

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



*Université M'hamed Bouguerra
Boumerdès
Faculté des Hydrocarbures et de
la Chimie*



MEMOIRE

présenté par:

Mr. BENSLIMANE Mohamed Cherif

Pour l'obtention du titre de Magister en Génie Electrique

Option: Equipements Electriques Industriels

THEME

COMPENSATION GLOBALE DES HARMONIQUES

" Etude, dimensionnement et commande d'un filtre actif parallèle "

Membres du jury proposés :

| | | | |
|----------------------------|------------------------|-----------------------|-------------------------------|
| <u>Président</u> | Mr. M. Zelmat | Maître de Conférences | FHC - Université de Boumerdès |
| <u>Rapporteurs:</u> | Mr. I. Habi | Chargé de cours | FHC - Université de Boumerdès |
| <u>Examineurs:</u> | Mr. D. Ouahdi | Maître de Conférences | FHC - Université de Boumerdès |
| | Mr. N. Debbache | Maître de Conférences | Université de Annaba |
| | Mr. R. Azouaou | Chargé de cours | Université de Tiziouzou |

DEDICACE

Je dédie ce modeste travail à :

Mes chers parents.

Mes sœurs, mon frère et à toute la famille.

Mon épouse et à toute la famille kihal.

Sans oublier tous mes amis.

Benslimane Mohamed Cherif

Remerciement

A Monsieur **M. Zelmat**

qui a accepté de présider le jury d'évaluation de ce travail.

A Monsieur **D. Ouahdi**, Monsieur **N. Debbache** et Monsieur **R. Azouaou**

Qui ont bien voulu honorer le jury par leur présence en tant qu'examineurs.

A mon promoteur Monsieur **I. Habi** pour son aide et ses conseils fructueux.

A tous mes amis et ceux qui m'ont aidé à élaborer ce travail.

Pour toutes ces personnes j'adresse mes meilleurs remerciements.

المخلص

أدى تطوير الأجهزة الكهربائية التي تستعمل المحولات السكنوية - في السنوات الأخيرة - إلى ارتفاع محسوس في مستوى التلوث التوافقي في الشبكات. إن هذه المحولات تمتص التيارات غير الجيبوية، و تستغل و كأنها مولدات التوافقيات. و يكون للتلوث الناتج آثار ضارة أ و مؤجلة، سواء بالنسبة للموزع أ و بالنسبة للمستغلين. و من بين هذه الآثار، يمكن أن نسجل تبيد الضغط في نقطة التوصيل، و سخونة الكبلات و المحولات، هرم الأجهزة، بالإضافة إلى إمكانية تعطل الأجهزة التي تعرضت للاضطراب. و للقضاء على هذه المشاكل ، فإن الحل التقليدي يتمثل في تقليص التوافقيات بواسطة مرشحات مطاوعة تتوقف قياساتها على طيف تيار الشحنة و معاوقة الشبكة. و نلاحظ أن كل تغيير في الشبكة "إعادة تنظيم ، الحاق زبائن جدد" قد يجعل المرشح غير مطابق و يؤدي إلى مخاطر الرنين.

إن التطورات المنجزة في مجال مركبات الطاقة سمحت بوضع أجهزة يطلق عليها المرشحات الفعالة، من أجل إزالة التوافقيات .

ومن خلال العمل المقدم في هذه المذكرة قمنا- بشكل منهجي - بدراسة نظرية ، بواسطة التظاهر تحت نظام ماتلاب سيمولينك لجهاز معوض نشط ثلاثي الأدوار ذي هيكل جهدي.

بدأنا بوصف وجيز للاضطرابات التوافقية المدرجة في الشبكات الكهربائية من قبل المحولات السكنوية، و عرض النتائج و الحلول التقليدية أو الحديثة التي تسمح بتجاوزها .

في الفصل الثاني، درسنا الطرائق المختلفة للتعرف على التيارات التوافقية لشحنة ملوثة.

اما الفصل الثالث فقد خصص لدراسة دارة القوة للمرشح الفعال للموازي لهيكل الجهد. وقد درسنا خطتي قيادة ، القيادة التخلفية و قيادة التنويع بواسطة عرض الدفع ذات العينات الطبيعية . و قد قمنا بمقابلة إيجابيات الخطتين و سلبياتهما بعد التظاهر الإجمالي لتصرف المرشح الفعال و قيادته، قصد تعويض التيارات التوافقية المحقنة بواسطة جسر مقوم ثلاثي الأدوار ذي تيرستور .

في الفصل الرابع قدمنا أهداف تنظيم الضغط في الطابق المتواصل للمرشح الفعال والوسائل اللازمة لإنجازها باستعمال منظم من نوع تام-نسبي.

Abstract

In the recent years, the development of electrical materials using static converters has caused an irrelevant increasing on harmonic pollution in electric networks mains. This converters absorb nonsinusoidal currents and behave as harmonic generators. The resulted pollution has a serious effects on both, consumers and distributors. Among this effects, we can introduce the voltage deterioration of junction point, the warming-up of cables and transformers, in addition to the exhaustion of the material.

In order to resolve this problemes, a classical approach was introduced, in which the objectif is to reduce the harmonics by using passive filters where the dimensioning is related to the spectrum of the current load and network's impedance. Any network modification may makes the filters non adaptable further more the risques of resonance will come up. The progresses reached in the field of power components, such as GTO, IGBT, help to conserve devices to eliminate harmonics named active filters.

This research introduces a theoretical study by simulation using Matlab – simulink program. This simulation concerns three phase voltage source active filter.

After a brief description of harmonic disturbances resulted in electrical networks in which their origin is from static converters, further more the consequences and classical or recent solutions are introduced.

In the second chapter, we have mentioned to the different identification methods of harmonic currents of non-linear load.

In the third chapter, the study of power circuit of voltage source parallel active filter is presented. In addition, two control strategies have been studied, hysteresis control and PWM control. After, a general simulation of the behaviour of the active filter and its control in order to compensate the harmonic currents injected by three phase rectifier bridge based on thyristors, the performances and disadvantages of the two methods are confronted.

Finally, in the fourth chapter, we have introduced the objectives of voltage regulation of inverter, and the means that help to realise this objectives by using a regulator type : Integral – proportional .

Sommaire

| | |
|----------------------------|---|
| Introduction générale..... | 1 |
|----------------------------|---|

Chapitre I : Perturbations harmoniques et principe de compensation active

| | |
|--|----|
| Introduction..... | 3 |
| I.1 Généralités sur la pollution harmonique..... | 4 |
| I.1.1 Définition de l'harmonique..... | 4 |
| I.1.2 Origines des harmoniques..... | 4 |
| I.1.2.1 appareils ferromagnétiques..... | 4 |
| I.1.2.2 Convertisseurs de l'électronique de puissance..... | 5 |
| I.1.2.3 systèmes à arcs | 6 |
| I.1.3 Les effets néfastes des harmoniques | 6 |
| I.1.3.1 effets sur les équipements du réseau | 6 |
| I.1.3.2 effets sur les systèmes de télécommunication et les circuits de télécommande... .. | 7 |
| I.1.3.3 effets sur les équipements de la clientèle..... | 7 |
| I.1.3.4 effets sur les instruments de mesure..... | 7 |
| I.1.3.5 effets sur la tension d'alimentation..... | 7 |
| I.1.4 Réglementation..... | 8 |
| I.1.5 Traitements traditionnels des harmoniques..... | 8 |
| I.1.5.1 surdimensionnement ou déclassement de l'installation électrique | 8 |
| I.1.5.2 Filtres passifs | 8 |
| I.2 La compensation active des harmoniques | 10 |
| I.2.1 Classification selon la configuration | 10 |
| I.2.1.1 Filtre actif parallèle..... | 10 |
| I.2.1.2 Filtre actif série..... | 11 |
| I.2.1.3 Filtre actif mixte série et parallèle..... | 13 |
| I.2.1.4 Filtres hybrides actifs et passifs | 13 |
| I.2.2 Classification selon la stratégie de commande..... | 19 |
| I.2.3 Classification selon la structure électrotechnique de l'onduleur..... | 19 |
| I.3 Autres applications des filtres actifs..... | 20 |
| I.3.1 Compensation du déséquilibre du réseau..... | 20 |
| I.3.2 Compensation de flicker..... | 21 |
| I.3.3 Compensation des creux de tension..... | 22 |
| Conclusion..... | 23 |

Chapitre II : Différentes méthodes d'identification des courants harmoniques

| | |
|---|----|
| Introduction..... | 24 |
| II.1 Méthodes d'identification des références du filtre actif | 24 |
| II.1.1 Méthode basée sur le principe du courant actif..... | 26 |
| II.1.1.1 Correspondance entre courants et puissances..... | 26 |
| II.1.1.2 Algorithme d'identification | 27 |
| II.1.1.3 Validation de la méthode basée sur le courant actif | 28 |

| | |
|---|----|
| II.1.2 Méthode des puissances instantanées | 30 |
| II.1.2.1 Algorithme d'identification | 34 |
| II.1.2.2 Exemple d'identification | 35 |
| II.1.3 Méthode tri-monophasé | 36 |
| II.1.3.1 Algorithme d'identification | 37 |
| II.1.3.2 Validation de la méthode tri-monophasé | 38 |
| II.1.4 Méthode basée sur la régulation de la tension continue V_C | 39 |
| Conclusion | 41 |

Chapitre III : Etude, dimensionnement et stratégies de commande d'un filtre actif parallèle à structure tension

| | |
|---|----|
| Introduction | 42 |
| III.1 Configuration du filtre actif à structure tension | 43 |
| III.1.1 Filtre actif avec trois onduleurs monophasés | 43 |
| III.1.2 Filtre actif avec onduleur triphasé à quatre bras | 44 |
| III.1.3 Filtre actif avec un onduleur triphasé à trois bras | 45 |
| III.2 Description du filtre parallèle étudié | 45 |
| III.2.1 L'onduleur de tension | 46 |
| III.2.2 Dimensionnement | 49 |
| III.2.2.1 Caractérisation de la charge polluante | 49 |
| III.2.2.2 Dimensionnement du filtre actif | 50 |
| III.3 Contrôle des courants du filtre actif | 52 |
| III.3.1 Contrôle des courants par hystérésis | 53 |
| III.3.2 Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI) | 54 |
| III.4 Exemple de compensation des courants harmoniques d'un redresseur triphasé | 57 |
| III.4.1 Description du système simulé | 57 |
| III.4.2 Résultats de simulation | 59 |
| Conclusion | |

Chapitre IV : Filtrage actif parallèle avec la compensation d'énergie réactive et la régulation du bus continu du filtre actif

| | |
|---|-----------|
| Introduction | 67 |
| IV.1 Régulation de la tension continue V_C | 67 |
| IV.1.1 Objectifs de la régulation | 67 |
| IV.1.2 Formulation du modèle de la boucle de régulation | 68 |
| IV.1.3 Régulateur de type Intégral-Proportionnel (IP) | 69 |
| IV.2 Compensation des courants harmoniques et des courants réactifs | 71 |
| IV.3 Exemple de compensation des courants harmoniques et des courants réactifs d'un redresseur triphasé avec la régulation de la tension du bus continu | 71 |
| IV.3.1 Description du système simulé | 71 |
| IV.3.2 Résultats de simulation | 72 |
| Conclusion | 81 |
| Conclusion générale..... | 82 |

| | |
|---------------------------|-----------|
| Bibliographie..... | 83 |
| Annexe 1..... | 86 |
| Annexe 2..... | 86 |
| Annexe 3..... | 88 |
| Annexe 4..... | 88 |

Introduction générale

Le développement du matériel électrique utilisant des convertisseurs statiques a entraîné ces dernières années une augmentation sensible du niveau de pollution harmonique sur les réseaux. Ces convertisseurs absorbent des courants non sinusoïdaux et se comportent comme des générateurs d'harmoniques.

Les différents secteurs industriels (utilisation de gradateurs, redresseurs, variateurs de vitesse...), tertiaires (informatique ou éclairage dans les bureaux, commerce.....) ou domestiques (téléviseurs, appareils électroménagers en grand nombre) sont concernés.

La pollution résultante a des effets néfastes instantanés ou différés tant pour le distributeur que pour les exploitants. Parmi ces effets, on peut noter la dégradation de la tension au point de raccordement, l'échauffement des câbles et transformateurs, le vieillissement du matériel et les éventuels dysfonctionnements d'équipements perturbés. Cette pollution se traduit aussi par les surcoûts importants pour l'utilisateur, surdimensionnement des installations, perte de productivité.....

Pour faire face à ce problème, les ingénieurs du domaine n'ont pas épargné leurs efforts pour trouver des solutions efficaces et peu onéreuses qui permettent de diminuer l'émission des courants harmoniques sur les réseaux.

Parmi ces solutions, l'utilisation des filtres passifs est la plus ancienne, elle consiste à empêcher le courant harmonique produit par une charge perturbatrice de se propager sur le reste du réseau en le piégeant dans un circuit d'éléments passifs (LC) connecté en parallèle avec la charge. Cette solution est actuellement la plus répandue, et peut être la plus simple et la moins chère mais l'efficacité de tels dispositifs est tributaire de l'impédance du réseau qui elle-même est susceptible d'évoluer. de plus le filtre passif forme, avec l'inductance de source, un circuit résonnant qui favorise l'amplification de tout harmonique de fréquence voisine de celle de la résonance.

Les progrès remarquables réalisés au cours des dernières années dans le domaine des dispositifs électroniques de puissance (les thyristors GTO et les transistors IGBT en particulier) ont permis de concevoir des dispositifs d'élimination des harmoniques auto-adaptables appelés compensateurs actifs d'harmoniques ou encore filtres actifs.

A travers ce travail présenté dans ce mémoire , nous mènerons systématiquement une étude théorique, par simulation sous MATLAB-Simulink d'un compensateur actif triphasé a structure tension.

Après une brève description des perturbations harmoniques induites dans les réseaux électriques par les convertisseurs statiques, les conséquences et solutions traditionnelles ou récentes permettant d'y remédier sont présentées.

Nous étudierons après dans le deuxième chapitre les différentes méthodes d'identification des courants harmoniques d'une charge polluante. Nous montrerons leurs avantages ainsi que leurs limites et nous les comparerons entre elles sur deux points, efficacité d'identification et simplicité d'implantation.

le troisième chapitre porte sur l'étude du circuit de puissance d'un filtre actif parallèle à structure tension. Pour le convertisseur, nous donnerons le dimensionnement et le choix des composants semi-conducteurs les plus adaptés. Ensuite nous traiterons l'aspect contrôle-commande du filtre actif à base d'onduleur de tension. Deux stratégies de commande seront étudiées, la commande à hystérésis et la commande MLI à échantillonnage naturel. Les performances et les inconvénients des deux méthodes seront confrontés après une simulation globale du comportement du filtre actif et de sa commande en vue de la compensation des courants harmoniques injectés par un pont redresseur triphasé à thyristors.

Dans le quatrième chapitre, nous présenterons les objectifs de la régulation de la tension de l'étage continu du filtre actif qui a été supposée constante dans le troisième chapitre, et les moyens de les réaliser en utilisant un régulateur de type Intégral-proportionnel. Enfin nous présenterons les résultats de compensation des courants harmoniques et des courants réactifs d'un redresseur triphasé. Cette partie illustre l'utilisation de l'onduleur de tension en tant que compensateur actif d'harmoniques et de puissance réactive.

Chapitre I

Perturbations harmoniques et principe de compensation active

Introduction

L'objectif du distributeur d'énergie est de fournir à ses clients une électricité de bonne qualité c'est à dire une onde de tension sinusoïdale, d'amplitude et de fréquence constante. En pratique, le transport et l'usage de l'électricité provoquent une déformation de la sinusoïde. Cette déformation est appelée : perturbation harmonique, elle est due à l'ensemble des charges raccordées au réseau dont les caractéristiques courant-tension sont non linéaires.

La perturbation harmonique est due pour une large partie au développement de nouveaux usages alimentés par des équipements électroniques et qui sont utilisés dans le domaine de l'industrie et l'électroménagers. cette perturbation qui augmente au fil des années risque d'être gênante à terme, elle provoque notamment le dysfonctionnement des appareils sensibles et le claquage des condensateurs, il est donc important d'avoir cette évolution dans le temps.

Depuis que leur principe a été proposé au début des années soixante-dix [1], les filtres actifs ont fait l'objet de nombreux travaux de recherche. Cependant la mise en œuvre de cette nouvelle méthode de filtrage n'a vu le jour que durant ces dix dernières années grâce aux progrès réalisés dans les semi-conducteurs de puissance entièrement commandables ainsi qu'au développement de certaines méthodes pratiques de calcul numérique.

Aujourd'hui, on compte plus de trois cents filtres actifs fonctionnant proprement au japon avec une puissance allant de 50 KVA à 50 MVA[2,3]. Ces nouveaux dispositifs de filtrage conçus autour d'un onduleur de tension ou de courant, à GTO ou à IGBT, ont donné plus de satisfaction que les filtres passifs traditionnellement utilisés.

Dans ce chapitre nous traitons tout d'abord la perturbation harmonique, leurs origines et leurs conséquences sur les équipements électriques.

Après, nous montrons les inconvénients des filtres passifs traditionnellement utilisés. Ensuite nous présentons une panoplie de dispositifs de filtrage actif des harmoniques classés selon différents critères : configuration, stratégie de commande et structure de convertisseur.

I.1 Généralités sur la pollution harmonique

I.1.1 Définition de l'harmonique

Un harmonique peut être défini comme étant une composante sinusoïdale d'une onde périodique ou d'une quantité possédant une fréquence qui est multiple entier de la fréquence fondamentale. Le domaine de fréquence qui correspond à l'étude des harmoniques est généralement compris entre l'harmonique 2 et celui du rang 40 [4].

Mais on peut observer des sous harmoniques ou des inter-harmoniques à des fréquences non multiples entières de la fréquence fondamentale.

I.1.2 Origines des harmoniques

La cause principale de l'existence des harmoniques de tension est l'injection des courants non sinusoïdaux par des charges dites non linéaires qui provoquent une chute de tension non sinusoïdale en circulant à travers l'impédance du réseau.

Ces charges sont divisées en trois parties qui sont :

- Notre réseau lui même tels que les transformateurs et alternateurs qui seaturent.
- Les équipements de la clientèle tel que l'ensemble des appareils électroménagers et les nouvelles applications de l'électricité utilisant en majorité des dispositifs électroniques qui contribuent à l'augmentation de la pollution harmonique.
- Les équipements de grande puissance installés dans les usines à des niveaux de tension plus élevés.

I.1.2.1 appareils ferromagnétiques

a) Transformateurs

Les transformateurs engendrent des tensions harmoniques d'ordres impaires à cause de la non linéarité des circuits magnétiques due à la construction du noyau et au mode de connexion des enroulements [5].

b) machines tournantes

La distorsion harmonique dans ce cas est due au réseau lui même.

- machines synchrones :

Les machines synchrones engendrent des tensions harmoniques de rangs impairs corrélatives aux irrégularités des champs tournants, au nombre et la distribution des encoches et au fonctionnement déséquilibré [6].

- machines asynchrones :

D'une part le courant magnétisant des moteurs asynchrones subit une distorsion due à la saturation et contient certains taux d'harmoniques impairs, cependant ces taux d'harmoniques du courant à vide sont faibles car la plus grande partie des ampères tours d'excitation est requise par l'entrefer, mais d'autre part, les fréquences de denture dues aux variations de réluctance provoquées par les encoches du stator et du rotor, sont plus gênantes [5].

Malgré ces éléments du réseau en régime saturé sont des charges non linéaires mais dans la pratique , les tensions harmoniques générées par ces éléments n'apportent qu'une faible distorsion (inférieur à 1% de la fondamentale) à l'onde de tension [4].

I.1.2.2 Convertisseurs de l'électronique de puissance

- Le petit appareillage à redresseur incorporé (l'ensemble des appareils électroménager, téléviseur, instrument de mesure, four à micro-onde, micro-ordinateur, charges d'accumulateurs) et connecté au réseau de distribution basse tension constitue la plus grande part de la puissance harmonique.
- L'appareillage de d'électronique de puissance apporte, dans le domaine industriel, une grande souplesse sur le plan de la conversion d'énergie, du réglage de vitesse et de l'asservissement des processus (électrolyse, induction, traction électrique , laminoirs , entraînement à vitesse variable.....).

Ces dispositifs sont des importants perturbateurs du réseau électrique.

- Les nouvelles applications de l'électricité utilisent en majorité des dispositifs électroniques en particulier pour le réglage de la puissance : c'est le cas notamment des gradateurs de lumière et les plaques à induction. Ces nouveaux appareils contribuent donc à l'augmentation de la pollution harmonique des réseaux.

I.1.2.3 systèmes à arcs

Les systèmes à arcs tels que le four à arc, l'éclairage fluorescent et les postes de soudage à arc à courant alternatif sont également des sources importantes des perturbations harmoniques causées par la clientèle.

En revanche , les appareillages à arcs et les convertisseurs de puissance sont actuellement les véritables causes de la distorsion harmonique(20% à 30% de leurs capacités) [7].

I.1.3 Les effets néfastes des harmoniques

Les distorsions harmoniques de tension peuvent endommager les appareils shunts qui voient cette tension déformée entre leurs bornes. D'autre part, les distorsions de courant peuvent détériorer les éléments séries traversés par le courant déformé et affectent les circuits inductivement couplés avec le réseau d'énergie.

Les courants et les tensions harmoniques ont des effets néfastes sur le fonctionnement, la rentabilité et la durée de vie de certains équipements électriques [7,8].

I.1.3.1 effets sur les équipements du réseau

- Amplification des niveaux de tension et de courant suite aux résonances séries et parallèles qui engendrent des surintensités de brève durée susceptibles de produire des échauffements nuisibles pour le matériel.
- Défaut de fonctionnement (dû au déplacement du point de passage par zéro de l'onde résultante de la tension) tels que les déséquilibres qui peuvent affecter les machines tournantes .

- Vieillessement et parfois claquage des isolants et de semi-conducteurs dû aux surtensions de la valeur Crête.
- Augmentation des pertes (du fait de l'échauffement supplémentaire) des générateurs, des moteurs et des condensateurs de compensation du facteur de puissance.
- Les harmoniques de courants générés par les convertisseurs statiques (redresseurs et onduleurs) peuvent produire une chute de tension le long de l'inductance de la ligne d'alimentation.

I.1.3.2 effets sur les systèmes de télécommunication et les circuits de télécommande

- Dégradation de la qualité des informations causées par le bruit induit au niveau de la ligne de télécommunication .
- Mauvais fonctionnement des relais de télécommande.
- Des fonctionnements intempestifs des systèmes de protection.

I.1.3.3 effets sur les équipements de la clientèle

- Des atténuations inopportunes des signaux de télécommande au niveau des récepteurs(déformation de l'image d'un téléviseur).
- Des dysfonctionnements des composantes sensibles de l'électronique.
- Le flicker ou le papillotement de luminosité des lampes qui est instantané.

I.1.3.4 effets sur les instruments de mesure

Les instruments de mesure qui sont calibrés initialement sur une onde sinusoïdale pure peuvent avoir, en présence des harmoniques, des erreurs de mesure suite à la distorsion brusque de l'alimentation.

I.1.3.5 effets sur la tension d'alimentation

Les harmoniques de courant produisent une chute de tension le long de l'inductance de la ligne d'alimentation en provoquant une distorsion de la tension sinusoïdale. Ces chutes de tension peuvent créer des résonances par couplage capacitif.

I.1.4 Réglementation

Afin d'éviter le mauvais fonctionnement des appareils électriques, les distributeurs d'énergie électrique ont été amenés à émettre des recommandations. En France les études effectuées par EDF ont conduit à préconiser les niveaux limites suivants pour les perturbations harmoniques de tension [9] :

Harmoniques pairs : $V_h/V_1 < 0,6\%$

Harmoniques impairs : $V_h/V_1 < 1\%$

Taux de distorsion global THD40 < 1,6%

Au delà de ces valeurs, il est nécessaire d'installer des dispositifs de filtrage ou bien dans certains cas extrêmes d'augmenter la puissance de court-circuit du réseau.

I.1.5 Traitements traditionnels des harmoniques

I.1.5.1 surdimensionnement ou déclassement de l'installation électrique

On n'élimine pas les courants harmoniques, on ne fait qu'éviter leurs effets néfastes pendant une période limitée.

Pour les installations nouvelles, on surdimensionne tous les éléments. Dans le cas d'installations existantes, on décline les équipements de distribution électrique soumis aux courants harmoniques [4].

I.1.5.2 Filtres passifs

Pour atténuer la perturbation harmonique, depuis son origine, les filtres passifs sont traditionnellement employés. Leur principe consiste à dériver le courant harmonique dans une faible impédance placée en parallèle avec la charge polluante pour éviter sa propagation dans le réseau.

Deux types de filtre passif sont généralement utilisés :

- ◆ Le filtre résonnant donné à la figure 1.1, qui présente une impédance très faible à la fréquence d'accord. Ce filtre est très sélectif et sert à atténuer fortement les harmoniques de rang déterminé, généralement le 5 et le 7.

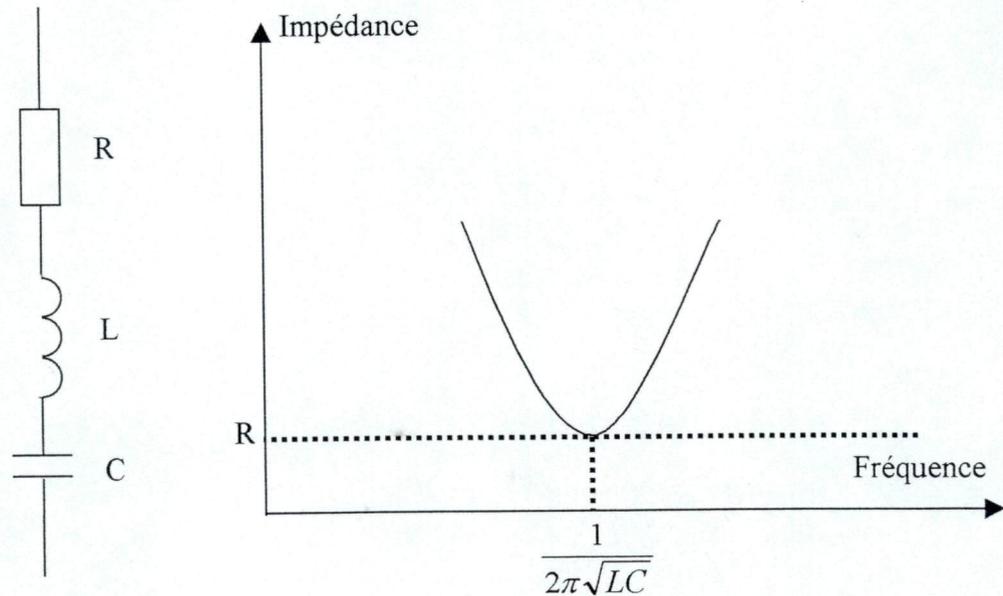


Figure 1.1 Filtre passif résonnant

- ◆ Le filtre amorti donné à la figure 1.2, qui possède une impédance faible pour les harmoniques aux fréquences supérieures ou égales à sa fréquence d'accord. Il est généralement utilisé pour l'atténuation de l'ensemble des harmoniques de rang élevé (>11).

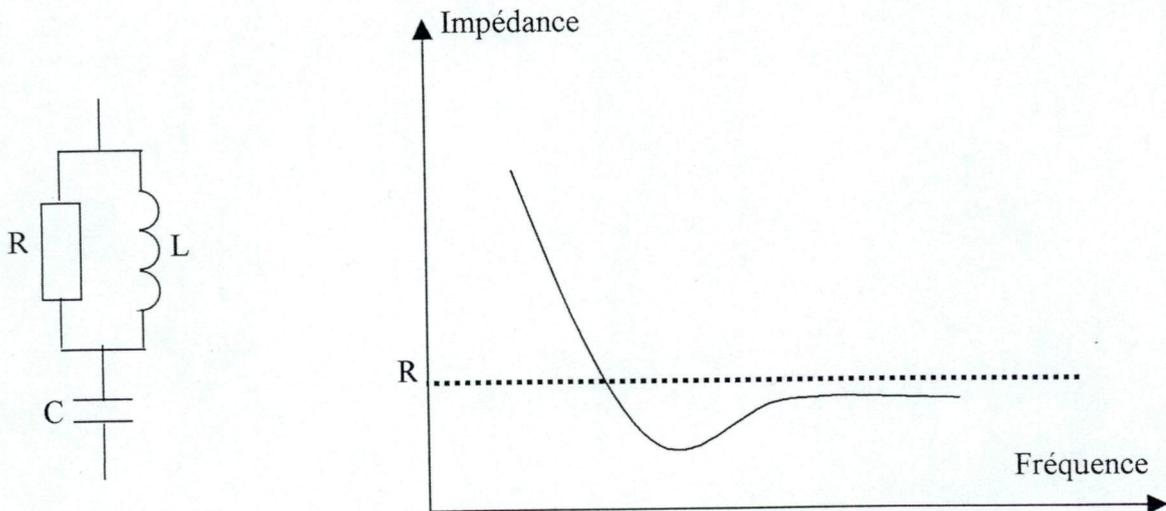


Figure 1.2 Filtre passif amorti

Les filtres passifs sont des moyens faciles et efficaces si les harmoniques à filtrer sont localisés dans une bande de fréquence étroite et l'impédance harmonique du réseau élevée.

Cependant, si ces conditions favorables ne sont pas réunies ces dispositifs deviennent plus complexes, onéreux et moins efficaces. Ceci est lié aux aspects suivants[10] :

- ◆ Leur incapacité de couvrir une large bande de fréquence, d'où l'utilisation de plusieurs filtres de rang d'accord différents.
- ◆ Un changement de la fréquence d'accord même petit, dû aux variations des caractéristiques de leurs éléments surtout les condensateurs (température, vieillissement) peut considérablement affecter leur capacité de filtrage.
- ◆ Leur efficacité dépend de l'impédance du réseau, mal connue et susceptible de varier.
- ◆ Le caractère inductif de l'impédance du réseau peut provoquer des résonances entre celui-ci et le filtre passif.

