

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي



BADJI MOKHTAR - ANNABA UNIVERSITY  
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR -ANNABA

جامعة باجي مختار - عنابة

Année 2019

Faculté des sciences de l'ingénierat  
Département d'électrotechnique

THESE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de DOCTORAT en Science

Contribution à l'Etude des Filtrés Actifs  
dans les Réseaux Electriques à Basse  
Tension

Spécialité : Electrotechnique

Option : Commande Electrique

Par

Mme Dendani Kherrat Hayette

DEVANT LE JURY

**Président** : Mr Labar Hocine

Prof à l' Université de Annaba

**Rapporteur** : Mr Omeiri Amar

Prof à l' Université de Annaba

**Co Encadreur** : Mr Adjabi Mohamed

Prof à l' Université de Annaba

**Examineurs** : Mr Lemzadmi Ahcene

Prof à l' Université de Guelma

: Mr Moussaoui Abdkrim

Prof à l' Université de Guelma

: Mde Rekioua Djamila

Prof à l' Université Bejaïa

## ملخص

إن جودة الموجة الكهربائية أبعد ما تكون عن الكمال، بسبب استخدام الأحمال غير الخطية التي تولد التوافقيات الحالية وتستهلك طاقة تفاعلية. هاتان الظاهرتان تولد بعض الاضطراب في عطل المعدات حتى تدهور بعض أو كل المعدات المتصلة بالشبكة. يمكن تغيير نوعية الأمواج من خلال عدة أنواع من الاضطرابات. معرفة أصول وآثار التوافقيات التلوث على شبكات الكهرباء. تحتوي هذه الدراسة على حل لإنشاء نظام من المرشحات الفعالة ذات ثلاثة مستويات من التحكم بواسطة عاكس التباطؤ الذي يحقق في الشبكة تيارًا متساويًا مع تلك التي يمتصها الحمل الملوث ، ولكن في حالة مقاومة الطور معهم ، العرض الحالي ليكون جيبيًا. يتم توفير تنظيم واستقرار عرض المرشح أثناء تغيير الحمولة بواسطة PI تقليدي ثم  $PI^\alpha$  كسور. تم عرض النمذجة والمحاكاة لشبكة التوريد والحمل غير الخطي والتصفية النشطة الموازية. لقد تم التحقق من صحة هذه الأساليب المقترحة من خلال محاكاة عددية. تم إجراء تحليل الوقت والتحليل الطيفي من نموذج الشبكة الكهربائية ، والحمل اللاخطي والفلتر النشط الموازي. تظهر نتائج المحاكاة لهذه الطرق المقترحة أن الفلتر النشط الموازي يمكن أن يجمع التوافقي الحالي بشكل فعال لإجبار تيار العرض على أن يكون جيبيًا وللتعويض عن الطاقة التفاعلية الناتجة عن الحمل غير الخطي. تم إجراء دراسة مقارنة وتم التحقق من صحة النتائج.

**الكلمات الافتتاحية :** مرشحات نشطة , مرشحات متوازية نشطة , قوى رد الفعل , التوافقيات

كلاسيك PI , كسور  $PI^\alpha$

## **ABSTRACT**

The quality of the electrical wave is far from being perfect, due to the use of non-linear loads that generate current harmonics and 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. The quality of wave can be altered by several types of disturbances. Knowing the origins and the effects of pollution harmonics on the electrical networks, this study has for solution to implement a system of active filters with three levels inverter hysteresis-based control which injects into the network a current equal to those absorbed by the polluting load, but in opposition of phase with these, thus leading the supply current to be sinusoidal. The regulation and the stability of the power supply of the filter during a variation of the load is ensured by a classical PI and then by a fractional  $PI^\alpha$ . The modelling and the simulation of the supply network, nonlinear load and parallel active filter were presented. The validation of these 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 these 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.

A comparative study has been conducted and the results have been validated .

**Keywords** : active filters : parallel actives, reactive powers ,harmonics ,classic PI , fractional  $PI^\alpha$

## **RESUME**

La qualité de l'onde électrique est loin d'être parfaite, en raison de l'utilisation de charges non linéaires qui génèrent des harmoniques de courant et consomment de la puissance réactive. Ces deux phénomènes génèrent quelques perturbations du dysfonctionnement des équipements jusqu'à la détérioration d'une partie ou de la totalité des équipements connectés sur le réseau. La qualité des ondes peut être altérée par plusieurs types de perturbations. Connaissant les origines et les effets des harmoniques de pollution sur les réseaux électriques. Cette étude a pour solution de mettre en place un système de filtres actifs à trois niveaux de contrôle par hystérésis inverseur qui injecte dans le réseau un courant égal à ceux absorbés par la charge polluante, mais en opposition de phase avec ceux-ci, conduisant ainsi le courant d'alimentation à être sinusoïdal. La régulation et la stabilité de l'alimentation du filtre lors d'une variation de charge est assurée par un PI classique puis par un PI<sup>α</sup> fractionnaire. La modélisation et la simulation du réseau d'alimentation, de la charge non linéaire et du filtre actif parallèle ont été présentées. La validation de ces méthodes suggérées a été réalisée par simulation numérique. Une analyse temporelle et une analyse spectrale ont été réalisées à partir du modèle du réseau d'alimentation, de la charge non linéaire et du filtre actif parallèle. Les résultats de simulation de ces méthodes proposées montrent que le filtre actif parallèle peut efficacement supprimer l'harmonique de courant pour forcer le courant d'alimentation à être sinusoïdal et compenser la puissance réactive générée par la charge non linéaire. Une étude comparative a été réalisée et les résultats ont été validés.

**Les mots clés :** filtres actifs , filtres actifs parallèles , puissances réactives , les harmoniques , PI classique , PI <sup>α</sup> fractionnaire

## 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

Je voudrais tout d'abord exprimer toute ma reconnaissance à Monsieur Amar Omeiri, Professeur 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.

J'exprime également ma reconnaissance à Monsieur Mohamed Adjabi Professeur à l'Université Badji Mokhtar – Annaba pour sa contribution judicieuse.

Je remercie Monsieur Hocine Labar , Professeur à l'Université Badji Mokhtar – Annaba, de m'avoir fait l'honneur de présider le jury de soutenance.

Je remercie Madame Professeur Rekioua Djamilia ,Messieurs Professeurs Lemzadmi Ahcene et Moussaoui Abdelkrim pour m'avoir fait l'honneur de participer au jury de soutenance.

Je tiens aussi à remercier Monsieur Haddour Naoufel , Maître de conférence à l'école centrale de Lyon, 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 madame Ghoudelbourk Sihem docteur enseignante à l'Université Badji Mokhtar – Annaba pour son aide et soutien tout au long de cette étude.

Sans oublier Madame Ourici Amel docteur enseignante à l'Université Badji Mokhtar – Annaba pour Ses conseils, ses orientations, ainsi que son implication directe.

## LISTE DES TABLEAUX

TABLEAUX	TITRES	N°
Tableau 1.1	Récapitulatif de différentes perturbations, origine, conséquences et exemple de pollutions	14
Tableau 1.2	Caractéristiques de quelques générateurs d'harmoniques	18
Tableau 1.3	individuelles sur les réseaux publics basse tension (norme CEI 61000-2-2)	20
Tableau 1.4	Limite des composantes harmoniques en courant (norme CEI 61000-3-2)	20
Tableau 1.5	Limites IEEE pour la distorsion harmonique de la tension.	21
Tableau 1-6	Limites IEEE des émissions de courants harmoniques	21
Tableau 1-7	Classification IEEE des perturbations électromagnétiques.	22
Tableau 2	Récapitulatif des solutions de dépollution	34
Tableau 4.1	Données de l'alimentation	58
Tableau 4.2	Données de la charge non-linéaire	59
Tableau 4.3	Données du filtre actif parallèle	65

## LISTE DES FIGURES

FIGURES	TITRES	N°
Figure 1.1(a)	Creux et coupures de tension (thèse ould Abdessalem)	7
Figure 1.1 (b)	Fluctuations de tension.	7
Figure 1.1(c)	Cas particulier de déséquilibre du système triphasé de tension.	8
Figure 1.1(e)	Les Harmoniques	9
Figure 1.2	Forme d'onde du courant de charge non linéaire : pont à diode alimentant une charge R C en parallèle	16
Figure 2.1	Filtre passif résonant	25
Figure 2.2	Filtre passif amorti.	25
Figure 2.3	Forme d'onde des courants absorbés.	26
Figure 2.4	Redresseur dodécaphasé, (a) montage en série et (b) montage en parallèle des deux ponts redresseurs.	27
Figure 2.5	Filtre actif parallèle (FAP)	28
Figure 2. 6	Filtre actif série (FAS)	30
Figure 2.7	Combinaison parallèle-série actifs (UPQC)	31
Figure 2.8	Filtre actif série et filtre passif parallèle	32
Figure 2.9	Filtre actif série connecté en série avec un filtre passif parallèle	32
Figure 2.10	Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle	33
Figure 3.1	Schéma de principe du filtre actif parallèle	35
Figure 3.2	Schéma de principe de l'ensemble réseau électrique, charge polluante et filtre actif et formes d'ondes des courants respectifs.	36 37
Figure 3.3	Structure d'un filtre actif parallèle	38
Figure 3.4	Onduleur de tension	39
Figure 3.5	Onduleur de courant	40
Figure 3.6	Algorithme d'identification des courants harmoniques basé sur le calcul des puissances réelles et imaginaires instantanées.	45 41
Figure 3.7	Boucle de régulation de la tension continue	47
Figure 3.8	Schéma de la régulation des courants du filtre actif parallèle	48

Figure 3.9	Schéma synoptique de l'ensemble réseau, filtre actif parallèle et charge polluante	49
Figure 3.10	Schéma synoptique d'un réseau triphasé.	50
Figure 3.11	Schéma synoptique d'un pont redresseur.	51
Figure 3.12	Présentation schématique d'un onduleur triphasé.	51
Figure 3.13	Représentation vectorielle des tensions générées par l'onduleur	54
Figure 4.1	Principe du Filtre Actif Parallèle	58
Figure 4.2	Forme de courant d'harmonique d'une phase à éliminer pour dépolluer le réseau	58
Figure 4.3	Charge polluante avant filtrage	59
Figure 4.4	Filtre actif à base d'onduleur à trois niveaux	60
Figure 4.5	Bras d'onduleur à trois niveaux	61
Figure 4.6	Commande des interrupteurs par hystérésis	62
Figure 4.7	Boucle de réglage de tension continu $V_{dc}$	65
Figure 4.8	Spectre harmonique de courant de source après filtrage avec PI classique.	66
Figure 4.9	la tension $V_{dc}$ après filtrage avec PI classique	67 68
Figure 4.10	Spectre harmonique de courant de source après filtrage avec PI fractionnaire	70
Figure 4.11	La tension $V_{cd}$ après filtrage avec PI fractionnaire	70

## 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 <sub>i</sub>	Taux de distorsion harmonique en courant
THD <sub>v</sub>	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
$p_o(t)$	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 $\alpha$ - $\beta$

## TABLE DES MATIERES

<b>INTRODUCTION GENERALE .....</b>	<b>1</b>
<b>CHAPITRE 1 <i>Perturbations des réseaux électriques ; leurs provenances et conséquences</i>.....</b>	<b>5</b>
1.1 Introduction.....	5
1.2 Qualité de l'énergie électriques.....	5
1.3 Pollutions électriques et leurs origines.....	6
1.4 paramètres de la qualité de l'énergie électrique.....	6
1.4.1 Creux et coupures de tension.....	6
1.4.2 Fluctuations de tension.....	7
1.4.3 Déséquilibre du système triphasé de tension.....	8
1.4.4 Variation de fréquence.....	8
1.4.5 Harmoniques et interharmoniques.....	9
1.5 Sources des harmoniques.....	10
1.5.1 Emission en tension .....	11
1.5.2 Emission en courant .....	11
1.6 Effets des harmoniques.....	12
1.7 Etude des harmoniques .....	14
1.7.1 Développement en série de Fourier du courant de la charge non linéaire.....	15
1.7.2 Taux de distorsion harmonique (Total Harmonic Distorsion THD).....	17
1.7.3 Facteur de puissance.....	18
1.8 Normes.....	19
1.9 Conclusion.....	22
<b>CHAPITRE 2 : DEPOLLUTION DES RESEAUX ELECTRIQUES.....</b>	<b>23</b>
2.1 Introduction.....	23
2.2 Solutions classiques et traditionnelles de dépollution.....	23
2.2.1 Agir sur la structure de l'installation .....	23
2.2.2 Surdimensionnement ou déclassement de l'installation électrique: .....	23
2.2.3 Renforcement de la puissance de court-circuit.....	24
2.2.4 Le Rééquilibrage des courants du réseau électrique:.....	24
2.2.5 Le filtrage Passif.....	24

2.2.6 Utilisation du redresseur dodécaphasé .....	26
2.3 Solutions modernes de dépollution.....	27
2.3.1 Filtre actif parallèle.....	28
2.3.2 Filtre actif série.....	29
2.3.3 La combinaison parallèle - série actifs.....	30
2.3.4 Combinaison hybride active et passive.....	31
2.3.5 Comparatif et choix du filtrage actif parallèle (FAP).....	33
Conclusion.....	35
<b>CHAPITRE 3 : FILTRE ACTIF PARALLELE DE PUISSANCE.....</b>	<b>36</b>
3.1 Introduction .....	36
3.2 Principe de filtrage actif parallèle de puissance.....	36
3.3 Structure du filtre actif parallèle .....	38
3.3.1 Etude de la partie puissance.....	38
3.3.2 Etude de l'onduleur de tension.....	39
3.4 Stratégie de commande du filtre actif parallèle .....	40
3.5 Généralités sur les puissances instantanées.....	42
3.6 Calcul des courants perturbateurs.....	44
3.7 Algorithme d'identification.....	45
3.8 Régulation .....	45
3.8.1 Régulation de la tension continue.....	46
3.8.2 Régulation du courant du filtre actif parallèle.....	47
3.9 Modélisation et simulation numérique .....	49
3.9.1 Schéma synoptique de l'ensemble réseau, filtre actif parallèle et charge polluante.....	49
3.9.2 Modélisation de l'ensemble réseau, filtre actif parallèle et charge polluante.....	50
Conclusion.....	55
<b>CHAPITRE 4 :Filtre actif parallèle de puissance à onduleur trois niveaux (NPC) &amp; Régulation de la tension VDC à l'aide des régulateur PI<math>\alpha</math> fractionnaire.....</b>	<b>56</b>
4.1 Introduction.....	56

4.2 Problématique .....	56
4.3 Filtre actif parallèle à onduleur trois niveaux NPC .....	57
4.3.1 Onduleurs à trois niveaux .....	59
4.3.2 Identification des signaux harmoniques de référence par la méthode des puissances instantanées .....	62
4.4 Régulation de la tension $V_{dc}$ .....	65
4.4.1 Régulation de la tension $V_{DC}$ à l'aide des régulateur PI .....	65
4.4.2 Régulation de la tension $V_{DC}$ à l'aide des régulateur $PI^{\alpha}$ fractionnaire .....	67
4.5 Conclusion.....	71
<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>	<b>72</b>
<b>REFERENCES.....</b>	<b>74</b>

***INTRODUCTION***  
***GENERALE***

## INTRODUCTION GENERALE

L'utilisation croissante dans l'industrie de systèmes commandés à base d'électronique de puissance entraîne de plus en plus de problèmes de perturbation au niveau des réseaux électriques. Ainsi, on assiste à une augmentation régulière, de la part des utilisateurs, des taux d'harmonique et de déséquilibre des courants, et à une importante consommation de la puissance réactive. La circulation de ces mêmes courants perturbés va également provoquer des harmoniques et des déséquilibres de tension, lesquels vont se superposer à la tension nominale du réseau électrique. De plus, des incidents du type ~coups de foudre~ ou un brusque démarrage d'une machine tournante à forte puissance peuvent causer une chute soudaine et importante de tension. On nommera ce type d'incident : creux de tension. Ces perturbations ont bien entendu des conséquences néfastes sur les équipements électriques, lesquelles peuvent aller d'un fort échauffement ou d'un arrêt soudain des machines tournantes jusqu'à la destruction totale de ces équipements.

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.

Progressivement, et de manière à endiguer l'augmentation des problèmes de perturbation sur les réseaux électriques, des normes de qualité électrique de plus en plus contraignantes seront imposées aux fournisseurs et aux consommateurs industriels. Face à ces nouvelles réglementations mais aussi face à la demande de plus en plus spécifique des utilisateurs d'énergie électrique, les compensateurs actifs doivent s'adapter en rendant plus complexes leurs structures et leurs méthodes de régulation. D'autant plus que ces solutions doivent se soumettre aux limites physiques et technologiques inhérentes aux dispositifs de filtrage 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.

