

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'enseignement Supérieur

et de la Recherche scientifique



**Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued**

**Faculté de Technologie**

**Mémoire de Fin d'Étude**

**En vue de l'obtention du diplôme de**

**MASTER ACADEMIQUE**

**Domaine : Sciences et Technologie**

**Filière : Électrotechnique**

**Spécialité : Commande électrique**

# Thème

Etude et simulation d'un filtre actif parallèle

De puissance

**Réalisé Par :**

**ADOUKA Yacine**

**DJOUADI Ahmed Tedjani**

**Encadré Par :**

**DR.ZELLOUMA Laid**

**Soutenu en Juin 2022**

# RESUME

Un des phénomènes important entraînant la dégradation de la qualité de l'énergie est la présence de la pollution harmonique sur les réseaux électriques. Les conséquences les plus connues de ce phénomène sont : la destruction de condensateurs, le déclenchement intempestif de disjoncteurs, les phénomènes de résonance avec les éléments composant le réseau, réchauffement de conducteur de neutre et de transformateur ainsi que l'usure qui est due à réchauffement des équipements qui sont soumis aux harmoniques. En comparaison avec les moyens classiques de mitigation, tels que le surdimensionnement des installations ou le filtrage passif, le filtrage actif est considéré par les spécialistes des réseaux comme étant la solution avant-gardiste pour filtrer les harmoniques.

Dans ce travail, nous exposons l'étude et la réalisation du filtre active parallèle de puissance en vue de compenser les harmoniques de courants et la puissance réactive susceptibles d'apparaître dans les réseaux électriques.

Après un rappel des origines, et des effets de la pollution harmonique sur les réseaux électriques, les différents solutions de dépollution du réseau électrique; nous étudions la structure du filtre actif parallèle de puissance, la commande du filtre actif à base de l'onduleur a été ensuite étudiée, à savoir les méthodes d'identification des courants harmoniques de référence: dans ce cas on utilise la méthode des puissances instantanées  $p-q$ , la commande hystérésis pour l'onduleur et un régulateur proportionnelle pour régulation du bus continue. Puis, nous allons validé par des simulations sous l'environnement *Simulink/Matlab*.

Les résultats obtenues prouvent que le filtre actif nous permet d'avoir des résultats très satisfaisant avec des de courants de source conforme aux normes inférieurs à 5%. i THD

**Mots clés:** Courants harmoniques, Taux de distorsion d'harmonique, *FAP*, Onduleur, Méthode  $p-q$ .

## م ا ل خ ص

من الظواهر المهمة التي تؤدي إلى تدهور جودة الطاقة وجود التلوث التوافقي على الشبكات الكهربائية. العواقب الأكثر شهرة لهذه الظاهرة هي: تدمير المكثفات ، التعثر المفاجئ لقواطع الدائرة ، ظواهر الرنين مع العناصر المكونة للشبكة ، تسخين الموصل المحايد والمحول بالإضافة إلى التآكل الناتج عن التسخين المعدات التي تخضع للتوافقيات. بالمقارنة مع الوسائل التقليدية للتخفيف ، مثل الحجم الكبير للتركيبات أو التصفية السلبية ، يعتبر متخصصو الشبكات أن التصفية الفعالة هي الحل الرائد لتصفية التوافقيات.

في هذا العمل، سوف نقوم بعرض دراسة و تحقيق المرشح الفعال المتوازن للإستطاعة بهدف تعويض توافقيات التيارات و الإستطاعة الغير فعالة التي تظهر في الشبكات الكهربائية.

بعد التذكير بأهم الإضطرابات التي تؤثر على الشبكة الكهربائية أسبابها و تأثيرها و مختلف الحلول لتصفية الشبكة من الشوائب. سوف نقوم بدراسة إجمالية لبنية المرشح الفعال المتوازن لإستطاعة؛ وبعد ذلك نقوم بدراسة تحكم المرشح الفعال القائم على العاكس و طرق المستعملة لتحديد التيارات التوافقية المرجعية و في هذه الدراسة سوف نستعمل طريقة الإستطاعة اللحظية بن-م و بإستعمال تقنية التحكم التخلفية أيضا سوف نتطرق إلى تنظيم الجزء الثابت. و بعد ذلك سوف نتحقق من النتائج عن طريق المحاكاة بإستعمال برنامج الماتلاب.

النتائج المتحصلة عليها تثبت أن المرشح الفعال يتيح لنا الحصول على نتائج جيدة جيداً مع،  $THD_i$  أقل من 5% و ذلك ما يتوافق القوانين و النظم الدولية.

**الكلمات المفتاحية:** التيارات التوافقية، معامل تشويه، التيار المرشح الفعال المتوازن، المرشح، طريقة p-q.

# *Dédicaces*

*Avec l'expression de ma reconnaissance, je dédie ce modeste travail à ceux qui, quels que soient les termes embrassés, je n'arriverais jamais à leur exprimer mon amour sincère.*

*A l'homme, mon précieux offre du dieu, qui doit ma vie, ma réussite et tout mon respect : mon cher père ABDESSELAM*

*A la femme qui a souffert sans me laisser souffrir, qui n'a jamais dit non à mes exigences et qui n'a épargné aucun effort pour me rendre heureux : mon adorable mère OUAHIBA.*

*A ma chère sœur NOUR et ANFEL qui n'ont pas cessée de me conseiller, encourager et soutenir tout au long de mes études. Que Dieu les protège et leurs offre la chance et le bonheur.*

*A mes frères YAHIA et ZAKARIA qui sait toujours comment procurer la joie et le bonheur pour toute la famille.*

*A mon cher grand-père, et ma chère grand-mère, mes oncles et mes tantes. Que Dieu leur donne une longue et joyeuse vie.*

*A tous les cousins, les voisins et les amis que j'ai connu jusqu'à maintenant.*

*Merci pour leurs amours et leurs encouragements.*

*Yacine*

# *Dédicaces*

*Louange à dieu qui nous a aidés à terminer ce travail, et les prières et la paix soient sur celui qui a été envoyé comme miséricorde aux mondes.*

*Je dédie le fruit de ce modeste travail à tous ceux qui se sont sacrifiés pour m'offrir les meilleures conditions de réussite.*

*Aux âmes de ma petite sœur et de mes parents qui ont souffert pour m'élever dignement et assurer mon éducation dans les meilleures conditions.*

*A mon frère, mes grands-parents et tous les membres de ma famille.*

*A tous mes proches et à tous mes amis.*

*Ahmed Tedjani*

# *Remerciements*

*Je remercie Allah de m' avoir donné la santé et tout dont je  
nécessitais pour l' accomplissement de cette mémoire.*

*Je tiens d'abord à exprimer toute ma gratitude et ma reconnaissance à  
mon encadreur Monsieur l. zellouma M.C.A à université Echahid Hamma  
Lakhdar d'El-Oued, pour m' avoir encadré et soutenu durant le travail  
de ce mémoire. Je le remercie aussi pour son aide précieuse, les conseils  
et les connaissances dont il a su me faire profiter.*

# *SOMMAIRE*

---

# SOMMAIRE

SOMMAIRE.....	i
LISTE DES FIGURES.....	iv
LISTE DES TABLEAUX.....	vi
LISTE DES SYMBOLES.....	vii
INTRODUCTION GENERALE.....	1

## **Chapitre I:**

### **Généralités sur les perturbations des réseaux électriques**

I.1 Introduction.....	3
I.2 Perturbation électrique.....	3
I.2.1 Creux et coupures de tension.....	3
I.2.2 Fluctuations des tensions.....	4
I.2.3 Déséquilibre du système triphasé de tension.....	5
I.2.4 Variation de fréquence.....	5
I.2.5 Harmonique et inter harmonique.....	5
I.2.5.1 Source d'harmonique.....	6
I.2.5.2 Conséquence néfastes des harmoniques.....	6
I.3 Origines des harmoniques.....	7
I.3.1 Effets instantanés.....	7
I.3.2 Effets à terme.....	8
I.4 Grandeurs caractéristiques.....	8
I.4.1 Grandeur harmonique.....	8
I.4.2 Rang de l'harmonique.....	9
I.4.3 Série de Fourier.....	9
I.4.4 Valeur efficace d'une grandeur alternative.....	10
I.4.5 Taux de distorsion.....	10
I.4.6 Facteur de puissance.....	10
I.4.7 Spectre d'harmonique (de fréquence).....	10
I.4.8 Charges linéaires et non linéaires.....	11
I.5 Influence des harmoniques sur le facteur de puissance FP.....	12
I.6 Normes et réglementation de perturbation.....	12
I.7 Les solutions traditionnelles.....	14
I.7.1 Compensation des courants harmoniques.....	15
I.7.1.1 Surdimensionnement ou déclassement de l'installation électrique.....	15

I.7.1.2	Transformateurs à couplage spécial.....	15
I.7.1.3	Inductances (selfs) série.....	16
I.7.1.4	Filtre passif.....	16
I.7.2	Compensation de la puissance réactive.....	16
I.7.3	Rééquilibrage des courants du réseau électrique.....	17
I.7.4	Agir sur la structure de l'installation.....	17
I.7.5	Pont dodécaphasé.....	17
I.8	Solutions modernes de dépollution.....	18
I.8.1	Filtrage actif. ....	19
I.8.1.1	Filtre actif parallèle. ....	19
I.8.1.2	Filtre actif série. ....	19
I.8.1.3	Combinaison parallèle série actif. ....	20
I.8.2	Filtrage hybride. ....	20
I.8.2.1	Association série d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif.....	21
I.8.2.2	Association parallèle d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif.....	22
I.8.2.3	Association d'un filtre actif série et d'un filtre passif.....	22
I.8.3	Les redresseurs MLI.....	23
I.8.3.1	Redresseur de tension. ....	23
I.8.3.2	Redresseur de courant. ....	24
I.9	Conclusion.....	25

## **Chapitre II:**

### **Structure du FAP de puissance et son principe de fonctionnement**

II.1	Introduction.....	26
II.2	Principe de filtrage actif parallèle de puissance.....	26
II.3	Structure du filtre actif parallèle.....	28
II.3.1	Etude de la partie puissance.. ....	29
II.3.1.1	Onduleur d'un filtre actif parallèle.....	29
II.3.1.2	circuit de stockage d'énergie.. ....	34
II.3.1.3	Filtre de sortie.....	34
II.3.2	Etude de la partie commande.....	35
II.3.2.1	Les méthodes d'identification des courants perturbés.....	35
II.3.2.1.1	Principe du fonctionnement de la méthode des puissances instantanées...36	
II.3.2.1.1.1	Séparation des puissances perturbatrices.....	37
II.3.2.2	Système a PLL.....	40

II.3.2.3 Commande d'onduleur.....	40
II.3.2.3.1 La commande par hystérésis.....	40
II.3.2.3.2 Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI).....	42
II.3.2.4 Régulation de la tension continue.....	42
II.3.2.5 Régulations du courant du filtre actif.....	44
II.4. Conclusion..	46

### **Chapitre III:**

#### **Modélisation et simulation du réseau perturbé**

III.1 Introduction..	47
III.2 Schéma globale du système à simuler.....	47
III.3 Modélisation de l'association réseau-filtre actif-charge polluante.....	48
III.3.1 Modélisation du réseau électrique..	48
III.3.2 Modélisation de la charge polluante.....	48
III.3.3 Calcul des paramètres du système ( <i>réseau-charge polluante-filtre actif</i> ).....	49
III.3.3.1 Caractéristiques du réseau électrique.....	49
III.3.3.2 Caractéristiques de la charge polluante.....	50
III.3.3.3 Caractéristiques des éléments du filtre actif.....	50
III.4 Simulation de l'ensemble réseau, filtre actif parallèle et charge polluante.....	53
III.5 Résultats de simulation et Interprétation.....	54
III.5.1 Résultats de simulation avant et après l'utilisation du FAP.....	54
III.5.2 Comportement du FAP en régime permanent.....	55
III.5.3 Comportement du FAP en régime dynamique (Changement de la charge).....	59
III.6 Conclusion.....	63
CONCLUSION GENERALE.....	64
BIBLIOGRAPHIQUES.....	65

# LISTE DES FIGURES

## Chapitre I: Généralités sur les perturbations des réseaux électriques

Titre	Page
Fig. (I.1) Creux et coupures de tension.	4
Fig. (I.2) Fluctuation de tension.	4
Fig. (I.3) Déséquilibre du système de tension triphasé.	5
Fig. (I.4) Variation de fréquence.	5
Fig. (I.5) Harmoniques et inter harmoniques.	6
Fig. (I.6) image d'une onde déformée.	9
Fig. (I.7) Le spectre harmonique du courant de charge polluante.	11
Fig. (I.8) Courant absorbé par une charge non linéaire.	11
Fig. (I.9) Structures de filtres passifs.	16
Fig. (I.10) Forme d'onde des courants absorbés	18
Fig. (I.11) Redresseur dodécaphasé, (a) montage en série et (b) montage en parallèle des deux ponts redresseurs.	18
Fig. (I.12) Structure du filtre actif parallèle.	19
Fig. (I.13) Structure du filtre actif série.	20
Fig. (I.14) Structure du filtre actif (série, parallèle).	20
Fig. (I.15) Association série d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif.	21
Fig. (I.16) Association parallèle d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif.	22
Fig. (I.17) Association d'un filtre actif série et d'un filtre passif.	22
Fig. (I.18) Topologie d'un redresseur à MLI triphasé de tension.	23
Fig. (I.19) Topologie d'un redresseur à MLI triphasé de courant.	24

## Chapitre II: Structure du FAP de puissance et son principe de fonctionnement

Titre	Page
Fig. (II.1) Schéma de principe du filtre actif parallèle.	26
Fig. (II.2) Schéma de principe de l'ensemble réseau électrique, charge polluante et filtre actif et formes d'ondes des courants respectifs.	27
Fig. (II.3) Structure d'un filtre actif parallèle.	28
Fig. (II.4) Schéma du circuit de puissance d'un filtre actif parallèle à structure tension.	29
Fig. (II.5) Structure d'un onduleur triphasé.	30
Fig. (II.6) Structure filtre active parallèle à tension.	31
Fig. (II.7) Interrupteurs équivalents du filtre actif à source de tension.	31
Fig. (II.8) Structure de filtre actif à courant.	32
Fig. (II.9) Représente un onduleur triphasé de tension.	32
Fig. (II.10) Séparation des puissances perturbatrices.	38
Fig. (II.11) Méthode d'extraction des courants de référence.	39
Fig. (II.12) Principe de commande par hystérésis.	41
Fig. (II.13) Commande des interrupteurs par hystérésis.	41
Fig. (II.14) Schéma de principe <i>MLI</i> .	42
Fig. (II.15) Boucle fermée de réglage de la tension continue.	43
Fig. (II.16) Schéma de la régulation des courants du filtre actif.	45
Fig. (II.17) Schéma de la régulation simplifié.	45

## Chapitre III: Modélisation et simulation du réseau perturbé

Titre	Page
Fig. (III.1) Schéma synoptique de système à simuler.	47
Fig. (III.2) Schéma synoptique d'un réseau triphasé.	48

Fig. (III.3) Schéma d'une charge non-linéaire (un pont redresseur).	49
Fig. (III.4) Schéma de simulation d'un filtre actif parallèle de puissance.	53
Fig. (III.5) Courant injecter par le filtre avant et après filtrage.	54
Fig. (III.6) Courant de la source avant et après filtrage.	54
Fig. (III.7) tension de bus continu $V_{dc}$ avant et après filtrage.	55
Fig. (III.8) Courant de la charge.	55
Fig. (III.9) Courant injecter par le filtre.	56
Fig. (III.10) Courant de la source.	56
Fig. (III.11) Le courant et la tension de la source après filtrage.	57
Fig. (III.12) tension de bus continu $V_{dc}$ .	57
Fig. (III.13) Spectre du courant coté source avant filtrage.	58
Fig. (III.14) Spectre du courant coté source après filtrage.	58
Fig. (III.15) Courant de la charge.	59
Fig. (III.16) Courant de la source.	60
Fig. (III.17) Courant injecter par le filtre.	60
Fig. (III.18) tension de bus continu $V_{dc}$ .	61

---

# LISTE DES TABLEAUX

## Chapitre I: Généralités sur les perturbations des réseaux électriques

Titre	Page
Tab (I.1) Limites de perturbations définies par EN 50160.	13
Tab (I.2) Classification des normes concernant la qualité d'énergie électrique.	14
Tableau (I.3) Niveau de compatibilité pour les tensions harmoniques sur les réseaux basse tension (Norme CEI 61000-2-2).	14

## Chapitre II: Structure du FAP de puissance et son principe de fonctionnement

Titre	Page
Tab (II.1) Tensions générées par l'onduleur de tension deux niveaux.	34

## Chapitre III: Modélisation et simulation du réseau perturbé

Titre	Page
Tab (III.1) Valeurs des éléments caractérisant la structure étudiée.	52
Tab (III.2) Les résultats des simulations.	62

## Liste des Symboles et Notations

### Liste des Symboles

$h$  Rang de l'harmonique

$p$  Puissance active

$q$  Puissance réactive

$S$  Puissance apparente

$D$  Puissance déformante

$R$  Résistance

$I$  Courant

$e_{sa}, e_{sb}, e_{sc}$  Tensions instantanées simples du réseau

$V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}$  Tensions instantanées au point de couplage

$i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}$  Courants débités par le réseau

$R_f$  Résistance du filtre de sortie

$L_f$  Inductance du filtre de sortie

$V_{dc}$  Tension continue du bus continu

$S_{ki}$  Fonction de commutation

$i_\alpha, i_\beta$  Courant de charge selon les axes  $(\alpha, \beta)$

$i_{ref\alpha}, i_{ref\beta}$  Courants de référence

$\tilde{p}, \tilde{q}$  Composantes alternatives de  $p$  et  $q$

### Liste des Notations

FAP Filtre Actif Parallèle

THD Total Harmonic Distortion

CEI La Commission Electrotechnique Internationale

EDF Electricité De France

FP Facteur de Puissance

FPB Filtre Passe-Bas

MLI Modulation de Largeur d'Impulsion

UPFC Unified Power Quality Conditioner

*Introduction*

*Générale*

# **INTRODUCTION GÉNÉRALE**

La prolifération de la connexion au réseau de distribution des charges non-linéaires, telles que les redresseurs, les gradateurs, le matériel informatique, les appareils de climatisation ou encore les éclairages à base de tubes fluorescents, etc...., est la cause principale de la dégradation de l'énergie électrique.

Par conséquent, les harmoniques engendrées par ces charges non linéaires circulent dans les réseaux électriques et peuvent perturber le fonctionnement normal de certains équipements électriques voire même engendrer leur destruction. Ces effets néfastes peuvent apparaître instantanément ou se produire en différé tant pour le distributeur que pour les utilisateurs. C'est pour ces raisons que le filtrage des distorsions en courant et en tension est au centre des préoccupations actuelles à la fois des fournisseurs, et des utilisateurs d'énergie électrique; ils adoptent donc, les uns comme les autres, les limites proposées par les normes *IEEE*, *CEI*. Donc il est nécessaire de réduire ces harmoniques pour protéger le réseau électrique contre cette pollution harmonique.

Du point de vue de la qualité de l'énergie on entend par perturbation électrique tout écart de la tension réseau par rapport à sa valeur et à sa forme nominale. Par extension, on peut aussi considérer comme perturbations les phénomènes agissant sur la forme du courant, car ils ont une influence directe sur la tension. Les différentes perturbations qu'on rencontre sont surtout des fluctuations de tension, le déséquilibre, la variation de la fréquence du réseau, les harmoniques et les transitoires. Les perturbations ont des effets néfastes sur les équipements électriques qui se manifestent généralement par des échauffements causant la dégradation du fonctionnement jusqu'à même la destruction totale de ces équipements.

Actuellement, il existe un certain nombre de solutions techniques pour éliminer ou réduire les effets liés à une mauvaise qualité de l'énergie. Il s'agit là d'un domaine très riche tant en innovations qu'en développement [1, 2, 5].

Cependant, grâce aux récents progrès réalisés sur les semi-conducteurs, l'électronique de puissance permet de compenser et de corriger tous ces indésirables. Il consiste à utiliser un

convertisseur de puissance, assimilable à une source de courant, qui compense la perturbation harmonique provenant de la charge en injectant dans le réseau un courant harmonique en opposition de phase par rapport à celui de la charge [1].

L'objectif de notre travail est d'étudier le concept du filtre actif en parallèle de puissance pour objectif de dépolluer les réseaux électriques par compensation des harmoniques produits dans le réseau (diminution du taux de distorsion d'harmonique totale), et parfois l'énergie réactive consommée par les charges non-linéaires afin d'obtenir un courant du réseau s'approchant le plus possible du signal sinusoïdal et l'amélioration du facteur de puissance. Puis, nous allons réaliser ce filtre actif par simulation et expérimentation.

Ce mémoire a été structuré comme suit:

- ✓ Dans le premier chapitre, nous présentons les perturbations des réseaux électriques connectés à des charges dites polluantes. Ensuite, les origines/les conséquences de cette pollution harmonique avec la citation des normes et régulations imposées aux utilisateurs, ainsi que les solutions classiques et modernes pour la réduction des harmoniques.
- ✓ Dans le deuxième chapitre, sera consacré à la structure du filtre actif parallèle de puissance ainsi que son principe de fonctionnement. Nous avons présenté les différentes méthodes d'identifications des courants harmoniques des références, les principaux types de commande d'onduleur, et la régulation de bus continue.
- ✓ Dans le troisième chapitre, la modélisation de l'ensemble, réseau-charge polluante-filtre actif, est d'abord présenté, ensuite les résultats de simulation obtenus à partir l'environnement *Matlab/Simulink*.

# *Chapitre I:*

## *Généralités sur les perturbations* *des réseaux électriques*

## I.1 Introduction

Le réseau électrique alimente le consommateur (client) avec une tension et une fréquence répondant aux normes. Malheureusement, ces grandeurs subissent, généralement des perturbations : Perturbation de la tension causées par les courants harmoniques, le déséquilibre des courants et des courants réactifs, qui circulent dans le réseau. Et, des perturbations qui sont causées par les tensions harmoniques et le déséquilibre des tensions et les creux de tension [1,2]. Cependant ces perturbations sont généralement causées par la connexion au réseau de charges non linéaires (Les onduleurs, les ponts redresseurs, les fours à arc et à induction, les variateurs de vitesse des machines électriques, les appareils domestiques tel que les téléviseurs et les lampes fluorescentes) qui provoquent une distorsion des courants et de la tension. Ces dispositifs à base de composants semi-conducteurs sont les sources d'harmoniques ayant des conséquences indésirables sur le comportement du réseau électrique. Donc il est d'intérêt de compenser ces harmoniques afin de pallier à leurs effets néfastes et par conséquent alimenter la qualité d'énergie électrique [3-4].

A cet effet, ce chapitre présente les principales perturbations de la tension, de courant, leurs origines, et conséquences. Par ailleurs, on considère les solutions traditionnelles (filtrage passif) et modernes (filtrage actif) qui sont utilisées pour pallier aux problèmes liés aux perturbations harmoniques.

## I.2 perturbation électrique

La qualité de l'énergie peut être affectée, soit du fait de certains incidents inhérents à la nature physique et aux sujétions liées à l'exploitation du réseau, soit du fait de certains récepteurs. Ces défauts se manifestent sous forme de différentes perturbations affectant un ou plusieurs des cinq paramètres précédemment définis. On a donc cinq possibilités distinctes de perturbation:

### I.2.1. Creux et coupures de tension

Le creux de tension est une diminution de la tension à une valeur entre 10 % et 90 % de la tension nominale [5,4] pendant une durée allant de 10 ms jusqu'à quelques secondes.

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

Une coupure de tension quant à elle est une diminution brutale de la tension à une valeur supérieure à 90 % de la tension nominale ou disparition totale pendant une durée généralement comprise entre 10 ms et une minute pour les coupures brèves et supérieure à une minute pour les coupures longues. La plupart des appareils électriques admettent une coupure totale d'alimentation d'une durée inférieure à 10 ms. La figure I.1 montre un exemple de creux et de coupure de tension [5].

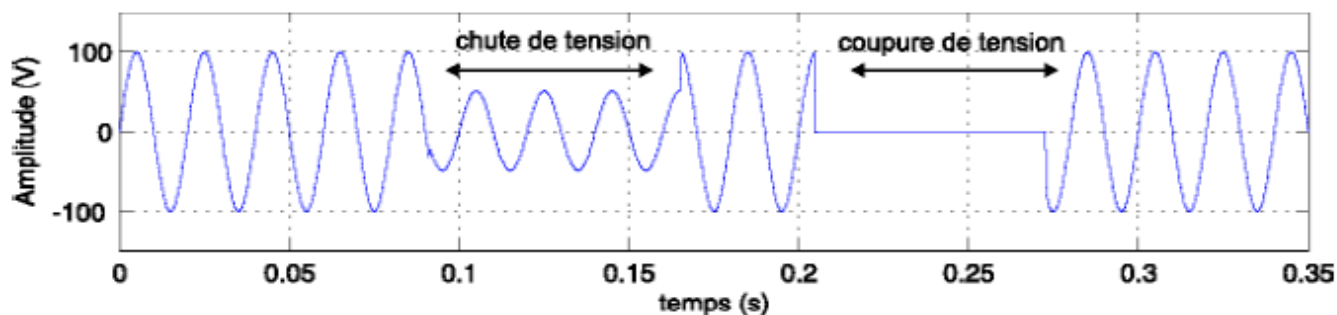


Fig. (I.1) Creux et coupures de tension

## I.2.2 Fluctuations des tensions

Les fluctuations de tension sont des variations périodiques ou erratiques de l'enveloppe de la tension. Ce sont des variations brutales de l'amplitude de la tension situées dans une bande de 10 % et se produisent sur un intervalle de temps de quelques centièmes de secondes. Elles sont en particulier dues à la propagation sur les lignes du réseau de courants d'appel importants. L'origine principale de ces courants est le fonctionnement d'appareil dont la puissance absorbée varie de manière rapide, comme les fours à arc et des machines à souder. Ces fluctuations se traduisent par des variations d'intensité, visible au niveau de l'éclairage causant un gêne visuel perceptible pour une variation de 1 % de la tension.