I.2 La compensation active des harmoniques

L'apparition de nouveaux composants semi-conducteurs, comme les thyristors GTO et les transistors IGBT, a permis d'envisager de nouvelles solutions aux perturbations des réseaux notamment la pollution harmonique. Dans certains pays comme le Japon, les filtres passifs traditionnellement utilisés pour la compensation des harmoniques sont de plus en plus abandonnés au profit de nouveaux dispositifs appelés filtres actifs de puissance. Jusqu'à présent plusieurs types de filtre actif ont été proposés et étudiés, mais peu d'entre eux ont été mis en pratique. Dans ce paragraphe , nous présentons une classification des filtres actifs selon différents critères.

I.2.1 Classification selon la configuration

I.2.1.1 Filtre actif parallèle

Le filtre actif connecté en parallèle sur le réseau (figure 1.3) est le plus souvent contrôlé comme un générateur de courant [11,12,13]. Il injecte dans le réseau des courants harmoniques égaux à ceux absorbés par la charge polluante, mais en opposition de phase avec ceux-ci. Le courant coté réseau sera ainsi sinusoïdal, cependant la tension au point de raccordement ne le sera que si la tension ne contient pas d'harmoniques. Ainsi l'objectif d'un filtre parallèle générateur de courant consiste à empêcher les courants harmoniques absorbés

par une charge non linéaire de circuler à travers l'impédance du réseau située en amont du point de connexion du filtre. Le dimensionnement du filtre actif est lié au courant harmonique à générer. La majorité des filtres actifs parallèles actuellement installés sur les réseaux électriques fonctionnent selon ce principe.

Le filtre actif parallèle peut être aussi contrôlé comme un générateur de tension [12,14]. Dans ce cas, son rôle est de maintenir la tension sinusoïdale quel que soit le courant de la charge polluante et quelle que soit la qualité de la tension réseau.

L'inconvénient de cette stratégie réside dans le fait que le filtre actif est traversé par le courant harmonique de la charge et par un courant harmonique venant du côté source. Ce dernier, lié à l'impédance du réseau, est mal connu et peut avoir des valeurs élevées qui risquent d'endommager le filtre actif. Cette stratégie s'adapte donc mieux dans le cas où l'impédance du réseau est forte.

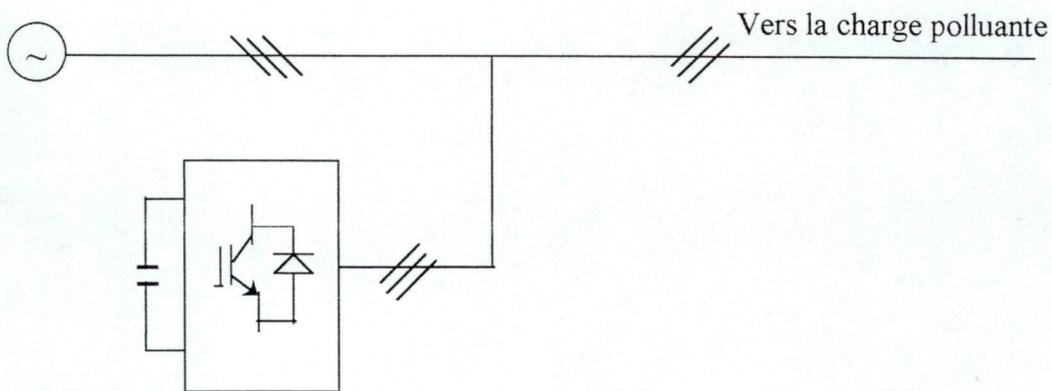


Figure 1.3 Filtre actif parallèle

I.2.1.2 Filtre actif série

Cette configuration est donnée à la figure 1.4. Le filtre actif se comporte comme une source de tension qui s'oppose à une éventuelle tension harmonique venant de la source et également à celle provoquée par la circulation du courant harmonique de la charge polluante à travers l'impédance du réseau. Ainsi la tension aux bornes de la charge polluante est purement sinusoïdale, ce qui n'est pas le cas du courant dans le réseau car celui-ci est traversé par la totalité du courant de la charge.

Le filtre actif série s'adapte bien à la protection des charges sensibles contre les perturbations provenant du réseau tels que le déséquilibre et les creux de tension.

Son principal inconvénient est qu'il nécessite une protection contre les surintensités, en cas de court-circuit de la charge, ce qui n'est pas facile à réaliser.

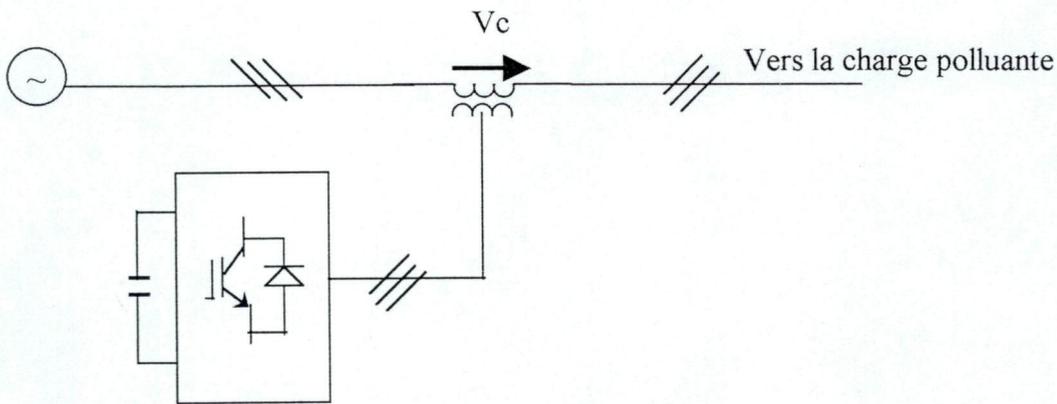


Figure 1.4 Filtre actif série

Le tableau ci-après donne une comparaison succincte des propriétés des deux filtres actifs parallèle et série :

| | Filtre actif parallèle | Filtre actif série |
|--|---|---|
| Configuration | En parallèle avec la charge polluante | En série avec la charge polluante |
| Fonctionnement | En générateur de courant harmonique | En générateur de tension harmonique |
| Type de charge à compenser | Redresseurs à diodes ou à thyristors avec charge inductive et cycloconvertisseurs | Redresseurs à diodes de forte puissance avec charge capacitive. Charges sensibles. |
| Autres fonctions | Compensation du réactif | Régulation de la tension |
| Puissance du filtre / puissance de la charge | De l'ordre de 30% | Inférieur à 10% |
| Situation présente | Déjà commercialisé | Test au niveau laboratoire |

Tableau 1.1 Comparaison des deux configurations du filtre actif série et parallèle

I.2.1.3 Filtre actif mixte série et parallèle

D'après ce qui précède, ni l'un ni l'autre des deux types de filtre actif n'est capable de réaliser un filtrage complet donnant une tension sinusoïdale coté charge et un courant coté réseau exempt d'harmonique. Cet objectif peut être réalisé en utilisant un filtre actif mixte composé de deux filtres actifs, l'un connecté en série avec la charge l'autre en parallèle avec celle-ci, comme le montre la figure 1.5.

Les tensions harmoniques provenant du réseau sont éliminées par le filtre série fonctionnant en générateur de tension tandis que les courants harmoniques absorbés par la charge polluante sont compensés par le filtre actif parallèle, générateur de courant.

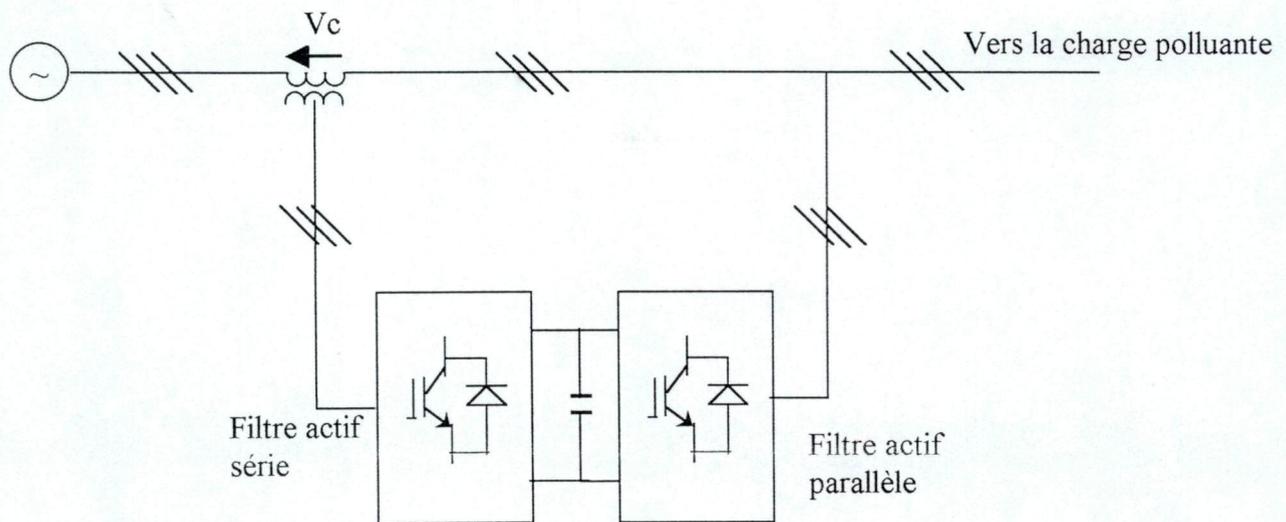


Figure 1.5 Combinaison d'un filtre actif parallèle avec filtre actif série.

Avec cette configuration, le courant injecté au réseau ainsi que la tension aux bornes de la charge ne contiennent pas de composantes harmoniques et ceci quelle que soit la perturbation de la charge et quelle que soit la qualité de la tension réseau [15].

Cette configuration s'adapte bien à la compensation des équipements engendrant différentes sortes de perturbations à la fois, tel que le four à arc. Selon certains auteurs, elle constituera la principale application des filtres actifs à l'avenir [16].

Cependant la réalisation pratique de ce type de filtre reste jusqu'à présent très onéreuse.

I.2.1.4 Filtres hybrides actifs et passifs

Malgré la grande attention portée sur les filtres actifs, leur application industrielle reste limitée à certains pays comme le Japon où les solutions traditionnelles sont inefficaces face à la prolifération des équipements polluants de fortes puissances sur un réseau qui n'est pas

assez puissant partout. L'application industrielle de ces nouveaux dispositifs de filtrage est freinée par leur coût de réalisation toujours plus élevé par rapport à celui des filtres à base d'éléments passifs. En effet, les filtres actifs sont réalisés par les convertisseurs fonctionnant à haute fréquence de commutation.

Afin de réduire le dimensionnement et par conséquent le prix des filtres actifs et ainsi augmenter leur potentialité d'application, l'association de filtres actifs de faibles puissances à des filtres passifs semble être une solution prometteuse. L'autre objectif de cette association est la réduction de la fréquence de commutation des filtres actifs.

Différentes configurations ont été proposées, seules trois d'entre elles sont présentées ici :

- filtre actif série associé à un filtre passif parallèle ;
- filtre actif en série avec filtre passif parallèle ;
- filtre actif parallèle associé à un filtre passif parallèle.

a) Filtre actif série avec filtre passif parallèle

Le schéma de principe est donné à la figure 1.6 [17]. Le filtre actif est le siège d'une chute de tension proportionnelle à la composante harmonique du courant réseau. Il peut alors être modélisé par une résistance R de valeur élevée aux fréquences harmoniques et nulle à la fréquence fondamentale.

Le filtre passif quant à lui est destiné à compenser tous les courants harmoniques de la charge polluante. Il est donc dimensionné en conséquence.

Le rôle du filtre actif série n'est pas la compensation directe des harmoniques, mais l'augmentation de l'efficacité du filtre passif en empêchant le courant harmonique de circuler vers le réseau. En outre, le filtre actif permet de réduire les risques d'antirésonance entre les éléments du filtre passif et l'impédance du réseau.

Le dimensionnement en puissance du filtre actif reste faible bien qu'il soit traversé par le courant fondamental de la charge. En effet, la tension à ces bornes à cette fréquence est très faible. Cependant, en cas de court-circuit de la charge, le filtre actif doit supporter toute la tension du réseau et est traversé par la totalité du courant de court-circuit.

Pour avoir une idée du gain en puissance du filtre actif, citons une application dans laquelle pour compenser les harmoniques d'un redresseur à thyristors de 20 kVA, un filtre passif de 10 kVA a été associé à un filtre série de 0.45 kVA [2]. Cette puissance serait de 7 kVA si ce système était remplacé par un filtre parallèle.

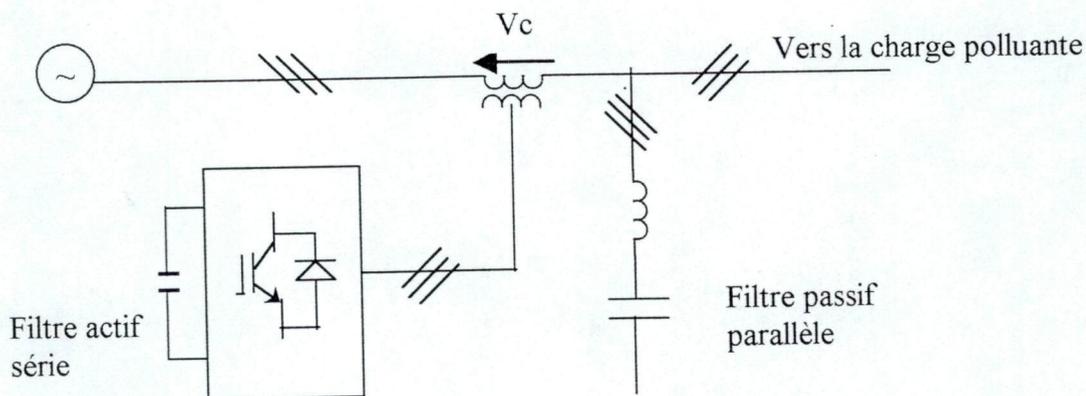


Figure 1.6 Combinaison d'un filtre actif série avec un filtre passif parallèle

b) Filtre actif en série avec filtre passif

Une autre configuration de l'association de filtres actif et passif est représentée à la figure 1.7 [17]. Le filtre actif est mis en série avec le filtre passif, le tout connecté en parallèle sur le réseau. Cette combinaison présente, par rapport à la précédente, les deux avantages suivants :

- Le dimensionnement en puissance du filtre actif est encore plus réduit du fait que le courant qui le traverse est plus faible.
- Le filtre actif est à l'abri d'un éventuel court-circuit de la charge.

Le filtre actif fonctionne selon le même principe que celui de la configuration précédente et présente une résistance nulle pour la fréquence fondamentale et une résistance très grande pour les harmoniques de la source.

Le résultat de filtrage est pratiquement identique à celui obtenu précédemment. Le filtre actif empêche donc le courant harmonique de circuler dans le réseau. De plus, dans le cas d'une

résonance parallèle, il agit comme une résistance d'amortissement. Toutefois, la tension de la charge polluante est affectée par des tensions harmoniques venant du coté réseau.

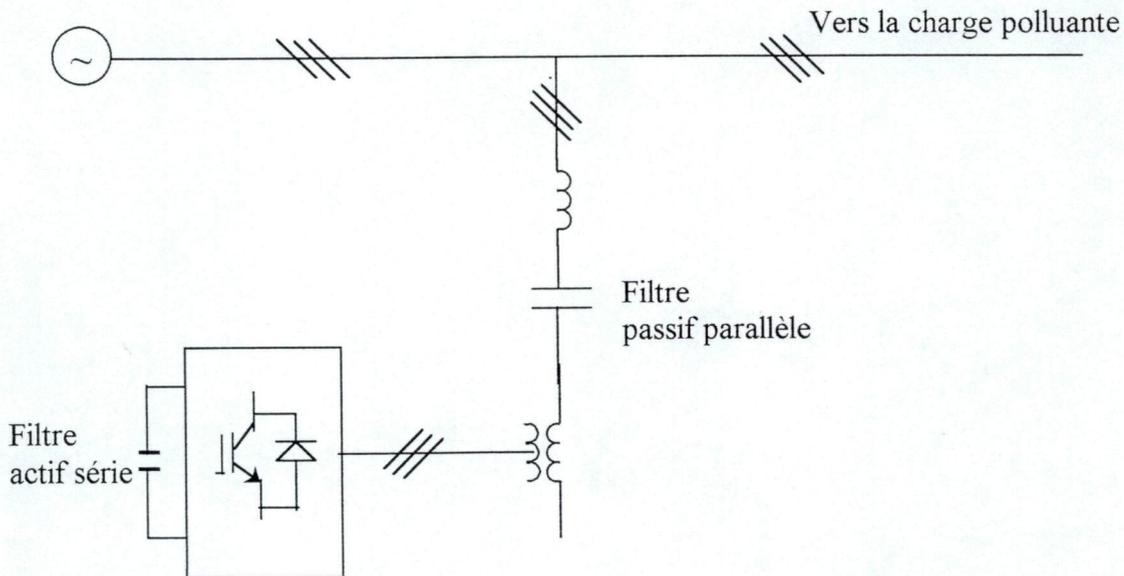


Figure 1.7 Mise en série d'un filtre actif avec un filtre passif parallèle

c) Filtre actif parallèle et filtre passif parallèle

Ce système de filtrage combiné est composé d'un filtre passif passe-haut et d'un filtre actif générateur de courant, connectés en parallèle avec le réseau comme le montre la figure 1.8. Le rôle du filtre actif est la compensation des courants harmoniques basses fréquences injectés par la charge polluante. Le filtre passif, raccordé sur une fréquence élevée, élimine les harmoniques hautes fréquences y compris ceux créés par le filtre actif [18].

Le filtre actif peut alors fonctionner avec une fréquence de commutation faible(par exemple moins de 1,5 kHz s'il est destiné au filtrage des harmoniques en déca de 350 Hz).

Le dimensionnement du filtre passif est également réduit puisque l'amplitude des harmoniques de rang élevé (supérieur à 11) est généralement beaucoup moins importante que celle des harmoniques de rang bas (inférieur à 11). En outre, le problème de résonance

parallèle peut être résolu grâce à un bon amortissement et les pertes dans le filtre passif seront faibles.

Ce type de filtrage combiné a déjà été appliqué à la compensation des courants harmoniques injectés par un cycloconvertisseur de forte puissance.

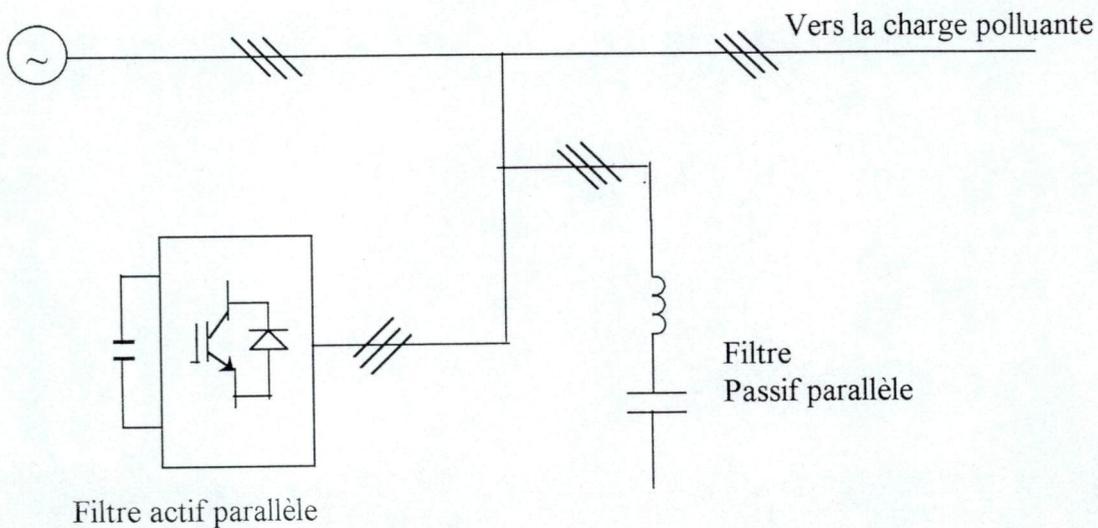


Figure 1.8 Filtres actif et passif parallèles

Le tableau ci-après donne une comparaison des propriétés des trois types de filtre hybride présentés précédemment. Il montre que la troisième configuration est déjà dans un stade avancé d'application. cependant la première et la deuxième configuration semblent être des solutions prometteuses puisque elles peuvent être réalisées à faible coût à partir d'un filtre passif déjà installé.

| | | | |
|--|--|--|--|
| Type de filtre hybride | filtre actif série avec filtre passif parallèle | filtre actif en série avec filtre passif parallèle | filtre actif parallèle avec filtre passif parallèle |
| Rôle du filtre actif | isolateur des harmoniques | isolateur des harmoniques | compensateur des harmoniques de rang faible |
| Fréquence de commutation du filtre actif | élevée | élevée | faible |
| Dimensionnement du filtre actif | faible | très faible | important |
| Rôle du filtre passif | compensation de tous les harmoniques | compensation de tous les harmoniques | compensateur des harmoniques de rang élevé |
| Dimensionnement du filtre passif | important | important | faible |
| Avantages | <ul style="list-style-type: none"> • peut être appliqué à des filtres passifs déjà installés • le courant harmonique ne circule pas dans le filtre actif | <ul style="list-style-type: none"> • peut être appliqué à des filtres passifs déjà installés • protection facile de la partie active | <ul style="list-style-type: none"> • peut être appliqué à des filtres passifs déjà installés • permet de contrôler la puissance réactive |
| Problèmes | <ul style="list-style-type: none"> • ne permet pas le contrôle de la puissance réactive • protection difficile de la partie active contre les courts-circuits de la charge | <ul style="list-style-type: none"> • ne permet pas le contrôle de la puissance réactive | <ul style="list-style-type: none"> • l'efficacité du filtre passif dépend de l'impédance du réseau |

Tableau 1.2 Comparaison des différentes configuration de filtrage hybride

I.2.2 Classification selon la stratégie de commande

La stratégie de commande définit l'objectif du filtre actif et détermine ses caractéristiques de filtrage en régime permanent comme en régime transitoire.

Une stratégie de commande permet de décider :

- Quel courant ou tension harmonique doit générer le filtre actif pour réaliser le filtrage ?
- Quelle méthode d'identification peut on utiliser pour extraire ce courant ou cette tension harmonique ?

Pour le premier point, on distingue trois principes :

Le premier est basé sur la génération du courant harmonique de la charge polluante qui sera utilisé dans la commande des filtres actifs parallèles générateurs de courant.

Le deuxième est basé sur la détection du courant harmonique dans le réseau, qui servira dans la commande des filtres actifs séries installés seuls ou en association avec des filtres passifs.

Le troisième consiste à générer la tension harmonique aux bornes de la charge polluante. Ce principe est appliqué dans la commande des filtres actifs mis en série avec des filtres passifs dont le but est de maintenir la tension de la charge sinusoïdale.

En ce qui concerne le second point, plusieurs méthodes permettant la séparation des composantes harmoniques de la composante fondamentale ont été développées.

I.2.3 Classification selon la structure électrotechnique de l'onduleur

Les filtres actifs sont en général réalisés à partir d'un convertisseur à commutation commandée. De ce point de vue on distingue deux structures de filtre actif. Celle à base d'un onduleur de tension et celle qui fait appel à un onduleur de courant.

La structure tension dans le filtrage actif est de loin la plus répandue, et presque la totalité des filtres actifs mis en pratique sont à base d'onduleur de tension. Les pertes excessives de la structure courant surtout dans sa bobine de stockage d'une part et l'arrivée sur le marché des IGBT, plus adaptés à la structure tension, d'autre part, constituent les raisons principales de cette préférence.

I.3 Autres applications des filtres actifs

Ces derniers temps, les filtres actifs, initialement proposés pour l'atténuation des harmoniques, voient leur fonction s'élargir à la compensation d'autres perturbations.

Ci-après nous présentons le principe de fonctionnement de quelques dispositifs de compensation active de perturbations tels que le déséquilibre du réseau, le flicker et les creux de tension

I.3.1 Compensation du déséquilibre du réseau

L'objectif du filtre actif est de rendre la tension de la charge équilibrée, malgré la dissymétrie de la tension réseau.

Le dispositif de compensation est constitué de trois onduleurs monophasés. Chaque onduleur est connecté au réseau par l'intermédiaire d'un transformateur dont le secondaire est monté en série avec une phase de la charge comme le montre la figure 1.9. Par sa configuration, ce dispositif ne se distingue pas de filtre actif série.

Le principe de compensation consiste à injecter une tension triphasée pour contrer la composante inverse de la tension réseau et ajuster, en même temps, l'amplitude de la composante directe afin d'avoir une tension constante [19]. Le calcul des tensions de référence fait appel aux composantes symétriques et au taux d'inverse défini précédemment.

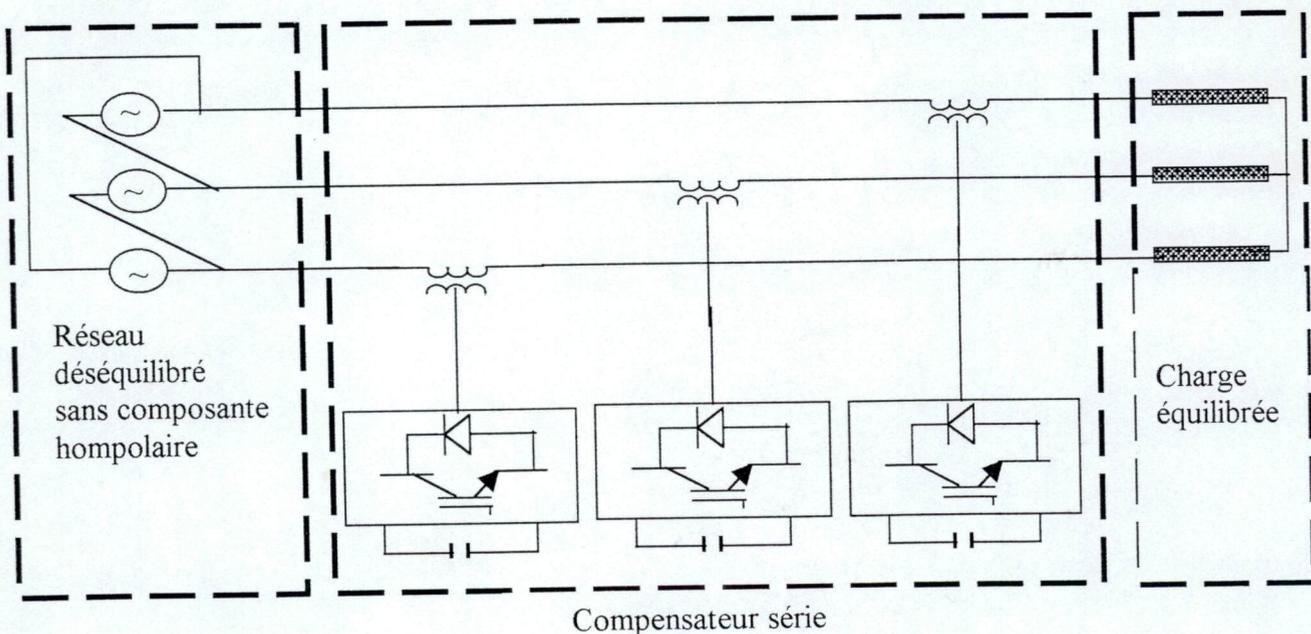


Figure 1.9 Compensateur du déséquilibre du réseau par un dispositif actif

I.3.2 Compensation de flicker

Comme nous avons déjà mentionné, la principale source des fluctuations rapides de la tension est le four à arc. Cependant cet équipement engendre simultanément plusieurs types de perturbations, tels que le déséquilibre des courants et dégradation du facteur de puissance. Par conséquent, le dispositif que nous allons présenter ici tient compte de la compensation de ces perturbations.

La figure 1.10 montre un dispositif combiné de deux parties série et parallèle destiné à la compensation des perturbations émises par un four à arc [20].

- la partie shunt, constituée d'un stato-compensateur, se charge essentiellement d'équilibrer la charge vue par le réseau, de corriger le facteur de puissance et de compenser les fluctuations de l'énergie réactive.
- La partie série du dispositif, de structure identique à un filtre actif série, est principalement chargée de la compensation des variations rapides, de 5 à 25 Hz, de la tension. Elle compense les fluctuations de la puissance active dues aux variations de la résistance du four à arc et se distingue donc du filtre actif par sa stratégie de commande.

