

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي



BADJI MOKHTAR ANNABA UNIVERSITY  
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA

جامعة باجي مختار - عنابة

Faculté des sciences de l'ingénieur  
Département d'électrotechnique

THESE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de DOCTORAT D'ETAT

Simulation d'un filtre actif parallèle de puissance  
pour la compensation des harmoniques de courant

Option  
Commande électrique

Par  
OMEIRI AMAR

DIRECTEUR DE THESE : Mr HADDOUCHE ALI M.C. UNIVERSITE DE ANNABA

DEVANT LE JURY

PRESIDENT:	Mr OUARI AHMED	M.C.	UNIVERSITE DE ANNABA
EXAMINATEURS:	Mr LEMZADMI AHCENE	M.C.	UNIVERSITE DE GUELMA
	Mr HADJ AHMED ABASSI	Prof.	UNIVERSITE DE ANNABA
	Mr LABAR HOCINE	M.C.	UNIVERSITE DE ANNABA

\* ANNEE 2007 \*

## ملخص

الحمولات الغير خطية تمتص تيارات غير جيبيه وتستهلك عموما استطاعة معوقة . هاتان الظاهرتان أدبا إلى عدد من الاضطرابات من الخلل في سير الأجهزة إلى إتلاف جزئي أو كلي للأجهزة المربوطة بالشبكة.

بسبب التطور في الإلكترونك الطاقة و خاصة التطورات الأخيرة المنجزة في مجال أنصف النواقل الطاقوية ذات التحكم في الفتح والغلق و ذات الاشتغال بتوترات عالية جدا , أجهزة ترشيح متطورة للتوافقيات ذات توافق ذاتي والمسماة ترشيح فعال قد تم انجازها.

العمل المقدم يتضمن خصوصا دراسة بواسطة التظاهر لمرشح فعال متوازي موجه لترشيح التيارات التوافقية الناجمة عن الحمولة الغير خطية وتعويض الطاقة المعوقة. أعمال بحثنا متعلق بدراسة ثنائية خاصة بتبيان التوافقيات و كذلك قيادة المنظم.

مرحلة تبيان التيارات التوافقية هي الأساس نمط الترشيح.طريقتان أصليتان تبيانية قد طورت : طريقة الاستطاعات الحقيقية و الوهمية اللآنية , و طريقة التبيان انطلاقا من التقاط تيار المنبع.

طريقة تبيان الاستطاعات الحقيقية و الوهمية اللآنية قد اختيرت لإنتاج التيارات النموذجية . هذه الأخيرة توفر ميزة اختيار الاضطراب المراد تعويضه بدقة, بسرعة وسهولة إدراجه .

طريقة جديدة لأستا صال التيار النموذجي قد طورت , هذه الطريقة التبيانية تركز على التقاط تيار المنبع. المرشح الفعال المقدم يحتوي دارة تحكم بسيطة تتعلق باستعمال ملقطين للتوتر و ملقاط للتيار. ميزة هذا المرشح النموذجي هي سهولة التحكم قلة تكلفة انجازه.نمطية والتظاهر لمجمل الشبكة,أي الشحنة الملوثة و المرشح الفعال المتوازي قد عرضت.

صلاحية الطريقتين المقدمتين قد أنجزت بتظاهر رقمي. عدة عينات التظاهر مرفقة بتحليل مؤقت و بتحليل إشعاعي قد أنجزت انطلاقا من نموذج مجموعة الشبكة, المرشح الفعال المتوازي والحمولة الملوثة. نتائج التظاهر للطريقتين المقدمتين توضح أن المرشح الفعال يزيل ثلوث الشبكة الكهربائية بطريقة فعالة من التوافقيات الناجمة عن الحمولة الغير خطية.

## **ABSTRACT**

The nonlinear loads absorb nonsinusoidal currents and generally consume reactive power. These two phenomena generate some disturbances of the dysfunction of equipment until the deterioration of a part or totality of the equipment connected on the network.

Due to the evolution of power electronics of and especially with the recent progress made in the field of the power semiconductors functioning at very high frequencies, modern means of filtering of the self-adapting harmonics, called active power filter could be conceived.

Work that we present particularly relates to the study with digital simulation of a parallel active filter intended to filter the harmonic currents generated by a nonlinear load and to compensate for reactive energy. Our research tasks relate to the joint study of the identification of the harmonics and the control of the inverter. The stage of identification of the harmonic currents is fundamental in the process of filtering. Two original techniques of identification were developed: method of the real and imaginary powers instantaneous, method of identification using the detection of the supply current.

The method of identification of the real and imaginary powers instantaneous was selected to generate the currents of references. This one offers the advantage of choosing the disturbance to be compensated with precision, speed and easy to be implemented.

A new method of extraction of the current of reference was developed; this method of identification is based on detection of the supply current. The active filter proposed has a very simple control circuit which consists in using two sensors of tension and only one sensor of current. The advantage of this type of active filter is the simplicity of order and the low cost of implementation.

The modelling and the simulation of the supply network, nonlinear load and parallel active filter were presented. The validation of the two methods suggested was carried out by digital simulation. Several cases of simulation accompanied by a temporal analysis and a spectral analysis were carried out starting from the model of the supply network, nonlinear load and parallel active filter. The simulation results of the two methods proposed show that the parallel active filter can effectively suppress the current harmonic to force the supply current to be sinusoidal and compensate the reactive power generated by the nonlinear load.

## **RESUME**

Les charges non linéaires absorbent des courants non sinusoïdaux et consomment généralement de la puissance réactive. Ces deux phénomènes engendrent un certain nombre de perturbations allant du dysfonctionnement d'un équipement jusqu'à la détérioration d'une partie ou de la totalité des équipements connectés sur le réseau.

Grâce à l'évolution de l'électronique de puissance et surtout aux récents progrès réalisés dans le domaine des semi-conducteurs de puissance, commandables à l'ouverture et à la fermeture, fonctionnant à des fréquences très élevés, des dispositifs de filtrage modernes des harmoniques auto-adaptables, appelés filtrage actifs ont pu être conçus.

Le travail que nous présentons concerne particulièrement l'étude par simulation numérique d'un filtre actif parallèle destiné à filtrer les courants harmoniques générés par une charge non linéaire et à compenser l'énergie réactive. Nos travaux de recherches portent sur l'étude conjointe de l'identification des harmoniques et de la commande de l'onduleur. L'étape d'identification des courants harmoniques est fondamentale dans le processus de filtrage. Deux techniques originales d'identification ont été développées : méthode des puissances réelles et imaginaires instantanées, méthode d'identification à partir de la détection du courant de la source.

La méthode d'identification des puissances réelles et imaginaires instantanées a été choisie pour générer les courants de références. Celle-ci offre l'avantage de choisir la perturbation à compenser avec précision, rapidité et facilité d'implantation.

Une nouvelle méthode d'extraction du courant de référence a été développée, cette méthode d'identification est basée sur la détection du courant de source. Le filtre actif proposé possède un circuit de commande très simple qui consiste à utiliser deux capteurs de tension et un seul capteur de courant. L'avantage de ce type de filtre actif est la simplicité de commande et le coût d'implémentation faible.

La modélisation et la simulation de l'ensemble réseau, charge polluante et filtre actif parallèle ont été présentées. La validation des deux méthodes proposées a été effectuée par simulation numérique. Plusieurs cas de simulation accompagnés d'une analyse temporelle et d'une analyse spectrale ont été effectués à partir du modèle de l'ensemble réseau, filtre actif parallèle et charge polluante. Les résultats de simulation pour les deux méthodes proposées montrent que le filtre actif parallèle dépollue efficacement le réseau électrique des harmoniques générées par la charge non linéaire.

## **DEDICACE**

Je dédie ce modeste travail à :

**A ma regrettée grand-mère**

**A mes regrettés parents**

**A ma femme**

**A mon fils**

**A mes deux filles**

**A mes frères et sœurs**

## **REMERCIEMENTS**

Le travail présenté dans cette thèse a été réalisé au sein du département d'électrotechnique, faculté des sciences de l'ingénieur, Université Badji Mokhtar – Annaba et le Laboratoire d'électronique de puissance de l'Université de Wales - Swansea, Grande Bretagne.

Je voudrais tout d'abord exprimer toute ma reconnaissance à Monsieur Ali Haddouche, Maître de conférence à l'Université Badji Mokhtar – Annaba, pour son encadrement et les conseils avisés qu'il a su me prodiguer tout au long de ces années.

Je remercie Monsieur Ahmed Ouari, Maître de conférence à l'Université Badji Mokhtar – Annaba, de m'avoir fait l'honneur de présider le jury de soutenance.

Je remercie Messieurs Hadj Ahmed Abassi, Professeur et Hocine Labar, Maître de conférence à l'Université Badji Mokhtar – Annaba et Monsieur Ahcene Lemzadmi, Maître de conférence à l'Université de Guelma, pour m'avoir fait l'honneur de participer au jury de soutenance.

Je tiens aussi à remercier Monsieur Mohamed Salah Khanniche, Maître de conférence à l'Université de Wales - Swansea, Grande Bretagne, de m'avoir accueilli au sein de son Laboratoire et de m'avoir permis d'utiliser les moyens de sa structure pour mes recherches.

Mes remerciements à Monsieur D. M. Grant, Maître de conférence à l'Université de Strathclyde - Glasgow, Grande Bretagne, pour m'avoir accueilli au sein de son Laboratoire.

## LISTE DES TABLEAUX

TABLEAUX	TITRES	N°
Tableau 1.1	Caractéristiques de quelques générateurs d'harmoniques	16
Tableau 1.2	Niveaux de compatibilité pour les tensions harmoniques individuelles sur les réseaux publics basse tension (norme CEI 61000-2-2)	18
Tableau 1.3	Limite des composantes harmoniques en courant (norme CEI 61000-3-2)	19
Tableau 1.4	Limites IEEE pour la distorsion harmonique de la tension.	19
Tableau 1.5	Limites IEEE des émissions de courants harmoniques	20
Tableau 1-6	Classification IEEE des perturbations électromagnétiques.	20
Tableau 2	Récapitulatif des solutions de dépollution	32
Tableau 4.1	Tensions générées par l'onduleur	63
Tableau 4.2	Valeurs des éléments caractérisant la structure étudiée	65

## LISTE DES FIGURES

FIGURES	TITRES	N°
Figure 1.1	Les perturbations électriques	8
Figure 1.2	Courant absorbé par une charge non linéaire	15
Figure 2.1	Filtre passif résonant	24
Figure 2.2	Filtre passif amorti.	24
Figure 2.3	Forme d'onde des courants absorbés.	25
Figure 2.4	Redresseur dodécaphasé, (a) montage en série et (b) montage en parallèle des deux ponts redresseurs.	26
Figure 2.5	Filtre actif parallèle (FAP)	27
Figure 2.6	Filtre actif série (FAS)	28
Figure 2.7	Combinaison parallèle-série actifs (UPQC)	29
Figure 2.8	Filtre actif série et filtre passif parallèle	30
Figure 2.9	Filtre actif série connecté en série avec un filtre passif parallèle	31
Figure 2.10	Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle	31
Figure 3.1	Schéma de principe du filtre actif parallèle	34
Figure 3.2	Schéma de principe de l'ensemble réseau électrique, charge polluante et filtre actif et formes d'ondes des courants respectifs.	35
Figure 3.3	Structure d'un filtre actif parallèle	36
Figure 3.4	Onduleur de tension	37
Figure 3.5	Onduleur de courant	38
Figure 3.6	Principe de la commande des courants par hystérésis	39
Figure 3.7	Commande par hystérésis	40
Figure 3.8	Principe de commande des courants par MLI	40
Figure 3.9	Commande par modulation de largeur d'impulsion (a) signal de référence et de porteuse, (b) tension de sortie	41
Figure 3.10	Schéma de principe de l'onduleur monophasé commandé par MLI sinus-triangle	42
Figure 3.11	Schéma de l'ensemble réseau, charge polluante et filtre actif parallèle	44
Figure 3.12	Rapport des puissances du filtre actif parallèle et de la charge non linéaire pour la compensation des courants harmoniques	48
Figure 3.13	Rapport des puissances du filtre actif parallèle et de la charge non linéaire pour la compensation des courants harmoniques et de la puissance réactive	49



FIFURES	TITRES	N°
Figure 4.1	Algorithme d'identification des courants harmoniques basé sur le calcul des puissances réelle et imaginaires instantanées.	55
Figure 4.2	Boucle de régulation de la tension continue	57
Figure 4.3	Schéma de la régulation des courants du filtre actif parallèle	58
Figure 4.4	Schéma synoptique de l'ensemble réseau, filtre actif parallèle et charge polluante	59
Figure 4.5	Schéma synoptique d'un réseau triphasé.	60
Figure 4.6	Schéma synoptique d'un pont redresseur.	61
Figure 4.7	Présentation schématique d'un onduleur triphasé.	61
Figure 4.8	Représentation vectorielle des tensions générées par l'onduleur	64
Figure 4.9	Formes d'ondes des courants et de la tension continue : $i_{ch}$ courant de charge, $i_f$ courant du filtre actif, $i_s$ courant de source et $v_{dc}$ tension aux bornes du condensateur	66
Figure 4.10	Spectre du courant de la charge non linéaire	67
Figure 4.11	Spectre du courant de source.	67
Figure 4.12	Formes d'ondes des courants et de la tension continue : $i_{ch}$ courant de charge, $i_f$ courant du filtre actif, $i_s$ courant de source et $v_{dc}$ tension aux bornes du condensateur	68
Figure 4.13	Spectre du courant de la charge non linéaire	69
Figure 4.14	Spectre du courant de source	69
Figure 4.15	Formes d'ondes des courants et de la tension continue : $i_{ch}$ courant de charge, $i_f$ courant du filtre actif, $i_s$ courant de source et $v_{dc}$ tension aux bornes du condensateur, $i_d$ courant de charge (coté continu)	70
Figure 5.1	Schéma de l'ensemble réseau, filtre actif parallèle monophasé et charge polluante	73
Figure 5.2	Filtre actif monophasé de puissance	83
Figure 5.3:	Phase de conduction pour $i_c > 0$ .	86
Figure 5.4:	Phase de conduction pour $i_c < 0$ .	86
Figure 5.5:	Schéma synoptique de l'ensemble réseau, filtre actif parallèle monophasé et charge polluante	87
Figure 5.6	Formes d'ondes des courants et de la tension continue : $i_{ch}$ courant de charge, $i_f$ courant du filtre actif, $i_s$ courant de source et $v_{dc}$ tension aux bornes du condensateur	89
Figure 5.7	Spectre du courant de source avant et après filtrage	89
Figure 5.8	Formes d'ondes des courants et de la tension continue : $i_{ch}$ courant de charge, $i_f$ courant du filtre actif, $i_s$ courant de source et $v_{dc}$ tension aux bornes du condensateur	90
Figure 5.9	Spectre du courant de source avant et après filtrage	90
Figure 5.10	Schéma synoptique de l'ensemble réseau, filtre actif parallèle triphasé et charge polluante	92
Figure 5.11	Formes d'ondes des courants et de la tension continue : $i_{ch}$ courant de charge, $i_f$ courant du filtre actif, $i_s$ courant de source et $v_{dc}$ tension aux bornes du condensateur	93
Figure 5.12	Spectre du courant de la charge non linéaire	93
Figure 5.13	Spectre du courant de source	93
Figure 5.14	Formes d'ondes des courants et de la tension continue : $i_{ch}$ courant de charge, $i_f$ courant du filtre actif, $i_s$ courant de source et $v_{dc}$ tension aux bornes du condensateur	94
Figure 5.15	Spectre du courant de la charge non linéaire	95

Figure 5.16	Spectre du courant de source.	95
Figure 5.17	Formes d'ondes des courants: $i_{ch}$ courant de charge, $i_f$ courant du filtre actif, $i_s$ courant de source	96
Figure 5.18	Spectre du courant de source avant et après filtrage	96
Figure 5.19	Formes d'ondes des courants: $i_{ch}$ courant de charge, $i_f$ courant du filtre actif, $i_s$ courant de source	97
Figure 5.20	Spectre du courant de source avant et après filtrage	97

## LISTE DES SYMBOLES

Symbole	Désignation
P	Puissance active
Q	Puissance réactive
D	Puissance déformante
S	Puissance apparente
$V_{s1,2,3}$	Tensions de la source
$e_{1, 2,3}$	Système de F. e. m. triphasé du réseau
$U_d$	Tension continue à la sortie du redresseur
$I_d$	Courant continu fournit par le redresseur
$I_f$	Courant efficace du filtre actif
$I_{ch}$	Courant efficace de la charge non linéaire
$I_{ch-h}$	Courant harmonique de la charge non linéaire
$I_s$	Courant efficace de la source
$V_{ch}$	Tension de la charge non linéaire
$V_f$	Tension du filtre actif
FP	Facteur de puissance
$THD_i$	Taux de distorsion harmonique en courant
$THD_v$	Taux de distorsion harmonique en tension
$V_{s1}$	Tension fondamentale de la source
$V_{sh}$	Tension harmonique de la source
$f_r$	Fréquence du réseau
$\omega$	Pulsation du réseau
$f_p$	Fréquence de la porteuse
m	Indice de modulation
r	Coefficient de réglage
$V_p$	Amplitude de la porteuse
$V_r$	Amplitude de la référence
$R_{ch}, L_{ch}$	Résistance et inductance côté continu
$R_s, L_s$	Résistance et inductance de la source
$R_{cc}, L_{cc}$	Résistance et inductance de court circuit
$R_f, L_f$	Résistance et inductance du filtre actif
$R_c, L_c$	Résistance et inductance de la charge côté réseau
$I_{ref}$	Courant de référence
$V_{dc}$	Tension aux bornes du condensateur
$C_{dc}$	Capacité du condensateur
$S_{cc}$	Puissance apparente de court circuit du réseau
$S_{ch}$	Puissance apparente de la charge non linéaire
$Z_n$	Impédance nominale du réseau
$p(t)$	Puissance réelle instantanée
$p_0(t)$	Puissance homopolaire instantanée
$\bar{p}$	Puissance continue liée à la composante fondamentale active
$\bar{q}$	Puissance continue liée à la composante fondamentale réactive
$\tilde{p}$ et $\tilde{q}$	Puissances alternatives liées à la somme des composantes perturbatrices
$I_\alpha, I_\beta$	Courants perturbateurs calculés dans le repère $\alpha\text{-}\beta$

## TABLE DES MATIERES

<b>INTRODUCTION GENERALE .....</b>	<b>1</b>
<b>CHAPITRE 1 ORIGINE, ANALYSE ET CONSEQUENCES DES HARMONIQUES.....</b>	<b>5</b>
1.1 Introduction.....	5
1.2 Paramètres de la qualité de l'énergie électriques.....	5
1.2.1 Creux et coupures de tension.....	6
1.2.2 Fluctuations de tension.....	6
1.2.3 Déséquilibre du système triphasé de tension.....	7
1.2.4 Variation de fréquence.....	7
1.2.5 Harmoniques et interharmoniques.....	7
1.3 Origine des harmoniques.....	9
1.3.1 Emission en tension .....	9
1.3.2 Emission en courant .....	10
1.4 Conséquences des harmoniques.....	11
1.5 Analyse des harmoniques .....	13
1.5.1 Développement en série de Fourier du courant de la charge non linéaire.....	13
1.5.2 Taux de distorsion harmonique (Total Harmonic Distorsion THD).....	15
1.5.3 Facteur de puissance.....	17
1.6 Normes.....	17
1.7 Conclusion.....	21
<b>CHAPITRE 2 : DEPOLLUTION DES RESEAUX ELECTRIQUES.....</b>	<b>22</b>
2.1 Introduction.....	22
2.1 Solutions traditionnelles de dépollution.....	22
2.2 Solutions modernes de dépollution.....	26
2.2.1 le filtre actif parallèle.....	27
2.2.2 le filtre actif série.....	28
2.2.3 La combinaison parallèle - série actifs (UPQC).....	29
2.2.4 Combinaison hybride active et passive.....	29
2.2.5 Comparatif et choix du filtrage actif parallèle (FAP).....	31
2.3 Conclusion.....	33

<b>CHAPITRE 3 : FILTRE ACTIF PARALLELE DE PUISSANCE, PRINCIPE, STRATEGIE DE</b>	
<b>COMMANDE ET DIMENSIONNEMENT</b> .....	34
3.1 Introduction .....	34
3.2 Principe de filtrage actif parallèle.....	34
3.3 Structure du filtre actif parallèle .....	36
3.3.1 Etude de la partie puissance.....	36
3.3.2 Etude de l'onduleur de tension.....	38
3.4 Stratégie de commande du filtre actif parallèle .....	42
3.5 Dimensionnement l'ensemble réseau, filtre actif parallèle.....	44
3.6 Conclusion.....	51
<b>CHAPITRE 4 : METHODE DES PUISSANCES REELLES ET IMAGINAIRES INSTANTANEEES</b> .....	52
4.1 Introduction.....	52
4.2 Généralités sur les puissances instantanées.....	52
4.3 Calcul des courants perturbateurs.....	54
4.4 Algorithme d'identification.....	55
4.5 Régulation .....	55
4.5.1 Régulation de la tension continue.....	56
4.5.2 Régulation du courant du filtre actif parallèle .....	57
4.6 Modélisation et simulation numérique.....	59
4.6.1 Schéma synoptique de l'ensemble réseau, filtre actif parallèle	
et charge polluante.....	59
4.6.2 Modélisation de l'ensemble réseau, filtre actif parallèle	
et charge polluante.....	60
4.6.3 Simulation de l'ensemble réseau, filtre actif parallèle	
et charge polluante.....	65
4.7 Conclusion.....	71
<b>CHAPITRE 5 : IDENTIFICATION A PARTIR DE LA DETECTION DU COURANT DE LA SOURCE</b> ...72	
5.1 Introduction.....	72
5.2 Etude du filtre actif parallèle monophasé.....	72
5.2.1 Principe d'équilibre énergétique du condensateur .....	74
5.2.2 Détermination de la capacité du condensateur de stockage d'énergie.....	76
5.2.3 Contrôle de la tension du condensateur $C_{dc}$ .....	77

5.2.4 Inductance du filtre.....	82
5.2.5 Phase de conduction du filtre actif parallèle monophasé avec la commande MLI.....	85
5.3 Modélisation et simulation numérique du filtre actif parallèle monophasé.....	87
5.3.1 Schéma synoptique de l'ensemble réseau, filtre actif parallèle monophasé et charge polluante.....	87
5.3.2 Simulation de l'ensemble réseau, filtre actif parallèle monophasé et charge polluante.....	88
5.4 Modélisation et simulation numérique du filtre actif parallèle triphasé.....	91
5.4.1 Schéma synoptique de l'ensemble réseau, filtre actif parallèle triphasé et charge polluante.....	91
5.4.2 Simulation de l'ensemble réseau, filtre actif parallèle triphasé et charge polluante.....	92
5.5 Conclusion.....	98
<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>	<b>99</b>
<b>REFERENCES.....</b>	<b>102</b>

## INTRODUCTION GENERALE

L'utilisation de l'électronique de puissance dans les installations de conversion d'énergie électrique a considérablement contribué à l'amélioration des performances et de l'efficacité de ces systèmes. En revanche, les convertisseurs statiques ont participé à la détérioration de la qualité du courant et de la tension des réseaux de distribution. En effet, ces systèmes consomment des courants non sinusoïdaux et ils se comportent comme des générateurs de courants harmoniques. Par l'intermédiaire de l'impédance de court-circuit du réseau, les courants harmoniques déforment la tension de celui-ci. Les déformations du courant et de la tension peuvent perturber le fonctionnement normal des équipements électriques. C'est pourquoi, les distributeurs d'énergie ayant la contrainte de fournir une tension sinusoïdale, prennent en charge l'atténuation des perturbations harmoniques au moyen d'installations de forte puissance. Cependant, les nouvelles réglementations internationales imposent aux consommateurs des limites aux harmoniques, engendrées par leurs systèmes, tant en courant qu'en tension. Ainsi, le filtrage des composantes harmoniques est au centre des préoccupations des distributeurs d'une part et des utilisateurs d'énergie électrique d'autre part, ils adoptent donc, les uns comme les autres, les limites proposées par les normes IEEE 519-1992, IEEE 1159-1995, CEI 61000-2-2 et CEI 61000-3-2.

Le respect des normes de la qualité de l'énergie électrique impose, si une charge non linéaire est connectée au réseau électrique, de concevoir un système qui restreint la dissipation des composantes harmoniques. Deux types de solutions sont envisageables. La première consiste à utiliser des convertisseurs statiques peu ou moins polluants, tandis que la seconde consiste à réaliser un filtrage des composantes harmoniques. La solution classique de filtrage qui est connue depuis longtemps consiste en l'utilisation de filtres passifs. Cette solution est la plus répandue et pratiquement la plus simple et la moins chère, mais elle présente deux inconvénients majeurs. Le premier est lié au phénomène de résonance avec le réseau qui est à l'origine de l'amplification de tout harmonique à fréquence voisine de celle du réseau. Le deuxième inconvénient est la dépendance des performances du filtre passif aux caractéristiques du réseau sur lequel il est connecté.

Grâce aux progrès remarquables réalisés au cours des dernières années dans le domaine des semi-conducteurs de puissance commandables à l'ouverture et à la fermeture et fonctionnant à des fréquences très élevés, ont permis de concevoir des dispositifs de filtrage

modernes des harmoniques auto-adaptables appelés filtrage actifs. Le but de ces filtres est de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à compenser les perturbations responsables de la dégradation des performances des équipements et installations électriques.

Le filtre actif est un onduleur de tension ou de courant qui injecte dans le réseau des courants perturbateurs égaux à ceux absorbés par la charge polluante, mais en opposition de phase avec ceux-ci conduisant ainsi à des courants sinusoïdaux courant côté réseau. Ainsi l'objectif du filtre actif parallèle consiste à empêcher les courants harmoniques produits par des charges polluantes, de circuler à travers l'impédance du réseau, située en amont du point de connexion du filtre actif.

Jusqu'à présent plusieurs solutions de dépollution des réseaux électriques ont été déjà proposées dans la littérature. Ils se distinguent, soit par leur mode de branchement sur le réseau (parallèle ou série), soit par leur mode de contrôle, ou bien par la structure de leur circuit de puissance. Celles qui répondent le mieux aux contraintes industrielles d'aujourd'hui sont les filtres actifs parallèle, série et combinaison parallèle-série actifs.

Le filtre actif parallèle peut être utilisé pour compenser les courants harmoniques et déséquilibrés de même que la puissance réactive. Le filtre série actif peut compenser à la fois les tensions harmoniques et déséquilibrées, et les creux de tension. La combinaison parallèle-série actifs correspond à une solution universelle de compensation pour un, plusieurs ou tous les types de perturbation, de courant et de tension que l'on observe sur le réseau.

Le travail présenté dans cette thèse concerne particulièrement l'étude par simulation d'un filtre actif parallèle destiné à compenser les courants harmoniques générés par une charge non linéaire et la compensation de l'énergie réactive.

Le filtre actif parallèle comporte deux fonctions principales; une fonction d'identification de courants harmoniques et une fonction de commande d'onduleur pour injecter les courants de compensation. Nos travaux portent sur l'étude conjointe de l'identification des harmoniques et de la commande de l'onduleur. L'étape d'identification des courants harmoniques est fondamentale dans le processus de filtrage. Sans une bonne estimation de ces courants, le système de commande, même très efficace ne pourrait pas apporter à lui seul, les corrections



suffisantes. Deux techniques originales d'identification des courants harmoniques ont été développées.

Le premier chapitre du mémoire recense les perturbations qui peuvent apparaître dans un réseau électrique basse tension et expose leurs origines, leurs analyses et leurs conséquences ainsi que les normes visant à diminuer leurs proliférations.

Dans le second chapitre, nous présenterons les solutions de dépollution des réseaux électriques existantes, tant traditionnelles que modernes. L'utilisation du filtre actif parallèle a été retenue pour la suite de nos travaux.

Dans le troisième chapitre, nous présenterons le principe de fonctionnement du filtre actif parallèle de puissance, la structure générale du FAP, les différentes stratégies de commande de l'onduleur de tension et le dimensionnement de l'ensemble réseau, charge polluante et filtre actif parallèle.

Dans le quatrième chapitre, nous traiterons le problème des perturbations en courant et de leur identification. La méthode des puissances instantanées, universellement adoptée pour le filtrage des harmoniques en raison de ses excellentes performances est présentée dans ce chapitre. Cette méthode offre l'avantage de choisir la perturbation à compenser avec précision, rapidité et facilité d'implantation. La modélisation de l'ensemble réseau, charge polluante et filtre actif parallèle est présenté dans le cas de la commande par modulation de largeur d'impulsion pour deux types de charge non linéaires à savoir un redresseur triphasé à diodes alimentant une charge RL série ou une charge RC parallèle. La validation de la méthode des puissances instantanées sera effectuée par simulation sous le logiciel Matlab-Simulink.

Dans le cinquième chapitre nous développons une contribution originale qui consiste en une nouvelle méthode d'extraction du courant de référence. Cette méthode d'identification est basée sur la détection du courant de source.

Dans un premier temps, nous présenterons le filtre actif parallèle monophasé. Ce filtre est constitué d'un onduleur de tension à modulation de largeur d'impulsion. La charge polluante est constituée d'un redresseur monophasé double alternance qui alimente une charge RL série ou une charge RC parallèle. Le filtre actif proposé possède un circuit de commande très

simple qui consiste à utiliser deux capteurs de tension et un seul capteur de courant. L'avantage de ce type de filtre actif est la simplicité de commande et le coût d'implémentation faible. Pour valider la méthode proposée, nous avons procédé à la simulation numérique du filtre actif monophasé parallèle en utilisant le logiciel PSPICE.

Dans un deuxième temps, nous présenterons le filtre actif parallèle triphasé. Le filtre actif proposé possède un circuit de commande très simple qui consiste à utiliser deux capteurs de tension et un seul capteur de courant par phase d'une manière analogue au filtre monophasé. La validation de la méthode proposée sera effectuée par simulation en utilisant deux logiciels Matlab-Simulink et le PSPICE.

## **CHAPITRE 1 : ORIGINE, ANALYSE ET CONSEQUENCES DES HARMONIQUES.**

### **1.1 Introduction**

Le distributeur d'énergie doit fournir à l'ensemble de ses clients et utilisateurs une énergie de bonne qualité sous la forme de trois tensions sinusoïdales constituant un réseau triphasé équilibré.

La qualité de cette énergie dépend de celle de la tension aux points de raccordement. Toutefois, cette tension subit généralement des altérations durant son transport jus qu'à son arrivée chez le client, industriel ou particulier. Les origines de ces altérations sont nombreuses; outre les incidents relatifs à la nature physique et matérielle des organes d'exploitation du réseau, il existe aussi des causes intrinsèques spécifiques au fonctionnement de certains récepteurs particuliers.

Afin d'éviter le dysfonctionnement, voire la destruction des composants du réseau électrique ou des récepteurs finaux, il est indispensable de comprendre l'origine des harmoniques et de chercher les solutions adéquates pour les supprimer.

Nous commencerons ce chapitre par un exposé des paramètres de la qualité de l'énergie électrique. Nous parlerons également de l'origine, l'analyse et l'effet des harmoniques sur les récepteurs électriques. Finalement, nous exposerons les normes internationales imposées aux utilisateurs.

### **1.2 Paramètres de la qualité de l'énergie électrique**

L'énergie électrique est fournie sous forme de tension constituant un système sinusoïdal triphasé dont les paramètres caractéristiques sont les suivants:

- Les fluctuations,
- le déséquilibre,
- la fréquence,
- la forme d'onde.

La qualité de l'énergie peut être affectée, soit du fait de certains incidents inhérents à la nature physique et aux sujétions liées à l'exploitation du réseau, soit du fait de certains récepteurs. Ces défauts se manifestent sous forme de différentes perturbations affectant un ou

plusieurs des quatre paramètres précédemment définis. On a donc quatre possibilités distinctes de perturbation:

### **1.2.1 Creux et coupures de tension**

Le creux de tension est une diminution brutale de la tension à une valeur située entre 10 % et 90 % de la tension nominale [1] pendant une durée allant de 10 ms jusqu'à quelques secondes.

Les creux de tension sont dus à des phénomènes naturels comme la foudre, ou à des défauts sur l'installation ou dans les réseaux tant publics que ceux des utilisateurs. Ils apparaissent également lors de manoeuvres d'enclenchement mettant en jeu des courants de fortes intensités (moteurs, transformateurs, etc.).

Une coupure de tension quant à elle est une diminution brutale de la tension à une valeur supérieure à 90 % de la tension nominale ou disparition totale pendant une durée généralement comprise entre 10 ms et une minute pour les coupures brèves et supérieure à une minute pour les coupures longues. La plupart des appareils électriques admettent une coupure totale d'alimentation d'une durée inférieure à 10 ms. La figure 1.1 (a) montre un exemple de creux et de coupure de tension.

### **1.2.2 Fluctuations de tension**

Les fluctuations de tension sont des variations périodiques ou erratiques de l'enveloppe de la tension. Ce sont des variations brutales de l'amplitude de la tension situées dans une bande de 10 % et se produisent sur un intervalle de temps de quelques centièmes de secondes.

Elles sont en particulier dues à la propagation sur les lignes du réseau de courants d'appel importants. L'origine principale de ces courants est le fonctionnement d'appareil dont la puissance absorbée varie de manière rapide, comme les fours à arc et des machines à souder. Ces fluctuations se traduisent par des variations d'intensité, visible au niveau de l'éclairage causant une gêne visuelle perceptible pour une variation de 1 % de la tension. Ce phénomène de papillotement est appelé flicker. Un exemple de fluctuation de tension est montré dans la figure 1.1 (b).

### **1.2.3 Déséquilibre du système triphasé de tension**

Lorsque les trois tensions ne sont pas identiques en amplitude et/ou ne sont pas décalées d'un angle de  $120^\circ$  les unes par rapport aux autres, on parlera de déséquilibre du système triphasé comme le montre la figure 1.1(c).

Un réseau électrique triphasé équilibré alimentant un récepteur électrique triphasé non équilibré conduit à des déséquilibres de tension dus à la circulation de courants non équilibrés dans les impédances du réseau

### **1.2.4 Variation de fréquence**

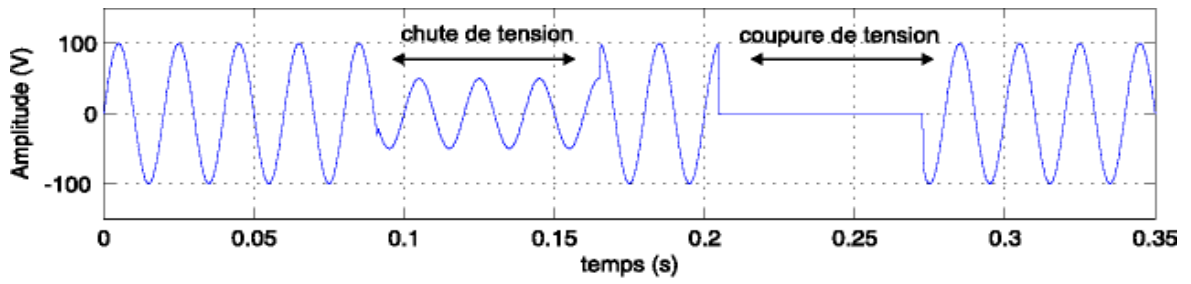
Une variation sensible de la fréquence du réseau peut apparaître sur les réseaux des utilisateurs non interconnectés ou alimentés par une source thermique autonome, comme le montre la figure 1.1 (d). Au niveau des réseaux de distribution ou de transport, cette variation de la fréquence est très rare et n'est présente que lors de circonstances exceptionnelles, comme dans le cas de certains défauts graves sur le réseau. Dans des conditions normales d'exploitation, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle  $50 \text{ Hz} \pm 1\%$ .

