

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A.MIRA-BEJAIA



Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique
Spécialité: Electrotechnique



Mémoire de Fin de Cycle

En vue d'obtention d'un diplôme Master en Electrotechnique
Option:
Electrotechnique Industrielle.

Sous le thème

Commande D'un Filtre Actif à Quatre Fils

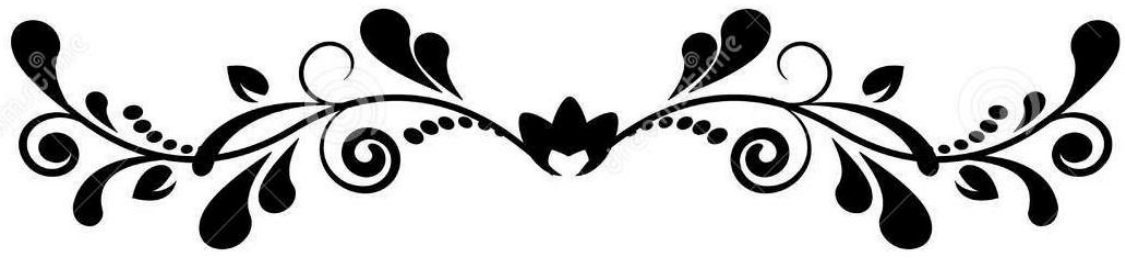
Réalisé par :

Mr MADANI Chabane.
M^{lle} BOUAITA Lila.

Présenté, devant le jury composé de

Mr IDJDARENE Kassa (Président).
Mr ALLOUI Loucif (Examineur).
Mr HAMOUDI Farid (Promoteur).
Mr AMIMEUR Hocine (Co-promoteur).

Année Universitaire : 2017/2018



Remerciements

Nous remercions **DIEU**, le tout-puissant de nous avoir donné la foi qui nous a guidée jusqu'à la réalisation et l'aboutissement de ce travail.

Nous tenons à remercier notre encadreur Mr **HAMOUDI Farid** pour son orientation, ses conseils, ses encouragements, son aide précieux, et le temps qu'il nous a accordé tout au long de notre travail, nous exprimons notre profond remerciement et respect.

Nos remerciements pour notre Co-promoteur Mr **AMIMEUR Hocine**.

Nous adressons nos plus sincères remerciements à Mr **IDJDARENE** et à Mr **ALOUI** d'avoir accordé de leur temps et d'avoir accepté de juger notre travail.

Nos remerciements pour Mr **ABDOUNE Kaddour**.

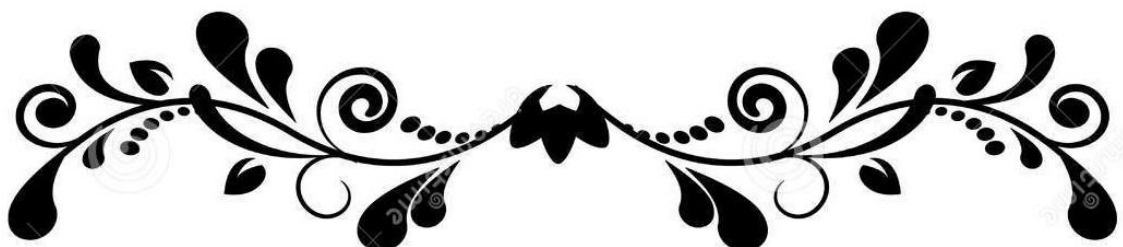
Nos remerciements les plus sincères vont à tous les professeurs du département d'**Electrotechnique** de l'université de **Béjaia** qui n'ont pas hésité un instant pour nous orienter, et d'être à notre disposition à tout moment pour la réussite et la réalisation de notre travail.

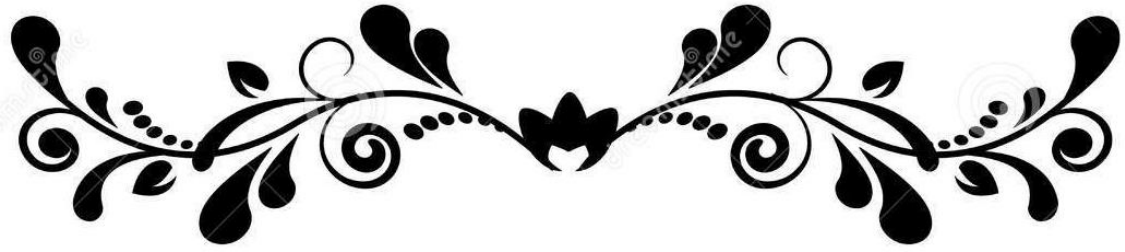
Nos chers **parents**, pour leurs patiences et leurs sacrifices pour voir ce jour. Ils ont tout donné pour notre réussite.

Nos fidèles **amis(es)**, tous nos remerciements pour vous, pour avoir participé soit de près soit de loin à la réalisation de ce travail.

Mr. MADANI Chabane

Mlle. BOUAITA Lila





Puisse Dieu faire en sorte que ce travail porte son fruit, Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent.

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

Mes parents :

MON Père **LAYACHI** qui a œuvré pour ma réussite, par son soutien, tous les sacrifices et ses précieux conseils, pour toute sa présence dans ma vie, reçois l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude.

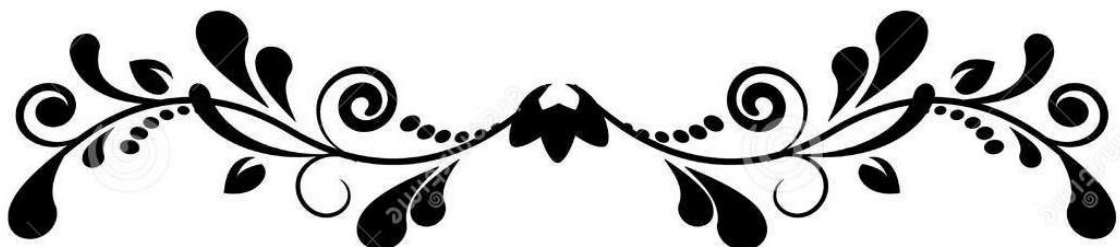
Ma cher Mère **Aicha**, qui peut être fière de trouver ici le résultat de longues années de sacrifices.

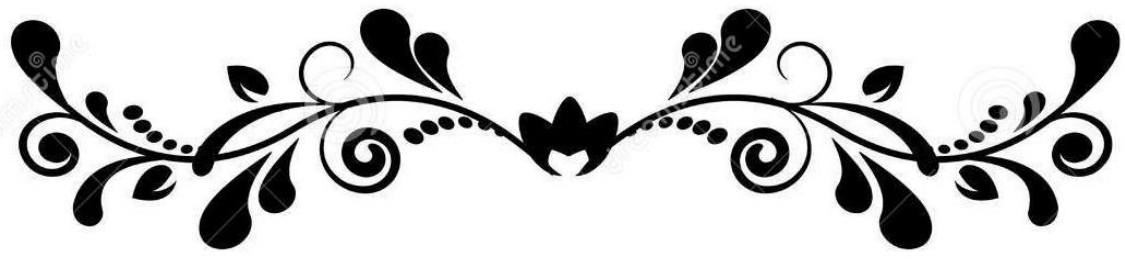
Ma grande famille MADANI du petit au grand, mes frères et principalement **Salim** qui a toujours insisté pour ma réussite.

MA Collègue **Lila** qui a été depuis toujours spéciale dans mon œil par rapport aux autres collègues et que j'ai jamais eu l'occasion de la remercier durant notre recherche.

Ma commune **SOUK EL TENINE** spécialement mon **village 8 mai 45 (VARA)**, toute la famille d'électrotechnique de l'université de Bejaïa.

CHABANE





Dédicaces

Je dédie ce travail à :

Mes parents :

Ma mère **Dahbia**, qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude.

Mon père **Hadi**, qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie. Puisse Dieu faire en sorte que ce travail porte son fruit ;

Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de toi.

Ma grande famille BOUAITA du petit au grand, ma grand-mère, mon grand-père, mes deux frères **Amine** et **Djamel** et mes sœurs **Saida**, Celia (**Sinouh**), Lynda (**Branda**), Siham (**Chouchou**), **Sylia** et **Zineb** qui n'ont cessé d'être pour moi des exemples de persévérance, de courage et de générosité.

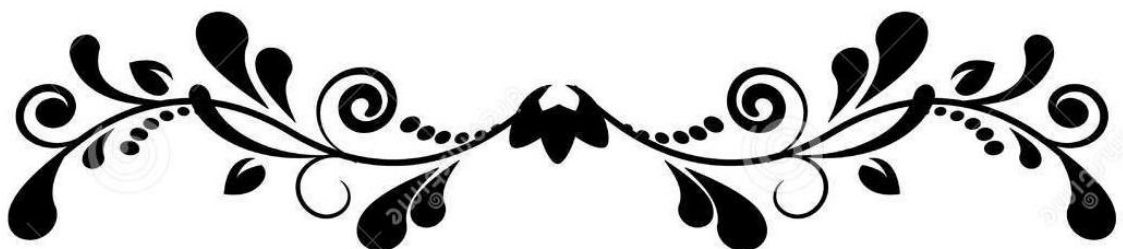
Mon bras droit **Bilal** qui n'a jamais cessé un moment de me donner de l'aide, encouragements et surtout des conseils très précieux tout au long de la réalisation de ce travail.

Mon Collège **Chabane** qui a été trop patient avec moi durant toute cette période.

Mes amis(es), mes collègues, chacun avec son propre nom, toute la famille d'électrotechnique de l'université de Béjaïa que sans eux ce travail ne sera pas réalisé.

Mes professeurs, qui doivent voir dans ce travail la fierté d'un savoir bien acquis.

Lila qui vous aimez énormément.



Symboles

h	Rang de l'harmonique.
F_{dis}	Facteur de distorsion.
$\cos \theta$	Déphasage.
θ	Déphasage entre le courant fondamental et la tension.
S	puissance apparente.
P	Puissance active.
Q	Puissance réactive.
D	Puissance déformante.
F_p	Facteur de puissance.
I_c	Valeur efficace du courant de la charge.
i_s	Courant de la source.
i_{ch}	Courant absorbé par la charge.
V_{inj}	Tension injecté par le FAS.
V_{dc}	Tension du bus continu.
V_{dc}^*	Tension de référence du bus continu.
C_{dc}	Condensateur de stockage.
T	Interrupteur.
L_c	Filtre de raccordement.
L_f	Inductance du filtre de sortie.
r_f	Résistance du filtre de sortie.
C_f	Capacité du filtre de sortie.
L_s	Inductance de la ligne.
R_s	Résistance de la ligne.
ε	Facteur d'amortissement.
ω_h	Pulsation de l'harmonique de rang h .
I_h	Harmonique de rang h .
i_{abc}^{ref}	Les courants de références.
i_f	Les courants injectés par le filtre.
$C_{\alpha\beta 0}$	Matrice de Concordia.
$C_{\alpha\beta 0}^{-1}$	Matrice inverse de Concordia.
v_α, v_β	Tensions dans le repère (α, β) .
i_α, i_β	Courants dans le repère (α, β) .
p, q et p_0	Puissance réelle, imaginaire et homopolaire.
\bar{p}, \bar{q} et \bar{p}_0	Puissances continues.
\tilde{p}, \tilde{q} et \tilde{p}_0	Puissances alternatives.
v_{md}	Amplitude de la tension direct.
θ_d	Phase instantanée de la tension directe fondamentale.
$\hat{\theta}_d$	Angle de rotation instantané.
$\hat{\omega}_d$	Pulsation estimée par le correcteur PI.
v_d	Angle de phase de la tension.
P_{loss}	Puissance de compensation des pertes dans le filtre actif.
v_d et v_q	Projections des tensions instantanées sur les axes tournants d et q .
$\varepsilon_a, \varepsilon_b$ et ε_c	Signaux d'erreurs.
m	Indice de modulation.
r	Taux de modulation.

f_p	Signal de modulation triangulaire.
f_r	Signal de référence sinusoïdale.
K_i	Coefficient d'action intégral.
K_p	Coefficient d'action proportionnel.

Abréviations

AC	Courant alternatif.
DC	Courant continu.
THD	Taux de Distorsion Harmonique.
FAP	Filtre Actif Parallèle.
FAS	Filtre Actif Série.
UPQC	Conditionneur universel de la qualité d'onde.
CEI	Commission Electrotechnique Internationale.
IGBT	Transistor bipolaire à grille isolée.
FPB	Filtre passe bas.
PLL	Boucle à verrouillage de phase.
PI	Correcteur Proportionnel Intégral.
MLI	Modulation de la largeur d'impulsion.