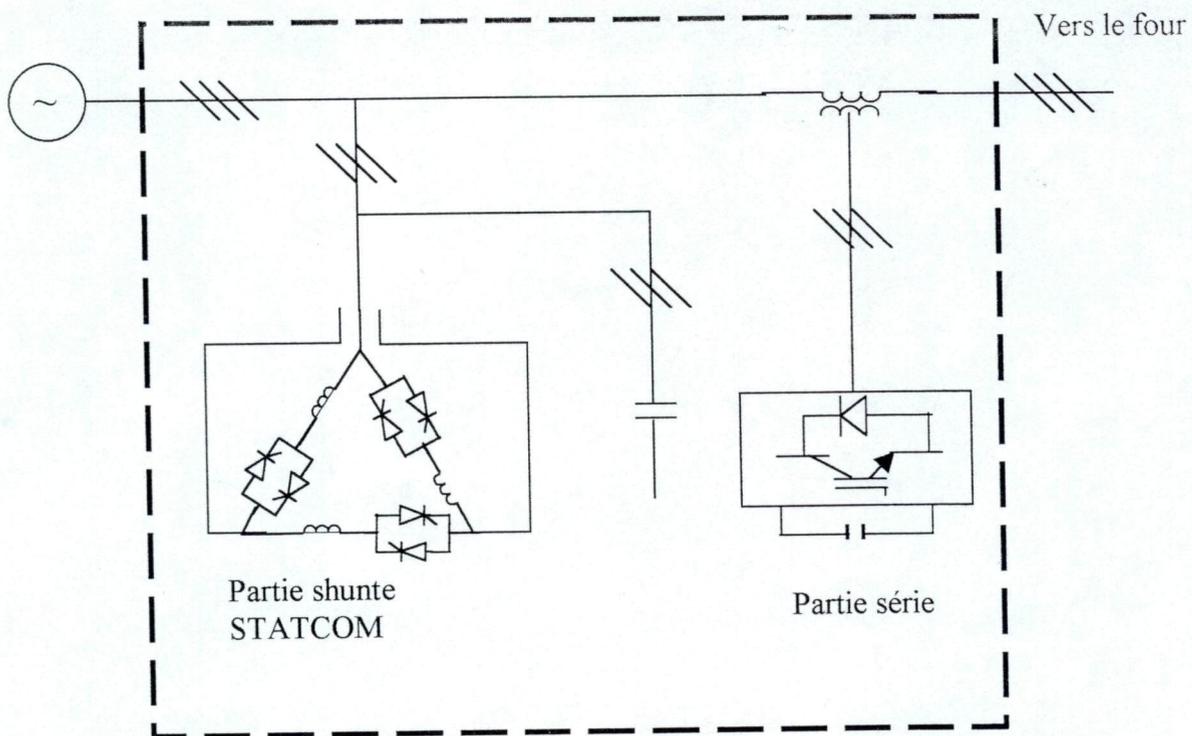


Figure 1.10 Compensateur mixte pour les fours à arc

I.3.3 Compensation des creux de tension

Les creux de tension sont des phénomènes aléatoires et il n'existe pratiquement aucun remède face à ce type de perturbation. Cependant leur effet sur certaines charges sensibles est important (pertes d'informations, interruption des communications, arrêt des processus automatiques....)

Un dispositif actif à configuration série a récemment été proposé [21]. Il permet de protéger une charge monophasée sensible contre les creux de tension. Le dispositif détecte la valeur maximale de la tension du côté réseau puis, à partir d'une alimentation sans interruption connectée à l'entrée du convertisseur, ajuste la tension aux bornes de la charge en injectant une tension complémentaire.

Ce dispositif est capable de réguler la tension aux bornes de la charge en une demi période après l'apparition du creux.

Conclusion

Comme nous avons pu constater, du fait de la prolifération sur les réseaux des charges non linéaires, la contamination harmonique prend de plus en plus d'ampleur à tel point que dans certains pays fortement industrialisés, les filtres passifs traditionnellement utilisés ne donnent plus de satisfaction.

Deux nouveaux dispositifs de filtrage appelés filtres actifs réalisés essentiellement à partir d'un convertisseur à IGBT ou à GTO ont été développés, étudiés et dans certains cas installés sur les réseaux électriques.

Afin de lutter efficacement contre la pollution harmonique résultante, tous les moyens présentés dans ce chapitre peuvent être employés seuls ou simultanément.

Les combinaisons de filtre actif et passif s'avèrent être des configurations prometteuses et assurent un compromis entre le coût et l'efficacité de compensation. Cependant, le filtre actif parallèle reste actuellement le plus répandu. Il présente des avantages certains et un potentiel de développement important.

En plus de filtrage des harmoniques, les filtres actifs sont activement recherchés et étudiés pour la compensation d'autres types de perturbation tels que le déséquilibre du réseau, le flicker et les creux de tension.

Ce mémoire sera consacré à l'étude théorique de filtres actifs parallèles à structure tension, en vue d'une compensation globale des harmoniques pour les systèmes triphasés.

Chapitre II

Différentes méthodes d'identification des courants harmoniques

Introduction

Le filtre actif doit son efficacité et surtout sa capacité d'adaptation aux variations de la charge polluante à son circuit de commande capable de réaliser les deux fonctions suivantes :

- ◆ Identifier les références à partir du spectre harmonique du courant de la charge polluante.
- ◆ Contrôler le convertisseur afin de reproduire ces courants harmoniques.

Ce chapitre présente les divers algorithmes permettant l'identification des composantes harmoniques du courant d'une charge non linéaire à partir du calcul des puissances harmoniques.

D'autres méthodes basées sur la soustraction de la partie active du courant fondamental du courant total peuvent être utilisées dans le cas où l'objectif du filtre actif est la compensation à la fois de l'énergie réactive et des harmoniques.

II.1 Méthodes d'identification des références du filtre actif

Considérons que le filtre actif est appelé à compenser la perturbation harmonique provoquée par une charge absorbant un courant non sinusoïdal, même si elle est alimentée sous tension sinusoïdale. La figure 2.1 montre le schéma de raccordement d'un filtre actif parallèle sur le réseau.

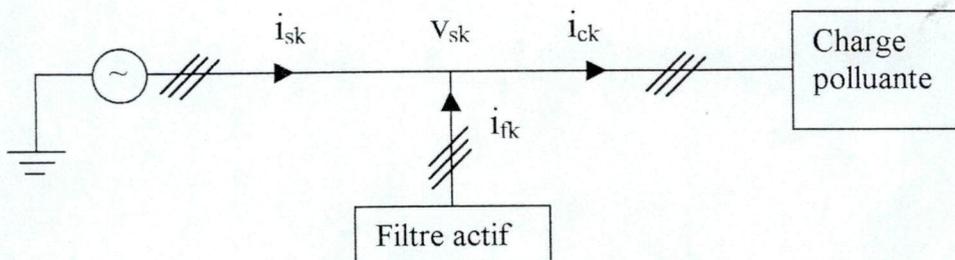


Figure 2.1 Schéma de raccordement du filtre actif parallèle sur le réseau

Le courant de la charge polluante i_{ck} peut être subdivisé en deux composantes : une composante à la fréquence fondamentale, et des composantes harmoniques aux fréquences

multiples de celle-ci . Le courant fondamental comporte à son tour deux parties distinctes, la partie active et la partie réactive.

Le courant i_{ck} ($k=1,2,3$) peut donc être représenté en série de Fourier par l'expression suivante :

$$i_{ck}(t) = \sqrt{2}I_{cak} \cos[\omega t - (k-1)\frac{2\pi}{3}] + \sqrt{2}I_{ckr} \sin[\omega t - (k-1)\frac{2\pi}{3}] + \sum_{h=2}^{\infty} \sqrt{2}I_{ck,h} \cos[h\omega t + \phi_h - h(k-1)\frac{2\pi}{3}]$$

(II.1) avec :

I_{cak} la valeur efficace du courant fondamental actif en phase avec la tension d'alimentation ;

I_{ckr} la valeur efficace du courant fondamental réactif en quadrature avec la tension d'alimentation ;

$I_{ck,h}$ la valeur efficace du courant harmonique au rang h ;

ϕ_h la phase à l'instant $t=0$ de l'harmonique h de la 1^{ère} phase.

Cette représentation du courant consommé par la charge polluante aide à expliquer d'une manière simple le rôle que peut jouer un filtre actif parallèle.

D'après la figure 2.1 nous avons :

$$i_{sk} = i_{ck} - i_{fk} \quad (II.2)$$

On veut consommer au niveau du réseau un courant i_{sk} sinusoïdal, le filtre actif doit générer un courant i_{fk} égal à la somme des harmoniques du courant i_{ck} consommé par la charge polluante, soit :

$$i_{fk} = \sum_{h=2}^{\infty} i_{ck,h} \quad (II.3)$$

où $i_{ck,h} = \sqrt{2}I_{ck,h} \cos[h\omega t + \phi_h - h(k-1)\frac{2\pi}{3}]$ est la composante harmonique au rang h .

Si en plus de filtrage des harmoniques on veut compenser l'énergie réactive consommée par la charge, le courant du filtre actif doit contenir, en plus des harmoniques, la partie réactive de la composante fondamentale du courant i_{ck} . Nous avons dans ce cas :

$$i_{fk} = \sqrt{2}I_{ckr} \sin[\omega t - (k-1)\frac{2\pi}{3}] + \sum_{h=2}^{\infty} i_{ck,h} \quad (II.4)$$

Il est également possible de ne compenser que l'énergie réactive. Le courant i_{jk} que doit générer le filtre actif est alors :

$$i_{jk} = \sqrt{2}I_{crk} \sin[\omega t - (k-1)\frac{2\pi}{3}] \quad (\text{II.5})$$

Un filtre actif est principalement composé d'un onduleur commandé et les courants donnés par (II.3), (II.4) où (II.5) constituent en réalité ses références et à ce titre doivent être connus à tout moment. Cependant aucune des composantes du courant i_{ck} , décrit par l'équation (II.1), n'est accessible d'une manière directe. La seule grandeur, liée à ces composantes, accessible par mesure directe est le courant total consommé par la charge polluante. A partir de cette mesure, le filtre actif doit donc être capable d'identifier ses références à l'aide de son circuit de commande.

II.1.1 Méthode basée sur le principe du courant actif

Cette méthode est basée sur la décomposition de la puissance absorbée par une charge non linéaire en puissance active, réactive et déformante[22].

II.1.1.1 Correspondance entre courants et puissances

Le courant total de la charge polluante i_{ck} peut être subdivisé en deux parties : le courant actif et le courant non-actif. La puissance active P résulte du courant actif noté i_{cak} qui est proportionnel à la tension v_{sk} si celle-ci n'est pas déformée. On peut donc écrire :

$$i_{cak} = \frac{P}{\sum_{k=1}^3 V_{sk}^2} \cdot v_{sk} = G \cdot v_{sk} \quad (\text{II.6})$$

où G est la conductance équivalente par phase de la charge.

Le courant non-actif noté i_{cnk} est obtenu par la soustraction de i_{cak} du courant total i_{ck} , soit :

$$i_{cnk} = i_{ck} - i_{cak} \quad (\text{II.7})$$

Le courant non-actif se décompose en parties réactive et déformante. Le courant réactif, en phase avec la tension en quadrature v'_{sk} , s'obtient, à partir de la puissance réactive Q , par

l'expression suivante :

$$i_{cnk} = \frac{Q}{\sum_{k=1}^3 V_{sk}^2} \cdot v'_{sk} = Y \cdot v'_{sk} \quad (\text{II.8})$$

où Y est la susceptance équivalente par phase de la charge.

La composante déformante qui représente la somme de tous les courants harmoniques $i_{ck,h}$ s'obtient en retranchant les courants actif et réactif du courant total. Nous avons alors :

$$\sum_{h=2}^{\infty} i_{ck,h} = i_{ck} - i_{cak} - i_{crk} \quad (\text{II.9})$$

Ainsi chacune des trois composantes du courant absorbé par une charge non linéaire peut être calculé à partir de la connaissance de la tension au point de raccordement, supposé sinusoïdale, et du courant total. Ceci nous permet la représentation de la charge par le circuit équivalent de figure 2.2

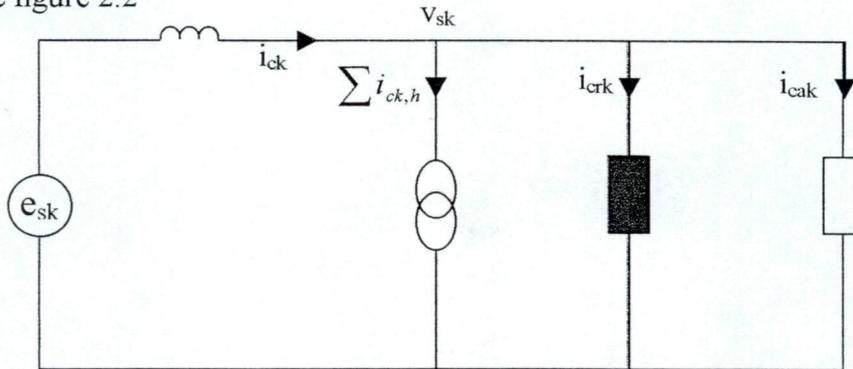


Figure 2.2 Modélisation d'une charge non-linéaire

II.1.1.2 Algorithme d'identification

Les calculs donnés par les équations (II.6) à (II.9) peuvent être effectués par l'algorithme illustré sur la figure 2.3. Cet algorithme permet d'obtenir, à partir de la mesure du courant de la charge polluante, les courants harmoniques que doit générer le filtre actif.

On résume cet algorithme de la façon suivante :

- les courants de la charge i_{ck} ainsi que les tensions v_{sk} sont obtenus par mesure directe.
- En partant de la mesure des $v_{sk}(k=1,2,3)$, on obtient les tensions en quadrature v'_{sk} par un circuit déphaseur.
- On obtient les puissances P et Q par intégration numérique ou en utilisant des filtres passe bas.

Remarques

1. Si le système des tension V_{sk} ($k=1,2,3$) est équilibré, les tension en quadrature V'_{sk} peuvent également être obtenues à partir des tensions composées par :

$$[V'_{s1}, V'_{s2}, V'_{s3}] = \left[\frac{(V_{s2} - V_{s3})}{\sqrt{3}}, \frac{(V_{s3} - V_{s1})}{\sqrt{3}}, \frac{(V_{s1} - V_{s2})}{\sqrt{3}} \right]$$

2. Il est à noter que la puissance P ne peut être associée au seul courant fondamental actif que si les tensions V_{sk} ne contiennent pas de composantes harmoniques. Sinon, P comporte tous les termes résultants de la multiplication des tensions et des courants de même fréquence.

Dans ce cas, le courant i_{cak} obtenu ne correspond pas à la composante active réelle du courant i_{ck} .

Ceci est également valable pour la puissance Q et le courant réactif i_{crk} par conséquent, les harmoniques ainsi identifiées ne sont pas fidèles à ceux du courant i_{ck} .

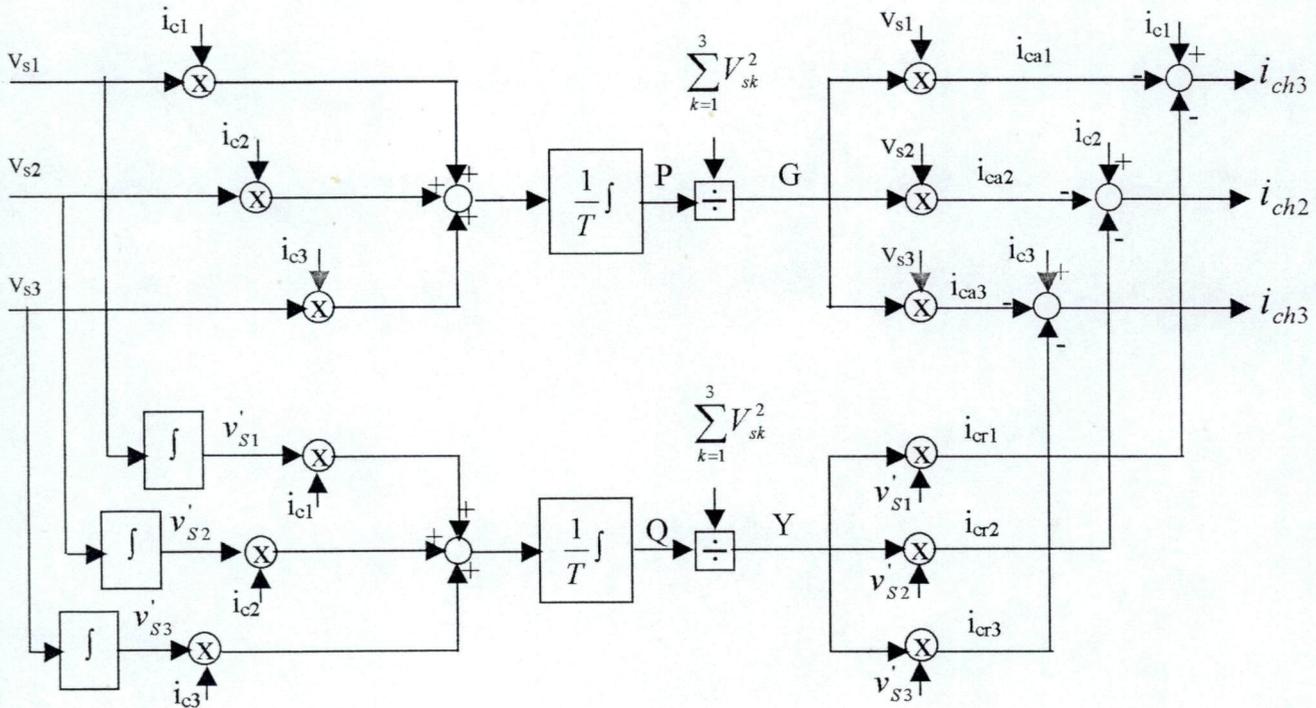


Figure 2.3 Algorithme d'identification des courants harmoniques par la méthode basée sur le principe du courant actif

II.1.1.3 Validation de la méthode basée sur le courant actif

Pour tester l'efficacité de cet algorithme d'identification, un exemple de décomposition d'un courant en composantes active, réactive et harmoniques a été traité à l'aide d'un programme

de simulation. Il s'agit du courant absorbé par un pont redresseur à thyristors débitant dans une charge R-L dont les éléments sont indiqués sur le schéma de la figure 2.4

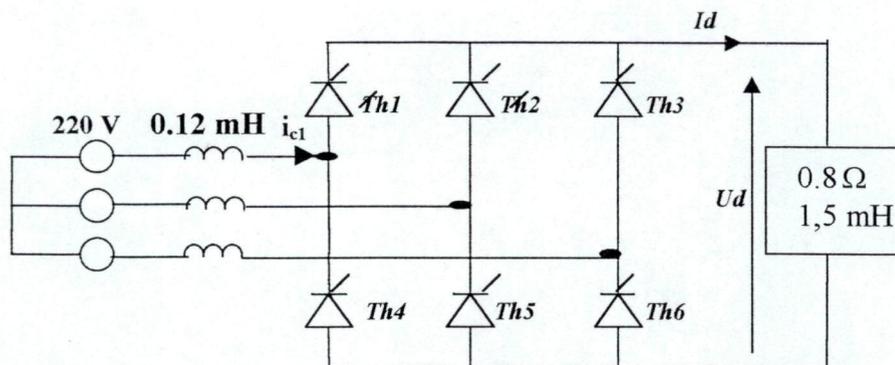


Figure 2.4 Exemple d'application pour une charge non linéaire

La figure 2.5 montre les formes d'onde du courant dans une phase i_{c1} , sa composante active i_{ca1} , sa composante réactive i_{cr1} ainsi que la somme de ses harmoniques $i_{c1,h}$.

Le courant actif est en phase avec la tension du réseau, tandis que le courant réactif est en quadrature avec celle-ci.

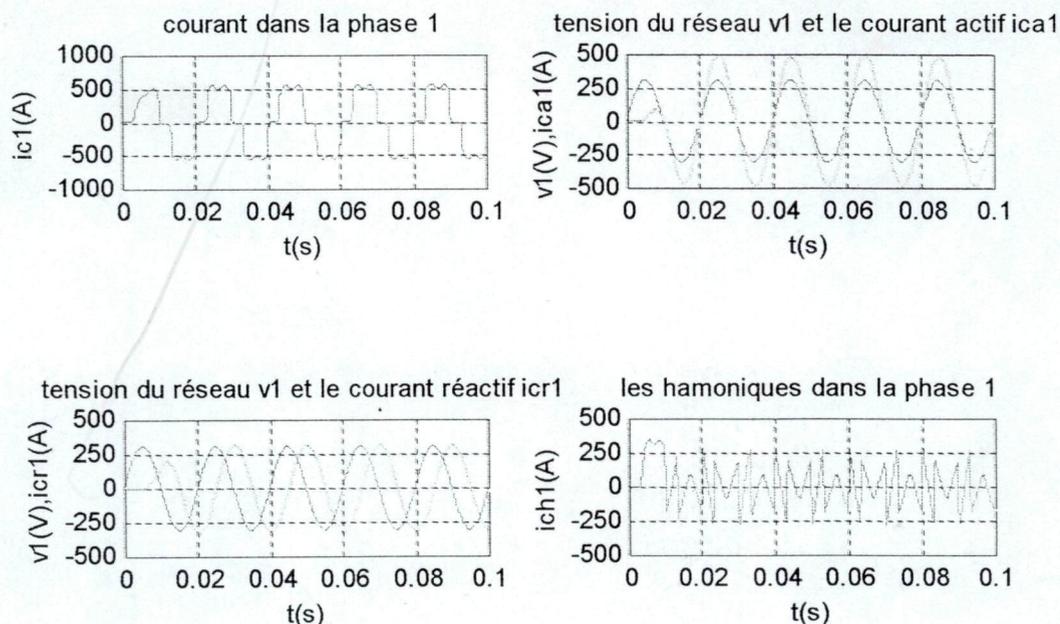


Figure 2.5 Les courants fondamental actif, réactif et harmonique du courant i_{c1} déterminés par la méthode basée sur le principe du courant actif

II.1.2 Méthode des puissances instantanées

Cette méthode d'identification des courants harmoniques, plus simple, consiste à éliminer la composante continue des puissances active et réactive instantanées ce qui est relativement facile à réaliser.

On exploite la transformation de concordia pour obtenir les puissances active et réactive et nécessite comme dans la méthode précédente un système triphasé de tensions sinusoïdales à la fréquence fondamentale.

On note respectivement les vecteurs des tensions simples au point de raccordement [Vs] et des courants de charge [ic] d'un système triphasé et équilibré par :

$$[Vs] = \begin{bmatrix} v_{s1} \\ v_{s2} \\ v_{s3} \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad [ic] = \begin{bmatrix} i_{c1} \\ i_{c2} \\ i_{c3} \end{bmatrix} \quad (\text{II.10})$$

La transformation des valeurs triphasées instantanées de la tension et du courant dans le repère des coordonnées $\alpha - \beta$ est donnée par les expressions suivantes :

$$\begin{bmatrix} v_{s\alpha} \\ v_{s\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{s1} \\ v_{s2} \\ v_{s3} \end{bmatrix} \quad (\text{II.11})$$

et pour les courants :

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{c1} \\ i_{c2} \\ i_{c3} \end{bmatrix} \quad (\text{II.12})$$

Les puissances réelle et imaginaire instantanées, notées respectivement P et q, sont définies par la relation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} P \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{s\alpha} & v_{s\beta} \\ -v_{s\beta} & v_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{II.13})$$

En remplaçant les tensions et les courants diphasés par leur homologues triphasés, on obtient :

$$P = v_{s\alpha} i_{c\alpha} + v_{s\beta} i_{c\beta} = v_{s1} i_{c1} + v_{s2} i_{c2} + v_{s3} i_{c3} \quad (\text{II.14})$$

De même, pour la puissance imaginaire on a :

$$q = v_{s\alpha} i_{c\beta} - v_{s\beta} i_{c\alpha} = -\frac{1}{\sqrt{3}} [(v_{s1} - v_{s2}) i_{c3} + (v_{s2} - v_{s3}) i_{c1} + (v_{s3} - v_{s1}) i_{c2}] \quad (\text{II.15})$$

A partir de l'expression (II.13), On posant :

$$\Delta = v_{s\alpha}^2 + v_{s\beta}^2 \quad \text{on a :}$$

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v_{s\alpha} - v_{s\beta} \\ v_{s\beta} v_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ q \end{bmatrix} \quad (\text{II.16})$$

ou alors :

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \left\{ \begin{bmatrix} v_{s\alpha} - v_{s\beta} \\ v_{s\beta} v_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{s\alpha} - v_{s\beta} \\ v_{s\beta} v_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ q \end{bmatrix} \right\} = \begin{bmatrix} i_{c\alpha p} \\ i_{c\beta p} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{c\alpha q} \\ i_{c\beta q} \end{bmatrix} \quad (\text{II.17})$$

avec :

$$i_{c\alpha p} = \frac{v_{s\alpha}}{\Delta} P \quad i_{c\alpha q} = -\frac{v_{s\beta}}{\Delta} q \quad (\text{II.18})$$

$$i_{c\beta p} = \frac{v_{s\beta}}{\Delta} P \quad i_{c\beta q} = \frac{v_{s\alpha}}{\Delta} q \quad (\text{II.19})$$

Les puissances instantanées selon les axes α et β peuvent s'écrire :

$$\begin{bmatrix} P_{\alpha} \\ P_{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{s\alpha} \cdot i_{c\alpha} \\ v_{s\beta} \cdot i_{c\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{s\alpha} i_{c\alpha p} \\ v_{s\beta} i_{c\beta p} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{s\alpha} i_{c\alpha q} \\ v_{s\beta} i_{c\beta q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{\alpha p} \\ P_{\beta p} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P_{\alpha q} \\ P_{\beta q} \end{bmatrix} \quad (\text{II.20})$$

$$P_{\alpha p} = \frac{v_{s\alpha}^2}{\Delta} P \quad P_{\alpha q} = -\frac{v_{s\alpha} v_{s\beta}}{\Delta} q \quad (\text{II.21})$$

$$P_{\beta p} = \frac{v_{s\beta}^2}{\Delta} P \quad P_{\beta q} = \frac{v_{s\alpha} v_{s\beta}}{\Delta} q$$

$P_{\alpha p}$: Puissance instantanée active selon l'axe α .

$P_{\beta p}$: Puissance instantanée active selon l'axe β .

$P_{\alpha q}$: Puissance instantanée réactive selon l'axe α .

$P_{\beta q}$: Puissance instantanée réactive selon l'axe β .

D'après les expressions (21), on peut écrire :

$$P = P_{\alpha p} + P_{\beta p} + P_{\alpha q} + P_{\beta q} = P_{\alpha p} + P_{\beta p} \quad (\text{II.22})$$

L'analyse de l'équation (II.22) nous ramène aux conclusions suivantes :

La somme des puissances instantanées $P_{\alpha p}$ et $P_{\beta p}$ coïncide avec la puissance instantanée dans un circuit triphasé.

La puissance réactive correspond à la partie de la puissance instantanée qui dépend de q . Ces puissances $P_{\alpha q}$ et $P_{\beta q}$ s'annulent entre elles et elles n'apportent aucune contribution au transfert de puissance instantanée entre la source et la charge.

Dans le cas où les tensions sont sinusoïdales et alimentent une charge non linéaire, les puissances instantanées P et q ont pour expression :

$$\begin{aligned} P &= \bar{P} + \tilde{P} \\ q &= \bar{q} + \tilde{q} \end{aligned} \quad (\text{II.23})$$

avec :

\bar{P} : Puissance continue liée à la composante fondamentale active du courant.

\bar{q} : Puissance continue liée à la composante fondamentale réactive du courant.

\tilde{P} et \tilde{q} : Puissances alternatives liées à la somme des composantes harmoniques du courant.

En considérant les équations (II.17) et (II.23), nous pouvons séparer le courant dans le repère $(\alpha - \beta)$ en trois composantes active et réactive à la fréquence fondamentale et la somme des harmoniques. Ceci conduit à :

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \underbrace{\frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} v_{s\alpha} - v_{s\beta} \\ v_{s\beta} v_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{P} \\ 0 \end{bmatrix}}_{\text{Courant Actif}} + \underbrace{\frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} v_{s\alpha} - v_{s\beta} \\ v_{s\beta} v_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{q} \end{bmatrix}}_{\text{Courant réactif}} + \underbrace{\frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} v_{s\alpha} - v_{s\beta} \\ v_{s\beta} v_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{P} \\ \tilde{q} \end{bmatrix}}_{\text{Courants Harmoniques}} \quad (\text{II.24})$$

Il est évident, d'après la relation (II.24), que pour identifier une des trois composantes, par exemple les courants harmoniques, les parties alternatives des puissances réelle et imaginaire doivent être séparées des parties continues. Cette séparation peut être réalisée en utilisant l'un des deux artifices de filtrage illustrés sur la figure 2.6.

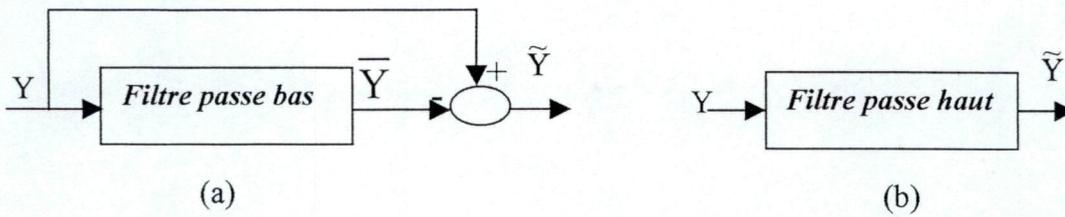


Figure 2.6 Schéma de principe des filtres utilisés pour l'extraction des composantes alternatives de P et q.

Les courants harmoniques triphasés $i_{ck,h}$ ($k=1,2,3$) sont obtenues à partir des courants diphasés $i_{c\alpha h}$ et $i_{c\beta h}$ par la transformation inverse de Concordia soit :

$$\begin{bmatrix} i_{c1,h} \\ i_{c2,h} \\ i_{c3,h} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{c\alpha,h} \\ i_{c\beta,h} \end{bmatrix} \quad (\text{II.25})$$

Si V et I_1 représentent respectivement les valeurs efficaces de la tension et du courant fondamental et Φ_1 , le déphasage entre eux, alors on peut écrire :

$$\begin{cases} \bar{P} = 3VI_{c1} \cos \Phi_1 \\ \bar{q} = -3VI_{c1} \sin \Phi_1 \end{cases} \quad (\text{II.26})$$

Les termes \bar{P} et \bar{q} sont respectivement équivalents à la puissance active conventionnelle et à la puissance réactive conventionnelle.

De cette manière, éliminer les courants harmoniques revient à compenser les composantes alternatives \tilde{P} et \tilde{q} . La suppression des courants réactifs revient à compenser la composante continue \bar{q} .

II.1.2.1 Algorithme d'identification

Le schéma de la figure 2.7 illustre les différentes étapes permettant l'obtention des composantes harmoniques du courant d'une charge non linéaire.

