

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Mémoire de Fin d'Études

Présenté à

L'Université d'Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued

Faculté de la Technologie

Département de Génie Electrique

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

En machines Electriques

Présenté par

MESAI BELGACEM Ahmed, ZOUARI FERHAT Abdelkader, LASSOUED Souhaieb

Thème

***Etude des stratégies de commande d'un filtre
actif parallèle triphasé***

Soutenu le 17/09/2020. Devant le jury composé de :

Dr. ZELLOUMA Laid

Président

Dr. MAHNI Tidjani

Maitre assistant B

Rapporteur

Dr. MAMMERI Oussama

Examineur

Année Universitaire 2019/2020



﴿ رَبَّنَا لَا تُؤَاخِذْنَا إِنْ نَسِينَا أَوْ أَخْطَأْنَا رَبَّنَا وَلَا تَحْمِلْ عَلَيْنَا إَصْرًا كَمَا حَمَلْتَهُ عَلَى الَّذِينَ مِنْ قَبْلِنَا رَبَّنَا وَلَا تُحَمِّلْنَا مَا لَا طَاقَةَ لَنَا بِهِ وَاعْفُ عَنَّا وَارْحَمْنَا أَنْتَ مَوْلَانَا فَانصُرْنَا عَلَى الْقَوْمِ الْكَافِرِينَ ﴾ سورة البقرة : الآية 286 .

" صدق الله العظيم "

Résumé

الملخص

أصبحت مشكلة التلوث التوافقي في شبكات التوزيع الكهربائي مقلقة أكثر فأكثر مع زيادة استخدام الأحمال غير الخطية، يعد ترشيح الطاقة النشطة أحد أكثر الحلول فعالية لهذه المشكلة. تقدم هذه المذكرة جهاز ترشيح نشط يتم التحكم فيه عن طرق استراتيجية $Hystérésis$ و MLI ، حيث يتم التوضيح بمخطط إجمالي للطريقتين وكذلك إخضاع الطرق المدروسة لإظهار أداء كل تحكم. يتم عرض نتائج المحاكاة للمرشح النشط المتوازي من مقوم المصدر المتتالي من أجل ثبات فعالية هذا المرشح. الكلمات المفتاحية: التلوث التوافقي، ترشيح الطاقة النشطة، شبكات التوزيع الكهربائي.

RÉSUMÉ

Le problème de la pollution harmonique dans les réseaux électriques de distribution devient de plus en plus préoccupant avec l'accroissement de l'usage des charges non-linéaires .

Ce mémoire présente un dispositif de filtrage actif parallèle commandé par la stratégie $Hystérésis$ en courant et par MLI , un schéma synoptique des deux méthodes est présenté ainsi qu'un asservissement des deux méthodes étudiées pour montrer les performances de chaque commande . Deux méthodes d'identification sont présentées la méthode de référentiel synchrone et la méthode des puissances instantanées.

Les résultats de simulation de la cascade source redresseur-filtre actif parallèle sont présentés pour montrer les performances de ce filtre.

LES MOTS CLÉS:

La pollution harmonique, les réseaux électriques de distribution, Le filtrage actif de

ABSTRACT

The problem of harmonic pollution in distribution electrical networks is becoming more and more worrying with the increasing use of nonlinear loads.

This thesis presents a parallel active filtering device controlled by the current hysteresis strategy and by PWM, a block diagram of the two methods is presented as well as a slaving of the two methods studied to show the performance of each command.

Simulation results of the parallel active rectifier-filter source cascade are presented to show the performance of this filter..

KEY WORDS:

Harmonic pollution, distribution electrical networks, Active power filtering.



Remerciements

Nous tenons à exprimer nos remerciement et nôtres profondes gratitudes avant tout à ALLAH le tout puissant pour la volonté, la santé, le courage et la patience, qu'il nous a donné durant toutes ces longues années.

*Ainsi, nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements à notre encadreur **Mr. MAHNI Tidjani** pour avoir d'abord proposée ce thème, pour suivi continuuel tout le long de la réalisation de ce mémoire et qui n'a pas cessée de nous donner ses conseils.*

Nos remerciements à tous les membres du jury qui ont accepté de juger notre travail.

Nous tenons à remercier vivement toutes personnes qui nous ont aidé à élaborer et réaliser ce mémoire, ainsi à tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin à accomplir ce travail.

En fin, nous tenons à exprimer notre reconnaissance à tous nos amis et collègues pour le soutien moral.

Dédicaces





Je dédie ce travail

À qui je dois tout à l'âme de mon père...parti à l'éternité, mais qui a été toujours présent dans mon cœur, je lui rends un grand hommage, Que Dieu Tout-Puissant ait pitié de lui!

À ma très mère, pour son soutien et sa confiance, que Dieu, lui procure santé et longue vie.

À mes chers frères et sœurs

À tous ceux qui me sont chères.

Tous mes amis(es).



AHMED

Dédicaces





À qui je dédie cet humble travail si ce n'est pas à mes très chers parents, dont le sacrifice, la tendresse, l'amour, la patience, le soutien, l'aide, et l'encouragement, sont l'essence de ma réussite. Sans eux je ne serai pas ce que je suis aujourd'hui. Qu'Allah les protège.

Je dédie ce travail également:

À mes très chères sœurs.

À mon très cher frère.

À tous mes chers amis .

À tous ceux qui me sont chers.



ABDELKADER

Dédicaces

Je dédie ce mémoire



A mes chers parents. Ma mère, qui m'a encouragé à aller de l'avant et Qui m'a donné tout son amour pour reprendre mes études,

et Mon très cher père est la plus belle perle du monde

Pour leur patience, leur amour, leur soutien et leurs Encouragements.

A tout ma famille pour l'amour et le respect qu'ils m'ont toujours accordé

A mes frères. Je leur souhaite tout le succès... tout le bonheur

A mes amis et mes camarade Pour une sincérité si merveilleuse....jamais oubliable, en leur souhaitant Tout lesuccès ...tout le bonheur.

Sans oublier tous les professeurs que ce soit du Primaire, du moyen, du secondaire ou de l'enseignement supérieur.



SOUHAEIB



Sommaire

Remerciement

Dédicace

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale..... a

CHAPITRE I : Problématique des harmoniques dans les réseaux électriques	
I.1 Introduction	1
I.2: Perturbation électrique.....	1
I.2.1: Creux et coupures de tension.....	2
I.2.2: Fluctuations de tension.....	3
I.2.3: Déséquilibre du système triphasé de tension.....	4
I.2.4: Variation de fréquence.....	4
I.3: Les harmoniques.....	5
I.4: Sources des harmoniques.....	6
I.5: Caractérisation des perturbations harmoniques.....	6
I.5.1: Rang de l'harmonique.....	6
I.5.2: Le taux de distorsion harmoniques	7
I.5.3: Le facteur de puissance.....	7
I.6: Les effets des harmoniques.....	8
a. Les effets instantanés.....	8
b: Les effets à terme.....	8
I.7: Solutions de dépollution du réseau électrique.....	9
I.7.1: Solutions traditionnelles de dépollution.....	9
I.7.1.a: Agir sur la structure de l'installation.....	9
I.7.1.b: Surdimensionnement ou déclassement de l'installation électrique	9
I.7.1.c: Renforcement de la puissance de court -circuit	10
I.7.1.d: Rééquilibrage des courants du réseau électrique	10
I.7.1.e: Filtrage passif.....	10
• Le filtre passif résonant	10
• Filtre passif amorti.....	11
• Filtre passif anti résonnant	11
I.7.2: Solutions modernes de dépollution.....	12
I.7.2.1: Filtres actifs.....	12

I.2.1.a: Le filtre actif parallèle (F.A.P).....	13
• Principe de fonctionnement.....	13
I.7.2.1.b: Le filtre actif série (F.A.S).....	13
• Principe de fonctionnement.....	13
I.7.2.1.c: Le filtre actif parallèle-série dit Universel (UPQC).....	14
I.7.2.2 Combinaison hybride active et passive.....	14
I.8. Conclusion.....	17
Chapitre II : Structure de filtre actif de puissance parallèle	
II.1.Introduction.....	19
II.2. Principe de filtrage actif parallèle de puissance.	19
II.3 Structure du filtre actif parallèle	21
II.4. Etude de la partie puissance.....	21
II.4.1. L'onduleur.....	21
II.4.2 Filtre de couplage.....	23
II.4.3 Stockage de l'énergie	23
II.5 Structure de la partie commande.....	24
II.5.1 Identification des courants perturbés.....	24
II.5.1.1 Méthode des puissances réelles et imaginaires instantanées (p-q).....	25
II.5.1.2 .La méthode du référentiel synchrone dq :	28
II.5.1.3 Méthode du filtre coupe-bande (notch filtre).....	30
II.6 commande de l'onduleur du filtre actif.....	31
a. Commande par hystérésis.....	31
b. Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI).....	32
II.7 Régulation de la tension du bus continu.....	34
II.8 Conclusion.....	36
CHAPITRE III : Simulation du Filtre Actif Parallèle	
III.1. Introduction.....	38
III.2: Description globale de la simulation.....	38
III.3. Résultats des simulations.....	41
III.3.1. Méthode du référentiel lié au synchronisme.....	41
III.3.1.a. Commande par hystérésis.....	41
III.3.1.a.1. Charge RL.....	41
III.3.1.a.2. Changement de la charge.....	42

III.3.1.b. Commande MLI.....	43
III.3.1.b.1. Charge RL.....	43
III.3.1.b.2. Changement de la charge.....	44
III.3.2. Méthode des puissances instantanées.....	45
III.3.2.a. Commande par hystérésis.....	45
III.3.2.a.1. Charge RL.....	45
III.3.2.a.2. Changement de la charge.....	46
III.3.2.b. Commande MLI.....	47
III.3.2.b.1. Charge RL.....	47
III.3.2.b.2. Changement de la charge.....	48
III.4. Conclusion	49
Conclusion générale.....	51
Annexe	
Bibliographique	



LISTE DES FIGURES

LISTE DES FIGURES

Page

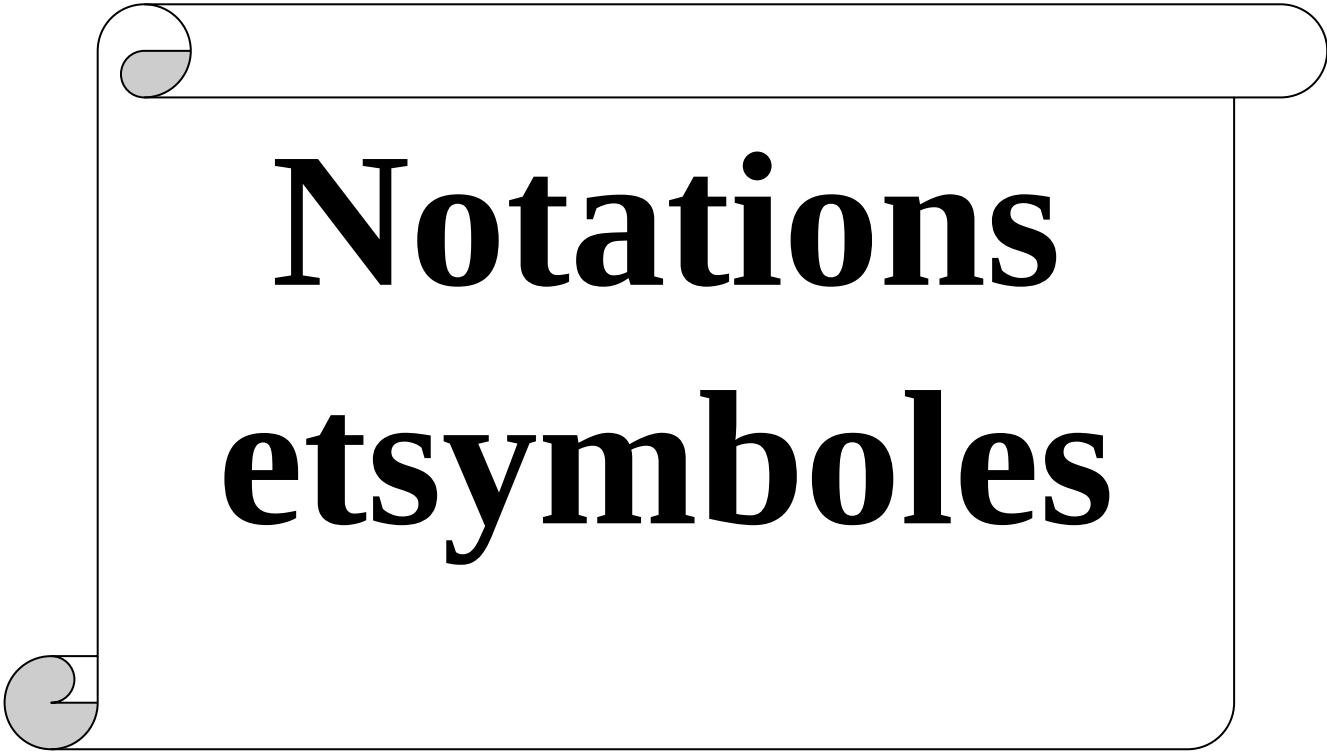
Chapitre I : Problématique des harmoniques dans les réseaux électriques		
Figure 1	<i>Creux et coupures de tension</i>	2
Figure 2	<i>Amplitude d'un creux de tension provoqué par un court-circuit</i>	2
Figure 3	<i>Le démarrage d'un moteur de forte puissance</i>	3
Figure 4	<i>Fluctuations de tension</i>	3
Figure 5	<i>Déséquilibre du système triphasé de tension</i>	4
Figure 6	<i>Variation de la fréquence</i>	4
Figure 7	<i>Harmoniques</i>	5
Figure 8	<i>Présentation spectrale d'un signal périodique</i>	7
Figure 9	<i>Filtre passif résonant</i>	11
Figure 10	<i>Filtre passif amorti</i>	11
Figure 11	<i>Filtre passif anti résonnant</i>	11
Figure 12	<i>Filtre actif parallèle</i>	13
Figure 13	<i>Filtre actif série</i>	14
Figure 14	<i>Filtre combiné parallèle-série (UPQC)</i>	14
Figure 15	<i>Filtre actif série avec filtre passif parallèle</i>	15
Figure 16	<i>Filtre actif série connecté en série avec un filtre passif parallèle</i>	16
Figure 17	<i>Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle</i>	16
Chapitre II : Structure de filtre actif de puissance parallèle		
Figure 1	<i>Schéma de principe du filtre actif parallèle</i>	19
Figure 2	<i>Schéma de principe de l'ensemble réseau électrique, charge polluante et filtre actif et formes d'ondes des courants respectifs</i>	20
Figure 3	<i>Structure d'un filtre actif parallèle</i>	21
Figure 4	<i>Onduleur de tension</i>	22
Figure 5	<i>Onduleur de courant</i>	23
Figure 6	<i>Filtres d'extraction[</i>	27
Figure 7	<i>Schéma de principe de la méthode d'identification des puissances instantanées.</i>	28
Figure 8	<i>Algorithme d'identification des courants harmoniques de référence à base du référentiel synchrone (Park)</i>	30
Figure 9	<i>Méthode du filtre coupe-bande</i>	31

Figure10	<i>Principe de commande des courants par hystérésis</i>	32
Figure 11	<i>Commande des courants par hystérésis</i>	32
Figure12	<i>Principe de commande des courants par MLI</i>	33
Figure13	<i>Modulateur MLI à porteuse triangulaire</i>	33
Figure14	<i>Schéma de la régulation du courant par MLI</i>	33
Figure15	<i>Réglage de la tension du bus continu par un régulateur PI</i>	35
Figure16	<i>Réglage de la tension du bus continu par PI pour une commande en courant</i>	36
Chapitre III : Simulation du Filtre Actif Parallèle		
Figure 1	<i>Schéma synoptique de l'association filtre actif-réseau-charge polluante</i>	38
Figure 2	<i>Schéma bloc de réseau électrique triphasé</i>	39
Figure 3	<i>Schéma bloc de redresseur triphasé</i>	39
Figure 4	<i>Schéma bloc de l'onduleur de tension à deux niveaux</i>	39
Figure 5	<i>Schéma bloc de la commande Hystérésis</i>	40
Figure 6	<i>Schéma bloc de la commande MLI</i>	40
Figure 7	<i>Schéma bloc de la méthode des puissances instantanées.</i>	40
Figure 8	<i>Ich: Courant de charge, If: Courant de filtre actif, Is: Courant de source</i>	41
Figure 9	<i>Spectre du courant de la source avant filtre</i>	41
Figure 10	<i>Spectre du courant de la source après filtre</i>	42
Figure 11	<i>Ich: Courant de charge, If: Courant de filtre actif, Is: Courant de source, Id: Courant redressé</i>	42
Figure 12	<i>Ich: Courant de charge, If: Courant de filtre actif, Is: Courant de source</i>	43
Figure 13	<i>Spectre du courant de la source avant filtre</i>	43
Figure 14	<i>Spectre du courant de la source après filtre</i>	44
Figure 15	<i>Ich: Courant de charge, If : Courant de filtre actif, Is : Courant de source, Id : Courant redressé</i>	44
Figure 16	<i>Ich: Courant de charge avant filtre</i>	45
Figure 17	<i>Is: Courant de source après filtre</i>	45
Figure 18	<i>Spectre du courant de la source avant filtre</i>	46
Figure 19	<i>Spectre du courant de la source après filtre</i>	46
Figure 20	<i>Ich: Courant de charge, If : Courant de filtre actif, Is : Courant de source, Id : Courant redressé</i>	46
Figure 21	<i>Ich: Courant de charge avant filtre</i>	47
Figure 22	<i>Is: Courant de source après filtre</i>	47
Figure 23	<i>Spectre du courant de la source avant filtre</i>	48
Figure 24	<i>Spectre du courant de la source avant filtre</i>	48

Figure 25	<i>Ich: Courant de charge, If : Courant de filtre actif, Is : Courant de source, Id : Courant redressé</i>	48
------------------	--	----

LISTE DES TABLEAUX

<i>Chapitre I : Problématique des harmoniques dans les réseaux électriques</i>		
<i>Tableau 1</i>	<i>Sources des perturbations harmoniques</i>	6
<i>Tableau 2</i>	<i>Effet des harmoniques sur quelques matériels</i>	8
<i>Chapitre III : Structure de filtre actif de puissance parallele</i>		
<i>Tableau1</i>	<i>Les THD avec les différenetes stragégies.</i>	48



Notations etsymboles

Symbole	Signification
THD	taux de distorsion harmonique
F	facteur de puissance
I_h	le courant harmonique
I_{ch}	courant de charge
I_s	courant de source
D	puissance Déformante
P	puissance active
Q	puissance reactive
S	la puissance apparente
F	Le facteur de puissance
V_{fn} , I_{fn} , L_f	tension, courant et inductance du filtre actif
f_n	fréquence de harmonique
f₁	fréquence fondamentale
n	harmonique de rang
y	signal déformé d'harmonique
I_{eff}	la valeur efficace de courant
V_{eff}	La valeur efficace de tension
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
GTO	Gate Turn-Off Thyristor
FAP	Filtre actif parallèle
FAS	Filtre actif série
f_c	la fréquence de coupure
UPQC	Unified Power Quality Conditioner
I_f	le courant instantané à la sortie du filtre actif parallèle
I_d	courant redressé côté charge
ω	la pulsation du filter
p(t)	Puissance réelle instantanée

$p_o(t)$	Puissance homopolaire instantanée
$\bar{p}$	Puissance continue liée à la composante fondamentale active
$\bar{q}$	Puissance continue liée à la composante fondamentale réactive
$\tilde{p}$ et $\tilde{q}$	Puissances alternatives liées à la somme des composantes perturbatrices
I_α, I_β	Courants perturbateurs calculés dans le repère α - β

Liste des Abréviations

FAP: Filtre actif parallèle

IGBT: Insulated Gate Bipolar Transistor

MLI: Modulation par largeur d'impulsion

FAP: Filtre actif parallèle

UPQC: Conditionneur universel d'énergie électrique

FPB: Filtre passe bas

PI: Régulateur proportionnel intégral

THD: Taux de distorsion harmonique

SVC: Static var compensator

FAS: Filtre actif série

A decorative scroll frame with a light gray background and a dark gray border. The frame has rounded corners and a small gray circular element at the top left corner.

Introduction générale

Introduction générale

L'énergie électrique est généralement distribuée sous la forme de trois tensions constituant un système sinusoïdal triphasé. Un des paramètres de ce système est la forme d'onde qui doit être la plus proche possible d'une sinusoïde.

La large utilisation des convertisseurs statiques dans les systèmes commandés à base d'électronique de puissance entraîne des problèmes au niveau de réseau électrique. Les convertisseurs statiques sont considérés comme des charges dites déformantes. Ces charges non linéaires, telles que les redresseurs à diodes et à thyristors, les gradateurs, les ordinateurs et leurs périphériques et les appareils de climatisation et d'éclairages à base de tubes fluorescents, absorbent des courants non sinusoïdaux même s'ils sont alimentés par une tension sinusoïdale et de ce fait introduisent des pollutions harmoniques sur les courants et les tensions des réseaux de distribution électrique et consomment généralement de l'énergie réactive.

Ces types de perturbation ont des effets très néfastes sur les équipements électriques. Ces effets peuvent provoquer des échauffements jusqu'à la destruction totale des équipements.

Afin de résoudre ce problème les filtres passifs sont largement utilisés. Or cette solution traditionnelle présente plusieurs inconvénients. Pour remédier à ces inconvénients la solution moderne consiste à mettre en œuvre des filtres actifs parallèles. Le filtre actif est un onduleur de tension ou de courant qui injecte dans le réseau des courants perturbateurs égaux à ceux absorbés par la charge polluante, mais en opposition de phase avec ceux-ci conduisant ainsi à des courants sinusoïdaux coté réseau. Ainsi l'objectif du filtre actif parallèle consiste à empêcher les courants harmoniques produits par des charges polluantes, de circuler à travers l'impédance du réseau, située en amont du point de connexion du filtre actif. Néanmoins, pour atteindre les meilleures performances du filtre actif parallèle, les stratégies de commande les plus adéquates doivent être adoptées.

Le travail présenté dans ce mémoire concerne l'étude d'un filtre actif parallèle par différentes stratégies de commande afin de compenser les courants harmoniques générés par une charge non linéaire. Ce travail est organisé en trois chapitres.

