

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Electrique  
Filière : Electrotechnique  
Option : Réseaux électrique

Réf:.....

**Mémoire de Fin d'Etudes  
En vue de l'obtention du diplôme:**

**MASTER**

***Thème***

***Etude et simulation d'un filtre  
hybride***

Présenté par :

**Mokeddem belkacem**

Soutenu le : 04 Juin 2017

Devant le jury composé de :

**Dr. Menacer Arezki**

**Dr. Rabhi Boualaga**

**Dr .Hadri Amel**

**Prof**

**M.C.A**

**M.C.A**

**Président**

**Encadreur**

**Examineur**

**Année universitaire: 2016 / 2017**

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Electrique  
Filière : Electrotechnique  
Option : Réseaux électrique

Mémoire de Fin d'Etudes  
En vue de l'obtention du diplôme:

**MASTER**

*Thème*

**Etude et simulation d'un filtre hybride**

Présenté par :

*-Mr. Mokeddem belkacem*

Avis favorable de l'encadreur :

*Dr. Rabhi Boualaga*

*signature*

**Avis favorable du Président du Jury**

*Prof. Menacer Arezki*

*Signature*

**Cachet et signature**



Université Mohamed Khider Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Electrique  
Filière : Electrotechnique  
Option : Réseaux électrique

## *Thème :*

# Etude et simulation d'un filtre hybride

Proposé par : Mokeddem belkacem

Dirigé par : Dr. Rabhi Boualaga

## RESUMES (Français et Arabe)

Ce mémoire est basé sur l'étude et simulation d'un filtre hybride pour dépollution des réseaux électrique. La simulation a été réalisé par la biais du MATLAB/Simulink/SimPowerSystem. Le filtre hybride simulé est constitué d'un filtre actif triphasé à structure tension connecté en série avec un filtre passif triphasé de type RLC, accordé sur l'harmonique 7, Le filtre actif joue un rôle essentiel en réduisant les harmoniques de courant de source. Dans ce cas, le filtre passif se comporte comme une faible impédance à la fréquence d'accord. Les résultats de simulation nous montré que le filtre passif prend en charge la compensation d'un partie des harmoniques et le filtre actif maintient les performances de filtrage, et le taux distorsion obtenu après la connexion du filtre hybride est  $THD=3.37\%$ .

### ملخص

هذه المذكرة تتركز على دراسة ومحاكاة مرشح هجين لتصفية شبكات الكهرباء. تم إجراء محاكاة باستخدام MATLAB / SIMULINK / SimPowerSystem. ويضم المرشح الهجين مرشح ثلاثي الطور فعال متصلة مع ثلاث مرشحات خامدة من نوع RLC و المرشح الخامد تم ضبطه على المتوافقة 7، و المرشح الفعال يلعب دورا رئيسيا في الحد من توافقيات المنبع. في هذه الحالة المرشح الخامد يعتبر مقاوم منخفضة في تردد. وأظهرت نتائج المحاكاة لنا أن المرشح الخامد يدعم تعويض جزء من التوافقيات و المرشح الفعال يحافظ أداء التصفية. ومعدل التشويه بعد التصفية بالمرشح الهجين هو  $THD = 3.37\%$ .

## REMERCEMENT

*Je remercie en premier lieu Dieu qui m'a donné ce bien là et pour que je vie ce jour et la force et la patience pour terminer ce travail.*

*Je tiens à exprimer mes remerciements à mon encadreur '**D'. Rabhi Boualaga** qui a proposé et a dirigé ce travail*

*Je remercie monsieur le président de jury, ainsi que les membres de jury d'avoir accepté de juger ce travail.*

*Je tiens à remercier les responsables et tout le personnel du département de Génie Electrique de Biskra pour les facilités qu'ils m'ont accordés pour terminer ce travail.*

*Le travail de mémoire que j'ai effectué doit beaucoup à certaines personnes que je tiens à les remercier sincèrement.*

*Nous remercions vivement nos familles **MOKEDDEM** pour leur aide matérielle et morale durant toute la période de préparation.*

*Enfin, je remercie tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à ma formation et à l'élaboration de ce modeste mémoire.*



## **Lists des Figures**

Figure I-1	Creux et cou pur es de tension	3
Figure I-2	particulier déséquilibre du système triphasé de tension	4
Figure I-3	Fluctuations de Tension	4
Figure I-4	Variation de fréquence	5
Figure I-5	Les harmonique	5
Figure I-6	Représentation spectrale d'un signal périodique	6
Figure I-7	Charge linéaires	8
Figure II-1	Filtre résonant	15
Figure II- 2	Filtre passif amorti	15
Figure II-3	Principe de filtrage actif parallèle	16
Figure II-4	Principe de filtrage actif série	17
Figure II-5	Combinaison parallèle série	18
Figure II-6	Association série d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif	19
Figure II.7	Association parallèle d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif	20
Figure II-8	Association d'un filtre actif série et d'un filtre passif	20
Figure III-1	la structure générale du filtre actif parallèle	23
Figure III-2	Structure d'un onduleur de tension triphasé	24
Figure III-3	Algorithme d'identification des courants harmoniques basé sur le calcul des puissances réelles et imaginaires instantanées	29
Figure III-4	courant de référence 1	30
Figure III-5	courant de référence 2	30
Figure III-6	courant de référence 2	30
Figure. III-7	Boucle de régulation de la tension d'alimentation du filtre actif parallèle	32

Figure III-8	Comparteur a hystérésis.	33
Figure III-9	Principe de commande par hystérésis	34
Figure III-10	filtre hybride shunt triphasé	34
Figure III-11	Schémas équivalent de la phase a	35
Figure III-12	Schémas équivalent de la phase a vis-à-vis des harmoniques	36
Figure III-13	Commande du FAP Hybride par la méthode des puissances active et réactive instantanées	38
Figure IV-1	Figure Structure générale du Filtre hybride	39
Figure IV-2	Formes d'ondes (a) tension de la source et son spectre (b) courant absorbé par la charge de et son spectre	41
Figure IV-3	: (a) Courant de charge avec son spectre, (b) courant de source du courant de source avec son spectre	42
Figure IV-4	Résultats de simulation de filtre actif parallèle : courant de source $i_s(A)$ , la tension de source $V_s(V)$ , courant du filtre $i_{njc}(A)$ .tension du bus continu $V_{dc}(V)$	43
Figure IV-5	Forme d'onde (a) du la tension du réseau et son spectre (b) de la courant du réseau et son spectre	44
Figure IV-6	Résultats de simulation du filtre hybride :courant de la charge $i_{ch}$ courant de source $i_s(A)$ , la tension de source $v_s(V)$ courant du filtre $i_{njct}(A)$ .tension du bus continu $v_{dc}(V)$ et sa référence	45
Figure IV-7	Forme d'onde (a) du le courant de réseaux polluant du réseau et son spectre (b) de la courant du réseau et son spectre après le filtrage	46

## Liste des symboles et acronymes

THD	taux de distorsion harmonique
P	La puissance active
S	La puissance apparente
Q	La puissance réactive
$I_h$	Courant harmonique
$F_p$	Facteur de puissance
H5, H7	Harmonique de rang
I1	courant fondamental
$\omega$	pulsation fondamentale du réseau
$\alpha_1$	déphasage du courant fondamental
$\alpha_h$	déphasage du courant harmonique de rang h
f	fréquence
$V_{s1}, V_{s2}, V_{s3}$	Les tensions simples du réseau triphasé
$V_\alpha, V_\beta$	Les tensions dans les systèmes biphasé
$I_\alpha \quad I_\beta$	Les courants dans les systèmes biphasé
$I_{ref}$	Courant de référence
$I_{inj}$	Courant injecté
HT	Haut tension
BT	Base tension
$V_h$	tensions harmoniques
D	Puissance déformante
IGBT	Insolated Gate Bipolar Transistor

## Liste des symboles et acronymes

---

$C_{dc}$	condensateur
$Z$	L'impédance
$V_{dc}$	Tension de bus continue
$L_f$	Inductance de filtre
$R_f$	Résistances de filtre
$p(t)$	Puissance active réelle instantanée
$q(t)$	Puissance réactive réelle instantanée
$\bar{p}$	puissance continue liée à la composante fondamentale active
$\bar{q}$	puissance continue liée à la composante fondamentale réactive
$\tilde{p}$	puissance alternative instantané active
$\tilde{q}$	puissance alternative instantané réactive
$P_c$	Puissance active nécessaire
$K_p$	Gain proportionnel du régulateur
$K_i$	Gain intégral du régulateur
$\omega_c$	fréquence de coupure
$\xi$	amortissement
PI	Proportionnel-Intégrale

## Liste de tableau

Tableau(IV-1) .....	40
---------------------	----

Dédicaces

Remerciement

Liste des tableaux

Liste des Figures

Liste des symboles

## Sommaire

Introduction générale .....	1
<b>Chapitre 1 : Perturbation des réseaux électrique et solutions dépollution</b>	
I-1-Introduction.....	2
I-2- Dégradation de la qualité l'énergie électrique.....	2
I-2 -1 Creux et cou pur es de tension.....	3
I-2-2 Déséquilibre du système triphasé de tension.....	4
I-2-3 Fluctuations de Tension (Flicker).....	4
I-2-4 variation de fréquence.....	5
I-3-Les harmonique.....	5
I-3-1 Définition des harmoniques.....	5
I-3-2 Les types d'harmoniques.....	6
I-3-3-Origine des harmonique.....	6
I-3-4.Effets des harmonique.....	7
I-3-4-1-Les effets instantanés.....	7
I-3-4-2-Les effets différés.....	7
I-3-4-3-Effets à terme.....	7

I-4-Grandeur caractéristiques.....	8
I-4-1-Les différents types de charges.....	8
I.-4-1-1.Charge linéaires.....	8
I-4-1-1-charge non linéaire.....	8
I-5--Charges génératrices d'harmoniques.....	8
I-5-1--Charges génératrices d'harmoniques de tension.....	8
I-5-2- Charges génératrices d'harmoniques de courant.....	9
1-5-3- Les montages électroniques.....	9
I-5-4- Les charges non linéaires passives.....	9
I-6-Caractéristiques des perturbations harmoniques.....	10
I-7- L'énergie réactive et le facteur de puissance.....	10
I-8-Solutions de dépollution des réseaux électrique.....	12
I-8-1-Solutions traditionnelles de dépollution.....	12
I-8-2- Solution modernes.....	12
I-9-Conclusion.....	13

## **Chapitre II :Filtrage passif et actif et hybride**

II-1-Introduction.....	14
II-2-filtrage passifs.....	14
II-2-1-Principe de fonctionnement.....	14
II-2-2-Types de filtre passif.....	14
II-2-2-1-les filtres résonant.....	14
II-2-2-2-les filtres amorti.....	15
II-2-3-Inconvénients des filtres passif.....	16
II-3-filtrage actif.....	16

II-3-1- filtre actif parallèle.....	16
II-3-2- Principe de fonctionnement.....	16
II-3-3-filtre actif série.....	17
II-3-4- Filtrage actif série-parallèle .....	17
II-3-5-avantages et inconvénients des filtres actifs.....	18
II-4-les filtres hybrides.....	18
II-4-1 Filtre hybride combinant filtres actif et passif.....	19
II-4-1-1-Association série d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif le filtre actif série	19
II-4-1-2-Association parallèle d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif.....	20
II-4-1-3-Association d'un filtre actif série et d'un filtre passif.....	20
II-5-conclusion.....	21

### **Chapitre III : Stratégie d'identification et commande d'un Filtre Actif parallèle hybride**

III -1-Introduction .....	22
III -2-Structure générale du filtre actif parallèle.....	22
III 3-Etude la partie de puissance .....	23
III -3-1-onduleur de tension.....	23
III -3-1-1- Structure générale.....	23
III -3-2-système de stockage d'énergie.....	24
III -3-3-filtre de sorti.....	25
III-4-Etude de la partie de identification -commande.....	25
III 4-1-la méthode d'identification des courants perturbé.....	25
III 4-1-1-Choix de la méthode.....	25
III -4-1-2-Méthode des puissance instantanées.....	26



III -4-3-Calcul des courants perturbateurs.....	27
III -4-4-Algorithmes d'identification.....	28
III -4-5- Résultat de simulation d'une méthode puissance instantanées.....	29
III -5-régulation de la tension continue.....	31
III -5-1-Régulateur Proportionnel-Intégrale PI.....	32
III -6--commande par hystérésis.....	33
III-7-Filtrage hybride.....	34
III-7-1- Principe de la compensation harmonique par le filtre hybride.....	35
III-7-2-Commande en puissance du filtre hybride.....	37
III -8-Conclusion.....	38

#### **Chapitre IV : Résultat de simulation**

Introduction.....	39
IV-2- Structure générale du Filtre hybride.....	39
IV-3- Résultat De Simulation Et Analyse avant le filtrage.....	40
IV-4- Résultat De Simulation d'un filtre passif.....	41
IV-5-Résultat de Simulation du filtre actif parallèle.....	42
IV-6- Résultat de Simulation après la connexion d'un filtre hybride.....	44
IV-conclusion général .....	46
Bibliographie	



**Introduction générale**

## Introduction générale

La qualité d'énergie électrique est un indicateur de la santé des équipements branchés sur le réseau électrique, La santé des équipements (bon fonctionnement, défaillance, durée de vie...etc.), la qualité d'énergie électrique dépend de la qualité de tension au point de livraison de l'énergie électrique. Cette tension subit généralement beaucoup de perturbation.L'utilisation croissante dans l'industrie des systèmes commandés à base d'électronique de puissance entraîne de plus en plus des problèmes de perturbation ou distorsions harmoniques des réseaux électriques

La distorsion harmonique est générée par les charges non linéaires connectées au réseau et qui absorbent des courants non sinusoïdaux. De plus ces harmoniques sont source de problèmes pour l'environnement du convertisseur : échauffement, perturbation des lignes téléphoniques etc.Pour diminuer ou supprimer ces perturbations et ainsi améliorer la qualité de l'énergie distribuée, plusieurs solutions existent [12], y compris les dispositifs de filtrage des harmoniques.

Dans ce mémoire on a étudié un filtre hybride, ce filtre est composé d'un filtre actif parallèle connecté en série avec un filtre passif. Ce mémoire est reparti en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre nous présentons la dégradation de la qualité l'énergie électrique, la définition des harmoniques, l'effet des harmoniques, l'origine des harmoniques, les types des charges non linéaires et les différentes solutions pour la dépollution du réseau électrique.

Le deuxième chapitre étudie les différents blocs constituant les filtres passifs, actifs et hybrides.

Le troisième chapitre expose la méthode des puissances instantanées pour identifier les courants harmoniques et l'application de cette méthode sur les filtres hybrides.

Dans le dernier chapitre de ce mémoire, nous présentons les résultats des simulations de ce travail et on clôture ce mémoire par une conclusion générale.

# **Chapitre I**

## **Perturbation des réseaux électrique et solutions dépollution**



## I-1-Introduction

La problématique des harmonique dans les réseaux électrique, également appelée pollution harmonique, n'est pas un phénomène nouveau. Néanmoins, du fait que de plus en plus de charges non linéaires se connectent au réseau

Les harmoniques générés sont des perturbations permanentes affectant la forme d'onde de la tension du réseau. Ces perturbations se superposent à l'onde fondamentale. Elle ont donc pour conséquence de modifier l'onde de tension ou de courant ce qui se traduit par une dégradation du facteur de puissance et/ou par la génération de courants et de tensions alternatives de fréquence différente de celle du fondamental

Pour minimiser ces perturbations et améliorer la qualité de l'énergie électrique fournie par le distributeur, Plusieurs solutions parmi celles-ci on distingue

- modification du convertisseur statique en termes de la topologie et/ou de la commande afin
- d'intervenir directement à la source des perturbation harmonique
- surdimensionnement du matériel électrique.
- Utilisation des dispositifs de filtrage (parallèle, série...etc.).

Dans ce chapitre nous présentons la dégradation de la qualité de l'énergie électrique, et la définition des harmoniques, l'effet de les harmonique, le origine des harmonique et vu aussi les charges non linéaires et les type des charges non linéaires et en finalement nous présentons les différents solution pour dépollution le réseau électrique.

## I-2- Dégradation de la qualité l'énergie électrique

Les perturbations de tension sont la cause la plus fréquente d'un large éventail de perturbations dans les systèmes d'alimentation industriels et commerciaux [12]. Les perturbations peuvent être transitoires, de courte durée, de longue durée ou périodiques. Toutefois, les problèmes les plus souvent rencontrés sont:

- ❖ Creux de tension;
- ❖ Déséquilibre du système triphasé;
- ❖ Fluctuations de tension (ou flicker)
- ❖ Harmoniques et inter-harmoniques.