De manière à atteindre ces objectifs de recherche, ce mémoire sera divisé en quatre chapitres :

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, sa structure générale, 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 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.

Cette étude a pour solution de mettre en œuvre un système de filtres actifs de puissance avec un onduleur à trois Niveaux à commande MLI hystérésis 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 coté réseau. La régulation et la stabilité de la source d'alimentation du filtre lors d'une variation de la charge est assurée par un PI classique puis par un  $PI^\alpha$  fractionnaire. Une étude comparative a été effectuée et des résultats ont été validés et améliorés sous l'environnement Matlab/Simulink.

# *Chapitre 1*

## 1.1 Introduction

Les distributeurs d'énergie doivent fournir à l'ensemble de ses clients et utilisateurs une énergie de bonne qualité sous la forme de trois tensions sinusoïdales formant 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 détériorations durant son transport jusqu'à son arrivée au client, industriel ou particulier. Les sources de ces altérations sont nombreuses; en plus des 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 savoir l'origine des perturbations et de chercher les solutions appropriées pour les supprimer.

Nous commencerons ce chapitre par un exposé les principales anomalies affectant la tension et le courant du réseau électrique. Nous parlerons également de leurs sources, des conséquences matérielles et des normes internationales imposées aux utilisateurs.

Nous exprimerons ensuite les solutions traditionnelles et modernes qui sont utilisées pour pallier aux problèmes dus aux pollutions harmoniques. A la fin, nous montrerons le principe de fonctionnement du filtre hybride actif passif parallèle, filtre utilisé et développé tout au long de ce chapitre.

## 1.2 Qualité de l'énergie :

L'énergie électrique est distribuée sous forme de tension formant un système sinusoïdal triphasé ayant les paramètres caractéristiques suivantes:

- la fréquence,
- l'amplitude des trois tensions,
- la forme d'onde,
- le déséquilibre.

La mesure de ces paramètres caractéristiques permet de définir la qualité de la tension. Un dommage de l'un d'entre eux ou de plusieurs à la fois laisse supposer la présence d'une défaillance dans le réseau électrique. Afin de montrer certaines perturbations et de donner le niveau de conformité de l'énergie fournie, des normes ont déjà été établies (voir la section 1.4).

.

### 1.3 Pollutions électriques et leurs origines

Les pollutions électriques affectant l'un des quatre paramètres cités précédemment peuvent se manifester par : un creux ou une coupure de tension, une fluctuation de tension, un déséquilibre de tension du système triphasé, une variation de la fréquence, la présence d'harmoniques et/ou d'inter harmoniques.

### 1.4 paramètres de la qualité de l'énergie électrique

L'énergie électrique est fournie sous forme de tension formant un système sinusoïdal triphasé avec les paramètres caractéristiques suivant:

- le déséquilibre,
- l'amplitude des trois tensions,
- 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 dépendances liées à l'exploitation du réseau, soit du fait de certains récepteurs. Ces avaries se manifestent par des perturbations pouvant affectées un ou plusieurs des paramètres définis précédemment. Ce qui entraîne quatre types différents de perturbation ou de troubles:

#### 1.4.1 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 ou atmosphériques comme la foudre, ou à des défauts sur l'installation, dans les réseaux publics ou ceux des utilisateurs. Ils apparaissent également lors de manœuvres d'enclenchement mettant en jeu des courants de fortes intensités (variateurs de vitesse, transformateurs, démarrage des moteurs, 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.

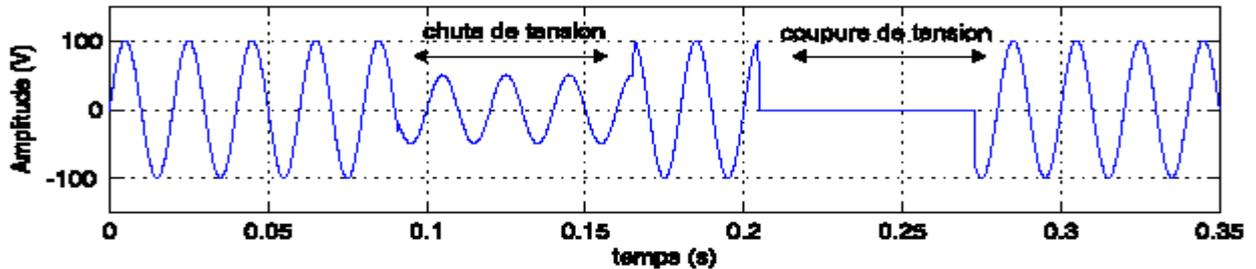


Figure 1.1(a) Creux et coupures de tension (thèse ould Abdessalem)

## 14.2 Fluctuations de tension

Les fluctuations de tension sont erratiques de l'enveloppe des variations périodiques ou de la tension. Ce sont des variations brutales de l'amplitude de la tension situées dans une bande de -10 % à +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 c'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 un gêne visuel 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).

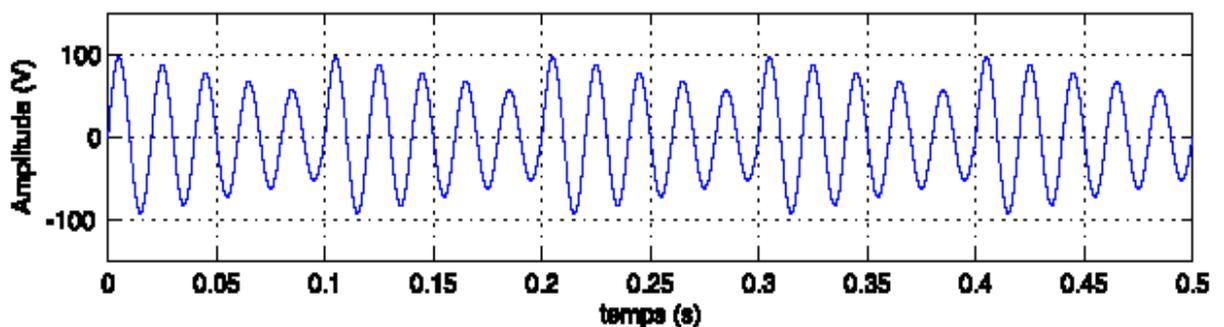


Figure 1.1 (b) Fluctuations de tension.

### 1.4.3 Déséquilibre du système triphasé de tension

Lorsque les trois tensions sont différentes 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.

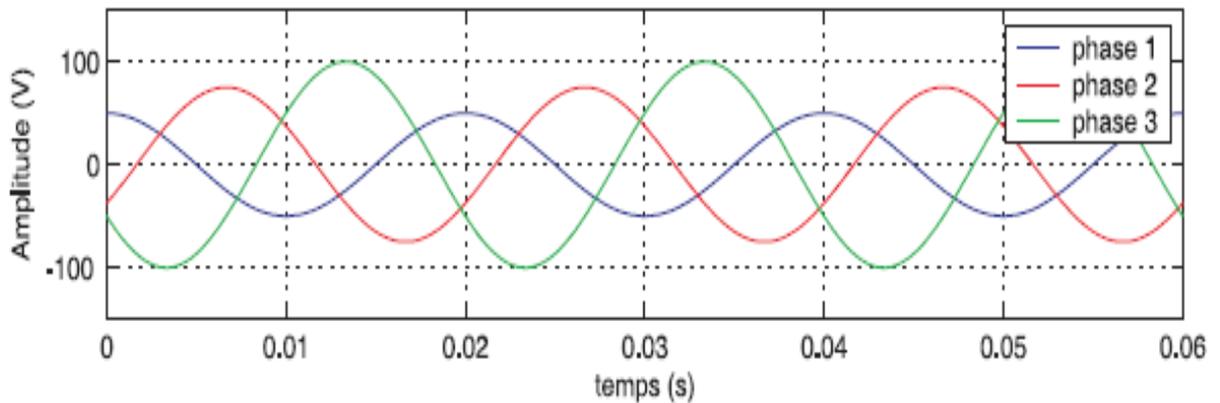


Figure 1.1 (c) Cas particulier de déséquilibre du système triphasé de tension.

### 1.4.4 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  $50 \text{ Hz} \pm 1\%$ .

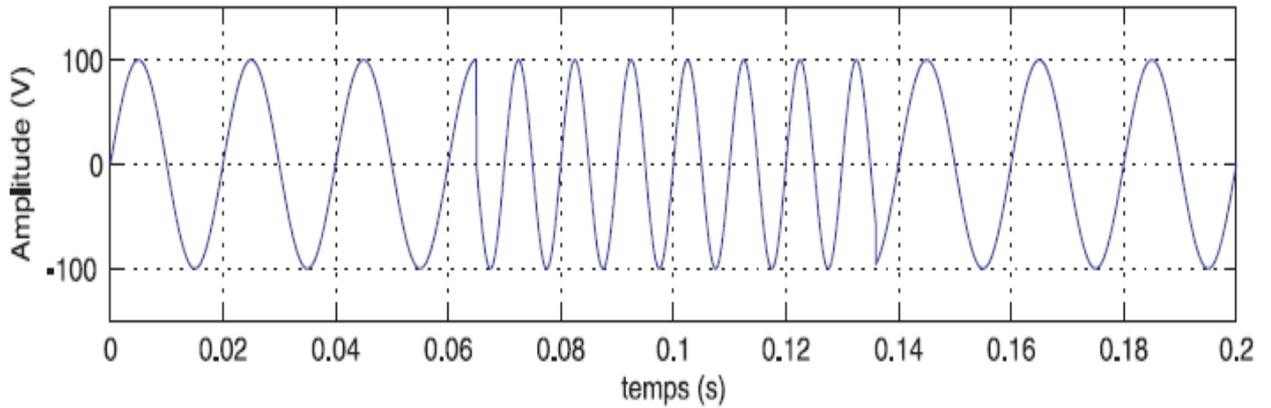


Figure 1.1 (d) Variation de fréquence.

### 1.4.5 Harmoniques et inter harmoniques

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 électriques est la prolifération des équipements de l'électronique de puissance à base de composants électroniques comme : les thyristors les transistors etc....

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

Les pollutions harmoniques seront traitées plus approfondie tout au long de cette thèse.

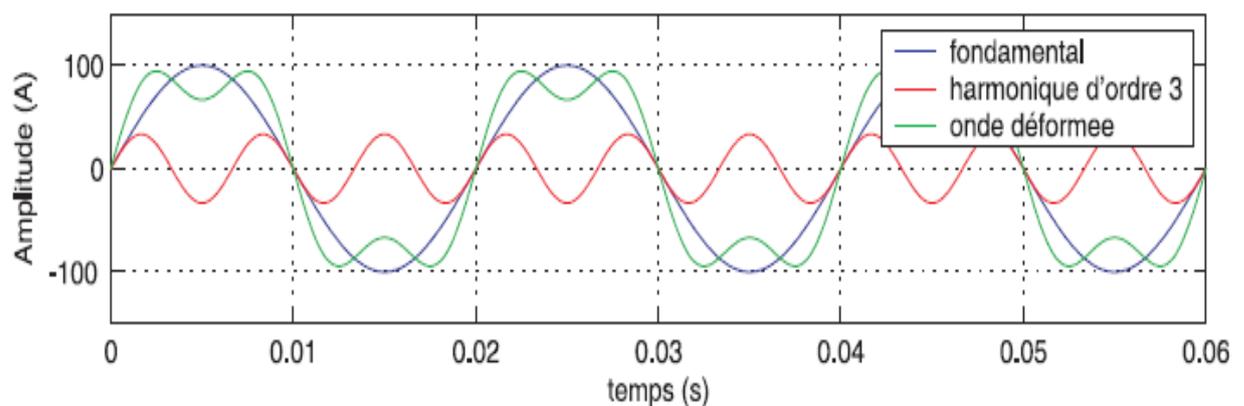


Figure. 1.1 (e) Les harmoniques

## 1.5 Source des harmoniques

La prolifération des équipements électriques utilisant des convertisseurs statiques a provoqué ces dernières années une augmentation sensible du niveau de pollution harmonique des réseaux électriques. Ces équipements électriques 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. La circulation 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 ce dernier.

### 1.5.1 Emission en tension

La transmission harmonique en tension due aux matériels de réseaux participe par 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 avec 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 et inférieur à 1% lorsque le groupe électrogène débite à pleine puissance sur une charge linéaire.
- **Transformateurs :** En fonctionnement en régime saturé les transformateurs peuvent être générateurs de tensions harmoniques. Sur les réseaux, le taux de distorsion harmonique en tension dû à ces appareils reste toujours faible.
- **Alimentations statiques in interruptibles (ASI) :** Ces dispositifs ont les performances de protéger le 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'alimentation statique ininterrompue.

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.

### 1.5.2 Emission en courant

Les charges non linéaires sources de pollution harmonique consomment un courant qui n'est pas sinusoïdale. elles sont les principales sources d'émission en courants harmoniques sur les réseaux.

On peut nommer sept 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 trouve 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 comporte 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].

### 1.6 Effets 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. Les effets occasionnés par les harmoniques peuvent être classer en deux type: les effets instantanés et les effets différés.

#### a ) **Effets instantanés**

Les effets instantanés apparaissent immédiatement dans certains appareillages :

- **Défauts de fonctionnement de certains équipements électriques:** En présence d'harmoniques, la tension (ou le courant) peut changer plusieurs fois de signe dans une demi- période ; Les appareils dont le fonctionnement est basé sur le passage à zéro des grandeurs électriques (appareils utilisant la tension comme référence) 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:** Quelques appareils de mesure et compteurs d'énergie à induction présentent des décadences de mesure et des erreurs

de lecture supplémentaires en présence d'harmoniques.

- **Vibrations et bruits:** Les courants harmoniques provoquent également des vibrations et des bruits acoustiques, spécialement dans les appareils électromagnétiques (transformateurs, inductances et machines tournantes).

**b) Effets à terme ou différés :**

Ils se révèlent après une exposition plus ou moins longue à la perturbation harmonique. L'effet différé le plus important est dû à la température et se traduit par l'échauffement. Il mène à une fatigue prématurée du matériel, des lignes et conduit à 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 touchent les câbles qui peuvent être le siège du suréchauffement du neutre et les matériels bobinés comme les transformateurs ou les moteurs électriques.
- **Echauffement des condensateurs:** L'échauffement est provoqué 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 augmentations de température peuvent conduire au claquage du diélectrique.
- **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 génèrent 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.

Un tableau 1 récapitulatif de types de perturbation, origines, conséquences et exemple de solutions est montré ci-dessous [Cahier Technique Schneider Electric n° □ 199 / p.26]

**Tableau 1.1 Récapitulatif de différentes perturbations, origine, conséquences et exemple de pollutions**

Types de perturbation	Origines	Conséquences	Exemples de solutions (équipement spécifiques et modifications)
<b>Variations et fluctuations de tension</b>	Variations importantes de charges (machines à souder, fours à arc...).	Fluctuation de la luminosité des lampes (papillotement ou flicker).	Compensateur électromécanique d'énergie réactive, compensateur automatique en temps réel, compensateur électronique série, régulateur en charge.
<b>Creux de tension</b>	Court-circuit, commutation de charges de forte puissance (démarrage moteur...).	Perturbation ou arrêt du procédé : pertes de données, données erronées, ouverture de contacteurs, verrouillage de variateurs de vitesse, ralentissement ou décrochage de moteurs, extinction de lampes à décharge.	ASI, compensateur automatique en temps réel, régulateur électronique dynamique de tension, démarreur progressif, compensateur électronique série. Augmenter la puissance de court-circuit (Pcc). Modifier la sélectivité des protections.
<b>Coupures</b>	Court-circuit, surcharges, maintenance, déclenchement intempestif.		ASI, permutation mécanique de sources, permutation statique de sources, groupe à temps zéro, disjoncteur shunt, téléconduite.
<b>Harmoniques</b>	Charges non linéaires (vari- ateurs de vitesse, fours à arc, machines à souder, lampes à décharge, tubes fluorescents...).	Surcharges (du conducteur de neutre, des sources...), déclenchements intempestifs, vieillissement accéléré, dégradation du rendement énergétique, perte de productivité.	Self anti-harmonique, filtre passif ou actif, filtre hybride, inductance de ligne. Augmenter la Pcc. Confiner les charges polluantes. Déclasser les équipements.
<b>Inter-harmoniques</b>	Charges fluctuantes (fours à arc, machines à souder...), convertisseur de fréquence.	Perturbation des signaux de tarification, papillotement (flicker).	Réactance série.
<b>Surintensités transitoires</b>	Manceuvre d'appareillages et de condensateurs, foudre.	Verrouillage de variateurs de vitesse, déclenchements intempestifs, destruction d'appareillage, incendies, pertes d'exploitation.	Parafoudre, parasurtenseur, enclenchement synchronisé, résistance de préinsertion, self de choc, compensateur automatique statique.
<b>Déséquilibres de tension</b>	Charges déséquilibrées (charges monophasées de forte puissance...).	Couples moteurs inverses (vibrations) et surchauffement des machines asynchrones.	Equilibrer les charges. Compensateur électronique shunt, régulateur électronique dynamique de tension. Augmenter la Pcc.

