



République Algérienne Démocratique et Populaire



Ministère d'Enseignement Supérieur et de la  
Recherche Scientifique

Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued  
Faculté de Technologie

Mémoire de Fin d'Étude

En vue de l'obtention du diplôme de

**MASTER ACADEMIQUE**

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Électrotechnique

Spécialité : Commande électrique

## *Thème*

*Étude et simulation d'un filtre actif  
parallèle à quatre fils de puissance*

*Réalisé par :*

LOUETRI Mohammed

YAMANI Othman

SMAILI Moulay Souleyman

*Encadré par:*

Dr. ZELLOUMA Laid

*Soutenu en Juin 2022*

## ***Remerciements***

Nous tenons d'abord à remercier dieu tout puissant, qui nous à éclairé le bon chemin et que nous à permis de réaliser ce modeste travail.

Nous tenons à exprimer notre chaleureuse gratitude à Mr :

Zellouma Laid pour son aide, son encouragement, sa patience et ses précieux conseils.

Nous remercions également tous les membres de jury pour avoir bien voulu évaluer notre travail.

L'ensemble des enseignants de l'institut d'électrotechnique pour leurs efforts pendant les années d'étude.

En fin Nous adressons notre remerciements les plus profonds et les distinguées à tous ceux qui nous aidons de proche ou de loin pour accomplir ce travail.

# DEDICACE

*Je dédie ce travail :*

*A mes parents,*

*À mes frères et sœurs, ma grande famille,*

*À mes ceux et celles qui m'éprouvent de la véritable  
amitié.*

LOUETRI MOHAMMED

*Je dédie ce travail :*

*A mes parents,*

*À mes frères et sœurs, ma grande famille,*

*À mes ceux et celles qui m'éprouvent de la véritable  
amitié.*

OTHMAN YAMANI

*Je dédie ce travail :*

*A mes parents,*

*À mes frères et sœurs, ma grande famille,*

*À mes ceux et celles qui m'éprouvent de la véritable  
amitié.*

SMAILI MOULAY SOULEYMAN

## RESUME

Ces dernières années, l'utilisation des convertisseurs statiques est en forte progression. Ces convertisseurs absorbent des courants non sinusoïdaux aux réseaux électriques. Ils se comportent alors comme des générateurs de courants harmoniques provenant des dysfonctionnements au niveau des équipements électriques.

Ce document est une contribution à l'amélioration de la qualité du courant électrique dans ce type de réseaux. Le filtre Actif Parallèle à Quatre fils est étudié, différentes topologies avec différentes charges (équilibré et déséquilibré) sont examinées. L'identification du courant perturbateur est faite à la base de filtre passe haut, qui ont prouvé de très bonne performance de filtre que ce soit, en régime transitoire ou en régime permanent.

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

Les résultats obtenus prouvent que le filtre actif nous permet d'avoir des résultats très satisfaisants avec des THDi de courants de source conformes aux normes inférieures à 5%.

**Mots clés:** charge non linéaire, Courants harmoniques, identification des harmoniques des courants, Taux de distorsion d'harmonique THD, FAP à quatre fils, Onduleur, Méthode p-q.

## **ABSTRACT**

Recently, the use of power electronic loads is increased. These power electronic loads absorb non-sinusoidal current from the electrical network and behave as harmonic currents generator, which can cause undesirable effects on electrical equipments.

This work is a contribution of improving the quality of electric current in such net works. Four wires shunt active filter is studied, different topologies with different loads (balanced and unbalanced) are discussed. The control is made at the base of High pass filter, which proved very good filtering performance, either in transient or steady.

The structure of a four-wires shunt active power filter and its control strategy are the most important elements in the compensation process. In this work, two-levels voltage source inverter topology is selected. However, instantaneous active and reactive power theory (p-q) is applied to calculate and identify harmonic currents. The hysteresis controller is used in current control loops. However, the simulations have been performed using Matlab/Simulink.

The shunt active filter based on the proposed control strategy has shown good performance in reducing the total harmonic distortion (THDi) of the source current to less than 5% satisfying the international recommendation.

**Key words:** non-linear load, Harmonic current, extraction the current harmonics, Total harmonic distortion THD, shunt active power filter four-wires, inverter, method (p-q),

## المخلص

في السنوات الأخيرة , يعتبر استعمال المحولات الثابتة في تزايد كبير , حيث أن هؤلاء المحولات يمتصون تيارات غير جيبييه من الشبكة الكهربائية . إذا أنهم يسلكون سلوك مولدات التيار التوافقي الذي يحدث خلل على مستوى الأجهزة الكهربائية.

تمثل هذه المورقة مساهمة في تحسين نوعية التيار الكهربائي في مثل هذه الشبكات. ندرس المصفي الفعال ذو أربعة خيوط ونستعمل عدة أشكال لهذا المصفي ومختلف أنواع الحمولات (متوازنة وغير متوازنة). يتم الكشف عن التيار الملوث باستعمال مصفي عالي العبور، وقد أعطى هذا الأخير نتائج ممتازة ، سواء في الحالة العابرة أو السكونية

بعد التذكير بأهم الاضطرابات التي تؤثر على الشبكة الكهربائية أسبابها و تأثيرها و مختلف الحلول لتصفية الشبكة من الشوائب . سوف نقوم بدراسة إجمالية لبنية المرشح الفعال المتوازن ذو أربعة أسلاك للاستطاعة , و بعد ذلك نقوم بدراسة تحكم المرشح الفعال القائم على العاكس والطرق المستعملة لتحديد التيارات التوافقية المرجعية وفي هذه الدراسة سوف نستعمل طريقة الاستطاعة اللحظية p-q. و بعد ذلك سوف نتحقق من النتائج عن طريق المحاكاة باستعمال برنامج الماتلاب .

النتائج المتحصل عليها تثبت أن المرشح الفعال يتيح لنا الحصول على نتائج جيدة جيدا , مع أقل من 5% و ذلك ما يوافق القوانين و النظم الدولية .

الكلمات المفتاحية : الحمولة الغير خطية , التيارات التوافقية , تحديد التوافقيات للتيارات , معامل تشويه التيار , المرشح الفعال المتوازن ذو أربعة خيوط , المرشح , طريقة p-q .

## SOMMAIRE

<b>LISTE DES FIGURES</b> .....	<b>I</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX</b> .....	<b>II</b>
<b>LISTE DES SYMPOLES</b> .....	<b>III</b>
<b>LISTE DES ABREVIATIONS</b> .....	<b>V</b>
<b>INTRODUCTION GENEERALE</b> .....	<b>1</b>

### CHAPITRE I GENERALITES SUR LES PERTURBATIONS DES RESEAUX ELECTRIQUES

I.1 Introduction.....	3
I.2 Perturbation électrique.....	3
I.2.1 Creux et coupures de tension.....	4
I.2.2 Fluctuations des tensions.....	4
I.2.3 Déséquilibre du système triphasé de tension.....	5
I.2.4 Variation de fréquence.....	5
I.2.5 Harmonique et inter harmonique.....	5
I.2.5.1 Source d'harmonique.....	6
I.2.5.2 Conséquence néfastes des harmoniques.....	6
I.2.5.2.1 Effets instantanés .....	6
I.2.5.2.2 Effets à terme.....	7
I.3 Les techniques de dépollution des réseaux électriques.....	8
I.4 Grandeurs caractéristiques.....	8
I.4.1 Grandeur harmonique.....	8
I.4.2 Rang de l'harmonique.....	9
I.4.3 Série de Fourier.....	9
I.4.4 Valeur efficace d'une grandeur alternative.....	9
I.4.5 Taux de distorsion.....	10
I.4.6 Facteur de puissance.....	10
I.4.7 Spectre d'harmonique (de fréquence).....	11
I.4.8 Charges linéaires et non linéaires.....	11
I.5 Influence des harmoniques sur le facteur de puissance FP.....	12
I.6 Normes et réglementation de perturbation.....	12
I.7 Les solutions traditionnelles.....	13
I.7.1 Compensation des courants harmoniques.....	13
I.7.1.1 Surdimensionnement ou déclassement de l'installation électrique.....	13
I.7.1.2 Transformateurs à couplage spécial.....	14

I.7.1.3 Inductances (selfs) série.....	14
I.7.1.4 Filtre passif.....	14
I.7.1.4.1 Filtre résonant.....	14
I.7.1.4.2 Filtre amorti.....	15
I.7.2 Compensation de la puissance réactive.....	15
I.7.3 Rééquilibrage des courants du réseau électrique.....	15
I.7.4 Agir sur la structure de l'installation.....	16
I.7.5 Pont dodécaphasé.....	16
I. 8 Solutions modernes de dépollution.....	16
I.8.1 Filtrage actif.....	16
I.8.1.1 Filtre actif parallèle(FAP).....	17
I.8.1.1.1 Filtre actif parallèle monophasé.....	17
I.8.1.1.2 Filtre actif parallèle à trois fils.....	18
I.8.1.1.3 Filtre actif parallèle à quatre fils.....	18
I.8.1.2 Filtre actif série.....	18
I.8.1.3 Combinaison parallèle série actif.....	19
I.8.2 Filtrage hybride.....	19
I.8.2.1 Association série d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif.....	20
I.8.2.2 Association parallèle d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif.....	20
I.8.2.3 Association d' un filtre actif série et d' un filtre passif.....	20
I.8.3 Les redresseurs MLI.....	21
I.8.3.1 Redresseur de tension.....	21
I.8.3.2 Redresseur de courant.....	22
I.9 Conclusion.....	22

## CHAPITRE II

### STRUCTURE DU FILTRE ACTIF PARALLELE A QUATRE FILS DE PUISSANCE ET PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

II.1 Introduction.....	23
II.2 Principe de filtrage actif parallèle de puissance.....	23
II.3. Modélisation et stratégies de commande de l'onduleur.....	24
II.3.1. Constituants d'un filtre actif parallèle à quatre fils.....	24
II.4 Structure Onduleur tension à quatre fils.....	24
II.4.1 Etude de la partie puissance .....	25
II.4.1.1 États de commutations possibles de l' onduleur.....	25
II.4.1.2 Filtre de sortie .....	26
II.4.1.3 circuit de stockage d'énergie .....	27

II.4.1.3.1 Estimation de la valeur de la capacité du condensateur de stockage.....	28
II.4.2 Etude de la partie commande.....	28
II.4.2.1 Les méthodes d'identification des courant perturbés.....	29
II.3.2.1.1 Généralités sur les méthodes d'identification.....	29
II.4.2.1.2 . Principe du fonctionnement de la méthode des puissances instantanées.....	30
II.4.2.2 Système a PLL.....	32
II.4.2.3 Commande de onduleur.....	34
II.4.2.3.1 La commande par hystérésis .....	34
II.4.2.3.2 Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI ).....	35
II.4.2.4 Régulation de la tension continue.....	36
II.5. Conclusion .....	38

### CHAPITRE III

#### SIMULATION DE L'ENSEMBLE RESEAU, CHARGE POLLUANTE ET FAP A QUATRE FILS

III.1 Introduction.....	39
III.2 Schéma de simulation.....	39
III.3 Schéma de la méthode de puissances instantanées classique avec FPB.....	40
III.4. Schéma de charges.....	40
III.4.1 Paramètres de la simulation.....	40
III.4.2 Résultat de simulation sous Matlab-Simulink.....	41
III.4.2.1 Cas de charge équilibrée .....	41
III.4.2.1.a- Le courbe avant filtrage.....	41
III.4.2.1.b- Les courbes après filtrage.....	43
III.4.2.1.c - Les courbes avant et après filtrage .....	45
III.4.2.2 Cas de charges déséquilibrées (I) .....	47
III.4.2.2.a- Les courbes avant filtrage .....	47
III.4.2.2.b- Les courbes après filtrage.....	49
III.4.2.2.c - Les courbes avant et après filtrage.....	51
III.4.2.3 Cas de charges déséquilibrées (II) .....	52
III.4.2.3.a- Les courbes avant filtrage .....	53
III.4.2.3.b- Les courbes après filtrage.....	54
III.4.2.3.c - Les courbes avant et après filtrage.....	56
III.5. Conclusion.....	58
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>59</b>
<b>Bibliographies.....</b>	<b>60</b>

## LISTE DE FIGURE

Figure	Le Titer	Page
Figure I.1(a)	Creux et coupures de tension.	4
Figure I.1(b)	Fluctuations de tension.	5
Figure I.1(c)	Cas particulier de déséquilibre du système triphasé de tension.	5
Figure I.1(d)	Variation de fréquence.	5
figure I.1(e)	Harmoniques.	6
Figure I.2	Déférentes solutions utilisées dans le filtrage du courant	8
Figure I.3	Décomposition d'un signal périodique.	8
Figure I.4	Diagramme de Fresnel des puissances	11
Figure I.5	Le spectre harmonique du courant de charge polluante	11
Figure I.6	Formes d'onde (tension, courant) d'une charge linéaire et charge non linéaire	12
Figure I.7	Filtre passif résonnant	14
Figure I.8	Branchement d'un filtre amorti	15
Figure I.9	Montage de Steinmetz pour le rééquilibrage	15
Figure I.10	Pont dodécaphasé	16
Figure I.11	Filtre actif parallèle	17
Figure I.12	Déférentes configurations d'un filtre actif monophasé	18
Figure I.13	Configuration d'un FAP à trois fils	18
Figure I.14	Filtre actif série	19
Figure I.15	Combinaison d'un filtre actif parallèle avec un filtre actif série	19
Figure I.16	Association série d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif	20
Figure I.17	Association parallèle d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif	20
Figure I.18	Filtre actif série connecté en série avec un filtre passif parallèle	21
Figure I.19	Redresseur de tension	21
Figure I.20	Redresseur de courant	22
Figure II.1	principe de la compensation active des harmoniques	23
Figure II.2	Principe du filtrage actif parallèle triphasé à quatre fils	24
Figure II.3	Structure d'un onduleur de tension à quatre bras	25
Figure II.4	États de commutations possibles de l'onduleur à quatre bras	25
Figure II.5	Commande du FAP	29
Figure II.6	Schéma de principe des filtres utilisés pour l'extraction des composantes alternatives p et q	32
Figure.II.6.a	Filtre passe bas	32
Figure.II.6.b	Filtre passe haut	32
Figure II.7	Algorithme réactives instantanées d'identification de la méthode Des puissances actives et réactive instantané	32
Figure II.8	schéma de principe d'une PLL classique	33
Figure II.9	schéma fonctionnel de la PLL	34
Figure II.10	Principe de la commande par hystérésis	35
Figure II.11	Schéma de principe <i>MLI</i>	35
Figure II.12	Boucle de régulation de la tension du bus continue par $I_{dc}$	37
Figure II.13	Boucle de régulation de la tension du bus continue par $P_{dc}$	38
Figure III.1	Schéma de simulation FAP à quatre fils	39
Figure III.2	Schéma de simulation la méthode de puissances instantanées classique avec FPB	40

<b>Figure III.3</b>	Schéma de charges	40
<b>charge équilibrée</b>		
<b>Figure III.4</b>	Simulation du FAP à 4 bras par de charge équilibrée avant filtrage	42
<b>Figure III.5</b>	Spectre d'harmonique du courant de la source par de charge équilibrée (phase a)	43
<b>Figure III.6</b>	Simulation du FAP à 4 bras par de charge équilibrée après filtrage	44
<b>Figure III.7</b>	Spectre d'harmonique du courant de la source (phase a)	45
<b>Figure III.8</b>	Simulation du FAP à 4 bras par de charge équilibrée avant et après filtrage	46
<b>charge déséquilibrée(I)</b>		
<b>Figure III.9</b>	Simulation du FAP à 4 bras par de charge déséquilibrée (I) avant filtrage	48
<b>Figure III.10</b>	Spectre d'harmonique du courant de la source (phase abc)	48
<b>Figure III.11</b>	Simulation du FAP à 4 bras par de charge déséquilibrée après filtrage.	50
<b>Figure III.12</b>	Spectre d'harmonique du courant de la source (phase abc).	50
<b>Figure III.13</b>	Simulation du FAP à 4 bras par de charge déséquilibrée (I) avant et après filtrage	52
<b>charge déséquilibrée(II)</b>		
<b>Figure III.14</b>	schéma de charges déséquilibrées (II)	52
<b>Figure III.15</b>	Simulation du FAP à 4 bras par de charge déséquilibrée (II) avant filtrage	54
<b>Figure III.16</b>	Spectre d'harmonique du courant de la source (phase abc)	54
<b>Figure III.17</b>	Simulation du FAP à 4 bras par de charge déséquilibrée après filtrage.	56
<b>Figure III.18</b>	Spectre d'harmonique du courant de la source (phase abc).	56
<b>Figure III.19</b>	Simulation du FAP à 4 bras par de charge déséquilibrée (II) avant et après filtrage	57

## LISTE DE TABLEUX

<b>Tableau I.1</b>	Limites des distorsions des tensions au $P_{cc}$ (IEEE 519-1996)	13
<b>Tableau II.1</b>	Tensions générées par l'onduleur de tension à quatre bras	26
<b>Tableau III.1</b>	Paramètres du système étudié	41
<b>Tableau III.2</b>	Résultat complet Taux de distorsion d'harmonique	58

## LISTE DES SYMBOLES

$U_f$	La tension de fourniture(V)
$U_n$	La tension nominale de réseau électrique (V)
h ou k	La range des harmoniques
f	Fréquence ( $H_z$ )
$f_h$	Fréquence de la composante harmonique de rang h( $H_z$ )
$f_1$	Fréquence de la composante fondamentale( $H_z$ )
S(t)	Un signal périodique peut représenter un courant(A)ou une tension (V).
T	Un période (S)
$\omega, \omega_s$	La pulsation de réseau (rad/s)
$\alpha_0$	Composante continue de la signal S(t) périodique.
$\alpha_n, b_n$ ou $\alpha_n, b_n$	Sont les coefficients de la série de Fourier.
$C_n$	L'amplitude l'harmonique de rang h
$\theta_h$	Phase de l'harmonique de rang h( $^\circ$ )
$C_{n\text{eff}}$	La valeur efficace de l'amplitude l'harmonique de rang h
$S_{\text{eff}}$	La Valeur efficace d'une grandeur d'harmonique.
$S_{\text{eff}h}$	Les valeurs efficaces des différentes harmoniques du signales.
D	Puissance Déformante
P	Puissance active (W)
Q	Puissance réactive (Var)
S	Puissance apparente (VA)
FP	Facteur de puissance
$I_f$	Valeur efficace du courant injecté par le FAP
$I_{\text{eff}h}$	Valeur efficace du Courant harmonique du rang h
$\phi_1$	Le déphasage entre la puissance active et la puissance apparent (degré)
$\phi$	Le déphasage entre la puissance active et la puissance apparente S
$\gamma$	Le déphasage entre $S_I$ et S.
$V_1$	Valeur efficace de la tension de l'harmonique de rang h
$S_1$	la puissance apparente dans le cas d'un système équilibré linéaire
$V_h$	Valeur efficace de la tension du fondamental
$P_{cc}$	Point de couplage commun
N	Un nombre de convertisseur triphasé
M	Sera à indice de pulsation
p	indice de pulsation
$f_r$	Fréquence de résonance( $H_z$ )
L	Inductance(H)
C	Capacité(F)
R	Résistance ( $\Omega$ )
$R_s$	Résistance du réseau côté source ( $\Omega$ ).
$L_s$	Inductance côté source (H).
$R_c$	Résistance côté de charge ( $\Omega$ ).
$L_c$	Inductance côté charge (H).
$L_f$	Inductance de filtre (H)
$C_{dc}$	Condensateur du bus continue
$I_s$	Courant du source

$I_f$	Courant du filtre
$I_h$	Courant harmonique de la charge
$I_n$	le courant du neutre
$i_f\{a,b,c,n\}$	Le courant fournit par le filtre actif (A)
$i_s\{a,b,c,n\}$	Le courant fournit par la source(A)
$r_f\{a,b,c\}$	Les résistances de couplage( $\Omega$ )
$l_f\{a,b,c\}$	Les inductances de couplage(H)
$r_s\{a,b,c\}$	Résistance du réseau coté source( $\Omega$ )
$l_s\{a,b,c\}$	Inductance du réseau coté source(H)
$r_c\{a,b,c\}$	Résistance du réseau coté charge( $\Omega$ ).
$l_c\{a,b,c\}$	Inductance du réseau coté charge (H).
$V_S\{1,2,3,n\}$	Tension de source(V).
$i_c\{1,2,3,n\}$	Courants de charges(A).
$V_{dc}$	Tension aux bornes du condensateur(V).
$i_{dc}$	Courant aux bornes du condensateur(A).
$V_{inj}$	Tensions injecte dans la réseau par filtre actif série (V).
$I_{inj}$	Courant injecte dans la réseau par filtre actif parallèle(A).
$I_d$	Le courant de charge coté continu(A).
$U_d$	La tension de charge coté continu(V).
$V_S\{a,b,c\}$	Tension de source(V).
$i_{ch}\{a,b,c\}$	Courants de charges(A).
$i_{\alpha}^*, i_{\beta}^*, i_0^*$	le courant d'identifie
$i_{ca}, i_{cb}, i_{cc}$	le courant de line
$V_{s\alpha}, V_{s\beta}, V_0$	Tensions estimées du réseau électrique au point de raccordement
$i_o$	Courant homopolaire(A).
$p(t)$	Puissance réelle(W).
$p_o(t)$	Puissance homopolaire(W).
$q(t)$	Puissance imaginaire.
$\bar{p}, \bar{q}$	Puissance continue liée à la composante fondamentale du courant et de la tension
$\tilde{p}, \tilde{q}$	Composantes Alternatives de la puissance réelle et imaginaire respectivement
$\varepsilon$	L'amplitude de l'onde triangulaire
$f_c$	Fréquence de coupure( $H_z$ )
$I_{ch-réf}\{a,b,c\}$	Courants de filtre de référence(A).
$\tilde{i}_d, \tilde{i}_q$	Courant alternatif(A).
$\alpha\text{-}\beta$	Axes du repaire de Concordia
$\Delta T$	La période de variation du courant du filtre
$\omega h$	la pulsation du rang h
$T_i$	Etat de l'interrupteur i (ouvert ou fermé)

## LISTE DES ABREVIATIONS

<i>THD</i>	En anglais: Taux de Distorsion Harmonique.
<i>FP</i>	Facteur de puissance.
<i>IGBTs</i>	En anglais: Insolâtes Gâte Bipolaire Transistor.
<i>MOSFETs</i>	En anglais: Metal Oxyde Semi-Conductor Field Effect Transistor.
<i>GTO</i>	En anglais: Gate Turn-Off Thyristor .
<i>MLI</i>	Modulation de Largeur d'Impulsion (En anglais: <i>PWM</i> , Pulse Width Modulation).
<i>VSC</i>	Onduleur de tension ou (En anglais: <i>Voltage Source Converter</i> ).
<i>FAP</i>	Filtre Actif Parallèle.
<i>FAS</i>	Filtre Actif Série.
<i>UPQC</i>	En anglais: Unified Power Quality Conditioner.
<i>IEEE</i>	En anglais: Institute of Electrical and Electronics Engineers.
<i>CEI</i>	En anglais: Commission Electrotechnique Internationale.
<i>IGBT</i>	En anglais: Isolated Gate Bipolar Transformer.
<i>PLL</i>	En anglais: Phase -Locked Loop (Boucle de verrouillage de phase).
<i>FFT</i>	La Transformée de Fourier Rapide.
<i>DFT</i>	La Transformée de Fourier Discrète .
<i>RDFT</i>	La transformée de Fourier discrète récursive.
<i>PIRI</i>	Puissance Instantanée Réelle et Imaginaire.
<i>TCD</i>	Transformation de Concordia Directe .
<i>SRF</i>	Théorie du Référentiel lié au Synchronisme.
<i>PID</i>	Régulateur :Proportionnelle Intégral, Dérivation .
<i>F.e.m.</i>	Force électromotrice.
<i>FPH</i>	Filtre Passe Haut
<i>FPB</i>	Filtre Passe Bas

## INTRODUCTION GENERALE

L'électronique de puissance est un domaine relativement nouveau et en pleine croissance. Ces dernières années, l'utilisation croissante des dispositifs d'électronique de puissance (On appelle ces dispositifs des charges non-linéaires) dans les systèmes électriques a entraîné de plus en plus de problèmes liés aux perturbations ou distorsions harmoniques des réseaux électriques. Ces perturbations sont générées par les charges non-linéaires connectées au réseau, comme exemple, on cite notamment les équipements à charge déséquilibrée et les convertisseurs statiques (redresseurs et cyclo-convertisseurs). Ces charge non-linéaires absorbent des courants non sinusoïdaux, même si elles sont alimentées par une tension sinusoïdale, elles se comportent par conséquent comme des générateurs des harmoniques et échangent en plus l'énergie réactive provenant des dysfonctionnements au niveau des équipements électriques.

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

Actuellement, il existe un certain nombre de solutions techniques pour éliminer ou réduire les effets liés à une mauvaise qualité de l'énergie. Il s'agit là d'un domaine très riche tant en innovations qu'en développement [39].

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 traditionnelles basées sur les filtres passifs, en raison notamment de la bande passante et la flexibilité. Au cour 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 charge 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.

Deux solutions peuvent être envisagées pour la création du quatrième fils.

La première consiste à utiliser un onduleur à quatre bras, et la seconde utilise un onduleur à trois bras conventionnel mais avec un bus continu dont le point milieu sert de point neutre connecté au neutre du réseau. Si la première structure est la plus utilisée dans la littérature parce qu'elle offre la meilleure optimisation du bus continu, la seconde structure est plus préférable de point de vue économique car elle réduit le nombre de semi-conducteur.

