



Université Mohamed Khider de Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Électrique  
Filière d'Electrotechnique

# MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies  
Génie Électrique  
Réseaux Electrique

Réf. :

---

Présenté et soutenu par :

**Hadfi Hassene**

Le : lundi 8 juillet 2019

## **Etude et Commande d'un Filtre Actif Parallèle à quatre bras**

---

### **Jury :**

Mr.	CHAROUF omar	MAA	Université de Biskra	Président
Mr.	BENCHOUIA mohamed toufik	Pr	Université de Biskra	Encadreur
Mme.	DERRADJI BELLOUM karima	MAA	Université de Biskra	Examineur



Université Mohamed Khider de Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Électrique  
Filière d'Electrotechnique

# MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies  
Génie Électrique  
Réseaux Electrique

Réf. :

---

Présenté et soutenu par :

**Hadfi Hassene**

Le : lundi 8 juillet 2019

## **Etude et Commande d'un Filtre Actif Parallèle à quatre bras**

---

Présenté par:  
HADFI Hassene

Avis favorable de l'encadreur:

Avis favorable du Président du Jury :

Cachet et signature

Année universitaire : 2018 - 2019

# *Remerciements*

*Tout d'abord remercier Dieu qui nous donne la patience et la volonté de faire ce travail humble dans de meilleures conditions et en bon état.*

*Je remercie également le Dr. **Benchouia Med Toufik** Pour toute son aide au cours de ma période d'étude pour ce sujet intéressant.*

*Nous remercions aussi les membres du Jury d'avoir accepté de juger notre travail.*

*Je remercie mes parents, peu importe ce que je m'offre autant. Je tiens également à remercier tous mes amis, sans exception, d'avoir apporté un soutien moral tout au long de la préparation de ce résumé.*

## *Dédicaces*

*Je dédie cet humble travail à ma mère et à mon père qui*

*J'ai planté dans mon cœur l'amour de la science et de la  
connaissance depuis mon enfance.*

*Je dédie également ce travail à tous mes professeurs pendant  
ma période d'études.*

*Je n'oublie pas de consacrer mon travail à ma famille et aux  
bourgeons de ma famille : Youssef et Amani et Duea et Lina  
ma chère nièce Sajida et ayte arahmene Et leur frère Moataz.*

*Je dédie aussi tous mes amis sans exception.*

*Je me souviens en particulier : Med Tahre , Masoudi, Fatiha,  
Housseem Mi, Isame Fr, Lamine et Oussama, Khalde Namouse,  
Lmghari, Kamel , ramzi , Mino, badi, toufa, rizki.*

## Résumé (Français et Arabia)

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 document est une contribution à l'amélioration de la qualité du courant électrique dans les réseau électrique.

Nous avons étudié le filtre actif parallèle à quatre bras et nous avons utilisons dans ce filtre différentes charges (équilibré et déséquilibré),et nous avons identifié le courant harmonique en utilisant la méthode du référentiel synchrone, Cette simulation a donné de très bons résultats.

Les résultats du simulations témoignent de l'importance du filtrage harmonique du courant électrique.

**Mots-clés:** filtre actif parallèle à quatre fils- les harmoniques - référentiel synchrone.

### ملخص

ان مشكلة التلوث بالتوافقيات في الشبكة الكهربائية هي في تفاقم مقلق خاصة مع تزايد استعمال الحمولات غير خطية. تمثل هذه الذاكرة المساهمة في تحسين نوعية التيار الكهربائي في الشبكة الكهربائية.

قمنا بدراسة المصفي المتوازي الفعال ذو اربعة أذرع و استخدمنا في هذا المصفي مختلف الحمولات (متوازنة وغير متوازنة، و حددنا التيار التوافقي باستعمال طريقة المستودع المتزامن، أعطيت هذه المحاكاة نتائج جيدة جدا.

نتائج المحاكاة تبين أهمية تصفية التوافقي للتيار الكهربائي.

**مفاتيح الكلمات :** المصفي المتوازي الفعال ذو اربعة خيوط - التوافقيات - المستودع المتزامن.

## LISTE DES FIGURES

Figure	Titre	Page
<b>Figure(I.1)</b>	Image d'une onde déformée.	4
<b>Figure (I.2)</b>	Diagramme vectorielle du facteur de puissance.	10
<b>Figure (I.3)</b>	Déférentes solution utilisées dans le filtrage du courant .	13
<b>Figure (I.4.a)</b>	Filtre passif parallèle.	13
<b>Figure (1.4.b)</b>	Filtre passe haute.	13
<b>Figure (I.5)</b>	Filtre bouchon.	14
<b>Figure (I.6)</b>	Schéma de filtre passif parallèle.	14
<b>Figure (I.7)</b>	Simulation d'un Filtre passif parallèle quatre fils (avant filtrage).	16
<b>Figure (I.8)</b>	Simulation d'un Filtre passif parallèle quatre fils (après filtrage).	17
<b>Figure (I.9)</b>	Principe du filtrage actif parallèle.	18
<b>Figure (I.10)</b>	Déférentes configurations d'un filtre actif monophasé.	19
<b>Figure (I.11)</b>	Configuration d'un FAP à trois fils.	19
<b>Figure (II.1)</b>	Principe du filtrage actif parallèle d'un réseau triphasé à quatre bras	23
<b>Figure (II.2)</b>	Onduleur à quatre bras pour un réseau triphasé à quatre fils.	24
<b>Figure (II.3)</b>	Filtres d'extraction	31
<b>Figure (II.4)</b>	Schéma du FMV.	32
<b>Figure (II.5)</b>	Identification par la méthode des puissances instantanées avec FPB+FMV.	32
<b>Figure (II.6)</b>	Identification par la méthode de référentiel synchrone avec FPB.	34
<b>Figure (II.7)</b>	Boucle de régulation de la tension continue	35
<b>Figure (II.8)</b>	Principe de la commande par hystérésis.	36
<b>Figure (III.1)</b>	Schéma de charges équilibré.	38
<b>Figure (III.2)</b>	Schéma de charges déséquilibré.	38
<b>Figure (III.3)</b>	Simulation du réseau à trois charges monophasées équilibré	40
<b>Figure (III.4)</b>	Simulation du FAP à quatre bras par la méthode R S avec FPB (charge équilibré).	42
<b>Figure (III.5)</b>	Simulation du FAP à quatre bras dans le cas les charges déséquilibré.	44
<b>Figure (III.6)</b>	Simulation du FAP à quatre bras par la méthode R S avec FPB (charge déséquilibré).	47
<b>Figure (III.7)</b>	Tension aux bornes du condensateur.	47

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
<b>Table I.1</b>	Conséquences des creux de tension sur quelques équipements électriques sensibles.	8
<b>Table I.2</b>	Paramètres du système étudié et paramètre de charge.	15
<b>Table I.3</b>	Caractéristiques des filtres actifs et passifs.	20
<b>Table II.1</b>	Tensions générées par l'onduleur de tension à quatre bras	25
<b>Table II.2</b>	Les modes de compensation de la commande des puissances instantanées.	30
<b>Table III.1</b>	paramètres du système étudié.	39
<b>Table III.2</b>	paramètre de charge	39
<b>Table III.3</b>	THD des courant de source.	48

## LISTE DES SYMBOLES ET ACRONYMES

CEI	Commission Electrotechnique Internationale
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
$I$	courant total
$I_h$	courant harmonique de rang $h$ qui représente le fondamental pour $h=1$
$R$	résistance traversée par le courant $I$
BT	Basse tension
P	Puissance active
Q	Puissance réactive
S	Puissance déformante
D	puissance de distorsion
$F.P$	facteur de puissance
$\varphi_1$	Le déphasage entre la puissance active et la puissance apparente
$\gamma$	Le déphasage entre la puissance apparente dans le cas d'un système équilibré
$\varphi$	Le déphasage entre la puissance active et la puissance apparente $S$
$S_i$	Taux harmonique de rang $i$
THD	Taux global de distorsion harmonique
$THD_i$	THD en courant
$THD_V$	THD en tension
$I_i$	Valeur efficace du Courant harmonique du rang $i$
$I_1$	La valeur efficace du Courant fondamental
$V_i$	Valeur efficace du Tension harmonique du rang $i$
$V_1$	La valeur efficace du Tension fondamental
$I_{sa}, I_{sb}, I_{sc}$	Courants de la source
$I_{ca}, I_{cb}, I_{cc}$	Courants du côté alternatif de la charge
$I_{fa}, I_{fb}, I_{fc}$	Courants du côté alternatif du filtre
$I_{fa}^*, I_{fb}^*, I_{fc}^*$	Courants de référence du filtre
$I_{fn}$	Courants du neutre côté filtre
$V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}$	Tensions de la source
FAB	Filtre actif parallèle

$V_{fa}, V_{fb}, V_{fc}$	Tensions côté alternatif de l'onduleur
$V_{dc}$	Tension du bus continu
$V_{dc}^*$	Tension de référence du bus continu
$R_{sa}, R_{sb}, R_{sc}$	Résistances de la source
$R_{ca}, R_{cb}, R_{cc}$	Résistances côté alternatif de la charge
$L_{fa}, L_{fb}, L_{fc}$	Inductances côté alternatif du filtre
$L_{sa}, L_{sb}, L_{sc}$	Inductances de la source
$L_{ca}, L_{cb}, L_{cc}$	Inductances côté alternatif de la charge
$K_i$	Constante integral
$K_p$	Constante proportionnel
$i_0$	Courant homopolaire
FPB	Filtre Passe Bas
FPH	Filtre Passe Haut
FMV	Filtre Multi-variables
PI	Régulateur Proportionnel Integral
MLI	Boucle de verrouillage de la phase
PLL	Modulation de largeur d'Impulsion
SRF	Méthode de référence synchrone
$C$ et $C^{-1}$	Transformation et transformation inverse de Concordia
$V_{fmax}$	La valeur maximale de la tension à l'entrée de l'onduleur.
$V_{smax}$	La valeur maximale de la tension simple au point de raccordement du filtre.
$I_d$	Courant côté continu de la charge
$I_s$	La valeur efficace du courant de la charge coté alternatif dans les trois phases.
$f_s$	La fréquence fondamentale du réseau électrique
$\omega_h$	La pulsation la plus faible des harmoniques à compenser
$\Delta V_{dc}$	Différence entre les tensions du condensateur
$I_h$	Courant harmonique de la charge
$C_{dc}$	Condensateur du bus continue
$I_n$	le courant du neuter
$V_\alpha, V_\beta, V_0$	Tensions perturbateurs calculés dans le repère $\alpha$ - $\beta$ -0

$i_\alpha, i_\beta, i_0$	Courants perturbateurs calculés dans le repère $\alpha$ - $\beta$ - 0
$\bar{v}_\alpha$	Tension fondamental sur l'axe - $\alpha$
$\bar{v}_\beta$	Tension fondamental sur l'axe - $\beta$
$p$	puissance réelle
$q$	puissance Imaginaire
$\bar{p}, \bar{q}$ et $\bar{p}_0$	Composantes continues des puissances instantanées.
$\tilde{p}, \tilde{q}$ et $\tilde{p}_0$	Composantes alternatives des puissances instantanées.
PIRI	Puissances Instantanées Réelle et Imaginaire
$p(\theta)$ et $P^{-1}(\theta)$	Transformation et transformation inverse de Park
FPP	Filtre passif parallèle
$id$	Courant sur l'axe direct
$idh$	Courant harmonique sur l'axe direct
$idf$	Courant fondamental actif sur l'axe direct
$iq$	Courant sur l'axe quadratique
$iqh$	Courant harmonique sur l'axe quadratique
$iqf$	Courant réactif sur l'axe quadratique
$\tilde{v}_\alpha$	Tension harmonique sur l'axe $\alpha$
$\tilde{v}_\beta$	Tension harmonique sur l'axe $\beta$
$\xi$	Coefficient d'amortissement

## Sommaire

<b>Introduction Générale</b>	1
<b>Chapitre I Perturbation et dépollution dans le réseaux électriques</b>	
I.1 Introduction	3
I.2 Dégradation de la qualité d'énergie dans les réseaux électriques	3
I.2.1 Perturbations harmoniques	4
I.2.2 Déséquilibre de tension	6
I.2.3 Creux de tension	7
I.2.4 Variation de la fréquence	8
I.3 Caractérisation et normes	9
I.3.1 Puissance active	9
I.3.2 Puissance réactive	9
I.3.3 Puissance déformante	9
I.3.4 Facteur de puissance	10
I.3.5 Taux harmonique de rang i	11
I.3.6 Taux global de distorsion harmonique	11
I.3.7 THD en courant ou en tension	11
I.3.8 Normes imposées sur le THD	12
I.4 Solutions de dépollution du courant dans les réseaux électriques	13
I.4.1 Solutions traditionnelles	13
I.4.2 Solutions modernes	18
I.5 Comparaison entre les filtres passifs et les filtres actifs	20
I.6 Conclusion	21
<b>Chapitre II Commande d'un filtre actif parallèle à quatre bras</b>	
II.1 Introduction	22
II.2 Constituants d'un filtre actif parallèle à quatre Bras	23
II.3 Étude de la partie de la puissance	23
II.3.1 Description d'un onduleur triphasé à quatre bras	24
II.3.2 Filtre de couplage	25
II.3.3 Système de stockage d'énergie	26
II.4 Étude de la partie commande	28
II.4.1 Identification des courants polluant	28
II.4.1.1 Méthode des puissances instantanées réelle, imaginaire et homoploaire avec	

FBP+FMV	28
II.4.1.2 Méthode de référentiel synchrone avec FPB	33
II.4.2 Régulation de la tension du bus continue	34
II.4.3 Contrôle de l'onduleur par hystérésis	35
II.5 Conclusion	36
<b>Chapitre III Simulation de l'ensemble réseau, charge polluant et FAP à quatre bras</b>	
III.1 Introduction	37
III.2 Schéma de simulation	38
III.2.1 Paramètres de la simulation	39
III.2.2 Résultats des simulations	39
III.2.2.1 Cas de charge équilibré	39
III.2.2.2 Interprétations des résultats	42
III.2.2.3 Cas de charge déséquilibré	42
III.2.2.4 Interprétations des résultats	48
III.3 Conclusion	48
<b>Conclusion Générale</b>	49
<b>Bibliographique</b>	50

Ces dernières années, l'utilisation croissante des dispositifs d'électronique de puissance dans les systèmes électriques a entraîné de plus en plus de problèmes liés aux perturbations ou distorsions harmoniques des réseaux électriques. Ce phénomène touche l'ensemble des secteurs industriels (utilisation de gradateurs, de redresseurs, de variateurs de vitesse,...), tertiaire (informatique ou éclairage des bureaux, commerce,...) et domestique (téléviseurs, appareils électroménagers grand public,...) [01].

Les harmoniques générées par les charges non linéaires circulent dans les réseaux électriques et qui absorbent des courants non sinusoïdaux. Ces harmoniques de courant vont à leur tour générer des tensions harmoniques aux différents points de connexion au réseau. Pour les autres équipements électriques connectés en ces points, cette pollution harmonique à des effets néfastes peuvent apparaître instantanément ou se produire en différé, on peut notamment citer la déformation de la tension réseau au point de raccordement alors que le distributeur d'énergie est tenu de fournir une tension propre. Cette pollution peut également conduire à l'échauffement des câbles et peuvent perturber le fonctionnement normal de certains équipements électriques ou bien encore à l'arrêt soudain de machines tournantes. Les limites proposées ont été établies par les normes de la commission international d'électrotechnique IEC61000, et par les recommandations IEEE Std. 519-1992 [07].

Pour garantir les normes de qualité, le filtrage actif d'harmoniques, et en particulier le filtrage shunt a prouvé son efficacité comme une alternative aux solutions traditionnelle basées sur les filtres passifs, en raison notamment de la bande passante et la flexibilité. Au cours des dernières années, plusieurs travaux ont été réalisés et sanctionnés par des réalisations pratiques de tels systèmes, mais la majorité des cas pour des systèmes triphasés à trois fils (sans distribution du fil neutre), or il se trouve que dans les réseaux basse tension, le fil neutre est souvent distribué, ce qui fait apparaître des composantes homopolaires (harmonique 3 et ces multiples impaires), notamment à cause des charges non linéaires monophasées. A cet effet, le filtre actif à quatre fils est plus adéquat, du fait de la distribution du quatrième fil, qui permet de compenser le courant du neutre [03].

Dans l'étude, l'objectif sera de contrôler un filtre actif parallèle à quatre bras, dans le but de Minimisation en courants harmoniques.

Notre mémoier est subdivisé en troi chapitres :

Dans ce premier chapitre, nous allons présenter les types et les causes des perturbations de courant et la tension dans les réseaux électriques. Ces désordres sont des harmoniques, des déséquilibres, des tensions faibles, leurs conséquences, des normes internationales imposées aux utilisateurs, qui proposent des solutions traditionnelles et un filtrage moderne.

## ***Introduction Générale***

---

Dans le deuxième chapitre, nous allons présenter la structure générale du filtre actif parallèle à quatre bras composé en deux parties : la partie puissance et la partie contrôle-commande. La partie puissance constituée en trois blocs sont l'onduleur de tension à quatre bras, le circuit de stockage d'énergie et le filtre de couplage, nous aborderons l'identification des courants perturbés, la régulation de la tension continue on utilise le régulateur Proportionnel-Intégral (PI), et la commande par hystérésis.

Dans le troisième chapitre, nous allons d'étudier la simulation de l'ensemble réseau, trois charges monophasées: trois charges identiques alimentée par trois redresseurs monophasés, et trois charges non identiques alimentée par un gradateur monophasé, et deux redresseurs monophasés. Filtre actif parallèle à quatre bras sous l'environnement Matlab-Simulink. On donne ensuite les résultats de simulation obtenus.