## 1.7 Etude 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 (principalement les courants) sont souvent perturbés et ils ne sont pas parfaitement sinusoïdaux. Dans le domaine de la qualité de l'énergie, il est essentiel 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 :

- les harmoniques, qui permettent la décomposition des signaux électriques perturbés (non sinusoïdaux) en composantes idéales et perturbations.

Le concept d'harmonique a été introduit par le mathématicien français Joseph Fourier [3] au début du XIX ème siècle, stipulant que tout signal périodique non sinusoïdal peut être représenté comme la somme ou la série de sinusoïdes de fréquences discrètes. La composante zéro de cette 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.

### 1.7.1 Développement mathématique 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 et son expression mathématique est de la forme suivante:

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

Ou bien peut être exprimé de la 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'expression 1.2 est appelé série de Fourier et que l'on peut exprimer  $f(\omega t)$  mathématiquement, par 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 :

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

En remplaçant 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 précédentes, le courant de la charge non linéaire est donné par l'expression :

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

Ce courant peut être décomposé en une composante fondamentale et des composantes harmoniques expression ci dessous:

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

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 sur la figure 1.2.

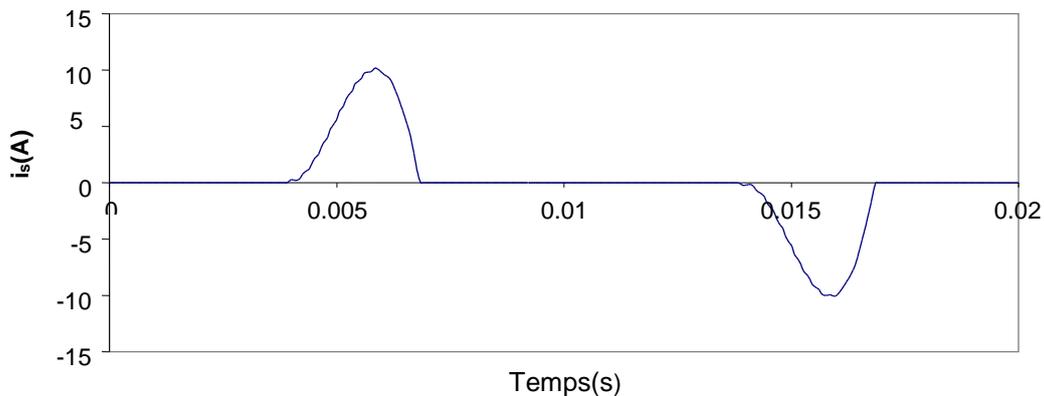


Figure 1.2. Forme d'onde du courant de charge non linéaire : pont à diode alimentant une charge R C en parallèle

Le courant de la source est exprimé par l'équation :

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

$$f_n = nf$$

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

Et la tension de la source est donné par :

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

### 1.7.2 Taux de distorsion harmonique (THD).

Le degré de pollution harmonique peut être quantifiée par le taux de distorsion harmonique, le taux de distorsion harmonique du courant de source THD<sub>i</sub> peut être exprimé 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 ci dessus, 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 :

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

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

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

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

Et que le courant efficace harmonique de la source est donné par l'expression :

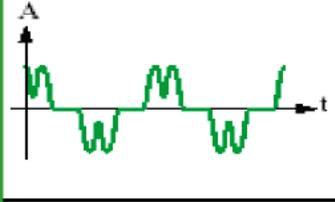
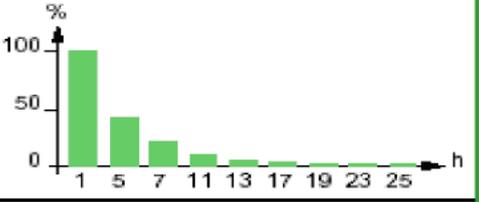
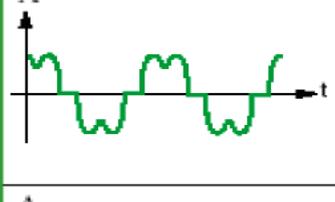
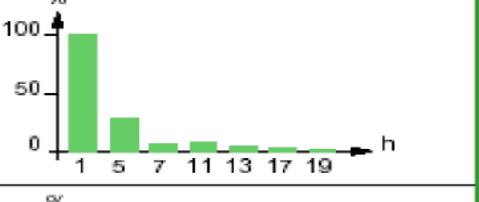
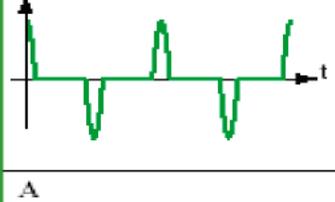
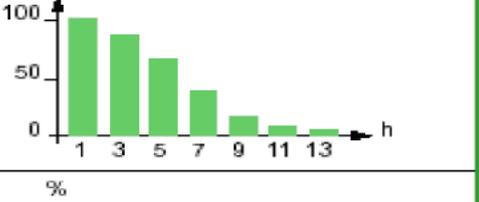
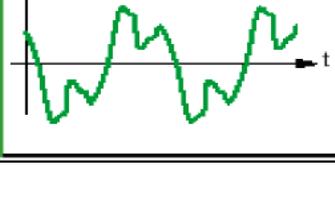
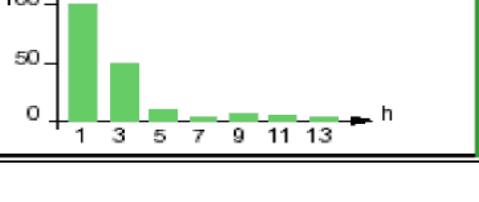
$$I_h = \sqrt{(I_s^2 - I_1^2)} = \sqrt{\sum_{n \neq 1}^{\infty} I_{sn}^2} \quad (1.20)$$

Par conséquent le THD<sub>i</sub> exprimé en pourcent 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 1.2: 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 quantifier la pollution harmonique dans un réseau électrique, on calcule le taux de distorsion harmonique en tension THD<sub>v</sub> 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.

$$\text{THD}_v \% = \sqrt{\frac{V_s^2}{V_{s1}^2}} - 1.100 \quad (1.22)$$

### 1.7.3 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, 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 présence 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.

## 1.8 Normes

Les principaux organismes internationaux de normalisation 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 à titre d'exemple:

**La norme CEI 61000-2-2:** elle définit les niveaux de compatibilité de tension harmoniques sur les réseaux publiques basse tension. Elle est représentée sur le tableau 1.3. Cette norme vise à protéger les équipements raccordés sur un réseau basse tension déformé.

**Tableau 1.3 : 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 1.4) fixe la limitation des courants injectés dans le réseau public pour des équipements dont le courant par phase est inférieur à 16A. Il s'agit des appareils du domaine domestique.

**Tableau 1.4 : 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 1.5, 1.6) [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 1.7) [6].

**Tableau 1.5 :** 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 1.6 :** 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 1-7** : 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.

## 1.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes provenances des pollutions 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 utilisateurs.

Afin de palier à ces problèmes, des réglementations imposent aux consommateurs 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, et dans le but d'améliorer la qualité de l'énergie électrique qui, doit être adéquate aux normes internationales standards, l'étude du chapitre qui va suivre fera l'objet d'étude des différents moyens de mitigation des harmoniques.

## *Chapitre 02*

## 2.1 Introduction

La conception d'un système qui restreint la dissipation des composantes harmoniques si une charge non linéaire est connectée au réseau électrique est imposée par le respect des normes de la qualité de l'énergie électrique. Deux propositions sont envisagées :

- La première consiste à utiliser des convertisseurs statiques peu ou moins polluants,
- 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.

## 2.2 Solutions classiques et traditionnelles de dépollution

Ce sont des techniques qui doivent être maîtrisées par la majorité des électrotechniciens. Elles proposent une solution simple et rapide pour certains cas de perturbations bien localisés et manipulent des composants passifs (inductances, condensateurs, transformateurs) et/ou des branchements qui effectuent des modifications sur le schéma de l'installation.

### 2.2.1 Agir sur la structure de l'installation :

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

### 2.2.2 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.

### **2.2.3 Renforcement de la puissance de court-circuit:**

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

### **2.2.4 Le Rééquilibrage des courants du réseau électrique:**

Cette solution va permettre de répartir les charges d'une manière similaire sur les trois phases. En effet, les charges monophasées et biphasées mal réparties engendrent des courants déséquilibrés dans un réseau électrique de tension basse.

### **2.2.5 Le Filtrage passif:**

La technique et 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 simple 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,
- équipements volumineux,
- inadaptabilité et perte d'efficacité lorsque les caractéristiques du réseau électrique évoluent.

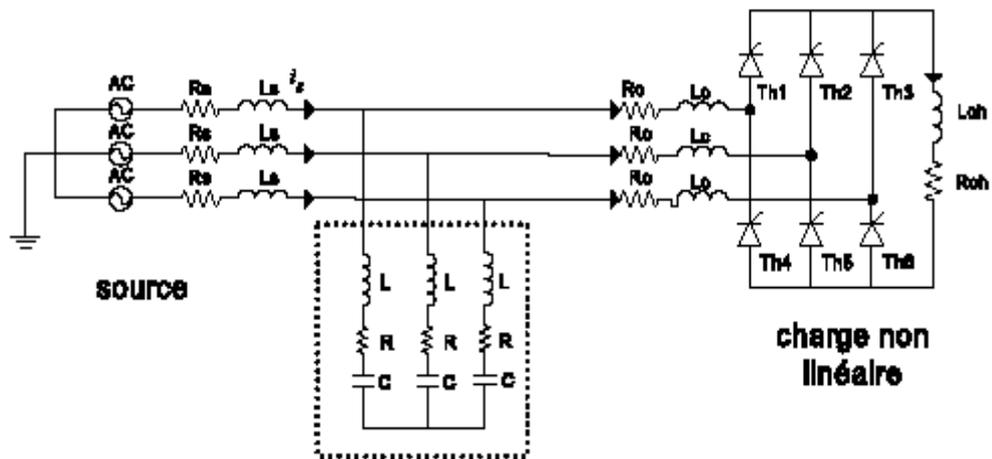


Figure 2.1 : Filtre passif résonant

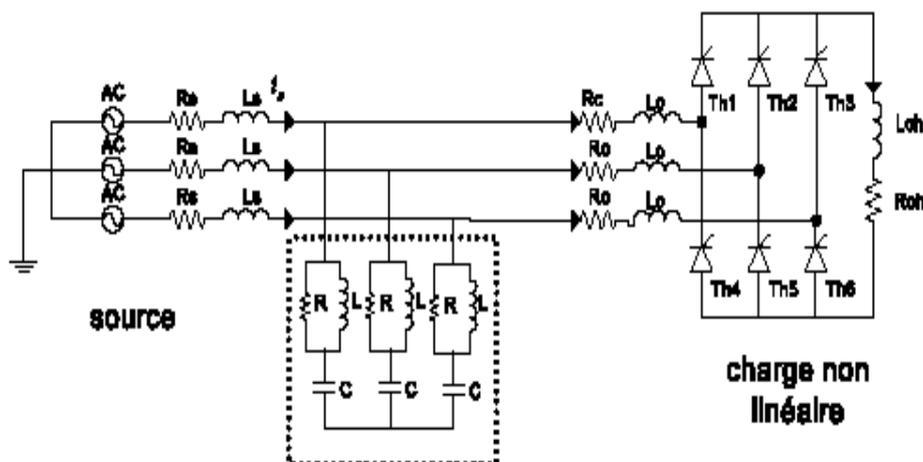


Figure 2.2 : Filtre passif amorti.

### 2.2.6 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 hémiphasé.

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.

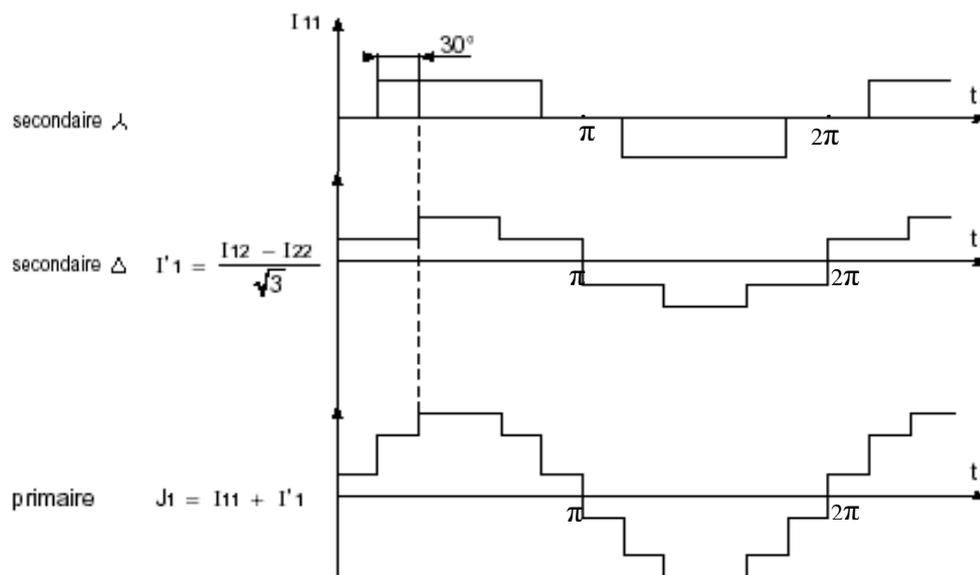


Figure 2.3: Forme d'onde des courants absorbés.

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.

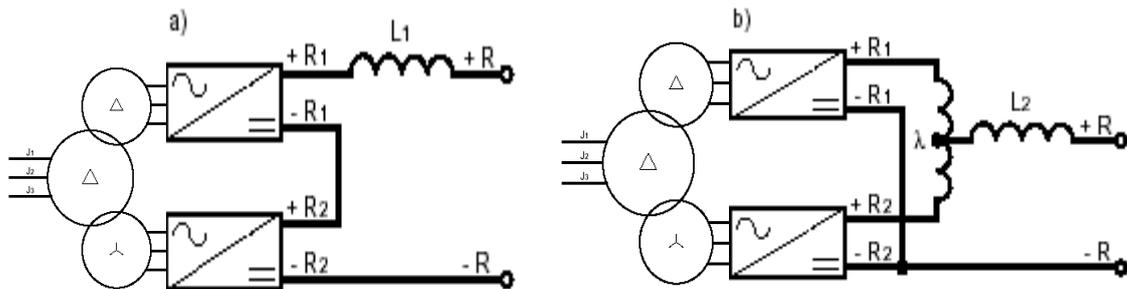


Figure 2.4: Redresseur dodécaphasé, (a) montage en série et (b) montage en parallèle des deux ponts redresseurs.

### 2.3 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.

### 2.3.1 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.

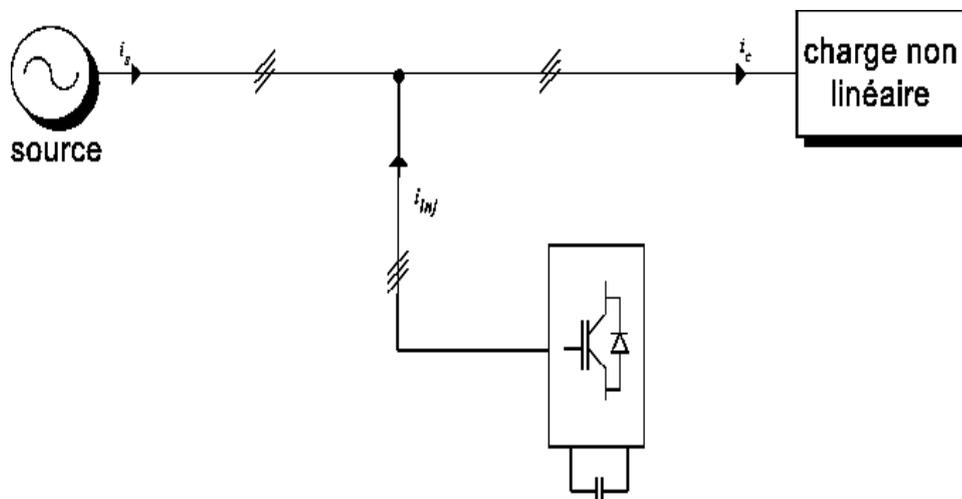


Figure 2.5 : Filtre actif parallèle (FAP)

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

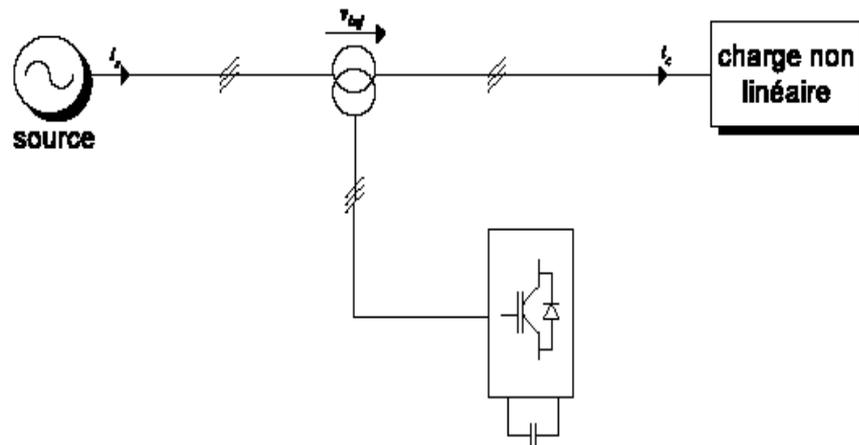


Figure 2. 6 : Filtre actif série (FAS)

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 parallèles 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.