Remerciements

Dédicaces

Symboles

Abréviations

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale..... 1

Chapitre I: Les perturbations et la dépollution harmoniques des réseaux

Introduction 2

1.1 Qualité d'énergie 2

1.2 Les perturbations électriques 2

a. Creux de tension 2

b. Fluctuation de l'amplitude de la tension 3

c. Déséquilibre du système triphasé de tension 3

d. Fluctuation de fréquence 4

e. Harmoniques 4

1.3 Distorsions harmoniques 7

1.3.1 Taux de distorsion harmonique 8

1.3.2 Facteur de puissance 8

1.4 Normes 9

1.5 Les différents types de charges 10

a. Charge non linéaire 10

b. Charge linéaire 10

1.6 Solutions de dépollution harmoniques 11

1.6.1 Solutions préventives 11

a. Convertisseurs multi niveaux 11

b. Transformateur 12

1.6.2 Solutions corrective 13

1.6.2.1 Filtrage passif 13

a. Filtre passif résonant.....	13
b. Filtre passif amorti.....	14
1.6.2.2 Filtrage actif.....	14
a. Filtre actif parallèle (FAP).....	15
b. Filtre actif série (FAS).....	15
c. Filtre mix (Série-parallèle).....	15
1.6.2.3 Filtrage hybride.....	16
1.7 Filtre actif triphasé à quatre fils.....	17
Conclusion.....	18

Chapitre II: Etude et modélisation du filtre actif quatre fils à quatre bras

Introduction	19
2.1 Principe général du filtrage actif des harmonique.....	19
2.2 Description du système à étudier	20
2.2.1 Structure générale d'un filtre actif à quatre fils	20
2.2.1.1 Etude de la partie puissance	21
a. Système de stockage capacitif.....	21
b. Filtre de raccordement au réseau (filtre de sortie).....	22
c. Filtre actif à quatre bras	23
2.3 Modélisation du système à étudier	24
2.3.1 Modélisation du filtre actif à quatre fils	24
a. Modélisation de l'onduleur de tension	24
b. Modélisation de l'onduleur de tension commandé en courant	27
2.3.2 Modélisation du réseau électrique	27
2.3.3 Modélisation de la charge polluante.....	28
2.4 Introduction au contrôle du filtre actif	29
Conclusion.....	30

Chapitre III: Contrôle et commande du filtre actif

Introduction	31
3.1 Identification des perturbations harmoniques	31
3.2 Théorie des puissances	31
3.2.1 Principe de la théorie $PQ0$	31
3.2.2 Application au filtrage actif dans un système à quatre fils.....	34
3.3 Identification de la séquence directe de la tension	37
3.3.1 Boucle à verrouillage de phase PLL.....	37
3.4 Stratégies de contrôle des courants	38
3.4.1 Principe de contrôle des courants	38
3.4.1.1 Stratégie de commande de l'onduleur du filtre actif	38
a. La commande par Hystérésis.....	38
b. La commande par Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI)	40
3.5 Régulation de la tension de bus continu de l'onduleur	41
3.6 Simulation et interprétation	43
3.6.1 Simulation avant filtrage à charge équilibrée	44
a. Courant dans la source	44
3.6.2 Simulation après filtrage à charge équilibrée.....	46
a. Courants de référence	46
b. Courant de référence et courant réel	47
c. Tension V_{dc} du bus continu	47
d. Courant de source après filtrage à charge équilibré	48
3.6.3 Simulation avant filtrage à charge déséquilibré.....	50
a. Le courant dans le neutre avant compensation à charge déséquilibré.....	50
b. Courant de source avant filtrage à charge déséquilibré.....	51
3.6.4. Simulation après filtrage à charge déséquilibré	53
a. Courant de source après filtrage	53
b. Le courant dans le neutre après compensation	54
Conclusion	54
Conclusion générale	55

Liste des figures

Chapitre I

Figure 1.1	Les perturbations les plus répondues sur l'onde électrique.....	7
Figure 1.2	Distorsions harmoniques.....	7
Figure 1.3	Charge linéaire.....	10
Figure 1.4	Charge non linéaires.....	10
Figure 1.5	Schéma électrique de l'onduleur triphasé à neutre clampé.....	11
Figure 1.6	Transformateur Triangle étoile.....	12
Figure 1.7	Transformateur à secondaire zigzag.....	13
Figure 1.8	Filtre passif.....	14
Figure 1.9	Les configurations possibles du filtre actif par rapport au réseau.....	16
Figure 1.10	Filtre actif parallèle avec des filtres passifs parallèles.....	17
Figure 1.11	Structure d'un filtre actif triphasé à quatre fils.....	18

Chapitre II

Figure 2.1	Schéma de principe du filtrage actif.....	19
Figure 2.2	Structure générale du filtre actif parallèle triphasé à quatre fils.....	20
Figure 2.3	Onduleur de tension avec filtre de raccordement au réseau L et LCL.....	23
Figure 2.4	Les seize configurations possible de l'onduleur à quatre bras.....	26
Figure 2.5	Onduleur de tension triphasé raccordé au réseau avec un filtre L.....	27
Figure 2.6	Schéma électrique d'un réseau triphasé.....	27
Figure 2.7	Modèle de la charge non linéaire équilibrée.....	28
Figure 2.8	Modèle de la charge non linéaire déséquilibrée.....	28
Figure 2.9	Contrôle du filtre actif.....	30

Chapitre III

Figure 3.1	Représentation graphique de la transformation des coordonnées « abc » à « $\alpha\beta 0$ ».....	32
Figure 3.2	Ecoulement des puissance dans un système à quatre fils après compensation des puissances indésirables (cas idéal).....	35
Figure 3.3	Filtre passe bas (FPB).....	35
Figure 3.4	Schéma bloc de l'algorithme de contrôle d'un filtre actif à quatre fils à base de la théorie des puissances instantanées $pq0$	36
Figure 3.5	Algorithme d'identification de la séquence directe de la tension.....	38
Figure 3.6	Principe de la commande par hystérésis.....	39
Figure 3.7	Commande par hystérésis.....	40
Figure 3.8	Principe de la commande par MLI.....	40
Figure 3.9	Commande Par Modulation de Largeur d'Impulsion MLI.....	41
Figure 3.10	Boucle de régulation du bus continu.....	42
Figure 3.11	Le schéma Simulink/SimPowerSystem de l'ensemble réseau électrique, charge non linéaire équilibré.....	43
Figure 3.12	La forme d'onde des courants de charge avant filtrage.....	44
Figure 3.13	Analyse spectrale de courant de charge pour les phases a, b et c.....	45
Figure 3.14	Courants de références qu'on souhaite injecté dans le réseau.....	46
Figure 3.15	Courant de référence et le courant réel.....	47
Figure 3.16	Tension V_{dc} du bus continu.....	47
Figure 3.17	Courant de source après filtrage en régime permanent.....	48
Figure 3.18	Analyse spectrale de courant de charge pour les phases a, b et c.....	49
Figure 3.19	Le schéma Simulink/SimPowerSystem de l'ensemble réseau électrique, charge non linéaire déséquilibré.....	50
Figure 3.20	Le courant dans le neutre avant compensation.....	50

Figure 3.21	Courant de source avant filtrage.....	51
Figure 3.22	Analyse spectrale de courant de charge pour les phases déséquilibrée (a,b et c).....	52
Figure 3.23	Courant de source après filtrage.....	53
Figure 3.24	Analyse spectrale de courant de charge pour les phases a, b et c.....	53
Figure 3.25	Le courant dans le neutre après compensation.....	54

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau 1.1 Niveaux de compatibilité pour les tensions harmoniques individuelles sur les réseaux publics basse tension (norme CEI 61000-2-2).....9

Tableau 1.2 Limite des composantes harmoniques en courant (norme CEI61000-3-2).....10

Chapitre II

Tableau 2.1 Tensions générées par l'onduleur de tension à quatre bras.....25

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Ces dernières années, une forte augmentation des charges non linéaires connectées au réseau électrique on était enregistrées tel que les ordinateurs, les télécopieurs, les lampes à décharge, les fours à arc, les chargeurs de batterie et les onduleurs. L'utilisation croissante de ces charges non linéaires, a des conséquences sur le système d'alimentation électrique, elles font appelés à un courant important, déformé, non sinusoïdale du réseau de distribution. Les courants harmoniques ont des effets négatifs sur la quasi-totalité des composantes du système électrique, en créant de nouvelles contraintes diélectriques, thermiques et/ou mécaniques.

Pour éviter le dysfonctionnement et la destruction de ses composantes, il faut bien comprendre l'origine des perturbations et de trouver les solutions adéquates pour les éliminer. Plusieurs solutions ont été proposées pour pallier les problèmes liés aux perturbations harmoniques, telles que le filtre passif et des le filtre actif. Les filtres actifs parallèles sont à ce jour les solutions avancées de dépollution les plus adéquats tant au niveau de la production que de la distribution. Leur réponse est instantanée et ils s'adaptent automatiquement aux évolutions des perturbations introduites par les charges du réseau électrique.

Ce mémoire est constitué d'une introduction générale, trois chapitres, une conclusion générale et bibliographie. Le premier chapitre de ce mémoire présente les différents types des perturbations harmoniques qui affectent la qualité de l'énergie électrique, leur origine et leurs effets. Nous allons également parler sur les solutions de dépollutions. Dans le deuxième chapitre, on présente les différents éléments constituent la partie puissance du filtre actif parallèle. Une modélisation de ce dernier sera présenter. Le dernier chapitre est affecté pour l'identification des courants harmoniques en utilisant la méthode des puissances instantanées, nous allons aussi présenter les stratégies de commande de l'onduleur. Ainsi que les résultats de simulations. Enfin, nous terminerons notre projet par une conclusion générale[1][2].

CHAPITRE I

Introduction

Une onde de courant parfaitement sinusoïdale, avec une amplitude et une fréquence constante, caractérise la bonne qualité d'énergie fournie par le réseau électrique.

La connexion des convertisseurs statiques affecte la qualité des courants et tensions des réseaux de distribution qui deviennent non sinusoïdaux.

L'étude dans ce chapitre est divisée en deux parties principales, la première partie est conçue pour l'étude des différentes perturbations harmoniques qui affectes la qualité de l'onde électrique, ainsi que leurs origines et leurs effets, notamment les harmoniques pour les qu'elles on s'intéressera particulièrement.

Des différentes solutions de dépollution ont été exposées dans la deuxième partie, en particulier le filtrage actif qui est le principal sujet de toute notre étude [1].

1.1 Qualité d'énergie

Les tensions d'un réseau électrique constituent un système alternatif triphasé, dont la fréquence de base est de 50 Hz ou de 60 Hz. Ce système est caractérisé par les paramètres suivants :

- La fréquence,
- L'amplitude des trois tensions,
- la forme d'onde qui doit être la plus proche possible d'une sinusoïde,
- La symétrie du système triphasé, caractérisée par l'égalité des modules des trois tensions et de leur déphasage relatif.

La qualité de la tension peut être affectée soit par les 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 quatre paramètres précédemment définis[3].

1.2. Les perturbations électriques

Les perturbations électriques affectant l'un des quatre paramètres cités précédemment peuvent se manifester par : un creux ou une coupure de tension, une fluctuation de tension, un déséquilibre du système triphasé de tension, une variation de la fréquence, la présence d'harmoniques et/ou d'inter harmoniques[1].

a. Creux de tension

On appelle creux de tension (*voltage sag*), une diminution brutale de l'amplitude de la tension à une valeur située entre 1 et 90% de sa valeur nominale. Lorsque la tension est absente (baisse de tension de 100 %) pendant 1 seconde à 1 minute on parle de « coupure

brève », et entre 10 ms et 1 s de « coupure très brève ». Une coupure brève n'est qu'un cas particulier du creux de tension, sa profondeur est supérieure à 90%, (la figure 1.1 (a)) [4][5].

- **Origines**

Les causes de ces perturbations sont dues à l'exploitation des réseaux, comme la mise sous tension des gros transformateurs, les courts-circuits, simple démarrage des gros moteurs[4].

- **Effets**

Les creux de tension ont comme effets, la perturbation des couples dans les machines tournantes, déclenchement des contacteurs, pannes intempestives. . .etc.[4].

b. Fluctuation de l'amplitude de la tension

Les fluctuations de l'amplitude de la tension sont des variations rapides de tension, répétitives ou aléatoires, (voir la figure 1.1(b))[6].

- **Origines**

Sont causées principalement par les variations rapides de puissance absorbée ou produite par des installations telles que les soudeuses, fours à arc, éoliennes, etc. [6].

- **Effets**

Ces fluctuations de tension peuvent provoquer un papillotement de l'éclairage (*flicker*), gênant pour la clientèle, même si les variations individuelles ne dépassent pas quelques dixièmes de pourcent [6].

c. Déséquilibre du système triphasé de tension

Lorsque les trois tensions ne sont pas identiques en amplitude et/ou ne sont pas décalées d'un angle de 120° les unes par rapport aux autres, on parlera de déséquilibre du système triphasé, (voir la figure 1.1 (c))[1].

- **Origines**

Un réseau électrique triphasé déséquilibré 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, et aussi par des courts-circuits monophasés ou biphasés[1].

- **Effets**

Les principaux effets de ce type de perturbation sont les échauffements des machines

tournantes à cause des couples inverses[4].

d. Fluctuation de fréquence

Les fluctuations de fréquences sont caractérisées par des variations de la valeur nominale de la fréquence fondamentale du réseau (50 ou 60 Hz) dans des intervalles du temps bref [4].

Dans des conditions normales d'exploitation, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle $50 \text{ Hz} \pm 1\%$, (voir la figure 1.1 (d)) [1].

- **Origines**

Elles sont rares et ne sont observées que lors de circonstances exceptionnelles, par exemple certains défauts graves du réseau, au niveau de la production ou du transport, comme elles résultent des variations de vitesses des alternateurs dans les centrales de production, lors de démarrages ou de l'arrêt d'une charge importante. Elle peut apparaître aussi dans les réseaux électriques lors d'un déséquilibre entre la puissance demandée par la charge et celle fourni par le réseau électrique[4] [7].

- **Effets**

La variation de la vitesse des machines tournantes peut aller des échauffements ou même l'arrêt de ces dernières jusqu'à la destruction totale de ces équipements [7].

e. Harmoniques

Une charge non linéaire appelle du réseau électrique un courant déformé, lequel va modifier l'allure de la tension sinusoïdale. Elles génèrent des courants harmoniques qui circulent à partir de la charge vers l'alimentation en empruntant le chemin de la moindre impédance. *Les courants harmoniques* sont des ondes sinusoïdales dont la fréquence est un multiple entier de la fréquence fondamentale(celle du réseau, 50 ou 60Hz). La superposition des courants harmoniques sur le courant fondamental provoque les formes d'onde non sinusoïdales associées aux charges non linéaires, (voir la figure 1.1 (e)).

Les harmoniques se distinguent par leurs rangs, du type pair ou impair :

- ✓ Les harmoniques de rang pair (2, 4, 6, 8...), très souvent négligeables en milieu industriel, s'annulent en raison de la symétrie du signal. Ils n'existent qu'en présence d'une composante continue.
- ✓ Par contre, les harmoniques de rang impair (3, 5, 7, 9...) sont fréquemment rencontrés sur le réseau électrique.
- ✓ Les harmoniques supérieurs au rang 25 sont dans une majorité des cas négligeables.

Les interharmoniques sont des ondes également sinusoïdales, mais de fréquences non multiples entier de la fréquence fondamentale. Ils sont aussi responsables de distorsions

harmoniques, et leurs apparitions sont aujourd'hui en augmentation[2][4].