Ce phénomène de papillotement est appelé flicker. La figure I.2 montre un exemple de fluctuation de tension [6].

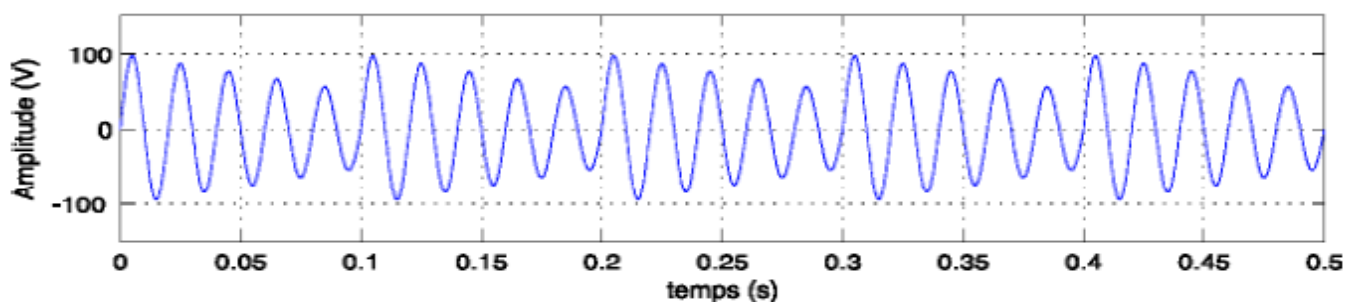


Fig. (I.2) Fluctuation de tension

### I.2.3. Déséquilibre du système de tension triphasé:

Lorsque les trois tensions ne sont pas identiques en amplitude et/ou ne sont pas décalées d'un angle de  $120^\circ$  les unes par rapport aux autres, on parlera de déséquilibre du système triphasé comme le montre la figure I.3 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 [7].

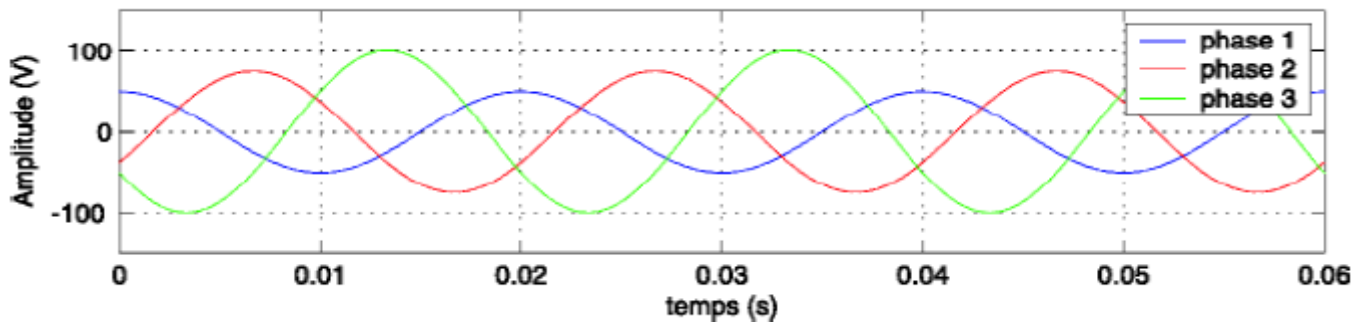


Fig. (I.3) Déséquilibre du système de tension triphasé.

### I.2.4. Variation de fréquence

Une variation sensible de la fréquence du réseau peut apparaître sur les réseaux des utilisateurs non interconnectés ou alimentés par une source thermique autonome comme le montre la figure I.4. 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  $50 \text{ Hz} \pm 1\%$  [2, 5].

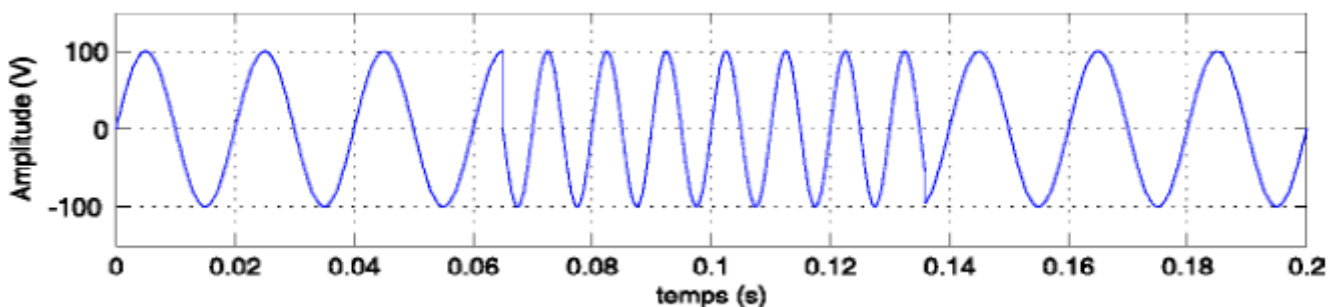


Fig. (I.4) Variation de fréquence.

### 1.2.5 Harmoniques et inter harmoniques

Les harmoniques sont une superposition sur l'onde fondamentale à 50 Hz, d'ondes également sinusoïdales mais de fréquences multiples entier de celle du fondamental. La figure I.5 montre

la superposition de l'harmonique d'ordre 3 sur un courant fondamental de fréquence 50 Hz. La principale source de la présence des harmoniques dans les réseaux électrique est l'utilisation de plus en plus croissante d'équipement de l'électronique de puissance à base de thyristors et de transistors. Les inter harmoniques sont superposés à l'onde fondamentale mais ne sont pas des multiples entiers de la fréquence du réseau. L'apparition des inter harmoniques est en augmentation et leurs origines principales sont les convertisseurs de fréquence les variateurs de vitesse et d'autres équipements similaires de commande électrique [6].

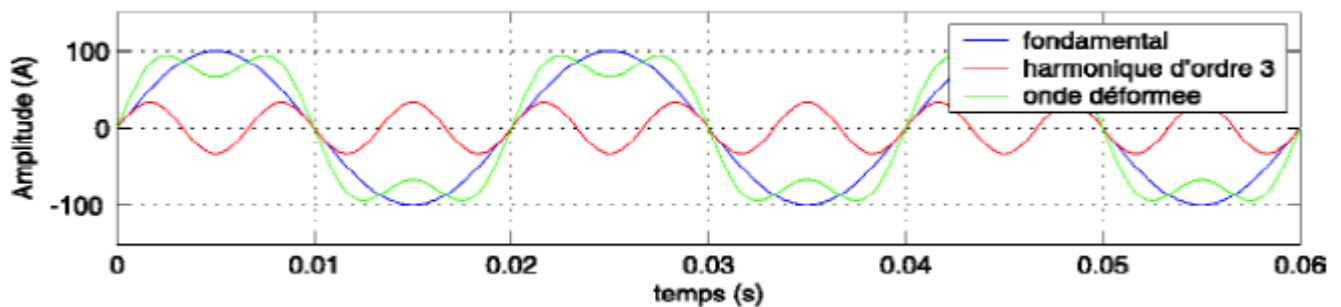


Fig. (I.5) Harmoniques et inter harmoniques.

### I.2.5.1 Sources d'harmoniques

L'injection des courants non-sinusoïdaux par des charges non-linéaires et le branchement de charges déséquilibrées branchées au réseau. Sont les causes principales des harmoniques, les convertisseurs statiques, les fours à arc et à induction, les téléviseurs, les lampes fluorescentes et les alimentations à découpage représentent la majorité des charges non linéaires sont donc des sources d'émission des harmoniques [9, 10].

### I.2.5.2 Conséquences néfaste des harmoniques:

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

- Alternateurs : pertes supplémentaires dans les enroulements statoriques et dans les amortisseurs liés à la circulation des courants harmoniques.
- Lignes : pertes ohmiques supplémentaires.
- Moteur à courant alternatif : pertes supplémentaires dans le fer et dans les enroulements plus réchauffement du moteur.
- Condensateur de puissance : pertes diélectrique supplémentaires conduisant au vieillissement rapide du condensateur

- Equipement de l'électronique de puissance : dysfonctionnement lié à la déformation de la tension.

### **I.3 Origine des harmoniques**

La prolifération des équipements électriques utilisant des convertisseurs statiques a entraîné ces dernières années une augmentation sensible du niveau de pollution harmonique des réseaux électriques. Ces équipements électriques sont considérés comme des charges non linéaires émettant des courants harmoniques dont les fréquences sont des multiples entiers de la fréquence fondamentale, ou parfois à des fréquences quelconques. Le passage de ces courants harmoniques dans les impédances du réseau électrique peut entraîner des tensions harmoniques aux points de raccordement et ainsi polluer les consommateurs alimentés par le même réseau électrique [6]. 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 sur coûts de production d'énergie importants. On peut classer les effets engendrés par les harmoniques en deux type: les effets instantanés et les effets à terme.

#### **I.3.1 Effets instantanés**

Les effets instantanés apparaissent immédiatement dans certains appareillages :

- Défauts de fonctionnement de certains équipements électriques: En présence d'harmoniques, la tension et le courant peuvent changer plusieurs fois de signe dans une demi-période. Les appareils dont le fonctionnement est basé sur le passage à zéro des grandeurs électriques peuvent être affectés.
- Troubles fonctionnels des micro-ordinateurs: Les effets sur ces équipements peuvent se manifester par la dégradation de la qualité de l'image et par des couples pulsatoires des moteurs d'entraînement de disque.
- Erreurs dans les appareils de mesure: Certains appareils de mesure et les compteurs d'énergie à induction présentent des dégradations de mesure des erreurs de lecture supplémentaires en présence d'harmoniques.
- Vibrations et bruits: Les courants harmoniques génèrent également des vibrations et des bruits acoustiques, principalement dans les appareils électromagnétiques (transformateurs, inductances et machines tournantes).

### I.3.2 Effets à terme

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

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

## I.4 Grandeurs caractéristiques

### I.4.1 Grandeur harmonique

La variation en fonction du temps, des grandeurs électriques courants et tensions des réseaux industriels alternatifs, s'éloigne significativement de la sinusoïde pure fig. (I.6).

La variation est en fait composée d'un certain nombre de sinusoïdes de fréquences différentes, comprenant entre autres, une sinusoïde à fréquence industrielle dite sinusoïde fondamentale ou plus simplement : le fondamental.

« Grandeur harmonique » ou simplement « harmonique » C'est une des composantes sinusoïdales de la variation de la grandeur physique possédant une fréquence multiple de celle

de la composante fondamentale. L'amplitude de l'harmonique est généralement de quelques pour cent de celle du fondamental [11].

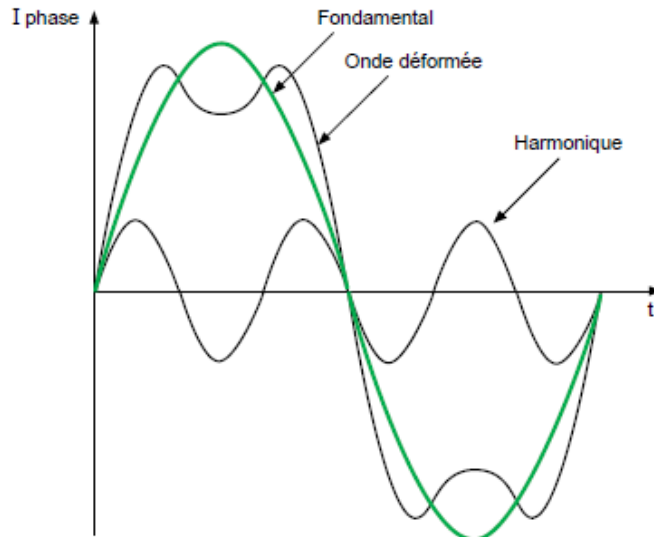


Fig. (I.6) image d'une onde déformée.

#### I.4.2 Rang de l'harmonique

C'est le rapport de sa fréquence ( $f_n$ ) à celle du fondamental (généralement la fréquence industrielle, 50 ou 60 Hz) [12]:

$$n = \frac{f_n}{f_1} \quad (\text{I.1})$$

#### I.4.3 Série de Fourier

Tout signal périodique de période  $T=1/f$ , peut se décomposer en une somme infinie des termes sinus et cosinus de fréquences multiples de  $f$ . Mathématiquement, cela s'écrit :

$$S(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \quad (\text{I.2})$$

La valeur  $a_0$  représente la valeur moyenne de  $S(t)$ .

On calcule les coefficients  $a_n$  et  $b_n$  avec les formules suivantes :

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T S(t) \cos(n\omega t) dt \quad \text{et} \quad b_n = \frac{2}{T} \int_0^T S(t) \sin(n\omega t) dt \quad (\text{I.3})$$

De plus, il existe quelques prérequis qui permettent de ne pas faire de calculs inutiles :

- si la fonction est symétrique par glissement, la valeur  $a_0$  est nulle ;
- si la fonction est paire, les coefficients  $b_n$  sont nuls ;

- si la fonction est impaire, les coefficients  $a_n$  sont nuls ;
- si la fonction possède une symétrie sur ses deux demi-périodes, les termes d'indice pairs sont nuls [13].

#### I.4.4 Valeur efficace d'une grandeur alternative

Il y a identité entre l'expression usuelle de cette valeur efficace calculée à partir de l'évolution temporelle de la grandeur alternative ( $y(t)$ ) et l'expression calculée à partir de son contenu harmonique :

$$Y_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T y^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{n=1}^{n=\infty} Y_n^2} \quad (I.4)$$

Notons qu'en présence d'harmoniques, les appareils de mesure doivent avoir une bande passante élevée ( $> 1$  kHz) [14].

#### I.4.5 Taux de distorsion

Le taux de distorsion est un paramètre qui définit globalement la déformation de la grandeur alternative [6]:

$$THD_i \% = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} (I_{sn})^2}}{I_1} \cdot 100 \quad (I.5)$$

Il existe aussi une autre définition qui remplace le fondamental  $I_1$  par la valeur efficace totale  $I_{eff}$ . Certains appareils de mesure l'utilisent.

#### I.4.6 Facteur de puissance:

Le facteur de puissance est défini dans le cas général par le rapport de la puissance active sur la puissance apparente :

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{\sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \cos(\phi_h)}{\sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_h^2} \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2}} \quad (I.6)$$

#### I.4.7 Spectre d'harmonique (de fréquence)

Un signal déformé comporte généralement plusieurs harmoniques. On représente souvent ce signal sous la forme d'un spectre, c'est -à-dire à l'aide d'un schéma où l'on porte en abscisse la fréquence et en ordonnée le module (en valeur efficace ou en pourcent). Comme il est représenté sur la figure (I.7) [12].

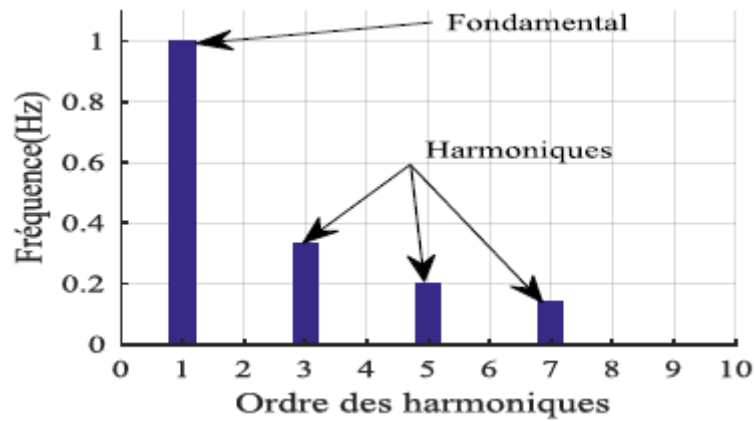


Fig. (I.7) Le spectre harmonique du courant de charge polluante.

### I.4.8 Charges linéaires et non linéaires

Une charge est dite linéaire lorsqu'il y a une relation linéaire (équation différentielle linéaire à coefficients constants) entre le courant et la tension. Plus simplement, une charge linéaire absorbe un courant sinusoïdal lorsqu'elle est alimentée par une tension sinusoïdale, ce courant pouvant être déphasé d'un angle  $\phi$  par rapport à la tension. Lorsque cette relation linéaire n'est pas vérifiée la charge est qualifiée de non linéaire. Celle-ci absorbe un courant non sinusoïdal, donc des courants harmoniques, même lorsqu'elle est alimentée par une tension parfaitement sinusoïdale Fig. (I.8) [14].

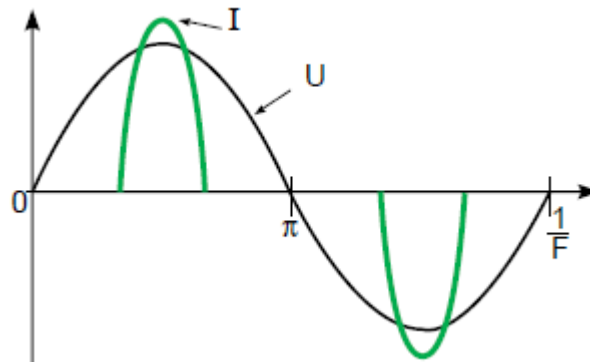


Fig. (I.8) Courant absorbé par une charge non linéaire.

### I.5 Influence des harmoniques sur le facteur de puissance FP

Normalement, pour un signal sinusoïdal le facteur de puissance est donné par le rapport entre la puissance active P et la puissance apparente S. En présence des harmoniques, la puissance apparente S est composée de trois parties ; actives P, réactive Q et déformante D. Cette dernière est la puissance provoquée par les courants harmoniques, comme montre par équation suivante [15]:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (\text{I.7})$$

$$P = 3 \cdot U \cdot I_1 \sin \varphi_1 \quad (\text{I.8})$$

$\varphi_1$  : représente le déphasage entre le courant fondamental et la tension.

$$Q = 3 \cdot U \cdot I_1 \cdot \sin \varphi_1 \quad (\text{I.9})$$

$$D = 3V_{eff} \sqrt{\sum_{h=2}^{50} \frac{I^2}{h}} \quad (\text{I.10})$$

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

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad (\text{I.11})$$

### I.6 Normes et réglementation de perturbation

Afin de limiter l'influence d'une charge polluante sur les autres charges connectées au réseau et en même temps éviter la modification des caractéristiques de ce dernier, les distributeurs d'énergie électrique ont été amenés à émettre des recommandations. Ces recommandations concernent les exigences au point de raccordement de l'utilisateur sur le réseau électrique. Un exemple de ces recommandations (les plus anciennes) stipule que chaque utilisateur pris séparément, doit, à son point de raccordement, respecter les limites de perturbations en tension suivantes [16] :

- Harmoniques pairs :  $V_h/V_I < 0.6\%$
- Harmoniques impairs :  $V_h/V_I < 1\%$
- Taux de distorsion harmonique en tension : THD < 1.6%

Au-delà de ces valeurs, il est nécessaire d'installer des dispositifs de filtrage ou bien dans certains cas extrêmes augmenter la puissance de court-circuit du réseau. Ces limites sont destinées à minimiser le risque de voir le réseau d'alimentation général atteindre un taux de distorsion harmonique en tension supérieur à 5%.

D'autre part, pour assurer la compatibilité entre les installations sensibles alimentées par le réseau, il faut imposer des limites d'émission et donner des niveaux d'immunité suffisants. Les caractéristiques principales de la tension fournie par un réseau de distribution (MT ou BI), définies par la norme Européenne EN 50160, précisent les tolérances qui doivent être garanties pour la tension et la fréquence ainsi que les niveaux des perturbations habituellement rencontrées. Le tableau I.1 suivant précise les valeurs adoptées [17].

Tab (I.1) Limites de perturbations définies par EN 50160.

Amplitude de la tension	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pour chaque période d'une semaine 95% des valeurs efficaces moyennes sur 10 minutes doivent être dans la plage <math>V_n \pm 10\%</math></li> </ul>
Variations rapides de la tension	<ul style="list-style-type: none"> <li>• De 5% à 10% de <math>V_n</math> (4 à 6% en moyenne tension)</li> </ul>
Creux de tension	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Profondeur : entre 10% à 99% de <math>V_n</math></li> <li>• Durée : entre 10 ms et 1 minute</li> <li>• Nombre : quelques dizaines à 1 millier par an</li> </ul>
Coupages brèves	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Durée : jusqu'à 3 minutes</li> <li>• Nombre : quelques dizaines à plusieurs centaines par an</li> </ul>
Coupages longues	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Durée : supérieure à 3 minutes</li> <li>• Nombre : entre 10 et 50 par an</li> </ul>
Fréquence	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 50 Hz <math>\pm</math> 1% pendant 95% d'une semaine</li> <li>• 50Hz + 4%, 6% pendant 100% d'une semaine</li> </ul>

Afin de concilier distributeurs et consommateurs, des normes ont été dictées. Le tableau I.2 résume les principales normes concernant la qualité d'énergie et la tension dans les systèmes électriques.

Tab (I.2) Classification des normes concernant la qualité d'énergie électrique.

Thèmes	Normes
Classification de la qualité d'énergie	CEI 61000-2-5 :1995 CEI 61000-2-1 :1990 IEEE 1159 :1995
Creux /Surtension/Interruption	CEI 61009-2-1 :1990 IEEE 1159 :1995
Harmoniques	CEI 61000-2-1 :1990 CEI 61000-2-2 CEI 61000-3-2 CEI 61000-4-7 :1991 IEEE 519 :1992
Flicker de tension	CEI 61000-4-15 :1997
Transitoires	CEI 61000-2-1 :1990 CEI 816 :1984 IEEE 1159 :1995 IEEE C62.41 :1991

Le tableau I.3, repris de la norme CEI 61000-2-2, présente les caractéristiques et le niveau de compatibilité pour les harmoniques au point de raccordement du client pour un réseau satisfaisant la norme CEI 1000-2-4 [18].

Tableau I.3 : Niveau de compatibilité pour les tensions harmoniques sur les réseaux basse tension (Norme CEI 61000-2-2).

Rangs impairs non multiples de 3		Rangs impairs multiples de 3		Rangs pairs	
Rang	Tension harm. (%)	Rang	Tension harm. (%)	Rang	Tension harm. (%)
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				

## I.7 Solutions traditionnelles de la dépollution

Des solutions existent pour éviter la propagation des harmoniques dans les réseaux électriques [15]. Elles nécessitent l'utilisation de composants passifs (inductances, condensateurs, transformateurs) et/ou des branchements qui modifient le schéma de l'installation [16].

### **I.7.1 Compensation des courants harmoniques**

Plusieurs solutions existent pour limiter la propagation et l'effet des harmoniques dans les réseaux électriques [2, 19, 13]:

- L'augmentation de la puissance de court-circuit du réseau et l'utilisation de convertisseurs peu polluants qui ont pour effet de diminuer la distorsion harmonique.
- L'utilisation de dispositifs de filtrage pour réduire la propagation des harmoniques produits par des charges non linéaires.
- Le filtrage consiste à placer en parallèle sur le réseau d'alimentation une impédance de valeur très faible autour de la fréquence à filtrer et suffisamment importante à la fréquence fondamentale du réseau. Parmi les dispositifs de filtrage les plus répandus, on distingue le filtre passif résonnant et le filtre passif amorti ou passe-haut.

#### **I.7.1.1 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 harmoniques 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 sur coût de production et ne tire pas profit du potentiel réel de l'installation [6].

#### **I.7.1.2 Transformateur à couplage spécial**

Le choix de couplages appropriés des transformateurs permet de limiter la circulation des courants harmoniques. L'utilisation d'un transformateur d'isolement, de rapport 1/1 à couplage triangle-étoile ou triangle-zigzag, empêche la propagation des courants harmoniques de rang 3 et leurs multiples circulant dans le neutre. Ce procédé n'a aucun effet sur les autres rangs harmoniques. Cette solution limite, au contraire, la puissance disponible de la source, et augmente l'impédance de ligne. Il en résulte une augmentation de la distorsion en tension due aux autres rangs harmoniques [21, 22].

### I.7.1.3 Inductances (selfs) série

L'utilisation d'inductances anti-harmoniques est une solution qui consiste à protéger les condensateurs, destinés à améliorer le facteur de puissance, en plaçant une inductance en série. Cette inductance est calculée de façon à ce que la fréquence de résonance ne corresponde à aucun des harmoniques présents [23].

### I.7.1.4 Filtrage passif

Les dispositifs du filtrage les plus répandus, sont le filtre passif résonnant, le filtre passif amorti et le filtre passe-haut, représentés par la figure I.9

- Le phénomène de résonance avec le réseau qui est à l'origine de l'amplification de tout harmonique à des fréquences voisines de celle de la résonance.
- La dépendance des performances du filtre passif des caractéristiques du réseau sur lequel il est connecté [24]

La conception de ces filtres nécessite une étude approfondie du réseau électrique. Leurs dimensionnements dépendent du spectre harmonique de la charge et de l'impédance de la source d'énergie [25].

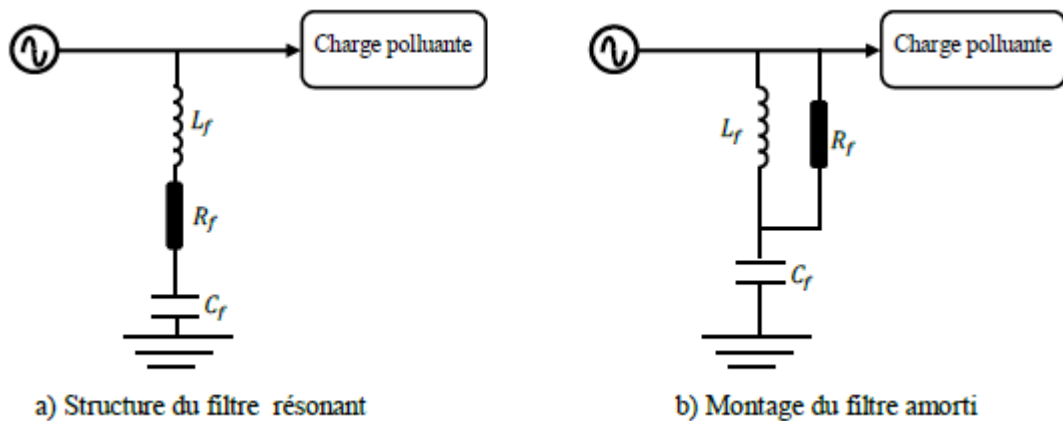


Fig. (I.9) Structures de filtres passifs.

