d'un onduleur. La tension DC est modulée par la fréquence de sortie du convertisseur et par conséquent, les courants inter-harmoniques apparaissent dans le courant d'alimentation selon les équations (AI.1) et (AI.2) causant la génération des tensions inter-harmoniques dans la tension de source.

- Une autre source commune des courants inter-harmoniques est les charges à variation périodique. Ceci inclut les soudeuses d'arc et les fours à arc électrique. Ces types de charges sont typiquement associés aux fluctuations de basse fréquence de tension et au clignotement léger résultant. Ces fluctuations de tension peuvent être considérées en tant que composants inter-harmoniques de basse fréquence. En plus, les charges à variation périodique génèrent également des inter-harmoniques à fréquence plus élevée avec une large bande [11]. Pour élucider ce phénomène on prend l'exemple suivant :

On suppose une tension alternative de fréquence  $f_1$  :

$$V(t) = \sin(2\pi f_1 t) \quad \text{en (p.u)} \quad (\text{AI.3})$$

une charge avec la caractéristique suivante :

$$R(t) = 1 - r \sin(f_i t) \quad (\text{AI.4})$$

avec  $r \ll 1$  et  $f_i$  la fréquence de variation de la charge, le courant circulant de cette charge est :

$$I(t) = \sin(2\pi f_1 t) (1 + r \sin(2\pi f_i t) + r^2 \sin^2(2\pi f_i t) + r^3 \sin^3(2\pi f_i t) + \dots) \quad (\text{AI.5})$$

alors  $I(t)$  contient les composantes de fréquence  $f_1 \pm f_i$ ,  $f_1 \pm 2f_i$ ,  $f_1 \pm 3f_i$ ,  $f_1 \pm 4f_i$ , etc. et comme résultat, les inter-harmoniques sont observées dans le spectre du courant autant que  $f_i$  est en asynchronisme avec  $f_1$ .

- Application de chauffage (surtout le chauffage ohmique).

### 3. Conséquence des inter-harmoniques

- les inter-harmoniques ont les mêmes conséquences que les harmoniques
- en plus les inter-harmoniques peuvent causer une perturbation significative dans la vision. Pour élucider ce point on va prendre l'exemple suivant.

Une tension polluée par des inter-harmoniques est représentée selon l'expression suivante :

$$\sin(100\pi t) + 0.3 \sin(2\pi f_1 t) \quad (\text{AI.6})$$

où  $f_i$  prend 44 Hz et 56 Hz respectivement fig I, on remarque les enveloppes avec une fluctuation de 6 Hz qui puisse causé le flicker si la charge lumineuse est sensible a ce type de variation. La fréquence du fluctuation est :

$$f_f = |f_i - f_k| \quad (\text{AI.7})$$

Où :  $f_i$  représente la fréquence de l'inter-harmonique ;  $f_k$  la fréquence de l'harmonique dont la fréquence est la plus proche au inter-harmonique.

Le Flicker est une conséquence spécifique aux inter-harmoniques, dont l'effet est plus remarquable si la fréquence de l'inter-harmonique est plus proche de sa fréquence image.