Le présent travail traite avec la dépollution harmonique par un filtre actif à quatre fils, et plus spécialement, le filtre à quatre fils à base d'un onduleur à trois bras. Ce travail a pour objectif, la mise en œuvre et la contribution au contrôle de ce type de structure appliquée au filtrage actif dans les réseaux de distribution à quatre fils. Le contrôle-commande du filtre actif est souvent déterminant pour l'objectif de compensation de tous les harmoniques indésirables. Ce contrôle comporte trois parties essentielles, à savoir, l'identification des perturbations harmoniques qui consiste en la séparation des harmoniques dans les courants absorbés par la charge non linéaire, la régulation de la tension continue aux bornes du bus continu de l'onduleur, et le contrôle des courants injectés dans le réseau. La qualité de filtrage sera déterminée ainsi par la qualité de contrôle de ces trois paramètres qui fera l'objet de notre préoccupation principale dans cette mémoire.

La présentation de ce manuscrit est étalée sur trois chapitres :

Le premier chapitre sera consacré au recensement des perturbations qui peuvent apparaître dans un réseau électrique basse tension, leurs causes et leurs conséquences ainsi que les normes visant à diminuer leurs proliférations. Nous rappelons aussi les solutions de dépollution existantes, tant traditionnelles que modernes.

Dans le deuxième chapitre nous avons présentée la structure de filtre actif parallèle à quatre fils, cette structure partagée en deux parties qui sont ; la partie de puissance et la partie de commande-contrôle, la partie de puissance est composée par l'onduleur de tension, système de stockage de l'énergie et filtre de sortie, dont la deuxième partie est composée par la commande d'onduleur et la méthode de l'identification des courants perturbés.

Dans le troisième nous avons simulé l'ensemble réseau, charge polluante, filtre actif parallèle à quatre fils sous l'environnement Simulink /Matlab. Les résultats de simulations obtenus montrent l'efficacité de notre filtre proposé pour la compensation des harmoniques et la puissance réactive en présence des charges équilibrées ou déséquilibrées.

## ***CHAPITRE I***

# **GENERALITES SUR LES PERTURBATIONS DES RESEAUX ELECTRIQUES**

## CHAPITRE I

### GENERALITES SUR LES PERTURBATIONS DES RESEAUX ELECTRIQUES

#### **I.1 Introduction:**

Le distributeur d'énergie doit fournir à l'ensemble de ses clients et utilisateurs une énergie de bonne qualité sous la forme de trois tensions sinusoïdales constituant un réseau triphasé équilibré. La qualité de cette énergie dépend de celle de la tension aux points de raccordement. Toutefois, cette tension subit généralement des perturbations et des altérations durant son transport jusqu'à son arrivée chez le client industriel ou particulier. Les origines de ces altérations sont nombreuses; outre les incidents relatifs à la nature physique et matérielle des organes d'exploitation du réseau, il existe aussi des causes intrinsèques spécifiques au fonctionnement de certains récepteurs particuliers. Une bonne qualité d'énergie est caractérisée par une onde de courant parfaitement sinusoïdale avec une amplitude et une fréquence constante. Par contre, ces convertisseurs affectent la qualité des courants et tensions des réseaux de distribution qui deviennent non sinusoïdaux. Ces systèmes sont des charges non-linéaires et consomment des courants non-sinusoïdaux, même s'ils sont alimentés par une source de tension sinusoïdale [1] [2] .

Afin d'éviter le dysfonctionnement, la destruction des composants du réseau électrique, il est indispensable de comprendre l'origine de ces perturbations et de chercher les solutions adéquates pour les supprimer [1] .

Pour cela ce présent chapitre va aborder les différents types de perturbations et leurs effets néfastes sur la qualité de l'énergie électrique et sur la forme d'onde de la tension et le courant du réseau électrique , ensuite , d'étudier les perturbation d'harmonique en commençant par leurs origines, conséquences et les caractéristiques de ces harmoniques. Par suite, nous parlerons sur les normes et les réglementations imposées aux utilisateurs. Ensuite, nous allons discuté sur les solutions traditionnelles et modernes utilisées pour atténuer ces problèmes liés aux perturbations harmoniques. Finalement, nous exposerons le principe de fonctionnement du filtre actif série, ce filtre est développé tout au long de cette mémoire.

#### **I.2 Perturbation électrique:**

Les perturbations électriques affectant des quatre paramètres (la fréquence, l'amplitude , la forme d'onde et la symétrie) [3].

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 [4].

La qualité de la tension peut être affectée, soit du fait de certains incidents inhérents à la nature physique et aux sujétions liées à l'exploitation du réseau, soit du fait de certains

récepteurs. Ces défauts se manifestent sous forme de différentes perturbations affectant un ou plusieurs des cinq paramètres précédemment définis. Quatre possibilités distinctes de perturbations peuvent être alors citées:

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

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

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

Une coupure de tension quand elle est une diminution brutale de la tension à une valeur supérieure à 90% de la tension nominale ou disparition totale pendant une durée généralement comprise entre 10 ms et une minute pour les coupures brèves et supérieure à une minute pour les coupures longues. La plupart des appareils électriques admettent une coupure totale d'alimentation d'une durée inférieure à 10 ms. La figure I.1(a) montre un exemple de creux et de coupure de tension[3].

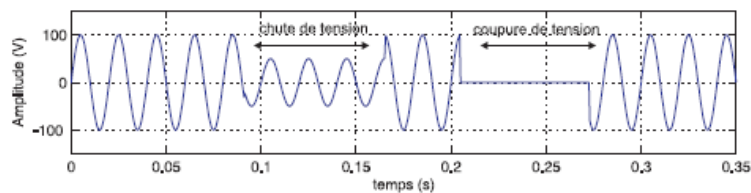


Figure I.1(a): Creux et coupures de tension.

### I.2.2 Fluctuations des tensions:

Les fluctuations de tension sont des variations périodiques ou erratiques de l'enveloppe de la tension. Ce sont des variations brutales de l'amplitude de la tension situées dans une bande de  $\pm 10\%$  et se produisent sur un intervalle de temps de quelques centièmes de secondes. Elles sont en particulier dues à la propagation sur les lignes du réseau de courants d'appel importants. L'origine principale de ces courants est le fonctionnement d'appareil dont la puissance absorbée varie de manière rapide, comme les fours à arc et des machines à souder. Ces fluctuations se traduisent par des variations d'intensité, visible au niveau de l'éclairage causant une gêne visuelle perceptible pour une variation de 1% de la tension. Ce phénomène de papillotement est appelé *flicker*. Un exemple de fluctuation de tension est montré dans la figure I.1(b) [3].

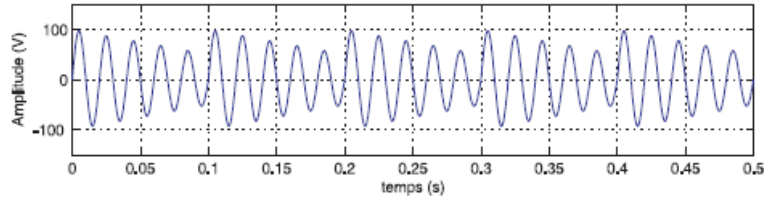


Figure I.1(b) Fluctuations de tension.

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

Lorsque les trois tensions ne sont pas identiques en amplitude et/ou ne sont pas décalées d'un angle de  $120^\circ$  les unes par rapport aux autres, on parlera de déséquilibre du système triphasé (voir la figure I.1(c)). Un réseau électrique triphasé équilibré alimentant un récepteur électrique triphasé non équilibré conduit à des déséquilibres de tension dus à la circulation de courants non équilibrés dans les impédances du réseau [3].

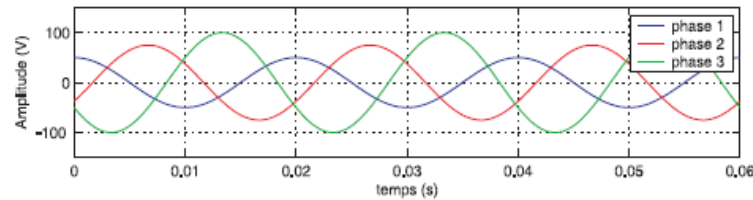


Figure I.1(c) Cas particulier de déséquilibre du système triphasé de tension.

### I.2.4 Variation de fréquence:

Bien qu'elles soient rares et qu'elles ne soient observées que lors de circonstances exceptionnelles, par exemple certains défauts graves du réseau, au niveau de la production ou du transport, elles peuvent apparaître sur les réseaux des utilisateurs non interconnectés ou alimentés par une source thermique autonome [4].

Une variation sensible de la fréquence du réseau peut apparaître sur les réseaux des utilisateurs non interconnectés ou alimentés par une source thermique autonome (voir la figure I.1(d)). Au niveau des réseaux de distribution ou de transport, cette variation de la fréquence est très rare et n'est présente que lors de circonstances exceptionnelles, comme dans le cas de certains défauts graves sur le réseau. Dans des conditions normales d'exploitation, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle  $50 \text{ Hz} \pm 1\%$  [3].

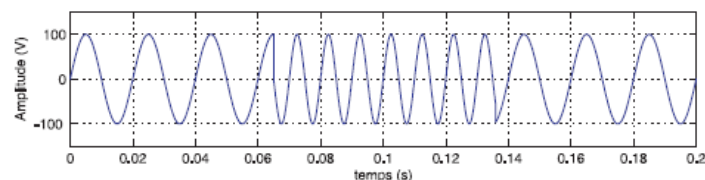


Figure I.1(d) Variation de fréquence.

### I.2.5 Harmonique et inter harmonique:

Les harmoniques sont une superposition sur l'onde fondamentale à  $50 \text{ Hz}$ , d'ondes également sinusoïdales mais de fréquences multiples entières de celle du fondamental.

La figure I.1(e) montre la superposition de l'harmonique d'ordre 3 sur un courant fondamental de fréquence 50 Hz. La principale source de la présence des harmoniques dans les réseaux électrique est l'utilisation de plus en plus croissante d'équipements de l'électronique de puissance à base de thyristors [3].

L'amplitude du rang 1 est appelée la composante fondamentale du signal électrique périodique ; dans notre cas il correspond à la fréquence 50Hz. L'harmonique d'ordre zéro correspond à la composante directe du signal, l'amplitude de chaque harmonique est inversement proportionnelle à son ordre [6].

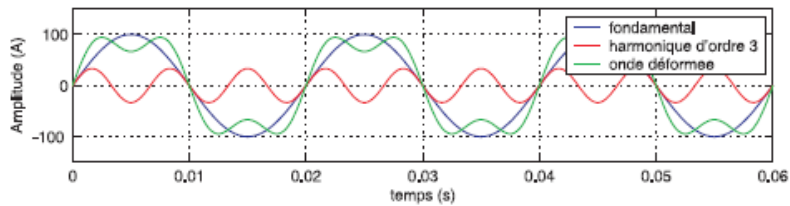


Figure I.1(e) Harmoniques.

### I.2.5.1 Source d'harmonique:

Dans le plupart des cas, les harmoniques de tensions ou de courants présentes sur les réseaux électriques proviennent de l'utilisation des charges non linéaires, tels que les convertisseurs statiques[6].

Les harmoniques sont générées par des charges non linéaires absorbant un courant non sinusoïdale . Actuellement, les équipements à base de thyristors constituent la principale source de ces harmoniques. Ces appareils, dont les caractéristiques électriques varient avec la valeur de la tension, sont assimilables à des générateurs de courants harmoniques : appareils d'éclairage fluorescent, variateurs de vitesse, redresseurs, téléviseurs, ordinateurs, etc [5].

### I.2.5.2 Conséquence néfastes des harmoniques:

Les courants harmoniques se propagent dans le réseau électrique, déforme l'allure du courant de la source et polluent les consommateurs alimentés par ce même réseau. Ils peuvent occasionner des incidents au niveau de l'appareillage du client et donner lieu à des surcoûts de production d'énergie importants. On peut classer les effets engendrés par les harmoniques en deux type : les effets instantanés et les effets à terme[5].

#### I.2.5.2.1 Effets instantanés:

Les effets quasi instantanés sur certains types d'appareillage, tels que l'électronique de puissance, calculateurs, relais, systèmes de contrôle et régulation, etc. La présence d'harmoniques sur les signaux provoque le déplacement du passage par zéro et des modifications de la valeur crête de l'onde[7].

- dysfonctionnements des dispositifs de commande ou de régulation (détection du passage par zéro, ...),
- pertes de précision dans les appareils de mesure (compteur d'énergie, instrumentation,...),

- vibrations dans les moteurs électriques alternatifs à cause des couples mécaniques pulsatoires dus aux champs tournants harmoniques,
- vibrations, bruits acoustiques dans les transformateurs ou les inductances dus aux efforts électrodynamiques proportionnels aux courants harmoniques
- perturbations induites dans les liaisons par courant faible sous forme de bruits par couplage électromagnétique (contrôle-commande, télécommunication, téléphonie, réseaux locaux, ...).
- Interférences avec les systèmes de télécommande à distance utilisés par les distributeurs d'énergie,
- déclenchement intempestif des circuits de protection,
- Effets de papillotement (flicker) au niveau des éclairages et des affichages des appareils électroniques[8].

### **I.2.5.2 .2 Effets à terme:**

Les effets à terme sur les machines tournantes, les transformateurs et les condensateurs, ce qui se manifeste par des échauffements supplémentaires. Il en découle la destruction de matériel ou plus fréquemment une diminution de leur durée de vie par surcharge thermique[7].

- vieillissement prématuré des moteurs électriques alternatifs du fait des pertes cuivre et fer supplémentaires, dû à la différence importante de la vitesse entre les champs tournants inducteurs harmoniques et le rotor,
- échauffements et pertes joules supplémentaires des câbles et des équipement entraînant des déclassements du matériel avec des surdimensionnements,
- surchauffe du neutre. En effet dans un système triphasé équilibré, les tensions sont déphasées de  $120^\circ$  si bien que lorsque les charges sont égales, le courant résultant dans le neutre est nul. Toutefois, si les courants de phases s'annulent, ce n'est pas le cas des courants harmoniques. Ces courants qui sont des multiples impairs de la fréquence du courant de phase s'ajoutent dans le conducteur neutre. Ainsi le courant résultant dans le neutre représente l'addition des courants harmoniques de rang trois et multiple de trois,
- échauffements supplémentaires des condensateurs par conduction et par hystérésis dans le diélectrique qui peuvent conduire au claquage,
- pertes supplémentaires dans les transformateurs ou les inductances dues à l'effet de Peau dans le cuivre, à l'hystérésis et aux courants de Foucault dans le circuit magnétique.
- fatigue mécanique des équipements à cause des vibrations et des couples pulsatoires,
- risque d'excitation de résonance : Les fréquences de résonance des circuits formés par les inductances du transformateur et les câbles sont normalement élevées. Ce n'est pas le cas lorsque des batteries de condensateurs sont raccordées au réseau pour relever le facteur de

puissance. Les fréquences de résonance peuvent devenir assez faibles et coïncider avec celles des harmoniques engendrés par les convertisseurs statiques. Dans ce cas, il y aura des phénomènes d'amplification d'harmoniques qui peuvent entraîner des destructions[8].

### I.3 Les techniques de dépollution des réseaux électriques:

Les solutions suggérées sont, Les solutions traditionnelles et Solutions modernes de dépollution:

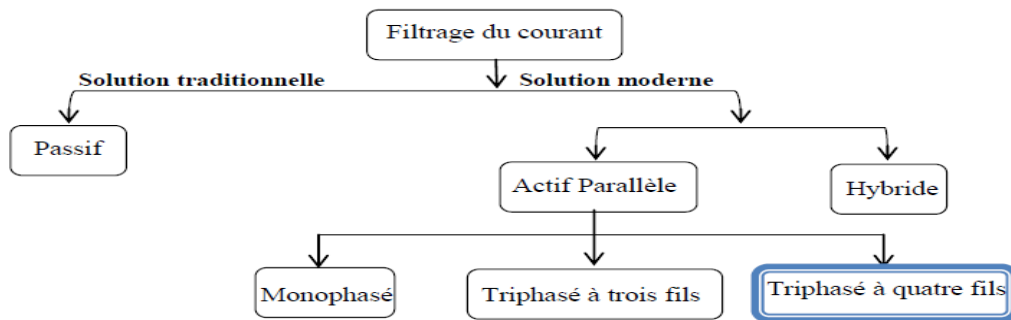


Figure I.2 : Différentes solutions utilisées dans le filtrage du courant[17].

### I.4 Grandeurs caractéristiques:

#### I.4.1 Grandeur harmonique:

Selon la norme *IEEE 519*, un harmonique est une composante sinusoïdale d'une onde périodique ou une quantité ayant une fréquence qui est un multiple entier de la fréquence fondamentale.

L'amplitude de rang 1 est appelée la composante fondamentale du signal électrique périodique. L'harmonique d'ordre zéro correspond à la composante directe du signal, 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 [9].

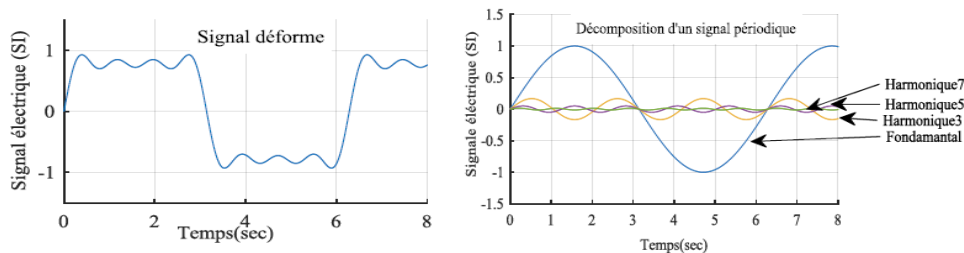


Figure I.3: Décomposition d'un signal périodique.

La mesure de cette pollution est très importante car elle permet de caractériser les installations et de s'assurer de la bonne qualité de l'énergie distribuée. Plusieurs critères existent pour mesurer les perturbations harmoniques mais c'est la Distorsion Totale des Harmoniques (en anglais, Total Harmonica Distorsion, THD) qui est le plus couramment utilisée[10].

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

C'est le rapport de la fréquence harmonique  $f_h$  sur la fréquence fondamentale  $f$  [11].

$$h = \frac{f_h}{f} \quad (\text{I.1})$$

pour  $h=1, f_1 = f$  (I.2)

### I.4.3 Série de Fourier:

La signal  $S(t)$  de la figure I.3 peut représenter un courant ou une tension. Il est périodique de période  $T$ , donc de fréquence  $f = \frac{1}{T}$  et de pulsation:

$$\omega = 2\pi \quad (\text{I.3})$$

Ce signal s'écrit selon la décomposition suivant [11]:

$$S(t) = a_0 + \sum_{h=1}^{\infty} a_n \cdot \cos(h\omega t) + \sum_{h=1}^{\infty} b_n \cdot \sin(h\omega t) \quad (\text{I.4})$$

avec:  $a_0 = \frac{1}{T} \int_0^t S(t) \cdot dt$  (I.5)

pour:  $h \geq 1: a_n = \frac{2}{T} \int_0^t S(t) \cdot \cos(h\omega t) \cdot dt$  (I.6)

$b_n = \frac{2}{T} \int_0^t S(t) \cdot \sin(h\omega t) \cdot dt$  (I.7)

On peut écrire:

$$S(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \sin(h\omega t + \theta_n) \quad (\text{I.8})$$

avec :  $\theta_n = \arctan(a_n/b_n)$  (I.9)

On définit les fréquences d'harmoniques  $f_h$  comme les fréquences multiples de la fréquence fondamentale « $f$ ». Leur rang  $h$  est tel que :

$$f_n = f * h \quad (\text{I.10})$$

$$C_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (\text{I.11})$$

La grandeur  $C_h$  est l'amplitude l'harmonique de rang  $h$ . Il faut noter qu'on utilise très souvent le terme amplitude pour désigner la valeur efficace harmonique donnée par:

$$C_{neff} = \frac{C_n}{\sqrt{2}} \quad (\text{I.12})$$

$\alpha_0$ : Composante continue de la tension  $S(t)$  périodique.

$\theta_n$ : Phase de l'harmonique de rang  $h$  [11].

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

Un procédé couramment utilisé pour décrire un signal  $S(t)$  périodique  $T$  est l'évaluation de sa valeur efficace:

$$S_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^t S^2(t) dt} \quad (\text{I.13})$$

Lorsque le développement en série de Fourier d'une fonction période est continu, on peut déterminer sa valeur efficace comme suit:

$$S_{eff} = (\sum_{h=1}^{\infty} (S_n)^2)^{\frac{1}{2}} \quad (I.14)$$

La valeur efficace d'un signal tient compte de la présence de tous les composants, harmonique, inter-harmonique et de la composante continue.

Lorsqu'un signal comporte des composantes harmoniques, sa valeur efficace est différente de la valeur efficace du signal fondamental. Il est alors possible d'évaluer grossièrement la déformation du signal en comparant la valeur efficace de la composante fondamentale et la valeur efficace [11].

#### I.4.5 Taux de distorsion:

Il y a plusieurs critères existents pour mesurer les perturbations harmoniques mais c'est la Distorsion Totale des Harmoniques (en anglais, Total Harmonic Distortion, THD) qui est le plus couramment utilisé.

Le *THD* étant défini comme le rapport entre la résultante de toutes les composantes harmoniques ( $h \geq 2$ ) et le fondamental du courant peut être exprimé en pourcentage et calculé comme suit:

$$THD(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^n S_{eff h}^2}}{S_{eff 1}} \times 100 \quad (I.15)$$

avec:  $S_{eff 1}$  la valeur efficace du signal fondamental et  $S_{eff h}$  les valeurs efficaces des différentes harmoniques du signales [11].

#### I.4.6 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.17), apparaît comme le montre le diagramme de Fresnel de la figure I.4 [12].

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (I.16)$$

$$D = 3 \cdot V_1 \sqrt{\sum_{h=2}^{50} I_n^2} \quad (I.17)$$

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

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} = \cos\varphi_1 \cos\gamma \quad (I.18)$$

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

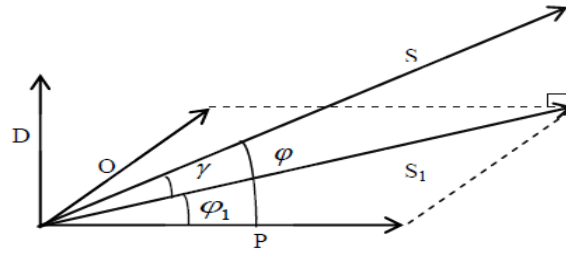


Figure I.4: Diagramme de Fresnel des puissances.

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

$\gamma$  : Le déphasage entre la puissance apparente dans le cas d'un système équilibré linéaire  $S_1$  et la puissance apparente dans le cas déséquilibré non linéaire  $S$ .

$\varphi$  : Le déphasage entre la puissance active et la puissance apparente  $S$  [12].

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

Un signal déformé comporte généralement plusieurs harmoniques. On représente souvent ce signal sous la forme d'un spectre, c'est-à-dire à l'aide d'un schéma où l'on porte en abscisse la fréquence et en ordonnée le module (en valeur efficace ou en pourcent). Comme il est représenté sur la figure I.5 [11].

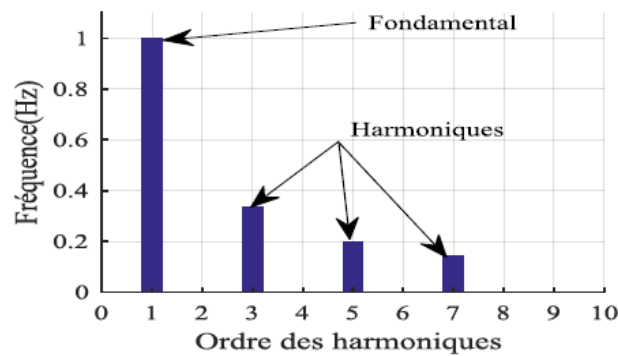


Figure I.5: Le spectre harmonique du courant de charge polluante.

#### I.4.8 Charges linéaires et non linéaires:

Une charge est dite linéaire lorsque son impédance est constante, le courant qu'elle absorbe est alors sinusoïdal lorsque la tension est sinusoïdale (voir figure I.6.a).

Une charge est dite non linéaire lorsque son impédance varie au cours d'une même période, le courant qu'elle absorbe n'est pas sinusoïdal lorsque la tension est sinusoïdale (voir figure I.6.b) [13].

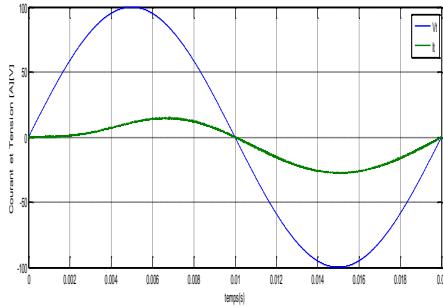


figure I.6.a

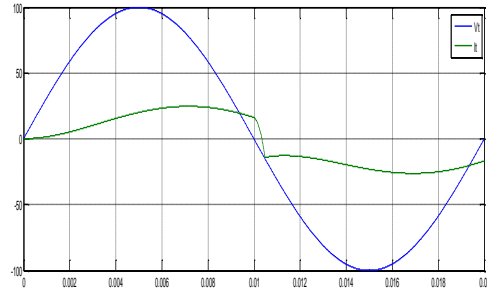


figure I.6.b

Figure I.6. Formes d'onde (tension, courant) d'une charge linéaire et charge non linéaire

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

Les harmoniques vont aussi détériorer le facteur de puissance des installations électriques. Ce facteur de puissance est défini comme le rapport de la puissance active transmise sur la puissance apparente[12].

Les différentes puissances en présence d'harmoniques de courant et de tension ont la forme suivante:

- La puissance active totale  $P$  :

$$P = \sum_{h=1,2,\dots}^{\infty} V_h \cdot I_h \cos\theta_h$$

Où

$\theta_h$ : est le déphasage entre le courant et la tension de rang  $h$ .

$V_h$ : est la valeur efficace de la tension pour le rang  $h$ .

$I_h$ : est la valeur efficace du courant pour le rang  $h$ .