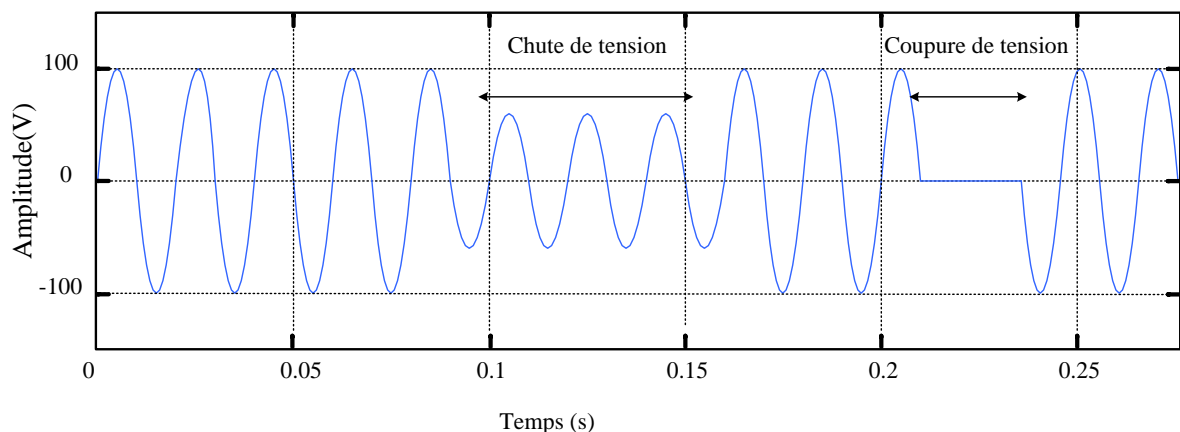
- **Origines**

L'augmentation sensible du niveau de la pollution harmonique des réseaux électriques est une conséquence de la prolifération des convertisseurs statiques. En effet, ces convertisseurs sont considérés comme des charges non linéaires émettant des courants harmoniques. Le passage de ces courants harmoniques dans les impédances du réseau électrique peut entraîner des tensions harmoniques aux points de raccordement et alors polluer les consommateurs alimentés par le même réseau électrique. Les principales sources des interharmoniques sont les convertisseurs statiques de fréquence, les fours à induction, les fours à arc...etc. [8].

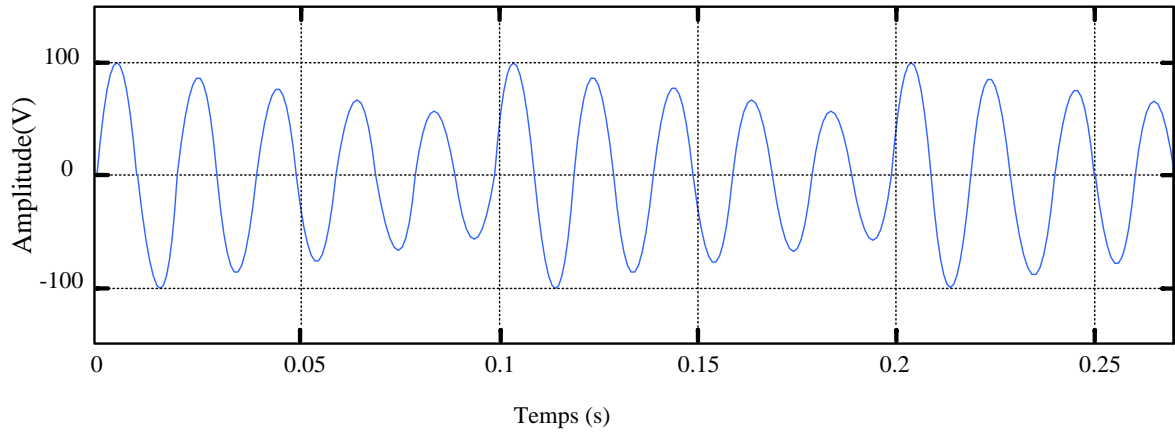
- **Effets**

La présence des harmoniques perturbe les autres charges, même linéaires, connectées aux bornes de la même source de tension. En effet, ces charges risquent de ne plus être alimentées dans des conditions satisfaisant aux références de tension exigées.

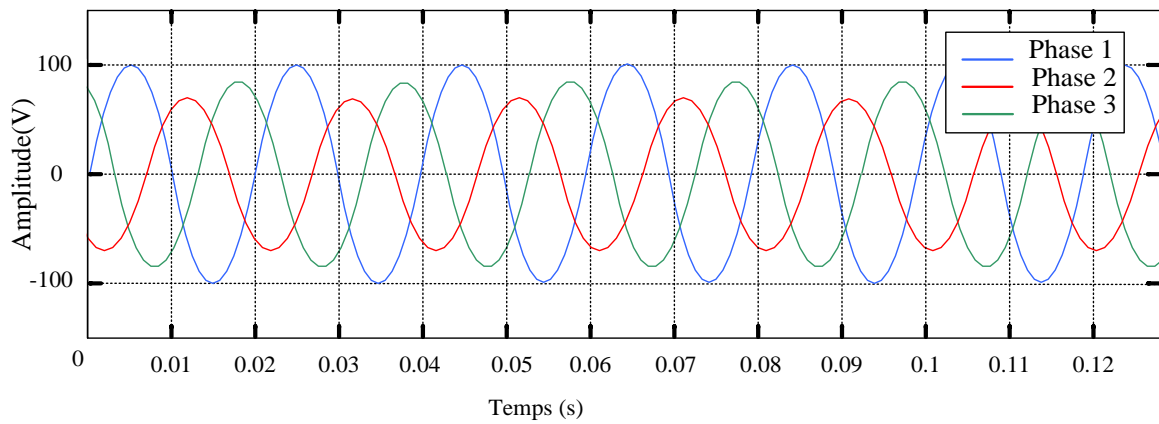
- ✓ Echauffement du câble de neutre : les courants de fréquence harmonique de rang trois et multiples de trois se somment dans le conducteur de neutre ; le courant de neutre valant fréquemment 120 à 130 % des courants de phase,
- ✓ Disjonctions principales intempestives, dues aux surintensités,
- ✓ Disjonctions différentielles intempestives dues aux fréquences des harmoniques, associées aux capacités parasites du réseau,
- ✓ Valeurs des courants efficaces plus élevées que celles nécessaires pour les besoins énergétiques de la charge,
- ✓ Suréchauffement des installations (transformateur, câbles...) par effet pelliculaire,
- ✓ Résonance en tension sur un système composé de condensateurs destinés à relever le facteur de déplacement[4].



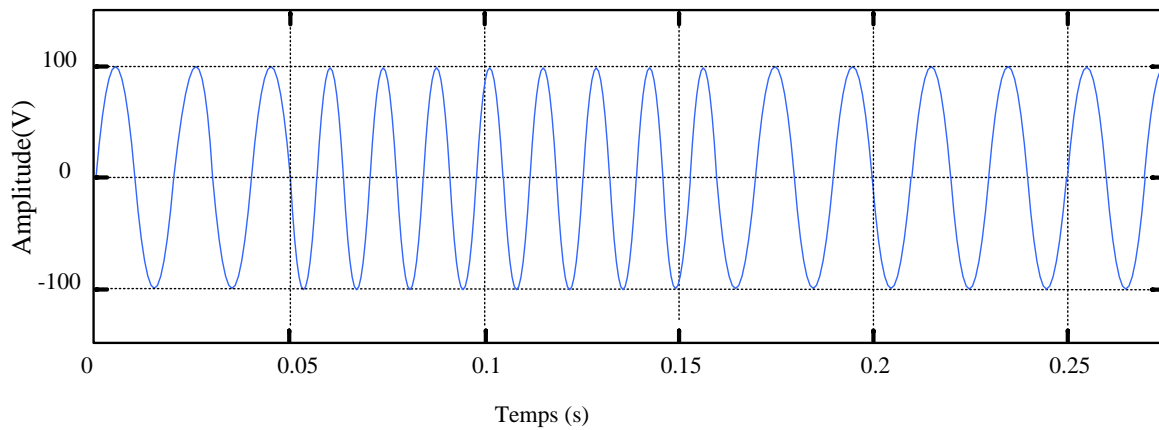
(a) Creux et coupure de tension.



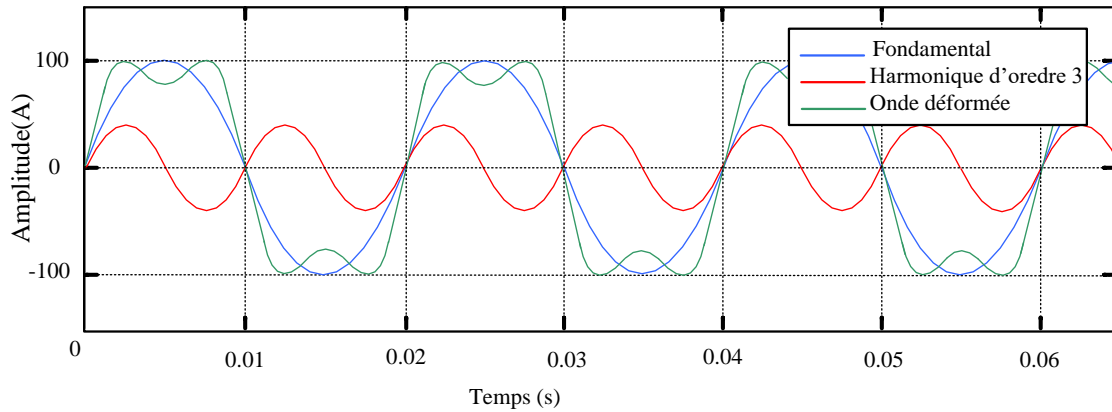
(b) Fluctuation de l'amplitude de la tension.



(c) Déséquilibre du système triphasé de tension.



(d) Variation de fréquence.



(e) Onde déformée.

Figure 1.1. Les perturbations les plus répandues sur l'onde électrique.

1.3 Distorsions harmoniques

On appelle distorsion harmonique toute déviation en régime permanent, de la forme sinusoïdale idéale de l'onde tension ou de courant (figure 1.2)[4].

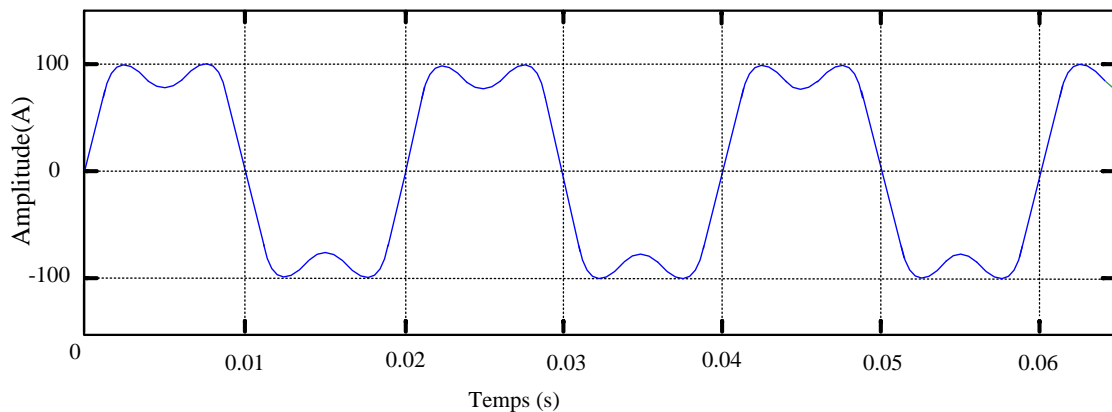


Figure 1.2. Distorsions harmoniques.

- **Origines**

Bien qu'elles ne soient pas la seule raison, les charges non linéaires sont la principale source de pollution harmonique.

Les systèmes à base d'électronique de puissance qui en est la cause principale. Ces systèmes sont à base de convertisseurs (AC-DC, DC-AC, etc.), qui utilisent des semi-conducteurs non contrôlables (diodes) ou contrôlables (thyristors, transistors)[4].

- **Effets**

Bien que la susceptibilité des différents appareils soit diversifiée à l'égard des harmoniques, on distingue essentiellement ces effets :

- ✓ Présence des vibrations et des bruits dans les appareils électromagnétiques,
- ✓ Présence du bruit dans les réseaux de télécommunication,
- ✓ Echauffement des câbles et des équipements,
- ✓ Echauffement des condensateurs,
- ✓ Echauffements dus aux pertes supplémentaires des machines et des transformateurs [4].

1.3.1 Taux de distorsion harmonique

Une distorsion harmonique est souvent caractérisée par le taux de distorsion harmonique total THD, (*Total Harmonic Distorsion*), défini comme suit [4] :

$$THD(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} (X_h)^2}}{X_1} \times 100\% \quad (1.1)$$

Où,

X_h : composante harmonique de rang h ;

X_1 : composante fondamentale.

Le taux de distorsion est un paramètre qui définit globalement la déformation de la grandeur alternative [8].

1.3.2 Facteur de puissance

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

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (1.2)$$

La puissance réactive Q est associée a courant fondamental. La puissance déformante D est due aux harmoniques de courant (avec $D = \sqrt{I_c^2 - I_{c1}^2}$, où I_c est la valeur efficace du courant de la charge).

Le facteur de puissance F_p est égal au rapport de la puissance active P par la puissance apparente S :

$$F_p = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad (1.3)$$

Le facteur de puissance sera toujours inférieur à 1. En posant :

$$P = 3VI_{c1} \cos \theta \quad (1.4)$$

On aura

$$F_p = \frac{I_{c1}}{I} \cos \theta = F_{dis} \cos \theta \quad (1.5)$$

Où

F_{dis} : Le facteur de distorsion, égal à 1 lorsque le courant est parfaitement.

θ : Le déphasage entre le courant fondamental et la tension [1][9].

1.4 Normes

Les normes ont pour but de limiter les distorsions harmoniques et de réduire leurs effets. La Commission Electrotechnique Internationale (CEI) définit le niveau des courants et des tensions harmoniques à ne pas dépasser par une série de normes de compatibilité électromagnétique (CEI 61000). Ci-après, les deux normes CEI les plus importantes concernant les distorsions harmoniques [1][4]:

La norme CEI 61000-2-2 : établie les niveaux de compatibilité de tensions harmoniques sur les réseaux publics basse tension. Elle est représentée sur le tableau 1.1. Cette norme vise à protéger les équipements raccordés sur un réseau basse tension déformé et elle limite à 8% le THD jusqu'au 40ème rang.

La norme CEI 61000-3-2 : représentée sur le tableau 1.2, elle fixe la limitation des courants injectés dans le réseau public pour des équipements dont le courant par phase est inférieur à 16 A. Il s'agit là des appareils du domaine domestique.

Harmoniques impaires				Harmoniques paires	
Multiple de 3		Non multiple de 3		Rang h	Taux max admissible (%)
Rang h	Taux max admissible (%)	Rang h	Taux max admissible (%)		
3	5	5	6	2	2
9	1.5	7	5	4	1
15	0.3	11	3.5	6	0.5
21	0.2	13	3	8	0.5
> 21	0.2	17	2	10	0.5
		19	1.5	12	0.2
		23	1.5	> 12	0.2
		25	1.5		
		≥ 25	$0.2+1.3 \times 25/h$		

Tableau 1.1. Niveaux de compatibilité pour les tensions harmoniques individuelles sur les réseaux publics basse tension (norme CEI 61000-2-2).