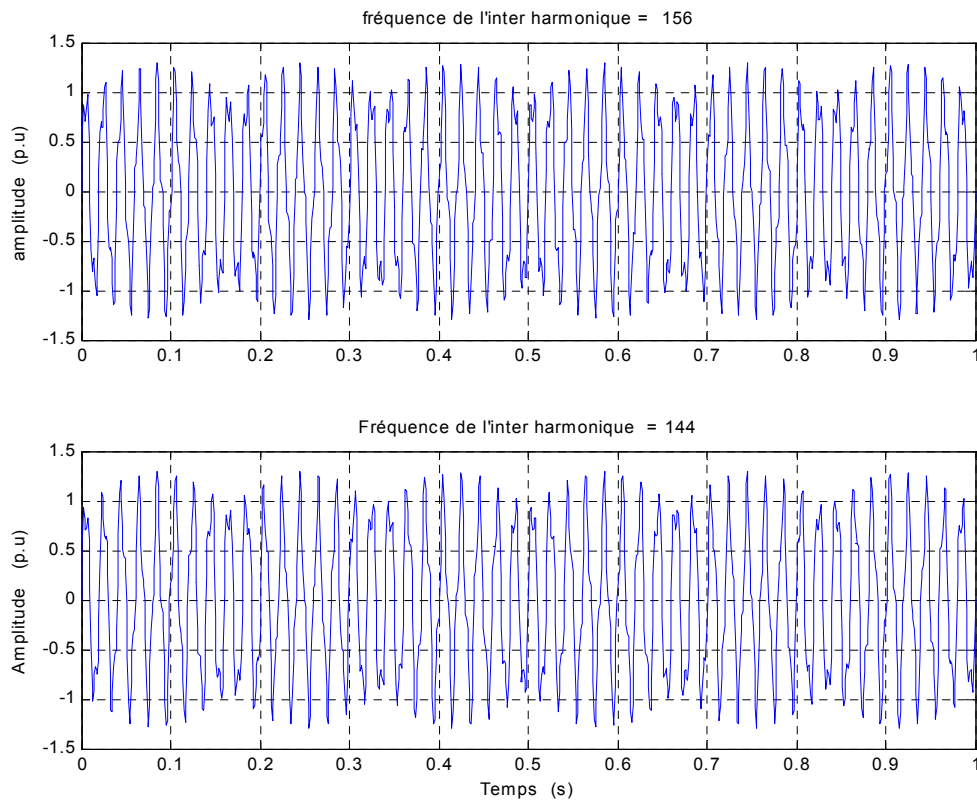


Fig. AI.1 : Le Flicker causé par les inter-harmoniques

## ANNEXE II

## Calcul de la fonction de transfert d'un filtre LCL

D'après La section ( III.2.3.1 ) on à obtenue

$$\begin{bmatrix} i_{1k} \\ u_{ck} \\ i_{2k} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 \\ A_{21} & 0 & A_{23} \\ 0 & A_{44} & A_{43} \end{bmatrix}}_{A_{LCL}} \begin{bmatrix} i_{1k} \\ u_{ck} \\ i_{2k} \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} B_{11} & 0 \\ B_{21} & B_{22} \\ 0 & B_{43} \end{bmatrix}}_{B_{LCL}} \begin{bmatrix} u_{1k} \\ e_k \end{bmatrix} \quad (\text{AII.1})$$

où :

$$A_{11} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{11}}{L_{11}} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R_{12}}{L_{12}} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R_{13}}{L_{13}} \end{bmatrix} ; \quad A_{12} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L_{11}} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{L_{12}} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{L_{13}} \end{bmatrix} \quad (\text{AII.2})$$

$$A_{21} = \begin{bmatrix} \frac{1}{C_1} \frac{R_{c1} R_{11}}{L_{11}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_2} \frac{R_{c2} R_{12}}{L_{12}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{C_3} \frac{R_{c3} R_{13}}{L_{13}} \end{bmatrix} \quad (\text{AII.3})$$

$$A_{22} = \begin{bmatrix} -R_{c1} \left( \frac{1}{L_{11}} + \frac{1}{L_{21}} \right) & 0 & 0 \\ 0 & -R_{c2} \left( \frac{1}{L_{12}} + \frac{1}{L_{22}} \right) & 0 \\ 0 & 0 & -R_{c3} \left( \frac{1}{L_{13}} + \frac{1}{L_{23}} \right) \end{bmatrix} \quad (\text{AII.4})$$

$$A_{23} = \begin{bmatrix} \frac{R_{c1}R_{21}}{L_{21}} - \frac{1}{C_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{R_{c2}R_{22}}{L_{22}} - \frac{1}{C_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{R_{c3}R_{23}}{L_{23}} - \frac{1}{C_3} \end{bmatrix}; \quad A_{32} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{21}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_{22}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L_{23}} \end{bmatrix} \quad (\text{AII.5})$$

$$A_{33} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{21}}{L_{21}} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R_{22}}{L_{22}} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R_{23}}{L_{23}} \end{bmatrix} \quad (\text{AII.6})$$

$$B_{11} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{11}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_{12}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L_{13}} \end{bmatrix}; \quad B_{21} = \begin{bmatrix} \frac{R_{c1}}{L_{11}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{R_{c2}}{L_{12}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{R_{c3}}{L_{13}} \end{bmatrix} \quad (\text{AII.7})$$

$$B_{22} = \begin{bmatrix} \frac{R_{c1}}{L_{21}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{R_{c2}}{L_{22}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{R_{c3}}{L_{23}} \end{bmatrix}; \quad B_{32} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L_2} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{L_{22}} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{L_{23}} \end{bmatrix} \quad (\text{AII.8})$$