N'importe quelle perturbation affecte un ou plusieurs paramètres suivants du système:

- ❖ Amplitude de tension ou de courant;
- ❖ Fréquence.

- ❖ Contenu spectral.

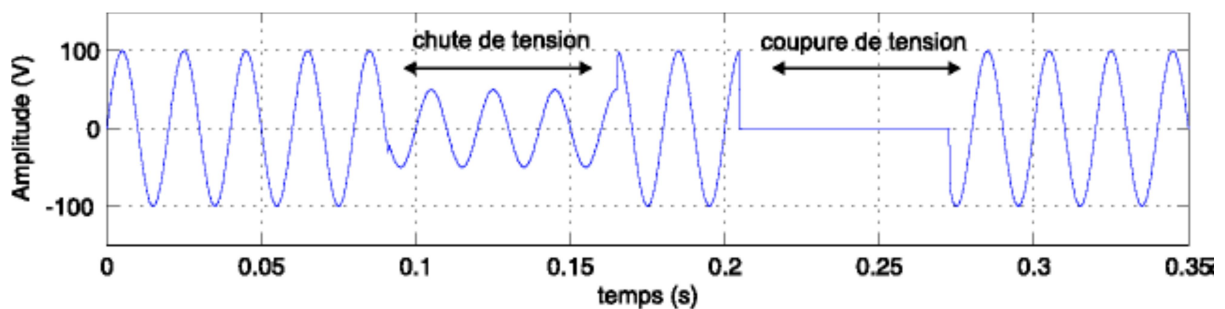
Deux facteurs ont une influence directe sur l'effet de la perturbation

- ❖ Durée de la perturbation.
- ❖ Impédance de la source [12].

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

Une coupure de tension quant à elle est une diminution brutale de la tension à une valeur supérieure à 90 % de la tension nominale ou disparition totale pendant une durée généralement comprise entre 10 ms et une minute pour les coupures brèves et supérieure à une minute pour les coupures longues. La plupart des appareils électriques admettent une coupure totale d'alimentation d'une durée inférieure à 10 ms. La figure( I.1 ) montre un exemple de creux et de coupure de tension[6].



Figure(-I-1) : Creux et coupures de tension

**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[12]

### I-2-2 Déséquilibre du système triphasé de tension

Lorsque les trois tensions ne sont pas identiques en amplitude et/ou ne sont pas décalées d'un angle de  $120^\circ$  les unes par rapport aux autres, on parlera de déséquilibre du système triphasé comme le montre la figure(I-2)

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[6]

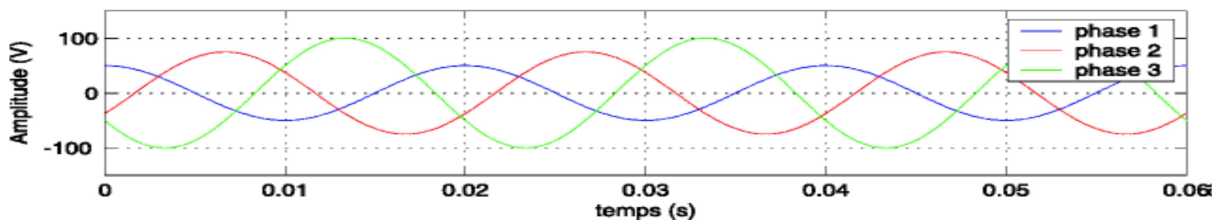


figure (I.2) : cas particulier déséquilibre du système triphasé de tension

### I-2-3 -Fluctuations de Tension (Flicker)

Les variations de tension sont des variations de la valeur efficace ou de la valeur crête d'amplitude inférieure à 10 % de la tension nominale et les fluctuations de tension sont une suite de variations de tension ou des variations cycliques ou aléatoires de l'enveloppe d'une tension dont les caractéristiques sont la fréquence de la variation et l'amplitude . Le terme Flicker est dérivé de l'impact visible sur les lampes (papillotement de la lumière) dû à la fluctuation de la tension. Parmi les causes les plus fréquentes de la fluctuation de la tension dans les réseaux de transmission et distribution sont les fours à arc[12].

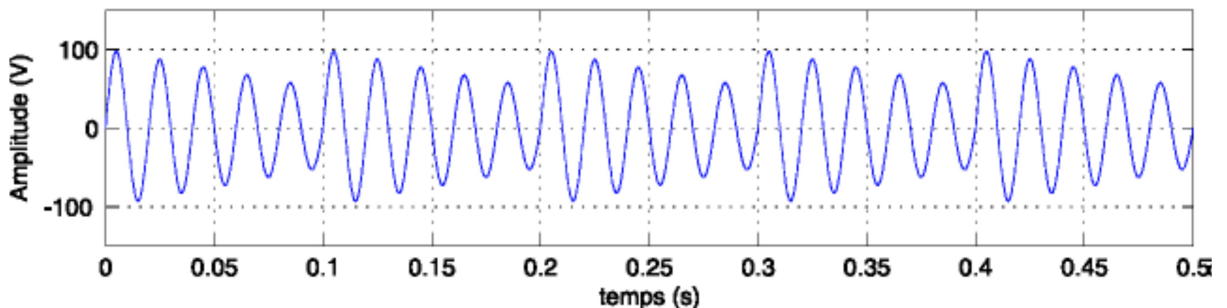


Figure- (I.3) : Fluctuations de Tension

### I-2-4- variation de fréquence

Une variation sensible de la fréquence du réseau peut apparaître sur les réseaux des utilisateurs non interconnectés ou alimentés par une source thermique autonome, comme le montre la figure(I-4). Au niveau des réseaux de distribution ou de transport, cette variation de la fréquence est très rare et n'est présente que lors de circonstances exceptionnelles, comme dans le cas de certains défauts graves sur le réseau. Dans des conditions normales d'exploitation, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle  $50 \text{ Hz} \pm 1\%$ . [6]

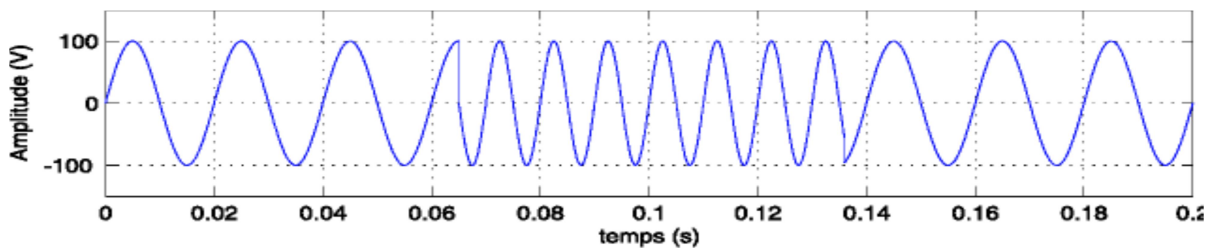


Figure (I.4) :Variation de fréquence

### I-3-Les harmonique

#### I-3-1-Définition des harmoniques

Les harmonique sont permanentes affectant la forme d'onde de la tension du réseaux [1]. Les courants harmoniques sont des courants dont la fréquence est un multiple entier de la fondamentale (celle de l'alimentation électrique). La superposition des courants harmoniques sur le courant fondamental provoque les formes d'onde non sinusoïdales associées aux charges non linéaires [2]

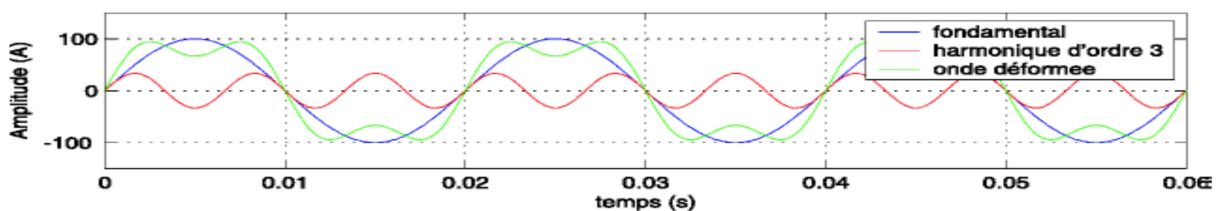


Figure-I-5 :Les harmonique



### I-3-2-Types des harmoniques

En règle générale, on distingue les harmoniques de rangs pairs(2, 4, 6,8 ...etc.) et les harmoniques de rangs impairs (3, 5,7 ...etc.) plus influentes, dans les réseaux industriels .Il existe aussi d'autre types d'harmoniques tel que :

➤ **Inter harmoniques:** Ce sont des composantes sinusoïdales d'une grandeur qui n'est pas une fréquence multiple entière de celle du fondamental.

➤ **Infra harmoniques:** Ce sont des composantes de fréquences inférieures à celle du fondamental[8].

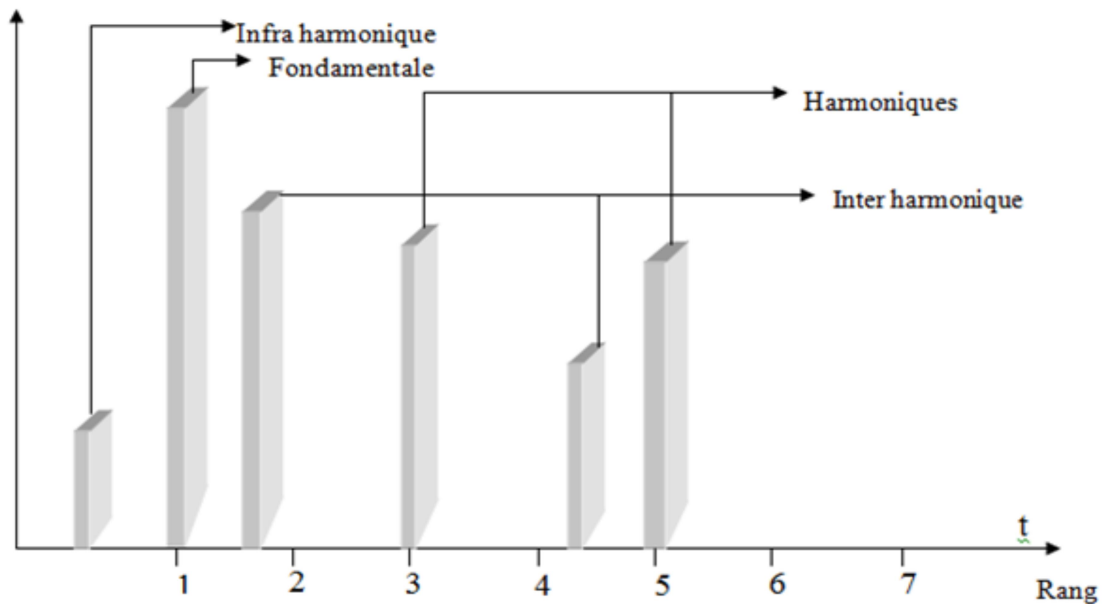


Figure (I.6): Représentation spectrale d'un signal périodique

### I-3-3-.Origine des harmonique

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

harmoniques aux points de raccordement et alors polluer les consommateurs alimentés par le même réseau électrique

Les différents secteurs industriels concernés sont aussi bien du type secondaire (utilisation des gradateurs, des redresseurs, des variateurs de vitesse...), que du type tertiaire (informatique ou éclairage dans les bureaux, commerces,...) ou domestique (téléviseurs, appareils électroménagers en grand nombre).[10]

### **I-3-4-Effets des harmonique**

#### **I-3-4-1-Les effets instantanés:**

Ce sont les effets immédiats sur le fonctionnement d'un matériel, ils concernent les appareils produisant une image électronique (écrans d'ordinateurs, téléviseurs), ~es appareils produisant un son censé être de bonne qualité (chaîne *HI-FI*, téléphone) ou la précision des appareils de mesure.[3]

#### **I-3-4-2-Les effets différés**

Ils se manifestent après une exposition longue au phénomène et se traduisent par une perte partielle des fonctionnalités ou une destruction complète de l'appareil.[3]

#### **I-3-4-3-Effets à terme**

Ils se manifestent après une exposition plus ou moins longue à la perturbation harmonique.L'effet à terme le plus important est de nature thermique, il se traduit par l'échauffement. Il conduit à une fatigue prématurée du matériel, des lignes et amènent un déclassement des équipements.[6]

- **Echauffement des câbles et des équipements**

Ces effets peuvent être à moyen terme (de quelques secondes à quelques heures) ou à long terme (de quelques heures à quelques années) et concernent les câbles qui peuvent être le siège du sur échauffement du neutre et les enroulements comme pour les transformateur sou les moteurs.[6]

- **Echauffement des condensateurs**

L'échauffement est causé par les pertes dues au phénomène d'hystérésis dans le diélectrique. Les condensateurs sont donc sensibles aux surcharges, quelles soient dues à une tension fondamentale trop élevée ou à la présence d'harmoniques. Ces échauffements peuvent conduire au claquage.[6]

## I-4-Grandeur caractéristiques

### I-4-1-Les différents types de charges

#### I-4-1-1-Charge linéaires

Une charge est dite linéaire, si alimentée par une tension sinusoïdale, elle consomme un courant sinusoïdal. Cependant, le courant et la tension peuvent être déphasés. Les charges linéaires couramment utilisées sont constituées de résistances, de capacités et d'inductances[8].

#### I-4-1-1-2-charge non linéaire

Une charge non linéaire absorbe un courant non sinusoïdal lorsqu'elle est soumise à une tension sinusoïdale. On peut citer, à titre d'exemples de charges non linéaires, des machines électromagnétiques saturées, des dispositifs d'électronique de puissance comprenant de redresseurs, lampes à décharge, tubes fluorescents[9].

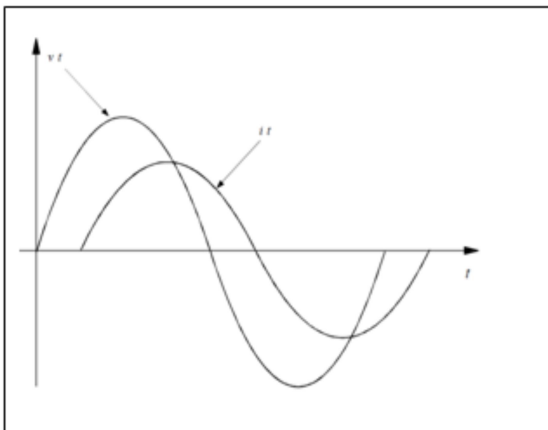


Figure (I-5) : Charge linéaires

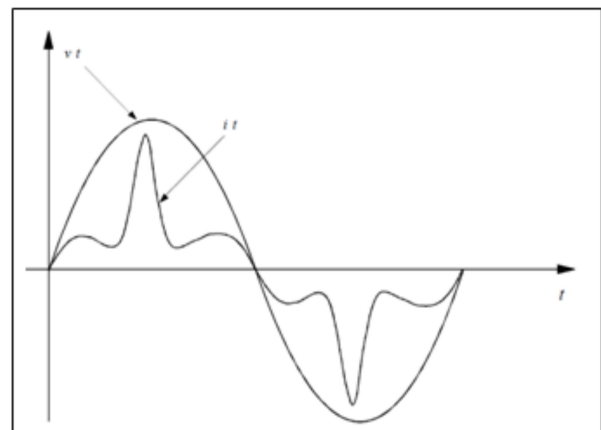


Figure (I-6) : Charge non linéaires

## I-5-Charges génératrices d'harmoniques

### I-5-1-Charges génératrices d'harmoniques de tension

Les alternateurs, les transformateurs et les ASI (Alimentation Statique Ininterrompibles) représentent les principales charges génératrices d'harmoniques de tension. Le taux de distorsion harmonique produit par ces charges est généralement faible. [ 3]

#### ➤ Les alternateurs

Le contenu harmonique de la tension générée par les alternateurs est lié à la qualité du bobinage et des pièces polaires qui assurent la forme sinusoïdale de l'onde.

➤ **Les transformateurs**

Ils peuvent être générateurs de tensions harmoniques lorsqu'ils fonctionnent en régime saturé

➤ **Les alimentations statiques interruptibles (ASI)**

Elles servent à protéger le matériel, en général des charges non-linéaires comme du matériel informatique, contre les creux de tension et les coupures. Le taux de tension harmonique est dû essentiellement aux courants harmoniques créés par les charges non-linéaires alimentées en aval.