Le premier chapitre est consacré à la présentation des perturbations dans les réseaux électriques d'alimentation, ainsi que les origines de ces perturbations et leurs conséquences sur les installations électriques. Ensuite, quelques normes d'harmoniques sont présentées. Après, les techniques et les méthodes de dépollution harmonique des réseaux électriques sont exposées.

Le deuxième chapitre est réservé à l'étude du filtre actif parallèle triphasé, nous exposerons les différents éléments constitutifs du filtre et les stratégies de commande par MLI, par hystérésis,

ainsi que l'identification par la méthode de puissances instantanées et la méthode de référentiel synchrone.

Dans le troisième chapitre, nous présenterons les simulations du filtre actif parallèle avec les deux stratégies les plus répandues de la détection des courants harmoniques, qui sont la méthode des puissances instantanées et la méthode du référentiel synchrone. Les deux stratégies de commande adoptées sont la commande par hystérésis et la commande MLI. Les résultats de simulations avec ces différentes stratégies seront présentés, interprétés et comparés.

Nous finalisons ce travail par une conclusion générale.



Chapitre I:

**Problématique des harmoniques
dans les réseaux électriques**

I.1 Introduction

Le distributeur d'énergie doit fournir à l'ensemble de ses clients et utilisateurs une énergie de bonne qualité sous la forme de trois tensions sinusoïdales constituant un réseau triphasé équilibré. La qualité de cette énergie dépend de celle de la tension aux points de raccordement.

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

Dans ce chapitre nous présentons des généralités sur les perturbations électriques affectant le réseau électrique. Nous concentrons sur les perturbations harmoniques causées par les charges non linéaires, en mettant en évidence leurs sources, leurs conséquences et les différentes solutions de dépollution harmonique. [1].

I.2 Perturbation électrique

Les tensions d'un réseau électrique constituent un système alternatif triphasé, dont la fréquence de base est de 50 ou 60 Hz. Les paramètres caractéristiques d'un tel système sont :

- La fréquence.
- L'amplitude des tensions.
- La forme d'onde qui doit être la plus proche possible d'une sinusoïde.
- La symétrie du système triphasé (égalité des amplitudes et des déphasages entre les phases).

La qualité de la tension peut être affectée, soit du fait de certains incidents inhérents à la nature physique et aux sujétions liées à l'exploitation du réseau, soit du fait de certains récepteurs non linéaires[2].

Ces défauts se manifestent sous forme de différentes perturbations affectant un ou plusieurs des quatre paramètres précédemment définis[2].

I.2.1 Creux et coupures de tension

Le creux de tension est une diminution brutale de la tension à une valeur située entre 10% et 90% de la tension nominale pendant une durée allant de 10 ms jusqu'à quelque second.

Les creux de tension sont dus à des phénomènes naturels comme la foudre, ou à des défauts sur l'installation ou dans les réseaux tant publics que ceux des utilisateurs. Ils s'apparaissent également lors de manœuvres d'enclenchement mettant en jeu des courants de fortes intensités (moteurs, transformateurs, etc.) [2] [3].

Une coupure de tension quant à elle est une diminution brutale de la tension à une valeur supérieure à 90% de la tension nominale, disparition totale pendant une durée comprise entre 10 ms est une minute pour les coupures brèves, supérieur à une minute pour les coupures longues. La plus part des appareils électriques admettent une coupure totale d'alimentation d'une durée inférieur à 10 ms. La figure I.1 montre un exemple de creux et de coupure de tension [2] [3].

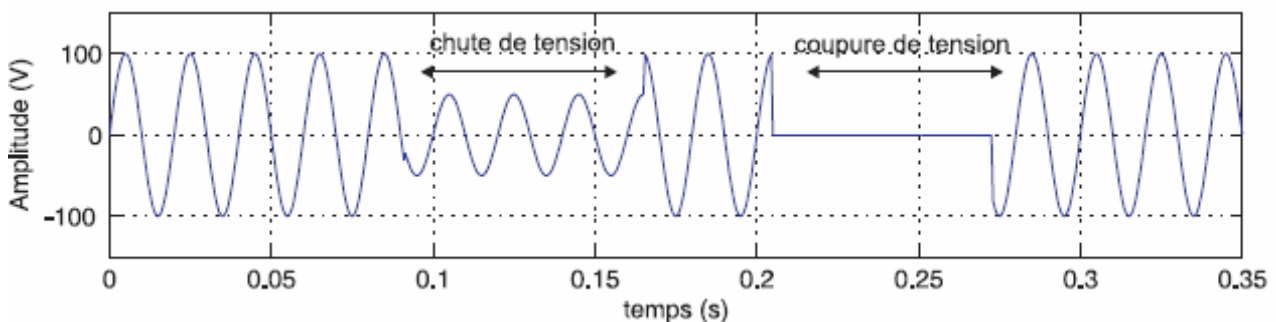


Figure I.1: Creux et coupures de tension

Les courts-circuits restent la principale cause de creux de tension et de coupures brèves. Ils engendrent des variations brusques de l'amplitude de la tension comme montre La figure I.2, et pour cette raison les creux de tension correspondants se caractérisent par une forme rectangulaire en fonction de temps [5].

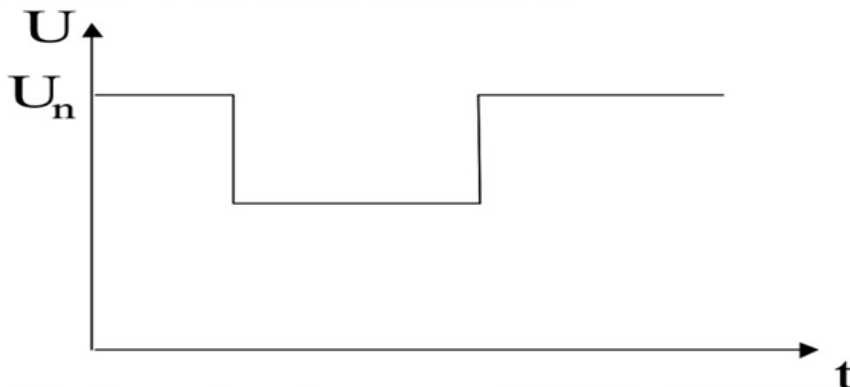


Figure I.2: Amplitude d'un creux de tension provoqué par un court-circuit.

Les moteurs de forte puissance (asynchrones essentiellement) peuvent également être à l'origine des creux de tension. La figure I.3 ou le courant des moteurs atteint au moment de leur démarrage 5 à 6 fois le courant nominal et diminue progressivement lorsque la machine se rapproche de sa vitesse nominale [5].

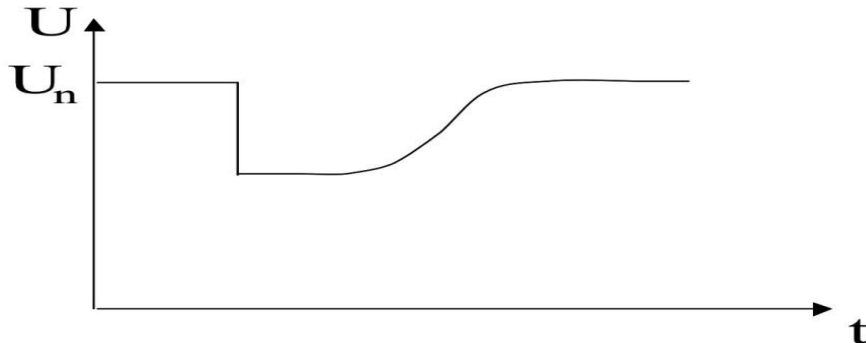


Figure I.3: Le démarrage d'un moteur de forte puissance.

Conséquences: Perturbation ou arrêt du procédé, pertes de données, données erronées, ouverture de contacteurs, verrouillage de variateurs de vitesse, ralentissement ou décrochage des moteurs et extinction de lampes à décharge [2].

I.2.2 Fluctuations de tension

Les fluctuations de tension sont des variations périodiques ou erratiques de l'enveloppe de la tension. Ce sont des variations brutales de l'amplitude de la tension situées dans une bande de $\pm 10\%$ et se produisent sur un intervalle de temps de quelques centièmes de Secondes [3].

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. Un exemple de fluctuation de tension est montré dans la figure (I.4).

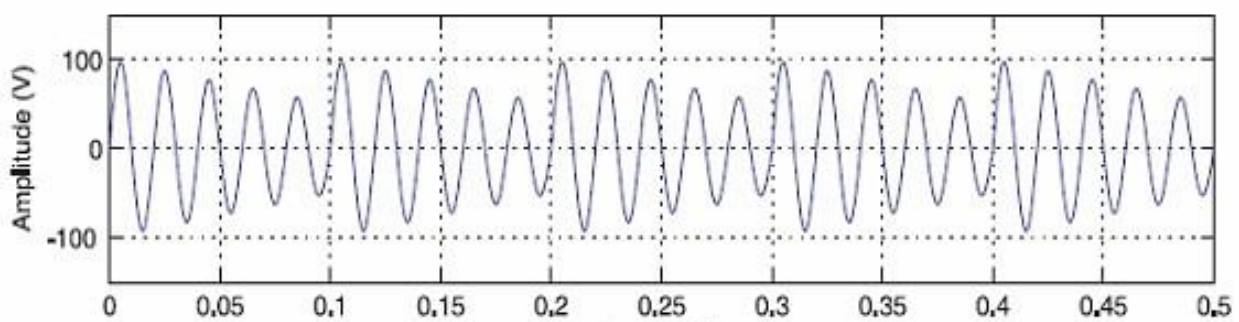


Figure I.4: Fluctuations de tension

Conséquences : Fluctuation de la luminosité des lampes (papillotement ou Flicker).

I.2.3 Déséquilibre du système triphasé de tension

Lorsque les trois tensions ne sont pas identiques en amplitude et/ou ne sont pas décalées d'un angle de 120° les unes par rapport aux autres, on parlera de déséquilibre du système triphasé comme le montre la figure (I.5). 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 [3].

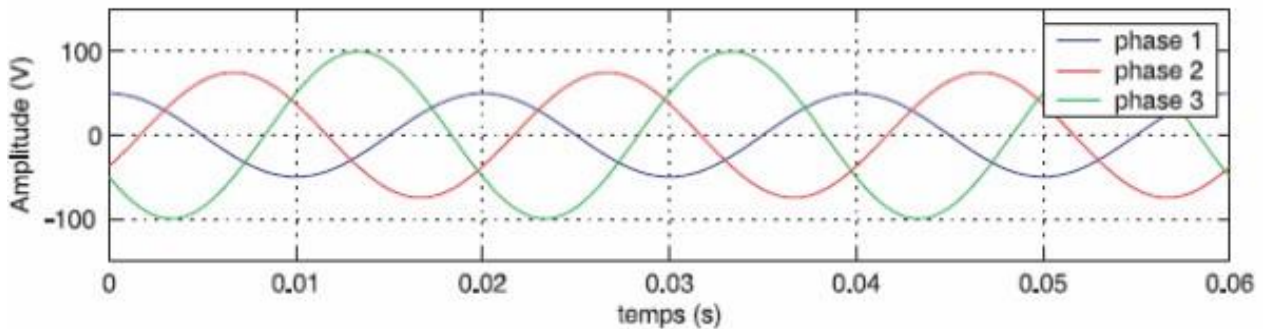


Figure I.5: Déséquilibre du système triphasé de tension

Conséquences: Couples moteurs inverses (vibrations) et sur-échauffement des machines électriques.

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, voir la figure (I.6). 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 les conditions normales d'exploitation, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle $50 \text{ Hz} \pm 1\%$ [3].

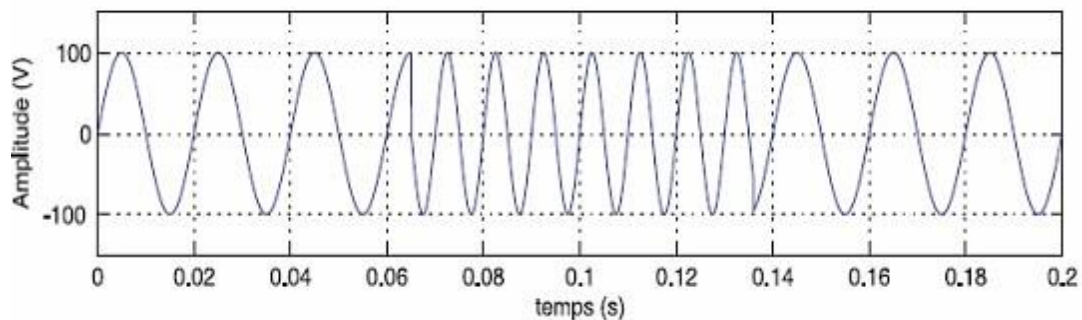


Figure I.6: Variation de la fréquence

I.3 Les harmoniques

L'expansion de l'emploi des charges électriques non linéaires durant les dernières années a significativement contribué à la propagation des harmoniques dans les systèmes d'électronique de puissance. Comme ces charges sont indispensables pour différents besoins domestiques et industriels.

Les déformations du courant et de la tension peuvent perturber le fonctionnement normal d'autres équipements électriques. C'est pourquoi, les distributeurs d'énergie ayant la contrainte de fournir une tension sinusoïdale, prennent en charge l'atténuation des perturbations harmoniques au moyen d'installation de forte puissance. Cependant, les nouvelles réglementations internationales imposent aux consommateurs des limites aux harmoniques, engendrées par leurs systèmes, tant en courant qu'en tension, ainsi, le filtrage des composantes harmoniques est au centre des préoccupations des distributeurs d'une part et des utilisateurs d'énergie électrique d'autre part [3].

I.3.1 Le signal déformé

Le signal déformé peut se décomposer en une somme d'ondes sinusoïdales et d'une composante continue éventuelle (théorème de Fourier). On distingue le fondamental (composante sinusoïdale de fréquence égale à celle du signal) et des harmoniques (composantes de fréquence multiple de celle du signal).

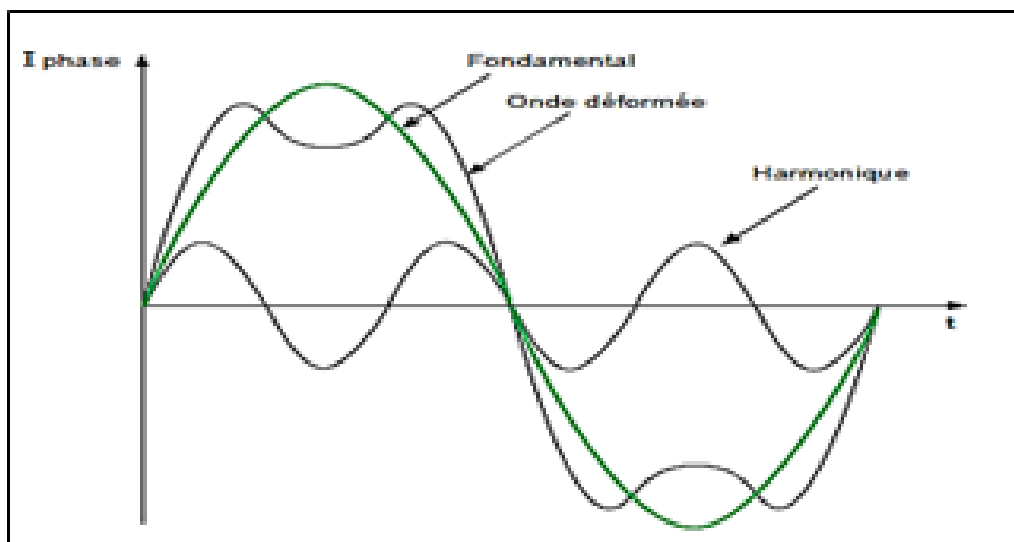


Figure I.7: Harmoniques

I.4 Sources des harmoniques

La cause principale de l'existence des harmoniques de tension est l'injection des courants non sinusoïdaux par des charges dites non linéaires, ainsi les charges déséquilibrées branchées au réseau. Le tableau (I.1) montre quelques sources des harmoniques.

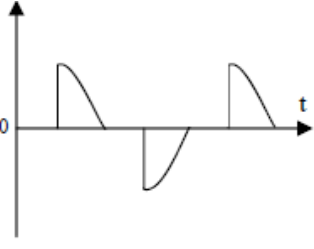
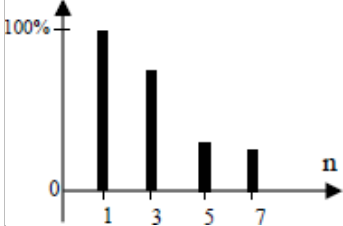
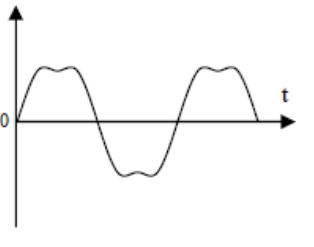
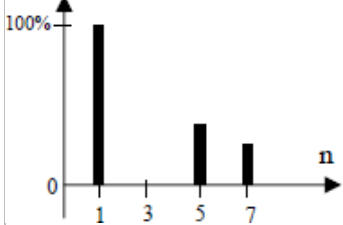
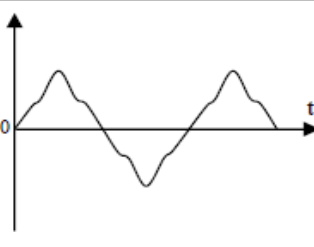
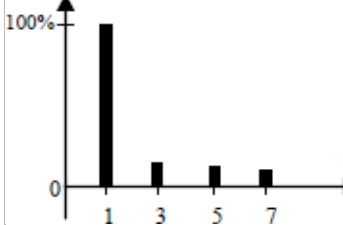
Type de charge	Appareils concernés	Courant absorbé	Spectre harmonique Correspondant
- Gradateurs monophasé (commande par angle de phase).	- Régulation de puissance de fours à résistances, - Modulation de puissance des lampes halogènes.		
- Redresseur triphasé à thyristors.	- Variateur de vitesse des moteurs à courant continu et des moteurs synchrones.		
- Moteur asynchrone.	- Machines-outils, - Appareils électroménagers, - Ascenseurs.		

Tableau I.1: Sources des perturbations harmoniques

I.5 Caractérisation des perturbations harmoniques

I.5.1 Rang de l'harmonique

On définit le rang harmonique comme le rapport de sa fréquence f_n à celle du fondamental (généralement la fréquence industrielle, 50 ou 60 Hz) [6].

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

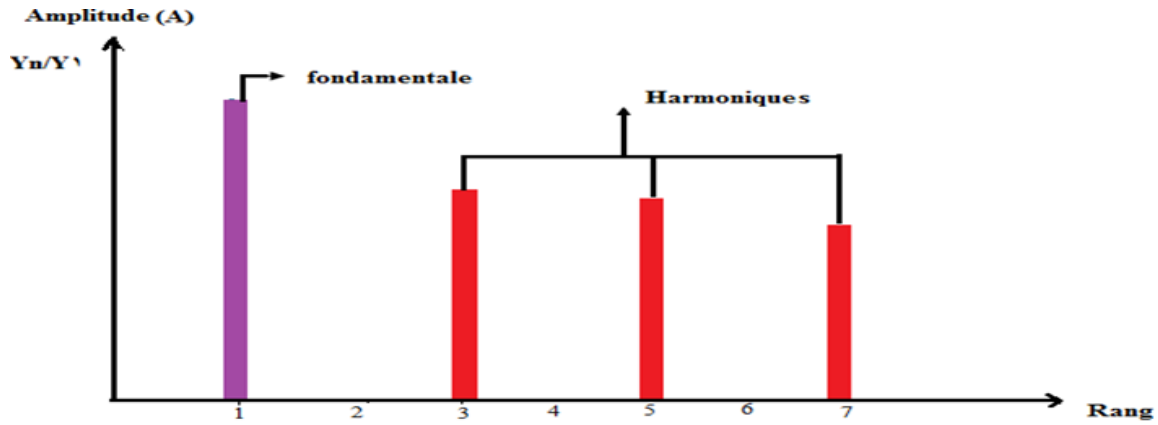


Figure I.8: Présentation spectrale d'un signal périodique

I.5.2 Taux de distorsion harmoniques

La perturbation harmonique est caractérisée par le taux de distorsion harmonique (THD) défini en tension ou en courant [6].

$$\text{THD} = 100 \times \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2(t)}}{I_1} \quad (\text{I.2})$$

I.5.3 Le facteur de puissance

En présence des harmoniques, la puissance apparente S est composée de trois parties : active P , réactive Q et déformante D . Son expression est donnée par l'équation suivante :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (\text{I.3})$$

Pour faire intervenir la participation des harmoniques dans la puissance apparente, nous définissons la puissance déformante D :

$$D = 3V_1 \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2} \quad (\text{I.4})$$

La valeur efficace du courant (RMS ou eff) :

$$I_{eff} = \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} I_n^2(t)} \quad (\text{I.5})$$

Et le facteur de puissance par :

$$FP = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad (\text{I.6})$$

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

I.6 Les effets des harmoniques

a. Les effets instantanés

Ce sont les effets immédiats sur le bon fonctionnement d'un équipement. Par exemple, dans le cas des appareils électroniques, il peut s'agir d'une altération de l'image pour les écrans de télévision ou une altération du son s'il s'agit d'une chaîne HI-FI ou d'un téléphone. La précision des appareils de mesure est également affectée par la présence d'harmoniques.

b. Les effets à terme

En prendre comme un exemple en explique : l'échauffement des câbles et des équipements, les pertes des câbles traversés par des courants harmoniques sont majorées, entraînant une élévation de température. Parmi les causes de pertes supplémentaires, l'élévation de la résistance apparente de l'âme avec la fréquence.