La fonction de transfert du filtre est alors :

$$G(s) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} (sI - A_{LCL})^{-1} \cdot B_{LCL} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{AII.9})$$

où :

$$G(s) = \begin{bmatrix} G_1(s) \\ G_2(s) \\ G_3(s) \end{bmatrix} \quad (\text{AII.10})$$

La fonction de transfert de la phase a du filtre passe bas LCL est exprimée par :

$$G_1(s) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} (SI - A_{LCL})^{-1} B_{LCL} \begin{bmatrix} 1 \\ \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{AII.11})$$

D'où :

$$G_1(s) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \frac{1}{\text{Det}(SI - A_{LCL})} \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \frac{1}{L_{11}} \\ \frac{R_{c1}}{L_{11}} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{AII.12})$$

$\alpha_{ij}$  : Les cofacteurs de la matrice  $(SI - A_{LCL})$ .

Finalement :

$$G_1(s) = \frac{1}{\text{Det}(SI - A_{LCL})} \left[ \alpha_{31} \frac{1}{L_{11}} + \alpha_{32} \frac{R_{c1}}{L_{11}} \right] \quad (\text{AII.13})$$

Avec :

$$\alpha_{31} = \frac{1}{L_{21}} \left[ \frac{1}{C_1} - \frac{R_{c1} R_{11}}{L_{11}} \right]; \quad \alpha_{32} = \frac{1}{L_{21}} \left[ s + \frac{R_{11}}{L_{11}} \right] \quad (\text{AII.14})$$

Après développement on aura :

$$G_1(s) = \frac{b_1 s + b_0}{a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0} \quad (\text{AII.15})$$

## ANNEXE III

## Les courants cachés générés par la théorie pq

Nous allons prendre deux exemples pour éclaircir ce phénomène :

1. soit le courant harmonique d'ordre 5 de la séquence positive :

$$\begin{aligned} i_{a5}(t) &= \sqrt{2}I_5 \sin(5\omega t + \varphi_5) \\ i_{b5}(t) &= \sqrt{2}I_5 \sin\left(5\omega t + \varphi_5 - \frac{2\pi}{3}\right) \\ i_{c5}(t) &= \sqrt{2}I_5 \sin\left(5\omega t + \varphi_5 + \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \quad (\text{AIII.2})$$

La transformé de Clarke donne :

$$\begin{aligned} i_{\alpha 5}(t) &= \sqrt{3}I_5 \sin(5\omega t + \varphi_5) \\ i_{\beta 5}(t) &= -\sqrt{3}I_5 \cos(5\omega t + \varphi_5) \end{aligned} \quad (\text{AIII.3})$$

D'où les puissances active et imaginaire instantanées :

$$\begin{aligned} p_5 &= 3V_m I_5 \cos(4\omega t + \varphi_5) \\ q_5 &= -3V_m I_5 \sin(4\omega t + \varphi_5) \end{aligned} \quad (\text{AIII.3})$$

Les courants de compensation sont donnés par :

$$i_{\alpha p 5} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_5 [\sin(5\omega t + \varphi_5) - \sin(3\omega t + \varphi_5)] \quad (\text{AIII.4})$$

$$i_{\alpha q 5} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_5 [\sin(5\omega t + \varphi_5) + \sin(3\omega t + \varphi_5)] \quad (\text{AIII.5})$$

$$i_{\beta p 5} = -\frac{\sqrt{3}}{2} I_5 [\cos(5\omega t + \varphi_5) + \cos(3\omega t + \varphi_5)] \quad (\text{AIII.6})$$

$$i_{\beta q 5} = -\frac{\sqrt{3}}{2} I_5 [\cos(5\omega t + \varphi_5) - \cos(3\omega t + \varphi_5)] \quad (\text{AIII.7})$$

c'est à dire :

$$\text{Suivant l'axe } \alpha \quad : \quad i_{\alpha 5} = i_{\alpha p 5} + i_{\alpha q 5} \quad (\text{AIII.8})$$

$$\text{Suivant l'axe } \beta \quad : \quad i_{\beta 5} = i_{\beta p 5} + i_{\beta q 5} \quad (\text{AIII.10})$$

Si le gain de compensation est le même pour  $\tilde{p}$  et  $\tilde{q}$ , on aura que les termes avec la fréquence de  $5\omega$  dans les deux composantes du courant. Au contraire les termes en  $3\omega$

appartient si les gains de compensation sont différents, ces termes n'étaient pas dans le courant de la charge, ces sont les courants cachés.