### **I-5-2- Charges génératrices d'harmoniques de courant**

Les charges non linéaires consomment un courant non sinusoïdal et représentent les principales sources d'émission en courants harmoniques sur les réseaux. On peut distinguer différents types de charges perturbatrices :

#### **1-5-3- Les montages électroniques**

➤ **Le redresseur monophasé à filtre capacitif:**

Il est utilisé comme premier étage des alimentations de télévisions, d'ordinateurs, d'imprimantes, des variateurs de vitesse des machines asynchrones, des lampes à ballast électronique, des ballasts électroniques pour rampes d'éclairage, etc.

➤ **Le gradateur monophasé**

Il est utilisé pour la commande de l'intensité des lampes à incandescence halogène, la commande de certains fours de cuisson, la régulation de puissance (chaudières), les démarreurs de moteurs électriques, etc.

#### **I-5-4- Les charges non linéaires passives**

➤ **Les moteurs asynchrones**

En théorie, ces moteurs génèrent des ondes de courant purement sinusoïdales; en pratique, les taux d'harmoniques mesurés sont variables.

➤ **Les lampes fluorescentes et les lampes à vapeur haute pression**

Elles représentent les deux tiers de la puissance consommée par l'éclairage dans le secteur tertiaire (bureaux, grands commerces, etc.). [3]

### I-6-Caractéristiques des perturbations harmoniques

La perturbation harmonique est généralement caractérisée par le taux de distorsion harmonique (THD) défini pour la tension ou le courant. Ce critère est le plus souvent employé pour quantifier le contenu harmonique d'un signal distordu. Il mesure également le degré de déformation du signal apporté par les harmoniques par rapport à une onde sinusoïdale. Il va de soit que la répartition spectrale complète généralement l'information sur le THD en indiquant le rang des harmoniques dominants. Pour chiffrer la consommation de puissance réactive le facteur de puissance (FP) est généralement utilisé

Le courant absorbé par une charge non linéaire (convertisseur statique) n'est pas sinusoïdal, mais sa valeur moyenne sur chaque phase est souvent nulle. Dans ce cas, la décomposition en série de Fourier du courant donne :

$$i(t) = \sqrt{2} I_1 \sin(\omega t + \alpha_1) + \sum_{h=2}^{\infty} \sqrt{2} I_h \sin(h\omega t + \alpha_h) \quad (1.1)$$

Avec :  $I_1, I_h$  : valeur efficace du courant fondamental et du courant harmonique de rang h,

$\alpha_1, \alpha_h$  : déphasage du courant fondamental et du courant harmonique de rang h,

$\omega$  : pulsation fondamentale du réseau

Le taux de distorsion harmonique de ce courant s'exprime sous la forme suivante [4]

$$THD = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \frac{I_h^2}{I_1^2}} \quad (1.2)$$

### I-7- L'énergie réactive et le facteur de puissance

La qualité d'énergie peut être aussi caractérisée par le facteur de puissance. Pour calculer ce facteur il faut d'abord calculer la puissance moyenne et la puissance apparente de source

$$P_s = \frac{1}{T} \int_0^T v_s(t) i(t) dt \quad (1.3)$$

$$P_s(t) = \frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} \sqrt{2} v_s \sin(\omega_1 t) \sqrt{2} I_{s1} \sin(\omega_1 t - \phi_{s1}) dt \quad (1.4)$$

Donc

$$P_s(t) = V_s I_{s1} \cos \phi_{s1} \quad (1.5)$$

Avec

$$S = V_s I_s \quad (1.6)$$

Le facteur de puissance est donné par:

$$F_p = \frac{P}{S} = \frac{V_s I_{s1} \cos \phi_{s1}}{V_s I_s} = \frac{I_{s1}}{I_s} \cos \phi_{s1} \quad (1.7)$$

$$F_p = \frac{I_{s1}}{I_s} F_d \quad (1.8)$$

$$F_d = \cos \phi_{s1} \quad (1.9)$$

C'est le facteur de déplacement du courant de source qui est égal au facteur de puissance dans le cas du circuit linéaire pour des courants et tension sinusoïdaux. Le facteur de puissance peut être écrit sous une autre forme.[4]

$$F_p = \frac{1}{\sqrt{THD^2 + 1}} F_d \quad (1.10)$$

## I-8--Solutions de dépollution des réseaux électrique

Deux types de solutions sont envisageables. La première consiste à utiliser des convertisseurs statiques moins ou peu polluants, tandis que la seconde consiste en la mise en œuvre d'un filtrage des composantes harmoniques. La première classe de solutions s'intéresse à la conception tandis que la seconde consiste à compenser les courants ou les tensions harmoniques. Deux groupes de solutions de dépollution pour compenser toutes les perturbations peuvent être distingués : les solutions traditionnelles et les solutions modernes

### I-8-1-Solutions traditionnelles de dépollution

Il s'agit notamment de mettre en œuvre les moyens suivants:

- ❖ Statocompensateur : il s'agit d'une méthode de compensation utilisée pour relever le facteur de puissance,
- ❖ Filtre passif : le plus ancien pour le traitement des harmoniques de courant. Il consiste à piéger les courants harmoniques pour empêcher qu'ils ne se propagent dans le reste du réseau[7].

### I-8-2- Solution modernes

Ces solutions sont proposées comme des solutions efficaces de dépollution des réseaux électriques afin de traiter les inconvénients inhérents aux solutions traditionnelles comme les filtres passifs (non adaptatifs aux variations de la charge et du réseau, phénomènes de résonance). Parmi toutes les solutions modernes, on trouve deux types de structures classiquement utilisées :

- ✓ Le filtre actif (série, parallèle ou bien encore associant les deux)
- ✓ Le filtre actif hybride (série, parallèle).

Le but de ces filtres actifs est de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à ce que le courant ou la tension redevienne sinusoïdal. Le filtre actif est connecté au réseau soit en série (FAS), soit en parallèle (FAP) suivant qu'il est conçu respectivement pour compenser les tensions ou les courants harmoniques, soit associé à des filtres passifs.

Pour fournir aux consommateurs une énergie électrique de qualité, même dans les conditions

de fonctionnement les plus perturbées, les filtres actifs sont proposés comme des solutions de dépollution des réseaux électriques Dans la suite, différentes topologies de filtres actifs usuels sont présentées[7]

### **I-9-Conclusion**

La pollution de réseau d'électricité répercute négativement sur la consommateur, Parce que les harmoniques affectent les matériels électriques. Cette raison de pollution c'est l'utilisation des composants de l'électronique de puissance.

Dans ce chapitre nous avons présenté les perturbations de réseau électrique et les effets de l'harmonique et les charges non linéaire , et le problème de l'utilisation de ces charges , Enfin on va citer les solutions pour la dépollution .





## **Chapitre II**

# **Filtrage passif, actif et hybride**

## II-1-Introduction :

L'utilisation excessive des charges non-linéaires au cours des dernières années, Conduit à la propagation des courants harmoniques dans les réseaux électriques. Ces courants ont affecté négativement sur les réseaux électriques en termes de causer des dommages notre matériels et dégradé la qualité des énergie électrique aussi autre effets, Les chercheurs de trouver des solutions radicales à ces problèmes dans le réseaux électrique L'une de ces solutions utilisent des filtres.

Dans ce chapitre, présenté les solutions possibles pour dépollution notre réseau , d'abord on va présenté le filtrage passif (amorti , résonant)et le filtrage actif (série , parallèle , combinaison parallèle série) avec le principe de chaque type et les avantages et les inconvénients , ensuite on va passer le filtrage hybride combinant filtres actif et passif avec le détail .

## II-2-filtrage passif

### II-2-1-Principe de fonctionnement

Le principe d'un filtre passif est de modifier localement l'impédance du réseau, de façon à « dériver » les courants harmoniques et à éliminer les tensions harmoniques y afférentes. Des éléments capacitifs et inductifs sont, en effet, associés de manière à obtenir une résonance série accordée sur une fréquence choisie.

Une connaissance précise des rangs harmoniques devant être filtrés et des atténuations requises est nécessaire à la réalisation d'un filtre. Une telle étude est généralement menée à l'aide d'un logiciel de simulation. En fonction de l'atténuation harmonique recherchée, différents types de filtres passifs sont utilisés. [3].

### II-2-2-Types de filtre passif

#### II-2-2-1-Filtre résonant

Il est constitué par la mise en série d'une inductance, d'une résistance, et d'un condensateur. La figure (II .1) montre clairement le montage de ce dernier ainsi que leurs impédances en fonction de la fréquence. Ce type de filtre est caractérisé par l'emplacement de trois filtres, deux pour les harmoniques d'ordre inférieurs et un filtre pour les harmonique d'ordre supérieurs, c'est-à-dire pour un pont triphasé nous avons besoin d'un filtre passe bas

pour le cinquième et l'autre pour le septième harmonique et d'un filtre passe haut pour tous les harmoniques au-delà de 11ème.[8]

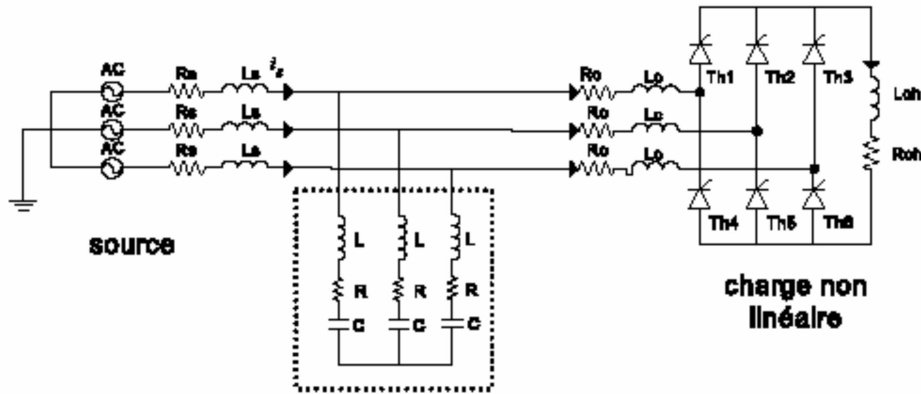


Figure (II.1) : Filtre résonant

**II-2-2-2les filtres amorti**

On utilise les filtres amorti pour filtrer simultanément des harmoniques du rang supérieur , et non une harmonique d'un rang particulier.il est recommandé lorsque les performances demandées ne sont pas trop élevées. On l'appelle aussi un filtre passe haut.

Le filtre passif amorti est un circuit RLC constitué par la mise en série d'une capacité avec un ensemble constitué de la mise en parallèle d'une résistance dite résistance d'amortissement et d'une inductance ,comme le figure (II. 2) .[1]

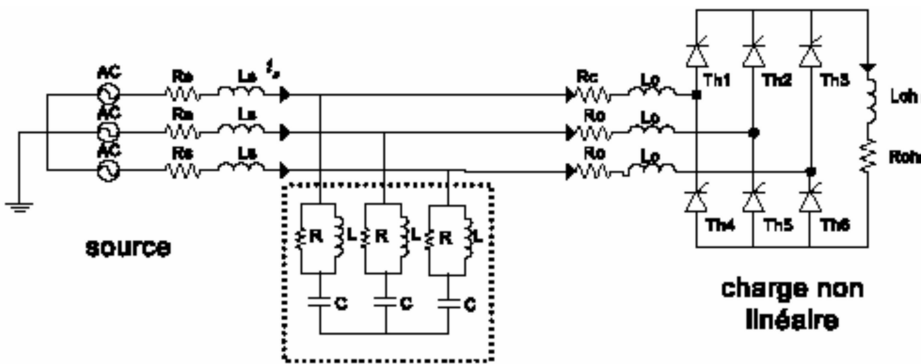


Figure (II. 2): Filtre passif amorti.

### II-2-3-Inconvénients des filtres passif

Le filtre passif entre en résonance série la source, ce qui fait apparait une distorsion de tension, qui donne naissance à un excès de courant harmonique qui peuvent passer à travers le filtre passif, et le détruire.

La variation des l'impédance de la source influe considérablement sur les caractéristiques de filtrage.

La résonance parallèle entre le filtre passif et la source produit des amplifications de courant harmoniques du côté de la source à des fréquences spécifiques.

Effet sur la propagation des signaux de télécommande centralisée. Utilisés par les distributeurs d'énergie. La propagation des signaux de télécommande à la fréquence 175HZ ,sur les réseaux HT et BT,et dans certains ces perturbée par la présence d'inductances a anti harmoniques ou des filtres passifs. L'injection du signal à175HZ est réalisée en aval des transformateurs des postes source a l'aide d'un transformateur dont le secondaire est inséré en série avec le réseau[1].

### II-3-le filtrage actif

#### II-3-2-Le filtre actif parallèle

##### II-3-2-1-Principe de fonctionnement

Le filtre actif connecté en parallèle sur le réseau, comme le montre la figure(II.3), est le plus souvent commandé comme un générateur de courant. Il injecte dans le réseau des courants perturbateurs égaux à ceux absorbés par la charge polluante [8]

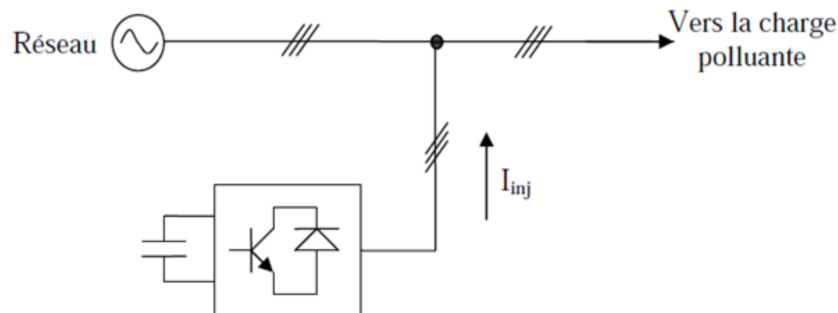


Figure (II.3) :Principe de filtrage actif parallèle

### II-3-3-Filtrage actif série

Le filtre actif série engendre des tensions harmoniques  $V_h$  dont la somme avec la tension du réseau  $V_s$  est une onde sinusoïdale figure (II.4). 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 [8]

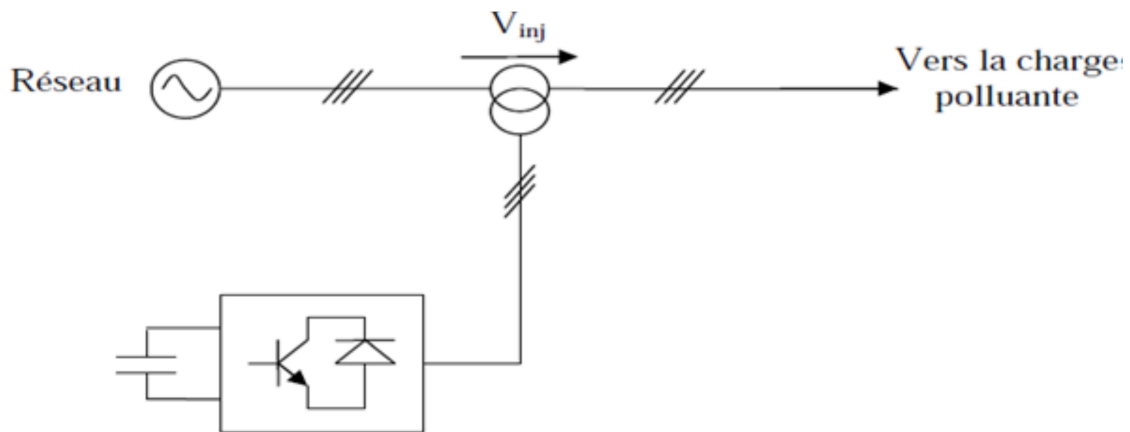


Figure (II.4) :Principe de filtrage actif série

### II-3-4-Filtrage actif série-parallèle

C'est une solution de compensation universelle basée sur le fonctionnement simultané des filtres actifs parallèle et série figure( II.5). Cette nouvelle topologie est appelée combinaison parallèle série actifs ou (United Power Quality Conditioner). Il possède les avantages cumulés des filtres actifs parallèles et série.

Le filtre actif série, lorsqu'il est placé en amont du filtre actif parallèle permet de dépolluer la source des tensions perturbatrices. Lorsqu'il est placé en aval, il permet d'isoler la charge de la source perturbée [8].