# Chapitre I

## **I.1 Introduction**

Généralement, le distributeur d'énergie délivre l'énergie électrique sous forme de trois tensions constituant un système sinusoïdal triphasé. Les paramètres caractéristiques de ce système sont la fréquence, l'amplitude, la forme d'onde, qui doit être sinusoïdale et la symétrie du système triphasé. Mais depuis quelques années, avec l'évolution technologique des composants d'électronique de puissance les distributeurs d'énergie rencontrent plusieurs problèmes liés à l'accroissement du nombre de convertisseurs statiques raccordés aux réseaux de distribution d'énergie. En effet, ces convertisseurs sont des sources polluantes qui absorbent des courants non sinusoïdaux et consomment pour la plupart de la puissance réactive. 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. Elles 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 [01].

Ce chapitre commence par connaître les propriétés des perturbations électriques, Comprendre l'origine des perturbations ,des conséquences.

La deuxième partie, on présente la caractérisation et les normes imposées sur le THD par la CEI et l'IEEE.

La pré-finale , on présenter les solutions traditionnelles et modernes utilisées pour dépolluer les réseaux électriques et enfin on compare entre les différentes solutions.

## **I.2 Dégradation de la qualité d'énergie dans les réseaux électriques**

La qualité d'énergie est un concept très large qui peut se définir par rapport à la continuité de la fourniture électrique et la forme de la tension disponible. L'évaluation de cette qualité consiste habituellement à caractériser les perturbations électromagnétiques parmi lesquelles on peut citer :

- Les perturbations harmoniques
- Les déséquilibres de tension
- Les creux de tension et coupures
- Les variations de la fréquence d'alimentation, etc.

Ces perturbations peuvent être groupées en quatre catégories selon qu'elles affectent l'amplitude, la forme d'onde, la fréquence et la symétrie. Elles peuvent aussi être classées selon qu'elles soient permanentes, semi-permanentes ou aléatoires (foudre, court-circuit, manœuvre...).

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

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

La mesure de ces paramètres permet de juger la qualité de la tension. Une détérioration de l'un d'entre eux ou de plusieurs à la fois laisse supposer la présence d'une anomalie dans le réseau électrique [02].

## I.2.1 Perturbations harmoniques

### I.2.1.1 Définition.

Un harmonique est défini comme étant une composante sinusoïdale d'un signal périodique, ayant une fréquence multiple de l'onde fondamentale. Le domaine des fréquences qui correspond à l'étude des harmoniques est généralement compris entre 100 Hz et 2000 Hz (entre les harmoniques de rangs  $h=2$  et  $h=40$ ).

L'amplitude de rang 1 est appelée la composante fondamentale du signal électrique périodique; dans notre cas c'est la (50 HZ) [01].

l'amplitude de chaque harmonique est inversement proportionnelle à son ordre.

Les premiers rangs harmoniques tel que (3, 5, 7) ont des amplitudes élevées, d'où l'importance des courants injectés, raison pour laquelle il faut limiter ces harmoniques dans les normes [03], la figure (I.1) suivante représente la forme d'onde fondamentale et la forme d'onde harmonique et la forme d'onde déformée.

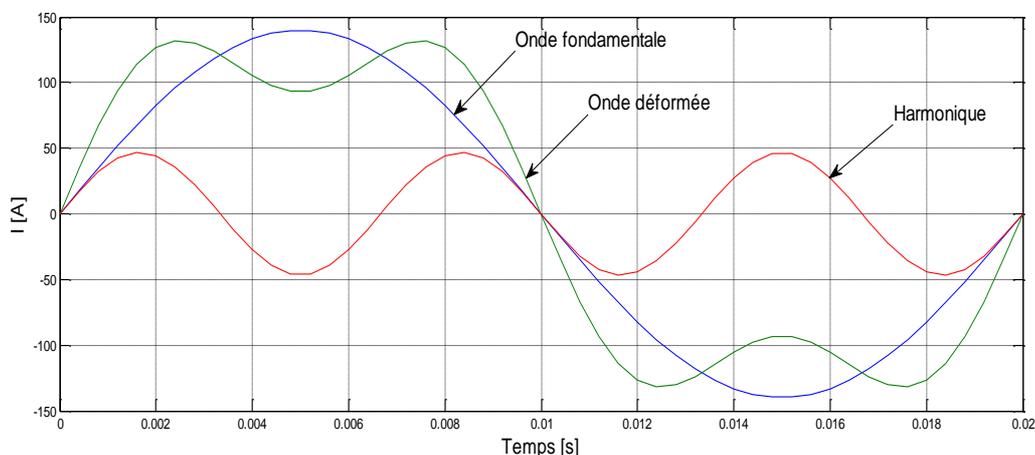


Figure (I.1): Image d'une onde déformée.

### I.2.1.2. Origine des harmoniques

Dans les secteurs industriels et domestiques on constate un accroissement de générateurs d'harmoniques. Il s'agit des dispositifs, tels que les convertisseurs statiques, contenant des éléments de commutation ainsi que d'autres dispositifs à caractéristique tension-courant non linéaire :

- Convertisseurs statiques

Les convertisseurs statiques sont les sources d'harmoniques les plus gênantes du fait du nombre et de la puissance des dispositifs installés. On peut citer de manière non exhaustive :

- Les redresseurs monophasés et triphasés. Ils génèrent des harmoniques dont la fréquence dépend sensiblement de la commande adoptée .

- Les cyclo-convertisseurs utilisés pour régler la vitesse des moteurs à courant alternatif

Les gradateurs utilisés dans les entraînements de faible puissance, les systèmes d'éclairage de chauffage ...

- Les variateurs de vitesse électroniques constitués principalement d'un convertisseur statique et d'une partie électronique, destinés à commander la vitesse d'un moteur électrique.

- Dispositifs à caractéristique tension-courant non linéaire, on distingue :

- Les fours à arc et à induction.

- Les transformations.

- Les machines tournantes.

- Inductances saturées , etc [14 - 15].

### I.2.1.3 Conséquences des harmoniques

De nombreux effets des harmoniques sur les installations et les équipements électriques peuvent être cités. Les effets les plus importants sont l'échauffement, les défauts de fonctionnement de certains équipements électriques et le risque d'excitation de résonance [4].

**a- L'échauffement** : Les pertes totales par effet Joule sont la somme de celles du fondamental et des harmoniques :

$$I^2 \cdot R = R \sum_{h=1}^{\infty} I_h^2 \quad ( I.1)$$

Avec :

✓  $I$  : courant total.

✓  $I_h$  : courant harmonique de rang  $h$  qui représente le fondamental pour  $h=1$ .

✓  $R$  : résistance traversée par le courant  $I$ .

Les harmoniques augmentent aussi les pertes fer (pertes par courants de Foucault). Ils prennent de l'importance dans les matériels utilisant les circuits magnétiques (moteurs ,transformateurs...etc.)

Le vieillissement des isolants est souvent dû à une contrainte en tension consécutive à La présence de la tension harmonique et donc à une augmentation locale du courant de fuite, ou encore à l'échauffement exagéré dans les conducteurs [5].

## **B- Défauts de fonctionnement de certains équipements électriques**

En présence d'harmoniques, la tension et le courant peuvent changer plusieurs fois de signe dans une demi-période. Les appareils dont le fonctionnement est basé sur le passage à zéro des grandeurs électriques peuvent être affectés [6].

- **Les défauts de fonctionnements de certains équipements électriques**

En présence des harmoniques, la tension (ou le courant) peut changer plusieurs fois de signe dans une demi-période; par conséquent, tout appareil dont le fonctionnement est basé sur le passage par zéro des grandeurs électriques (appareils utilisant la tension comme référence) peut être perturbé [1].

- **Le risque d'excitation de résonance**

Les fréquences de résonance des circuits formés par des inductances du transformateur et des câbles sont normalement élevées. Ce n'est pas le cas lorsque des batteries de capacité sont raccordées au réseau pour relever le facteur de puissance; les fréquences de résonance peuvent devenir assez faibles, et coïncider ainsi avec celles des harmoniques engendrés par les convertisseurs statiques. Dans ce cas, il y aura des phénomènes d'amplification d'harmoniques [1].

### **I.2.2 Déséquilibre de la tension**

Un récepteur triphasé électrique qui n'est pas équilibré et que l'on alimente par un réseau triphasé équilibré conduit à des déséquilibres de tension dus à la circulation de courants non équilibrés dans les impédances du réseau. Ceci est fréquent pour la réceptrice monophasée basse tension. Mais cela peut également être engendré, à des tensions plus élevées, par des machines à souder, des fours à arc ou par la traction ferroviaire [7].

### I.2.2.2 Conséquences du déséquilibre

Il est plus intéressant d'aborder le problème du déséquilibre par type d'équipement. Le déséquilibre d'une installation triphasée peut entraîner un dysfonctionnement des appareils de basses tensions connectés [17] :

- Mauvais fonctionnement d'un appareil monophasé alimenté par une tension très faible (lampe à incandescence qui fournit un mauvais éclairage).
- Destruction d'un appareil monophasé alimenté par une tension trop élevée, il peut être détruit (claquage d'un filament de lampe par surtension).

Concernant les dispositifs triphasés d'électronique de puissance, principalement les ponts redresseurs, le fonctionnement en présence de déséquilibre entraîne l'apparition de composantes harmoniques non caractéristiques, notamment des harmoniques de rang multiple de 3. L'apparition de ces courants harmoniques peut poser des problèmes, comme la génération d'une antirésonance lors du filtrage de l'harmonique de rang 5. Outre les effets classiques des harmoniques, ces fréquences non caractéristiques peuvent conduire, dans certains cas, au blocage de la commande [04].

La conséquence des composantes inverses sur les machines tournantes est la création d'un champ tournant en sens inverse du sens de rotation normal, d'où un couple de freinage, parasite et des pertes supplémentaires qui provoquent l'échauffement de la machine [5].

Concernant l'effet du déséquilibre homopolaire, il faut signaler le risque d'échauffement du conducteur neutre dans un réseau BT qui, lorsque le conducteur est d'un diamètre trop faible, peut provoquer une rupture du conducteur ou un incendie [3].

### I.2.3 Creux de tension

#### I.2.3.1 Origine des creux de tension.

Un creux de tension est une diminution brusque de la tension de fourniture. Cette diminution, située entre 90% et 10% de la tension nominale  $U_n$ , est suivie du rétablissement de la tension après un court laps de temps. Un creux de tension peut durer de 10 ms à 3 mn .

La plupart des appareils électriques admettent une coupure totale d'alimentation d'une durée inférieure à 10 ms [01].

Il y a deux types de phénomènes à l'origine des creux de tension :

- Les creux provenant du fonctionnement d'appareils à charge fluctuante ou de la mise en service d'appareils appelant un courant élevé au démarrage (moteurs, transformateurs...etc.).

- Les creux liés aux phénomènes aléatoires, comme la foudre ou tous les courts circuits accidentels sur les réseaux de distribution ou les réseaux internes des clients (défaut d'isolation, protection de branches sur les lignes aériennes... etc) [05].

### I.2.3.2 Conséquences des creux de tension

Les creux de tension sont susceptibles de perturber le fonctionnement de certaines installations industrielles et tertiaires. En effet, ce type de perturbation peut causer des dégradations de fonctionnement des équipements électriques qui peuvent aller jusqu'à la destruction totale de ces équipements. Le tableau (I.1) résume les conséquences néfastes causées par les creux de tension sur quelques matériels industriels et tertiaires sensibles [16].

**Table I.1:** Conséquences des creux de tension sur quelques équipements électriques sensibles.

Types d'appareils	Conséquences néfastes
Eclairage	Moins de luminosité, extinction et réallumage (lampes à arc)
Systèmes à base d'électronique de puissance	Arrêt du dispositif
Dispositifs de protection	Ouverture des contacteurs
Moteurs asynchrones	Ralentissements, blocage, surintensité au retour de la Tension
Moteurs synchrones	Perte de synchronisme, décrochage et arrêt du moteur
Variateurs de vitesse pour un moteur à courant continu	<ul style="list-style-type: none"> <li>• En mode onduleur : destruction des protections</li> <li>• En mode redresseur : ralentissement de la machine</li> </ul>
Variateurs de vitesse pour un moteur asynchrone	Ralentissement blocage, surintensité au retour de la tension, destruction éventuelle de matériel au niveau du convertisseur

### I.2.4 Variation de la fréquence

Les réseaux de distributions ou de transports ont une fréquence constante, sa variation est très rare sauf dans des circonstances exceptionnelles, comme dans le cas de certains défauts graves sur le réseau. Dans les conditions normales d'exploitations, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle de 50 Hz  $\pm$ 1% [11].

### I.3 Caractérisation et normes

#### I.3.1 Puissance active

La puissance active  $P$  d'un signal comportant des harmoniques est la somme des puissances actives dues aux tensions et courants de même rang. La décomposition de la tension et du courant en leurs composantes harmoniques nous Donne [03] :

$$P = \sum_{i=0}^{\infty} (U_i I_i \cos\phi_i) \quad (\text{I.2})$$

$\phi_i$  étant le déphasage entre la tension et le courant de l'harmonique de rang  $i$ . En l'absence d'harmoniques, on retrouve bien l'expression :

$$P = U_1 I_1 \cos\phi_1 \quad (\text{I.3})$$

#### I.3.2 Puissance réactive

La puissance réactive n'est définie que pour le fondamental, soit [03]:

$$Q = U_1 I_1 \sin\phi_1 \quad (\text{I.4})$$

#### I.3.3 Puissance déformante

Considérons la puissance apparente  $S$  [03]:

$$S = U_{eff} I_{eff} \quad (\text{I.5})$$

En présence d'harmoniques, on peut écrire :

$$S^2 = \left( \sum_{i=0}^{\infty} (U_i^2) \right) \sum_{i=0}^{\infty} (I_i^2) \quad (\text{I.6})$$

Par conséquent, en présence d'harmoniques, la relation  $S^2 = P^2 + Q^2$  n'est pas valide. On définit la puissance de distorsion  $D$  telle que :

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

### I.3.4 Facteur de puissance

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

Dans le cas où il y a des harmoniques, une puissance supplémentaire appelée la puissance déformante ( $D$ ), donnée par la relation (I. 8), apparaît comme le montre le diagramme de Fresnel de la figure (I.2) [07].

$$D = 3 \cdot V_1 \sqrt{\sum_{h=2}^{50} I_h^2} \quad (\text{I.8})$$

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

$$F.P = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} = \cos\varphi_1 \cdot \cos\gamma \quad (\text{I.9})$$

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

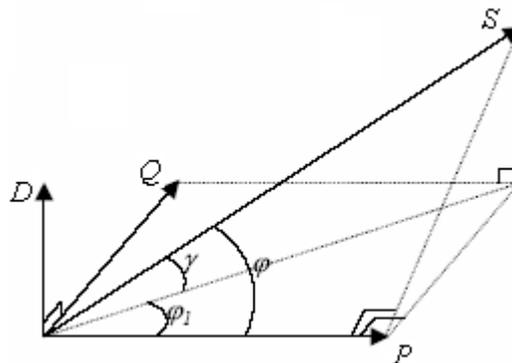


Figure (I .2) : diagramme vectorielle du facteur de puissance

$\varphi_1$ : Le déphasage entre la puissance active et la puissance apparente.

$\gamma$  : Le déphasage entre la puissance réactive dans le cas d'un système équilibré.

linéaire  $S_I$  et la puissance apparente dans le cas déséquilibré non linéaire  $S$ .

$\varphi$  : Le déphasage entre la puissance active et la puissance apparente  $S$ .

### I.3.5 Taux harmonique de rang i

Elle est définie par :

$$S_i = h_i / h_1 \quad (\text{I.10})$$

ou  $h_i$  représente la composante harmonique de rang  $i$ ,  $h_1$  représente la composante fondamentale [03].

### I.3.6 Taux global de distorsion harmonique

$$\text{THD} = \sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} h_i^2 / h_1^2} \quad (\text{I.11})$$

Le terme THD correspond au (Total Harmonic Distortion), représente le rapport entre la valeur efficace des harmoniques et la valeur efficace du fondamental. Le taux de distorsion harmonique est une notion très utilisée pour définir l'importance du contenu harmonique d'un signal alternatif [03].

### I.3.7 THD en courant ou en tension

Il existe deux sortes de THD : en tension (apparaît à la source) ou en courant (dû aux charges non linéaires)

Lorsqu'il s'agit des harmoniques de courant, l'expression devient [01][10][18]:

$$\text{THD}_i = \sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} I_i^2 / I_1^2} \quad (\text{I.12})$$

- ✓  $I_i$  : Valeur efficace du Courant harmonique du rang  $i$
- ✓  $I_1$  : La valeur efficace du Courant fondamental

Lorsqu'il s'agit des harmoniques de tension, l'expression devient :

$$\text{THD}_V = \sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} V_i^2 / V_1^2} \quad (\text{I.13})$$

- ✓  $V_i$  : Valeur efficace du Tension harmonique du rang  $i$
- ✓  $V_1$  : La valeur efficace du Tension fondamental

### **I.3.8 Normes imposées sur le THD**

Afin de garantir un niveau de qualité de l'énergie satisfaisant en limitant les effets des perturbations harmoniques, les distributeurs d'énergie et les utilisateurs sont amenés à respecter des normes et des recommandations qui définissent les règles relatives à la compatibilité électromagnétique (CEM) définies [13]:

- au niveau international par la CEI,
- au niveau européen par le CENELEC,
- au niveau français, par l'UTE et le CEF,

En effet , ces normes ont été établies par des groupes d'experts internationaux, qui représentent les constructeurs, les utilisateurs de matériels, ainsi que par des représentants de laboratoires d'essais, des consultants et des universitaires spécialistes du domaine considéré.