2. soit le courant harmonique d'ordre 7 de la séquence négative :

$$\begin{aligned} i_{a7}(t) &= \sqrt{2}I_7 \sin(7\omega t + \varphi_7) \\ i_{b7}(t) &= \sqrt{2}I_7 \sin\left(7\omega t + \varphi_7 + \frac{2\pi}{3}\right) \\ i_{c7}(t) &= \sqrt{2}I_7 \sin\left(7\omega t + \varphi_7 - \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \quad (\text{AIII.11})$$

La transformé de Clarke donne :

$$\begin{aligned} i_{\alpha7}(t) &= \sqrt{3}I_7 \sin(7\omega t + \varphi_7) \\ i_{\beta7}(t) &= \sqrt{3}I_7 \cos(7\omega t + \varphi_7) \end{aligned} \quad (\text{AIII.12})$$

D'où les puissances active et imaginaire instantanées :

$$\begin{aligned} p_7 &= -3V_m I_7 \cos(8\omega t + \varphi_7) ; \\ q_7 &= -3V_m I_7 \sin(8\omega t + \varphi_7) \end{aligned} \quad (\text{AIII.13})$$

Les courants de compensation sont donnés par :

$$i_{cp7} = -\frac{\sqrt{3}}{2}I_7 [\sin(9\omega t + \varphi_7) - \sin(7\omega t + \varphi_7)] \quad (\text{AIII.14})$$

$$i_{cq7} = \frac{\sqrt{3}}{2}I_7 [\sin(9\omega t + \varphi_7) + \sin(7\omega t + \varphi_7)] \quad (\text{AIII.15})$$

$$i_{\beta p7} = \frac{\sqrt{3}}{2}I_7 [\cos(9\omega t + \varphi_7) + \cos(7\omega t + \varphi_7)] \quad (\text{AIII.16})$$

$$i_{\beta q7} = -\frac{\sqrt{3}}{2}I_7 [\cos(9\omega t + \varphi_7) - \cos(7\omega t + \varphi_7)] \quad (\text{AIII.17})$$

c'est à dire :

$$\text{Suivant l'axe } \alpha : \quad i_{\alpha7} = i_{cp7} + i_{cq7} \quad (\text{AIII.18})$$

$$\text{Suivant l'axe } \beta : \quad i_{\beta7} = i_{\beta p7} + i_{\beta q7} \quad (\text{AIII.17})$$

Si le gain de compensation est le même pour  $\tilde{p}$  et  $\tilde{q}$ , on aura que les termes avec la fréquence de  $7\omega$  dans les deux composantes du courant. Au contraire les termes en  $9\omega$  appartient si les gains de compensation sont différents, ces termes n'étaient pas dans le courant de la charge, ces sont des courants cachés.



## ANNEXE IV

## Comportement du filtre de sortie du filtre actif parallèle

Nous avons simulé le comportement d'un filtre type L utilisé dans la sortie du filtre actif parallèle. Dans cette simulation on donne trois courants de référence différents :

- Courant sinusoïdale (dépollué des harmoniques) ;
- Courant rectangulaire dans le fondamental est prépondérant ;
- Courant quelconque où le fondamental est a faible amplitude

Dans chaque cas on remarque la distorsion du courant à la sortie du filtre et le déphasage entre le courant injecté est le courant de références. Cette simulation permet d'avoir un le choix optimal de la valeur de l'inductance utilisée comme filtre de sortie dans le filtre actif parallèle.