- La puissance réactive  $Q$  :

$$Q = \sum_{h=1,2,\dots}^{\infty} V_h \cdot I_h \sin\theta_h$$

- Le facteur de puissance :

$$F_p = \frac{P}{S}$$

En présence de signaux de courant et/ou de tension non sinusoïdaux, l'égalité  $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$  n'est plus vérifiée. On introduit alors la puissance déformante  $D$ , permettant d'exprimer la puissance apparente de la façon suivante:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}$$

### I.6 Normes et réglementation de perturbation:

Pour éviter tous les désagréments générés par la présence de courants et de tensions harmoniques sur le réseau et pour préserver la pollution du réseau, les utilisateurs sont de plus en plus tenus de respecter un certain nombre de normes [14]. L'objectif des normes et des réglementations est de limiter les dysfonctionnements occasionnés par les harmoniques. Les deux principaux organismes de normalisation internationaux dans le domaine

électrotechnique sont la CEI et l'IEEE. Ces deux organismes réalisent la principale activité de normalisation dans le domaine des perturbations électriques au niveau mondial mais n'ont pas une uniformité de critères en ce qui concerne la définition des interactions entre le réseau et les charges connectées [1].

- CEI 61000-3-2 qui définit les limites d'émissions de courant harmonique par les appareils consommant moins de 16A par phase
- CEI 61000-2-2 qui définit les niveaux de compatibilité de tensions harmoniques sur les réseaux publics basse tension
- CEI 61000-2-4 qui définit les niveaux de compatibilité dans les réseaux d'installations industrielles[1],[15].
- IEEE 519-1996 qui définit les limites des perturbations des tensions et courant au  $P_{cc}$ . Le tableau (I.1) indique ces limites des distorsions des tensions.

Tableau I.1: Limites des distorsions des tensions au  $P_{cc}$  (IEEE 519-1996).

Niveau des tensions au $P_{CC}$	Taux individuel d'harmoniques (%)	Taux de distorsion global $THD(\%)$
$v_n \leq 69kV$	3	5
$69kV \leq v_n \leq 161kV$	1.5	2.5
$v_n \geq 69kV$	1	1.5

## I.7 Les solutions traditionnelles:

Sont des techniques qui doivent être connues par tous les électriciens. Elles apportent une solution facile et rapide pour certains cas de perturbations bien localisées et utilisent des composants passifs (inductances, condensateurs, transformateurs) et/ou des branchements qui modifient le schéma de l'installation. Plusieurs solutions existent pour limiter la propagation et l'effet des harmoniques dans les réseaux électriques[3].

### I.7.1 Compensation des courants harmoniques:

Plusieurs solutions existent pour limiter la propagation et l'effet des harmoniques dans les réseaux électriques :

- l'augmentation de la puissance de court-circuit du réseau et l'utilisation de convertisseurs peu polluants qui ont pour effet de diminuer la distorsion harmonique,
- l'utilisation de dispositifs de filtrage pour réduire la propagation des harmoniques produits par des charges non linéaires[16].

#### I.7.1.1 Sur dimensionnement ou déclassement de l'installation électrique:

On procède généralement au sur dimensionnement des équipements afin d'assurer leur tenue aux surcharges harmoniques. Cette solution n'a pas sur les harmoniques qui ne subissent aucune action curative de la part de l'utilisateur. Par cette approche, les problèmes liés à la pollution harmoniques sont résolus pendant une durée limitée. Le déclassement des

équipements de distribution électrique soumis aux harmoniques est utilisé dans le cas des installations existantes. Cette méthode cause un surcoût de production et ne tire pas le profit du potentiel réel de l'installation [1].

### I.7.1.2 Transformateurs à couplage spécial:

Cette solution empêche la propagation des courants harmoniques de rang 3 et de leurs multiples. Il s'agit d'une solution centralisée pour un ensemble de charges monophasées. Elle n'a cependant aucun effet sur les autres rangs d'harmoniques (h5, h7, ...). Cette solution limite, au contraire, la puissance disponible de la source, et augmente l'impédance de ligne. Il en résulte une augmentation de la distorsion en tension due aux autres rangs harmoniques[9].

### I.7.1.3 Inductances (selfs) série:

Cette solution, utilisée pour les entrainements à vitesse réglable (variateurs de vitesse) et les redresseurs triphasés, consiste à introduire une inductance série en amont d'une charge non linéaire. Peu onéreuse, la self a cependant efficacité limitée. Il faut en installer une par charge non linéaire. La distorsion en courant est divisée approximativement par deux[9].

### I.7.1.4 Filtre passif:

Le filtrage est réalisé par la mise en parallèle avec l'impédance du réseau d'un circuit de très faible impédance par rapport à l'impédance du réseau à la fréquence de l'harmonique que l'on veut éliminer. Le courant choisit le chemin le moins résistant et de ce fait l'harmonique sera dévié à travers ce dernier[30].

#### I.7.1.4.1 Filtre résonant:

Il est constitué par la mise en série d'une inductance, d'une résistance, et d'un condensateur. La figure I.7 montre clairement le montage de ce dernier ainsi que son avec la ligne de l'impédance en fonction de la fréquence [29].

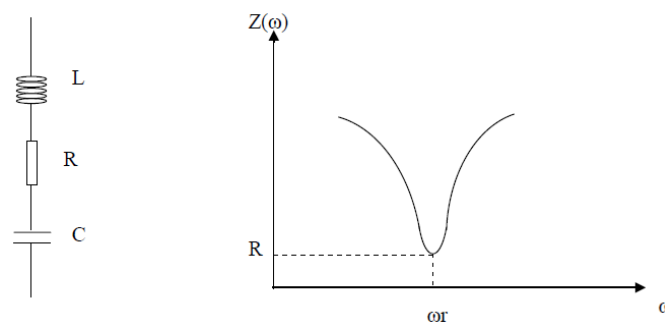


Figure I.7 : Filtre passif résonnant

Ce type de filtre est caractérisé par l'emplacement de trois filtres, deux pour les harmoniques d'ordre inférieurs et un filtre pour les harmoniques d'ordres supérieurs, c'est-à-dire pour un pont triphasé nous avons besoin d'un filtre passe bas pour le cinquième et l'autre pour le septième harmonique et d'un filtre passe haut pour tous les harmoniques au-delà de la 11ème [29].

### I.7.1.4.2 Filtre amorti:

Un filtre amorti est composé d'une capacité en série avec un ensemble constitué de la mise en parallèle d'une inductance et d'une résistance appelée résistance d'amortissement. Il est utilisé lorsque les performances demandées ne sont pas trop élevées. On utilise souvent pour filtrer simultanément les plus hautes fréquence du spectre et non une fréquence particulière, c'est un filtre passe haut[30].

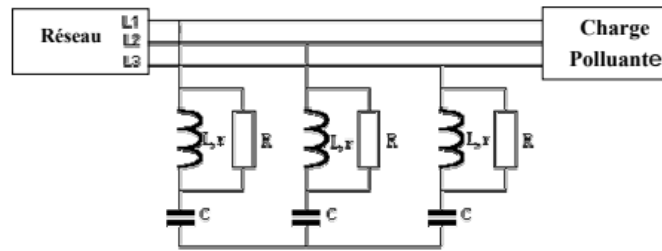


Figure I.8: Branchement d'un filtre amorti

### I.7.2 Compensation de la puissance réactive:

La puissance réactive est majoritairement consommée par les moteurs asynchrones et plus récemment par des dispositifs à base d'électronique de puissance. Différentes méthodes de compensation sont utilisées pour relever le facteur de puissance. La plus simple consiste à placer des batteries de condensateurs en parallèle avec le réseau. L'inconvénient de cette méthode réside dans le fait que la puissance réactive fournie par les condensateurs est constante et qu'elle ne s'adapte pas à l'évolution du besoin[16][9].

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

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

Une autre solution est l'installation d'un compensateur passif composé d'inductance et de condensateur. La figure I.9 montre ce compensateur, appelé *montage de Steinmetz*.

Ce montage permet de présenter à 50 Hz une impédance équilibrée. Cependant, le montage de Steinmetz provoque un fort déséquilibre pour des fréquences différentes de 50 Hz, avec des résonances qu'il faut éviter d'exciter à proximité d'un générateur d'harmoniques[16].

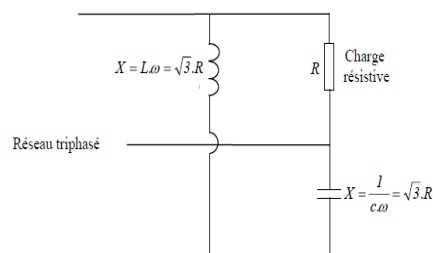


Figure I.9: Montage de Steinmetz pour le rééquilibrage.

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

Il faut éviter de connecter un récepteur sensible en parallèle avec un pollueur tel que les redresseurs par exemple, si le pollueur est de forte puissance, il est souhaitable de l'alimenter par un autre transformateur[19].

### I.7.5 Pont dodécaphasé:

Leur principe consiste à utiliser un transformateur à deux secondaires délivrant des tensions décalées de  $30^\circ$  entre elles (ou deux transformateurs dont les couplages entre les primaires et les secondaires doivent être couplés différemment (Y/Y et Y/D ou D/D et D/Y). Chacun de ces secondaires alimentant un redresseur en pont de Grätz. On obtient ainsi un redresseur dit dodécaphasé (pont ayant douze bras) dont les redresseurs sont montés en série (Figure I.10) . Cette solution permet, par combinaison des courants, d'éliminer au primaire les harmoniques de rang les plus bas tels que 5 et 7 (souvent les plus gênants car de plus fortes amplitudes). Elle nécessite un transformateur à deux secondaires, l'un en étoile et l'autre en triangle ce qui permet de ne générer que les harmoniques de rang  $12k \pm 1$ [20].

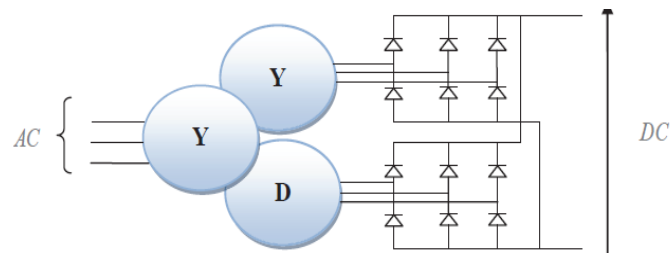


Figure I.10: Pont dodécaphasé.

## I. 8 Solutions modernes de dépollution

Les solutions de dépollution traditionnelle ne répondant plus à l'évolution des réseaux électriques et des charges à protéger, comme nous venons de le décrire précédemment, d'autres solutions modernes ont été proposées appelées filtres actifs. Il vient se rajouter à des structures déjà existantes de convertisseurs. Il peut également être utilisé comme complément aux solutions traditionnelles de réjection des harmoniques. Le principe du filtrage actif est l'injection de courants (ou des tensions) harmoniques en opposition de phase avec les harmoniques que l'on désire compenser : courants harmoniques absorbés par la charge et/ou de tensions harmoniques présentes sur le réseau[21].

### I.8.1 Filtrage actif:

Les inconvénients inhérents des solutions traditionnelles de dépollution ont conduit à concevoir une nouvelle structure plus flexible de filtrage moderne et efficace appelée filtrage actif, capable de s'adapter avec l'évolution de la charge. Ceci est rendu possible grâce à l'évolution de l'électronique de puissance, notamment en ce qui concerne les semi-conducteurs de puissance, comme les thyristors GTO et les transistors IGBT. Le but de ces filtres actifs est de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à ce

que le courant ou la tension redevienne sinusoïdal. Le filtre actif est connecté au réseau soit en série (F.A.S), soit en parallèle (FAP) suivant qu'il est conçu respectivement pour compenser les tensions ou les courants harmoniques, soit associé à des filtres passifs. Pour fournir aux consommateurs une énergie électrique de qualité, même dans les conditions de fonctionnement les plus perturbées, les filtres actifs sont proposés comme des solutions de dépollution des réseaux électriques, différentes topologies de filtres actifs usuels sont présentées[12] [22].

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

Appelé aussi compensateur shunt, il est connecté en parallèle sur le réseau de distribution (Figure I.11) . Il est le plus souvent commandé comme un générateur de courant. Il restitue dans le réseau électrique les courants harmoniques inégaux à ceux absorbés par la charge non linéaire mais en opposition de phase, de telle sorte que le courant fourni par le réseau is soit sinusoïdal et en phase avec la tension simple correspondante. Son indépendance vis-à-vis de la source et de la charge lui assure l'auto-adaptabilité, la fiabilité et la performance.

Le filtre actif parallèle empêche les courants harmoniques, réactifs et déséquilibrés de circuler à travers l'impédance du réseau. Il améliore ainsi les taux de distorsion en courant et en tension[23].

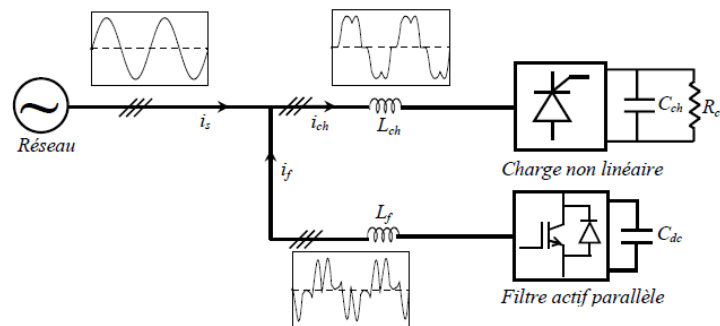


Figure I.11: Filtre actif parallèle[24].

#### I.8.1.1.1 Filtre monophasé:

Deux différentes configurations du filtre actif parallèle monophasé sont présentées par la figure I.12.

Dans la première configuration (figure I.12.a), le filtre est principalement composé d'un onduleur monophasé, d'une capacité qui sert comme source de tension continue, et d'une inductance liant l'onduleur avec le réseau (source du courant).

Dans la deuxième configuration (figure I.12.b), on ajoute un transformateur et une capacité C'. Le primaire du transformateur est alimenté par l'onduleur, le secondaire est connecté en série avec C', ainsi cette capacité avec le secondaire forment un filtre passif du courant de la charge [09].

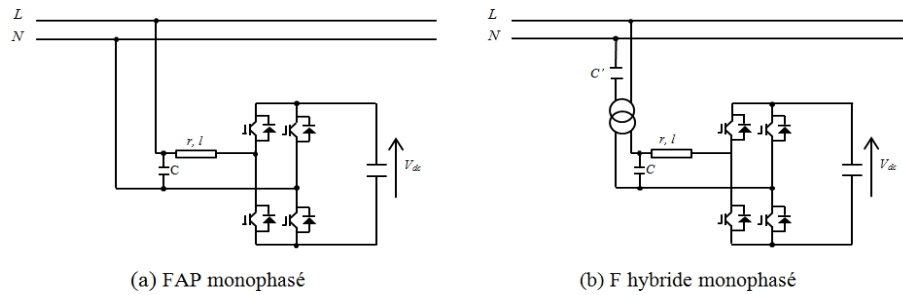


Figure I.12 Différentes configurations d'un filtre actif monophasé.

### I.8.1.1.2 Filtre actif parallèle à trois fils:

Il est composé d'un onduleur à trois bras qui se 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. Ainsi, le courant fourni par la source d'énergie devient sinusoïdal[09].

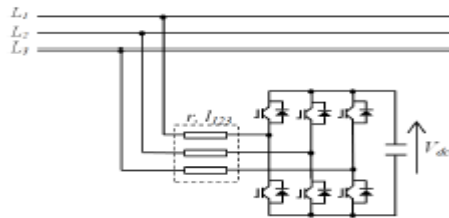


Figure I.13: Configuration d'un FAP à trois fils.

### I.8.1.1.3 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, une surcharge de la puissance réactive et un déséquilibre. Pour réduire ces problèmes, des compensateurs à quatre fils ont été développés dans les références[31]. Les topologies de ce type de filtre seront détaillées dans le chapitre suivant.

### I.8.1.2 Filtre actif série (FAS):

Le filtre actif série se comporte comme une source de tension qui s'oppose aux tensions perturbatrices (creux, déséquilibre, harmoniques) venant de la source et également à celles provoquées par la circulation des courants perturbateurs à travers l'impédance de réseau. Il empêche les courants harmoniques consommés par la charge non linéaire de remonter vers la source. Dans ce cas, il se comporte comme une impédance élevée aux fréquences harmoniques et comme une impédance nulle à la fréquence fondamentale. Ainsi, la tension aux bornes de la charge à protéger est purement sinusoïdale. Les perturbations de tension dans le système sont atténuées en injectant la différence entre la tension désirée et la tension réelle comme le montre la figure I.14. L'élément de stockage de l'énergie d'un filtre actif série est conçu pour répondre aux exigences de compensation les plus sévères, notamment dans le cas de creux de tension de longue durée[24].

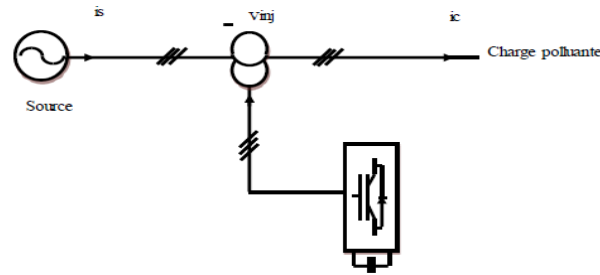


Figure I.14 : Filtre actif série[23].

### I.8.1.3 Combinaison parallèle série actif:

D'après ce qui précède, ni l'un ni l'autre des deux types de filtre actif n'est capable de réaliser un filtrage complet donnant une tension sinusoïdale côté charge et un courant côté réseau exempt d'harmonique. Cet objectif peut être réalisé en utilisant un filtre actif mixte composé de deux filtres actifs, l'un connecté en série avec la charge l'autre en parallèle avec celle-ci, comme le montre la figure I.15. Les tensions harmoniques provenant du réseau sont éliminées par le filtre série fonctionnant en générateur de tension tandis que les courants harmoniques absorbés par la charge polluante sont compensés par le filtre actif parallèle, générateur de courant[25].

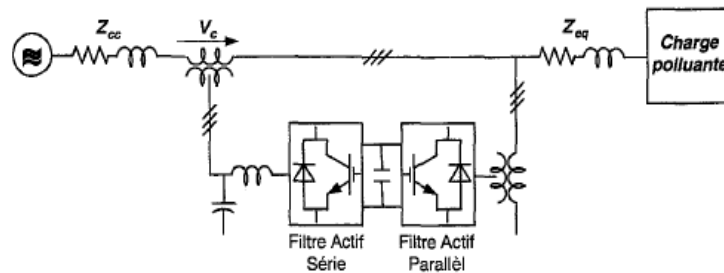


Figure I.15: Combinaison d'un filtre actif parallèle avec un filtre actif série.

### I.8.2 Filtrage hybride:

Le filtrage mixte ou hybride résulte de l'association d'un filtre passif et d'un filtre actif. L'intérêt des filtres mixtes est que le filtre passif prend en charge la compensation d'une grande partie des harmoniques; le filtre actif maintient les performances de filtrage en fonction de l'évolution de la charge et du réseau. Ainsi la puissance de convertisseur qui constitue le filtre actif est fortement diminuée grâce aux éléments passifs. Ces structures permettent donc, d'optimiser le rapport performance/coût et d'avoir une meilleure tenue en tension[6].

On a plusieurs structures de filtre mixte. Par exemple :

- le filtre actif série avec des filtres passifs parallèles.
- le filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles.
- le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle [16].

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

Dans cette configuration, les deux filtres actif et passif sont directement connectés en série, sans l'intermédiaire d'un transformateur. L'ensemble est connecté en parallèle sur le réseau comme le décrit la figure I.16.

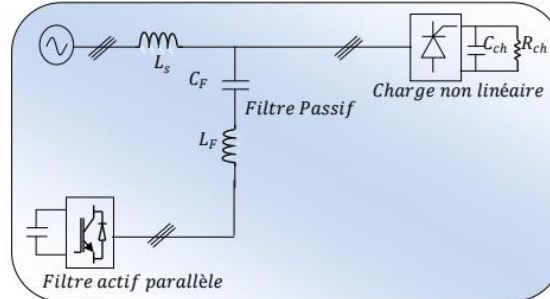


Figure I.16: Association série d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif.

Dans ce cas, le filtre passif se comporte comme une impédance faible à la fréquence d'accord et comme une grande impédance à la fréquence fondamentale. Ce système présente deux avantages : le dimensionnement en puissance du filtre actif est encore plus réduit du fait que le courant qui le traverse est plus faible et le filtre actif est à l'abri d'un éventuel court-circuit de la charge [26].

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

Dans cette topologie, le filtre actif est connecté en parallèle avec le filtre passif. Tous deux sont également en parallèle avec la charge. Le filtre actif parallèle sert à compenser les courants harmoniques basses fréquences émis par la charge polluante alors que le filtre passif, accordé sur une fréquence harmonique élevée, permet de compenser les harmoniques hautes fréquences [26].

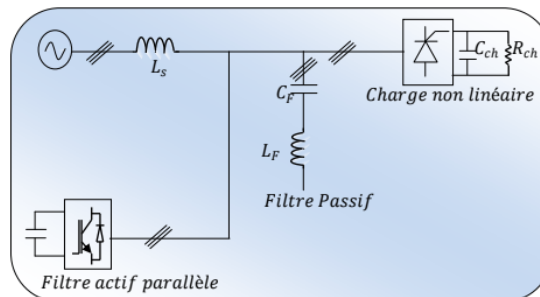


Figure I.17: Association parallèle d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif.

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

Le principe de fonctionnement de cette configuration, présentée en figure I.18, est la même que la précédente avec l'avantage de réduire encore le dimensionnement du filtre actif série car le courant qui le traverse est plus faible. De plus, le filtre actif série est à l'abri d'un éventuel court-circuit de la charge [6].

Dans cette configuration, le compensateur n'agit que sur les courants harmoniques, et améliore l'efficacité des filtres passifs : il évite l'amplification des tensions harmoniques amont aux fréquences d'anti résonance des filtres passifs, il atténue fortement les courants harmoniques entre charge et source par «abaissement» de l'impédance globale (filtres passifs plus compensateur actif). Puisque le compensateur actif n'est pas traversé par la totalité du courant réseau, son dimensionnement (et en particulier celui du coupleur magnétique) peut être réduit[27].

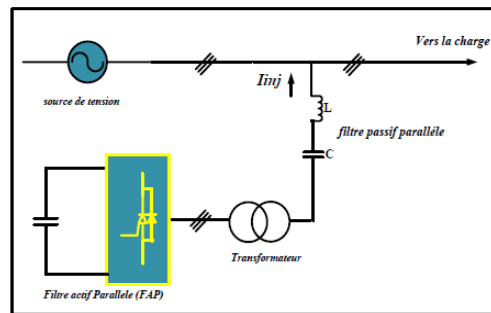


Figure I.18: Filtre actif série connecté en série avec un filtre passif parallèle.

### I.8.3 Les redresseurs MLI:

Les redresseurs à *MLI* sont des onduleurs exploitant leurs réversibilités en courant dans le deuxième mode de fonctionnement. Grâce à la commande *MLI*, ces convertisseurs peuvent prélever des courants sinusoïdaux sur le réseau alternatif et assurer aussi un facteur de puissance unitaire. Selon le type d'onduleur utilisé, nous distinguons deux structures de redresseurs à *MLI* [24]:

- redresseur à *MLI* de courant:
- redresseur à *MLI* de tension:

#### I.8.3.1 Redresseur de tension:

Son schéma de principe est présenté sur la (figure I.19). Les composants de puissance disponibles (IGBT, GTO) étant unidirectionnels en courant, le courant  $I_d$  le sera également. La réversibilité en puissance s'effectue par l'inversion de la tension redressée  $U_d$ . Le contrôle de la puissance réactive est obtenu par action sur la phase du courant réseau par rapport à la tension [28].

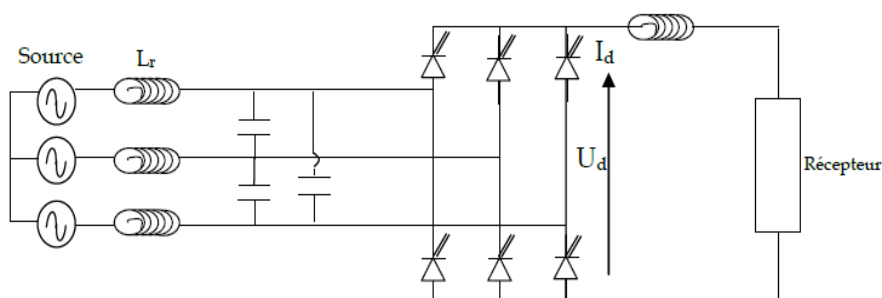


Figure I.19: Redresseur de tension

### I.8.3.2 Redresseur de courant:

Elle est présentée sur la (figure I.20). La tension  $U_d$  étant Unidirectionnelle, la réversibilité de la puissance active est assurée par le courant  $I_d$ , qui est bidirectionnel. Le contrôle de la puissance réactive est réalisé par action indirecte sur la phase du fondamental de courant du réseau [29].

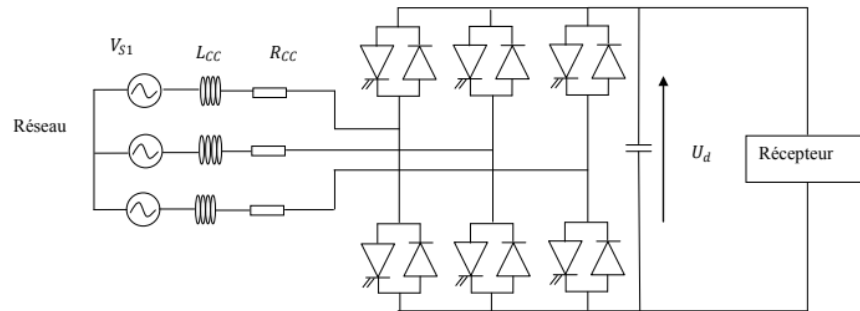


Figure I.20 : Redresseur de courant

Les inductances  $L_{cc}$  servent dans la (figure I.20) à découpler le convertisseur de réseau car les deux réseaux alternatifs et continus sont tous deux sources de tension [29].