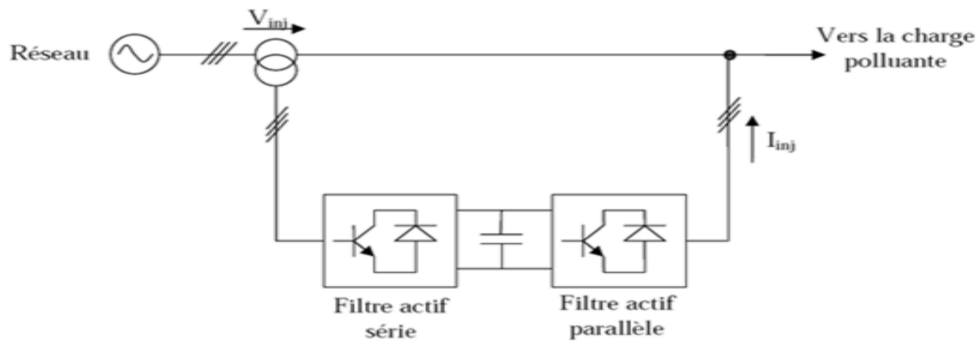


Figure (II.5) : Combinaison parallèle série

### II-3-5-avantages et inconvénients des filtres actifs

#### a) Les avantages du filtre actif :

Le filtre actif offre de nombreux avantages :

- Il s'adapte automatiquement à l'évolution des charges et du réseau.
- Peut compenser plusieurs rangs harmoniques (dans la limite de sa bande passante)
- Ne passe pas en surcharge lorsque le courant harmonique à compenser dépasse le dimensionnement du filtre actif, il limite son émission de compensation harmonique au maximum de ses capacités mais il n'y a aucun risque de destruction.
- Le risque de résonance entre filtre et impédance du réseau qui existe avec le filtre passif est supprimé.

#### b) les inconvénients de filtrage actif

- Le filtrage actif n'est possible que dans le cas des réseaux de faible puissance.
- Il permet la compensation de l'énergie réactive, mais à un coût très élevé par rapport au filtrage passif.
- Son coût est beaucoup plus élevé que celui du filtrage passif [1]

### II-4-Filtre hybride

Le filtrage mixte ou hybride résulte de l'association d'un filtre passif et d'un filtre actif. L'intérêt des filtres mixtes est que le filtre passif prend en charge la compensation d'une grande partie des harmoniques; le filtre actif maintient les performances de filtrage en fonction de l'évolution de la charge et du réseau. Ainsi la puissance du convertisseur qui constitue le filtre actif est fortement diminuée grâce aux éléments passifs. Ces structures

permettent donc, d'optimiser le rapport performance/coût et d'avoir une meilleure tenue en tension.

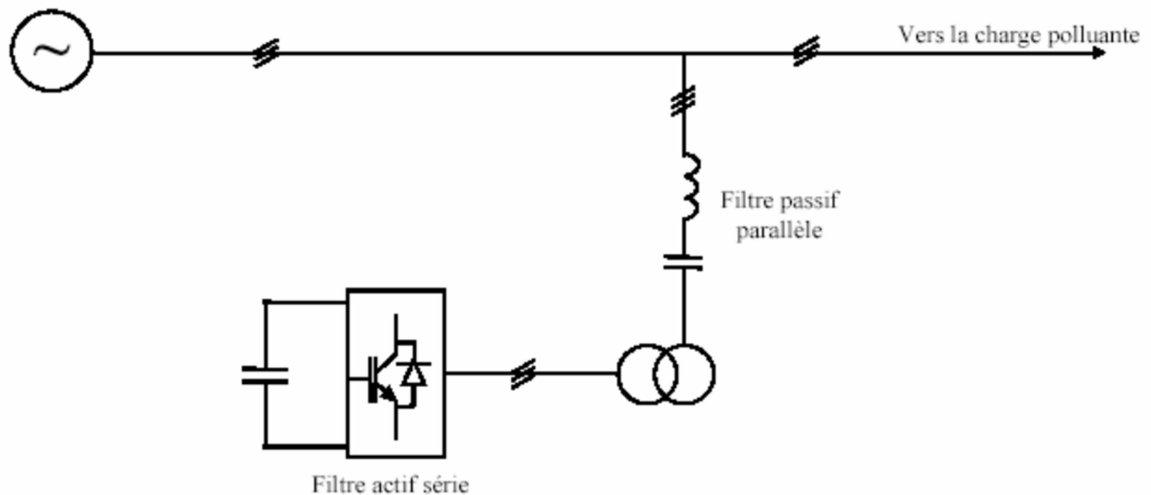
On a plusieurs structures des filtres mixte, parmi les quelles :

- ❖ Association série d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif le filtre actif série
- ❖ Association parallèle d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif
- ❖ Association d'un filtre actif série et d'un filtre passif

#### II-4-1 Filtre hybride combinant filtres actif et passif

##### II-4-1-1 Association série d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif

Dans cette configuration, les deux filtres actif et passif sont directement connectés en série, sans l'intermédiaire d'un transformateur. L'ensemble est connecté en parallèle sur le réseau comme le décrit la figure II-6

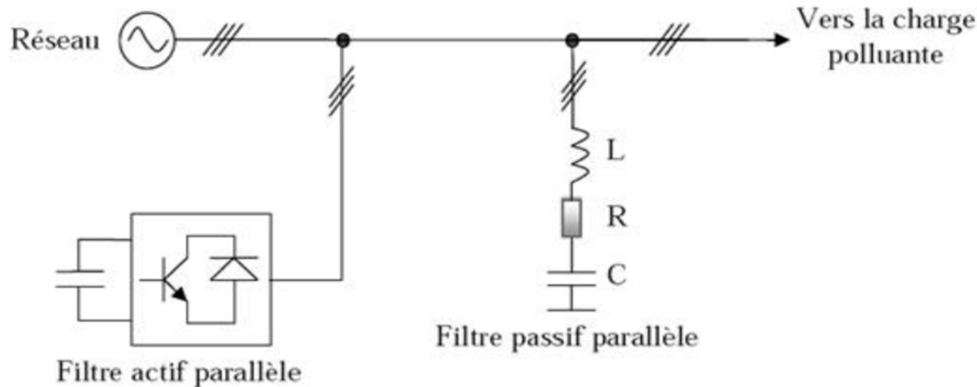


**Figure (II-6) :** Association série d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif.

Dans ce cas, le filtre passif se comporte comme une impédance faible à la fréquence d'accord et comme une grande impédance à la fréquence fondamentale. Ce système présente deux avantages : le dimensionnement en puissance du filtre actif est encore plus réduit du fait que le courant qui le traverse est plus faible et le filtre actif est à l'abri d'un éventuel court-circuit de la charge [7]

### II-4-1-2 Association parallèle d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif

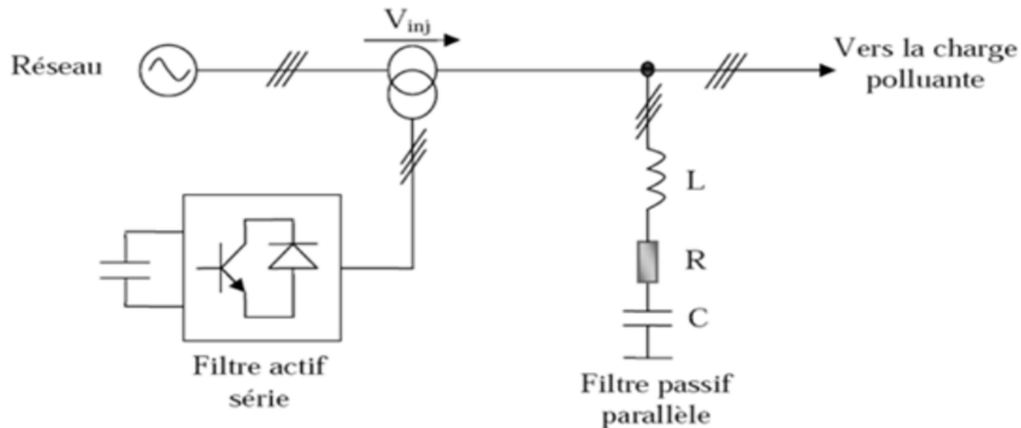
Dans cette topologie, le filtre actif est connecté en parallèle avec le filtre passif. Tous deux sont également en parallèle avec la charge. Le filtre actif parallèle sert à compenser les courants harmoniques basses fréquences émis par la charge polluante alors que le filtre passif, accordé sur une fréquence harmonique élevée, permet de compenser les harmoniques hautes fréquences [7]



**Figure (II.7) :** Association parallèle d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif.

### II-4-1-3 Association d'un filtre actif série et d'un filtre passif

Cette structure permet de réduire les risques d'antirésonance entre les éléments des filtres passifs et l'impédance du réseau. Dans ce cas, le filtre actif série agit comme une résistance vis-à-vis des courants harmoniques et les oblige à circuler dans le filtre passif, tout en restant transparent à la fréquence fondamentale. La figure (II.8), illustre cette topologie [7].



**Figure (II.8) :** Association d'un filtre actif série et d'un filtre passif.



**II-5-conclusion**

Dans ce chapitre nous avons présenté les différents types de filtrage (filtrage passif et filtrage actif et en fin le filtrage hybride ),et présenté aussi le principe de chaque type et les inconvénients Les avantages.

# Chapitre III

## Stratégie d'identification et Commande d'un filtre actif parallèle hybride



### III -1-Introduction

Ces dernières années, le filtrage actif fait l'objet de nombreux travaux de recherche afin de compenser les courants harmoniques générés par les charges polluantes, Le filtre actif est un onduleur connecté en parallèle sur le réseau électrique afin d'injecter des courants harmoniques égaux et en opposition de phase à ceux absorbés par la charge polluante.

Dans ce chapitre nous étudions les stratégies d'identification et de commande d'un filtre actif parallèle, on a divisée cette étude en deux partie principal ,la premier partie de puissance ,dans cette partie nous présentons l'onduleur de tension et l'élément de stockage d'énergie et finalement le filtre de sortie. La deuxièmes partie de commande ,dans cette partie nous présentons l'identification des courant perturbés par la méthode des puissances instantanées, la régulation de la tension continue et des courants du filtre actif et finalement la commande de l'onduleur de tension .

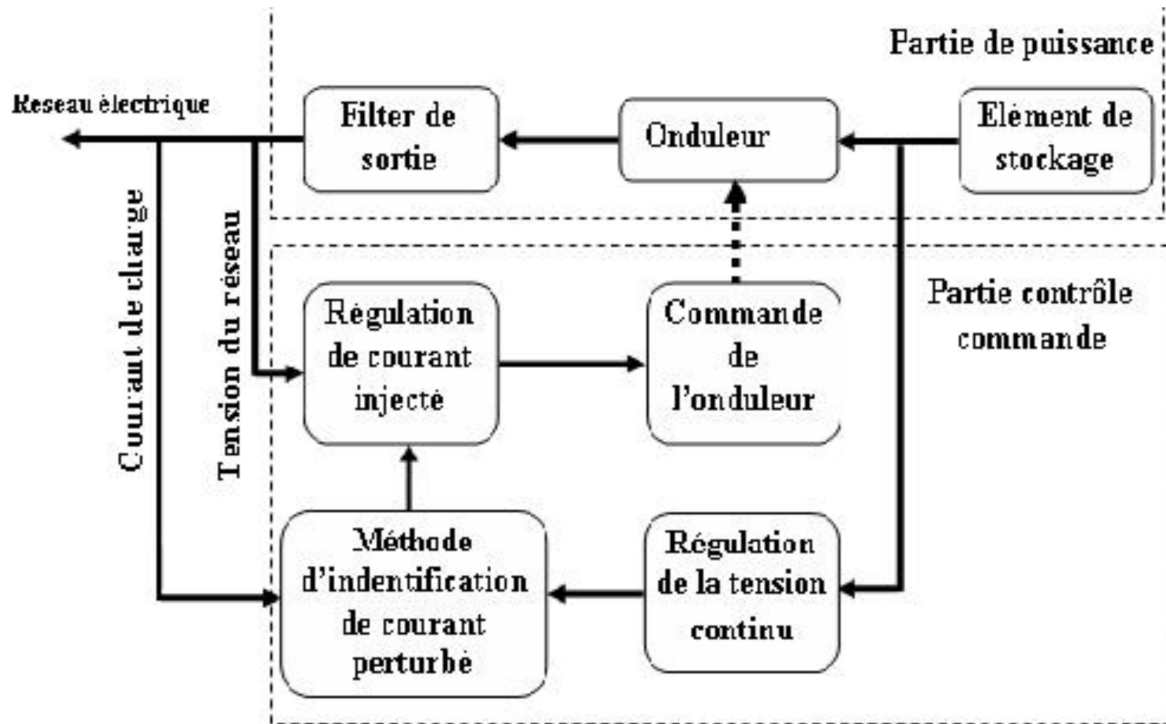
### III -2-structur générale du filtre active parallèle

La Figure(III.1) donne la structure générale du filtre actif parallèle, laquelle se présente sous la forme de deux blocs : la partie puissance et la partie contrôle-commande. La partie puissance est constituée :

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

La partie contrôle-commande quant à elle 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.[10]



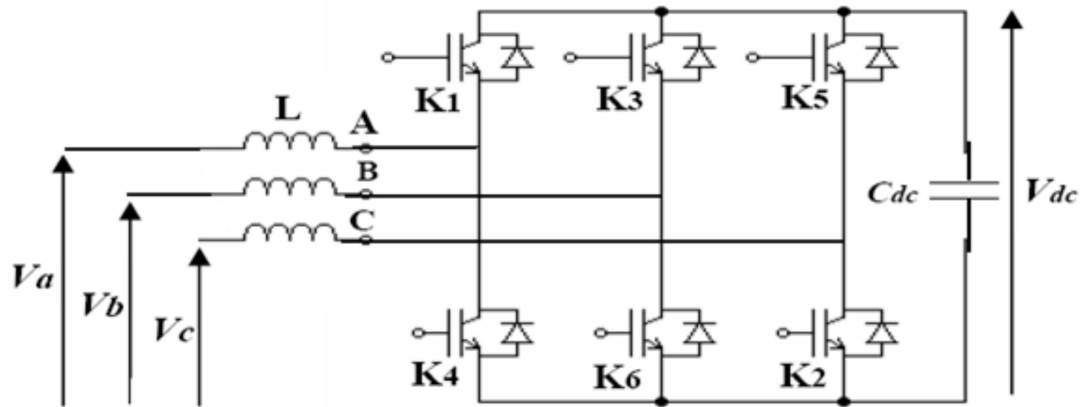
Figure( III.1) la structure générale du filtre actif parallèle

### III -3-Etude de la partie puissance

#### III.3.1 Onduleur de tension

##### III -3-1-1-Structure générale

La Figure (III.2 )présente un onduleur triphasé à structure de tension. Il se compose de trois bras à interrupteurs réversibles en courant, commandés à la fermeture et à l'ouverture, réalisés à partir d'un transistor (GTO ou IGBT) et d'une diode en antiparallèle. Le stockage de l'énergie du côté continu se fait par l'intermédiaire d'un condensateur  $C_{dc}$  de tension  $V_{dc}$ . Le filtre de sortie est un filtre passif habituellement du premier ordre ( $L_f, R_f$ ) employé pour connecter l'onduleur de tension au réseau électrique.[10]



**Figure (III.2):** Structure d'un onduleur de tension triphasé

Cette structure du filtre actif parallèle ne permet pas la fermeture simultanée des semi-conducteurs d'un même bras sous peine de court-circuiter le condensateur de stockage. Par contre, ils peuvent être tous les deux ouverts (pendant un temps mort). La continuité des courants est alors assurée par la mise en conduction d'une des diodes d'un même bras.

En pratique, nous commandons les deux semi-conducteurs d'un même bras de façon complémentaire : la conduction de l'un entraîne le blocage de l'autre. En réalité, le mode, où les semi-conducteurs d'un même bras sont tous les deux fermés, n'existe que durant les commutations. Afin d'éviter un court-circuit à cause du délai de blocage des interrupteurs, il faut insérer sur un même bras, un temps d'attente, également appelé temps mort, entre la commande de blocage d'un interrupteur et la commande d'amorçage de l'autre. Avec l'hypothèse des commutations instantanées, ce mode de fonctionnement ne sera pas pris en compte et par conséquent, aucun risque de court-circuiter le condensateur n'est à craindre.[10]

### III -3-2-Système de stockage d'énergie

Le stockage de l'énergie du côté continu se fait souvent par un système de stockage capacitif représenté par un condensateur  $C_{dc}$  qui joue le rôle d'une source de tension continue  $V_{dc}$ , comme le montre la Fig. II.2. Le choix des paramètres du système de stockage ( $V_{dc}$  et  $C_{dc}$ ) se répercute sur la dynamique et sur la qualité de compensation du filtre actif parallèle. En effet, une tension  $V_{dc}$  élevée améliore la dynamique du filtre actif. De plus, les ondulations de la tension continue  $V_{dc}$ , causées par les courants engendrés par

le filtre actif et limitées par le choix de Cdc, peuvent dégrader la qualité de compensation du filtre actif parallèle. Ces fluctuations sont d'autant plus importantes que l'amplitude du courant du filtre est grande et que sa fréquence est faible[1].