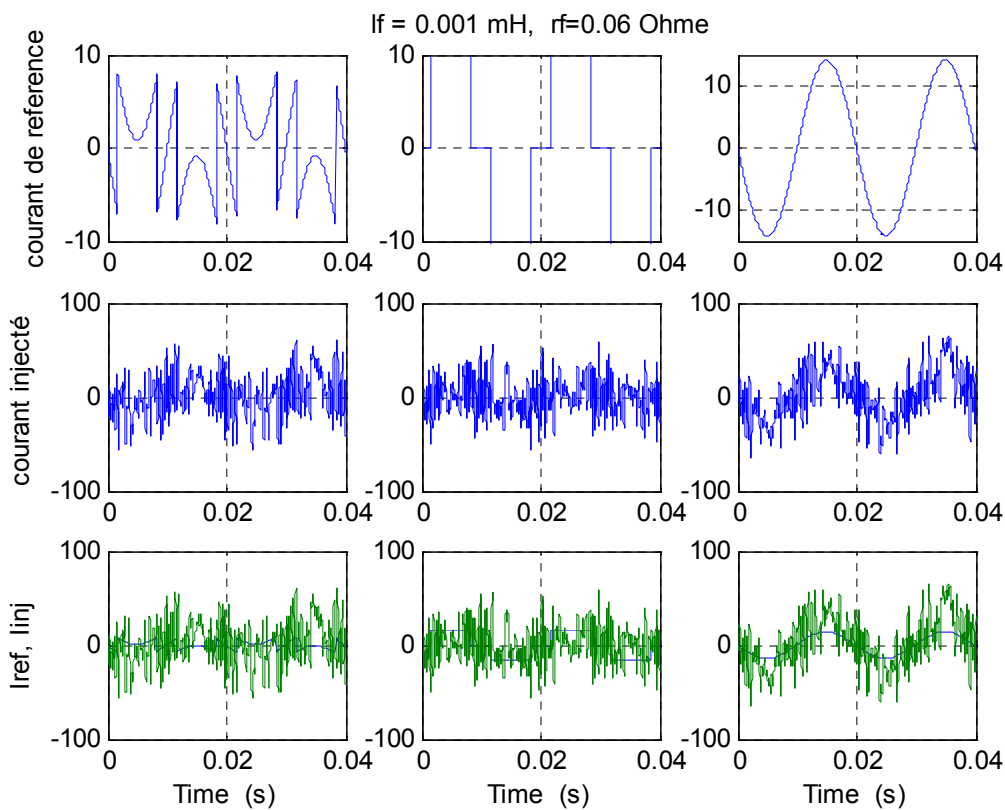


Fig. AIV.1 : valeur de l'inductance est 1 mH

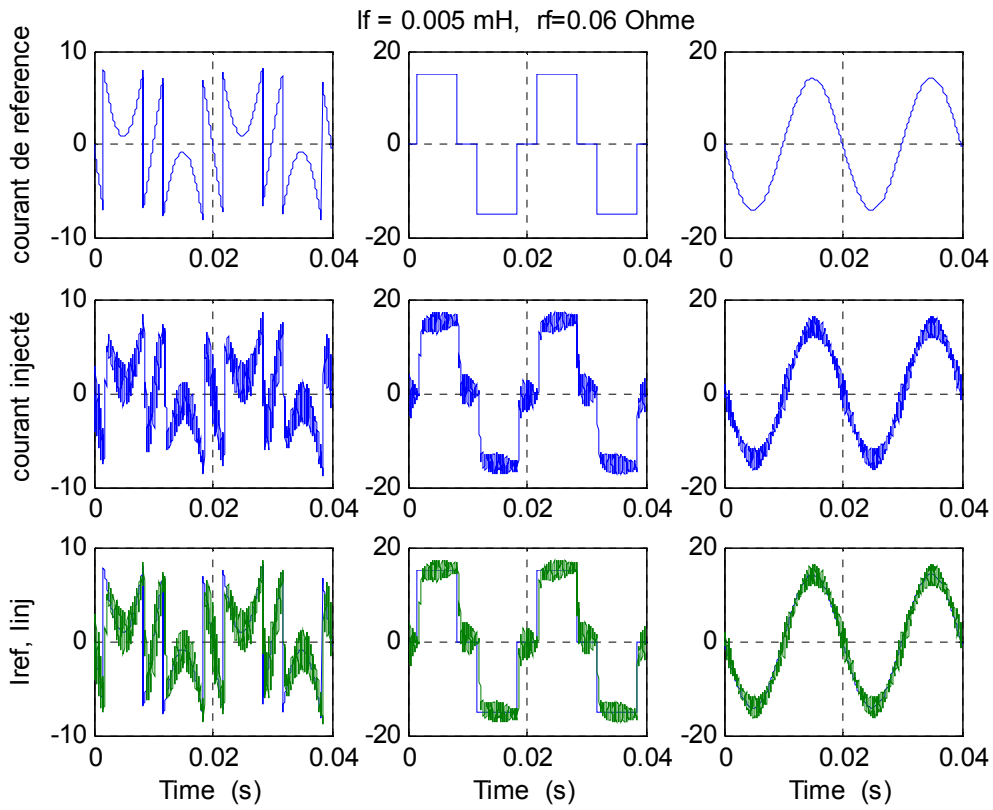