## I.9 Conclusion

Nous avons vu qu'actuellement Les charges non linéaires qui produisent une pollution électrique ( les harmoniques) qui nécessite généralement un dispositif d'élimination de ces perturbations et compensation de l'énergie réactive qu'ils consomment. Puis on a abordé les principales perturbations harmoniques et les moyens techniques permettant de les limiter dont il existe plusieurs, les solutions classiques présentent de nombreuses contraintes pour répondre à un besoin actif de dépollution, elles sont souvent pénalisées en termes d'encombrement, de résonance et d'une mauvaise adaptation face à l'évolution du réseau et aux charges polluantes.

De plus nous sommes s'intéressé dans la suite aux solutions modernes tel que le filtre actif parallèle à quatre fils.

## ***CHAPITRE II***

**STRUCTURE DU FILTRE ACTIF  
PARALLELE A QUATRE FILS DE  
PUISSANCE ET PRINCIPE DE  
FONCTIONNEMENT**

## CHAPITRE II

### STRUCTURE DU FILTRE ACTIF PARALLELE A QUATRE FILS DE PUISSANCE ET PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

#### II.1 Introduction:

Pour réduire les harmoniques au niveau de la source nous proposons dans ce travail le filtrage actif parallèle à quatre fils, et ses avantages, tel que l'adaptation aux variations de la charge.

Dans ce chapitre nous allons présenter deux topologies différentes des filtres actifs, pour compenser les harmoniques de courants générés par les charges non-linéaires reliées à un réseau électrique à quatre fils. Cela permettra d'envisager le cas des charges monophasées et éventuellement déséquilibrées. Une description des différents constituants du filtre actif parallèle est nécessaire. Nous étudions en détail la méthode des puissances réelle, imaginaire et homopolaire instantanées.

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

La figure II.1 présente le principe d'un compensateur actif de type parallèle qui permet de compenser les harmoniques de courant de la charge polluante à l'aide d'une source de courant mise en œuvre[32].

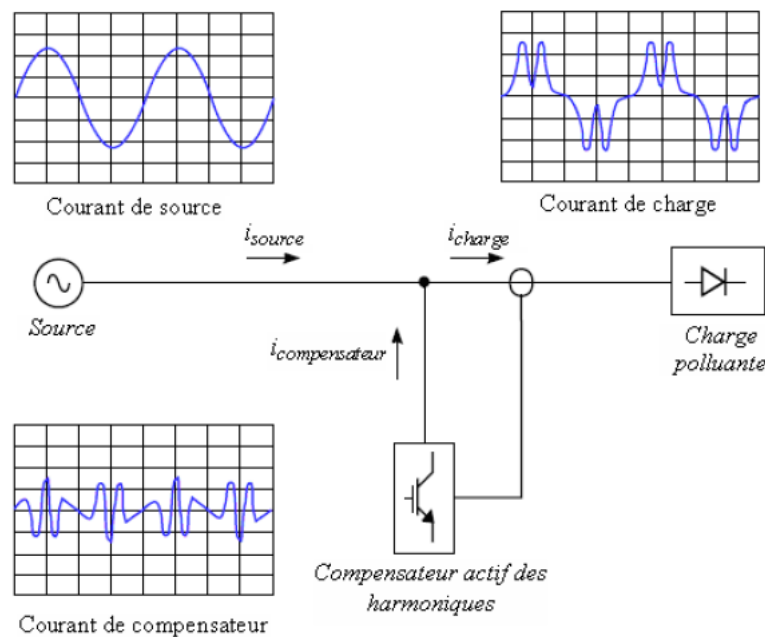


Figure. II.1 principe de la compensation active des harmoniques.

Le principe est d'injecter un courant en opposition de phase avec les courants de la charge afin d'obtenir un courant le plus sinusoïdal possible au niveau de la source. En général, la présence d'une charge polluante sur le réseau électrique entraîne la circulation de trois composantes de puissance active, réactive et déformante (diagramme vectoriel sur la

figure I.4 chapitre I), le filtre actif peut alors compenser la puissance réactive et la puissance déformante mais cela nécessite une commande lui associée.

Dans le paragraphe qui suit nous présenterons les différentes techniques de commande existant dans la littérature qui peuvent être appliquées pour réaliser une fonction de filtrage actif.

## II.2. Modélisation et stratégies de commande de l'onduleur:

### II.2.1. Constituants d'un filtre actif parallèle à quatre fils:

Un filtre actif parallèle à quatre fils est essentiellement constitué de deux parties (Voir la figure II.2:

- Partie commande – contrôle.
- Partie puissance.

Ces deux parties vont être détaillées dans les deux sections qui suivent[38] :

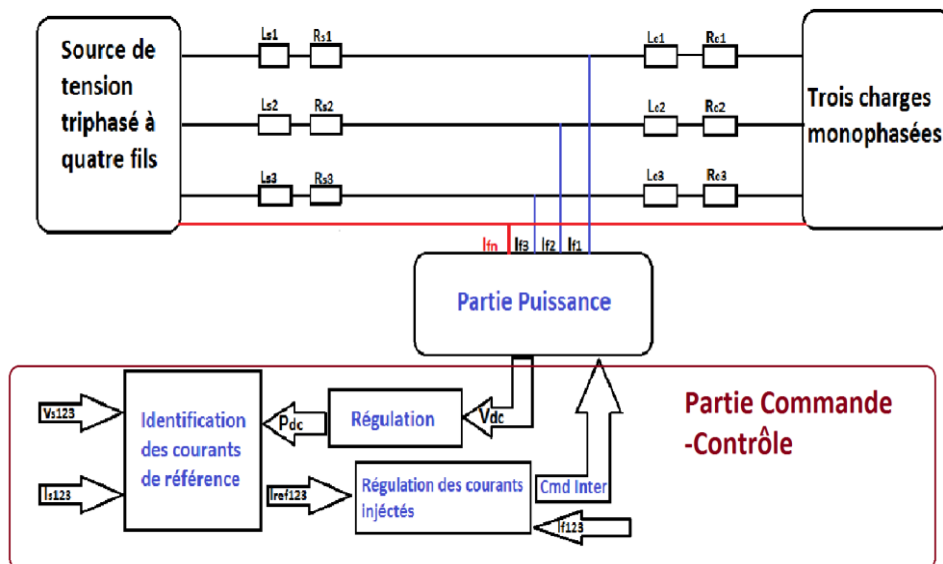


Figure.II.2 : Principe du filtrage actif parallèle triphasé à quatre fils.

### II.3 Structure de l'onduleur de tension à quatre bras:

La structure générale d'un onduleur à quatre bras est représenté dans la figure (II.3). L'onduleur est composé de quatre bras, chaque bras a deux interrupteurs bidirectionnels, ces derniers fonctionnent de manière complémentaire pour éviter le court-circuit de la source de tension continue à l'entrée de l'onduleur, ou l'ouverture de la charge de l'onduleur considérée comme une source de courant. Les diodes antiparallèles sont nécessaires pour assurer la circulation bidirectionnelle du courant[37].

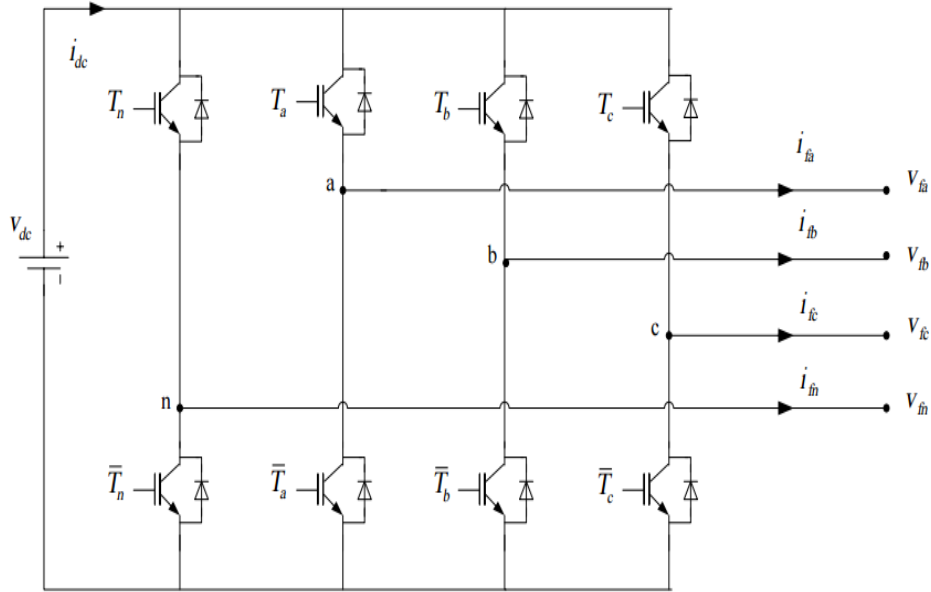


Figure II.3 : Structure d'un onduleur de tension à quatre bras

### II.3.1 Etude de la partie puissance :

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

- États de commutations possibles de l' onduleur
- Le filtre de sortie.
- Le système de stockage de l'énergie[17].

#### II.3.1.1 États de commutations possibles de l' onduleur:

Les états possibles de cet onduleur sont seize. Ils sont représentés en ordre selon les combinaisons des interrupteurs  $[T_1, T_2, T_3, T_n]$ [37].

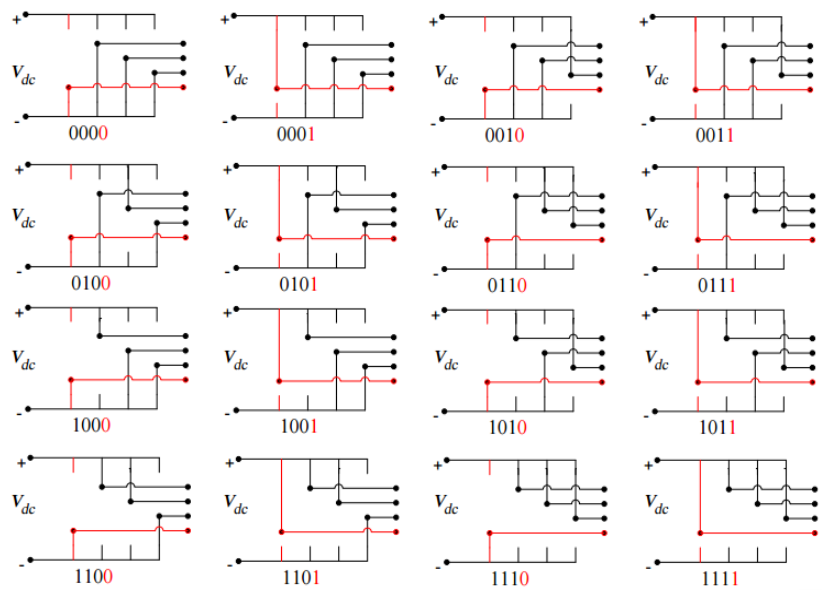


Figure II.4 : États de commutations possibles de l' onduleur à quatre bras

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

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

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

$$V_{f3} = (T_3 - T_n)V_{dc} \text{ et } i_{dc} = T_1 i_1 + T_2 i_2 + T_3 i_3 - T_n i_n \quad (\text{II.3})$$

Avec :  $T_i = 1$  si  $T_{i+n}$  est fermé,

$T_i = 0$  si  $T_{i+n}$  est ouvert

$i=1$  à 4.

k	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_n$	$V_{f1}$	$V_{f2}$	$V_{f3}$
0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	0	$V_{dc}$	0	0
2	0	1	0	0	0	$V_{dc}$	0
3	1	1	0	0	$V_{dc}$	$V_{dc}$	0
4	0	0	1	0	0	0	$V_{dc}$
5	1	0	1	0	$V_{dc}$	0	$V_{dc}$
6	0	1	1	0	0	$V_{dc}$	$V_{dc}$
7	1	1	1	0	$V_{dc}$	$V_{dc}$	$V_{dc}$
8	0	0	0	1	$-V_{dc}$	$-V_{dc}$	$-V_{dc}$
9	1	0	0	1	0	$-V_{dc}$	$-V_{dc}$
10	0	1	0	1	$-V_{dc}$	0	$-V_{dc}$
11	1	1	0	1	0	0	$-V_{dc}$
12	0	0	1	1	$-V_{dc}$	$-V_{dc}$	0
13	1	0	1	1	0	$-V_{dc}$	0
14	0	1	1	1	$-V_{dc}$	0	0
15	1	1	1	1	0	0	0

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

### II.3.1.2 Filtre de sortie:

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

- Assurer la dynamique du courant, c'est-à-dire réaliser l'égalité :

$$\frac{d}{dt} I_{h-ch} = \frac{d}{dt} I_{inj} \quad (\text{II.4})$$

Avec  $I_{h-ch}$  le courant harmonique de la charge et  $I_{inj}$  le courant injecté par le filtre actif.

- Empêcher les composantes dues aux commutations de se propager sur le réseau électrique. Le filtre de sortie est composé d'une inductance  $L_f$  de résistance interne  $R_f$ , il ne permet pas de satisfaire simultanément les deux critères de dimensionnement du filtre de

sortie. En effet, seule une valeur relativement faible de  $L_f$  peut réaliser une bonne dynamique du filtre actif en satisfaisant l'égalité (II.4). Malheureusement une valeur faible de  $L_f$  permet à la majorité des composantes dues aux commutations de se retrouver coté réseau et par conséquent d'affecter les installations et les équipements électriques. Inversement, une valeur relativement élevée de  $L_f$  va empêcher ces composantes de se propager sur le réseau électrique mais affectera la dynamique du filtre actif et dégradera alors la qualité de compensation [34]. Le bon dimensionnement du filtre de sortie du premier ordre dépendra donc du compromis à trouver entre la dynamique et l'efficacité du filtre actif parallèle.

### II.3.1.3 Circuit de stockage d'énergie :

La source continue de l'onduleur de tension est un condensateur ( $C_{dc}$ ) qui joue le rôle d'une source de tension continue  $V_{dc}$ [20].

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  $C_{dc}$ , 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. Ils doivent être faible d'une part pour ne pas dépasser la limite en tension des semi-conducteurs et d'autre part pour ne pas dégrader la performance du filtre actif[9],[33].

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 utilisées[16]:

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

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

$$I_s = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} I_d^2 d(\omega t)} = I_d \quad (\text{II. 5})$$

où:  $I_d$  représente le courant de charge coté continu.

Le fondamental du courant de la charge est donné par :

$$I_{s1} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} I_s = 0.9I_d \quad (\text{II.6})$$

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:

$$\sum_{h=2}^{\infty} I_{sh} = \sqrt{I_s^2 - I_{s1}^2} = 0.43I_s \quad (\text{II. 7})$$

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 :

$$C_{dc} \geq \frac{0.43I_s}{6f_s(v_{dc_{max}}^2 - v_{dc_{min}}^2)} \quad (\text{II. 8})$$

où :  $f_s$  la fréquence fondamentale du réseau électrique.

On choisit un taux d'ondulation  $v_{dc}$  acceptable, généralement de l'ordre de 2%  $v_{dc}$  [17].

• 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:

$$C_{dc} = \frac{I_h}{v_{dc}\Delta v_{dc}\omega_h} \quad (\text{II. 9})$$

où:  $\omega_h$  la pulsation la plus faible des harmoniques à compenser [16].

### II.3.1.3.1 Estimation de la valeur de la capacité du condensateur de stockage:

La détermination de la valeur de la capacité du condensateur de stockage d'énergie peut  $C_{dc}$  être estimée en se basant sur le principe de l'échange instantané de l'énergie nécessaire pour subvenir à une augmentation ou une diminution d'un échelon de puissance imposé parla charge (régime transitoire), en appliquant le concept de l'équilibre d'énergie [4].

A partir de la puissance réelle maximale de la charge  $P_{max}$  la valeur de la capacité est donnée par :

$$C_{dc} = \frac{2 \cdot P_{max} \cdot 20 \cdot 10^{-3}}{V_{dc}^2(1-K^2)} \quad \text{où} \quad k = V_{dc_{min}}/V_{dc} \quad (\text{II.10})$$

La tension  $V_{dc_{min}}$  doit être choisie judicieusement pour assurer la contrôlabilité du courant en tous points de fonctionnement.

### II.3.2 Etude de la partie commande :

La commande est mise en œuvre en trois étapes. Dans la première étape, la tension de réseau et le courant de la charge sont détectés à l'aide de transformateurs de mesures (le TC et le TP). Dans la deuxième étape, on détermine le courant de référence à partir des méthodes d'identifications approuvées. Dans la troisième étape de commande, les signaux de commutation de semi-conducteur de l'onduleur de l'FAP sont générés en utilisant, l'hystérésis, MLI classique ou vectorielle, en mode glissant, ou des techniques de contrôle à base de logique floue. Donc la commande d'un filtre actif parallèle triphasé est basée sur la division du système en deux boucles. Le premier sert à générer les courants de références, que l'onduleur doit injecter dans le point de raccordement, quant au deuxième, il sert à contrôler les courants injectés par l'onduleur de sorte qu'ils suivent le plus fidèlement possible ceux de la référence comme présenté dans la Figure II.5 [26].

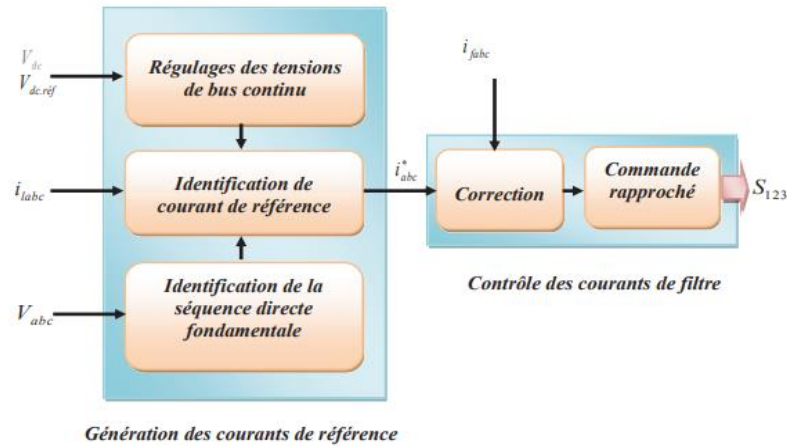


Figure II.5: Commande du FAP

La commande du filtre actif parallèle est basée sur la nature de l'onduleur qui produit le courant à injecter dans le réseau et la commande choisie pour contrôler cet onduleur.

### II.3.2.1 Les méthodes d'identification des courant perturbés:

#### II.3.2.1.1 Généralités sur les méthodes d'identification:

Les différentes méthodes d'identification de courant perturbateur peuvent être regroupées en deux familles d'approche.

La première utilise la transformée de Fourier rapide dans le domaine fréquentiel, pour extraire les harmoniques du courant. Cette méthode est bien adaptée aux charges où le contenu harmonique varie lentement. Elle donne aussi l'avantage de sélectionner les harmoniques individuellement et de ne choisir de compenser que les plus prépondérants. Il est à noter que cette méthode nécessite une grande puissance de calcul afin de réaliser, en temps réel, toutes les transformations nécessaires pour extraire les harmoniques.

La deuxième famille est basée sur le calcul des puissances instantanées dans le domaine temporel. Certaines de ces méthodes se basent sur le calcul des puissances harmoniques de la charge non linéaire. D'autres peuvent être utilisées pour compenser à la fois les courants harmoniques et la puissance réactive, en se basant sur la soustraction de la partie fondamentale active du courant total.

Récemment, des nouvelles méthodes d'identification ont été présentées pour donner le choix de compenser un, plusieurs ou voire même tous les types de courants perturbateurs. En effet, en se basant sur la régulation de la tension continue et sur celles du réseau électrique aux points de raccordement, nous pouvons compenser à la fois tous les courants perturbateurs, tout en offrant la possibilité de réguler la tension de la charge. Cette méthode, qui ne peut être implantée que numériquement, ne garantit pas une compensation parfaite de la puissance réactive, de même que la régulation de tension n'assure pas toujours une bonne qualité à la tension de la charge.

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

Enfin, la méthode d'identification la plus utilisée est celle appelée méthode des puissances réelles et imaginaires instantanées. Cette méthode offre l'avantage de choisir la perturbation à compenser avec précision, rapidité et facilité d'implantation. Pour toutes ces raisons nous avons retenu cette méthode d'identification pour le reste de notre étude. En effet, afin de pouvoir compenser les courants harmoniques, les courants déséquilibrés et la puissance réactive conjointement ou individuellement, cette méthode nous a semblé la mieux appropriée [16].

### II.3.2.1.2.Principe du fonctionnement de la méthode des puissances instantanées:

#### A) Généralités sur la théorie des puissances active et réactive instantanées:

Le principe de cette méthode est basé sur le passage de système triphasé constitué par les tensions simples et les courants de lignes à un système biphasé ( $\alpha, \beta$ ) en utilisant la transformation de Concordia. Notons que ( $V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}$ ) et ( $I_{cha}, I_{chb}, I_{chc}$ ) les tensions simples et les courants de lignes du système triphasé équilibré dans le repère abc. Les expressions des tensions ( $V_{s\alpha}, V_{s\beta}$ ) et des courants ( $I_{ch\alpha}, I_{ch\beta}$ ) dans le repère biphasé  $\beta$  calculées en utilisant la transformation de Concordia sont données par les relations suivantes : [34].

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_{s\alpha} \\ V_{s\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.12})$$

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_{ch\alpha} \\ I_{ch\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{cha} \\ I_{chb} \\ I_{chc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.13})$$

$I_0$  et  $V_0$  les composantes homopolaires de la tension et du courant du système. La puissance active instantanée est calculée par la relation suivante :

$$\mathcal{P}(t) = V_{sa}i_{cha} + V_{sb}i_{chb} + V_{sc}i_{chc} = \mathcal{P}(t) + \mathcal{P}(0) \quad (\text{II.14})$$

Avec :

$\mathcal{P}(t)$  est la puissance active instantanée.

$\mathcal{P}(0)$  est la puissance homolaire instantanée.

$$\mathcal{P}(t) = V_{s\alpha}i_{ch\alpha} + V_{s\beta}i_{ch\beta} \quad (\text{II.15})$$

$$\mathcal{P}_0(t) = V_0i_0 \quad (\text{II.16})$$

De même, on peut calculer la puissance réactive instantanée de la relation suivante :

$$q(t) = -\frac{1}{\sqrt{3}}[(V_{sa} - V_{sb}) \cdot i_{chc} + (V_{sb} - V_{sc}) \cdot i_{cha} + (V_{sc} - V_{sa}) \cdot i_{chb}] \quad (\text{II.17})$$

$$q(t) = V_{s\alpha} \cdot i_{ch\beta} - V_{s\beta} \cdot i_{ch\alpha} \quad (\text{II.18})$$

**Remarque :** Il est à noter que le courant du neutre  $i_n$  et le courant homopolaire  $i_o$  sont liés par la relation ci-dessous [17]:

$$i_n = I_{C1} + I_{C2} + I_{C3} \quad (\text{II.19})$$

$$i_o = \frac{1}{\sqrt{3}}(I_{C1} + I_{C2} + I_{C3}) = \frac{1}{\sqrt{3}}i_n \quad (\text{II.20})$$

En utilisant les relations (II.15) et (II.18), nous pouvons exprimer les puissances actives et réactives instantanées sous forme matricielle comme suit :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & V_{s\beta} \\ -V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ch\alpha} \\ i_{ch\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{II.21})$$

Les puissances active et réactive instantanées peuvent s'écrire comme la somme d'une composante continue et d'une composante alternative :

$$\begin{cases} p = \bar{p} + \tilde{p} \\ q = \bar{q} + \tilde{q} \end{cases} \quad (\text{II.22})$$

Avec :

$p$  et  $q$  sont les composantes continues de  $p$  et  $q$  liées aux fondamentaux,  $\tilde{p}$  et  $\tilde{q}$  sont les composantes alternatives de  $p$  et  $q$  liées aux harmoniques.

### Calcul des courants de référence :

Les expressions des composantes  $i_{ch\alpha}$  et  $i_{ch\beta}$  du courant de charges sont déduit à partir de la relation (II.21) :

$$\begin{bmatrix} i_{ch\alpha} \\ i_{ch\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & V_{s\beta} \\ -V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \frac{1}{V_{s\alpha}^2 + V_{s\beta}^2} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (\text{II.23})$$

En remplaçons la relation (II.22) dans la relation (II.23) on obtient :

$$\begin{bmatrix} i_{ch\alpha} \\ i_{ch\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{p} \\ \bar{q} \end{bmatrix} + \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (\text{II.24})$$

Ou sous la forme suivante :

$$\begin{bmatrix} i_{ch\alpha} \\ i_{ch\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{p} \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{q} \end{bmatrix} + \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (\text{II.25})$$

Courant actif                      courant réactif                      courant harmonique

Avec :

$\nabla = V_{s\alpha}^2 + V_{s\beta}^2$  Supposé constant dans l'hypothèse d'une tension sinusoïdale équilibrée du réseau électrique.

Cette expression montre que l'identification des différentes composantes du courant dans le repère ( $\alpha$ - $\beta$ ) revient à séparer les termes continus des puissances active et réactive instantanées. Les courants perturbateurs triphasés qui représentent les courants identifiés, dits

les courants de références ( $i_{ref}$ ), sont calculés à partir de la transformation  $\alpha$ - $\beta$  inverse donnée par la relation[17] :

$$\begin{bmatrix} i_{ha-ref} \\ i_{hb-ref} \\ i_{hc-ref} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{h\alpha} \\ i_{h\beta} \\ i_{n0} \end{bmatrix} \quad (II.26)$$

### b) Séparation des puissances :

Il est évident, d'après la relation (II.24), que pour identifier une des trois composantes, par exemple les courants harmoniques, les parties alternatives des puissances actives et réactives doivent être séparées des parties continues. Cette séparation peut être réalisée en utilisant l'un des deux artifices de filtrage illustrés sur la figure(II.6). [34] .