### **1.2.5 Harmoniques et interharmoniques**

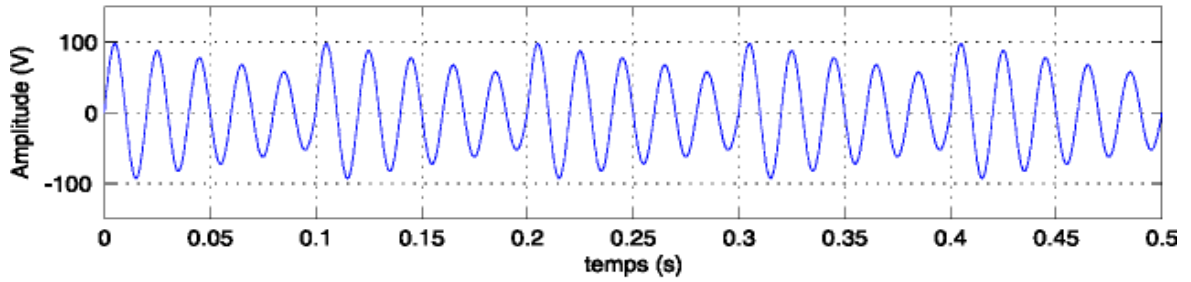
Les harmoniques sont une superposition sur l'onde fondamentale à 50 Hz, d'ondes également sinusoïdales mais de fréquences multiples entières de celle du fondamental. La figure 1.1(e) montre la superposition de l'harmonique d'ordre 3 sur un courant fondamental de fréquence 50 Hz. La principale source de la présence des harmoniques dans les réseaux électrique est l'utilisation de plus en plus croissante d'équipement de l'électronique de puissance à base de thyristors et de transistors.

Les interharmoniques sont superposées à l'onde fondamentale mais ne sont pas des multiples entiers de la fréquence du réseau. L'apparition des interharmoniques est en augmentation et leurs origines principales sont les convertisseurs de fréquence les variateurs de vitesse et d'autres équipements similaires de commande électrique.

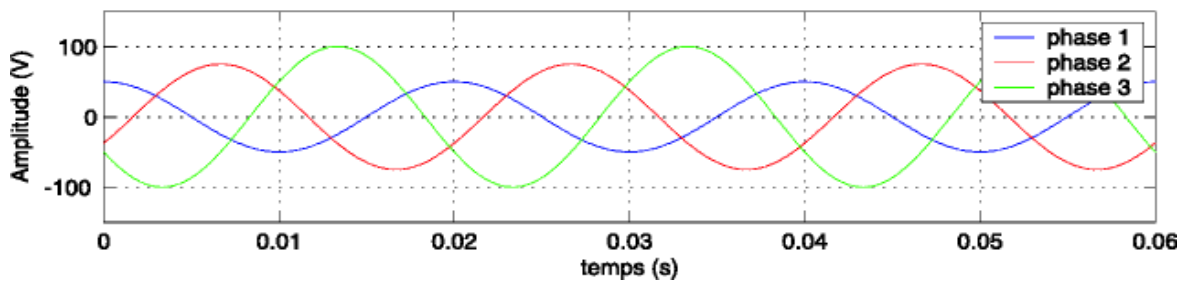
Les perturbations harmoniques feront l'objet d'une étude approfondie tout au long de cette thèse.



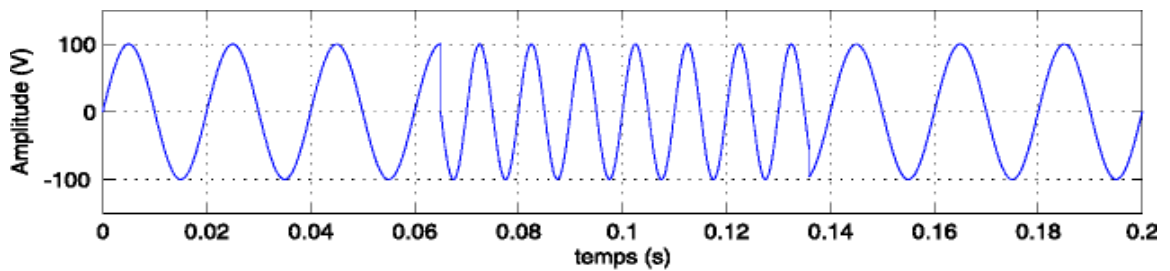
(a) Creux et coupures de tension.



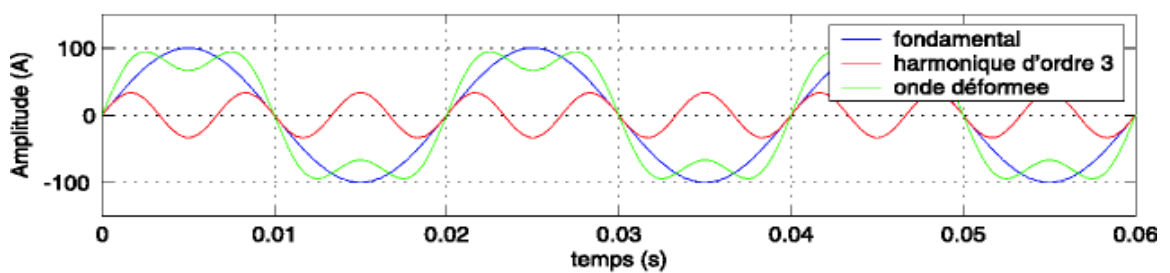
(b) Fluctuations de tension.



(c) Cas particulier de déséquilibre du système triphasé de tension.



(d) Variation de fréquence.



(e) Harmoniques.

Figure 1.1: Les perturbations électriques

### 1.3 Origine des harmoniques

La prolifération des équipements électriques utilisant des convertisseurs statiques a entraîné ces dernières années une augmentation sensible du niveau de pollution harmonique des réseaux électriques. Ces équipements électriques sont considérés comme des charges non linéaires émettant des courants harmoniques dont les fréquences sont des multiples entiers de la fréquence fondamentale, ou parfois à des fréquences quelconques. Le passage de ces courants harmoniques dans les impédances du réseau électrique peut entraîner des tensions harmoniques aux points de raccordement et ainsi polluer les consommateurs alimentés par le même réseau électrique.

#### 1.3.1 Emission en tension :

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

- **Alternateurs :** Les alternateurs des centrales de production fournissent une tension d'alimentation qui contient très peu d'harmoniques ( $< 0.5\%$ ). Le contenu harmonique de la tension générée par les alternateurs est lié à la qualité du bobinage et des pièces polaires qui assurent la forme sinusoïdale de l'onde. Sur un groupe électrogène, le taux de distorsion harmonique en tension est généralement inférieur à 5% à vide est inférieur à 1% lorsque le groupe électrogène débite à pleine puissance sur une charge linéaire.
- **Transformateurs :** Les transformateurs peuvent être générateurs de tensions harmoniques lorsqu'ils fonctionnent en régime saturé. Sur les réseaux, le taux de distorsion harmonique en tension dû à ces appareils reste toujours faible.
- **Alimentations statiques ininterrompibles (ASI) :** Ces dispositifs ont des performances très intéressantes pour la protection du matériel contre les creux de tension et les coupures. En revanche, ils ont parfois des limitations dans le domaine harmonique qu'il convient de connaître pour bien les maîtriser. En effet, le réseau

protégé alimente généralement des charges non linéaires comme du matériel informatique.

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

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

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

### **1.3.2 Emission en courant :**

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

On peut distinguer sept différents types de « charges perturbatrices élémentaires » chez l'utilisateur, dont quatre sont des montages électroniques :

- le redresseur monophasé à filtre capacitif,
- le gradateur monophasé,
- le redresseur triphasé à thyristors,
- le redresseur triphasé à diodes et filtre capacitif,
- les moteurs asynchrones,
- les lampes,
- les appareils à arc électrique.

#### **a) Le redresseur triphasé à thyristors :**

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



## **b) Les charges non linéaires passives :**

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

- **Les lampes :**

On distingue deux types de lampes qui produisent des courants harmoniques :

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

- **Les appareils à arc électrique :**

Les appareils à arc électrique regroupent les fours à arc à courant alternatif, dont la puissance peut atteindre plusieurs dizaines de MW, et les machines de soudure à l'arc, à courant alternatif ou continu [2].

## **1.4 Conséquences des harmoniques**

Les courants harmoniques se propagent dans le réseau électrique, déforment l'allure du courant de la source et polluent les consommateurs alimentés par ce même réseau. Ils peuvent occasionner des incidents au niveau de l'appareillage du client ce qui donne lieu à des surcoûts de production d'énergie importants. On peut classer les effets engendrés par les harmoniques en deux types: les effets instantanés et les effets à terme.

### **a ) Effets instantanés**

Les effets instantanés apparaissent immédiatement dans certains appareillages :

- **Défauts de fonctionnement de certains équipements électriques:** En présence d'harmoniques, la tension et le courant peuvent changer plusieurs fois de signe dans une demi-période. Les appareils dont le fonctionnement est basé sur le passage à zéro des grandeurs électriques peuvent être affectés.
- **Troubles fonctionnels des micro-ordinateurs:** Les effets sur ces équipements peuvent se manifester par la dégradation de la qualité de l'image et par des couples pulsatoires des moteurs d'entraînement de disque.

- **Erreurs dans les appareils de mesure:** Certains appareils de mesure et les compteurs d'énergie à induction présentent des dégradations de mesure des erreurs de lecture supplémentaires en présence d'harmoniques.
- **Vibrations et bruits:** Les courants harmoniques génèrent également des vibrations et des bruits acoustiques, principalement dans les appareils électromagnétiques (transformateurs, inductances et machines tournantes).

#### b) Effets à terme

Ils se manifestent après une exposition plus ou moins longue à la perturbation harmonique. L'effet à terme le plus important est de nature thermique, il se traduit par l'échauffement. Il conduit à une fatigue prématurée du matériel, des lignes et amènent un déclassement des équipements.

- **Echauffement des câbles et des équipements:** Ces effets peuvent être à moyen terme (de quelques secondes à quelques heures) ou à long terme (de quelques heures à quelques années) et concernent les câbles qui peuvent être le siège du sur échauffement du neutre et les enroulements comme pour les transformateurs ou les moteurs.
- **Echauffement des condensateurs:** L'échauffement est causé par les pertes dues au phénomène d'hystérésis dans le diélectrique. Les condensateurs sont donc sensibles aux surcharges, quelles soient dues à une tension fondamentale trop élevée ou à la présence d'harmoniques. Ces échauffements peuvent conduire au claquage.
- **Echauffement due aux pertes supplémentaires des machines électriques et des transformateurs:** L'échauffement est causé par les pertes dans le stator des machines électriques et principalement dans leurs circuits rotoriques à cause des différences importantes de vitesse entre les champs tournants inducteurs harmoniques et le rotor.

Les harmoniques gênent aussi des pertes supplémentaires dans les transformateurs, par effet Joule dans les enroulements, accentuées par l'effet de peau et des pertes par hystérésis et courants de Foucault dans les circuits magnétiques

### 1.5 Analyse des harmoniques :

La théorie classique de l'énergie électrique ne tient compte que des systèmes électriques basés sur des signaux sinusoïdaux. Cependant les signaux électriques présents sur les réseaux (surtout les courants) sont souvent perturbés et ils ne sont pas parfaitement sinusoïdaux. Dans le domaine de la qualité de l'énergie, il est indispensable de bien connaître tous les échanges d'énergie entre le réseau et les différentes charges de façon à pouvoir compenser les éventuelles perturbations.

L'analyse des signaux non sinusoïdaux est basée sur deux concepts mathématiques qui sont les harmoniques, qui permettent la décomposition des signaux électriques perturbés (non sinusoïdaux) en composantes idéales et perturbations.

Le concept d'harmonique a été introduit au début du XIX<sup>ème</sup> siècle par Joseph Fourier [3], en démontrant que tout signal périodique non sinusoïdal peut être représenté par une somme ou série des sinusoïdes de fréquences discrètes. La composante zéro de la série dite de Fourier est la composante continue, tandis que la première composante est appelée composante fondamentale. Dans le cas des systèmes raccordés au réseau, celle-ci est une composante à la fréquence nominale du réseau (50Hz). Le reste des composantes de la série sont appelés harmoniques et sont multiples de la fréquence fondamentale.

#### 1.5.1 Développement en série de Fourier du courant de la charge non linéaire

Le courant absorbé par une charge non linéaire, peut être décomposé en série de Fourier, son expression mathématique est de la forme :

$$i_{ch}(\omega t) = I_0 + I_{1m} \sin(\omega t + \phi_1) + I_{2m} \sin(2\omega t + \phi_2) + I_{3m} \sin(3\omega t + \phi_3) + \dots + I_{nm} \sin(n\omega t + \phi_n) \quad (1.1)$$

ou d'une autre manière

$$y = f(\omega t) = a_0 + a_1 \sin(\omega t) + b_1 \cos(\omega t) + a_2 \sin(2\omega t) + b_2 \cos(2\omega t) + a_3 \sin(3\omega t) + b_3 \cos(3\omega t) + \dots + a_n \sin(n\omega t) + b_n \cos(n\omega t) \quad (1.2)$$

$$f(\omega t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \{a_n \sin(n\omega t) + b_n \cos(n\omega t)\} \quad (1.3)$$

Le développement de l'équation 1.2 est appelé série de Fourier et lorsque l'on peut exprimer  $f(\omega t)$  mathématiquement, on obtient les expressions suivantes:

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) d\omega t \\ a_n &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \sin(n\omega t) d\omega t \\ b_n &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \cos(n\omega t) d\omega t \end{aligned} \quad (1.4)$$

Les équations 1.1 et 1.2 sont équivalentes en posant

$$a_n \sin(n\omega t) + b_n \cos(n\omega t) = I_{nm} \sin(n\omega t + \phi_n) \quad (1.5)$$

Cette égalité donne l'amplitude de l'harmonique de rang n

$$I_{nm} = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (1.6)$$

et son déphasage

$$\phi_n = \arctan\left(\frac{b_n}{a_n}\right) \quad (1.7)$$

$$\begin{aligned} a_n &= I_{nm} \cos \phi_n \\ b_n &= I_{nm} \sin \phi_n \end{aligned} \quad (1.8)$$

Le courant de la charge non linéaire peut être exprimé selon l'équation 1.3 de la forme suivante :

$$i_{ch}(\omega t) = \sum_{n=1}^{\infty} \{a_n \sin(n\omega t) + b_n \cos(n\omega t)\} \quad (1.9)$$

Substituant l'équation 1.8 dans l'équation 1.9, on obtient

$$i_{ch}(\omega t) = \sum_{n=1}^{\infty} \{I_{nm} \sin \phi_n \sin(n\omega t) + I_{nm} \cos \phi_n \cos(n\omega t)\} \quad (1.10)$$

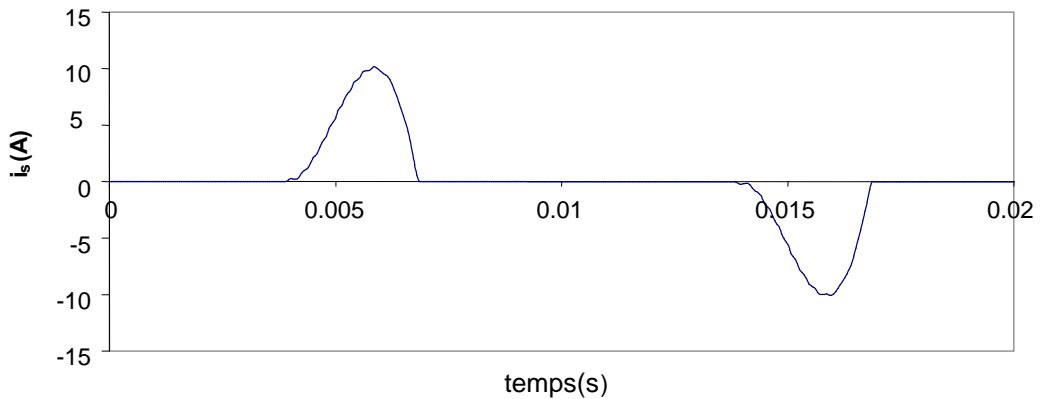
D'après les expressions ci-dessus, le courant de la charge non linéaire est donné par :

$$i_{ch}(\omega t) = \sum_{n=1}^{\infty} I_{nm} \sin(n\omega t + \phi_n) \quad (1.11)$$

Ce courant peut être subdivisé en une composante fondamentale et des composantes harmoniques

$$i_{ch}(\omega t) = I_{1m} \sin(\omega t + \phi_1) + \sum_{n \neq 1}^{\infty} I_{nm} \sin(n\omega t + \phi_n) \quad (1.12)$$

Comme exemple d'une charge non linéaire, on prend un redresseur à diodes qui alimente un condensateur et une résistance monté en parallèle, la forme d'onde du courant est représentée par la figure 1.2.



**Figure 1.2 :** Courant absorbé par une charge non linéaire

$$i_s(\omega t) = i_{s1}(t) + \sum_{n \neq 1}^{\infty} i_{sn}(t) \quad (1.13)$$

$$f_n = nf$$

$$i_s(\omega t) = \sqrt{2} I_{s1} \sin(\omega t + \phi_1) + \sum_{n \neq 1}^{\infty} \sqrt{2} I_{sn} \sin(n\omega t + \phi_n) \quad (1.14)$$

et la tension de la source est donné par :

$$v_s(\omega t) = \sqrt{2} V \sin(\omega t) \quad (1.15)$$

### 1.5.2 Taux de distorsion harmonique (Total Harmonic Distorsion THD).

La pollution harmonique peut être évaluée par le taux de distorsion harmonique, le taux de distorsion harmonique THD<sub>i</sub> du courant de source peut être calculé de la manière suivante :

$$\text{THD}_i \% = \frac{\sqrt{\sum_{n \neq 1}^{\infty} (I_{sn})^2}}{I_1} \cdot 100 \quad (1.16)$$

D'après l'équation 1.16, le THD mesure le rapport entre les harmoniques et le fondamental.

Le courant efficace de la source peut être calculé d'après la formule suivante

$$I_s = \sqrt{\left( \frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} i_s^2(t) dt \right)} \quad (1.17)$$

$$I_s = \sqrt{I_{s1}^2 + \sum_{n \neq 1} I_{sn}^2} \quad (1.18)$$

La composante harmonique du courant de source instantané peut être obtenue d'après la formule suivante :

$$i_h(\omega t) = i_s(\omega t) - i_{s1}(\omega t) = \sum_{n \neq 1} i_{sn}(\omega t) \quad (1.19)$$

Et le courant efficace harmonique de la source est :

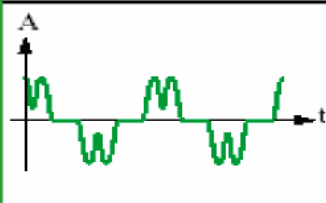
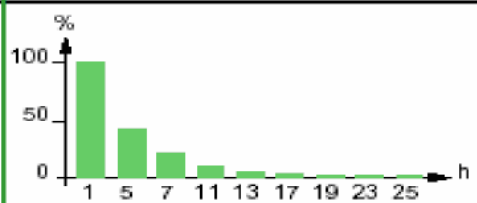
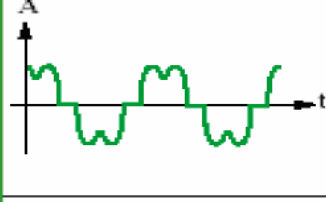
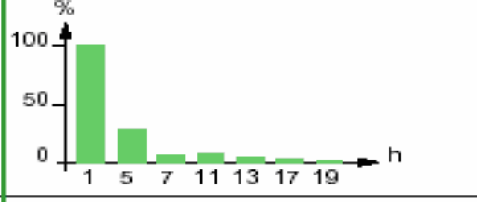
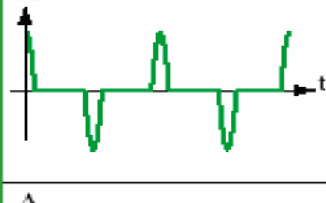
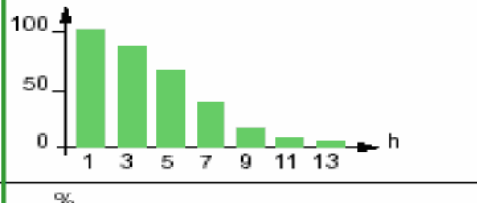
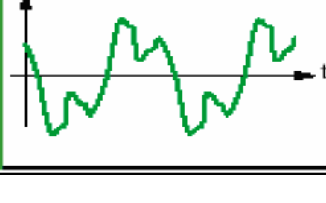
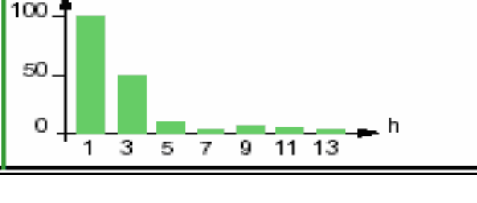
$$I_h = \sqrt{(I_s^2 - I_1^2)} = \sqrt{\sum_{n \neq 1} I_{sn}^2} \quad (1.20)$$

Par conséquent le THD<sub>i</sub> est égale :

$$\text{THD}_i \% = \frac{\sqrt{I_s^2 - I_{s1}^2}}{I_{s1}} \cdot 100 = \sqrt{\frac{I_s^2}{I_{s1}^2} - 1} \cdot 100 \quad (1.21)$$

Le THD<sub>i</sub> de quelques charges non linéaires est donné par le tableau 1.1 [4]

**Tableau 1.1:** Caractéristiques de quelques générateurs d'harmoniques

Charges non linéaires	Forme d'onde de courant	Spectre	THD
Variateur de vitesse			44 %
Redresseur / chargeur			28 %
Charge informatique Ordinateur			115 %
Eclairage fluorescent			53 %

Dans le cas général, pour mesurer la pollution harmonique dans un réseau électrique, on calcule le taux de distorsion harmonique en tension  $THD_v$  car il permet également d'intégrer l'influence de l'impédance de court circuit. Plus l'impédance de court circuit est faible, moins le courant aura d'influence sur la tension.

$$THD_v \% = \sqrt{\frac{V_s^2}{V_{s1}^2} - 1} \cdot 100 \quad (1.22)$$

### 1.5.3 Facteur de puissance

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

Dans le cas où il y a des harmoniques, une puissance supplémentaire appelée la puissance déformante ( $D$ ) entre en considération. Elle est donnée par la relation :

$$D = V \cdot \sqrt{\sum_{n \neq 1}^{\infty} I_{sn}^2} \quad (1.23)$$

Le facteur de puissance est donc égale :

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad (1.24)$$

Avec

$$P = V \cdot I_{s1} \cos \phi_1 \quad (1.25)$$

$$Q = V \cdot I_{s1} \sin \phi_1 \quad (1.26)$$

On peut aussi calculer le facteur de puissance de la manière suivante :

$$FP = \frac{V \cdot I_{s1} \cos \phi_1}{V \cdot I_s} = \frac{I_{s1}}{I_s} \cos \phi_1 \quad (1.27)$$

On constate que la puissance déformante et la puissance réactive contribuent à la dégradation du facteur de puissance.

## 1.6 Normes.

Les deux principaux organismes de normalisation internationaux dans le domaine électrotechnique sont la CEI (Commission Electrotechnique Internationale), et l'IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers). Ces deux organismes réalisent la

principale activité de normalisation dans le domaine des perturbations électriques au niveau mondial mais n'ont pas une uniformité de critères en ce qui concerne la définition des interactions entre le réseau et les charges connectées.

L'objectif des normes et des réglementations est de limiter les dysfonctionnements occasionnés par les harmoniques. La Commission Electrotechnique Internationale (CEI) définit le niveau des courants et des tensions harmoniques à ne pas dépasser par une série de normes de compatibilité électromagnétique (CEI 61000) Nous pouvons citer a titre d'exemple:

**La norme CEI 61000-2-2:** elle définit les niveaux de compatibilité de tension harmoniques sur les réseaux publics basse tension. Elle est représentée sur le tableau 1.2. Cette norme vise a protéger les équipements raccordés sur un réseau basse tension déformé.

**Tableau 1.2 :** Niveaux de compatibilité pour les tensions harmoniques individuelles sur les réseaux publics basse tension (norme CEI 61000-2-2)

rangs impairs		rangs impairs		rangs pairs	
Rang	taux (%)	rang	taux (%)	rang	taux (%)
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,3	6	0,5
13	3	21	0,2	8	0,5
17	2	>21	0,2	10	0,5
19	1,5			12	0,2
23	1,5			>12	0,2
25	1,5				
>25	$0,2+1,3*25/h$				

**La norme CEI 61000-3-2:** cette norme (tableau 1.3) fixe la limitation des courants injectés dans le réseau publique pour des équipements dont le courant par phase est inférieur à 16A. Il s'agit des appareils du domaine domestique.



**Tableau 1.3 :** Limite des composantes harmoniques en courant (norme CEI 61000-3-2)

rang harmonique	courant harmonique maximal autorisé (A)
harmoniques impaires	
3	2,3
5	1,14
7	0,77
9	0,40
11	0,33
13	0,21
$15 \leq h \leq 39$	$0,15*15/h$
harmoniques paires	
2	1,08
4	0,43
6	0,3
$8 \leq h \leq 40$	$0,23*8/h$

Deux sociétés de l'IEEE travaillent aussi dans des domaines liés à la qualité de l'énergie, IAS (Industrial Applications Society) et PES (Power Engineering Society). Leurs activités de normalisation sont gérées par le comité SCC-22 (Standards Coordinating Committee on Power Quality). Les deux normes principales de l'IEEE sont :

**IEEE 519:** 1992, Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Power Systems. Cette norme détermine la procédure pour contrôler les harmoniques présents sur le réseau électrique ainsi que les limites recommandées de la pollution harmonique générée par les clients et de distorsion harmonique totale sur le réseau (voir tableau 1.4, 1.5) [5].

**IEEE 1159:** 1995, IEEE Recommended Practice on Monitoring Electric Power Quality. Cette norme réalise un bilan exhaustif et donne une définition de tous les phénomènes électromagnétiques qui ont lieu dans le réseau en fonction de leur contenu spectral, leur durée et leur amplitude (voir tableau 1.6) [6].

**Tableau 1.4 :** Limite IEEE pour la distorsion harmonique de la tension.

Tension au point de raccordement ( $V_n$ )	Distorsion Harmonique Individuelle (%)	THD $V_n$ (%)
$V_n \leq 69\text{kV}$	3.0	5.0
$69\text{kV} < V_n \leq 161\text{kV}$	1.5	2.5
$V_n > 161\text{kV}$	1.0	1.5

**Tableau 1.5 : Limite IEEE des émissions de courants harmoniques**

$V_n \leq 69\text{kV}$						
$I_{cc} / I_{ch}$	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	$TDD$
<20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20-50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50-100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100-1000	12.0		5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0
$69\text{kV} < V_n \leq 161\text{kV}$						
<20	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
20-50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0
50-100	5.0	2.25	2.0	1.25	0.35	6.0
100-1000	6.0	2.75	2.5	1.0	0.5	7.5
>1000	7.5	3.5	3.0	1.25	0.7	10.0
$V_n > 161\text{kV}$						
<50	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
$\geq 50$	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0

**Tableau 1-6 : Classification IEEE des perturbations électromagnétiques.**

		Durée	Magnitude de tension
<b>Variations de courte durée</b>			
Instantané	<i>Creux</i>	0.5 – 30 cycles	0.1 – 0.9 p.u.
	<i>Surtension</i>	0.5 – 30 cycles	1.1 – 1.8 p.u.
Momentané	<i>Coupure</i>	0.5 cycles – 3s	< 0.1 p.u.
	<i>Creux</i>	30 cycles – 3s	0.1 – 0.9 p.u.
	<i>Surtension</i>	30 cycles – 3s	1.1 – 1.8 p.u.
Temporaire	<i>Coupure</i>	3s – 1 min	< 0.1 p.u.
	<i>Creux</i>	3s – 1 min	0.1 – 0.9 p.u.
	<i>Surtension</i>	3s – 1 min	1.1 – 1.8 p.u.
<b>Variations de longue durée</b>			
	<i>Coupure longue</i>	> 1 min	0.0 p.u.
	<i>Surtension</i>	> 1 min	0.8 – 0.9 p.u.
	<i>Sous-tension</i>	> 1 min	1.1 – 1.2 p.u.

## **1.7 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes origines des perturbations affectant les réseaux électriques basse tension et les solutions de dépollution existantes.

Le développement croissant des appareils générateurs d'harmoniques entraînera une hausse sensible des perturbations injectées par les clients.

Afin de palier à ces problèmes, des réglementations imposent aux utilisateurs tertiaires et domestiques de limiter la prolifération des harmoniques dans le réseau électrique. Ainsi et afin de répondre aux contraintes de l'évolution des charges polluantes, le développement des systèmes de compensation adaptatifs est favorisé.

Ainsi dans le but d'améliorer la qualité de l'énergie électrique, qui doit être conforme aux nouvelles contraintes normatives, nous étudierons dans le chapitre suivant les différentes méthodes de dépollution harmoniques.

## **CHAPITRE 2 : DEPOLLUTION DES RESEAUX ELECTRIQUES.**

### **2.1 Introduction**

Le respect des normes de la qualité de l'énergie électrique impose, si une charge non linéaire est connectée au réseau électrique, de concevoir un système qui restreint la dissipation des composantes harmoniques. Deux types de solutions sont envisageables. La première consiste à utiliser des convertisseurs statiques peu ou moins polluants, tandis que la seconde consiste à réaliser un filtrage des composantes harmoniques.

La première classe de solutions s'intéresse à la conception des circuits tandis que la seconde, que nous présentons par la suite consiste à filtrer les courants harmoniques. Les principales techniques se rattachant à cette dernière approche sont proposées et comparées dans ce chapitre.

### **2.1 Solutions traditionnelles de dépollution**

Ce sont des techniques qui doivent être connues par tous les électrotechniciens. Elle apportent une solution facile et rapide pour certains cas de perturbations bien localisées et utilisent des composants passifs (inductances, condensateurs, transformateurs) et/ou des branchements qui modifient le schéma de l'installation.

#### **a) Agir sur la structure de l'installation :**

Il est souhaitable d'alimenter un grand pollueur par un transformateur à part, afin de le séparer d'un récepteur sensible. Face à un pollueur moyen il est préférable d'effectuer l'alimentation des câbles distincts au lieu de les connecter en parallèle. Une distribution en étoile permet le découplage par les impédances naturelles et/ou additionnelles

#### **b) Surdimensionnement ou déclassement de l'installation électrique:**

On procède généralement au surdimensionnement des équipements afin d'assurer leur tenue aux surcharges harmoniques. Cette solution n'agit pas sur les harmoniques qui ne subissent aucune action curative de la part de l'utilisateur. Par

cette approche, les problèmes liés à la pollution harmonique sont résolus pendant une durée limitée.

Le déclassement des équipements de distribution électrique soumis aux harmoniques est utilisé dans le cas des installations existantes. Cette méthode cause un surcoût de production et ne tire pas profit du potentiel réel de l'installation.

**c) Renforcement de la puissance de court-circuit:**

La diminution de l'impédance totale en amont de la charge non linéaire permet de réduire la tension créée par les harmoniques de courant, et donc de diminuer le taux de distorsion harmonique en tension au point de raccordement. Cependant, les courants harmoniques ne sont pas atténués.

**d) Rééquilibrage des courants du réseau électrique:**

C'est une solution qui permet de répartir les charges d'une manière identique sur les trois phases. En effet, les charges monophasées et biphasées mal réparties engendrent des courants déséquilibrés dans un réseau électrique basse tension.

**e) Filtrage passif:**

Le principe du filtrage passif consiste à insérer en amont de la charge, un ou plusieurs circuits accordés sur les harmoniques à rejeter. Ainsi pour filtrer un courant à une fréquence particulière, un filtre résonnant série est placé en parallèle sur le réseau (figure 2.1). Cependant, ce type de filtre est très sélectif. Pour atténuer toute une bande de fréquences, un filtre passif amorti du second ordre (figure 2.2) est préférable. Le dimensionnement de ces filtres dépend des harmoniques à éliminer, des performances exigées, de la structure du réseau et de la nature des récepteurs. Par cette technique, il est en général plus aisé de rejeter les harmoniques de rang élevé que celles de rang faible.

Malgré sa large utilisation dans l'industrie, ce dispositif simple a tout de même certains inconvénients :

- une connaissance approfondie de la configuration du réseau électrique est nécessaire, les variations de l'impédance du réseau peuvent détériorer les performances du filtre,

- le réseau peut former un système résonnant avec le filtre et les fréquences voisines de la fréquence de résonance sont amplifiées,
- equipments volumineux,
- inadaptabilité et perte d'efficacité lorsque les caractéristiques du réseau électrique évoluent.

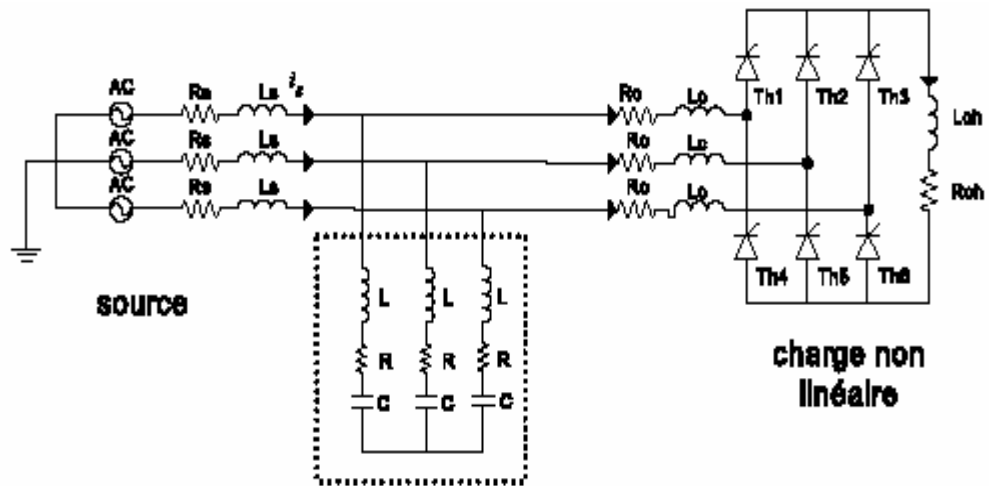


Figure 2.1 : Filtre passif résonant

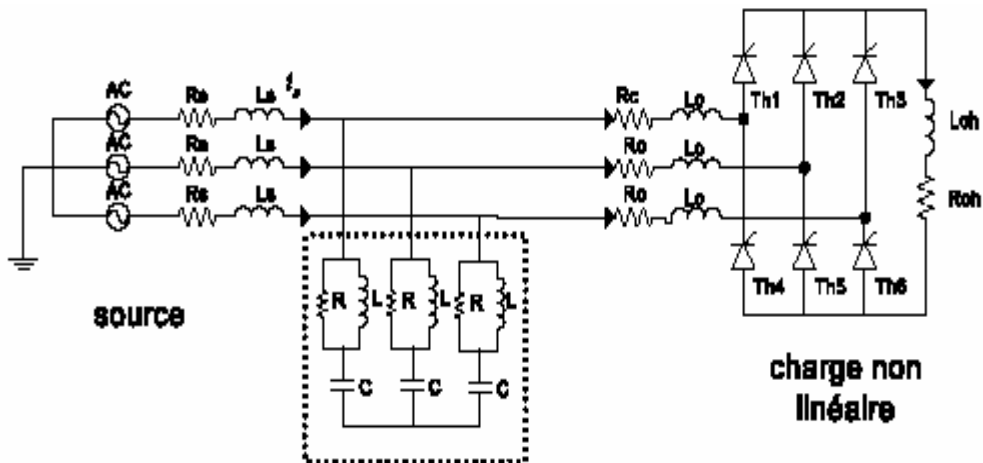


Figure 2.2 : Filtre passif amorti.