Harmoniques impaires		Harmoniques paires	
Rang h	Courant max admissible (A)	Rang h	Courant max admissible (A)
3	2.30	2	1.08
5	1.14	4	0.43
7	0.77	6	0.3
9	0.40	$8 \leq h \leq 40$	$0.23 \times 8/h$
11	0.33		
13	0.21		
$15 \leq h \leq 39$	$0.15 \times 15/h$		

Tableau1.2. Limite des composantes harmoniques en courant (norme CEI 61000-3-2).

1.5 Les différents types de charges

a. Charge linéaire

Une charge est dite linéaire, si elle absorbe un courant sinusoïdal pour une tension d'alimentation sinusoïdale (voir la figure 1.3) [10].

b. Charge non linéaire

Une charge est dite non linéaire, si elle impose un courant qui n'est pas proportionnel à la tension sinusoïdale (voir la figure 1.4). Ce courant peut être décomposé en une composante fondamentale et des harmoniques

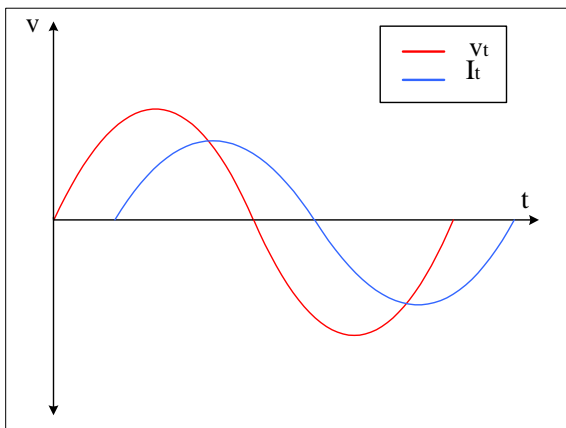


Figure 1.3. Charge linéaire.

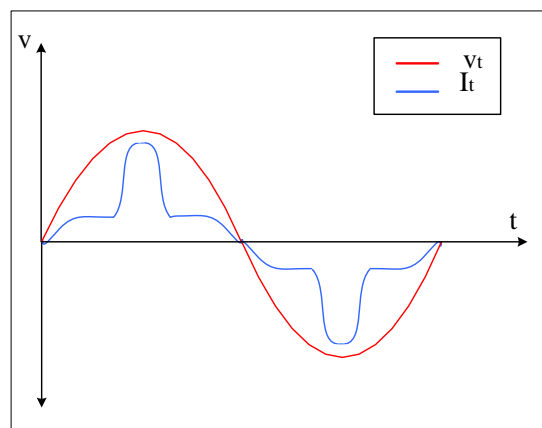


Figure 1.4. Charge non linéaire.

1.6 Solutions de dépollution harmoniques

L'amélioration de la qualité de l'énergie, et en particulier la dépollution harmonique a pour but de minimiser leurs impacts sur les charges et les équipements du réseau.

On distingue deux types de solutions de dépollution de ces harmoniques, les solutions préventives et les solutions correctives.

1.6.1 Solutions préventives

Plusieurs méthodes sont utilisées afin de réduire et éliminer les courants et les tensions harmoniques dans les réseaux de distribution :

a. Convertisseurs multi niveaux

Un onduleur multi niveaux comprenant n condensateurs et deux bras de commutation utilisera $2 * n$ transistors et aura $(n + 1)$ niveaux (voir la figure 1.5).

Le diviseur capacitif est alimenté par une tension continue constante, en utilisant un redresseur à source de courant et tension régulée. Les deux cellules de commutation ont $(n + 1)$ configurations ; pour chacune, n transistors sont bloqués et donc n signaux de commande sont égaux à 1, les autres sont nuls[11].

L'avantage principale d'un onduleur multi niveaux est la réduction des contraintes en tension sur les interrupteurs de puissance.

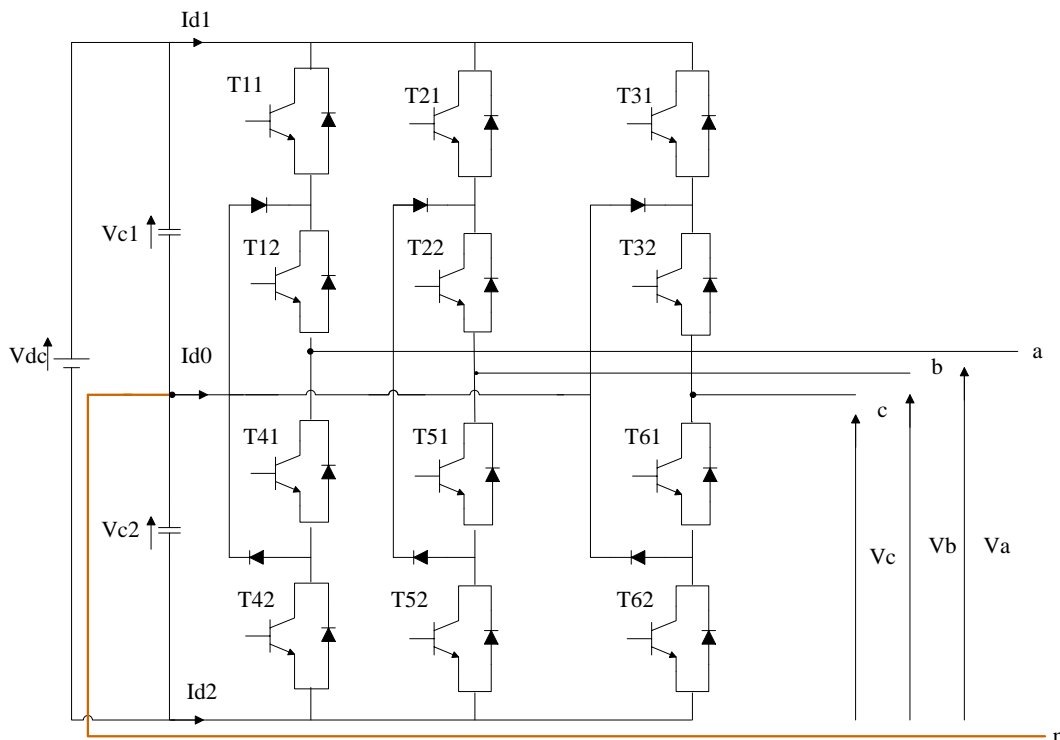


Figure 1.5. Schéma électrique de l'onduleur triphasé à neutre clampé.

b. Transformateur

L'utilisation d'un transformateur dont le primaire est couplé en étoile et le secondaire en zigzag (couplage Y_{zn}) permet d'éliminer au primaire les courants de pulsation du troisième harmonique. Il en va de même pour un transformateur couplé en triangle au primaire et en étoile au secondaire (couplage D_{yn}) puisque les harmoniques de rang trois étant en phase, ils ne peuvent pas circuler sur le réseau en amont du transformateur [12].

✓ Transformateur triangle étoile

L'utilisation d'un transformateur triangle-étoile a pour effet d'éliminer les courants du 5^{ème} et du 7^{ème} harmonique produits par la charge non linéaire.

En chaque nœud du triangle du primaire, les courants harmoniques de rang 3 se compensent, et le courant dans la ligne ne contient donc pas d'harmonique de rang 3.

Les courants harmoniques de rang 3 ne sont donc pas transmis au réseau. Par contre, ces courants circulent dans les enroulements primaires du transformateur et provoquent un échauffement supplémentaire, (voir la figure 1.6) [13].

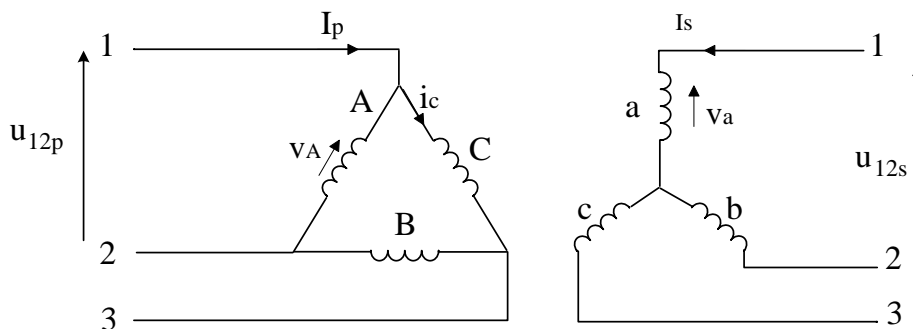


Figure 1.6. Transformateur Triangle étoile.

✓ Transformateur à secondaire zigzag

On voit aisément sur cette figure que les ampères-tours sur une même colonne au secondaire s'annulent. Il en résulte qu'aucun courant harmonique de rang 3 ne circule au primaire, (voir la figure 1.7) [13].

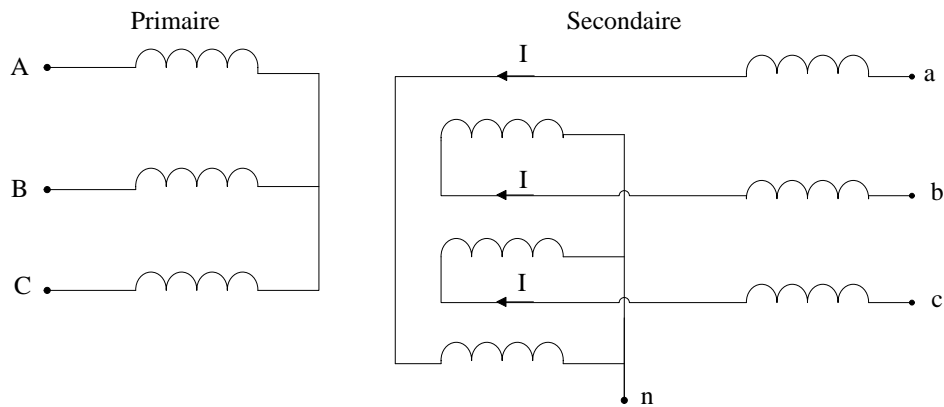


Figure1.7. Transformateur à secondaire zigzag.

1.6.2 Solutions correctives

1.6.2.1 Filtrage passif

Il s'agit d'utiliser un condensateur en série avec une inductance de façon à obtenir l'accord sur un harmonique de fréquence donnée. Cet ensemble placé en dérivation sur l'installation présente une impédance très faible pour sa fréquence d'accord, et se comporte comme un court-circuit pour l'harmonique considéré.

Il est possible d'utiliser simultanément plusieurs ensembles accordés sur des fréquences différentes afin d'éliminer plusieurs rangs d'harmoniques. Les filtres passifs contribuent à la compensation d'énergie réactive de l'installation[14]. Comme tout dispositif, le filtre passif présente quelques inconvénients :

- ✓ Une connaissance approfondie de la configuration du réseau électrique est nécessaire,
- ✓ Les variations de l'impédance du réseau peuvent détériorer les performances du filtre,
- ✓ Le réseau peut former un système résonnant avec le filtre et les fréquences [1].

a. Filtre passif résonant

Un filtre résonant est constitué d'une résistance, d'un condensateur et d'une bobine en série, comme décrit sur la figure 1.8 (A).

Ce filtre a pour objet de présenter une impédance très faible au passage d'un courant harmonique à un rang déterminé. Pour des différents rangs harmoniques à filtrer, Plusieurs filtres résonants correspondant sont souvent installés en parallèle. L'inconvénient présenté par ce filtre est la sensibilité aux variations de l'inductance (dus à la qualité de réalisation) ou de la capacité (dus au vieillissement ou à la température), ce qui entraîne un désaccord de l'ensemble [15].

L'impédance équivalente est :

$$z_{eq}(w) = \frac{1-Lcw^2+jRCw}{jCw} \quad (1.6)$$

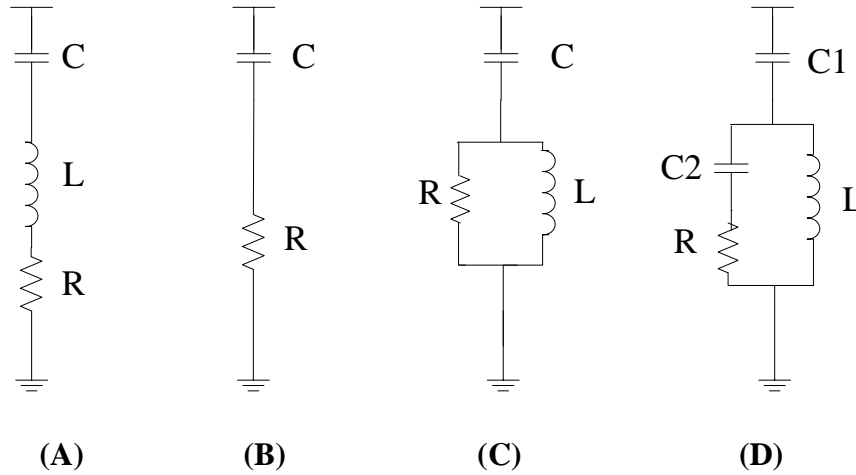


Figure 1.8. *Filtre passif : (A) filtre résonant, (B) filtre amorti de 1^{er} ordre, (C) filtre amorti de 2^{ème} ordre, (D) filtre amorti de 3^{ème} ordre*

b. Filtre passif amorti

Le filtre passif amorti est généralement utilisé pour filtrer tous les harmoniques du rang supérieure à 11. Comme le montre la figure 1.8 (B, C et D), ce filtre comprenant trois topologie, filtre amorti de 1^{er} ordre, 2^{ème} ordre et 3^{ème}ordre [16].

1.6.2.2 Filtrage actif

Un compensateur actif est un dispositif qui exploite au moins un convertisseur statique pour satisfaire la fonction de « dépollution harmonique »[12].

Le filtre actif est un convertisseur d'électronique de puissance, qui est en générale un onduleur commandé en courant ou en tension raccordé au réseau à travers des éléments passifs [4].

- **Principe de filtrage actif**

Repose sur le principe d'injecter soit des courants, soit des tensions harmoniques de même grandeur mais en opposition de phase avec ceux absorbés par la charge de manière à compenser les perturbations responsables de la dégradation des performances des équipements et installations électriques [1].

- **Classification des filtres actifs**

La classification des filtres actifs ce fait selon plusieurs critères, comme :

- ✓ Sa configuration par rapport au réseau,
- ✓ Le type d'onduleur qu'il utilise,
- ✓ Le nombre de fils.