### I.7.2 Compensation de la puissance réactive

La puissance réactive est majoritairement consommée par les moteurs asynchrones et plus récemment par des dispositifs à base d'électronique de puissance. Différentes méthodes de compensation sont utilisées pour relever le facteur de puissance. La plus simple consiste à placer des batteries de condensateurs en parallèle avec le réseau. L'inconvénient de cette

méthode réside dans le fait que la puissance réactive fournie par les condensateurs est constante et qu'elle ne s'adapte pas à l'évolution du besoin [7].

### **I.7.3 Rééquilibrage des courants du réseau électrique**

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

Une autre solution est l'installation d'un compensateur passif composé d'inductance et de condensateur. Ce montage permet de présenter à 50 Hz une impédance équilibrée. Cependant, le montage de Steinmetz provoque un fort déséquilibre pour des fréquences différentes de 50 Hz, avec des résonances qu'il faut éviter d'exciter à proximité d'un générateur d'harmoniques [7].

### **I.7.4 Agir sur la structure de l'installation:**

Il est souhaitable d'alimenter un grand pollueur par un transformateur à part, afin de le séparer d'un récepteur sensible. Face à un pollueur moyen il est préférable d'effectuer l'alimentation des câbles distincts au lieu de les connecter en parallèle. Une distribution en étoile permet le découplage par les impédances naturelles et/ou additionnelles [6].

### **I.7.5 Pont 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 hexasphasé.

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 [26].

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 I.8 représente le courant absorbé par le primaire du transformateur à partir des courants délivrés par les deux secondaires.

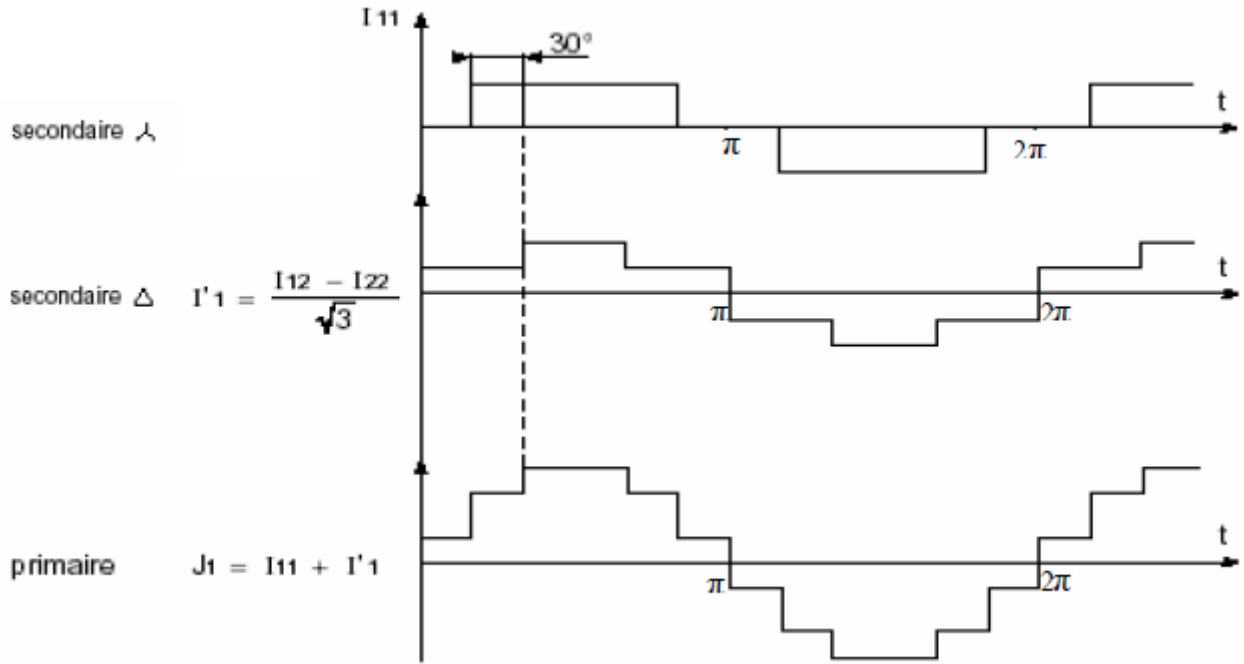


Fig. (I.10) Forme d'onde des courants absorbés

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 I.9

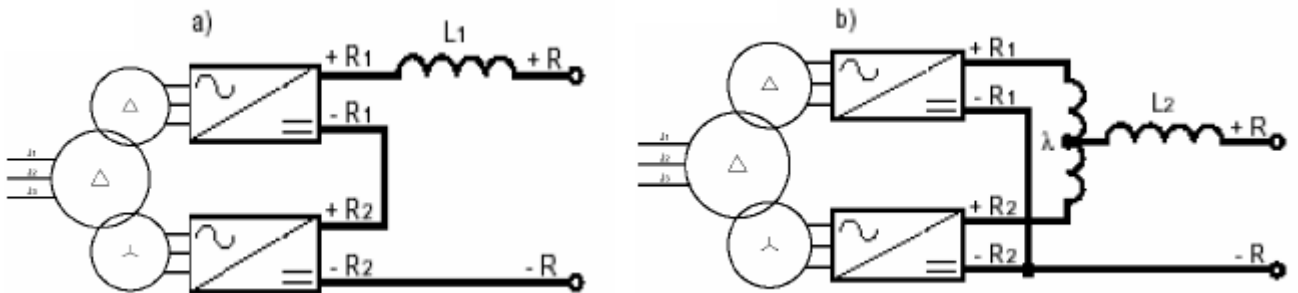


Fig. (I.11) Redresseur dodécaphasé, (a) montage en série et (b) montage en parallèle des deux ponts redresseurs.

### I.8 Solutions modernes

Les solutions de dépollution traditionnelles ne répondent pas au changement des réseaux électriques et des charges à protéger, [20] donc des solutions modernes sont proposées. En effet, les filtres actifs s'adaptent aux évolutions du réseau électrique et de la charge. Tout en fournissant aux consommateurs une bonne qualité de l'énergie, même si le fonctionnement est perturbé.

### I.8.1 Filtrage actif

Le filtrage actif date du début des années 1970 et ses familles de filtres actifs parallèles et série réalise a base d'onduleurs contrôlés en modulation de largeur d'impulsion (*MLI*) datent de 1976 et son la solution adaptée à la compensation des tensions [19].

Le but de ces filtres actifs est de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à ce que le courant ou la tension redevienne sinusoïdal [27].

On trouve trois types de structures de filtre actif :

#### I.8.1.1 Filtre actif parallèle (FAP)

Utilisé pour compenser toutes les harmoniques du courant, les déséquilibres et la puissance réactive.

Le FAP est connecté en parallèle avec le réseau (voir la figure I.12). Il injecte dans le réseau des courants égaux mais en opposition de phase à ceux absorbés par la charge. Ainsi le FAP empêche les courants perturbateurs (harmoniques, réactifs et déséquilibrés) produit par des charges polluantes, de circuler à travers l'impédance de réseau donc les courants coté réseau seront sinusoïdaux [28].

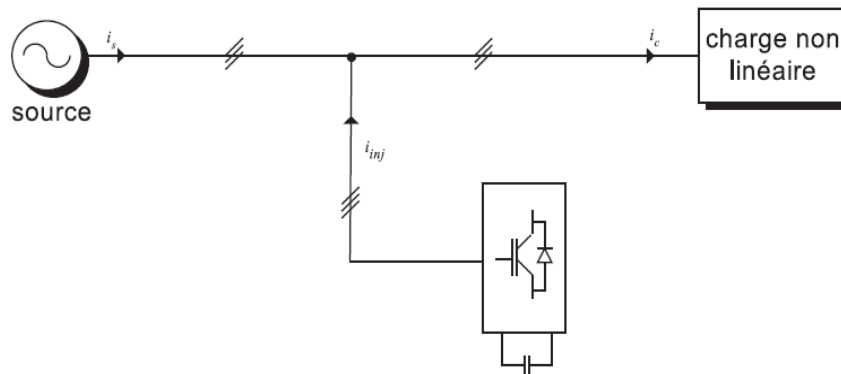


Fig. (I.12) Structure du filtre actif parallèle.

#### I.8.1.2 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 I.13), venant de la source et également à celles provoquées par la circulation des courants perturbateurs à travers l'impédance du réseau [29].

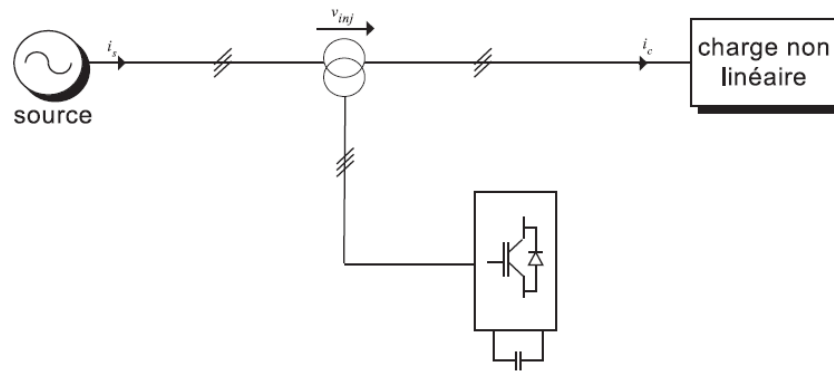


Fig. (I.13) Structure du filtre actif série.

### I.8.1.3 La combinaison parallèle - série actifs

La combinaison parallèle-série actifs, aussi appelée Unified Power Quality Conditioner (UPQC), résulte de l'association des deux filtres actifs parallèle et série, comme le montre la Fig. I.14. Profitant des avantages des deux filtres actifs, l'UPQC assure un courant et une tension sinusoïdaux du réseau électrique à partir d'un courant et d'une tension perturbés de celui-ci [4, 5, 30, 31, 32].

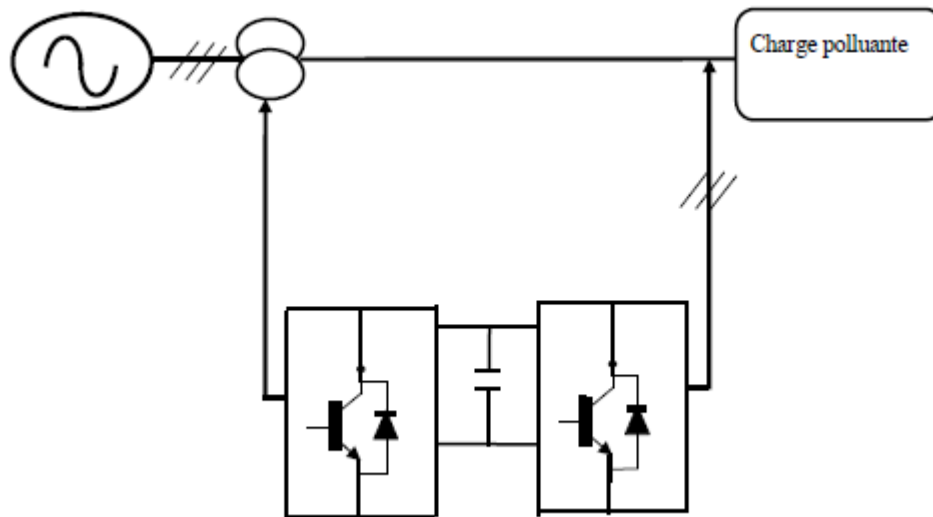


Fig. (I.14) Structure du filtre actif (série, parallèle).

### I.8.2 Filtre hybride

Afin de réduire le dimensionnement et par conséquent le prix des filtres actifs, l'association de filtres actifs à des filtres passifs peut être une solution. Dans ce cas on connectera en parallèle ou en série des filtres passifs pour compenser les harmoniques prépondérants [33]. Ainsi, les

filtres passifs éliminent les harmoniques en basses fréquences, ce qui permet de réduire le dimensionnement du filtre actifs qui ne compense que le reste des perturbations. En conséquence, le filtre hybride est plus petit que pour un filtre actif et la réponse est bien meilleure qu'avec des filtres passifs seuls [34]. Cette structure permet d'améliorer les caractéristiques de compensation des filtres passifs et de réaliser ainsi une réduction de la valeur nominale du filtre actif [35]. Souvent le filtre passif est formé par deux filtres réglés aux fréquences des harmoniques 5 et 7 et un filtre passe haut réglé autour de la fréquence de l'harmonique 11. Ainsi dans ce cas, le filtre actif permet d'éviter des résonances entre les éléments passifs et le réseau [36].

### I.8.2.1 Association série d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif

Dans cette configuration, les deux filtres actif et passif sont directement connectés en série, sans l'intermédiaire d'un transformateur. L'ensemble est connecté en parallèle sur le réseau comme il est présenté dans la figure I.15

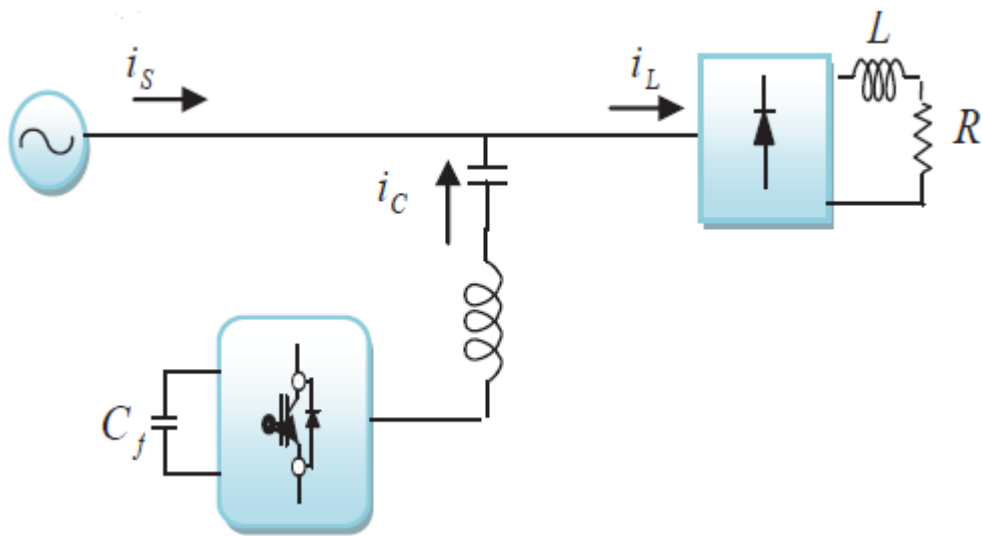


Fig. (I.15) Association série d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif.

Dans ce cas, le filtre passif se comporte comme une impédance faible à la fréquence d'accord et comme une grande impédance à la fréquence fondamentale. Ce système présente deux avantages : le dimensionnement en puissance du filtre actif est encore plus réduit du fait que le courant qui le traverse est plus faible et le filtre actif est à l'abri d'un éventuel court-circuit de la charge [2, 37].

### I.8.2.2 Association parallèle d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif

Dans cette topologie, le filtre actif est connecté en parallèle avec le filtre passif. Tous les deux sont également en parallèle avec la charge comme il est présenté dans la figure I.16

Le filtre actif parallèle sert à compenser les courants harmoniques de basses fréquences émis par la charge polluante, alors que le filtre passif accordé sur une fréquence harmonique élevée, permet de compenser les harmoniques de hautes fréquences [37].

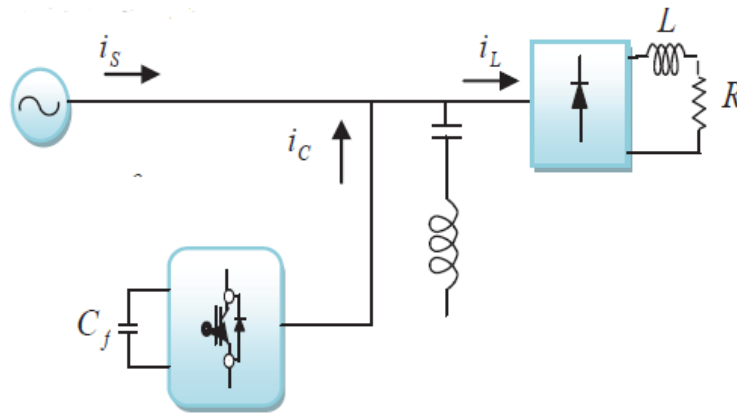


Fig. (I.16) Association parallèle d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif.

### I.8.2.3 Association d'un filtre actif série et d'un filtre passif

Le principe de fonctionnement de cette configuration est le même que le précédent. Il a l'avantage de réduire encore le dimensionnement du filtre actif série car le courant qui le traverse est faible, de plus, le filtre actif série est à l'abri d'un éventuel court-circuit de la charge [38].

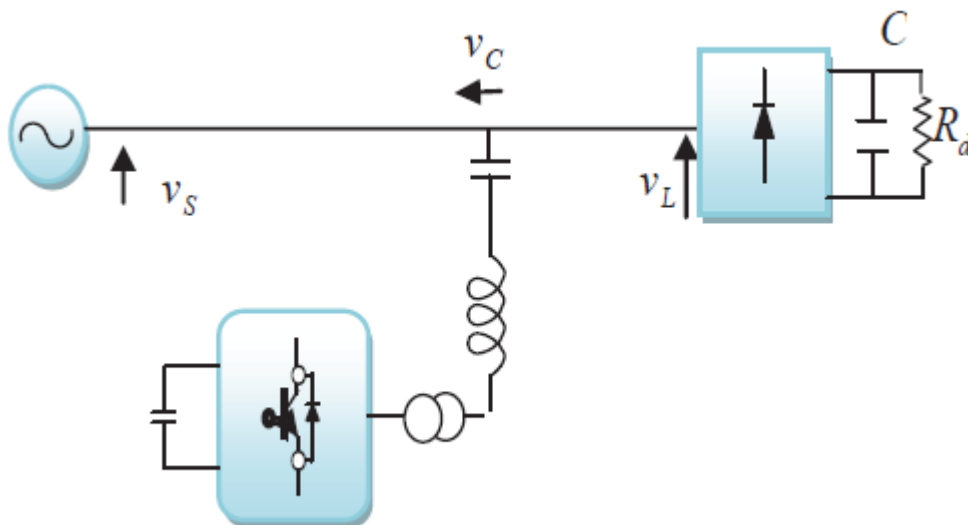


Fig. (I.17) Association d'un filtre actif série et d'un filtre passif.

### I.8.3 Les redresseurs MLI

Les redresseurs à MLI sont des onduleurs exploitant leurs réversibilités en courant dans le deuxième mode de fonctionnement. Grâce à la commande MLI, ces convertisseurs peuvent prélever des courants sinusoïdaux sur le réseau alternatif et assurer aussi un facteur de puissance unitaire. Selon le type d'onduleur utilisé, nous distinguons deux structures de redresseurs à MLI:

- redresseur à MLI de courant
- redresseur à MLI de tension

#### I.8.3.1 Redresseur de tension

Le redresseur à MLI de tension est basé sur une structure d'onduleur de tension représenté sur la figure 1.18. Chaque interrupteur est constitué d'un IGBT (composant commandé à l'amorçage et au blocage) et d'une diode en antiparallèle. Cet interrupteur est unidirectionnel en tension et bidirectionnel en courant. Ainsi, ce convertisseur, de part sa structure, est réversible en courant. Il peut donc contrôler de façon instantanée la forme d'onde des courants prélevés sur le réseau [39]. Il alimente alors une charge (active ou passive) en continu à partir d'un réseau alternatif, le courant absorbé étant sinusoïdal et, éventuellement, en phase avec la tension réseau correspondante.

Ce redresseur à MLI permet d'atteindre un facteur de puissance très proche de l'unité et régler, via la commande, la direction du flux de l'énergie réactive : absorbée ou fournie [40].

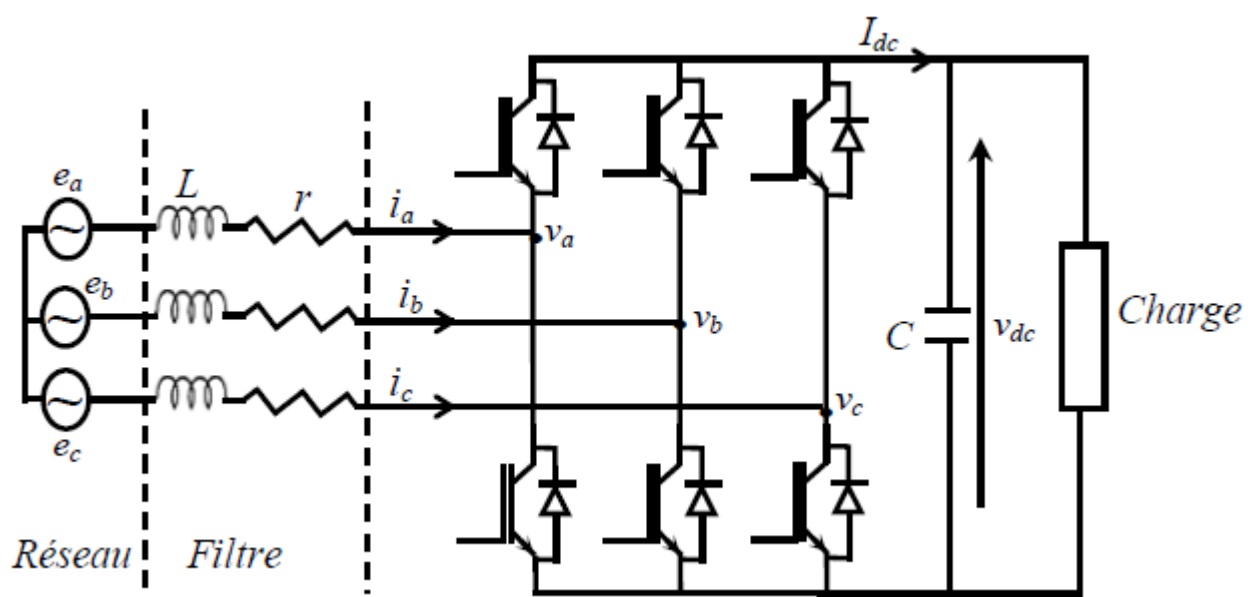


Fig. (I.18) Topologie d'un redresseur à MLI triphasé de tension.

Parmi les moyens de dépollution harmonique présentés précédemment, plus particulièrement les convertisseurs à prélèvement de courant sinusoïdal, on s'intéressera dans la suite de ce travail uniquement à la structure du redresseur à MLI de tension. Elle constitue donc notre topologie support pour développer et implanter des stratégies de commande permettant le prélèvement de courants sinusoïdaux sur le réseau alternatif et le fonctionnement avec un facteur de puissance unitaire.

### I.8.3.2 redresseur à MLI de courant

La topologie de la redresse à MLI de courant est illustrée sur la figure I.19. Il assure la conversion d'énergie entre une source de tension alternative et un récepteur de courant continu. Les interrupteurs sont unidirectionnels en courant mais bidirectionnels en tension. L'utilisation des techniques MLI conduit à un courant coté alternatif ayant une pollution harmonique contrôlée [16]. Cette structure est souvent dotée d'un filtre de second ordre LC du côté alternatif [41, 42].

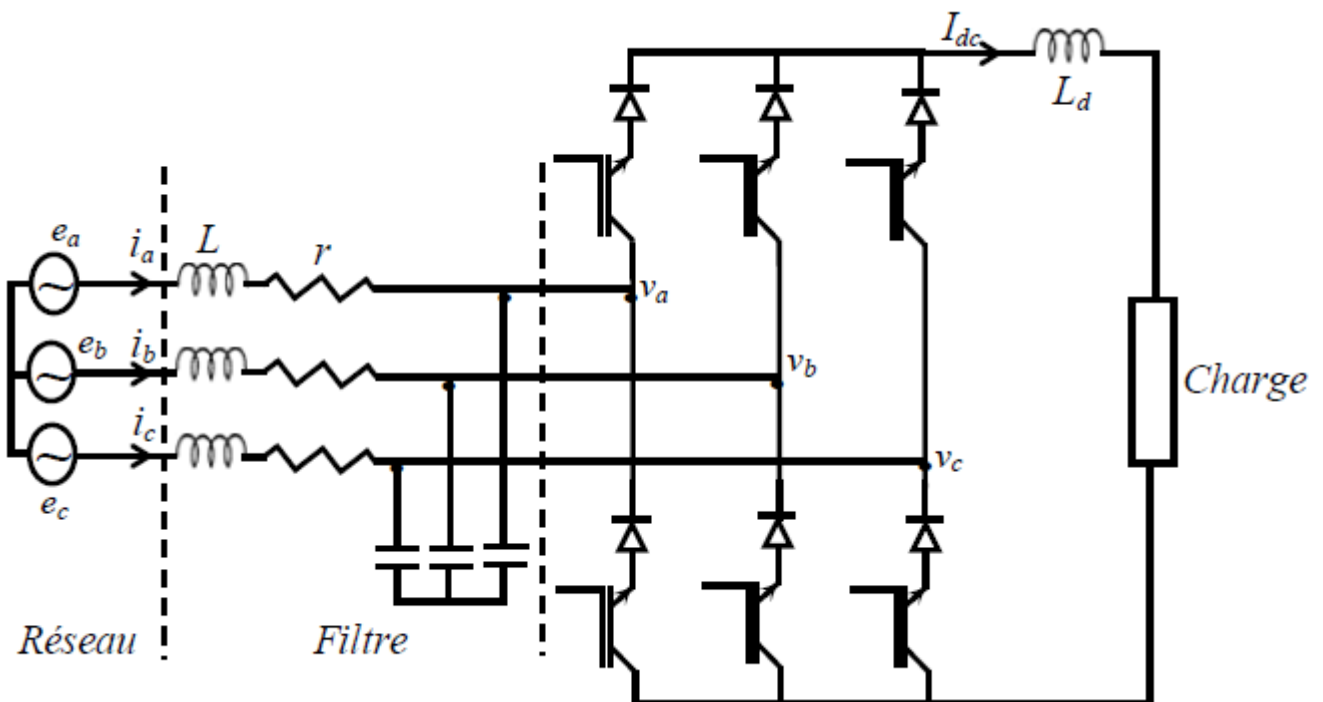


Fig. (I.19) Topologie d'un redresseur à MLI triphasé de courant.