Nature du matériel électrique	Effet de la «pollution harmonique »
Machines tournantes Moteurs triphasés, alternateurs	Echauffements supplémentaires (effet Joule) dans les enroulements statoriques. Couples oscillatoires. Augmentation du bruit.
Transformateurs	Pertes supplémentaires dans le fer (par courants de Foucault) et dans les enroulements (par effet Joule). Risque de saturation en présence d'harmoniques pairs.
Câbles	Augmentation des pertes surtout dans le câble de neutre où s'ajoutent les harmoniques de rang 3 et multiples de 3. Pertes diélectriques supplémentaires.
Electronique de puissance (ponts redresseurs à thyristor, transistors, etc.)	Troubles fonctionnels liés la forme d'onde (commutation, synchronisation).
Condensateurs de puissance	Pertes diélectriques supplémentaires aboutissants à un vieillissement prématuré des condensateurs
Lampes à décharge	Risque de vacillement
Dispositifs de protection (Fusibles.Disjoncteurs magnétothermiques...)	Fonctionnement intempestif
Ordinateur	Dysfonctionnement lié aux couples pulsatoires des moteurs d'entraînement des supports magnétiques
Compteur d'énergie	Erreurs de mesure
Téléviseurs	Déformation d'image

Tableau I.2: Effet des harmoniques sur quelques matériels

I.7 Solutions de dépollution du réseau électrique

Afin de compenser toutes les perturbations, deux méthodes de solution de dépollution, harmoniques au sein d'un site industriel, où la distorsion harmonique a graduellement augmenté ou comme solution globale pour un nouveau site, donc le filtre est un absorbeur de courants harmoniques traditionnelle et moderne sont présentés. Le filtrage est une méthode de réduction des missions [5].

On distingue les techniques suivantes:

- a) les filtres passifs.
- b) les filtres actifs.
- c) les filtres hybrides.

I.7.1 Solutions traditionnelles de dépollution.

Ce sont des techniques connues par les électrotechniciens. Elles apportent une solution facile et rapide pour certains cas de perturbations bien localisées et utilisent des composants passifs (inductances, condensateurs, transformateurs) et/ou des branchements qui modifient le schéma de l'installation [4].

I.7.1.a Agir sur la structure de l'installation

Il est souhaitable d'alimenter un grand pollueur par un transformateur à part, afin de le séparer d'un récepteur sensible. Face à un pollueur moyen il est préférable d'effectuer l'alimentation des câbles distincts au lieu de les connecter en parallèle. Une distribution en étoile permet le découplage par les impédances naturelles et/ou additionnelles [4].

I.7.1.b. Surdimensionnement ou déclassement de l'installation électrique

On procède généralement au surdimensionnement des équipements afin d'assurer leur tenue aux surcharges harmoniques. Cette solution n'agit pas sur les harmoniques qui ne subissent aucune action curative de la part de l'utilisateur. Par cette approche, les problèmes liés à la pollution 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 surcoût de production et ne tire pas profit du potentiel réel de l'installation[4].

I.7.1.c. Renforcement de la puissance de court -circuit

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

I.7.1.d. Rééquilibrage des courants du réseau électrique

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

I.7.1.e. Filtrage passif

Le principe du filtrage passif consiste à insérer en amont de la charge, un ou plusieurs circuits accordés sur les harmoniques à rejeter. Ainsi pour filtrer un courant à une fréquence particulière, un filtre résonnant série est placé en parallèle sur le réseau. Cependant, ce type de filtre est très sélectif. Pour atténuer toute une bande de fréquences, un filtre passif amorti du second ordre est préférable. Le dimensionnement de ces filtres dépend des harmoniques à éliminer, des performances exigées, de la structure du réseau et de la nature des récepteurs [4].

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

- une connaissance approfondie de la configuration du réseau électrique est nécessaire, les variations de l'impédance du réseau peuvent détériorer les performances du filtre.
- le réseau peut former un système résonnant avec le filtre et les fréquences voisines de la fréquence de résonance sont amplifiées.
- équipements volumineux (problème d'encombrement).
- inadaptabilité et perte d'efficacité lorsque les caractéristiques du réseau électrique évoluent.

Parmi les filtres passifs couramment utilisés, on cite :

• Le filtre passif résonant

Il est donné par la figure I.9. Dans ce filtre, le rang d'accord 'ha' correspond au multiple, entier ou non, de la fréquence nominale du réseau. La pulsation de résonance du filtre est :

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = 1/\sqrt{LC} \quad (I.7)$$

$$Z_{eq} = \frac{1-LW^2+jRCW}{jCW} \quad (I.8)$$

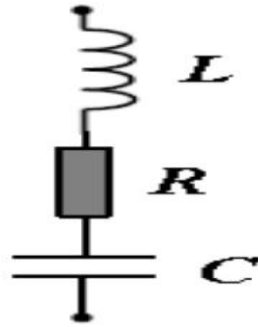


Figure I.9 : Filtre passif résonnant.

• Filtre passif amorti

C'est un filtre passe haut constitué d'une inductance en parallèle avec une résistance, le tout en série avec un condensateur comme décrit sur la figure I.10. Son impédance équivalente est :

$$Z_{eq}(w) = \frac{1-LW^2+j\frac{L}{R}W}{-\frac{L}{R}CW^2+jCW} \quad (I.9)$$

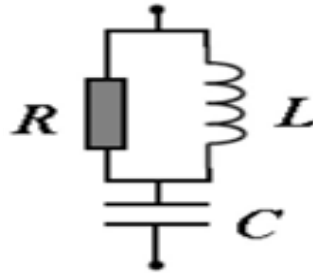


Figure I.10 : Filtre passif amorti

• Filtre passif anti résonnant

Le phénomène de l'anti-résonance (figure I.11) se rencontre dans les réseaux électriques quelque soit leur niveau de tension. L'impédance vue par le réseau et le filtre passif résonnant est :

$$Z_{eq}(w) = jL_S W \frac{1-LCw^2+jRCw}{1-(L+L_S)Cw^2+jRCw} \quad (I.10)$$

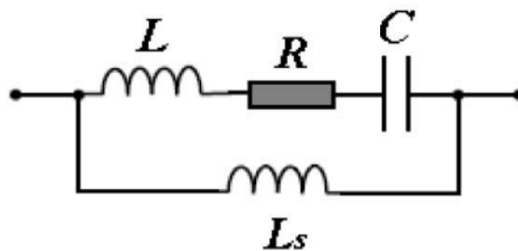


Figure I.11 : Filtre passif anti résonnant.

Dans ce cas, les variations de l'impédance du réseau peuvent détériorer les performances du filtre. De plus, l'impédance du réseau peut former un système résonnant avec le filtre et les fréquences voisines de la fréquence de résonance seront alors amplifiées. Finalement, cette solution est dédiée à un type de charge et une configuration réseau et perd de son efficacité lorsque les caractéristiques de ceux-ci évoluent.

I.7.2 Solutions modernes de dépollution

Deux raisons principales ont conduit à concevoir une nouvelle structure de filtrage moderne et efficace appelée actif[4].

- La première raison est due aux inconvénients inhérents des solutions traditionnelles de dépollution qui ne répondent plus à l'évolution des charges et des réseaux électriques. En effet, les méthodes de dépollution des réseaux électriques présentent un certain nombre d'inconvénients. Le plus important d'entre eux est sans doute le fait d'être sensible aux évolutions de l'environnement. Ils voient leur efficacité baisser avec les variations des perturbations (variation des fréquences et des amplitudes des harmoniques).

- La seconde raison fait suite à l'apparition de nouveaux composants à commutation forcée, comme les transistors bipolaires, les thyristors GTO et les transistors IGBT qui a permis de réaliser de nouvelles structures qui assurent le contrôle de la forme d'onde de la phase du courant d'entrée. Le but de ces filtres est de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à compenser les perturbations responsables de la dégradation des performances des équipements et installations électriques. Ainsi le filtrage actif tend à annuler les courants harmoniques en injectant dans la source perturbatrice des courants harmoniques d'amplitudes identiques, mais en opposition de phases à l'aide d'un pont onduleur. A cet effet, une mesure du courant de la charge non linéaire permet de connaître le courant à fournir [4].

I.7.2.1 Filtres actifs

Le filtrage actif constitue aujourd'hui une solution plus sophistiquée que le filtrage passif, bénéficiant des technologies les plus performantes et constamment améliorée par les constructeurs. Le principe de fonctionnement du filtre actif réside dans le fait que celui-ci produit des courants qui s'opposent aux courants harmoniques créés par les charges non linéaires, tendant ainsi à rétablir un courant appelé du réseau quasi sinusoïdal. Ces filtres actifs sont encore appelés compensateurs actifs. Ils sont utilisés en parallèle ou en série d'une installation nécessitant un traitement harmonique.

I.7.2.1.a Le filtre actif parallèle (F.A.P)

Appelé aussi compensateur shunt, il est connecté en parallèle sur le réseau de distribution (figure 1.12). Il est le plus souvent commandé comme un générateur de courant. Il restitue dans le réseau électrique les courants harmoniques injectés sont égaux à ceux absorbés par la charge non linéaire mais en opposition de phase, de telle sorte que le courant fourni par le réseau soit sinusoïdal et en phase avec la tension simple correspondante. Son indépendance vis-à-vis de la source et de la charge lui assure auto-adaptabilité, fiabilité et performance [4].

✓ Principe de fonctionnement

Le principe du filtre actif de type parallèle (filtre actif le plus répandu) réalise l'injection d'un courant dit compensateur en opposition avec le courant déformé absorbé par la charge non linéaire. Le courant résultant en amont de la charge est un courant reconstitué proche du sinusoïdal classique transformant alors, vis-à-vis du réseau, la charge non linéaire en une charge linéaire. Les effets néfastes des harmoniques sont ainsi annulés.

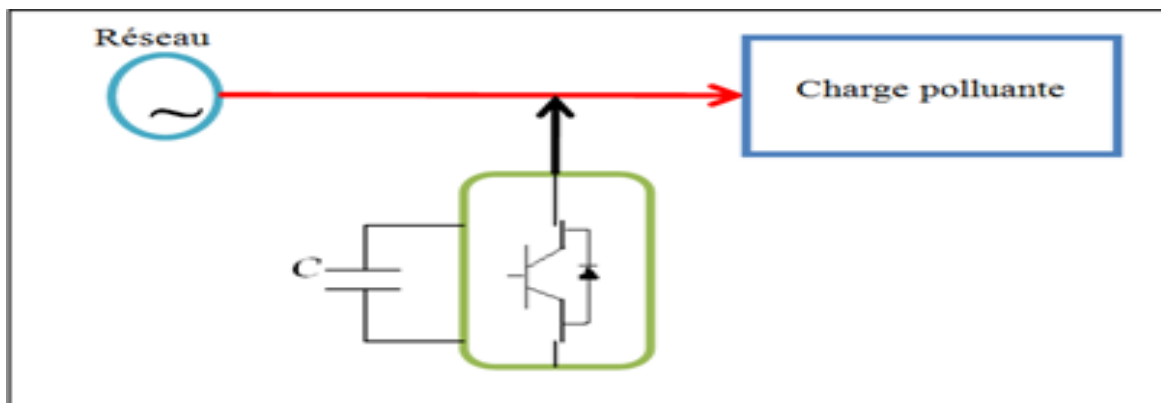


Figure I.12: Filtre actif parallèle.

I.7.2.1.b Le filtre actif série (F.A.S)

Le filtre actif série engendre des tensions harmoniques V_h dont la somme avec la tension réseau V_s est une onde sinusoïdale (figure I.13). Il est destiné à protéger les installations sensibles aux perturbations provenant du réseau telles que les harmoniques en tension, les surtensions. En revanche, le filtrage série ne permet pas de compenser les courants harmoniques consommés par la charge [4].

✓ Principe de fonctionnement

Le filtre actif série se comporte dans ce cas, comme une source de tension qui s'oppose aux tensions perturbatrices (creux, déséquilibre, harmoniques) venant de la source et également à celles

provoquées par la circulation des courants perturbateurs à travers l'impédance du réseau. Ainsi la tension aux bornes de la charge à protéger est purement sinusoïdale.

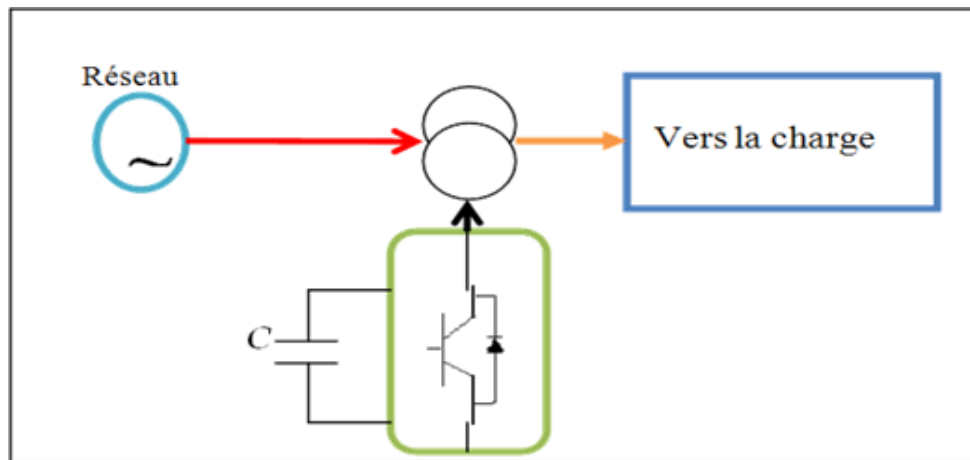


Figure I.13: Filtre actif série.

I.7.2.1.c Le filtre actif parallèle-série dit Universel (UPQC)

La combinaison parallèle-série active, aussi appelée Unified Power QualityConditioner (UPQC), résulte de l'association des deux filtres actifs parallèle et série. 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].

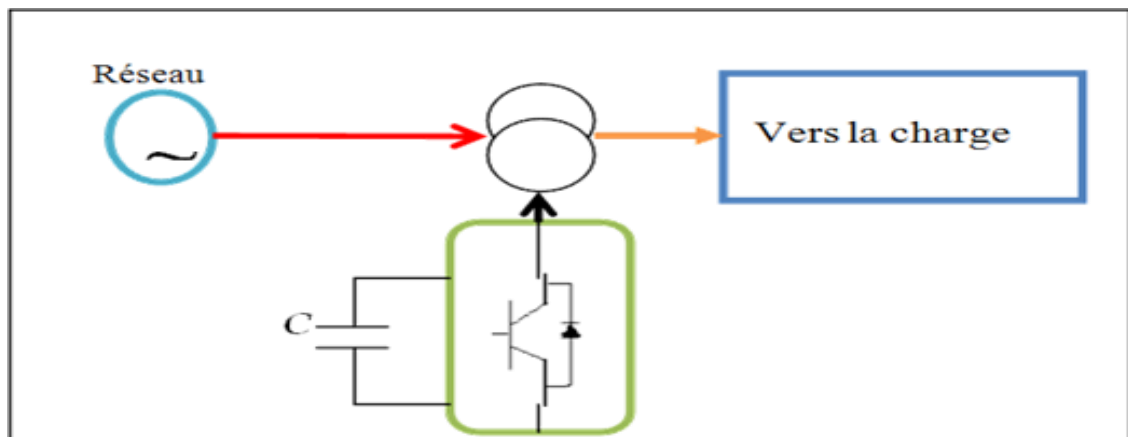


Figure I.14: Filtre combiné parallèle-série (UPQC).

I.7.2.2 Combinaison hybride active et passive

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

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

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

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

Le rôle du filtre actif série de la figure I.15 est d'empêcher les courants harmoniques de circuler vers le réseau et de les obliger à passer par les filtres passifs raccordés à leurs fréquences.

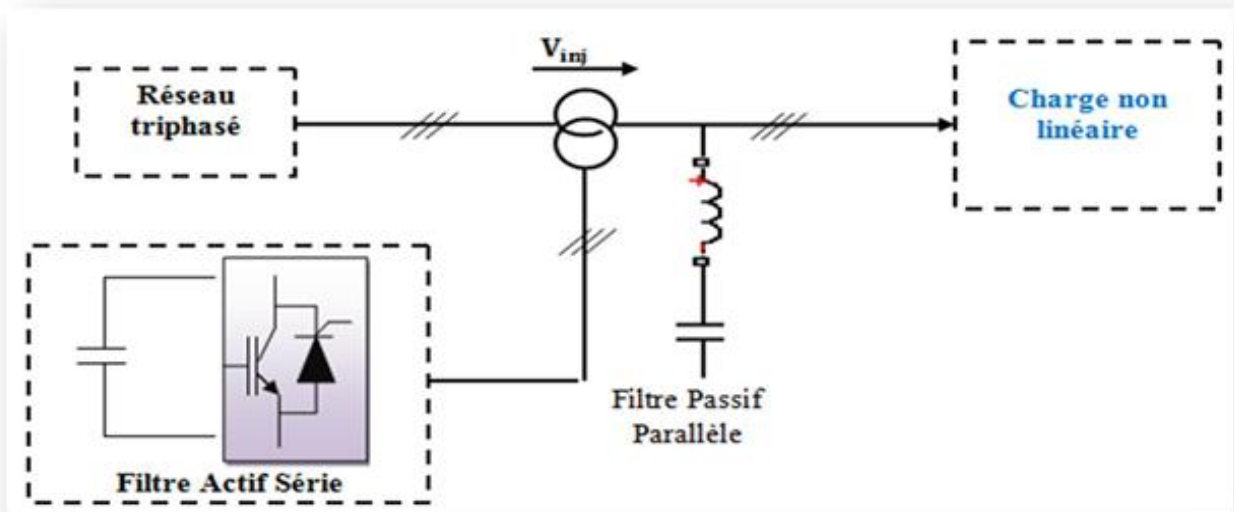


Figure I.15 : Filtre actif série avec filtre passif parallèle

La figure I.16 illustre la topologie d'un filtre actif série connecté en série avec un filtre passif parallèle. Le principe de fonctionnement de cette configuration, est le même que pour la topologie précédente avec l'avantage de réduire encore le dimensionnement du filtre actif série car le courant qui le traverse est plus faible. De plus, le filtre actif série est à l'abri d'un éventuel court-circuit de la charge.

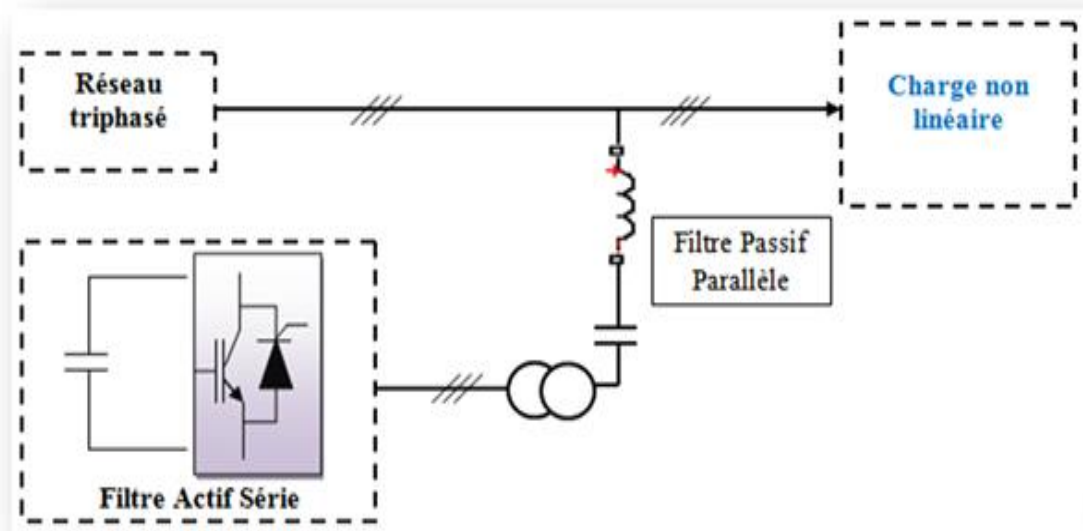


Figure I.16 : Filtre actif série connecté en série avec un filtre passif parallèle

La figure I.17 présente la structure d'un filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle. Le rôle du filtre actif parallèle dans cette configuration, est la compensation des courants harmoniques basses fréquences émis par la charge polluante. Le filtre passif accordé sur une fréquence élevée, élimine les harmoniques hautes fréquences y compris ceux créés par le filtre actif parallèle. Ce type de filtrage a déjà été appliqué à la compensation des courants harmoniques émis par un cyclo-convertisseur de forte puissance.

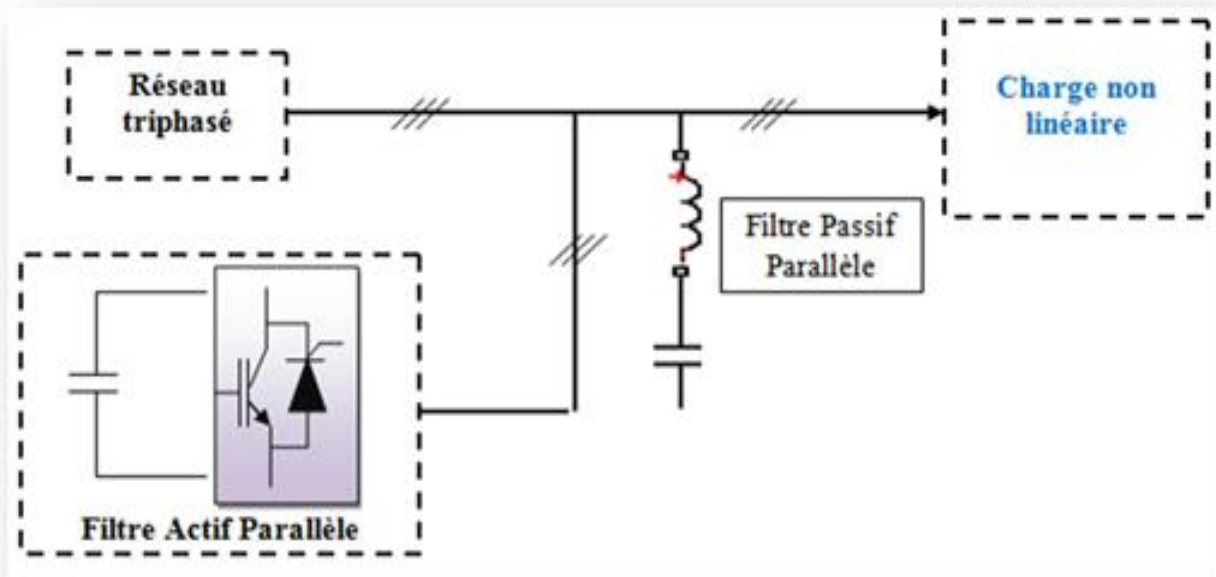


Figure I.17 : Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle.