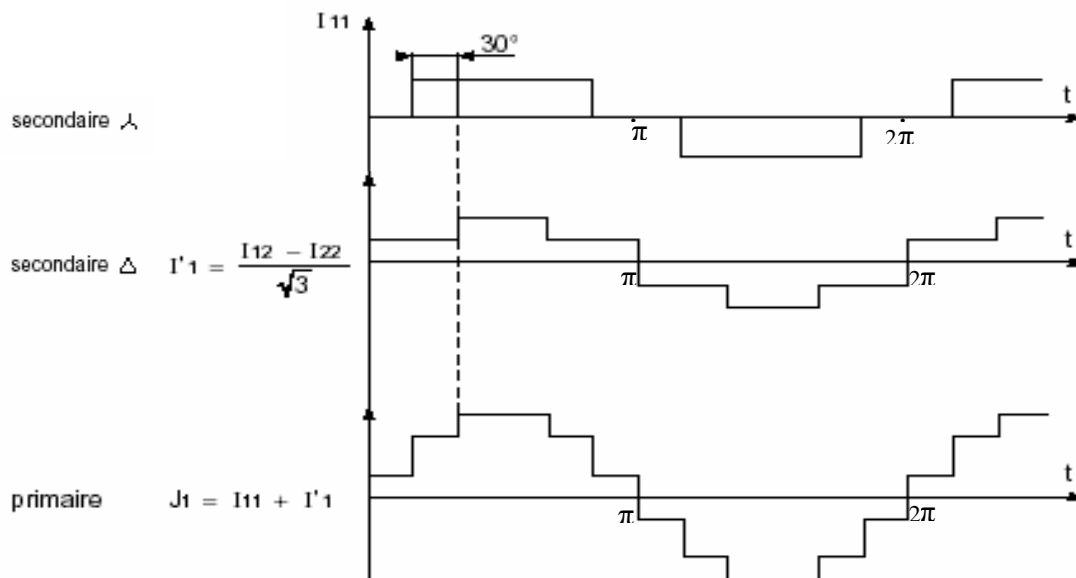
### f) utilisation du redresseur dodécaphasé :

Le principe consiste à utiliser un transformateur à deux secondaires délivrant des tensions décalées de  $30^\circ$  entre elles, chacun de ces secondaires alimentant un redresseur en pont de Graëtz qui réalise un redressement hémiphase.

Les redresseurs doivent fournir des courants continus identiques afin que les courants alternatifs qu'ils prélèvent sur les secondaires des transformateurs aient les mêmes valeurs. Dans ces conditions, il y a une recombinaison des courants harmoniques, générés par chacun des redresseurs au primaire du transformateur et le calcul montre que les harmoniques de rang  $6k \pm 1$  avec  $k$  impair sont éliminés [7].

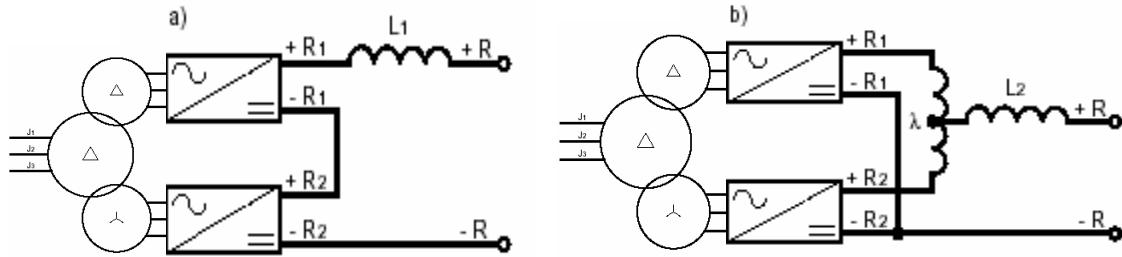
C'est le cas en particulier pour les harmoniques 5 et 7 dont les amplitudes théoriques sont les plus importantes. Les harmoniques 11 et 13 sont conservés tandis que les harmoniques 17 et 19 sont éliminés. Les harmoniques restants sont donc de rang  $12k \pm 1$  avec  $k$  entier naturel.

La figure 2.3 représente le courant absorbé par le primaire du transformateur à partir des courants délivrés par les deux secondaires.



**Figure 2.3:** Forme d'onde des courants absorbés.

Le courant de ligne a une forme beaucoup plus proche d'une sinusoïde que le courant obtenu avec un seul redresseur. Les deux redresseurs peuvent être connectés en série ou en parallèle comme montré sur la figure 2.4.



**Figure 2.4:** Redresseur dodécaphasé, (a) montage en série et (b) montage en parallèle des deux ponts redresseurs.

## 2.2 Solutions modernes de dépollution.

Deux raisons principales ont conduit à concevoir une nouvelle structure de filtrage moderne et efficace appelée filtre actif. La première raison est due aux inconvénients inhérents des solutions traditionnelles de dépollution qui ne répondent plus à l'évolution des charges et des réseaux électriques. La seconde raison fait suite à l'apparition de nouveaux composants semi-conducteurs, comme les thyristors GTO et les transistors IGBT et MOSFET. Le but de ces filtres est de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à compenser les perturbations responsables de la dégradation des performances des équipements et installations électriques.

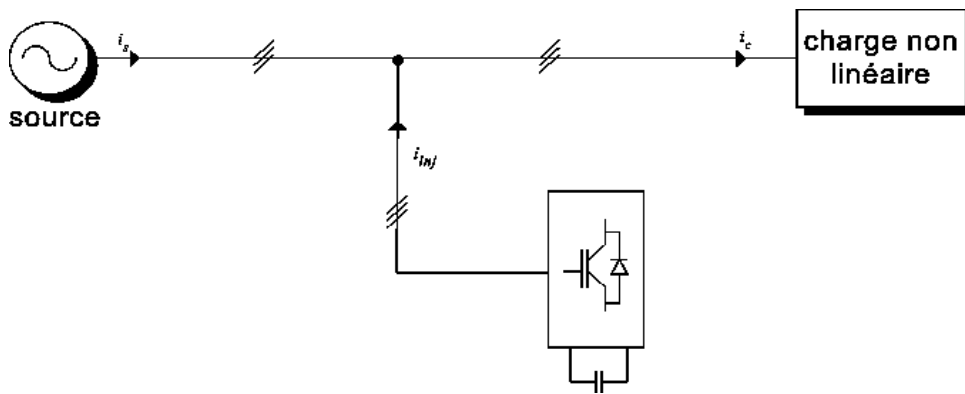
Nous citerons trois topologies possibles de filtres actifs:

- **le filtre actif parallèle (FAP):** conçu pour compenser toutes les perturbations de courant comme les harmoniques, les déséquilibres et la puissance réactive.
- **le filtre actif série (FAS):** conçu pour compenser toutes les perturbations de tension comme les harmoniques, les déséquilibres et les creux de tension.
- **la combinaison parallèle - série actifs:** La combinaison parallèle -série actifs, aussi appelée **Unified Power Quality Conditioner (UPQC)**, solution universelle pour compenser toutes les perturbations en courant et en tension.



### 2.2.1 Filtre actif parallèle

Le filtre actif connecté en parallèle sur le réseau, comme le montre la figure 2.5, est le plus souvent commandé comme une source de courant [8]. Il injecte dans le réseau des courants perturbateurs égaux à ceux absorbés par la charge polluante, mais en opposition de phase avec ceux-ci. Le courant côté réseau est alors sinusoïdal. Ainsi l'objectif du filtre actif parallèle (F.A.P) consiste à empêcher les courants harmoniques produits par des charges polluantes, de circuler à travers l'impédance du réseau, située en amont du point de connexion du filtre actif.



**Figure 2.5 :** Filtre actif parallèle (FAP)

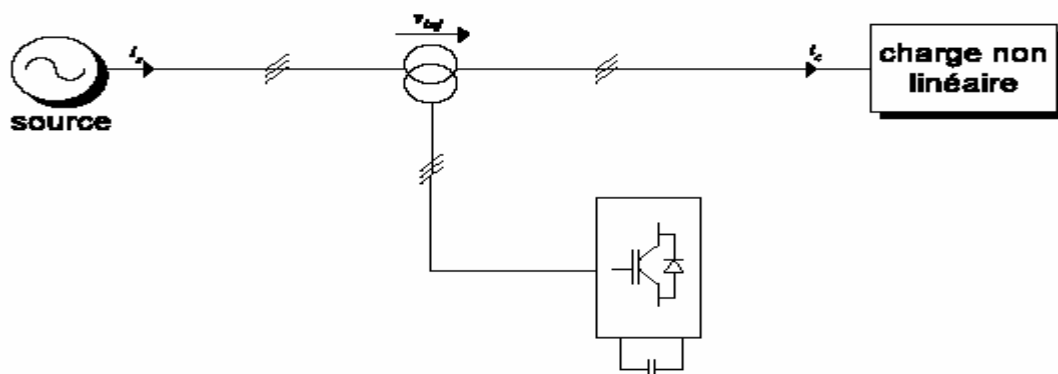
Les principes de fonctionnement des premiers filtres actifs parallèles ont été décrits dans la littérature dès le début des années 1970 [9]. En 1976, une première famille de filtre actif parallèle a été conçue à partir d'onduleurs à transistors de puissance commandés en MLI [10]. Ces premiers dispositifs de puissance étaient alors proposés pour la seule compensation des courants harmoniques. Cependant, à cette époque, il était encore difficile de concevoir ce type de système pour des applications industrielles. Cette barrière technologique sera franchie, dès 1977, lors de la conception d'un premier prototype de filtre actif parallèle à base de thyristors à commutations naturelles pour la compensation de courant harmonique [11]. Cependant, l'application des onduleurs à base de thyristor a tout de suite posé le problème de la génération non désirée de composantes injectées sur le réseau à la fréquence de commutation. La même raison a également empêché l'utilisation de compensateurs statiques parallèles à thyristors, lesquels avaient été conçus pour la compensation conjointe de la puissance réactive et des courants déséquilibrés [12].

Au cours des années 1980, des progrès importants dans le domaine des semi-conducteurs ont permis de développer de nouveaux composants de puissance associant hautes fréquences de commutation et fortes puissances. Profitant de ces avancées, et de l'avènement des interrupteurs de puissance du type GTO et IGBT, de nombreux onduleurs de puissance, commandés en MLI, ont pu être conçus en vue de répondre aux contraintes industrielles de conception des filtres actifs parallèles [13]. Ainsi, ces derniers ont commencé à être commercialisés et installés à travers le monde, et plus spécialement dans les pays les plus industrialisés comme le Japon [14, 15, 16].

Actuellement, les filtres actifs parallèles sont essentiellement installés par les consommateurs industriels. L'évolution future de ces dispositifs de puissance pourrait autoriser le fournisseur d'énergie à prendre un rôle plus important, en lui permettant de les installer lui-même. Cette approche permettrait d'amortir la propagation des harmoniques causées par la résonance, laquelle peut être observée entre les inductances du réseau et les batteries de condensateur installées pour améliorer le facteur de puissance.

### 2.2.2 le filtre actif série

Le filtre actif série se comporte comme une source de tension qui s'oppose aux tensions perturbatrices (creux, déséquilibre, harmonique), comme le montre la figure 2.6, venant de la source et également à celles provoquées par la circulation des courants perturbateurs à travers l'impédance du réseau [17]. Ainsi la tension aux bornes de la charge à protéger est purement sinusoïdale



**Figure 2. 6:** Filtre actif série (FAS)

Le filtre actif Série (F.A.S) est une solution adaptée à la compensation des tensions perturbatrices, harmoniques, déséquilibrées et des creux de tension. Ces perturbations

trouvent généralement leurs origines dans le réseau lui-même mais peuvent parfois être provoquées par les charges elles-mêmes.

En 1976, une famille de filtres actifs séries avec des onduleurs à transistors contrôlés en MLI a été présentée [10]. Un compensateur statique pour le rééquilibrage de la tension du réseau électrique a été proposé en 1985 [18].

En 1990, un compensateur de tension à base d'onduleur de tension triphasé a été proposé pour compenser le déséquilibre de tension de réseau électrique [19]. Depuis, beaucoup de travaux ont été consacrés à l'amélioration de la qualité de compensation du déséquilibre de la tension du réseau [20]. D'autres articles ont introduit le problème des creux de tension et leur compensation par le compensateur actif série [17].

### 2.2.3 La combinaison parallèle - série actifs

La combinaison parallèle - série actif est une solution de compensation universelle basée sur le fonctionnement simultané des filtres actifs parallèle et série (figure 2.7). Cette nouvelle topologie est appelée combinaison parallèle série actifs ou Unified Power Quality Conditioner (UPQC) [21]. L'UPQC possède les avantages cumulés des filtres actifs parallèle et série.

Le filtre actif série, lorsqu'il est placé en amont du filtre actif parallèle, il permet de dépolluer la source des tensions perturbatrices. Lorsqu'il est placé en aval, il permet d'isoler la charge de la source perturbée.

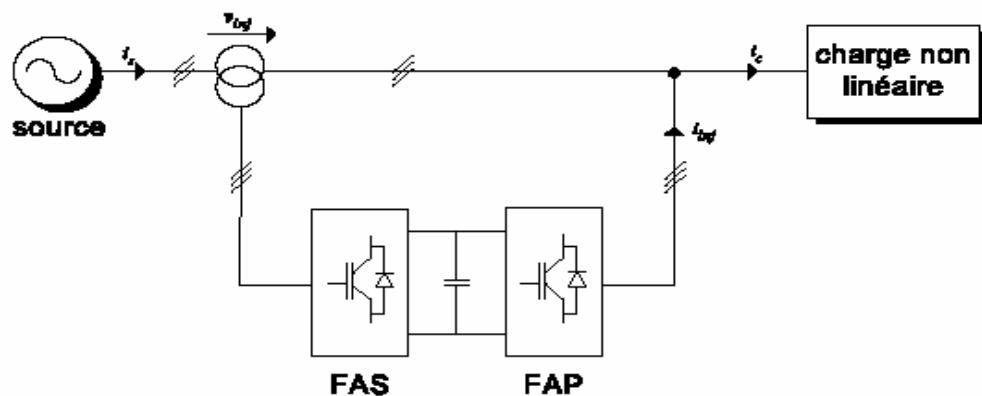


Figure 2.7 : Combinaison parallèle-série actifs (UPQC)

### 2.2.4 Combinaison hybride active et passive

Afin de réduire le dimensionnement et par conséquent le prix des filtres actifs, l'association de filtres actifs de faible puissance à des filtres passifs peut être une solution. Dans ce cas, les filtres passifs ont pour rôle d'éliminer les harmoniques prépondérants

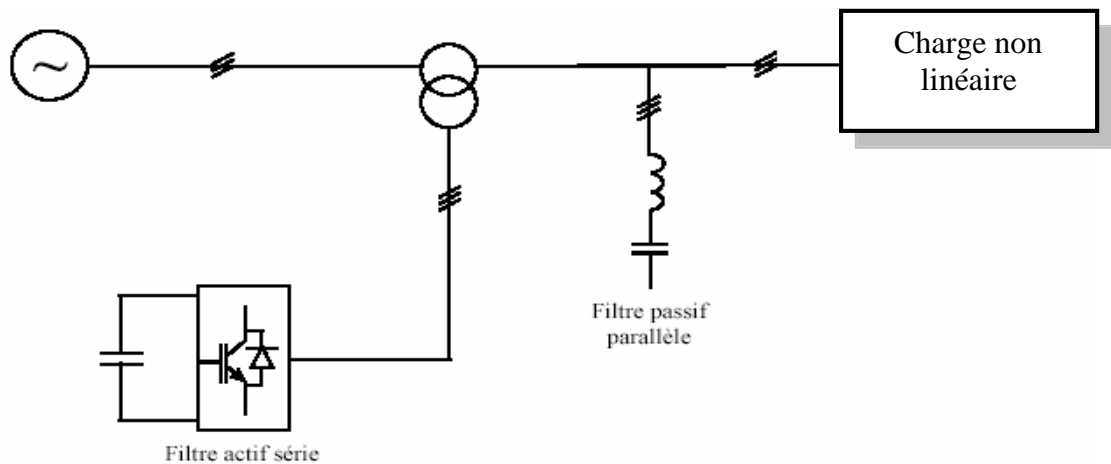
permettant de réduire le dimensionnement des filtres actifs qui ne compensent que le reste des perturbations.

Plusieurs configurations ont été présentées dans la littérature [22], les plus étudiées étant :

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

#### a) Le filtre actif série avec des filtres passifs parallèles

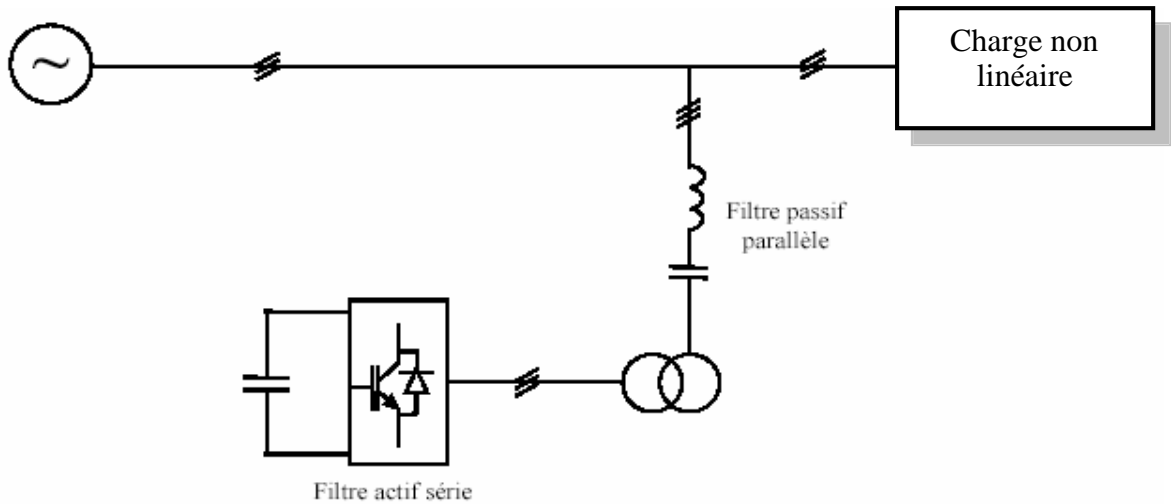
Le rôle du filtre actif série dans ce cas est d'empêcher les courants harmoniques de circuler vers le réseau et de les obliger à passer par les filtres passifs raccordés à leurs fréquences comme le montre la figure 2.8.



**Figure 2.8** : Filtre actif série et filtre passif parallèle

#### b) Le filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles

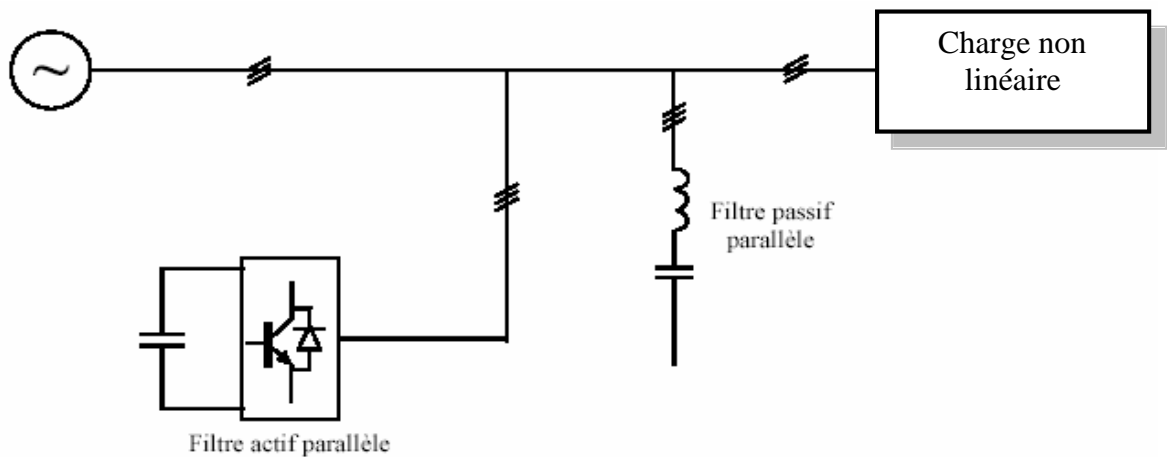
Le principe de fonctionnement de cette configuration, présentée en figure 2.9, est la même que la précédente avec l'avantage de réduire encore le dimensionnement du filtre actif série car le courant qui le traverse est plus faible.



**Figure 2.9:** Filtre actif série connecté en série avec un filtre passif parallèle

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

Le rôle du filtre actif parallèle dans cette configuration, montrée en figure 2.10, est la compensation des courants harmoniques basses fréquences émis par la charge polluante. Le filtre passif accordé sur une fréquence élevée, élimine les harmoniques hautes fréquences y compris ceux créés par le filtre actif parallèle. Ce type de filtrage a déjà été appliqué à la compensation des courants harmoniques émis par un cycloconvertisseur de forte puissance.



**Figure 2.10 :** Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle

### 2.2.5 Comparatif et choix du filtrage actif parallèle (FAP)

Le tableau 2 montre un récapitulatif des avantages et inconvénients de cinq schémas de dépollution: renforcement de la puissance de court-circuit, filtrage passif, filtrage actif série, filtrage actif parallèle et le filtrage parallèle - série actifs.

Le filtre parallèle - série active compense toutes les perturbations liées à la tension et au courant. Néanmoins, cette solution dite universelle reste difficile à réaliser pratiquement.

Le filtre actif parallèle génère des composantes harmoniques aux mêmes fréquences et en opposition de phase aux perturbations mesurées. Il compense les courants harmoniques engendrés par une charge non linéaire, tout en s'adaptant aux évolutions du récepteur. Cependant, la compensation des harmoniques de tension n'est toujours pas évidente avec cette approche.

En raison de la législation des normes de qualité de l'énergie (surtout la compensation des harmoniques de courant) et les bonnes performances obtenues par le FAP, nous avons retenu cette topologie de compensation pour notre stratégie de dépollution des perturbations harmoniques.

**Tableau 2** : Récapitulatif des solutions de dépollution

Principes	Avantages	Inconvénients
renforcement de la puissance de court-circuit	amélioration de la forme de la tension	pas d'amélioration de la forme du courant, pas toujours réalisable
filtrage passif	amélioration de la forme du courant	risque de résonance, pas d'adaptabilité
redresseur dodécaphasé	harmoniques 5, 7, 17 et 19 sont éliminés	harmoniques de rang $12k \pm 1$ sont conservés
filtrage actif série FAS	amélioration de la forme de la tension, adaptabilité aux variations de charge et du réseau	pas d'amélioration de la forme du courant
filtrage actif parallèle FAP	amélioration de la forme du courant, adaptabilité aux variations de charge et du réseau	amélioration de la forme de la tension pas toujours évidente
combinaison parallèle - série actifs UPQC	amélioration de la forme du courant, amélioration de la forme de la tension, adaptabilité aux variations de charge et du réseau	réalisation difficile

### 3.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté plusieurs solutions traditionnelles et modernes de dépollution. La solution classique à base de filtres passifs est souvent pénalisée en termes d'encombrement et de résonance. De plus, les filtres passifs ne peuvent pas s'adapter à l'évolution des charges polluantes.

Récemment, en plus du filtrage des harmoniques, les filtres actifs parallèles et séries, et leur combinaison, sont étudiés pour la compensation de tous les types de perturbation susceptible d'apparaître dans un réseau électrique basse tension. En effet, profitant des progrès réalisés dans le domaine de l'électronique de puissance, ces solutions peu encombrantes n'occasionnent aucune résonance avec les éléments passifs du réseau et font preuve d'une grande flexibilité face à l'évolution du réseau électrique et de la charge polluante.

Le filtre actif parallèle (FAP) peut être installé pour compenser toutes les perturbations de courant comme les harmoniques et la puissance réactive.

Le filtre actif série (FAS) peut être installé pour compenser toutes les perturbations de tension comme les harmoniques et les creux de tension.

La combinaison parallèle-série actifs (UPQC) est la solution universelle pour compenser toutes les perturbations en courant et en tension.

D'autres solutions de dépollution consistent à associer des filtres actifs et passifs pour trouver un compromis entre l'efficacité de compensation et le coût. Ces solutions peuvent être des solutions futures très prometteuses.

Les méthodes de régulation avancées que nous appliquerons dans le cas du filtre actif parallèle monophasé et triphasé, seront étudiées dans les prochains chapitres.

## CHAPITRE 3 : FILTRE ACTIF PARALLELE DE PUISSANCE, PRINCIPE, STRATEGIE DE COMMANDE ET DIMENSIONNEMENT.

### 3.1 Introduction

Afin de réduire les harmoniques au niveau du réseau électrique, nous proposons dans ce travail le filtrage actif parallèle, par les avantages qu'il représente, tel que l'adaptation aux variations de la charge polluante.

Le filtre actif parallèle est un onduleur de tension à modulation de largeur d'impulsions, il injecte dans le réseau des courants harmoniques égaux et en opposition de phase à ceux absorbés par la charge polluante. Cette structure a pour vocation d'éliminer de façon active tout ou une partie des harmoniques de courant.

Dans ce chapitre nous étudierons la structure générale, les différentes stratégies de commande de l'onduleur de tension et le dimensionnement du filtre actif parallèle.

### 3.2 Principe de filtrage actif parallèle de puissance.

Le schéma de principe du filtre actif parallèle est représenté sur la figure 3.1, il doit fournir la puissance déformante et la puissance réactive. Ainsi, le réseau fournit uniquement la puissance active.

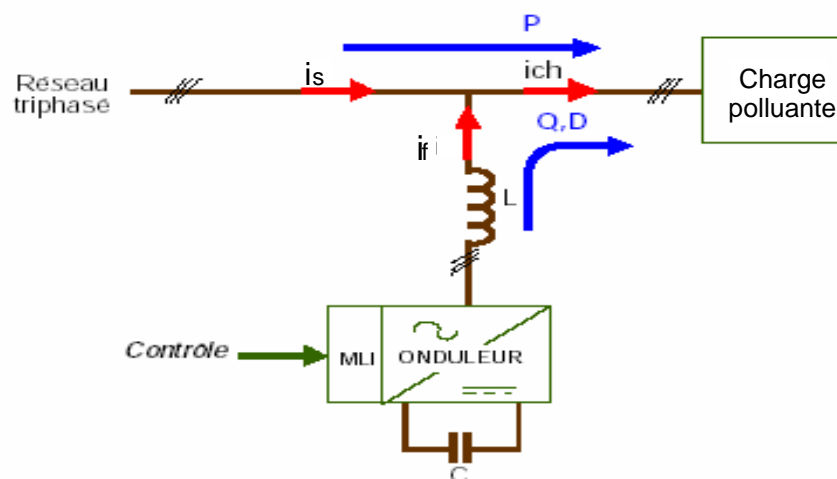


Figure 3.1: Schéma de principe du filtre actif parallèle.



Pour cela, le circuit de contrôle, en agissant sur la commande MLI, doit imposer la valeur instantanée du courant débité par l'onduleur de telle sorte que le courant fourni par le réseau soit sinusoïdal et en phase avec la tension simple correspondante.

Dans le cas général, le courant absorbé par la charge comporte une composante active ( $i_{cha}$ ), une composante réactive ( $i_{chr}$ ) et une composante harmonique ( $\sum_{n=1}^{\infty} i_{chn}$ ).

$$i_{ch} = i_{cha} + i_{chr} + \sum_{n=1}^{\infty} i_{chn} \quad (3.1)$$

Le compensateur actif ne peut absorber ou fournir de la puissance active puisqu'il ne comporte pas de source active.

D'après la première loi de Kirchhoff, le courant fourni par la source est égale à :

$$i_s = i_{ch} - i_f \quad (3.2)$$

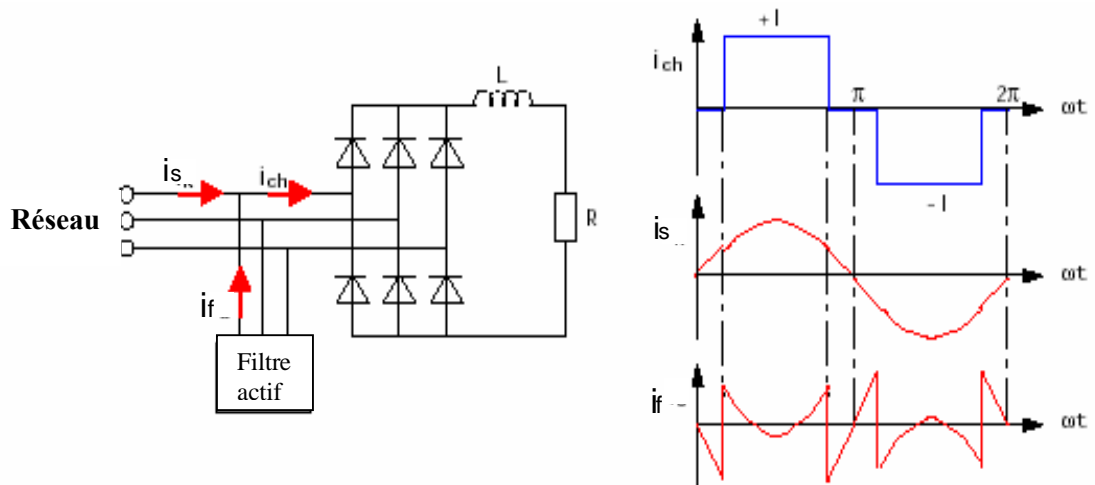
La source fournit la puissance active absorbée par la charge :

$$i_s = i_{cha} \quad (3.3)$$

Le filtre actif parallèle fournit la puissance réactive et déformante :

$$i_f = i_{chr} + \sum_{n=1}^{\infty} i_{chn} \quad (3.4)$$

Pour illustrer le principe de filtrage actif, considérons l'ensemble réseau électrique, charge polluante et filtre actif (figure 3.2). La charge polluante est constituée d'un pont triphasé à diodes débitant sur un circuit RL.



**Figure 3.2:** Schéma de principe de l'ensemble réseau électrique, charge polluante et filtre actif et formes d'ondes des courants respectifs.

Alors que le courant absorbé par la charge polluante est non sinusoïdal, le filtre actif injecte un courant de telle manière que le courant absorbé par le réseau doit être sinusoïdal.

### 3.3 Structure du filtre actif parallèle :

Les filtres actifs sont constitués de deux parties distinctes: une partie puissance, une partie commande (figure 3.3). La première se compose d'un onduleur, d'un filtre de couplage au réseau et d'une source d'énergie. Ces deux derniers déterminent la nature du filtre actif. Il peut être à structure tension ou courant suivant qu'il est réalisé à l'aide d'un onduleur de tension ou de courant.

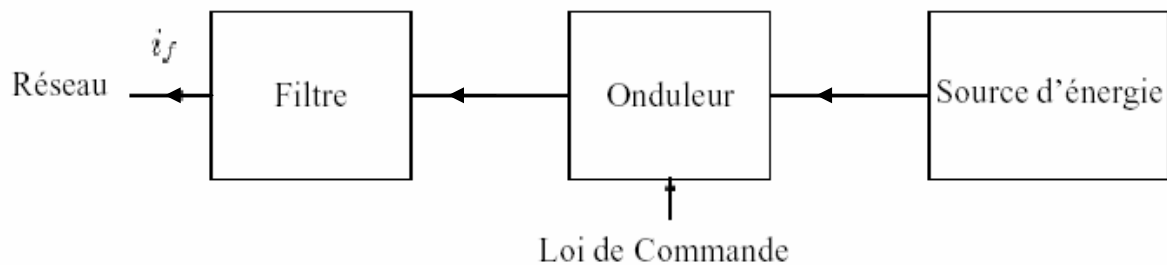


Figure 3. 3: Structure d'un filtre actif parallèle

- **La partie puissance est constituée :**

- d'un onduleur à base d'interrupteurs de puissance, commandables à l'ouverture et à la fermeture (GTO, IGBT, MOSFET, etc....) avec des diodes en antiparallèle.
- d'un circuit de stockage d'énergie.
- d'un filtre de sortie.

- **La partie commande est constituée :**

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

#### 3.3.1 Etude de la partie puissance

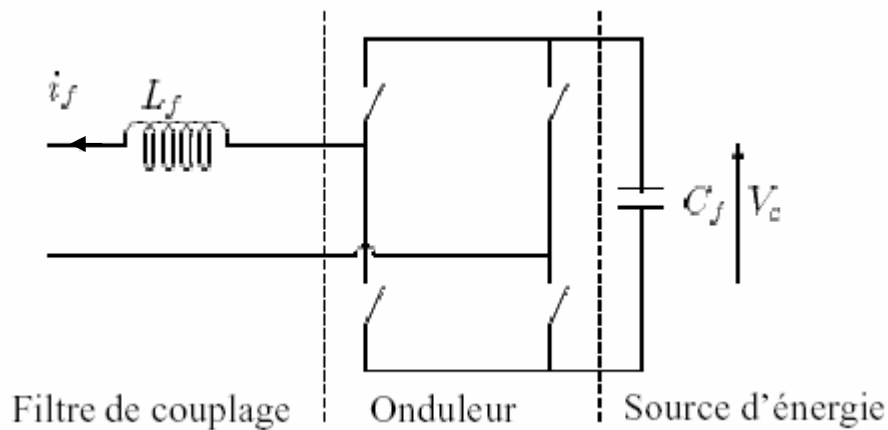
- **Structure tension**

L'onduleur de tension connecté en parallèle au réseau est illustré par la figure 3.4 [23]. La

capacité  $C_f$  joue le rôle d'une source de tension continue. La tension à ses bornes  $V$  doit être positive et maintenue quasiment constante. Ses fluctuations doivent être faibles d'une part pour ne pas dépasser la limite en tension des semi-conducteurs constituant les interrupteurs, d'autre part pour ne pas dégrader les performances du filtre actif.

L'onduleur de tension est relié au réseau par l'intermédiaire d'un filtre du premier ordre constitué d'une inductance  $L_f$ . Deux rôles sont dévolus à ce filtre: d'une part transformer les variations de tension  $V_f$  en variations de courant, d'autre part filtrer les fréquences de commutation des bras d'onduleur.

Les interrupteurs de l'onduleur sont réversibles en courant. Ils sont constitués de semi-conducteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture en anti-parallèle avec une diode [24].



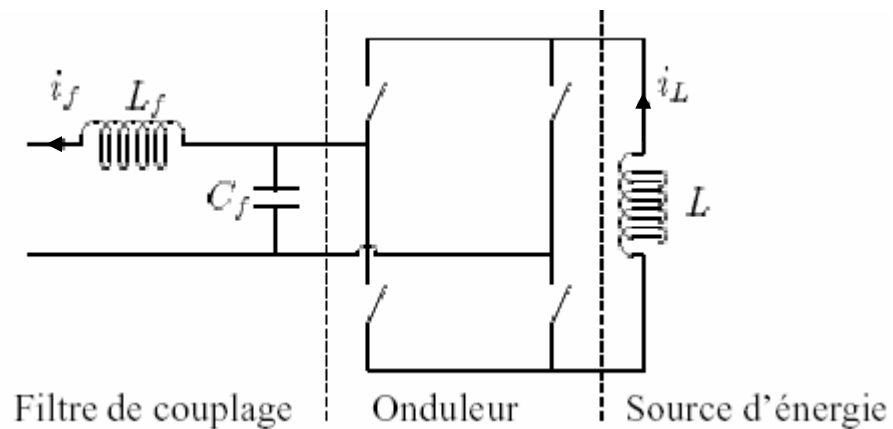
**Figure 3. 4:** Onduleur de tension

- **Structure courant**

La figure 3.5 représente le schéma de principe d'un onduleur de courant [23]. L'inductance joue le rôle d'une source de courant continu. Le courant  $i_L$  traversant cette inductance est maintenu quasiment constant pour ne pas dégrader les performances du filtre actif.