### **III -3-3-Filtre de sortie**

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

- assurer la dynamique du courant
- empêcher les composantes dues aux commutations de se propager sur le réseau électrique.

### **III-4-Etude de la partie d'identification commande**

La stratégie de commande se base sur la détection des courants perturbateurs dans le domaine temporel. Trois possibilités d'identification des courants perturbateurs ont déjà été proposées

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

La première méthode est la plus appropriée au filtre actif parallèle installé par le consommateur pour compenser les courants perturbateurs causés par ses charges polluantes[10].

### **III -4-1-La méthode d'identification des courants perturbés**

#### **III -4-1-1-Choix de la méthode :**

Plusieurs méthode ont été utilisés pour l'extraction des courants de références pour un filtre actif ; parmi ,la méthode basée sur le principe du courant actif, la méthode tri-monophasé, la méthode basé sur la régulation de la tension continue et la méthode des puissance instantanées

Cette dernièreest basée sur calcul des puissances instantanées dans le domaine temporel. Elle permet de calculer les puissances harmoniques de la charge non linéaire. Comme on

peut l'utiliser pour compenser à la fois les courants harmoniques et réactifs, en se basant sur la soustraction de la partie fondamentale active du courant total.

C'est la méthode d'identification la plus utilisée est aussi appelée méthode des puissances réelles et imaginaire instantanées. Elle offre l'avantage de choisir les perturbations à compenser avec précision, de rapidité facilité d'implantation. Pour toutes ces raisons on a retenu cette méthode d'identification pour ce travail [1].

### III -4-1-2-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 :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (3.1)$$

Cette méthode exploite la transformation  $\alpha$ - $\beta$  pour obtenir les puissances réelles et imaginaires. Notons par  $(V_\alpha, V_\beta)$  et  $(I_\alpha, I_\beta)$  les composantes orthogonales du repère  $\alpha$ - $\beta$  associées respectivement aux tensions de raccordement du filtre actif parallèle et aux courants absorbée par les charges polluantes. La transformation  $\alpha$ - $\beta$ -0 triphasée permet d'écrire la relation des tensions suivante [12]

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{s1} \\ V_{s2} \\ V_{s3} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Et la relation des courants ci-dessous

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{s1} \\ I_{s2} \\ I_{s3} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

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

$$P(t) = V_{s1} \cdot I_{s2} + V_{s2} \cdot I_{s3} + V_{s3} \cdot I_{s1} = V_\beta \cdot V_\alpha \quad (3.4)$$

De la même manière la puissance imaginaire instantanée peut s'écrire sous la forme suivante :

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

$$V_\alpha \cdot V_\beta - V_\beta \cdot V_\alpha \quad (3.5)$$

D'ou:

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_\alpha & V_\beta \\ -V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

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

$$\begin{cases} p = \bar{p} + \tilde{p} \\ q = \bar{q} + \tilde{q} \end{cases} \quad (3.7)$$

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  $\tilde{q}$  représentent les puissances alternatives instantanées actives et réactives liée à la somme des composantes perturbatrices du courant et de la tension.

### III -4-3-Calcul des courants perturbateurs.

En inversant la relation (3.7), nous pouvons déterminer les courants dans le repère  $\alpha$ - $\beta$  comme le montre l'équation (3.8) :

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (3.8)$$



En considérant les équations (3.7) et (3.8), nous pouvons décomposer le courant dans le repère ( $\alpha$ - $\beta$ ) en trois composantes, active et réactive à la fréquence fondamentale et les harmoniques. Ceci conduit à:

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{p} \\ 0 \end{bmatrix}}_{\text{courant actif}} + \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{q} \end{bmatrix}}_{\text{courant réactif}} + \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix}}_{\text{courant harmonique}} \quad (3.9)$$

avec

$$\Delta = V_\alpha^2 + V_\beta^2 \quad (3.10)$$

Cette expression montre que l'identification des différentes composantes du courant dans le repère ( $\alpha$ - $\beta$ ) revient à séparer les termes continus des puissances réelles et imaginaires instantanées. Les courants perturbateurs triphasés qui représentent les courants identifiés, dits courants de référence ( $I_{ref}$ ), sont calculés à partir de la transformation ( $\alpha$ - $\beta$ ) inverse donnée par la relation :[6]

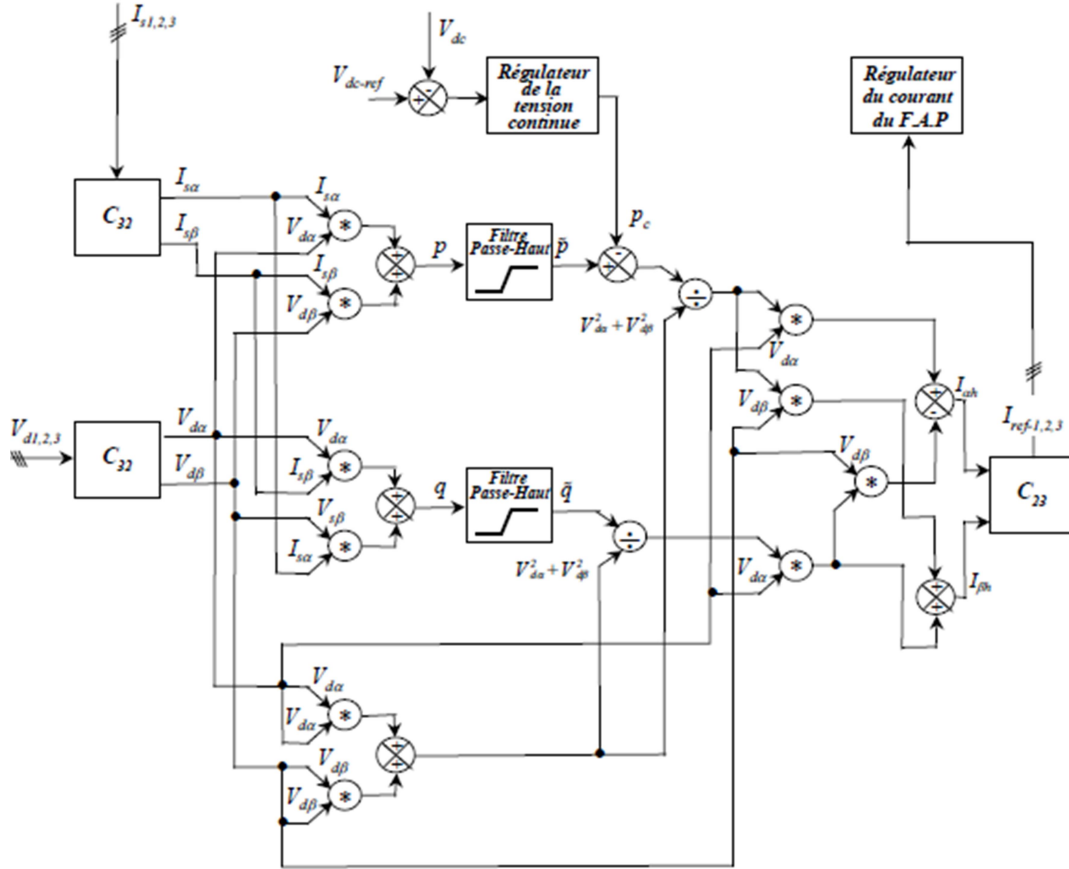
$$\begin{bmatrix} I_{h\alpha} \\ I_{h\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

$$\begin{bmatrix} I_{ref1} \\ I_{ref2} \\ I_{ref3} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{h\alpha} \\ I_{h\beta} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Avec  $I_\alpha$ ,  $I_\beta$  courants perturbateurs calculés dans le repère  $\alpha$ - $\beta$  à partir des courants réactifs et harmoniques de la relation (3.9).

### III -4-4-Algorithmes d'identification

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



**Figure (III.3):** Algorithme d'identification des courants harmoniques basé sur le calcul des puissances réelles et imaginaires instantanées

Cette figure représente le schéma de l'algorithme d'identification des courants harmoniques. Ce dernier est constitué essentiellement, par des blocs de la matrice de transformation ( $\alpha$ - $\beta$ ), des filtres passe haut, permettant d'extraire les composantes continues des puissances, et les différents blocs de calcul des courants harmoniques [6].

#### III-4-5-Résultat de simulation de la méthode des puissances instantanées

Le réseau est un système de tension triphasé parfaitement sinusoïdal, tel que :

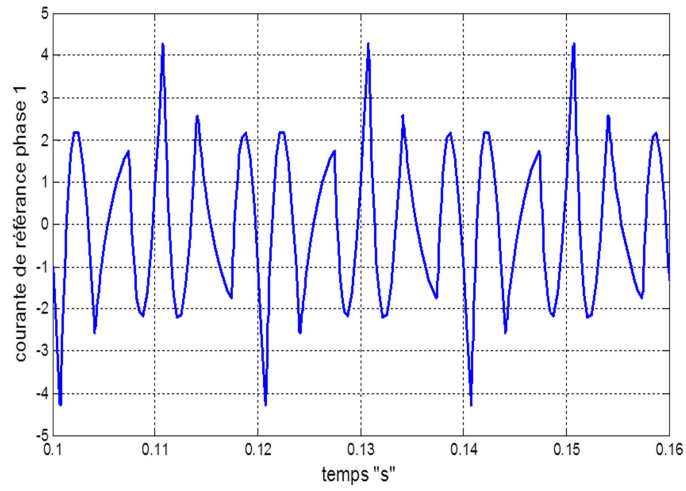
La tension maximale simple  $V_m=100$  V et la fréquence  $f=50$  Hz.

L'inductance de la source est  $2.3e-3$  H

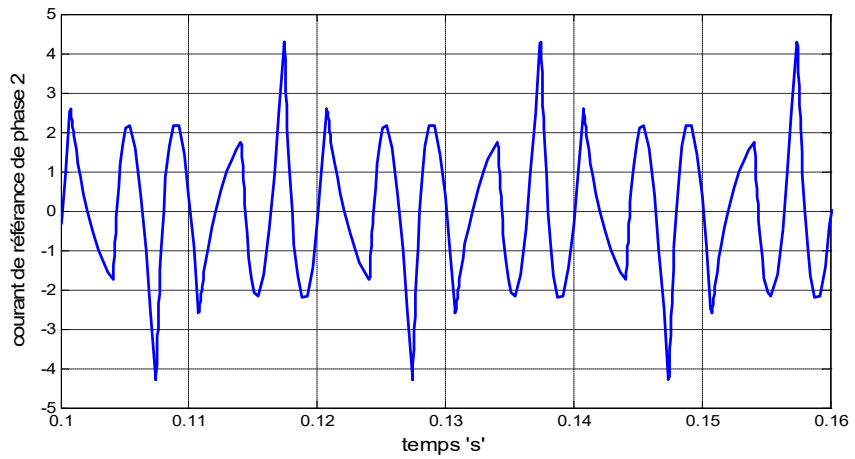
Résistance de la source est  $0.42 \Omega$

La charge polluante est un redresseur triphasé qui alimente une charge résistive de  $5\Omega$

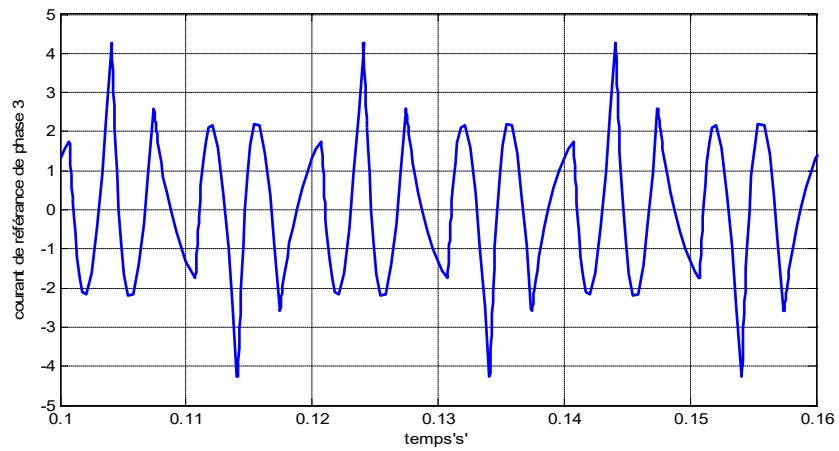
La fréquence du filtre passe haut,  $f=35$  Hz.



**Figure(III.4) :** courant identifié de la phase 1



**Figure (III.5) :** Courant identifié de la phase2



**Figure (III.6) :** Courant identifié de la phase3

Les figures (III.6) et (III.7) et (III.8) représentent les courants de références identifiés, par la méthode des puissances instantanées à travers tous les blocs nécessaires pour le calcul du courant de référence. Ces courants présentent un THD de 16.35 %.

### III -5-Régulation de la tension continue.

La tension aux bornes du condensateur doit être maintenue à une valeur fixe. Les éléments à l'origine de la variation de la tension moyenne  $V_{dc}$  aux bornes du condensateur sont les suivants:

- Les pertes statique et dynamique dans les semi-conducteurs de puissance Del 'onduleur,
- Les pertes dans les inductances de découplage  $L_f$ ,
- L'injection des courants fondamentaux pendant les régimes transitoires de la charge polluante.

Pour que cette tension  $V_{dc}$  soit maintenue constante, nous ajoutons à la puissance réelle instantanée une consigne de puissance active  $P_c$ . Cette régulation est plus lente que celle des courants harmoniques, ce qui permet de la considérer comme parfaite à l'échelle de la régulation des harmoniques[7]

La puissance absorbée aux bornes de condensateur peut s'écrire sous la forme suivante :

$$P_c = \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{2} C V_{dc}^2 \right) \quad (3.13)$$

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

$$P_c = C V_{dc} \frac{d}{dt} (V_{dc}) \quad (3.14)$$

$$V_{dc}(p) = \frac{P_c(p)}{V_{dc-ref} C p} \quad (3.15)$$

Nous avons utilisé un régulateur proportionnel intégral (PI) pour que la tension moyenne aux bornes du condensateur soit maintenue à une valeur quasi-constante. la valeur de la tension mesurée  $V_{dc}$  est comparée à sa référence  $V_{dc-r}$ . Le signal d'erreur est ensuite appliqué à l'entrée du régulateur PI.[1]

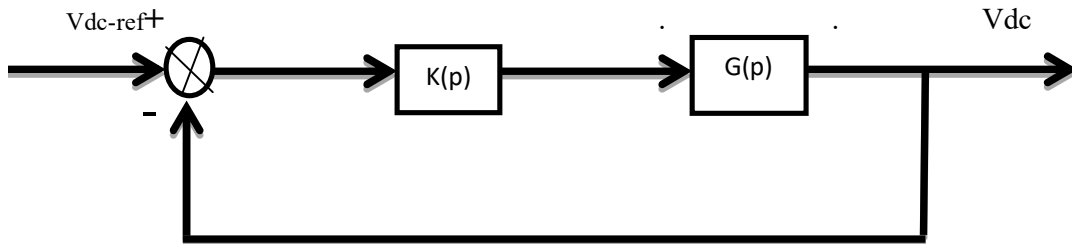
### III-5-1-Le Régulateur PI(Proportionnel-Intégrale)

Le régulateur PI (Proportionnel-Intégrale) classique permet de minimiser l'erreur statique. Il est donné par la formule suivante

$$C(p) = k_p + \frac{k_i}{p} \quad (3.14)$$

Ou par :

$$c(p) = \frac{1 + \tau_1.p}{\tau_1.p} \quad (3.15)$$



**Figure( III-7) :**Boucle de régulation de la tension continue du filtre actif parallèle

La fonction de transfert (régulateur plus système) en boucle fermée est

$$F(p) = \frac{\omega_c.(1+\tau)}{p^2+2\xi\omega_c.p+\omega_c^2} \quad (3.16)$$

Avec 
$$\omega_c = \sqrt{\frac{2}{C.\tau_1}} \quad (3.17)$$

Et 
$$\xi = \frac{\tau}{\sqrt{2.C.\tau_1}} \quad (3.18)$$

Nous seront amené à établir un compromis, entre la minimisation du taux de distorsion des harmoniques de courant THDi ,et la limitation des fluctuations de tension  $v_c(t)$ , ainsi que de minimiser le temps de cette fluctuation. On va choisir un amortissement  $\xi_c$  entre 0.4 et 0.8, soit  $\xi_c = 0.7$ . [5]

- l'application numérique de  $k_p$  et  $k_i$

$$\frac{k_p \cdot s + k_i}{s} \times \frac{1}{C \cdot s} = \frac{k_p \cdot s + k_i}{C \cdot s^2} \quad (3.19)$$

en BF

$$\frac{\frac{k_p \cdot s + k_i}{C \cdot s^2}}{1 + \frac{k_p \cdot s + k_i}{C \cdot s^2}} \quad (3.20)$$

$$\frac{k_p \cdot s + k_i}{C \cdot s^2 + k_p \cdot s + k_i} \quad (3.21)$$

On a la fonction de transfert du second ordre

$$S^2 + 2\omega_c^2 \xi s + \omega_c^2 \quad (3.22)$$

$$\omega_c = 2 \times \pi \times 18 \text{rad/s} \quad (3.23)$$

$$\xi = 0.7$$

$$k_i = \omega_c^2 \cdot C = 0.509$$

$$k_p = 2\xi \cdot \omega_c^2 = 7.898$$

### III -6- Commande par hystérésis

La commande par hystérésis, appelée aussi commande en tout ou rien, est une commande non linéaire qui utilise l'erreur existant entre le courant de référence et le courant produit par l'onduleur, cette erreur est comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis.[8]

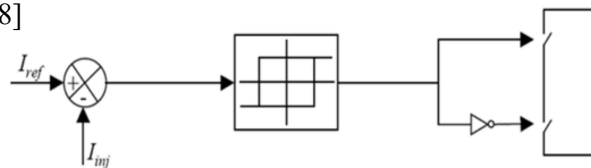


Figure (III-8): Comparateur a hystérésis.