I.8 Conclusion

Le réseau électrique est affecté par des diverses perturbations. Les charges non linéaires sont de plus en plus présentes comme récepteurs consommateurs dans les réseaux, Elles produisent une pollution électrique harmonique qui nécessite un dispositif d'élimination de ces perturbations et compensation de l'énergie réactive qu'ils consomment.

On a abordé les perturbations harmoniques et les moyens techniques permettant de les limiter dont il existe plusieurs. Les solutions modernes sont les meilleures. Les solutions classiques présentent de nombreuses contraintes pour répondre à un besoin actif de dépollution, elles sont souvent pénalisées en termes d'encombrement, de résonance et d'une mauvaise adaptation face à l'évolution du réseau et aux charges polluant.

A decorative frame resembling a scroll, with a light gray background and a thin black border. The top-left and bottom-left corners feature stylized scroll folds. The text is centered within the frame.

Chapitre II:

**Structure de filtre actif de
puissance parallele**

II.1. Introduction

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

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

Dans ce chapitre nous étudierons la structure du filtre actif parallèle, l'onduleur, la source continue, le filtre de couplage, les différentes stratégies d'identification des courants harmoniques, de commande de l'onduleur de tension et la régulation de la tension du bus continu.

II.2. Principe de filtrage actif parallèle

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.

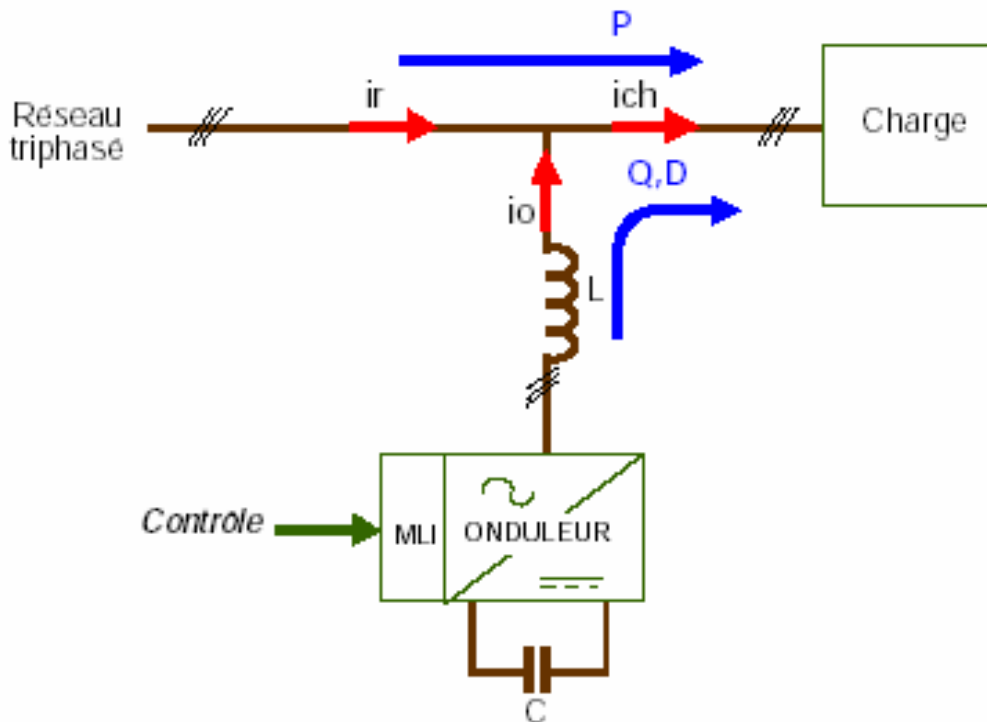


Figure II.1: Schéma de principe du filtre actif parallèle.

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

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

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

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 :

$$i_s = i_{ch} - i_f \quad (II.2)$$

La source fournit la puissance active absorbée par la charge :

$$i_s = i_{cha} \quad (II.3)$$

Le filtre actif parallèle fournit la puissance réactive et déformante :

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

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.

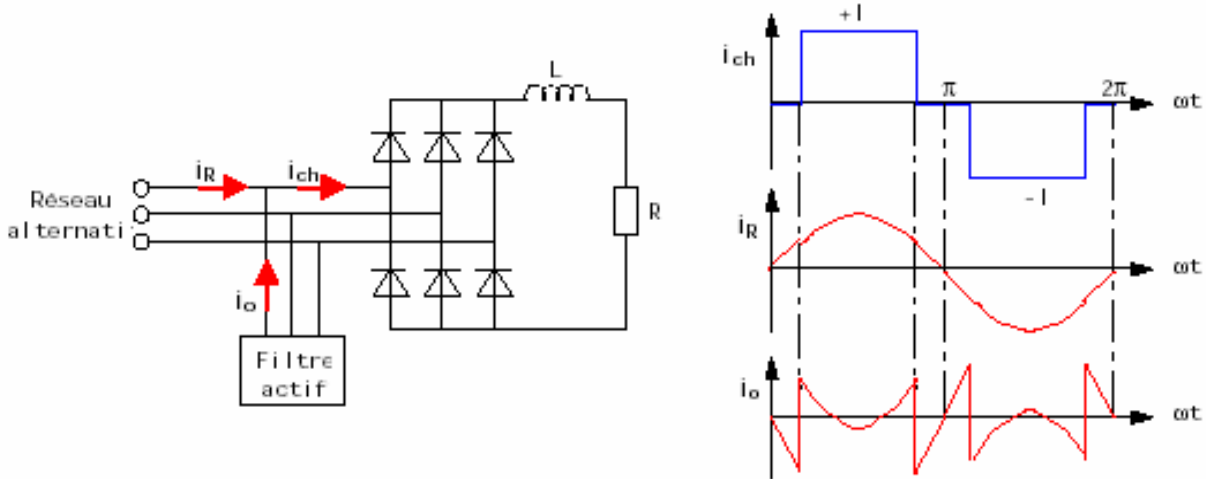


Figure II.2: Schéma de principe de l'ensemble réseau électrique, charge polluante et filtre actif et formes d'ondes des courants respectifs.

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 distinctes: une partie puissance, une partie commande (figure II.3).

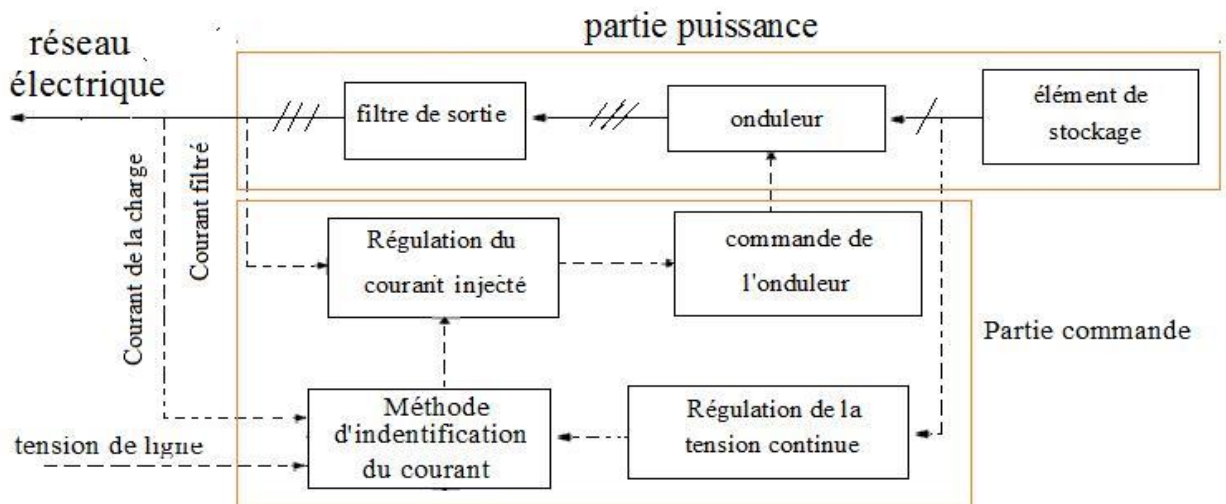


Figure II. 3: Structure d'un filtre actif parallèle.

- **La partie puissance est constituée :**

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

- **La partie commande est constituée :**

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

II.4. Etude de la partie puissance

II.4.1. L'onduleur

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion continue - alternative à partir d'une source de tension continue. Donc, il est possible de produire à la sortie du convertisseur une tension alternative, par une séquence de commande adéquate des interrupteurs.

Le but de la commande de l'onduleur est de permettre la meilleure reproduction des courants de référence, à travers les ordres de commande appliqués aux interrupteurs de puissance.

- **Structure tension**

L'onduleur de tension connecté en parallèle au réseau est illustré par la figure II.4 [23]. La capacité C_f joue le rôle d'une source de tension continue. La tension à ses bornes V doit être positive et maintenue quasiment constante. Ses fluctuations doivent être faibles d'une part pour ne pas dépasser la limite en tension des semi-conducteurs constituant les interrupteurs, d'autre part pour ne pas dégrader les performances du filtre actif.

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

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

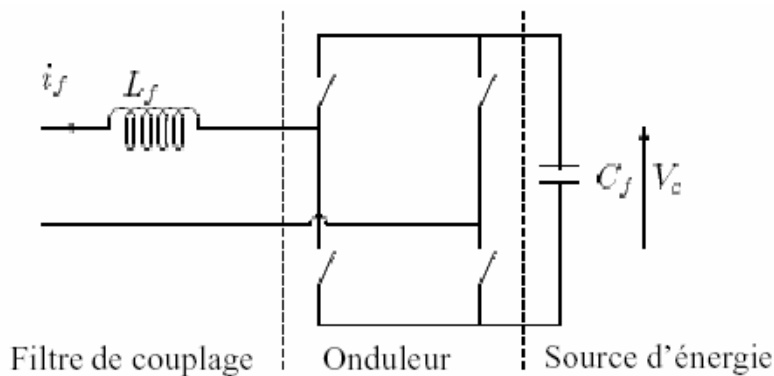


Figure II. 4: Onduleur de tension

- **Structure courant**

La figure II.5 représente le schéma de principe d'un onduleur de courant [23].

L'inductance joue le rôle d'une source de courant continu. Le courant i_L traversant cette inductance est maintenu quasiment constant pour ne pas dégrader les performances du filtre actif.

L'onduleur de courant est relié au réseau par l'intermédiaire d'un filtre passe-bas du second ordre constitué d'une inductance L_f et d'une capacité C_f . Ainsi le courant i_f du filtre actif est égal au courant délivré par l'onduleur filtré par le filtre LC dont la fréquence propre est $\frac{1}{2\pi\sqrt{L_f C_f}}$.

La bande passante du filtre actif est donc essentiellement imposée par le choix de L_f et de C_f . Ceux-ci peuvent être dimensionnés de manière à atténuer la fréquence de commutation des interrupteurs de l'onduleur.

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

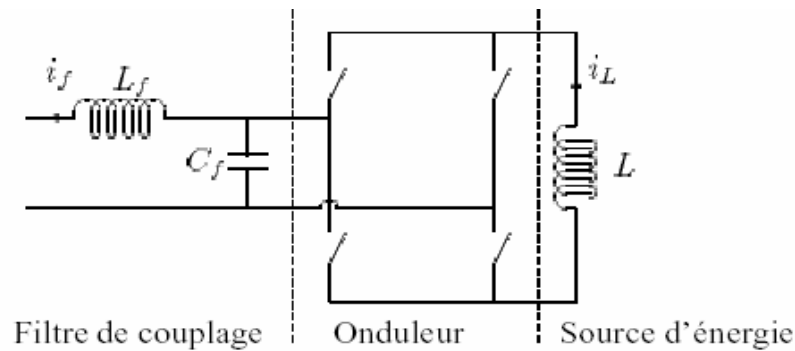


Figure II. 5: Onduleur de courant

II.4.2 Filtre de couplage

Le rôle du filtre de sortie est d'assurer la connexion de l'onduleur de tension au réseau électrique qui est considéré comme un générateur de courant harmonique. Il doit empêcher la propagation, dans le réseau électrique, des composantes dues aux commutations des semi-conducteurs (filtre).

En général, dans les FAP, un filtre de sortie du premier ordre est utilisé, 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.

II.4.3 Stockage de l'énergie

Le stockage de l'énergie du côté continu se fait souvent par un système de stockage capacitif représenté par le condensateur qui joue le rôle d'une source de tension continue. Dans les applications de compensation d'harmoniques, une tension V_{dc} élevée améliore la dynamique du filtre actif, par ailleurs, le critère commun pour le choix de la capacité C_{dc} est en générale la limitation des ondulations de la tension continue. Ces ondulations sont d'autant plus élevées que les harmoniques à compenser sont de basses fréquences et d'amplitudes importante. Un dimensionnement adéquat de la capacité peut-être établi à partir d'un courant type que doit générer le filtre actif, ceci n'est pas toujours facile à réaliser car on ne connaît pas souvent tous les harmoniques qu'on doit compenser,

ainsi une méthode de dimensionnement consiste à calculer la capacité à partir du courant harmonique du rang le plus faible I_h [12].

$$C_{dc} = \frac{I_h}{\tau V_{dc} \omega h} \quad (\text{II.5})$$

Avec τ : Taux d'ondulation admissible généralement de l'ordre de 5% de V_{dc}

ωh : Pulsation du rang h .

II.5. Structure de la partie commande

En générale, la commande du filtre actif de puissance est mise en œuvre en trois étapes :

- La première étape consiste à détecter la tension du réseau et le courant de la charge par des capteurs
- de tension et de courant.
- La deuxième étape consiste à déterminer les courants de référence à partir des méthodes d'identification approuvées.
- La dernière étape permet de générer des signaux de commutation des semi-conducteurs de l'onduleur du filtre actif de puissance parallèle en utilisant, l'hystérésis, ou la MLI classique ou la MLI vectorielle, etc[20] .

II.5.1. Identification des courants perturbateurs:

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 .

La méthode d'identification la plus utilisée est celle appelée méthode des puissances réelles et imaginaires instantanées [22]. Cette méthode offre l'avantage de choisir la perturbation à compenser avec précision, rapidité et facilité d'implantation. Pour toutes ces raisons nous avons retenu cette méthode d'identification pour le reste de notre étude. En effet, afin de pouvoir compenser les courants harmoniques, les courants déséquilibrés et la puissance réactive conjointement ou individuellement, cette méthode nous a semblé la mieux appropriée.

Une autre méthode, appelée méthode de détection synchrone, reposant sur la transformée de Park a été proposée [20]. 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.

II.5.1.1 Méthode des puissances réelles et imaginaires instantanées (p-q) :

Cette méthode est la plus utilisée. elle offre l'avantage de choisir la perturbation aкомпenser avec précision, rapidité et facilité d'implantation. Pour ces raisons nous avons retenu cette méthode d'identification pour le reste de notre travail

II.5.1.1.1 principe de la méthode des puissances instantanées :

En présence des harmoniques, la puissance apparente est composée de trois parties : active (P), réactive (q) et déformante (d) comme le montre la relation (II.6).

$$S = \sqrt{P^2 + q^2 + d^2} \quad (II.6)$$

Cette méthode exploite la transformation α - β pour obtenir les puissances réelles et imaginaires.

Notons par (V_α, V_β) et (I_α, I_β) les composantes orthogonales du repère α - β associées respectivement aux tensions de raccordement du filtre actif parallèle (V_s) et aux courants absorbés par les charges polluantes (I_s). La transformation α - β -0 triphasée permet d'écrire, la relation des tensions suivante[16] :

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} \quad (II.7)$$

Et la relation des courants ci-dessous

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} \quad (II.8)$$

Les composantes avec l'indice (0) représentent les séquences homopolaires du système triphasé de courant et de tension.

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

$$\begin{cases} P(t) = V_{sa}I_{sa} + V_{sb}I_{sb} = p(t) + p_0(t) \\ P(t) = V_\alpha I_\alpha + V_\beta I_\beta \\ P_0(t) = V_0 I_0 \end{cases} \quad (II.9)$$

Avec $P(t)$ la puissance réelle instantanée, $P_0(t)$ la puissance homolaire instantanée.

L'avantage de la transformation α - β -0 est la séparation des séquences homopolaires du système triphasé de courant ou de tension. De la même manière, la puissance imaginaire instantanée peut s'écrire sous la forme suivante :

$$q(t) = -\frac{1}{\sqrt{3}}[(V_{sa}-V_{sb})I_{sc} + (V_{sb}-V_{sc})I_{sa} + (V_{sc}-V_{sa})I_{sb}] = V_\alpha V_\beta - V_\beta V_\alpha \quad (II.10)$$

La puissance q a une signification plus large que la puissance réactive habituelle. En effet, contrairement à la puissance réactive, qui ne considère que la fréquence fondamentale, la puissance imaginaire prend en compte toutes les composantes harmoniques de courant et de tension. C'est pourquoi on lui donne une autre dénomination (puissance imaginaire) avec comme unité le Volt-ampère imaginaire (VAI). A partir des relations (II.9) et (II.10), nous pouvons établir la relation matricielle suivante:

$$\begin{bmatrix} P \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & V_{s\beta} \\ -V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{\alpha} \\ I_{\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{II.11})$$

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

$$\begin{cases} p = \bar{p} + \tilde{p} \\ q = \bar{q} + \tilde{q} \end{cases} \quad (\text{II.12})$$

Avec:

- $\bar{p}$ une puissance continue liée à la composante fondamentale active du courant et de la tension.
- $\bar{q}$ une puissance continue liée à la composante fondamentale réactive du courant et de la tension.
- $\tilde{p}$ et $\tilde{q}$ des puissances alternatives liées à la somme des composantes perturbatrices du courant et de la tension.

II.5.1.1.1.a- Séparation des puissances perturbatrices :

Afin de garder les puissances correspondant aux courants harmoniques, il faut filtrer la composante continue correspondant à la composante fondamentale. Pour ce faire, un filtre passe-haut ou passe-bas est utilisé. Ce dernier est le plus utilisé car il ne présente pas une amplification aux fréquences voisines de la fréquence de résonance et son résidu harmonique est moins important. Le schéma présenté dans la figure II.6 donne le principe de séparation des puissances perturbatrices. Où X peut être P ou q .

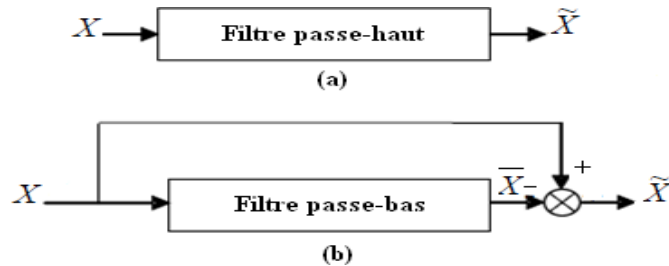


Figure II.6–Filtres d'extraction.

Un filtre passe-bas dans l'espace des puissances permet de séparer la composante fondamentale (autrement dit la partie continue), des composantes perturbatrices (la partie alternative). Deux filtres sont nécessaires, le premier pour isoler la partie continue de la puissance active instantanée et le second pour isoler la partie continue de la puissance réactive instantanée.

II.5.1.1.1.b- Calcul des courants perturbateurs :

En inversant la relation (II.11), nous pouvons recalculer les courants dans le repère

α - β comme le montre l'équation (II.13):

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{V_{s\alpha}^2 + V_{s\beta}^2} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (II.13)$$

En considérant les équations (II.14) et (II.15), nous pouvons séparer le courant dans le repère (α - β) en trois composantes, active et réactive à la fréquence fondamentale et les harmoniques. Ceci conduit à:

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{P} \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{Q} \end{bmatrix} + \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (II.14)$$

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

Cette expression montre donc que l'identification des différentes composantes du courant dans le repère (α - β) revient à séparer des termes continus des puissances réelle et imaginaire instantanées.

Les courants perturbateurs dans le repère biphasé (α - β) sont donnés par la forme suivante [17]:

$$\begin{bmatrix} \tilde{I}_\alpha \\ \tilde{I}_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (II.15)$$

Les courants perturbateurs triphasés qui représentent les courants identifiés, dits courants de référence (I_{ref}), sont calculés à partir de la transformation α - β inverse (transformation C2-3) donnée par la relation (II.16) :

$$\begin{bmatrix} I_{refa} \\ I_{refb} \\ I_{refc} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{I}_\alpha \\ \tilde{I}_\beta \end{bmatrix} \quad (II.16)$$

Avec $\tilde{I}_\alpha, \tilde{I}_\beta$ courants perturbateurs calculés dans le repère (α - β) à partir des courants réactifs et harmoniques de la relation (II.14).

II.5.1.1.2- Algorithme d'identification :

Finalement, l'algorithme d'identification que nous avons défini peut être représenté par le synopsis de la figure II.7. Par souci de simplification, nous décrirons les matrices des relations (II.7) et (II.8), après avoir enlevé les composantes homopolaires.

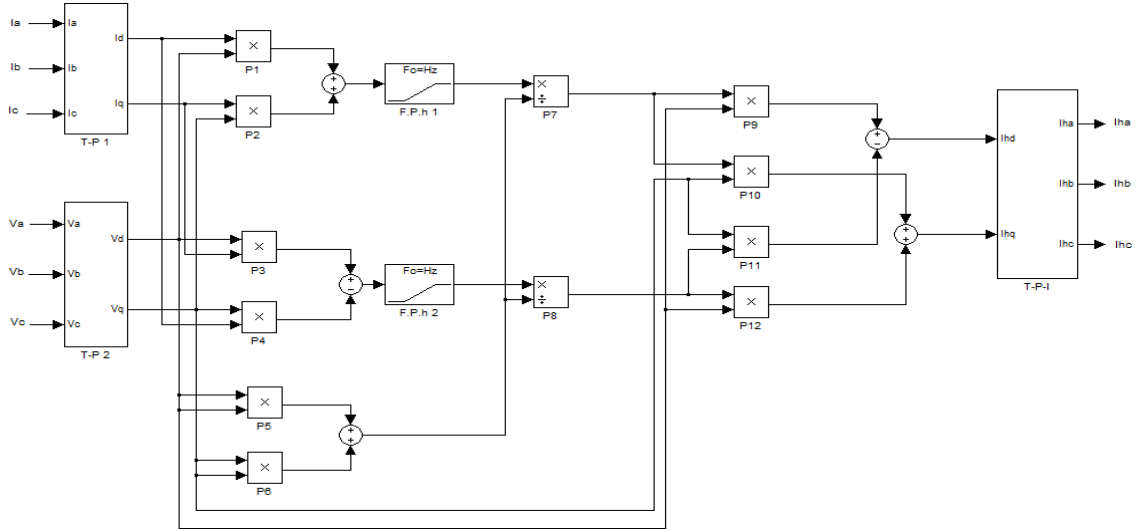


Figure II.7-Schéma de principe de la méthode d'identification des puissances instantanées.