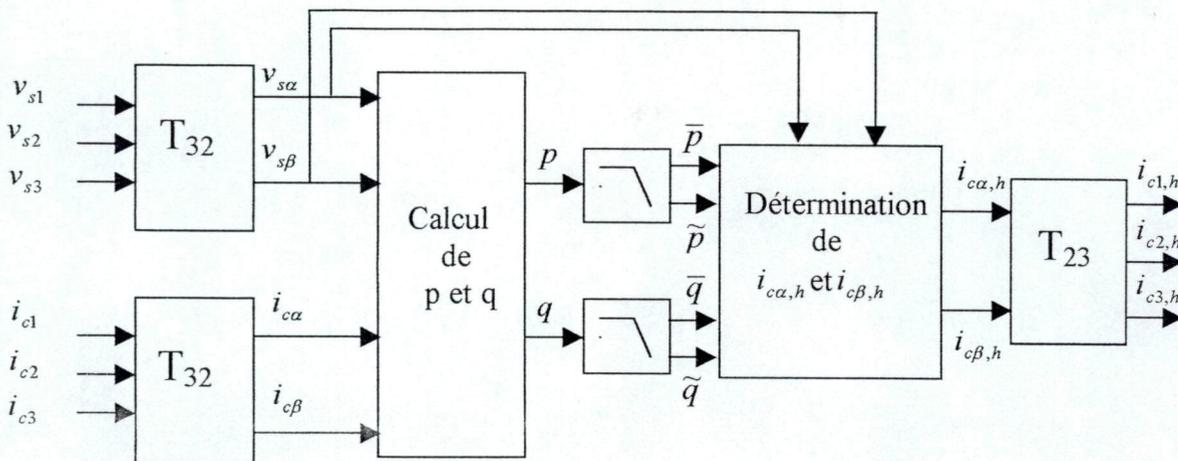


Figure 2.7 Algorithme 'pq' d'extraction des courants harmoniques

Remarques :

- 1) La théorie pq présentée auparavant est valable uniquement pour les systèmes triphasés dépourvus de composante homopolaire.
- 2) L'extraction des courants des harmoniques dans des applications monophasées ne peut pas être réalisée par cette méthode.
- 3) La théorie pq est applicable dans le cas où les tension V_{s123} sont déformées, à condition de filtrer les ondulations présentés sur le module du vecteur $V_{s\alpha\beta} (\sqrt{V_{s\alpha}^2 + V_{s\beta}^2})$

II.1.2.2 Exemple d'identification

Cet algorithme d'identification est utilisé pour extraire les courants harmoniques générés par le redresseur de la figure 2.4

Pour l'extraction de la composante harmonique \tilde{p} de la puissance réelle p , ou la composante harmonique \tilde{q} de la puissance imaginaire q , un circuit constitué d'un filtre passe bas et d'un soustracteur est utilisé.

La fonction de transfert des filtres passe bas de p et de q , ainsi ces paramètres destinés à éliminer les composantes \bar{p} et \bar{q} sont donnés dans l'annexe 1.

Cet algorithme permet effectivement d'éliminer la composante fondamentale dans le spectre du courant d'une charge polluante (figure 2.8).

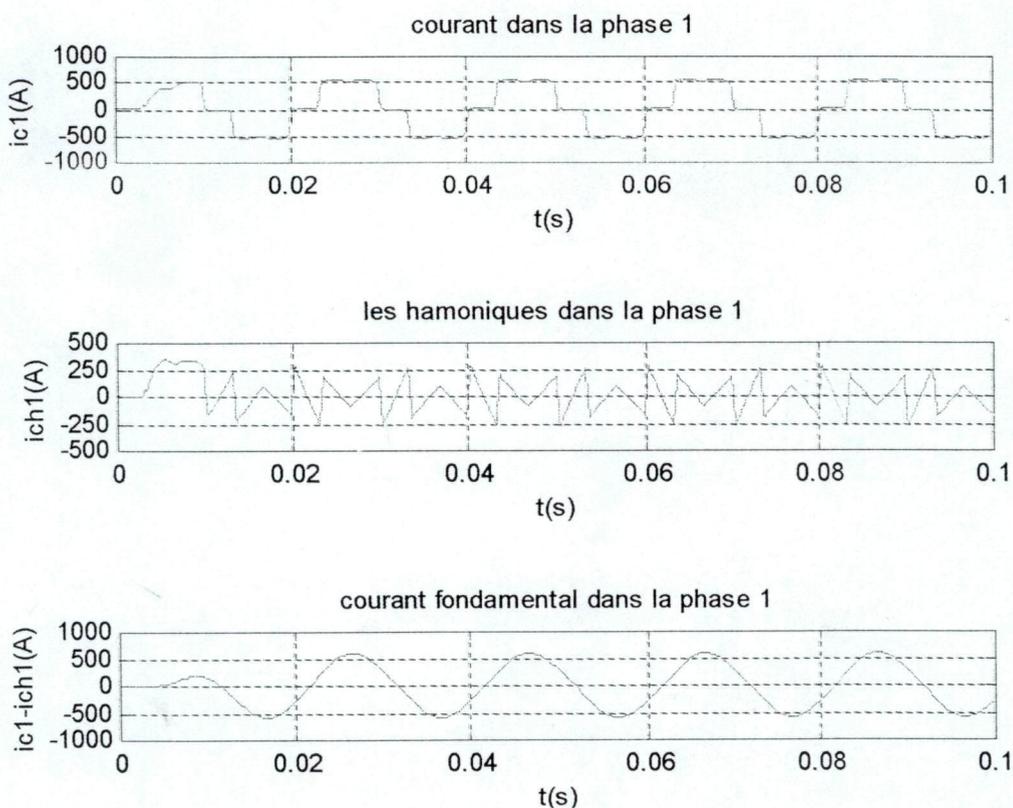


Figure 2.8 Extraction des courants harmoniques par la méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées

II.1.3 Méthode tri-monophasé

Cette méthode permet de traiter les trois phases de façon indépendante. Le principe est basé sur l'estimation de l'amplitude de la composante fondamentale active (i_{cfa}) et de la composante fondamentale réactive (i_{cfr}) du courant i_c absorbé par la charge [23].

Considérons le courant i_c absorbé par charge non-linéaire sur la première phase.

Il est exprimé par :

$$i_{c1}(\theta_s) = \sum_{h=1}^{\infty} I_{ch} \sin(h\theta_s - \phi_h) = I_{c1} \sin(\theta_s - \phi_1) + \sum_{h=2}^{\infty} I_{ch} \sin(h\theta_s - \phi_h) \quad (\text{II.27})$$

avec $\theta_s = \omega t$

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

$$v_s(\theta_s) = \sqrt{2}V_s \sin(\theta_s) \quad (\text{II.28})$$

en multipliant l'équation (27) respectivement par $\sin(\theta_s)$ et $\cos(\theta_s)$ nous obtenons :

$$i_{c1}(\theta_s) \sin(\theta_s) = \frac{I_{c1}}{2} \cos(\phi_1) - \frac{I_{c1}}{2} \cos(2\theta_s - \phi_1) + \sin(\theta_s) \sum_{h=2}^{\infty} I_{ch} \sin(h\theta_s - \phi_h) \quad (\text{II.29})$$

$$i_{c1}(\theta_s) \cos(\theta_s) = -\frac{I_{c1}}{2} \sin(\phi_1) + \frac{I_{c1}}{2} \sin(2\theta_s - \phi_1) + \cos(\theta_s) \sum_{h=2}^{\infty} I_{ch} \sin(h\theta_s - \phi_h) \quad (\text{II.30})$$

D'après les relations (II.29) et (II.30) nous constatons que seules les composantes continues sont proportionnelles respectivement à l'amplitude du courant fondamental actif et à l'amplitude du courant réactif.

Les premières composantes alternatives ont une fréquence égale à deux fois la fréquence réseau. Ces dernières seront donc filtrées à l'aide d'un filtre passe-bas dont la fréquence de coupure est relativement basse afin d'empêcher que l'ondulation basse fréquence ne se retrouve en sortie.

Cependant, il est indispensable de respecter un bon compromis entre le filtrage efficace des fréquences parasites et une dynamique rapide de l'algorithme d'extraction.

après le filtrage on obtient :

$$[i_{c1} \sin(\theta_s)]_{\text{filtré}} = \frac{I_{c1}}{2} \cos(\phi_1) \tag{II.31}$$

$$[i_{c1} \cos(\theta_s)]_{\text{filtré}} = -\frac{I_{c1}}{2} \sin(\phi_1)$$

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

$$i_{cf} = I_{c1} \cos(\phi_1) \sin(\theta_s) - I_{c1} \sin(\phi_1) \cos(\theta_s) = i_{cfa} + i_{cfr} = I_{c1} \sin(\theta_s - \phi_1) \tag{II.32}$$

II.1.3.1 Algorithme d'identification

Le schéma complet de l'estimation des courants harmoniques de la première phase est présenté sur la figure 2.9

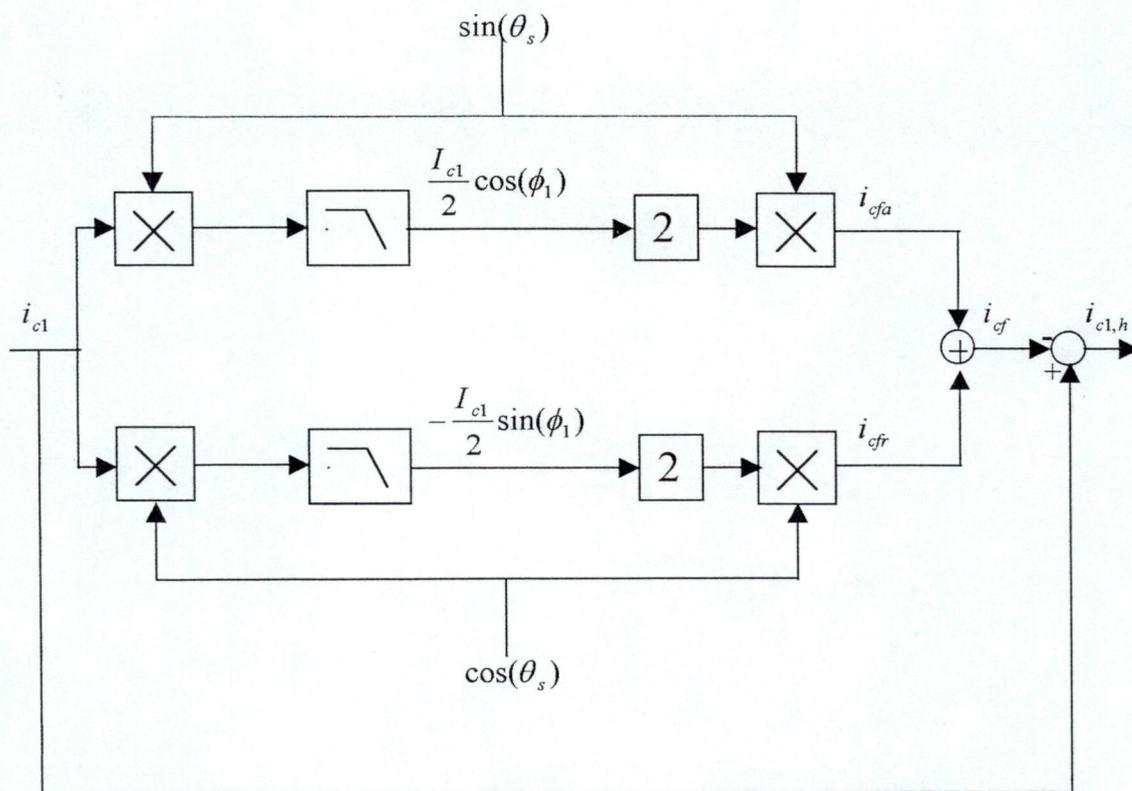


Figure 2.9 Algorithme d'extraction tri-monophasé

Remarques

1. La même démarche est appliquée pour les deux autres phases. Il suffit de prendre en compte les courants de charge i_{c2} et i_{c3} et d'utiliser des signaux sinusoïdaux synchronisés sur les tensions simples correspondantes.
2. Cet algorithme nécessite la génération de signaux sinusoïdaux d'amplitudes unitaire . il permet la compensation des harmoniques et/ou fondamental réactif.

II.1.3.2 Validation de la méthode tri-monophasé

La même charge polluante que dans les deux cas précédants a été considérée afin de tester cet algorithme d'identification.

Pour supprimer les composantes alternatives dont la fréquence minimale est égale à deux fois la fréquence réseau (100 Hz), on a choisit un filtre d'ordre 2 dont la fréquence de coupure est fixée à 30Hz.

Les résultats de simulation présentés sur la figure 2.10 attestent le bon fonctionnement de cette méthode.

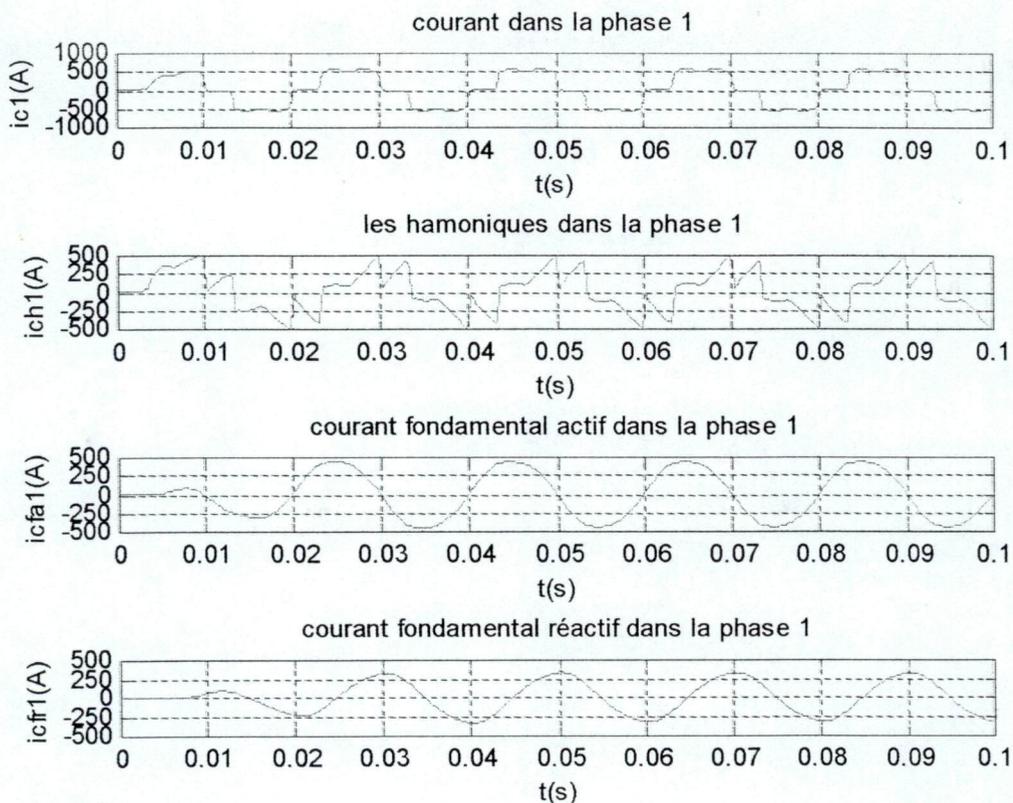


Figure 2.10 Identification des courants actif, réactif et harmoniques par la méthode trimonophasé

II.1.4 Méthode basée sur la régulation de la tension continue V_C [23]

Cette méthode est basée sur une propriété du filtre actif à savoir qu'en régime permanent le compensateur n'échange pas de puissance active avec le réseau. La puissance active fournie par le réseau d'alimentation correspond à celle demandée par la charge non-linéaire. Cette condition est réalisée en supposant que les pertes par commutation dans l'onduleur de tension sont négligeables.

La sortie du régulateur de tension délivre l'information concernant la puissance active P_s^* devra fournir la source pour alimenter la charge. Cette puissance est égale, à un coefficient près à l'amplitude I_{ca} du courant fondamental actif consommé. Ce coefficient dépend de la valeur efficace V_s de la tension.

Le courant fondamental i_{ca} est obtenu en multipliant l'amplitude I_{ca} par un signal sinusoïdal unitaire en phase avec la tension réseau (Figure 2.11).

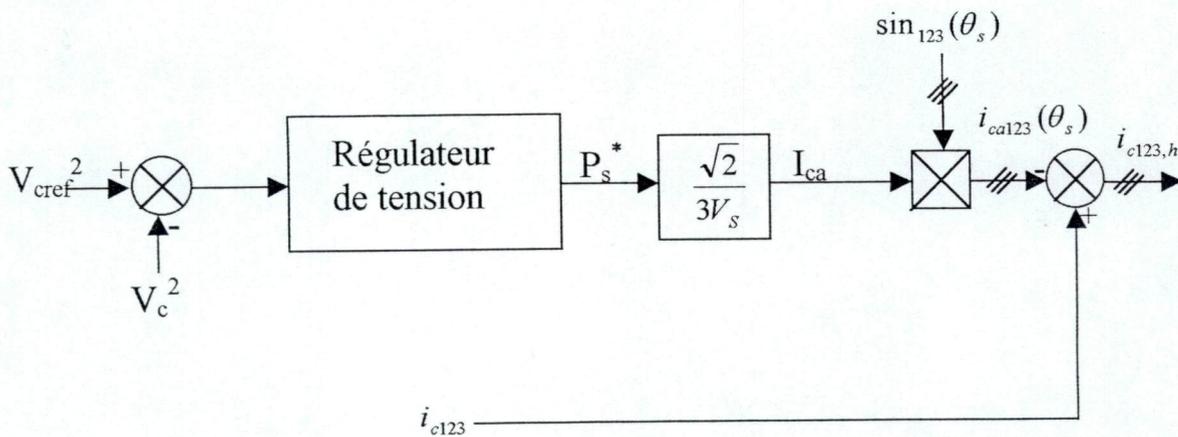


Figure 2.11 Algorithme d'extraction des courants harmoniques par la méthode basée sur la régulation de la tension continue

Enfin, le courant harmonique par phase que doit générer le filtre actif est égal à celui de la charge polluante déduit de sa composante fondamentale active.

L'application de cette méthode avec l'étude de la régulation de la tension continue aux bornes du condensateur C_f du filtre actif sera l'objet de notre quatrième chapitre.

Remarques

- 1) Cette méthode impose aux courants issus de la source i_{s123} d'être en phase avec la tension du réseau après compensation. On ne peut pas donc dissocier la compensation des courants harmoniques et la compensation des courants réactifs.
- 2) Ce concept permet au filtre actif de compenser les éventuels déséquilibres de la charge polluante.
- 3) Une estimation fidèle de la composante active dépendra de la qualité du système de tensions sinusoïdales unitaires déduit de la mesure des tensions V_{s123} au point de raccordement.

Conclusion

A partir de la connaissance de différentes composantes du courant absorbé par la charge non linéaire, diverses fonctions peuvent être attribuées au filtre actif : élimination des courants harmoniques, compensation de l'énergie réactive ou les deux à la fois.

Pour conclure cette étude, nous allons procéder à la comparaison de ces différentes méthodes d'identification et nous effectuons quelques remarques sur leur utilisation :

- ◆ Les performances de la méthode basée sur le principe du courant actif et la méthode des puissances instantanées sont parfaitement identiques. Ceci était attendu car ces deux méthodes sont en effet deux implantations différentes d'un même algorithme .
- ◆ Les trois premières méthodes permettent la compensation des harmoniques et/ou du fondamental réactif, mais la quatrième méthode basée sur la régulation de la tension continue n'est envisageable que dans le cas où le filtre actif compense systématiquement les courants harmoniques et le fondamental actif.
- ◆ De point de vue implantation, la méthode basée sur le courant actif est complexe, à savoir que la réalisation de l'algorithme d'identification des trois dernières méthodes est plus simple que la première méthode.

Chapitre III

**Etude, dimensionnement et stratégies de
commande d'un filtre actif
parallèle à structure tension**

Introduction

Les dispositifs de l'électronique de puissance capables de générer des formes d'ondes souhaitées pour compenser les harmoniques sont les onduleurs à commutation rapide.

Comme dans le cas des applications industrielles (variateur de vitesse, alimentation de secours...), deux structures électrotechniques s'affrontent, du moins en théorie, l'onduleur de tension et l'onduleur commutateur de courant.

La structure tension a fait l'objet de nombreux travaux de recherche [12,24,25]. La structure courant n'a pas été considérée avec le même intérêt à cause de considérations économiques.

Le schéma synoptique de base d'un filtre actif parallèle que se soit à structure tension ou à structure courant est donné sur la figure 3.1.

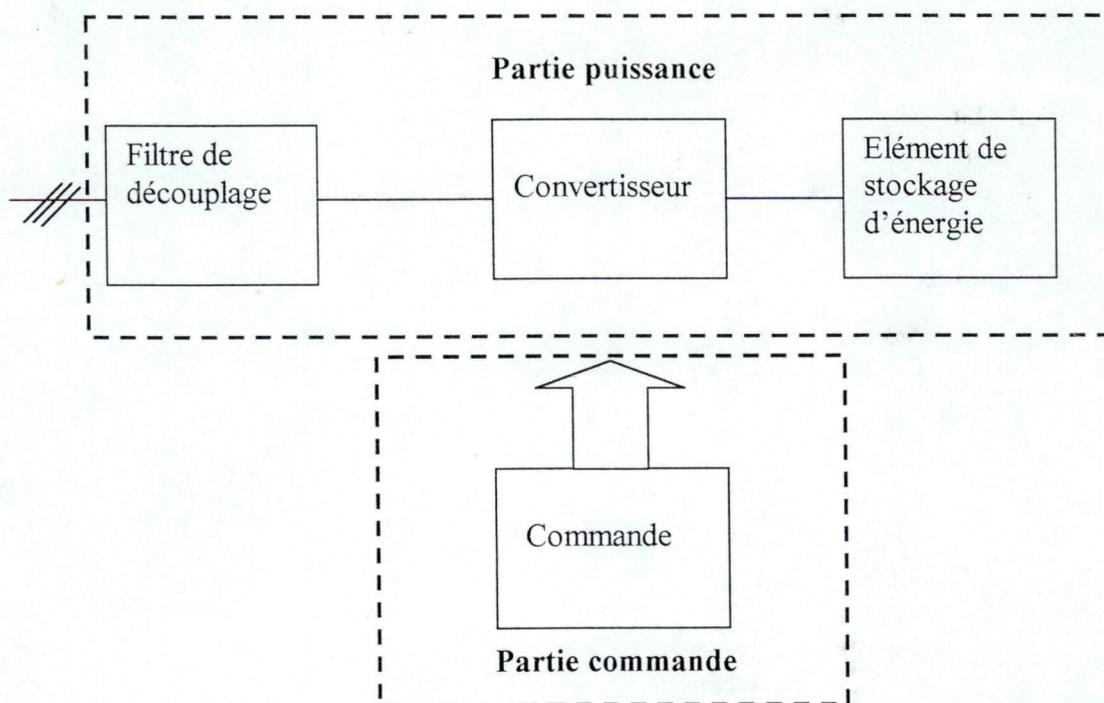


Figure 3.1 schéma synoptique d'un filtre actif parallèle

L’objectif de ce chapitre est de présenter le principe de fonctionnement et de commande d’un filtre actif triphasé de type tension.

Dans un premier temps, nous nous intéresserons à l’étude du circuit de puissance d’un filtre actif à base d’onduleur de tension ainsi que son dimensionnement. Dans une deuxième partie, nous traiterons le contrôle du courant de sortie du filtre actif. Nous terminerons le chapitre par une simulation globale du comportement du filtre actif et de sa commande en vue de la compensation des courants harmoniques injectés par un redresseur triphasé commandé.

Le programme de simulation est conçu avec le logiciel Matlab/simulink.

III.1 Configuration du filtre actif à structure tension

On peut distinguer différentes réalisations d’un filtre actif parallèle à structure tension pour un réseau triphasé.

III.1.1 Filtre actif avec trois onduleurs monophasés

Dans cette configuration chaque phase possède son propre filtre actif formé d’un onduleur monophasé comme le montre la figure 3.2.

Chaque filtre actif contrôle indépendamment le courant harmonique dans la phase à laquelle il est connecté. Ce type de réalisation offre les avantages suivants [26] :

- Une répartition des commandes des interrupteurs sans contraintes.
- Plus de degrés de liberté qui pourrait être exploité en structure multiniveaux.

Cependant le nombre important de composants semi-conducteurs utilisés d’une part, et le surdimensionnement de l’élément de stockage d’autre part, pénalisent fortement ce choix.

En revanche cette solution peut être la plus appropriée pour la réalisation des filtres mixtes composés d’un filtre actif série ou parallèle à faible puissance et d’un filtre passif parallèle[17]. En outre elle offre la possibilité d’envisager l’élimination du courant homopolaire circulant dans le neutre.

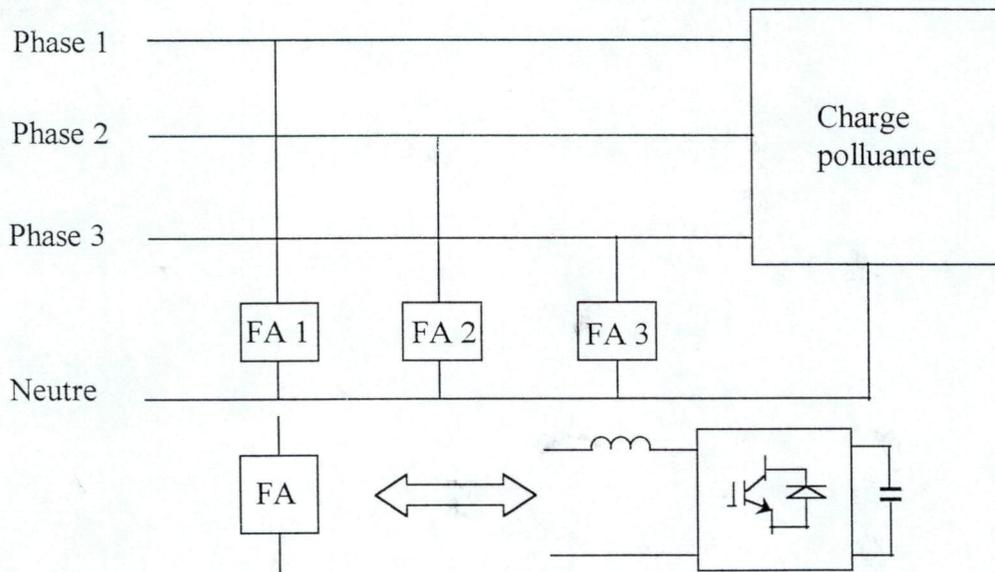


Figure 3.2 Filtrage triphasé avec trois onduleurs monophasés

III.1.2 Filtre actif avec onduleur triphasé à quatre bras

Une autre réalisation plus économique du filtre actif pour les installations triphasés avec neutre est illustrée sur la figure 3.3.

Elle consiste à utiliser un pont onduleur avec quatre bras comme le montre le schéma de la figure 3.3

Cette configuration est proposée pour éviter le recours à un élément de stockage à point milieu [26]. Elle permet, comme la structure précédente, d'annuler le courant homopolaire dans le neutre du réseau.

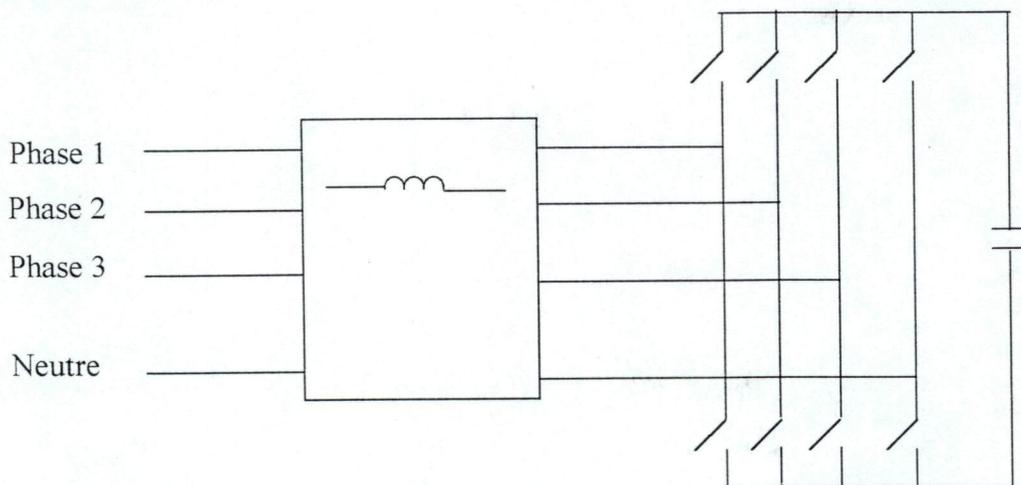


Figure 3.3 Filtrage triphasé par un onduleur de tension à quatre bras

III.1.3 Filtre actif avec un onduleur triphasé à trois bras

La réalisation la plus répandue est celle donnée à la figure 3.4. Dans ce cas, la compensation des courants harmoniques dans le réseau se fait par le contrôle des courants des trois phases de l'onduleur. Cette configuration est préférable du moins pour le filtrage actif parallèle, car elle présente les avantages suivants [26] :

- Un nombre minimum de semi-conducteurs.
- Un seul élément de stockage coté continu avec un faible dimensionnement.