## I.9 Conclusion

Comme nous avons pu le constater dans ce premier chapitre, la qualité de l'énergie électrique est affectée pas dès les différents types des perturbations comme les creux de tension, le déséquilibre ainsi que les harmoniques, qui engendrent la dégradation de la qualité de l'énergie et donc une mauvaise satisfaction et prestation du client. Cependant aux perturbations elles subies des solutions existent, soit traditionnelles ou modernes, doivent être prise afin de minimiser les effets des perturbations et garantir une alimentation de qualité. Les solutions traditionnelles comme les filtres passifs qui ne sont pas très performants avec des charges non linéaire et variable. Pour cela et avec les progrès de l'électronique de puissance et de l'informatique, les travaux de recherches ont été orientés vers des nouvelles solutions à savoir les filtres actifs : série, parallèle et hybride, dans ce contexte un état de l'art actuel des filtres actifs a été dressé dans ce chapitre pour qui il nous aide à déterminer la stratégie et les points de contributions de notre travail. Dans le chapitre suivant, nous présenterons l'étude détaillée du filtre actif parallèle ainsi que leurs stratégies de commande.

# *Chapitre II:*

*Structure du FAP de puissance*  
*et principe de fonctionnement*

## II.1 Introduction

La structure du filtre actif parallèle (FAP), est considérée dans ce chapitre. Elle est composée de deux (2) parties principales : la partie puissance et la partie contrôle-commande [23].

Ce chapitre présente la structure du filtre actif parallèle ainsi que son principe de fonctionnement. Par ailleurs les différentes stratégies de commande utilisées pour ces filtres actifs de puissance triphasée pour identifier les courants harmoniques de référence.

## II.2 Principe de filtrage actif parallèle de puissance

Le schéma de principe du filtre actif parallèle est représenté sur la figure II.1, il doit fournir la puissance déformante et la puissance réactive. Ainsi, le réseau fournit uniquement la puissance active [6].

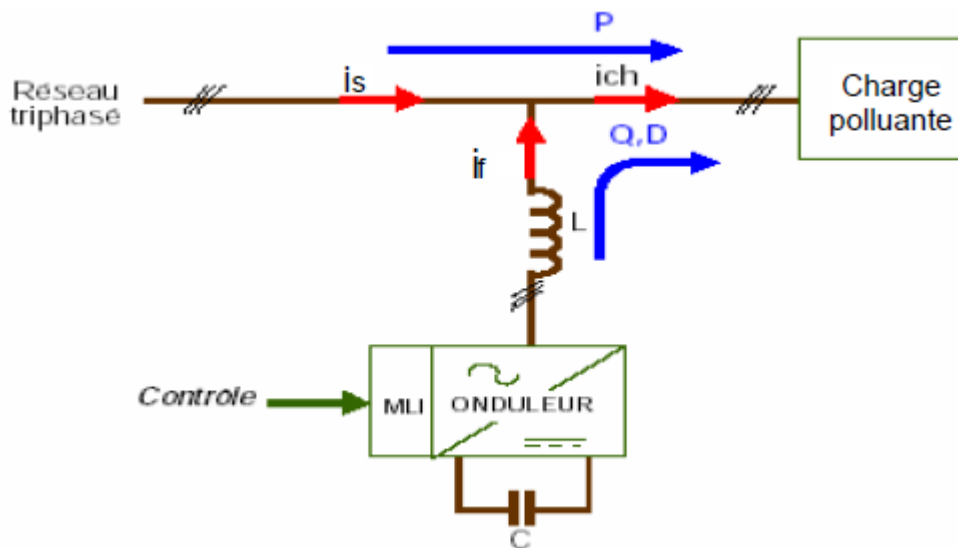


Fig. (II.1) Schéma de principe du filtre actif parallèle.

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 [43].

Ce filtre est le plus souvent commandé comme un générateur de courant, il génère des courants harmoniques, en opposition de phase avec le réseau, afin que la somme avec ceux-ci soit nulle. On obtient alors des courants sinusoïdaux au niveau du réseau. Il permet donc de supprimer au point de raccordement tous les harmoniques de courants de la charge non linéaire. En pratique, on ne peut pas obtenir un courant de ligne purement sinusoïdal comme dans le cas idéal mais le but est d'avoir un courant qui sera le plus proche possible de la sinusoïde. La simulation par PSIM permet d'apprécier la réalité de la compensation.

En général, le filtre actif parallèle est utilisé pour la dépollution des réseaux BT et MT. Son impédance totale vis à vis de la source et de la charge lui confère une bonne auto-adaptabilité avec des performances appréciables [15].

Dans le cas général, le courant absorber par la charge comporte une composante active ( $i_{cha}$ ), une composante réactive ( $i_{chr}$ ) et une composante harmonique

$$\left(\sum_{n=1}^{\infty} i_{chn}\right)$$

$$i_{ch} = i_{cha} + i_{chr} + \sum_{n=1}^{\infty} i_{chn} \tag{II.1}$$

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

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

$$i_s = i_{ch} + i_f \tag{II.2}$$

La source fournit la puissance active absorbée par la charge :

$$i_s = i_{cha} \tag{II.3}$$

Le filtre actif parallèle fournit la puissance réactive et déformante :

$$i_f = i_{chr} + \sum_{n=1}^{\infty} i_{chn} \tag{II.4}$$

Pour illustrer le principe de filtrage actif, considérons l'ensemble réseau électrique, charge polluante et filtre actif (figure II.2). La charge polluante est constituée d'un pont triphasé à diodes débitant sur un circuit RL.

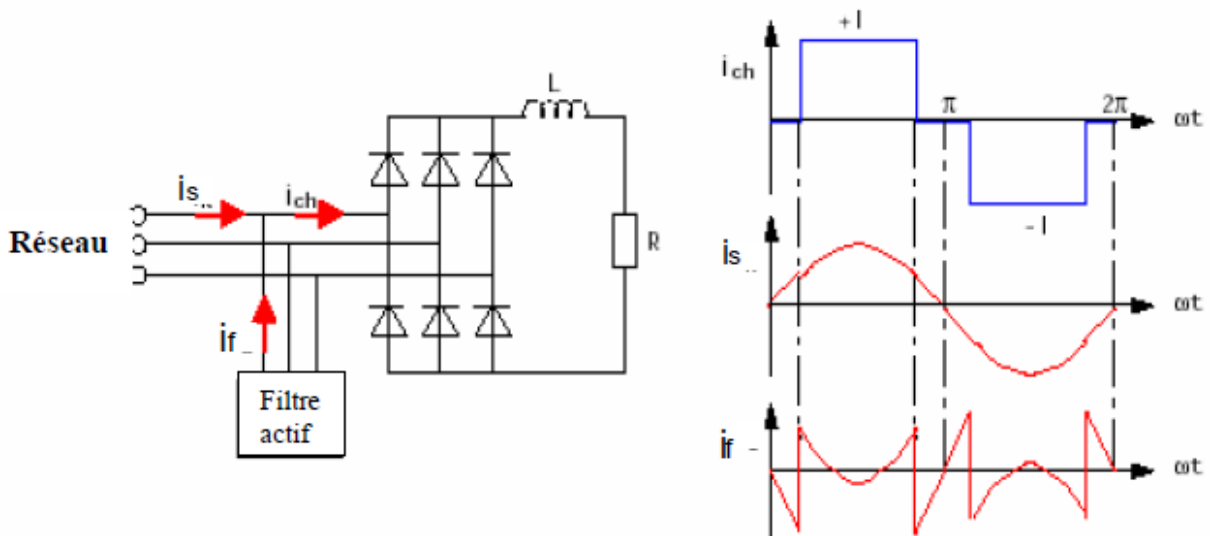


Fig. (II.2) Schéma de principe de l'ensemble réseau électrique, charge polluante et filtre actif et formes d'ondes des courants respectifs.

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

### II.3 Structure du filtre actif parallèle

Les filtres actifs sont constitués de deux parties laquelle se présente sous la forme de: la partie puissance et la partie commande. (figureII.3).

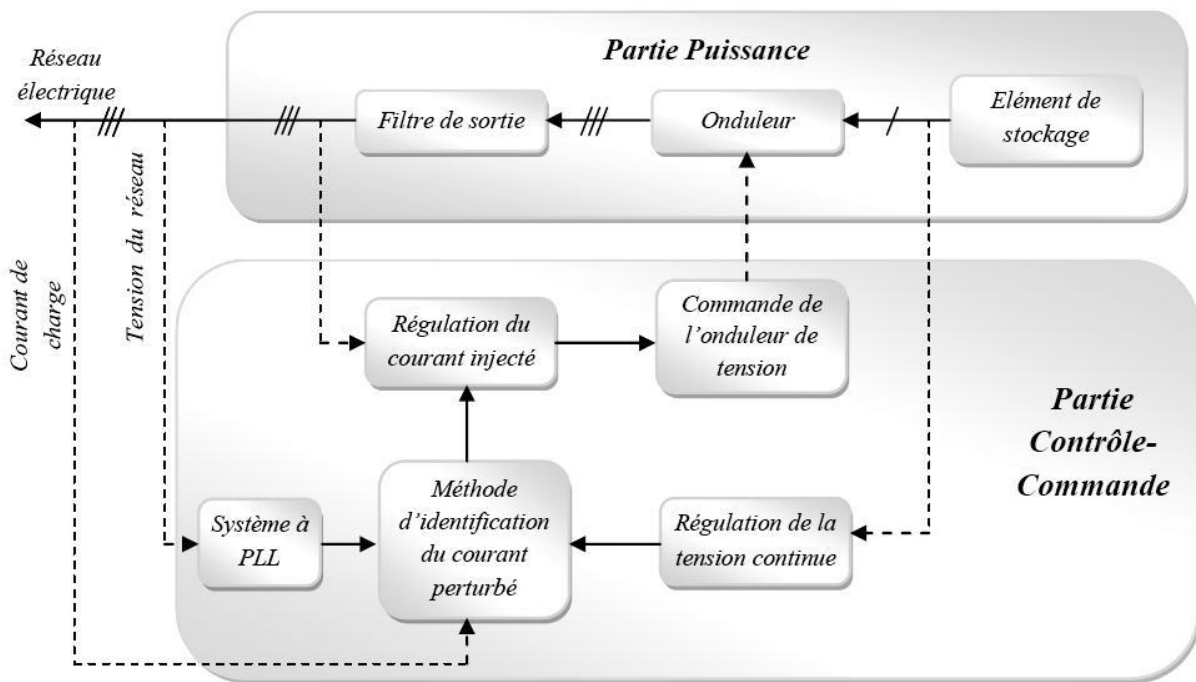


Fig. (II.3) Structure d'un filtre actif parallèle.

La partie puissance est constituée:

- D'un onduleur de tension à base d'interrupteurs de puissance, commandables à l'amorçage et au blocage (*GTO, IGBT, ...etc.*) avec des diodes en antiparallèle;
- D'un circuit de stockage d'énergie;
- D'un filtre de sortie.

La partie commande est constituée:

- De la méthode d'identification des courants perturbés;
- Du système à base de *PLL* qui sera intégré dans la méthode d'identification des courants;

- De la régulation de la tension continue appliquée aux éléments de stockage d'énergie;
- De la régulation du courant injecté sur le réseau à partir de l'onduleur de tension;
- De la commande de l'onduleur de tension [44].

### II.3.1 Etude de la partie puissance

La partie puissance du FAP est constituée de l'onduleur, d'un filtre découplage et d'une capacité de stockage de l'énergie.

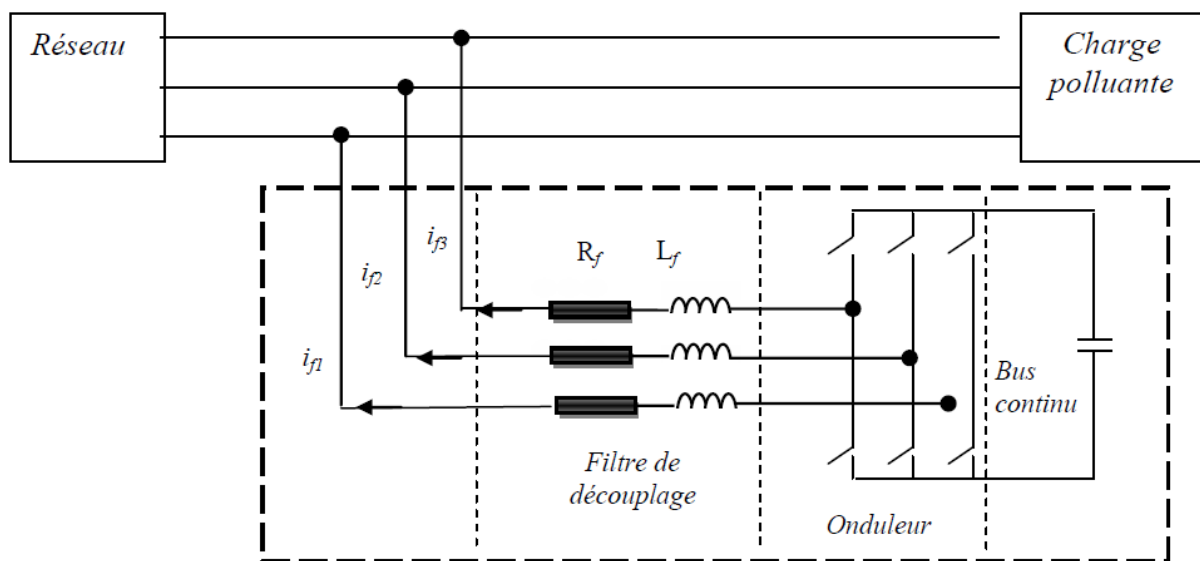


Fig. (II.4) Schéma du circuit de puissance d'un filtre actif parallèle à structure tension.

#### II.3.1.1 Onduleur d'un filtre actif parallèle

- **Structure générale**

L'onduleur est la partie essentielle du filtre actif [45]. La figure (II.5) présente une structure générale d'onduleur triphasé, il se compose de trois bras à base d'interrupteurs de puissance commandables à l'amorçage et au blocage avec de diodes en antiparallèle [2, 46].

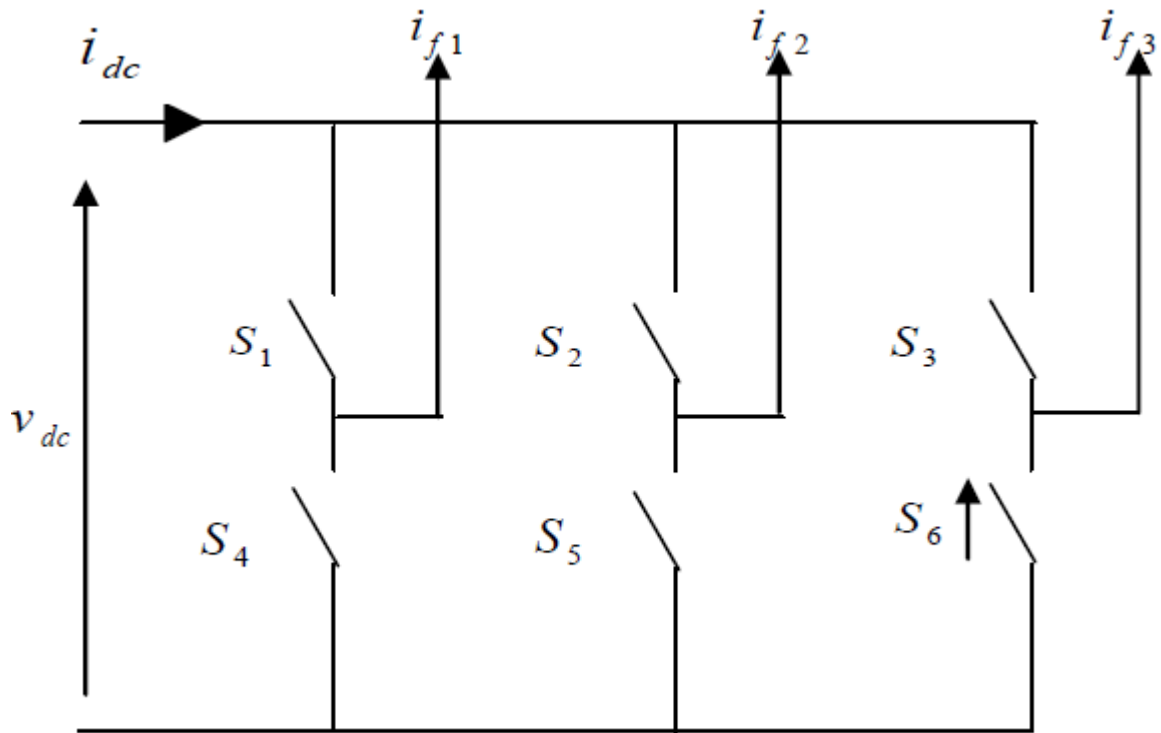


Fig. (II.5) Structure d'un onduleur triphasé.

L'onduleur peut être commandé en tension ou en courant et peut donc se comporter comme une source de tension ou de courant vis-à-vis du circuit extérieur. Ce comportement en source de tension ou de courant peut être obtenu indifféremment avec une structure d'onduleur de tension ou de courant. La source continue peut être une source de courant ou de tension, cette source peut être un élément réactif, condensateur ou inductance, dans lequel on maintient constante la valeur moyenne de l'énergie stockée [43].

- **Structure de tension**

Le filtre actif à structure tension connecté en parallèle au réseau est représenté sur la figure (II.6). On insère entre l'onduleur et le réseau un filtre d'entrée du premier ordre qui est en réalité une simple inductance  $L_f$ . La capacité " $C_{dc}$ " joue le rôle d'une source de tension continue. La tension à ses bornes  $V_{dc}$  doit être positive et maintenue quasiment constante. Ses fluctuations doivent être faibles d'une part pour ne pas dépasser la limite en tension des semi-conducteurs constituant les interrupteurs, d'autre part pour ne pas dégrader les performances du filtre actif [47, 48].

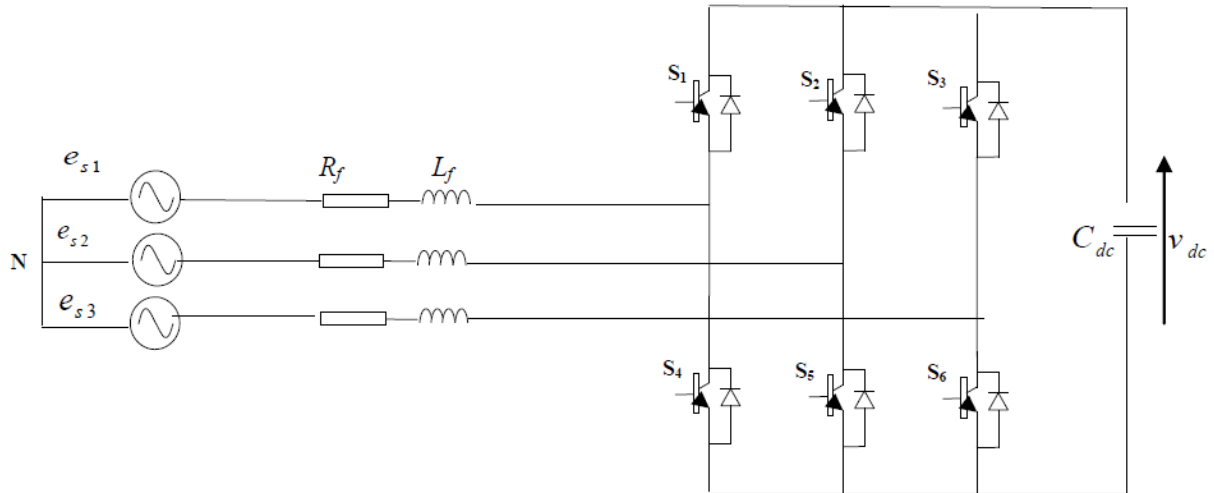


Fig. (II.6) Structure filtre active parallèle à tension.

L'onduleur de tension utilise des interrupteurs réversibles en courant formés de semi-conducteurs commandés à la fermeture et à l'ouverture associés à des diodes montées en parallèle inverse comme le montre la figure (II.7). On utilise de préférence:

- Le transistor à effet de champ ou *MOSFET* pour les faibles puissances;
- Le transistor bipolaire ou *IGBT* pour les courants moyens;
- Le thyristor *GTO* pour les forts courants [49].

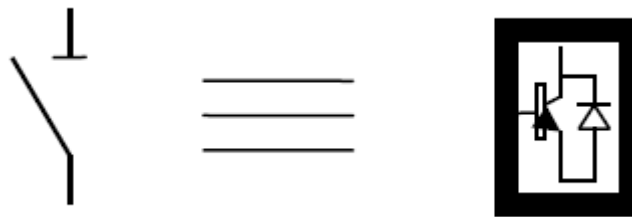


Fig. (II.7) Interrupteurs équivalents du filtre actif à source de tension.

### • Structure de courant

Le schéma de principe du filtre actif à structure courant connecté au réseau est représenté sur la figure (II.8). On insère entre l'onduleur et le réseau un filtre d'entrée (d'un filtre passe-bas) du second ordre constitué d'une inductance  $L_f$  et d'une capacité  $C_f$ . L'inductance  $L$  sert à stocker l'énergie et joue le rôle d'une source de courant continu. Le courant  $i_f$  traversant cette

inductance est maintenu quasiment constant pour ne pas dégrader les performances du filtre actif [50, 48].

Les interrupteurs sont unidirectionnels. Ils sont formés par des transistors commandés à l'ouverture et à la fermeture. Ceux-ci ne pouvant supporter de tension inverse, ils nécessitent une diode en série [47].

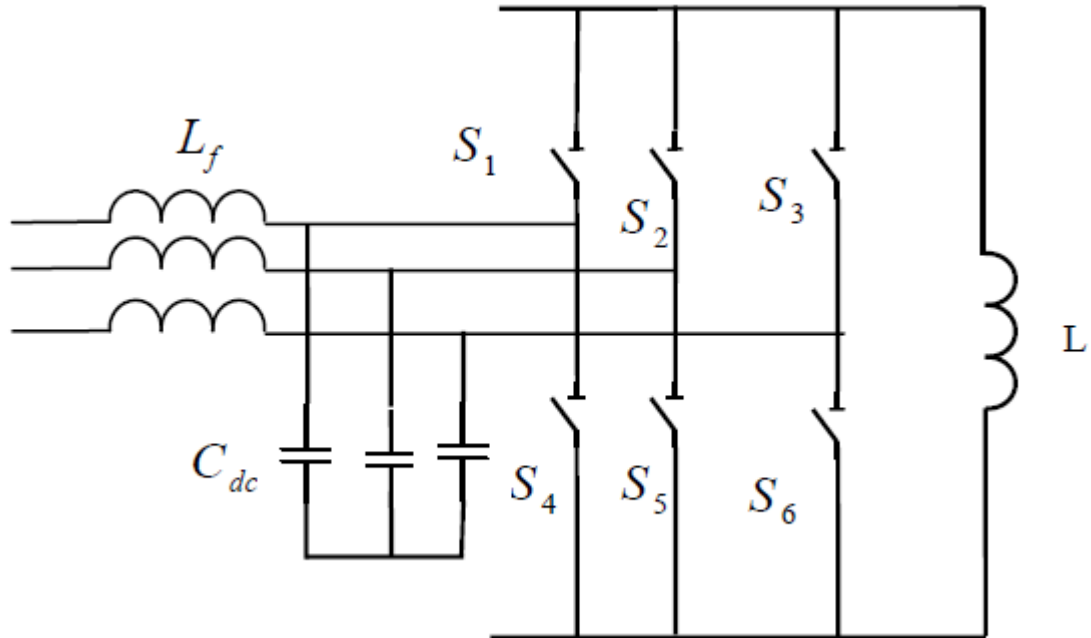


Fig. (II.8) Structure de filtre actif à courant.

### II.3.1.1.1 Etude de l'onduleur de tension à deux niveaux à trois bras

L'onduleur de tension, contrairement à celui de courant est caractérisé par son élément d'alimentation en énergie qui est un condensateur (Figure II.9). La tension aux bornes de ce condensateur doit être maintenue constante [24].

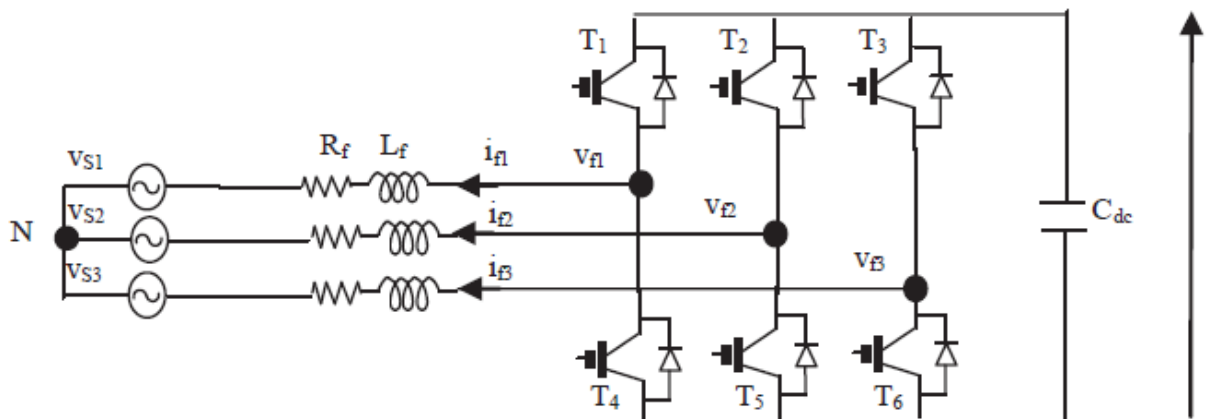


Fig. (II.9) Représente un onduleur triphasé de tension.