Concernant la configuration par rapport au réseau, on distingue le filtre actif parallèle, le filtre actif série, ou encore une combinaison entre ces deux dernières configurations qui est le filtre mix (Série-parallèle) comme le montre la figure 1.9[4].

a. Filtre actif parallèle(FAP)

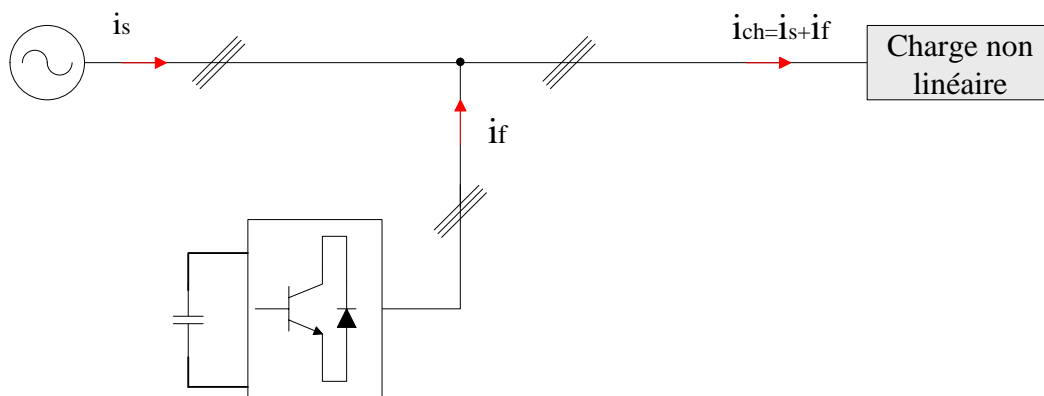
Le filtre actif parallèle appelé aussi compensateur *shunt* (figure 1.9(a)), conçu pour compenser toutes les perturbations de courant comme les harmoniques, les déséquilibres et la puissance réactive, génère un courant harmonique qui annule les harmoniques de courant coté réseau[1].

b. Filtre actif série (FAS)

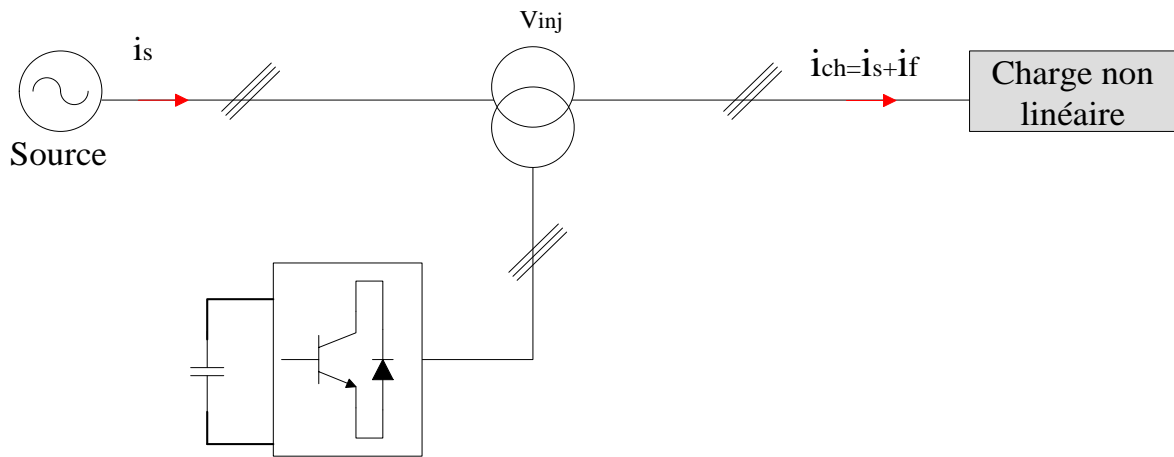
Le filtre actif série (figure 1.9 (b)), se comporte comme une source de tension conçu pour compenser toutes les perturbations de tension comme les harmoniques, les déséquilibres et les creux de tension, génère une tension harmonique qui garantit une tension sinusoïdale aux bornes de la charge[1].

c. Filtre actif Série-parallèle

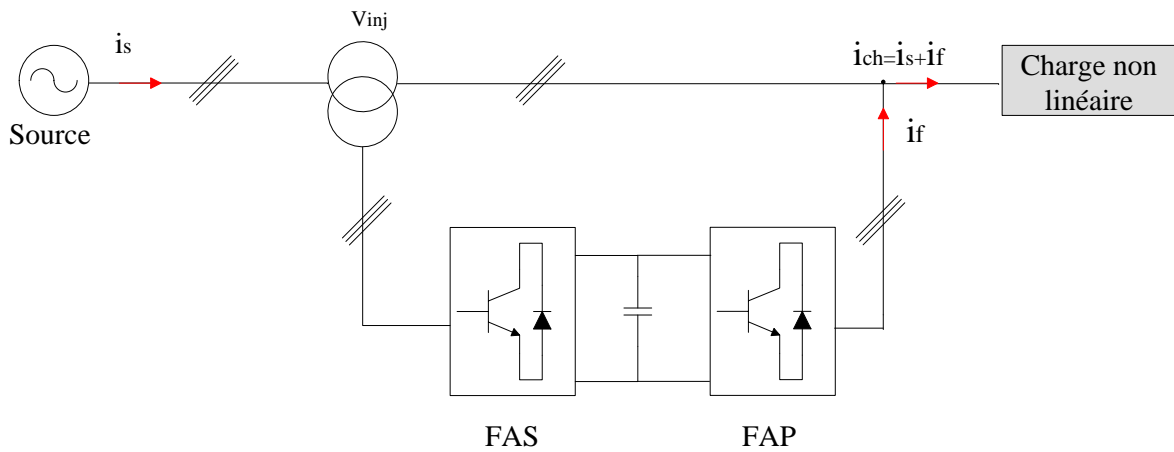
La combinaison parallèle-série actifs se nomme :Conditionneur universel de la qualité d'onde, en anglais (*Unified Power Quality Conditionneur UPQC*) (figure 1.9 (c)), est une solution universelle pour compenser toutes les perturbations en courant et en tension, repose sur le fonctionnement simultané des filtres actifs parallèle et série[1].



(a)Compensateur actif dit « parallèle» .



(b) Compensateur actif dit « série ».



(c) Compensateur actif dit « série-parallèle ».

Figure 1.9 : Les configurations possibles du filtre actif par rapport au réseau.

1.6.2.3 Filtrage hybride

Une combinaison entre le filtre actif et le filtre passif est dite hybride, dans le but de réduire le dimensionnement et le coût des filtres actifs, cette solution est envisageable. Dans ce cas, le rôle du filtre passif est l'élimination des harmoniques prépondérants permettant de réduire le dimensionnement des filtres actifs qui ne compensent que le reste des perturbations. Plusieurs configurations ont été présentées dans la littérature, les plus étudiées étant [7] :

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

Le filtre hybride a les performances des deux filtres, actif et passif. Un exemple filtre actif parallèle avec un filtre passif est le suivant :

- **Filtre actif parallèle avec des filtres passifs parallèles**

Une combinaison entre un filtre actif parallèle et un filtre passif série est montré sur la figure 3.10, le rôle du filtre actif parallèle est la compensation des courants harmoniques basses fréquences émis par la charge non linéaire, pour le filtre passif, il est accordé sur une fréquence élevé, pour éliminer les harmoniques hautes fréquences et celles créés par le FAP[7].

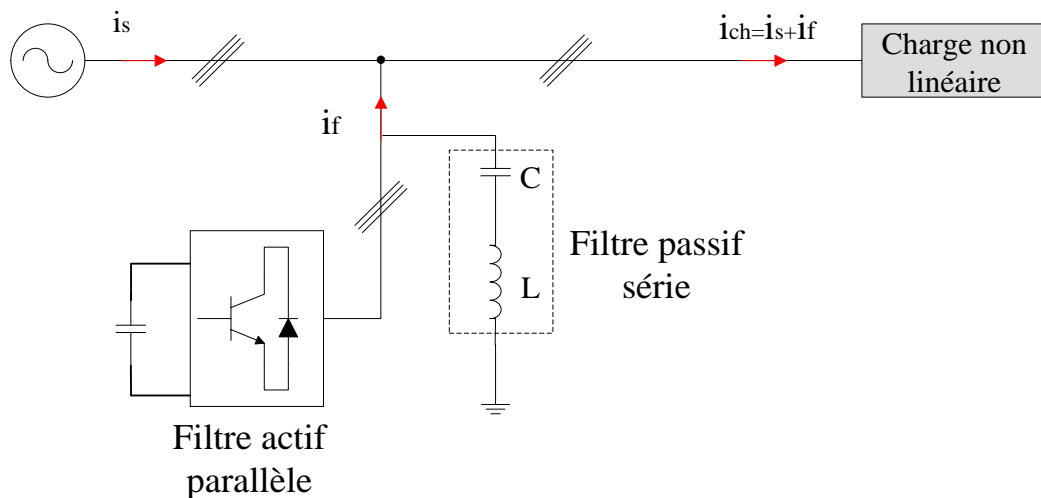


Figure 1.10. Filtre actif parallèle avec des filtres passifs parallèles.

1.7 Filtre actif triphasé à quatre fils

Un filtre actif triphasé à trois fils est les premiers compensateurs à connaître le succès. En 1990 un intérêt particulier a été porté sur les structures à quatre fils. Le filtre actif triphasé à quatre fils a été le plus envisageable car il offre les qualités d'un filtre à trois fils plus l'élimination du courant dans le neutre. Comme le monte la figure ci-dessous, le fil neutre est connecté à un quatrième bras.

Les avantages de cette structure est la simplification du contrôle du bus continu au prêt de ce quatrième bras, elle permet une meilleure exploitation, et réduit sensiblement la taille du bus continu, contrairement à la structure à trois bras qui a souvent besoins d'un bus continu plus large et d'un niveau de tension plus élevé mais le nombre de semi-conducteurs est réduit, par rapport à la structure à quatre fils ce qui permet un contrôle plus simple[4].

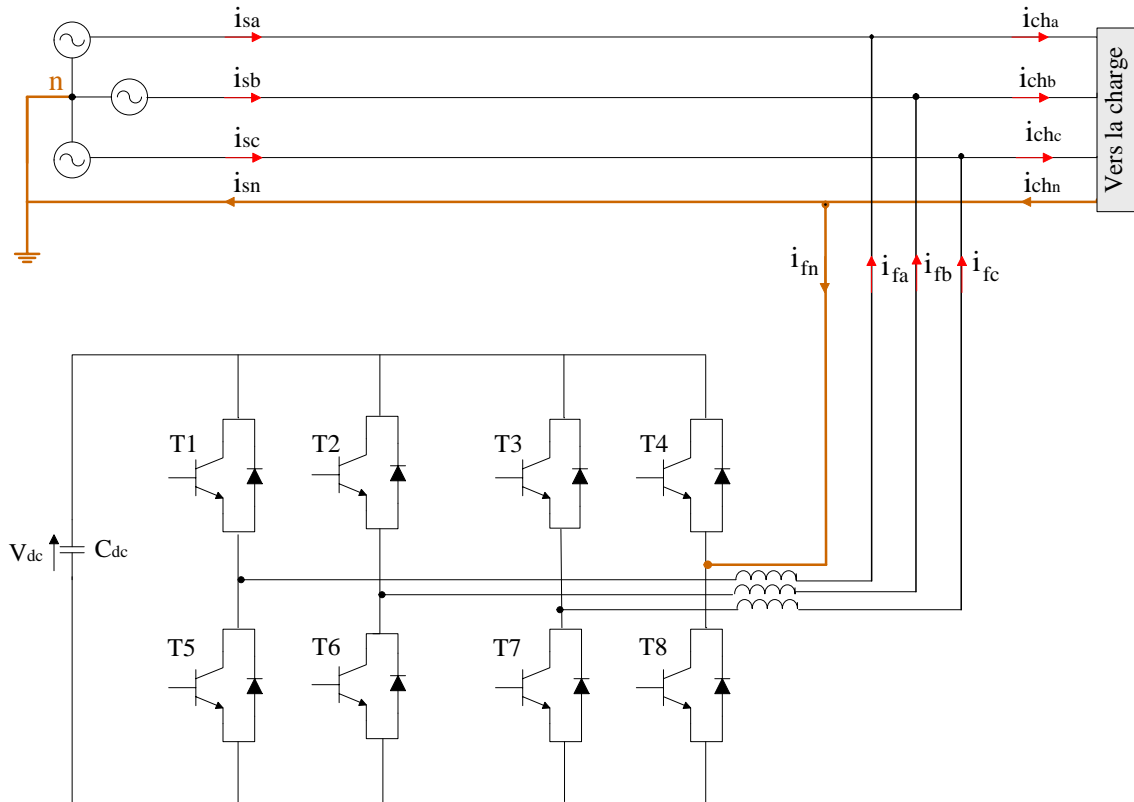


Figure 1.11. Structure d'un filtre actif triphasé à quatre fils.

Conclusion

L'étude de ce chapitre nous a permis d'identifier les différents types de perturbations qui affectent le réseau de distribution, leurs origines et leurs effets indésirables sur les récepteurs donc le consommateur, comme on a évoqué les solutions convenables pour éliminer ces perturbations.

Plusieurs solutions ont été élaborées, chaque une a son principe, mais pour nous le filtre actif est plus adéquat et plus convenable, il génère des courants qui s'opposent aux harmoniques créés par les charges non linéaires. La figure 1.9 (a), est la topologie qu'on qualifie habituellement, la plus instinctive et elle fera l'objectif de notre chapitre suivant.

CHAPITRE II

Introduction

Comme il a été illustré ou bien présenté dans le chapitre qui précède, le FAP est la solution la plus adéquate pour l'élimination des harmoniques dans un réseau de distribution, afin de garantir une bonne qualité de l'énergie électrique pour le consommateur. Donc ce chapitre a pour objectif de présenter ce FAP, le principe sur lequel il repose et sa structure générale. Cette dernière est divisée en deux grandes parties essentielles qui sont : la partie puissance qui sera étudiée dans ce chapitre et la partie contrôle-commande, qui sera l'objectif de notre chapitre qui suit et elle sera étudiée en détail.

Pour la partie puissance, nous présenterons les trois principaux éléments qui la constitue : le bus continu, qui joue le rôle de la source de tension pour notre FAP, le filtre de raccordement qui est un filtre passif utilisé afin de connecter le FAP tension au réseau électrique et finalement, l'onduleur triphasé à structure de tension à quatre fils quatre bras qui représentent notre FAP. Une modélisation appropriée sera présentée aussi dans ce chapitre pour notre FAP, le réseau électrique triphasé et finalement la charge non linéaire utilisée durant tout notre travail. Finalement, une introduction au contrôle du filtre actif clôture notre chapitre et donne une idée et ouvre l'esprit sur le contenu du troisième chapitre.