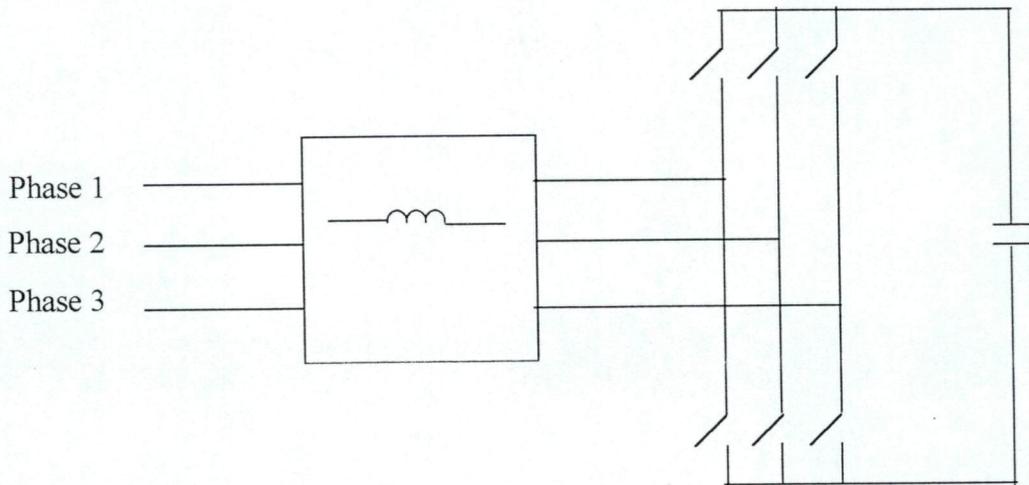


Figure 3.4 Filtrage triphasé par un onduleur de tension à trois bras

III.2 Description du filtre parallèle étudié

Le schéma du circuit de puissance d'un filtre actif parallèle à structure tension est donné sur la figure 3.5. On y distingue trois éléments :

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

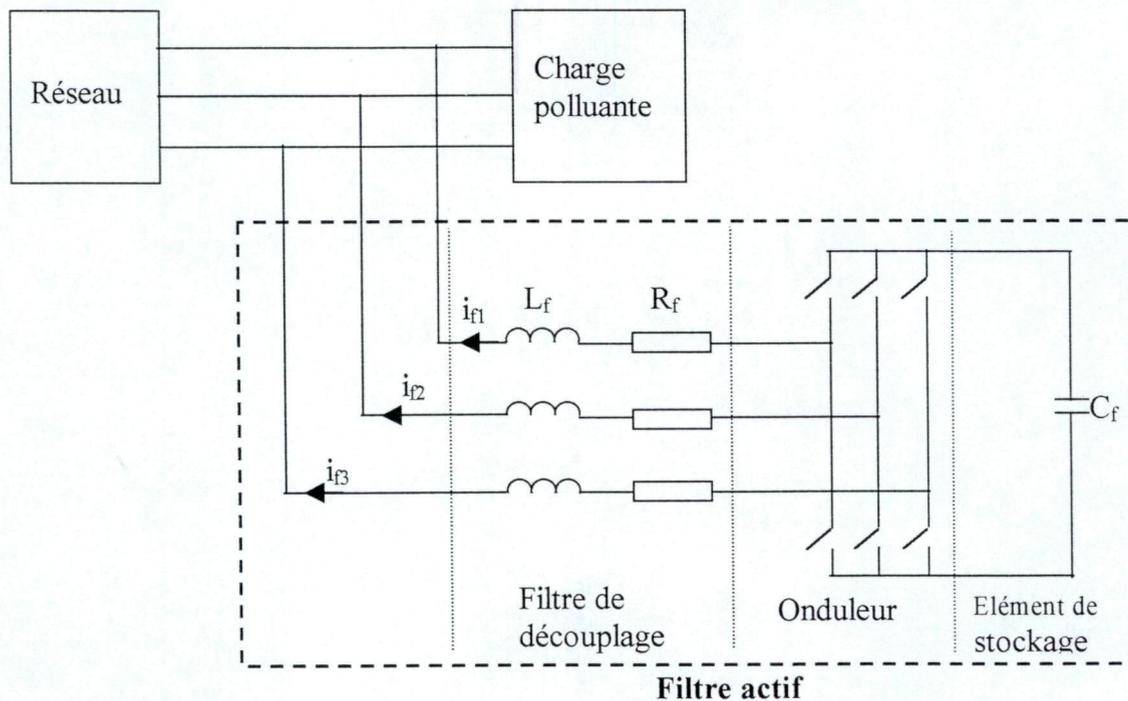


Figure 3.5 Schéma de puissance d'un réseau avec filtre actif à structure tension

III.2.1 L'onduleur de tension

Notre étude sera basée sur un onduleur triphasé à trois bras (Figure 3.6).

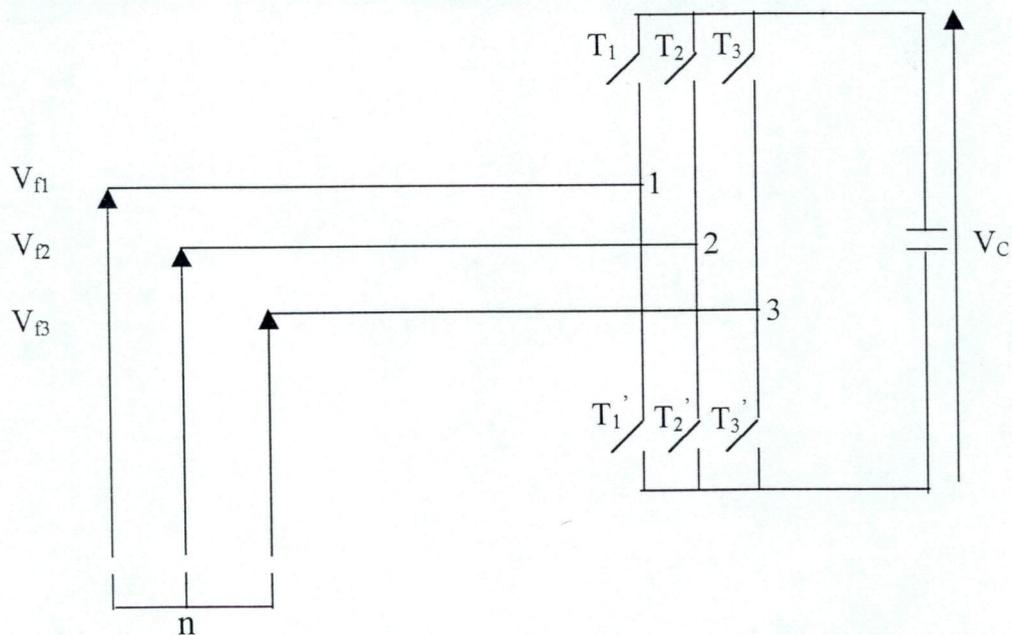


Figure 3.6 Onduleur triphasé à structure tension

Le stockage de l'énergie se fait dans un condensateur qui joue le rôle d'une source de tension continue. La fluctuation de la tension de condensateur doit être faible afin de ne pas dépasser la limite en tension des composants de puissance et afin d'éviter la perte de commutation des courants générés par le filtre actif.

Six interrupteurs bidirectionnels en courant et unidirectionnels en tension commutent de manière à imposer des tensions simples alternatives (V_{f1}, V_{f2}, V_{f3}) en sortie de l'onduleur.

Les interrupteurs supposés idéaux, sont toujours constitués d'un semi-conducteur commandable à l'ouverture et à la fermeture (GTO, MOSFET, IGBT) connecté en anti-parallèle avec une diode (Figure 3.7)

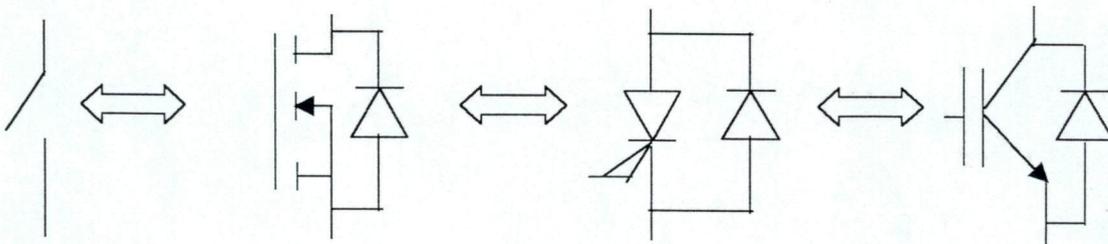


Figure 3.7 Interrupteurs de puissance

Au cours de son fonctionnement, le convertisseur statique relie, par l'intermédiaire de ses interrupteurs, une source de tension et une source de courant entre lesquelles il assure et contrôle l'échange d'énergie. Pour que cette liaison puisse se faire il faut respecter deux règles essentielles :

- Une source de tension ne doit jamais être court-circuitée mais elle peut être ouverte. En d'autres termes, deux interrupteurs d'un même bras ne peuvent être fermés simultanément.
- Une source de courant ne doit jamais être ouverte. Cette mise en garde impose la présence de la diode anti-parallèle.

En considérant les différents états des interrupteurs, on peut déduire l'ensemble des tensions délivrées par l'onduleur pour la configuration triphasée étudiée.

Appelons T_k et T_k' les interrupteurs idéaux, connectés sur la phase k ($k=1,2,3$). C_k et C_k' sont les commandes logiques qui leur sont associées. La commande est supposée alternée ($C_k = \overline{C_k'}$).

CHAPITRE III – Etude, dimensionnement et stratégies de commande d'un filtre actif parallèle à structure tension

Nous avons :

$$\begin{aligned} C_k = 1 &\implies T_k \text{ passant et } T_k' \text{ ouvert.} \\ C_k = 0 &\implies T_k \text{ ouvert et } T_k' \text{ passant.} \end{aligned}$$

On définit les vecteurs des tensions triphasées $[V_f]_n$ et $[V_f]_M$, ainsi que le vecteur des variables logiques $[C]$ par :

$$[V_f]_n = \begin{bmatrix} V_{f1} \\ V_{f2} \\ V_{f3} \end{bmatrix}, \quad [V_f]_M = \begin{bmatrix} V_{f1M} \\ V_{f2M} \\ V_{f3M} \end{bmatrix}, \quad [C] = \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{bmatrix} \quad (\text{III.1})$$

avec

$$[V_f]_n = [C] \cdot V_C \quad (\text{III.2})$$

Les tensions V_{f1M} , V_{f2M} , V_{f3M} , mesurées aux points 1,2 et 3, ne peuvent prendre que les valeurs V_C , $-V_C$, ou 0. En tenant compte de l'absence de tension homopolaire, les tensions simples délivrées par l'onduleur sont données par :

$$\begin{bmatrix} V_{f1} \\ V_{f2} \\ V_{f3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2/3 & -1/3 & -1/3 \\ -1/3 & 2/3 & -1/3 \\ -1/3 & -1/3 & -2/3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{f1M} \\ V_{f2M} \\ V_{f3M} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2/3 & -1/3 & -1/3 \\ -1/3 & 2/3 & -1/3 \\ -1/3 & -1/3 & -2/3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{bmatrix} \cdot V_C \quad (\text{III.3})$$

Les variables C_1 , C_2 et C_3 prennent chacune deux valeurs possibles. Il en résulte donc huit états possibles pour les tensions V_{f1} , V_{f2} , V_{f3} résumés dans le tableau 3.1 :

| | C_1 | C_2 | C_3 | V_{f1} | V_{f2} | V_{f3} |
|----------|-------|-------|-------|------------|------------|------------|
| 1 | 1 | 0 | 0 | $2/3 V_C$ | $-1/3 V_C$ | $-1/3 V_C$ |
| 2 | 1 | 1 | 0 | $1/3 V_C$ | $1/3 V_C$ | $-2/3 V_C$ |
| 3 | 0 | 1 | 0 | $-1/3 V_C$ | $2/3 V_C$ | $-1/3 V_C$ |
| 4 | 0 | 1 | 1 | $-2/3 V_C$ | $1/3 V_C$ | $1/3 V_C$ |
| 5 | 0 | 0 | 1 | $-1/3 V_C$ | $-1/3 V_C$ | $2/3 V_C$ |
| 6 | 1 | 0 | 1 | $1/3 V_C$ | $-2/3 V_C$ | $1/3 V_C$ |
| 7 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Tableau 3.1 Tension de sortie de l'onduleur

III.2.2 Dimensionnement

III.2.2.1 Caractérisation de la charge polluante

L'ensemble constitué par le redresseur d'alimentation et la charge polluante, représentée par un pont redresseur à thyristors débitant sur une charge R-L est représenté sur la figure 3.8. Le réseau d'alimentation est modélisée par trois sources de tensions sinusoïdales parfaites en série avec une inductance L_S . Une inductance additionnelle L_C est connectée à l'entrée du pont redresseur afin de limiter les gradients di/dt à l'amorçage des thyristors. L'inductance totale $L_S' = L_S + L_C$ s'oppose à la variation brutale du courant de ligne. En conséquence, la commutation des thyristors ne peut être considérée comme instantanée et laisse apparaître un empiètement des intervalles de conduction des semi-conducteurs.

Nous admettons que la résistance R_S est négligeable devant la résistance R_d et que l'inductance du coté continu L_d est très grande permettant au convertisseur de fournir un courant redressé I_d parfaitement lissé. Nous désignerons respectivement par μ et α , l'angle d'empiètement et l'angle de retard à l'amorçage des thyristors.

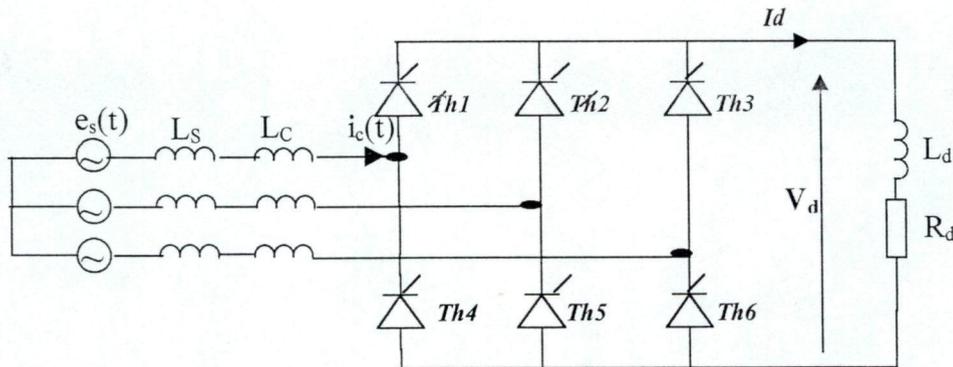


Figure 3.8 Schéma d'un redresseur triphasé à thyristors

Les tensions $e_{s1}(t)$, $e_{s2}(t)$, $e_{s3}(t)$ forment un système triphasé équilibré. La décomposition en série de Fourier du courant de la première phase est donnée par la formule de Moltgen [23] :

$$i_c(\omega t) = \sum_{h=1}^{\infty} \sqrt{2} I_{ch} \sin(h\omega t - \phi_h) \quad (\text{III.4})$$

$$\text{avec } I_{ch} = \frac{2\sqrt{2}I_d}{\pi h} \cos\left(\frac{\pi h}{6}\right) \left(\frac{\sin(h\mu/2)}{(h\mu/2)}\right) \quad (\text{III.5})$$

$$\text{et } \phi_h = h\left(\alpha + \frac{\mu}{2}\right) \quad (\text{III.6})$$

L'angle d'empiétement μ est calculé à partir de la relation implicite suivante :

$$\cos(\alpha) - \cos(\alpha + \mu) = \frac{\sqrt{2}L_s\omega I_d}{\sqrt{3}V_s} \quad (\text{III.7})$$

En supposant que μ est très faible, l'expression du courant $i_c(t)$ devient :

$$i_c(t) = \frac{2\sqrt{3}I_d}{\pi} \left[\sin[(\omega t - \alpha)] - \frac{1}{5} \sin[5(\omega t - \alpha)] - \frac{1}{7} \sin[7(\omega t - \alpha)] + \frac{1}{11} \sin[11(\omega t - \alpha)] + \dots \right] \quad (\text{III.8})$$

Le pont triphasé fonctionne sous une tension efficace V_s et absorbe une puissance apparente nominale S_n . On en déduit les grandeurs caractéristiques suivantes pour la charge non linéaire:

$$V_d = \frac{3V_s\sqrt{6}}{\pi} \cos(\alpha)$$

$$I_d = \frac{S_n}{V_d} \quad (\text{III.9})$$

$$R_d = \frac{V_d}{I_d}$$

L'inductance équivalente L_s a une valeur comprise entre 1% et 10% de la valeur de l'inductance nominale L définie par [23] :

$$L = \frac{V_s}{\omega I_{c1}} \quad (\text{III.10})$$

I_{c1} représente la valeur efficace de la composante fondamentale du courant i_c et ω la pulsation du réseau.

III.2.2.2 Dimensionnement du filtre actif

L'objectif est de déterminer la puissance apparente du filtre actif connaissant la puissance nominale consommée par la charge non linéaire. Le dimensionnement du filtre actif est réalisé en supposant que la totalité des courants harmoniques est compensée.

La valeur efficace du courant $i_c(t)$ est définie par la relation (III.11) :

$$I_C = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_{ch}^2} \quad (III.11)$$

On en déduit la valeur efficace I_{fh} des courants harmoniques de compensation générée par le filtre actif :

$$I_{fh} = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_{ch}^2} = \sqrt{I_c^2 - I_{c1}^2} \quad (III.12)$$

Dans le cas d'un réseau comportant 3 phases, supposé sinusoïdal et équilibré, la puissance apparente nominale absorbée par le redresseur se met sous la forme :

$$S_{red} = \sqrt{P_{red}^2 + Q_{red}^2 + D_{red}^2} = 3V_S I_C \quad (III.13)$$

$$\text{avec} \quad \begin{cases} P_{red} = 3V_S I_S \cos \phi_1 \\ Q_{red} = 3V_S I_S \sin \phi_1 \\ D_{red} = 3V_S \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_{ch}^2} \end{cases} \quad (III.14)$$

d'où : P_{red} est la puissance active absorbée par le redresseur

Q_{red} est la puissance réactive absorbée par le redresseur

D_{red} est la puissance déformante absorbée par le redresseur

En supposant que le filtre actif compense la totalité des courants harmoniques, sa puissance nominale sera :

$$S_{\text{filtre}} = D_{red} \quad (III.15)$$

A partir des relations (III.11), (III.14) et (III.15), nous déduisons le rapport reliant la puissance apparente du filtre actif et celle de la charge polluante :

$$\frac{S_{\text{filtre}}}{S_{\text{red}}} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_{ch}^2}}{I_C} \tag{III.16}$$

Si on néglige le phénomène d’empiètement, l’expression (III.8) ainsi que la relation (III.12) Nous conduisent à la détermination des valeurs efficaces I_C et I_{fh} suivantes [27] :

$$I_C = \sqrt{\frac{2}{3}} I_d \tag{III.17}$$

$$I_{fh} = I_d \sqrt{\frac{2}{3} - \frac{6}{\pi^2}} = 0.24 I_d \tag{III.18}$$

Le rapport des courants et donc des puissances devient :

$$\frac{S_{\text{filtre}}}{S_{\text{red}}} = 29\% \tag{III.19}$$

La puissance du filtre actif nécessaire à la compensation de tous les harmoniques de courant consommés par un pont triphasé représente près d’un tiers de la puissance nominale de la charge.

Les rapports de puissance entre le filtre actif et la charge lors d’une compensation totale ou partielle sont résumés dans le tableau (3.2) [13] :

| Objectif | $S_{\text{filtre}}/S_{\text{red}}(\%)$ |
|--|--|
| Suppression de tous les harmoniques | 29 |
| Suppression de l’harmonique de rang 5 | 19 |
| Suppression de l’harmonique de rang 7 | 14 |
| Suppression de l’harmonique de rang 5 et 7 | 23,5 |

Tableau 3.2 Puissance du filtre actif en fonction des objectifs de compensation

III.3 Contrôle des courants du filtre actif

Pour maintenir le courant à la sortie du filtre actif autour de sa référence calculée au chapitre Précédent, deux techniques de commande peuvent être utilisées.

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

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

III.3.1 Contrôle des courants par hystérésis

La commande par hystérésis est basée sur le principe du réglage par mode glissant [23]. Cette solution est parfaitement adaptée aux organes de commande ayant une action à deux positions comme c'est le cas ici pour l'onduleur.

Le principe de cette méthode de contrôle de courant est basé sur la commande des interrupteurs de l'onduleur de telle sorte que les variations du courant soient limitées dans une bande encadrant les courants de référence. Cette régulation se fait par une comparaison permanente entre les courants réels et les courants de références(Figure 3.9)

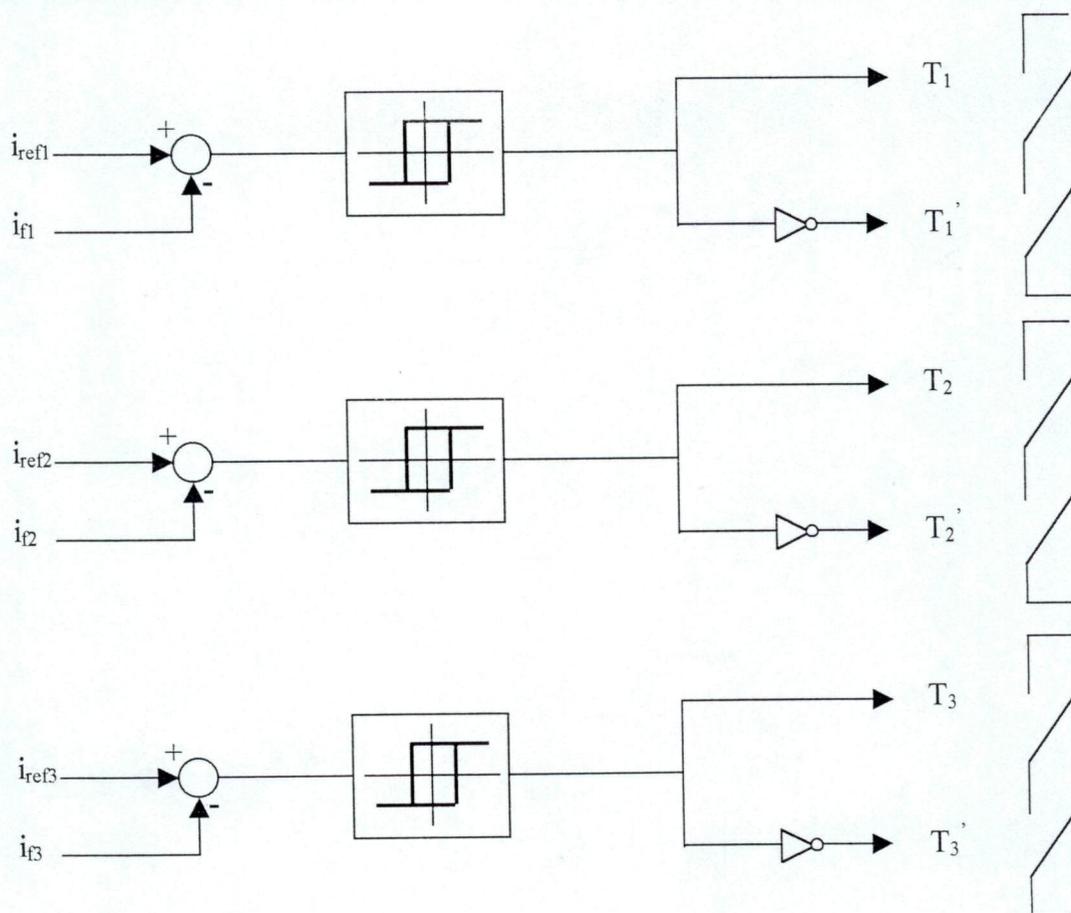


Figure 3.9 Principe de la commande par hystérésis

La sortie du comparateur est reliée à la logique de commande de l'onduleur de manière à imposer une commutation des interrupteurs lorsque le courant s'écarte de la bande d'hystérésis de largeur Δi .

Chaque sortie de cette bande entraîne un changement de configuration des interrupteurs. Les ordres de commande C_i des interrupteurs sont déterminés alors comme suit :

$$\begin{cases} \text{Si } \varepsilon_k \geq \Delta i & \text{alors } C_k=0 \text{ (} T_k \text{ ouvert et } T_k' \text{ passant)} \\ \text{Si } \varepsilon_k \leq -\Delta i & \text{alors } C_k=1 \text{ (} T_k \text{ passant et } T_k' \text{ ouvert)} \end{cases} \quad (\text{III.20})$$

$$\text{avec : } \varepsilon_k = i_{refk} - i_{fk} \quad (\text{III.21})$$

Malgré la simplicité de sa mise en œuvre, sa robustesse et son excellente dynamique, la commande par hystérésis présente les inconvénients suivants [23] :

- La fréquence de commutation dépend essentiellement de la dérivée du courant de consigne. Cette dernière dépend de la valeur de l'inductance de découplage L_f et de la chute de tension à ses bornes. L'amplitude de la dérivée n'est pas donc maîtrisée et la fréquence de commutation n'est pas fixe.
- La commande est appliquée séparément sur les trois phases. Or la structure électrotechnique impose à chaque instant que la somme des trois courants soit nulle. Le résultat obtenu sur un courant n'est donc pas indépendant des deux autres phases. Ainsi le courant asservi ne pourra en pas respecter les limites imposées par la bande de l'hystérésis.

III.3.2 Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI)

Dans ce type de commande, on désire rendre le fréquence de commutation constante. Pour cela, on superpose à la loi de commande par mode de glissement, un signal auxiliaire de forme triangulaire (porteuse) dont l'amplitude et la fréquence sont fixes, comme le montre Le schéma de la figure 3.10

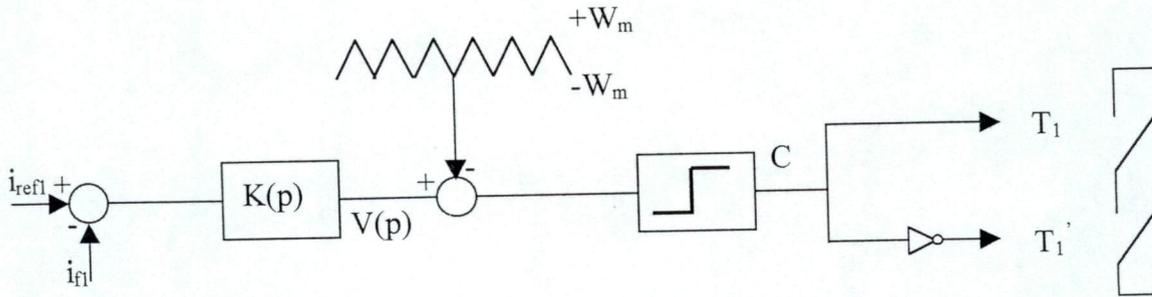


Figure 3.10 Principe de la commande par MLI

Dans le cas d'une MLI à échantillonnage naturel la modulatrice $V(p)$ issue du régulateur est comparée directement avec le signal triangulaire. Les signaux logiques C qui en résultent donnent l'ordre de commutation des interrupteurs (Figure 3.11).

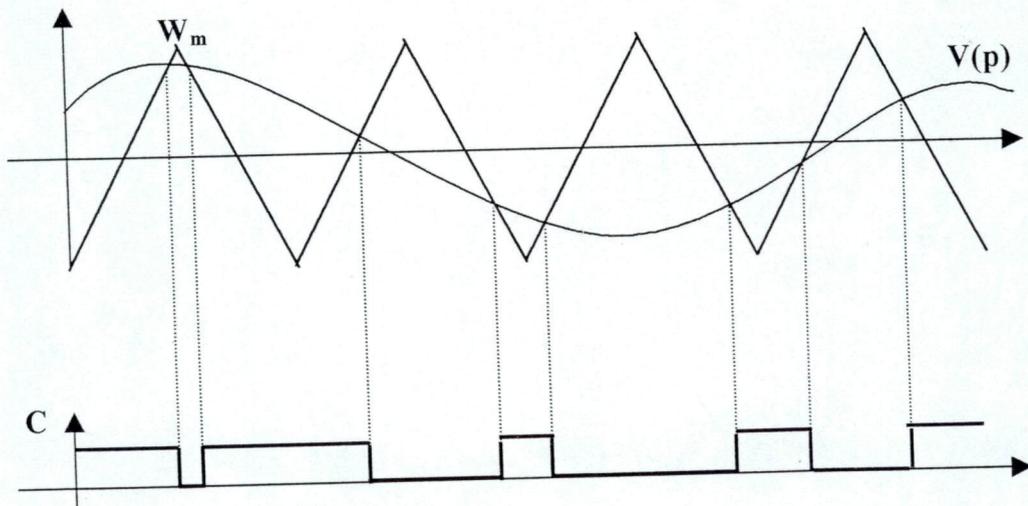


Figure 3.11 Répartition des commutations sur un bras de l'onduleur

Les paramètres caractérisant cette commande sont l'indice de modulation m et le taux de modulation r .

L'indice de modulation m est le rapport entre la fréquence f_p de la porteuse et la fréquence f de la modulante, $m=f_p/f$.

Le taux de modulation r est défini comme le rapport entre l'amplitude V_m de la tension de référence et l'amplitude W_m de la porteuse, $r=V_m/W_m$

On peut assimiler la fonction transfert de l'onduleur à un gain G_0 à condition que la fréquence de commutation soit élevée par rapport à la dynamique du système. Dans ce cas, le gain a pour expression [23] :

$$G_0 = \frac{V_c}{2W_m} \quad (\text{III.22})$$

avec

V_c : tension moyenne coté continu,

W_m : amplitude de la porteuse.

On règle l'amplitude du triangle de manière à obtenir un gain unitaire G_0 ($W_m=V_c/2$)

Le choix du correcteur $K(p)$ à grand gain s'avère nécessaire pour atteindre les objectifs de régulation [28]. Le correcteur utilisé est de type IP.

Le schéma de régulation du courant est décrit à la figure 3.12

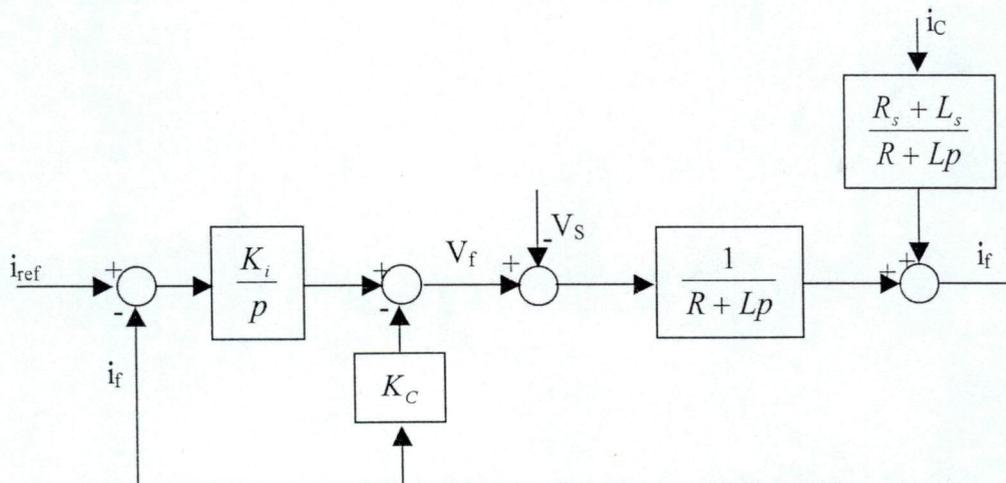


Figure 3.12 Régulation de courant de type IP

III.4 Exemple de compensation des courants harmoniques d'un redresseur triphasé

III.4.1 Description du système simulé

Le schéma global du système à étudier est représenté sur la figure 3.13. il se compose de quatre parties :

- Le réseau d'alimentation triphasé sinusoïdal .
- La charge non linéaire symbolisée par un pont redresseur à thyristors .
- L'onduleur à structure tension .
- Les commandes de convertisseurs statiques .