Fig. AIV.2 : valeur de l'inductance est 5 mH

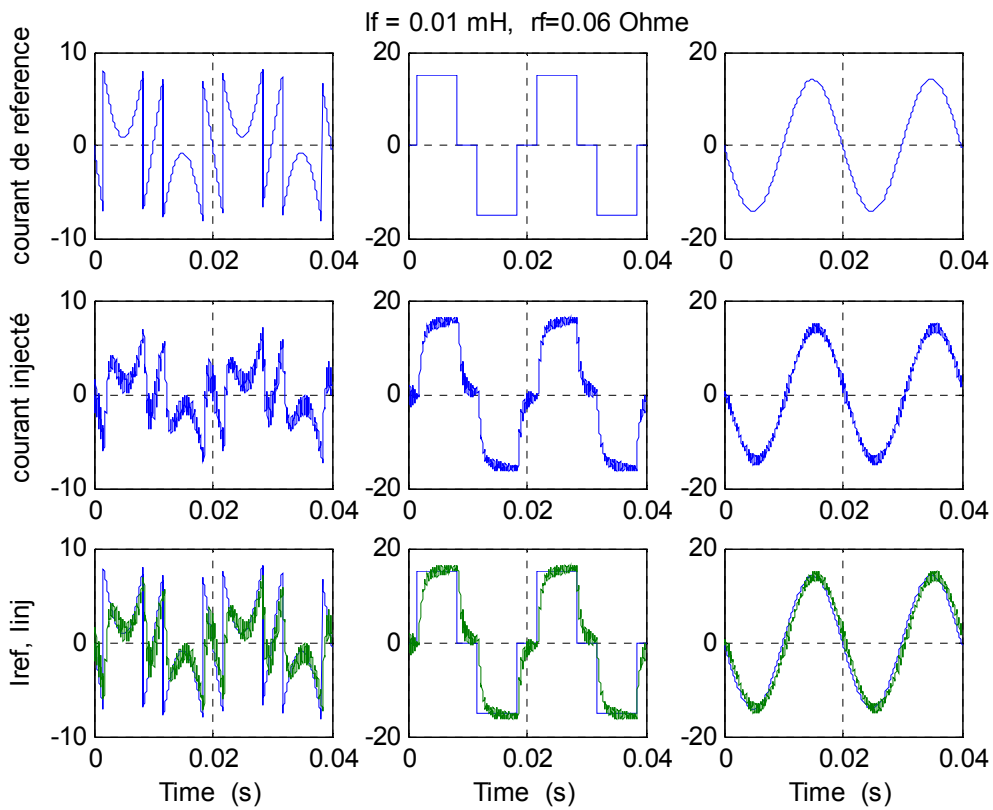


Fig. AIV.3 : valeur de l'inductance est 10 mH

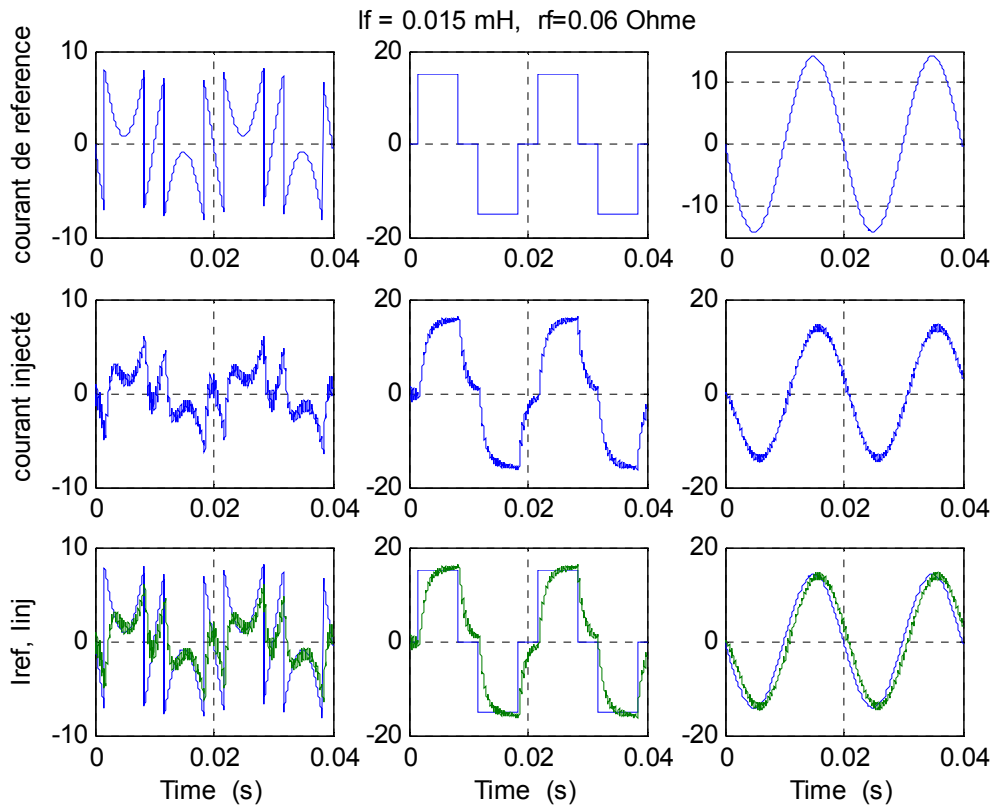