Dans cette figure, nous avons présenté le schéma de l'algorithme d'identification des courants harmoniques, qui est constitués essentiellement, par des blocs de la matrice de transformation (α - β), des filtres passe haut afin d'enlever les composantes continue des puissances, et les différents blocs de calcul du courant harmonique.

II.5.1.2 .La méthode du référentiel synchrone dq :

Le principe de cette méthode consiste à transformer le système des courants, ou des tensions triphasées en un système diphasé formé d'un repère orthogonal (d - q), tournant avec une pulsation w choisie[28]. Si on veut un filtrage actif avec correction du facteur de puissance, on choisit cette pulsation égale à celle du système triphasé. Ainsi les composantes des courants, par exemple, selon les axes d et q seront composées d'une composante constante et d'une composante alternative (variable). La composante constante représente l'amplitude de la composante évoluant avec la pulsation w , contenue dans le courant polluant[28].

Cette composante est évidemment le fondamental de ce courant. La composante variable représente les harmoniques. La transformé de Park des courants de charge nous donne :

$$\begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i_{ch1} \\ i_{ch2} \\ i_{ch3} \end{pmatrix} \quad (II.17)$$

Comme nous venons de citer :

$$\begin{cases} i_d = \bar{i}_d + \tilde{i}_d \\ i_q = \bar{i}_q + \tilde{i}_q \end{cases} \quad (\text{II.18})$$

Où

$\bar{i}_d$: Amplitude du courant fondamental actif.

$\tilde{i}_d$: Courant harmonique

$\bar{i}_q$: Amplitude du courant fondamental réactif

$\tilde{i}_q$: Courant harmonique

La séparation des parties constantes du courant mesuré se fait par un filtre passe haut, ou passe bas soit du premier ordre, soit du deuxième ordre. La transformé inverse de Park de ces derniers délivre les courants harmoniques de références :

$$\begin{pmatrix} i_{ch_ref1} \\ i_{ch_ref2} \\ i_{ch_ref3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{i}_d \\ \tilde{i}_q \end{pmatrix} \quad (\text{II.19})$$

Le diagramme de blocs d'un générateur de courants de référence utilisant l'algorithme du référentiel synchrone est présenté dans la Fig.II.8[16]. La matrice de passage de plan(α - β) vers le plan (d - q) est donnée comme suite :

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & -\sin(\omega t) \\ \sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{II.20})$$

D'après la relation (II.20), la transformation du plan (α - β) vers le référentiel (d - q) des signaux en sinus et cosinus, synchronisés avec les tensions simples du réseau, est indispensable. Ces derniers sont créés en utilisant, dans chaque phase, une boucle à verrouillage de phase, plus connue sous la nomination anglo-saxonne PLL (Phase LockedLoop) [9].

Cet algorithme possède les quelques caractéristiques suivantes :

1. Cette méthode est inhérente aux systèmes triphasés.
2. Elle peut être appliquée aussi bien aux systèmes triphasés équilibrés qu'aux systèmes triphasés avec neutre, déséquilibrés.
3. Méthode de calcul simple.
4. Découplage net entre le fondamental et les composantes harmoniques.
5. Elle est basée sur des valeurs instantanées.

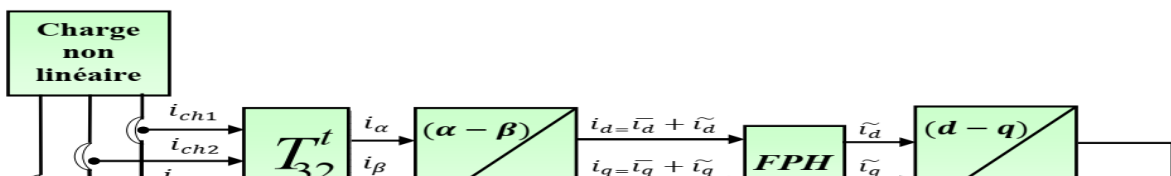


Figure II.8: Algorithme d'identification des courants harmoniques de référence à base du référentiel synchrone (Park)

II.5.1.3 Méthode du filtre coupe-bande (notch filtre)

C'est le plus simple des algorithmes du calcul des courants de référence, comme l'illustre le diagramme représenté sur la figure. II.8

Dans ce type de commande le courant de charge est filtré par un filtre coupe-bande qui parfois est appelé filtre « notch ». Ces filtres coupe-bande éliminent la composante fondamentale tout en laissant passer les composantes harmoniques. Ils ont, par conséquent, la même fréquence de coupure. Le courant de référence ainsi créé permet la génération des signaux de commande des semi-conducteurs de l'onduleur.

Le filtre coupe-Bande s'applique sans problème aux systèmes (équilibré ou non) monophasé, biphasé ou triphasé avec que Le nombre d'harmoniques compensé dépend de la bande passante des semi-conducteur composant l'onduleur du filtre actif. Cette méthode est caractérisée par un bon temps de réponse lors de régime transitoire et de calcul simple. [24].

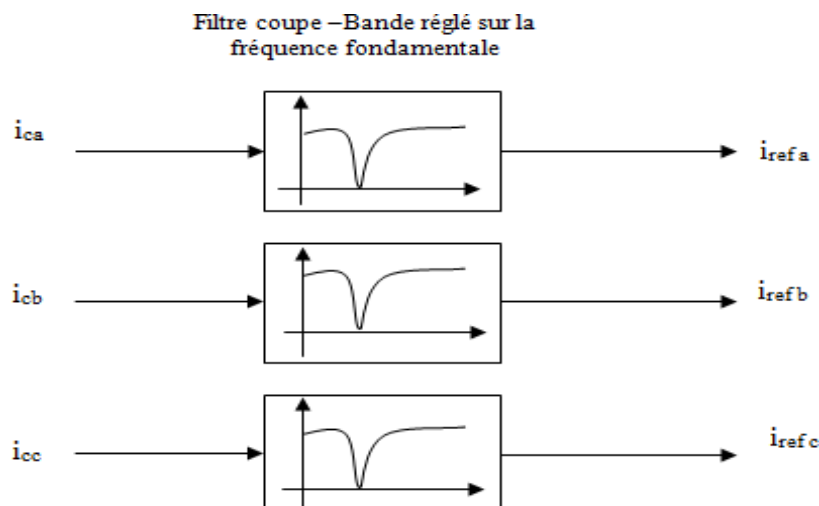


Figure II.9: Méthode du filtre coupe-bande.

II.6 Commande de l'onduleur du filtre actif

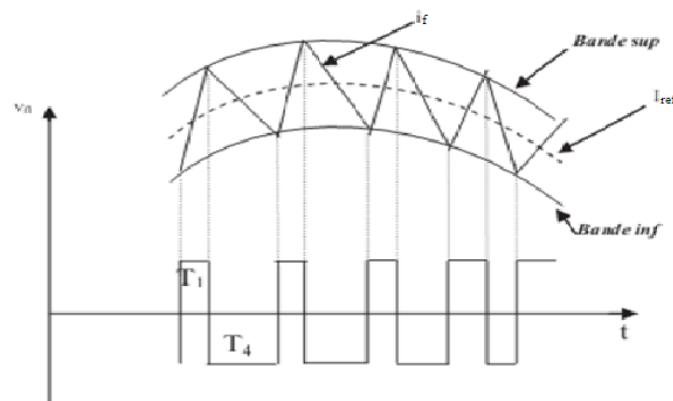
Les performances du filtre actif et notamment la diminution du THD du courant de source sont certes liées aux performances de la génération des références de courants harmoniques, mais dépendent également de la stratégie de commande de l'onduleur de tension (la poursuite des références de courant).

Deux types de commandes de convertisseur statique sont abordés dans ce chapitre: la commande par MLI et la commande par hystérésis.

a. Commande par hystérésis

La commande par hystérésis, appelée aussi commande en tout ou rien qui se résume pour un système du premier ordre à un simple relais, fig. II.9.

Son principe est de comparer le signal de référence avec le signal réel, la différence entre eux est comparée à une bande fixe appelée bande d'hystérésis, dès que l'erreur atteint la bande inférieure ou supérieure un ordre de commande est envoyé afin de diminuer ou augmenter la tension en sortie de l'onduleur.

**Figure II.10:** Principe de commande des courants par hystérésis

La simplicité est le principal avantage de cette technique. En revanche, les commutations évoluant librement à l'intérieur de la bande d'hystérésis, on ne peut pas maîtriser correctement le spectre haute fréquence dû aux fréquences de commutations. [28].

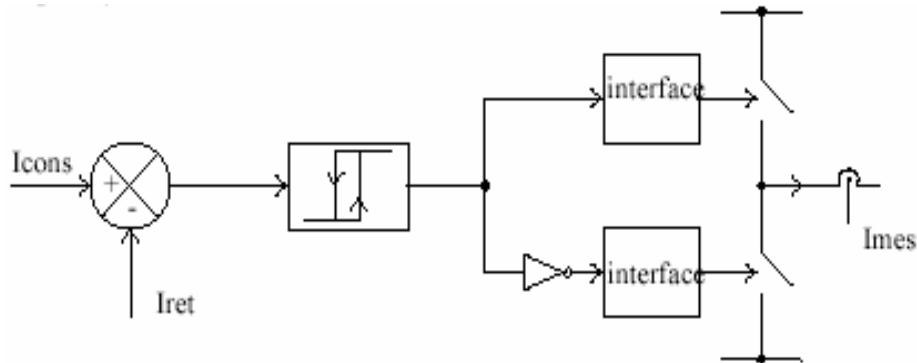


Figure II.11: Commande des courants par hystérésis

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

La commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI) est la technique de commande la plus utilisée, elle résout le problème de la maîtrise de la fréquence de commutation en fonctionnant avec une fréquence fixe facile à filtrer en aval de l'onduleur. La plus simple et la plus connue des modulations de largeur d'impulsion est sans doute la MLI à échantillonnage naturel. Cette technique de commande met en œuvre d'abord un régulateur qui détermine la tension de référence de l'onduleur (modulatrice) à partir de l'écart entre le courant mesuré et sa référence, comme le montre la fig.II.11. L'erreur à la sortie des régulateurs est ensuite comparée avec un signal triangulaire (porteuse à fréquence élevée fixant la fréquence de commutation). La sortie du comparateur fournit l'ordre de commande des interrupteurs ; comme il est présenté dans la fig.II.12 [19].

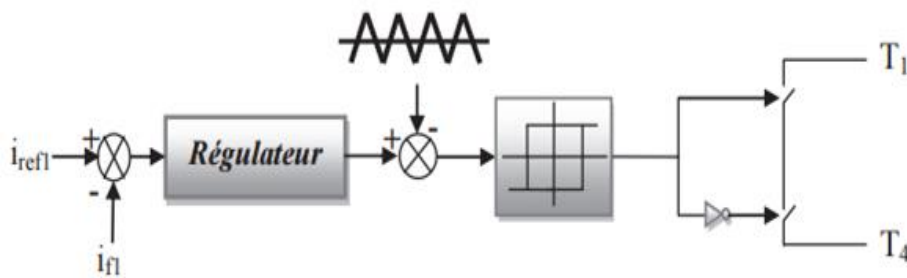


Figure II.12: Principe de commande des courants par MLI.

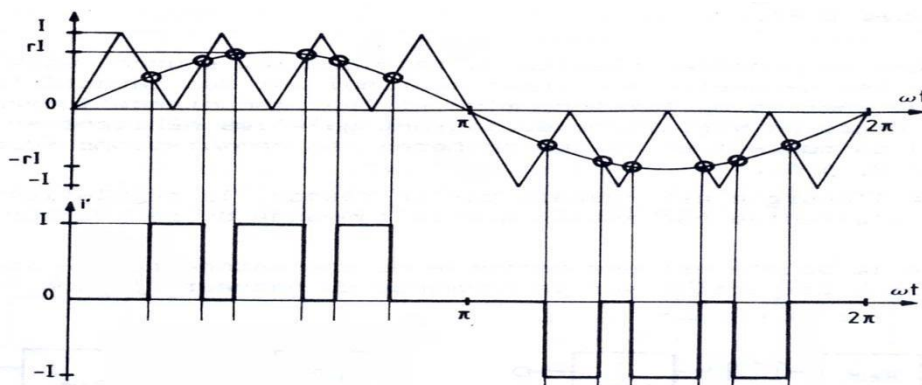


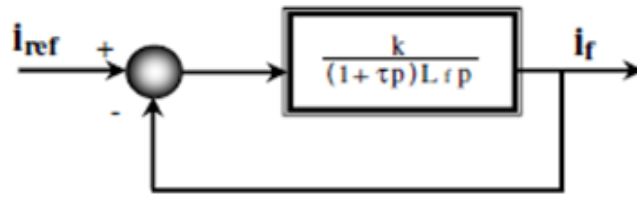
Figure II.13: Modulateur MLI à porteuse triangulaire.

Le signal de référence sinusoïdal est de fréquence $f_r = 1/T_r$, le signal de modulation triangulaire ou porteuse est de fréquence $f_p = 1/T_p$ (figure II.10).

Deux paramètres principaux caractérisent la commande à MLI:

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

L'intérêt de la correction est de permettre une erreur statique nulle. En effet, si le système comporte un intégrateur et se stabilise à un point d'équilibre, tous les signaux sont constants. Le schéma fonctionnel de la régulation du courant I_{ref} est donné par la figure II.13. [22].

**Figure II.14:** Schéma de la régulation du courant par MLI

La fonction de transfert en poursuite est alors :

$$F(p) = \frac{K}{(1 + \tau p) + L_f p} \quad (II.21)$$

En identifiant la fonction de transfert en boucle fermée à un second ordre :

$$F(p) = \frac{\omega_c^2}{(p^2 + 2\xi_c \omega_c p + \omega_c^2)} \quad (II.22)$$

$$\text{Avec: } \omega = \sqrt{\frac{K_l}{L_f \tau}} \quad , \quad \xi_c = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{L_f}{K_P \tau}}$$

La détermination des coefficients du correcteur se fait par l'identification de la fonction de transfert en boucle fermée à un système de second ordre. Une valeur de ξ_c (le coefficient d'amortissement) égale à 0.7 réalise un bon compromis entre les performances dynamiques et statiques. Quant à la fréquence de coupure $\omega_c/2\pi$, elle doit être choisie en respectant le critère lié à la rapidité du système en boucle fermée et le critère de filtrage.

La rapidité de la boucle dépend donc de la valeur de la fréquence de coupure du régulateur [8]. D'où, on calcule les paramètres du régulateur PI:

$$K_i = \omega^2 \cdot L_f \cdot \tau = 22.20 \quad (\text{II.23})$$

$$K_p = \frac{1}{(2\xi)^2} = 0.51 \quad (\text{II.24})$$

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

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

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

II.7. Régulation de la tension du bus continu

Le filtre actif parallèle est alimenté par un condensateur qui joue le rôle d'une source de tension continue. Cette tension doit être maintenue constante, afin de ne pas dégrader les performances de filtrage, et pour ne pas dépasser la limite en tension des semi-conducteurs.

La cause principale de la variation de cette tension, est la variation de la charge polluante, qui crée un échange de puissance active avec le réseau. La régulation de cette tension est nécessaire, afin de garder sa valeur constante, et pour limiter les fluctuations de cette tension. [19].

Pour la régulation, on utilise un régulateur proportionnel intégral (PI).

✓ Régulateur Proportionnel Intégral basé sur la puissance fluctuante

En régime permanent les courants de référence ne contiennent pas de composante fondamentale et la puissance nécessaire pour compenser les pertes est faible. Dans ce cas, un simple gain est suffisant et pour filtrer les fluctuations à 300Hz, nous proposons d'ajouter un filtre passe-bas du premier ordre en sortie du régulateur. Dans notre travail, nous avons choisi le régulateur ci-dessous pour réguler la tension du condensateur V_{dc} à sa valeur de consigne V_{dc}^* :

$$K(s) = \frac{K_r}{1 + \tau_c s} \quad (\text{II.25})$$

Avec K_r gain du régulateur et τ_c constant de temps

La relation entre la puissance active absorbée par le condensateur et la tension aux bornes de celui-ci s'écrit :

$$P_c = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} C V_{dc}^2 \right) \quad (\text{II.26})$$

Soit après la transformation de Laplace:

$$P_c = \frac{1}{2} C s V_{dc}^2(s) \quad P_c = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} C V_{dc}^2 \right) \quad (\text{II.27})$$

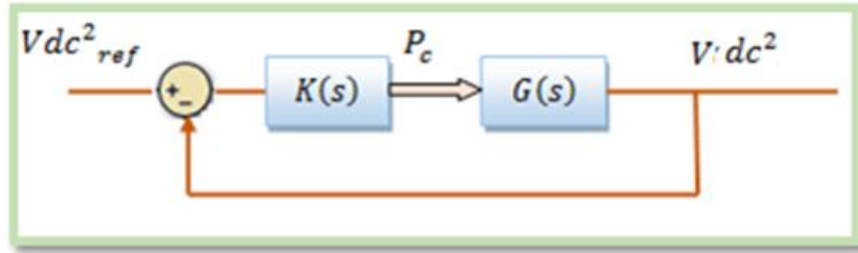


Figure II.15: Régulation de la tension du bus continu par un régulateur PI

$$G(s) = \frac{2}{Cs} \quad (\text{II.28})$$

$$FTBF(s) = \frac{K(s).G(s)}{1+K(s).G(s)} \quad (\text{II.29})$$

Après calcul, la fonction de transfert en boucle fermée est de la forme :

$$FTBF(s) = \frac{\omega^2}{s^2 + 2\xi\omega s + \omega^2} \quad (\text{II.30})$$

$$\omega = \sqrt{\frac{2K_r}{C\tau_c}} \text{ et } \xi_c = \frac{1}{2\sqrt{2}} \sqrt{\frac{C}{K_r\tau_c}} \quad (\text{II.31})$$

✓ Régulateur basé sur le courant fluctuant

Dans ce cas la régulation de la tension moyenne du bus continu est continu est basé sur les courants fluctuant, alors la sortie du régulateur donne un courant de référence (ce n'est pas le cas de la méthode précédente ou le régulateur donne une puissance fluctuante de référence) qui est à la suite multiplié par les tensions directes du réseau et ensuite nous ajoutons ces courants harmoniques déterminés par le filtre passif.

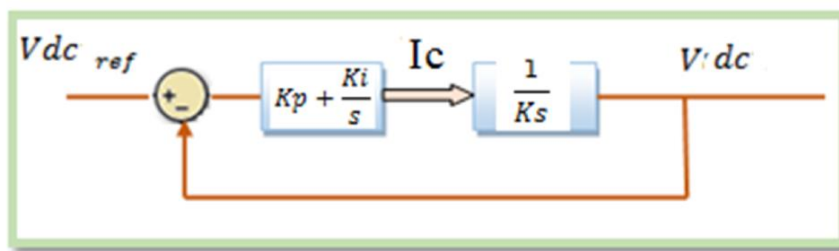


Figure II.16: Régulation de la tension du bus continu par PI pour une commande en courant

$$FTBF(s) = \frac{Kp(s)+k_i}{KS^2+KpS+K_i} = \frac{\frac{Kp}{K}(S+\frac{K_i}{Kp})}{S^2+\frac{Kp}{K}S+\frac{K_i}{K}} \quad (II.32)$$

Sachant que $K = \frac{\sqrt{2}CV_{dc}^*}{3V_s}$

Cette fonction de transfert représente un système de deuxième ordre. Donc, en égalisant les deux équations caractéristiques :

$$S^2 + 2\xi\omega s + \omega^2 = S^2 + \frac{Kp}{K}S + \frac{K_i}{K} \quad (II.33)$$

$$\begin{cases} Ki = K\omega^2 \\ Kp = 2\xi\omega K \end{cases}$$

Un bon choix de ζ et ω nous permet d'obtenir des bons résultats.

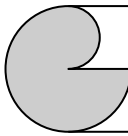
II.8 Conclusion.

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



Chapitre III

Simulation du Filtre Actif Parallèle



III.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, la modélisation des éléments du réseau électrique perturbé ainsi que ceux du filtre actif parallèle ont été bien détaillés. Cette modélisation avait comme objectif, comprendre le mode de fonctionnement de ce type de réseau et de son filtrage, et par la suite être capable de faire des simulations sur Simulink. Simulink est un outil puissant de MATLAB permettant de modéliser, simuler et analyser les systèmes électriques réels.

Dans ce chapitre on étudie le schéma de l'association filtre actif-réseau-charge polluante, qui seront implantés sur Simulink. Différentes simulations basées sur la commande MLI à échantillonnage naturel et sur la commande par hystérésis seront présentées. Les méthodes d'identification adoptées sont la méthode de puissances instantanées et la méthode du référentiel synchrone. Différents types de charges vont être examinés. Enfin les résultats des simulations seront discutés.

III.2 Description globale de la simulation

Les programmes de simulation développés, permettent de visualiser sur un intervalle de temps donné l'évolution des courants dans les différentes branches du circuit de la figure III.1. Ils simulent également la commande du filtre actif selon les différentes méthodes d'identification et de commande utilisées.