Le raccordement au réseau de la charge polluante et du compensateur s'effectue par l'intermédiaire de l'impédance de court-circuit représentée par l'inductance L_s .

Le pont redresseur à thyristors débitera sur une charge R_d, L_d . La constante du temps du dipôle inductif sera choisie assez grande de façon à assurer un lissage suffisant du courant redressé I_d , empêchant ainsi le fonctionnement du redresseur en régime discontinu.

Le filtre actif fonctionne comme source de courant. L'onduleur de tension est contrôlé pour produire les courants harmoniques nécessaires à la charge de sorte que le réseau fournisse seulement le courant fondamental.

Notre étude sera basée sur un onduleur triphasé alimenté par une source de tension supposée idéale.

Pour asservir les courants du filtre actif, on utilise dans un premier temps l'hystérésis puis la commande à modulation de largeur d'impulsion (MLI). La détermination des courants de référence sera effectuée par la méthode pq .

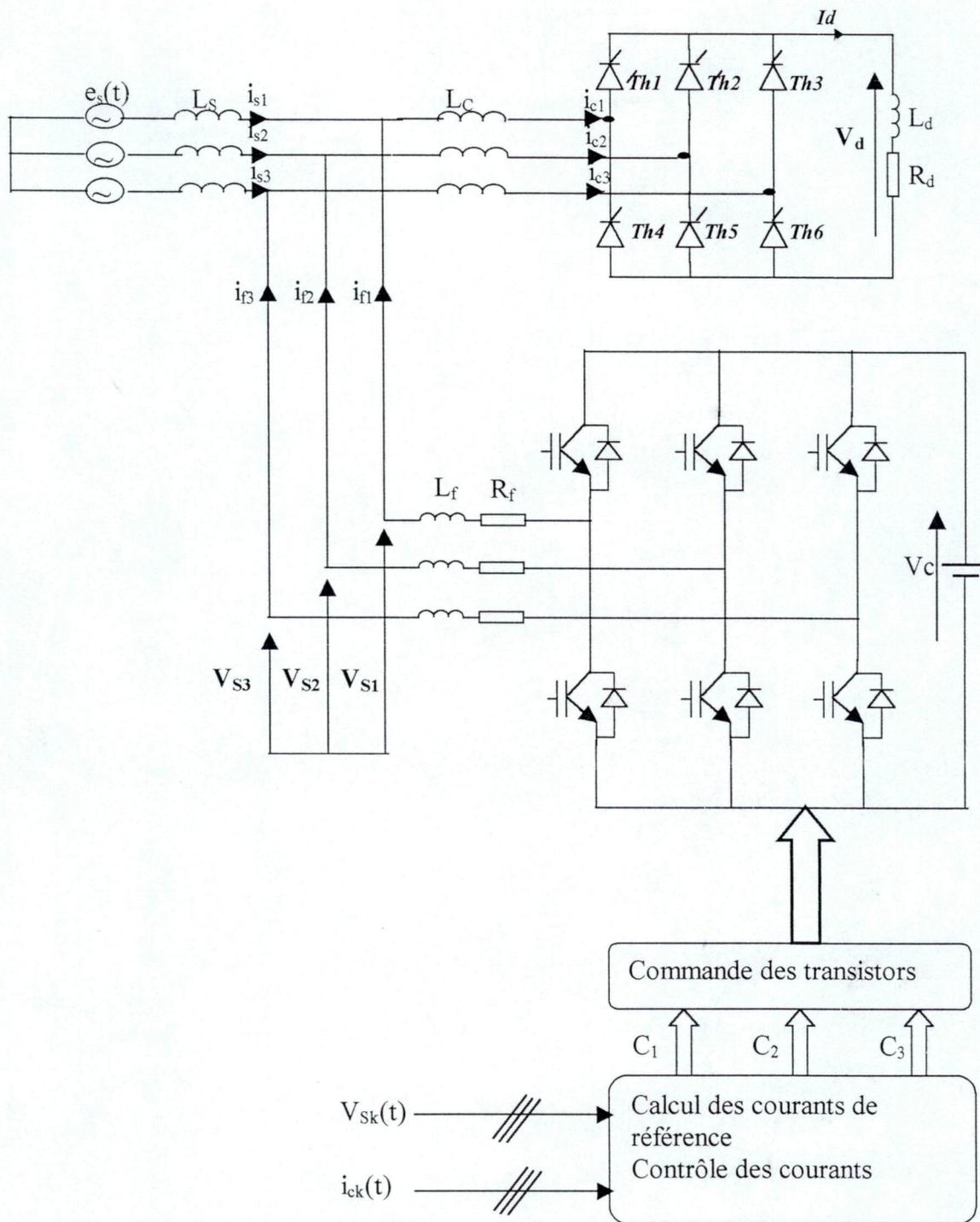


Figure 3.13 Schéma global du système à simuler

III.4.2 Résultats de simulation

Les Figures 3.14 et 3.15 représentent respectivement le comportement du filtre actif lors de connexion du pont redresseur sur le réseau ($\alpha = 30^\circ$). Ces figures incluent la forme d'onde des tensions de réseau, des courants de la première phase, le courant consommé par le redresseur i_{c1} , le courant généré par le filtre actif i_{f1} ainsi que sa référence le courant i_{ref1} et celui fourni par le réseau i_{s1} .

Les résultats sont obtenus par la simulation du système de la Figure 3.13 respectivement avec la commande hystérésis et la commande à MLI. Le courant i_{s1} est quasi sinusoïdal déphasé sur sa tension V_1 . Néanmoins des pics y apparaissent pendant les commutations dans le redresseur. Ces déformations de la forme d'onde du courant injecté dans le réseau sont plus importantes dans le cas de la commande à MLI. Elles sont l'effet du déphasage entre le courant réel généré par le filtre actif et sa référence.

Sur les Figures 3.16 et 3.17 sont comparés les spectres du courant injecté sur le réseau avant et après compensation ainsi que leur taux de distorsion harmonique.

Avec la commande hystérésis ou la commande à MLI, le filtre actif permet une réduction importante des harmoniques du courant. Toutefois l'efficacité du filtre actif est meilleur avec la commande hystérésis.

Lorsque le redresseur fonctionne avec un angle d'amorçage de 60° , la compensation des courants harmoniques est illustré sur Figure 3.18. On observe sur le courant source des pics qui apparaissent pendant les commutations. Sur la figure aussi sont superposés le courant réel du filtre actif et sa référence. L'écart entre les deux ondes s'est accentué pour cet angle de retard ($\alpha = 60^\circ$).

D'ailleurs, la figure 3.19 montre que le THD du courant source après compensation augmente avec l'accroissement de l'angle d'amorçage α .

Les paramètres du système simulé (Figure 3.13), déduits des optimisations des paragraphes précédents du chapitre (III), sont donnés en annexe 3.

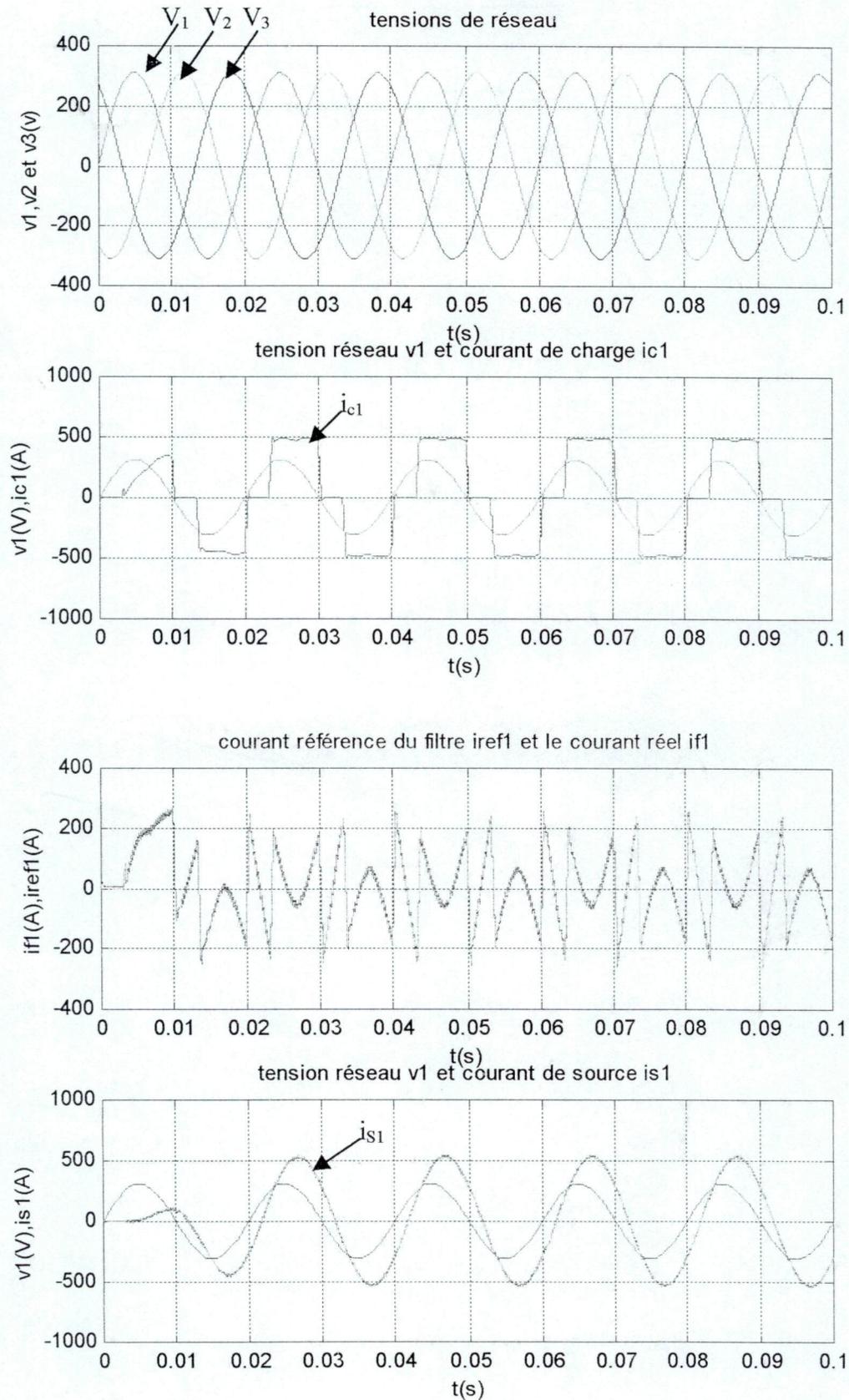


Figure 3.14 Compensation des courants harmoniques avec la commande hystérésis
($\alpha = 30^\circ$, $\Delta i = 1A$)

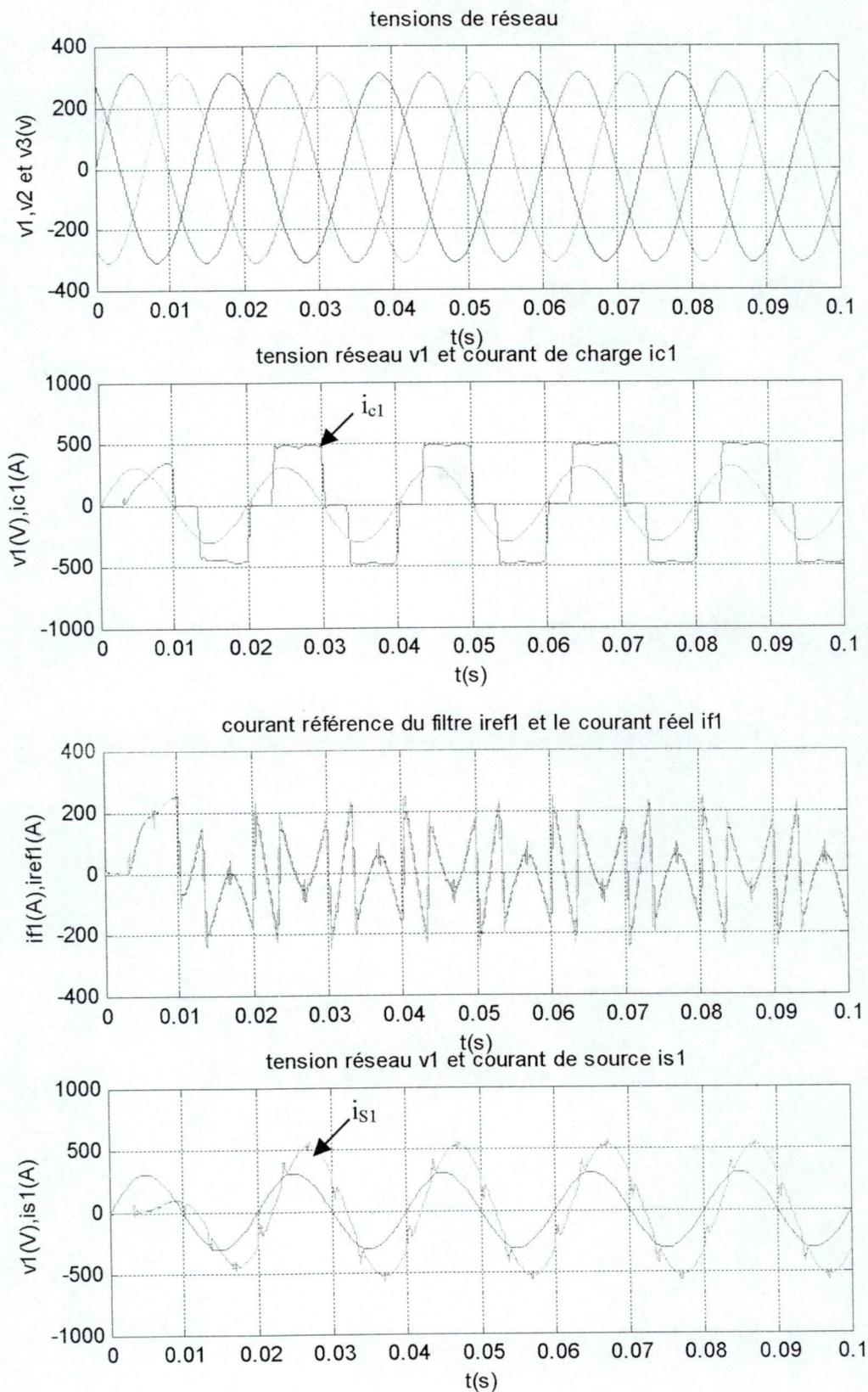


Figure 3.15 Compensation des courants harmoniques avec la commande MLI
($\alpha = 30^\circ$)

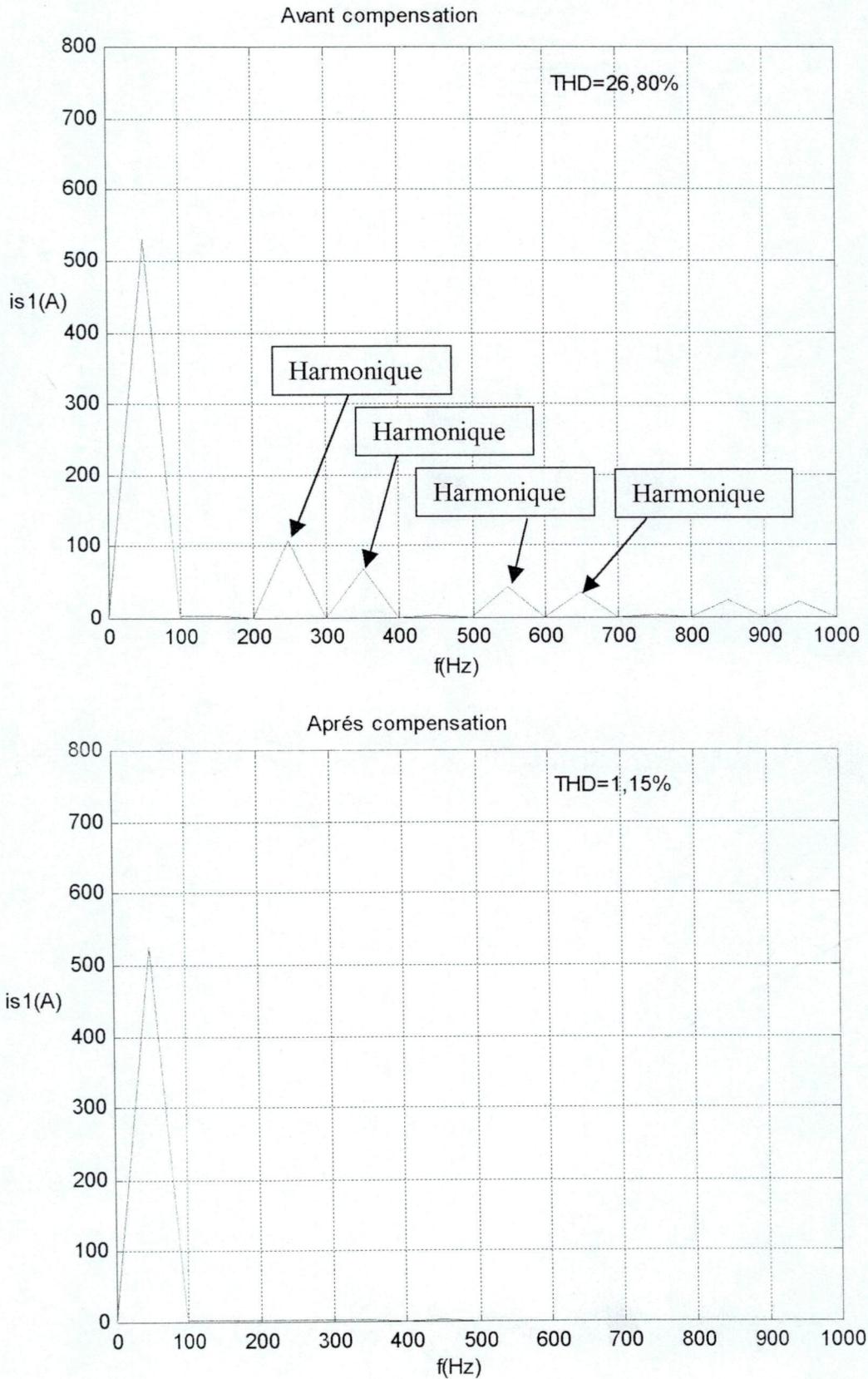


Figure 3.16 Spectre et taux de distorsion du courant source avant et après Compensation avec la commande hystérésis ($\alpha = 30^\circ, \Delta i = 1A$)

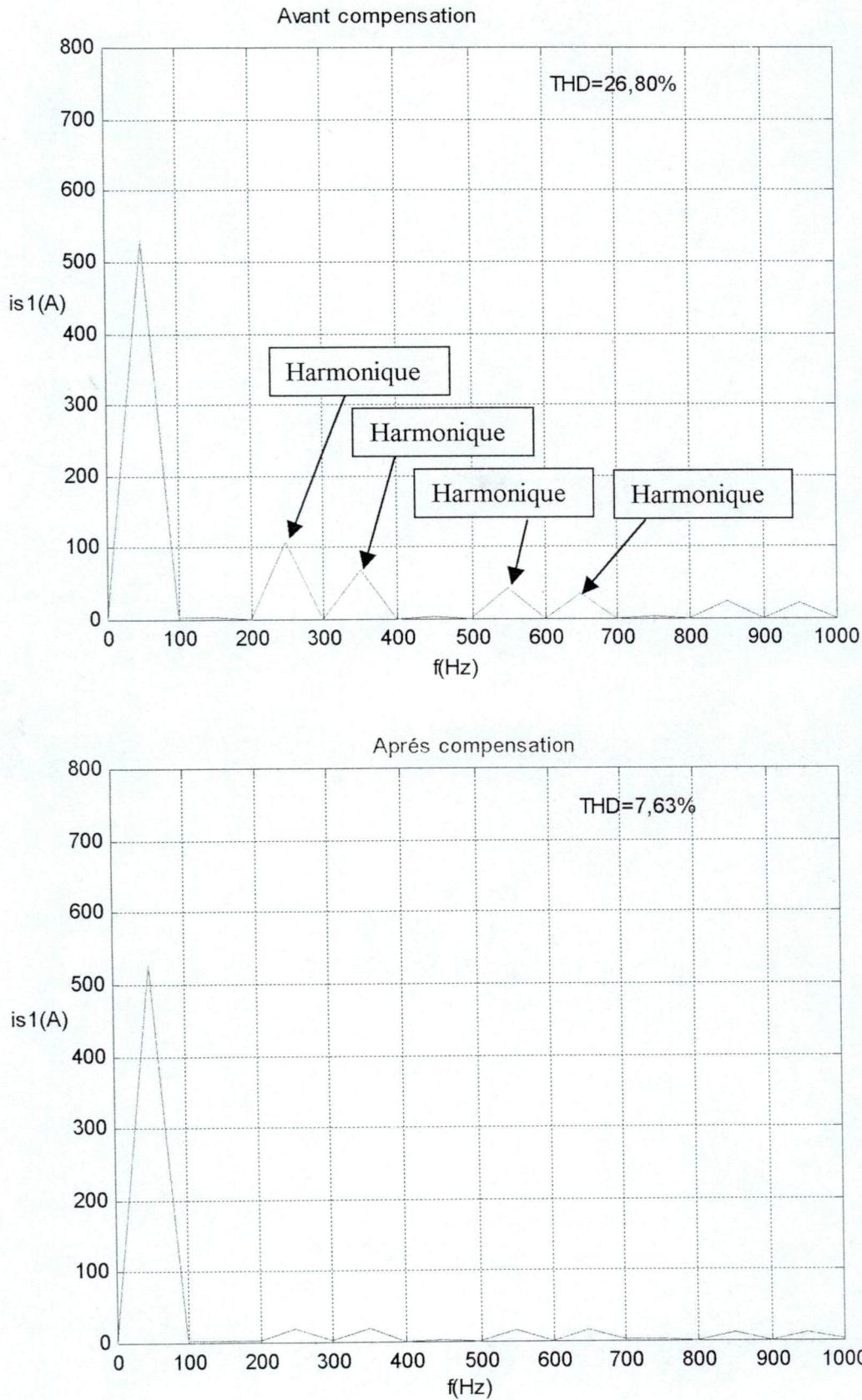


Figure 3.17 Spectre et taux de distorsion du courant source avant et après compensation avec la commande MLI ($\alpha = 30^\circ$)

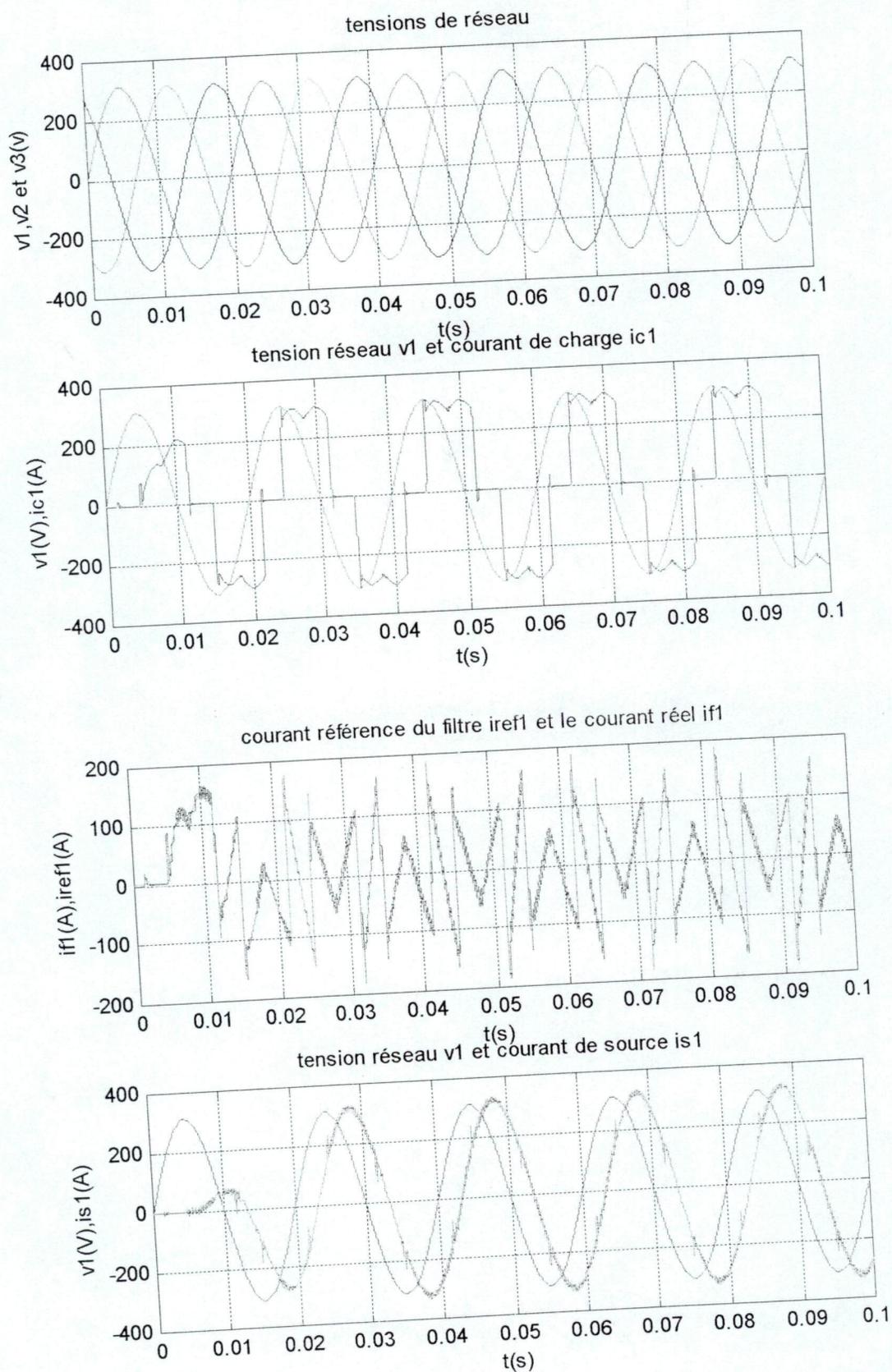


Figure 3.18 Compensation des courants harmoniques avec la commande hystérésis
($\alpha = 60^\circ, \Delta i = 1A$)

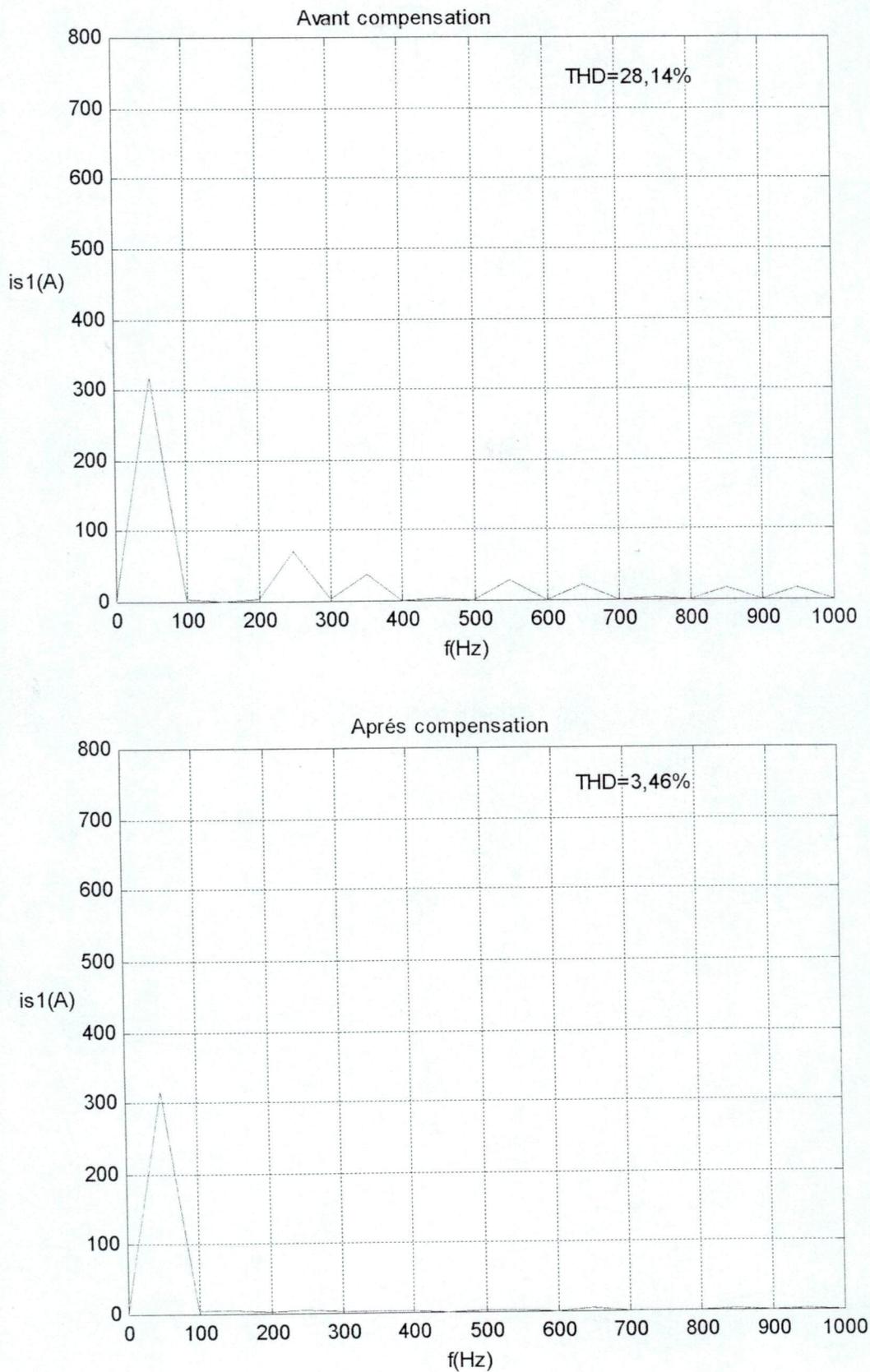


Figure 3.19 Spectre et taux de distorsion du courant source avant et après compensation avec la commande hystérésis ($\alpha = 60^\circ$, $\Delta i = 1A$)

Conclusion

Dans ce chapitre, après avoir présenté les différentes réalisations d'un filtre actif parallèle à structure tension pour un réseau triphasé, nous avons étudié le dimensionnement et le principe de commande d'un filtre actif triphasé.