Afin de faciliter la connaissance des normes pour chaque domaine, les normes CEI qui couvrent tous les domaines de l'électrotechnique sont numérotées et référencées comme par exemple CEI 61000 sur la compatibilité électromagnétique et CEI 60063 qui définit les séries de valeurs normalisées pour les résistances et condensateurs ,...etc. Les normes internationales publiées par la CEI dans les domaines de l'électricité et de l'électronique ont pour objectifs de :

- faciliter les échanges dans le monde en supprimant les barrières techniques,
- assurer la qualité des produits,
- garantir l'interopérabilité des produits et des systèmes,
- contribuer à la sécurité lors de l'utilisation des produits,
- contribuer à la protection de l'environnement et à la qualité de vie.

Au niveau international (CEI), les normes CEI 61000 publiées dans le domaine de la compatibilité électromagnétique (CEM) sont divisées en plusieurs parties, conformément à la structure suivante:

- Généralités,
- Environnement,
- Limites,
- Techniques d'essais et de mesures,
- Guide d'installation et d'atténuation,
- Normes génériques.

## I.4 Solutions de dépollution du courant dans les réseaux électriques

Afin de compenser les perturbations du courant, deux groupes de solution de dépollution, traditionnelle et moderne existent, Voir figure (I.3) [01][03].

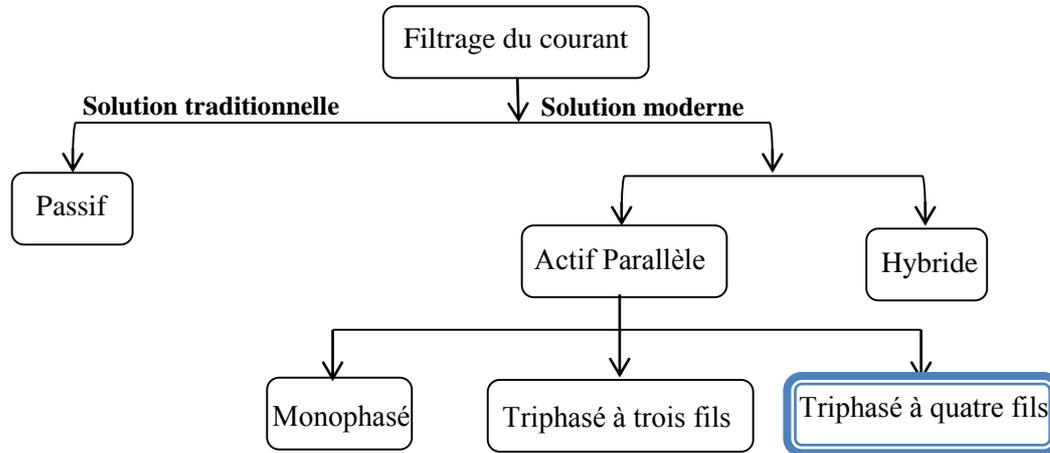


Figure (I.3): Différentes solutions utilisées dans le filtrage du courant.

### I.4.1 Solutions traditionnelles

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

- Stat compensateur : 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 [08].

#### a- Filtre passif parallèle

On place en parallèle sur le réseau d'alimentation une impédance très faible accordée à la fréquence de l'harmonique à piéger.

On a alors cette structure [08]:

$$z_{\text{éq}} = \frac{1 - jL\omega^2}{jL\omega} \quad (\text{I.14})$$

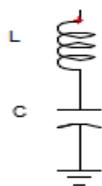


Figure (I.4.a): Filtre passif parallèle

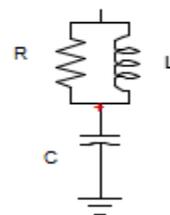


Figure (I.4.b): Filtre passe haut

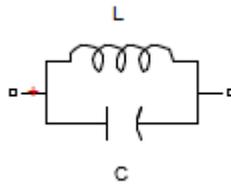
On peut également mettre en filtre passe-haut pour les harmoniques supérieur à h 11 ce qui aura pour effet de diminuer le nombre de filtres.

En jouant sur la valeur de R on rend le filtre plus ou moins sélectif.

### b- Filtre passif série :

Le principe de ce filtre est le même que le précédent mais au lieu de piéger les harmoniques on les empêche de remonter à la source [08].

Un exemple de filtre passif série est le circuit bouchon.



Figure(I.5): filtre bouchon

$$z_{\text{éq}} = \frac{jLC\omega}{1-jLC\omega^2} \quad (\text{I.15})$$

Où, on peut empêcher les harmoniques de passer pour  $\omega = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$

### c- Resultants de simulation du Filtre passif parallèle quatre fils

#### ▪ Schéma de simulation

La figure(I.6) suivante représenter le schéma de simulation de filtre passif parallèle à quatre fil.

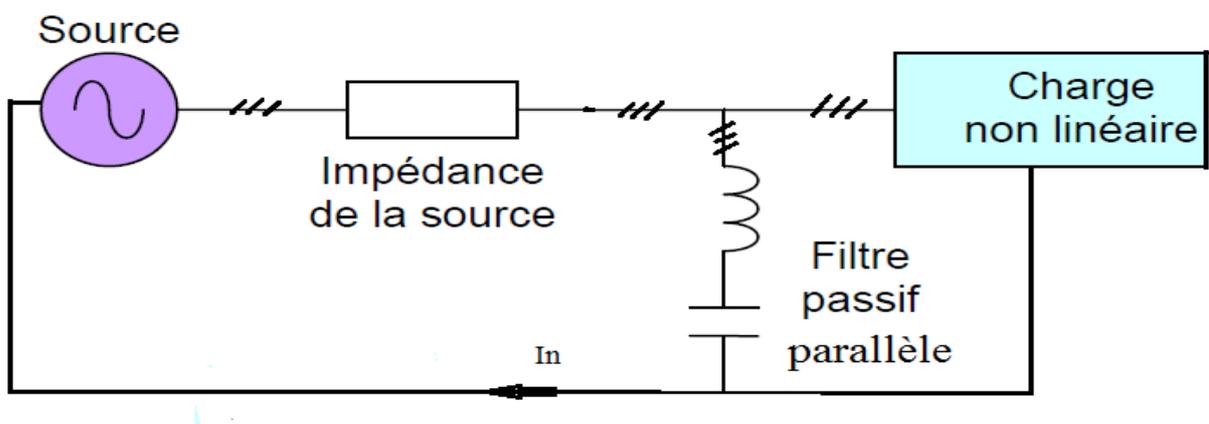


Figure (I.6): Schéma de filtre passif parallèle.

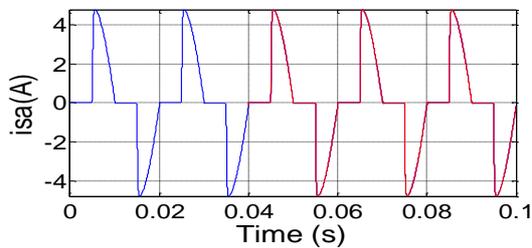
▪ Paramètres de la simulation

Table I.2: Paramètres du système étudié et paramètre de charge.

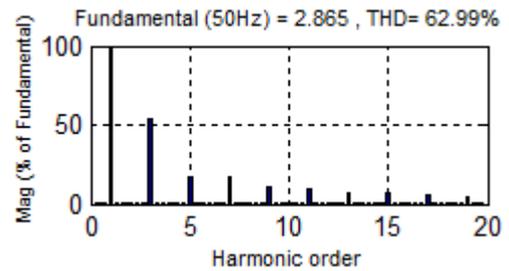
<b>Alimentation</b>	Tension Vs[V]		100
	Fréquence fs [Hz]		50
	Resistance Rs[Ω]		0.42
	Inductance Ls [mH]		2.3
<b>Charge non linéaire</b>	Gradateur	R[Ω]=20	
	Thyristor	R[Ω]=12.4	L [mH]=20
	Diode	R[Ω]=16.5	L [mH]=50

c.1- Avant filtrage

\* Phase a

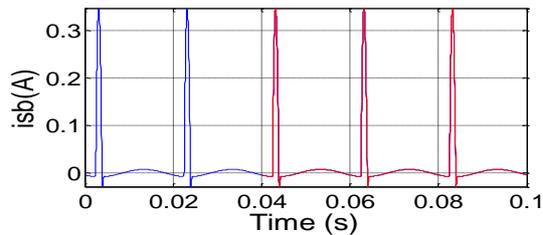


-a- courant de la source( phase a).

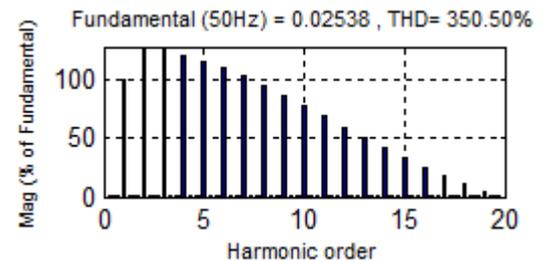


-b- Spectre d'harmonique (phase a).

\* Phase b

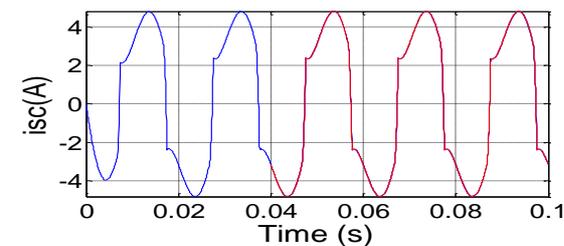


-c- courant de la source( phase b).

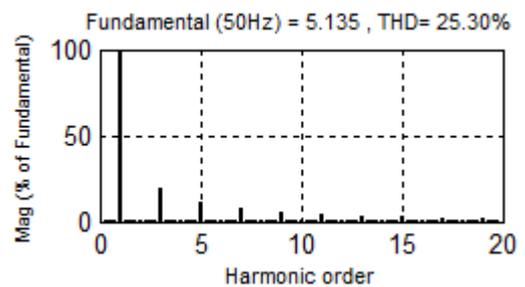


-d- Spectre d'harmonique (phase b).

\* Phase c



-e- courant de la source( phase c).

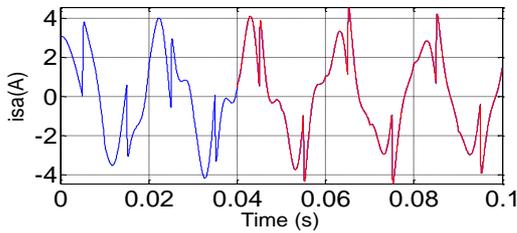


-f- Spectre d'harmonique (phase c).

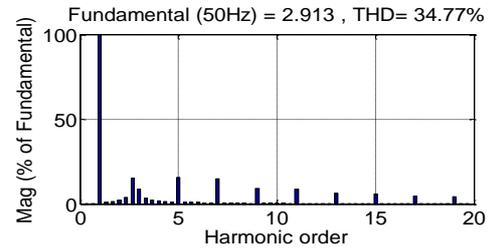
Figure (I.7): Simulation d'un Filtre passif parallèle quatre fils (avant filtrage).

**c.2- Après filtrage h3**

**\* Phase a**

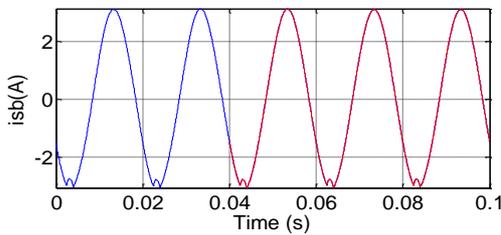


-a- courant de la source( phase a).

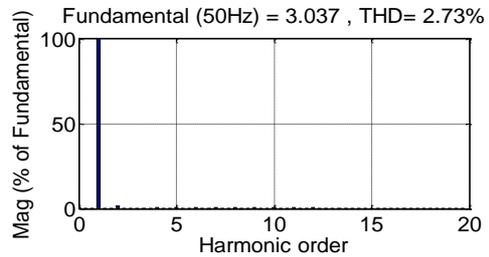


-b- Spectre d'harmonique (phase a).

**\* Phase b**

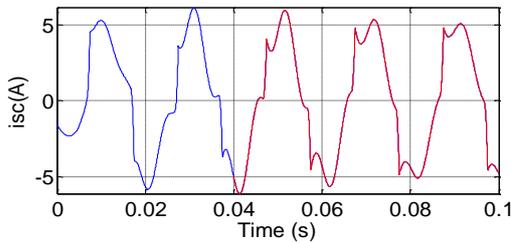


-c- courant de la source( phase b).

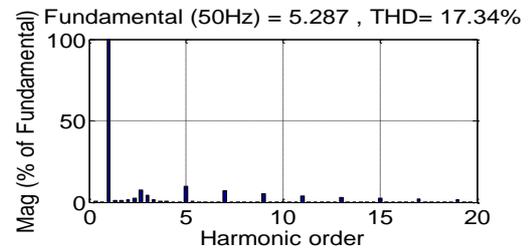


-d- Spectre d'harmonique (phase b).

**\* Phase c**

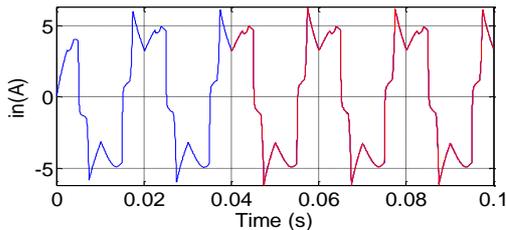


-e- courant de la source( phase c).

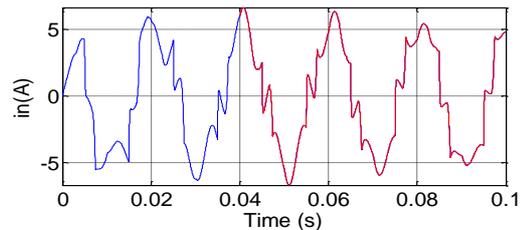


-f- Spectre d'harmonique (phase c).

**\* Fil neutre**



-g- courant de neutre avant le filtrage.



-h- courant de neutre après le filtrage.

Figure (I.8): Simulation d'un Filtre passif parallèle quatre fils (après filtrage).

### c.3- Interprétations des résultats

Les figures (I.7), (I.8) présentent les résultats obtenus :

- les figures (I.7) suivants représentent la réponse de simulation avant filtrage , on remarque dans la phase (abc) que le courant de la source sont pollués et déformé avec un THD phase (a) égale 62.99%, et phase (b) égale 350.50% et phase (c) égale 25.30%. à cause de surcharge importantes par la présence des courants d'harmonique.

- les figures (I.8) suivants représentent la réponse de simulation avant filtrage, On fixe la même condition et avec insertion le filtre a l'instant 0,4s / et la phase (abc) montre que les forme des courants après le filtrage n'était pas sinusoïdale (coté source) ,on remarque après le filtrage n'est pas une bonne amélioration pour moi THD.

### d- Inconvénient des filtres passifs

#### d.1- antirésonance

Ajouter un tel filtre à pour effet de modifier l'impédance de court-circuit du réseau. Cette impédance devient alors [08]:

$$Z_{rés} = \frac{jL_S \omega (1 - LC\omega^2)}{1 - (L + L_S)C\omega^2} \quad L_S \text{ inductance de ligne} \quad (I.16)$$

On peut alors constater qu'il existe une pulsation pour laquelle l'amplitude sera très amplifiée. De plus pour chaque filtre ajouté on crée une nouvelle pulsation d'antirésonance.

#### d.2- Vieillessement

Ces filtres avec le temps, la corrosion, voient leur pulsation variée, ainsi ils n'assurent plus leurs fonctions de filtrage calibré sur un harmonique particulier.

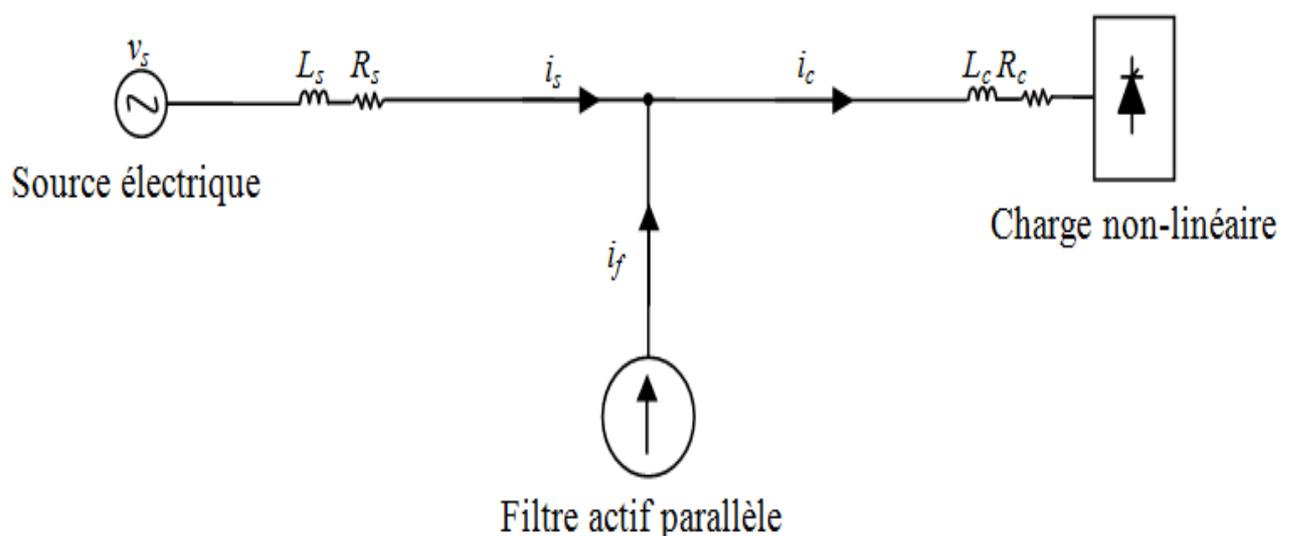
## I.4.2 Solutions modernes

La première solution de dépollution consiste à fabriquer la charge la moins polluante possible, comme le pont redresseur dodécaphasé, de manière à réduire le taux d'émission d'harmoniques. Les appareils à prélèvement sinusoïdal sont aussi proposés pour la compensation des harmoniques et de la puissance réactive. Cependant, ces solutions entraînent un coût supplémentaire et demandent plus que le savoir-faire habituel pour les mettre en oeuvre. De plus, ces solutions ne résolvent pas les problèmes causés par les charges polluantes qui existent sur le marché.