Les interrupteurs sont unidirectionnels en tension et doivent être réversibles en courant. Pour y parvenir, les éléments semi-conducteurs composant l'onduleur sont associés en parallèle avec des diodes. Ces semi-conducteurs sont commandés à la fermeture et à l'ouverture [27]. Les semi-conducteurs d'un même bras de l'onduleur sont commandés de façon alternée, la conduction de l'un entraînant le blocage de l'autre. Le fonctionnement de l'onduleur se déroule de manière à ce que les semi-conducteurs d'un même bras ne soient jamais fermés simultanément, au risque de court-circuiter le condensateur. En effet, les semi-conducteurs du même bras peuvent être ouverts pendant un temps défini comme étant un temps mort afin d'éviter ce risque [51].

L'ouverture et la fermeture des interrupteurs de l'onduleur de la Figure II.9 dépendent de l'état des signaux de commande ( $S_1, S_2, S_3$ ) comme il est défini par [52]:

$$S_1 = \begin{cases} 1 & T_1 \text{ fermé} & T_4 \text{ ouvert} \\ 0 & T_1 \text{ ouvert} & T_4 \text{ fermé} \end{cases}$$

$$S_2 = \begin{cases} 1 & T_2 \text{ fermé} & T_5 \text{ ouvert} \\ 0 & T_2 \text{ ouvert} & T_5 \text{ fermé} \end{cases}$$

$$S_3 = \begin{cases} 1 & T_3 \text{ fermé} & T_6 \text{ ouvert} \\ 0 & T_3 \text{ ouvert} & T_6 \text{ fermé} \end{cases}$$

Les tensions de ligne, imposées par l'onduleur, sont alors définies par :

$$\begin{bmatrix} v_{f1} - v_{f2} \\ v_{f2} - v_{f3} \\ v_{f3} - v_{f1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_1 - S_2 \\ S_2 - S_3 \\ S_3 - S_1 \end{bmatrix} V_{dc} \quad (\text{II.5})$$

Les tensions de sortie de l'onduleur, posées par  $V_{fx}$  ; avec ( $x = \{1, 2, 3\}$ ), sont référencées par rapport au neutre du réseau et vérifient l'équation suivante :

$$V_{fx} = V_{sx} + L_f \frac{di_{fx}}{dt} + R_f i_{fx} \quad (\text{II.6})$$

Les tensions du réseau étant supposées équilibrées et sachant que la somme des courants injectés par l'onduleur est nulle, on peut écrire :

$$\begin{cases} V_{s1} + V_{s2} + V_{s3} = 0 \\ i_{f1} + i_{f2} + i_{f3} = 0 \end{cases} \quad (\text{II.7})$$

Nous pouvons donc déduire des équations (II.6) et (II.7) la relation suivante :

$$V_{f1} + V_{f2} + V_{f3} = 0 \quad (\text{II.8})$$

A partir des équations (II.5) et (II.8), nous obtenons :

$$\begin{bmatrix} V_{f1} \\ V_{f2} \\ V_{f3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2S_1 & -S_2 & -S_3 \\ -S_1 & 2S_2 & -S_3 \\ -S_1 & -S_2 & -2S_3 \end{bmatrix} \frac{V_{dc}}{3} \quad (\text{II.9})$$

Puisque les grandeurs  $S_1$ ,  $S_2$  et  $S_3$  peuvent prendre chacune deux valeurs (0 ou 1), il en résulte huit commandes possibles, présentées dans le tableau II.1

Tab (II.1) Tensions générées par l'onduleur de tension deux niveaux.

État	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$v_{f1}$	$v_{f2}$	$v_{f3}$
0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	$2v_{dc}/3$	$-v_{dc}/3$	$-v_{dc}/3$
2	0	1	0	$-v_{dc}/3$	$2v_{dc}/3$	$-v_{dc}/3$
3	1	1	0	$v_{dc}/3$	$v_{dc}/3$	$-2v_{dc}/3$
4	0	0	1	$-v_{dc}/3$	$-v_{dc}/3$	$2v_{dc}/3$
5	1	0	1	$v_{dc}/3$	$-2v_{dc}/3$	$v_{dc}/3$
6	0	1	1	$-2v_{dc}/3$	$v_{dc}/3$	$v_{dc}/3$
7	1	1	1	0	0	0

### II.3.1.2 Circuit de stockage d'énergie

La source continue de l'onduleur de tension est un condensateur ( $C_{dc}$ ) qui joue le rôle d'une source de tension continue  $V_{dc}$  [53]. Une certaine quantité de l'énergie doit être emmagasinée en permanence dans la source continue. Mais à cause des pertes dans les interrupteurs et dans le condensateur, la source continue doit recevoir son énergie du réseau continuellement à travers le convertisseur. Pour son fonctionnement, la tension  $V_{dc}$  est maintenue constante afin de remédier aux fluctuations qui peuvent affecter la qualité du filtrage [51].

### II.3.1.3 Filtre de sortie

Le filtre de sortie a pour rôle d'assurer la liaison entre le réseau et l'onduleur de tension. Le dimensionnement de ce filtre doit tenir compte des deux points importants suivants:

- II doit fournir une atténuation suffisante des rebondissements causés par la commutation des semi-conducteurs de l'onduleur du filtre actif,
- II doit préserver les performances du filtre actif, définie par :

$$\frac{di_f}{dt} = \frac{di_{ref}}{dt} \quad (\text{II.10})$$

Un filtre de sortie du premier ordre est le plus souvent utilisé dans la littérature, il est composé d'une inductance  $L_f$  et de résistance interne  $R_f$ . Une valeur relativement faible de  $L_f$  permet d'obtenir une bonne dynamique du FAP en satisfaisant l'égalité (II.10) [27, 53].

## II.3.2 Etude de la partie commande

### II.3.2.1 Les méthodes d'identification des courants perturbés

Les performances du filtre actif dépendent des semi-conducteurs de puissance utilisés pour réaliser l'onduleur et le choix de la méthode utilisée pour compenser la composante harmonique du courant de charge. Afin de commander le filtre actif parallèle, nous devons d'abord identifier les courants harmoniques de la charge polluante, qui servent en effet comme références du filtre actif parallèle. Trois possibilités d'identification des courants perturbateurs ont déjà été proposées:

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

La première méthode est la plus appropriée au filtre actif parallèle installé par le consommateur pour compenser les courants perturbateurs causés par ses charges polluantes.

Les différentes méthodes d'identification de courant perturbateur peuvent être regroupées en deux familles [4, 6, 47, 49, 50].

- Les stratégies de commande dans le domaine fréquentiel sont basées sur le principe de l'analyse de Fourier et nécessitent la périodicité de l'onde polluante. Parmi ces stratégies, La transformée de Fourier rapide (*FFT*), la transformée de Fourier discrète (*DFT*), la transformée de Fourier discrète récursive (*RDFT*) et le filtre de *Kalman* sont les méthodes usuellement utilisées dans le domaine fréquentiel.
- Les stratégies de commande temporelle sont basées sur le principe de maintenir la tension ou le courant instantané proche d'un signal sinusoïdal, ce avec une tolérance raisonnable. Parmi ces stratégies, on peut citer:

La méthode des puissances instantanées ( $pq$ ): Cette méthode offre l'avantage de choisir la perturbation à compenser avec précision, rapidité et facilité d'implantation, la théorie de référentiel lié au synchronisme ( $dq$ ), la théorie des puissances instantanées dans le référentiel ( $pqr$ ) et enfin la méthode du filtre coupe-bande.

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

La méthode de puissance instantanée est la méthode la plus connue et appropriée au filtre actif parallèle installé par le consommateur pour compenser les courants perturbateurs causés par ses charges polluantes. C'est pourquoi cette méthode de détection sera employée dans ce travail [2, 22, 47, 49, 50].

### II.3.2.1.1 Principe du fonctionnement de la méthode des puissances instantanées

Cette méthode introduit par H. Akagi qui est une méthode temporelle. Elle était utilisée afin d'éviter les difficultés dues au nombre élevé de calcul lors de la mise en œuvre de méthodes fréquentielles telle que la transformée de Fourier (Transformées de Fourier rapide ou discrète), exploite la transformation de Concordia de tensions simples et courants de ligne, afin de calculer les puissances réelle, imaginaire et homopolaire instantanées. Elle permet de transformer la composante fondamentale en une composante continue et les composantes harmoniques en composantes alternatives.

Cette transformation est nécessaire si nous voulons éliminer facilement la composante continue. Le principe de la méthode de puissances réelle, imaginaire et homopolaire instantanées est énoncé ci-dessous [19, 64] :

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = [C_{32}] \cdot \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.11})$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = [C_{32}] \cdot \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.12})$$

Avec C32 la matrice de transformation développée par Concordia.

$$[C_{32}] = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \begin{bmatrix} 1 & \frac{-1}{2} & \frac{-1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{-\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{II.13})$$

A partir des vecteurs  $V_{s\alpha\beta}$  et  $i_{c\alpha\beta}$  décrivant le système des tensions et le système des courants dans le repère  $(\alpha, \beta)$ , on applique le concept des puissances instantanées défini par akagi [1, 4, 65] valable aussi bien en régimes transitoires que dans le cas des régimes permanents. Cette théorie introduit une décomposition de puissances instantanées dans le plan  $(\alpha, \beta)$ . Les puissances réelle et imaginaire instantanées, notées respectivement  $p$  et  $q$ , sont définies par la relation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} P \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_\alpha & V_\beta \\ -V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{II.14})$$

En remplaçant les tensions et les courants diphasés par leur homologues triphasés, nous tenons :

$$P = V_\alpha \cdot i_\alpha + V_\beta \cdot i_\beta = V_{sa} \cdot i_{ca} + V_{sb} \cdot i_{cb} + V_{sc} \cdot i_{cc} \quad (\text{II.15})$$

$$q = -V_\alpha \cdot i_\beta + V_\beta \cdot i_\alpha = \frac{1}{\sqrt{3}} [(V_{sc} - V_{sb}) \cdot i_{ca} + (V_{sa} - V_{sc}) \cdot i_{cb} + (V_{sb} - V_{sa}) \cdot i_{cc}] \quad (\text{II.16})$$

A partir des équations (II.15) et (II.16),  $p$  et  $q$  peuvent être exprimées en composantes AC et DC, telles que: [6,66]

$$\begin{cases} P = \bar{P} + \tilde{P} \\ q = \bar{q} + \tilde{q} \end{cases} \quad (\text{II.17})$$

$\bar{p}$ : Composante DC de  $p$  liée au courant actif fondamental conventionnel

$\bar{q}$ : Composante AC de  $p$ , dépourvue de valeur moyenne et liée aux courants harmoniques causés par les composantes AC de la puissance instantanée réelle

### II.3.2.1.1.1 Séparation des puissances perturbatrices

Le filtre de puissance chargé d'isoler les puissances active et réactive comme montre la Figure II.3 et leurs caractéristiques concernant le résidu harmonique sont différentes. Ils n'ont pas donné entière satisfaction car :

- Pour obtenir une extraction satisfaisante, le régime dynamique est lent. En générale, la fréquence de coupure est choisie assez basse, entre 5 Hz et 35 Hz, ce qui engendre alors une instabilité du filtre actif lors de variations rapides de la charge.
- Dans le cas contraire, si l'on choisit une fréquence de coupure plus élevée, la précision de la détermination de la composante alternative est altérée et peut s'avérer insuffisante [7].

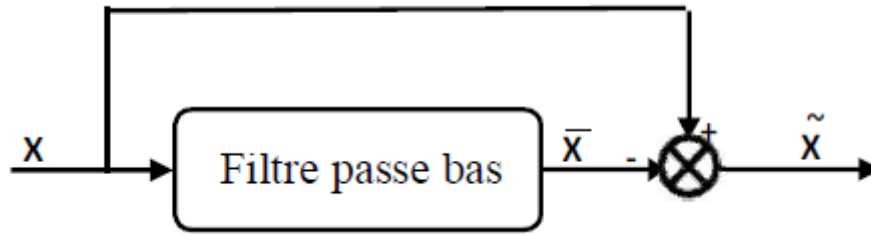


Fig. (II.10) Séparation des puissances perturbatrices.

L'ordre du filtre passe-bas définit la dynamique et l'efficacité d'atteindre l'objectif de compensation. L'inconvénient majeur d'utilisation d'un filtre d'ordre élevé est le temps de calcul plus long, mais dans notre cas ce temps est relativement très faible en contre part la précision de séparation des composantes alternatives est remarquablement très élevée [67].

En considération les équations (II.4) (II.7), on sépare le courant de charge dans le plan  $\alpha$ - $\beta$  en trois composantes active et réactive à la fréquence fondamentale et la somme des harmoniques. Ceci conduit à :

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \left\{ \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{P} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{Q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \tilde{P} \\ \tilde{Q} \end{bmatrix} \right\} \quad (III.18)$$

Avec  $\Delta = V_\alpha^2 + V_\beta^2$  On a :

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{P} \\ 0 \end{bmatrix}}_{\text{Courant actif}} + \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{Q} \end{bmatrix}}_{\text{Courant réactif}} + \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \tilde{P} \\ \tilde{Q} \end{bmatrix}}_{\text{Courant harmonique}} \quad (II.19)$$

Maintenant, si on souhaite également compenser la puissance réactive, ainsi que les courants harmoniques générés par les charges non linéaires, le signal de référence du filtre actif parallèle doit  $\bar{p}$ ,  $\bar{q}$  et  $\tilde{q}$ . Dans ce cas, les courants de référence sont calculés par:

$$\begin{bmatrix} i_{ref\alpha} \\ i_{ref\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \cdot \begin{bmatrix} V_\alpha & V_\beta \\ V_\beta & -V_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{P} \\ \bar{q} + \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (II.20)$$

Les courants triphasés sont obtenus à partir des courants diphasés  $i_{ref\alpha}$  et  $i_{ref\beta}$  par la transformation inverse de Concordia. Ces courants représentent les perturbations et deviennent les courants de référence qui sont à injecter en opposition de phase sur le réseau électrique pour éliminer les harmoniques.

$$\begin{bmatrix} I_{ref1} \\ I_{ref2} \\ I_{ref3} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{\alpha} \\ I_{\beta} \end{bmatrix} \quad (II.21)$$

Le schéma ci-dessous représente les différents étapes qui permet d'obtenir les courants perturbateurs due aux présence des charges non-linéaire

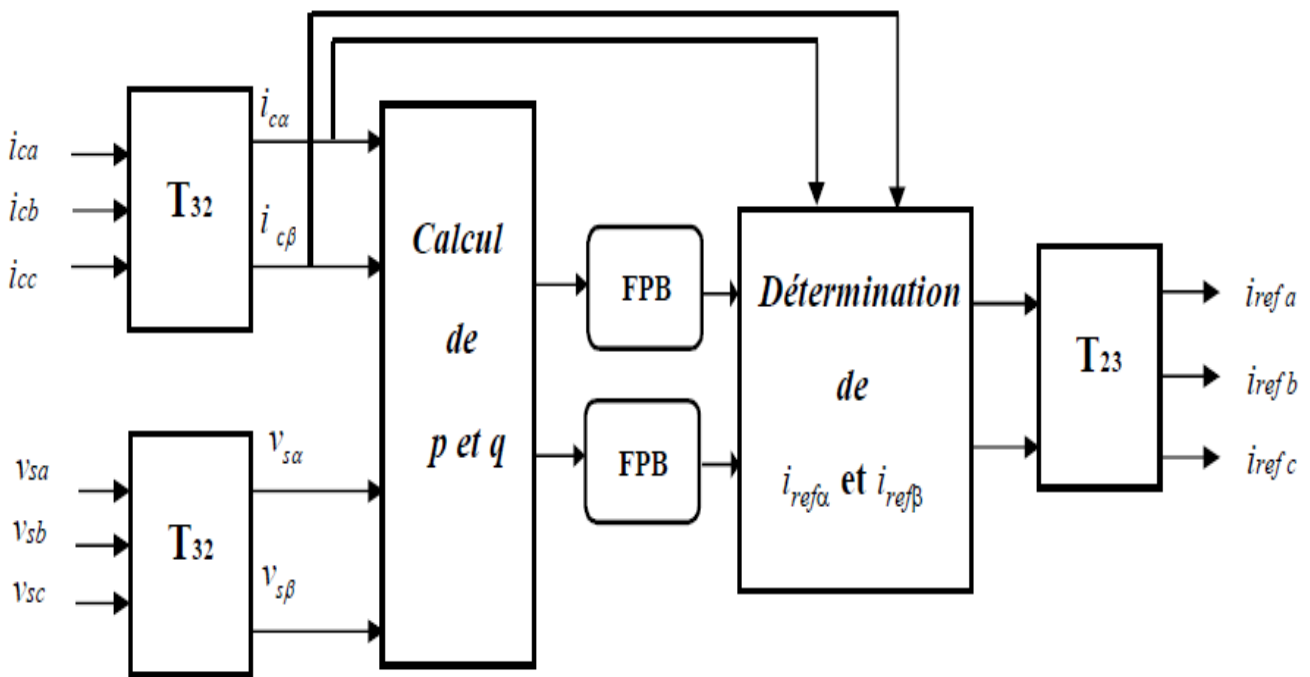


Fig. (II.11) Méthode d'extraction des courants de référence.

L'algorithme de l'indentification des courants de références constitué principalement des blocs de la matrice de transformation du système triphasé du courant ou de tension au système biphasé ( $\alpha - \beta$ ), des filtres passe bas afin d'assurer l'annulation de la composante continu de la puissance active et réactive, et aussi des blocs de calcul des courant perturbateurs [59].

### II.3.2.1.2 Système à PLL

Diverses perturbations peuvent survenir sur le réseau électrique (creux de tension, harmoniques, déséquilibre ...). Pour nos applications dans le processus de filtrage actif, le déséquilibre de tension réduit sensiblement la qualité de compensation des harmoniques [21]. En effet, nous venons de voir que l'algorithme de la méthode des puissances  $pq$  (*PIRI*) et celui la méthode (*pqr*) suggèrent des tensions d'entrée (la tension du réseau) saines pour pouvoir identifier correctement les courants harmoniques, ce qui n'est souvent pas le cas pratique. Pour la méthode synchrone, on vu qu'au moins l'identification de la phase est obligatoire. Dans ce cas, nous avons montré comment extraire les composantes directe, inverse et homopolaire de la tension triphasée. Nous présentons la méthode de la boucle à verrouillage de phase ou *PLL*, cette technique la plus utilisée [2, 28].

La méthode *PLL* est proposé pour extraire la composante fondamentale directe de la tension du réseau. C'est un système asservi comprenant un régulateur pour la détection de la pulsation directe de la tension et utilisant une transformation pour passer dans le repère de *Park*. Donc cette méthode détecte les paramètres de la composants fondamentale ( $\theta_d, V_m$ ) des tension de source. Ces variable sont nécessaires dans l'étape d'identification des courants harmoniques [2, 3, 5, 32].

### II.3.2.3 Commande de l'onduleur

L'objectif de la commande est de générer les ordres d'ouverture et de fermeture des interrupteurs, de sorte que la tension créée par l'onduleur soit la plus proche de la tension de référence [43]. Les deux principales familles de commande des convertisseurs statiques sont:

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

#### II.3.2.3.1 Commande par hystérésis

L'objectif de la commande par hystérésis, encore connue sous la dénomination de commande en tout ou rien, est de contrôler les courants de compensation en les forçant à suivre ceux de référence. Un système de base pour le contrôle de la bande d'hystérésis est représenté sur la Figure (II.12)

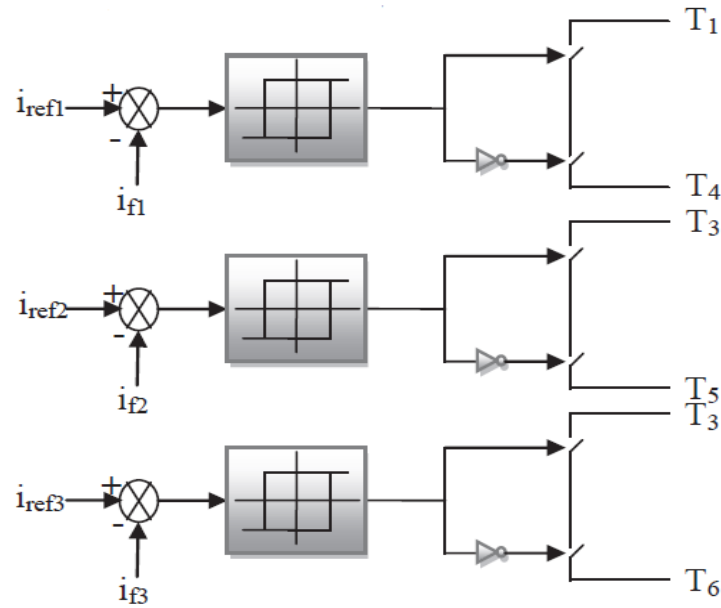


Fig. (II.12) Principe de commande par hystérésis.

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 [4]. Le courant de compensation va rester dans une bande autour du signal de référence, voir la Figure (II.13)

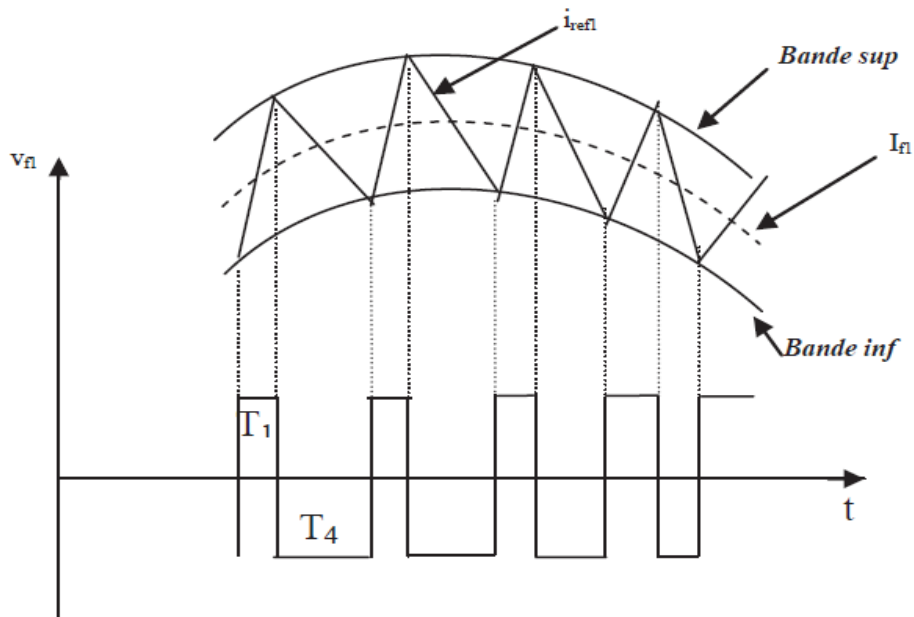


Fig. (II.13) Commande des interrupteurs par hystérésis.

La simplicité de la mise en œuvre, est le principal atout de cette technique. En revanche, les commutations évoluent librement à l'intérieur de bande d'hystérésis, on ne peut maîtriser correctement le spectre de haute fréquence dû aux fréquences de commutations.

### II.3.2.3.2 Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI) sinusoïdale

La méthode de la *MLI*, Modulation de Largeur d'Impulsion (En anglo-saxon: Pulse Width Modulation) résout le problème de la maîtrise de la fréquence de commutation en fonctionnant avec une fréquence fixe, la technique *MLI* compare l'erreur entre le signal (courant ou tension) et sa consigne avec une onde triangulaire (porteuse) d'une amplitude et d'une fréquence fixées. Ce contrôle met en œuvre d'abord un régulateur qui, à partir de l'écart entre le courant et sa référence détermine la tension de référence de l'onduleur (modulatrice). Cette dernière est ensuite comparée avec une onde triangulaire symétrique, à fréquence élevée (porteuse) comme il est indiqué sur la figure (II.14). La sortie du comparateur fournit l'ordre de commande des interrupteurs. Dans ce système de contrôle, la fréquence de commutation est fixe (la technique *MLI* résout le problème de la maîtrise de la fréquence de commutation), le réglage s'effectuant par variation du rapport cyclique des signaux de commande [6, 27, 45].

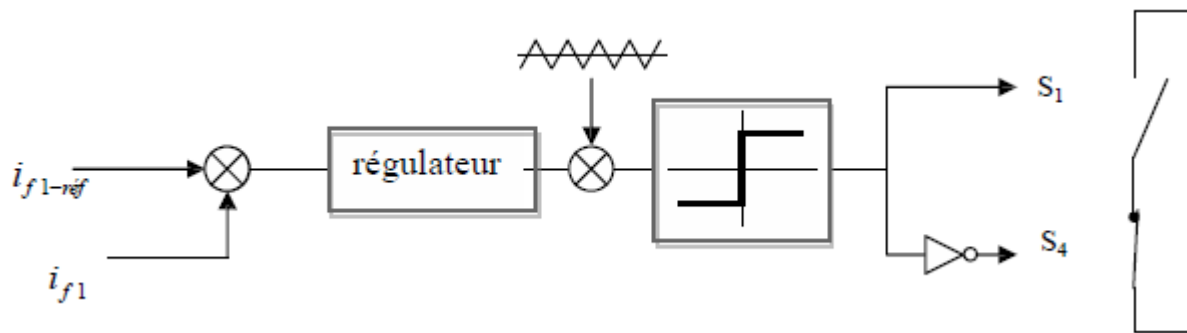


Fig. (II.14) Schéma de principe *MLI*.