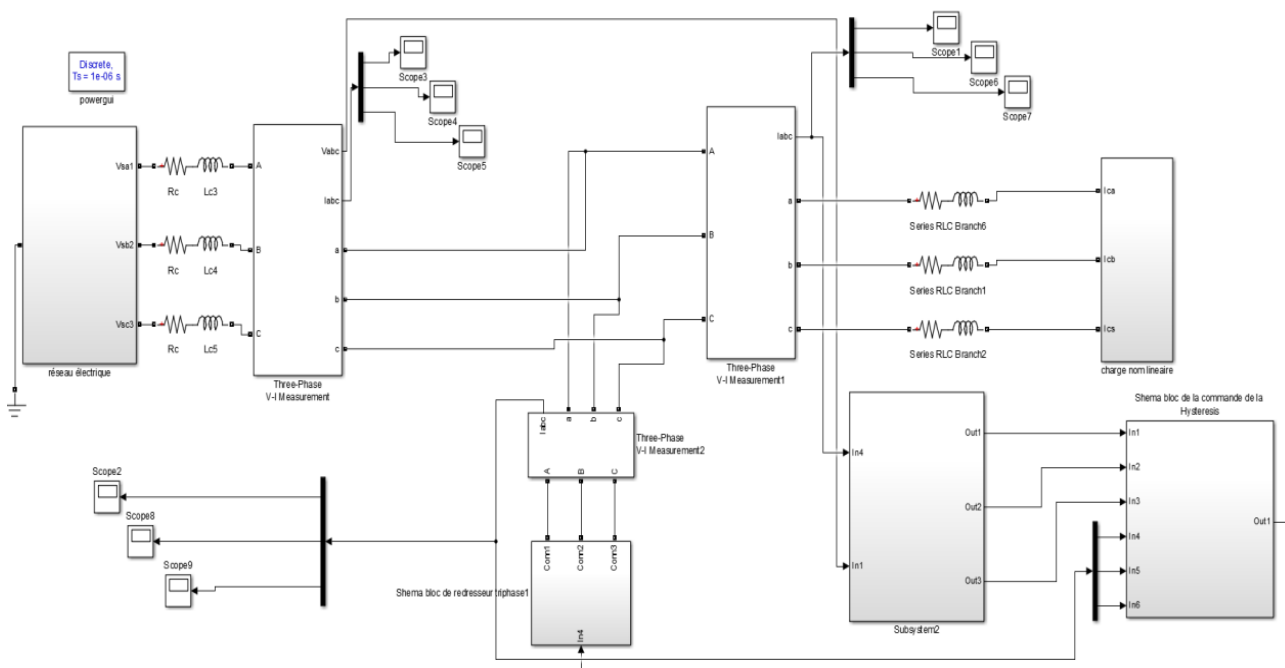


Figure III.1: Schéma synoptique de l'association filtre actif-réseau-charge polluante

Ce schéma bloc se compose des éléments suivants :

- D'un réseau électrique triphasé représenté par les grandeurs e_s , R_s , L_s (Voir la figure III. 2).

- D'un pont redresseur à diodes (pont triphasé) alimentant une charge (R_d, L_d ou R_d, C_d) pour la représentation d'une charge non linéaire qui génère des courants harmoniques, (voir la figure III.3).
- D'un transformateur de réglage (R_c, L_c) connecté à l'entrée de la charge non linéaire, (voir la figure III.3).
- D'un bloc d'identification des courants harmoniques (voir la figure III.1).
- D'un filtre actif parallèle, lequel est composé d'un onduleur de tension de trois bras à interrupteurs réversibles en courant et bi-commandés (IGBT/Diode), d'une source de tension continue V_{dc} et d'un filtre de sortie représenté par (R_f, L_f), (voir la figure III.4).
- D'une commande de l'onduleur de tension avec hystérésis ou MLI (voir la figure III.5 et III.6).

Les schémas de simulations sont représentés dans les figures suivantes :

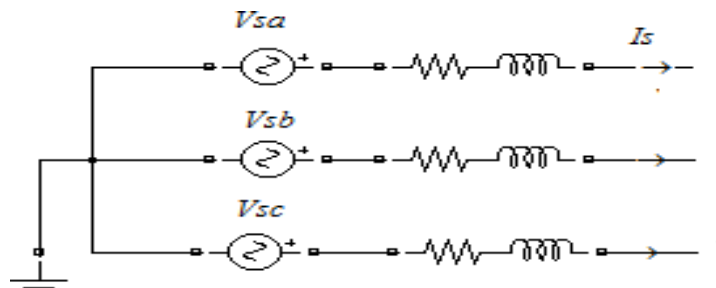


Figure III.2: Schéma bloc de réseau électrique triphasé.

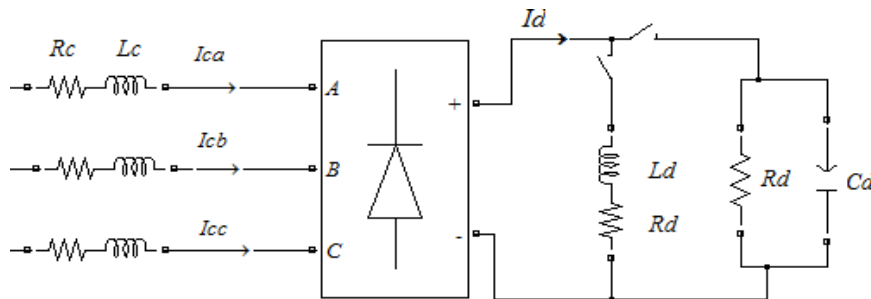


Figure III.3: Schéma bloc de redresseur triphasé.

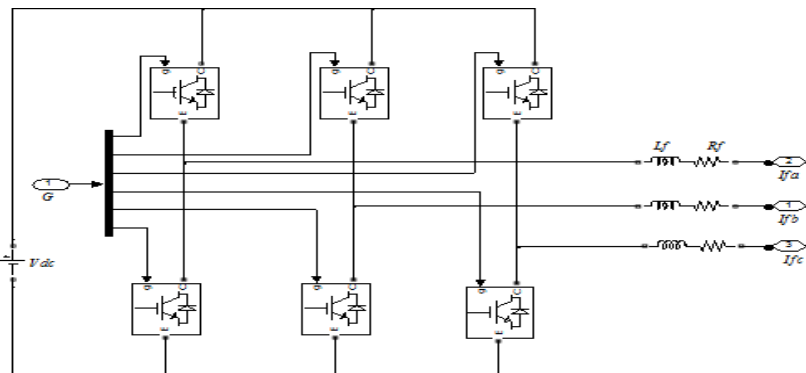


Figure III.4: Schéma bloc de l'onduleur de tension à deux niveaux.

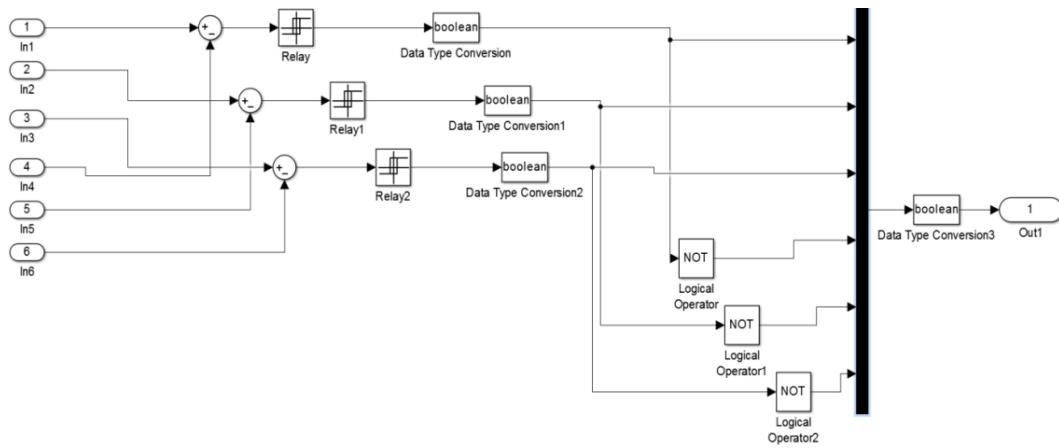


Figure III.5: Schéma bloc de la commande Hystérésis.

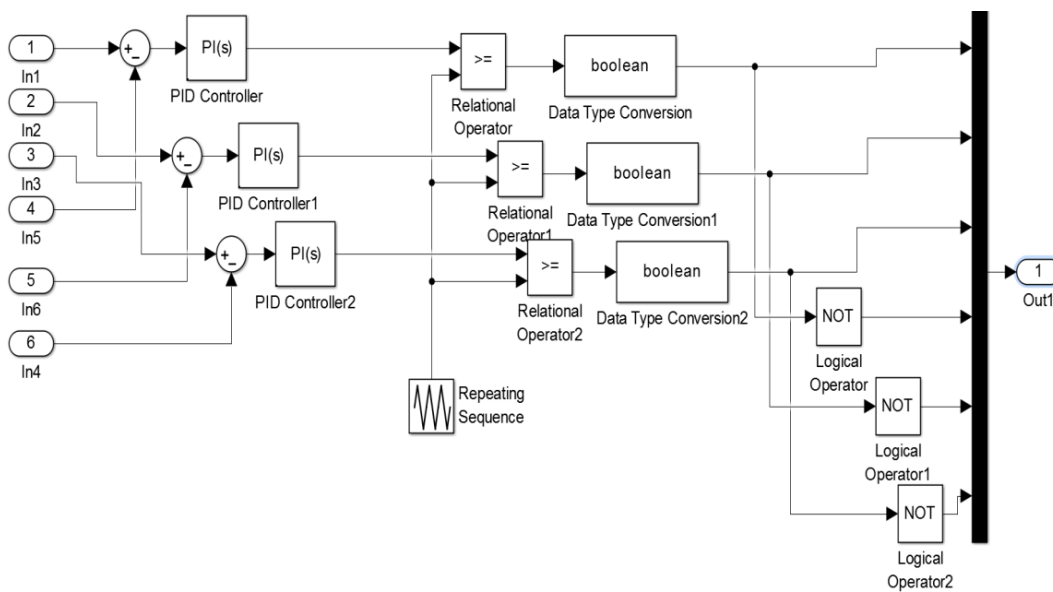


Figure III.6: Schéma bloc de la commande MLI.

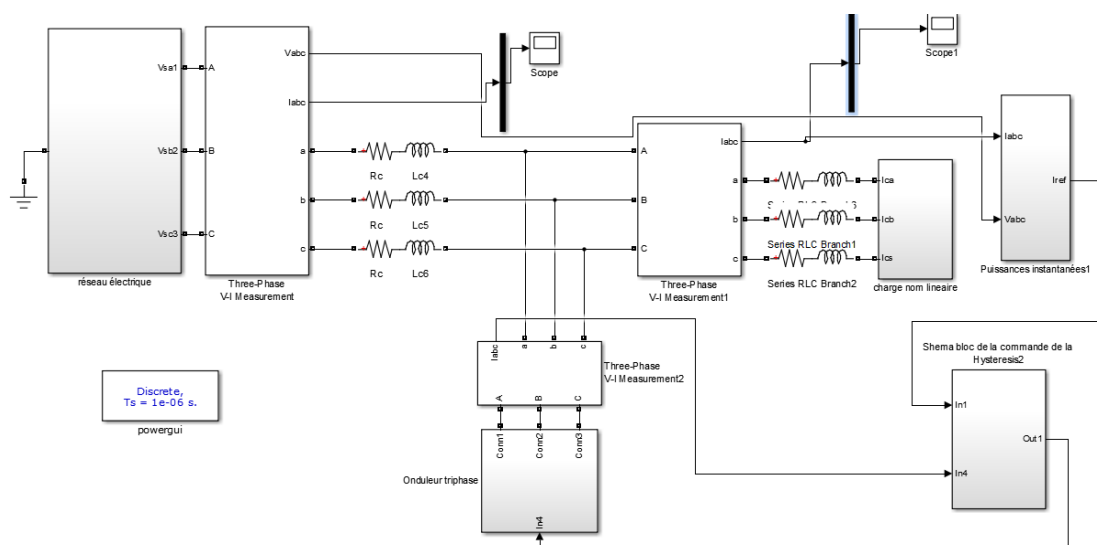


Figure III.7: Schéma bloc de la méthode des puissances instantanées.

III.3 Résultats des simulations

III.3.1 Méthode du référentiel lié au synchronisme

III.3.1.a Commande par hystérésis

III.3.1.a.1 Charge RL

Les figures ci-dessous montrent les résultats obtenus avec la commande Hystérésis dans le cas où le pont à diodes alimente une charge de type RL. Le courant de la charge I_c (phase une) est déformé ; il est plein d'harmoniques. Le courant I_f est le courant injecté par le filtre (toujours pour la phase une). Le courant de la source I_s est filtré, il est devenu presque sinusoïdale après le filtrage. Le THD avant filtrage est de 24.27 %, par contre après filtrage il devient 2.28 %.

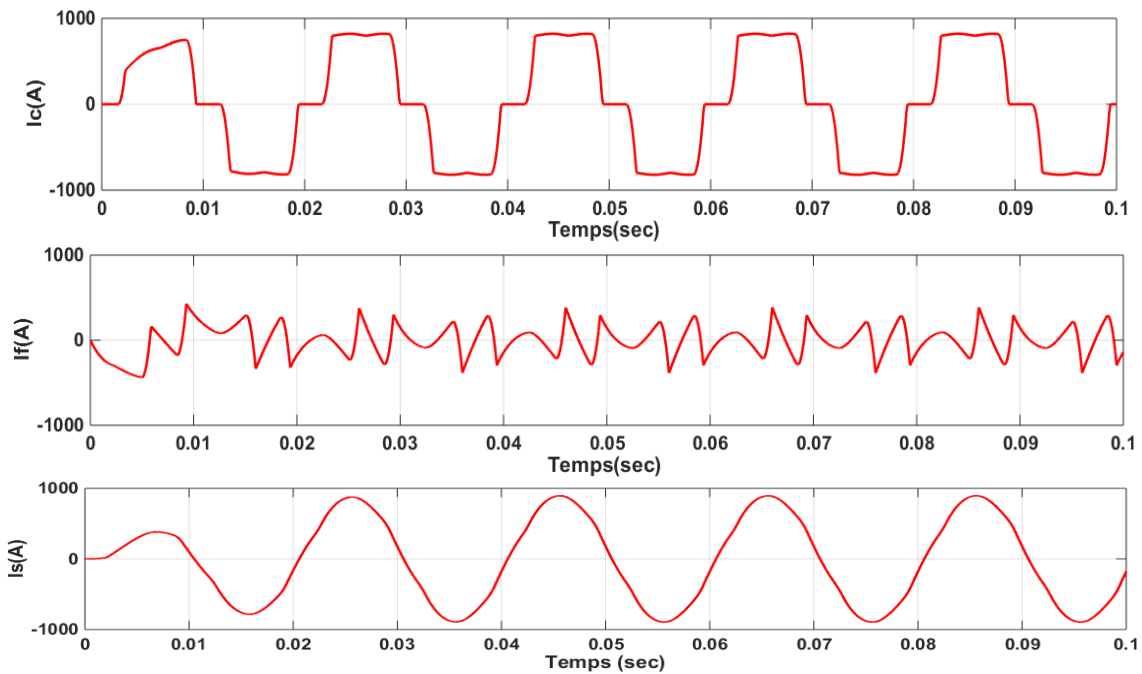


Figure III.8: I_{ch} : Courant de charge, I_f : Courant de filtre actif, I_s : Courant de source.

Fundamental (50Hz) = 893.3(A) , THD= 24.27%

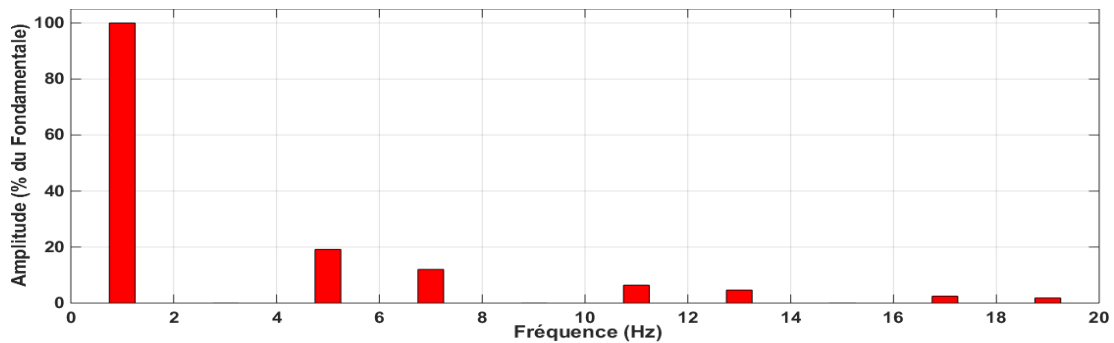


Figure III.9: Spectre du courant de la source avant filtre.

Fundamental (50Hz) = 894.2(A) ,THD= 2.28%

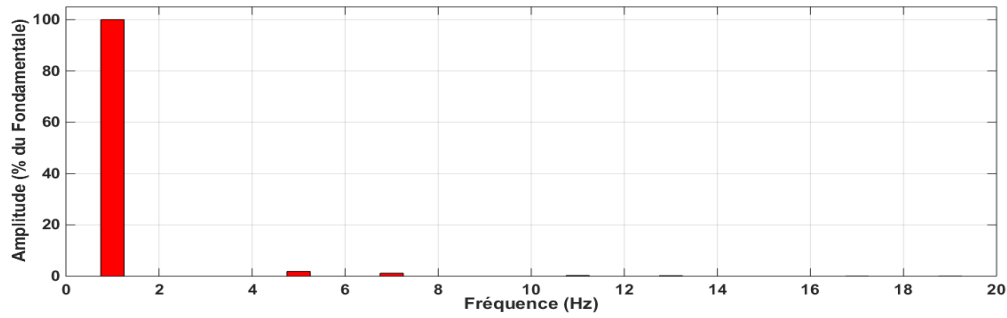


Figure III.10: Spectre du courant de la source après filtre.

III.3.1.a.2 Changement de la charge

A l'instant $t = 0.1$ s, la charge RL est remplacée par une charge RC. Les résultats des simulations sont montrés ci-dessous. Ces résultats permettent de visualiser l'effet du changement de la charge sur les performances du F.A.P. on voit que le filtrage se fait d'une manière permanente et les performances du filtre ne se dégradent pas.

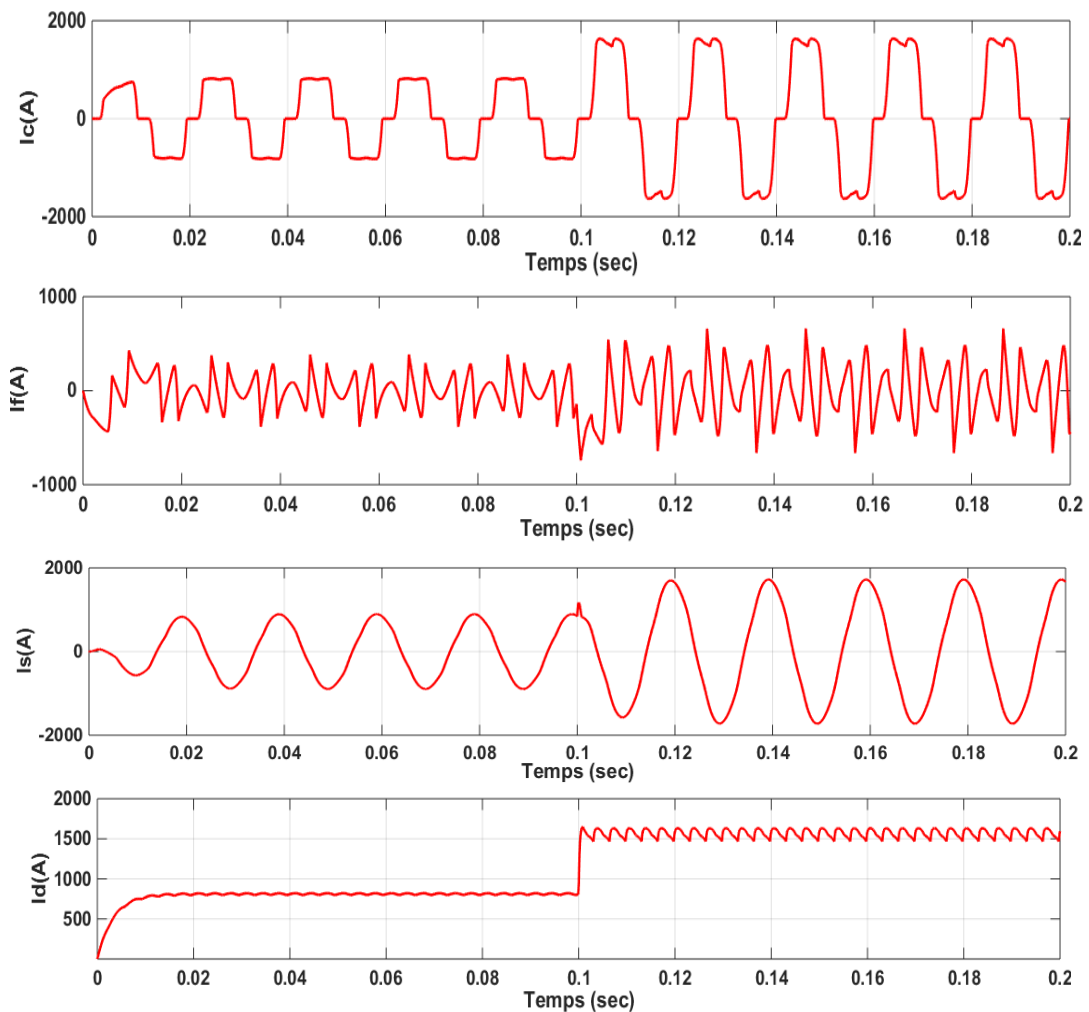


Figure III.11: I_{ch} : Courant de charge, I_f : Courant de filtre actif, I_s : Courant de source, I_d : Courant redressé.

III.3.1.b Commande MLI

III.3.1.b.1 Charge RL

Les figures ci-dessous montrent les résultats obtenus avec la commande MLI dans le cas où le pont à diodes alimente une charge de type RL. Le courant de la charge I_c (phase une) est déformé; il est plein d'harmoniques. Le courant I_f est le courant injecté par le filtre (toujours pour la phase une).

Le courant de la source I_s est filtré, il est devenu presque sinusoïdale après le filtrage. Le THD avant filtrage est de 24.27 %, par contre après filtrage il devient 2.94 %.