L'onduleur de courant est relié au réseau par l'intermédiaire d'un filtre passe-bas du second ordre constitué d'une inductance  $L_f$  et d'une capacité  $C_f$ . Ainsi le courant  $i_f$  du filtre actif est égal au courant délivré par l'onduleur filtré par le filtre LC dont la fréquence propre est  $\frac{1}{2\pi\sqrt{L_f C_f}}$ . La bande passante du filtre actif est donc essentiellement imposée par le choix de  $L_f$  et de  $C_f$ . Ceux-ci peuvent être dimensionnés de manière à atténuer la fréquence de commutation des interrupteurs de l'onduleur.

Les interrupteurs sont unidirectionnels. Ils sont formés par des transistors commandés à l'ouverture et à la fermeture. Ceux-ci ne pouvant supporter de tension inverse, ils nécessitent une diode en série [24].



**Figure 3. 5:** Onduleur de courant

#### - Comparaison des deux structures

- **Dimensionnement des circuits de stockage**

Pour les faibles puissances, le stockage de l'énergie dans un condensateur (structure tension) est plus efficace et moins coûteux. En revanche, pour les fortes puissances une inductance (structure courant) est plus adaptée.

- **Protection contre les surtensions et surintensités**

Les interrupteurs constituant un onduleur de tension doivent être protégés contre les surintensités tandis qu'un onduleur de courant nécessite une protection contre les surtensions. Cette dernière est plus complexe à réaliser technologiquement.

Ainsi, pour des installations de faible ou de moyenne puissance, la structure tension semble mieux adaptée et plus simple à réaliser [23]. Par conséquent, nous avons retenu cette structure par la suite.

### 3.3.2 Etude de l'onduleur de tension

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion continue - alternative à partir d'une source de tension continue, on peut obtenir à la sortie une tension alternative. Donc, il est possible de produire à la sortie du convertisseur une tension alternative, par une

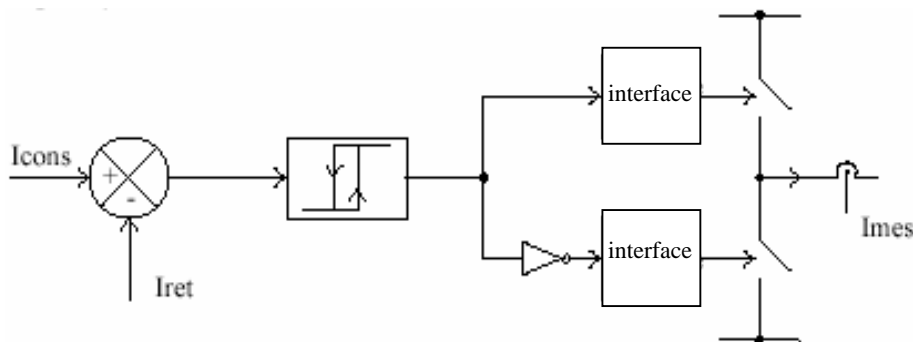
séquence de commande adéquate des interrupteurs. Cette tension peut comporter un ou plusieurs créneaux par alternance suivant qu'il s'agit d'une commande à un créneau par alternance, ou d'une commande de modulation de largeur d'impulsions (MLI).

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

- la commande par hystérésis
- la commande par modulation de largeur d'impulsions.

**a) Commande par hystérésis :**

La commande par hystérésis, appelée aussi commande en tout ou rien, est une commande non linéaire qui utilise l'erreur existant entre le courant de référence et le courant produit par l'onduleur, cette erreur est comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis, comme le montre la figure 3.6.



**Figure 3.6:** Principe de la commande des courants par hystérésis.

Dés que l'erreur atteint la bande inférieure ou supérieure (figure 3.7), un ordre de commande est envoyé de manière à rester à l'intérieur de la bande. La simplicité est le principal avantage de cette technique. En revanche, les commutations évoluant librement à l'intérieur de la bande d'hystérésis, on ne peut pas maîtriser correctement le spectre haute fréquence dû aux fréquences de commutations.

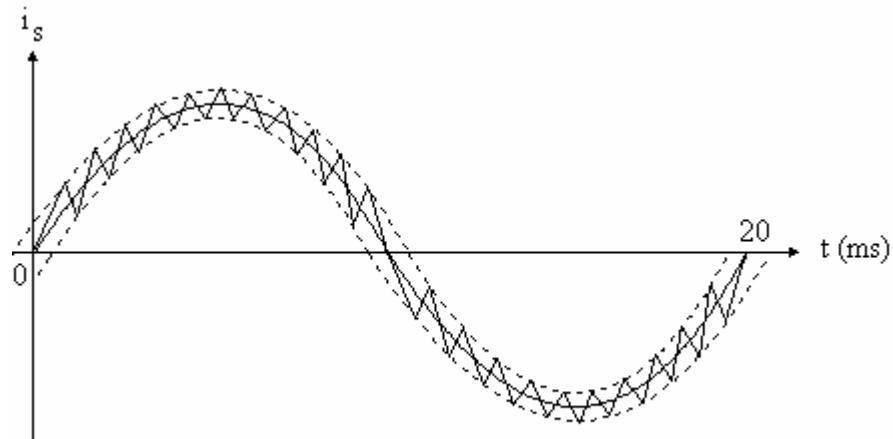


Figure 3.7: Commande par hystérésis

Ce problème peut être résolu par une autre stratégie de commande qui peut être proposé à savoir la commande par hystérésis modulée. Mais dans cette stratégie de commande, il est difficile de définir la largeur de la bande de l'hystérésis [25].

**b) Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI) :**

Pour résoudre les problèmes précédents, nous introduisons une deuxième famille de commande de l'onduleur : la technique de commande par MLI, qui résout le problème de la maîtrise de la fréquence de commutation, dont le schéma de principe est donné par la figure 3.8.

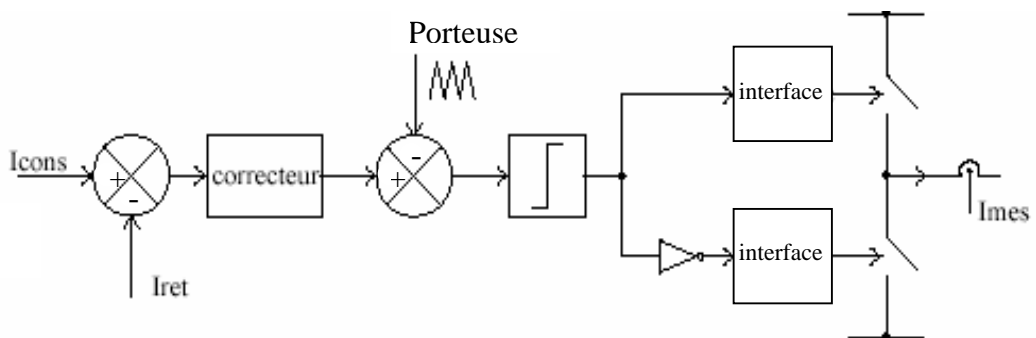
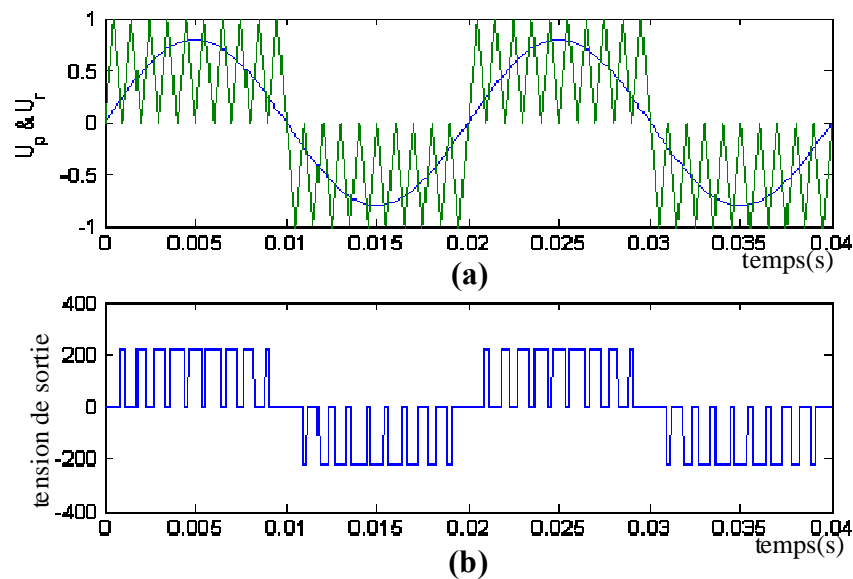


Figure 3.8: Principe de commande des courants par MLI.

La plus simple et la plus connue des modulations de largeur d'impulsion est sans doute la MLI à échantillonnage naturel, comme le montre la figure 3.9.

Cette technique de commande met en œuvre d'abord un régulateur qui détermine la tension de référence de l'onduleur à partir de l'écart entre le courant mesuré et sa référence. Cette dernière est ensuite comparée avec un signal triangulaire (porteuse à fréquence élevée fixant la fréquence de commutation). La sortie du comparateur fournit l'ordre de commande des interrupteurs.



**Figure 3.9 :** Commande par modulation de largeur d'impulsions

(a) signal de référence et de porteuse,

(b) tension de sortie.

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

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

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

### c) Principe de la commande MLI sinus-triangle :

Le signal de commande des interrupteurs est généré à partir de la comparaison du signal de référence sinusoïdal de fréquence  $f_r=1/T_r$  et du signal de modulation triangulaire ou porteuse de fréquence  $f_p = 1/T_p$  (figure 3.10).

Deux paramètres principaux caractérisent la commande à MLI:

- L'indice de modulation :  $m = f_p/f_r$ , avec  $m \gg 1$ .
- Le coefficient de réglage :  $r = V_{rmax} / V_{pmax}$ , Généralement  $r$  est compris entre zéro et un.

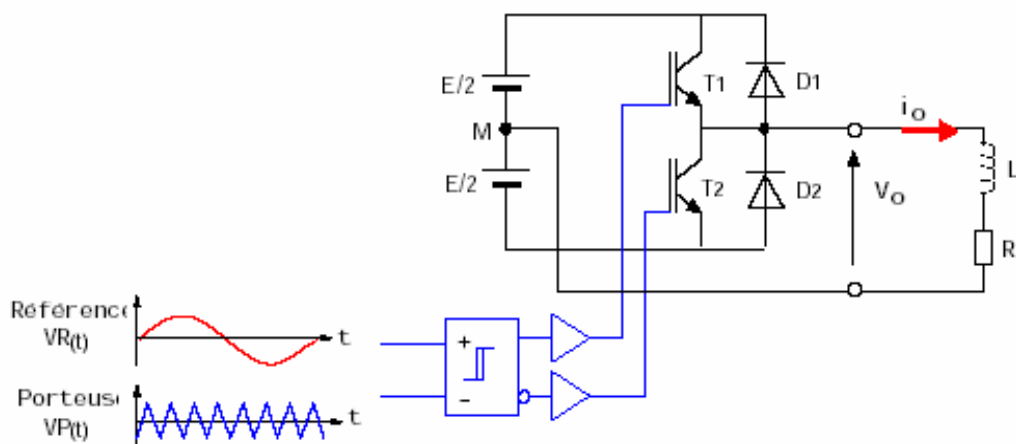


Figure 3.10: Schéma de principe de l'onduleur monophasé commandé par MLI sinus-triangle.

### 3.4 Stratégie de commande du filtre actif parallèle

Afin de commander le filtre actif parallèle, nous devons d'abord identifier les courants harmoniques de la charge polluante, qui servent en effet comme références du filtre actif parallèle. Donc, la stratégie de commande du FAP se base sur la détection des courants perturbateurs dans le domaine temporel. Trois possibilités d'identification des courants perturbateurs peuvent être utilisées [14, 15] :

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

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



La première famille utilise la transformée de Fourier rapide dans le domaine fréquentiel, pour extraire les harmoniques de courant. Cette méthode est bien adaptée aux charges où le contenu harmonique varie lentement. Elle donne aussi l'avantage de sélectionner les harmoniques individuellement. Il est à noter que cette méthode nécessite une grande capacité de calcul [26].

La deuxième famille est basée sur le calcul des puissances instantanées dans le domaine temporel. Certaines de ces méthodes se basent sur le calcul des puissances harmoniques de la charge non linéaire. D'autres peuvent être utilisées pour compenser à la fois les courants harmoniques et la puissance réactive, en se basant sur la soustraction de la partie fondamentale active du courant total [8].

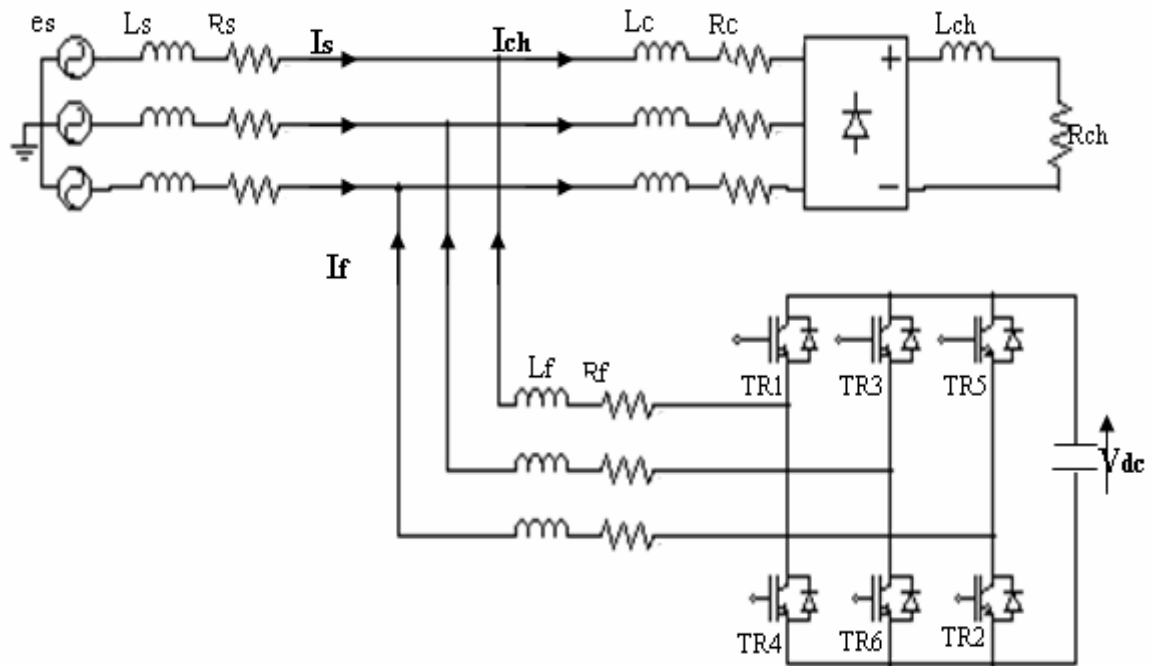
Récemment, des nouvelles méthodes d'identification donnent le choix de compenser un, plusieurs ou voire même tous les types de courants perturbateurs. En effet, en se basant sur la régulation de la tension continue et sur celles du réseau électrique aux points de raccordement, nous pouvons compenser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

Une autre méthode, appelée méthode de détection synchrone, reposant sur la transformée de Park a été proposée [27]. Cette méthode se base essentiellement sur le calcul de la pulsation fondamentale obtenue par une PLL. Cela exige une précision parfaite du calcul de cette pulsation afin de ne pas avoir des courants identifiés erronés.

Enfin, la méthode d'identification la plus utilisée est celle appelée méthode des puissances réelles et imaginaires instantanées [28]. Cette méthode offre l'avantage de choisir la perturbation à compenser avec précision, rapidité et facilité d'implantation. Pour toutes ces raisons nous avons retenu cette méthode d'identification pour le reste de notre étude. En effet, afin de pouvoir compenser les courants harmoniques, les courants déséquilibrés et la puissance réactive conjointement ou individuellement, cette méthode nous a semblé la mieux appropriée.

### 3.5 Dimensionnement de l'ensemble réseau, filtre actif parallèle et charge polluante

Dans cette partie, nous étudions le dimensionnement du réseau, de la charge polluante et celui du filtre actif parallèle FAP (figure 3.11). La charge polluante est un pont redresseur triphasé à diodes alimentant une charge RL série ou RC parallèle et le réseau d'alimentation est un réseau triphasé de tension (220/380 V, 50 Hz) de puissance nominale apparente de 400 KVA.



**Figure 3.11** : Schéma de l'ensemble réseau, charge polluante et filtre actif parallèle.

- **Réseau électrique**

Le réseau électrique est représenté par un poste de transformation représenté par la f.e.m du réseau, une inductance  $L_s$  et une résistance  $R_s$ . En tenant compte de la norme CEI 61000-3-12, il faudrait que l'ensemble réponde à la spécification suivante [25]:

$$S_{cc} / S_{ch} \geq 30$$

avec

$S_{cc}$  puissance apparente de court circuit du réseau

$S_{ch}$  puissance apparente de la charge non linéaire

Pour notre étude on a choisit un rapport  $S_{cc} / S_{ch} = 30$ , ce qui donne une puissance de court circuit égale à :

$$S_{cc} = 30.400 = 12 \text{ MVA}$$

L'importance de l'effet inductif sur l'effet résistif est prise en compte de manière à avoir

$$X_s = 10R_s$$

Donc :

$$Z_s = \frac{3V_s^2}{S_{cc}} = R_s \sqrt{101} \quad (3.5)$$

ce qui donne :

$$R_s = 1.2 \text{ m}\Omega \text{ et } L_s = 38.2 \text{ }\mu\text{H}$$

- **Charge polluante**

La charge polluante se compose d'une inductance  $L_c$  et d'une résistance  $R_c$  et d'un redresseur triphasé en pont à diodes alimentant une charge RL série ou une charge RC parallèle .

#### ***Calcul de l'inductance $L_c$ et de la résistance $R_c$***

Pour notre étude on prend pour l'ensemble réseau, transformateur et câbles des valeurs tel que :

$$X_t = X_s + X_c = 5\%Z_n \quad (3.6)$$

$$R_t = R_s + R_c = 1\%Z_n \quad (3.7)$$

$$Z_n = \frac{3V_n^2}{S_n} = 0.363\Omega \quad (3.8)$$

avec

$Z_n$  impédance nominale du réseau

Ce qui donne :

$$L_c = 19.6 \text{ }\mu\text{H}$$

$$R_c = 2.4 \text{ m}\Omega$$

#### ***Redresseur triphasé en pont à diodes***

La valeur moyenne de la tension à la sortie du redresseur est donnée par l'expression suivante :

$$U_d = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} \cdot V_n = 2.34 V_s = 515 \text{ V} \quad (3.9)$$

$$I_d = \frac{S_n}{U_d} = 776 \text{ A} \quad (3.10)$$

La résistance de la charge du redresseur est égale à :

$$R_{ch} = \frac{U_d}{I_d} = 0.66 \Omega \quad (3.11)$$

La tension redressée présente une ondulation de fréquence égale à 300 Hz. Pour obtenir un courant lissé à la sortie du redresseur, il faut que la constante de temps du circuit  $T_{ch} = R_{ch} \cdot L_{ch}$  soit supérieur à  $T_{ond}$ , on prend une inductance avec une valeur égale à :

$$L_{ch} = 2 \text{ mH.}$$

- **Filtre actif parallèle**

Dans cette partie, nous étudions la puissance apparente du filtre actif parallèle, de manière à évaluer, du point de vue économique, les possibilités de compensation pour tout type de perturbations de courant.

Avant de débiter cette étude, nous devons connaître les valeurs de tension et de courant que doit supporter chaque interrupteur de l'onduleur. Généralement, ces interrupteurs sont choisis pour supporter individuellement la tension continue  $V_{dc}$  et la valeur crête du courant du filtre actif  $I_{inj}$  tout en tenant compte des composantes dues aux découpages [29].

### *Compensation des courants harmoniques*

La puissance apparente d'une charge non linéaire ( $S_{ch}$ ) est composée de trois termes de puissance : la puissance active  $P_{ch}$ , la puissance réactive  $Q_{ch}$  et la puissance déformante  $D_{ch}$ , comme l'indique l'expression suivante:

$$S_{ch} = \sqrt{P_{ch}^2 + Q_{ch}^2 + D_{ch}^2} = 3V_s I_{ch} \quad (3.12)$$

avec

$V_s$  la tension du réseau au point de raccordement

$I_{ch}$  le courant de la charge non linéaire.

La puissance apparente du filtre actif ( $S_f$ ) compensant le courant harmonique  $I_h$ , injecté par un pont redresseur triphasé à diodes, est donnée par l'équation suivante :

$$S_f = \sqrt{D_{ch}^2} = 3V_s I_h \quad (3.13)$$

Le courant harmonique  $I_h$  qui doit être créé par le filtre actif peut s'écrire de la façon suivante :

$$I_h = \sqrt{I_s^2 - I_{1ch}^2} \quad (3.14)$$

avec

$I_{1ch}$  le courant fondamental consommé par la charge non linéaire.

Le courant fondamental et le courant de la charge peuvent être exprimés en fonction du courant direct de la charge non linéaire  $I_d$ , comme suite :

$$I_s = \sqrt{\frac{2}{3}} I_d \quad (3.15)$$

$$I_{1ch} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d \quad (3.16)$$

Le rapport des puissances filtre actif charge ( $\tau_h$ ) peut être exprimé dans ce cas par la relation suivante :

$$\tau_h = \frac{S_f}{S_{ch}} = \frac{3V_s I_h}{3V_s I_{ch}} \quad (3.17)$$

Des expressions (3.14), (3.15) et (3.16), nous obtenons le rapport des puissances égale à :

$$\tau_h \% = \frac{\sqrt{\pi^2 - 9}}{\pi} \approx \mathbf{30\%} \quad (3.18)$$

La puissance apparente du filtre actif est égale à **30%** de puissance apparente de la charge polluante

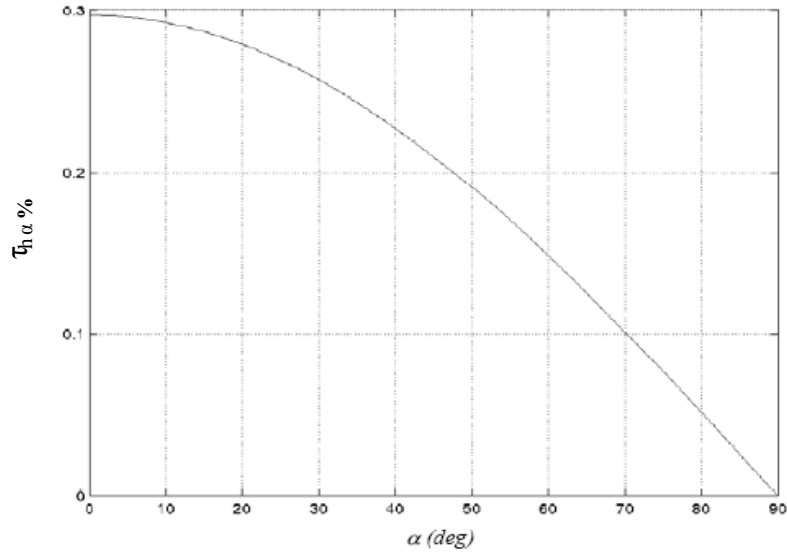
Lorsque la charge non linéaire est composée d'un redresseur triphasé à thyristors alimentant une charge RL série, le courant de la charge dépend de l'angle de retard  $\alpha$ , comme le montre l'expression (3.19).

$$I_{d\alpha} = \frac{U_d}{R_{ch}} \cos\alpha = I_d \cos\alpha \quad (3.19)$$

Le rapport des puissances filtre actif charge ( $\tau_h$ ) devient égale à :

$$\tau_{h\alpha} \% = \frac{\sqrt{\pi^2 - 9}}{\pi} \cdot \cos\alpha = 0.3 \cos\alpha = \tau_h \cdot \cos\alpha \quad (3.20)$$

La figure 3.12 montre la variation du rapport des puissances  $\tau_{ha}$ , du filtre actif parallèle par rapport à celle de la charge non linéaire, en fonction de l'angle de retard  $\alpha$  des thyristors.



**Figure 3.12:** Rapport des puissances du filtre actif parallèle et de la charge non linéaire pour la compensation des courants harmoniques

A partir de la figure 3.12, on constate que pour  $\alpha = 0$ , la puissance maximale du filtre actif est de  $S_f \approx 30\% S_{ch}$ . Cette puissance diminue avec l'augmentation de l'angle de retard ( $\alpha$ ) grâce à la diminution du courant harmonique

### ***Compensation des courants harmoniques et de la puissance réactive***

Dans cette étude, nous nous intéresserons au calcul du rapport des puissances apparentes dans le cas de la compensation des courants harmoniques et de la puissance réactive consommés par la même charge non linéaire. Dans ce cas, le rapport des puissances apparentes ( $\tau_{hr}$ ) du filtre actif parallèle par rapport à celle de la charge non linéaire est donné par la relation suivante :

$$\tau_{hr} = \frac{S_f}{S_{ch}} = \frac{\sqrt{Q_{ch}^2 + D_{ch}^2}}{3V_s I_{ch}} \quad (3.21)$$

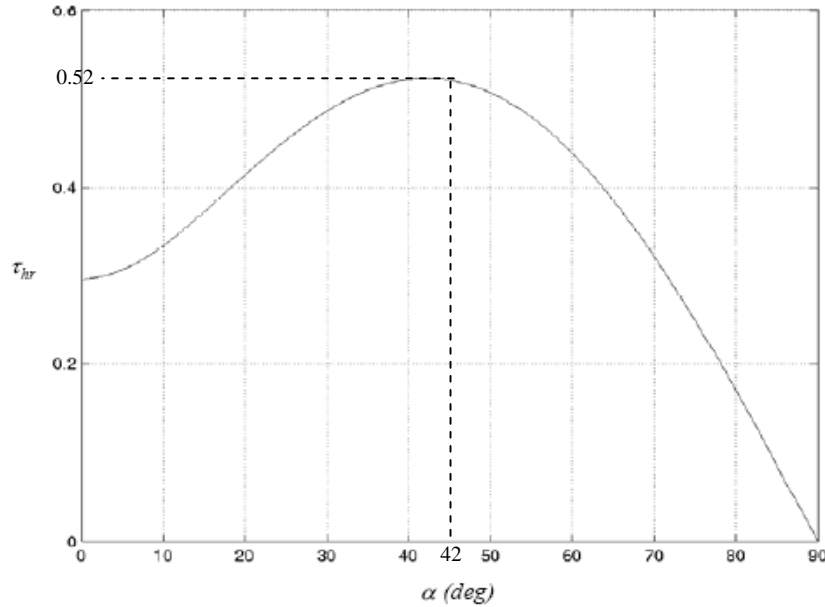
Cette dernière relation peut également s'écrire sous la forme suivante :

$$\tau_{hr} = \frac{\sqrt{(3V_s I_h)^2 + (3V_s I_{1ch} \cdot \sin \alpha)^2}}{3V_s I_{ch}} \quad (3.22)$$

En reportant les relations (3.14), (3.15) et (3.16) dans la relation (3.22), on obtient l'expression du rapport des puissances  $\tau_{hr}$  suivante :

$$\tau_{hr} = \cos\alpha \sqrt{1 - \frac{9}{\pi^2} \cos^2 \alpha} \quad (3.23)$$

La figure 3.13 illustre le rapport des puissances  $\tau_{hr}$  en fonction de l'angle de retard des thyristors  $\alpha$  de la charge non linéaire.



**Figure 3.13 :** Rapport des puissances du filtre actif parallèle et de la charge non linéaire pour la compensation des courants harmoniques et de la puissance réactive

A partir de la figure 3.13, on constate que pour un angle de retard  $\alpha=0$ , on trouve le même rapport de puissance que celui obtenu dans le cas de compensation précédent ( $S_f \approx 30\% S_{ch}$ ). Par contre, dans ce cas de compensation, le filtre actif atteint ici un rapport maximum de puissance de  $S_f \approx 52\% S_{ch}$  pour un angle de  $\alpha \approx 42^\circ$ .

Dans ce cas, le filtre actif parallèle, peut être utilisé pour compenser à la fois les courants harmoniques et la puissance réactive.

Le filtre actif est un onduleur de tension triphasé à IGBT avec des diodes montées en anti-parallèles. Ces composants sont choisis généralement pour supporter la tension  $V_{dc}$  et la valeur maximale du courant du filtre actif. La puissance du filtre est égale à :

$$S_f \approx 30\% S_{ch} = 30.400/100 = 120 \text{ KVA}$$

- **Calcul du système de stockage d'énergie.**

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

La tension continue  $V_{dc}$  doit être assez élevée pour améliorer la commandabilité du filtre actif, tout en respectant la tension de seuil des interrupteurs. En respectant ce compromis, on opte pour une tension continue :

$$V_{dc} = 800 \text{ V}$$

La capacité du condensateur est choisie pour minimiser l'ondulation de la tension continue  $V_{dc}$ . En utilisant la relation 3.24, qui sera démontrée au chapitre 5, on obtient une capacité de :

$$C_{dc} = \frac{V_{s \max} \Delta I_{ch} T}{V_{f \text{ref}}^2 - V_{f \min}^2} \quad (3.24)$$

$$C_{dc} = 4000 \mu\text{F}$$

- **Calcul du filtre de découplage.**

Le filtre de sortie est un filtre passif utilisé pour connecter l'onduleur de tension au réseau électrique. Le filtre de sortie est dimensionné pour satisfaire les deux critères suivants :

- assurer la dynamique du courant :

$$\frac{d}{dt} I_{h-ch} = \frac{d}{dt} I_{inj} \quad (3.25)$$

avec

$I_{h-ch}$  le courant harmonique de la charge

$I_{inj}$  le courant injecté par le filtre actif,

- empêcher les composantes dues aux commutations de se propager sur le réseau électrique



Le filtre de sortie est composé d'une inductance  $L_f$  de résistance interne  $R_f$ , il ne permet pas de satisfaire simultanément les deux critères de dimensionnement du filtre de sortie. En effet, seule une valeur relativement faible de  $L_f$  peut réaliser une bonne dynamique du filtre actif en satisfaisant l'égalité (3.24). Malheureusement, une valeur faible de  $L_f$  permet à la majorité des composantes dues aux commutations de se retrouver côté réseau et par conséquent d'affecter les installations et les équipements électriques. Inversement, une valeur relativement élevée de  $L_f$  va empêcher ces composantes de se propager sur le réseau électrique mais affectera la dynamique du filtre actif et dégradera alors la qualité de compensation.

Le bon dimensionnement du filtre de sortie du premier ordre dépendra donc du compromis à trouver entre la dynamique et l'efficacité du filtre actif parallèle.

Dans notre cas, le filtre actif est un onduleur de tension, les tensions générées par celui-ci sont sous forme d'impulsions et causent des ondulations de courants. Ces ondulations sont difficiles à atténuer par l'augmentation de  $L_f$ , car on est obligé d'augmenter la tension continue  $V_{dc}$  afin de conserver les performances du filtre actif. En utilisant la relation 3.26, qui sera démontrée au chapitre 5, on obtient une inductance de :

$$L_f = \int \frac{|V_s| - |V_{dc}|}{di_L} dt \quad (3.26)$$

$L_f = 150 \mu\text{H}$  et  $R_f = 5 \text{ m}\Omega$ .

### 3.6 Conclusion.

Dans ce chapitre nous avons présenté le principe de fonctionnement du filtre actif parallèle de puissance, la structure générale du FAP, les différentes stratégies de commande de l'onduleur de tension et le dimensionnement de l'ensemble réseau, charge polluante et filtre actif parallèle.

Dans les chapitres suivants, nous décrivons deux méthodes de calculs des courants de référence pour l'élimination des courants harmoniques dans un réseau électrique. La première méthode basée sur la transformation de Concordia pour le calcul des puissances réelles et imaginaires instantanées, tandis que la seconde méthode est basée sur l'identification à partir de la détection du courant de la source.

## CHAPITRE 4 : METHODE DES PUISSANCES REELLES ET IMAGINAIRES INSTANTANEEES.

### 4.1 Introduction.

Pour générer les courants de références, la méthode d'identification la plus souvent utilisée est la méthode des puissances réelles et imaginaires instantanées. Celle-ci offre l'avantage de choisir la perturbation à compenser avec précision, rapidité et facilité d'implantation. Cette méthode [28] est souvent utilisée pour compenser les courants harmoniques et la puissance réactive.

### 4.2 Généralités sur les puissances instantanées.

En présence des harmoniques, la puissance apparente est composée de trois parties: active (P), réactive (Q) et déformante (D) comme le montre la relation (4.1).

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (4.1)$$

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

$$\begin{bmatrix} V_o \\ V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{s1} \\ V_{s2} \\ V_{s3} \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Et les courants par la relation :

$$\begin{bmatrix} I_o \\ I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{s1} \\ I_{s2} \\ I_{s3} \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Les composantes indicées (0) représentent les séquences homopolaires du système de courant et de tension triphasé.

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

$$\begin{aligned} P(t) &= V_{s1} I_{s1} + V_{s2} I_{s2} + V_{s3} I_{s3} = p(t) + p_0(t) \\ p(t) &= V_{\alpha} I_{\alpha} + V_{\beta} I_{\beta} \\ p_0(t) &= V_0 I_0 \end{aligned} \quad (4.4)$$

avec

$p(t)$  la puissance réelle instantanée,

$p_0(t)$  la puissance homopolaire instantanée.

L'avantage de la transformation  $\alpha\text{-}\beta\text{-}0$  est la séparation des séquences homopolaires du système triphasé de courant ou de tension. De la même manière, la puissance imaginaire instantanée peut s'écrire sous la forme suivante :

$$q(t) = -\frac{1}{\sqrt{3}} [(V_{s1} - V_{s2}) I_{s3} + (V_{s2} - V_{s3}) I_{s1} + (V_{s3} - V_{s1}) I_{s2}] = V_{\alpha} I_{\beta} - V_{\beta} I_{\alpha} \quad (4.5)$$

A partir des relations (4.4) et (4.5), nous pouvons établir la relation matricielle suivante:

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & V_{s\beta} \\ -V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{\alpha} \\ I_{\beta} \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

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

$$\begin{cases} p = \bar{p} + \tilde{p} \\ q = \bar{q} + \tilde{q} \end{cases} \quad (4.7)$$

avec :

$\bar{p}$  puissance continue liée à la composante fondamentale active du courant et de la tension.

$\bar{q}$  puissance continue liée à la composante fondamentale réactive du courant et de la tension.

$\tilde{p}$  et  $\tilde{q}$  puissances alternatives liées à la somme des composantes perturbatrices du courant et de la tension.