2.1 Principe général du filtrage actif des harmonique

Comme en a mentionné dans le chapitre précédent, le filtre actif figure parmi les solutions correctives de la dépollution harmoniques, pour but d'améliorer la qualité de l'énergie électrique et de réduire le taux de distorsion harmonique. Son principe de base est montré sur la figure 2.1.

À l'aide d'un onduleur de tension et avec une commande appropriée, on reçoit à sa sortie la forme des courants de compensation i_f à injecté dans le réseau pour but d'annuler les composantes harmoniques du courant généré par la charge non linéaire, de telle sorte que le courant fourni par le réseau soit sinusoïdal[17].

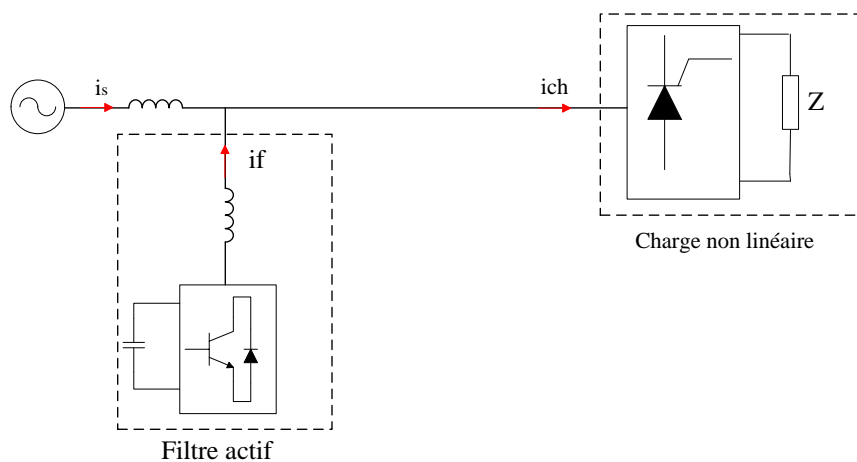


Figure 2.1. Schéma de principe du filtrage actif.

2.2 Description du système à étudier

Le schéma global du système à étudier est représenté sur la figure (2.2). Il est composé de trois parties principales suivantes :

- Source d'alimentation triphasée à quatre fils,
- Trois charges non linéaires monophasées symbolisées par des ponts redresseurs,
- Un filtre actif parallèle à quatre bras à structure tension (onduleur).

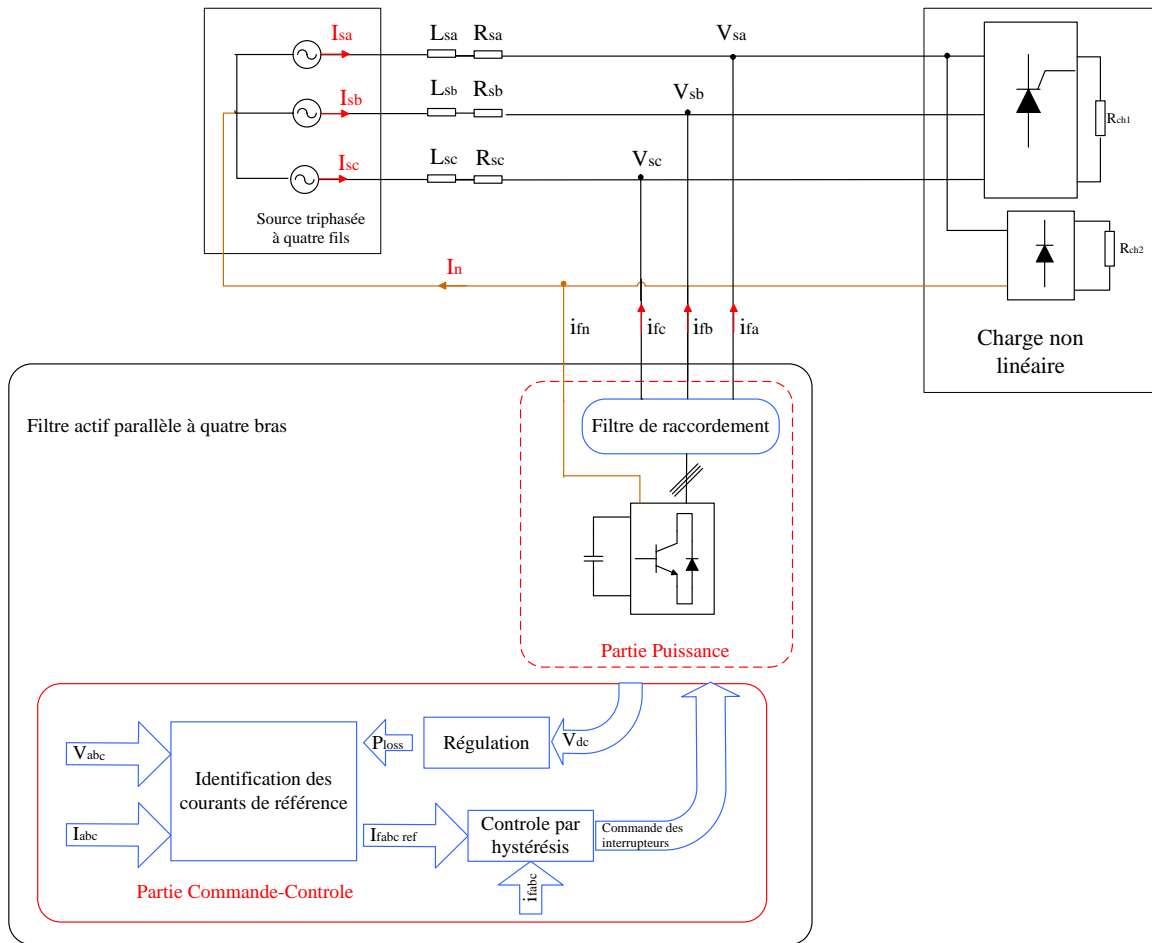


Figure 2.2. Structure générale du filtre actif parallèle triphasé à quatre fils.

Le raccordement de la charge polluante au réseau s'effectue par l'intermédiaire de l'impédance du réseau L_s et R_s . Le pont redresseur débite sur une charge R_{ch} . Le couplage du filtre actif avec le réseau s'effectue par l'intermédiaire d'un filtre de raccordement[18].

2.2.1 Structure générale d'un filtre actif à quatre fils

Un filtre actif parallèle à quatre fils est constitué essentiellement de deux parties principales (Voir la figure 2.1)[4][7].

- Partie puissance,
- Partie commande – contrôle.

La partie puissance est constituée :

- D'un onduleur de tension à base d'interrupteurs de puissance commandables à l'amorçage et au blocage IGBT avec des diodes en antiparallèle,
- D'un circuit de stockage d'énergie capacitif,
- D'un filtre de raccordement Lc .

La partie commande – contrôle quant à elle est constituée :

- D'un bloc d'identification de perturbation sur le courant,
- D'un bloc d'identification des composantes liées à la séquence directe fondamentale des tensions du réseau,
- D'un bloc pour la régulation de la tension du bus continu,
- D'un bloc de contrôle du courant injecté sur le réseau par l'onduleur,
- Enfin la commande de l'onduleur.

2.2.1.1 Etude de la partie puissance

a. Système de stockage capacitif

Le stockage de l'énergie du côté continu se fait le plus souvent par un système de stockage capacitif représenté par un condensateur C_{dc} qui joue le rôle d'une source de tension continue V_{dc} .

Le choix des paramètres du système de stockage (V_{dc} et C_{dc}) se répercute sur la dynamique et sur la qualité de compensation des harmoniques du filtre actif parallèle. Dans les applications de compensation d'harmoniques, une tension V_{dc} élevée aux bornes du bus continu améliore la dynamique du filtre actif, d'autre part, une valeur élevée de C_{dc} réduit les ondulations mais augmente le coût et la taille du FAP. De plus, les ondulations de la tension continuent V_{dc} , causées par les courants engendrés par le filtre actif et limitées par le choix de C_{dc} . Ces ondulations sont d'autant plus élevées que les harmoniques à compenser sont de basses fréquences et d'amplitudes importantes ou la capacité est faible. Pour cette raison, nous pouvons estimer que seuls les premiers harmoniques sont pris en compte dans le choix des paramètres du système de stockage.

La méthode la plus simple et la plus utilisée pour le dimensionnement consiste à calculer la capacité C_{dc} à partir du courant harmonique I_h du rang le plus faible [4][7][19].

La capacité C_{dc} se calcule de la façon suivante :

$$C_{dc} = \frac{I_h}{\varepsilon \cdot V_{dc} \cdot \omega_h} \quad (2.1)$$

Avec :

ω_h , est la pulsation de l'harmonique de rang h,

I_h : Harmonique de rang h,

V_{dc} : Tension du bus continue,

C_{dc} : Condensateur de stockage.

b. Filtre de raccordement au réseau (filtre de sortie)

Un filtre de sortie est un filtre passif utilisé afin de connecter l'onduleur de tension au réseau électrique (voir la figure 2.3).

Les types de filtres connus et qui sont souvent utilisés sont les suivants;

- ✓ Le filtre type L, dite de premier ordre, Dans la littérature, ce filtre est le plus utilisé pour sa simplicité,
- ✓ Le filtre type LCL, dite de troisième ordre.

Le filtre de sortie est dimensionné pour satisfaire les critères suivants [4] [21] [22] :

- Assurer la dynamique du courant :

$$\frac{d}{dt} \vec{I}_{h-ch} = \frac{d}{dt} \vec{I}_{inj} \quad (2.2)$$

Avec :

\vec{I}_{h-ch} : Le courant harmonique de la charge,

\vec{I}_{inj} : Le courant du filtre actif.

- Minimiser la variation brusque de courant (lissage),
- Empêcher les composantes dues aux commutations de se propager sur le réseau électrique,
- Causer le minimum de chute de tension à ses bornes.

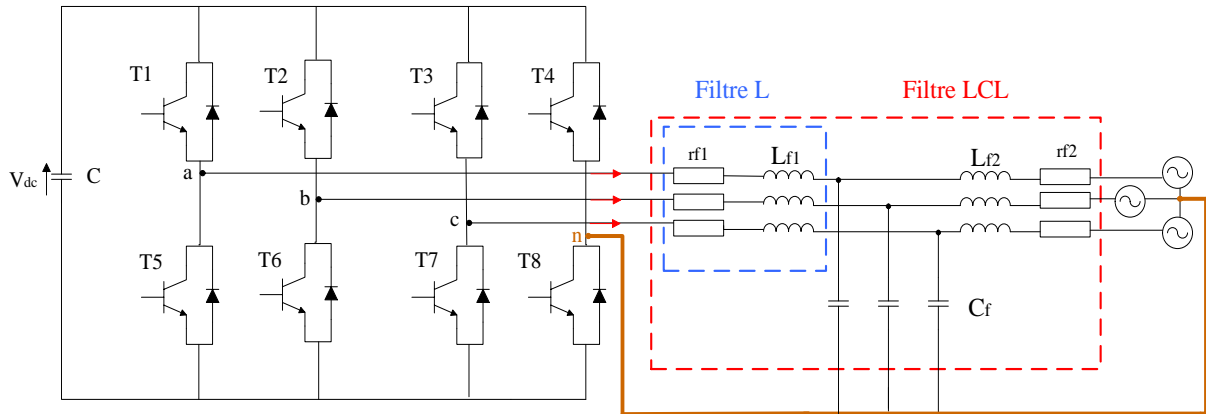


Figure 2.3. Onduleur de tension avec filtre de raccordement au réseau L et LCL.

✓ **Filtre du premier ordre**

Ce type de filtre est le plus utilisé. Il est composé d'une inductance L_f et de résistance interne r_f , comme le montre la figure 2.3. Une valeur relativement faible de L_f peut réaliser une bonne dynamique du filtre actif et diminuer les chutes de tension. Malheureusement, cette faible valeur de L_f permet à la majorité des composantes dues aux commutations de se retrouver côté réseau et par conséquent d'affecter les installations et les équipements électriques. Inversement, une valeur 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.

Ce filtre peut causer des effets secondaires non désirés comme la résonance avec d'autres éléments passifs installés sur le réseau électrique[7].

✓ **Filtre du troisième ordre**

Souvent appelé filtre en T, composé de deux inductances L_{f1} et L_{f2} , de résistances internes r_{f1} et r_{f2} respectivement et d'une capacité c_f , comme le montre la figure 2.3.

Le filtre LCL est une combinaison des deux filtres L et LC. La présence du filtre LC à la sortie de l'onduleur de tension, qui se comporte comme un générateur de tensions harmoniques, permet l'élimination des composantes hautes fréquences dues aux découpages. L'association d'un filtre L et LC transforme la source de tension en une source de courant et améliore la qualité des grandeurs de sorties[7][12].

c. Filtre actif à quatre bras

Comme il est illustré sur la figure (1.11) dans le chapitre précédent, le filtre actif utilisé est un onduleur triphasé à structure de tension, composé de quatre bras à huit interrupteurs commandables à la fermeture et à l'ouverture, réalisé à base des transistors IGBT, et des diodes en antiparallèle, avec une source de tension continue représenté par un circuit de stockage capacitif C_{dc} [7].

2.3 Modélisation du système à étudier

2.3.1 Modélisation du filtre actif à quatre fils

L'objectif de la modélisation est de trouver une relation entre les grandeurs de commande et les grandeurs électriques des parties alternatives et continue de l'onduleur.

a. Modélisation de l'onduleur de tension

L'ouverture et la fermeture des interrupteurs de l'onduleur de la figure 2.2 dépendent de l'état des signaux de commande (T_1, T_2, T_3) , comme défini ci-dessous [23]:

$$v_{f1} = (T_1 - T_4)v_{dc} \quad (2.3)$$

$$v_{f2} = (T_2 - T_4)v_{dc} \quad (2.4)$$

$$v_{f3} = (T_3 - T_4)v_{dc} \quad (2.5)$$

Et

$$i_{dc} = T_1 i_1 + T_2 i_2 + T_3 i_3 \quad (2.6)$$

Avec:

$T_i = 1$ si T_{i+4} est fermé.

$T_i = 0$ si T_{i+4} est ouvert.

$i = 1$ à 4.

On peut avoir donc cette combinaison binaire représenté dans le tableau 2.1.

K	T_1	T_2	T_3	T_4	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 2.1. Tensions générées par l'onduleur de tension à quatre bras.

Exemple : La combinaison 0110 correspond à la configuration 6 de la figure 2.4.