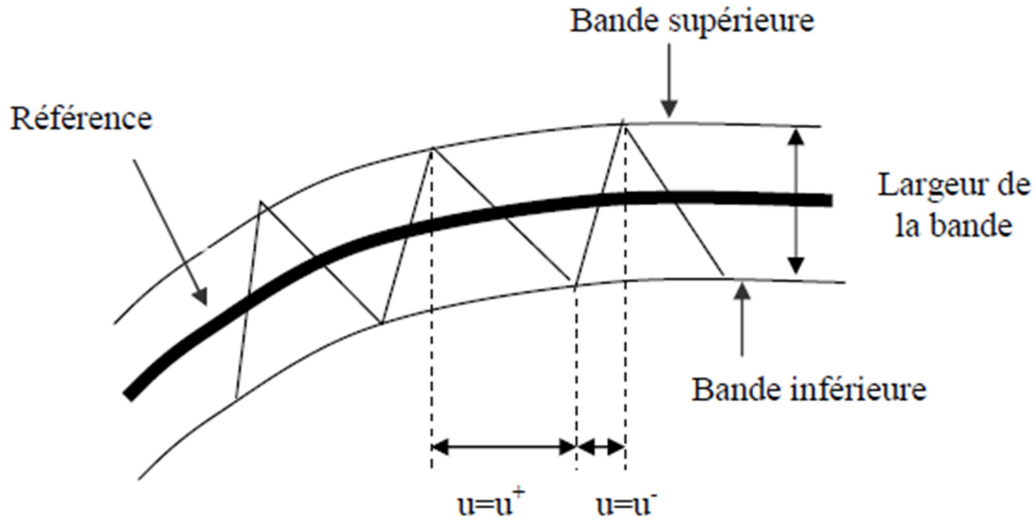


Figure (III-9): Principe de commande par hystérésis

### III-7-Filtrage hybride

La topologie du filtre hybride shunt triphasé sans transformateur est illustrée à la Figure IV.1 Le filtre hybride shunt triphasé est composé d'un filtre passif accordé à la 5<sup>ème</sup> ou 7<sup>ème</sup> harmonique, et un filtre actif de dimensionnement réduit formé par un onduleur de type source de tension. Le filtre actif joue un rôle essentiel en réduisant les harmoniques de courant de source. Dans ce cas, le filtre passif se comporte comme une faible impédance à la fréquence d'accord et comme une grande impédance à la fréquence fondamentale[4]

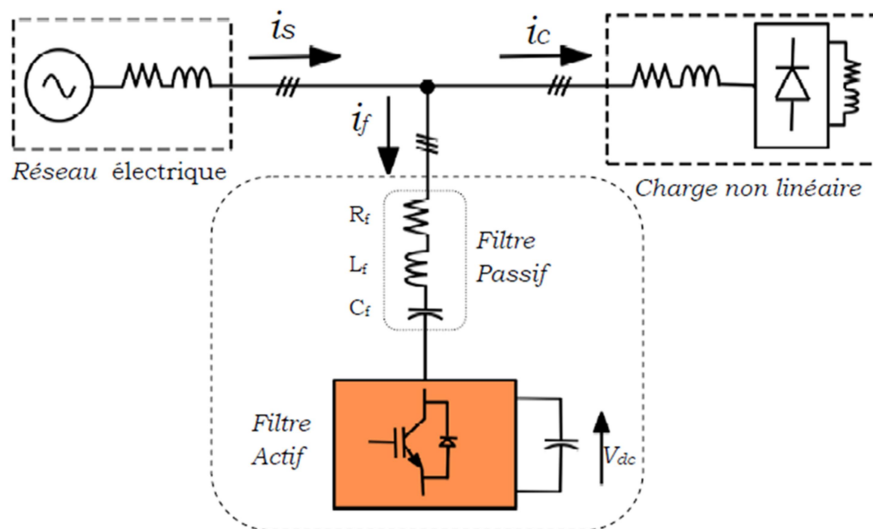


Figure (III-10) : filter hybride shunt triphasé

### III-7-1- Principe de la compensation harmonique par le filtre hybride

La figure Figure (III-11) montre le schéma équivalent par phase du système pour la compensation des harmoniques, dans lequel la tension de la source  $v_s$  est supposée purement sinusoïdale. Le filtre actif impose une tension instantanée VAF forçant la circulation d'un courant harmonique à travers les filtres passifs et améliorant ainsi leurs caractéristiques de compensation. Il fonctionne comme un générateur de tension et la valeur de la tension générée VAF est équivalente au produit d'un gain de la compensation harmonique K par la composante harmonique du courant source  $i_{sh}$  [4]

$$V_{FA} = i_{sh} K \quad (3.24)$$

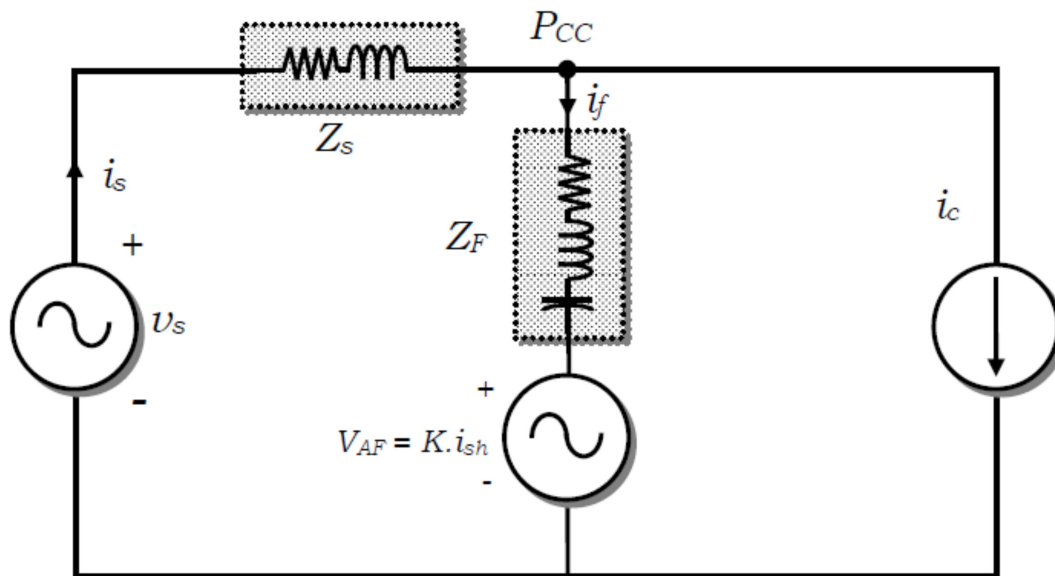
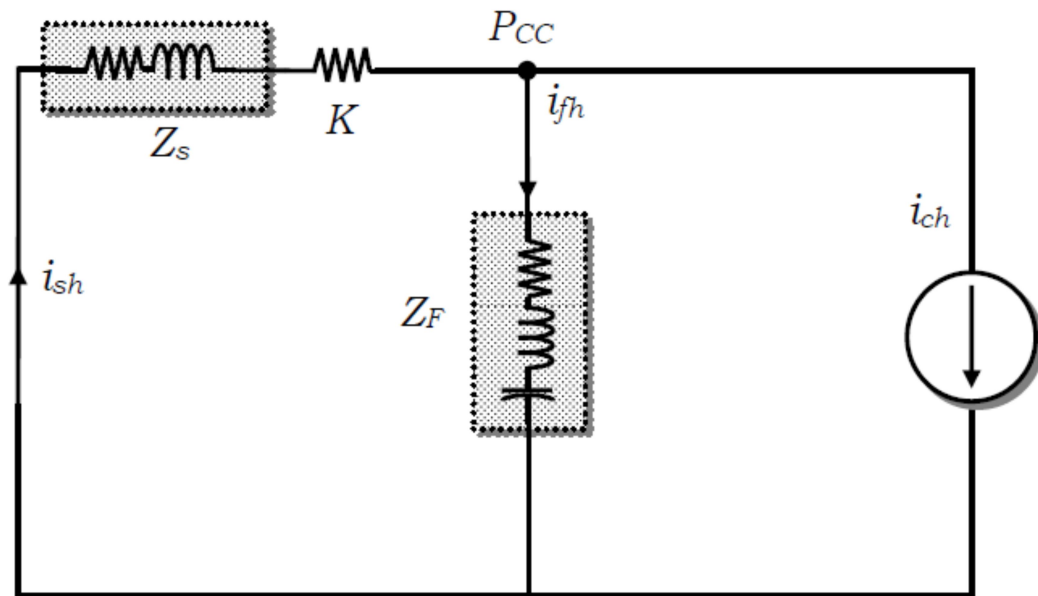


Figure (III-11) : Schémas équivalent de la phase a

A partir de la figure (III-11) qui présente le schéma équivalent vis-à-vis des harmoniques, nous pouvons déduire que, dans le cas où le filtre actif n'est pas connecté, c'est-à-dire lorsque  $K=0$ , en supposant que la tension de source soit équilibrée et sinusoïdale, le courant harmonique  $i_{sha}$  est alors défini par la relation

$$i_{sh} = \frac{Z_F}{Z_F + Z_s} i_{ch} \quad (3.25)$$





**Figure (III-12) :** Schémas équivalent de la phase a vis-à-vis des harmoniques

Quand le filtre actif est connecté et que  $K \neq 0$ , il va donc contribuer avec le filtre passif à l'absorption des courants harmoniques de la charge, on a donc  $i_{sh}$

$$i_{sh} = \frac{Z_F}{Z_F + Z_s + K} i_{ch} \quad (3.26)$$

A partir des équations (3.25) et (3.26), nous pouvons déduire que

$$V_{AF} = \frac{Z_F \cdot K}{Z_F + Z_s + k} i_{ch} \quad (3.27)$$

Le filtre actif agit comme une résistance  $K$  qui atténue les courants harmoniques en présentant une résistance élevée en regard de ces derniers. Si  $K$  est grand devant  $Z_f$ , les courants harmoniques absorbés par la charge vont donc majoritairement passer par le filtre LC. Si  $K$  est grand devant  $Z_s$ , la valeur de  $K$  déterminera alors les performances du filtrage. Si  $K$  tend vers l'infini, alors  $i_{sh}$  tend vers 0 et le filtrage est alors parfait.

À noter que la composante fondamentale des courants n'est pas affectée par le gain  $K$ . La performance de la compensation harmonique du filtre hybride peut être caractérisée par le taux d'atténuation des harmoniques, lequel est défini comme étant le rapport entre le courant harmonique dans la source et le courant

harmonique dans la charge non linéaire

$$\frac{i_{sh}}{i_{ch}} = \left| \frac{Z_{Fh}}{Z_{Fh} + Z_{sh} + K} \right| \quad (3.28)$$

L'influence du gain K sur la distorsion harmonique totale des courants de la source est un facteur important à examiner. L'expression de ce THD est donnée par

$$\text{THD}\% = \sqrt{\frac{\left( \left| \frac{Z_{Fh}}{Z_{Fh} + Z_{sh} + K} \right| \right)^2}{I_{sh}^2}} \quad (3.29)$$

Les relations (3.28) et (3.29) montrent que pour un gain K plus élevé, la compensation harmonique du filtre hybride est meilleure. Cependant, cela augmente la capacité du filtre actif puisque la tension imposée par le filtre actif est proportionnelle à K. La capacité du filtre actif est aussi influencée par le dimensionnement du filtre passif puisque ce dimensionnement détermine le courant circulant à travers le filtre actif.

### III-7-2-Commande en puissance du filtre hybride

La stratégie de commande fait l'objet de notre étude sur le filtre hybride, le but étant d'améliorer les caractéristiques du filtrage tout en utilisant une méthode de commande de complexité réduite. Nous utilisons la méthode des puissances instantanées afin d'identifier les références de courant. Pour cela, deux grandeurs sont mesurées :

- Les courants de charge  $i_{ch}$
- Les courants du filtre  $i_f[4]$

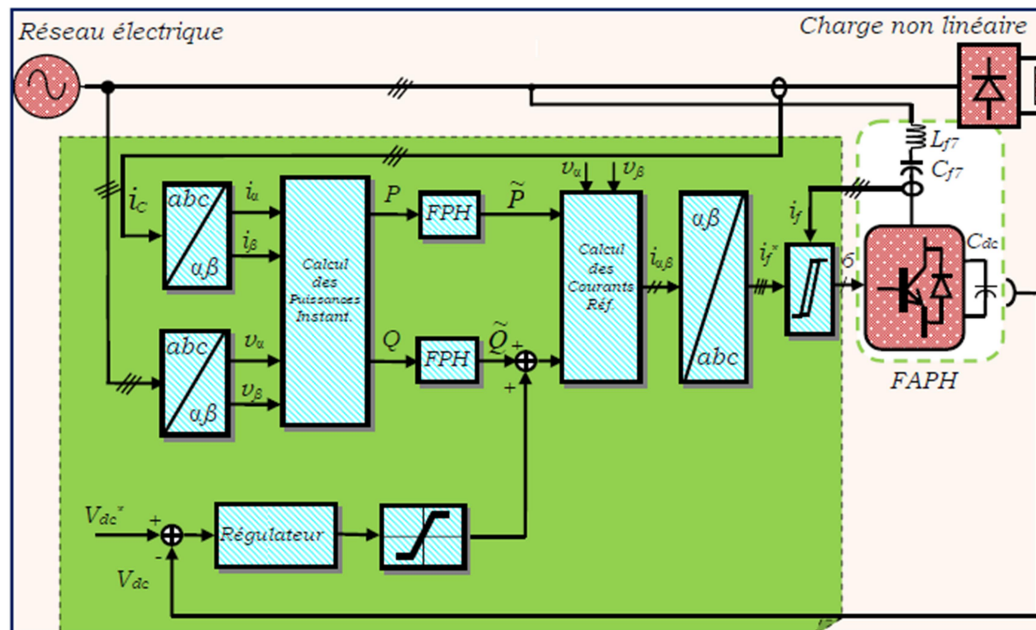


Figure (III-13) : Commande du FAP Hybride par la méthode des puissances active et réactive instantanées

### III-8-conclusion

Dans ce chapitre on a présenté la stratégie de commande et identification d'un filtre actif parallèle. Premièrement on a présenté la partie de puissance qui compose un onduleur de tension et élément de stockage d'énergie et finalement filtre de sortie. La partie de commande et d'identification est basé sur l'identification de courants harmoniques par la méthode des puissances instantanées pour extraire les courants harmonique comme montre les résultats de simulation de cette méthode. La régulation de la tension continue appliquée aux éléments de stockage d'énergie et la commande de l'onduleur de tension sont présentées. La dernière section de ce chapitre est consacré au filtre hybride, son principe de compensation des harmonique et sa commande.

#### IV-1-Introduction :

Dans ce chapitre nous allons présenter les résultats de simulation obtenus pour les trois types de filtre, à savoir filtre passif, filtre actif et filtre hybride. Ces résultats ont été obtenus à l'aide du logiciel Matlab/Simulink en utilisant également le Toolbox « SimPowerSystem ».