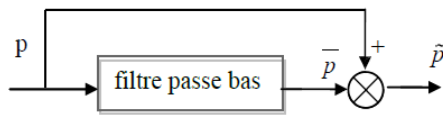


Figure.II.6.a: Filtre passe bas.

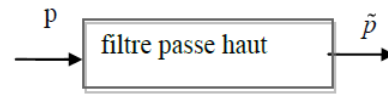


Figure.II.6.b: Filtre passe-haut.

Figure II.6 : Schéma de principe des filtres utilisés pour l'extraction des composantes alternatives p et q.

### C) Algorithme d'identification :

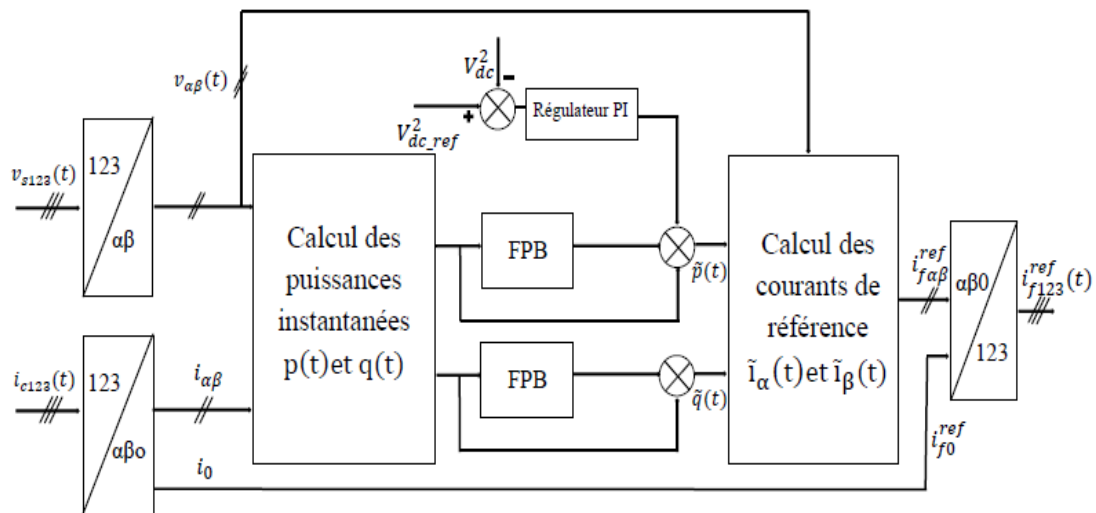


Figure II.7 :Algorithme réactives instantanées d'identification de la méthode Des puissances actives et réactive instantané.

#### II.3.2.2 Système a PLL:

Principalement le PLL est un système utilisée comme moyen afin d'extraire les composantes directe, inverse et homopolaire de la tension triphasée et pour récupérer les informations de la phase et de la fréquence. Son principe de base est illustré sur la figure II.8[35].

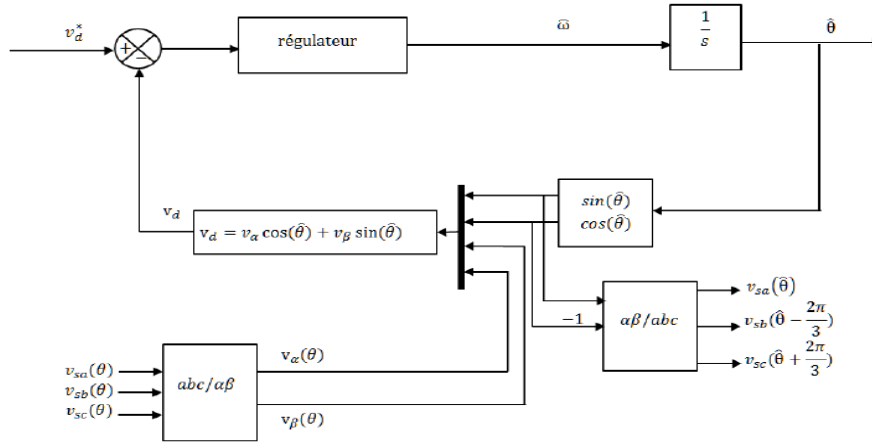


Figure II.8 schéma de principe d'une PLL classique

Supposons que les trois tensions au point de raccordement sont données par le système triphasé suivant :

$$\begin{cases} v_{sa}(\theta) = \sqrt{2}v_s \sin \theta \\ v_{sb}(\theta) = \sqrt{2}v_s \sin \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) \\ v_{sc}(\theta) = \sqrt{2}v_s \sin \left( \theta + \frac{2\pi}{3} \right) \end{cases} \quad (\text{II.27})$$

D'un premier temps, ces tensions subissent une transformation triphasée biphasée de Concordia.

$$\begin{cases} v_{s\alpha}(\theta) = \sqrt{3}v_s \sin(\theta) \\ v_{s\beta}(\theta) = -\sqrt{3}v_s \sin(\theta) \end{cases} \quad (\text{II.28})$$

Les tensions obtenus  $v_{s\alpha}(\theta)$  et  $v_{s\beta}(\theta)$  sont exprimées dans le repère de Park (dq) par la relation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\hat{\theta}) & \sin(\hat{\theta}) \\ -\sin(\hat{\theta}) & \cos(\hat{\theta}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{s\alpha} \\ v_{s\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{II.29})$$

Avec  $\theta$  la phase instantanée réelle de la tension et  $\hat{\theta}$  est l'intégrale de l'estimation de la pulsation  $\hat{\omega}$  déterminée par le régulateur PI, nous obtenons ainsi :

$$v_{sd} = \sqrt{3}v_s \sin(\theta - \hat{\theta}) \quad (\text{II.30})$$

Il apparait claire que, l'angle de phase de la tension  $v_{sd}$  est égale à  $(\theta - \hat{\theta})$ . Pour satisfaire la condition  $(\theta = \hat{\theta})$ , il faut choisir la valeur de la tension de référence  $v_{sd}^*$  nulle. A cette condition, la PLL sera verrouillée.

Supposons que  $(\theta - \hat{\theta})$  soit petit, alors, l'expression (II.27) peut être réécrite comme suit :

$$v_{sd} = \sqrt{3}v_s(\theta - \hat{\theta}) \quad (\text{II.31})$$

Comme la pulsation angulaire estimée  $\hat{\omega}$  est déterminé par le régulateur PI, de ce fait, on peut écrire :

$$\hat{\omega} = F_{PI}(s) \cdot \sqrt{3}v_s(\theta - \hat{\theta}) \quad (\text{II.32})$$

Avec  $F_{PI}(s)$  est la fonction de transfert du régulateur PI, donnée par l'expression suivante :

$$F_{PI}(s) = k_p + \frac{k_i}{s} = k_p \left( \frac{1 + \tau_i s}{\tau_i s} \right) \quad (\text{II.33})$$

Ainsi, la position angulaire aura pour expression

$$\hat{\theta} = \frac{1}{s} \hat{\omega} \quad (\text{II.34})$$

Nous obtenons donc le schéma fonctionnel de la PLL illustré sur la figure II.9 suivante :

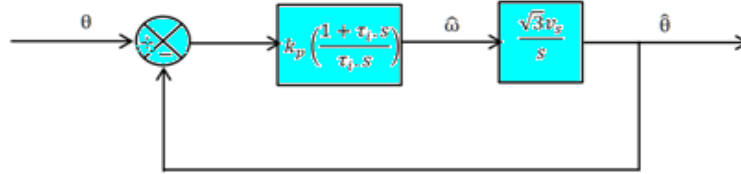


Figure II.9 schéma fonctionnel de la PLL.

Afin de déterminer les paramètres du régulateur PI, la fonction de transfert en boucle fermée de ce système est donnée par :

$$\frac{\hat{\theta}(s)}{\theta(s)} = \frac{\sqrt{3}v_s k_p \left( \frac{1 + \tau_i s}{\tau_i s} \right) \cdot \frac{1}{s}}{1 + \sqrt{3}v_s k_p \left( \frac{1 + \tau_i s}{\tau_i s} \right) \cdot \frac{1}{s}} \quad (\text{II.35})$$

Afin de réaliser un bon compromis entre la stabilité et les performances dynamiques, nous avons choisi :  $\xi = 0.707$  ce qui nous permet de déterminer à partir de II.35 :

$$k_p = \frac{2\xi\omega_n}{\sqrt{3}\omega_n} \text{ et } \tau_i = \frac{2\xi}{\omega_n} \quad (\text{II.37})$$

### II.3.2.3 Commande de onduleur :

L'objectif de cette commande appliquée aux compensateurs est de déterminer les instants d'ouverture et de fermeture des interrupteurs qui permettent d'obtenir une tension de sortie, côté alternatif, qui suit le plus fidèlement possible la consigne en minimisant ses harmoniques non désirées (harmoniques de commutation) et ce, en optimisant l'amplitude pour une tension du bus continue donnée.

Différents types de commande de l'onduleur sont recensés dans la littérature, on peut citer la commande par hystérésis et la commande MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion). La commande par hystérésis se résume pour un système du premier ordre à un simple relais, elle est parfaitement adaptée aux organes de commande ayant une action à deux positions comme c'est le cas pour l'onduleur. La commande MLI cherche à rendre la fréquence de commutation constante et nécessite pour cela un régulateur [36].

#### II.3.2.3.1 La commande 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 (II.10) expose son principe qui consiste à établir dans un premier temps

le signal d'erreur, différence entre le courant de référence  $i_2^*$  et le courant produit par l'onduleur  $i_a$ .

Cette erreur est ensuite comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis afin de fixer les ordres de commande des interrupteurs. Cette commande présente cependant un inconvénient majeur : elle ne permet pas de contrôler la fréquence de commutation des semi-conducteurs, d'où la présence d'un nombre important d'harmoniques dans les courants générés. [6][30]

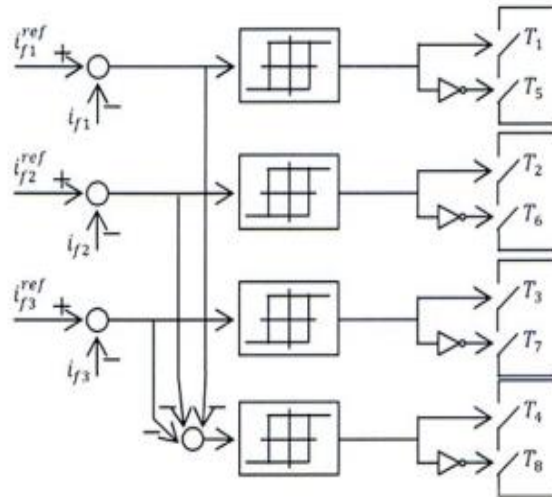


Fig.II.10: Principe de la commande par hystérésis.

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

La méthode de la *MLI*, Modulation de Largeur d'Impulsion (En anglo-saxon: Pulse Width Modulation) résout le problème de la maîtrise de la fréquence de commutation en fonctionnant avec une fréquence fixe, la technique *MLI* compare l'erreur entre le signal (courant ou tension) et sa consigne avec une onde triangulaire (porteuse) d'une amplitude et d'une fréquence fixées. Ce contrôle met en œuvre d'abord un régulateur qui, à partir de l'écart entre le courant et sa référence détermine la tension de référence de l'onduleur (modulatrice). Cette dernière est ensuite comparée avec une onde triangulaire symétrique, à fréquence élevée (porteuse) comme il est indiqué sur la figure (II.11). La sortie du comparateur fournit l'ordre de commande des interrupteurs. Dans ce système de contrôle, la fréquence de commutation est fixe (la technique *MLI* résout le problème de la maîtrise de la fréquence de commutation), le réglage s'effectuant par variation du rapport cyclique des signaux de commande [1],[21].

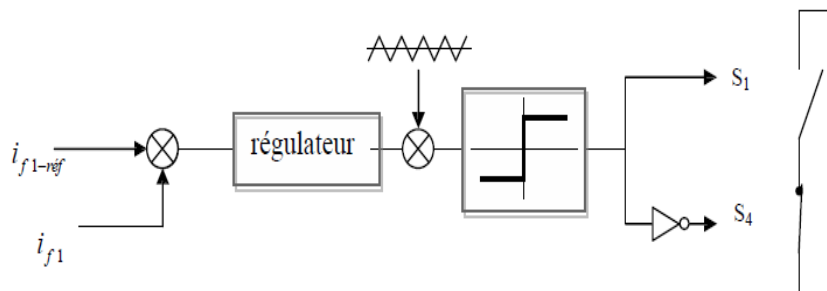


Fig.II.11: Schéma de principe MLI.

### II.3.2.4 Régulation de la tension 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. Si aucun échange de puissance active n'existe entre la capacité et le réseau ; cette dernière sera considérée comme un réservoir pour le circulation des harmoniques. Les principales causes d'échange de puissance et qui sont susceptibles de modifier cette tension sont [9]:

- 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,
- Les pertes par effet Joule dans les composants passifs L et C. Afin d'assurer le rôle de source de tension continue, une régulation de cette tension est nécessaire. L'objectif de cette régulation revient à limiter la variation de la tension en utilisant une capacité de valeur aussi faible que possible. De cette façon, le dimensionnement du condensateur pourra être optimisé.

La régulation est usuellement faite par des correcteurs de type proportionnel intégral (PI). La référence est générée par le correcteur PI comme suit :

$$I_{dc} = k_p(V_{dc}^* - V_{dc}) + k_i \int (V_{dc}^* - V_{dc}) dt \quad (II.38)$$

pour une régulation par  $I_{dc}$  et :

$$P_{dc} = k_{pdc}(V_{dc}^* - V_{dc})^2 + k_{pdc} \int (V_{dc}^* - V_{dc})^2 dt \quad (II.39)$$

pour une régulation par  $P_{dc}$ .

$k_p$  et  $k_i$  (resp.  $K_{pdc}$  et  $K_{idc}$ ) sont les termes proportionnel et intégral du correcteur PI. Contrairement au contrôle des courants harmoniques, ce correcteur est bien adapté à la régulation de la tension continue, et il reste le plus utilisé à cet effet. Les gains proportionnel et intégral sont déterminés à partir de l'étude de la fonction de transfert en boucle fermée schématisée sur les figures II.12 et II.13.

#### Régulation par $I_{dc}$

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

$$V_{dc} = \frac{1}{C_{dc}} \int I_{dc} dt \quad (II.40)$$

en appliquant la transformé de Laplace on trouve :

$$V_{dc} = \frac{1}{sC_{dc}} I_{dc} \quad (II.41)$$

La fonction de transfert du système est :  $\frac{1}{sC_{dc}}$  et la boucle de régulation par PI est montrée à la figure II.12. La fonction de transfert en boucle fermée s'écrit comme suit :

$$G_{BF} = \frac{(1 + \frac{K_P s}{K_i}) \frac{K_i}{C}}{s^2 + \frac{K_P}{C} s + \frac{K_i}{C}} \quad (II.42)$$

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

$$G_{BF} = \frac{(1 + \frac{K_p}{K_i} S) \omega_c^2}{S^2 + 2\xi \omega_c S + \omega_c^2} \quad (\text{II.43})$$

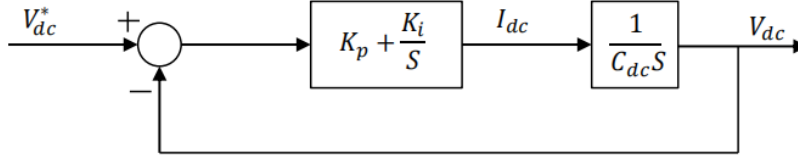


Figure II.12 – Boucle de régulation de la tension du bus continue par  $I_{dc}$ .

Après identification de cette dernière équation avec l'équation II.42 on trouve :  $K_i = \omega_c^2 C_{dc}$  et  $K_p = 2\xi \sqrt{K_i C}$

### Régulation par $P_{dc}$

Si on n' néglige 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 :

$$P_{dc} = \frac{d(1/2 C_{dc} V_{dc}^2)}{dt} \quad (\text{II.44})$$

en appliquant la transformation de Laplace sur cette relation, on obtient :

$$P_{dc}(S) = \frac{1}{2} S C_{dc} V_{dc}^2(S) \quad (\text{II.45})$$

Le carré de la tension aux bornes du condensateur est donnée par :

$$V_{dc}^2(S) = \frac{2P_{dc}(S)}{C_{dc} S} \quad (\text{II.46})$$

A partir de la relation II.46 et en tenant compte du régulateur PI, la boucle de régulation de tension continue peut être représentée par la figure II.13. Le choix des paramètres  $K_{pdc}$  et  $K_{idc}$  aura pour objectif d'obtenir un temps de réponse minimal afin de ne pas nuire la dynamique du filtre actif.

A partir de la figure II.13, la fonction de transfert représentant la régulation en boucle fermée de la tension continue est donnée par :

$$G_{BF} = \frac{1 + \frac{K_{pdc}}{K_{idc}} S}{S^2 + \frac{K_{pdc}}{C_{dc}} S + 2 \frac{K_{idc}}{C_{dc}}} \quad (\text{II.47})$$

Comparant cette équation avec la forme générale d'une fonction de transfert de deuxième ordre, on trouve:  $K_{idc} = \frac{1}{2}C_{dc} \cdot \omega_{dc}^2$  et  $K_{pdc} = \xi\sqrt{2 \cdot C_{dc} \cdot K_{idc}}$  tel que:

$\omega_c = 2\pi f_c$  Pour un compromis entre temps de réponse et d'assement on prend  $\xi = 0.707$  et pour un bon filtrage des harmoniques de la tension de boucle on prend  $f_c = 65\text{Hz}$ . Il est possible de linéariser l'équation II.44 autour de  $V_{dc}^*$  et faire la régulation de  $V_{dc}$  au lieu de  $V_{dc}^2$  comme c'est le cas dans.

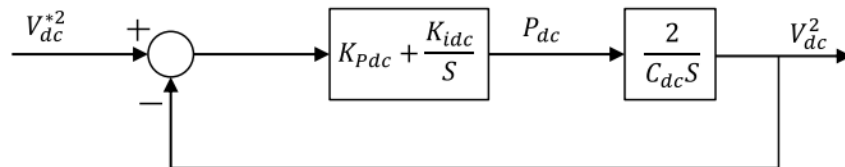


Figure II.13 – Boucle de régulation de la tension du bus continue par  $P_{dc}$ .

La régulation par  $I_{dc}$  ou par  $P_{dc}$  peut se faire aussi avec un simple régulateur proportionnel en série avec un filtre passe bas permettant de filtrer les harmoniques de la tension continue.

#### II.4. Conclusion:

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

## ***CHAPITRE III***

**SIMULATION DE L'ENSEMBLE  
RESEAU, CHARGE POLLUANTE ET  
FAP A QUATRE FILS**

CHAPITRE III

SIMULATION DE L'ENSEMBLE RESEAU, CHARGE POLLUANTE ET FAP A QUATRE FILS

III.1 Introduction:

La simulation numérique est devenue l'outil indispensable de l'étude de ces systèmes. Dans ce chapitre on propose d'étudier la simulation de l'ensemble réseau, charges polluantes, deux redresseurs monophasés, filtre actif parallèle à quatre fils sous l'environnement Matlab-Simulink. On donne par suite les résultats de simulation obtenus et on fait les commentaires nécessaires.

III.2 Schéma de simulation:

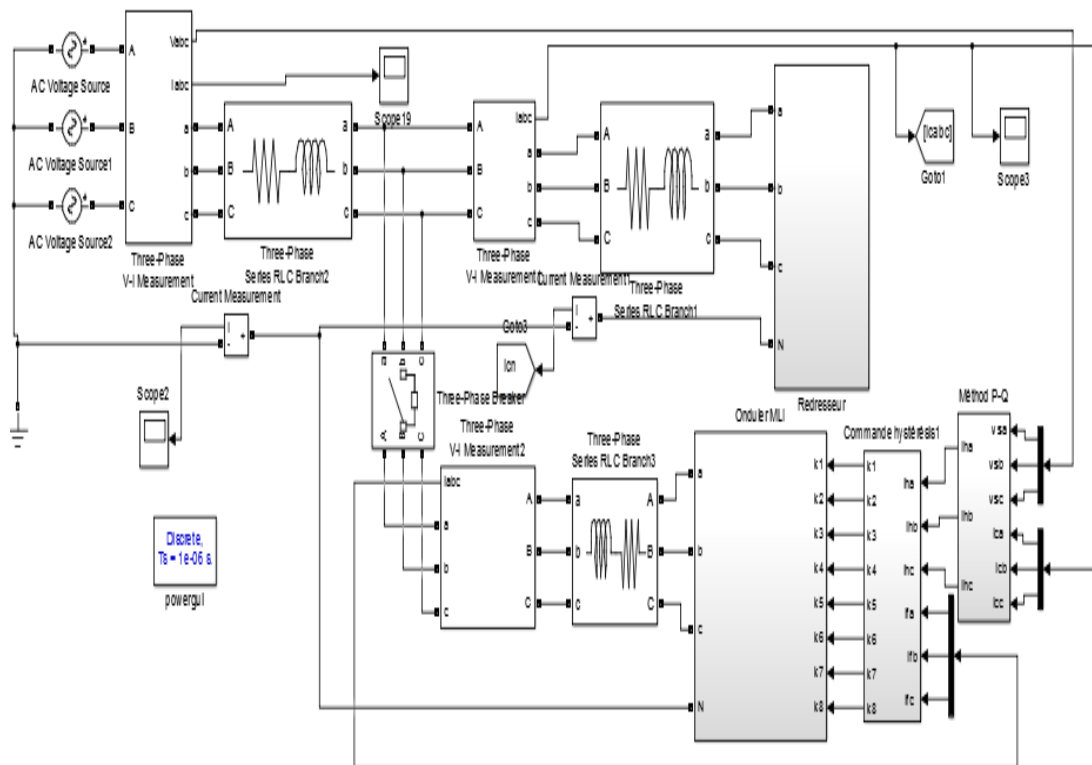


Figure III.1: Schéma de simulation FAP à quatre fils.

**III.3 Schéma de la méthode de puissances instantanées classique avec FPB:**

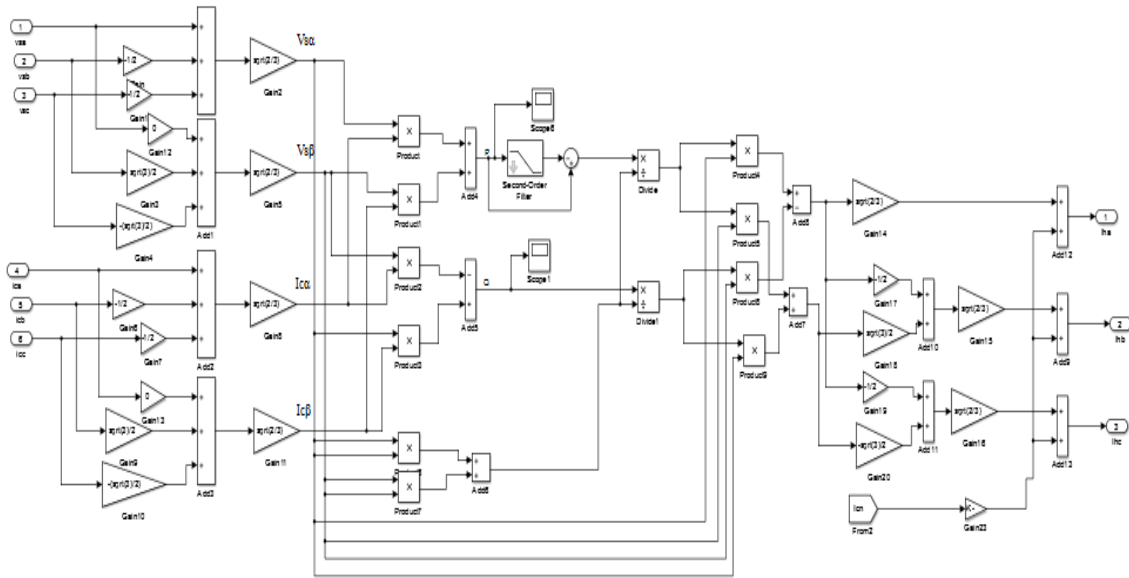


Figure III.2: Schéma de simulation la méthode de puissances instantanées classique avec FPB.

**III.4 Schéma de charges**

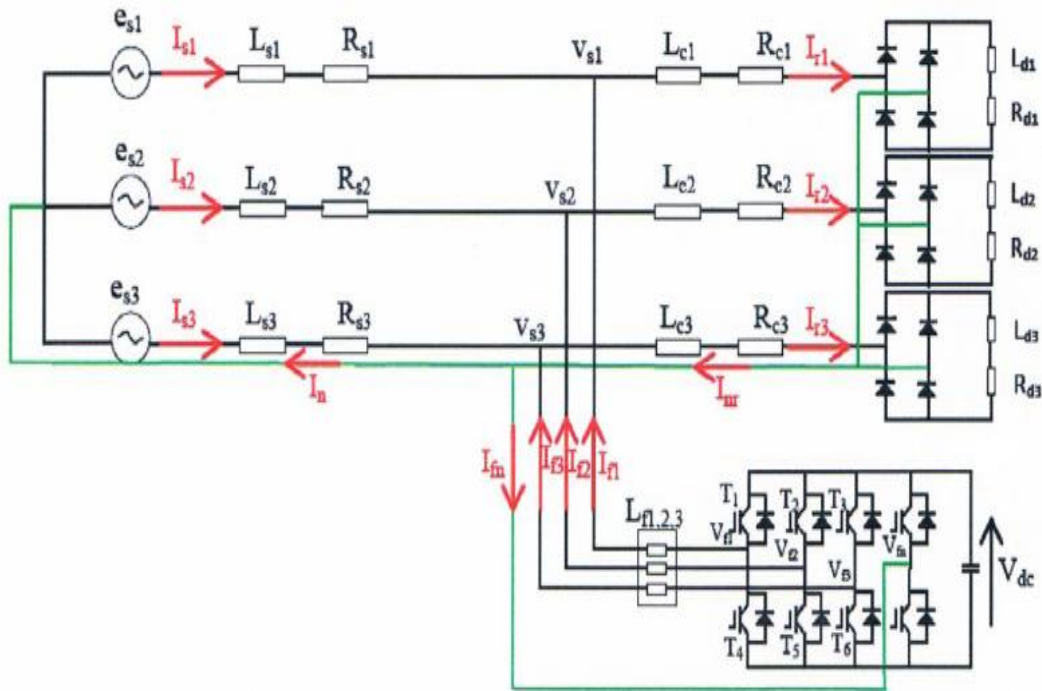


Figure III.3: Schéma de charges .