### II.3.2.4 Régulation de la tension continue:

La tension continue ( $V_{dc}$ ) doit être régulée pour qu'elle soit maintenue constante [1, 54, 55, 56]. Sachant que le changement de cette tension est cause, principalement, lors l'échange de puissance active avec le réseau [54]. En supposons que les pertes au niveau de l'onduleur et du le filtre de sortie soient négligeable. La relation entre la puissance absorbée par le condensateur et la tension à ses bornes est :

D'où sous la forme de Laplace, on a :

$$P_{dc} = \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{2} C_{dc} V_{dc}^2 \right) \quad (\text{II.22})$$

$$P_{dc}(S) = \frac{1}{2} S C_{dc} V_{dc}^2(S) \quad (\text{II.23})$$

Alors, on déduit la tension aux bornes du condensateur:

$$V_{dc}^2 = \frac{2P_{dc}}{C_{dc}S} \quad (\text{II.24})$$

A partir de cette dernière relation (II.24), la boucle fermée de réglage de ( $V_{dc}$ ) est montrée par la figure suivante :

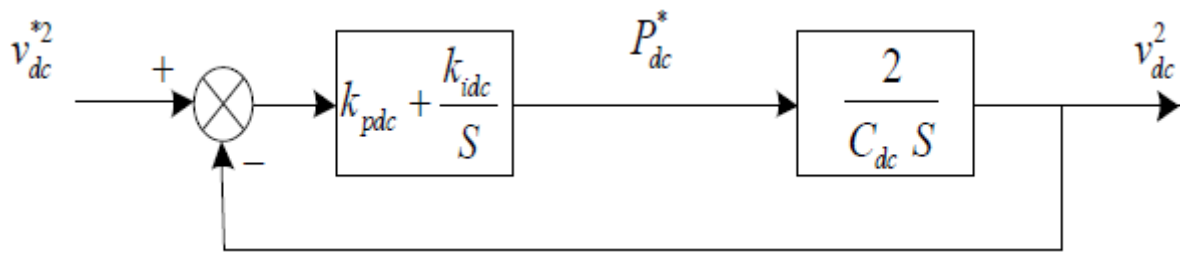


Fig. (II.15) Boucle fermée de réglage de la tension continue.

On déduit :

$$\frac{(1 + \frac{K_{pdc}}{K_{idc}}S)}{S^2 + 2\frac{K_{pdc}}{C_{dc}}S + 2\frac{K_{idc}}{C_{dc}}} \quad (\text{II.25})$$

Donc, par identification avec la forme standard de la fonction de transfert de deuxième ordre, on détermine les expressions des coefficients des régulateurs PI soient :

$$K_{idc} = \frac{1}{2} C_{dc} \omega_c^2$$

$$\omega_c = 2\pi f_c$$

$$K_{pdc} = \xi \sqrt{2C_{dc}K_{idc}}$$

On choisit, alors  $\xi = 0.707$  est  $f_c = 20$  Hz pour assurer un amortissement optimum et un bon filtrage.

### II.3.2.5 Régulation du courant du filtre actif:

En négligeant la résistance de l'inductance  $L_f$ , l'équation reliant la tension qui doit fournir l'onduleur, afin de créer des courants harmoniques en opposition de phase à ceux existant sur le réseau et la tension au point de raccordement est définie par:

$$V_f = V_S + L_f \frac{di_f}{dt} \quad (\text{II.26})$$

La transformation de Laplace de l'équation (II.26) est donnée par:

$$V_f(S) = V_S(S) + L_f I_f(S) \quad (\text{II.27})$$

La relation (II.27) donne la grandeur asservie  $I_f$  en fonction de la grandeur de commande  $V_f$ . On obtient:

$$I_f = \frac{V_f(S) - V_S(S)}{S \cdot L_f} \quad (\text{II.28})$$

La tension  $V_f$  donnée par la relation (II.28) est composée de deux termes à fréquences différentes. Le premier terme est la tension du réseau qui est facilement mesurable. Le deuxième terme est égal à la tension aux bornes de l'inductance  $L_f$  lorsqu'elle est traversée par un courant égal à celui de la référence. Cette tension doit être générée par un régulateur. Le courant de référence est composé des courants harmoniques avec des fréquences multiples de celle du réseau. Pour éviter les harmoniques dus aux découpages sur le fonctionnement du régulateur, on peut ajouter un filtre passe-bas du premier ordre avant celui-ci. Le schéma de régulation du courant est décrit par la figure (II.16).

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

$$G(S) = \frac{V_{dc}}{2V_p} \quad (\text{II.29})$$

Avec:

$V_{dc}$ : La tension côté continu de l'onduleur;

$V_p$  : L'amplitude de la porteuse triangulaire;

$\tau$ : Représentant le retard causé par le calcul des courants perturbateurs.

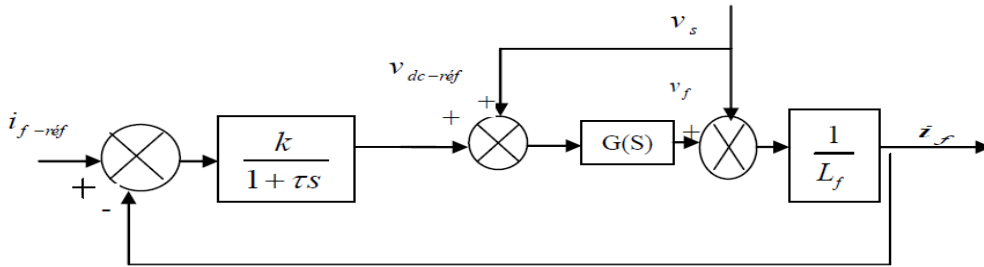


Fig. (II.16) Schéma de la régulation des courants du filtre actif.

Pour que  $V_f$  soit égale à  $V_{f-ref}$ , nous choisissons  $G(s)$  égal à 1. Le schéma de la régulation de ce courant peut alors se simplifier, comme montre la figure (II.17) [57, 58].

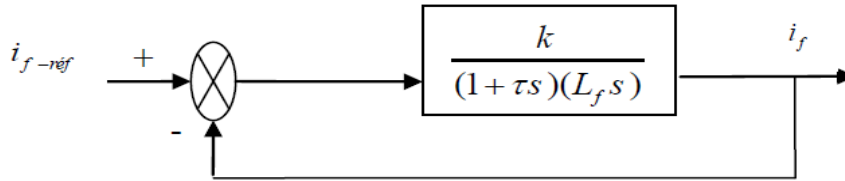


Fig. (II.17) Schéma de la régulation simplifié.

La fonction de transfert en boucle fermée est :

$$F_i(S) = \frac{\omega_i^2}{S^2 + 2\xi_i\omega_i S + \omega_i^2} \tag{II.30}$$

$$\omega_i = \sqrt{\frac{K}{K\tau}} \tag{II.31}$$

$$\xi_i = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{L_f}{K\tau}} \tag{II.32}$$

On remarque que pour obtenir un amortissement suffisant dans la régulation du courant, le produit  $k, \tau$  doit être limité [58].

## II.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le principe de fonctionnement du filtre actif parallèle de puissance, la structure générale du FAP, les différentes méthodes d'identifications des courants de référence où on a consacré la théorie de la puissance instantanée réelle et imaginaire et étudié le principe de base et stratégies de commande de l'onduleur de tension. Finalement, nous avons présenté le circuit de régulation du courant ainsi qu'une boucle de régulation de la tension continue  $V_{dc}$  du filtre actif afin d'assurer un fonctionnement plus stable [43].

Le chapitre suivant, sera consacré à la modélisation de l'ensemble réseau, charge polluante et filtre actif et simulés sous l'environnement *Matlab/Simulink*.

# *Chapitre III:*

## *Modélisation et simulation du réseau perturbé*

III.1 Introduction

Dans ce chapitre nous avons étudié la modélisation des différentes parties du système global: le réseau électrique, la charge polluante (redresseur en pont tout diodes), et le filtre actif parallèle. Enfin nous présentons les résultats de simulation obtenus dans l'environnement *Matlab/ Simulink* avec interprétation.

III.2 Schéma globale du système à simuler

Schéma globale du système à simuler est représenté sur la figure (III.1). Il est composé de quatre parties à savoir:

- ✓ Le réseau d'alimentation triphasé
- ✓ La charge non linéaire (redresseur non commandé)
- ✓ Le filtre actif a structure tension (onduleur)
- ✓ Le système de commande des interrupteurs de puissance

Le raccordement de la charge polluante au réseau est du compensateur s'effectue par l'intermédiaire de l'impédance du réseau  $L_s$  et  $R_s$ . Le pont redresseur débite sur une charge  $L_{ch}$  et  $R_{ch}$ . Le couplage du filtre actif avec le réseau s'effectue par l'intermédiaires de  $L_f$  et  $R_f$ [59].

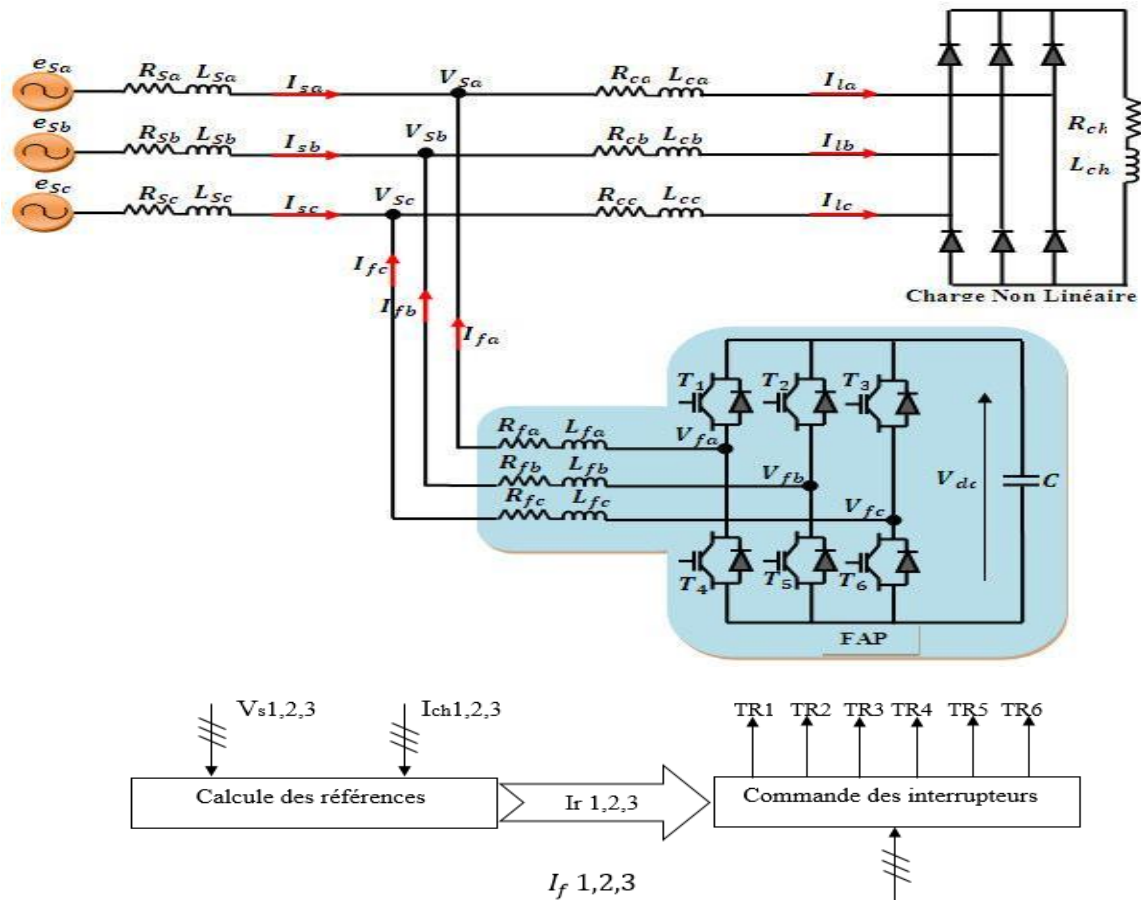


Fig. (III.1) Schéma synoptique de système à simuler.

### III.3 Modélisation de l'association réseau-filtre actif-charge polluante

La modélisation d'un système revient à trouver les équations mathématiques qui décrivent son fonctionnement [6].

#### III.3.1 Modélisation du réseau électrique

Le réseau est assimilable à une source de tension sinusoïdale en série avec une impédance (une inductance  $L_s$  et une résistance  $R_s$ ), dite de *court-circuit*, d'où la représentation du réseau par un système de *f.e.m* triphasées équilibrées en série avec une impédance la figure (III.2) [45, 58]:

$$Z_s = R_s + jL_s \cdot \omega_s \tag{III.1}$$

$$\begin{bmatrix} e_{s1} \\ e_{s2} \\ e_{s3} \end{bmatrix} = \sqrt{2}E \begin{bmatrix} \sin(\omega_s t) \\ \sin(\omega_s t - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\omega_s t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \tag{III.2}$$

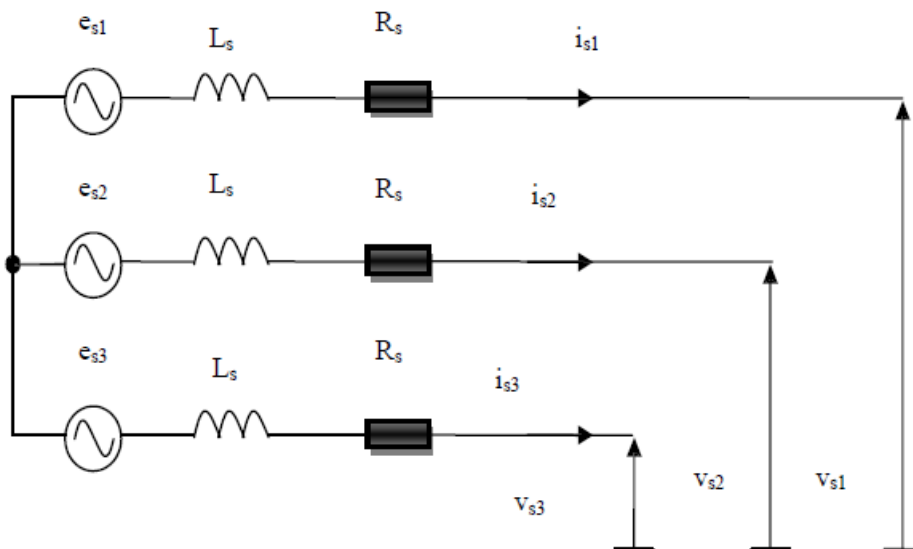


Fig. (III.2) Schéma synoptique d'un réseau triphasé.

#### III.3.2 Modélisation de la charge polluante

La charge polluante est matérialisée par un pont redresseur à diodes représenté sur la figure (III.3), débitant sur une charge inductive R-L.

Les redresseurs absorbent des courants non sinusoïdaux et considérés comme des générateurs d'harmonique de courants d'ordre  $6h \pm 1$ . Pour pouvoir filtrer harmoniques, il convient d'abord

de les identifier. Cette charge est modélisé comme étant des sources de courants parfaites (les semi-conducteurs sont considérés parfaits) [45, 60, 61].

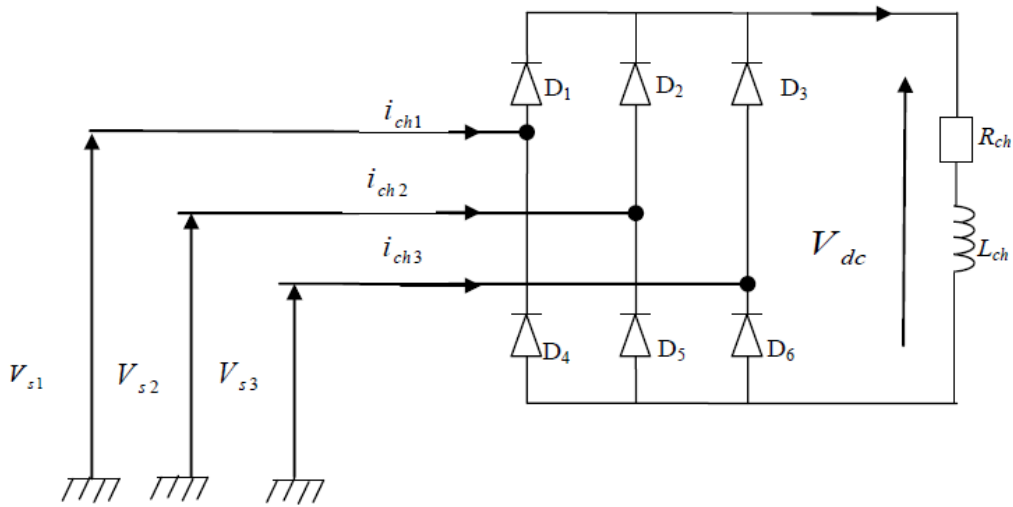


Fig. (III.3) Schéma d'une charge non-linéaire (un pont redresseur).

### III.3.3 Calcul des paramètres du système (*réseau-charge polluante-filtre actif*)

#### III.3.3.1 Caractéristiques du réseau électrique

Le réseau électrique est représenté par un poste de transformation représenté par la *f.é.m.* du réseau, une inductance  $L_s$  et une résistance  $R_s$  en série (*dite de court-circuit*).

Le réseau à pour puissance apparente nominale et tension efficace simple (la tension efficace composée)  $U_s = \sqrt{3} V_s$ .

**L'impédance nominale du réseau est donnée par:**

$$Z_n = \frac{3V_s^2}{S_n} \tag{III.3}$$

L'impédance  $Z_{cc}$  de court-circuit du réseau est généralement égale à 2% de  $Z_n$ . Cette impédance exprimée en complexe nous donne:

$$Z_{cc} = R_{cc} + jL_{cc} \cdot \omega_s \tag{III.4}$$

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

$$L_{cc}\omega_s = 10 \cdot R_{cc} \tag{III.5}$$

Donc:

$$Z_{cc} = R_{cc} + jL_{cc} \cdot \omega_s = R_{cc} + j10 \cdot R_{cc} = R_{cc}(1 + 10j) \quad (\text{III.6})$$

En module:

$$|Z_{cc}| = \sqrt{101R_{cc}} \rightarrow R_{cc} = \frac{1}{\sqrt{101}} Z_{cc} \quad (\text{III.7})$$

et par la suite :

$$L_{cc} = \frac{10}{\omega_s \sqrt{101}} Z_{cc} \quad (\text{III.8})$$

Avec:

$$\omega = 2\pi f$$

$$f = 50 \text{ Hz}$$

### III.3.3.2 Caractéristiques de la charge polluante

La charge polluante se compose d'un pont redresseur triphasé débitant sur une charge R-L ( $R_{ch}$  et  $L_{ch}$ ) avec une inductance supplémentaire  $L_c$  à l'entrée du redresseur afin de limiter les gradients  $di/dt$ . L'inductance  $L_{tot}$  totale s'oppose à la variation brutale du courant de ligne, le courant de la charge non-linéaire peut être exprimé par la relation suivante [46]:

$$L_{tot} = L_s + L_c \quad (\text{III.9})$$

$$i_{ch}(t) = i_{ch_{moy}} + \sum (a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)) \quad (\text{III.10})$$

Avec:  $i_{ch_{moy}}$  est le courant moyen de la charge non-linéaire, il est donné par:

$$i_{ch_{moy}} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_{ch} d(\omega t) \quad (\text{III.11})$$

### III.3.3.3 Caractéristiques des éléments du filtre actif

Les deux principaux paramètres qu'il faut estimer, dans la conception du circuit de puissance, afin d'assurer une commande adéquate et une bonne qualité de filtrage, sont:

- ✓ Le choix de la valeur de tension de référence de la capacité ( $V_{dc}$ );
- ✓ Le choix de la valeur de la capacité de stockage ( $C_{dc}$ ) [3].

- **La valeur de filtre sortie d'onduleur**

Un filtre de raccordement de nature inductif  $L_f$  est généralement dimensionné pour limiter l'ondulation du courant injecté au réseau.

Les simulations montrent que pour obtenir un bon *THD* et une meilleure dynamique,  $Z_f$  doit varier entre 4 et 8 fois  $Z_{cc}$ .

$$Z_f = 4 \times \frac{1}{\sqrt{101}} Z_{cc} \quad (\text{III.12})$$

De (III.4, 7, 8 et 12) on déduit les valeurs de  $R_f$  et  $L_f$ :

$$R_f = 4 \times \frac{1}{\sqrt{101}} Z_{cc} \quad (\text{III.13})$$

$$L_f = 4 \times 10 \times \frac{1}{\sqrt{101}} Z_{cc} \quad (\text{III.14})$$

- **La capacité du condensateur est donnée par:**

A partir des travaux de la référence *Ala,2002*, bases sur la mesure du courant harmonique  $I_h$  du rang harmonique le plus faible. La valeur de la capacité  $C_{dc}$  se calcule de la façon suivante [32]:

$$C_{dc} = \frac{I_h}{V_{dc} \cdot \varepsilon \cdot \omega_h} \quad (\text{III.15})$$

$\omega$ : le taux d'ondulation de la tension  $V_{dc}$ , généralement égal à 5%.

- **La tension redressée par le redresseur constituée des diodes mises en antiparallèle avec les IGBTs est donnée par:**

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} V_{seff} \quad (\text{III.16})$$

La tension de référence doit être légèrement supérieure à  $dc$   $v$  pour que le filtre puisse débiter sur le réseau [58, 62].

Les valeurs des éléments caractérisant cette structure ont été regroupées dans le tableau (III.1).

Tab (III.1) Valeurs des éléments caractérisant la structure étudiée.

	<i>Paramètre</i>	<i>Valeur numérique</i>
<i>Réseau électrique</i>	$V_s$	58 V
	<i>Fréquence <math>f</math></i>	50 Hz
	<i>Résistance <math>R_s</math></i>	0.42 $\Omega$
	<i>Inductance <math>L_s</math></i>	0.23 mH
	<i>Résistance <math>R_l</math></i>	10 $\Omega$
<i>Charge perturbatrice</i>	<i>Inductance <math>L_l</math></i>	5 mH
	<i>Résistance <math>R_c</math></i>	0.2 $\Omega$
	<i>Inductance <math>L_c</math></i>	1 mH
	<i>Résistance <math>R_f</math></i>	0.5 $\Omega$
<i>Filtre actif parallèle</i>	<i>Inductance <math>L_f</math></i>	3 mH
	<i>Tension <math>V_{dc}</math></i>	120 V
	<i>Condensateur <math>C</math></i>	1100 $\mu F$

### III.4 Simulation de l'ensemble réseau, filtre actif parallèle et charge polluante

Les programmes de simulation développés ont été effectués en utilisant logiciel Matlab-simulink qui permet de visualiser sur un intervalle de temps donné l'évolution des courants dans les différentes branches du circuit. La modélisation globale de l'ensemble réseau, filtre actif parallèle est représenté sur la figure (III.4)

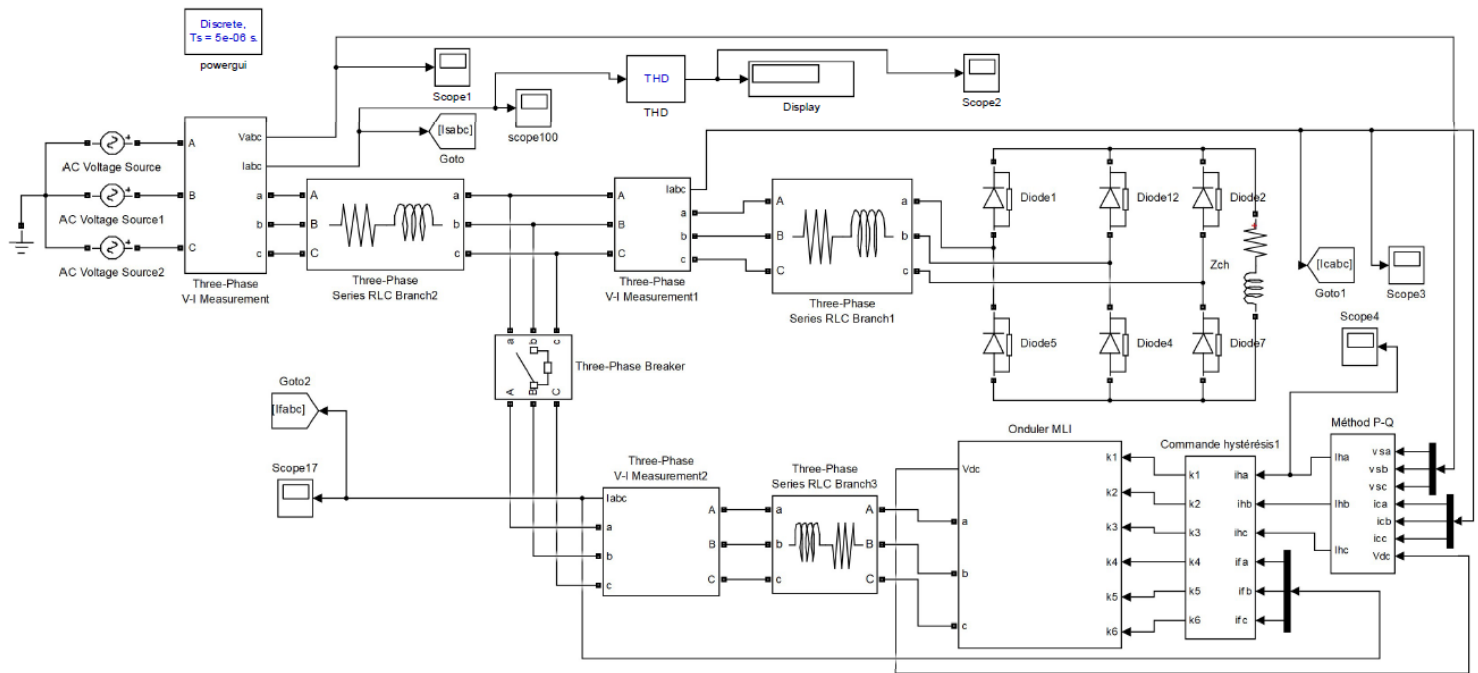


Fig. (III.4) Schéma de simulation d'un filtre actif parallèle de puissance.