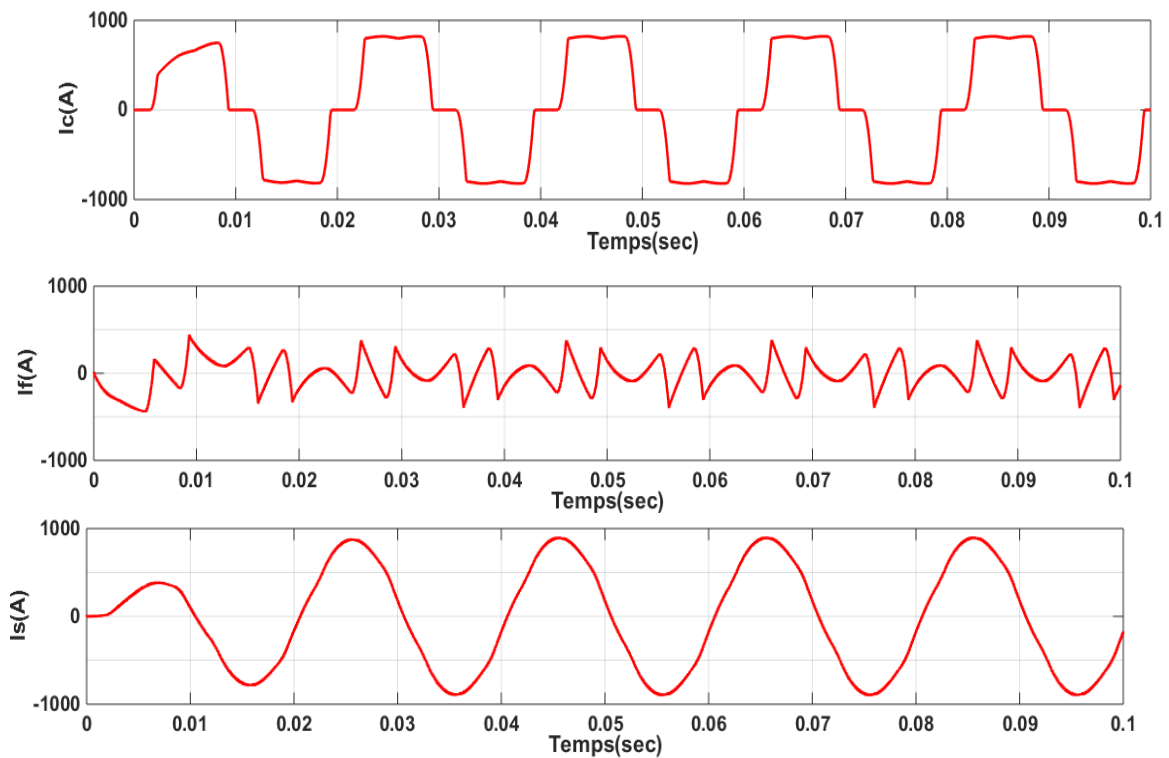


Figure III.12: I_{ch} : Courant de charge, I_f : Courant de filtre actif, I_s : Courant de source.

Fundamental (50Hz) = 893.4(A), **THD= 24.27%**

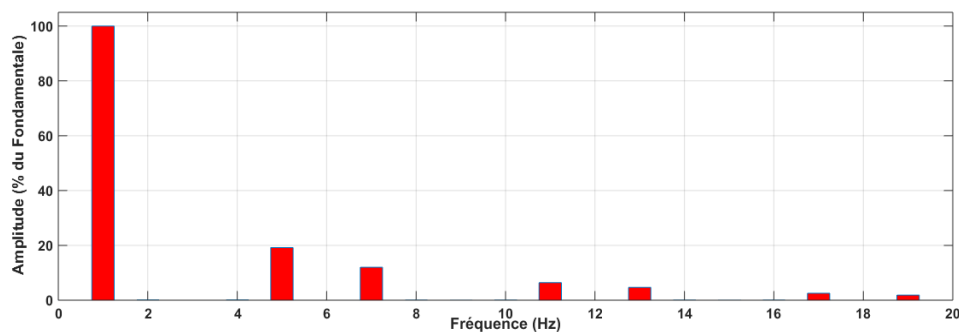


Figure III.13: Spectre du courant de la source avant filtre

Fundamental (50Hz) = 892.9(A) , **THD= 2.94%**

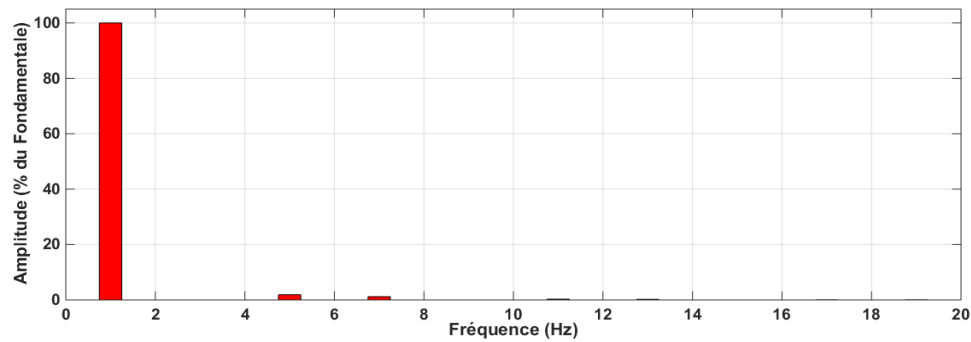
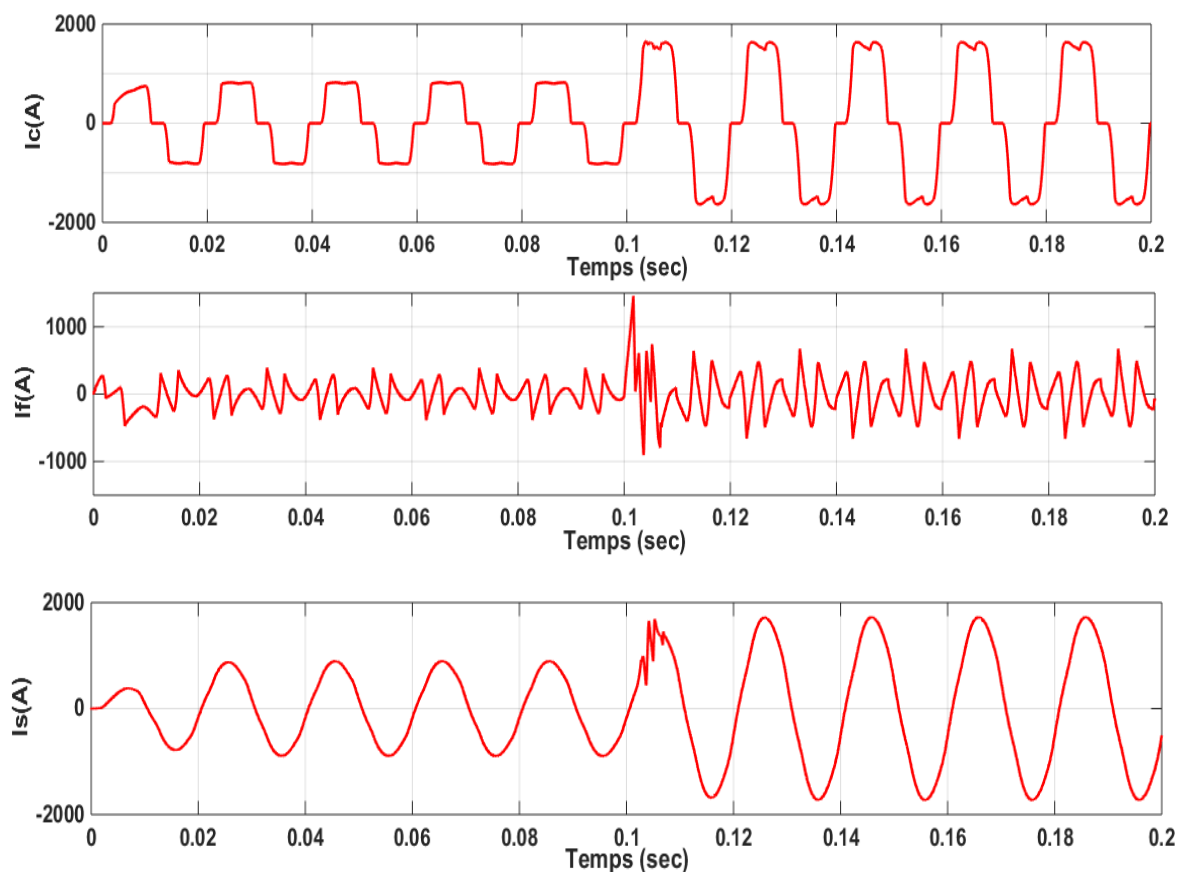


Figure III.14: Spectre du courant de la source après filtre

III.3.1.b.2 Changement de la charge

A l'instant $t = 0.1$ s, la charge RL est remplacée par une charge RC. Les résultats des simulations sont montrés ci-dessous. Ces résultats permettent de visualiser l'effet du changement de la charge sur les performances du F.A.P. On voit que le filtrage se fait d'une manière efficace et permanente et les performances du filtre ne se dégradent pas.



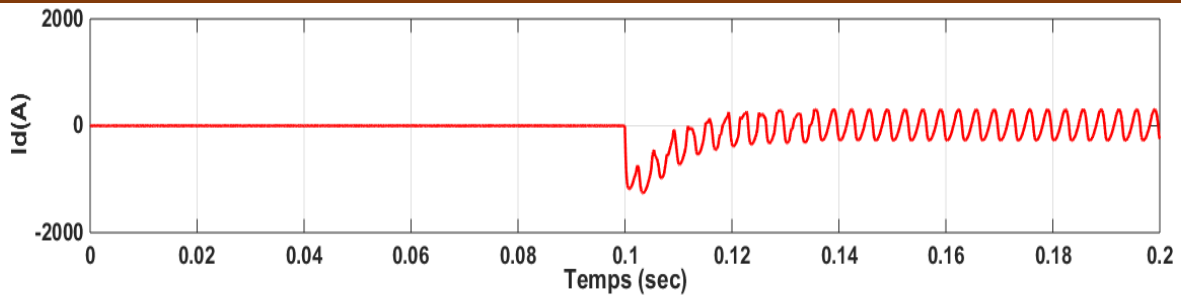


Figure III.15: I_{ch} : Courant de charge, I_f : Courant de filtre actif, I_s : Courant de source, I_d : Courant redressé.

III.3.2 Méthode des puissances instantanées

III.3.2.a Commande par hystérésis

III.3.2.a.1 Charge RL

Les figures ci-dessous montrent les résultats obtenus avec la commande Hystérésis dans le cas où le pont à diodes alimente une charge de type RL. Le courant de la charge I_c (phase une) est déformé ; il est plein d'harmoniques. Le courant de la source I_s est filtré, il est devenu presque sinusoïdale après le filtrage. Le THD avant filtrage est de 24.28 %, par contre après filtrage il devient 2.27 %.

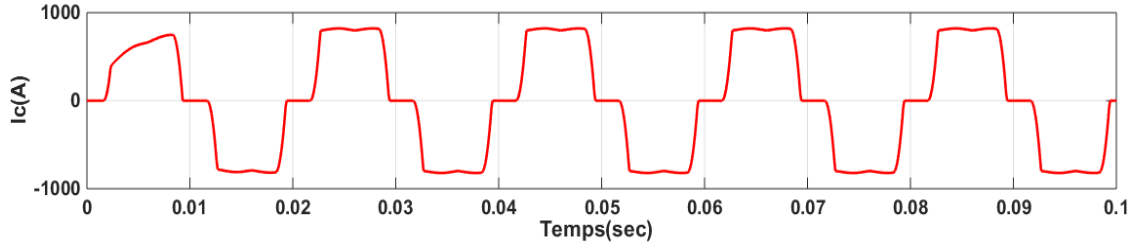


Figure III.16: I_c : Courant de charge avant filtre

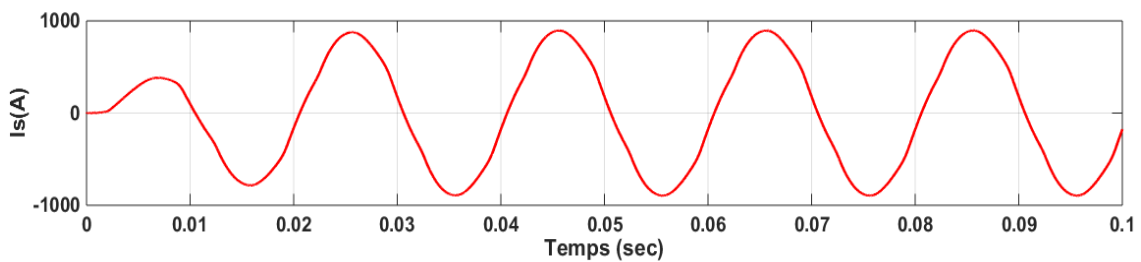


Figure III.17: I_s : Courant de source après filtre

Fundamental (50Hz) = 893.2, THD= 24.28%

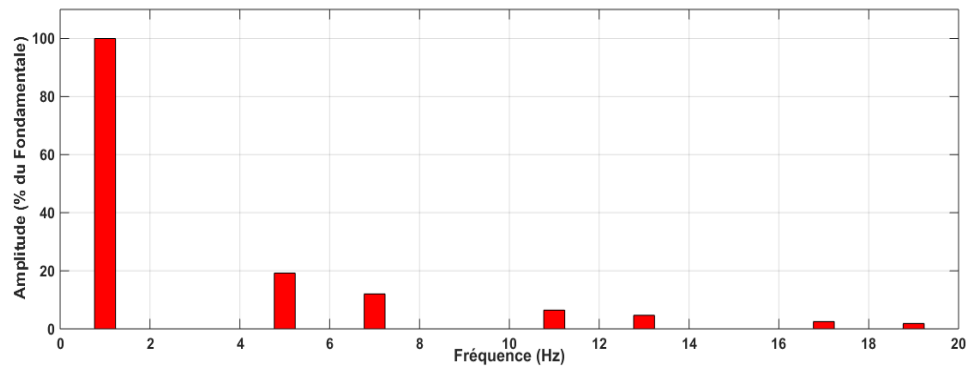


Figure III.18: Spectre du courant de la source avant filtre

Fundamental (50Hz) = 894.2 , THD= 2.27%

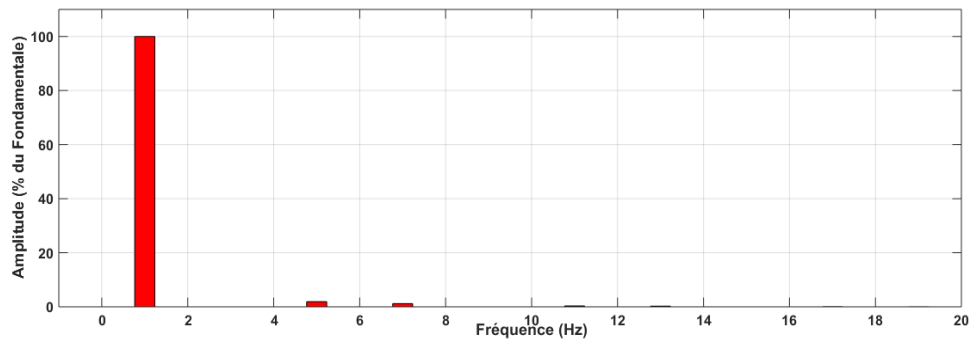
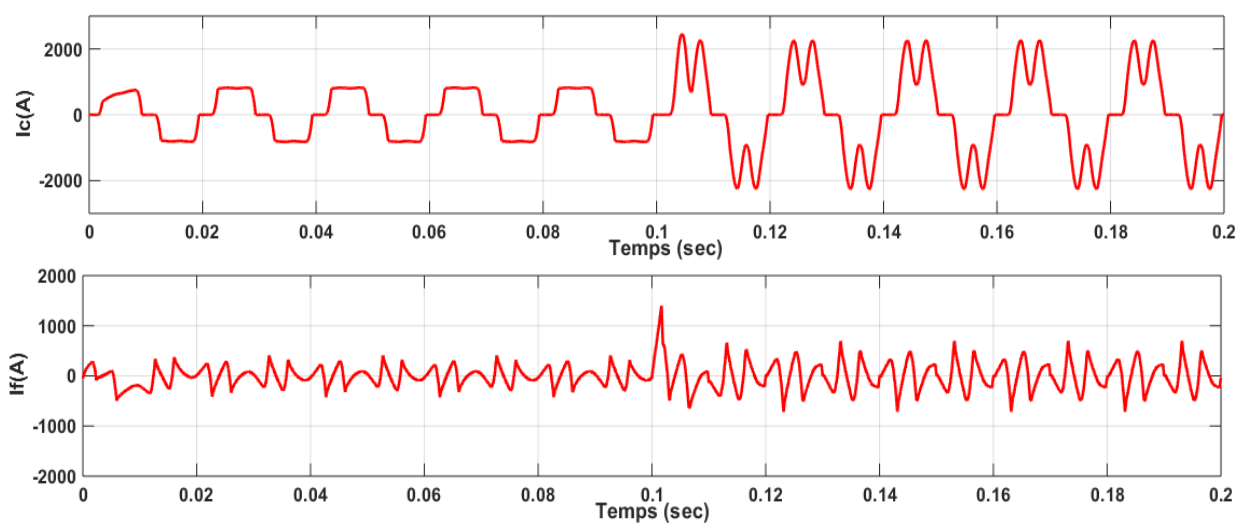


Figure III.19: Spectre du courant de la source après filtre.

III.3.2.a.2 Changement de la charge:



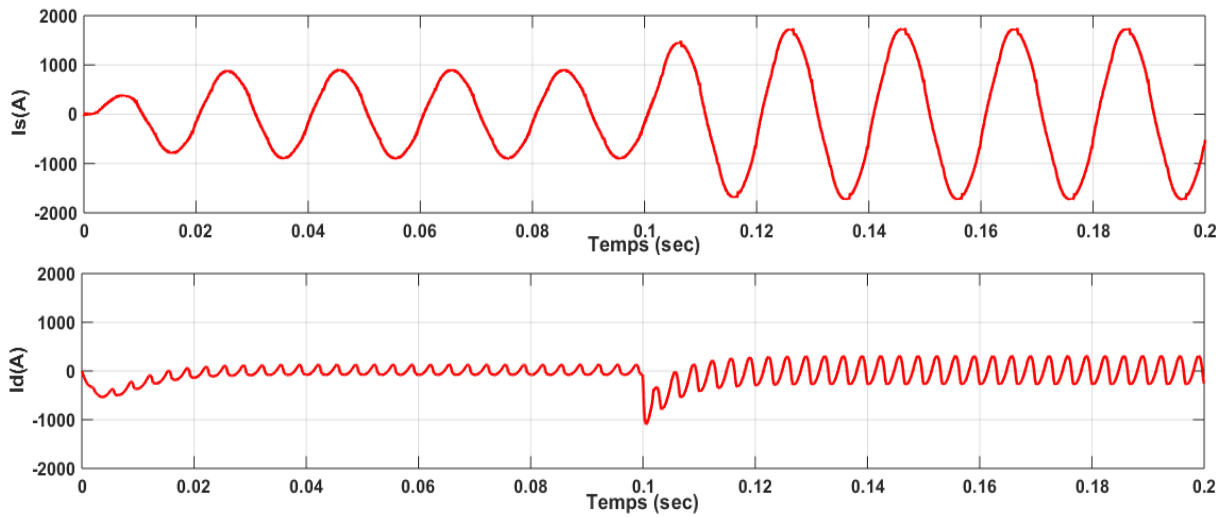


Figure III.20 : I_{ch} : Courant de charge, I_f : Courant de filtre actif, I_s : Courant de source, I_d : Courant redressé.

III.3.2.b Commande MLI

III.3.2.b.1 Charge RL

Les figures ci-dessous montrent les résultats obtenus avec la commande MLI dans le cas où le pont à diodes alimente une charge de type RL. Le courant de la charge I_c (phase une) est déformé ; il est plein d'harmoniques. Le courant de la source I_s est filtré, il est devenu presque sinusoïdale après le filtrage. Le THD avant filtrage est de 24.30 %, par contre après filtrage il devient 2.62 %.

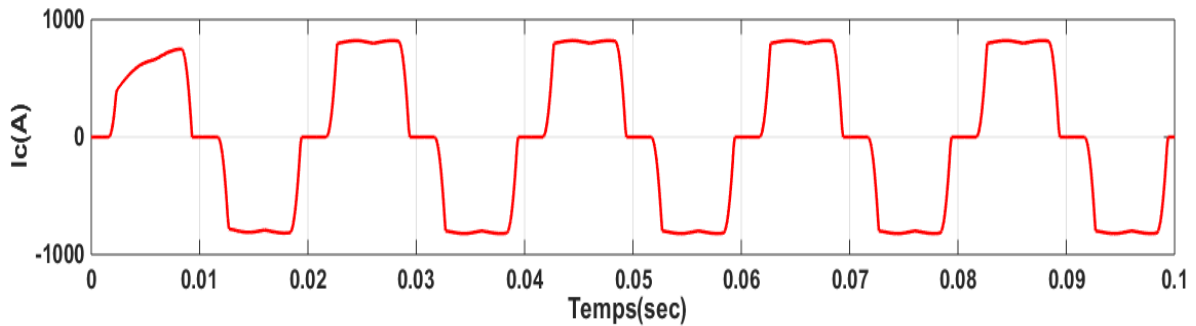


Figure III.21: I_c : Courant de charge avant filtre

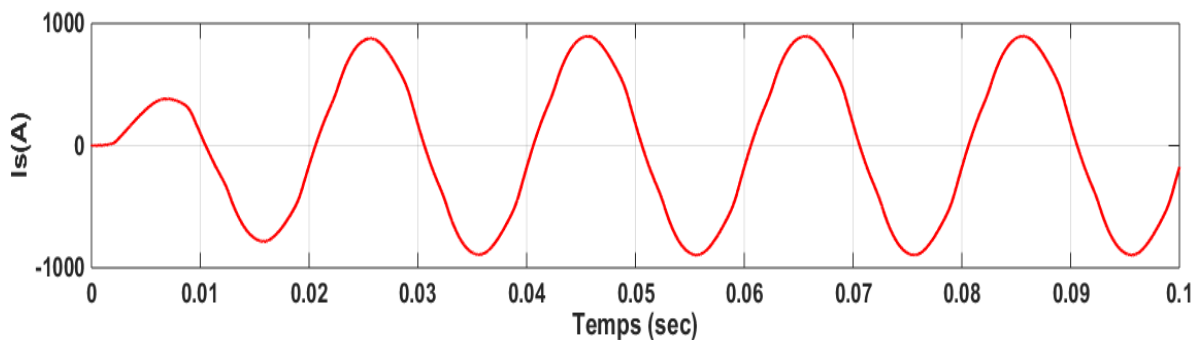


Figure III.22: I_s : Courant de source après filtre

Fundamental (50Hz) = 893.2 ,THD= 24.30%

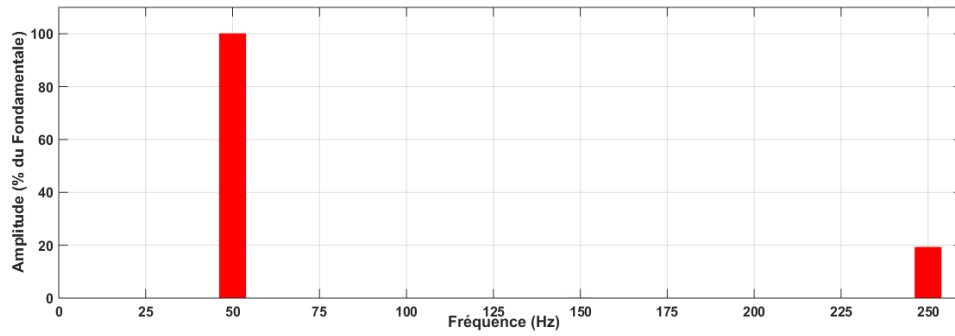


Figure III.23: Spectre du courant de la source avant filtre.