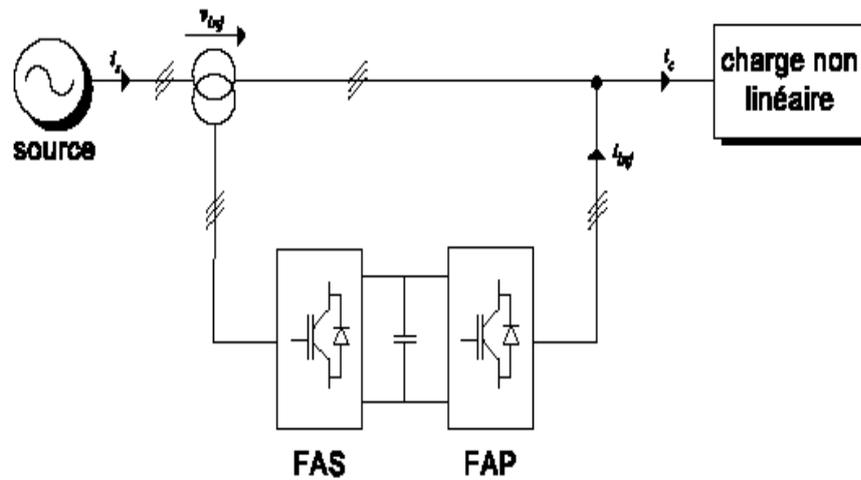


Figure 2.7 : Combinaison parallèle-série actifs (UPQC)

### 2.3.4 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.

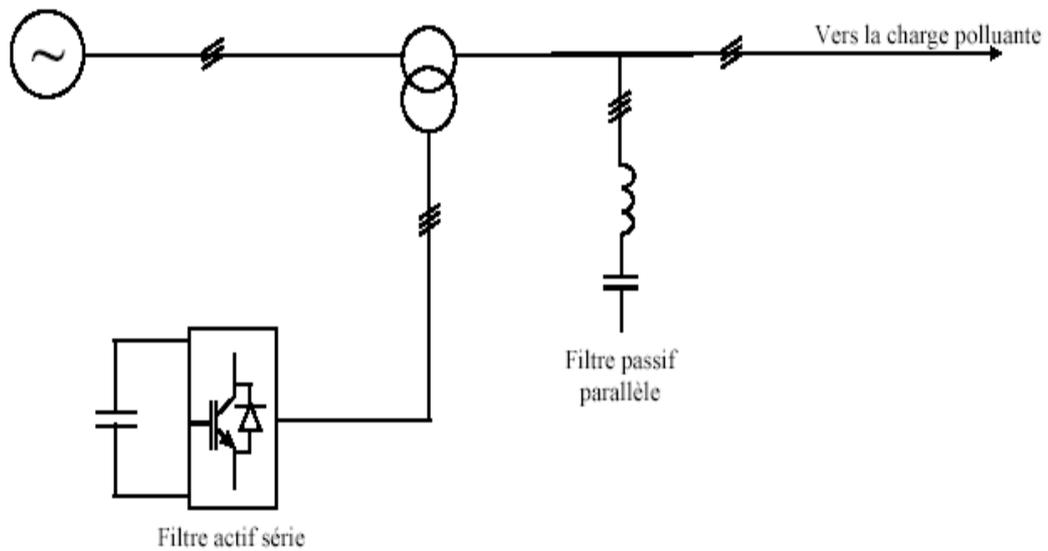


Figure 2.8 : Filtre actif série et filtre passif parallèle

**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.

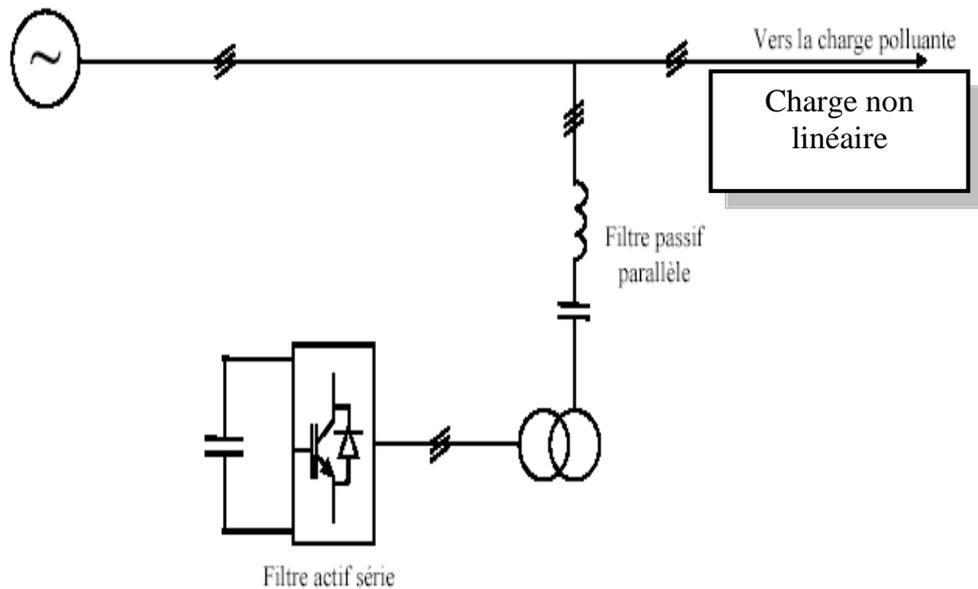


Figure 2.9: Filtre actif série connecté en série avec un filtre passif parallèle

### 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.

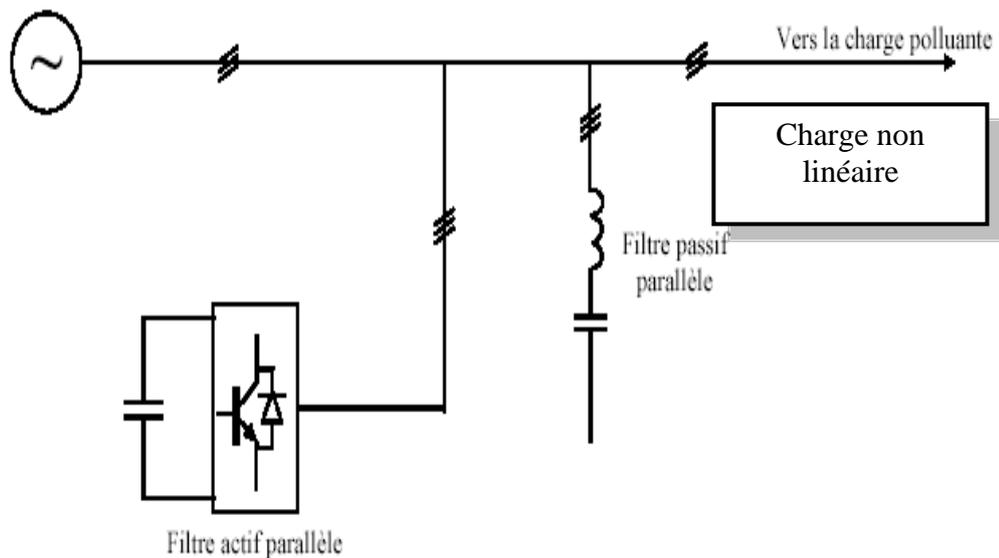


Figure 2.10 : Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle

#### 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 engendrées 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-	amélioration de la forme de la tension	pas d'amélioration de la forme du courant, pas
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

## Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre un ensemble de 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 même, 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 propositions et solutions de dépollution consistent à associer des filtres actifs et passifs pour la recherche d'un compromis entre l'efficacité de compensation et le coût. Ces solutions sont très prometteuses dans le futures.

## *Chapitre 03*

### 3.1 Introduction

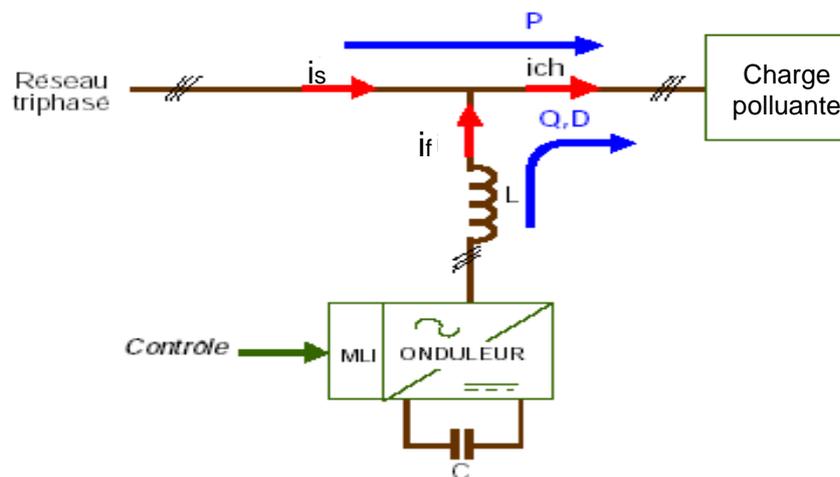
Afin de réduire les harmoniques au niveau du réseau électrique, nous proposons dans ce travail le filtrage actif parallèle, car il représente des avantages, comme l'adaptation aux variations de la charge polluante.

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. Ceci a l'avantage d'éliminer de façon active tout ou une partie des harmoniques de courant.

Nous proposons donc d'étudier 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

Sur la figure 3.1, le schéma de principe du filtre actif parallèle est représenté, il doit fournir la puissance déformante et la puissance réactive. Par conséquent, 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.

Généralement , 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.

La première loi de Kirchhoff donne que le courant fourni par la source est égale à

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

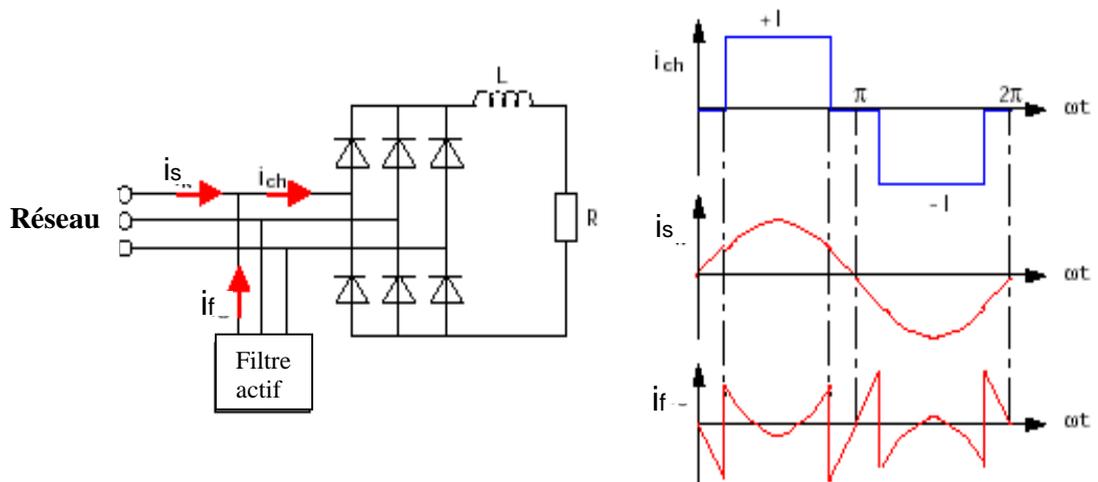
La source fournit la puissance active absorbée par la charge

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

Le filtre actif parallèle fournit la puissance réactive et déformante

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

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

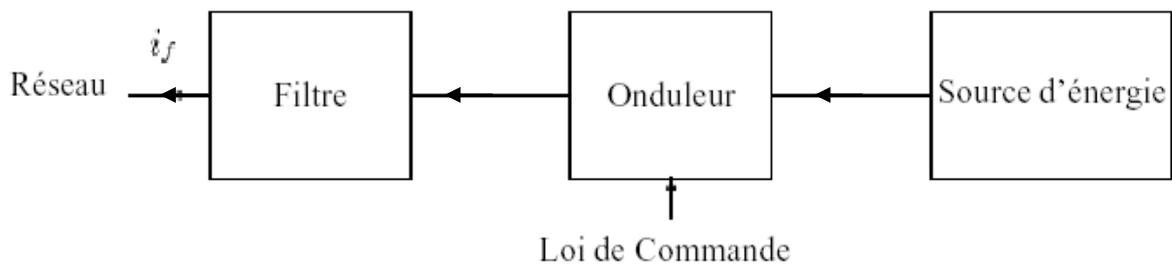


**Figure 3.2:** Schéma de principe de l'ensemble réseau électrique, charge polluante et filtre actif et formes d'ondes des courants respectifs.

Notons 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 composés de deux parties distinctes : une partie puissance , une partie commande figure 3.3 . La première est composée 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**

- 1/ d'un onduleur à base d'interrupteurs de puissance, commandables à l'ouverture et à la fermeture GTO, IGBT, MOSFET, etc.... avec des diodes de roue libre
- 2/ d'un circuit de stockage d'énergie
- 3/ d'un filtre de sortie

- **La partie commande est constituée :**

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

#### 3.3.1 Etude de la partie puissance

- **La structure tension**

L'onduleur de tension connecté en parallèle au réseau est représenté par la (figure 3.4) [23]. La capacité  $C_f$  a le rôle d'une source de tension continue. La tension à ses bornes  $V$  doit être positive et maintenue quasiment constante. Ses variations doivent être faibles d'une part , pour

ne pas dépasser la limite en tension des semi-conducteurs qui constituent les interrupteurs, et d'une 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 assignés à ce filtre: d'une part transformer les variations de tension  $V_f$  en variations de courant, et d'une 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].

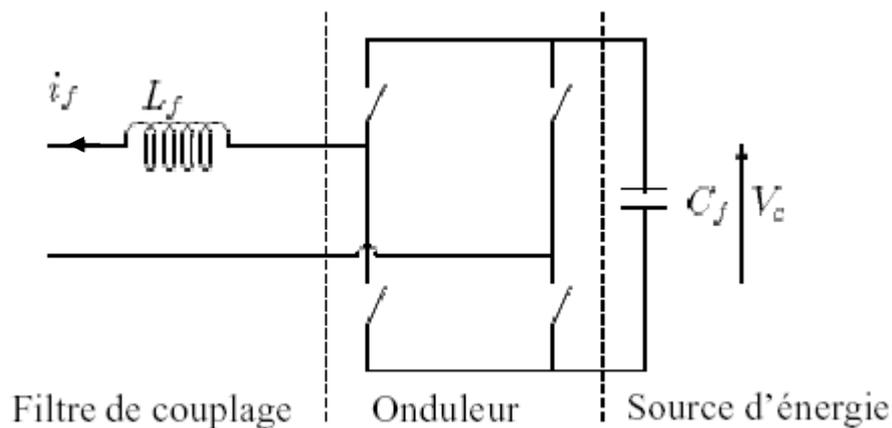


Figure 3. 4: Onduleur de tension

- **La structure courant**

La figure 3.5 représente le schéma de principe d'un onduleur de courant [25]. L'inductance joue le rôle d'une source de courant continu. Le courant  $i_L$  traversant cette inductance est maintenu presque 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 imposée par le choix de  $L_f$  et de  $C_f$ .

Ces derniers, peuvent être dimensionnés de manière à diminuer la fréquence de commutation des interrupteurs de l'onduleur.

Les interrupteurs sont unidirectionnels. Ils sont composés par des transistors commandés à

l'ouverture et à la fermeture. Ces interrupteurs ne pouvant supporter de tension inverse, ils nécessitent une diode en série [26].