Deux stratégies de commande(commande par hystérésis, commande par MLI) pour contrôler les courants du filtre actif à structure tension ont été exposées.

La première possède les avantages d'une commande ordinaire à savoir sa simplicité et rapidité. Elle conduit à un fonctionnement à fréquence de commutation variable.

Par contre la deuxième est caractérisée par un fonctionnement à fréquence de commutation fixe mais nécessite une adaptation du régulateur IP utilisé.

Les caractéristiques de compensation du filtre actif à structure tension ont été déterminées par la simulation globale du système réseau - filtre actif – charge polluante. Concernant cette dernière, nous nous sommes plus particulièrement intéressés au cas du redresseur triphasé à thyristors débitant sur une charge inductive.

Le programme de simulation de l'ensemble formé par le système de puissance et le système de commande du filtre actif est réalisé grâce au logiciel Matlab/simulink.

D'après les résultats de simulation, les deux commandes appliquées au filtre actif parallèle ont permis au courants harmoniques délivrés par le filtre actif de bien suivre leurs références pour donner un courant de source sinusoïdal.

La comparaison des taux de distorsion harmonique du courant réseau obtenu avec les deux méthodes de commande, hystérésis et MLI, montre une légère supériorité de la première méthode.

Chapitre IV

**Filtrage actif parallèle avec la
compensation d'énergie réactive et la
régulation du bus continu du filtre actif**

Introduction

Dans le chapitre précédent nous avons analysé la régulation des courants à la sortie du filtre actif, et donc les courants coté alternatif de l'onduleur, en supposant constante la tension aux bornes de la capacité de stockage.

Or, en fonctionnement réel du filtre actif, cette dernière peut varier. En fait durant le régime transitoire de la charge polluante, le filtre actif échange une certaine puissance active avec le réseau. Ceci se traduit par une variation de l'énergie moyenne dans la capacité de stockage et par conséquent par une modification de la valeur de la tension continue [28].

Ce chapitre est consacré à la simulation de la compensation des courants harmoniques et des courants réactifs absorbés par un pont redresseur triphasé à thyristors avec la régulation de la tension aux bornes de l'élément de stockage d'énergie.

IV.1 Régulation de la tension continue V_C

La tension moyenne V_C aux bornes du condensateur C_f doit être maintenue à une valeur constante. Les causes de variation de cette tension sont principalement :

- Les pertes par commutation et par conduction des interrupteurs de puissance.
- Les pertes par effet joule dans les composants passifs L_f et C_f .

A partir de ces considérations, une régulation de la tension aux bornes du condensateur est nécessaire afin d'assurer le rôle de tension continue.

IV.1.1 Objectifs de la régulation

La variation de tension ΔV_C aux bornes du condensateur de stockage dépend principalement de la valeur de la capacité C_f . En effet, une diminution de C_f entraîne l'augmentation de ΔV_C et inversement [23].

L'objectif principal de la régulation de tension revient donc à limiter la variation de tension ΔV_C en utilisant une capacité de valeur aussi faible que possible. De cette façon, le dimensionnement du condensateur pourra être optimisé.

Notons tout de même qu'une réduction trop importante de la valeur du condensateur peut rendre les ondulations de la tension nuisibles.

IV.1.2 Formulation du modèle de la boucle de régulation

En régime permanent, la puissance active fournie par la source doit être égale à la puissance demandée par la charge. Lorsqu'un déséquilibre de puissance active se produit dans le système, le condensateur de stockage d'énergie doit fournir la différence de puissance entre le réseau et la charge. Il en résulte alors une variation de la tension continue aux bornes de la capacité C_f [29].

Si la puissance active fournie par le réseau est inférieure à celle absorbée par la charge ($P_f > 0$) Alors la valeur moyenne de la tension condensateur diminue. Dans le cas contraire ($P_f < 0$), la valeur moyenne de la tension augmente.

La relation liant la puissance active absorbée par le condensateur et la tension à ses bornes s'écrit :

$$P_f = \frac{1}{2} C_f \frac{dV_c^2(t)}{dt} \quad (IV.1)$$

La transformation de Laplace appliquée à la relation (IV.1) conduit au schéma (Figure 4.1) de la régulation en boucle fermée du carré de la tension continue $V_c(p)$.

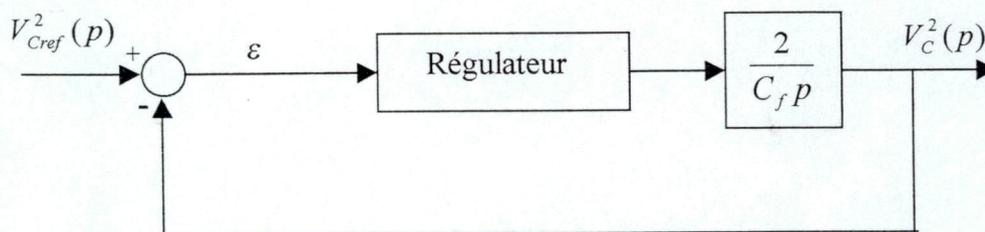


Figure 4.1 Schéma fonctionnel de la régulation de la tension de l'étage continu

IV.1.3 Régulateur de type Intégral-Proportionnel (IP)

Afin de maintenir constante la tension aux bornes du condensateur, on va utiliser un régulateur de type IP (Intégral-Proportionnel). Contrairement à un régulateur proportionnel-Intégral classique PI, le régulateur IP présenté sur la figure 4.2 a la particularité de ne pas générer de zéro supplémentaire dans la fonction de transfert en boucle fermée (un zéro lent pourrait diminuer les performances dynamiques du système).

Afin d'atténuer les ondulations de tension, un filtre passe-bas du premier ordre est appliqué sur la mesure de la tension

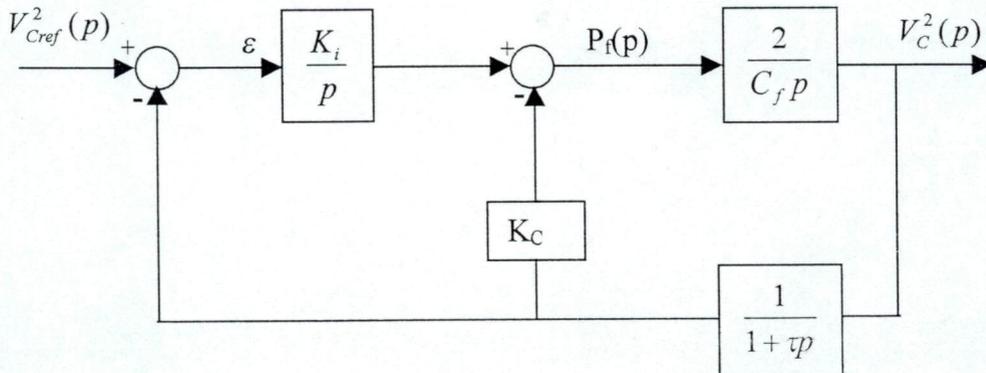


Figure 4.2 Schéma du régulateur de tension de type IP

A partir de la structure du régulateur, on exprime la fonction de transfert en boucle fermée de la façon suivante :

$$V_c^2(p) = \frac{F(p)}{G(p)} V_{cref}^2(p) \quad (IV.2)$$

avec

$$\begin{cases} F(p) = \tau p + 1 \\ G(p) = \frac{C_f \tau}{2K_i} p^3 + \frac{C_f}{2K_i} p^2 + \frac{K_c}{K_i} p + 1 \end{cases} \quad (IV.3)$$

On peut identifier chacun des pôles de la fonction de transfert avec les pôles p_1 , p_2 et p_3 , placés sur le cercle de butterworth de rayon ω_0 , définis de la façon suivante :

$$\begin{cases} p_1 = -\omega_0 \\ p_2 = \omega_0 e^{j\frac{3\pi}{4}} \\ p_3 = \omega_0 e^{-j\frac{3\pi}{4}} \end{cases} \quad (IV.4)$$

avec

$$\omega_0 = \frac{1}{(1 + \sqrt{2})\tau} \quad (IV.5)$$

Une fois l'identification des pôles effectuée, les coefficients du régulateur ont pour expression :

$$\begin{cases} K_c = \frac{C_f}{2(1 + \sqrt{2})\tau} \\ K_i = \frac{C_f}{2(1 + \sqrt{2})^3 \tau^2} \end{cases} \quad \text{avec } \tau = \frac{1}{2\pi f_c} \quad (IV.6)$$

D'après les équations (IV.4) et (IV.5), on constate que la dynamique de la régulation est imposée par la constante de temps τ du filtre passe-bas. La rapidité de la boucle de régulation dépend donc de la fréquence de coupure f_c de ce filtre. Ainsi le filtrage correct des ondulations de tension se fera au dépend d'un mauvais temps de réponse.

On choisit une fréquence de coupure de 30 Hz afin d'assurer un bon compromis entre le taux de distorsion harmonique du courant de référence i_{sref} , et entre la variation et le temps de réponse de V_C . On obtient la valeur numérique ($\tau = 0.0053$).

IV.2 Compensation des courants harmoniques et des courants réactifs

Dans le chapitre précédent, notre simulation a été consacrée seulement pour la compensation des harmoniques en négligeant la correction du courant réactif, ce qui a été expliqué par le déphasage existant entre le courant de source et la tension du réseau.

Dans ce qui suit, on va s'intéresser à compenser l'énergie réactive échangée entre le réseau et la charge non linéaire en tenant compte toujours de la compensation des courants harmoniques.

La compensation de l'énergie réactive consiste à rendre le déphasage entre le courant et la tension de source nul, d'où le facteur de puissance est quasi unitaire.

Si e plus de filtrage des harmoniques on veut compenser l'énergie réactive consommée par la charge, le courant du filtre actif doit contenir, en plus des harmoniques, la partie réactive de la composante fondamentale du courant de charge.

IV.3 Exemple de compensation des courants harmoniques et des courants réactifs d'un redresseur triphasé avec la régulation de la tension du bus continu

IV.3.1 Description du système simulé

Dans cette partie, notre étude va porter sur le système composé d'un réseau alimentant un redresseur triphasé et d'un filtre actif parallèle à structure tension dont le schéma des circuits de puissance et de commande sont donnés sur la figure 4.3.

La méthode directe, décrite dans le chapitre II est utilisée comme algorithme d'extraction des courants. Elle est la plus simple à mettre en œuvre car elle repose uniquement sur la régulation de la tension du bus continu.

Le mode de régulation des courants consiste à l'asservissement des courants issus du Réseau (commande en i_s).

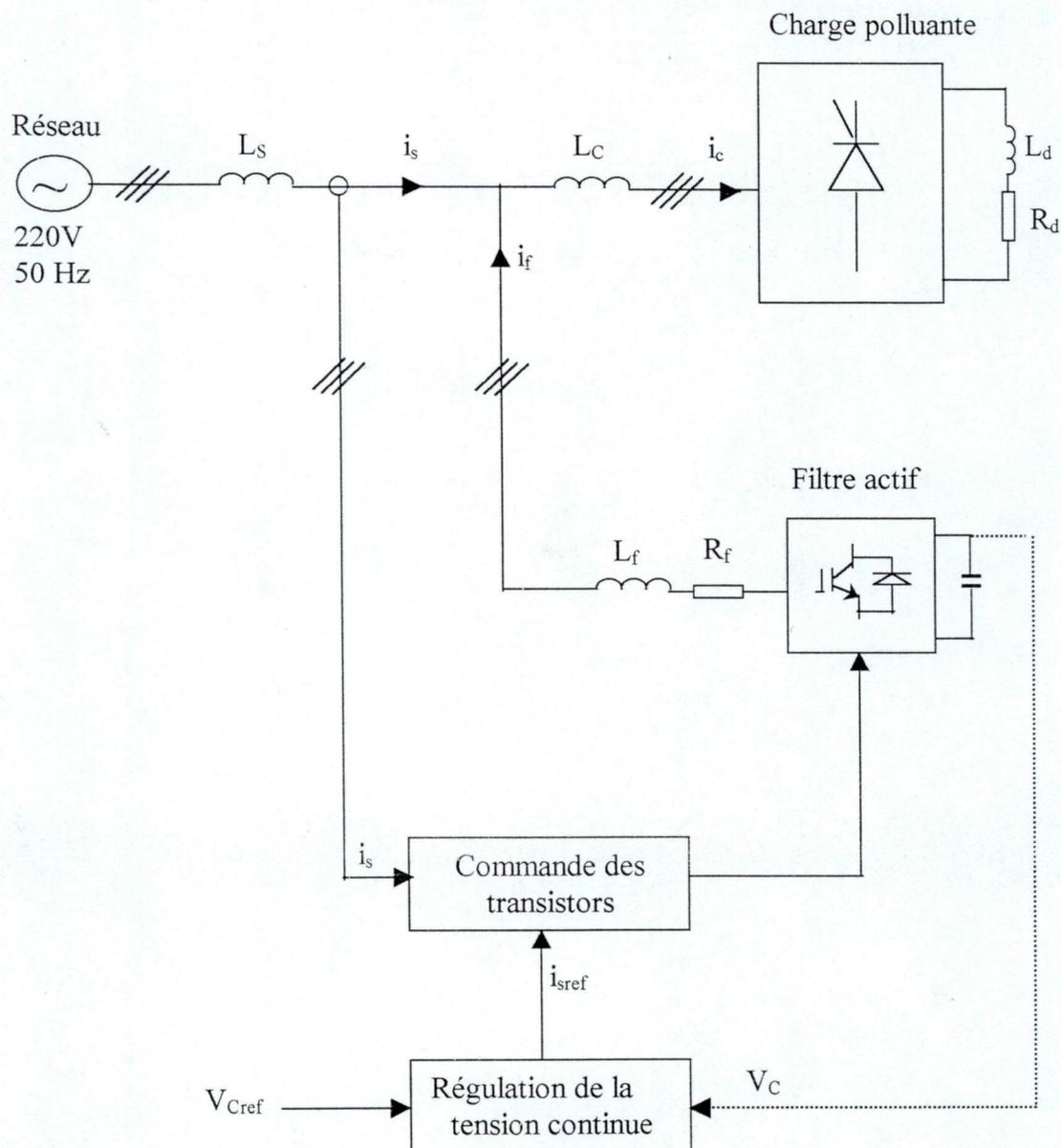


Figure 4.3 Schéma global du système à simuler

IV.3.2 Résultats de simulation

La compensation des courants harmoniques et réactifs est illustrée sur les figures (4.4), (4.5) et (4.6) qui correspondent respectivement à trois angles d'amorçages $\alpha = 0$, $\alpha = 30^\circ$ et $\alpha = 60^\circ$. Les courants de la charge polluante, du filtre actif avec sa référence et du réseau sont représentés à ces figures.

Après compensation, les courants issus de la source i_{s123} sont en phase avec les tensions du réseau, ce qui n'était pas le cas pour le filtrage sans compensation d'énergie réactive présenté dans le chapitre III.

On constate que les courants générés par le filtre actif suivent bien leurs références. Le spectre des figures (4.7) et (4.8) met en évidence que le taux de distorsion du courant de source se dégrade par rapport au cas précédent (compensation des courants harmoniques).

La mesure du THD s'effectue à partir de la composante fondamentale du courant i_s , or celle-ci diminue car seule la composante fondamentale active est fournie par le réseau. Donc pour une atténuation donnée des courants harmoniques, le THD est contraint d'augmenter .

Les performances dynamiques de la régulation de tension sont liées au choix du correcteur. Les simulations représentées sur la figure 4.9 illustrent le comportement du régulateur de tension lors de la connexion de la charge sur le réseau.

On compare les régimes transitoires et les performances du régulateur pour différentes valeurs de capacité C_f . On constate que :

- Pour les valeurs faibles de capacité ($250 \mu F$), le creux de tension est profond ($\Delta V_C = 165V$) et le système est lent (temps de réponse de l'ordre de 0,15s).
- Pour les valeurs $700 \mu F$ et $900 \mu F$ la variation ΔV_C est plus acceptable ($\Delta V_C = 100V$) mais la courbe de variation de V_C présente un dépassement.
- Pour $C_f = 500 \mu F$, la variation est légèrement plus grande, toutefois le dépassement est nul et le système réagit rapidement par rapport aux autres valeurs de C_f .

La variation de ΔV_C aux bornes du condensateur de stockage dépend principalement de la capacité C_f . En effet, une diminution de C_f entraîne l'augmentation de ΔV_C et inversement.

L'objectif principal de la régulation de tension revient à limiter la variation de tension ΔV_C en utilisant une capacité de valeur aussi faible que possible. De cette façon, le dimensionnement du condensateur pourra être optimisé.

Dans notre simulation on a choisi $C_f = 500 \mu F$.

Pour cette valeur on aboutit à :

- Une variation ΔV_C acceptable.
- Un dépassement nul.
- Un système rapide.

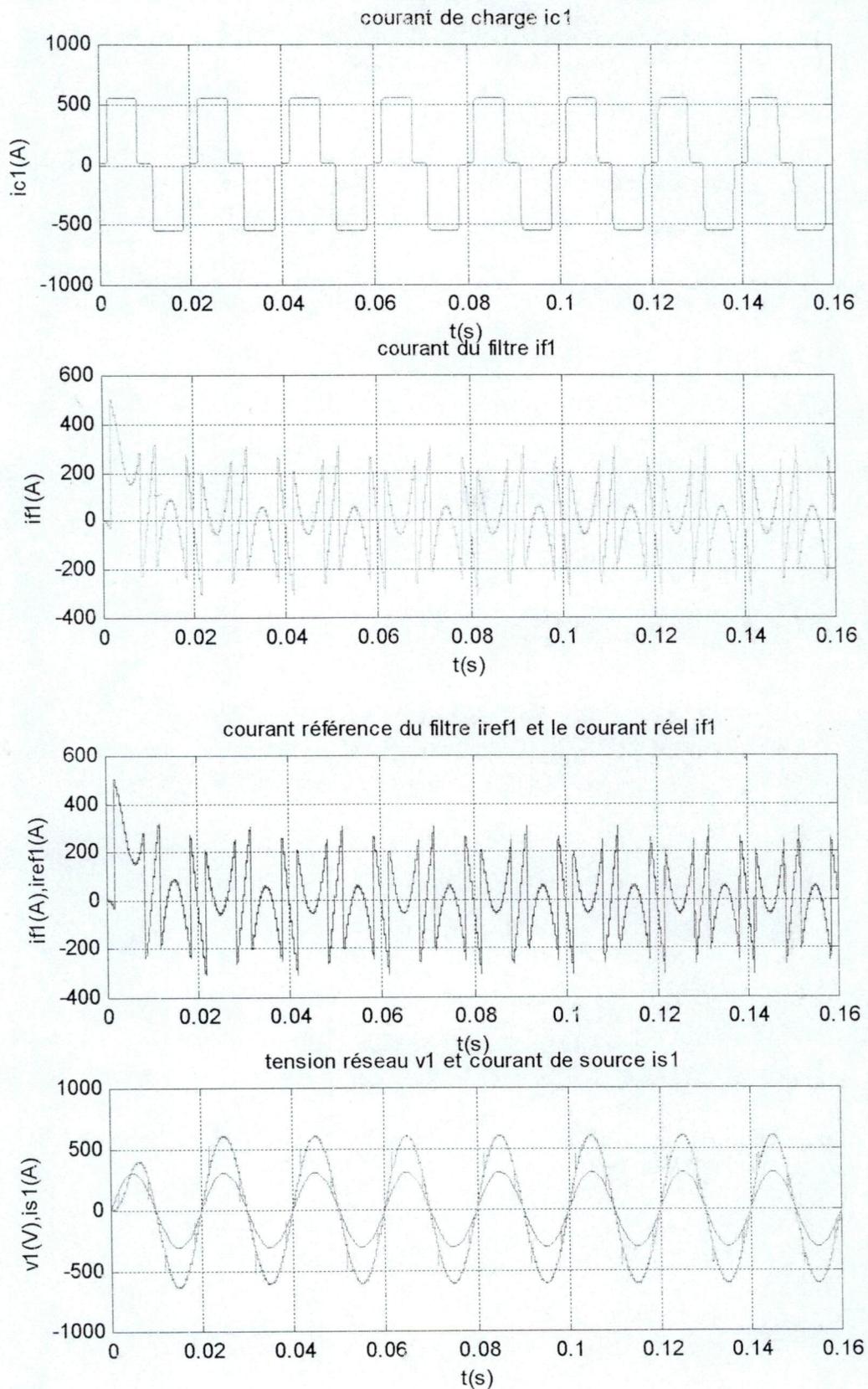


Figure 4.4 Compensation des courants harmoniques et des courants réactifs ($\alpha = 0^\circ$)

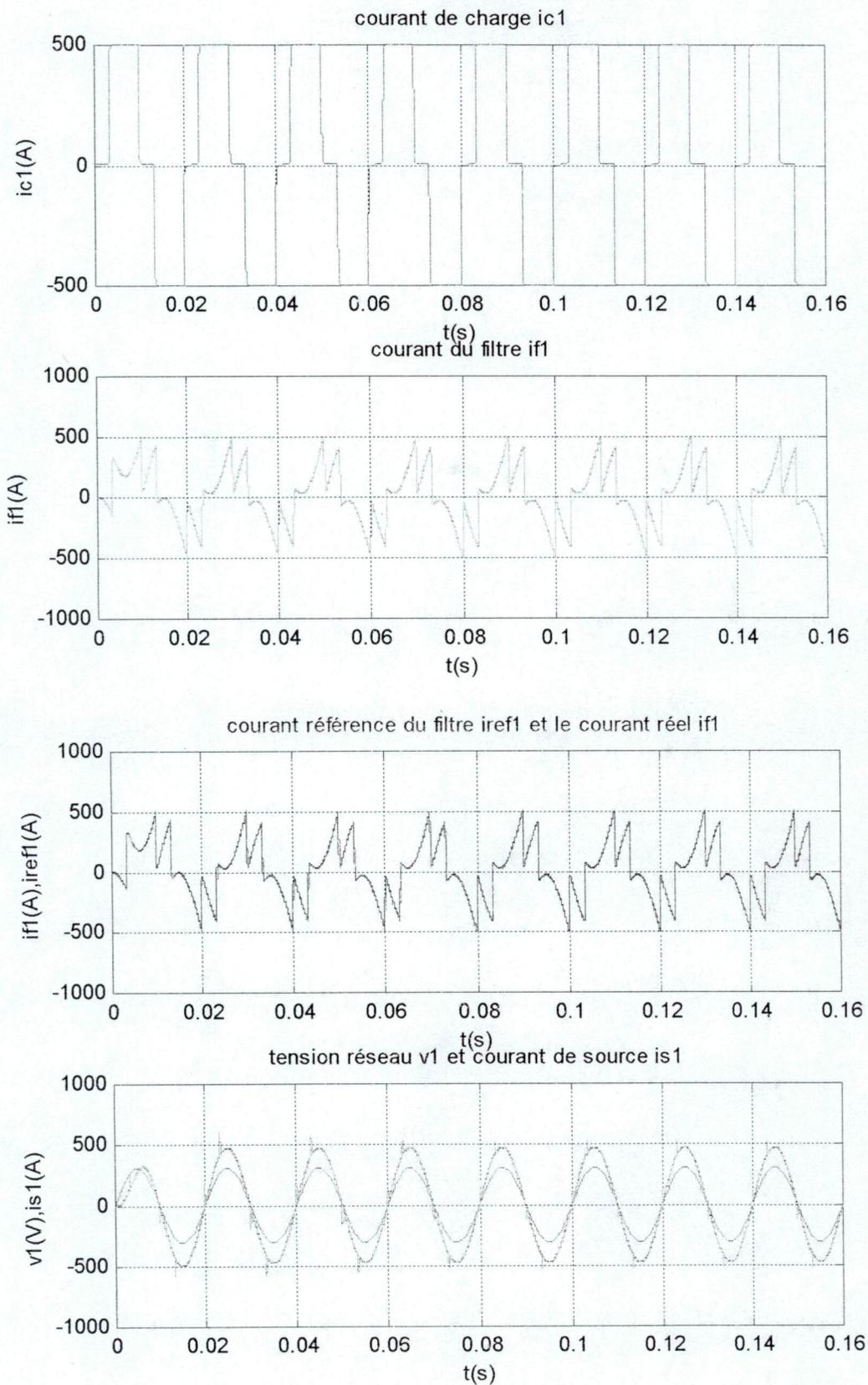


Figure 4.5 Compensation des courants harmoniques et des courants réactifs ($\alpha = 30^\circ$)

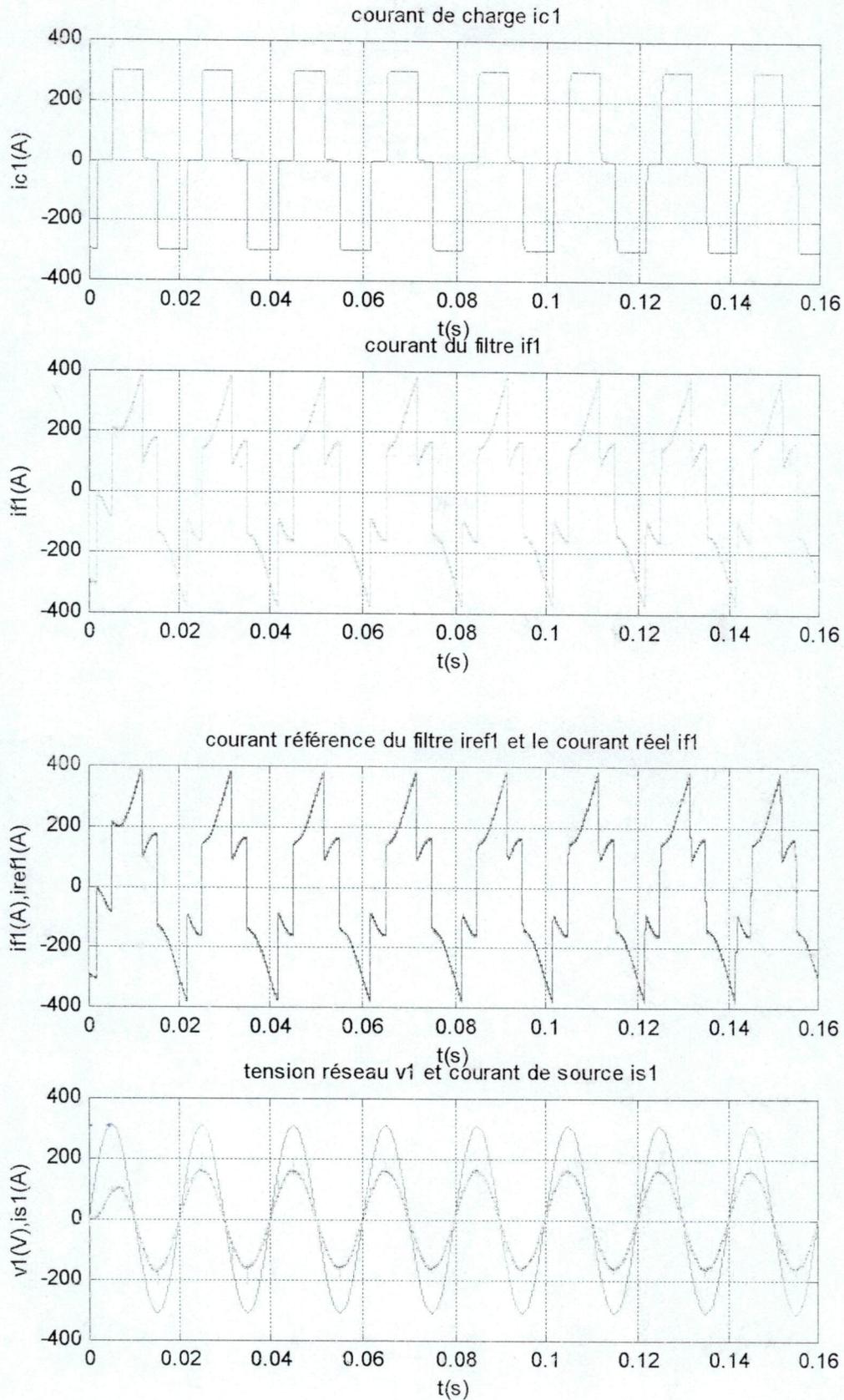


Figure 4.6 Compensation des courants harmoniques et des courants réactifs ($\alpha = 60^\circ$)