Afin d'accompagner l'évolution des contraintes du fournisseur et du consommateur sans imposer un changement aux installations, une famille de filtres a été proposée comme une solution de dépollution des perturbations en courant [01].

### I.4.2.1 Filtre actif parallèle

Le filtre actif parallèle composé d'un onduleur connecté au réseau par l'intermédiaire d'un filtre passif L-R. Il se connecte en parallèle avec le réseau triphasé et injecte en temps réel les composantes harmoniques des courants absorbés par les charges non linéaires connectées au réseau. Ainsi, le courant fourni par la source d'énergie devient sinusoïdal. Ces filtres actifs shunt présentent des avantages et des inconvénients par rapport aux filtres passifs [01][03]. Cette classe de filtre constitue la configuration la plus largement répandue dans les procédés industriels. Le filtre est connecté au circuit principal de puissance comme montré dans la figure (I.9).



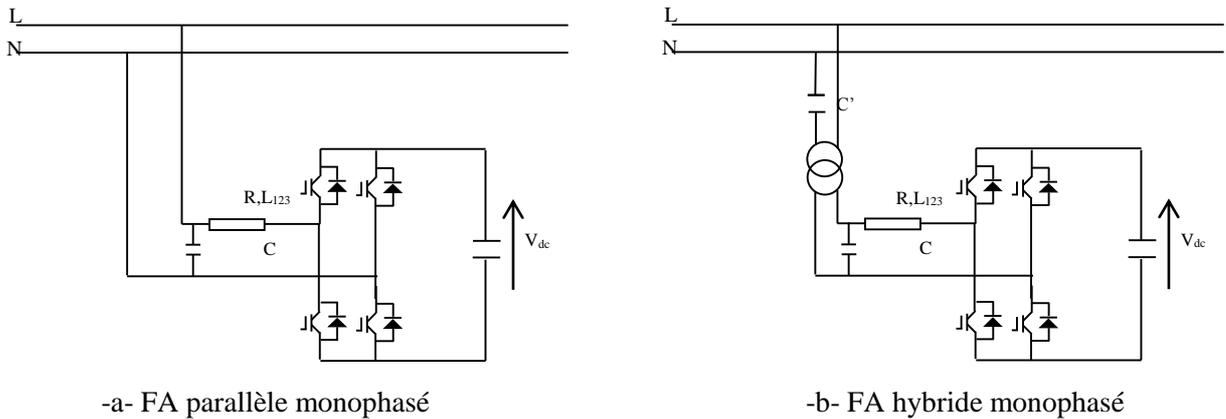
Figure(I.9): Principe du filtrage actif parallèle.

On peut distinguer trois configurations du filtre actif parallèle à structure tension :

**a. Filtre monophasé**

Deux différentes configurations du filtre actif parallèle monophasé sont présentées par la

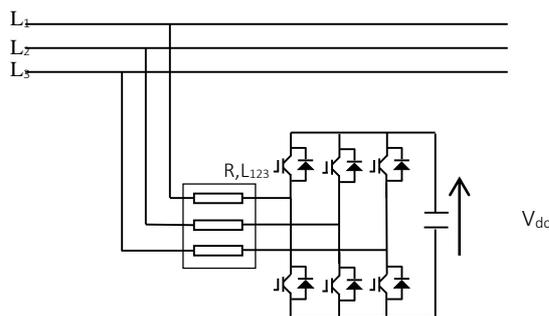
figure (I.5) ci-dessous [01][03].



Figure(I.10): Déféréntes configurations d'un filtre actif monophasé.

**b. Filtre actif parallèle à trois fils**

Il est composé d'un onduleur à trois bras qui ce connecte en parallèle avec le réseau triphasé par l'intermédiaire d'une inductance de couplage. Il injecte en temps réel les composantes harmoniques des courants absorbés par les charges non linéaires connectées au réseau [01]. Ainsi, le courant fourni par la source d'énergie devient sinusoïdal .



Figure(I.11): Configuration d'un FAP à trois fils.

**c. Filtre actif parallèle à quatre fils**

Un grand nombre de charges monophasées peuvent être alimentées à partir d'un système triphasé avec le neutre. Elles peuvent causer un courant harmonique excessif dans le neutre, un déséquilibre des courants de source. Pour ces problèmes, des compensateurs à quatre fils ont été présenté [03].

### I.5 Comparaison entre les filtres passifs et les filtres actifs

Le tableau suivant donne une comparaison entre les filtres actifs et les filtres passifs selon plusieurs critères [03].

Table I.3: Caractéristiques des filtres actifs et passifs.

<b>Critère de comparaison</b>	<b>Filtre passif</b>	<b>Filtre actif d'harmoniques</b>
<b>Action sur les courants harmoniques</b>	- Nécessite un filtre pour chaque fréquence - pas d'adaptabilité - risque de résonance	- Agit simultanément sur plusieurs fréquences - adaptabilité - amélioration de la forme de la tension pas toujours évidente
<b>Influence de la variation de Fréquence</b>	- Efficacité réduite	- Aucune conséquence
<b>Influence de la modification de l'impédance</b>	- Risque de résonance	- Aucune conséquence
<b>Influence de l'augmentation de courant</b>	- Risque de surcharge et de détérioration	- Aucun risque de surcharge, mais efficacité diminué
<b>Augmentation de la charge</b>	- Nécessite des modifications sur le filtre, dans certains cas	- Aucun problème si : $I_f < I_h$
<b>Action sur les harmoniques</b>	- Suivant leurs ordres	- possible, grâce au paramétrage
<b>Modification de la fréquence fondamentale</b>	- Modification impossible	- Possible, grâce à la reconfigure-ation
<b>Encombrement</b>	- Important	-Faible
<b>Poids</b>	- Important	-Faible
<b>Performance</b>	- Pauvre	-Bonne
<b>Fiabilité</b>	- Pauvre	- Pauvre
<b>Coût</b>	- Réduit	-élevé
<b>Pertes</b>	- Réduites	-élevées

**I.6 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes origines des perturbations affectant les réseaux électriques.

Différentes solutions ont été présentées telles que les filtres passifs et actifs sont utilisés pour compenser les perturbations dans les réseaux électriques

Notre objectif étant fixé sur la dépollution de perturbation du type courant due à des différentes charges non-linéaire, Le chapitre suivant sera consacré a la structure du filtre actif Parallèle à quatre bras.

# Chapitre II

## **II.1 Introduction**

Le but de ce travail est d'améliorer le niveau harmonique, pour améliorer ce damier, nous proposons un filtre actif parallèle à quatre bras.

Dans ce chapitre, nous étudierons la structure d'un filtre actif parallèle à quatre bras, laquelle a été divisé en deux :

- La partie puissance.
- La partie commande.

Dans ce chapitre, nous donnerons une explication détaillée du filtre actif parallèle à quatre bras .

### II.2 Constituants d'un filtre actif parallèle à quatre Bras

Un filtre actif parallèle à quatre bras est essentiellement constitué de deux parties (Voir la figure (II.1) ):

- Partie puissance.
- Partie commande.

Ces deux parties vont être détaillées dans les deux sections qui suivent [01].

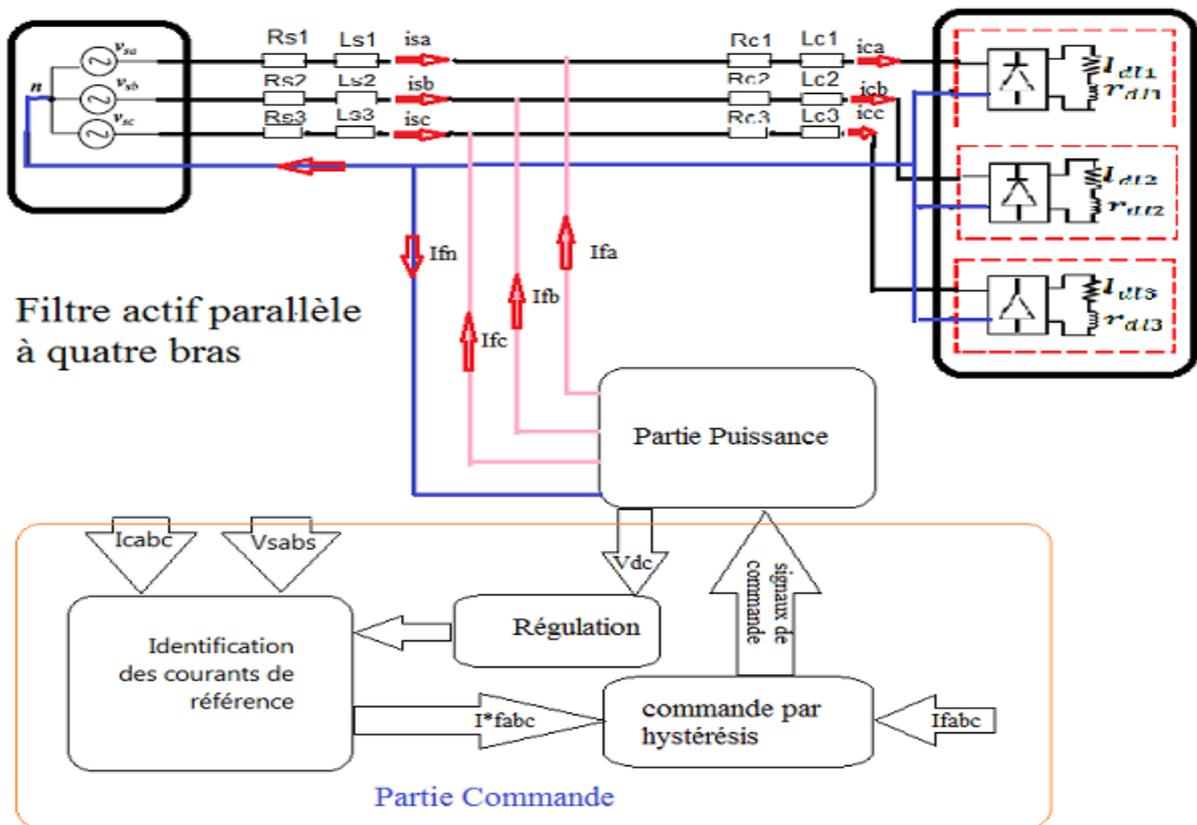


Figure (II.1): Principe du filtrage actif parallèle d'un réseau triphasé à quatre bras

### II.3 Étude de la partie de la puissance

Dans cette section nous sommes intéressés à la partie puissance du FAP dont les composants sont les suivants [01]:

- L'onduleur à quatre bras.
- Le filtre de couplage.
- Le système de stockage de l'énergie.

### II.3.1 Description d'un onduleur triphasé à quatre bras

Dans cette topologie, nous utilisons un onduleur comprenant quatre bras constitués de huit interrupteurs réversibles en courant (transistors bipolaires, IGBT, GTO) en antiparallèle avec une diode [01][03]. Comme l'illustre la figure (II.2).

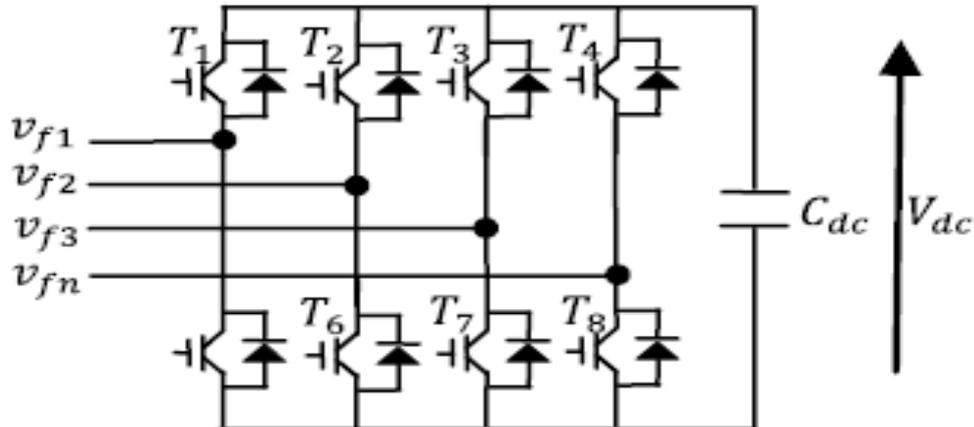


Figure (II.2): Onduleur à quatre bras pour un réseau triphasé à quatre fils.

Les états de commutation pour ce type d'onduleur sont présentés dans le tableau II.1. Ils sont obtenus grâce aux expressions suivantes :

$$V_{f1} = (T_1 - T_4)V_{dc} \quad (\text{II.1})$$

$$V_{f2} = (T_2 - T_4)V_{dc} \quad (\text{II.2})$$

$$V_{f3} = (T_3 - T_4)V_{dc} \quad (\text{II.3})$$

$$i_{dc} = T_1 i_1 + T_2 i_2 + T_3 i_3 - T_4 i_4 \quad (\text{II.4})$$

Avec :  $T_i = 1$  si  $T_{i+4}$  est fermé, et  $T_i = 0$  si  $T_{i+4}$  est ouvert, et  $i = 1$  à 4

Tableau II.1 : Tensions générées par l'onduleur de tension à quatre bras

K	T4	T3	T2	T1	Vf3	Vf2	Vf1
0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	1	0	0	Vdc
2	0	0	1	0	0	vdc	0
3	0	0	1	1	0	vdc	vdc
4	0	1	0	0	Vdc	0	0
5	0	1	0	1	Vdc	0	vdc
6	0	1	1	0	Vdc	vdc	0
7	0	1	1	1	Vdc	vdc	vdc
8	1	0	0	0	-vdc	-vdc	-vdc
9	1	0	0	1	-vdc	-vdc	0
10	1	0	1	0	-vdc	0	-vdc
11	1	0	1	1	-vdc	0	0
12	1	1	0	0	0	-vdc	-vdc
13	1	1	0	1	0	-vdc	0
14	1	1	1	0	0	0	-vdc
15	1	1	1	1	0	0	0

### II.3.2. Filtre de couplage

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

- assurer la dynamique du courant du filtre défini par :

$$\frac{di_f}{dt} = \frac{di_h}{dt} \quad (\text{II.5})$$

Où  $i_f$  : Courant du filtre

$i_h$  : Courant harmonique de la charge

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

Pour satisfaire ces deux conditions, on utilise un filtre de premier ordre, composé d'une inductance  $L_f$  avec une résistance interne  $R_f$ , une petite valeur de cette inductance assure la

dynamique du courant. Contrairement, une valeur relativement grande de celle-là empêche les composantes dues aux commutations de se propager sur le réseau. En négligeant la résistance de ce filtre de couplage on obtient [04][19]:

$$\left(\frac{di_f}{dt}\right)_{max} = \frac{V_{fmax} - V_{smax}}{L_f} \quad (\text{II.6})$$

Avec  $V_{fmax}$ : La valeur maximale de la tension à l'entrée de l'onduleur.

$V_{smax}$ : La valeur maximale de la tension simple au point de raccordement du filtre.

Prenons la valeur maximale de tension  $v_f = \sqrt{\frac{2}{3}} v_{dc}$  avec la valeur maximale de la tension du réseau, pour des petites variations du courant du filtre, on obtient:

$$\left(\frac{\Delta i_f}{\Delta T}\right)_{max} = \frac{\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot V_{dc} - V_{smax}}{L_f} \quad (\text{II.7})$$

Avec  $\Delta T = 1/f_{ond}$  : la période de variation du courant du filtre

En supposant la variation maximale du courant du filtre égale à 25% de la valeur maximale du courant du réseau, la valeur de l'inductance de couplage est donnée par :

$$L_f = \frac{\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot V_{dc} - V_{smax}}{0.25 i_{smax} f_{ond}} \quad (\text{II.8})$$

### II.3.3 Système de stockage d'énergie

L'utilisation des batteries de condensateurs est effective dans les petites et moyennes puissances. Dans le cas des grandes puissances on utilise des bobines supraconductrices [01].

Le choix de la tension  $V_{dc}$  et de la capacité de condensateur  $C_{dc}$  affecte la dynamique et la qualité de compensation du filtre actif parallèle. En effet, une tension  $V_{dc}$  élevée améliore la dynamique du filtre actif. De plus, les ondulations de la tension continue  $V_{dc}$  causées par les courants engendrés par le filtre actif et limitées par le choix de  $C_{dc}$  [09], 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. Pour cette raison, nous

pouvons estimer que seuls les premiers harmoniques sont pris en compte dans le choix des paramètres du système de stockage. Pour démontrer ceci, deux méthodes peuvent être utilisés [12]:

- La première méthode est basée sur le calcul de l'énergie fournie par le filtre actif et celle de la charge polluante comme suit [01]:

La valeur efficace du courant de la charge coté alternatif dans les trois phases est :

$$I_s = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} I_d^2 d(\omega t)} = I_d \quad (\text{II.9})$$

où  $I_d$  représente le courant de charge coté continu. Le fondamental du courant de la charge est donné par :

$$I_{s1} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} I_s = 0.9I_d \quad (\text{II.10})$$

Les courants harmoniques produits par la charge représentent la différence entre le fondamentale et la valeur efficace du courant coté alternatif de la charge. Ces courants sont donnés par [01]:

$$\sum_{h=2}^{\infty} I_{sh} = \sqrt{I_s^2 - I_{s1}^2} = 0.43I_s \quad (\text{II.11})$$

Le filtre actif doit fournir la puissance correspondante aux harmoniques produite par la charge. En choisissant la période de l'ondulation de la tension aux bornes du condensateur six fois inférieure à celle de la tension du réseau électrique, on peut trouver [01]:

$$C_{dc} \geq \frac{0.43I_s}{6f_s(V_{dcmax}^2 - V_{dcmin}^2)} \quad (\text{II.12})$$

$f_s$  : La fréquence fondamentale du réseau électrique. On choisit un taux d'ondulation  $\Delta V_{dc}$  acceptable, généralement de l'ordre de 2% $V_{dc}$ .