### III.5 Résultats de simulation et Interprétation

#### III.5.1 Résultats de simulation avant et après l'utilisation du FAP

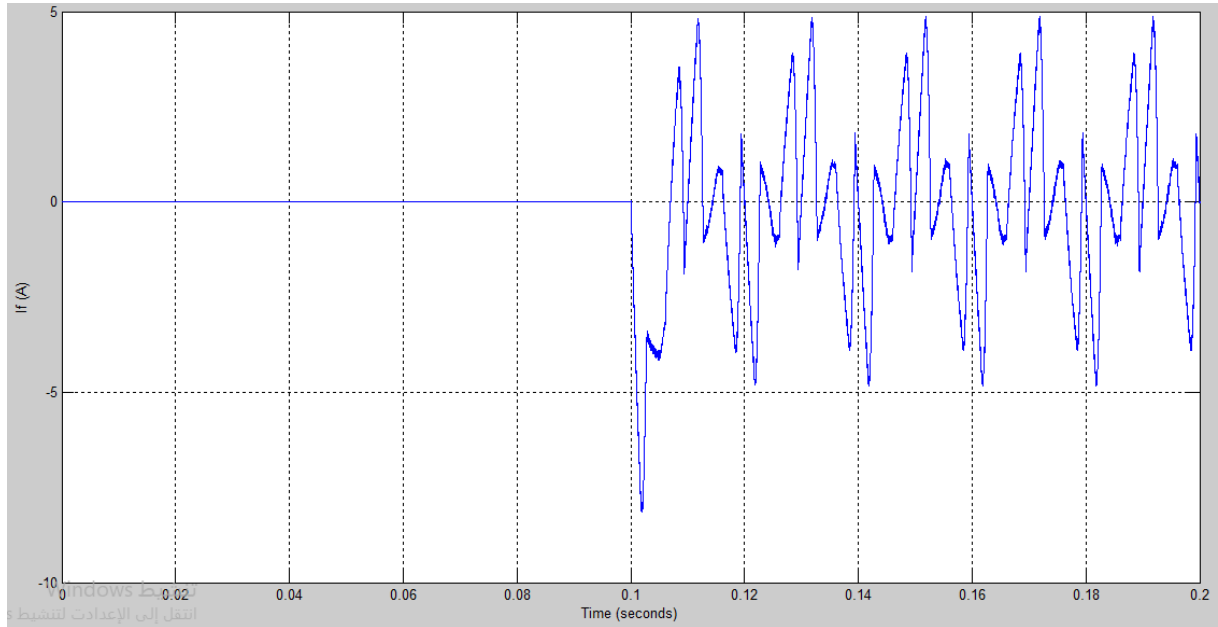


Fig. (III.5) Courant injecter par le filtre avant et après filtrage.

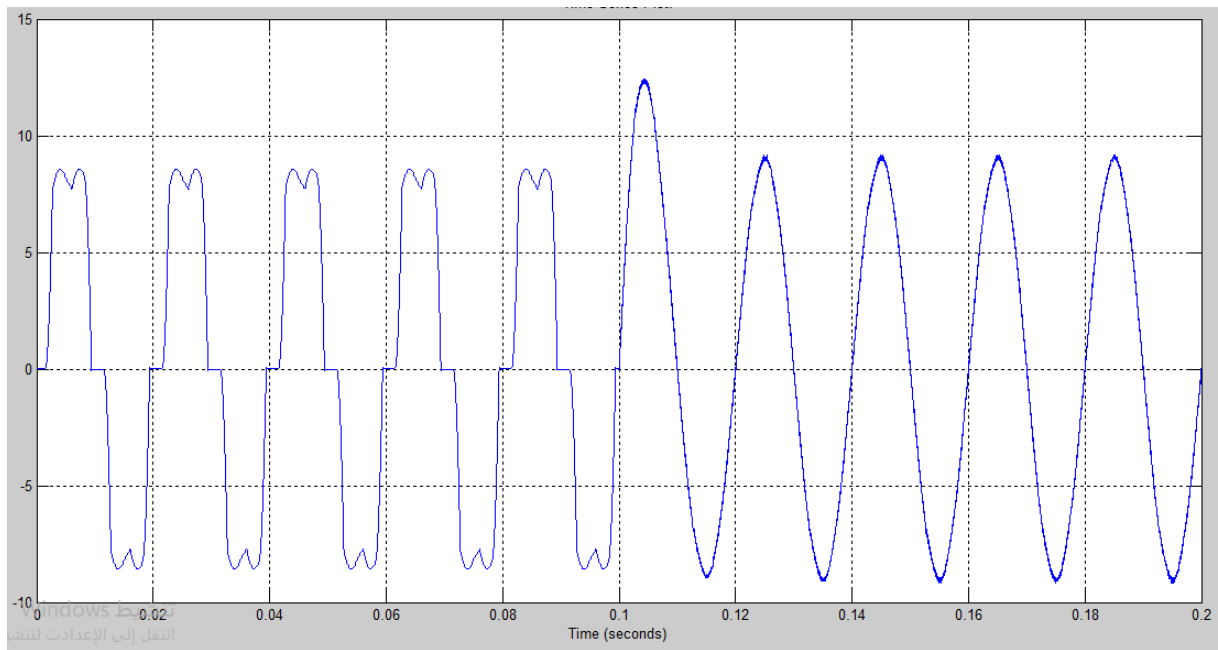


Fig. (III.6) Courant de la source avant et après filtrage.

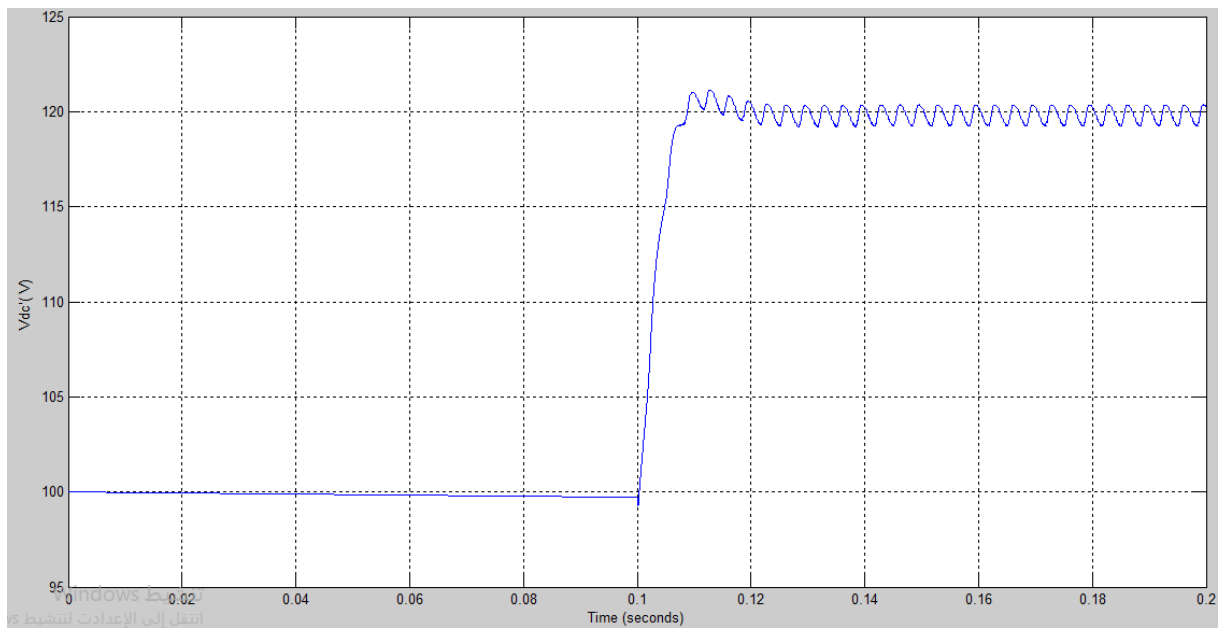


Fig. (III.7) tension de bus continu  $V_{dc}$  avant et après filtrage.

### III.5.2 Comportement du FAP en régime permanent

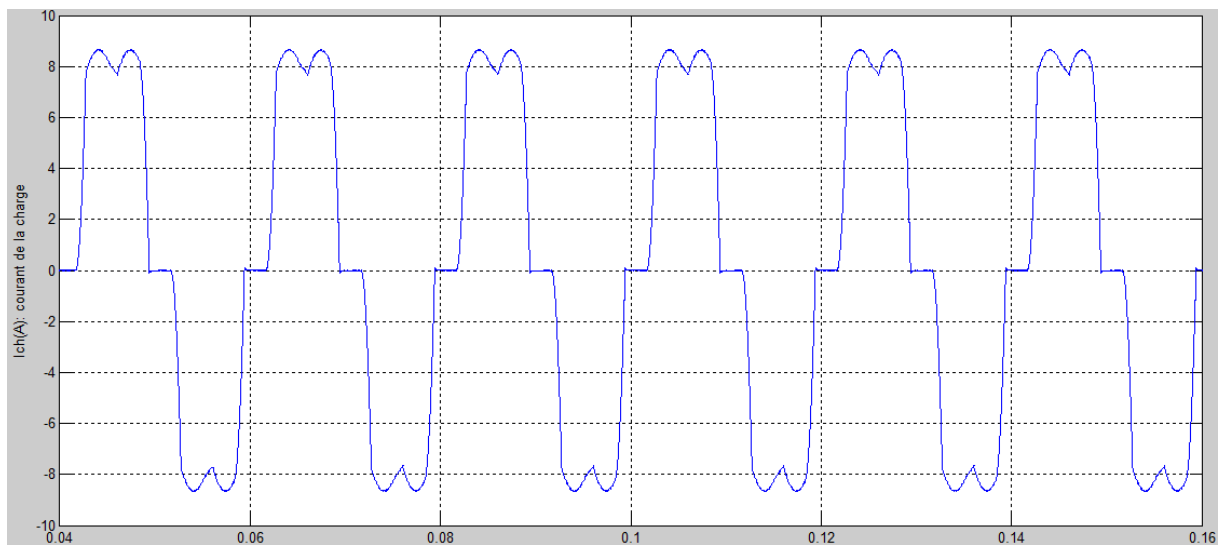


Fig. (III.8) Courant de la charge.

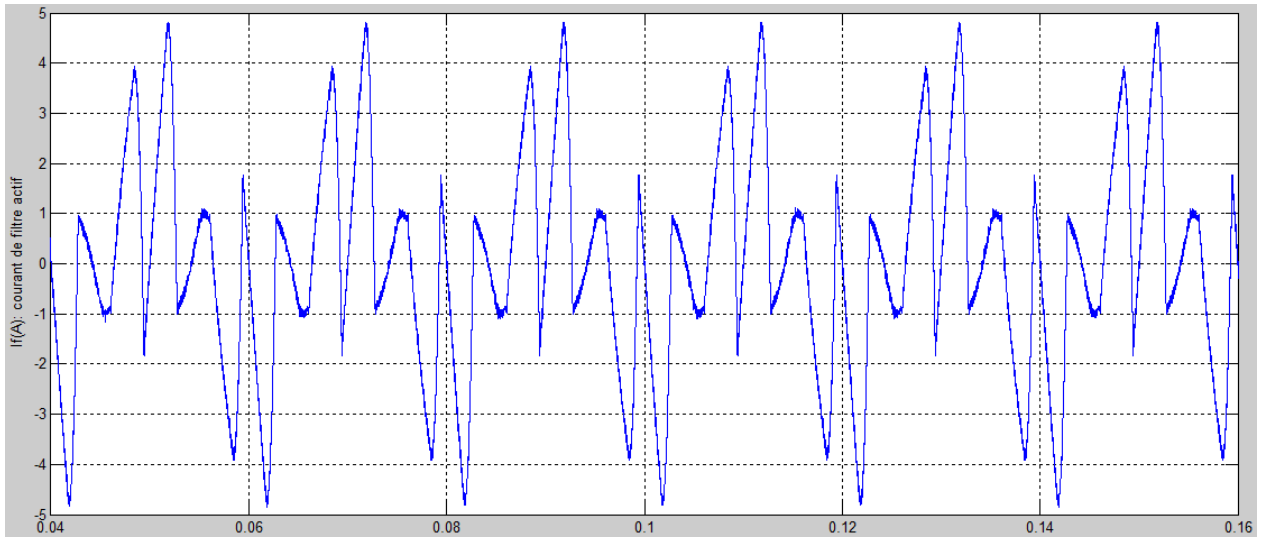


Fig. (III.9) Courant injecter par le filtre.

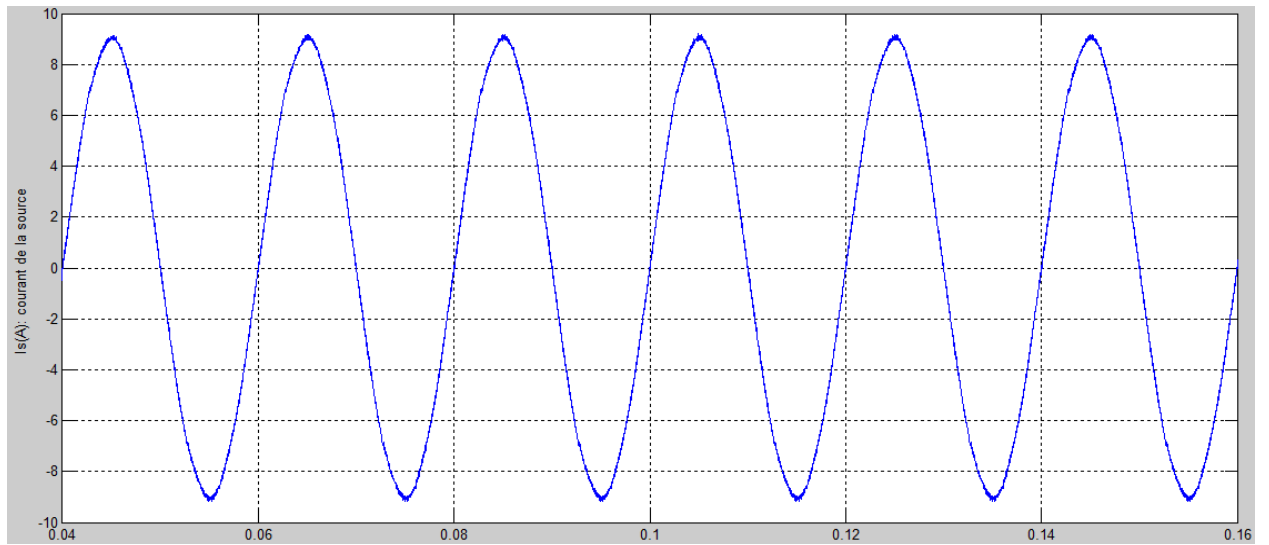


Fig. (III.10) Courant de la source.

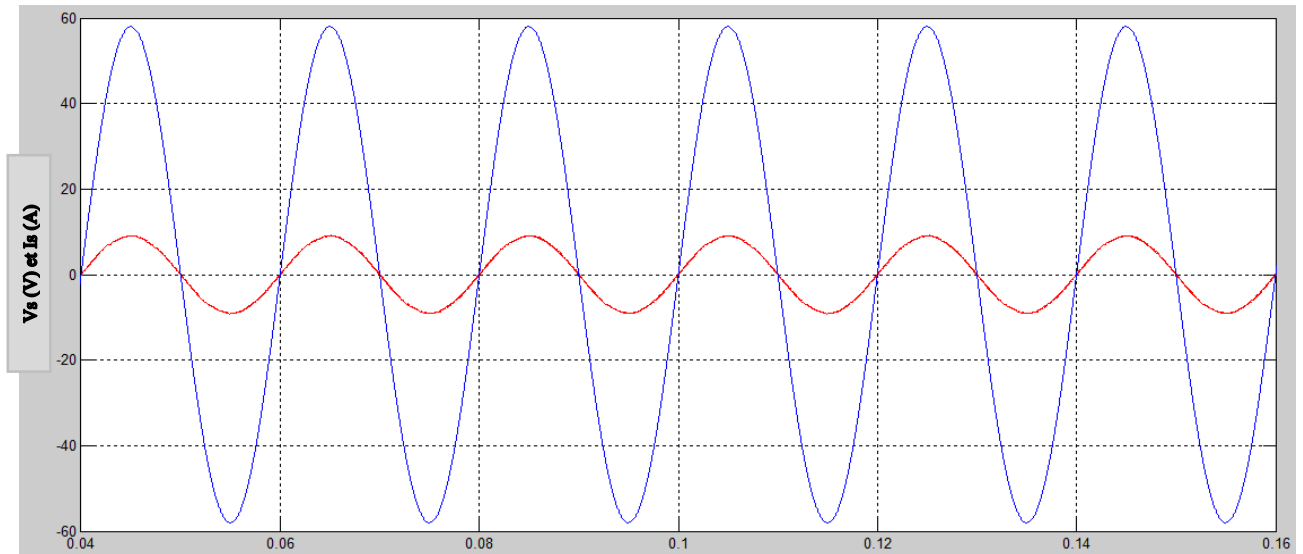


Fig. (III.11) Le courant et la tension de la source après filtrage.

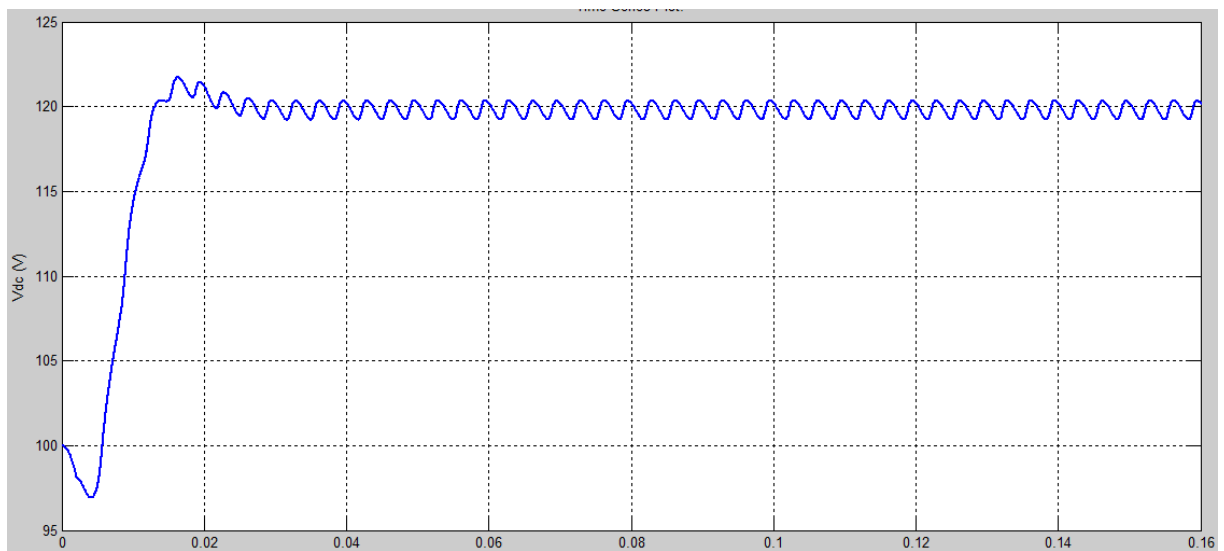


Fig. (III.12) tension de bus continu  $V_{dc}$ .

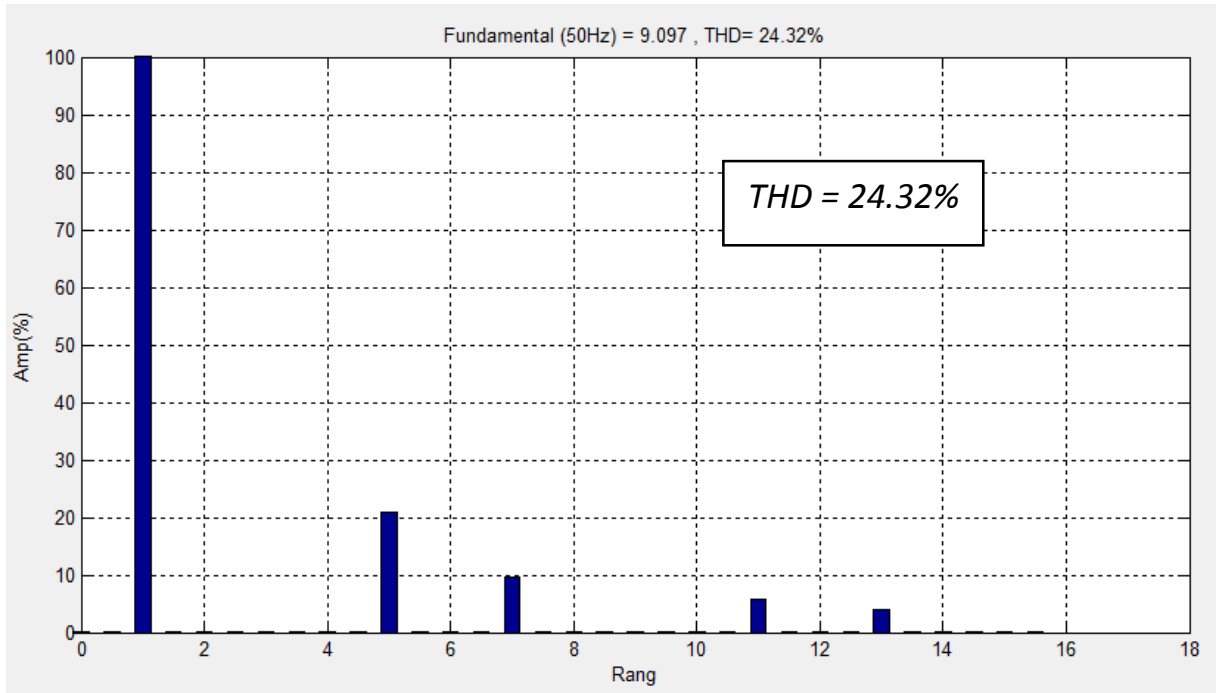


Fig. (III.13) Spectre du courant coté source avant filtrage.

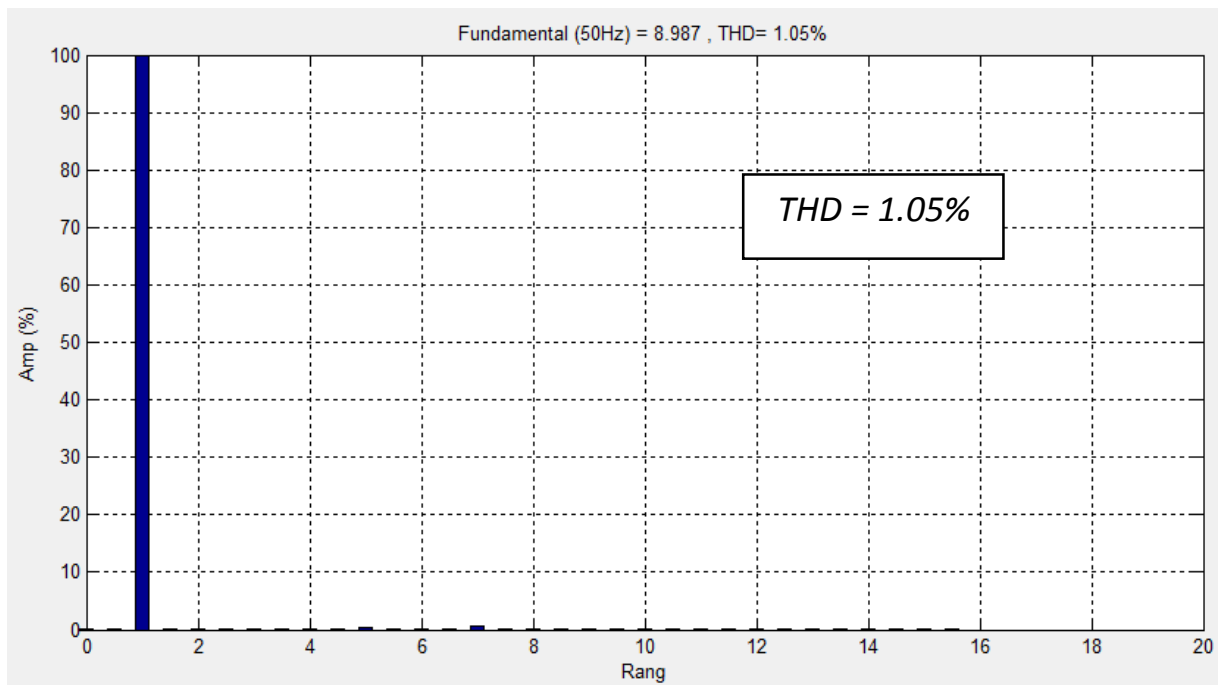


Fig. (III.14) Spectre du courant coté source après filtrage.

**III.5.3 Comportement du FAP en régime dynamique (Changement de la charge)**

Pour étudier l'adaptation et le comportement du *FAP* en régime dynamique, nous avons procédé à une variation de la charge non linéaire. Le passage de la charge(1) à la charge(2), se fait à l'instant  $t=0.1$ sec. Comme le montre les figures suivants:

Le temps			
0 à 0.1		0.1 à 0.2	
La charge RL1		La charge RL2	
R	L	R	L
10 Ω	5 mH	5 Ω	5 mH

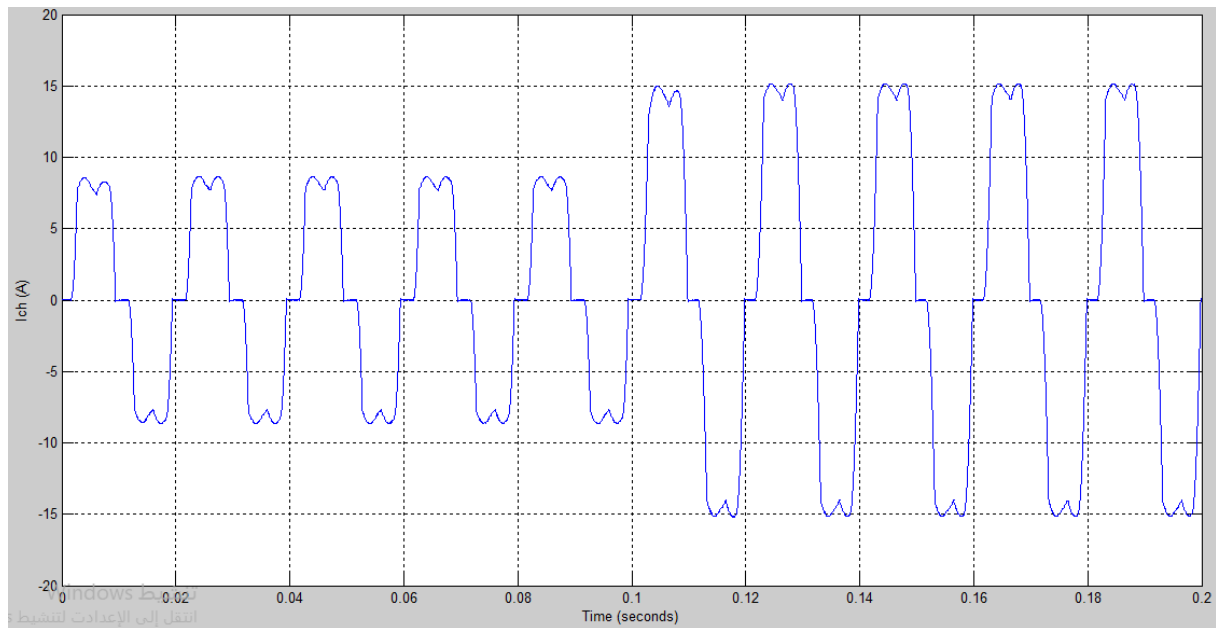


Fig. (III.15) Courant de la charge.