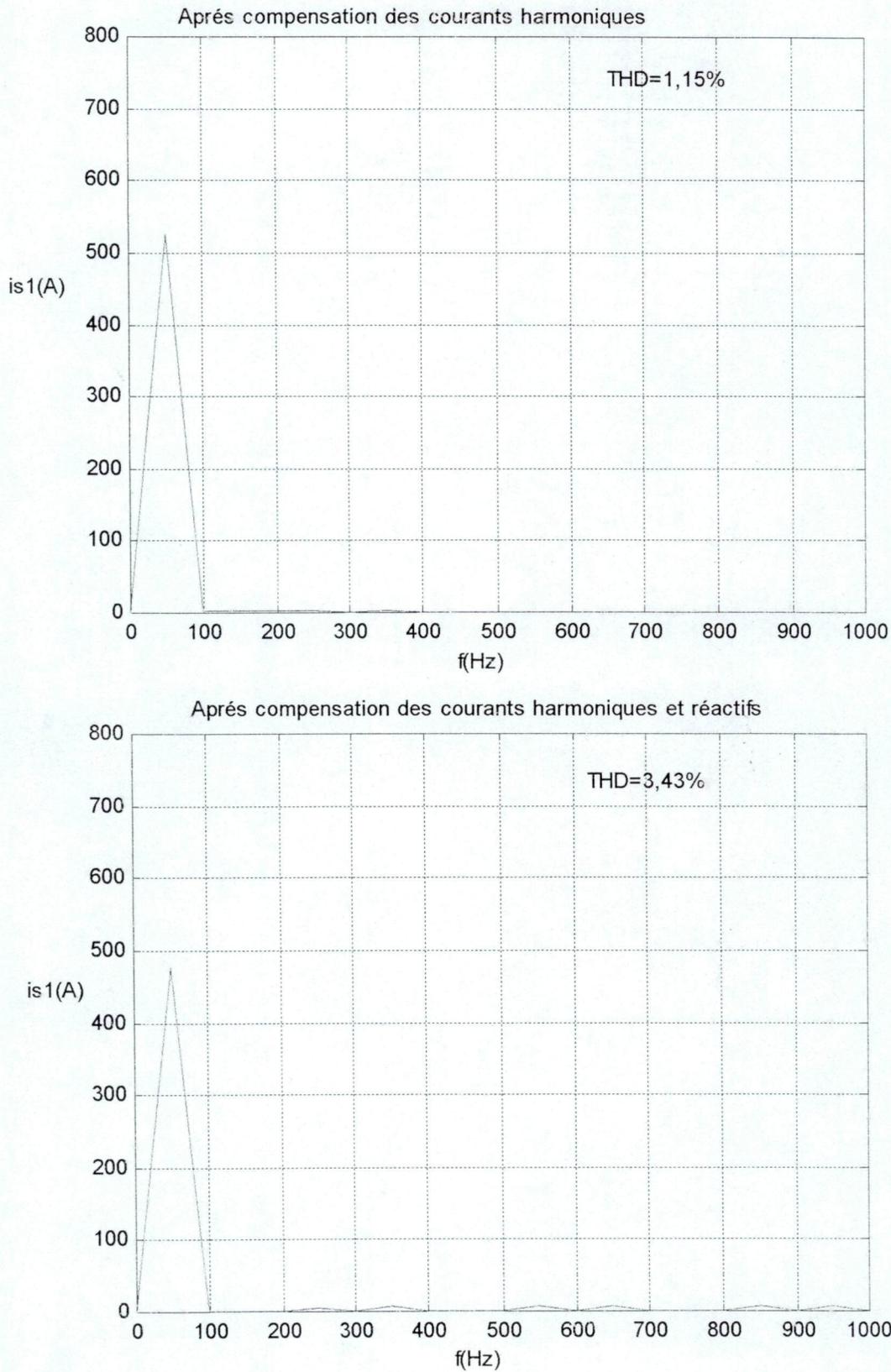


Figure 4.7 Spectre du courant source obtenu après compensation des courants harmoniques et/ou des courants réactifs ($\alpha = 30^\circ$)

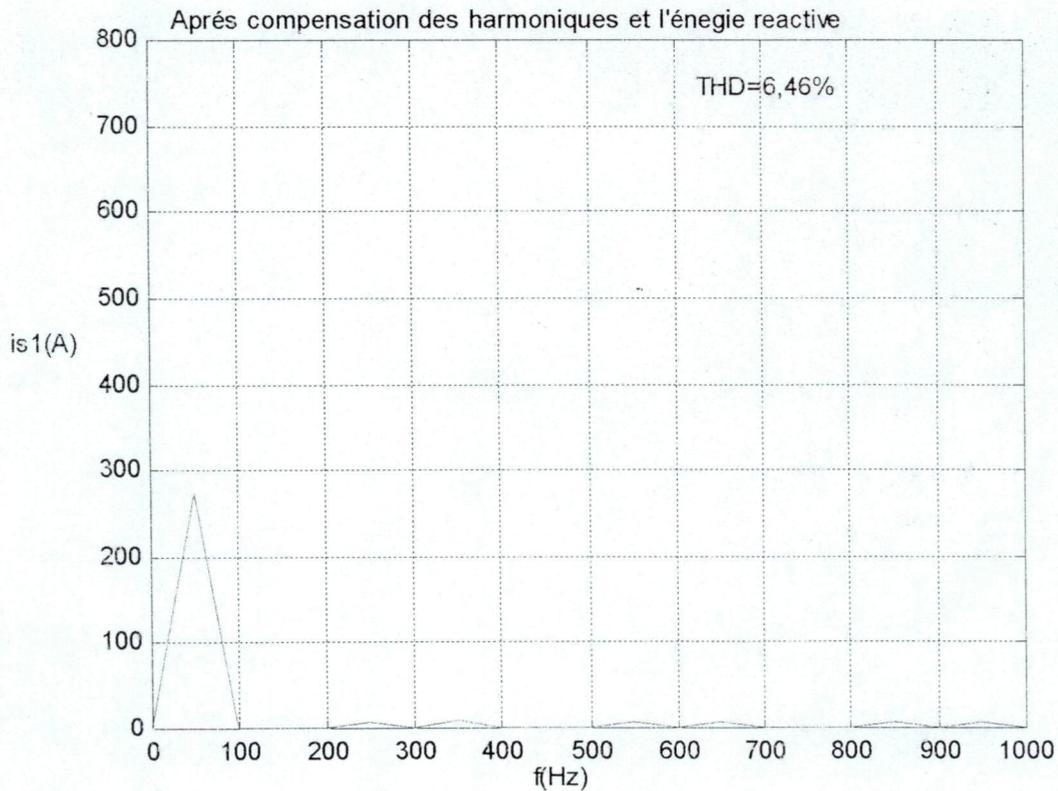
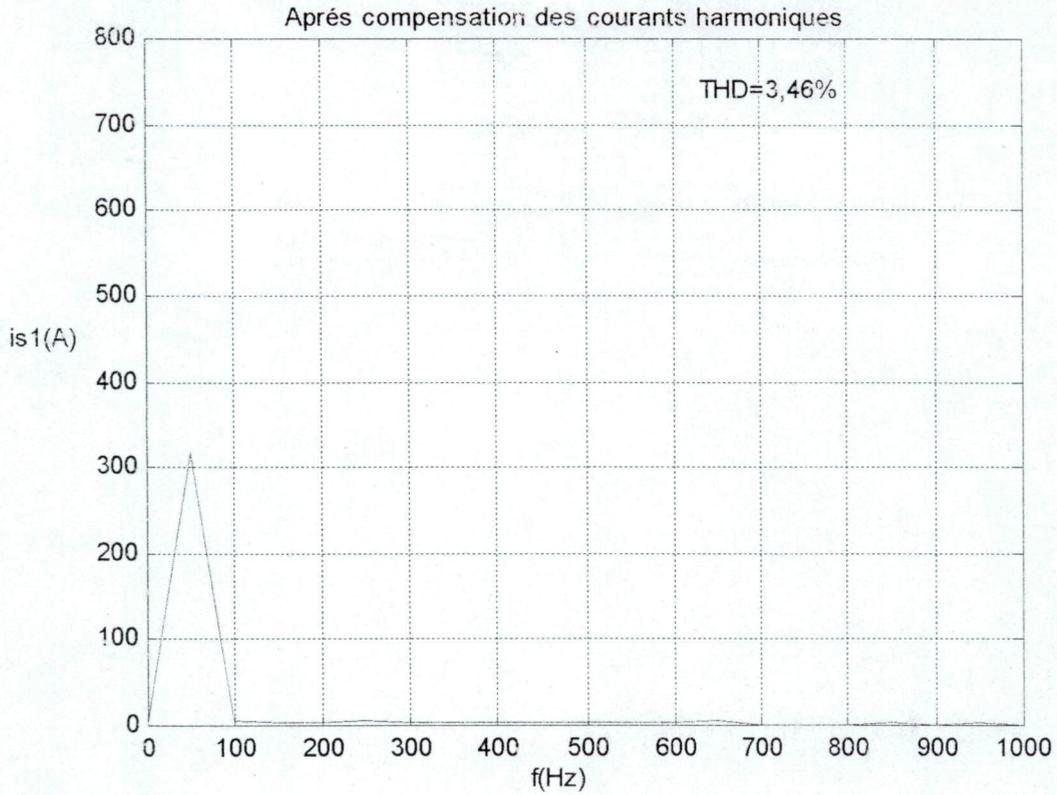
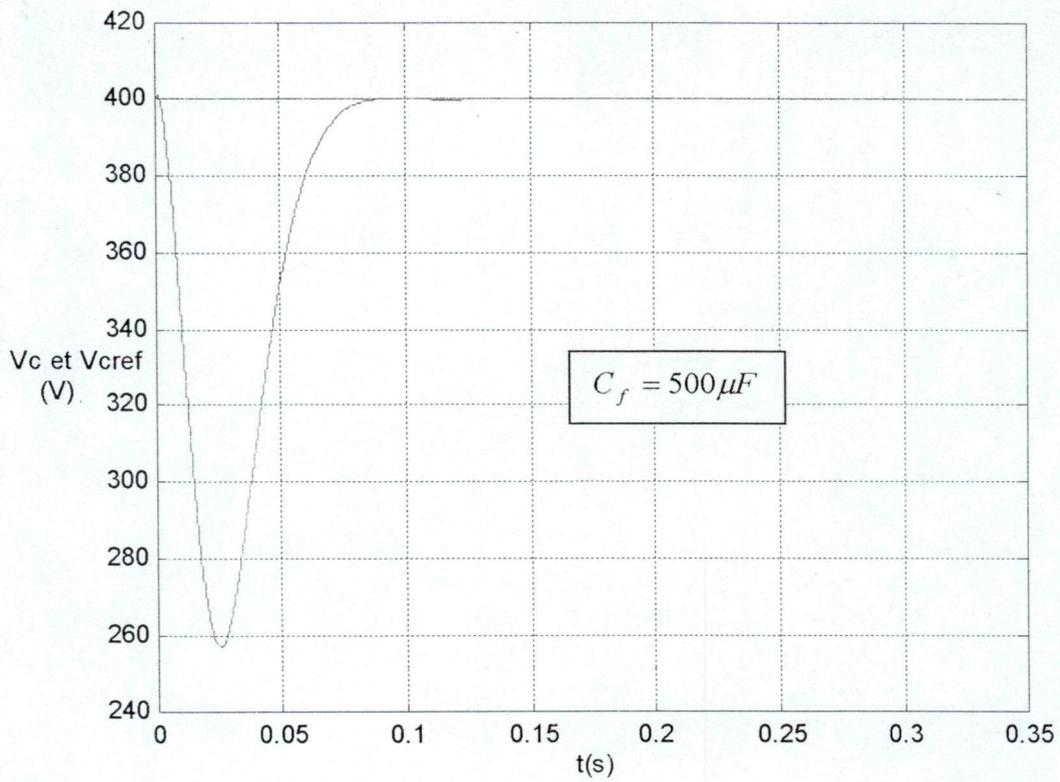
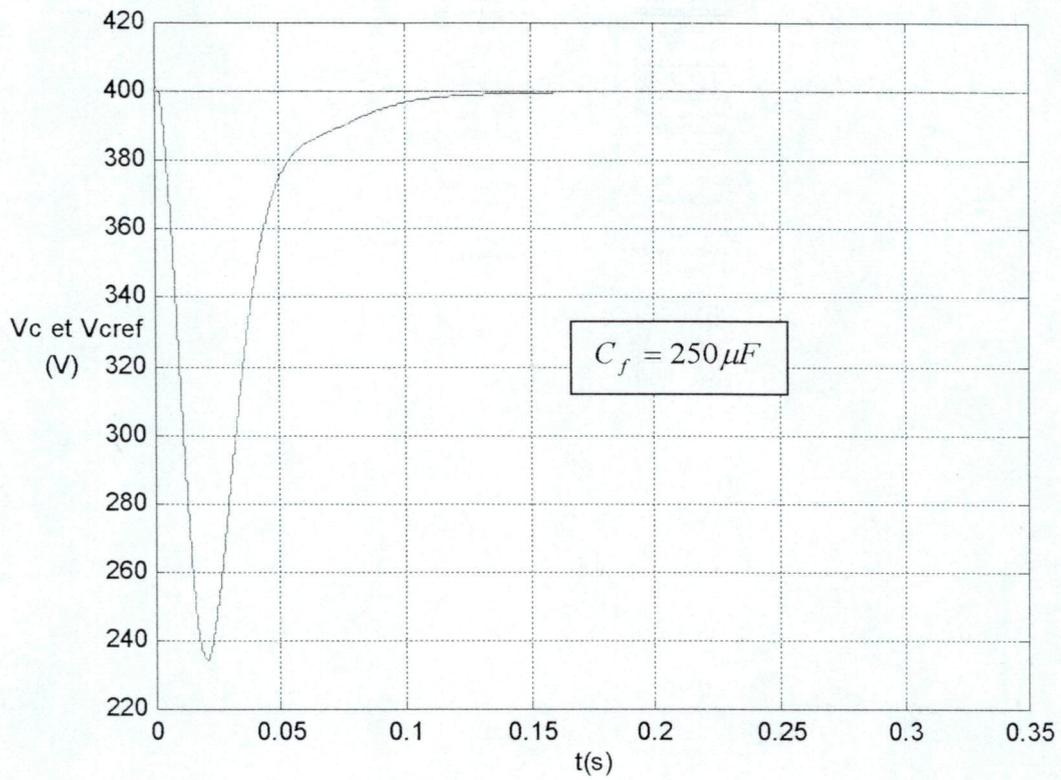


Figure 4.8 Spectre du courant source obtenu après compensation des courants harmoniques et/ou des courants réactifs ($\alpha = 60^\circ$)



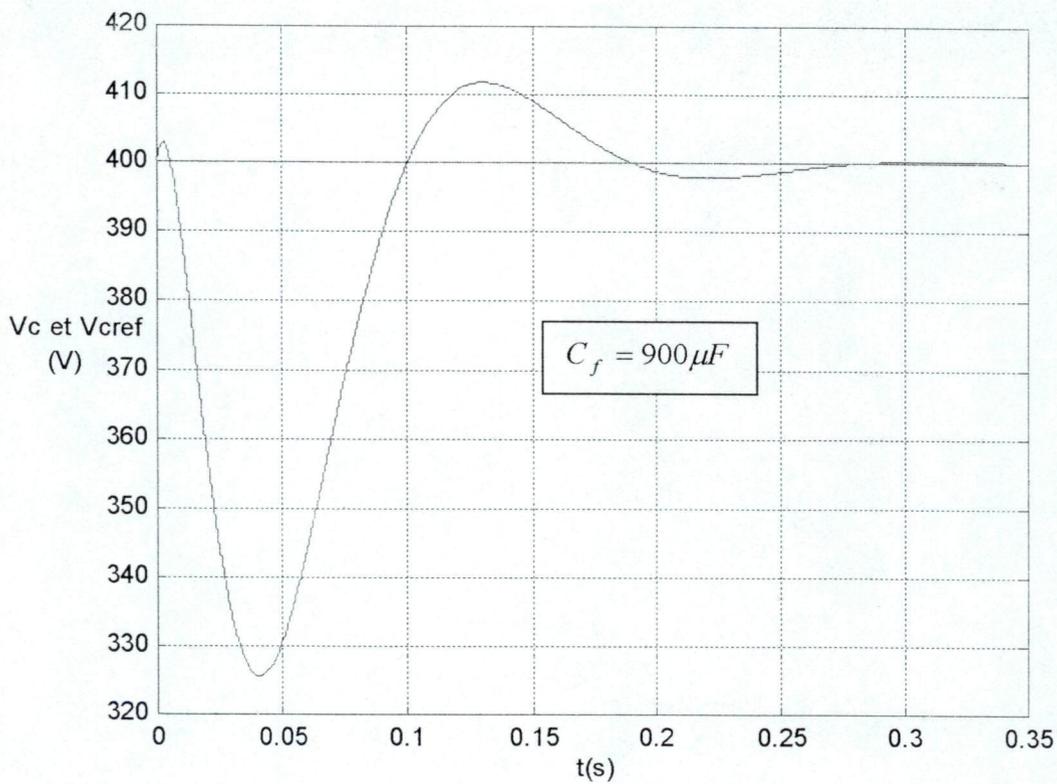
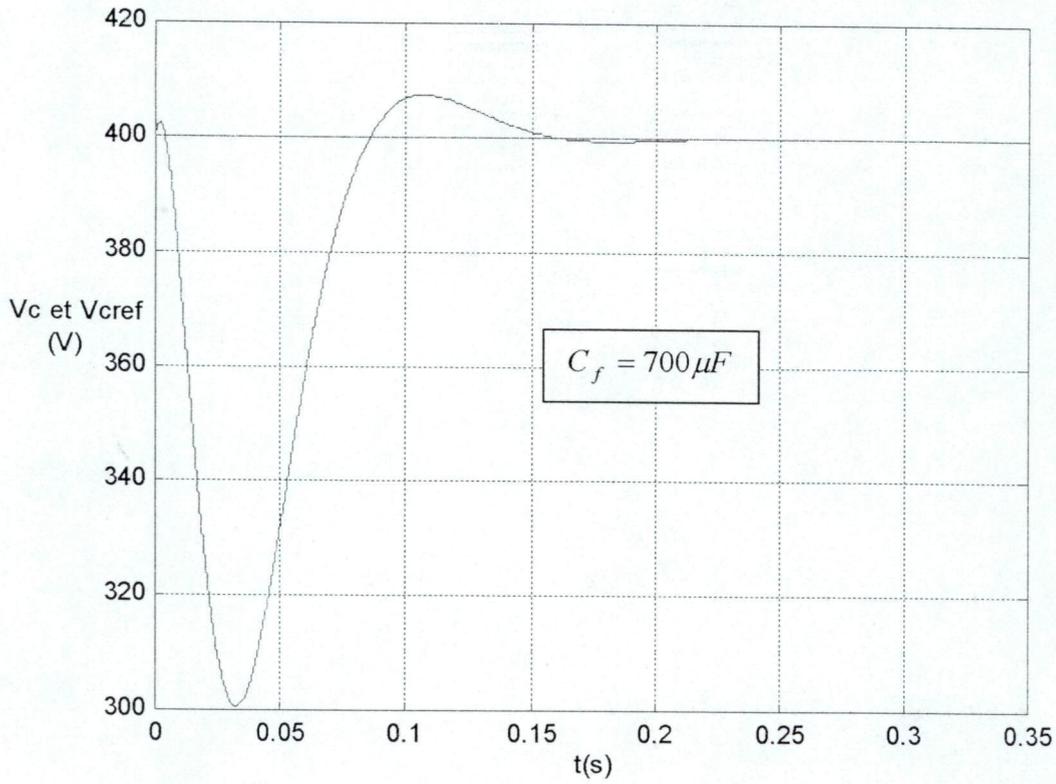


Figure 4.9 Comportement du régulateur IP pour différentes valeurs de C_f

Conclusion

Notre quatrième chapitre s'est porté particulièrement sur un filtre triphasé parallèle destiné à compenser à la fois les courants harmoniques et le fondamental réactif, générés par une charge polluante de type pont triphasé à thyristors, sans négliger l'effet de variation de la tension du bus continu du filtre actif sur les caractéristiques du filtrage.

Nous avons étudié l'interaction entre les performances du régulateur IP de la tension continue et le dimensionnement du réservoir capacitif.

La méthode directe qui repose uniquement sur la régulation du bus continu a été mise en œuvre.

Les résultats de simulation ont confirmé les bonnes performances des régulations des courants et de la tension V_c .

Bibliographie

Bibliographie

- [1] **L. Gyugyi, E.C. Strucular**
« Active AC power filters »
IEEE IAS Annual meeting, 1976, vol. 19-c, pp. 529-535.
- [2] **H. Akagi**
« Trends in active power line conditioners »
IEEE Transaction on power Electronics, vol. 9, no. 3, mai 1994, pp. 263-268.
- [3] **H. Akagi**
« New trends active filters »
EPE , Sevilla, septembre 1995, pp. 017-026.
- [4] **T. Deflandre, P. Maura**
« La maîtrise des harmoniques sur les réseaux industriels et tertiaires »
EDF réf. GEDO. 1.48.B.07/96, Décembre 1996.
- [5] **J.C. Guignard**
« Line harmonics : origin, evolution and limitation »
PCIM/power quality proceeding 26.28 Mai 1998 Nuremberg.
- [6] **J.S. Subjak, J.S. Mckquilkin**
« Harmonics – causes, Effect, measurements, and analysis :AnUpdate »
IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 26, no.6, novembre 1990, pp. 1034.1042.
- [7] **T. Deflandre, P.Maura**
« Les harmoniques sur les réseaux électriques »
Collection de la direction des études et recherches d'électricité de France, EYROLLES,
ISSN 0399-4198,1998.
- [8] **S. Bernard, G.Escriva**
« Surcoûts engendrés par les harmoniques et économies grâce à la compensation active »
REE, N° 5, Mai 1999, pp. 52.60
- [9] **EN 60555**
« Perturbations produites dans les réseaux d'alimentation par les appareils électrodomestiques et les équipements analogues »
CENELEC, Avril 1987
- [10] **M. Pereira, K.Sadek**
« Damping harmonics in the power system with active filters »
EPE, Sevilla, septembre 1995, vol. 1, pp.1.123-1.128
- [11] **J. XU**
« Filtrage actif parallèle des harmoniques des réseaux de distribution d'électricité »
Thèse INPL, Nancy, janvier 1994.

- [12] **C. Lott**
« Filtrage actif parallèle des harmoniques de courant sur les réseaux industriels : étude théorique et réalisation d'une maquette à GTO »
Thèse INPL, Nancy octobre 1995.
- [13] **A. Salem nia**
« Contribution à l'étude théorique et expérimentale d'un filtre actif parallèle à commande analogique et numérique temps réel ».
Thèse INPL, Nancy, septembre 1996.
- [14] **B.M Bird, J.F. Marsh, P.R Mclellan**
« Harmonics reduction in multiple converters by triple frequency injection »
IEE Proceeding, 1969, vol. 116, no .10pp. 1730-1734.
- [15] **J.H.R. Enslin, J. Zhao, R. Spée**
« Opération of the unified power flow controller as harmonic isolator »
IEEE Transaction on power Electronics, vol. 11, no. 6, novembre 1996, pp. 776-784.
- [16] **H. Fujita, H. Akagi**
« The unified quality conditioner the integration of series active filters and shunt active filters »
PE SC' 96, juin 1996, vol.1,pp.494-501.
- [17] **K. Aliouane**
« Contribution à l'étude du filtrage d'harmoniques des réseaux de distribution à l'aide de l'association de filtres actif et passif parallèle »
Thèse INPL, janvier 1995.
- [18] **S. Fukuda, T. Endoh**
« Control method for a combined active filter system employing a current source converter and a high pass filter »
IEEE Transactions on Industry Applications, Mai/Juin, 1995, vol. 31, no.3 pp. 590-597.
- [19] **A. Campos, G. Joos, P. Ziogas, J. Lindsay**
« Analysis and design of a series voltage compensator for three-phase unbalanced sources »
IEEE Transaction on Industrial Electronics, vol. 39, no.2, avril 1992, pp. 159-167.
- [20] **M.Zouiti, S.Saadate**
« Electronic based equipment for flicker mitigation »
ICH QP' 99, Athena 1998, octobre 1998.
- [21] **V.B. Bhavaraju, P. Enjeti**
« A fast active power filter to correct line voltage sags »
IEEE Transaction on Industrial Electronics, vol. 41, no.3, juin 1994, pp. 333-338.
- [22] **S.Y. Choe, K. Heumann**
« Harmonic current compensation using three phase current source converter »
EPE, Firenze 1991, septembre 1991, vol. 3, pp. 6-11.

- [23] **N. Bruyant**
« Etude et commande généralisées de filtres actifs parallèles »
Thèse ESEA Génie électrique, Saint-nazaire, novembre 1999
- [24] **H. Akagi, A. Vabac, S. Atoh**
« Control strategy of active power filters using multiple voltage source PWM converters »
IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 22, no.3, pp. 460-465, 1986.
- [25] **C. Lott, O. Lapierre, H. Pouliquen**
« High power voltage source PWM active filter with low switching effect »
EPE , Sevilla, septembre 1995, vol. 1, pp. 1.908-1.913.
- [26] **L. Benchaita**
« Etude, par simulation numérique et expérimentation, d'un filtre actif parallèle à structure courant avec une nouvelle méthode de contrôle – commande »
Thèse de doctorat de l'université Henri Poincaré, Nancy 1, octobre 1998.
- [27] **B.M. Bird, K.G. King, D.A.G. Pedder**
« An introduction to power electronics »
WILEY, 1993
- [28] **M. Machmoum, N. Bruyant, S.saadate, M.A. Alali**
« Stratégies de dépollution active des réseaux électriques »
Revue RIGE, vol. 4, n° 3-4, 2001, pp 293-316
- [29] **C.Y. Hsu, H.Y. Wu**
« A new single – phase active power filter with reduced energy storage capacitor »
Proc. PESC'95, Atlanta, vol. 1, pp. 202-208.

Annexes

A1

Filtre passe bas :

$$F_b = \frac{\omega_0^2}{p^2 + 2\varepsilon_0\omega_0 p + \omega_0^2}$$

Les paramètres suivants sont retenus pour les filtres passe bas de p et q, destinés à éliminer les composantes continues \bar{p} et \bar{q} :

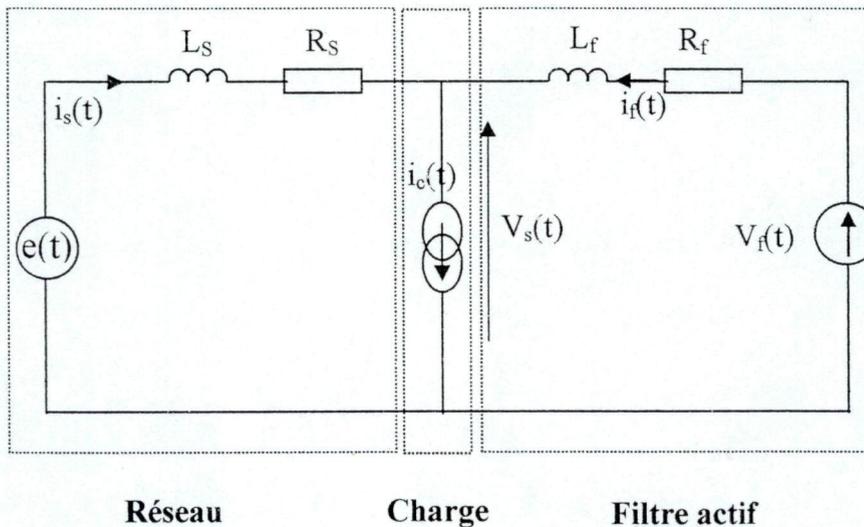
$$\omega_0 = 100\pi \text{ rad/s} \quad \varepsilon_0 = 0.7$$

A2

Contrôle des courants par MLI

L'association du filtre actif et de la charge, connectés au réseau constitue le système. Sa modélisation associée à une commande permettra d'en déduire le schéma bloc de la boucle fermée.

La représentation du modèle électrique par phase est la suivante :



Modèle électrique monophasé de l'ensemble réseau – charge - filtre actif

La charge polluante est représentée par une source de courant regroupant une composante fondamentale et des composantes harmoniques. Le filtre actif est modélisé par une source de tension $V_f(t)$ résultant des commutations des bras de l'onduleur.

A partir de la modélisation électrique, on établit la relation donnant la grandeur asservie i_f en fonction de la grandeur de commande V_f .

$$i_f(p) = \frac{R_s + L_s \cdot p}{R + L \cdot p} i_c(p) + \frac{V_f(p) - V_s(p)}{R + L \cdot p}$$

avec $R = R_s + R_f$
 $L = L_s + L_f$

Pour le correcteur de type Intégral – proportionnel, le schéma de régulation du courant est décrit à la figure 3.12

La fonction de transfert en poursuite est alors :

$$F(p) = \frac{i_f(p)}{i_{ref}(p)} = \frac{\omega_0^2}{p^2 + 2\varepsilon\omega_0 p + \omega_0^2}$$

avec : $\omega_0 = \sqrt{\frac{-K_i}{L}}$ et $\varepsilon = \frac{-K_C - R}{2} \sqrt{\frac{1}{-K_i L}}$

$$\omega_0 = 2\pi f_0$$

d'où : ε est le coefficient d'amortissement.
 f_0 est la fréquence de résonance.

La fréquence de commutation f_c du compensateur actif conditionne également le choix de f_0 dans le sens où f_c est environ trois fois supérieure à f_0 .

$$f_c = 10 \text{ kHz}, f_0 = 3 \text{ kHz}$$

A3

Les paramètres utilisés dans la simulation de la figure 3.13

◆ Réseau :

$$\begin{aligned}V_S &= 220 \text{ V} \\L_S &= 0.011 \text{ mH} \\f &= 50 \text{ Hz}\end{aligned}$$

◆ Redresseur :

$$\begin{aligned}R_d &= 0.88 \ \Omega \\L_d &= 4.4 \text{ mH} \\L_c &= 0.129 \text{ mH}\end{aligned}$$

◆ Filtre actif :

$$\begin{aligned}L_f &= 0.35 \text{ mH} \\R_f &= 0.0012 \ \Omega\end{aligned}$$

A4

Les paramètres du régulateur IP ($C_f = 500 \mu F$, $V_c = 400V$)

$$\begin{aligned}\tau &= 0.0053 \\K_i &= 0.0701 \\K_c &= 0.0065\end{aligned}$$