Fundamental (50Hz) = 969.8 ,THD= 2.62%

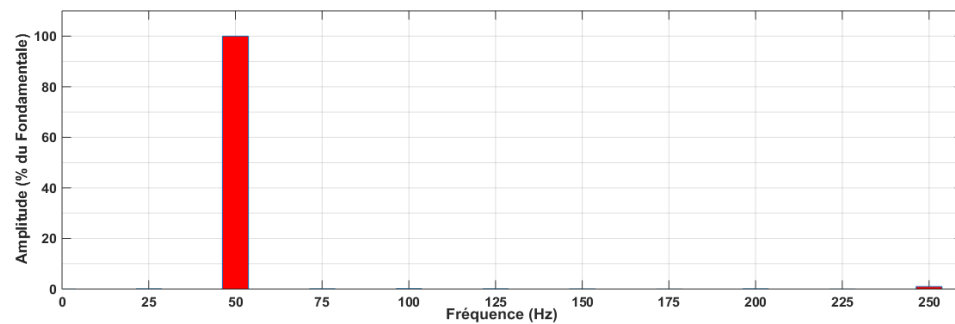
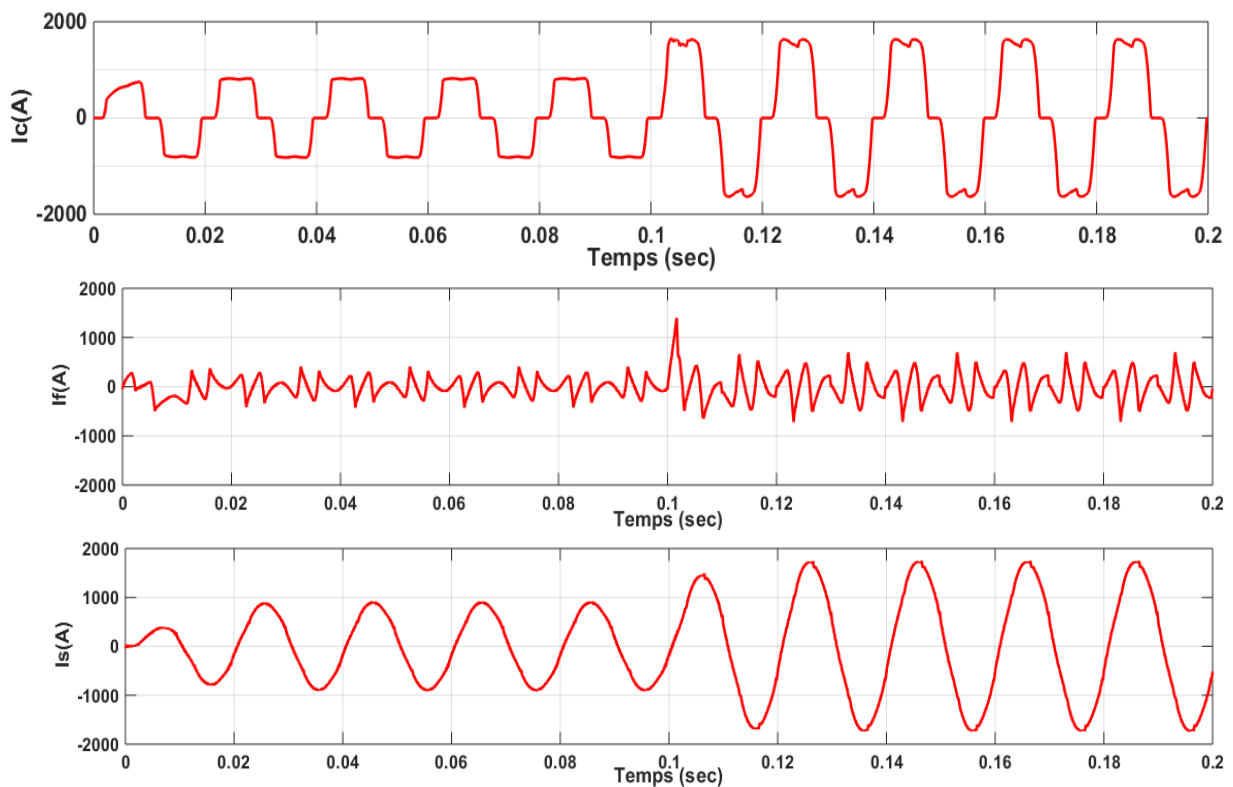


Figure III.24: Spectre du courant de la source avant filtre

III.3.2.b.2 Changement de la charge:



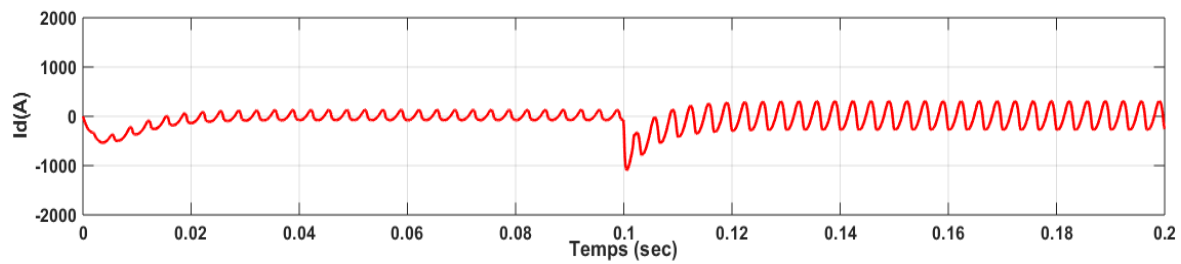


Figure III.25 : I_{ch} : Courant de charge, I_f : Courant de filtre actif, I_s : Courant de source, I_d : Courant redressé

III.4 Conclusion

Les résultats obtenus montrent l'efficacité et les bonnes performances du filtre actif parallèle traité dans ce travail. Le THD de la charge est de 24.28 %. Le filtre a réduit le THD à une valeur inférieure à 5 % correspondant aux recommandations et normes internationales. Le courant I_s est quasi sinusoïdal dans tous les cas des simulations.

Sur le tableau III.1 sont comparés les THDs du courant de la source après l'installation du filtre actif. Avec l'une ou l'autre commande, le filtre actif permet une réduction importante des harmoniques du courant. Toutefois, l'efficacité du filtre actif est meilleure avec la commande hystérésis et la méthode de puissances instantanées.

Identification Commande	Méthode de référentiel synchrone	Méthode des puissances instantanées
Hystérésis	2.28%	2.27%
MLI	2.9 %	2.62%

Tableau III.1 Les THD avec les différentes stratégies.

A decorative scroll frame with a light gray background and a black outline. The frame has rounded corners and a small gray circular element at the top left corner, resembling a scroll binding. The text is centered within the frame.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire consiste à l'étude et la simulation d'une solution de la dépollution des réseaux électriques. Ces pollutions sont principalement causées par des charges non linéaires à base de convertisseurs de puissances qui offrent de l'énergie sous plusieurs formes et sont de plus en plus utilisées dans l'industrie.

Le premier chapitre a été consacré à la problématique des perturbations ou distorsions harmoniques générées par les charges non linéaires connectées aux réseaux électriques. Les origines et les effets néfastes de ces perturbations ont été abordés et les normes en vigueur ont été présentées. Ces normes, notamment imposées aux distributeurs d'énergie, autorisent cependant la génération d'harmoniques dans certaines limites. Nous avons alors présenté, de manière générale, les solutions traditionnelles et modernes utilisées en filtrage d'après l'analyse des perturbations harmoniques et leurs effets sur le réseau électrique.

Dans le deuxième chapitre, on a présenté la topologie du filtre actif parallèle étudié ainsi que la méthode utilisée pour l'identification des courants références.

Dans le troisième chapitre, ces travaux ont été validés par simulation. L'ensemble des simulations a été effectué à l'aide des outils MATLAB/Simulink on s'est intéressé à la commande du filtre actif parallèle en comparant deux stratégies de commande, MLI et hystérésis.

Les résultats de simulation ont montré l'efficacité du filtre actif parallèle lors de la compensation des courants harmoniques et/ ou du réactif, comme le confirme le THD du courant de source qui passe de 24.28 % avant compensation à 2.94 % après compensation avec la commande MLI par rapport à la méthode du référentiel lié au synchronisme. Et utilisant la commande par hystérésis, on améliore encore plus le THD qui est réduit à 2.28 %, et à 2.62 % après compensation avec la commande MLI par rapport à la méthode des puissances instantanées. Et utilisant la commande par hystérésis, on améliore encore plus le THD qui est réduit à 2.27 %.

En fin, le filtre actif parallèle nous a donné des résultats satisfaisants par son adaptabilité au changement accompagnons le réseau pour le rendre plus stable avec un facteur de puissance unitaire.

comme perspectives pour les futures promotions on peut citer:

- La réalisation pratique du travail réalisé en simulation.
- l'association du filtre actif parallèle avec un filtre passif pour réduire le coût de l'installation.
- l'utilisation d'autres techniques de commande de l'intelligence artificielles dans la commande du filtre actif.

Annaxe

Annexe

Paramètres de simulation

1- Paramètres du réseau:

Le réseau est un système de tension triphasé parfaitement sinusoïdal, tel que: la tension simple : $V_m = V$ et la fréquence : $f_r = 50 \text{ Hz}$ donc :

$$V_{sa} = V_m \sin(\omega.t) \quad \text{Eq(III.1)}$$

$$V_{sb} = V_m \sin(\omega.t - 120) \quad \text{Eq(III.2)}$$

$$V_{sc} = V_m \sin(\omega.t - 240) \quad \text{Eq(III.3)}$$

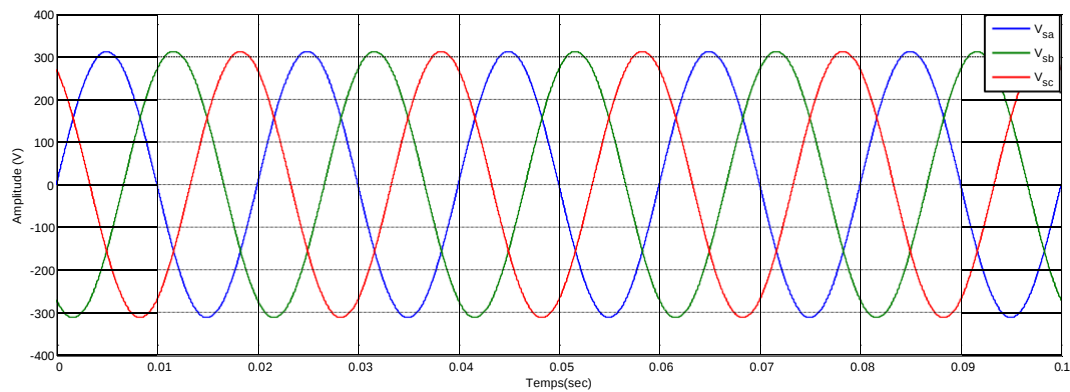


Figure AN.1 -Tension d'alimentation.

Inductance du réseau : $L_s = 15.10^{-6} \text{ H}$

Résistance du réseau : $R_s = 0.5.10^{-3} \Omega$

2- Paramètres de la charge polluante:

La charge polluante c'est un redresseur triphasé non commandé qui alimente une charge résistive inductif (R_d, L_d) ou résistive capacitive (R_d, C_d). Cette charges a les paramètres suivants:

$$(R_d, L_d) = 0.6 \Omega, 2.10^{-3} \text{ H}$$

$$(R_d, C_d) = 0.6 \Omega, 3.3.10^{-3} \text{ F}$$

Pour l'amélioration de la qualité de courant de la charge et variation de la tension du entrée la redresseur, une résistance et inductance est connectée à l'entrée du redresseur à diodes ($L_c=50\mu H$ et $R_c=1.2m\Omega$).

3- Paramètres du filtre actif:

Le filtre actif est l'ensemble, onduleur de tension à deux niveaux avec source continue (V_{dc}), filtre de sortie (L_f, R_f), avec:

$$V_{dc} = 740 \text{ V}$$

$$(L_f, R_f) = (150.10^{-6} H, 5.10^{-3} \Omega)$$

4- Paramètres de la commande du filtre actif:

Commande Hystérésis:

Caractérisent ce commande la bande d'hystérésis (h), elle est choisie de façon à ne pas dépasser la fréquence de commutation admissible des semi-conducteurs contrôlés et à minimiser suffisamment les harmoniques de courant.

$$h = \pm 5 \text{ A}$$

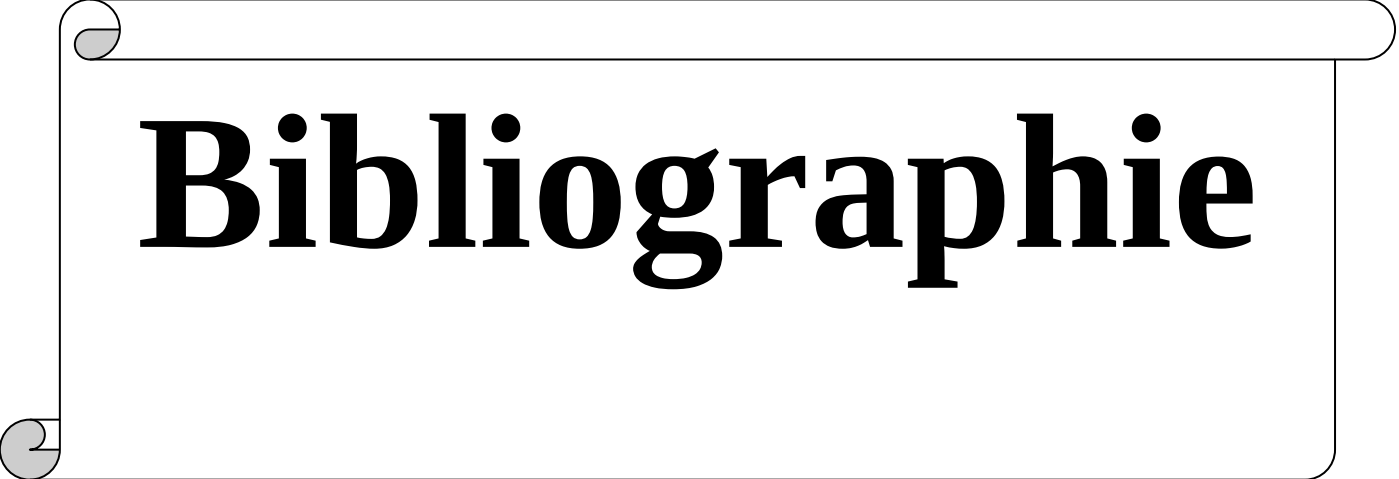
4.2- Commande MLI :

La technique MLI est basée sur la variation soit de l'indice de modulation « m », soit le coefficient de réglage de tension « r ».

$$m = 200 \quad \text{quel} \quad f_p = 10 \text{ KHZ}$$

et

$$r = 0.8 \quad \text{quel} \quad V_{pmax} = 420 \text{ V}$$



Bibliographie

Références bibliographiques

- [1]AbdelfettahBOUSSAID«Filtrage actif des harmoniques dans les réseaux électriques. Contribution à l'amélioration de l'énergie électrique»,THESE DOCTORAT, UNIVERSITÉ DES FRÈRES MENTOURI – CONSTANTINE,2017.
- [2]EBAIBIA Samira & DAKHLI Loubna«Modélisation et Simulation d'un Filtre Actif Parallèle à sept Niveaux à Commande MLI,»mémoire de Master, UNIVERSITE LARBI TEBESSI – TEBESSA,2016 .
- [3]YETTOU miloud& DEBLA nacer Eddine«Commande d'un Filtre Actif Parallèle À trois niveaux (NPC) Par différentes stratégies de commande », mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf - M'sila, 2018.
- [4]BOKAHIL Fatima Zohra«Plate forme expérimentale d'un filtre actif parallèle », mémoire de Master, UNIVERSITE LARBI BEN M'HIDI DE OUM EL BOUAGHI ,2016
- [5]BELHAMIDI Meriem& BENAHMED Hakima«Comparaison entre deux stratégies de commande d'un filtre actif parallèle», mémoire de Master, Université Dr Tahar Moulay de saïda, 2016.
- [6]Salem Hafsia«Commande d'un Filtre actif parallèle à quatre bras par des techniques avancées», mémoire de Master, Université Mohamed Khider – Biskra, 2015.
- [7]A. Chandra, B. Zingh, B.N. Zingh, K. Al-Haddad, « An improved control algorithm ofshunt active filter for voltage regulation, harmonic elimination, power factor correctionand balancing of nonlinear loads », IEEE Trans. on power electronics, May 2000.
- [8]R. Tounsi, « Développement d'un contrôle commande pour un compensateur série de creux de tension. Validation par simulation du fonctionnement avec des chargesindustrielles » Thèse de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, 30 Octobre 1999
- [9]M. Muljadi, R. Shiferl, T. A. Lipo, « Induction machine phase balancing byunsymmetricalthyristor voltage control », IEEE Trans. on Industry applications, , May/June 1985
- [10]L. Moràn, P. D. Ziogas, G. Joos, « Three-phase solid-state voltage compensator system,«Can. J. Elect. Comp. Eng., 1990.
- [11]A. Campos, G. Joos, P. Ziogas, J. Lindsay, « Analysis and design of a series voltageunbalance compensator based on a three-phase VSI operating with unbalanced switchingfunction », IEEE Trans. on power electronics, May 1994.
- [12]H. Fujita, H. Akagi, « The unified power quality conditioner: the integration of seriesand shunt-active filters », IEEE Trans. on Power Electronics ,March 1998.

- [13]Miao-Xin Wang, « Filtrage actif de puissance : Etudes et réalisation d'un filtre actif à commande numérique temps réel » Thèse de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, 18 Décembre 1992.
- [14]Xu (J.), « Filtrage actif parallèle des harmoniques des réseaux de distribution d'électricité », INPL, Thèse de doctorat, 1994.
- [15]Seguier (G.) et Labrique (F.), La conversion continu alternatif, Tec & doc Lavoisier, 1989, Les convertisseurs de l'électronique de puissance, volume 4.
- [16]Mohamad AlaaEddin Alali, « Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension », Thèse de Doctorat de l'Université de Louis Pasteur, Strasbourg, 12 Septembre 2002
- [17]T. Nakajima, E. Masada, « An active power filter with monitoring of harmonics spectrum », EPE-89, 3rd European conference on power electronics and applications, Aachen, Germany, 1989
- [18]S. Guffon, « Modélisation et commandes à structure variable de filtres actifs de puissance » Thèse de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, 24 Juillet 2000. 28 - H. Akagi, Y. Kanazawa and A. Nabae, « Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuits », Proceeding 1983 International power electronics conference. Tokyo, Japan, 1983.
- [19]M.A.E. Alali, S. Saadate, Y.A. Chapuis, F. Braun, « Energetic study of a shunt active conditioner compensating current harmonics, power factor and unbalanced », EPE-PEMC, 2000 Kosc, Slovak Republic, September 2000.
- [20]L. Zellouma, « Filtrage actif parallèle des harmoniques du courant générés par un pont redresseur triphasé non commandé », Mémoire de Magister, Université d'Annaba 2006.
- [21]L. Zellouma, A. Omeiri et S. Saad, « Shunt active power filter for current harmonic suppression using hysteresis control », 2007.
- [22]L. Merabet, S. Saad et A. Omeiri, « Compensation des courants harmoniques par filtre actif parallèle », Revue synthèse N°14 Juin 2005.
- [23]Tokuo Ohnishi, Kenichiro Ueki et Masahide Hojo, « Source current detection control of active filter for preventing current oscillation », 35th Annual IEEE Power electronics Specialists Conference, Aachen, Germany, 2004
- [24]Kawamura, A., Hanyoshi, T., and Hoft, R. G. « deadbeat current PWM inverter with parameter estimation using only voltage sensor » IEEE Press, 1986.
- [25]L. Rahmani, F. Krim, A. Bouafia. « Deadbeat Control for PWM AC Chopper », Taylor & Francis, 2004.
- [26]L. Rahmani, F. Krim, M.S. Khanniche, A. Bouafia. « Control for PWM AC Chopper feeding nonlinear loads », Taylor & Francis, March 2004.

- [27]Belhouchet and L.Rahmani. «Development of Adaptative Hysteresis-band CurrentControl of PWM Three-Phase AC Chopper with Constant Switching Frequency» Taylor&Francis, Electric Power Components and systems, 2009.
- [28]N. Belhouchet, L.Rahmani and S. Begag.«A novel adaptative HBCC technique forthree-phase shunt APF» Elsevier, Electric Power Systems Research.2009
- [29]C. A. Claro, J. Kaffka, A. Campos «Analysis and design of a shunt active power Filteremploying a dead beat control technique» Industrial Electronics Society, The 25thAnnual Conference of the IEEE, Dec. 1999.