### 4.3 Calcul des courants perturbateurs.

En inversant la relation (4.6), nous pouvons déterminer les courants dans le repère  $\alpha\text{-}\beta$  comme le montre l'équation (4.8) :

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{V_{s\alpha}^2 + V_{s\beta}^2} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

En considérant les équations (4.7) et (4.8), nous pouvons décomposer le courant dans le repère  $(\alpha\text{-}\beta)$  en trois composantes, active et réactive à la fréquence fondamentale et les harmoniques. Ceci conduit à:

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ 0 \end{bmatrix}}_{\text{courant actif}} + \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ q \end{bmatrix}}_{\text{courant réactif}} + \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix}}_{\text{courants harmoniques}} \quad (4.9)$$

avec

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

Cette expression montre que l'identification des différentes composantes du courant dans le repère  $(\alpha\text{-}\beta)$  revient à séparer les termes continus des puissances réelles et imaginaires instantanées. Les courants perturbateurs triphasés qui représentent les courants identifiés, dits courants de référence ( $I_{ref}$ ), sont calculés à partir de la transformation  $(\alpha\text{-}\beta)$  inverse donnée par la relation (4.10) :

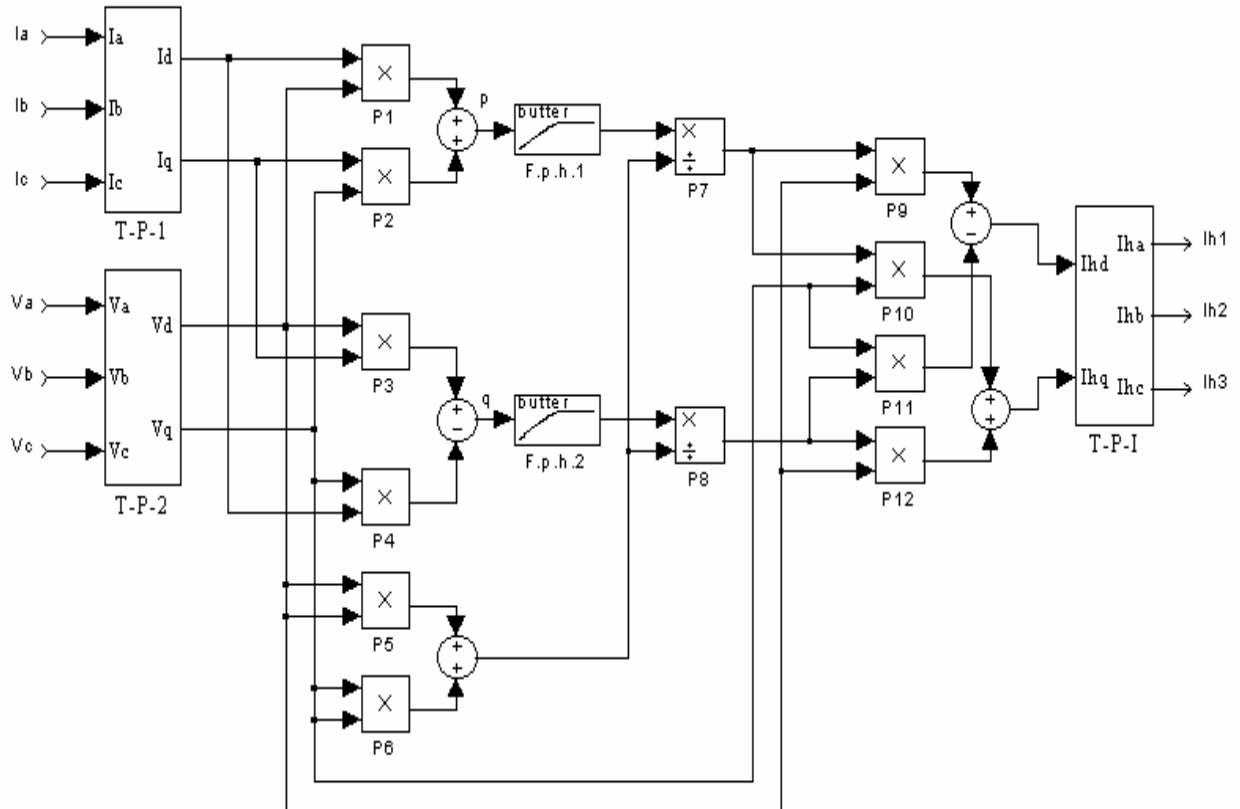
$$\begin{bmatrix} I_{ref1} \\ I_{ref2} \\ I_{ref3} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

avec

$I_\alpha, I_\beta$  courants perturbateurs calculés dans le repère  $\alpha\text{-}\beta$  à partir des courants réactifs et harmoniques de la relation (4.9).

#### 4.4 Algorithme d'identification.

La figure 4.1 illustre les différentes étapes de calcul permettant l'obtention des composantes harmoniques du courant d'une charge non- linéaire.



**Figure 4.1:** Algorithme d'identification des courants harmoniques basé sur le calcul des puissances réelles et imaginaires instantanées.

Cette figure représente le schéma de l'algorithme d'identification des courants harmoniques. Ce dernier est constitué essentiellement, par des blocs de la matrice de transformation ( $\alpha-\beta$ ), des filtres passe haut, permettant d'extraire les composantes continues des puissances, et les différents blocs de calcul des courants harmoniques [25].

#### 4.5 Régulation :

Une fois les courants de références obtenus, l'étape suivante consiste à étudier les méthodes de contrôle de ce dispositif. Celles-ci permettent de contrôler le filtre actif afin qu'il génère des courants qui suivent au mieux leurs références.

Il existe deux grandes familles de stratégie de contrôle du courant, la commande par modulation de largeur d'impulsion et la commande par hystérésis.

Dans notre étude, nous avons retenu la commande à MLI afin de contourner les problèmes de la commande par hystérésis. La régulation du filtre actif met en œuvre tout d'abord un régulateur qui, à partir de l'écart entre le courant réel et le courant de référence, détermine la tension de référence de l'onduleur. Cette dernière est ensuite comparée avec un signal en dent de scie (porteuse). La sortie du comparateur fournit l'ordre de commande des interrupteurs. Afin de maintenir la tension aux bornes de l'élément de stockage à une valeur fixe, une boucle de régulation de la tension continue est prévue.

#### 4.5.1 Régulation de la tension continue.

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

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

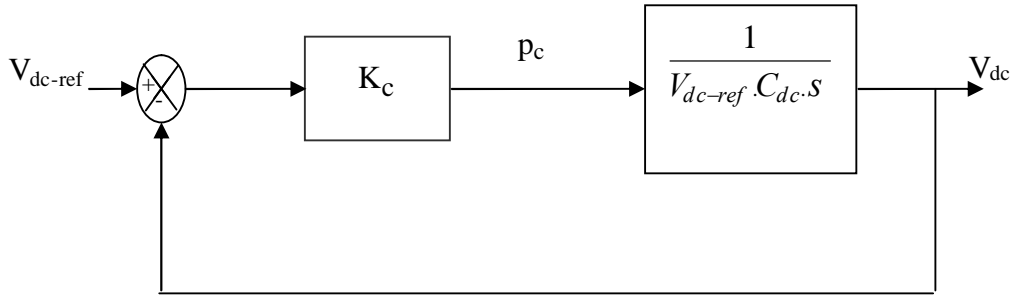
$$P_c = \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{2} C_{dc} \cdot V_{dc}^2 \right) \quad (4.11)$$

Notons que la relation (4.11) est non linéaire. Pour des faibles variations de la tension  $V_{dc}$  autour de sa référence  $V_{dc-ref}$ , elle peut être linéarisée à travers les relations suivantes :

$$p_c = C_{dc} \cdot V_{dc-ref} \frac{d}{dt} (V_{dc})$$

$$V_{dc}(s) = \Rightarrow \frac{P_c(s)}{V_{dc-ref} \cdot C_{dc} \cdot s} \quad (4.12)$$

A partir de la relation (4.12), et en prenant en compte le régulateur proportionnel ( $K_c$ ), la boucle de régulation de la tension continue peut être représentée par le schéma de la figure 4.2. Le choix du paramètre  $K_c$  aura pour objectif d'obtenir un temps de réponse minimal [25].



**Figure 4.2:** Boucle de régulation de la tension continue.

#### 4.5.2 Régulation du courant du filtre actif parallèle :

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

$$L_f \cdot \frac{d}{dt} I_{inj} = V_f - V_s \quad (4.13)$$

Notons par  $\Delta I_f$  la différence entre le courant de référence et le courant mesuré à partir de la relation suivante :

$$\Delta I_f = I_{ref} - I_{inj} \quad (4.14)$$

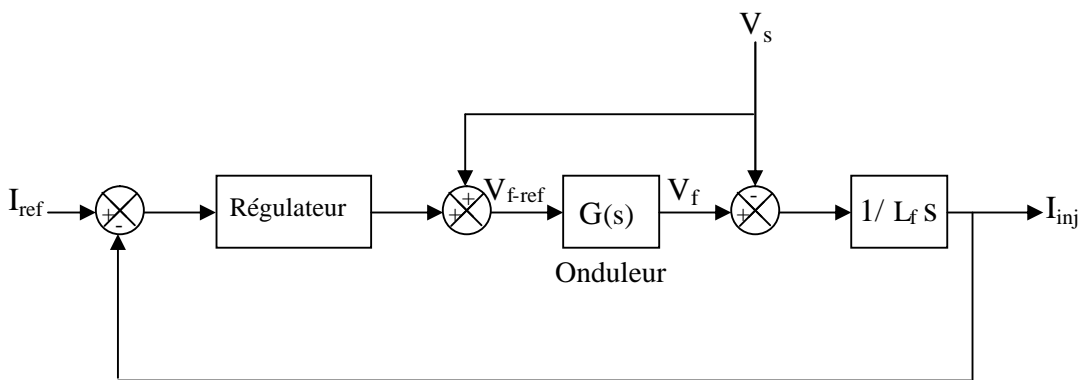
A partir des équations (4.13) et (4.14), nous obtenons l'expression ci-dessous :

$$L_f \cdot \frac{d}{dt} \Delta I_f = (V_s + L_f \frac{d}{dt} I_{ref}) - V_f \quad (4.15)$$

Le premier terme de la partie droite de la relation (4.15) peut être défini comme tension de référence ( $V_{f-ref}$ ), ce qui nous donne l'expression suivante :

$$V_{f-ref} = V_s + L_f \frac{d}{dt} I_{ref} \quad (4.16)$$

L'écart entre  $V_{f-ref}$  et  $V_f$  produit alors une erreur sur le courant. Selon la relation (4.16), la tension de référence est composée de deux termes à fréquences différentes. Le premier représente la tension du réseau  $V_s$  directement mesurable. Le second est égal à la chute de tension aux bornes de l'inductance  $L_f$ , lorsque celle-ci est traversée par un courant égale à celui de référence. Ce terme doit être élaboré par un régulateur de courant, comme le montre la figure 4.3.



**Figure 4.3:** Schéma de la régulation des courants du filtre actif parallèle

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

$$G(s) = K \frac{1}{1 + \tau.s} \quad (4.17)$$

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

Avec :

$V_{dc}$  la tension du côté continu de l'onduleur,

$V_p$  l'amplitude de la porteuse triangulaire et ( $\tau$ ) représentant le retard causé par le calcul des courants perturbateurs.

Le régulateur doit satisfaire les objectifs généraux de la régulation ainsi les contraintes liées au rejet des perturbations [25, 29].



## 4.6 Modélisation et simulation numérique

Pour étudier le comportement du filtre actif avec le réseau électrique, il faut tout d'abord établir un modèle mathématique de l'ensemble réseau, filtre actif parallèle et charge polluante. Après une simulation globale est effectuée pour analyser le comportement du filtre actif et sa commande afin de compenser ces courants harmoniques générés par la charge non linéaire.

### 4.6.1 Schéma synoptique de l'ensemble réseau, filtre actif parallèle et charge polluante.

La figure 4.4 donne le schéma synoptique de l'ensemble réseau, filtre actif parallèle et charge polluante. Le filtre actif parallèle n'est rien d'autre qu'un onduleur de tension commandé en courant possédant une source dite flottante (condensateur) et qui est connecté au réseau perturbé par un filtre inductif.

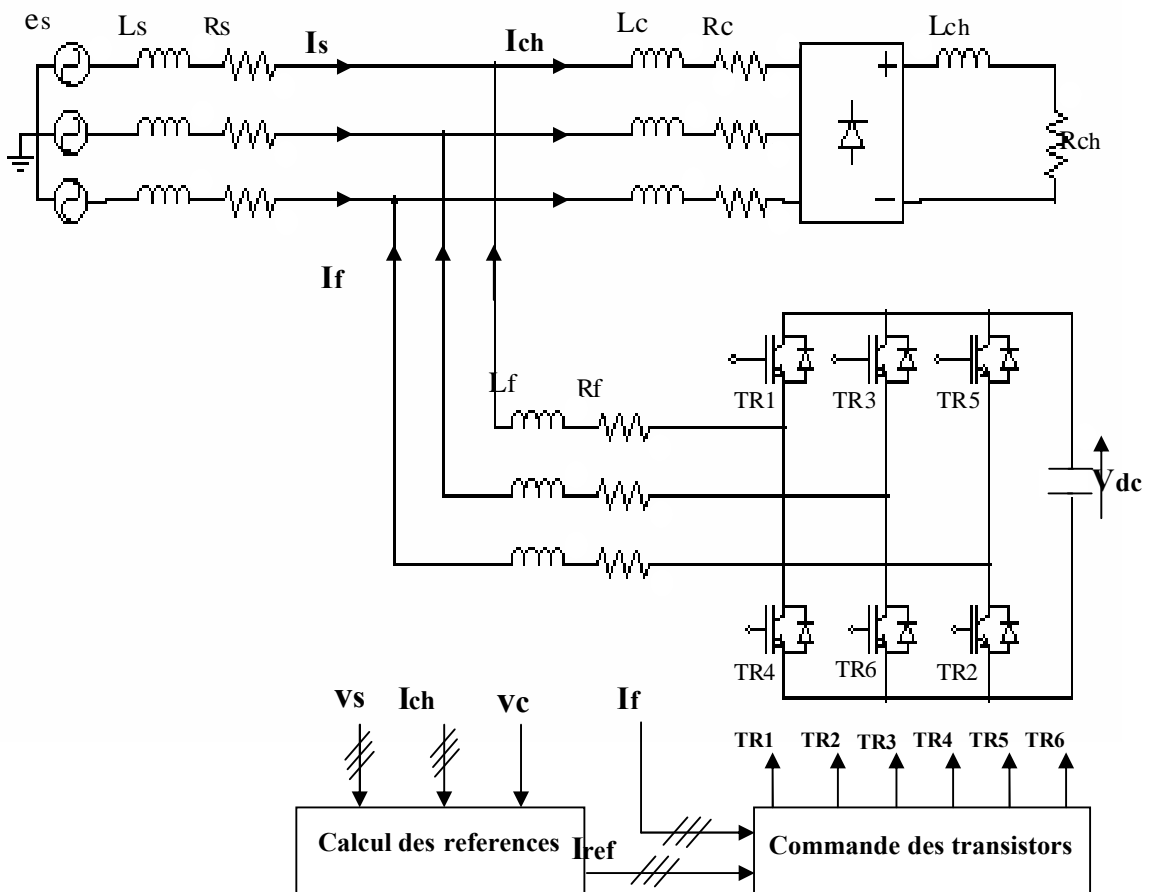


Figure 4.4: Schéma synoptique de l'ensemble réseau, filtre actif parallèle et charge polluante

#### 4.6.2 Modélisation de l'ensemble réseau, filtre actif parallèle et charge polluante.

La modélisation d'un système revient à trouver les équations mathématiques qui décrivent son fonctionnement [25].

##### a) Modélisation du réseau

Le réseau est assimilable à une source de tension sinusoïdale en série avec une impédance, dite de court circuit, d'où la représentation du réseau par un système de F.e.m. triphasées équilibrées en série avec une impédance (figure 4.5).

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

$$Z_s = R_s + jL_s\omega \quad (4.18)$$

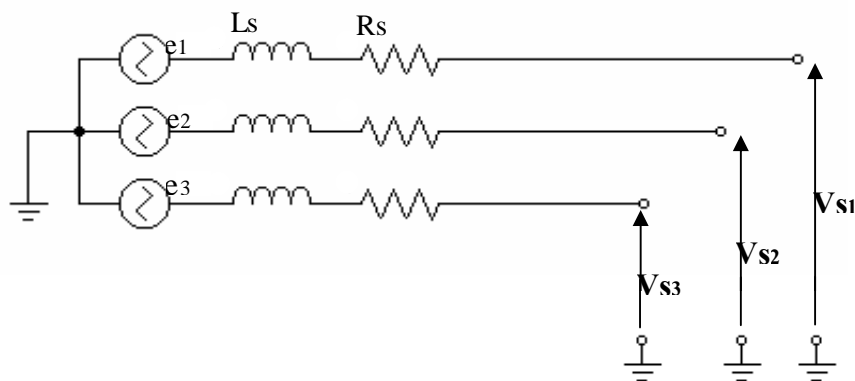


Figure 4.5: Schéma synoptique d'un réseau triphasé.

##### b) Modélisation de la charge polluante

Pour tester le filtre actif on a opté pour une charge polluante qui est un pont redresseur triphasé, représenté sur la figure 4.6, ce dernier génère des harmoniques de courants de l'ordre  $6k \pm 1$ . Cette charge est modélisée comme étant sources de courants parfaites (les semi-conducteurs sont considérés parfaits).

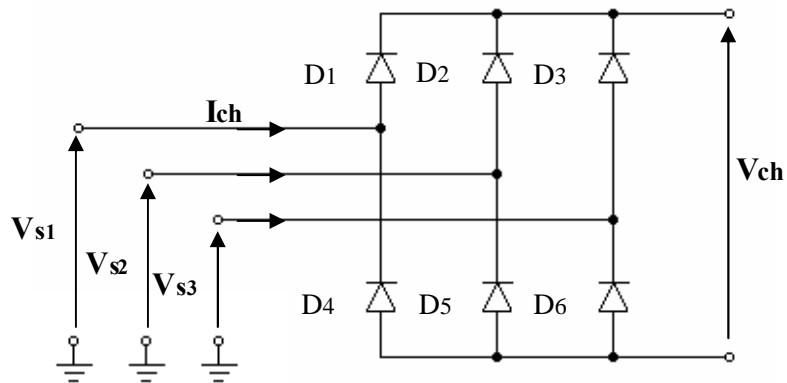


Figure 4.6: Schéma synoptique d'un pont redresseur.

**c) Modélisation du filtre actif parallèle.**

Dans notre étude on a choisi un onduleur de tension commandé en courant, ce dernier est constitué de trois bras dont chacun est constitué de deux cellules, chaque cellule contient un interrupteur bicommandable (IGBT), aux bornes duquel est monté une diode en antiparallèle, la cellule ainsi définie forme un interrupteur bidirectionnel.

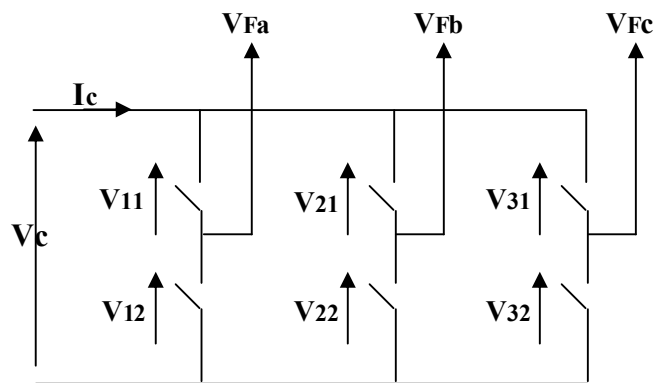


Figure 4.7: Présentation schématique d'un onduleur triphasé.

• **Fonction de connections :**

Soit  $i = 1, 2, 3$

$j = 1, 2$

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

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

d'où

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

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

- **Fonctions de conversions composées :**

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

$$\begin{cases} V_{Fab} = V_{21} - V_{11} \\ V_{Fbc} = V_{31} - V_{21} \\ V_{Fca} = V_{11} - V_{31} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} V_{Fab} = (F_{11} - F_{21}) \cdot V_c \\ V_{Fbc} = (F_{21} - F_{31}) \cdot V_c \\ V_{Fca} = (F_{31} - F_{11}) \cdot V_c \end{cases} \quad (4.19)$$

d'où

$$\begin{bmatrix} V_{Fab} \\ V_{Fbc} \\ V_{Fca} \end{bmatrix} = V_c \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_{11} \\ F_{21} \\ F_{31} \end{bmatrix} = V_c \cdot \begin{bmatrix} F_{ab} \\ F_{bc} \\ F_{ca} \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

Les fonctions de conversions composées sont :

$$\begin{cases} F_{ab} = F_{11} - F_{21} \\ F_{bc} = F_{21} - F_{31} \\ F_{ca} = F_{31} - F_{11} \end{cases} \quad (4.21)$$

- **Fonctions de conversions simples :**

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

$$\begin{bmatrix} V_{Fa} \\ V_{Fb} \\ V_{Fc} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{Fab} \\ V_{Fbc} \\ V_{Fca} \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

d'où

$$\begin{bmatrix} V_{Fa} \\ V_{Fb} \\ V_{Fc} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot V_c \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_{11} \\ F_{21} \\ F_{31} \end{bmatrix} = V_c \cdot \begin{bmatrix} F_a \\ F_b \\ F_c \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

Les fonctions de conversion simples s'écrivent alors :

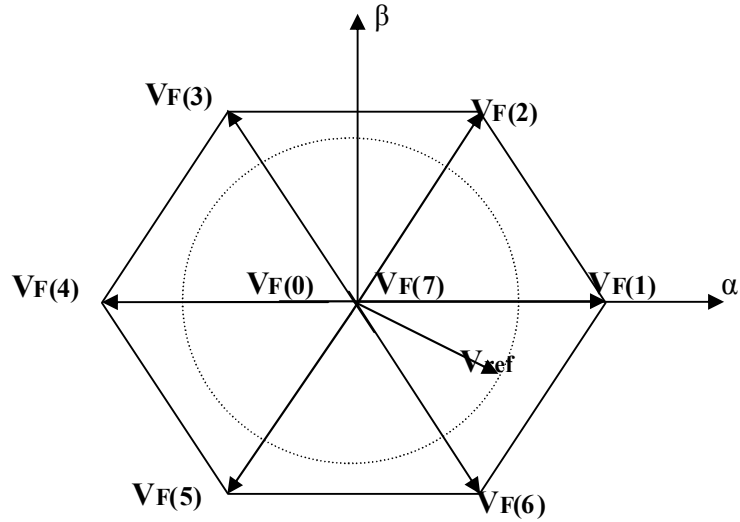
$$\begin{cases} F_a = \frac{1}{3} \cdot (2F_{11} - F_{21} - F_{31}) \\ F_b = \frac{1}{3} \cdot (-F_{11} + 2F_{21} - F_{31}) \\ F_c = \frac{1}{3} \cdot (-F_{11} - F_{21} + 2F_{31}) \end{cases} \quad (4.24)$$

- **Représentation vectorielle des tensions fournies par l'onduleur :**

Dans le plan biphasé  $(\alpha, \beta)$  en considérant  $V_F(k)$  le vecteur correspondant aux tensions de l'onduleur, les huit cas possibles du vecteur  $V_F(k)$  sont donnés par le tableau 4.1 et la figure 4.8 [25, 30, 31, 32].

**Tableau 4.1 :** Tensions générées par l'onduleur.

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



**Figure 4.8:** Représentation vectorielle des tensions générées par l'onduleur

Où  $V_{ref}$  représente la tension de référence que doit produire l'onduleur pour pouvoir créer les courants perturbateurs identifiés. Ceci signifie que l'onduleur n'est capable de fournir des tensions égales aux tensions de référence que si le vecteur formé par ces derniers reste à l'intérieur de l'hexagone de la figure 4.8.

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

$$\begin{bmatrix} V_{Fa} \\ V_{Fb} \\ V_{Fc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{S1} \\ V_{S2} \\ V_{S3} \end{bmatrix} + R_f \cdot \begin{bmatrix} I_{Fa} \\ I_{Fb} \\ I_{Fc} \end{bmatrix} + L_f \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{Fa} \\ I_{Fb} \\ I_{Fc} \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

$$\begin{bmatrix} V_{S1} \\ V_{S2} \\ V_{S3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} - R_{cc} \cdot \begin{bmatrix} I_{S1} \\ I_{S2} \\ I_{S3} \end{bmatrix} - L_{cc} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{S1} \\ I_{S2} \\ I_{S3} \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

avec :

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

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

$$\begin{bmatrix} I_{s1} \\ I_{s2} \\ I_{s3} \end{bmatrix} \text{ Courants fournis par le réseau.}$$

Le modèle de l'ensemble réseau, filtre actif parallèle et charge polluante s'obtient par la combinaison des différents modèles [20].

#### 4.6.3 Simulation de l'ensemble réseau, filtre actif parallèle et charge polluante

Les programmes de simulation développés ont été effectués en utilisant le logiciel Matlab-Simulink qui permettent de visualiser sur un intervalle de temps donné l'évolution des courants et de la tension dans les différentes branches du circuit de la figure 4.4. La modélisation globale de l'ensemble réseau, filtre actif parallèle et charge polluante a permis d'étudier la validité fonctionnelle du filtre actif parallèle à travers plusieurs simulations. Les valeurs des éléments caractérisant cette structure ont été regroupées dans le tableau 4.2.

**Tableau 4.2** : Valeurs des éléments caractérisant la structure étudiée

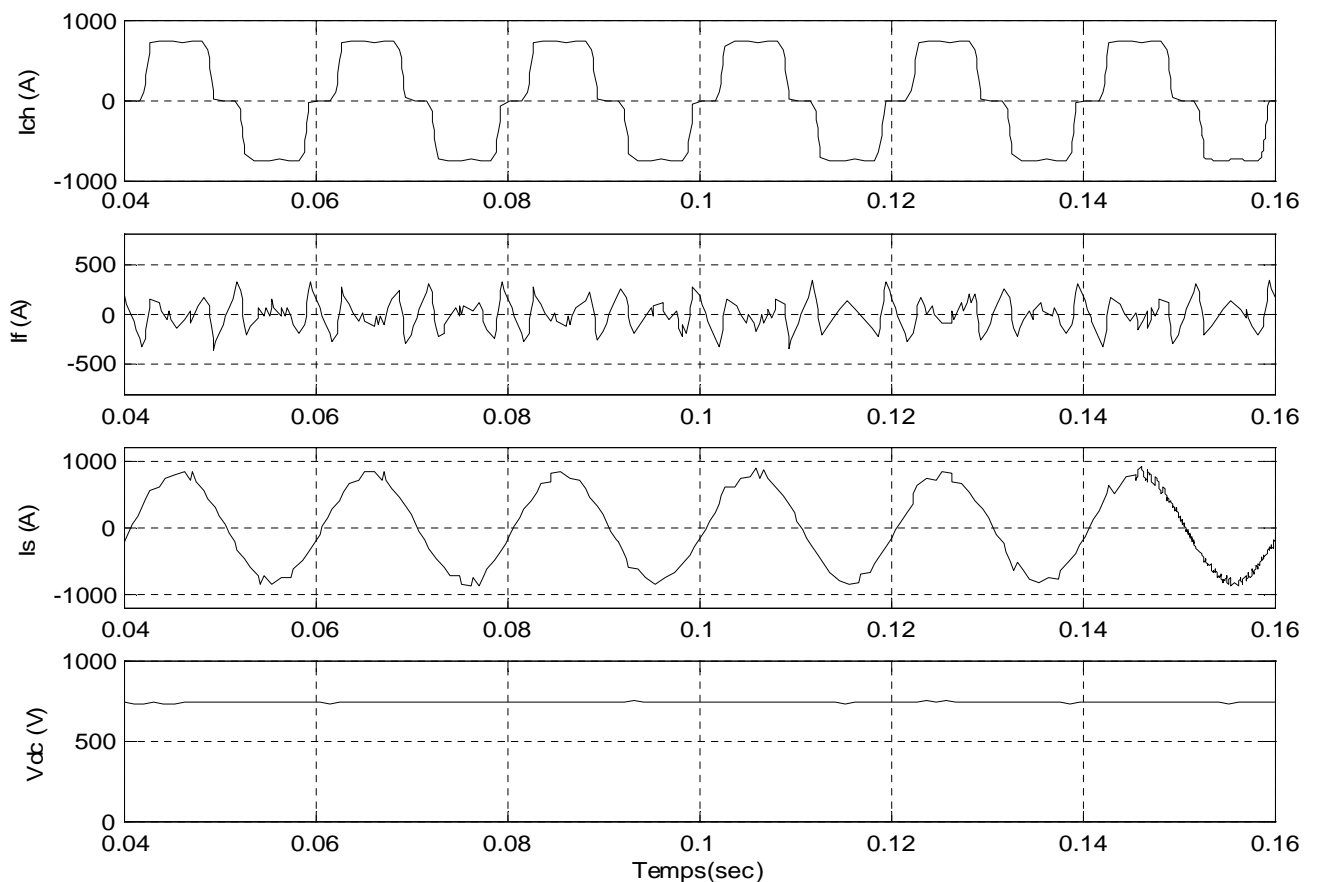
<b>Réseau électrique</b>	
Puissance apparente, tension	12 MVA, 230 V, 50 Hz
Résistance et inductance $R_s, L_s$	1.2 m $\Omega$ , 38.2 $\mu$ H
<b>Charge non linéaire</b>	
Puissance apparente	400 KVA
Résistance et inductance $R_c, L_c$	19.6 m $\Omega$ , 2.4 $\mu$ H
Pont de Graets alimentant une charge RL serie, $R_{ch}, L_{ch}$	0.66 $\Omega$ , 2 mH
Pont de Graets alimentant une charge RC parallèle, $R_{ch}, C_{ch}$	2 m $\Omega$ , 40 $\mu$ F
<b>Filtre actif parallèle</b>	
Tension continue $V_{dc}$	800 V
Capacité du condensateur $C_{dc}$	4000 $\mu$ F
Résistance et inductance $L_f, R_f$	5 m $\Omega$ , 150 $\mu$ H
Fréquence de commutation $f_p$	10 kHz

Finalement, ces simulations nous permettront d'évaluer la performance et la rapidité de la méthode des puissances réelles et imaginaires instantanées avec la commande à modulation de largeur d'impulsion pour deux types de charges non linéaires.

- **Première charge non linéaire** : Pont de Graets triphasé à diodes alimentant une charge RL série

Les figures 4.9, 4.10 et 4.11 présentent l'analyse temporelle des courants dans les différents éléments de la phase A et l'analyse spectrale des courants de la charge non linéaire et de la source.

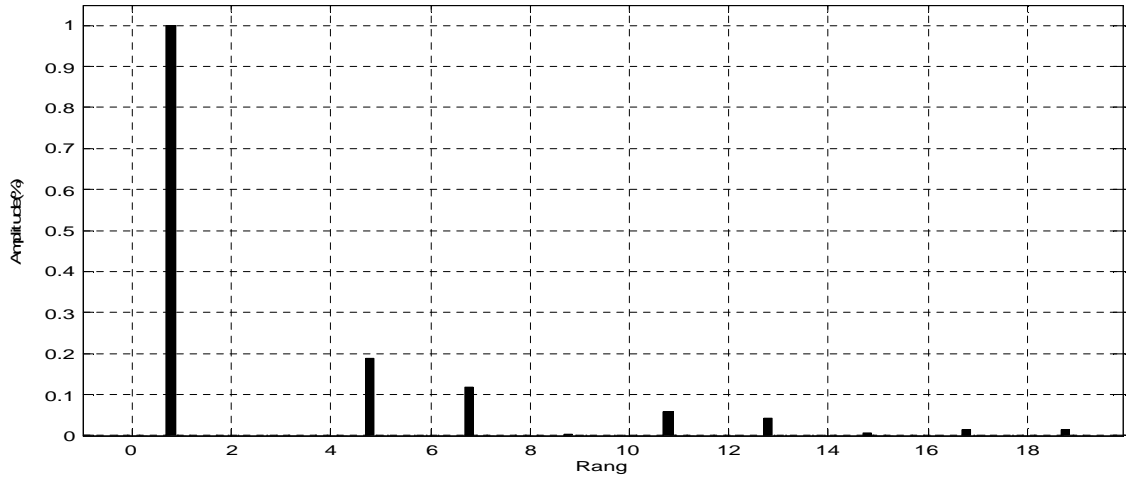
Les Figures 4.9, 4.10 représentent les formes d'ondes des courants et de la tension dans les différentes branches du circuit de la figure 4.4,  $i_{ch}$  courant consommé par le redresseur,  $i_f$  courant injecté par le filtre actif,  $i_s$  courant fournit par la source (réseau) et  $V_{dc}$  tension aux bornes du condensateur, obtenues par simulation numérique



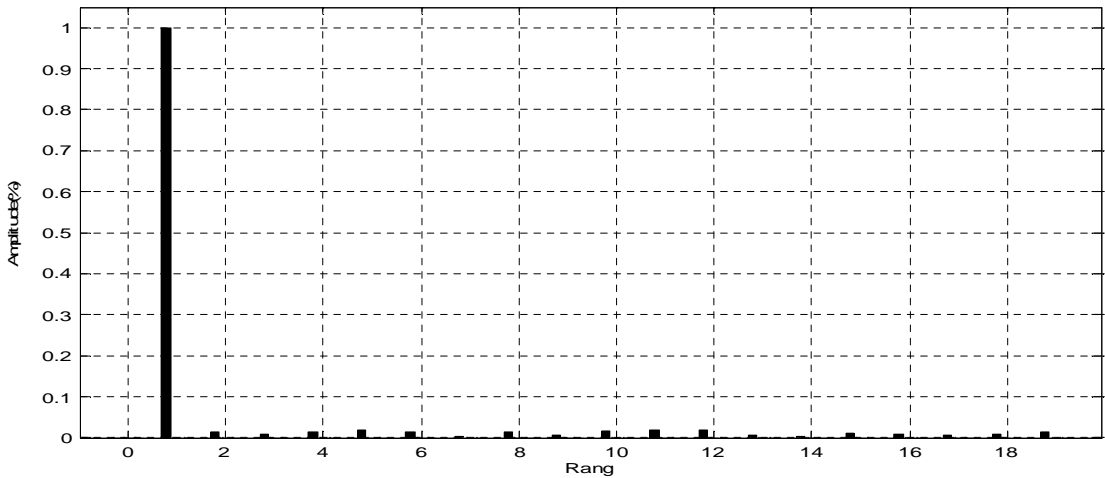
**Figure 4.9:** Formes d'ondes des courants et de la tension continue :  $i_{ch}$  courant de charge,  $i_f$  courant du filtre actif,  $i_s$  courant de source et  $v_{dc}$  tension aux bornes du condensateur



On voit d'après la figure 4.9 que l'allure du courant de source après filtrage est presque sinusoïdale et en phase avec la tension de source, ce qui prouve la bonne qualité de filtrage du filtre actif parallèle.



**Figure 4.10:** Spectre du courant de la charge non linéaire

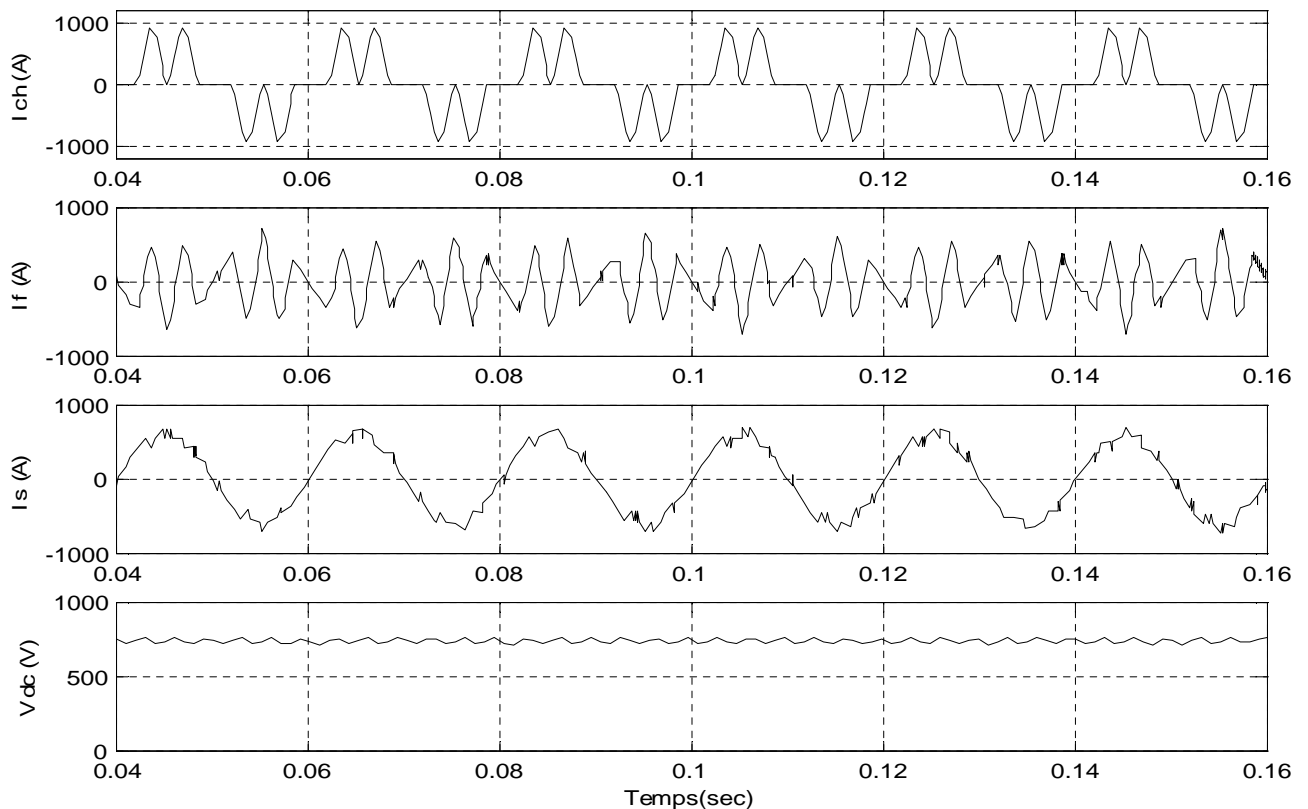


**Figure 4.11:** Spectre du courant de source après filtrage.

Les figures 4.10 et 4.11 présentent l'analyse spectrale des courants de la charge non linéaire et de source de la phase A. Le THD du courant de la charge non linéaire est de 23.50% et de 3.80% pour le courant de source, ce qui donne une bonne qualité de filtrage.