**III.4.1 Paramètres de la simulation:**

Pour simuler le modèle de l'association filtre actif-réseau-charge polluante du la figure(III.1) sous Matlab-Simulink, on a utilisé les paramètres suivant :

Les valeurs par phase de ces paramètres sont présentées au tableau ci-dessous :

Tab III.1 : Paramètres du système étudié.

Source	Vmax[V]	100
	F[Hz]	50
	Rs[Ω]	0.42
	Ls[mH]	0.23
filtre	Rf [Ω]	0.5
	Lf [mH]	3
	Vdc[V]	180
charge	Rc[Ω]	0.2
	Lc[mH]	1
FPB	$f_c$ [Hz]	65
	$\varepsilon_c$	0.707

Pour les charges, nous étudions les deux cas suivants :

➤ Cas où les trois charges sont identiques :  $R_{da}= R_{db}= R_{dc}=30\Omega$  ;  $L_{da}= L_{db}= L_{dc}=90\text{mH}$ .

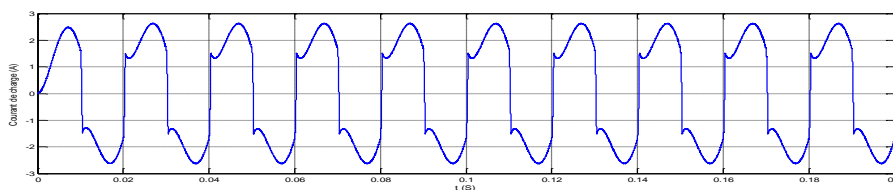
➤ Cas où les trois charges sont différentes :  $R_{da}=30\Omega$  ,  $R_{db}=15\Omega$  ,  $R_{dc}=25\Omega$  ;  $L_{da}=90\text{mH}$  ,  $L_{db}=100\text{mH}$  ,  $L_{dc}=85\text{mH}$ .

### III.4.2 Résultat de simulation sous Matlab-Simulink:

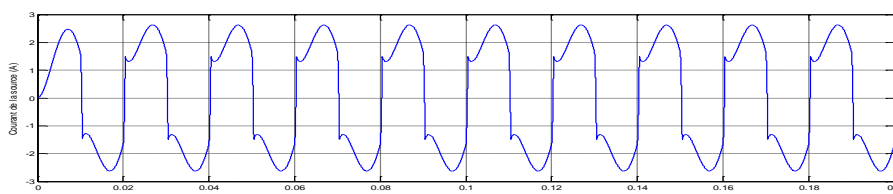
#### III.4.2.1 Cas de charge équilibrée:

Les résultats suivant représentent la réponse pour un cas de charge identique (équilibré) et on considère que l'angle d'amorçage  $\alpha$  est le même pour tous les thyristors, on prend  $\alpha = 0$ . C'est la raison pour laquelle nous ne tracerons que la courbe du courant de source de la phase a , 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.

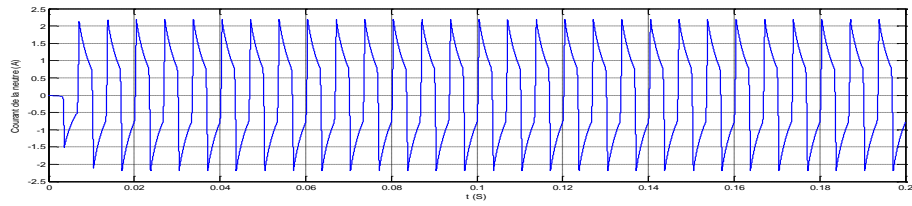
##### III.4.2.1.a- Les courbes avant filtrage:



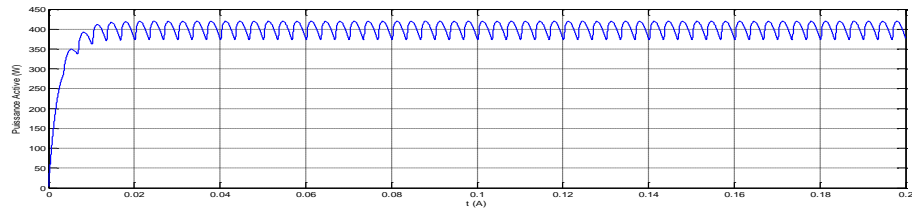
a: Courant du côté charge (phase a).



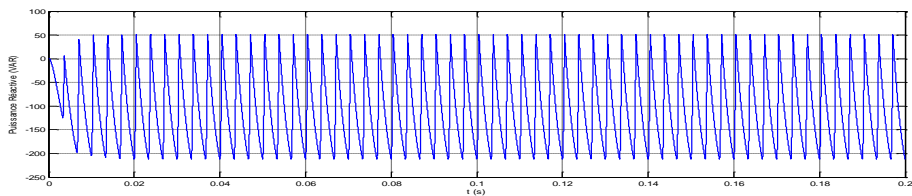
b: Courant de la source (phase a).



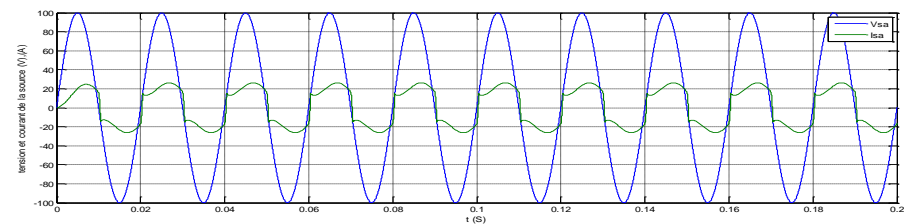
c: Courant du neutre de la source.



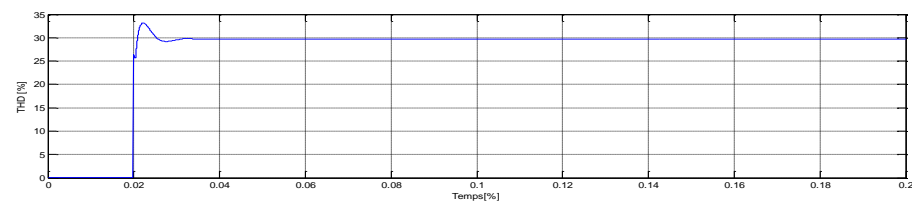
d: Puissance active de la source .



e: Puissance réactive de la source.



f: Tension et Courant de la source (phase a).



g: Taux de distorsion d'harmonique

Figure III.4: Simulation du FAP à 4 bras par de charge équilibrée avant filtrage.

- D'après la figure III.4.a nous remarquons que le courant du côté charge est déformé.
- Nous constatons que le courant du neutre du côté source n'est pas nul malgré que la charge équilibrée (figure III.4.c).
- On note une importante valeur  $THD_i$ , qui est très élevée et dépasse 5 % (figure III.4.g) (la norme IEEE-512-1992).

- Nous constatons qu'il y a un déphasage entre le courant et la tension de la source, (figure.III.4.f). De plus, la puissance active est instable comme illustré à la figure III.4.d . Cela signifie que le facteur de puissance n'est pas bon (dégradé).

• Taux de distorsion d'harmonique

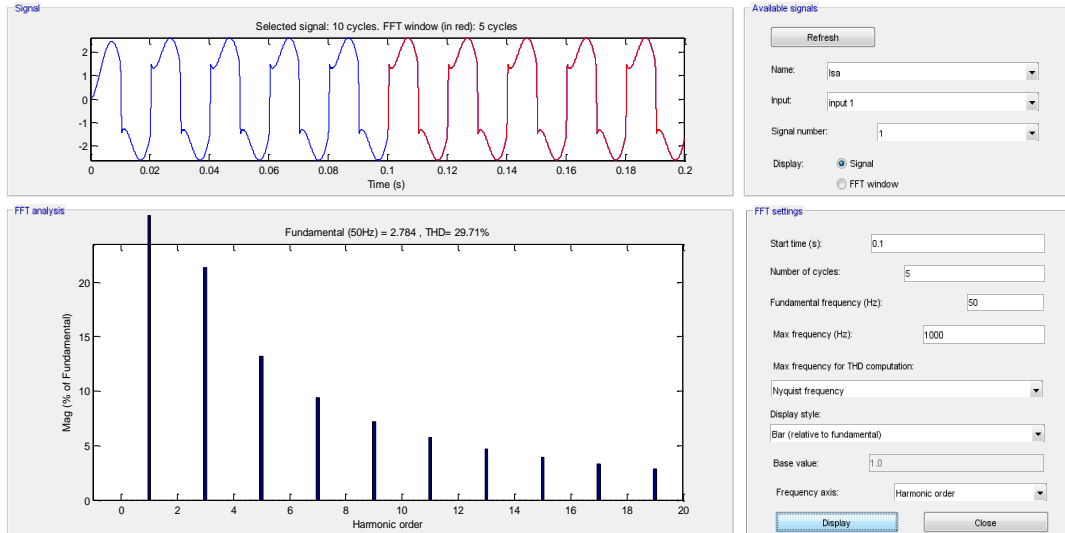
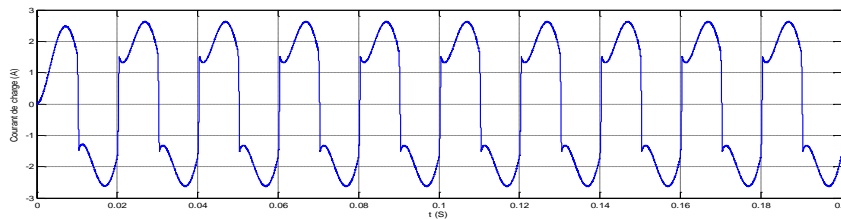
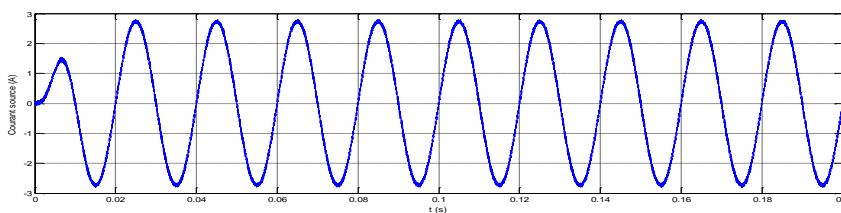


Figure III.5 Spectre d'harmonique du courant de la source par de charge équilibrée (phase a).

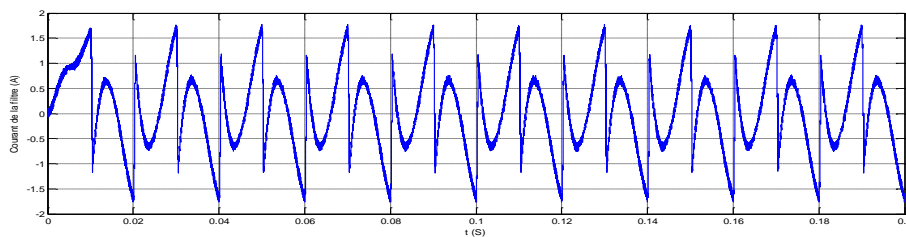
III.4.2.1.b - Les courbes après filtrage:



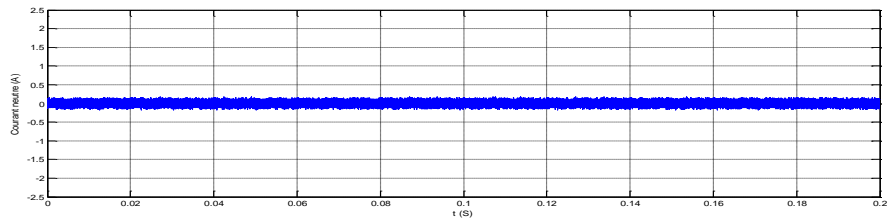
a: Courant du côté charge (phase a).



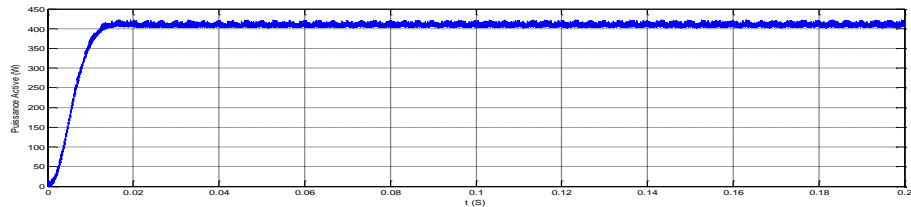
b: Courant de la source (phase a).



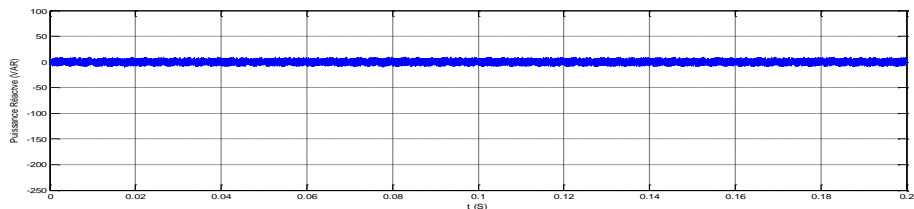
c: Courant de la filtre (phase a).



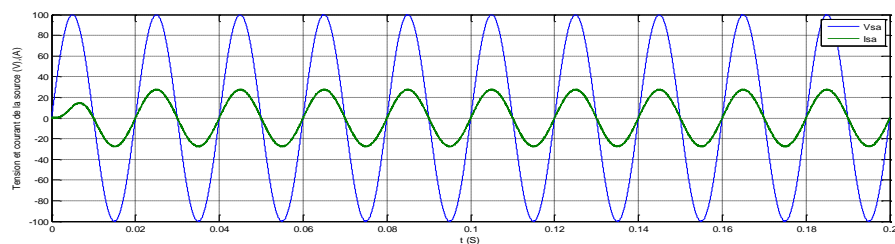
d: Courant du neutre de la source.



e: Puissance active de la source.



f: Puissance réactive de la source.



g: Courant et tension de la source (phase a)

Figure III.6: Simulation du FAP à 4 bras par de charge équilibrée après filtrage.

- Dans la figure III.6.b nous constatons une bonne amélioration du courant de la source ,et devenu quasiment sinusoïdale.
- La figure III.6.d présente la forme du courant du neutre coté source, ou nous remarquons qu'il est nul.
- On constate qu'il n'y a pas de déphasage entre le courant et la tension (figure III.6.g).
- La puissance active est stable (figure III.6.e.) cela signifie que le facteur de puissance est totalement amélioré .

• Taux de distorsion d'harmonique:

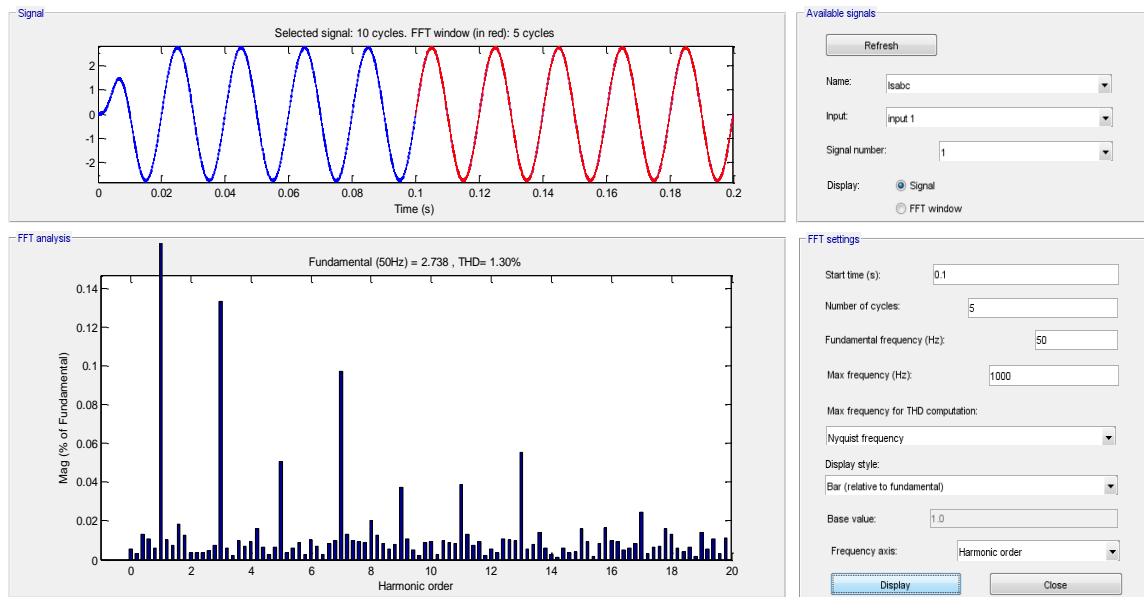
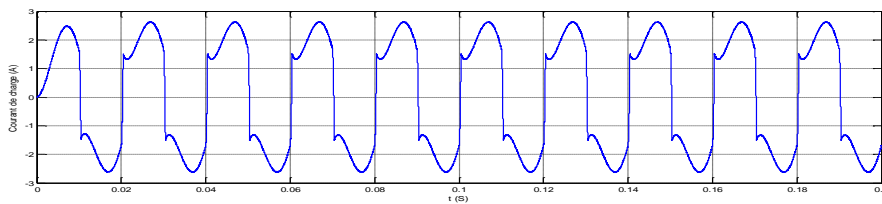
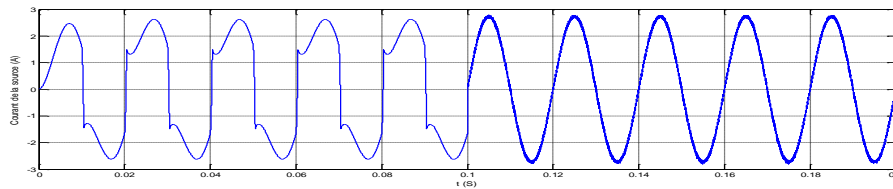


Figure III.7: Spectre d'harmonique du courant de la source (phase a).

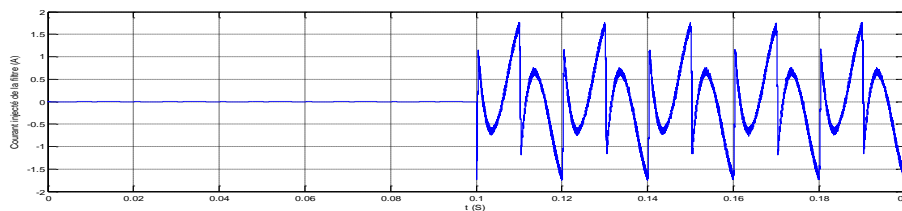
III.4.2.1.c - Les courbes avant et après filtrage:



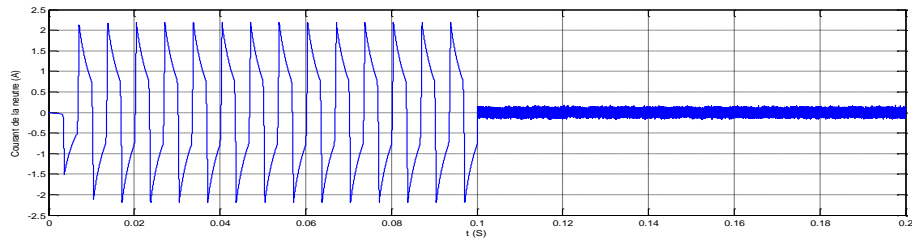
a: Courant du côté charge (phase a).



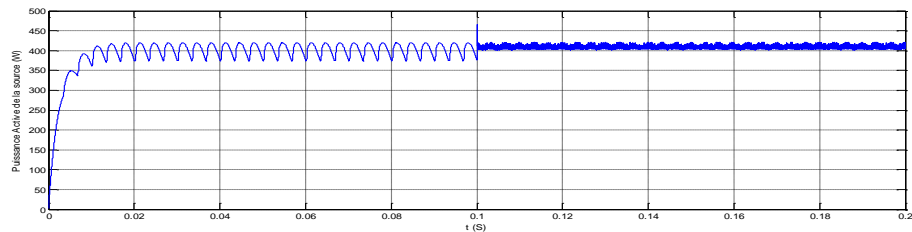
b: Courant de la source (phase a).



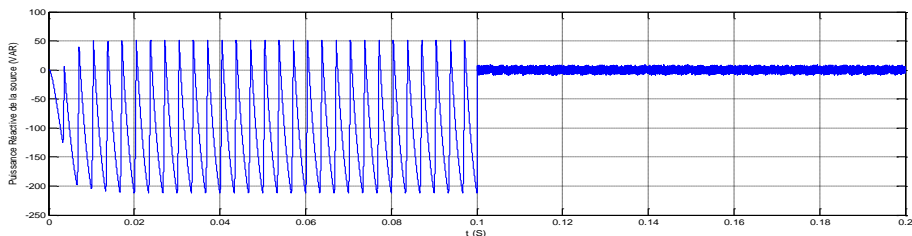
c: Courant injecté par le filtre (phase a).



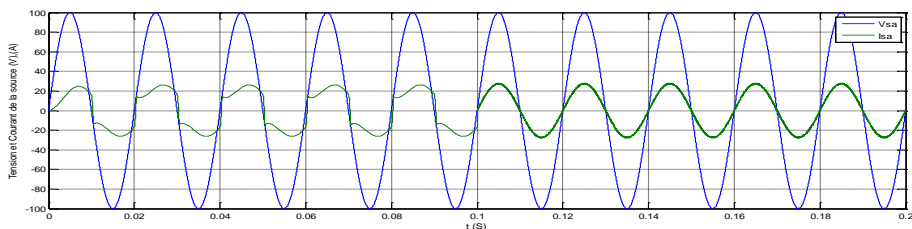
d: Courant du neutre de la source.



e: Puissance active de la source.



f: Puissance réactive de la source .



g: Courant et tension de la source (phase a)

Figure III.8: Simulation du FAP à 4 bras par de charge équilibrée avant et après filtrage.

- A l'instant  $t = 0,1$  s le FAP est inséré, la courbe de la figure III.8.g montre la variation de la tension de source et le courant de la source en fonction du temps, on peut noter qu'avant l'insertion du FAP il existe un déphasage entre la tension et le courant. A partir du moment où le FAP est inséré ce déphasage devient nul (disparaît), ce qui signifie que le facteur de puissance est unitaire.
- Les figures (III.8.e, et III.8.f) : présentent les puissances instantanées active  $p$  (W) et réactive  $q$  (Var), nous remarquons que à l'instant 0.1(sec) que le FAP à quatre fils compense l'énergie réactive de source qui a été consommée par la charge non-linéaire, aussi la puissance active redevient stable, donc le facteur de puissance est amélioré.

- **Taux de distorsion d'harmonique:**

- Avant filtrage : THD = 29.71 %.
- Après filtrage : THD = 1.30 %.

On constate une amélioration significative de la qualité du courant après filtrage. Cela montre qu'une filtration parallèle actif à quatre fils donne un bon résultat.

### III.4.2.2 Cas de charge déséquilibrée(I):

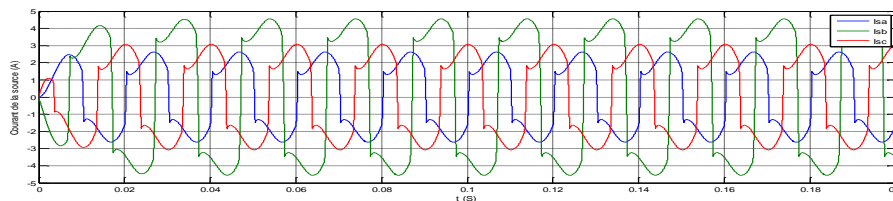
Dans ce deuxième cas nous avons pris un système de charges déséquilibré(I) non identique, c'est la raison pour laquelle nous ne tracerons que les courbes du courant de source de chaque phase (abc) , ainsi que les spectres des harmoniques du chaque phases, Les résultats de simulation du système étudié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

L'angle d'amorçage  $\alpha$  est le même pour tous les thyristors, on prend  $\alpha = 0$

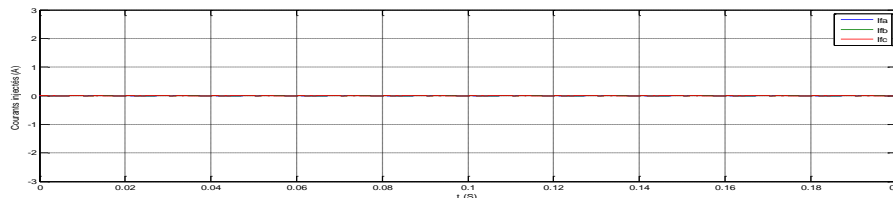
- **En changeant Paramètres charges:**

Cas ou les trois charges sont différentes :  $R_{da}=30\Omega$  ,  $R_{db}=15\Omega$  ,  $R_{dc}=25\Omega$  ;  $L_{da}=90\text{mH}$  ,  $L_{db}=100\text{mH}$  ,  $L_{dc}=85\text{mH}$ .