-La deuxième méthode, plus simple, se base sur la mesure du courant harmonique  $I_h$  du rang le plus faible. La capacité  $C_{dc}$  se calcule de la façon suivante [01-03]:

$$C_{dc} = \frac{I_h}{V_{dc}\Delta V_{dc}\omega_h} \quad (\text{II.13})$$

Avec  $\omega_h$  : la pulsation la plus faible des harmoniques à compenser

## II.4 Étude de la partie commande

### II.4.1 Identification des courants polluant

L'identification du courant polluant est une étape essentielle dans le processus de commande des filtres actifs. A l'heure actuelle, les chercheurs continuent toujours à améliorer ces méthodes à fin d'obtenir des meilleurs résultats.

Plusieurs méthodes d'identification des courants de référence ont été développées depuis la mise en place des premiers filtres actifs afin de générer les signaux de référence servant à la commande du filtre actif.

Dans ce chapitre les deux méthodes d'identification habituellement utilisées seront développées pour être appliquées au filtre actif parallèle à quatre fils :

- La méthode des Puissances Instantanée Réelle, Imaginaire et homopolaire (PIRI) .
- La méthode de Référentiel Synchronique (SRF).

Dans le but d'appliquer des filtres d'extraction à ces deux méthodes, on utilise le Filtre Passe Bas et le Filtre Multi-Variables [03].

#### II.4.1.1 Méthode des puissances instantanées réelle, imaginaire et homopolaire avec FBP+FMV

Cette méthode introduite par [20] , exploite la transformation de Concordia des tensions simples et des courants de ligne, afin de calculer les puissances réelle, imaginaire et homopolaire instantanées. Elle permet de transformer la composante fondamentale en une composante continue et les composantes harmoniques en composantes alternatives. Cette transformation est nécessaire si on veut éliminer facilement la composante continue. Le principe de cette méthode est énoncé ci-dessous.

Soient respectivement les tensions simples et les courants de ligne d'un système triphasé avec homopolaire,  $v_{sa}(t)$ ,  $v_{sb}(t)$ ,  $v_{sc}(t)$  et  $i_{ca}(t)$ ,  $i_{cb}(t)$ ,  $i_{cc}(t)$ . La transformation de Concordia permet de ramener ce système triphasé des axes  $abc$  aux axes  $\alpha$ - $\beta$ -0, comme le montre les deux relations suivantes :

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \\ V_0 \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \\ V_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.14})$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \\ i_{cc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.15})$$

Après isolation des composantes fondamentales en tension notées  $\bar{v}_\alpha\beta 0$ , les puissances réelle, imaginaire et homopolaire instantanés sont données par la matrice suivante :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \\ p_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{v}_\alpha & \bar{v}_\beta & 0 \\ -\bar{v}_\beta & \bar{v}_\alpha & 0 \\ 0 & 0 & \bar{v}_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.16})$$

Les composantes  $\bar{v}_\alpha\beta$  sont isolées par un filtre multi-variables (FMV) au lieu d'une PLL. Les puissances instantanés peuvent s'écrire de la façon suivante :

$$p = \bar{p} + \tilde{p} \quad (\text{II.17})$$

$$q = \bar{q} + \tilde{q} \quad (\text{II.18})$$

$$p_0 = \bar{p}_0 + \tilde{p}_0 \quad (\text{II.19})$$

$\bar{p}$ ,  $\bar{q}$  et  $\bar{p}_0$ : Composantes continues des puissances instantanées.

$\tilde{p}$ ,  $\tilde{q}$  et  $\tilde{p}_0$ : Composantes alternatives des puissances instantanées.

A l'aide d'un filtre passe bas avec une boucle de retour ou d'un filtre passe haut, on peut éliminer de  $p$  et de  $q$  une (des) partie (s) selon les objectifs de la compensation montrés au tableau II.2 ci-dessous [01][03].

Table II.2 : Les modes de compensation de la commande des puissances instantanées.

Parameter à Compenser	Parameter de Contrôle
Courant harmonique	$p = \tilde{p}$ et $q = \tilde{q}$
Énergie réactive	$p=0$ et $q = \bar{q}$
Courant harmonique + Énergie réactive	$p = \tilde{p}$ et $q=\bar{q}$

Pour la compensation du courant dans le neutre, le courant homopolaire  $i_0$  sera utilisé directement comme référence sans passer par le calcul de la puissance homopolaire et donc l'isolation de la composante fondamentale de la tension homopolaire pour le calcul de la puissance homopolaire n'est pas nécessaire dans cette variante de la méthode des PIRI.

L'objectif dans ce travail est de compenser les harmoniques de courant et l'énergie réactive. Les composantes du courant  $i_{f\alpha\beta}^*$  sont alors définies par [01][03] :

$$\begin{bmatrix} i_{f\alpha}^* \\ i_{f\beta}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{V}_\alpha & \bar{V}_\beta \\ -\bar{V}_\beta & \bar{V}_\alpha \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ q \end{bmatrix} \quad (\text{II.20})$$

Donc:

$$\begin{bmatrix} i_{f\alpha}^* \\ i_{f\beta}^* \end{bmatrix} = \frac{1}{\bar{V}_\alpha^2 + \bar{V}_\beta^2} \begin{bmatrix} \bar{V}_\alpha & -\bar{V}_\beta \\ \bar{V}_\beta & \bar{V}_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ q \end{bmatrix} \quad (\text{II.21})$$

Soit :

$$i_{f\alpha}^* = \frac{\bar{V}_\alpha}{(\bar{V}_\alpha^2 + \bar{V}_\beta^2)} \tilde{p} - \frac{\bar{V}_\beta}{(\bar{V}_\alpha^2 + \bar{V}_\beta^2)} q \quad (\text{II.22})$$

$$i_{f\beta}^* = \frac{\bar{V}_\beta}{(\bar{V}_\alpha^2 + \bar{V}_\beta^2)} \tilde{p} + \frac{\bar{V}_\alpha}{(\bar{V}_\alpha^2 + \bar{V}_\beta^2)} q \quad (\text{II.23})$$

$i_{f\alpha}^*$  et  $i_{f\beta}^*$  sont les courants de référence dans le repère de Concordia. On remarque dans les expressions de ces derniers l'absence du courant homopolaire. On prend pour l'homopolaire :

$$i_{f0}^* = i0$$

Maintenant, il est aisé de remonter aux courants de référence par la transformation inverse de Concordia [03].

$$\begin{bmatrix} i_{fa}^* \\ i_{fb}^* \\ i_{fc}^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{f\alpha}^* \\ i_{f\beta}^* \\ i_{f0}^* \end{bmatrix} \quad (\text{II.24})$$

- **Filtres d'extraction**

Les deux types de filtre d'extraction sont présentés à la figure suivante [01] :



Figure (II.3) : Filtres d'extraction.

Comme cela est exposé dans la littérature, ces filtres d'extraction permettent d'obtenir une élimination plus ou moins satisfaisante de la composante continue, car leurs caractéristiques concernant le résidu harmonique sont différentes. Ils n'ont pas donné entière satisfaction car[01] :

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

- **Principe du FMV**

mais les filtres d'extractions (Passe Bas Ou Passe Haut) permettent d'obtenir une élimination plus ou moins satisfaisante, Pour ces raisons, un nouveau type de filtre d'extraction nommé ici Filtre Multi Variable (FMV) a été développé, Son principe de base s'appuie sur les travaux de Song Hong-Scok [01][03], et est basé sur l'extraction de la composante fondamentale des signaux, directement selon les axes  $\alpha, \beta$  comme cela est présenté à la figure (II.4)

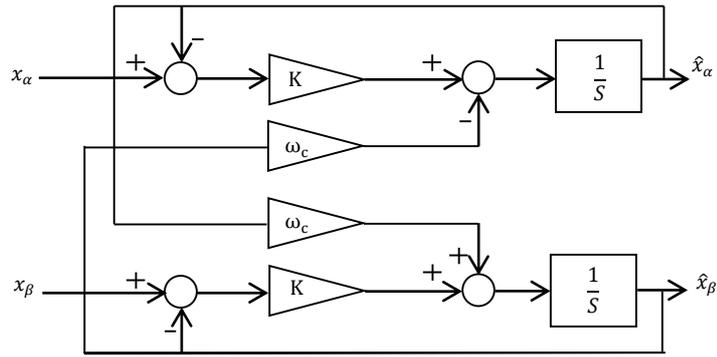


Figure (II.4): Schéma du FMV.

Selon les axes  $\alpha$ - $\beta$ , les expressions liant les composantes  $\hat{X}_{\alpha\beta}$  en sortie du FMV aux composantes d'entrée  $X_{\alpha\beta}$  sont les suivantes :

$$\hat{x}_\alpha(s) = \left(\frac{K}{s} [x_\alpha(s) - \hat{x}_\alpha(s)] - \frac{\omega_c}{s} \hat{x}_\beta(s)\right) \tag{II.25}$$

$$\hat{x}_\beta(s) = \left(\frac{K}{s} [x_\beta(s) - \hat{x}_\beta(s)] + \frac{\omega_c}{s} \hat{x}_\alpha(s)\right) \tag{II.26}$$

Où sont représentés par :

$x_{\alpha\beta}$ : Le signal électrique d'entrée selon les axes  $\alpha - \beta$  de nature tension ou courant.

$\hat{x}_{\alpha\beta}$ : Les composantes fondamentales de  $x_{\alpha\beta}$ .

K : Constante à fixer.

$\omega_c = 2\pi f$ : Pulsation fondamentale du réseau [01][03].

La figure (II.5) illustre l'algorithme d'identification

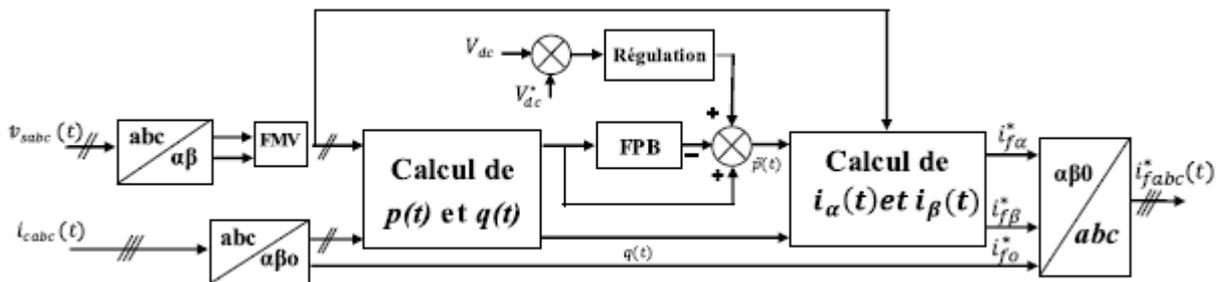


Figure (II.5): Identification par la méthode des puissances instantanées avec FPB+FMV.

**II.4.1.2 Méthode de référentiel synchrone avec FPB**

La méthode de référentiel synchrone, est appelée aussi méthode des courants instantanés d et q. Elle permet d'obtenir des meilleures performances même si la tension du réseau est perturbée ou déséquilibré. La figure (2.6) représente le Schéma de principe de cette méthode.

Dans cette méthode les courants de la charge sont transformés dans le repère  $\alpha\beta 0$  de Concordia avec la transformation  $C$ , puis dans le repère dq de Park  $P(\theta)$  de l'équation (2.26) pour obtenir  $i_d(t)$  et  $i_q(t)$ .

$$p(\theta) = \begin{bmatrix} -\sin(\theta) & \cos(\theta) \\ \cos(\theta) & \sin(\theta) \end{bmatrix} \tag{II.27}$$

$\theta = \omega t$  représente la position angulaire du repère tournant qui est une fonction linéaire de la pulsation angulaire. Ce repère de référence tourne à une vitesse constante en synchronisme avec les tensions triphasées [21]. Le courant dans ce repère peut être exprimé de la façon suivante :

$$i_d(t) = i_{dh}(t) + i_{df}(t) \tag{II.28}$$

$$i_q(t) = i_{qh}(t) + i_{qf}(t) \tag{II.29}$$

réactive dans le repère dq,  $i_{dh}(t)$  et  $i_{qh}(t)$  représentent successivement les courants harmoniques sur l'axe d et l'axe q dans le même repère. Le courant de référence  $i_{dh}(t)$  sera extrait dans ce repère à l'aide d'un FPB avec une boucle de retour.

Avec la transformation inverse de Park  $P^{-1}(\omega t)$  appliquée sur  $i_{dh}$  et  $i_q$  on obtient les courants  $i_{f\alpha}^*$  et  $i_{f\beta}^*$ . Ensuite la transformation inverse de Concordia  $C^{-1}$  est appliquée sur  $i_{f\alpha}^*$ ,  $i_{f\beta}^*$  et  $i_{f0}^* = i_0$  pour retrouver les courants de référence  $i_{fa}^*$ ,  $i_{fb}^*$  et  $i_{fc}^*$  dans le repère triphasé.

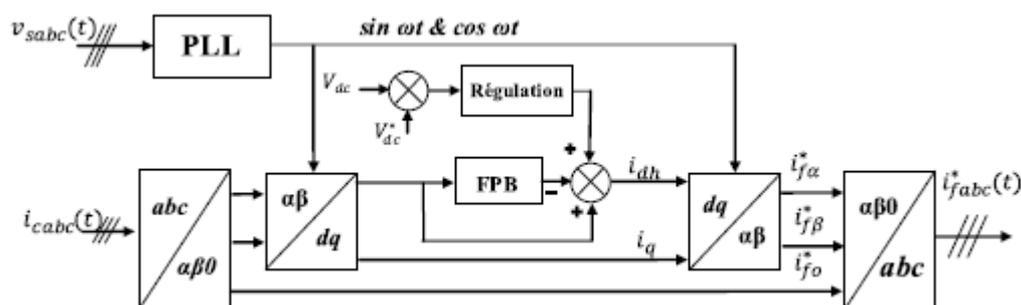


Figure (II.6): Identification par la méthode de référentiel synchrone avec FPB.

### II.4.2 Régulation de la tension du bus continue

La source d'alimentation du filtre n'est pas une source de tension autonome mais une capacité qui se charge et se décharge. La tension aux bornes de cette dernière n'est pas constante, à cause de sa sensibilité aux échanges de puissance active entre la charge polluante et le réseau.

Les pertes dans les composantes de puissance font aussi varier la tension aux bornes de la capacité, d'où la nécessité de réguler cette tension de la maintenir à un niveau constant. Les principales causes susceptibles de modifier cette tension sont [03] :

- Les pertes dans le filtre actif.
- L'injection des courants fondamentaux pendant les régimes transitoires de la charge polluante.
- Les Pertes de commutation et par conduction des interrupteurs de puissance.

Afin d'assurer le rôle de source de tension continue, une régulation de cette tension est nécessaire. Pour cela, nous pouvons utiliser un régulateur PI. Si nous négligeons les pertes au niveau de l'onduleur et dans le filtre de sortie, la relation entre la puissance absorbée par le condensateur et la tension à ses bornes peut s'écrire sous la forme suivante [03] :

La tension au borne de la capacité du bus continu est :

$$V_{dc} = \frac{1}{C_{dc}} \int I_{dc} dt \quad (\text{II.30})$$

en appliquant la transformé de Laplace on trouve :

$$V_{dc} = \frac{1}{sC_{dc}} I_{dc} \quad (\text{II.31})$$

La fonction de transfert du système est :  $\frac{1}{sC_{dc}}$ , et la boucle de régulation par PI est montrée à la figure (2.8) [03]. La fonction de transfert en boucle fermée s'écrit comme suit :

$$G_{BF} = \frac{\left(1 + \frac{K_P}{K_I} s\right) \frac{K_I}{C}}{s^2 + \frac{K_P}{C_{dc}} s + \frac{K_I}{C_{dc}}} \quad (\text{2.31})$$

L'expression générale d'une fonction de transfert du second ordre est :

$$G_{BF} = \frac{\left(1 + \frac{K_P}{K_i} s\right) \omega_c^2}{s^2 + 2\xi \omega_c s + \omega_c^2} \quad (2.32)$$

En comparant cette équation avec la forme générale, on trouve :

$$K_i = \omega_c^2 C_{dc} \quad \text{et} \quad K_{pdc} = 2\xi \sqrt{C_{dc} K_i} \quad \text{tel que :} \quad \omega_c = 2\pi f_c$$

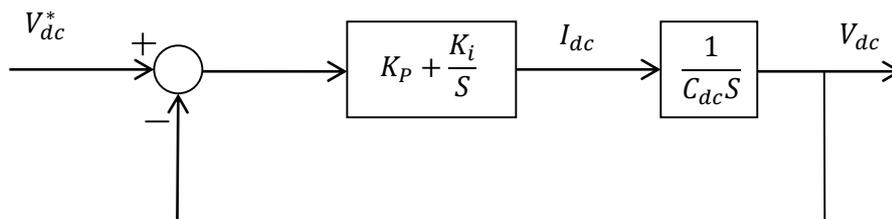
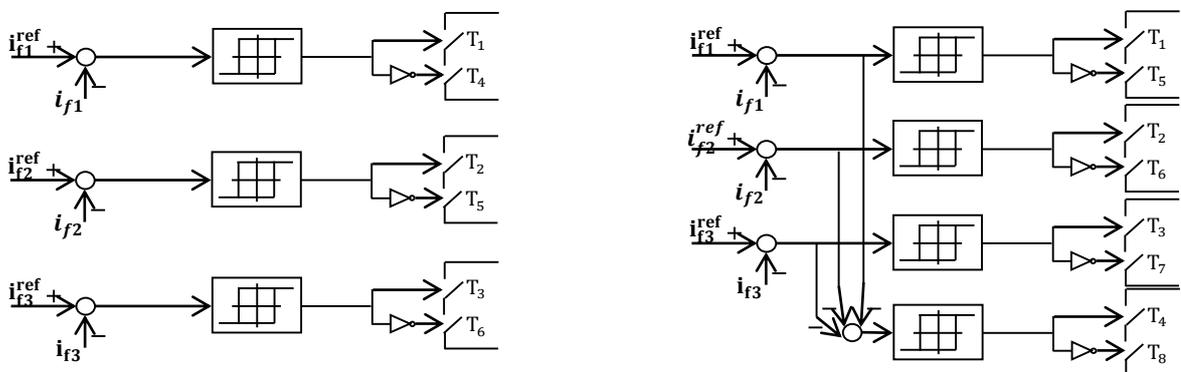


Figure (II.7): Boucle de régulation de la tension continue.