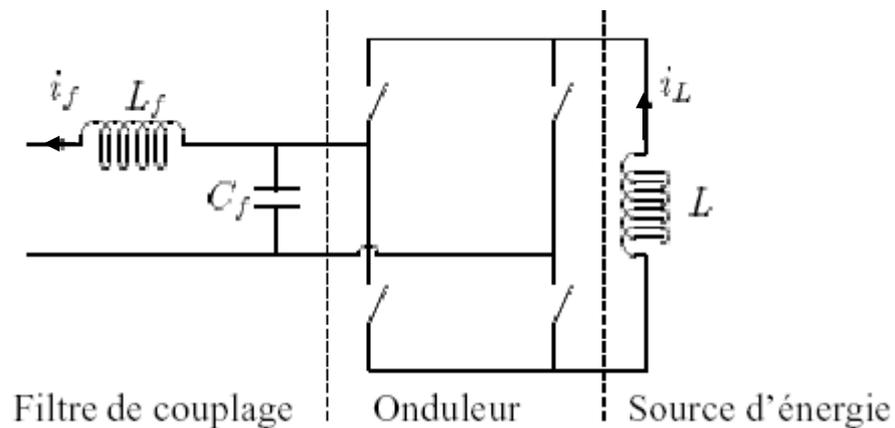


Figure 3. 5: Onduleur de courant

## - Comparaison des deux structures

### 1/Dimensionnement des circuits de stockage

Pour les petites puissances ; le stockage de l'énergie dans un condensateur (structure tension) est plus efficace et moins coûteux . En revanche ; pour les grandes puissances une inductance (structure courant) est plus adéquate.

### 2/Protection contre les surtensions et les surintensités

Les transistors qui constituent , un onduleur de tension doivent être protégés contre les Sur-intensités tandis qu'un onduleur de courant nécessite une protection contre les sur-tensions. 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 [27] . Cependant ; nous avons retenu cette structure par la suite.

## 3.4 Stratégie de commande du filtre actif parallèle

Afin de contrôler le filtre actif parallèle, nous devons en premier connaître les courants harmoniques de la charge polluante , qui sont utilisés comme références du filtre actif parallèle . Cependant ; la stratégie de commande du FAP est basée sur la détection des courants perturbateurs dans le domaine temporel . Trois méthodes d'identification des courants

---

perturbateurs peuvent être utilisées [28] :

- 1) identification à partir de la détection du courant de la charge polluante .
- 2) identification à partir de la détection du courant de la source .
- 3) identification à partir de la détection de la tension de la source .

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

La première ; utilise la transformée de Fourier rapide dans le domaine fréquentiel , pour déterminer les harmoniques de courant . Cette méthode est bien adaptée aux charges où le contenu harmonique ne varie pas beaucoup . Elle a aussi l'avantage de sélectionner les harmoniques individuellement . Notons ; que cette méthode nécessite une grande capacité de calcul [29].

La deuxième utilise ; 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 sont 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 [30].

Dernièrement , des nouvelles méthodes d'identification donnent le choix de compenser un , plusieurs ou 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, on peut compenser à la fois tous les courants perturbateurs, tout en offrant la possibilité de réguler la tension de la charge [ 31]. Cette méthode , qui ne peut être utilisée que numériquement, n'offre pas une compensation parfaite de la puissance réactive , de même que la régulation de tension n'offre pas une bonne qualité à la tension de la charge.

Une autre méthode, dite , méthode de détection synchrone, reposant sur la transformation de Park a été proposée [32] . Cette méthode est basée sur le calcul de la pulsation fondamentale obtenue par une PLL . Ceci demande une précision nette du calcul de cette pulsation afin de ne pas avoir des courants identifiés faux .

Par conséquent, la méthode d'identification la plus utilisée est celle appelée méthode des puissances réelles et imaginaires instantanées [33]. Cette méthode donne l'avantage de choisir la perturbation à compenser avec netteté, rapidité et facilité d'implantation. Pour toutes ces raisons nous avons opté pour cette méthode d'identification pour le reste de notre étude. Afin de pouvoir compenser les courants harmoniques, les courants déséquilibrés et la puissance réactive conjointement ou individuellement, cette méthode nous a semblé la mieux adaptée. 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 [34] est souvent utilisée pour compenser les courants harmoniques et la puissance réactive.

### 3.5 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 (3.5).

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (3.5)$$

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 :

$$\begin{bmatrix} V_o \\ V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{s1} \\ V_{s2} \\ V_{s3} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Et les courants par la relation :

$$\begin{bmatrix} I_o \\ I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{s1} \\ I_{s2} \\ I_{s3} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

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:

$$\begin{aligned} P(t) &= V_{s1} I_{s1} + V_{s2} I_{s2} + V_{s3} I_{s3} = p(t) + p_0(t) \\ p(t) &= V_{\alpha} I_{\alpha} + V_{\beta} I_{\beta} \\ p_0(t) &= V_0 I_0 \end{aligned} \quad (3.8)$$

avec

$p(t)$  la puissance réelle instantanée,

$p_0(t)$  la puissance homolaire instantanée.

L'avantage de la transformation  $\alpha$ - $\beta$ -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 :

$$q(t) = -\frac{1}{\sqrt{3}} [(V_{s1} - V_{s2}) I_{s3} + (V_{s2} - V_{s3}) I_{s1} + (V_{s3} - V_{s1}) I_{s2}] = V_{\alpha} I_{\beta} - V_{\beta} I_{\alpha} \quad (3.9)$$

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

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & V_{s\beta} \\ -V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{\alpha} \\ I_{\beta} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

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 :

$$\begin{cases} p = \bar{p} + \tilde{p} \\ q = \bar{q} + \tilde{q} \end{cases} \quad (3.11)$$

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.

### 3.6 Calcul des courants perturbateurs.

En inversant la relation (3.10), nous pouvons déterminer les courants dans le repère  $\alpha$ - $\beta$  comme le montre l'équation (3.11) :

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{V_{s\alpha}^2 + V_{s\beta}^2} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

En considérant les équations (3.11) et (3.12), nous pouvons décomposer le courant dans le repère  $(\alpha$ - $\beta)$  en trois composantes, active et réactive à la fréquence fondamentale et les harmoniques. Ceci conduit à:

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ 0 \end{bmatrix}}_{\text{courant actif}} + \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ -q \end{bmatrix}}_{\text{courant réactif}} + \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix}}_{\text{courants harmoniques}} \quad (3.13)$$

courant actif                  courant réactif                  courants harmoniques

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  $(\alpha$ - $\beta)$  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  $(\alpha$ - $\beta)$  inverse donnée par la relation (3.14) :

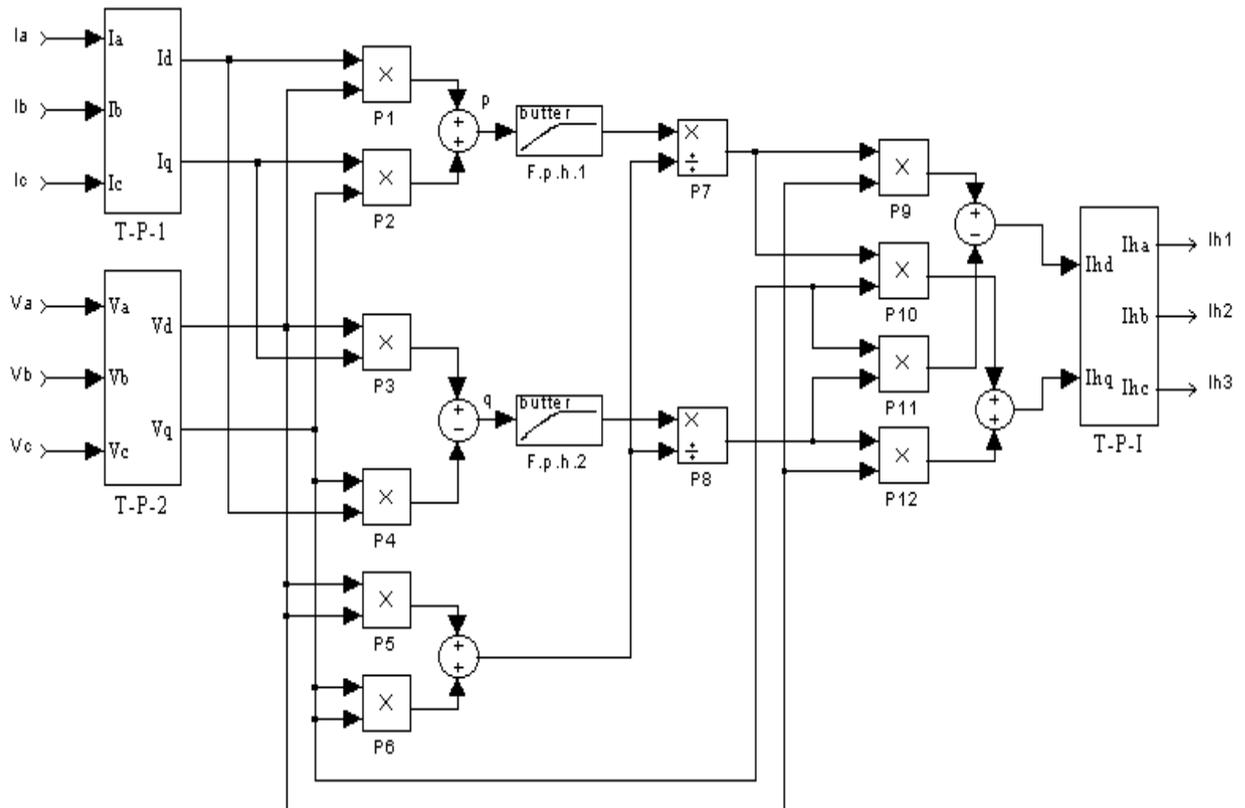
$$\begin{bmatrix} I_{ref1} \\ I_{ref2} \\ I_{ref3} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

avec

$I_\alpha, I_\beta$  courants perturbateurs calculés dans le repère  $\alpha$ - $\beta$  à partir des courants réactifs et harmoniques de la relation (3.13).

### 3.7 Algorithme d'identification.

La figure 3.6 illustre les différentes étapes de calcul permettant l'obtention des composantes harmoniques du courant d'une charge non-linéaire.



**Figure 3.6:** 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 [35].

### 3.8 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.

### 3.8.1 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 :

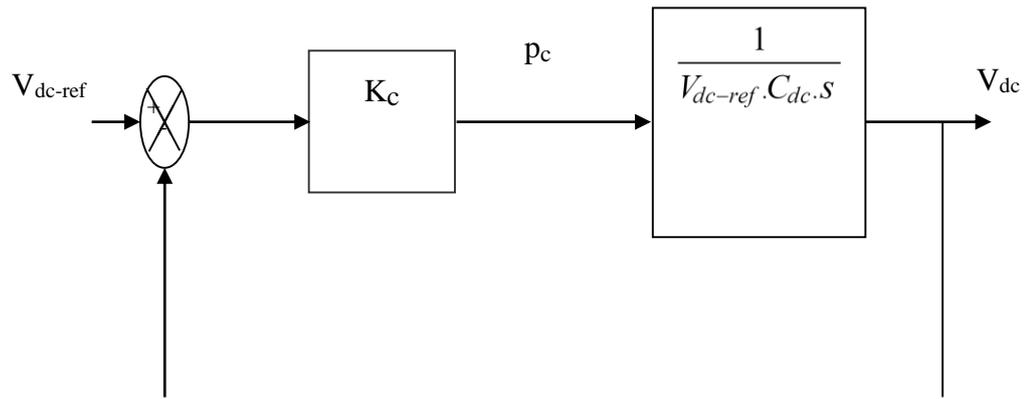
$$P_c = \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{2} C_{dc} \cdot V_{dc}^2 \right) \quad (3.15)$$

Notons que la relation (3.15) 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 :

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

$$V_{dc}(s) = \Rightarrow \frac{P_c(s)}{V_{dc-ref} \cdot C_{dc} \cdot s} \quad (3.16)$$

A partir de la relation (3.16), 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 3.7 Le choix du paramètre  $K_c$  aura pour objectif d'obtenir un temps de réponse minimal [36].



**Figure 3.7:** Boucle de régulation de la tension continue

### 3.8.2 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  $I_{inj}$ .

$$L_f \cdot \frac{d}{dt} I_{inj} = V_f - V_s \quad (3.17)$$

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

$$\Delta I_f = I_{ref} - I_{inj} \quad (3.18)$$

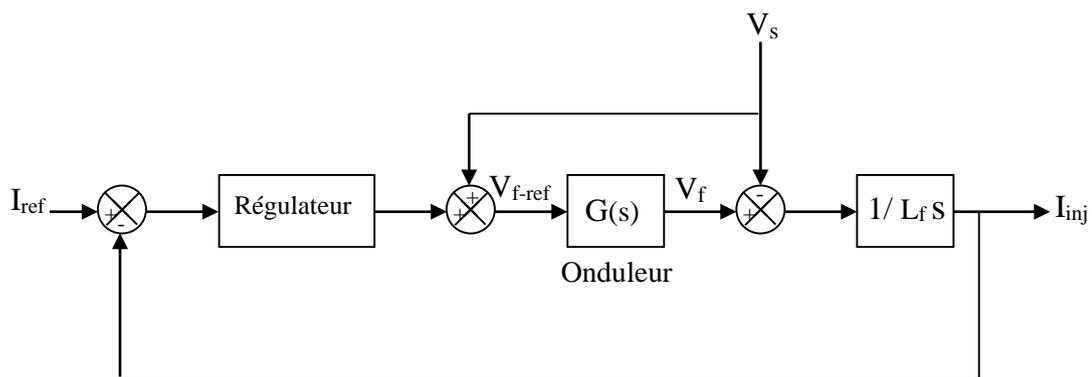
A partir des équations (4.13) et (4.14), nous obtenons l'expression ci-dessous :

$$L_f \cdot \frac{d}{dt} \Delta I_f = (V_s + L_f \frac{d}{dt} I_{ref}) - V_f \quad (3.19)$$

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 :

$$V_{f-ref} = V_s + L_f \frac{d}{dt} I_{ref} \quad (3.20)$$

L'écart entre  $V_{f-ref}$  et  $V_f$  produit alors une erreur sur le courant. Selon la relation (3.20), 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 3.8



**Figure 3.8:** 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 :

$$G(s) = K \frac{1}{1 + \tau \cdot s} \quad (3.21)$$

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

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

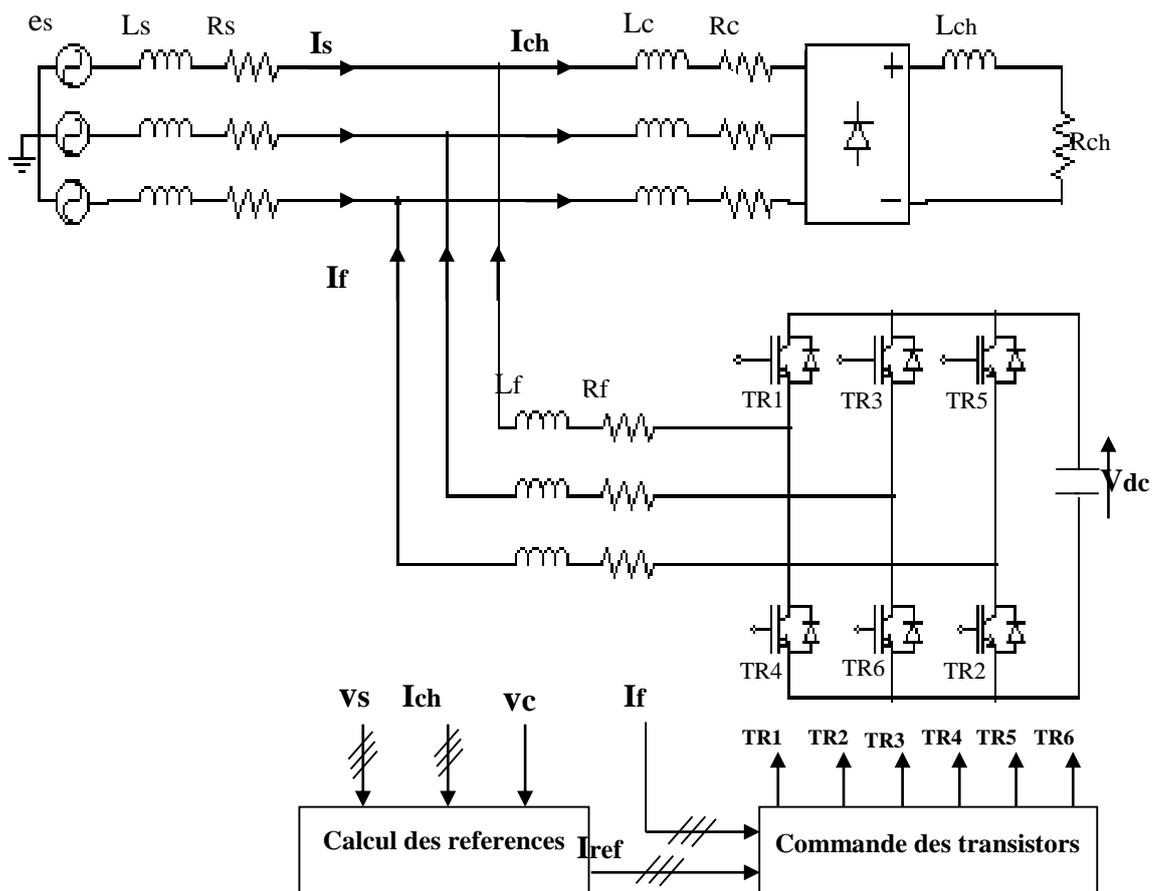
au rejet des perturbations [37].