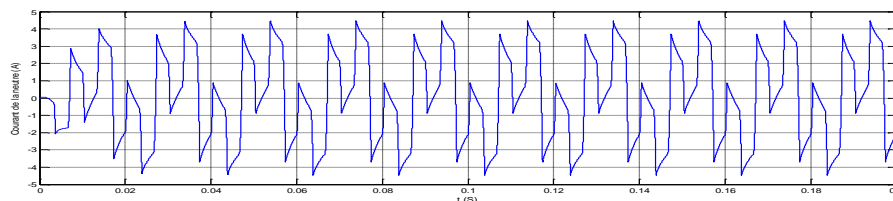
#### III.4.2.2.a- Les courbes avant filtrage:



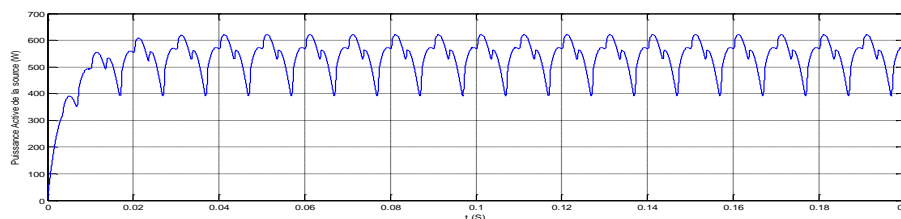
a: Courant de la source (phase abc).



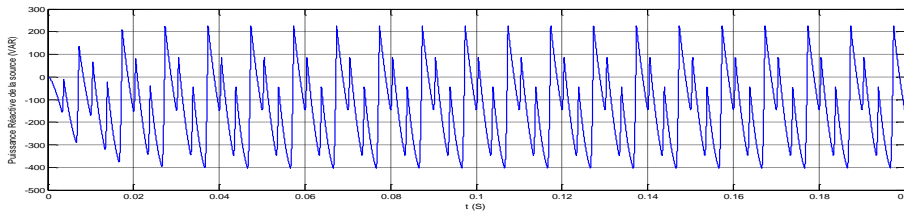
b: Courant injecté par le filtre (phase abc).



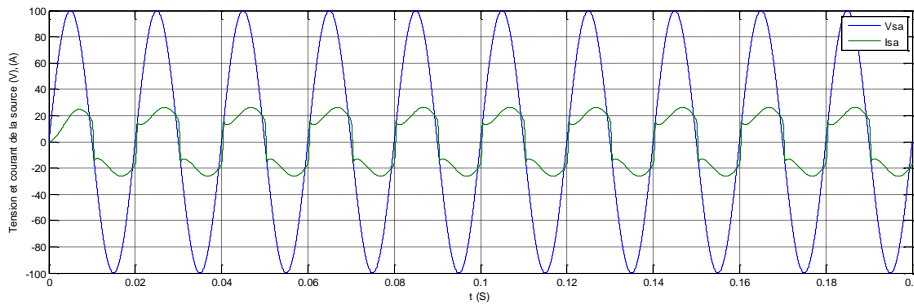
c: Courant du neutre.



d: Puissance active de la source.



e: Puissance réactive de la source.



f: Courant et tension de la source (phase a)

Figure III.9: Simulation du FAP à 4 bras par de charge déséquilibrée(I) avant filtrage.

- D'après la figure III.9.a nous remarquons que le courant du côté charge est déformé.
- Nous constatons que le courant du neutre du côté source n'est pas nul (figure III.9.c).
- Nous constatons qu'il y a un déphasage entre le courant et la tension de la source, (figure III.9.f). De plus, la puissance active est instable comme illustré à la figure III.9.d . Cela signifie que le facteur de puissance n'est pas bon (dégradé).

• Taux de distorsion d'harmonique (Isabc):

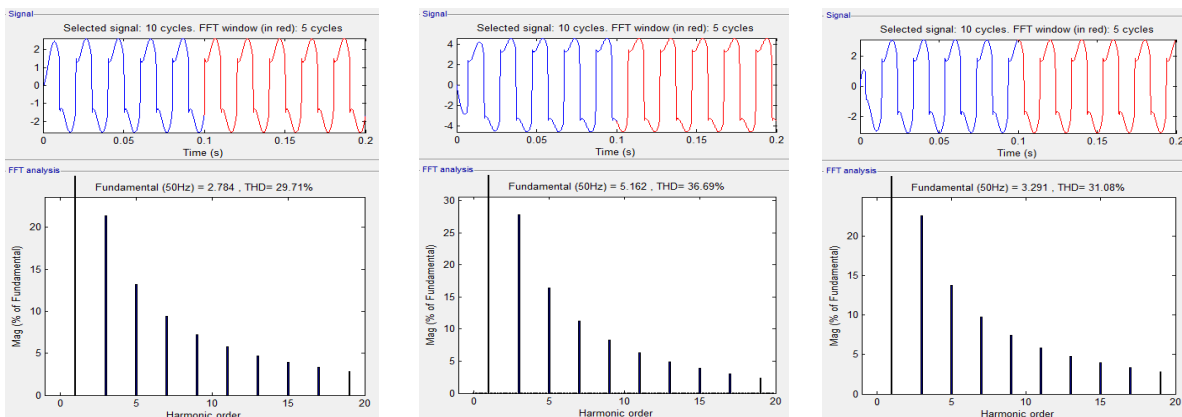
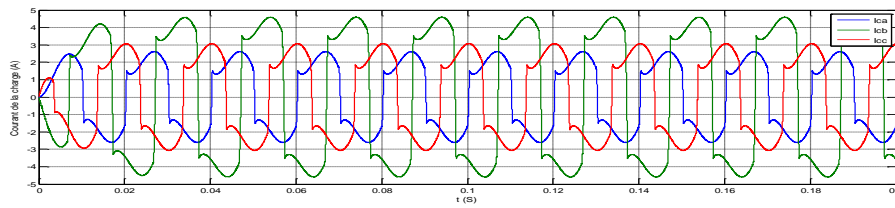


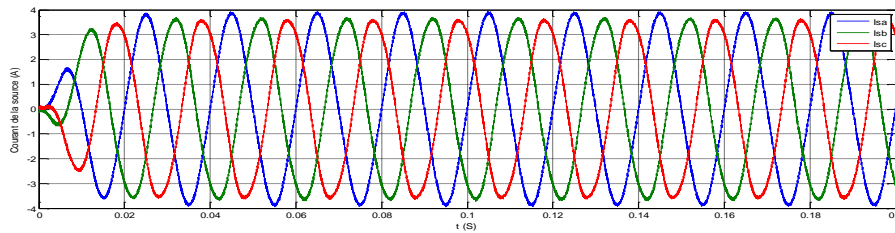
Figure III.10: Spectre d'harmonique du courants de la source (phase abc).

\*Le taux de distorsion d'harmonique a été mesurée sur 5 périodes (colorés en rouge) entre l'instant 0.1 et 0.2 s, nous remarquons que  $THD_{I_{sa}} = 29.71\%$  ,  $THD_{I_{sb}} = 36.69\%$  ,  $THD_{I_{sc}} = 31.08\%$  .

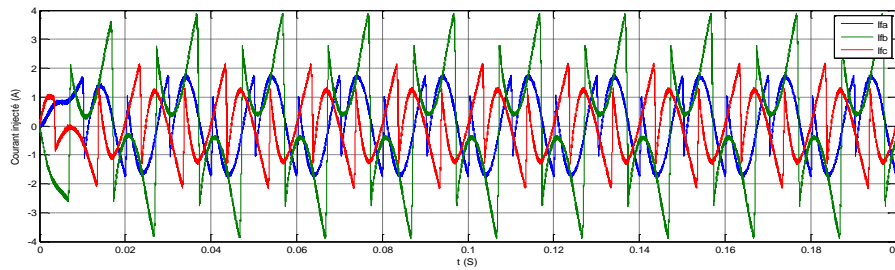
III.4.2.2.b- Les courbes après filtrage:



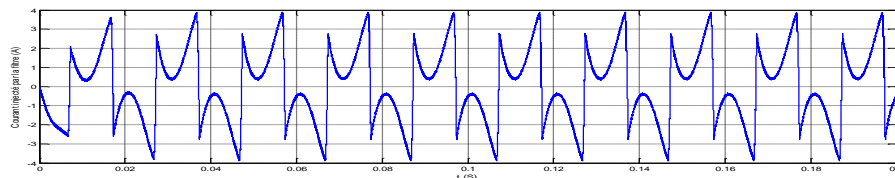
a: Courant du coté charge (phase abc).



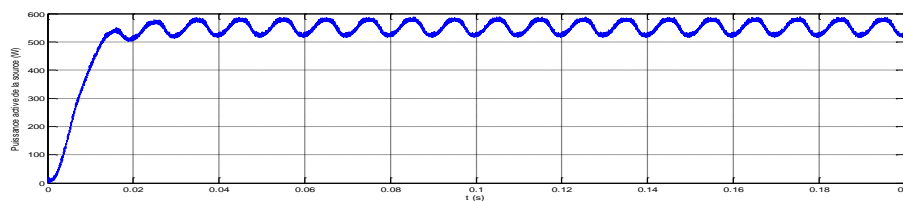
b: Courant de la source (phase abc).



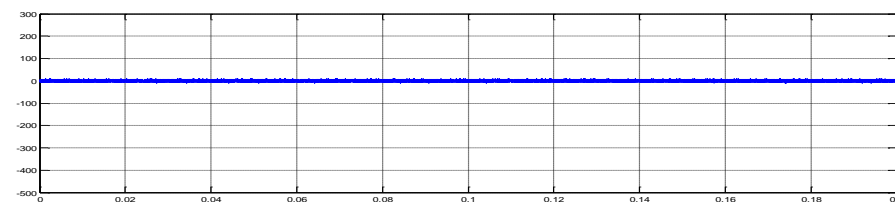
c: Courant injecté par le filtre (phase abc).



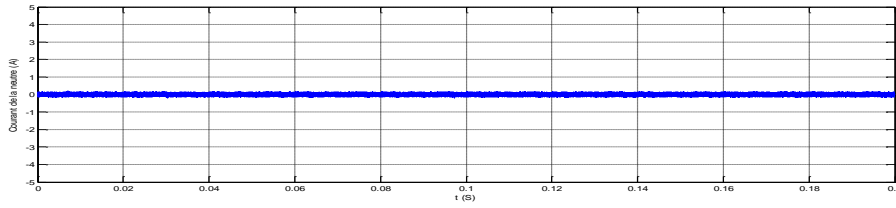
d: Courant injecté par le filtre (phase b).



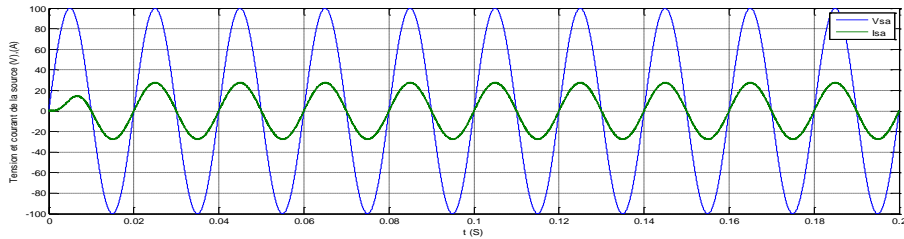
e: Puissance active de la source.



f: Puissance réactive de la source.



g: Courant du neutre de la source.



h: Courant et tension de la source (phase a)

Figure III.11: Simulation du FAP à 4 bras par de charge déséquilibrée (I) après filtrage.

- Dans la figure III.11.b nous constatons une bonne amélioration sur les formes d'ondes des trois courants de la source ,et devenues presque sinusoïdaux.
- La figure III.11.g présente que le courant de neutre est nul.
- La figure III.11.f présente que la puissance réactive est presque nulle est nul.
- On constate qu'il n'y a pas de déphasage entre le courant et la tension (figure III.11.h).
- La puissance active est approximativement stable (figure III.11.e) cela signifie que le facteur de puissance est amélioré.

• Taux de distorsion d'harmonique

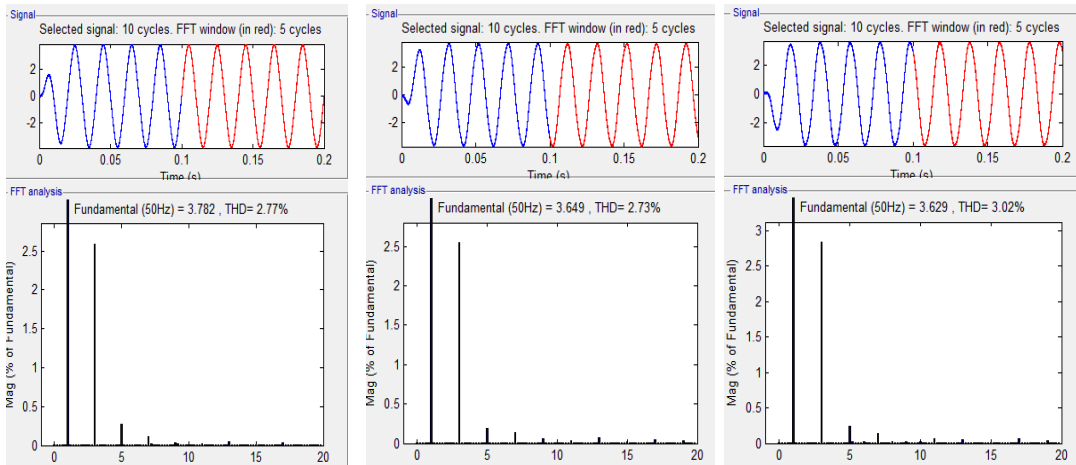
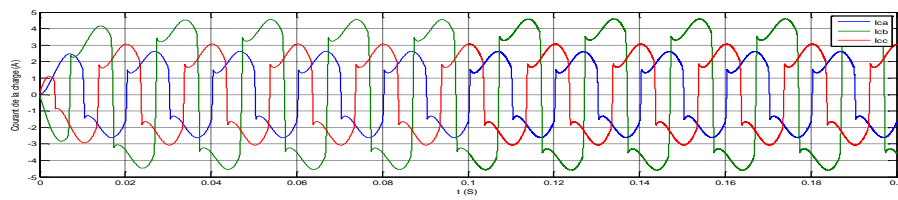
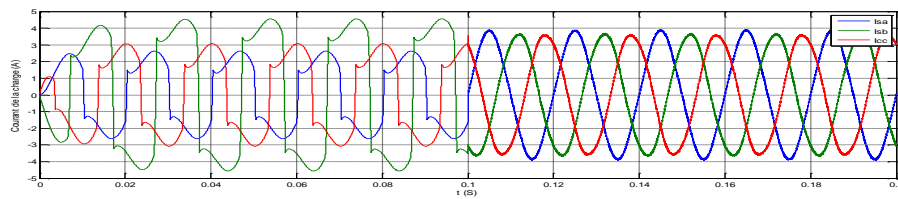


Figure III.12: Spectre d'harmonique du courant de la source (phase abc).

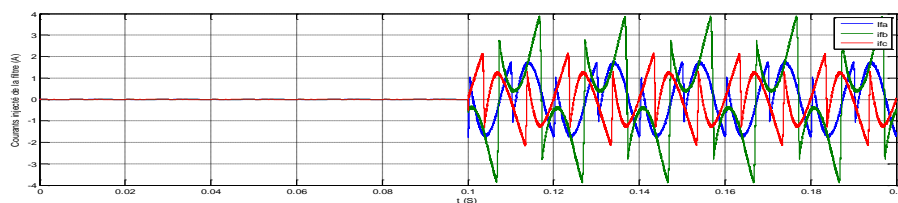
III.4.2.2.c- Les courbes avant et après filtrage:



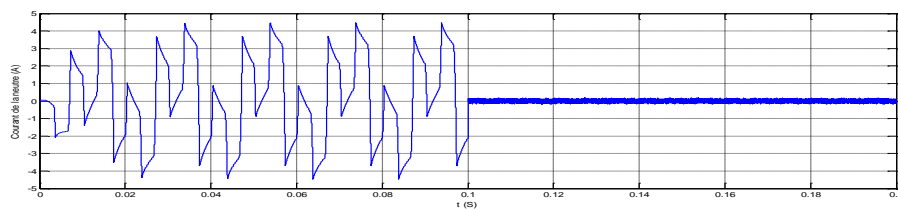
a: Courant du coté charge (phase abc).



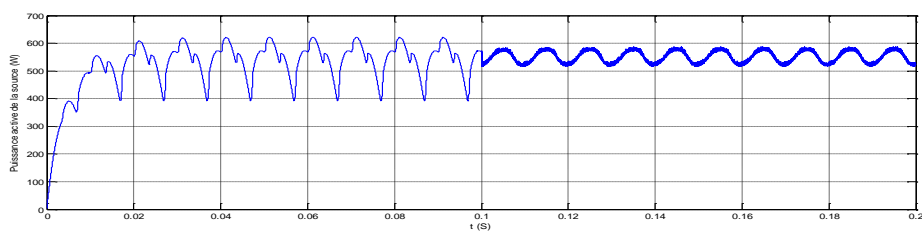
b: Courant de la source (phase abc).



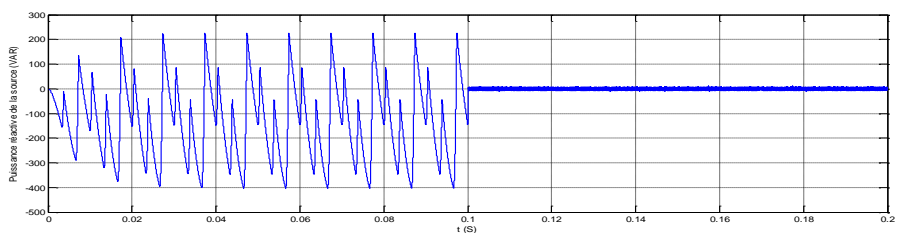
c: Courant injecté par le filtre (phase abc).



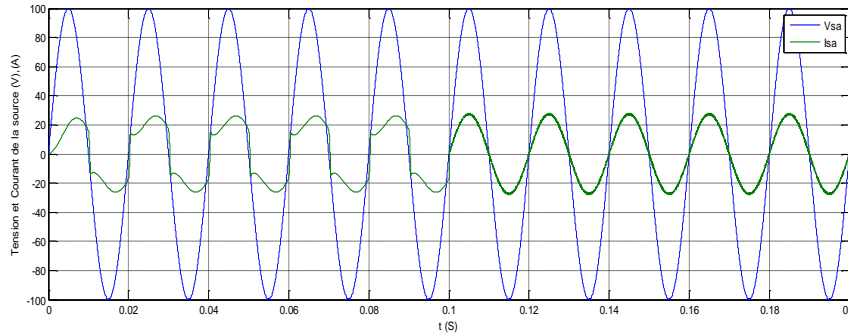
d: Courant du neutre de la source.



e: Puissance active de la source.



f: Puissance réactive de la source.



g: Courant et tension de la source (phase a)

Figure III.13: Simulation du FAP à 4 bras par de charge déséquilibrée (I) avant et après filtrage.

Nous remarquons après l'instant  $t = 0,1$  s que il y a des améliorations sur la forme d'onde des courants, compensation de la puissance réactive et ça revient au bon fonctionnement du notre le FAP qui est inséré à cet instant .

**III.4.2.3 Cas de charges déséquilibrées (II):**

La première phase un gradateur monophasée alimente une inductance résistive, et son angle d'amorçage égal à  $\alpha_a = \frac{\pi}{3}$ , les deuxième phase deux redresseurs monophasés double alternance à diodes chacun alimente une inductance résistive , et son angle d'amorçage égal à  $\alpha_b = 0$  . Pour la troisième phase un gradateur monophasée alimente une inductance résistive, et son angle d'amorçage égal à  $\alpha_c = \frac{\pi}{6}$  , c'est la raison pour laquelle nous ne tracerons que les courbes du courant de source de chaque phase (abc).

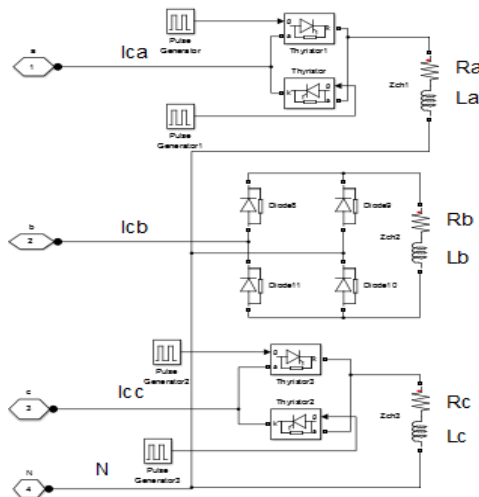
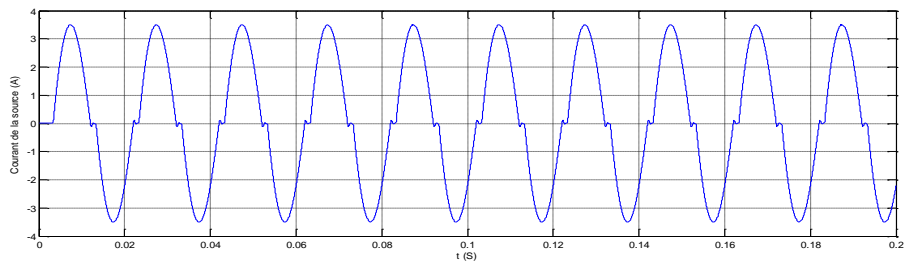


Figure III.14: schéma de charges déséquilibrées (II).

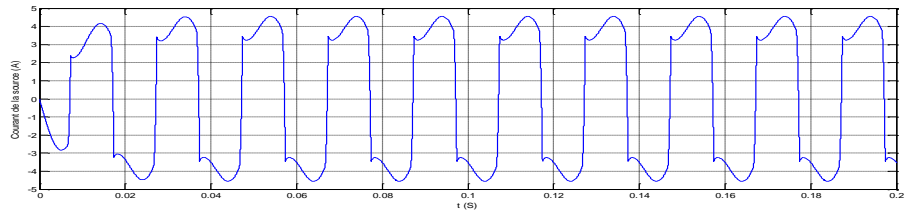
**• En changeant Paramètres charges:**

Cas où les trois charges sont différentes :  $R_{da}=20\Omega$  ,  $R_{db}=15\Omega$  ,  $R_{dc}=25\Omega$  ;  $L_{da}=50mH$  ,  $L_{db}=100mH$  ,  $L_{dc}=60mH$ .

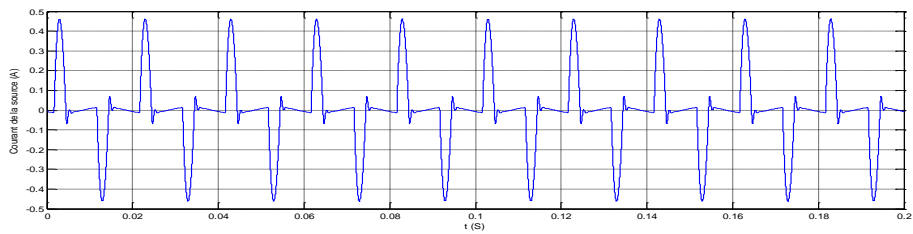
III.4.2.3.a- Les courbes avant filtrage:



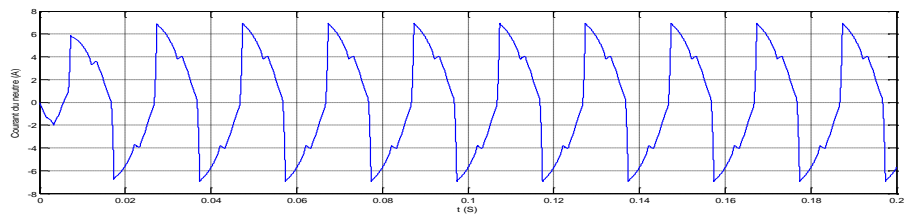
a: Courant de la source (phase a).



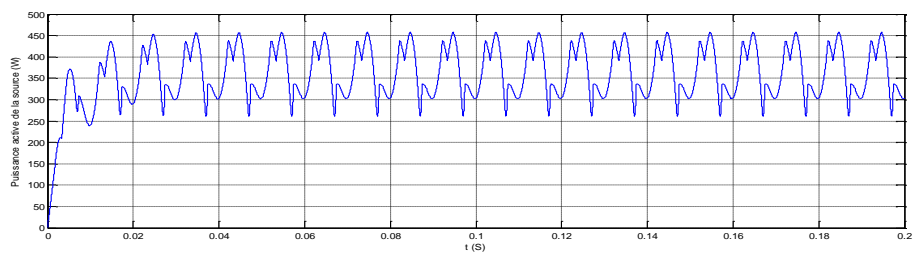
b: Courant de la source (phase b).



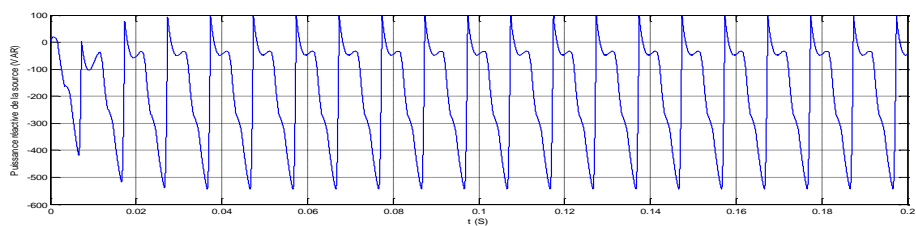
c: Courant de la source (phase c).