### II.4.3 Contrôle de l'onduleur par hystérésis

La commande conventionnelle par hystérésis est très couramment utilisée de par sa simplicité d'utilisation et sa robustesse. En fait, cette stratégie assure un contrôle satisfaisant du courant sans exiger une connaissance poussée du modèle du système à contrôler ou de ses paramètres. La figure 2.8 expose son principe qui consiste à établir dans un premier temps le signal d'erreur, différence entre le courant de référence  $i_f^{ref}$  et le courant produit par l'onduleur  $i_f$ . Cette erreur est ensuite comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis afin de fixer les ordres de commande des interrupteurs [03].



-a- cas d'un onduleur à trois bras

-b- cas d'un onduleur à quatre bras

Figure (II.8): Principe de la commande par hystérésis.

## **II.5 Conclusion**

Nous avons présenté dans ce chapitre la définition et la structure de filtre actif parallèle à quatre fils, cette structure partagée à deux parties: la partie de puissance et la partie de commande-contrôle, la partie de puissance est représentée par l'onduleur de tension, système de stockage de l'énergie et filtre de sortie, et la deuxième partie qui est la commande-contrôle est représentée par la commande d'onduleur, la régulation de la tension continue, l'identification des courants perturbés, plusieurs méthodes de commande sur l'onduleur, Dans ce chapitre nous choisissons la commande par hystérésis.

# Chapitre III

### III.1 Introduction

Un système d'électronique de puissance est un ensemble de conversion d'énergie qui contient les organes suivants :

- Source d'énergie.
- Convertisseurs statique.
- Charge réceptrice.
- Dispositif de commande du convertisseurs.

Il est caractérisé par la non linéarité des semi-conducteurs constituant le convertisseurs et par la présence de sous-ensemble à la fois hétérogènes et fortement interdépendants .

L'étude analytique de ce système est difficile et ne peut être menée, pour un point de fonctionnement donné, qu'avec des hypothèses simplificatrices importantes. C'est pour cette raison que la simulation numérique est devenue l'outil indispensable de l'étude de ces système.

Dans ce chapitre on propose d'étudier la simulation de l'ensemble réseau, trois charges monophasées:

- Identiques alimentée par trois redresseurs monophasé.
- Non identiques alimentée par un gradateur monophasé, et deux redresseurs monophasé.

Filtre actif parallèle à quatre bras sous l'environnement Matlab-Simulink .On donne ensuite le résultats de simulation obtenus.

III.2 Schéma de simulation

Les figures (III.1) et (III.2), représentent le principe d'un filtre actif parallèle alimentée par des charges non linéaires (charges équilibrées et charges déséquilibrées) :

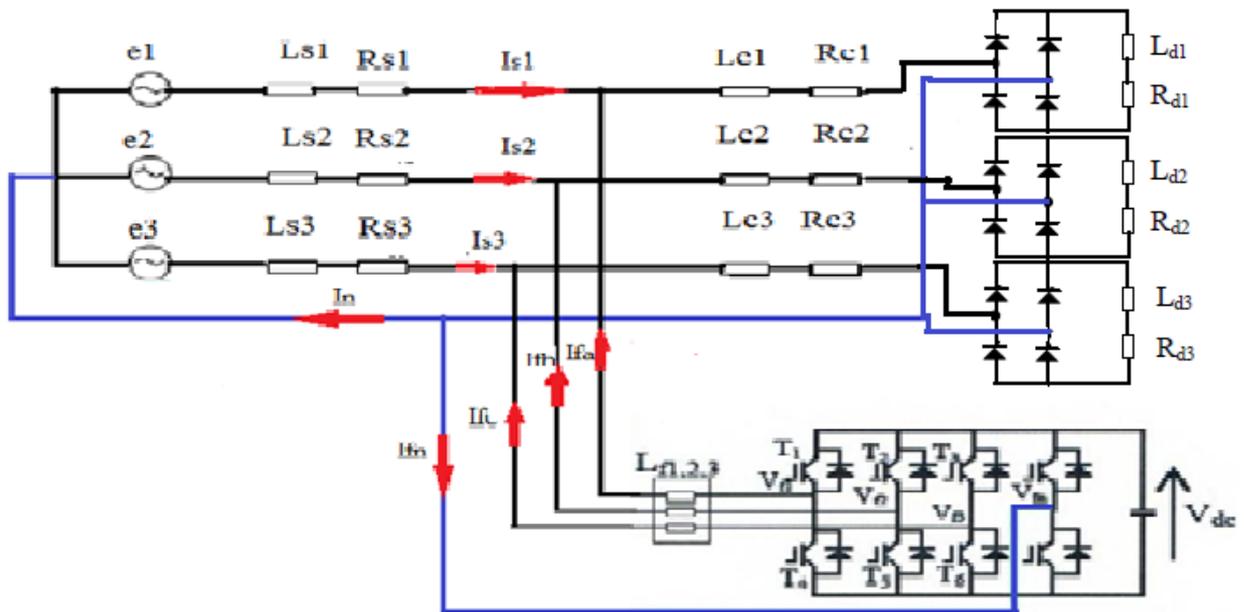


Figure (III.1): Schéma de charges équilibré.

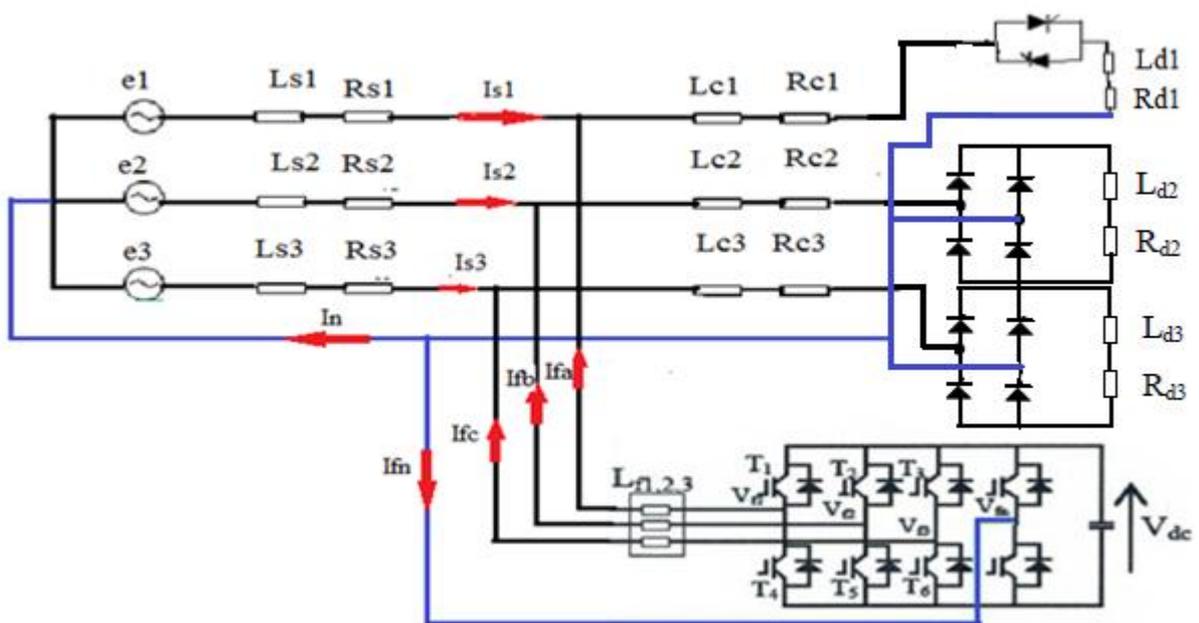


Figure (III.2): Schéma de charges déséquilibré

### III.2.1 Paramètres de la simulation

Les paramètres du système sont comme suit:

Table III.1 : paramètres du système étudié.

<b>Alimentation</b>	<b>Tension</b> $V_{seff}$ [V]	220
	<b>Fréquence</b> $f_s$ [Hz]	50
	<b>Résistance</b> $R_s$ [ $\Omega$ ]	0.42
	<b>Inductance</b> $L_s$ [mH]	2.3
<b>Filtre</b>	<b>Tension</b> $V_{dc}$ [V]	700
	<b>Capacité</b> $C_{dc}$ [ $\mu$ F]	1000
	<b>Inductance</b> $L_f$ [mH]	3
	<b>Bande d'hystérésis</b> $\Delta H$ [A]	0.1
<b>Charge</b>	<b>Résistance</b> $R_c$ [m $\Omega$ ]	1
	<b>Inductance</b> $L_c$ [mH]	1

Table III.2 : paramètre de charge

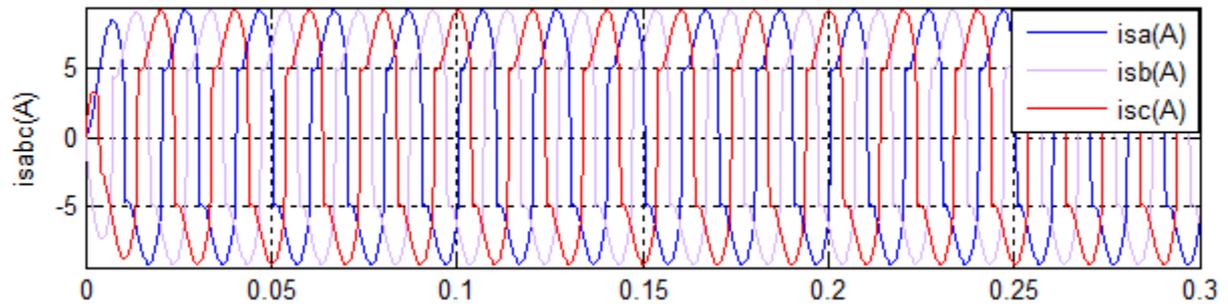
Type de charge	Paramètre	Phase a	Phase b	Phase c
<b>Charge équilibre</b>	R [ $\Omega$ ]	26		
<b>Charge déséquilibre</b>		26	30	60
<b>Charge équilibre</b>	Lc [mH]	90		
<b>Charge déséquilibre</b>		60	85	100

### III.2.2 Résultats des simulations.

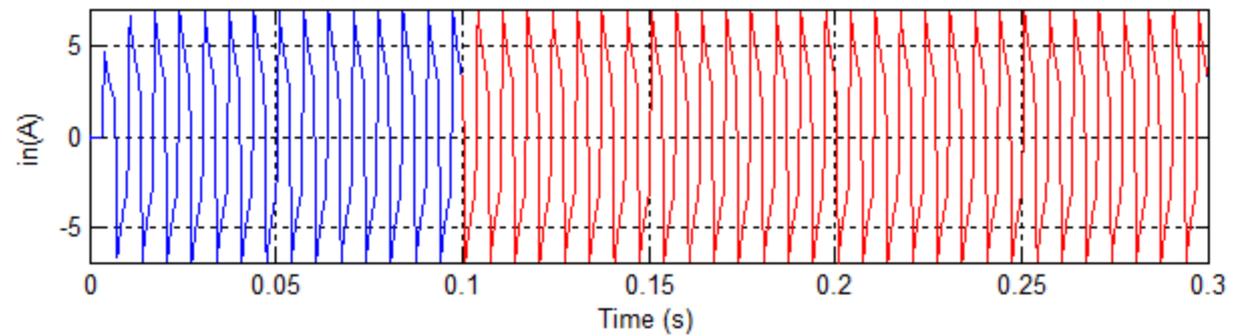
#### III.2.2.1 Cas de charge équilibré

Dans ce premier cas nous avons pris un système de charges équilibré, c'est la raison pour laquelle nous ne tracerons trois courbes du courant de source de la phase (abc), ainsi que le spectre d'harmonique de cette phase, les deux autres phases ont la même courbe de courant et le même spectre d'harmonique que ceux de la première phase. Les résultats des simulations du système étudié sont présentés sur les figures suivantes :

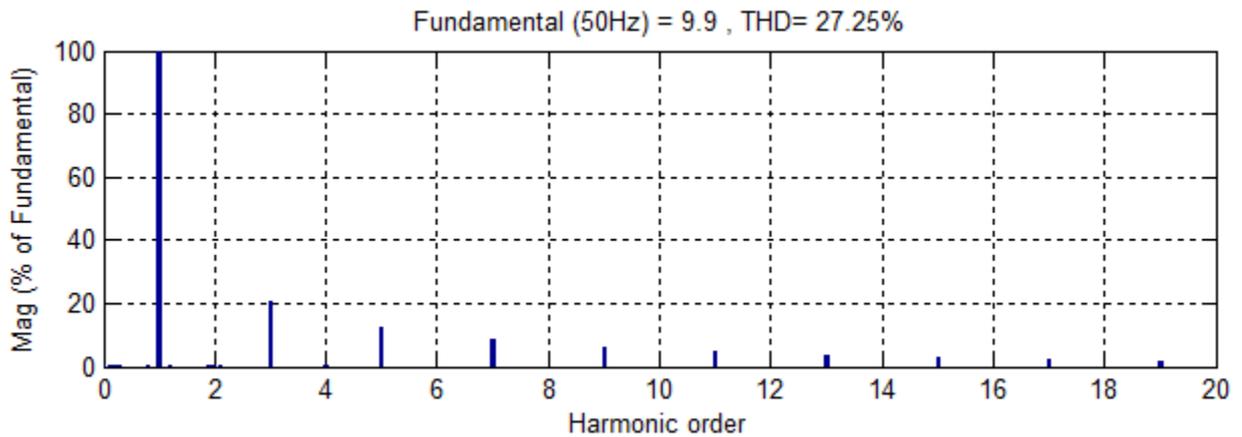
**a-Avant filtrage**



-a- courant de la source.



-b- courant de neutre.



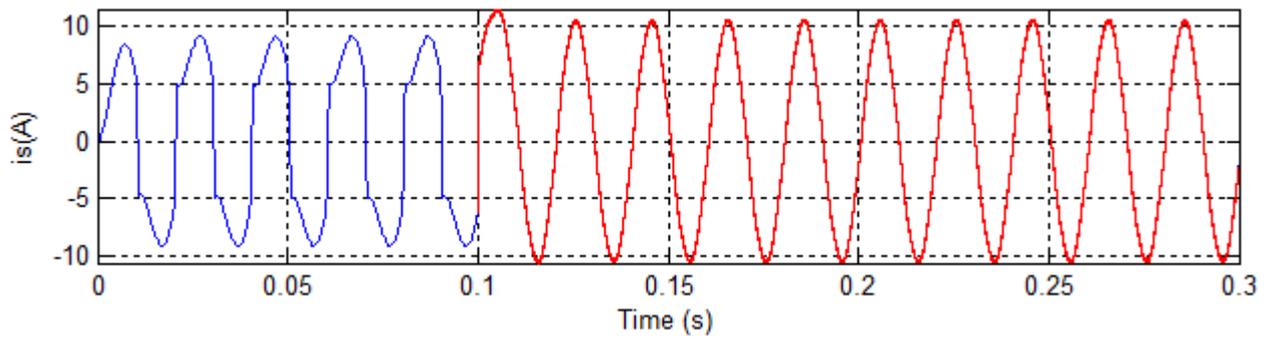
-c- spectre d'harmonique du courant de source

Figure (III.3) Simulation du réseau à trois charges monophasées équilibré.