A partir des états des interrupteurs présentés par les variables T_1, T_2 et T_3 , on pourra examiner seize configurations possible de l'onduleur, (voir la figure 2.4).

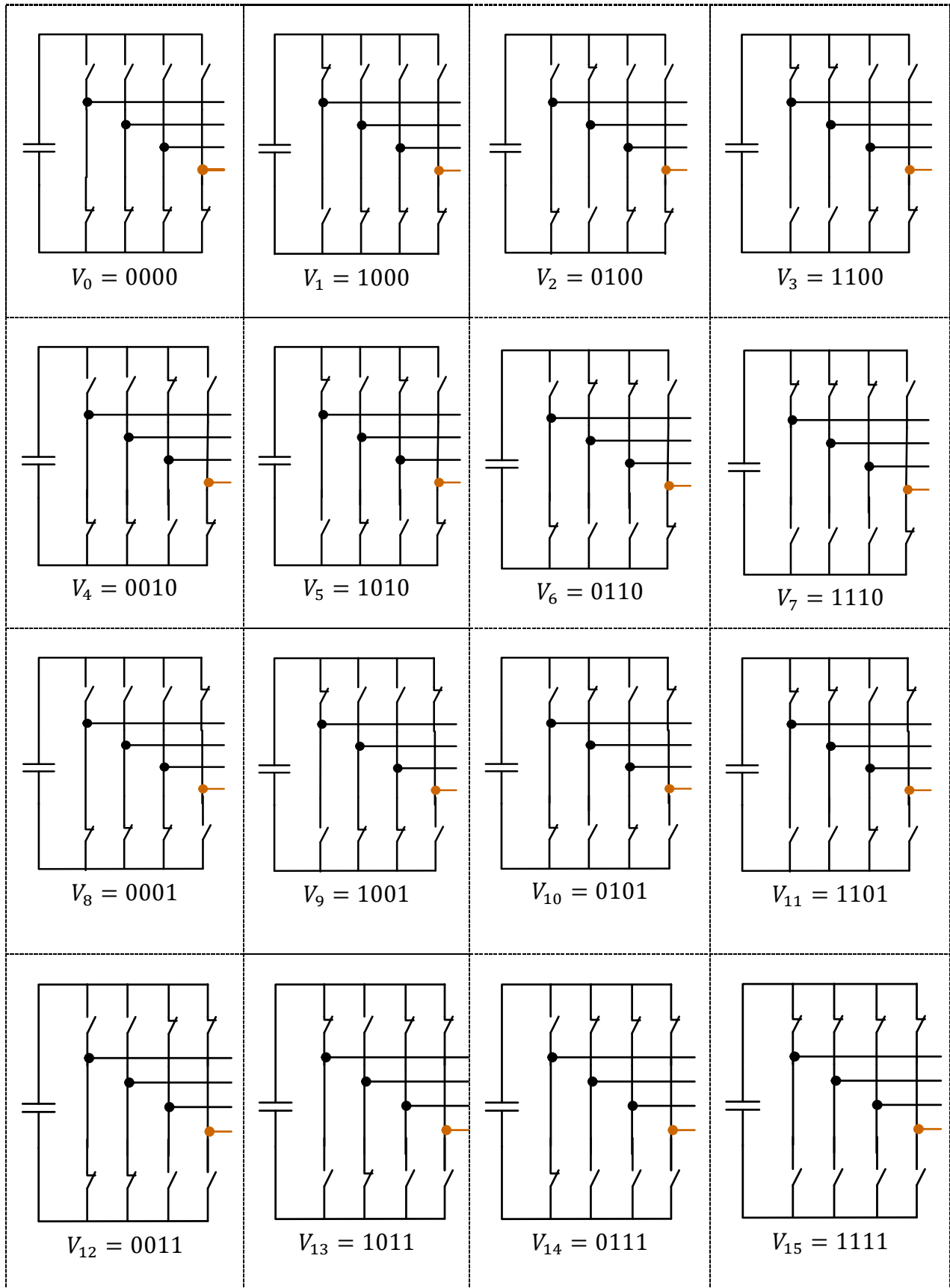


Figure 2.4. Les seize configurations possibles de l'onduleur à quatre bras.

b. Modélisation de l'onduleur de tension commandé en courant

Pour cette modélisation, on s'intéressera aux relations liant les tensions de phases $v_{ck}(t)$ avec les courants de phases $i_{ck}(t)$ et les tensions du réseau $v_k(t)$ quand l'onduleur est couplé au réseau à travers un filtre inductif (figure 2.5), pour cela on néglige les harmoniques de découpages et on suppose que la source de tension V_{dc} est parfaite. L'interaction entre l'onduleur de tension et le réseau est décrite par les équations suivantes[4] :

$$\begin{cases} v_{ca}(t) = r_c i_{ca}(t) + L_c \frac{d}{dt} i_{ca}(t) + v_a(t) \\ v_{cb}(t) = r_c i_{cb}(t) + L_c \frac{d}{dt} i_{cb}(t) + v_b(t) \\ v_{cc}(t) = r_c i_{cc}(t) + L_c \frac{d}{dt} i_{cc}(t) + v_c(t) \end{cases} \quad (2.7)$$

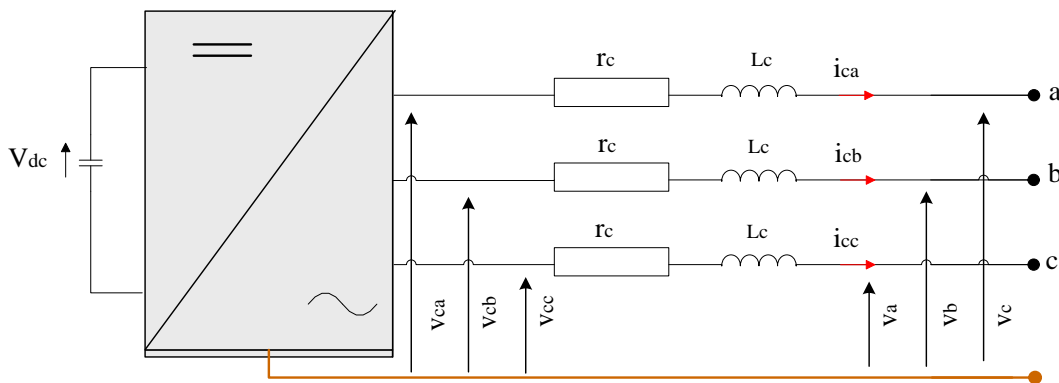


Figure 2.5. Onduleur de tension triphasé raccordé au réseau avec un filtre L.

2.3.2 Modélisation du réseau électrique

Le réseau d'alimentation est modélisé par trois sources de tension sinusoïdales parfaites en série avec une impédance Z_s . La figure 2.6 montre le schéma de principe d'un réseau électrique triphasé.

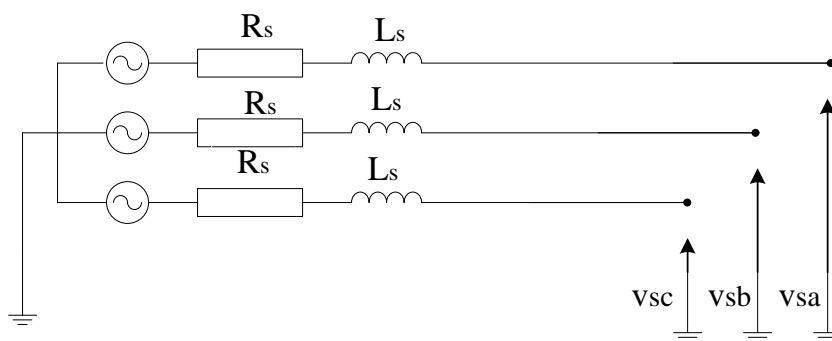


Figure 2.6. Schéma électrique d'un réseau triphasé.

D'où la représentation du réseau par le système d'équation triphasé équilibré sont exprimées par le système d'équation suivant[24] :

$$\begin{cases} v_a = \sqrt{2} v \sin(\omega t) \\ v_b = \sqrt{2} v \sin(\omega t - 2\pi/3) \\ v_c = \sqrt{2} v \sin(\omega t + 2\pi/3) \end{cases} \quad (2.8)$$

Avec

$$Z_s = R_s + jL_s\omega \quad (2.9)$$

2.3.3 Modélisation de la charge polluante

La charge polluante utilisé dans notre système est représentée par un pont redresseur à thyristors débitant sur une charge (R_{ch1}) comme illustré dans la figure 2.7. La figure 2.8 représente un charge non linéaire déséquilibré. Une charge non linéaire à base d'électronique de puissance considérée comme une source des courants harmoniques[4][23].

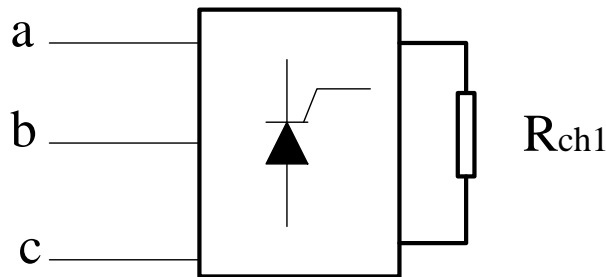


Figure 2.7. *Modèle de la charge non linéaire équilibrée.*

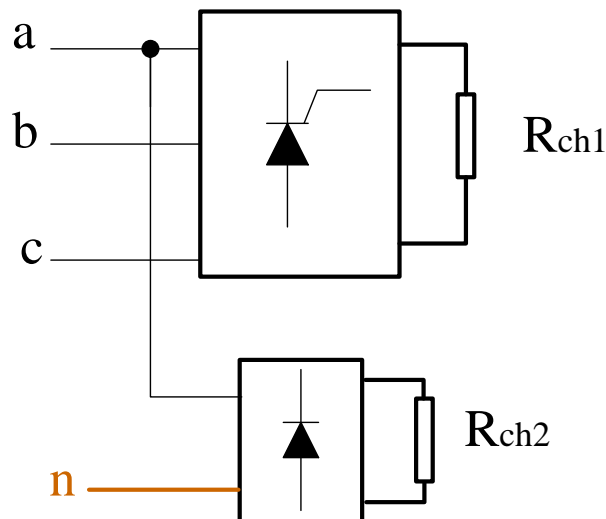


Figure 2.8. *Modèle de la charge non linéaire déséquilibrée.*

Le courant circulant dans la charge se décomposer en une composante fondamentale

i_{chf} et une composante harmonique i_{chh} [12].

$$i_{ch}(t) = i_{chf} + i_{chh} \quad (2.10)$$

Avec le fondamental

$$i_{chf} = \sqrt{2} \times I_1 \times \sin(\omega t + \varphi_1) \quad (2.11)$$

Et pour les harmoniques

$$i_{chh}(t) = \sum_{h=2}^{\infty} \sqrt{2} \times I_h \times \sin(h\omega t + \varphi_h) \quad (2.12)$$

2.4 Introduction au contrôle du filtre actif

Comme l'illustre la figure 2.9, deux blocs principaux caractérisent le contrôle du filtre actif. Le premier sert à générer les courants que l'onduleur doit injecter dans le point de raccordement qui sont les courants de références i_{abc}^{ref} , de sorte qu'ils suivent le plus fidèlement possible ceux de la référence.

Le bloc de génération des courants de référence contient trois sous blocs, à savoir [4]:

- Un bloc d'identification de la séquence directe fondamentale des tensions v_{abc} au point de raccordement ;
- Un bloc de régulation des tensions du bus continu ;
- Finalement un bloc qui calcule les courants de référence i_{abc}^{ref} .

Le bloc de contrôle des courants injectés par le filtre actif est composé à son tour de deux sous blocs :

- Un bloc qui sert à corriger l'erreur entre les courants de référence i_{abc}^{ref} , et les courants injectés par le filtre actif i_{abc}^{inj} ;
- Un bloc pour la commande rapprochée de l'onduleur qui sert à générer les ordres d'ouverture ou de fermeture des interrupteurs.

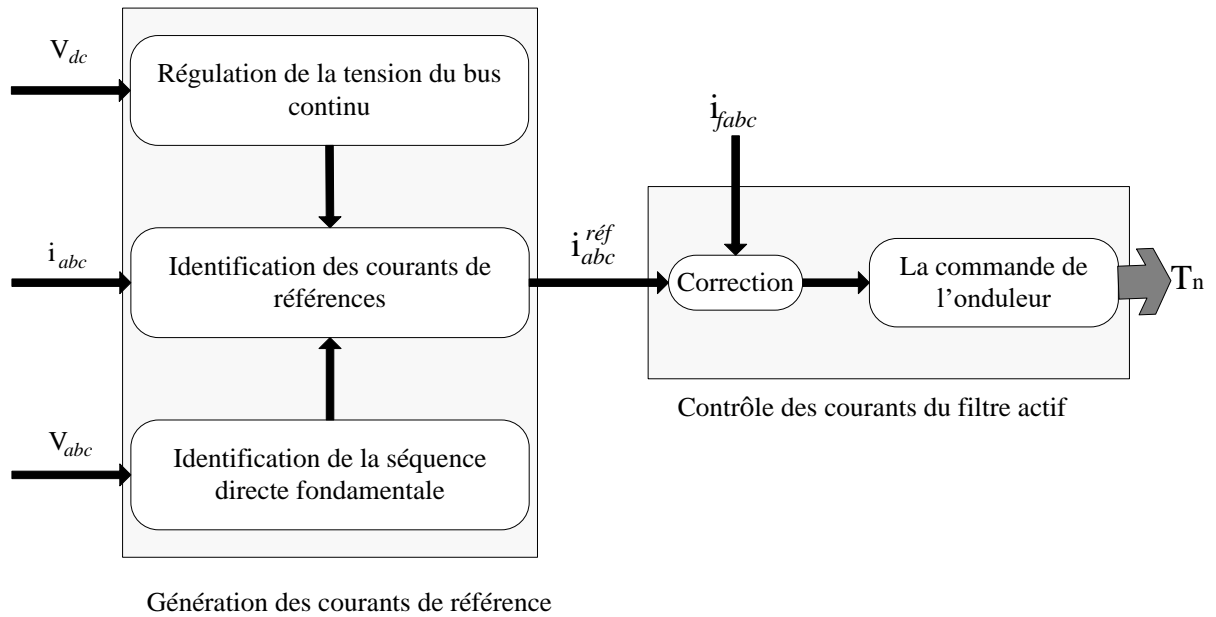


Figure 2.9. Contrôle du filtre actif.