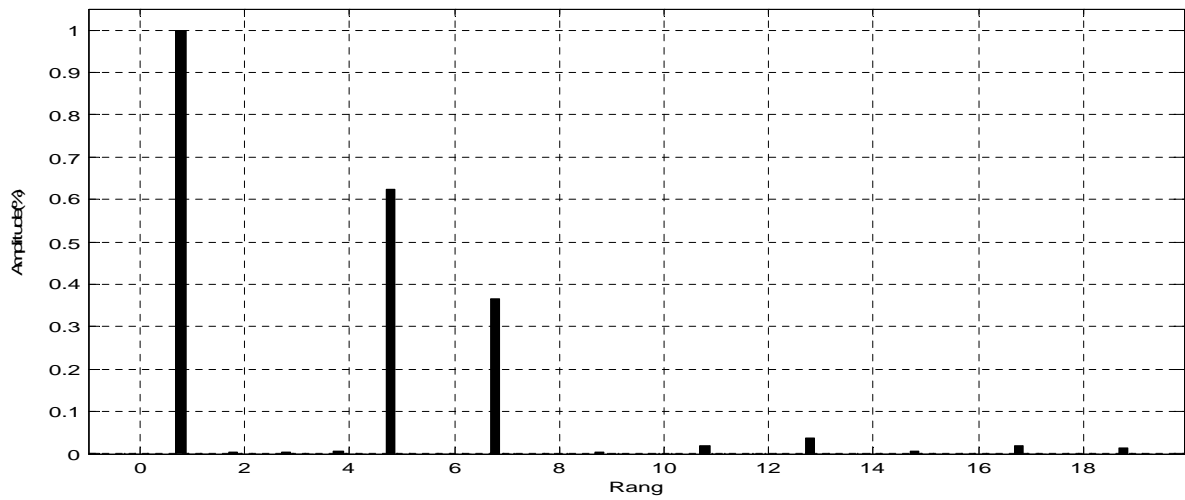
- **Deuxième charge non linéaire:** Pont de Graets triphasé à diodes alimentant une charge RC parallèle.

Les figures 4.12, 4.13 et 4.14 montrent l'analyse temporelle des courants dans les différents éléments de la phase A et l'analyse spectrale des courants de la charge non linéaire et de la source.

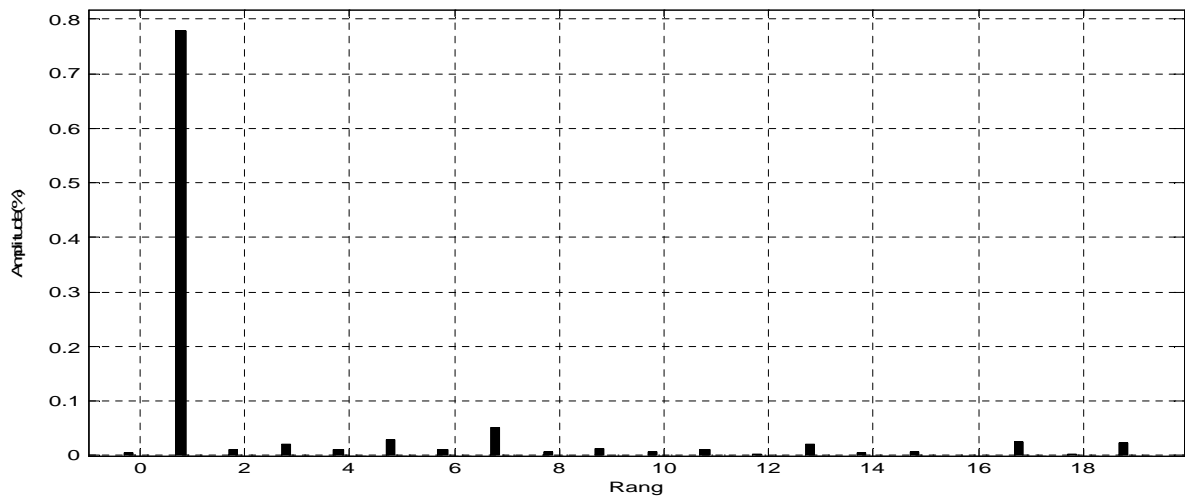


**Figure 4.12:** Formes d'ondes des courants et de la tension continue :  $i_{ch}$  courant de charge,  $i_f$  courant du filtre actif,  $i_s$  courant de source et  $v_{dc}$  tension aux bornes du condensateur

La figure 4.12 montre que l'allure du courant de la charge non linéaire présente des ondulations qui sont dues à la charge et décharge du condensateur, mais le courant de source après filtrage est presque sinusoïdale et en phase avec la tension de source, ce qui prouve que le filtre actif parallèle s'adapte aux variations de la charge non linéaire.



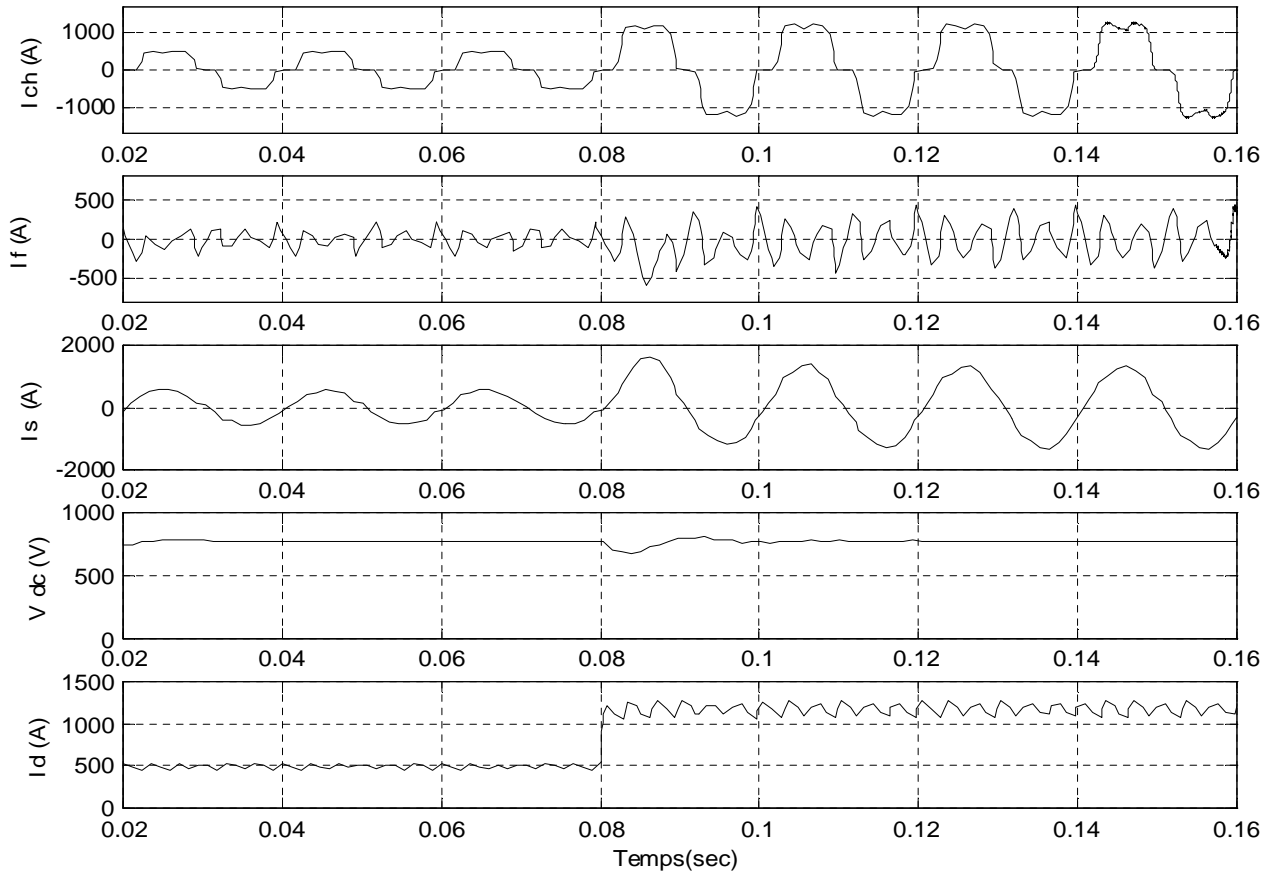
**Figure 4.13 :** Spectre du courant de la charge non linéaire



**Figure 4.14 :** Spectre du courant de source après filtrage

Les figures 4.13 et 4.14 présentent l'analyse spectrale des courants de la charge non linéaire et de source de la phase A. Le THD du courant de la charge non linéaire est de 72.40%, l'augmentation du THD par rapport au cas précédent est due à la forte ondulation du courant de la charge non linéaire. Le THD du courant de source est égale à 4.40%, ce qui prouve la bonne qualité de filtrage.

Afin de déterminer avec précision la performance du filtre actif parallèle, nous avons simulé un troisième cas, une augmentation soudaine de charge non linéaire.



**Figure 4.15:** Formes d'ondes des courants et de la tension continue :  $i_{ch}$  courant de charge,  $i_f$  courant du filtre actif,  $i_s$  courant de source et  $v_{dc}$  tension aux bornes du condensateur,  $i_d$  courant de charge (coté continu)

La figure 4.15 présente l'analyse temporelle des courants : de la charge non linéaire, du filtre actif et de source de la phase A. Cette figure montre la rapidité du filtre actif parallèle, en effet lors du changement brutale de la charge, le courant de source reste toujours sinusoïdal et en phase avec la tension de la source. La tension aux bornes du condensateur de stockage d'énergie a chuté légèrement lors de l'augmentation brutale de la charge, mais grâce à la rapidité de la boucle de régulation de la tension continue, cette tension a été rétablie à sa valeur initiale.

#### **4.7 Conclusion.**

Dans ce chapitre nous avons présenté la modélisation et simulation de l'ensemble réseau, filtre actif parallèle et charge polluante. La méthode des puissances réelles et imaginaires instantanées a été utilisée pour générer les courants de références. La méthode d'identification utilisée s'adapte bien aux variations de la charge non linéaire.

Plusieurs cas de simulation accompagnés d'une analyse temporelle et d'une analyse spectrale ont été effectués à partir du modèle de l'ensemble réseau, filtre actif parallèle et charge polluante. Les résultats de simulation montrent que le filtre actif parallèle dépollue efficacement le réseau électrique des harmoniques générées par la charge non linéaire.

Au chapitre suivant nous présenterons une nouvelle méthode d'extraction du courant de référence qui est basée sur la détection du courant de source

## CHAPITRE 5 : IDENTIFICATION A PARTIR DE LA DETECTION DU COURANT DE LA SOURCE.

### 5.1 Introduction

Dans ce chapitre une nouvelle méthode d'extraction du courant de référence est développée. Cette méthode d'identification est basée sur la détection du courant de source [33].

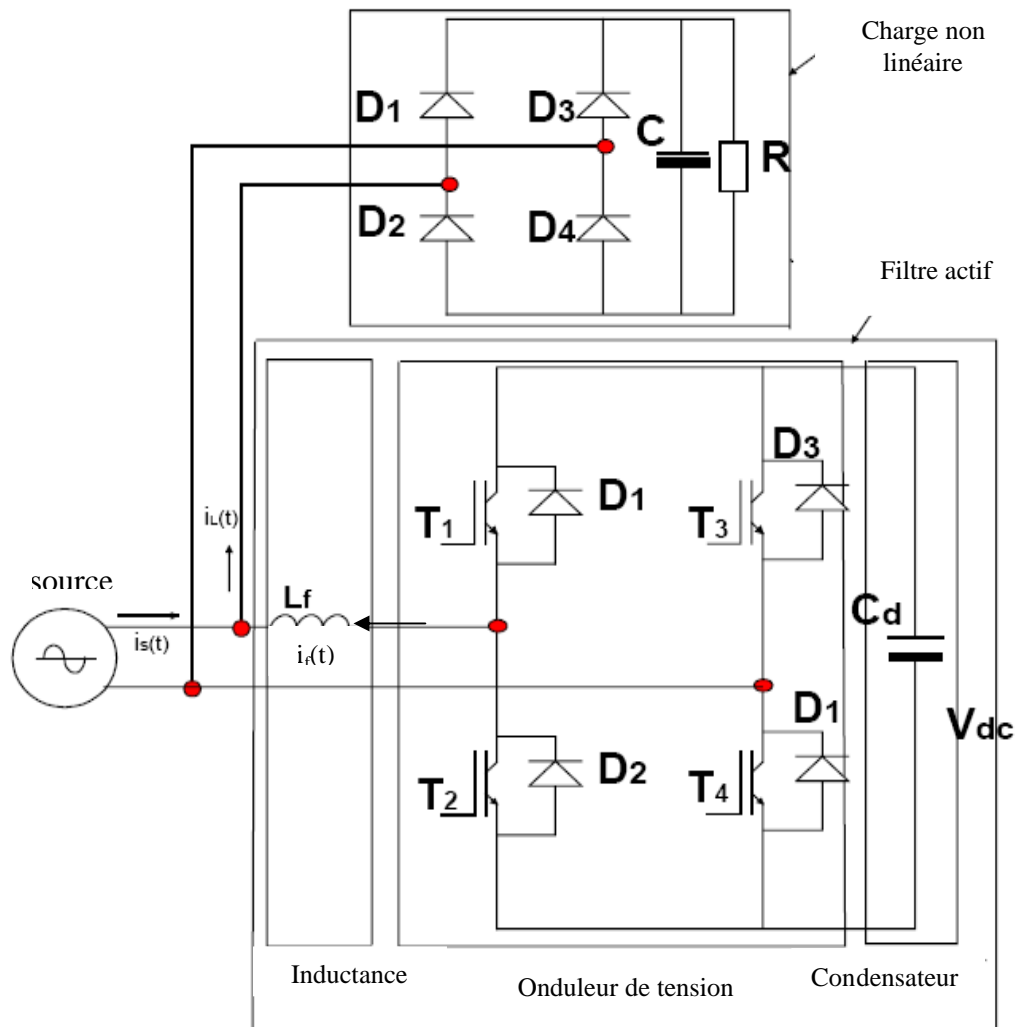
Tout d'abord, nous étudions le filtre actif parallèle monophasé. Celui-ci est constitué d'un onduleur de tension à modulation de largeur d'impulsion. La charge polluante est constituée d'un redresseur monophasé double alternance qui alimente une charge RL série ou une charge RC parallèle. Le filtre actif proposé possède un circuit de commande très simple qui consiste à utiliser deux capteurs de tension et un seul capteur de courant [34]. L'avantage de ce type de filtre actif est la simplicité de commande et le coût d'implémentation faible. Pour valider la méthode proposée, nous procédons à la simulation numérique du filtre actif monophasé parallèle en utilisant le logiciel PSPICE.

Ensuite, nous présentons le filtre actif parallèle triphasé [35]. Ce filtre possède le même circuit de commande par phase que le filtre monophasé. La validation de cette méthode sera effectuée par simulation numérique à l'aide deux logiciels : Matlab-Simulink et PSpice.

### 5.2 Etude du filtre actif parallèle monophasé

Le filtre actif est connecté en parallèle sur le réseau, il est le plus souvent commandé comme source de courant [36]. Il injecte dans le réseau des courants perturbateurs égaux à ceux absorbés par la charge polluante, mais en opposition de phase avec ceux-ci. Le courant côté réseau est alors sinusoïdal. Ainsi l'objectif du filtre actif parallèle consiste à empêcher les courants harmoniques produits par des charges polluantes, de circuler à travers l'impédance du réseau, située en amont du point de connexion du filtre actif.

La figure 5.1 montre l'ensemble réseau, filtre actif parallèle monophasé et charge polluante. Le filtre actif parallèle est principalement composé de trois parties : un onduleur monophasé, un condensateur et une inductance. L'onduleur est utilisé pour charger et décharger le condensateur  $C_{dc}$  afin d'assurer le filtrage du courant de la charge non linéaire. Le condensateur  $C_{dc}$  est utilisé comme un élément de stockage d'énergie et l'inductance  $L_f$  est utilisée pour lisser et contrôler le courant à injecter par le filtre actif. Le filtre actif parallèle doit fournir la puissance déformante et/ou la puissance réactive. Ainsi, le réseau fournit uniquement la puissance active.



**Figure 5.1:** Schéma de l'ensemble réseau, filtre actif parallèle monophasé et charge polluante

Afin de comprendre le fonctionnement du filtre actif parallèle, il est nécessaire d'étudier les étapes suivantes :

- Principe d'équilibre énergétique du condensateur  $C_{dc}$ .
- Détermination de la capacité du condensateur de stockage d'énergie.
- Contrôle de la tension du condensateur  $C_{dc}$ .
- Inductance du filtre.
- Phase de conduction du filtre actif parallèle monophasé.

### 5.2.1 Principe d'équilibre énergétique du condensateur

Dans un convertisseur de puissance sans pertes, la source fournit la puissance active nécessaire pour la charge pour que le convertisseur fournisse la puissance réactive à la charge non linéaire. Ainsi, le condensateur est une source d'énergie réactive ne fournissant aucune puissance active. Dans le meilleur des cas pour une opération du FAP, la tension moyenne du condensateur devrait être maintenue à une valeur constante, mais la fluctuation de tension, due au flux de puissance réactif, ne peut pas être évitée. Par conséquent une méthode de contrôle est nécessaire pour le maintien de cette tension constante. Le principe d'équilibre énergétique est utilisé pour l'analyse de la fluctuation de la tension  $V_{dc}$ . Certaines conclusions sont données dans ce travail pour définir le concept d'écoulement d'énergie de la tension  $V_{dc}$ . Pour expliquer le principe d'équilibre énergétique du condensateur de  $C_{dc}$  est comme suit [37]. Posons :

- $V_{ref}$  tension de référence aux bornes du condensateur
- $E_{ref}$  énergie de référence du condensateur

Dans ce cas nous obtenons :

$$E_{cref} = \frac{1}{2} C V_{cref}^2 \quad (4.1)$$

Si :

- $e_c(t)$  énergie instantanée du condensateur
- $v_c(t)$  tension instantanée du condensateur

On obtient :

$$e_c(t) = \frac{1}{2} C v_c^2(t) \quad (4.2)$$

Pendant une période la perte d'énergie du condensateur est :

$$\Delta E_c(t) = E_{cref} - e_c(t)$$

$$\Delta E_c(t) = \frac{1}{2} C V_{cref}^2 - \frac{1}{2} C v_c^2(t)$$

$$\Delta E_c(t) = \frac{C}{2} [V_{cref}^2 - v_c^2(t)]$$

$$\Delta E_c(t) = \frac{C}{2} [V_{cref} + v_c(t)][V_{cref} - v_c(t)]$$



Si pendant une période il y a peu de changement de la tension du condensateur, on peut écrire :

$$\left[ V_{cref} + v_c(t) \right] \approx 2V_{cref}$$

où

$[V_{ref} + v_c(t)]$  est très petit mais non égal à zéro.

Dans ce cas :

$$\Delta E_c(t) = CV_{cref} [V_{cref} - v_c(t)] \quad (4.3)$$

Puisque la perte d'énergie doit être compensée par la source, la valeur maximale du courant de charge peut être calculée par :

$$\int_0^T V_{smax} \sin(\omega t) I_{sc} \sin(\omega t) dt = \Delta E_c(t) \quad (4.4)$$

D'où :

$$V_{smax} I_{sc} \int_0^T \sin^2(\omega t) dt = \Delta E_c(t)$$

$$\frac{V_{smax} I_{sc}}{2} \int_0^T [1 - \cos(2\omega t)] dt = \Delta E_c(t)$$

$$\frac{V_{smax} I_{sc} T}{2} = \Delta E_c(t)$$

$$V_{smax} I_{sc} T = 2\Delta E_c(t)$$

On obtient:

$$I_{sc} = \frac{2}{V_{smax} T} \Delta E_c(t) \quad (4.5)$$

Par conséquent, l'amplitude du courant de charge peut être déduit en substituant l'équation 4.3 dans 4.5 :

$$I_{sc} = \frac{2CV_{cref}}{TV_{smax}} [V_{cref} - v_c(t)] \quad (4.6)$$

L'amplitude du courant fournie par la source est:

$$I_{smax} = I_s + I_{sc} \quad (4.7)$$

Par conséquent en multipliant l'équation 4.7 par  $\sin(\omega t)$ , il est possible d'obtenir le courant de référence de source.

$$i_{sref} = (I_s + I_{sc})\sin(\omega t) \quad (4.8)$$

$$i_{sref} = I_{smax} \sin(\omega t) \quad (4.9)$$

Cette théorie est utilisée dans notre travail afin de contrôler l'amplitude du courant de référence sinusoïdal durant chaque cycle de tension et pour la tension  $V_{dc}$ . Ce concept est également employé pour déterminer la valeur du condensateur  $C_{dc}$ , élément de stockage d'énergie.

### 5.2.2 Détermination de la capacité du condensateur de stockage d'énergie

Indépendamment du filtrage des harmoniques de courant, le FAP est censée résister à des variations de la charge et chute de tension, et revenir rapidement aux conditions initiales. La valeur du condensateur de stockage d'énergie est l'un des paramètres essentiel qui détermine la réponse aux demandes énergétiques du FAP. Ainsi, la capacité du condensateur est choisie selon l'augmentation de la composante fondamentale du courant de charge. L'énergie stockée dans le condensateur doit être libérée immédiatement pour compenser l'augmentation de la puissance consommée par la charge.

En utilisant ce concept, le bilan énergétique décrit auparavant [37], on obtient:

$$\frac{C}{2} [V_{cref}^2 - V_{c,min}^2] = \frac{1}{2} V_{s,max} \Delta I_{ch} T \quad (4.10)$$

Où :

T : période de la tension source,

$V_{cmin}$  : tension minimale préréglée du condensateur de stockage d'énergie

$V_{smax}$  : tension maximale de la source.

La capacité du condensateur est :

$$C = \frac{V_{s,max} \Delta I_{ch} T}{V_{fref}^2 - V_{f,min}^2} \quad (4.11)$$

Posons les tensions maximale et minimale aux bornes condensateur à :

$$V_{cref} > V_{smax}$$

$$V_{c \min} \leq V_{c \text{ref}} \leq V_{c \max}$$

$$V_{c \max} = 400 \text{ V}$$

$$V_{c \min} = 360 \text{ V}$$

$$\text{Posons } V_{c \text{ref}} = 380 \text{ V}$$

Prenons une ondulation du courant de  $\Delta I_{ch} = 5 \text{ A}$

$$T = 20 \text{ ms, pour } f = 50 \text{ Hz}$$

$$V_{s \max} = 340 \text{ V}$$

D'où :

$$C = 2200 \mu\text{F}$$

### 5.2.3 Contrôle de la tension du condensateur $C_{dc}$

D'après l'équilibre énergétique, il est évident que la variation de la tension aux bornes du condensateur est due à la charge et à la décharge du condensateur. Toutefois la tension  $v_c(t)$  du convertisseur doit être maintenue constante. Pour obtenir un fonctionnement efficace, la tension  $V_{dc}$  du FAP doit être toujours plus grande que la tension maximale de la source. Les chutes de tension ne peuvent être évitées pendant le régime transitoire. Cependant, un rétablissement rapide est nécessaire. Pour résoudre ce problème, l'amplitude du courant de source est contrôlée en utilisant une boucle de tension continue.

Le courant de source après filtrage est égale à :

$$i_s(t) = I_{s \max} \sin(\omega t)$$

La puissance active fournie par la source :

$$p_s = v_s(t) i_s(t)$$

$$p_s(t) = V_{s \max} \sin(\omega t) I_{s \max} \sin(\omega t)$$

$$p_s(t) = \frac{V_{s \max} I_{s \max}}{2} - \frac{V_{s \max} I_{s \max}}{2} \cos(2\omega t)$$

$$P_s(t) = P_s + \tilde{P}_s(t)$$

Où

la composante continue :  $P_s = \frac{V_{s \max} I_{s \max}}{2}$

les composantes alternatives :  $\tilde{p}_s(t) = \frac{V_{s \max} I_{s \max}}{2} \cos(2\omega t)$  (4.17)

La puissance instantanée consommée par la charge :

$$p_{ch} = v_s(t) i_{ch}(t)$$

$$p_{ch}(t) = V_{s \max} \sin(\omega t) \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \theta_n)$$

$$p_{ch}(t) = V_{s \max} \sin(\omega t) \left[ I_1 \sin(\omega t + \theta_1) + \sum_{n=2}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \theta_n) \right]$$

$$p_{ch}(t) = V_{s \max} \sin(\omega t) I_1 \sin(\omega t + \theta_1) + V_{s \max} \sin(\omega t) \sum_{n=2}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \theta_n)$$

$$A = V_{s \max} \sin(\omega t) I_1 \sin(\omega t + \theta_1)$$

$$A = \frac{V_{s \max} I_1}{2} [\cos(\omega t - \omega t - \theta_1) - \cos(\omega t + \omega t + \theta_1)]$$

$$A = \frac{V_{s \max} I_1}{2} [\cos(-\theta_1) - \cos(2\omega t + \theta_1)]$$

$$A = \frac{V_{s \max} I_1}{2} \cos(\theta_1) - \frac{V_{s \max} I_1}{2} \cos(2\omega t + \theta_1)$$

$$B = V_{s \max} \sin(\omega t) \sum_{n=2}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \theta_n)$$

$$B = \sum_{n=2}^{\infty} \frac{V_{s \max} I_n}{2} [\cos(\omega t - n\omega t - \theta_n) - \cos(\omega t + n\omega t + \theta_n)]$$

$$B = \sum_{n=2}^{\infty} \frac{V_{s \max} I_n}{2} [\cos\{(1-n)\omega t - \theta_n\} - \cos\{(1+n)\omega t - \theta_n\}]$$

$$p_{ch} = A + B$$

$$p_{ch}(t) = \frac{V_{s\max} I_1}{2} \cos(\theta_1) - \frac{V_{s\max} I_1}{2} \cos(2\omega t + \theta_1) +$$

$$+ \sum_{n=2}^{\infty} \frac{V_{s\max} I_n}{2} [\cos\{(1-n)\omega t - \theta_n\} - \cos\{(1+n)\omega t - \theta_n\}]$$

$$p_{ch}(t) = P_{ch} + \tilde{P}_{ch} \quad (4.18)$$

Où

$$P_{ch} = \frac{V_{s\max} I_1}{2} \cos(\theta_1)$$

$$\tilde{p}(t)_{ch} = -\frac{V_{s\max} I_1}{2} \cos(2\omega t + \theta_1) + \sum_{n=2}^{\infty} \frac{V_{s\max} I_n}{2} [\cos\{(1-n)\omega t - \theta_n\} - \cos\{(1+n)\omega t - \theta_n\}]$$

La puissance active fournie par le filtre actif :

$$p_f(t) = p_s(t) - p_{ch}(t) \quad (4.19)$$

La substitution de l'équation 4.17 et 4.18 dans 4.19 donne,

$$\tilde{p}_f(t) = P_s + \tilde{p}_s(t) - P_{ch} - \tilde{p}_{ch}(t)$$

$$p_f(t) = P_f + \tilde{p}_f(t)$$

avec

$$P_f = P_s - P_{ch}$$

$$\tilde{p}_f(t) = \tilde{p}_s(t) - \tilde{p}_{ch}(t)$$

$P_f$  et  $\tilde{p}_f(t)$  sont la composante continue et les composantes alternatives respectivement du filtre. Si on suppose que les pertes dans le convertisseur sont constantes, l'amplitude de la puissance du filtre est égale :

$$P_f = P_s - P_{ch}$$

$$P_f = \frac{1}{2} (V_{s\max} I_{s\max} - V_{s\max} I_1 \cos \theta_1) \quad (4.21)$$

$$C \Delta V_c^2 = (P_f - P_{pertes}) \Delta t \quad (4.22)$$

La substitution de l'équation 4.21 dans 4.22 donne,

$$C \Delta V_c^2 = \frac{1}{2} (V_{s\max} I_{s\max} - V_{s\max} I_1 \cos \theta_1 - 2P_{pertes}) \Delta t$$

$$\Delta V_c = \sqrt{\frac{(V_{s \max} I_{s \max} - V_{s \max} I_1 \cos \theta_1 - 2P_{peres}) \Delta t}{C}} \quad (4.23)$$

Où

$\Delta V_c$  Tension moyenne aux bornes du condensateur

De l'équation 4.33, en ajustant l'amplitude du courant de source, on peut contrôler la tension moyenne aux bornes du condensateur. D'après la section 5.2.1, l'amplitude du courant de source peut être commandée en utilisant le courant de charge et de décharge du condensateur de stockage d'énergie.

Le condensateur de stockage d'énergie est un élément passif du filtre actif de puissance. Les valeurs moyennes de  $\tilde{p}_s(t)$  et  $\tilde{p}_{ch}(t)$  pendant une période sont égales à zéro et elles n'affectent pas la tension moyenne du condensateur. Cependant, les composantes alternatives de  $\tilde{p}_s(t)$  et  $\tilde{p}_{ch}(t)$  peuvent entraîner une fluctuation de tension du condensateur. Par conséquent, la tension aux bornes du condensateur peut être représentée comme :

$$V_c(t) = V_c + \tilde{v}_c(t) \quad (4.24)$$

Où :

$V_c$  est la tension moyenne du condensateur

$\tilde{v}_c(t)$  est la fluctuation de la tension du condensateur.

Le courant de l'élément de stockage peut être représenté comme :

$$i_{dc}(t) = I_{dc} + \tilde{i}_{dc}^+(t) + \tilde{i}_{dc}^-(t) \quad (4.25)$$

Où :

$\tilde{i}_{dc}^+(t)$  : Composantes harmoniques de rang inférieur dues au courant de charge.

$\tilde{i}_{dc}^-(t)$  : Composantes harmoniques de rang supérieur dues à la commutation.

$I_{dc}$  : Composante continue

Afin de simplifier l'analyse de la fluctuation de tension du condensateur, on suppose les hypothèses suivantes :

- 1) Pour une fréquence élevée de commutation, la fluctuation de tension du condensateur due au  $\tilde{i}_{dc}^-(t)$  est très petite donc négligeable.
- 2) Le convertisseur de puissance n'a aucune perte.
- 3) L'énergie stockée dans l'inductance du filtre est négligeable.

4) La fluctuation de tension du condensateur est très petite comparée à la tension moyenne du condensateur.

Par conséquent, en régime permanent on a :

$$P_s - P_{ch} = 0 \quad (4.26)$$

avec

$$P_c = 0 \text{ et } I_{dc} = 0.$$

Ceci signifie que la tension moyenne peut être maintenue constante.

De l'équation 4.20,

$$p_c(t) = P_c + \tilde{p}_c(t) = \tilde{p}_c(t) \quad (4.27)$$

La puissance instantanée à l'entrée doit être égale à celle à la sortie :

$$\tilde{p}_c(t) = v_c(t)i_{dc}(t) \quad (4.28)$$

$$\text{Mais } i_{dc}(t) = I_{dc} + \tilde{i}_{dc}(t) + \check{i}_{dc}(t)$$

Ainsi :

$$I_{dc} = 0, \check{i}_{dc}(t) = 0$$

Et on obtient

$$i_{dc}(t) = \tilde{i}_{dc}(t) \quad (4.29)$$

$$\tilde{p}_c(t) = v_c(t)i_{dc}(t) = v_c(t)\tilde{i}_{dc}(t)$$

$$\tilde{p}_c(t) = v_c(t)\tilde{i}_{dc}(t) = [\tilde{v}_c(t) + V_c]\tilde{i}_{dc}(t)$$

L'amplitude de  $\tilde{v}_c(t)$  est très petite ( $\tilde{v}_c(t) \approx 0$ ) devant la tension  $V_c$  en régime permanent. Les composantes harmoniques de rang inférieur dues au courant de charge fourni par le condensateur peut être représenté par :

$$\tilde{p}_c(t) = [\tilde{v}_c(t) + V_c]\tilde{i}_{dc}(t)$$

$$\tilde{p}_c(t) = V_c\tilde{i}_{dc}(t)$$

$$\tilde{i}_{dc}(t) = \frac{\tilde{p}_f(t)}{V_c} \quad (4.30)$$

Cependant, la fluctuation de tension du condensateur est :

$$\tilde{v}_c(t) = \frac{1}{C} \int_0^t \tilde{i}_{dc}(t) dt \quad (4.31)$$

$$\tilde{v}_c(t) = \frac{1}{C} \int_0^t \frac{\tilde{p}_f(t)}{V_c} dt$$

$$\tilde{p}_f(t) = \sum_{n=1}^{\infty} P_{fn} \cos(n\omega t + \theta_n) \quad (4.32)$$

$$\tilde{v}_c(t) = \frac{1}{C} \int_0^t \frac{\sum_{n=1}^{\infty} P_{fn} \cos(n\omega t + \theta_n)}{V_f} dt$$

$$\tilde{v}_c(t) = \frac{1}{CV_f} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{P_{fn}}{n\omega} \cos(n\omega t + \theta_n) \quad (4.33)$$

Généralement, la fluctuation de tension de l'élément de stockage d'énergie doit être réglée à un niveau acceptable pour obtenir un bon filtrage. De l'équation 4.33, la fluctuation de tension du condensateur dépend directement de la puissance  $\tilde{p}_f(t)$ . Cependant, plus la fréquence est faible plus l'amplitude des composantes alternatives est grande. La capacité du condensateur requise est calculée par :

$$C = \frac{1}{\tilde{v}_c(t)} \int_0^t \frac{\tilde{p}_f(t)}{V_c} dt \quad (4.34)$$

Pour un filtre actif de grande puissance, un condensateur de grande capacité est nécessaire pour supprimer la fluctuation de tension à un niveau limité. Ainsi, la capacité du condensateur dépend de l'estimation de la puissance du filtre actif et de la puissance et du type de charge.

#### 5.2.4 Inductance du filtre.

L'inductance du filtre est un autre paramètre important dans la configuration du FAP, parce qu'ensemble avec la fréquence de commutation du convertisseur ils règlent le niveau d'ondulation du courant de compensation injecté. Pour une haute performance du FAP, les interrupteurs de puissance (IGBT) du convertisseur doivent être commandé avec précision.

Pour une fréquence de commutation élevée, l'inductance du filtre doit être assez petite pour pouvoir suivre le changement du courant de compensation. D'une part, pour les faibles puissances, une faible fréquence de commutation avec une grande inductance est nécessaire pour ralentir le taux de changement du courant de compensation. D'autre part, pour une application de grande puissance, une haute fréquence de commutation avec une petite



inductance est nécessaire afin d'augmenter le taux  $\frac{di_{L_f}}{dt}$ . Le taux de changement du courant est lié au changement de la tension à travers l'inductance, comme le montre l'équation 4.35.

$$\Delta v_L(t) = L_{L_f} \frac{di_{L_f}}{dt} \quad (4.35)$$

Où :

$L_f$  Inductance du filtre,

$\Delta v_L(t)$  Variation de la tension à travers l'inductance,

$i_{L_f}(t)$  courant circulant dans l'inductance

Le dimensionnement de l'inductance du filtre dépend directement de la puissance du FAP.