Fig. AIV.4 : valeur de l'inductance est 15 mH

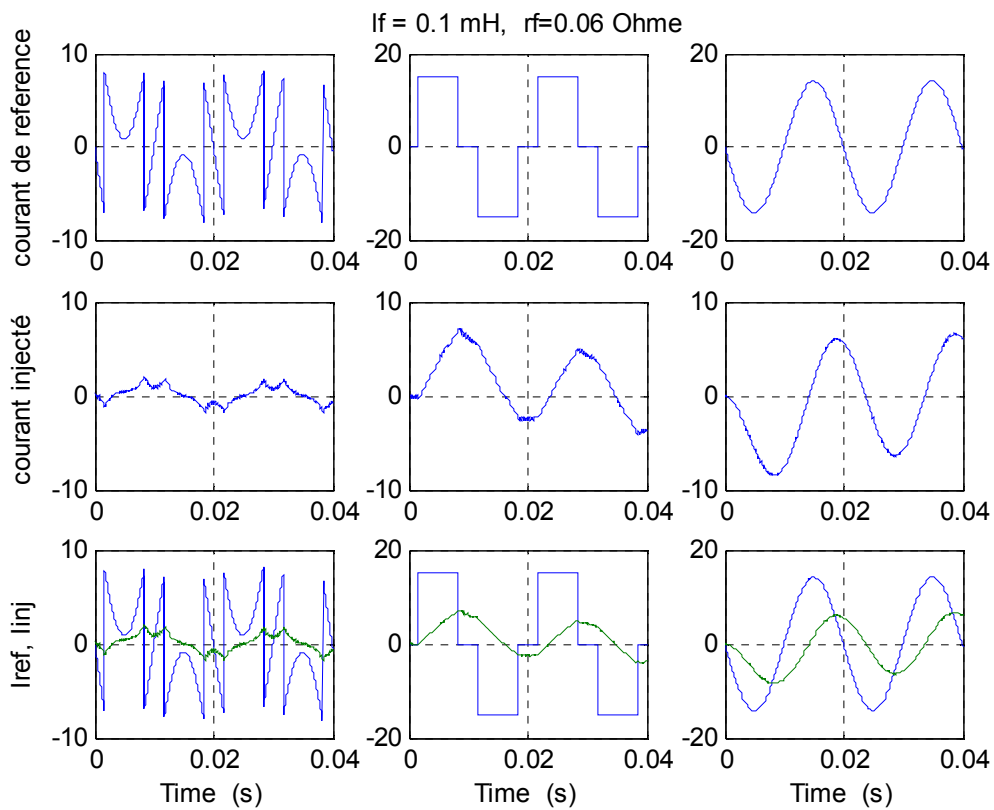


Fig. AIV.5 : valeur de l'inductance est 100 mH