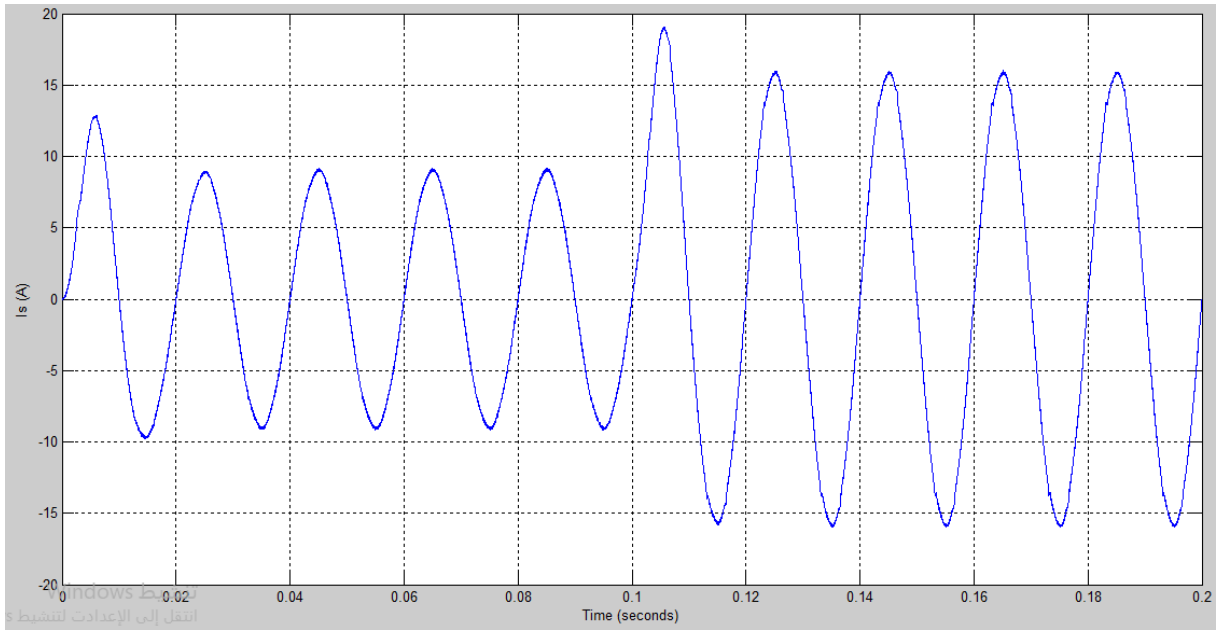


Fig. (III.16) Courant de la source.

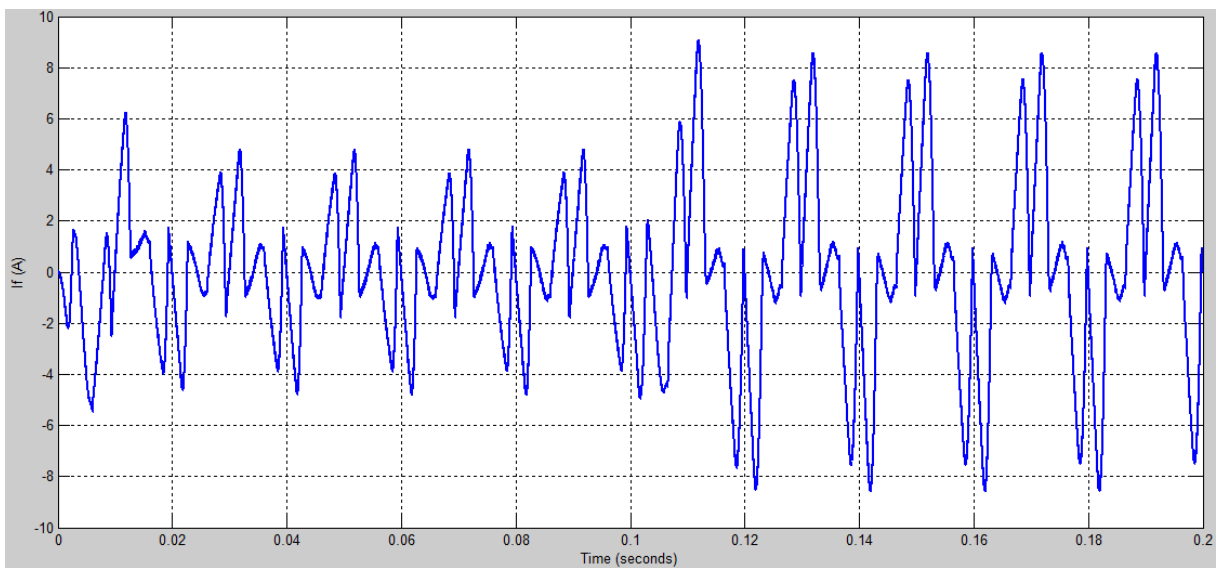


Fig. (III.17) Courant injecter par le filtre.

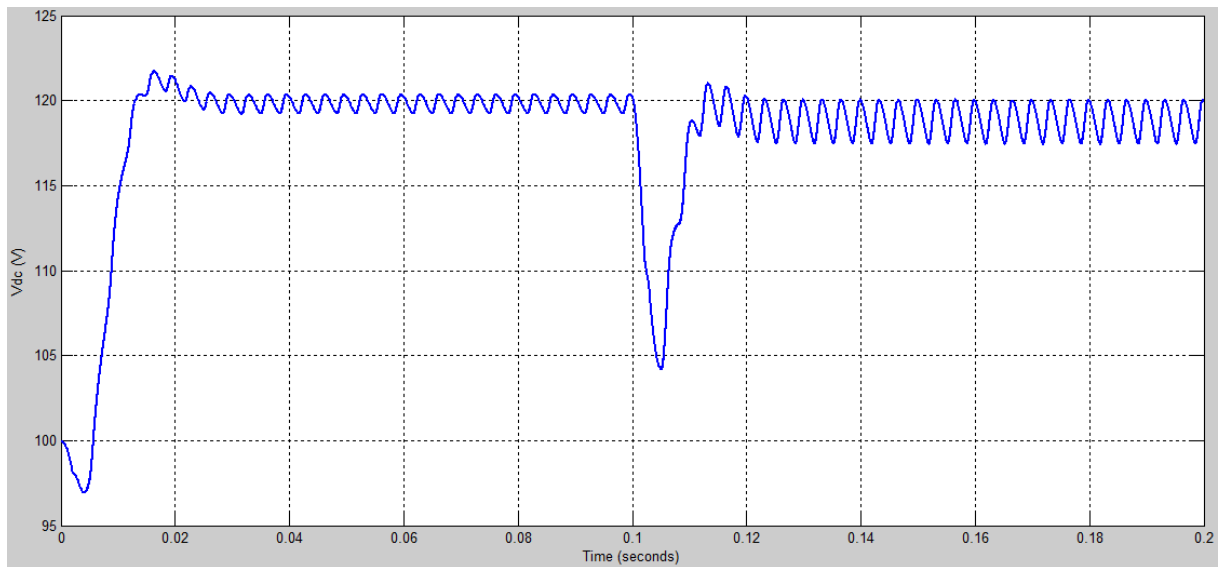


Fig. (III.18) tension de bus continu  $V_{dc}$ .

D'après les résultats de simulation obtenus sur les figures on remarque que:

### En régime permanent

- les figures (IV.5, 6, 7, 8, 9) montre que le courant «  $I_s$  » est quasi-sinusoidal, néanmoins un pic apparaissant dans le première temps. En autre côté, le courant de source après la compensation est presque sinusoidal et en phase avec la tension de source, ce qui signifie la correction du facteur de puissance, ce qui prouve une bonne qualité du filtrage avec *FAP*.
- On remarque qu'aussi, le courant du filtre actif suit bien sa référence. Néanmoins il est masqué par les composantes dues à la fréquence de commutation.

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

Les harmoniques au niveau de la source sont atténués, comme le montre le spectre après compensation. Le THD du courant de la charge non linéaire est de 24.32%, avant compensation le THD du courant maintenant est égale à 1.05%.

Tab (III.2) Les résultats des simulations.

Commande	Charge	THD% avant filtrage	THD% après filtrage
Commande hystérésis	R-L	24.32%	1.05%

Les résultats obtenus montrent l'efficacité et les bonnes performances du filtre actif parallèle de puissance, qui a réduit la THD à une valeur inférieure à 5% correspondant aux recommandations et aux normes internationales [63].

### En régime dynamique

- En régime dynamique les figure (IV.15, 16, 17 et 18): montrent des résultats très satisfaisants du point de vue dépassement est temps de réponse, aussi montre que le courant de source est toujours quasi-sinusoïdal malgré la variation de la charge.

### III.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présentés le filtre actif parallèle comme un compensateur très efficace contre les différentes perturbations provoquées par les charges polluées, à savoir :

- Les composantes harmoniques injectées par la charge ;
- Les courants réactifs générés par la charge ;
- Le déséquilibre dans les courants de la charge [7].

Avec ce filtre actif, le  $i$  *THD* du courant de source réduit de 24.32 % à 1.05 % avec la commande hystérésis (pour une charge R-L). Avec une bonne compensation de la puissance réactive et s'adapte parfaitement aux variations de la charge (reste son fonctionnement stable).

D'après les résultats obtenus par simulations on peut dire que la méthode *PIRI* présente des bonnes performances dans la détection des courants des harmoniques de référence.

*Conclusion*  
*Générale*

# CONCLUSION GÉNÉRALE

De nos jours, la qualité de l'énergie est un domaine de la plus haute importance. À l'heure où l'économie des pays industrialisés repose sur leurs capacités à produire ou à acheter l'énergie, l'utilisation adéquate et sans perte inutile est capitale. Ce projet, bien que ne touchant qu'un de ces domaines de la qualité de l'énergie pourtant si vaste, a permis de faire un bref survol de la problématique liée à la pollution harmonique sur les réseaux de distribution électrique ainsi que des différents moyens de mitigation utilisés. Une bonne compréhension de la problématique des harmoniques, de leurs influences sur le réseau électrique, ainsi que des moyens de mitigation existant pour les minimiser est maintenant devenue essentielle pour tout ingénieur travaillant dans le domaine de l'électrotechnique.

Dans ce contexte, notre travail présent dans ce mémoire a été consacré à l'étude d'un filtre actif parallèle de puissance afin d'améliorer la qualité de l'énergie dans le réseau électrique et particulièrement compenser les harmoniques et la puissance réactive.

Pour atteindre notre objectif dans ce travail nous choisissons la méthode des puissances instantanées réelles et imaginaire que nous donne des bons résultats et cette méthode s'est avérée très efficace dans le cas de la connexion des charges non-linéaires, pour la commande de l'onduleur triphasé nous utilisons la commande hystérésis, puisqu'elle est une commande très simple à mettre en œuvre. Concernant le régulateur de bus continu nous avons utilisé un simple régulateur proportionnel, avec un filtre à passe bas.

Les résultats obtenus que soit par simulations (dans l'environnement Matlab/Simulink) prouvent que le filtre actif choisi peut réduire les harmoniques de courant à des valeurs inférieures à 5 % qui répond aux normes internationales; ainsi que une bonne compensation de l'énergie réactive, et ce filtre adapte aux variations de la charge.

En conclusion, on peut affirmer que l'objectif de ce mémoire est atteint. Les résultats obtenus très satisfaisantes et montrent l'efficacité et les bonnes performances du filtre actif parallèle de puissance à deux niveaux.

# *Bibliographiques*

## BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] B. Nouri «Fonctionnement à Fréquence de Commutation Constante des Convertisseurs de Puissance en Utilisant des Techniques de Commande Avancées» Application : Amélioration de la Qualité de l'Energie, thèse de Doctorat en Sciences Option : Machines Electriques et leurs Commandes Université ferhat abbas – setif, 2011.
- [2] A.M.A Edin, «Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques», Thèse de Doctorat en génie électrique, Université Louis Pasteur ULP, (France) 2002.
- [3] C. Abdelmadjid «Filtrage actif triphasé pour charges non linéaires», thèse de doctorat L'université de setif, 2010.
- [4] : N. Djamel «Contribution à l'Etude des Stratégies de Commande des Filtrés Actifs Triphasés», Mémoire de Magister, Université Mohamed Chérif Messaadia de Souk-Ahras, 2014.
- [5] G. Desquilbet, C. Foucher, P. Fauquembergue, «Statistical analysis of voltage dips», Notes EDF, 96NR00 102, 1995.
- [6] O. Amar. «Simulation d'un filtre actif parallèle de puissance pour la compensation des harmoniques de courant » Thèse Doctorat. Université Annaba 2007.
- [7] D. Tarek, D. Abdelkader «Commande Prédictive d'un Filtre Actif Parallèle», Mémoire de MASTER ACADEMIQUE, Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued, 2017.
- [8] H. AKAGI, Y. KANAZAWA, A. NABAE « Generalized theory of the instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components », IEEE Trans .Ind .Appl , vol. IA-20, No.9,pp. 652-630, 1984.
- [9] M. Shafiee Khor «Amélioration de la qualité de l'énergie à l'aide de compensateurs Actifs : série, parallèle ou conditionneurs unifiés de réseaux électriques», Thèse de doctorat de l'école Polytechnique de l'université de Nantes, Nantes, 2006.
- [10] 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 docteur de l'université Henri Poincaré, Nancy 1, 1998.
- [11] C. Collombet J.M. Lupin J. Schonek Cahier technique n° 152 « Perturbations harmoniques dans les réseaux pollués et leur traitement », édition 1999
- [12] H. DOUAR, «Evaluation du cout des pertes générées par les perturbations harmoniques dans les réseaux électriques», Mémoire de Magister, Université M'hamed Bougara-Boumerdes ,2006.
- [13] S .BOUGUERRA et I.BOURENNANE « filtrage actifs parallèles des réseaux électriques avec compensation de l'énergie réactive ». Mémoire d'ingénieur d'état en génie électrotechnique, Université de m'sila, 2007.

- [14] E. Bettega J-N. Fiorina Cahier technique n° 183 « Harmoniques : convertisseurs propres et compensateurs actifs », édition 2000
- [15] G. Elhacéne H. Rachida «Contribution à La Commande d'un filtre actif parallèle ». Mémoire de master en Électrotechnique Université Abderrahmane MIRA- BEJAIA 2017.
- [16] S. Nia Ahmad «Contribution à l'étude théorique et expérimentale d'un filtre actif parallèle à commande analogique et numérique temps réel», Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine (INPL), Lorraine, 1996.
- [17] Y. Abdelli «Etude et commande de convertisseurs statiques multifonctions en vue de l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique», Thèse de doctorat de l'université de Nantes, Nantes, 2005.
- [18] CEI 1000-2-4 (02.1994) «compatibilité électromagnétique (CEM). Partie 2: environnement. Section 4: niveaux de compatibilité dans les installations industrielles pour les perturbations conduites à basse fréquence».
- [19] N. Mesbahi, «Contribution à l'étude des performances des onduleurs multiniveaux sur les Réseaux de Distribution», Thèse de Doctorat, Université annaba ,2014.
- [20] A. Bouafia, «Techniques de commande prédictive et floue pour les systèmes d'électronique de puissance: application aux redresseurs à MLI», Thèse de Doctorat, Université Ferhat Abbas – Sétif, Octobre 2010.
- [21] T. MAHNI, «Etude et conception d'un filtre actif parallèle triphasé à quatre fils en vue de sa commande par des méthodes d'intelligence artificielle», Thèse de doctorat en sciences, Université Mohamed Khider-Biskra, 2017.
- [22] Z .CHELLI, «Amélioration de la qualité de l'énergie électrique par un filtre actif d'harmonique», Thèse de doctorat en sciences, Université Badji Mokhtar-Annaba, 2015.
- [23] M .Oussama, «ETUDE DES HARMONIQUES ET TECHNIQUES DE COMMANDES DU FILTRE ACTIF», Mémoire de Magister, Université de Batna 2.
- [24] Seyed Hossein Hosseini, Tohid Nouri and Mehran Sabahi «A Novel Hybrid Active Filter for Power Quality Improvement and Neutral Current Cancellation», Electrical Engineering department, Seraj Higher Education Institute, Tabriz, Iran, Downloaded on May 27,2010 at 01:24:26 UTC from IEEE Xplore. Restrictions apply.
- [25] Surya Prakash Singh, Student Member, IEEE and Dr.Ramesh Kumar Tripathi, Member, IEEE «Modern Trend in Active Power Conditioning», Surya Prakash Singh, Research Scholar, Electrical Engg. Department, Motilal Nehru National Institute of Technology, Allahabad (U.P.)-211004, INDIA.
- [26] J.-N. Fiorina, « Harmoniques en amont des redresseurs des ASI », Cahier Technique n° 160.
- [27] S. Beaulieu, «Etude et mise au point d'un filtre actif d'harmoniques en vue d'améliorer la qualité de l'alimentation électrique», Mémoire de Fin d'Etude, Université, Québec à Chicoutimi, Mai 2007.

- [28] BERGERAS François «Etude de nouvelles structures de filtres actifs intégrées en Hyperfréquences», thèse de Doctorat de l'université de Limoges, Spécialité : "Electronique des Hautes Fréquences, Photonique et systèmes", Université de Limoges, 2010.
- [29] 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
- [30] T. Deflandre, P. Murras, «Les harmoniques sur les réseaux électriques», Edition Eyrolles, 1998
- [31] C. Fetha, «Analyse et amélioration de l'indice de la non-symétrie de tension dans la qualité de l'énergie électrique», Thèse Doctorat. Université de Batna 2006.
- [32] N. BELHAOUCHET , «Fonctionnement à Fréquence de Commutation Constante des Convertisseurs de Puissance en Utilisant des Techniques de Commande Avancées », Thèse de doctorat Université Setif, 2011.
- [33] F. Defay « Commande prédictive directe d'un convertisseur multicellulaire triphasé pour une application de filtrage actif », Thèse Doctorat. Université De Toulouse 2008.
- [34] S.R Dzone Naoussi « Implantation de réseaux neuromimétiques sur cible FPGA application à l'intégration d'un système de filtrage actif », Thèse Doctorat. Université de Strasbourg 2011.
- [35] S. Bhattacharya « Design and implementation of a hybrid series active filter system », Power Electronics Specialists Conference. PESC '95 Record, 26th Annual IEEE, pp.189-195, Vol.1, Jun 1995.
- [36] A.L.D. Bermeo « Commandes avancées des systèmes dédiées à l'amélioration de la qualité de l'énergie : de la basse tension à la montée en tension », Thèse Doctorat. Institut National Polytechnique de Grenoble 2006.
- [37] M.M. Abdusalam « Structures et stratégies de commande des filtres actifs parallèle et hybride avec validations expérimentales », Thèse Doctorat. Université Nancy-I 2008.
- [38] A. Boukadoum « Contribution à l'analyse et la réduction de la pollution harmonique dans le réseau électrique », Mémoire de Magister. Université d'Annaba 2007.
- [39] J. Fadat, Y. Dorait : «Redresseur à absorption de courants sinusoïdaux: commande dans le repère triphasé», 3E1, no. 52, pp. 46-59, Mars 2008.
- [40] P. Ladoux, G. Ollivier : «Compensateur d'harmonique et de puissance réactive système didactique», RESELEC 2002.
- [41] J. D. Gandoy, C. M. Penalver: «Dynamic and steady state analysis of a three phase boost rectifier», IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 15, no. 6, pp. 953-959, Nov. 2000.
- [42] J. R. Espinoza, G. Joos, J. L. Guzman, L. A. Moran, R. P. Burgos: «Select Me harmonic elimination and current/voltage control in current/voltage-source topologies: a unified approach», IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 48, no. 1, pp. 71-81, Feb. 2001.

- [43] A. Imane «Étude et Réalisation d'un Filtre Actif Parallèle de Puissance Commandé par DSPACE1104», Thèse Master. Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued 2019.
- [44] M. MAGRAOUI, «Validation de techniques de commande d'un filtre actif parallèle, Mémoire présente à l'école de technologie supérieure, Université du Québec, 2007.
- [45] M. BENGOURINA, «Etude et mise au point d'un filtre actif parallèle d'harmoniques en vue d'améliorer la qualité de l'alimentation électrique», Mémoire de Magister, Université des Sciences et de Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 2012.
- [46] A. BOUSSAID, «Filtrage actif des harmoniques dans les réseaux électriques. Contribution à l'amélioration de l'énergie électrique», Thèse de doctorat troisième cycle LMD, Université Des Frères Mentouri-Constantine, 2017.
- [47] L. ZELLOUMA, «Filtrage actif parallèle des harmoniques du courant générés par un pont redresseur triphasé non commandé», Mémoire de magister, Université Badji Mokhtar-Annaba, 2006.
- [48] X. JIANHONG, «Filtrage actif parallèle des harmoniques des réseaux de distribution d'électricité», Thèse en vue de l'obtention du doctorat de l'I.N.P.L, 1994.
- [49] S. MOUTTOU, «Nouvelles Approches de Commande d'un Filtre Actif Parallèle à Source De Courant», Mémoire présenté à l'université du Québec à Trois-Rivières comme exigence partielle de la maîtrise en génie électrique, Université du Québec à Trois-Rivières, 2002.
- [50] T. MAHNI, «Etude et conception d'un filtre actif parallèle triphasé à quatre fils en vue de sa commande par des méthodes d'intelligence artificielle», Thèse de doctorat en sciences, Université Mohamed Khider-Biskra, 2017.
- [51] M.D. Epanya « Application du filtrage actif pour une mise en œuvre de méthode de prédiction et de contrôle d'harmoniques dans un réseau de distribution électrique», Mémoire comme exigence partielle de la maîtrise en génie électrique. Université du Québec 2010.
- [52] A. Boukadoum « Contribution à l'analyse et la réduction de la pollution harmonique dans le réseau électrique », Mémoire de Magister. Université d'Annaba 2007.
- [53] S. Karimi « Continuité de service des convertisseurs triphasés de puissance et prototypage "FPGA in the loop": application au filtre actif parallèle », Thèse Doctorat. Université Nancy-I 2009.
- [54] A. Sahbani, M. Labben-Ben Braiek, M.A. Dami et M. Jemli, «Commande d'un Filtre Actif Triphasé Shunt par la Logique Floue», 3rd International Conference, SETIT, Tunisia, March 27-31, 2005.
- [55]: John Vodden, Pat Wheeler and Jon Clare «DC Link Balancing and Ripple Compensation for a Cascaded-HBridge using Space Vector Modulation», Department of Electrical and Electronic Engineering University of Nottingham United Kingdom, 978-1-4244-2893-9/09©2009 IEEE.

- [56]: S. H. Hosseini & K. Zare «an efficient a-b-c reference frame-based algorithm in an active power filter for reactive power compensation under unbalanced conditions »,Electrical Engineering Department, Azad University of Tabriz, 51579-1655, Tabriz, Iran
- [57] A. RABIE, «Contribution à l'étude du filtre actif parallèle de puissance à trois niveaux», Mémoire de Magister, Université d'El-Oued, 2012.
- [58] L. ZELLOUMA, «Contribution à l'étude du filtrage des harmoniques des réseaux de distribution à l'aide du filtre actif », Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar-Annaba, 2010.
- [59] N. Bruyant « étude et commande généralité de filtre actif parallèle, compensation globale ou sélective des harmonique régime équilibré ou déséquilibré» , Thèse de doctorat, Université Nantes, 1999.
- [60] T. BENSLIMANE, «Commande numérique d'un filtre actif parallèle autonome», Mémoire de magister, Ecole Militaire polytechnique, 2004.
- [61] M. BOUKAIS et B. MAHIDDINE, «Etude et réalisation d'un filtre actif triphasé», Mémoire d'ingénieur d'état, Ecole Militaire polytechnique,2001.
- [62] S. CHENNAI, «Etude, Modélisation & Commande des Filtres Actifs: Apport des techniques de l'intelligence artificielle», Thèse de doctorat en sciences, Université Mohamed Khider-Biskra, 2013.
- [63] H. AKAGI, «New trends in active filters for power conditioning», IEEE Tran. On Industry applications, vol.32, No. 6, pp. 1312-1322, November/December
- [64] M. C. Benhabib, «Contribution à l'étude des différentes topologies et commandes des filtres actifs parallèles à structure tension : modélisation, simulation et validation expérimentale de la commande», Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, Décembre 2004.
- [65] K. Aliouane, «Contribution à l'étude du filtrage des harmoniques des réseaux de distribution à l'aide de l'association des filtres passifs et filtres actifs », Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, Janvier 1995.
- [66] D. Ould Abdeslam, D.WIRA, P.FLIELLER, D.AND MERCKLE, «Une nouvelle approche neuromimétique pour l'identification et la compensation des harmoniques dans les systèmes électriques» , International Conference on Electrical Engineering and its Applications, Sidi Bel-Abbes, Algeria, 2006.
- [67] H. Akagi, S. Atoli, A. Nabae, «Control Strategy of Active Power Filters using Multiple Voltage Source PWM Converters», IEEE Trans on Ind. Appl., Vol. IA-22,pp. 460-465, 1986