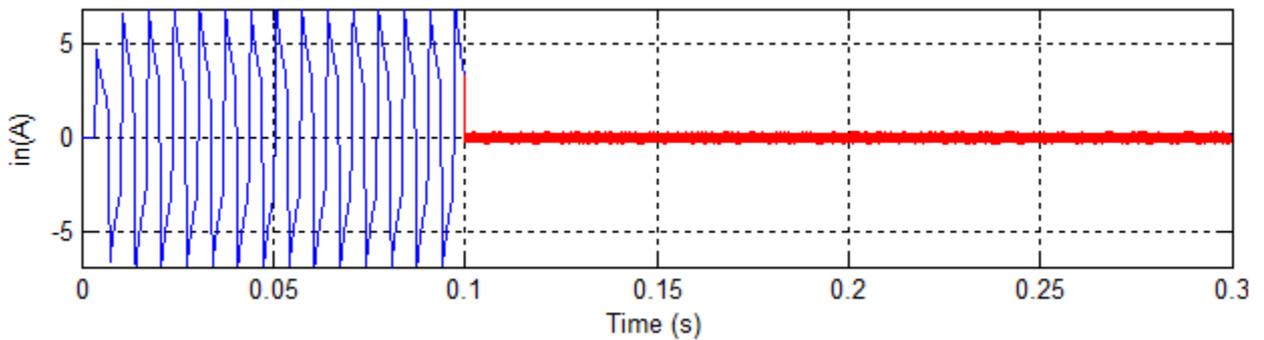
-Le taux de distorsion d'harmonique a été mesurée sur 10 périodes (colorés en rouge) entre l'instant 0.1 et 0.3 s, nous remarquons que  $THD = 27.25$

**b- Après filtrage**

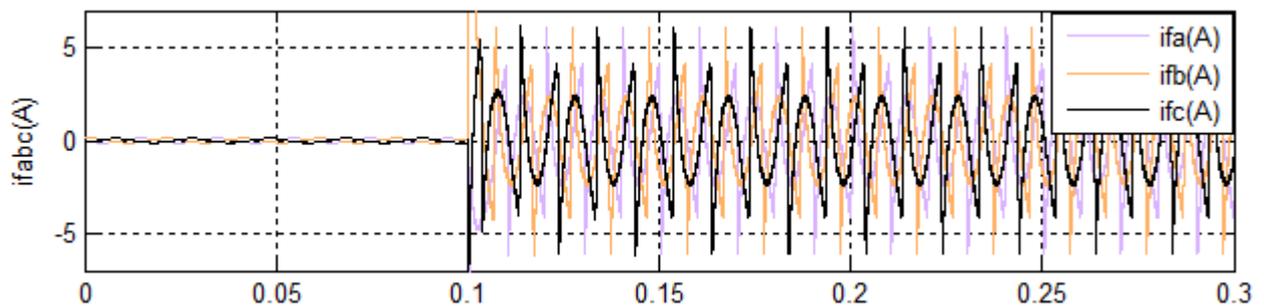
❖ **Filtrage par la méthode Référentiel synchrone avec FPB**



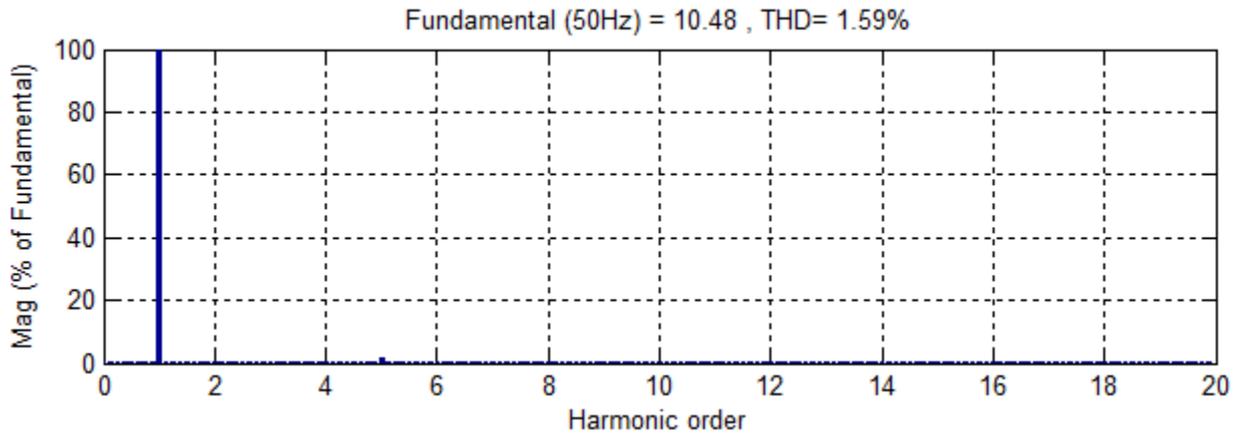
-a- Courant de la source avant et après le filtrage (phase a)



-b- Courant du neutre avant et après le filtrage.



-c- Courant injecté par le filtre (3 phase)



-d- Spectre d'harmonique.

Figure (III.4): Simulation du FAP à quatre bras par la méthode R S avec FPB (charge équilibré)

Le taux de distorsion d'harmonique a été mesurée sur 10 périodes (colorés en rouge) entre l'instant 0.1 et 0.3 s, nous remarquons que THD = 1.59 %.

### III.2.2.2 Interprétations des résultats

Les figures (III.3), (III.4) présentent les résultats obtenus :

- Les résultats de la figure (III.3), (III.4), représentent la réponse pour un cas de charge équilibré est le même pour tous C'est-à-dire que les trois charges monophasées identiques alimentés par trois ponts diode non commandées .

Avant filtrage, on remarque dans la figure (a) que les courants de la source sont pollués et déformé avec un THD sont 27.25%, et la figure (b) montre qu'il ya un courant excessif dans le neutre à cause de surcharge importantes par la présence des courants d'harmonique.

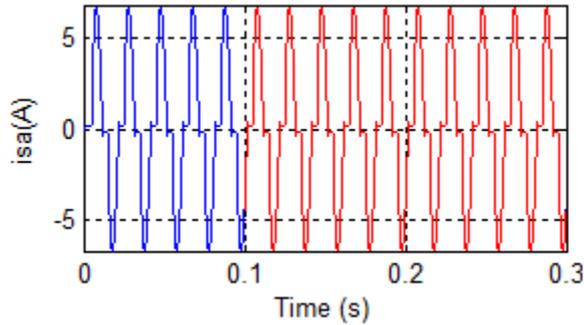
Après filtrage, On fixons la même condition des charge équilibrés avec insertion le filtre a l'instant 0,1s, et La figure (a) montre que les forme des courants est sinusoïdale après le filtrage

### III.2.2.3 Cas de charge déséquilibré

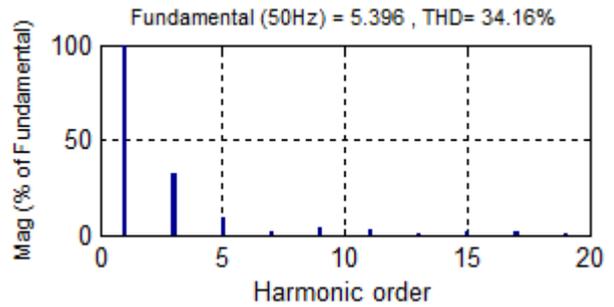
Dans ce deuxième cas nous avons pris un système de charges déséquilibré, c'est la raison pour laquelle nous ne tracerons que les courbes du courant de source de chaque phase, ainsi que les spectres des harmoniques du chaque phases, Les résultats de simulation du système étudié sont présentés sur les figures suivants :

**a-Avant filtrage :**

**\* Phase a**



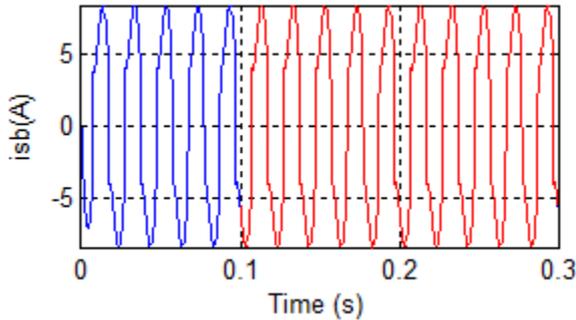
-a- courant de la source( phase a).



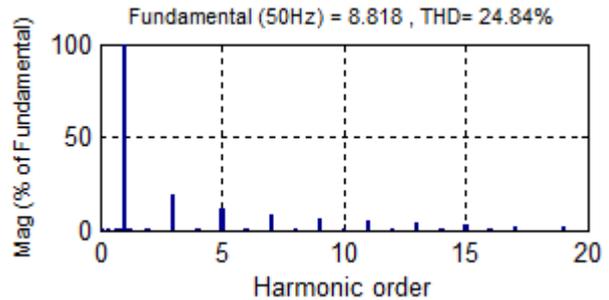
-b- Spectre d'harmonique (phase a).

Le taux de distorsion d'harmonique a été mesurée sur 10 périodes (colorés en rouge) entre l'instant 0.1 et 0.3 s, nous remarquons que THD = 34.16 %.

**\* Phase b**



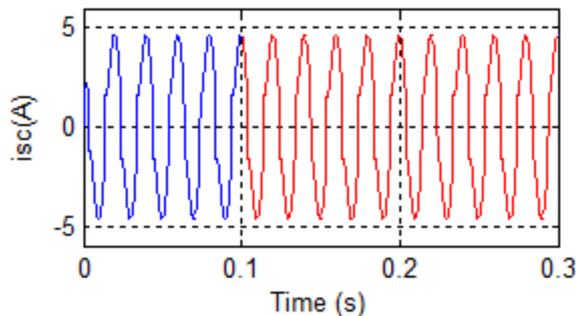
-c- courant de la source( phase b).



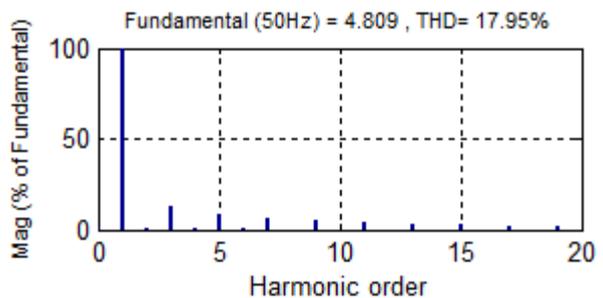
-d- Spectre d'harmonique (phase b).

Le taux de distorsion d'harmonique a été mesurée sur 10 périodes (colorés en rouge) entre l'instant 0.1 et 0.3 s, nous remarquons que THD = 24.84%

**\* Phase c**



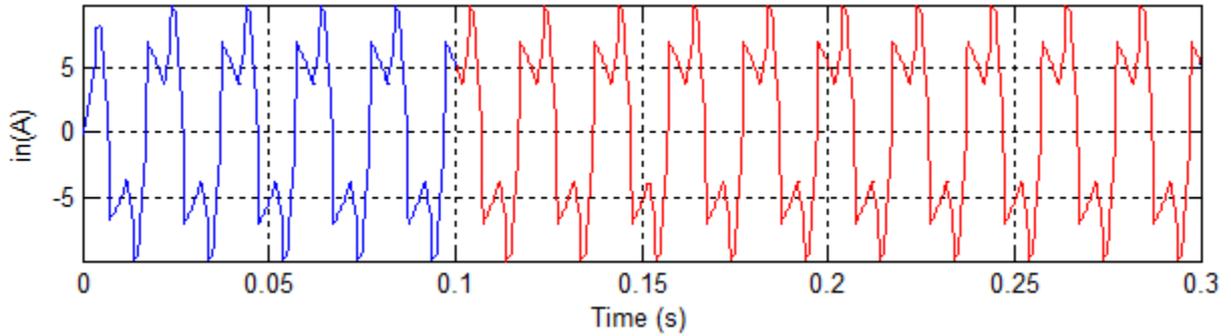
-e- courant de la source( phase c).



-f- Spectre d'harmonique (phase c).

Le taux de distorsion d'harmonique a été mesurée sur 10 périodes (colorés en rouge) entre l'instant 0.1 et 0.3 s, nous remarquons que THD = 17.95%

\* **Fil neutre**



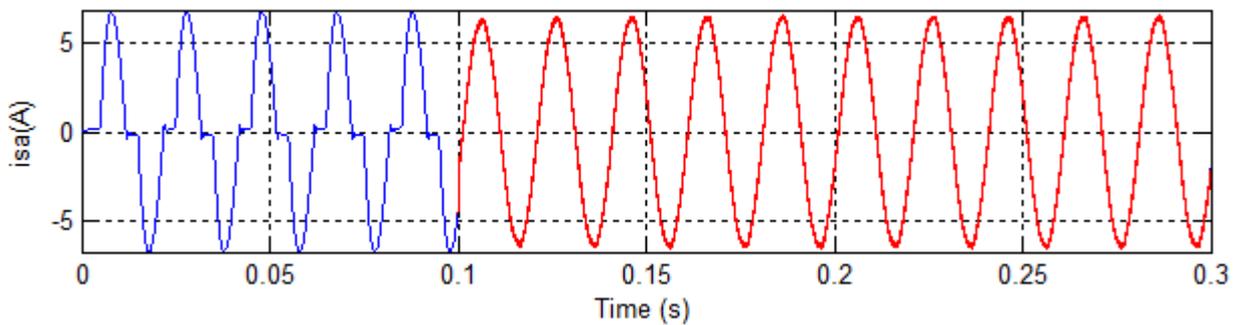
-g- courant de neutre.

Figure (III.5): Simulation du FAP à quatre bras dans le cas les charges déséquilibré.

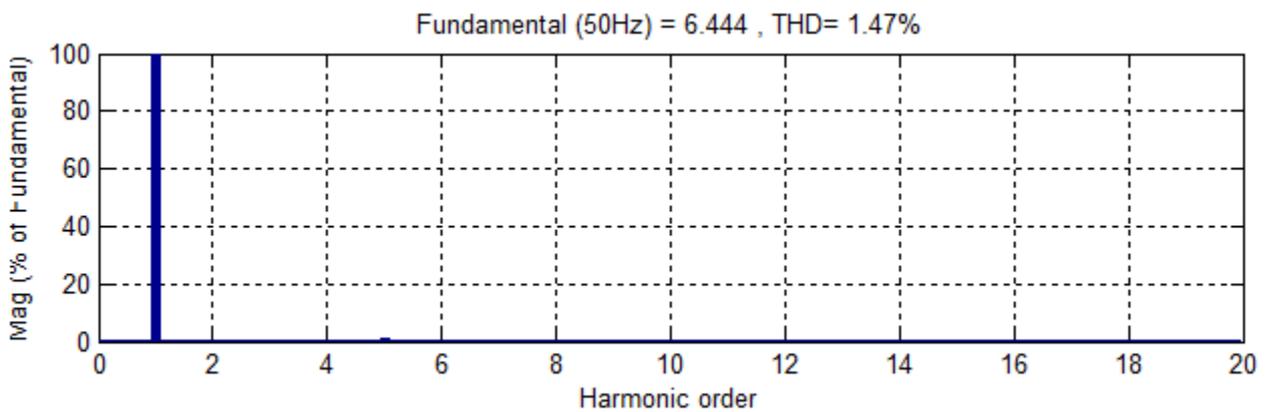
**b- Après filtrage**

❖ **Filtrage par la méthode Référentiel synchrone avec FPB**

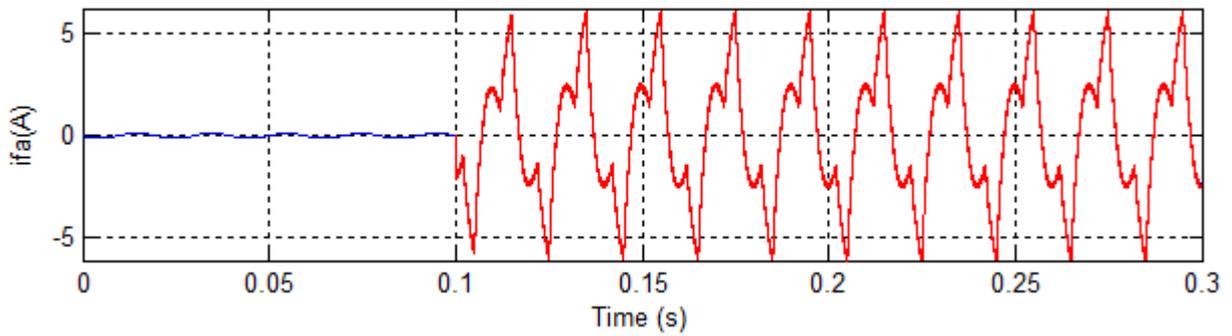
\* **Phase a**



-a- courant de la source avant et après le filtrage ( phase a).



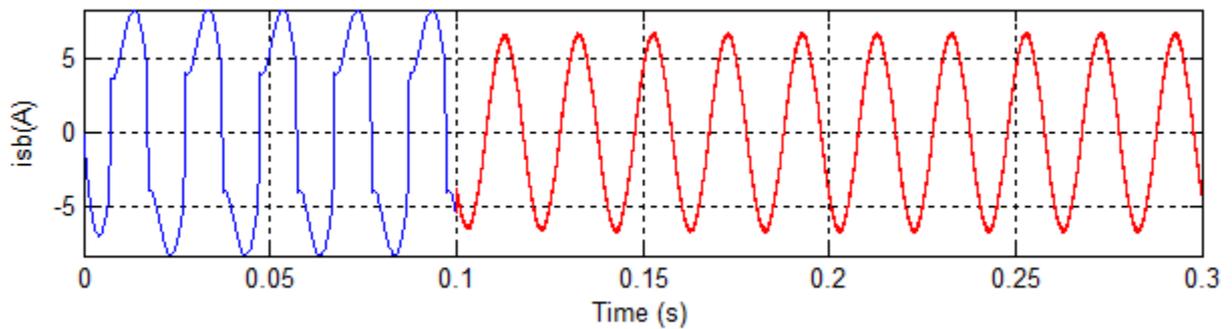
-b- Spectre d'harmonique (phase a).



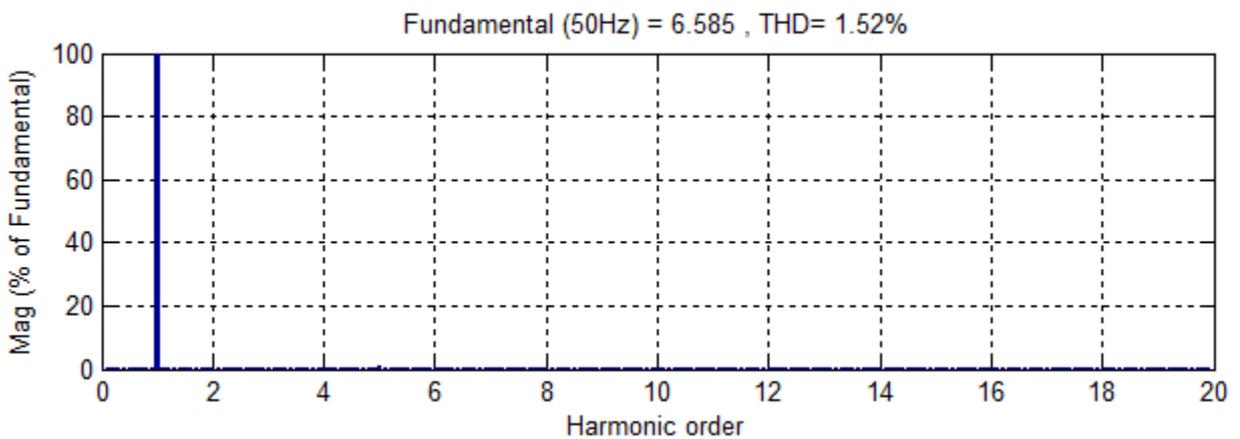
-c- Courant injecté par filtre actif (phase a).