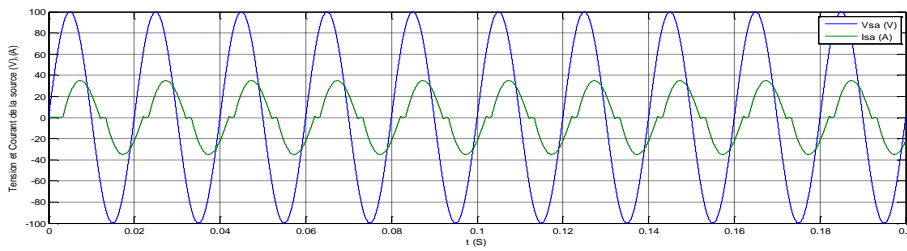
d: Courant du neutre de la source .



e: Puissance active de la source.



f: Puissance réactive de la source.



g: Courant et tension de la source (phase a)

Figure III.15: Simulation du FAP à 4 bras par de charge déséquilibrée(II) avant filtrage.

- D'après les figures III.15.abc nous remarquons que les courants des trois phases sont déformés.
- Nous constatons que le courant du neutre du côté source n'est pas nul (figure III.15.d).
- Nous constatons qu'il y a un déphasage entre le courant et la tension de la source, (figure III.15.g). De plus, la puissance active est instable comme illustré à la figure III.15.e. Cela signifie que le facteur de puissance n'est pas bon (dégradé).

• Taux de distorsion d'harmonique:

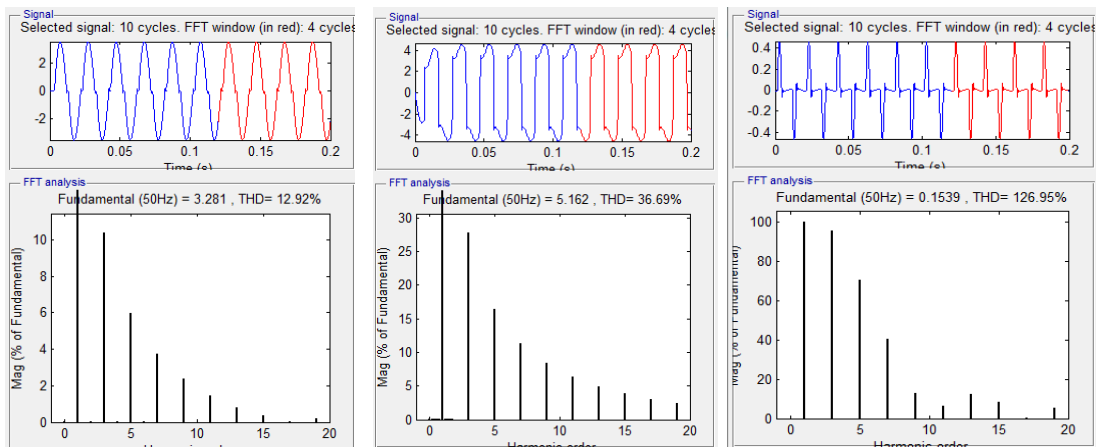
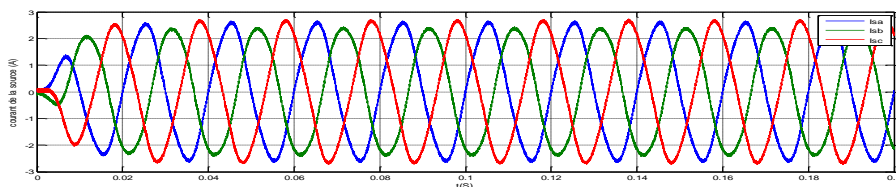


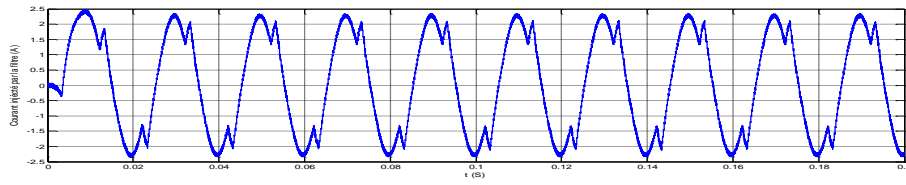
Figure III.16: Spectre d'harmonique du courant de la source (phase abc).

\*Le taux de distorsion d'harmonique a été mesurée sur 4 périodes (colorés en rouge) entre l'instant 0.12 et 0.2 s, nous remarquons que  $THD_{I_{sa}}= 12.92\%$  , $THD_{I_{sb}}= 36.69\%$  , $THD_{I_{sc}} = 126.95\%$

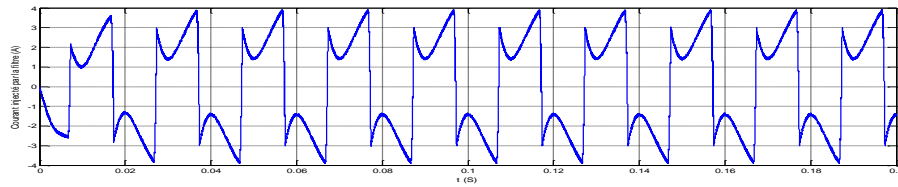
III.4.2.3.b- Les courbes après filtrage:



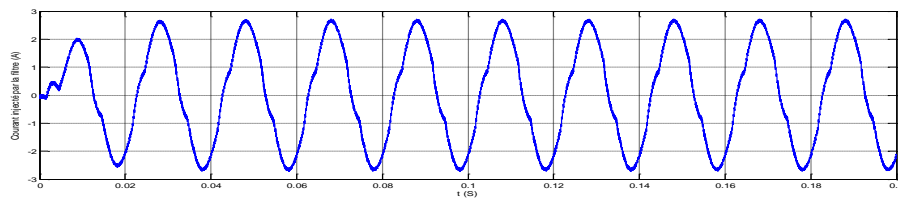
a: Courant de la source (phase abc).



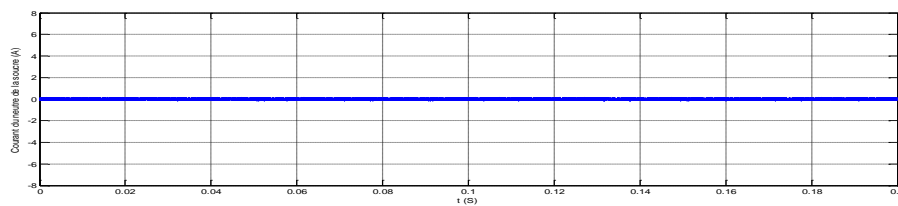
b: Courant injecté par le filtre (phase a).



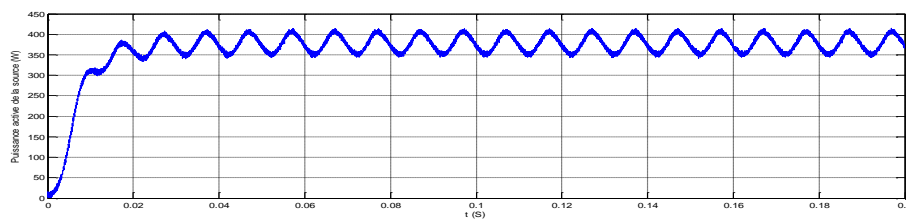
c: Courant injecté par le filtre (phase b).



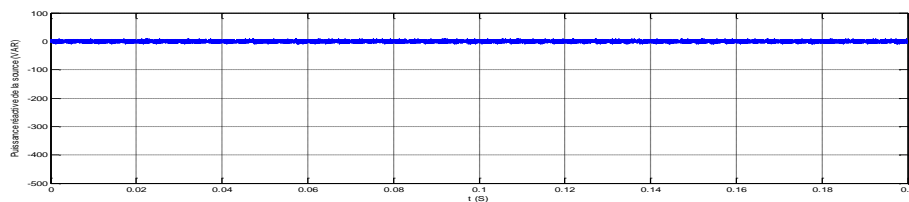
d: Courant injecté par le filtre (phase c).



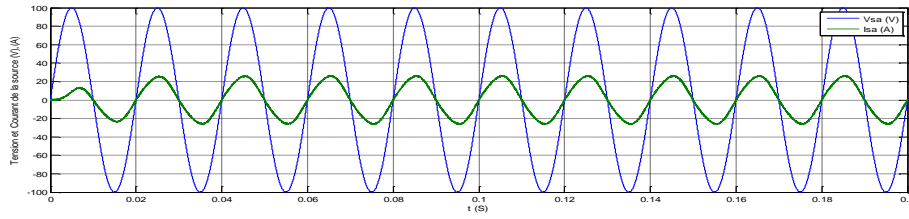
e: Courant du neutre de la source .



f: Puissance active de la source.



g: Puissance réactive de la source.



h: Courant et tension de la source (phase a)

Figure III.17: Simulation du FAP à 4 bras par de charge déséquilibrée(II) après filtrage.

- Dans la figure III.17.a nous constatons une bonne amélioration sur les formes d'ondes des trois courants de la source ,et devenues presque sinusoïdaux.
- La figure III.17.e présente que le courant de neutre est nul.
- La figure III.17.g présente que la puissance réactive est presque nulle est nul.
- On constate qu'il n'y a pas de déphasage entre le courant et la tension (figure III.17.h).
- La puissance active est approximativement stable (figure III.17.f) cela signifie que le facteur de puissance est amélioré.

• Taux de distorsion d'harmonique:

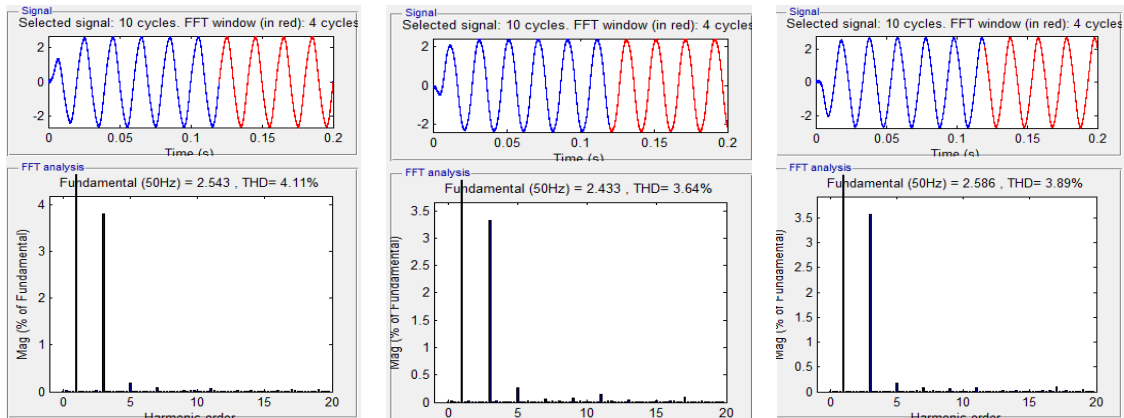
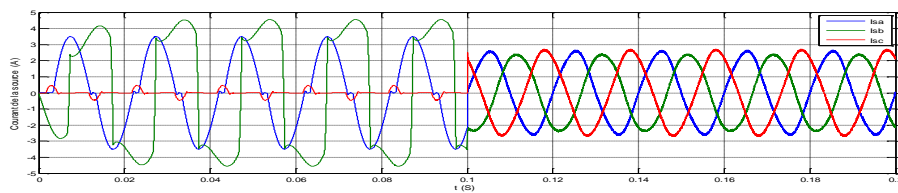


Figure III.18: Spectre d'harmonique du courant de la source (phase abc).

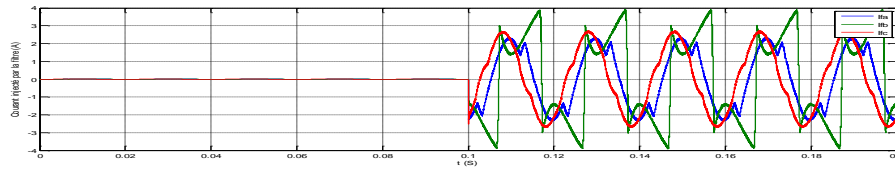
\*Le taux de distorsion d'harmonique a été mesurée sur 4 périodes (colorés en rouge) entre l'instant 0.12 et 0.2 s, nous remarquons que  $THD_{I_{sa}} = 4.11\%$  ,  $THD_{I_{sb}} = 3.64\%$  ,  $THD_{I_{sc}} = 3.89\%$

\*Représenter la Figure III.18 Spectre d'harmonique du courants de la source (phase abc).  
On remarque un manque important d'harmoniques, La raison est due à l'injection du maillage avec le filtre actif à quatre fils.

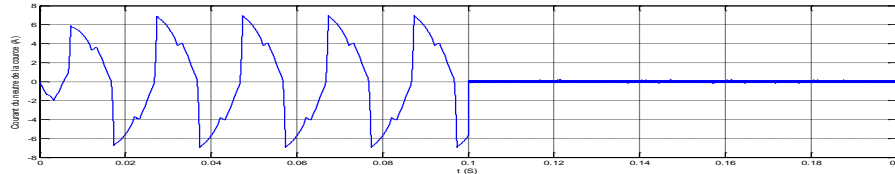
III.4.2.3.c - Les courbes avant et après filtrage:



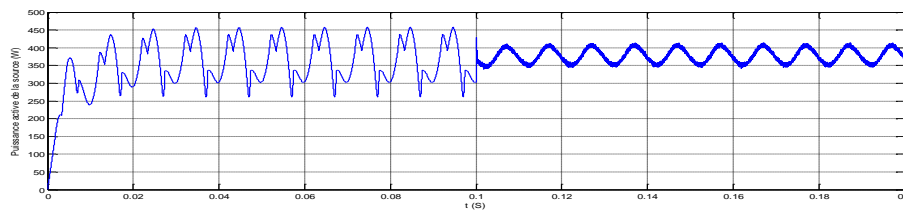
a: Courant de la source (phase abc).



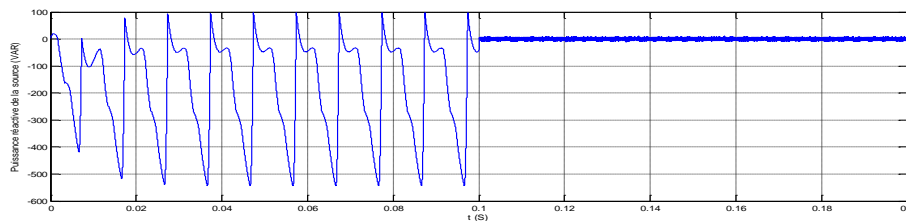
b: Courant injecté par le filtre (phase abc).



c: Courant du neutre de la source .



d: Puissance active de la source.



e: Puissance réactive de la source.

Figure III.19: Simulation du FAP à 4 bras par de charge déséquilibrée(II) avant et après filtrage.

Les figure (III.19.d, III.19.e) : présentent les puissances instantanées active  $p(W)$  et réactive  $q(Var)$ , nous remarquons que à l'instant 0.1(sec) dès que le FAP à quatre fils compense l'énergie réactive de source qui a été consommée par la charge non-linéaire, aussi la puissance active redevenir stable , Donc le facteur de puissance s'améliore.

A l'instant  $t = 0,1$  s le FAP est inséré, la courbe de la figure III.19.a montre la variation de la tension de source et le courant de la source en fonction du temps, on peut noter qu'avant l'insertion du FAP il existe un déphasage entre la tension et le courant. A partir du moment où le FAP est inséré ce déphasage devient nul (disparaisse), ce qui signifie que le un facteur de puissance est unitaire.

•**Résultat complet Taux de distorsion d'harmonique:**

Tab III.2 : Résultat complet Taux de distorsion d'harmonique.

<b>charges équilibrées</b>				
<b>THD [%]</b>	Phase A	Phase B	Phase C	<b>FP</b>
<b>THD [%]</b> avant filtrage	29.71			$0.55 < \cos\varphi < 0.98$
<b>THD [%]</b> après filtrage	1.30			$\cos\varphi = 1$
<b>charges déséquilibrées (I)</b>				
<b>THD [%]</b>	Phase A	Phase B	Phase C	<b>FP</b>
<b>THD [%]</b> avant filtrage	29.71	36.69	31.08	$0.55 < \cos\varphi < 0.98$
<b>THD [%]</b> après filtrage	2.77	2.73	3.02	$\cos\varphi = 1$
<b>charges déséquilibrées (II)</b>				
<b>THD [%]</b>	Phase A	Phase B	Phase C	<b>FP</b>
<b>THD [%]</b> avant filtrage	12.92	36.69	126.95	$0.55 < \cos\varphi < 0.98$
<b>THD [%]</b> après filtrage	4.11	3.64	3.89	$\cos\varphi = 1$

### III.5. Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons étudié le comportement du fonctionnement d'un filtre parallèle actif à quatre fils avec des charge équilibrées et déséquilibrées.

Les résultats de simulations obtenus avec plusieurs scénarios (charges équilibrées et déséquilibrées) montrent l'efficacité de notre filtre proposé pour l'atténuation des harmoniques et la compensation de la puissance réactive, ainsi que l'amélioration du facteur de puissance sur les trois phases.

## **CONCLUSION GENERALE**

Dans ce mémoire nous avons présenté une solution pour l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique en utilisant un filtre actif à quatre bras 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.

Notre application a été faite pour différents cas de charges (équilibré, déséquilibré et variation de charge) en utilisant l'outil Simulink de Matlab. La méthode des puissances active et réactive instantanées a été utilisée dans la phase d'identification, la commande par hystérésis connue par son efficacité, mais aussi par sa fréquence de commutation variable est adoptée dans la phase de commande du FAP à quatre fils.

D'après les séries de simulation présentés dans le dernier chapitres, on peut conclure du filtrage actif parallèle à quatre fils est un outil très efficace et donne des bons résultats ; il permet d'offrir une réduction significative des harmoniques du courant quel que soit la charge (équilibrée, déséquilibrée) ou dans en régime dynamique (variation de charge).

Le courant fourni par la source après le filtrage est toujours presque sinusoïdal avec une valeur du THD qui ne dépasse pas 5 % (au-dessous de la norme IEEE). Le déphasage entre la tension et le courant est nul après l'utilisation de ce filtre ce qui signifie la compensation totale de la puissance réactive, ainsi que l'amélioration du facteur de puissance.

Finalement on peut conclure que le filtre à quatre files quatre bras présente une solution universelle pour le problème des charges déséquilibre ,et la circulation de l'harmonique 3 dans le file de neutre .

## **BIBLIOGRAPHIES**

- [1] **OMEIRI . AMAR.**"Simulation d'un filtre actif parallèle de puissance pour la compensation des harmoniques de courant "Thèse Doctorat. Université Annaba 2007.
- [2] **A . BOUSSAID,** "Filtrage actif des harmoniques dans les réseaux électriques. Contribution à l'amélioration de l'énergie électrique", Thèse de doctorat troisième cycle LMD, Université Des Frères Mentouri-Constantine, 2017.
- [3] **D. OULD ABDESLAM,** « Techniques neuromimétiques pour la commande dans les systèmes électriques : application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basses tension»,Thèse de doctorat, université de Haute Alsace, décembre 2005.
- [4] **Mr. BENNAIDJA TAREK,** «Filtrage actif pour les réseaux déséquilibrés et distordus» Thèse Magister, Université Ferhat Abbas – Setife-1-,2014.
- [5] **YOUSFI ABDELKADER ,** "Amélioration de la qualité d'énergie électrique en utilisant un onduleur de tension à cinq niveaux " , Mémoire de Magister en Electrotechnique, Université Chlef ,2008.
- [6] **ZELLOUMA LAID,** "Filtrage actif parallèle des harmoniques du courant génères par un pont redresseur triphasé non commande" ,Thèse de Magister, Université BADJI Mokhtar Annaba, Algérie, 2006.
- [7] **AMAIA LOPEZ DE HEREDIA BERMEO,**"Commandes avancées des systèmes dédiés a l'amélioration de la qualité de l'énergie : de la basse tension a la montée en tension", Thèse Doctorat, l'institut national polytechnique de Grenoble avec le « label européen » le 14 novembre 2006
- [8] **ABDELMADJID CHAOUI ,** "Filtrage actif triphae pour charges non lineaires" ,thèse de doctorat, université de sétif, 2010.
- [9] **T. MAHNI,** "Etude et conception d'un filtre actif parallèle triphasé à quatre fils en vue de sa commande par des méthodes d'intelligence artificielle", Thèse de doctorat en sciences, Université Mohamed Khider-Biskra, 2017.
- [10] **H. Wafa Melle,** "Analyse harmonique dans un réseau électrique avec une production d'énergie éolienne", Mémoire de Magister, Université Setif 1, 2013.
- [11] **H. DOUAR,** "Evaluation du cout des pertes générées par les perturbations harmoniques dans les réseaux électriques", Mémoire de Magister, Université M'hamed Bougara-Boumerdes ,2006.
- [12] **I. GHADBANE,** "Etude et réalisation d'un filtre actif parallèle en utilisant différentes stratégies de contrôle", Thèse de doctorat en sciences, Université Mohamed Khider-Biskra, 2016.
- [13] **SCHNEIDER ELECTRIC –** Christophe PREVE, Robert JEANNOT, Guide de conception des réseaux électriques, février 1997, édition n° 6883-427/A .

- [14] **M. MAGRAOUI**, "Validation de techniques de commande d'un filtre actif parallèle, Mémoire présentée à l'école de technologie supérieure, Université du Québec, 2007.
- [15] **M. ANTOINE HANNA NOHRA**, "Commande de filtres actifs parallèles sur un réseau fortement perturbé", Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse)-France, 2017.
- [16] **Mohamad Alaa Eddin Alali** "Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension" Soutenue publiquement le 12 Septembre 2002 , Docteur de l'Université Louis Pasteur - Strasbourg I Discipline : Génie électrique
- [17] **S. Hafsia**, "Commande d'un filtre actif parallèle à quatre bras par des techniques avancées", Mémoire de Magister, Université Mohamed Khider -Biskra, 2015.
- [18] **I. GHADBANE**. < Commande d'un Filtre Actif Triphasée Parallèle Par Différents Régulateurs >. Mémoire de magistère, Université Mohamed Kheider-Biskra, 2011.
- [19] **H. GUENDOZ**, "Compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension", Mémoire de Magister, Université Badji Mokhtar-Annaba, 2008.
- [20] **D. NEKKAR**, "Contribution à l'étude des stratégies de commande des filtres actifs triphasés", Mémoire de Magister, Université Mohamed Chérif Messaadia-Souk-Ahras, 2014.
- [21] **M. BENGOURINA**, "Etude et mise au point d'un filtre actif parallèle d'harmoniques en vue d'améliorer la qualité de l'alimentation électrique", Mémoire de Magister, Université des Sciences et de Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 2012.
- [22] **F. HAMOUDI**, "Contribution aux stratégies de commande avancées d'un filtre actif shunt à quatre fils, Thèse de doctorat en sciences, Université EL-Hadj Lakder-Batna, 2012.
- [23] **I. BOUYAKOUB**, "Identification des courants harmoniques par la stratégie neuromimétiques: Applications au filtre actif parallèle", Thèse de doctorat en sciences, Université des Sciences et de Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 2017.
- [24] **A. BOUAFIA**, "Techniques de commande prédictive et floue pour les systèmes d'électronique de puissance: application aux redresseurs a *MLI*, Thèse de doctorat en sciences, Université Ferhat Abbas-Setife, 2010.
- [25] **S.H. SHAHALAMI**, "Filtrage hybride des perturbations harmoniques produites par des systèmes d'entraînement asynchrone à vitesse variable", Thèse de doctorat en sciences, Université Henri Poincaré, Nancy-I, 2001.
- [26] **K. DJAZIA**, "Etude des filtres actifs pour réseaux déséquilibrés et distordus", thèse de doctorat en sciences, université Ferhat Abbas – Setife 1, 2015.

[27] **A.BENABDELKADER** ," Filtrage actif serie étude et implémentation" ,thèse de doctorat en sciences, université des sciences et de technologie d'oran mohamed boudiaf, 2019.

[28] **BOURENNANE Ibrahim et BOUGUERRA Samir** «Filtrage actif parallèle des réseaux électrique avec compensation de l'énergie réactive » Mémoire d'ingénieur d'état en Électrotechnique. Juin 2007.M'SILA

[29] **F .GAOUAR et I. CHOUIDIRA et D. S. OULD** «Commande d'un filtre actif serie» Mémoire d'ingénieur d'état en Électrotechnique. M'SILA 2010.

[30] **L. ZELLOUMA**, "Contribution à l'étude du filtrage des harmoniques des réseaux de distribution à l'aide du filtre actif ", Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar-Annaba, 2010.

[31] **A. HAMADI**. < Contribution \_a l'Etude des Filtres Hybrides de Puissance Utilisés pour Améliorer la Qualité de l'Energie dans le Réseau Electrique de Distribution>. Thèse de doctorat, Ecole de Technologie Supérieure-Québec, Canada, 2010.

[32] **Mohamed FERHAT**, "Commande en Temps Réel D'un Filtre Actif de Puissance", Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas-Sétif,2012.

[33] **A. RABIE**, "Contribution à l'étude du filtre actif parallèle de puissance à trois niveaux", Mémoire de Magister, Université d'El-Oued, 2012.

[34] **DOUABHI NAER**, "Contribution à l'étude de la Qualité de L'énergie", Mémoire de Magister, Université El-Hadj Lakhder Batna,2016.

[35] **BACHAR Rahima**, " Commande Prédictive Appliquée au Filtre Actif ",Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider-Biskra,2019.

[36] **M<sup>elle</sup> KEBIRI Samia**, " Modélisation et simulation d'un filtre actif multi niveaux", Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri, TIZI-OUZOU,2009.

[37] **M. Saïd BARKAT et Mansour BOUZIDI**, "Commande par mode glissant d'un filtre actif parallèle à quatre bras", Mémoire d'ingénieur d'état en électrotechnique, Université M'SILA,2012.

[38] **SOUFIANE BEN ALI ET SADDAM BOUHANAK**, "Etude et simulation d'un filtre actif parallèle quatre fils", mémoire master académique, Université Echahid Hama Lakhder d'El-Oued,2015.

[39] **ALIA IMANE**, " Étude et réalisation d'un filtre actif parallèle de puissance commandé par *DSPACE1104*" , mémoire master académique, Université Echahid Hama Lakhder d'El-Oued,2019.