### 3.9 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.

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

La figure 3.9 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 3.9:** Schéma synoptique de l'ensemble réseau, filtre actif parallèle et charge polluante

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

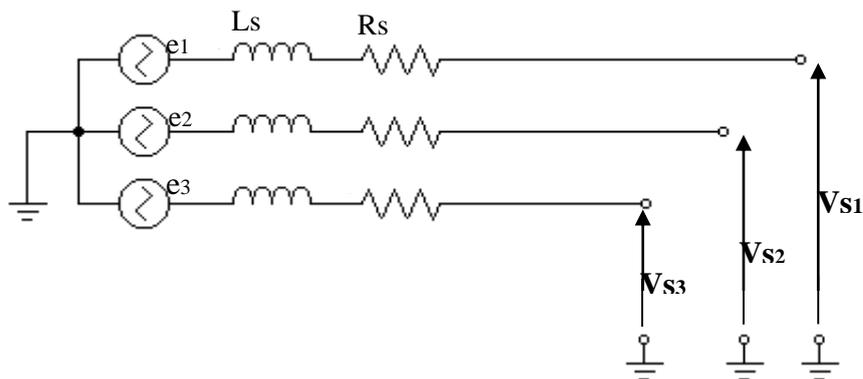
La modélisation d'un système revient à trouver les équations mathématiques qui décrivent son fonctionnement [25].

#### 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).

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

$$Z_s = R_s + jL_s\omega \quad (3.22)$$

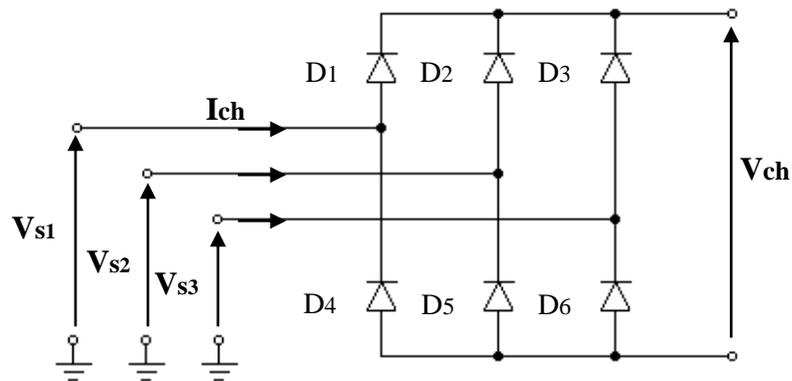


**Figure 3.10:** Schéma synoptique d'un réseau triphasé.

#### 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 3.11, 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-

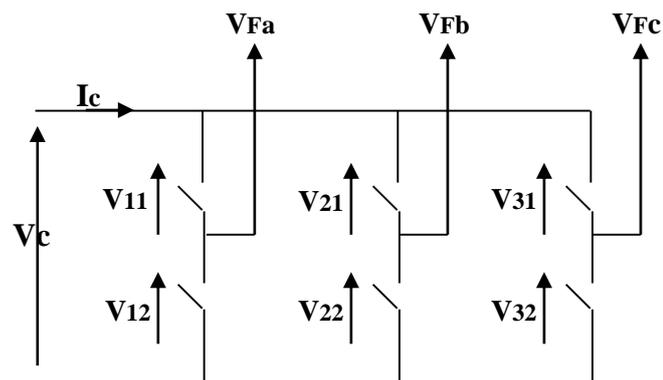
conducteurs sont considérés parfaits).



**Figure 3.11:** 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 3.12:** Présentation schématique d'un onduleur triphasé.

- **Fonction de connexions :**

Soit  $i = 1, 2, 3$

$j = 1, 2$

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

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

d'où

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

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.

$$\begin{cases} V_{Fab} = V_{21} - V_{11} \\ V_{Fbc} = V_{31} - V_{21} \\ V_{Fca} = V_{11} - V_{31} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} V_{Fab} = (F_{11} - F_{21}) \cdot V_c \\ V_{Fbc} = (F_{21} - F_{31}) \cdot V_c \\ V_{Fca} = (F_{31} - F_{11}) \cdot V_c \end{cases} \quad (3.23)$$

d'où

$$\begin{bmatrix} V_{Fab} \\ V_{Fbc} \\ V_{Fca} \end{bmatrix} = V_c \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_{11} \\ F_{21} \\ F_{31} \end{bmatrix} = V_c \cdot \begin{bmatrix} F_{ab} \\ F_{bc} \\ F_{ca} \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

Les fonctions de conversions composées sont :

$$\begin{cases} F_{ab} = F_{11} - F_{21} \\ F_{bc} = F_{21} - F_{31} \\ F_{ca} = F_{31} - F_{11} \end{cases} \quad (3.25)$$

- **Fonctions de conversions simples :**

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

$$\begin{bmatrix} V_{Fa} \\ V_{Fb} \\ V_{Fc} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{Fab} \\ V_{Fbc} \\ V_{Fca} \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

d'où

$$\begin{bmatrix} V_{Fa} \\ V_{Fb} \\ V_{Fc} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot V_c \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{11} \\ F_{21} \\ F_{31} \end{bmatrix} = V_c \begin{bmatrix} F_a \\ F_b \\ F_c \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

Les fonctions de conversion simples s'écrivent alors :

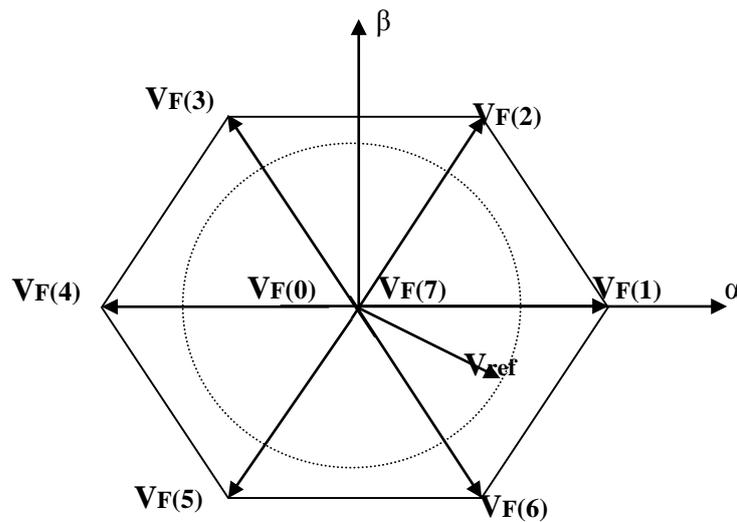
$$\begin{cases} F_a = \frac{1}{3} \cdot (2F_{11} - F_{21} - F_{31}) \\ F_b = \frac{1}{3} \cdot (-F_{11} + 2F_{21} - F_{31}) \\ F_c = \frac{1}{3} \cdot (-F_{11} - F_{21} + 2F_{31}) \end{cases} \quad (3.28)$$

- **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 3.1 et la figure 3.12 [25, 30, 31, 32].

**Tableau 3.1 :** Tensions générées par l'onduleur.

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



**Figure 3.13:** Représentation vectorielle des tensions générées par l'onduleur

Où  $\mathbf{V}_{ref}$  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 3.14.

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 :

$$\begin{bmatrix} V_{Fa} \\ V_{Fb} \\ V_{Fc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{S1} \\ V_{S2} \\ V_{S3} \end{bmatrix} + R_f \cdot \begin{bmatrix} I_{Fa} \\ I_{Fb} \\ I_{Fc} \end{bmatrix} + L_f \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{Fa} \\ I_{Fb} \\ I_{Fc} \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

$$\begin{bmatrix} V_{S1} \\ V_{S2} \\ V_{S3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} - R_{cc} \cdot \begin{bmatrix} I_{S1} \\ I_{S2} \\ I_{S3} \end{bmatrix} - L_{cc} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{S1} \\ I_{S2} \\ I_{S3} \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

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 [41].

Finalement, ces simulations nous permettront d'évaluer la performance et la rapidité de la méthode des puissances réelles et imaginaires avec la commande à modulation de largeur d'impulsion.

### 3.10 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 04*

## 4.1 Introduction

La qualité de l'onde électrique est loin d'être parfaite, due à l'utilisation des charges non linéaires qui génèrent des harmoniques de courant et consomment de la puissance réactive. Cette qualité d'onde peut être altérée par plusieurs types de perturbations. Connaissant les origines et les effets de la pollution harmonique sur les réseaux électriques, cette étude a pour solution de mettre en œuvre un système de filtres actifs de puissance avec un onduleur à trois Niveaux à commande MLI hystérésis 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 coté réseau. La régulation et la stabilité de la source d'alimentation du filtre lors d'une variation de la charge est assurée par un PI classique puis par un  $PI^\alpha$  fractionnaire. Une étude comparative a été effectuée et des résultats ont été validés et améliorés sous l'environnement Matlab/Simulink.

## 4.2 Problématique

L'utilisation des appareils électriques est de plus en plus intense que ce soit pour des applications industrielles ou domestiques. Cependant la plupart de ces appareils tels que les redresseurs, les gradateurs, les matériels informatique, les appareils de climatisation ou encore les éclairages à base de tube fluorescents absorbent des courants non sinusoïdaux, ce qui provoque des distorsions harmoniques dans l'ensemble du réseau électrique. Ces harmoniques peuvent perturber le fonctionnement normal de certains équipements électriques.

Les méthodes classiques de réduction des harmoniques impliquent l'utilisation des filtres passifs constituent une solution possible et usuelle [42]. Cependant, ces dispositifs ont montré leurs limites et inconvénients comme : manque d'adaptabilité lors de variations de l'impédance du réseau, de la charge et résonance possible avec l'impédance du réseau et dans certains cas défavorables où cette résonance est excitée, celle-ci peut entraîner une tension harmonique élevée et un courant harmonique important dans la capacité du filtre et dans le réseau. Ainsi, cette solution présente un inconvénient majeur qui peut être intolérable dans ces circonstances particulières.

Dans ce contexte et afin de répondre aux besoins grandissant de l'industrie et la croissance importante de la pollution harmonique et d'éviter les inconvénients des filtres passifs a conduit à l'émergence de nouvelles structures dites les filtres actifs.

Plusieurs topologies des filtres actifs ont été proposées dans la littérature [43] [44], la solution consiste à connecter le filtre actif en parallèle avec le système polluant, le principe du filtre actif parallèle consiste à générer des courants harmoniques en opposition de phase à ceux existants sur le réseau. Le courant absorbé par les charges polluantes est non-sinusoidal, alors que le courant généré par le filtre actif parallèle est tel que le courant du réseau soit sinusoidal,

L'apparition de nouveaux composants semi-conducteurs, comme les thyristors GTO et les transistors *IGBT*, a permis d'envisager de nouvelles solutions de compensation des perturbations du réseau électriques. Ils peuvent également être utilisés comme complément aux solutions traditionnelles de dépollution. Le rôle d'un filtre actif est de compenser en temps réel les perturbations, en tout ou en partie, présentes dans les réseaux électriques.

Dans la littérature il existe plusieurs structures, à savoir [45]:

- Les filtres actifs parallèles,
- Les filtres série,
- Les filtres combinés parallèle-série,
- Les filtres à structures hybrides actif- passif .

### 4.3 Filtre actif parallèle à onduleur trois niveaux NPC

Dans cette étude nous nous sommes intéressés beaucoup plus au filtre actif parallèle appelé aussi compensateur shunt, il est connecté en parallèle sur le réseau de distribution voir figure 5.1. Son indépendance vis-à-vis de la source et de la charge lui assure auto-adaptabilité, fiabilité et performance. Le filtre actif parallèle empêche les courants harmoniques, réactifs et déséquilibrés de circuler à travers l'impédance du réseau [46]. Il améliore ainsi les taux de distorsion en courant et en tension.

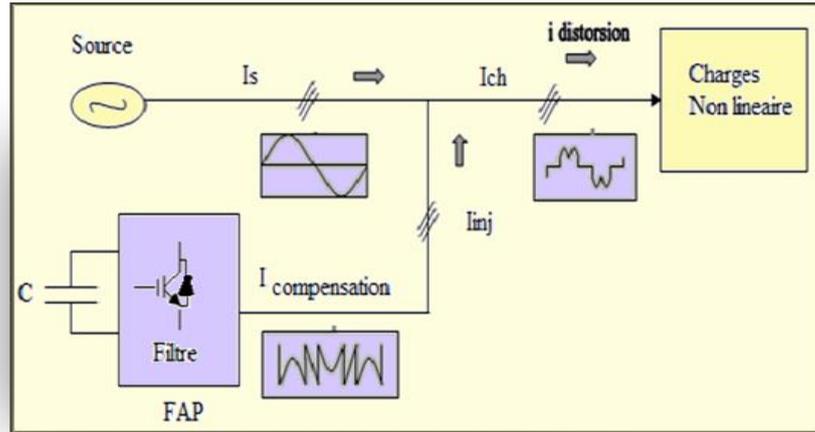


Figure 4.1: Principe du Filtre Actif Parallèle

La charge polluante composée d'un redresseur alimentant une charge RL qui délivre un courant polluant (voir figure 4.2). Nous remarquons que les courants de trois lignes à l'entrée du redresseur  $I_{abc}$  ne sont pas sinusoïdaux, ils sont sous une forme rectangulaire d'une part, et d'autre part la valeur obtenue du taux de distorsion harmonique THD de ces courants est très élevée (représentée par la figure 4.3),  $THD = 22.62\%$ . Les amplitudes de rang 5<sup>e</sup>, 7<sup>e</sup>, 11<sup>e</sup> et la 13<sup>e</sup> sont très élevées, les autres rangs d'harmoniques à des amplitudes faibles (<5%).

Tableau 4.1 : Données de l'alimentation

$V_s$	$f$	$R_s$	$L_s$	$R_c$	$L_c$
380V	50Hz	0.2	0.01mH	0.02	1.5mH

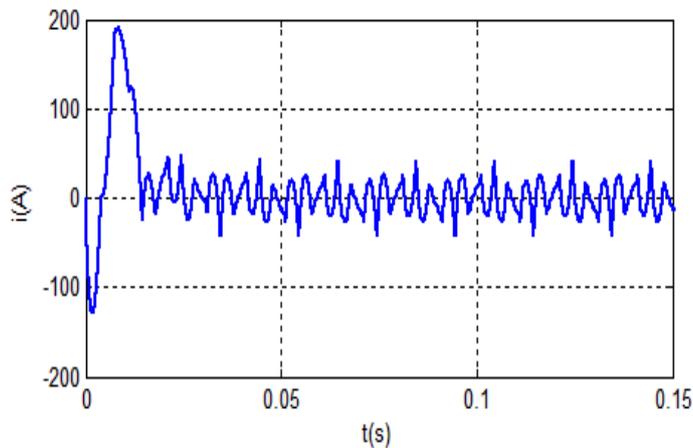


Figure 4.2: Forme de courant d'harmonique d'une phase à éliminer pour dépolluer le réseau

Tableau 4.2 : Données de la charge non- linéaire

$R_d$	$L_d$	$R_{ad}$
$2\Omega$	2mH	$4\Omega$

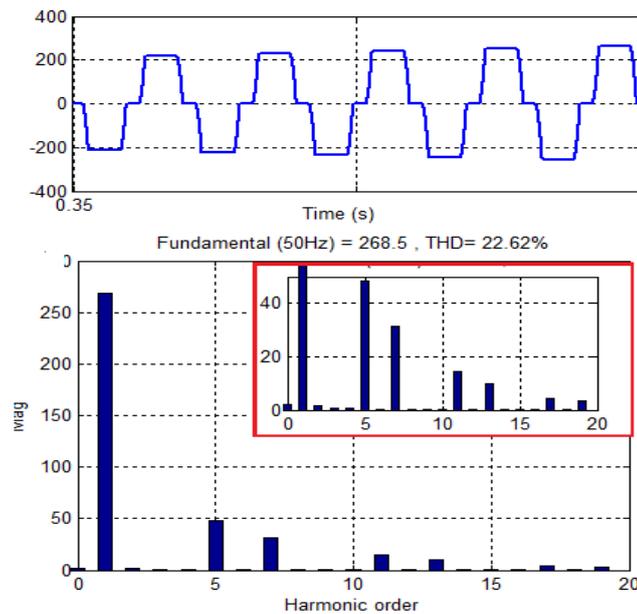


Figure 4.3: Charge polluante avant filtrage

### 4.3.1 Onduleur à trois niveaux

Afin de diminuer le THD nous allons utiliser un filtre actif parallèle (FAP). Le système étudié est composé de deux parties : la partie puissance et la partie contrôle-commande. La partie puissance est constituée : d'un onduleur de tension multi-niveaux offrent d'énormes avantages par rapport aux onduleurs deux niveaux. Ces avantages sont que la répartition de la tension est obtenue de manière naturelle en régime établi, ce qui permet de commuter chaque semi-conducteur indépendamment des autres. Ceci rend le convertisseur plus robuste et plus performant pendant les commutations. La tension commutée est d'amplitude réduite et la commutation est donc plus simple à gérer et le nombre de tension générée est plus élevé, moins d'harmonique de distorsion et faible fréquence de commutation.