Le taux de distorsion d'harmonique a été mesurée sur 10 périodes (colorés en rouge) entre l'instant 0.1 et 0.3 s, nous remarquons que THD = 1.47%.

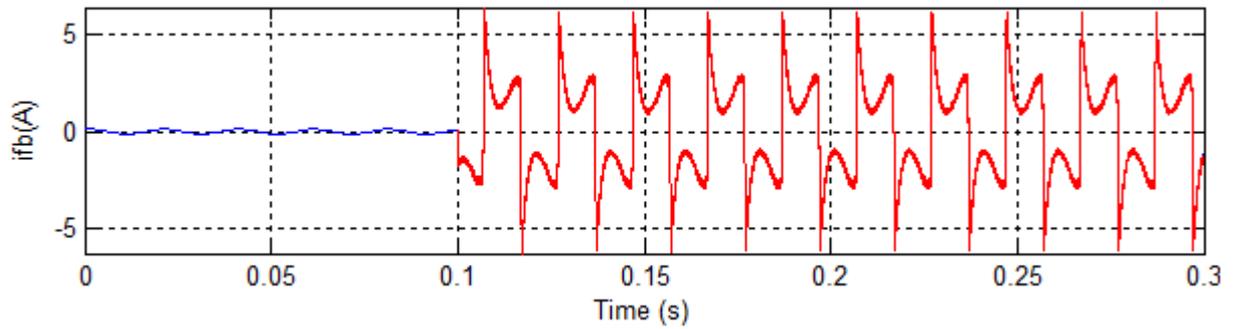
\* **Phase b**



-d- courant de la source avant et après le filtrage ( phase b).



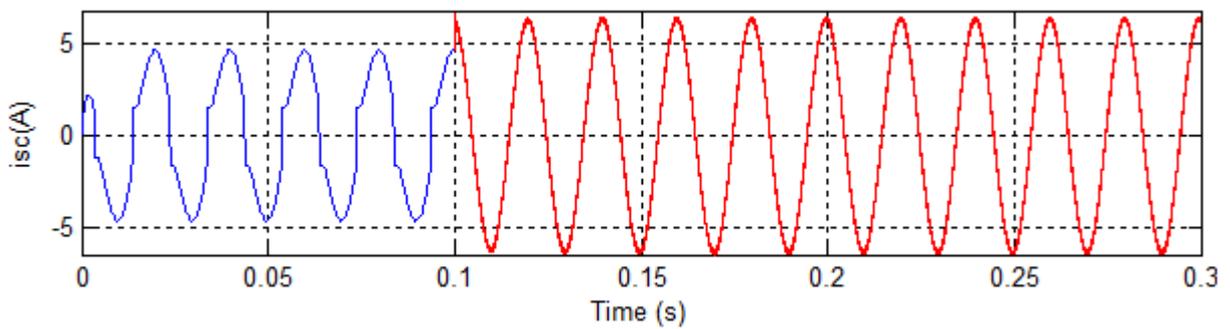
-e- Spectre d'harmonique (phase b).



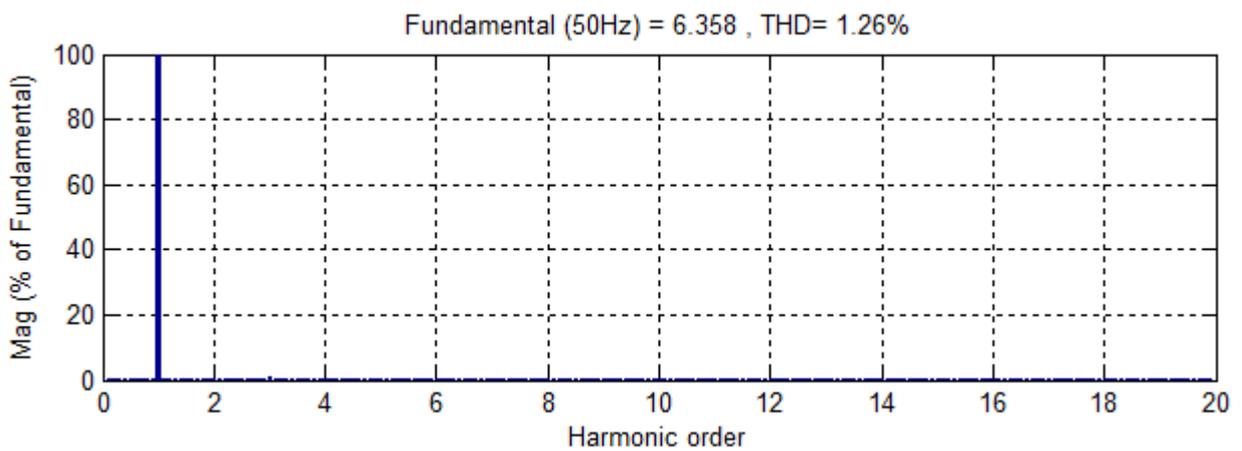
-f- Courant injecté par filtre actif (phase b).

Le taux de distorsion d'harmonique a été mesurée sur 10 périodes (colorés en rouge) entre l'instant 0.1 et 0.3 s, nous remarquons que  $THD = 1.52\%$ .

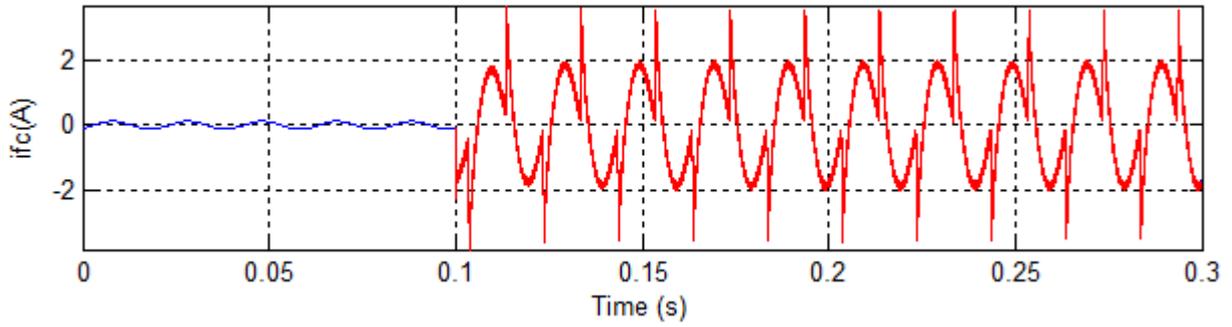
\* Phase c



-g- courant de la source avant et après le filtrage ( phase c).



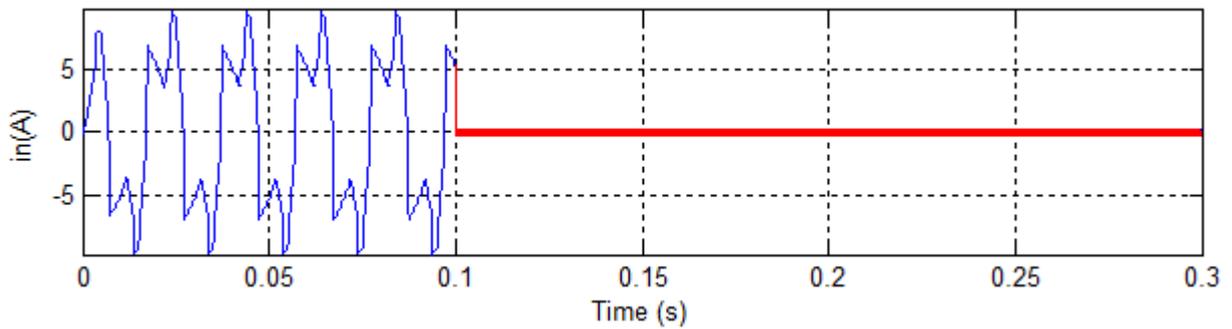
-h- Spectre d'harmonique (phase c).



-i- Courant injecté par filtre actif (phase c).

Le taux de distorsion d'harmonique a été mesurée sur 10 périodes (colorés en rouge) entre l'instant 0.1 et 0.3 s, nous remarquons que THD = 1.26%.

**\* Fil neutre**



-j- courant de neutre avant et après le filtrage .

Figure (III.6): Simulation du FAP à quatre bras par la méthode R S avec FPB (charge déséquilibré).

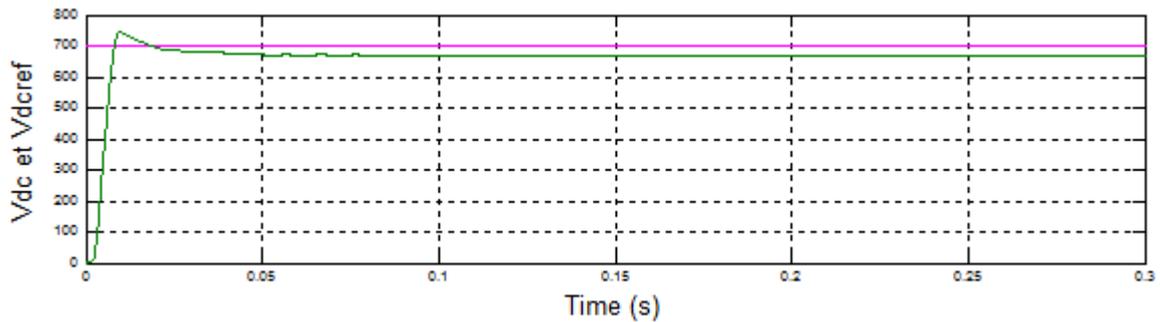


Figure (III.7): Tension aux bornes du condensateur.

### III.2.2.4 Interprétations des résultats

Les figures (III,5), (III,6), (III,7) présentent les résultats obtenus :

- Les résultats de la figure (III,5), (III,6), représentent la réponse pour un cas de charge déséquilibré est le non même pour tous C'est-à-dire que les trois charges monophasées non-identiques alimentés par un gradateur monophasé, et deux diode monophasé , non commandées.

Avant filtrage, on remarque dans la figures (abc) que le courant de la source sont pollués et déformé avec un THD phase (a) égale 34.16%, et phase (b) égale 24.84%, et phase (c) égale 17.95%, et la figure (g) montre qu'il ya un courant excessif dans le neutre à cause de surcharge importantes par la présence des courants d'harmonique.

Après filtrage, On fixons la même condition des charge déséquilibrés avec insertion le filtre a l'instant 0,1s, et La figures (abc) montre que les forme des courants est sinusoïdale après le filtrage (coté source), avec un THD phase(a) égale 1.47%,et phase (b) égale 1.52%,et phase (c) égale 1.26%, et La courant du neutre côté source est après le filtrage , il est devenu nul.

- Les résultats de la figure (III.7), représente la réponse de Tension aux bornes du condensateur. nous observons les variations de tension aux bornes du condensateur de 0 s à 0,1s régime transitoire et la stabilité de la tension au moment présent de 0,1 s à 0,3 s, idéalement par rapport à 700 v régimes permanentes.

### III.3 Conclusion

D'après les résultats de simulation nous remarquons que :

- Les courants du côté source sont sinusoïdaux presque dépourvus d'harmonique, et leurs THD sont présentés dans le tableau suivant :

	THD[%]	Phase a	Phase b	Phase c
Charges équilibrées	THD[%] Avant filtrage	27.25%		
	THD[%] Après filtrage	1.59%		
Charges déséquilibrées	THD[%] Avant filtrage	34.16%	24.84%	17.95%
	THD[%] Après filtrage	1.47%	1.52%	1.26%

Table (III.3): THD des courant de source.

- Le courant du neutre côté source est aussi filtré, il est devenu pratiquement nul.

## ***Conclusion Générale***

---

Ce travail a été consacré à l'application et l'amélioration des performances d'un filtre actif à quatre bras pour l'amélioration de la qualité d'énergie électrique dans un réseau électrique basse tension avec distribution du fil neutre. Le filtre actif parallèle avait pour objectif compenser les courants perturbateurs harmoniques, réactifs et déséquilibrés afin de maintenir un système de courants triphasé du côté de source sinusoïdal et équilibré ou en d'autres termes, découpler les perturbations causées par les charges non linéaire du réseau amont.

Dans le premier chapitre, après l'analyse théorique des perturbation harmonique et leurs effets sur le réseau électrique, et enfin on présenté les solutions traditionnelles et modernes utilisées pour dépolluer les réseaux électriques.

Dans le deuxième chapitre nous avons étudié la structure générale du filtre actif parallèle à quatre bras composé en deux partie : la partie puissance et la partie contrôle-commande, la partie puissance constituer en trois blocks sont onduleur de tension à quatre bras, le circuit de stockage d'énergie et le filtre de couplage, et dans la partie contrôle-commande nous avons étudié deux algorithmes d'identification des grandeurs harmoniques de référence: Identification par la méthode des puissances instantanées avec FPB+FMV et l'identification par la méthode Référentiel synchrone avec FPB, donc est important de noter que l'Identification par la méthode des puissances instantanées avec FPB+ FMV et Référentiel synchrone avec FPB, qui permettant d'améliorer les performances de compensation du filtre actif parallèle d'un réseau triphasé à quatre fils. La commande par hystérésis.

Dans le troisième chapitre, nous avons étudié la simulation de l'ensemble réseau, charge non linéaire et le filtre actif parallèle à quatre bras sous l'environnement Matlab Simulink. d'après les résultats de simulation nous remarquons que les courants du côté source sont sinusoïdaux presque dépourvus d'harmonique et le courant dans le fil neutre côté source est devenu nul.

**BIBLIOGRAPHIES**

- [01] **S. Hafsia** « Commande d'un Filtre actif parallèle à quatre bras par des techniques avancées », Thèse de magistère, Université Mohamed Kheider-Biskra, 2015.
- [02] **D. OULD ABDESLAM** « Techniques Neuromimétiques pour la Commande dans les Systèmes Electriques : Application au Filtrage Actif Parallèle dans les Réseaux Electriques Basse Tension » . Thèse de doctorat, Université de Haute-Alsace, Décembre 2005.
- [03] **M. Tidjani** « Étude et Conception d'un Filtre Actif Parallèle Triphasé à Quatre Fils en vue de sa Commande par des Méthodes d'Intelligence Artificielle », Thèse de doctorat, Université Mohamed Kheider-Biskra , 2017.
- [04] **M. Al. ALALI**, « Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension », Thèse Doctorat de l'Université Louis Pasteur-Strasbourg I, 2002.
- [05] **A. RABIE**, «Contribution à l'étude du filtre actif parallèle de puissance à trois niveaux », Thèse de magistère, Université d'El-Oued ,2012.
- [06] **Abdelmalek BOULAHIA** << Etude des Convertisseurs Statiques destinés à la Qualité de l'Energie Electrique >> mémoire magister en électrotechnique Université de Constantine, 2009
- [07] **G. Ismail**, «Étude Et Réalisation D'un Filtre Actif Parallèle En Utilisant Différentes Stratégies De Contrôle», Thèse de doctorat, Université Mohamed Kheider-Biskra , 2016
- [08] **M. Fatiha**, <<Etude et Commande d'un Filtre Actif Parallèle à Structure de Tension >>, Mémoire de Magister, Univ. Oran, Octobre 2001.
- [09] **I. ETXEVERRIA**, « Actionneurs réseaux dédiés à la qualité d'énergie ». Thèse de doctorat de l'INPG, Grenoble, France, (2003).
- [10] **Ch. ARNOUX**, « Les Harmoniques », Fiche d'application, Ed 1, Service Communication, France, Mai 2008.
- [11] **L. MORAN et J. DIXON** « Power Electronics Handbook », Academic Press, Chapter 39 pp.1-36 ,2007.
- [12] **CH, Abdelmadjid**. « Filtrage actif triphasé pour charges non linéaires ». Thèse de doctorat. Univ Setif 2010.
- [13] **M. Muftah Abdusalam**, << Structures et Stratégies de Commande des Filtrés Actifs Parallèle et Hybride avec Validations Expérimentales >>, Thèse de Doctorat, Univ. H. Poincaré, Nancy-I, Mai 2008.
- [14] **H.KHOUARA**, « application d'un filtre actif série au control de la tension à réseau à basse tension », Mémoire d'ingénieur d'Etat, Université de BATNA, 2006
- [15] **K. AL HADDAD**, « La qualité de l'énergie électrique », Montreal Canada, 2005

## ***BIBLIOGRAPHIES***

---

- [16] **G. G. Champiot** " Les perturbations électriques et électromagnétiques: Conception et amélioration des installations industrielles et tertiaires" Collection Electra, Dopee Diffusion, 1991REG, N°. 12, pp. 791-796, 1984.
- [17] **P. Meynaud, P. Pene, G. desquilbet**, " Déséquilibre de tension" Note EDF, 96NR00003, 1996.
- [18] **M. Tidjani**, «Stratégies de Commande d'un Filtre Actif Parallèle à Quatre Fils», Thèse de magistère, CENTRE UNIVERSITAIRE D'EL-OUED, 2012.
- [19] **B. Ouahid**, « Contribution à l'analyse des Onduleurs Multiniveaux », Mémoire de Magister, Univ. Batna, 2005.
- [20] **H. AKAGI, S. OGASAWARA and H. KIM**. « The Theory of Instantaneous Power in Three-Phase Four-Wire Systems and its Applications » Electrical engineering in Japan, V. 135, p. 74-86, Mai 2001.
- [21] **J. BALCELLS, M. LAMICH et G. CAPELLA**. < LC Coupled Shunt Active Power Filter (APF) : New Topology and Control Method >. Electrical Power Quality and Utilisation, 2007.