#### IV-2- Structure générale du Filtre hybride

Le système simulé est composé d'un filtre actif triphasé à structure tension et d'un filtre passif triphasé, classiquement accordé sur l'harmonique 7 pour des raisons liées à l'encombrement. Ces deux filtres sont directement connectés en série sans transformateur. L'ensemble est ensuite connecté en parallèle sur le réseau près de la charge non linéaire, comme le présente la figure (IV.1)

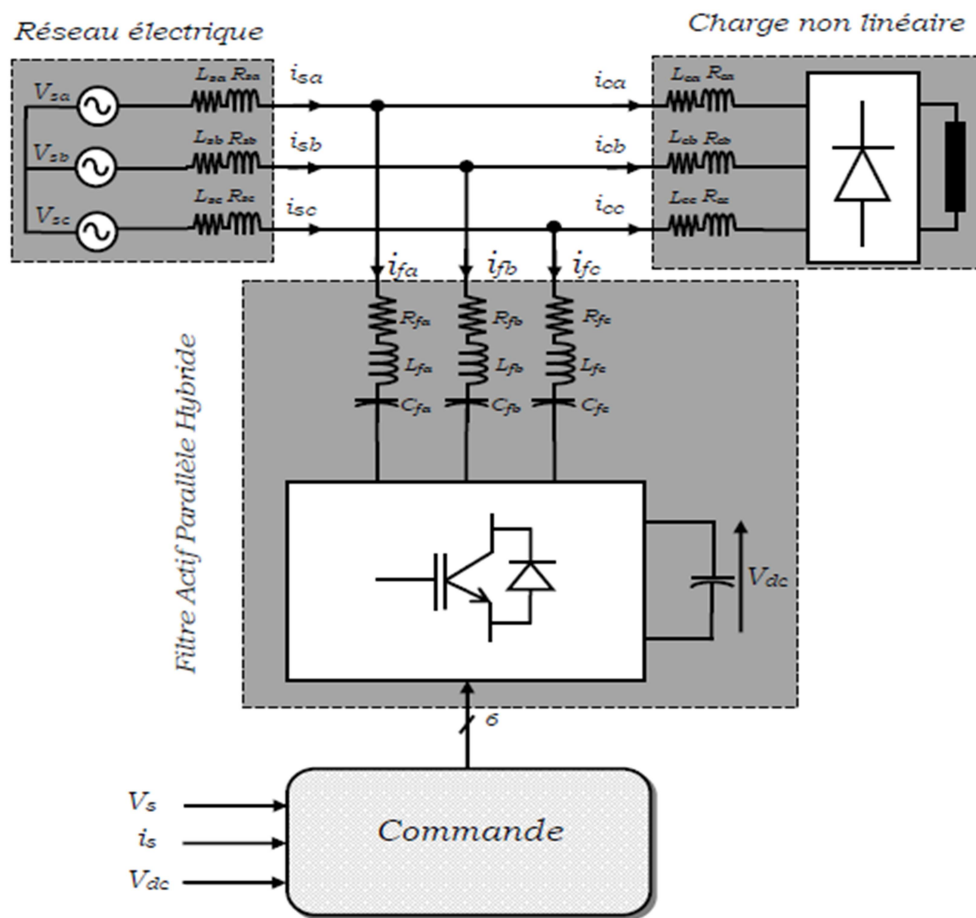


Figure (IV.1) : Structure générale du Filtre hybride

La simulation est effectuée à l'aide des paramètres du système présentés dans le tableau (IV.1)

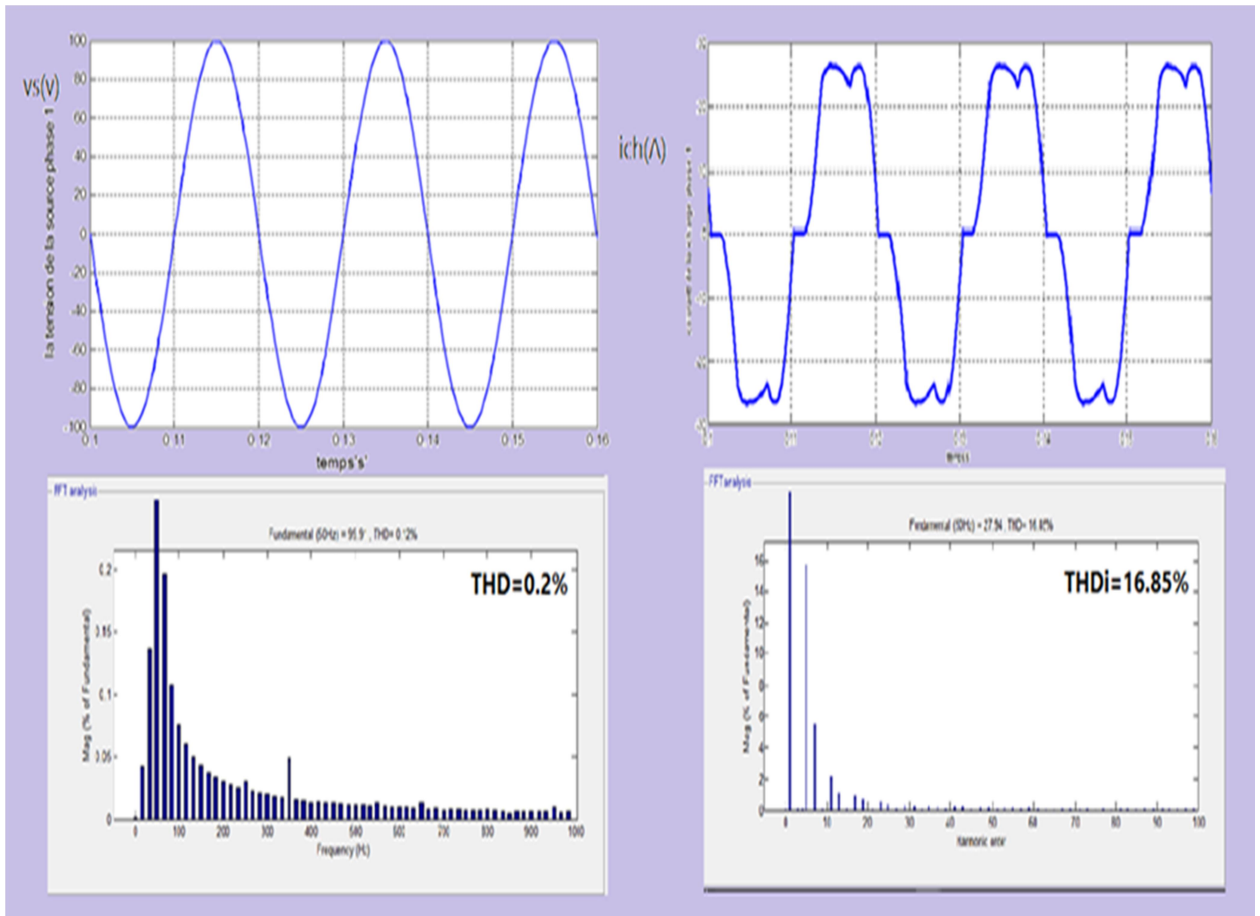
Partie du système	Désignations	Valeurs
<b>Réseau électrique</b>	- Tension maximale	- $V_{sm} = 100 \text{ V}$
	- Fréquence	- $f = 50 \text{ Hz}$
	- Impédance interne	- $R_s = 0.42\Omega$
		- $L_s = 2.3^e-3 \text{ H}$
<b>Charge non linéaire</b>	- Pont Redresseur triphasé Avec charge résistif	$R_{ch}=5\Omega$
	- Impédance du filtre à L'entrée du pont (PD3)	$L=2^e-3 \text{ H}$ $R=0.8 \Omega$
<b>Filtre hybride parallèle</b>	- Condensateur de stockage	- $C_{dc} = 1100 \mu\text{F}$
	- Filtre de couplage	- $R_f = 0.01 \Omega$
		- $L_f = 1.9 \text{ mH}$
		- $C_f = 110 \mu\text{F}$
	- Tension de référence	- $V_{dc\_ref} = 50 \text{ V}$
	-Régulateur PI	- $k_p=7.898$ - $k_i=0.509$

**Tableau IV.1** Paramètres de simulations

#### IV-3- Résultat De Simulation Et Analyse avant le filtrage :

Le réseau électrique est représenté par une source de tension triphasée parfaitement sinusoïdale d'amplitude  $V_s$ , de fréquence  $f$ , d'impédance interne ( $R_s, L_s$ ). La charge non linéaire, génératrice des courants harmoniques et consommant de la puissance réactive, est modélisée par un pont redresseur débitant sur une charge résistive.

On remarque que le courant de la charge est riche en harmonique et présente un THD de 16.85% comme montre la figure (IV.2)



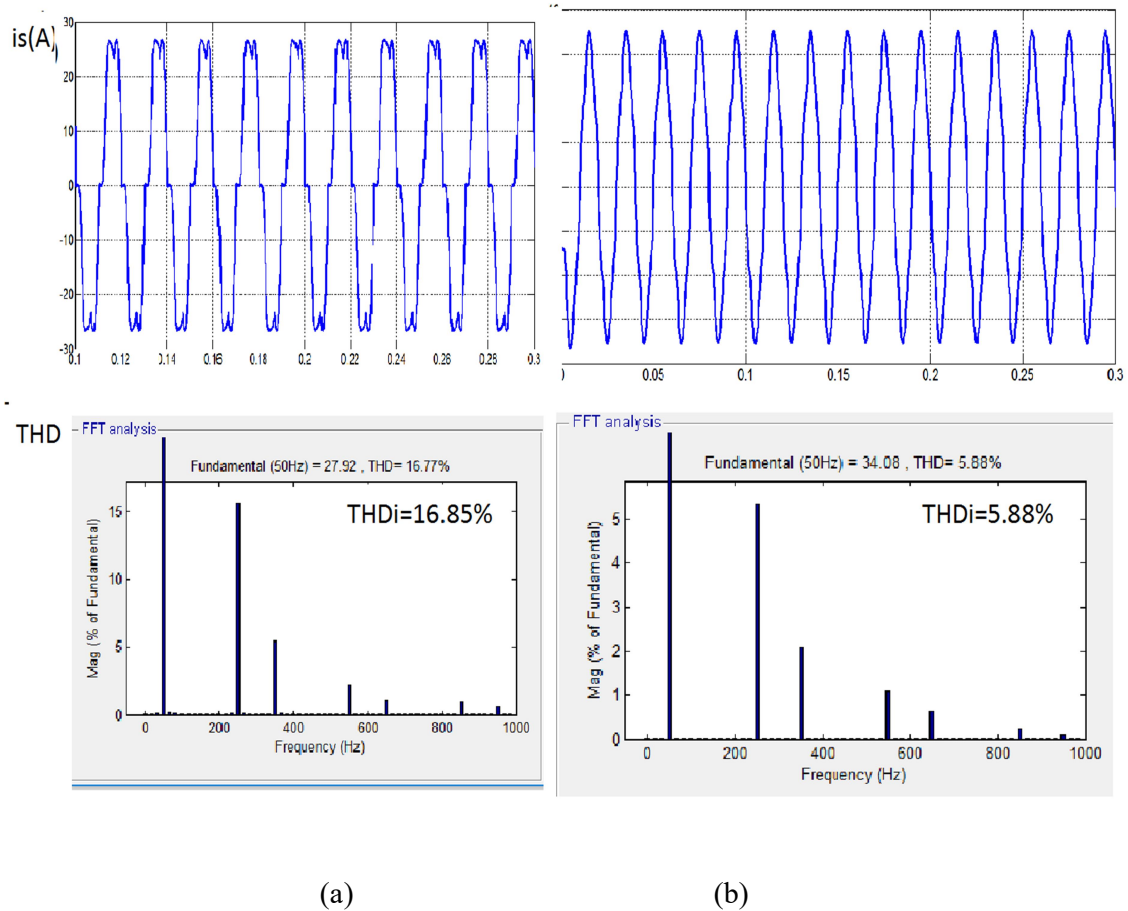
(a)

(b)

**Figure (IV.2) :** Formes d'ondes (a) tension de la source et son spectre (b) courant absorbé par la charge de et son spectre

#### IV-4- Résultat De Simulation d'un filtre passif

Notre travail a été commencé par la simulation d'un filtre passif pour compensé l'harmonique rang 7, les résultats de simulation dans ce cas sont illustrés par la figure (IV.3). Le filtre passif permet une réduction des harmoniques de courant. La valeur de THD est réduite à 5. % après filtrage.



**Figure (IV.3) :** (a) Courant de source avant le filtrage avec son spectre, (b) courant de source après le filtrage avec son spectre

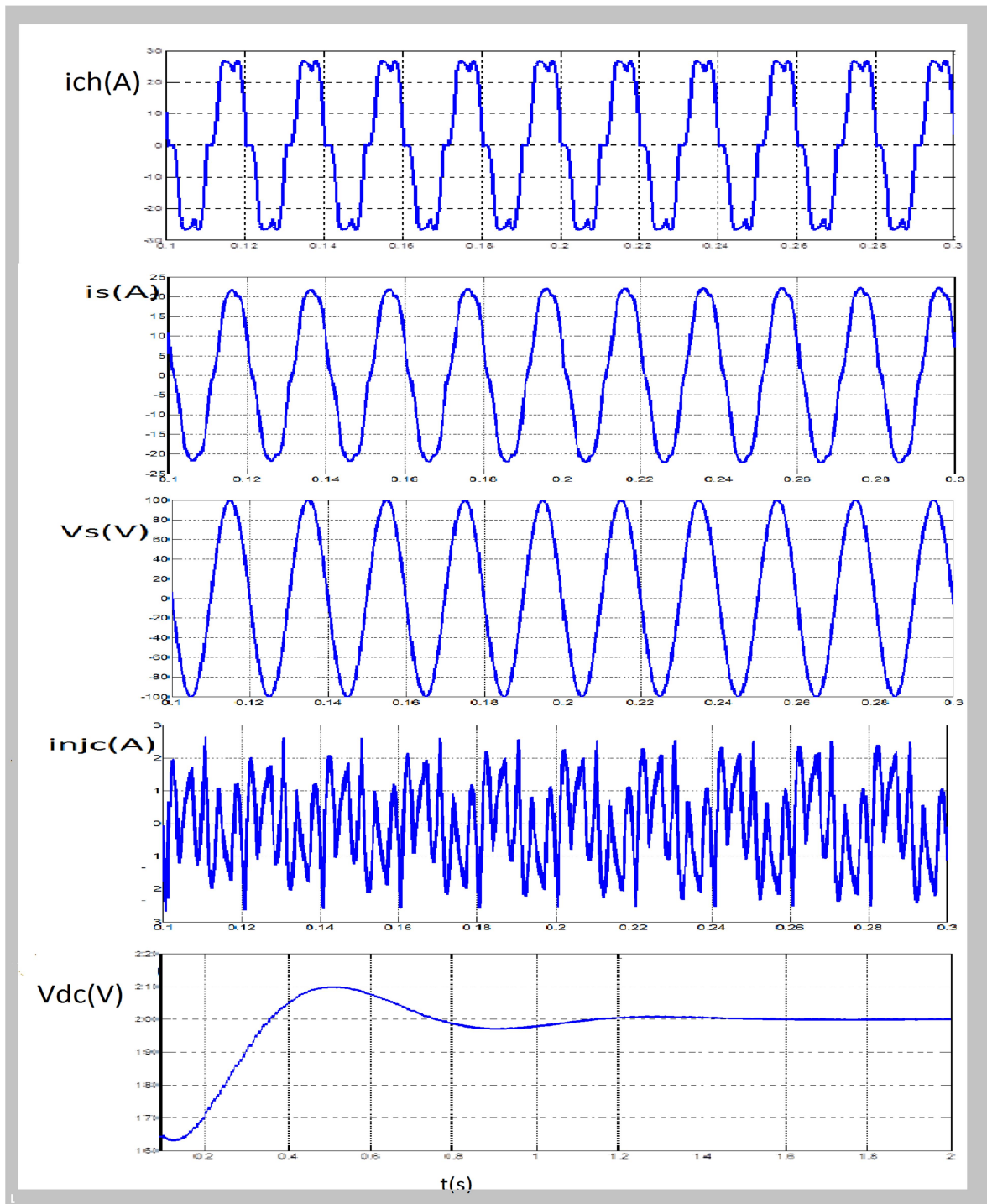
#### IV-5-Résultat de Simulation du filtre actif parallèle

Nous allons présenter les résultats de simulation de filtre actif parallèle après la connexion avec le réseaux électrique.