La figure 4.3, présente le schéma général avec l'onduleur de tension trois niveaux, de structure appelé à point neutre "clampé" (NPC Neutral-Point-Clamped) [47] [48] à base d'interrupteurs de puissance, commandables à l'amorçage et au blocage avec des diodes en antiparallèle, d'un circuit de stockage d'énergie et d'un filtre de sortie destiné à réaliser l'interface entre le réseau et l'onduleur. La partie commande, sert au contrôle de la commutation des éléments semi-conducteurs formant l'onduleur de la partie puissance. Au moyen de stratégies de contrôle appropriées, il est possible de générer des signaux harmoniques à la sortie de l'onduleur servant à compenser ceux présents sur le réseau électrique.

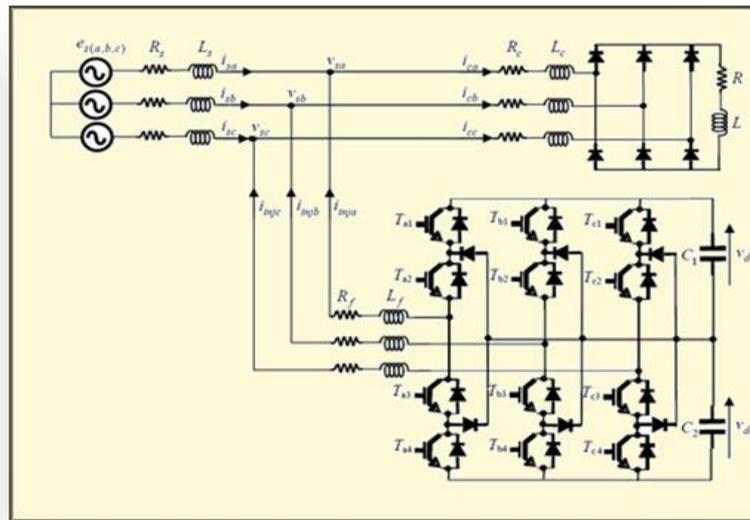


Figure 4.4: Filtre actif à base d'onduleur à trois niveaux

L'onduleur comporte deux sources de tension continues et trois bras symétriques. Chaque bras est constitué de quatre interrupteurs bidirectionnels et deux diodes médianes, permettant d'avoir le niveau zéro de la tension de sortie de l'onduleur. La structure N.P.C utilise deux tensions d'entrée. Elle consiste à créer un point milieu sur l'étage de tension continue de valeur  $U_c$ , permettant de générer des créneaux d'amplitude  $-U_c/2$ ,  $0$ ,  $+U_c/2$  dont la combinaison permet d'avoir une onde proche de la sinusoïde qu'avec la structure classique d'onduleur à deux niveaux [49]. Pour une tension d'entrée  $U_c$ , les interrupteurs d'un onduleur à trois niveaux supportent la moitié de la tension supportée par ceux d'un onduleur à deux niveaux.

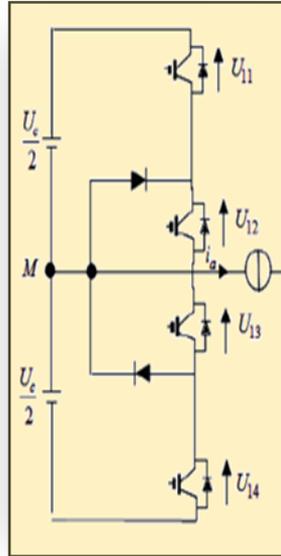


Figure 4.5: Bras d'onduleur à trois niveaux

Un filtre de sortie a été conçu pour assurer la liaison entre le réseau et l'onduleur de tension. Il est composé d'une inductance  $L_f$  et d'une résistance interne  $R_f$ . Une valeur relativement faible de  $L_f$  permet d'obtenir une bonne dynamique du FAP en satisfaisant l'égalité.

$$\frac{di_f}{dt} = \frac{di_{ref}}{dt} \quad (4.1)$$

Dans la première étape, la tension de réseau et le courant de la charge sont détectés à l'aide de transformateurs de mesures puis le courant de référence est déterminé à partir des méthodes d'identifications et finalement, les signaux de commutation de semi-conducteur de l'onduleur de l'FAP sont générés en utilisant, l'hystérésis MLI [50].

Les courants de charge réels sont détectés et comparés avec leurs composants non actifs. Cette technique peut être caractérisée par une bande d'hystérésis qui est le seul paramètre de contrôle de courant de chaque bras de l'onduleur. Les signaux de sortie des comparateurs à hystérésis sont utilisés pour commander l'ordre de commutation des interrupteurs de chaque bras de l'onduleur (voir la figure 4.6).

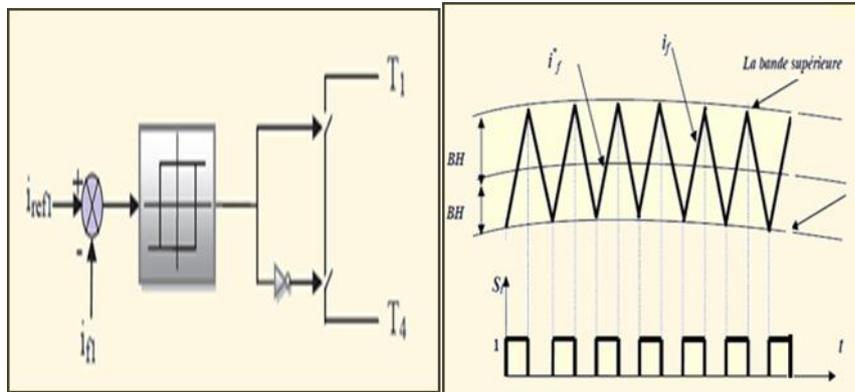


Figure 4.6: Commande des interrupteurs par hystérésis

L'étape suivante consiste à générer les courants de références, que l'onduleur doit injecter dans le point de raccordement, un contrôle des courants injectés par l'onduleur est effectué de sorte qu'ils suivent le plus fidèlement possible ceux de la référence. L'onduleur est tenu de fournir en tout temps les courants de compensation harmonique dans le réseau. Et pour atteindre ce but, il faut qu'il soit alimenté par une source d'énergie stable.

### 4.3.2 Identification des signaux harmoniques de référence par la méthode des puissances instantanées

Cette méthode d'identification des courants harmoniques, consiste à éliminer la composante continue des puissances active et réactive instantanées ce qui est relativement facile à réaliser [51]. La méthode des puissances instantanées introduite par H.Akagi [52] exploite la transformation de concordia des tensions aux points de raccordement du filtre actif parallèle et des courants absorbés par la charge polluante, afin de calculer les puissances réelles et imaginaires instantanées. Cette méthode est validée aussi bien en régime permanent qu'en régime transitoire. Les mesures des tensions et des courants exprimés sous forme triphasée sont converties en système biphasé équivalent à l'aide de la transformée de concordia:

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

Et la relation des courants ci-dessous :

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

Les puissances réelles et imaginaires instantanées, notées respectivement  $p$  et  $q$ , sont définies par la relation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_\alpha & V_s \\ -V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

En remplaçant les tensions et les courants biphasés par leurs homologues triphasés, nous obtenons :

$$q = V_\alpha i_\beta - V_\beta i_\alpha = \frac{1}{\sqrt{3}} [(V_{sa} - V_{sb})i_{ca} + (V_{sa} - V_{sc})i_{cb} + (V_{sb} - V_{sa})i_{cc}] \quad (4.5)$$

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 :

$$\begin{cases} p = \bar{p} + \tilde{p} \\ q = \bar{q} + \tilde{q} \end{cases} \quad (4.6)$$

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.

En inversant la relation (4.6), nous pouvons recalculer les courants dans le repère  $\alpha\beta$  comme le montre l'équation :

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_\alpha & V_\beta \\ -V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

En considérant les équations (4.7) et (4.8), nous pouvons séparer le courant dans le repère en trois composantes, active et réactive à la fréquence fondamentale et les harmoniques.

Ceci conduit à :

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix}}_{\text{Courant actif}} \begin{bmatrix} \bar{P} \\ 0 \end{bmatrix} + \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix}}_{\text{courant réactif}} \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{Q} \end{bmatrix} + \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ -V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix}}_{\text{courant harmonique}} \begin{bmatrix} \tilde{P} \\ \tilde{Q} \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

$$\Delta = V_s^2 + V_\beta^2 \quad (4.9)$$

Il est évident que pour pouvoir calculer les trois composantes du courant indépendamment les unes des autres, il faut tout d'abord pouvoir isoler les puissances actives et réactives  $\bar{P}$  et  $\bar{Q}$  liées respectivement à la composante fondamentale du courant actif et réactif [53].

Cette expression montre donc que l'identification des différentes composantes du courant dans le repère  $(\alpha-\beta)$  revient à séparer des 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  $(\alpha - \beta)$  inverse donnée par la relation (4.10).

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

avec  $I_\alpha$ ,  $I_\beta$  courants perturbateurs calculés dans le repère  $\alpha-\beta$  à partir des courants réactifs et harmoniques.

Tableau 4.3 : Données du Filtre actif parallèle

$L_f$	$R_f$	$V_{dc}$	$C_{dc}$
0.15mH	5 mΩ	800V	4.4mF

#### 4.4 Régulation de la tension $V_{DC}$

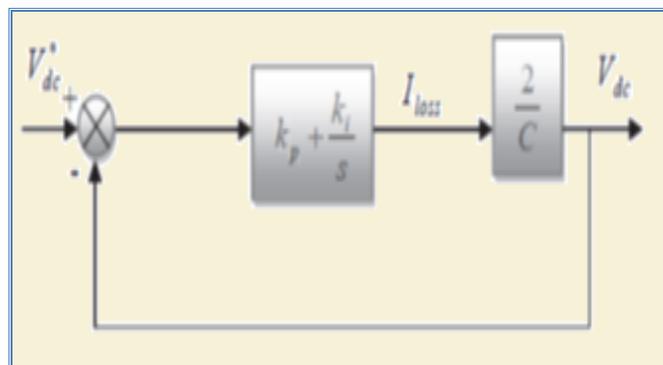
L'onduleur est tenu de fournir en tout temps les courants de compensation harmonique dans le réseau. Et pour atteindre ce but, il faut qu'il soit alimenté par une source d'énergie stable. La boucle d'asservissement de la tension  $V_{DC}$  permet de réaliser cette stabilité.

##### 4.4.1 Régulation de la tension $V_{DC}$ à l'aide des régulateur PI

La boucle d'asservissement de la tension  $V_{DC}$  a pour but de réaliser cette stabilité. Pour cela la régulation du niveau de tension  $V_{dc}$  est faite par un régulateur de type proportionnel intégral (PI). Le courant de référence additionnel  $I_{loss}$  est généré par le régulateur PI comme suit :

$$I_{loss} = K_p (V_{dc}^* - V_{dc}) + K_i \int (V_{dc}^* - V_{dc}) dt \quad (4.11)$$

Avec  $K_p$  et  $K_i$  les termes du régulateur PI. Ils sont déterminés à partir de l'étude de la fonction de transfert en boucle fermée élaborée sur la figure 4.7.

Figure 4.7: Boucle de réglage de tension continu  $V_{dc}$ .

La fonction de transfert est donnée par :

$$\frac{V_{dc}}{V_{dc}^*} = \frac{2\varepsilon w_c s + w_c^2}{s^2 + 2\varepsilon w_c s + w_c^2} \quad (4.12)$$

Où le coefficient d'amortissement  $\varepsilon$  et la fréquence de coupure  $w_c$  sont donnés par :

$$\begin{cases} w_c = \sqrt{\frac{2K_i}{C}} \\ \varepsilon = K_p \sqrt{\frac{1}{2K_i C}} \end{cases} \quad (4.13)$$

Après l'injection du courant de référence reproduit par le filtre actif dans le réseau, on peut constater qu'une fois le filtre actif parallèle est mis en marche, le courant du réseau est désormais sinusoïdal. La figure 8 montre le nouveau courant avec un THD % = 2.79 % .

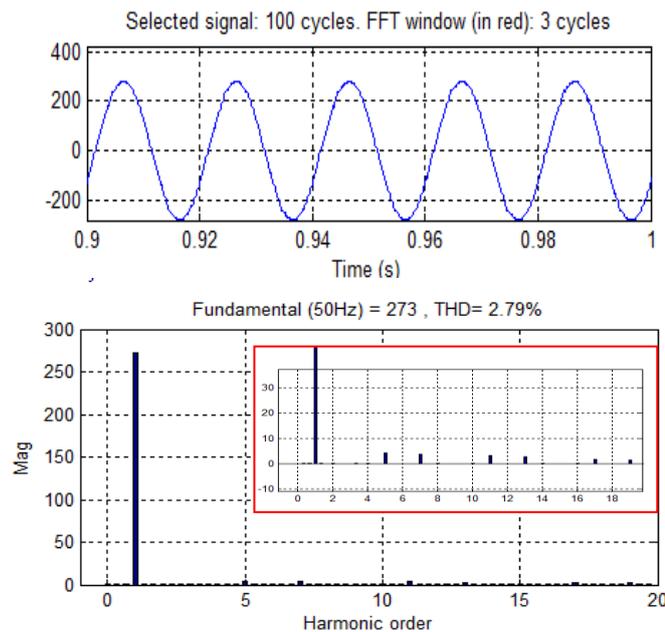


Figure 4.8: Spectre harmonique de courant de source après filtrage avec PI classique

Nous avons varié la charge à  $t= 0.2s$  pour voir le comportement de la tension  $V_{dc}$  nous remarquons que la tension à une petite perturbation puis elle se stabilise voir figure 09.

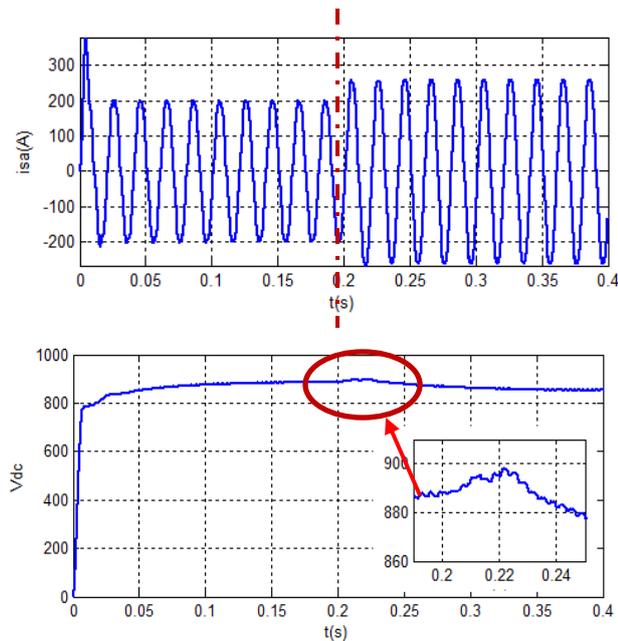


Figure 4.9: la tension  $V_{dc}$  après filtrage avec PI classique

#### 4.4.2 Régulation de la tension $V_{DC}$ à l'aide des régulateur $PI^\alpha$ fractionnaire

Pour remédier à la perturbation de la tension  $V_{dc}$  lors de la variation de la charge nous allons utiliser dans cette section les régulateur fractionnaire .Le calcul fractionnaire dont les origines théoriques sont très anciennes alors que son développement et ses applications sont très récents car ,ce n'est qu'au début des années 1951 , que Davidson et Cole [54] dans leurs travaux sur la relaxation diélectrique dans certains liquides, ont pu mettre à jour des phénomènes naturels dont les modèles faisaient appel à la dérivée d'ordre fractionnaire et l'on exprimé sous la forme d'une équation ,dont le pôle est à puissance fractionnaire (PPF) :

$$G(s) = \frac{1}{(1 + \frac{s}{P_f})^\alpha} \quad (4.14)$$

Où  $\alpha$  serait un réel non nécessairement entier, voire un nombre complexe et  $P$  est le symbole de la transformée de Laplace de la différentiation et  $P_f$  est le pôle fractionnaire (fréquence de coupure). Cette théorie connaît actuellement une grande popularité parmi les chercheurs aussi bien dans les sciences fondamentales qu'en ingénierie. Notre intérêt pour l'introduction de ces systèmes dans les schémas de commande de la chaîne éolienne a été motivé par les très bonnes performances des systèmes d'ordre fractionnaire relativement à celles des systèmes d'ordre entier.