D'après la figure 5.2 on a :

$$V_s = V_{dc} + V_{L_f}$$

$$V_{L_f} = V_s - V_{dc} \quad (4.36)$$

D'après les équations ci-dessus il est clair qu'avec une inductance constante, la variation de la tension du FAP doit être la différence de potentielle entre la tension continue  $V_{dc}$  du condensateur et la valeur instantanée de la tension de source.

On obtient :

$$L_{L_f} \frac{di_{L_f}}{dt} = V_s - V_{dc} \quad (4.37)$$

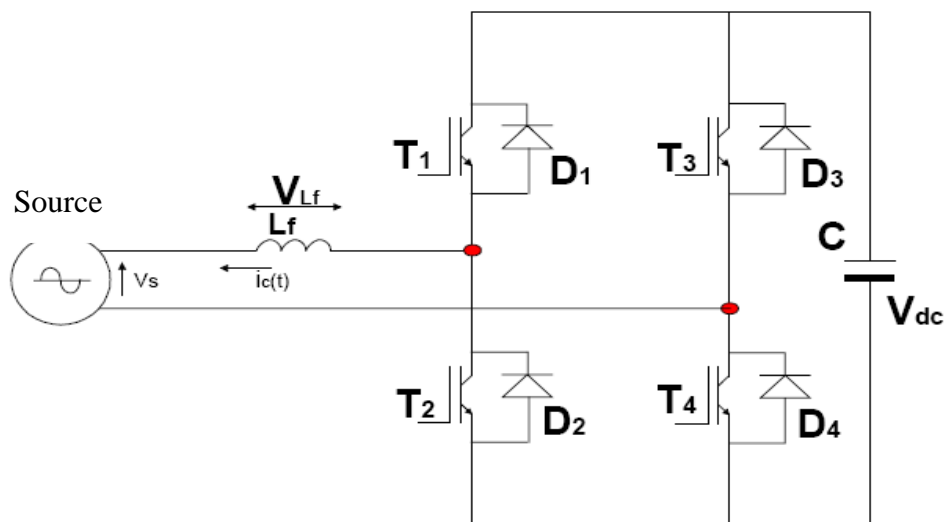


Figure 5.2 : Filtre actif monophasé de puissance

Si la tension continue  $V_{dc}$  est maintenue relativement constante et la tension de source est sinusoïdale, la variation de la tension par phase varie périodiquement de 0-360 degrés en fonction de la tension du système. Cependant pour compenser les harmoniques, la gamme opérationnelle du convertisseur est limitée à 180 degrés [37]. À cet effet, l'ondulation des courants du convertisseur du FAP pour une demi période de 180 degrés de fonctionnement est

a) minimale  $\left. \frac{di_L(t)}{dt} \right|_{\min}$  : ceci se produit à la crête de la tension d'alimentation,

$$\left. \frac{di_L(t)}{dt} \right|_{\min} = \frac{|V_s| - |V_{dc}|}{L_f} \quad (4.38)$$

L'équation ci-dessus donne le niveau d'ondulation du courant harmonique comme suit :

$$di_L(t) = \left[ \frac{|V_s| - |V_{dc}|}{L_f} \right] dt \quad (4.39)$$

b) maximale  $\left. \frac{di_L(t)}{dt} \right|_{\max}$  : ceci se produit pendant le passage à zéro de la tension d'alimentation, c.-à-d. pour  $V_s=0$

$$\left. \frac{di_L(t)}{dt} \right|_{\max} = \frac{|V_{dc}|}{L_f} \quad (4.40)$$

donne le niveau d'ondulation du courant :

$$di_L = \frac{|V_{dc}|}{L_f} dt \quad (4.41)$$

Il en ressort que l'ondulation du courant  $di_L$  dépend de  $dt$  et  $L_f$  pour des valeurs constantes de  $V_s$  et  $V_{dc}$ . Par conséquent pour n'importe quel dimensionnement d'un filtre actif de puissance et pour une fréquence de commutation donnée, l'inductance  $L_f$  est calculée et sachant que  $V_s$  varie de  $0 \leq V_s \leq 180^\circ$  :

$$L_f = \left[ \frac{|V_s| - |V_{dc}|}{di_L} \right] dt \quad (4.42)$$

### 5.2.5 Phase de conduction du filtre actif parallèle monophasé avec la commande MLI :

Les modes de fonctionnement du convertisseur (filtre actif parallèle, figure 5.2) à MLI avec une porteuse unipolaire peuvent être divisés en huit.

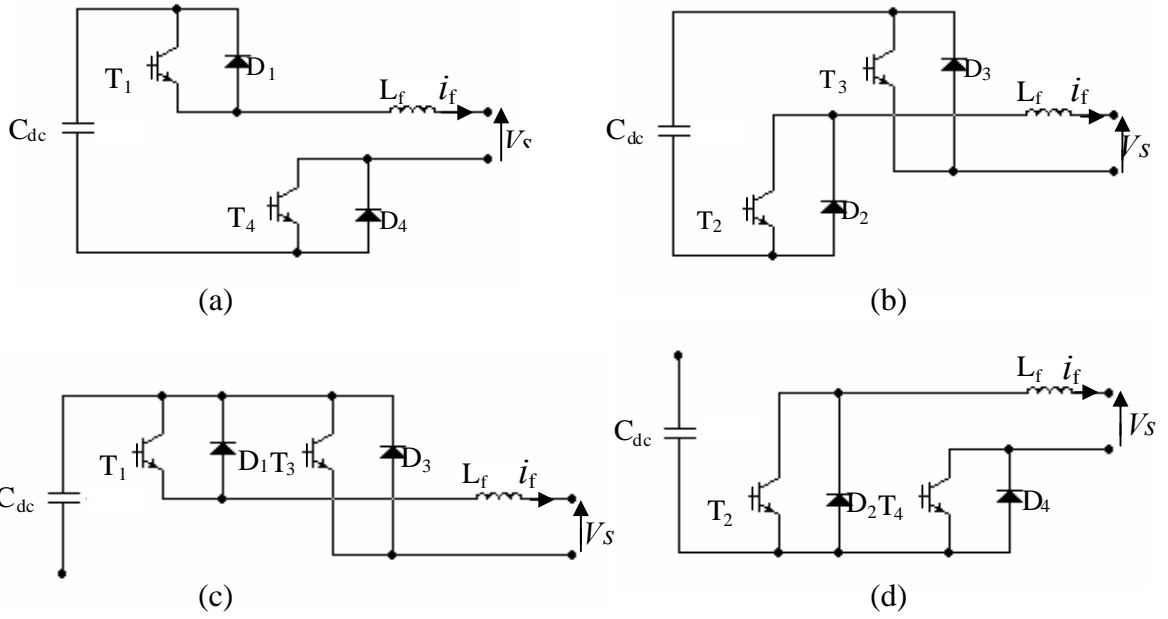
Le courant fourni par le convertisseur  $i_c(t)$  est positif dans les modes (a), (b), (c) et (d). La figure 5.3 (a) montre l'opération du mode (a) où  $(T_1, T_4)$  sont amorcés. Le courant passe par  $T_4, C_d, T_1$  et  $L_f$ . Dans ce cas, le condensateur  $C_d$  se décharge.

La figure 5.3 (b) montre le mode (b) où  $(T_2, T_3)$  sont amorcés. Les deux transistors  $T_2$  et  $T_3$  ne peuvent pas conduire pour la direction du courant de  $i_c(t)$ . Le courant traverse  $D_3, C_d, D_2$  et  $L_f$ . Dans ce cas, le condensateur  $C_d$  se charge.

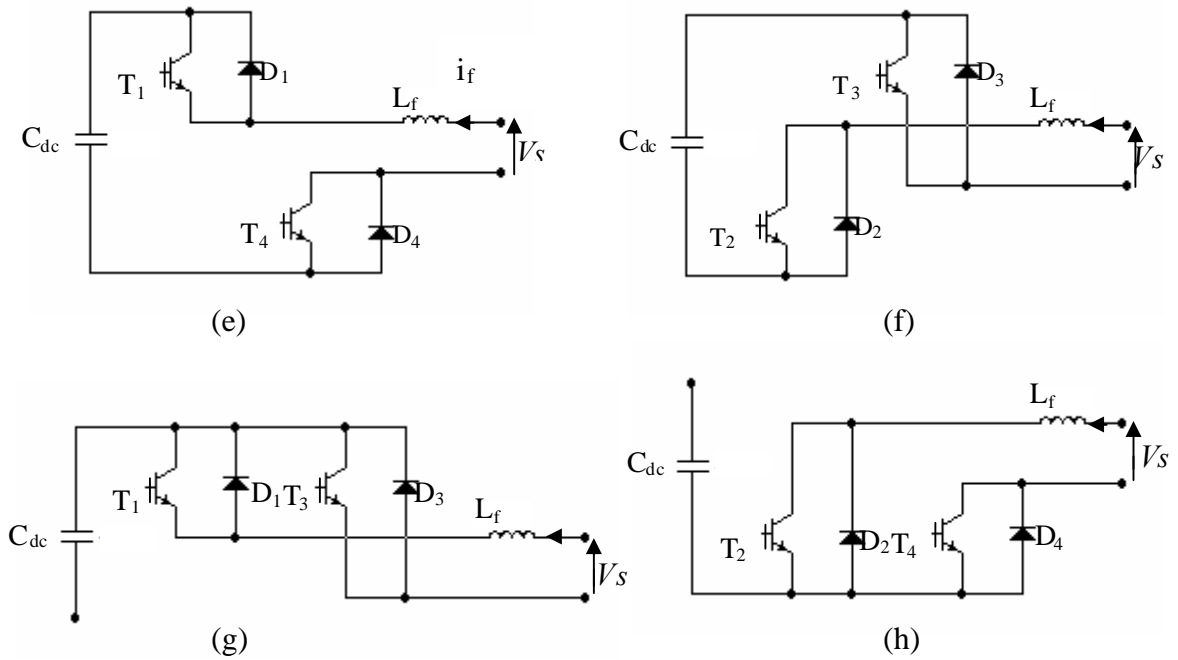
Les figures 5.3 (c) et 5.3 (d) sont les modes (c) et (d) respectivement. Les transistors  $(T_1, T_3)$  sont amorcés dans le mode (c) et  $(T_2, T_4)$  sont amorcés dans le mode (d). La trajectoire du courant traverse  $D_3, T_1$  et  $L_f$  dans le mode (c), et la trajectoire du courant traverse  $T_4, D_2$  et  $L_f$  dans mode (d), le courant ne passe pas par le condensateur dans ces cas. Par conséquent la tension continue du condensateur se maintient constante. Une opération similaire se produit quand le courant du convertisseur  $i_c(t)$  est négatif. Ils sont définis comme mode (e), (f), (g) et (h) (la figure 5.4).

En résumé le condensateur  $C_d$  se charge pendant les modes (b) et (e), et le convertisseur fonctionne en redresseur. Le condensateur  $C_d$  se décharge pendant les modes (a) et (f), et le convertisseur fonctionne en onduleur. Si la puissance totale chargée est plus grande que la puissance déchargée pendant un cycle le convertisseur fonctionne en même temps en chargeur et filtre.

Si la puissance chargée totale est égale à la puissance déchargée pendant un cycle, le convertisseur fonctionne comme un filtre actif seulement [38].



**Figure 5.3:** Phase de conduction pour  $i_f > 0$ .



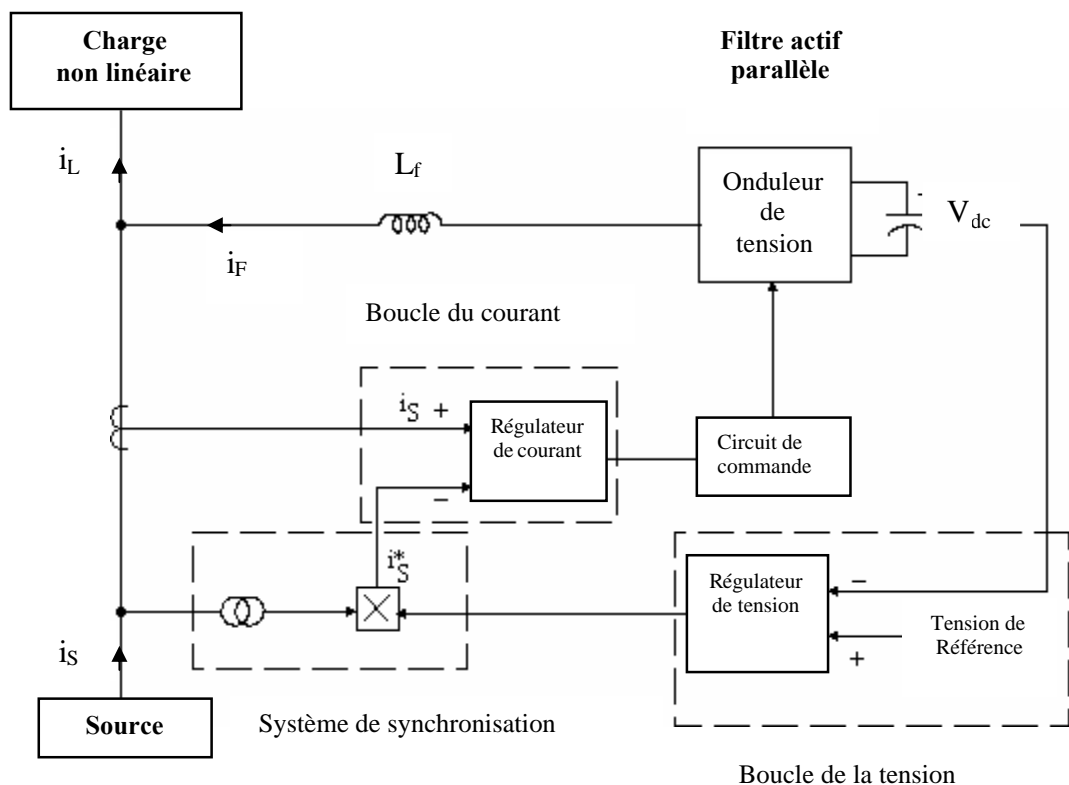
**Figure 5.4:** Phase de conduction pour  $i_f < 0$ .

### 5.3 Modélisation et simulation numérique du filtre actif parallèle monophasé

Pour étudier le comportement du filtre actif monophasé avec le réseau électrique, il faut tout d'abord établir un modèle mathématique de l'ensemble réseau, filtre actif parallèle monophasé et charge polluante. Ensuite une simulation globale est effectuée afin d'analyser le comportement du filtre actif et sa commande lors de la compensation des courants harmoniques générés par la charge non linéaire.

#### 5.3.1 Schéma synoptique de l'ensemble réseau, filtre actif parallèle monophasé et charge polluante.

La figure 5.5 donne le schéma synoptique de l'ensemble réseau, filtre actif parallèle monophasé et charge polluante. Le filtre actif parallèle monophasé est un onduleur de tension commandé en courant.



**Figure 5.5:** Schéma synoptique de l'ensemble réseau, filtre actif parallèle monophasé et charge polluante

La commande du filtre actif monophasé comporte deux boucles de régulation en cascade.

- La boucle interne permet le contrôle du courant alternatif, en valeur instantanée. Pour imposer un courant sinusoïdal, en phase avec la tension, le courant de référence de la source courant ( $i_{sref}$ ) est générée à partir de l'image de la tension alternative ( $V_{sm} \cdot \sin\omega t$ ), l'amplitude étant réglée par la sortie de la boucle externe.

- La boucle externe réalise la régulation de la tension du condensateur ( $V_{dc}$ ), élément de stockage d'énergie. Elle est nécessaire pour limiter  $V_{dc}$ , à cause du caractère élévateur du montage. En outre, réguler  $V_{dc}$  sert à régler la puissance fournie à la charge.

L'amplitude du courant de référence est réglée par la sortie du régulateur de tension pour adapter la puissance absorbée par l'onduleur à la puissance dissipée dans la charge. Le condensateur, connecté sur le côté continu de l'onduleur, constitue un élément de stockage d'énergie susceptible de fournir à la charge non linéaire la puissance déformante due aux courants harmoniques.

La boucle de régulation externe fixe la valeur de la tension  $V_{dc}$  du condensateur, choisie en fonction de la tension du réseau alternatif. La sortie du régulateur tension, multipliée par  $\sin\omega t$ , donne le courant de référence.

### 5.3.2 Simulation de l'ensemble réseau, filtre actif parallèle monophasé et charge polluante

Le programme de simulation développé à été effectué en utilisant le logiciel PSpice qui permet de visualiser sur un intervalle de temps donné l'évolution des courants et de la tension dans les différentes branches du circuit de la figure 5.5. La modélisation globale de l'ensemble réseau, filtre actif parallèle monophasé et charge polluante a permis d'étudier le comportement du filtre actif parallèle monophasé à travers plusieurs simulations.

Finalement, ces simulations nous permettent d'évaluer la performance et la rapidité de la méthode d'identification à partir de la détection du courant de la source en utilisant la commande à modulation de largeur d'impulsion pour deux types de charges.

- **Première charge non linéaire** : Pont de Graets monophasé à diodes alimentant une charge RL série

Les figures 5.6 et 5.7 montrent l'analyse temporelle des courants dans les différents éléments et l'analyse spectrale des courants de la charge non linéaire et de la source.

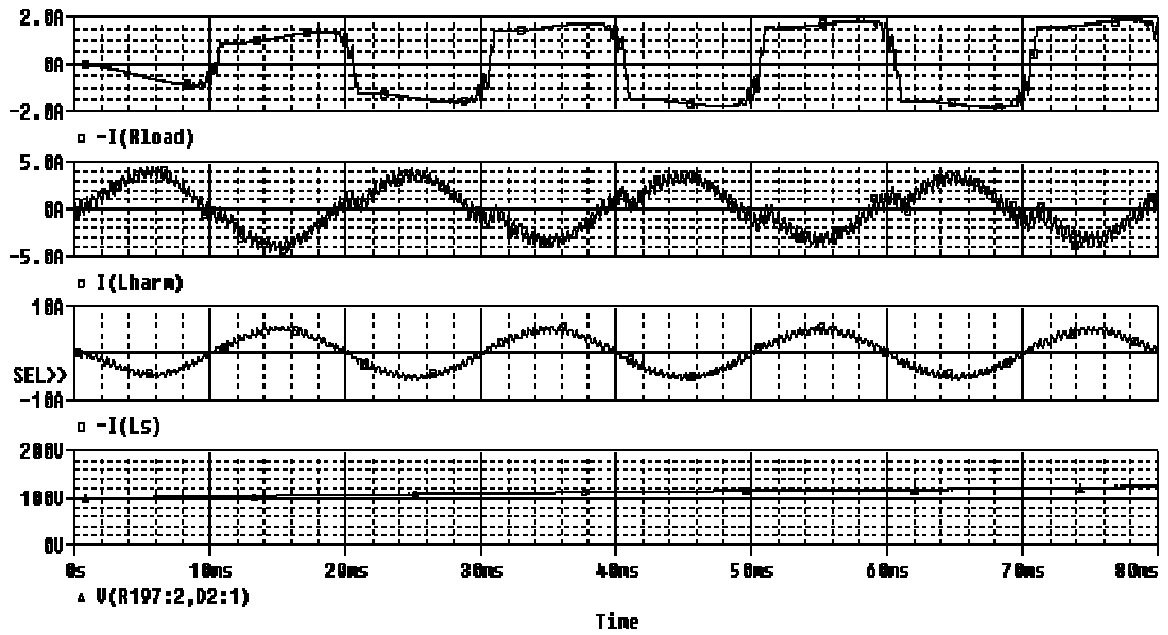


Figure 5.6: Formes d'ondes des courants et de la tension continue :  $i_{ch}$  courant de charge,  $i_f$  courant du filtre actif,  $i_s$  courant de source et  $v_{dc}$  tension aux bornes du condensateur

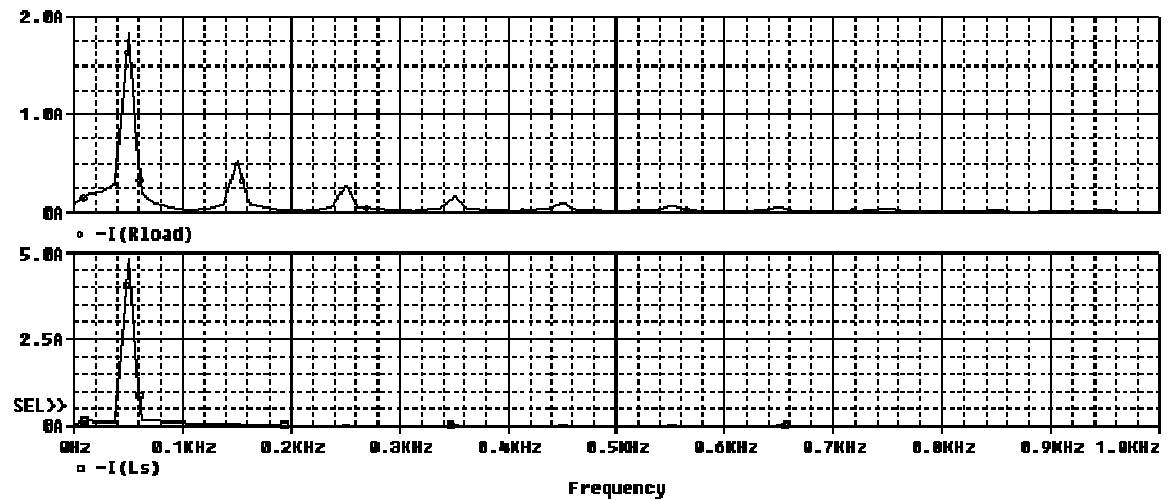


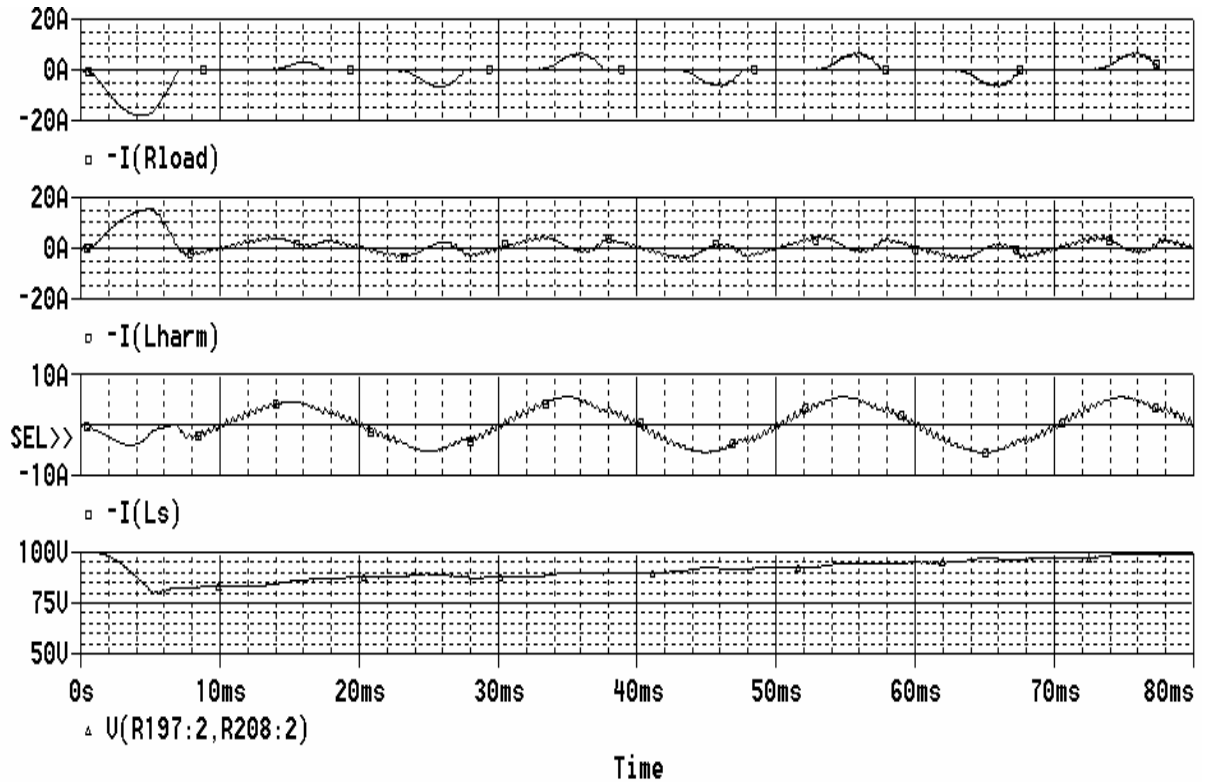
Figure 5.7: Spectre du courant de source avant et après filtrage.

D'après la figure 5.6 l'allure du courant de source après filtrage est presque sinusoïdale et en phase avec la tension de source, ce qui prouve la bonne qualité de filtrage du filtre actif parallèle.

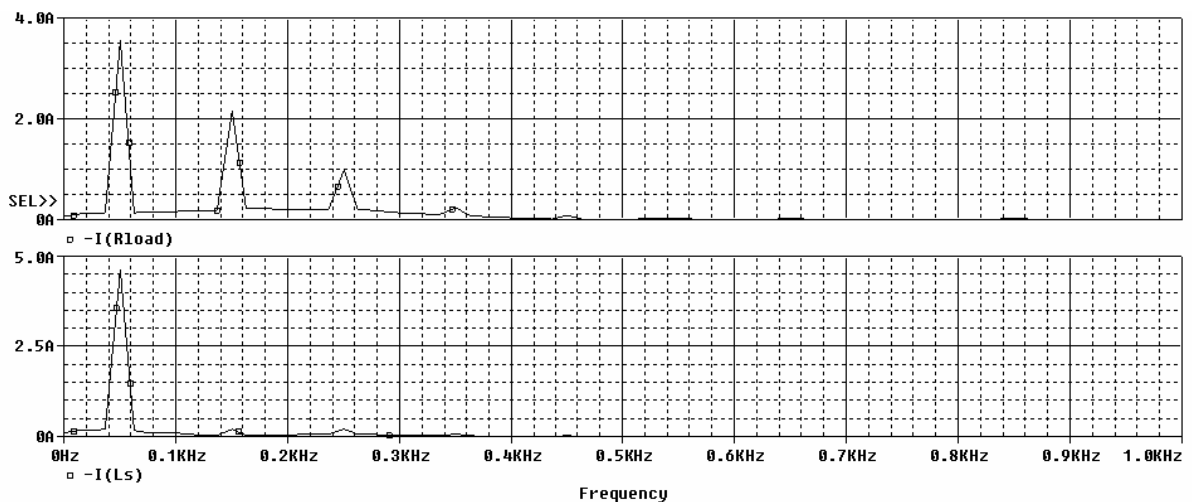
Sur la figure 5.7, l'analyse spectrale des courants de la charge non linéaire et de source est représentée. Le THD du courant de la charge non linéaire est de 47.50% et de 3.80% pour le courant de source, ce qui donne une bonne qualité de filtrage

- **Deuxième charge non linéaire** : Pont de Graets monophasé à diodes alimentant une charge RC parallèle.

Les figures 5.8 et 5.9 représentent l'analyse temporelle des courants dans les différents éléments et l'analyse spectrale des courants de la charge non linéaire et de la source.



**Figure 5.8:** Formes d'ondes des courants et de la tension continue :  $i_{ch}$  courant de charge,  $i_f$  courant du filtre actif,  $i_s$  courant de source et  $v_{dc}$  tension aux bornes du condensateur



**Figure 5.9:** Spectre du courant de source avant et après filtrage



La figure 5.8 montre que l'allure du courant de la charge non linéaire présente des ondulations qui sont dues à la charge et décharge du condensateur, mais le courant de source après filtrage est presque sinusoïdale et en phase avec la tension de source, ce qui prouve que le filtre actif parallèle s'adapte aux variations de la charge non linéaire.

L'analyse spectrale des courants de la charge non linéaire et de source de la phase A est représentée sur la figure 5.9. Le THD du courant de la charge non linéaire est de 65%, l'augmentation du THD par rapport au cas précédent est due à la forte ondulation du courant de la charge non linéaire. Le THD du courant de source est égale à 4.5 %, ce qui prouve la bonne qualité de filtrage.

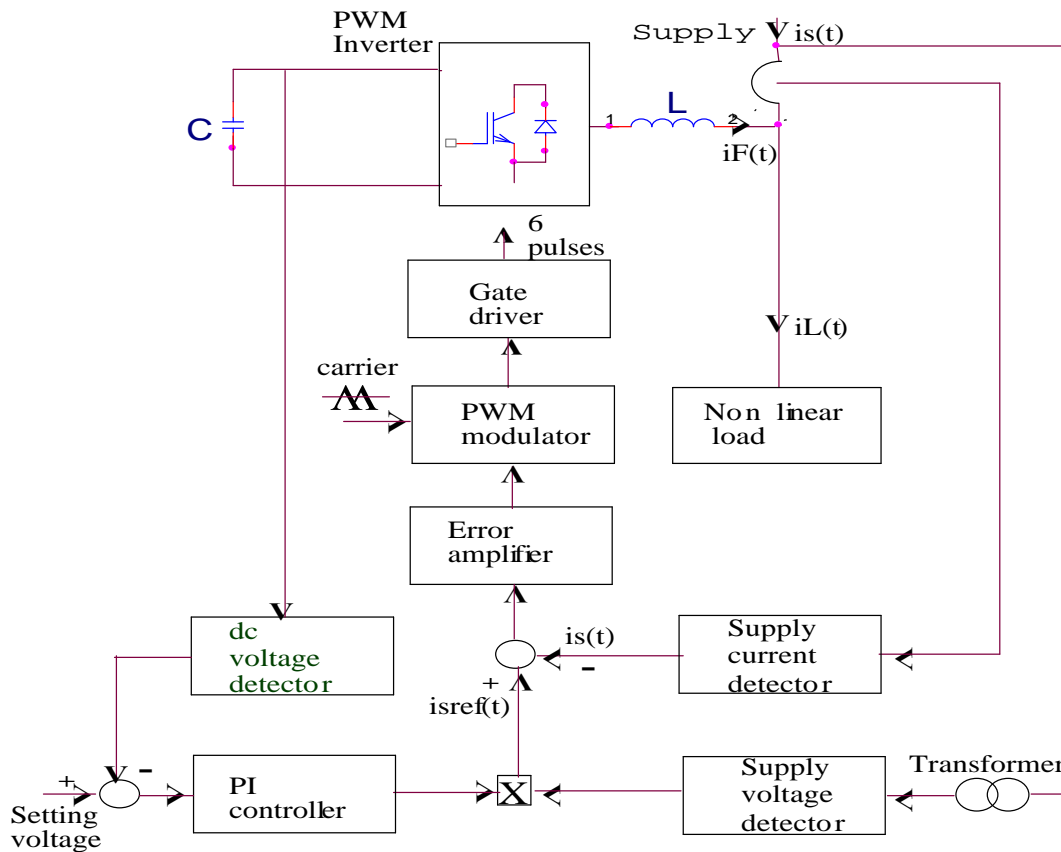
#### **5.4 Modélisation et simulation numérique du filtre actif parallèle triphasé**

Pour étudier le comportement du filtre actif triphasé avec le réseau électrique, on établit un modèle mathématique de l'ensemble réseau, filtre actif parallèle triphasé et charge polluante, et on procède de la même manière qu'avec le filtre actif monophasé.

##### **5.4.1 Schéma synoptique de l'ensemble réseau, filtre actif parallèle triphasé et charge polluante.**

Le Schéma synoptique de l'ensemble réseau, filtre actif parallèle triphasé et charge polluante est représenté dans la figure 5.10. Dans le FAP proposée, trois paramètres doivent être détectés, la tension aux bornes du condensateur à courant continu, la tension d'alimentation triphasé et le courant triphasé de la source. Les tensions d'alimentation triphasées sont utilisées pour créer un système triphasé sinusoïdal de références décalées de  $120^\circ$ , avec une amplitude égale l'unité. La tension aux bornes du condensateur fournit l'information de l'équilibre de puissance ; l'énergie fournie par la source doit être égale à la puissance active consommée par la charge.

La tension détectée aux bornes du condensateur à courant continu est comparée à la tension de consigne. La différence entre les deux signaux est appliquée à un régulateur PI pour créer l'amplitude désirée du courant de référence. Le signal à la sortie du régulateur PI et la référence sinusoïdale par phase alimentent un multiplicateur analogue pour créer le courant de référence  $i_{ref}$  désiré. La différence entre le courant de source de référence et le courant détecté de la source alimente le régulateur P. le signal à la sortie du régulateur est le signal de modulation. Une onde porteuse est comparée au signal de modulation correspondant à une phase pour produire les signaux de commande des interrupteurs.



**Figure 5.10:** Schéma synoptique l'ensemble réseau, filtre actif parallèle triphasé et charge polluante

#### 5.4.2 Simulation de l'ensemble réseau, filtre actif parallèle triphasé et charge polluante

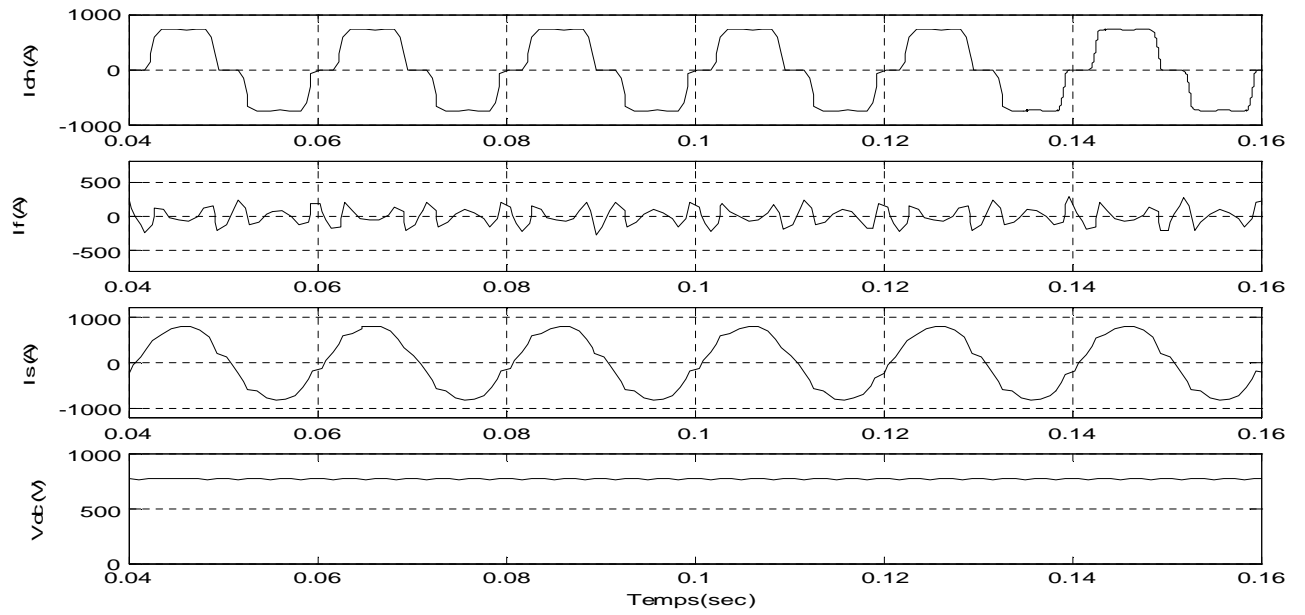
La simulation du FAP a été effectuée en utilisant deux logiciels : Matlab-Simulink et PSpice qui permettent de visualiser sur un intervalle de temps donné l'évolution des courants et de la tension dans les différentes branches du circuit de la figure 5.10.