La figure (IV.5) présente, de haut en bas et pour une seule phase , les formes d'ondes du courant de la charge polluante  $i_{ch}$  et le courant du réseau  $i_s$ , la tension du réseau  $V_S$ , le courant de compensation injecté par le filtre actif dans le réseau  $i_{inj}$  et la tension du bus continu  $V_{dc}$ .

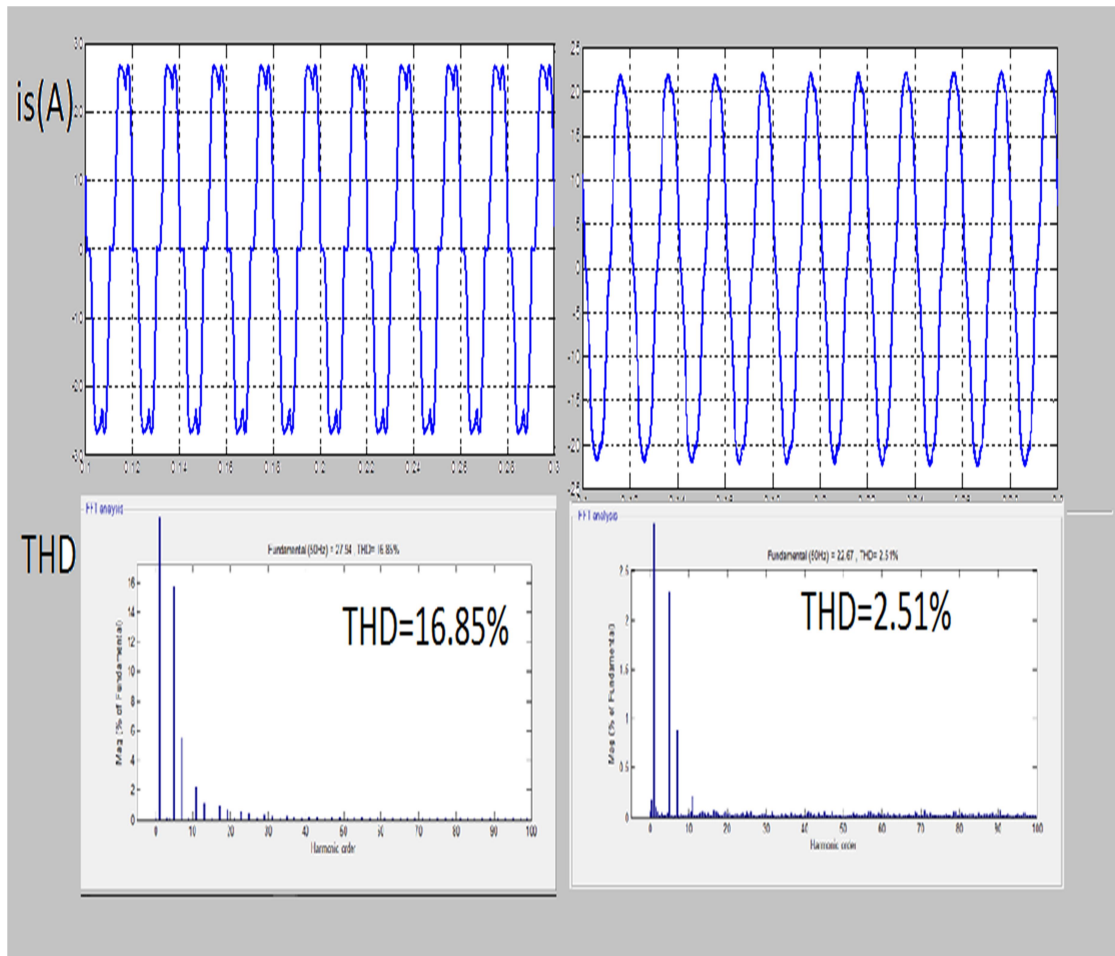
Ces résultats de simulations montrent que le courant du réseau est en phase avec la tension du réseau donc un facteur de puissance unitaire, ce courant présente un  $THDi$  qui décroît de 16.85% à 2.512%. Par ailleurs, la tension  $V_{dc}$  du bus continu (aux bornes du

condensateur de stockage  $C_{dc}$ ) arrive à atteindre très rapidement son niveau de potentiel de référence  $V_{dref}$  fixé à 200 V ce qui montre l'efficacité du régulateur PI.



**Figure (IV.4) :** Résultats de simulation de filtre actif parallèle : courant de source  $i_s$  (A), la tension de source  $V_s$  (V), courant du filtre  $i_{njc}$  (A), tension du bus continu  $V_{dc}$  (V)





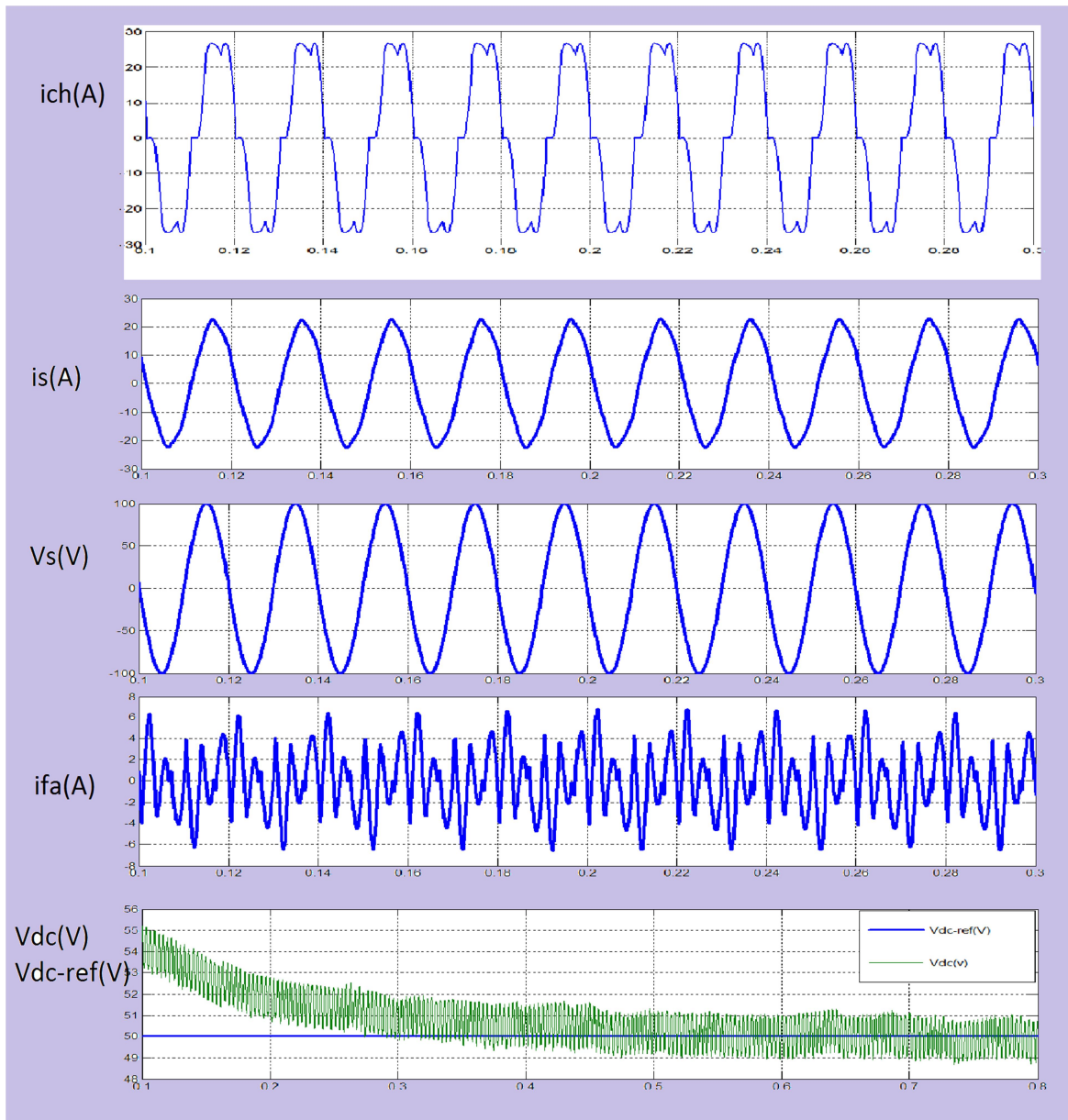
(a)

(b)

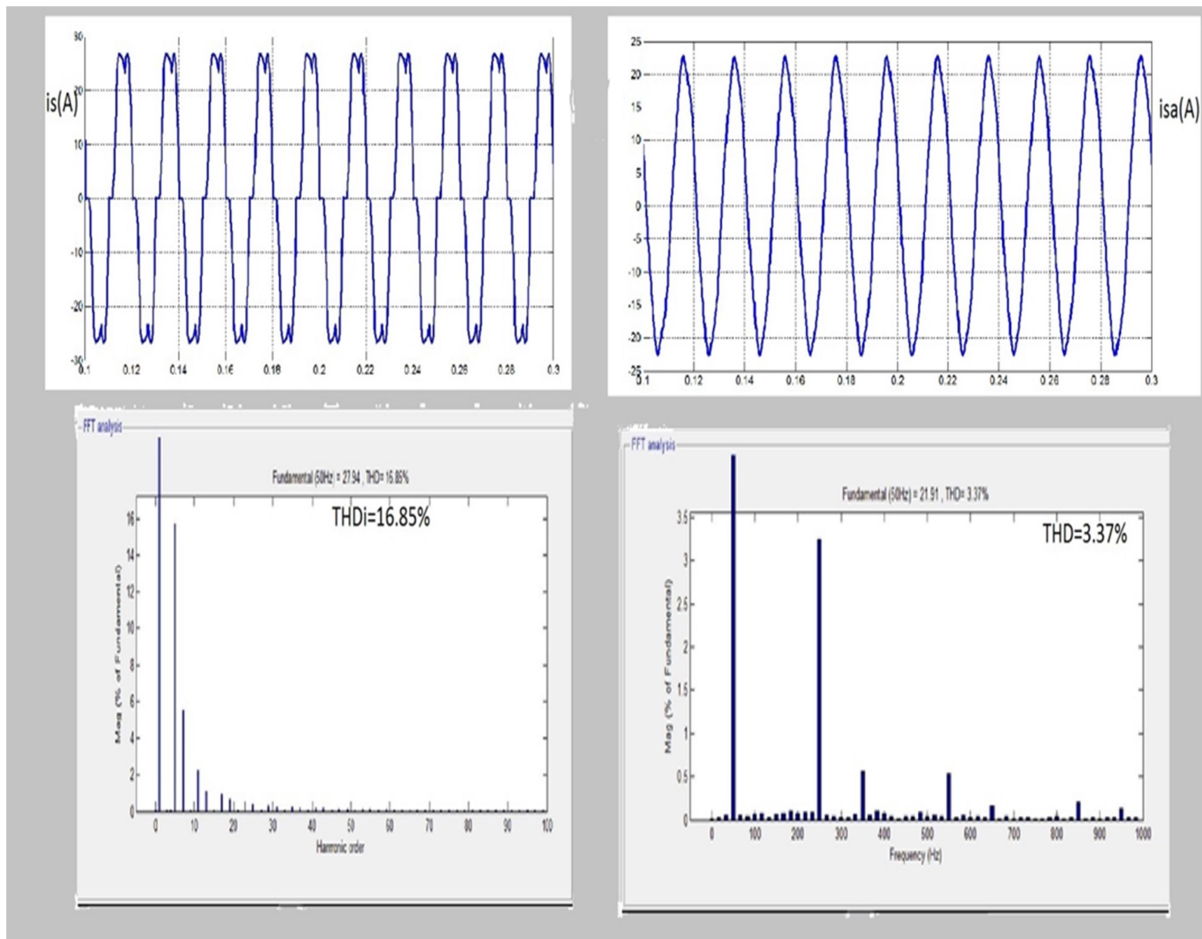
**Figure (IV.5) :** (a) Courant de source avant le filtrage avec son spectre, (b) courant de source après le filtrage avec son spectre

#### IV-6- Résultat de Simulation après la connexion d'un filtre hybride

La figure IV.6 présente, de haut en bas et pour une seule phase (a), les formes d'ondes du courant de la charge polluante  $i_{ch}$ , la tension du réseau  $V_s$ , du courant du réseau  $i_s$ , du courant  $i_f$  de compensation injecté par le FAPP dans le réseau et de la tension du bus continu Vdc (V).



**Figure (IV.6) :** Résultats de simulation du filtre hybride :courant de la charge  $i_{ch}$  courant de source  $i_s(A)$ , la tension de source  $V_s(V)$  courant du filtre  $i_{nct}(A)$ .tension du bus continu  $V_{dc}(V)$  et sa référence



(a)

(b)

**Figure (IV.9) :** (a) Courant de source avant le filtrage avec son spectre, (b) courant de source après le filtrage avec son spectre

- **Interprétation**

Sur la figure IV.9, nous pouvons après l'injection des courants de compensation  $i_f$ , les courants du réseau redevenir quasi-sinusoidaux avec un  $THDi$  qui décroît de 16.85% à 3.37%, et en phase avec leurs tensions correspondantes. Par ailleurs, la tension  $V_{dc}$  du bus continu arrive à atteindre sa valeur de référence  $V_{dcref}$  à 50 V au lieu de 200V vu dans le cas du filtre actif parallèle. Cette baisse de tension de référence de 200 à 50V réduit considérablement les valeurs des tensions bloqués par les transistors de l'onduleur ce qui réduit les pertes de puissance dans l'onduleur et améliore le rendement du système.

## Conclusion générale


Le travail est basé sur l'étude et simulation d'un filtre hybride pour l'objectif de la compensation des courants perturbateurs harmoniques générés par la charge non linéaire, en utilisant le logiciel MATLAB-Simulink et le Toolbox SimPowerSystem,

Dans cette étude on a été commencé par l'étude de filtre actif parallèle et on a détaillé la stratégie de commande et d'identification basée sur la méthode de la puissance instantanée active et réactive pour extraire les courants harmoniques générés par la charge non linéaire. L'onduleur de tension est commandé par la commande à hystérésis et la tension du bus continu aux bornes du condensateur est régulée par un régulateur PI.

Le filtre hybride simulé est constitué d'un filtre actif triphasé à structure tension connecté en série avec un filtre passif triphasé de type RLC, accordé sur septième harmonique. Le filtre actif joue un rôle essentiel en réduisant le harmonique de courant de source. Dans ce cas, le filtre passif se comporte comme une faible impédance à la fréquence d'accord et comme une grande impédance à la fréquence fondamentale.

Les résultats de simulation montrent que le filtre passif prend en charge la compensation d'une partie des harmoniques et le filtre actif maintient les performances de filtrage, et le taux de distorsion obtenu après la connexion du filtre hybride est  $THD=3.37\%$ .

**Bibliographie**  
*Class*  
*of 2017*



## Bibliographie

- [1] Daamech Mossaab, « étude et simulation d'un filtre hybride parallèle », mémoire d'ingénieur 2014. Université de Biskra.
- [2] [http://www.chauvinarnoux.com/sites/default/files/documents/appli\\_f\\_harmoniques\\_ed1.pdf](http://www.chauvinarnoux.com/sites/default/files/documents/appli_f_harmoniques_ed1.pdf)
- [3] Sanae rechaka, «étude des méthodes de filtrage des harmonique dans le réseaux de distribution» », mémoire d'ingénieur en génie électrique l'université du québec à trois-rivières 2002
- [4] Mustapha Sarra « contribution a l'étude des filtres actifs hybrides », Doctorat en électronique, Université de Setif.
- [5 ] « Régulation de la tension d'alimentation du filtre actif parallèle par PI adaptatif »
- [6] Omerir amar « simulation d'un filtre active parallèle de puissance pour la compensation des harmoniques de courant» Doctorat en Commande électrique universite de annaba 2007
- [7].Mohamd.muftah abdu slam. «structure et stratégies de commande des filters actives» Doctorat en électrotechnique 2008
- [8] .zellouma laid «compensation d'harmonique et de la puissance réactive à l'aide de filtre active parallèle» mémoire d'ingénieur El-Oued 2015
- [9]. « Chapitre I Pollution harmonique – Norme »
- [10]. Mohamad Alaa Eddin Alali «Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension » Doctorat en électronique, Université de Louis Pasteur – Strasbourg 2002
- [11]Sahli Abdeslem « Filtrage actif et contrôle de puissances : application aux systèmes photovoltaïques interconnectés au résea » mémoire setif magister 2012
- [12]. NEKKAR Djamel Contribution « à Etude des Stratégies de Commande des Filtres Actifs Triphasés » Mémoire de Magister Souk-Ahras 2013/2014