La forme du régulateur fractionnaire est le suivant  $PI^\alpha D^\mu$  c'est une extension du régulateur PID dont la fonction de transfert est :

$$H(p) = K_p + K_i p^{-\alpha} + K_d p^{-\mu} \quad (4.15)$$

Où  $\alpha$  et  $\mu$  sont des nombres réels positifs ;  $K_p$  est le gain proportionnel,  $K_i$  la constante d'intégration et  $K_d$  la constante de différentiation. Il est évident qu'en prenant  $\alpha = 1$  et  $\mu = 1$  on obtient le régulateur PID classique. Logiquement, ce régulateur peut améliorer le niveau de performances du système de commande, vu qu'il présente plus de paramètres de réglage. L'étape clé dans l'implémentation numérique d'une commande d'ordre fractionnaire est l'évaluation numérique ou la discrétisation des dérivations d'ordre fractionnaire  $p^\alpha$ . Un système de commande d'ordre fractionnaire peut être décrit par une fonction de transfert continue de la forme [55] :

$$G(p) = \frac{b_m p^{\beta_m} + b_{m-1} p^{\beta_{m-1}} + \dots + b_0 p^{\beta_0}}{a_n p^{\alpha_n} + a_{n-1} p^{\alpha_{n-1}} + \dots + a_0 p^{\alpha_0}} \quad (4.16)$$

D'où la fonction de transfert discrète du système d'ordre fractionnaire,  $(G(z))$ , peut être obtenue sous la forme :

$$G(z) = \frac{b_m (w(z^{-1}))^{\beta_m} + b_{m-1} (w(z^{-1}))^{\beta_{m-1}} + \dots + b_0 (w(z^{-1}))^{\beta_0}}{a_n (w(z^{-1}))^{\alpha_n} + a_{n-1} (w(z^{-1}))^{\alpha_{n-1}} + \dots + a_0 (w(z^{-1}))^{\alpha_0}} \quad (4.17)$$

Où  $(w(z^{-1}))$  représente l'équivalent discret de l'opérateur de la place  $p$ , exprimé comme une fonction de la variable complexe  $z$  ou l'opérateur de décalage  $z^{-1}$ . Dans le but d'implémenter

des modèles d'ordre fractionnaire dans les schémas de commande présentés dans ce travail, nous utiliserons la méthode appelée "Méthode de la fonction de singularité" développée par Charef et al. [56] Pour un système d'ordre fractionnaire du premier ordre (single fractal system) la méthode d'approximation consiste à approximer la pente de  $20 \text{ dB/dec}$  sur le tracé de Bode du PPF par un nombre de ligne sous forme de zig-zag, produite par une alternance de pente  $20 \text{ dB/dec}$  et  $0 \text{ dB/dec}$  correspondant à une alternance de pôles et de zéros sur l'axe réel négative du plan tel que  $p_0 < z_0 < p_1 < z_1 < \dots < z_{N-1} < p_N$ . D'où l'approximation suivante [57] :

$$G(s) = \frac{1}{\left(1 + \frac{s}{P_f}\right)^\alpha} \approx \frac{\prod_{i=0}^{N-1} \left(1 + \frac{s}{z_i}\right)}{\prod_{i=0}^{N-1} \left(1 + \frac{s}{p_f}\right)} \quad (4.18)$$

Où  $(N + 1)$  est le nombre total des singularités qui peut être déterminé par la bande de fréquences du système. Les pôles et les zéros de la fonction de singularités peuvent être obtenus comme suit:

$$p_i = (ab)^i p_0 \quad i = 1, 2, 3, \dots, N \quad z_i = (ab)^i a p_0 \quad i = 1, 2, 3, \dots, N - 1 \quad \text{Avec, } p_0 = p_f 10^{\frac{e_p}{20\alpha}}$$

$$\alpha = 10^{\frac{e_p}{20(1-\alpha)}} \quad b = 10^{\frac{e_p}{20\alpha}} \quad a = \frac{\log(a)}{\log(ab)} \quad (4.19)$$

Avec  $e_p$  est l'erreur tolérée en dB.

Nous avons programmés et simulé cette méthodes sous Matlab pour différentes valeurs de  $\alpha$ . La fonction de transfert que nous avons retenue pour notre système de puissance qui correspond à  $\alpha = 0.63$ . On remarque qu'une fois le filtre actif parallèle est mis en fonctionnement, avec régulation de la tension  $V_{dc}$  par un régulateur fractionnaire le courant du réseau  $y$  est désormais quasi-sinusoidal et libre de toutes perturbations harmoniques avec un THD% = 1.40% (voir figure .10). Ainsi la tension  $V_{dc}$  est plus stable lors de la variation de la charge (voir figure 4.11).

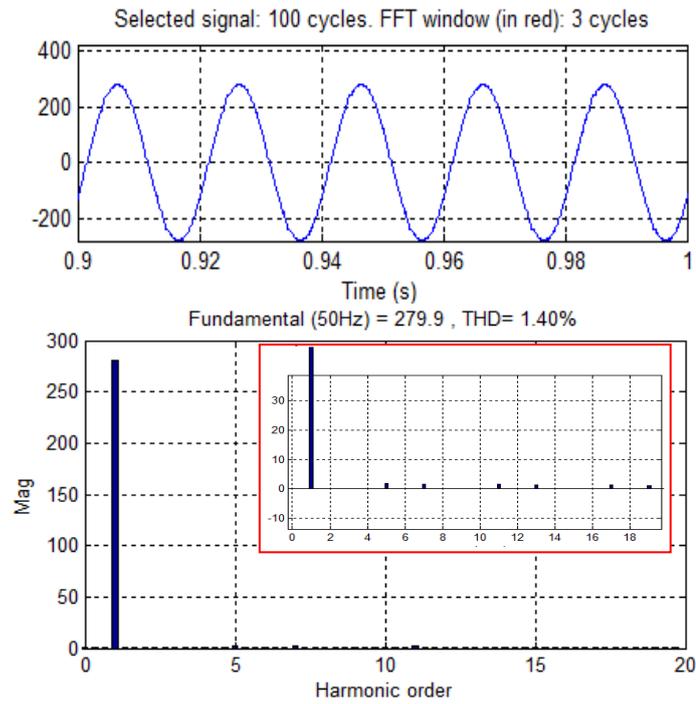


Figure 4.10: Spectre harmonique de courant de source après filtrage avec PI fractionnaire

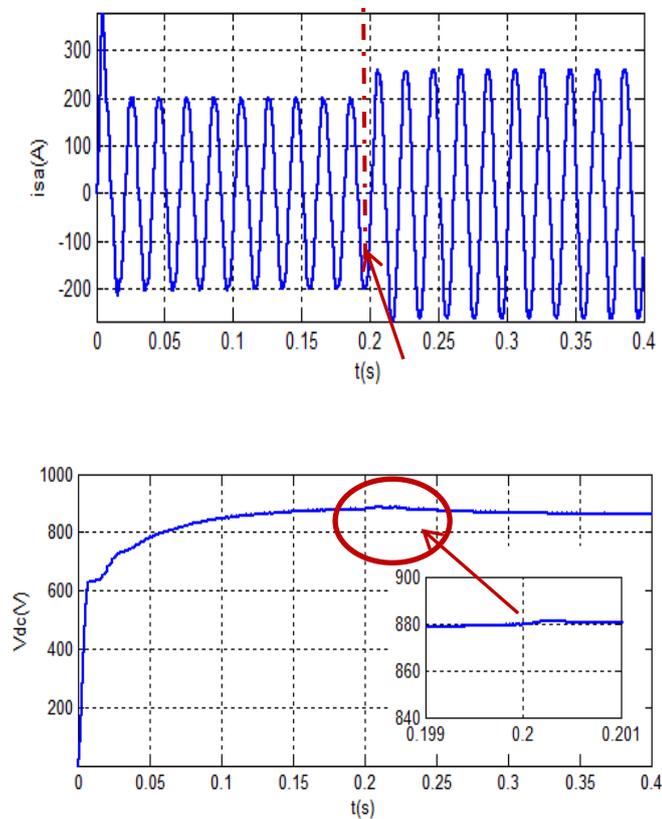


Figure 4.11: La tension  $V_{dc}$  après filtrage avec PI fractionnaire

#### 4.5 Conclusion

Ce travail a été consacré à l'application et l'amélioration des performances d'un filtre actif parallèle multiniveaux pour l'amélioration de la qualité d'énergie électrique dans un réseau électrique basse tension. Le filtre actif parallèle multiniveaux avait pour objectif de compenser les courants perturbateurs d'harmoniques, réactifs et déséquilibrés afin de maintenir un système de courants triphasé du côté de source sinusoïdal et équilibré ou en d'autres termes, découpler les perturbations causées par les charges non linéaires du réseau amont. D'après les résultats de simulation nous avons constaté l'avantage des filtres multiniveaux qui apparait aussi dans le fait qu'une augmentation du niveau permet un filtrage par défaut grâce au nombre d'interrupteur par bras et à la fréquence de commutation qui est de l'ordre de kHz qui offre un THD de courant source meilleure par rapport à la même structure à deux niveaux. La régulation et la stabilité de la source d'alimentation du filtre lors d'une variation de la charge est assurée par un PI classique puis par un  $PI^\alpha$  fractionnaire. Une étude comparative a été effectuée Les résultats obtenus sont très satisfaisantes et très prometteuses pour les régulateurs fractionnaires étant donné que nous avons eu une diminution considérable du taux d'harmoniques de courant.

***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. 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 Le filtre actif parallèle multiniveaux avait pour objectif de compenser les courants perturbateurs d'harmoniques, réactifs et déséquilibrés afin de maintenir un système de courants triphasé du côté de source sinusoïdal et équilibré ou en d'autres termes, découpler les perturbations causées par les charges non linéaires du réseau

amont. D'après les résultats de simulation nous avons constaté l'avantage des filtres multiniveaux qui apparait aussi dans le fait qu'une augmentation du niveau permet un filtrage par défaut grâce au nombre d'interrupteur par bras et à la fréquence de commutation qui est de l'ordre de kHz qui offre un THD de courant source meilleure par rapport à la même structure à deux niveaux. La régulation et la stabilité de la source d'alimentation du filtre lors d'une variation de la charge est assurée par un PI classique puis par un  $PI^\alpha$  fractionnaire. Une étude comparative a été effectuée Les résultats obtenus sont très satisfaisantes et très prometteuses pour les régulateurs fractionnaires étant donné que nous avons eu une diminution considérable du taux d'harmoniques de courant.

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.

# ***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. IA21, 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-Kimbark,direct current transmission.Copyrith C 1971 John Wiley&Sons,inc.reprinted by permission of John Wiley and Son inc.
- 25-Harris,K.A.(1965) Some design aspects of the cross-channel power link. In high voltage direct current convertors and systems(B.J.Cory,ed.),Macdonald ,London,pp.196 198.
- 26-Abramovitch,B.J.,et.AL.(1982).harmonique filters for the sellindge convertor stations. Gec J.sci.tech.,48,35-38.
- 27-Stanley,C.H.,Price.J.J.,and Brewer,G.L.(1977).design and performance of a.c.filters for 12 pulse h.v.d.c. Schemes. IEE conf.publ.154,158.161.
- 28-Ainsworth.J.D.(1965)filter,damping circuits and reactive voltamperes in h.v.d.c. Convertors.in high voltage direct current convertors and systems (B.J.Cory,ed.), Macdonald.London.pp.137 174
- 29-Harrison,R.E.,and Krishhnayya,P.C.S. (1978). System considerations in the application of

- dc Filters for HVDC transmission. CIGRE .paper 14.09.Paris.
- 30 - Segulier (G.) et Labrique (F.), La conversion continu alternatif, Tec & doc Lavoisier, 1989, Les convertisseurs de l'électronique de puissance, volume 4.
- 31 - 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
- 32 - 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
- 33 - S. Guffon, « Modélisation et commandes a structure variable de filtres actifs de puissance » Thèse de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, 24 Juillet 2000.
- 34 - H. Akagi, Y. Kanazawa and A. Nabae, « Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuits », Proceeding 1983 International power electronics conférence. Tokyo, Japan, PP. 1375-13 86, 1983.
- 35- 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.
- 36- Active power filters :A review IEE. Proc.-Electr. Application, vol.147, n°5, September 2000 Y. S. Kim, J.S. Kim, S.H. Ko
- 37 - L. Zellouma, « Filtrage actif parallèle des harmoniques du courant générés par un pont redresseur triphasé non commandé », Mémoire de Magister, Université d'Annaba 2006
- 38 - L. Zellouma, A. Omeiri et S. Saad, « Shunt active power filter for current harmonics suppression using hysteresis control», AJIT 6 (4): 436-440, 2007
- 39 - L. Merabet, S. Saad et A. Omeiri, «Compensation des courant harmoniques par filtre actif parallèle », Revue synthèse N°14 Juin 2005.
- 40-H.Bouchikha,M.Ghers “three phase shunt hybrid filters for the current harmonics suppression and the reactive power compensation”. Euro journalspublishing,inc ,vol.24 N° .4’(2008),pp.,580-590.
- 41 – 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
- 43 – 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
- 44- 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
- 45 - 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.
- 46- Delivering clean and pure power(Active power filters as a solution to power quality problems in distribution networks , IEEE power & energy magazine, September-october 2003 A. NASIRI
- 47-Saad Mekhilef,“Current Controllers of Active Power Filter for Power Quality Improvement: A Technical Analysis”,Online ISSN 1848-3380, Print ISSN 0005-1144 ATKAFF 56(1), 42–54; 2015 .
- 48-Krishna.P, Chandra, M. V. Suresh kumar,“A Comparative Study on Different Control Techniques of SAPF for Power Quality Improvement”, International Journal of Innovative Technologies Volume.04, Issue No.06, June-2016, Pages: 0950-0962.
- 49-Chennai Salim “Stead and Dynamic Performances Evaluation of Three Shunt Active Power Filter For Power Quality Improvement ”,Electrotehnica ,Electronica, Automatica 2016,Vol 64 ,n°04.
- 50-Chennai Salim and Benchouia Mohamed Toufik,“Three-level (NPC) Shunt Active Power Filter Performances based on Fuzzy Controller for Harmonic Currents Compensation under Non-Ideal Voltage Conditions”, International Journal on Electrical Engineering and Informatics - Volume 6, Number 2, June 2014.
- 51-Raju.B, Mr.Y.Rajesh babu,“Power Quality Enhancement by Using Multilevel Shunt Active Power Filter with Renewable Energy Sources”, International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET) Volume 3 Issue IX, September 2015 IC Value: 13.98 ISSN: 2321-9653.
- 52-Salim Chennai,“Efficient Control Scheme for Fivelevel (NPC) Shunt Active Power Filters Based on Fuzzy Control Approaches”, Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science60(2), pp. 135-142, 2016 .
- 53-Ghoudelbourk .S, Dib Djalel, Billel Maghni and Mounir Zouli ,“Selective Harmonic Elimination Strategy in Eleven Level Inverter For PV System with Unbalanced DC sources”, TMREES Technologies and Materials for Renewable Energy, , Paris-France. 2016.
- 54-Abhishek Kumar, Akshneel Sharma, Arjun Kumar GB, “Maximum Power Extraction in Grid Connected DFIG Using 3 Level Diode Clamped Inverter”, National Conference on Sustainable Development in Renewable Energy Sources and Power System Engineering Sri Venkateshwara College of Engineering, Bengaluru Vol. 5, Special Issue 3, May 2017.
- 55-Thiago B. Soeiro , Mario Schweizer , Jörgen Linner , Per Ranstad and Johann W. Kolar,“ Comparison of 2- and 3-level Active Filters with Enhanced Bridge-Leg Loss

- Distribution”, International Journal of Innovative Research in Electrical, Electronics, Instrumentation and Control Engineering nCORETech 2017.
- 56-Haritha V M, Athira M “Shunt Active Power Filter with Hysteresis Current Control”, International Journal of Innovative Research in Electrical, Electronics, Instrumentation and Control Engineering nCOREtech, 2017.
- 57- Ghodelbourk.S , D.Dib ; A.Omeiri; A. Taher Azar , “ MPPT control in wind energy conversion systems and the application of fractional control ( $PI\alpha$ ) in pitch wind turbine ”,Publication in Int. J. Modelling, Identification and Control, Vol. 26, No. 2, 2016 .