Ces simulations nous permettent d'évaluer la performance et la rapidité de la méthode d'identification à partir de la détection du courant de la source en utilisant la commande à modulation de largeur d'impulsion pour deux types de charges.

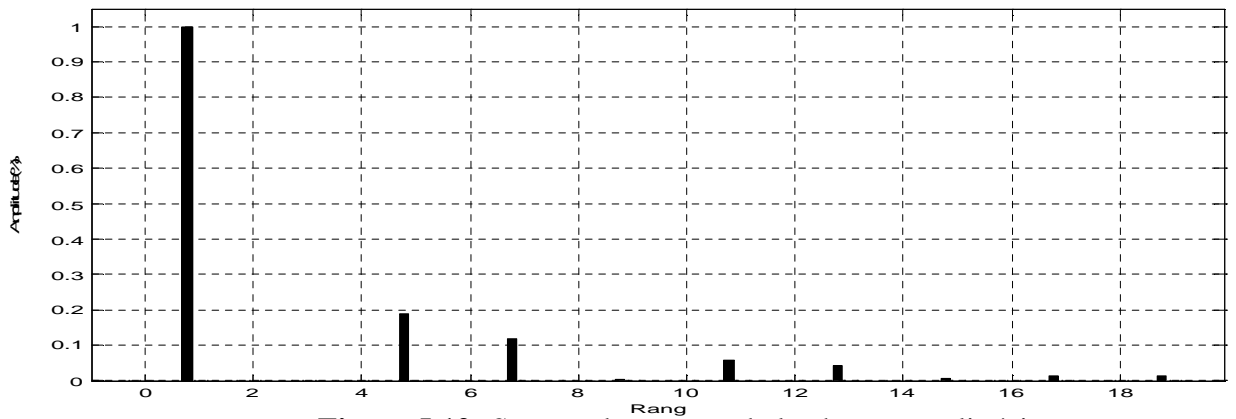
##### a) Simulation sous Matlab-Simulink.

- **Première charge non linéaire :** pont de Graets triphasé à diodes alimentant une charge RL série

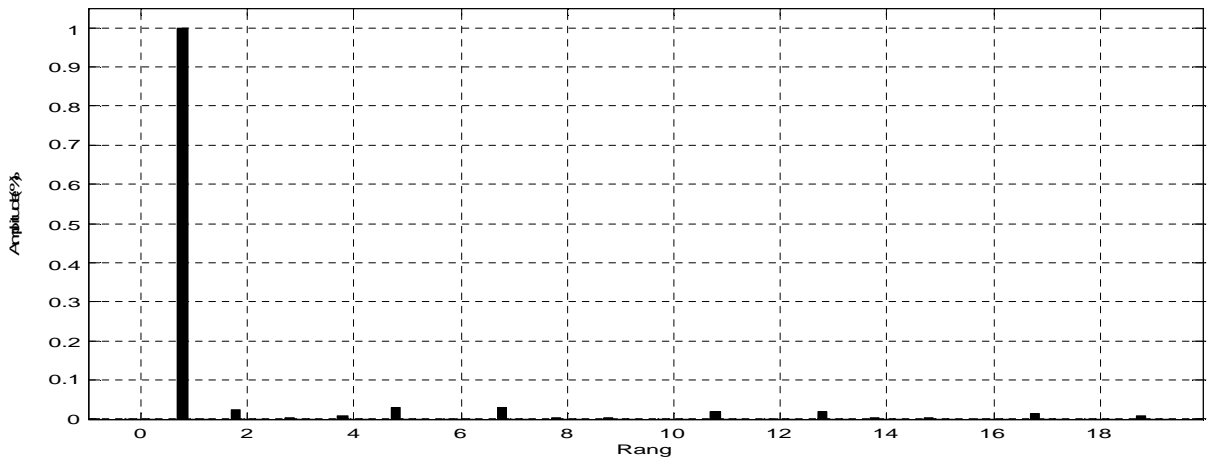
Les figures 5.11, 5.12 et 5.13 représentent l'analyse temporelle des courants dans les différents éléments et l'analyse spectrale des courants de la charge non linéaire et de la source



**Figure 5.11:** Formes d'ondes des courants et de la tension continue :  $i_{ch}$  courant de charge,  $i_f$  courant du filtre actif,  $i_s$  courant de source et  $v_{dc}$  tension aux bornes du condensateur



**Figure 5.12:** Spectre du courant de la charge non linéaire



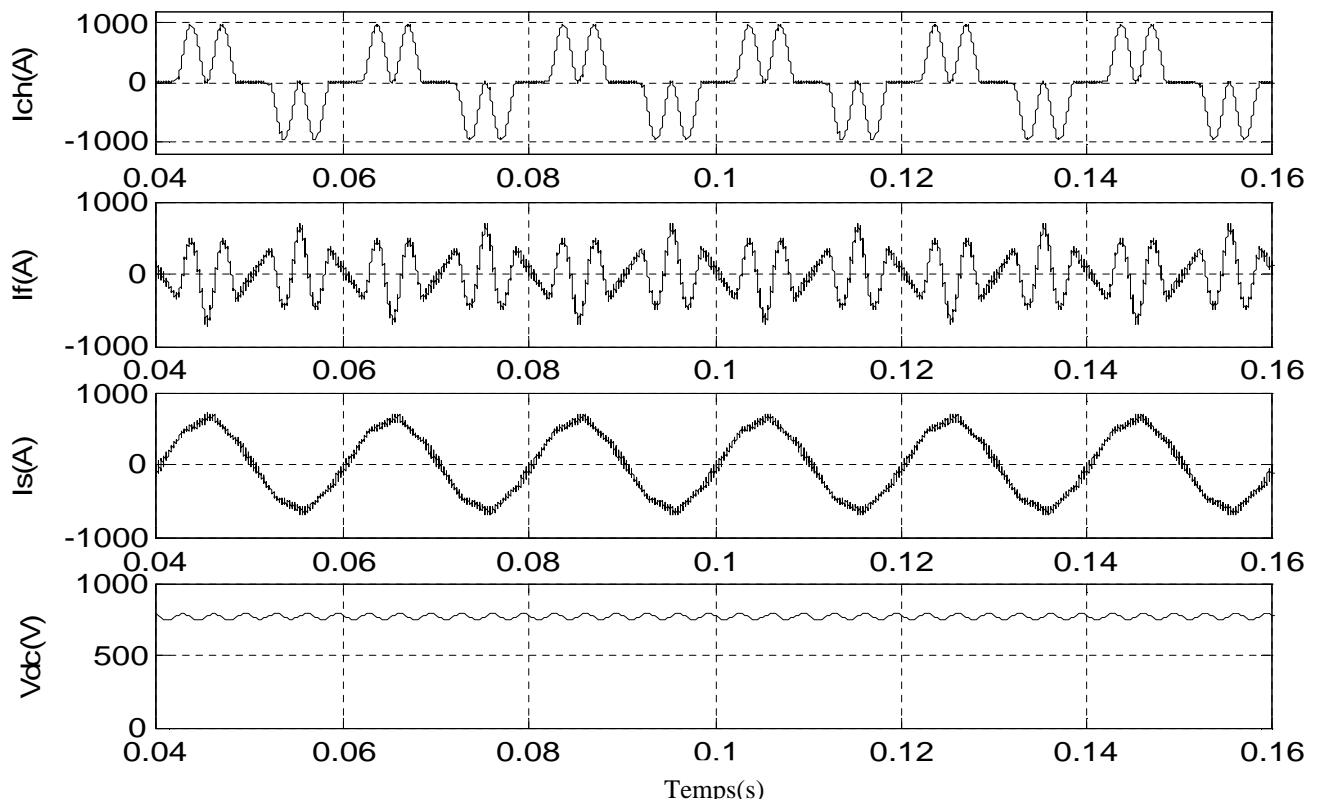
**Figure 5.13:** Spectre du courant de source.

La figure 5.11 montre que l'allure du courant de source après filtrage est presque sinusoïdale et en phase avec la tension de source, ce qui prouve la bonne qualité de filtrage du filtre actif parallèle.

L'analyse spectrale des courants de la charge non linéaire et de source est représentée sur les figures 5.12 et 5.13. Le THD du courant de la charge non linéaire est de 23.53% et de 4.16% pour le courant de source, ce qui donne une bonne qualité de filtrage

- **Deuxième charge non linéaire** : pont de Graets triphasé à diodes alimentant une charge RC parallèle.

Les figures 5.6 et 5.7 présentent l'analyse temporelle des courants dans les différents éléments et l'analyse spectrale des courants de la charge non linéaire et de la source



**Figure 5.14** : Formes d'ondes des courants et de la tension continue :  $i_{ch}$  courant de charge,  $i_f$  courant du filtre actif,  $i_s$  courant de source et  $v_{dc}$  tension aux bornes du condensateur

De la figure 5.14 on déduit que l'allure du courant de source après filtrage est presque sinusoïdale et en phase avec la tension de source, ce qui prouve la bonne qualité de filtrage du filtre actif parallèle.

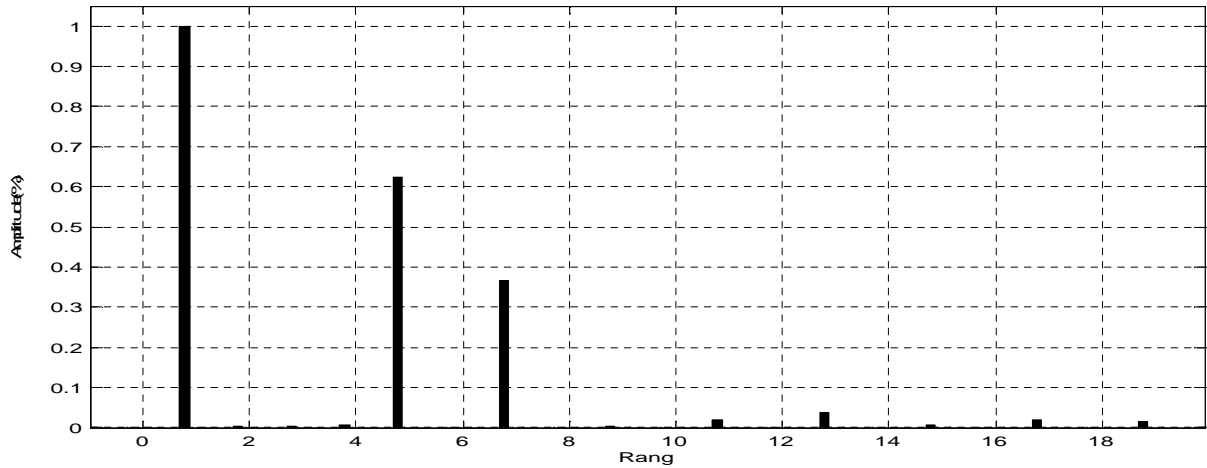


Figure 5.15: Spectre du courant de la charge non linéaire

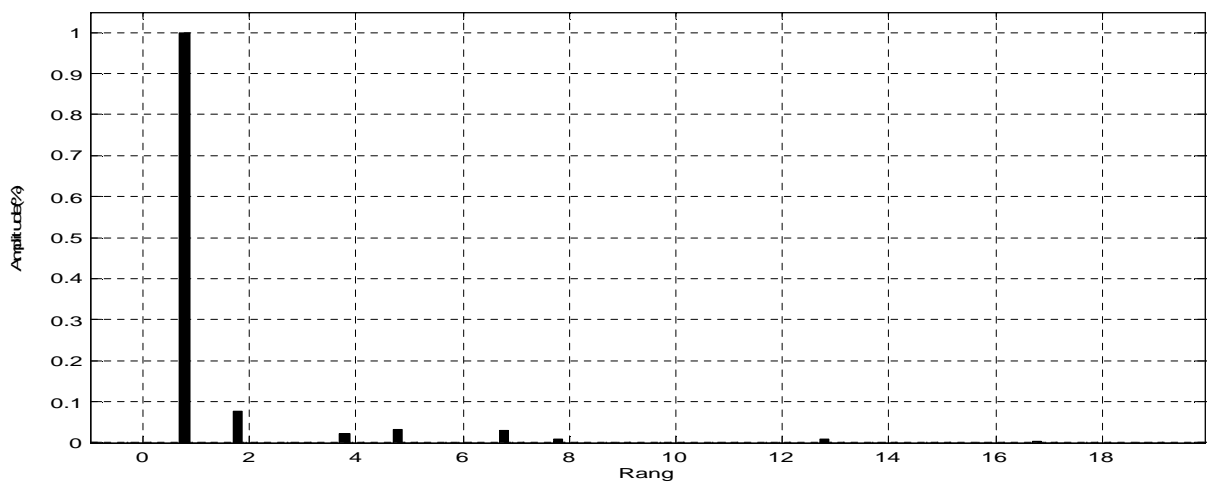


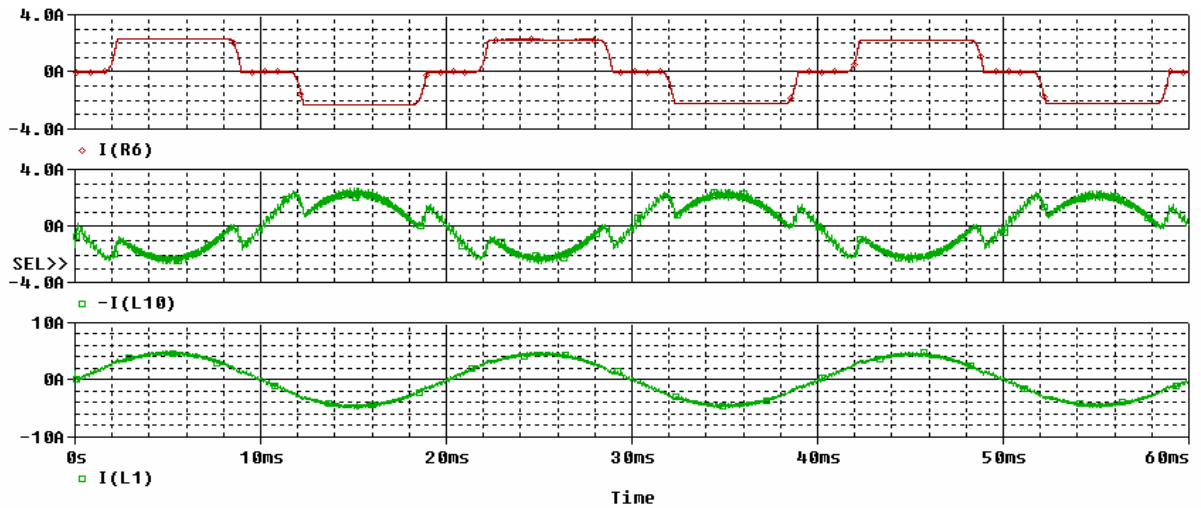
Figure 5.16 : Spectre du courant de source.

Les figures 5.15 et 5.16 montrent l'analyse spectrale des courants de la charge non linéaire et de source. Le THD du courant de la charge non linéaire est de 72.37% et de 4.97% pour le courant de source, ce qui donne une bonne qualité de filtrage

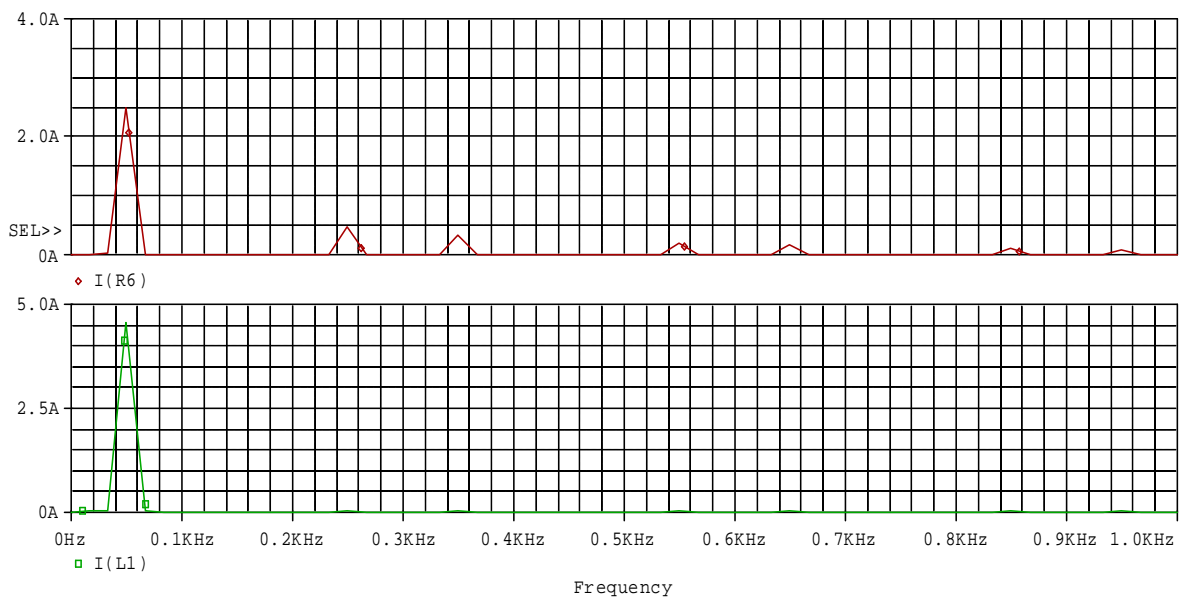
#### a) Simulation sous Pspice.

- **Première charge non linéaire** : pont de Graets triphasé à diodes alimentant une charge RL série

Les figures 5.18, et 5.19 représentent l'analyse temporelle des courants dans les différents éléments et l'analyse spectrale du courant de source avant et après filtrage.



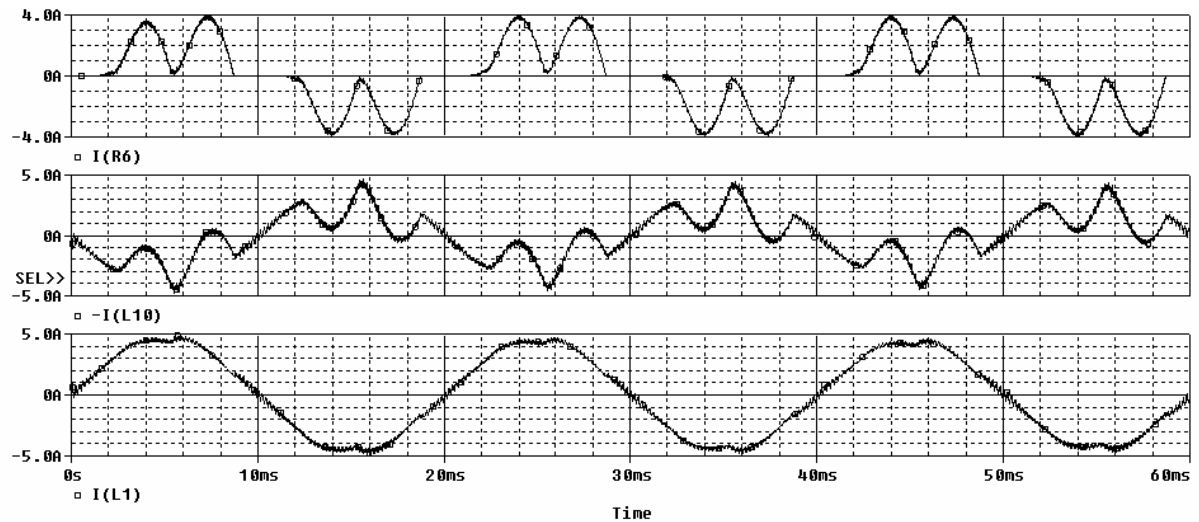
**Figure 5.17:** Formes d'ondes des courants :  $i_{ch}$  courant de charge,  $i_f$  courant du filtre actif,  $i_s$  courant de source



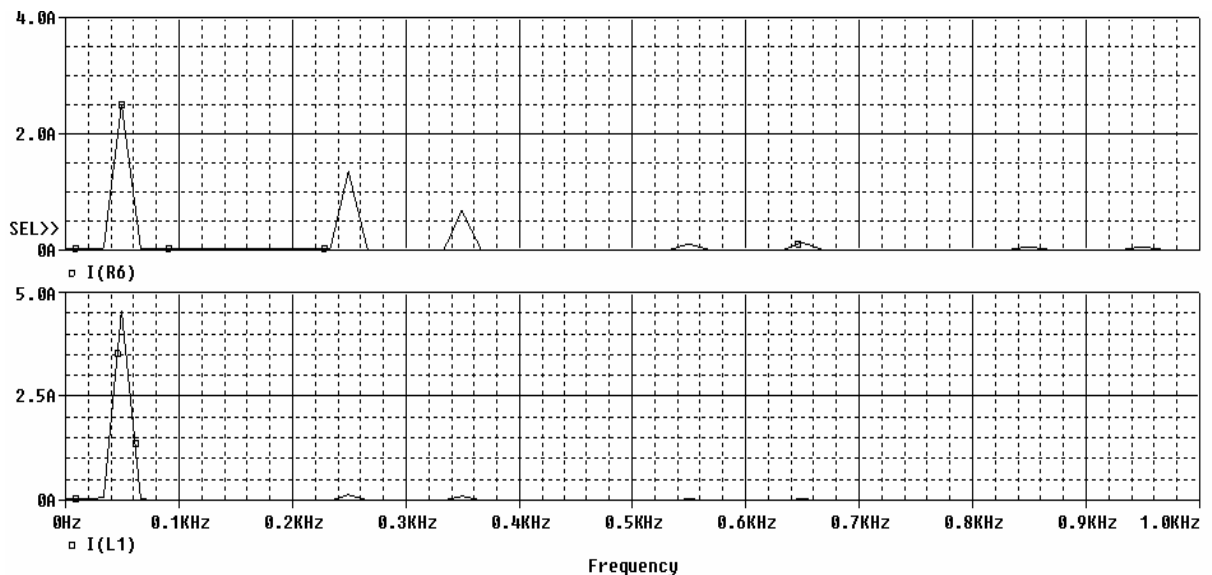
**Figure 5.18:** Spectre du courant de source avant et après filtrage

- **Deuxième charge non linéaire :** pont de Graets triphasé à diodes alimentant une charge RC parallèle.

Les figures 5.19 et 5.20 montrent l'analyse temporelle des courants dans les différents éléments et l'analyse spectrale des courants de la charge non linéaire et de la source



**Figure 5.19:** Formes d'ondes des courants :  $i_{ch}$  courant de charge,  $i_f$  courant du filtre actif,  $i_s$  courant de source



**Figure 5.20:** Spectre du courant de source avant et après filtrage

L'allure du courant de la charge non linéaire (figure 5.19) présente des ondulations qui sont dues à la charge et décharge du condensateur, mais le courant de source après filtrage est presque sinusoïdal et en phase avec la tension de source, ce qui indique que le filtre actif parallèle triphasé élimine les harmoniques générées par la charge non linéaire.

Ainsi, on peut conclure que la méthode d'indentification basée sur la détection du courant de source est une méthode fiable, simple et moins coûteuse. Elle a donnée des résultats comparables à la méthode des puissances réelles et imaginaires instantanées.

## 5.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons développé une contribution originale qui consiste en une nouvelle méthode d'extraction du courant de référence. Cette méthode d'identification est basée sur la détection du courant de source.

Dans un premier temps, nous avons présenté le filtre actif parallèle monophasé. Ce filtre est constitué d'un onduleur de tension à modulation de largeur d'impulsion. Le filtre actif proposé possède un circuit de commande très simple qui consiste à utiliser deux capteurs de tension et un seul capteur de courant. L'avantage de ce type de filtre actif est la simplicité de commande et le coût d'implémentation faible. Pour valider la méthode proposée, nous avons procédé à la simulation numérique du filtre actif monophasé parallèle en utilisant le logiciel PSpice.

Dans un deuxième temps, nous avons présenté le filtre actif parallèle triphasé. Le filtre actif proposé possède un circuit de commande très simple qui consiste à utiliser deux capteurs de tension et un seul capteur de courant par phase d'une manière analogue au filtre monophasé. La validation de la méthode proposée est effectuée par simulation en utilisant deux logiciels Matlab-Simulink et PSpice pour deux types de charges non linéaires.

Plusieurs cas de simulation accompagnés d'une analyse temporelle et d'une analyse spectrale ont été effectués à partir du modèle de l'ensemble. Les résultats de simulation montrent que le filtre actif parallèle dépollue efficacement le réseau électrique des harmoniques générées par la charge non linéaire.



## CONCLUSION GENERALE

Ce travail a été consacré aux améliorations des performances des filtres actifs parallèles, avec pour but le filtrage des courants perturbateurs harmoniques et la compensation de l'énergie réactive.

Après avoir recensé les origines et les conséquences des perturbations électriques des solutions de dépollution ont été présentées et le choix d'une solution basée sur les principes de filtrage actif type parallèle (FAP) a été retenu. Nos travaux de recherches portent sur l'étude conjointe de l'identification des harmoniques et de la commande de l'onduleur. L'étape d'identification des courants harmoniques est fondamentale dans le processus de filtrage. Sans une bonne estimation de ces courants, le système de commande, même très efficace ne pourrait pas apporter à lui seul, les corrections suffisantes. Deux techniques originales d'identification des courants harmoniques ont été développées.

Dans un premier temps, la méthode d'identification des puissances instantanées a été choisie pour identifier le plus grand nombre de perturbations en courant, tels que les courants harmoniques. Cette méthode exige une tension de réseau sinusoïdal, pour pouvoir fournir uniquement les perturbations en courant émises par la charge polluante. Elle offre l'avantage de choisir la perturbation à compenser avec précision, rapidité et facilité d'implantation. La modélisation et de l'ensemble réseau, charge polluante et filtre actif parallèle a été présenté dans le cas de la commande par modulation de largeur d'impulsion pour deux types de charge non linéaires à savoir un redresseur triphasé à diodes alimentant une charge RL série ou une charge RC parallèle. La validation de la méthode des puissances instantanées a été effectuée par simulation à partir du logiciel Matlab-Simulink. Plusieurs cas de simulation accompagnés d'une analyse temporelle et d'une analyse spectrale ont été effectués à partir du modèle de l'ensemble réseau, filtre actif parallèle et charge polluante. Les résultats de simulation montrent que le filtre actif parallèle dépollue efficacement le réseau électrique des harmoniques générées par la charge non linéaire.

Dans un deuxième temps, nous avons développé une nouvelle méthode d'extraction du courant de référence. Cette méthode d'identification est basée sur la détection du courant de source.

Nous avons présenté tout d'abord le filtre actif parallèle monophasé. Il est constitué d'un onduleur de tension à modulation de largeur d'impulsion. Le filtre actif proposé possède un

circuit de commande très simple qui consiste à utiliser deux capteurs de tension et un seul capteur de courant. L'avantage de ce type de filtre actif est la simplicité de commande et le coût d'implémentation faible. Pour valider la méthode proposée, nous avons procédé à la simulation numérique du filtre actif monophasé parallèle en utilisant le logiciel PSpice.

Ensuite, nous avons présenté le filtre actif parallèle triphasé. Celui-ci possède un circuit de commande très simple qui consiste à utiliser deux capteurs de tension et un seul capteur de courant par phase d'une manière analogue au filtre monophasé. La validation de la méthode proposée est effectuée par simulation en utilisant deux logiciels Matlab-Simulink et le logiciel PSpice.

Par ailleurs, nous avons développé plusieurs voies de recherche dont certaines nous permettent d'envisager de nombreuses orientations futures. Ces perspectives de recherche peuvent se regrouper en trois domaines d'action : Un domaine concerne plus l'automatique et les problèmes de régulation des filtres actifs, l'électronique de puissance et les structures de ces dispositifs, et l'application de l'électronique et de la microélectronique.

En électronique de puissance, les actions de recherche envisagées concernent principalement la structure ou les composants constituant les filtres actifs étudiés.

L'étude des perturbations engendrées par l'onduleur, leurs importances, leurs causes et la possibilité de les compenser sans avoir recours aux méthodes de régulation.

Nous pouvons également envisager d'utiliser ces filtres actifs dans les réseaux de transport à haute tension où des structures multiniveaux seront à développer.

En Automatique, de nombreuses actions peuvent être entrepris pour repousser les limites d'application et de performance des filtres actifs.

On peut travailler plus directement sur la boucle de régulation du courant du filtre actif parallèle:

- en mesurant les effets du dépassement, observé dans la fonction de transfert en poursuite en mode discret, sur la qualité de compensation et sur l'existence possible d'une résonance.
- en résolvant le problème du dépassement par un autre type de régulateur comme  $H_\infty$  tout en trouvant une solution au problème du déphasage.

En électronique et microélectronique, nous pensons évidemment à la puissance de traitement de certains processeurs qui permettent d'atteindre nos objectifs de vitesse d'échantillonnage, de manière à repousser les limites théoriques et pratiques de certains régulateurs.

Dans ce sens, des études doivent être envisagées en microélectronique, en particulier avec l'utilisation de circuits intégrés spécifiques, tels que les ASIC (Application Specific Integrated Circuit) et PLD (Programmable Logic Device), pour répondre aux contraintes de calcul actuelles.

## REFERENCES

- 1 - G. Desquilbet, C. Foucher, P. Fauquembergue, « Statistical analysis of voltage dips », Notes EDF, 96NR00 102, 1995.
- 2 - Thierry Deflandre et Philippe Maurs, « Les harmoniques sur les réseaux électriques », Direction des Etude et Recherche en France -Edition EYROLLES, 1998.
- 3 - Dhombres, J. et Robert, J. B. « Fourier - Créateur de la physique- mathématique». Editions Berlin, 1998.
- 4 - E. BETTEGA, J. N. FIORINA, «Harmoniques: convertisseurs propres et compensateurs actifs», CT n° 183, Jan 2000.
- 5 - IEEE STD 519-1992, «IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems», IEEE 519 working Group., 1992.
- 6 - IEEE STD 1159-1995, «IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality», 1995.
- 7 - J.-N. Fiorina, « Harmoniques en amont des redresseurs des ASI », Cahier Technique n° 160.
- 8 - 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 l'Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy 30 Octobre 1998.
- 9 - H.Sasaki, T.Machida, « A new method to eliminate ac harmonic currents by magnetic compensation-consideration on basic design », IEEE Trans. Power Appl. Syst., vol. 90, No. 5, pp. 2009-2019, 1971.
- 10 - L. Gyugyi and E.C. Strycula, « Active AC power filters », IEEE/IAS Annual Meeting, pp. 529-535. 1976.
- 11 - N.Mohan, and al, « Active filters for ac harmonic suppression », IEEE/PES winter meeting, A77 026-8, 1977.
- 12 - M. Grandpierre, B. Trannoy, « A static power device to rebalance and compensate reactive power in three phase network: design and control », IEEE Ind. Appl. Soc. Annual meeting, pp. 127-13 5, 1977.
- 13 - H. Akagi, A. Nabae and S. Atoh, « Control strategy of active power filters using multiple voltage-source PWM converters », IEEE Trans. on Industry applications, vol. IA-22, pp. 460-465, 1986.
- 14 - H. Akagi, « New trends in active filters for power conditioning », IEEE Trans. on Industry applications, vol. 32, No. 6, pp. 1312-1322, November/December 1996.
- 15 - H. Akagi, « Control strategy and site selection of a shunt active filter for damping of

- harmonic propagation in power distribution systems », IEEE Trans. on power delivery, vol. 12, No. 1, pp. 354-363, January 1997.
- 16 - A. Chandra, B. Zingh, B.N. Zingh, K. Al-Haddad, « An improved control algorithm of shunt active filter for voltage regulation, harmonic elimination, power factor correction and balancing of nonlinear loads », IEEE Trans. on power electronics, vol.15, No. 3, pp. 495-507, May 2000.
  - 17 - R. Tounsi, « Développement d'un contrôle commande pour un compensateur série de creux de tension. Validation par simulation du fonctionnement avec des charges industrielles » Thèse de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, 30 Octobre 1999
  - 18 - M. Muljadi, R. Shiferl, T. A. Lipo, « Induction machine phase balancing by unsymmetrical thyristor voltage control », IEEE Trans. on Industry applications, vol. IA-21, no. 4, PP. 669- 678, May/June 1985
  - 19 - L. Moràn, P. D. Ziogas, G. Joos, « Three-phase solid-state voltage compensator system », Can. J. Elect. Comp. Eng., vol. 15, no. 1, PP. 27-35, 1990.
  - 20 - A. Campos, G. Joos, P. Ziogas, J. Lindsay, « Analysis and design of a series voltage unbalance compensator based on a three-phase VSI operating with unbalanced switching function », IEEE Trans. on power electronics, vol.9, N°3, P. 269-274, May 1994.
  - 21 - H. Fujita, H. Akagi, « The unified power quality conditioner: the integration of series- and shunt-active filters », IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 13, No. 2, pp. 1312-1322, March 1998.
  - 22- Miao-Xin Wang, « Filtrage actif de puissance : Etudes et réalisation d'un filtre actif à commande numérique temps réel » Thèse de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, 18 Décembre 1992.
  - 23 - Xu (J.), «Filtrage actif parallèle des harmoniques des réseaux de distribution d'électricité», INPL, Thèse de doctorat, 1994.
  - 24 - Segulier (G.) et Labrique (F.), La conversion continu alternatif, Tec & doc Lavoisier, 1989, Les convertisseurs de l'électronique de puissance, volume 4.
  - 25 - Mohamad Alaa Eddin Alali, « Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension », Thèse de Doctorat de l'Université de Louis Pasteur, Strasbourg, 12 Septembre 2002
  - 26 - T. Nakajima, E. Masada, « An active power filter with monitoring of harmonic spectrum », EPE-89, 3rd European conference on power electronics and applications, Aachen, Germany, 1989
  - 27 - S. Guffon, « Modélisation et commandes a structure variable de filtres actifs de puissance » Thèse de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, 24 Juillet 2000.

- 28 - H. Akagi, Y. Kanazawa and A. Nabae, « Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuits », Proceeding 1983 International power electronics conference. Tokyo, Japan, PP. 1375-1386, 1983.
- 29 - M.A.E. Alali, S. Saadate, Y.A. Chapuis, F. Braun, « Energetic study of a shunt active conditioner compensating current harmonics, power factor and unbalanced », EPE-PEMC 2000, Kosic, Slovak Republic, vol. 5, pp. 211-216, September 2000.
- 30 - L. Zellouma, « Filtrage actif parallèle des harmoniques du courant générés par un pont redresseur triphasé non commandé », Mémoire de Magister, Université d'Annaba 2006
- 31 - L. Zellouma, A. Omeiri et S. Saad, « Shunt active power filter for current harmonics suppression using hysteresis control », AJIT 6 (4): 436-440, 2007
- 32 - L. Merabet, S. Saad et A. Omeiri, « Compensation des courant harmoniques par filtre actif parallèle », Revue synthèse N°14 Juin 2005.
- 33 – Tokuo Ohnishi, Kenichiro Ueki et Masahide Hojo, « Source current detection control of active filter for preventing current oscillation », 35th Annual IEEE Power electronics Specialists Conference, Aachen, Germany, pp 965-965, 2004
- 34 – J. C. Wu, H. L. Jou, « Simplified control for the single phase active power filter », IEE Proc. Electr. Power Appl., Vol. 143, No. 3, pp 219-224, May 1996
- 35 - A. Omeiri, A. Haddouche, L. Zellouma and S. Saad, « A three phase shunt active power filter for currents harmonics suppression and reactive power compensation », AJIT 5 (12): pp 1454-1457, 2006
- 36 - L. H. Tey, P. L. So and Y. C. Chu, « An improvement of power quality using adaptive shunt active filter », IEEE Trans. Power Delivery, vol. 20, no. 2, pp. 1558-1568, 2005.
- 37 – G. G. Terbobri, « Real time active power filtering using sliding mode control », PhD Thesis, University of Wales, Swansea, UK, 1999
- 38 - H. Liahng Jou, H. Yung Chu, J. Chang Wu, « A novel active power filter for reactive power compensation and harmonic suppression », INT. J. Electronics, Vol.75, N°3, pp. 577-587, 1993.