Conclusion

La partie puissance du FAP était le sujet ciblé dans ce chapitre, les éléments constituant ce FAP ont été présentés et qui sont l'onduleur à structure tension avec son principe de fonctionnement et sa modélisation, le circuit de stockage capacitif, ainsi que le filtre de raccordement au réseau. La deuxième partie contrôle-commande, sera détaillée dans le chapitre suivant.

CHAPITRE III

Introduction

Comme nous avons cité dans le chapitre précédent, la partie contrôle-commande fera l'objectif de ce chapitre, dans un premier temps l'identification des perturbations harmoniques pour les éliminer et obligatoire pour permettre l'amélioration des performances des réseaux électriques. Pour cela nous faisons l'étude de cette partie.

Une identification des courants perturbés a été élaborée on utilisant la théorie des puissances instantanées. Une PLL pour extraire la composante fondamentale directe de la tension dans les réseaux électriques, après une régulation de la tension du bus continu a été faite afin de maintenir la tension aux bornes du condensateur à une valeur fixe. Après l'identification des courants perturbés, des stratégies de commande de l'onduleur en étaient proposées, tel que la commande par Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) et La commande par Hystérésis, cette dernière est la commande utilisée dans notre simulation.

On conclut ce chapitre par les résultats obtenus tout au long de notre simulation avec leurs interprétations.

3.1 Identification des perturbations harmoniques

Dans le but du filtrage actif des harmoniques en raison de la dépollution des réseaux électriques, il est donc nécessaire d'identifier avec précision les courants harmoniques de la charge polluante afin d'accomplir le processus de la compensation active. Le choix de la méthode utilisée pour l'isolement des composantes harmoniques du courant de la charge est un facteur indispensable. Parmi toutes les méthodes d'identification présentées dans la littérature, la méthode des puissances instantanées est la plus utilisée, à nos jours, elle est devenue très courante dans les applications conçues pour le filtrage actif car elle réalise le meilleur compromis entre les performances statiques et dynamiques[25] .

3.2 Théorie des puissances instantanées

"*The Generalised Theory of the Instantaneous Reactive Power in Three-Phase Circuits*", Théorie introduite par AKAGI et AL en 1984, c'est une méthode temporelle, connue comme la théorie des puissance instantanées (souvent dite théorie pq ou pq-theory) [26].

3.2.1 Principe de la théorie PQ0

Son principe est basé sur le passage de systèmes triphasés constitués par les tensions simples et les courants de ligne dans le repère « abc » vers un repère fixe « $\alpha\beta 0$ » comme c'est illustre par la figure (3.1), en exploitant la transformation de Concordia, afin de calculer les puissances réelle, imaginaire et homopolaire instantanées. Elle permet de transformer la composante fondamentale en une composante continue et les composantes harmoniques en composantes alternatives.

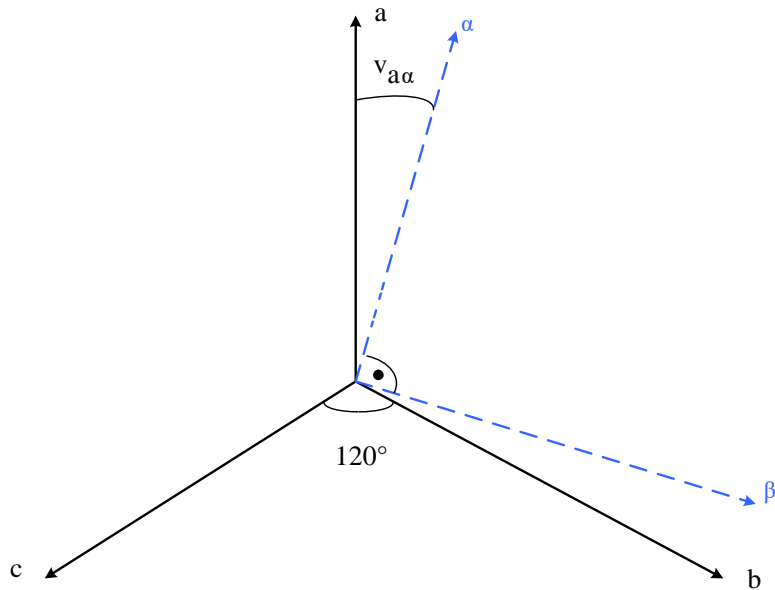


Figure 3.1. Représentation graphique de la transformation des coordonnées « abc » à « $\alpha\beta$ ».

Considérons les tensions simples et les courants de ligne d'un système triphasé avec la composante homopolaire. La transformation de Concordia permet d'obtenir les composantes correspondantes dans le plan « $\alpha\beta 0$ »:[4][27][28].

Pour les tensions dans le référentiel orthogonal:

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_0 \end{bmatrix} = C_{\alpha\beta 0} \times \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Pour les courants dans le référentiel orthogonal:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = C_{\alpha\beta 0} \times \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Avec $C_{\alpha\beta 0}$ la matrice de Concordia qui est donnée comme suite:

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

En utilisant la transformé de Concordia inverse on peut passer du référentiel « $\alpha\beta 0$ » au référentiel « abc ».

$C_{\alpha\beta 0}^{-1}$ la matrice inverse de Concordia:

$$C_{\alpha\beta 0}^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Les tensions et les courants sont donnés respectivement sous la forme matricielle suivante:

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = C_{\alpha\beta 0}^{-1} \times \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_0 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = C_{\alpha\beta 0}^{-1} \times \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Où:

v_α , v_β et i_α , i_β , sont les composantes orthogonales dans le repère « $\alpha\beta$ » respectivement, des tensions du réseau v_s et des courants absorbés par les charges polluantes i_l .

Et, les composantes (v_0 et i_0) représentent les composantes homopolaires du système triphasé [24].

- **Puissances instantanées dans un système à quatre fils**

La puissance triphasée instantanée dans le système « abc » est donnée par :

$$P_{3\varphi} = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c \quad (3.7)$$

En utilisant les transformées données dans les équation (3.1) et (3.2), cette puissance sera définie dans le système « $\alpha\beta 0$ » par :

$$P_{3\varphi} = v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta + v_0 i_0 \quad (3.8)$$

Les vecteurs tension et le courant sont donnés par:

$$\vec{v} = (v_\alpha + v_0) + j i_\beta \quad (3.9)$$

$$\vec{i} = (i_\alpha + i_0) + j i_\beta \quad (3.10)$$

La puissance apparente se calcule de la façon suivante:

$$S = \vec{v} \cdot \vec{i}^* \quad (3.11)$$

Avec

$$\vec{i}^* = (i_\alpha + i_0) - j i_\beta \quad (3.12)$$

donc

$$S = v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta + v_0 i_0 + j(-v_\alpha i_\beta + v_\beta i_\alpha) \equiv p + p_0 + jq \quad (3.13)$$

avec

$$\begin{cases} p = v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta \\ q = v_\beta i_\beta - v_\alpha i_\alpha \\ p_0 = v_0 i_0 \end{cases} \quad (3.14)$$

L'avantage de la transformation dans le repère stationnaire est la séparation des séquences homopolaires du système triphasé de courant ou de tension [24].

3.2.2 Application au filtrage actif dans un système à quatre fils

La puissance réelle p , imaginaire q et homopolaire p_0 , sont exprimées par la matrice suivante [4]:

$$\begin{bmatrix} p \\ q \\ p_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta & 0 \\ -v_\beta & v_\alpha & 0 \\ 0 & 0 & v_0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

Dans un système triphasé à quatre fils, la présence simultanée de la composante homopolaire dans la tension et le courant, conduit à l'apparition de la puissance homopolaire. Dans ce cas, la définition complète des puissances réelles, imaginaires et homopolaires instantanées peuvent être exprimées comme la somme d'une composante continue et d'une composante alternative:

$$\begin{cases} p = \bar{p} + \tilde{p} \\ q = \bar{q} + \tilde{q} \\ p_0 = \bar{p}_0 + \tilde{p}_0 \end{cases} \quad (3.16)$$

La puissance p_0 peut être considérée comme une puissance réelle supplémentaire mais qui coule à travers le neutre comme le montre la figure ci-dessous:

D'où

\bar{p}, \bar{q} et \bar{p}_0 les puissances continues.

\tilde{p}, \tilde{q} et \tilde{p}_0 les puissances alternatives.

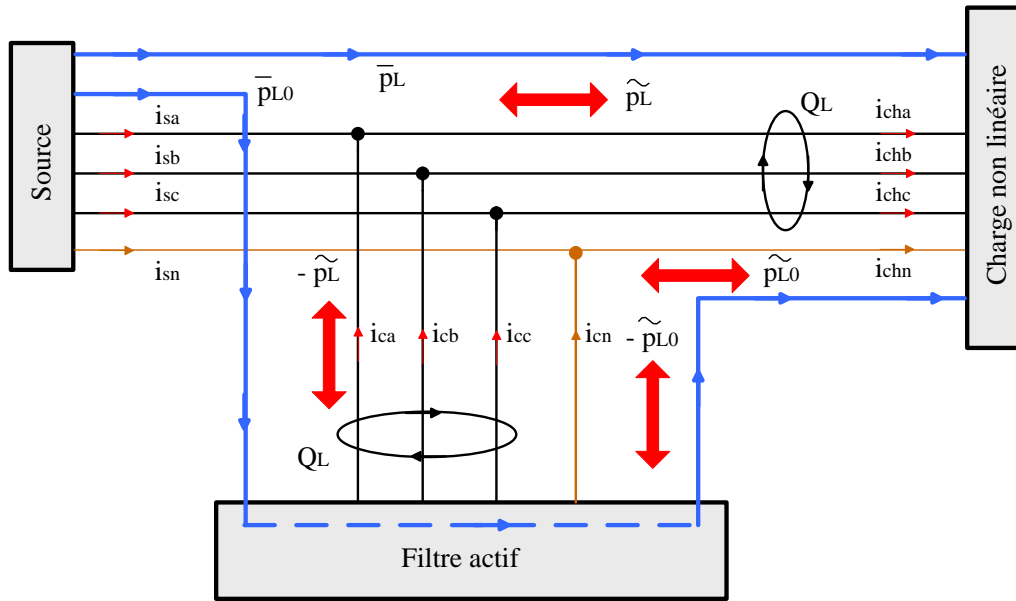


Figure 3.2. *Écoulement des puissances dans un système à quatre fils après compensation des puissances indésirables (cas idéal).*

Cette décomposition nous permet l'identification soit des composantes continues soit des composantes alternatives, dans notre cas on s'intéresse à l'identification des composantes alternatives. Pour cela on utilise un filtre passe bas, son principe de fonctionnement est détaillé sur la figure (3.3).

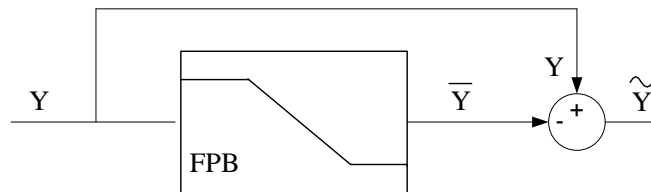


Figure 3.3. *Filtre passe bas (FPB).*

avec

Y : Le signal de la puissance réelle P ou homopolaire P_0 .

\bar{Y} : La composante continue (directe) de la puissance Y .

\tilde{Y} : La composante alternative (harmonique) de la puissance Y .

L'expression des courants en fonction des puissances citées dans l'équation (3.15), nécessite le calcul de la matrice inverse de D .

$$D = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta & 0 \\ -v_\beta & v_\alpha & 0 \\ 0 & 0 & v_0 \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

$$\det(D) = v_\alpha(v_\alpha \times v_0) - v_\beta(-v_\beta \times v_0) = v_0(v_\alpha^2 + v_\beta^2) \quad (3.18)$$

On aura

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{v_0(v_\alpha^2 + v_\beta^2)} \begin{bmatrix} (v_\alpha^2 + v_\beta^2) & 0 & 0 \\ 0 & v_0 v_\alpha & v_0 v_\beta \\ 0 & -v_0 v_\beta & v_0 v_\alpha \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} p_0 \\ p \\ q \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} (v_\alpha^2 + v_\beta^2) \\ v_0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} p_0 \\ p \\ q \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

Les courants de référence dans le plan $\alpha\beta 0$ sont:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha^{ref} \\ i_\beta^{ref} \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} -\tilde{p}_L + \bar{p}_{L0} + p_{loss} \\ -q_L \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

D'où les courants de référence dans le plan abc sont:

$$\begin{bmatrix} i_a^{ref} \\ i_b^{ref} \\ i_c^{ref} \end{bmatrix} = C_{\alpha\beta 0}^{-1} \times \begin{bmatrix} i_\alpha^{ref} \\ i_\beta^{ref} \\ -i_{L0} \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

Le schéma explicatif des différentes étapes appliquées pour arriver au résultat final est résumé sur la figure (3.4).

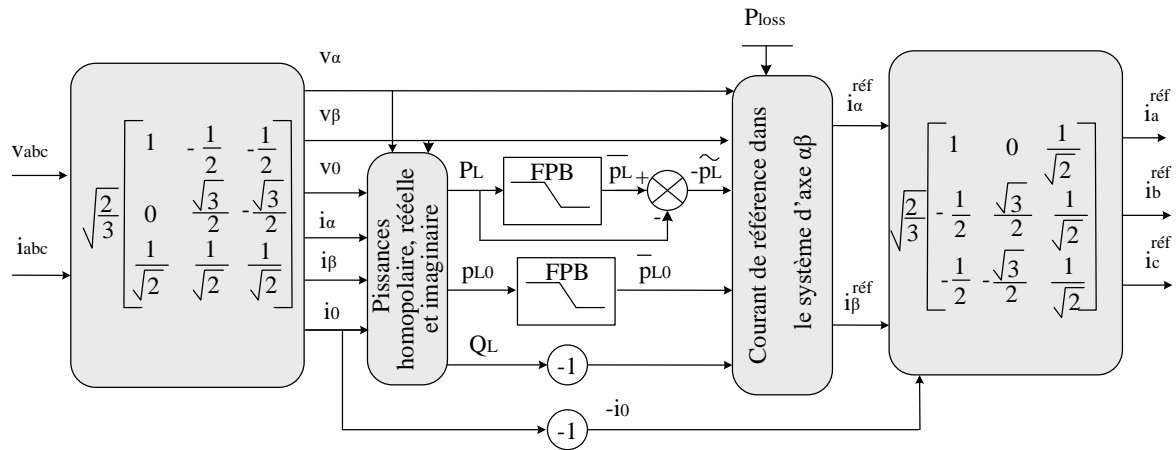


Figure 3.4. Schéma bloc de l'algorithme de contrôle d'un filtre actif à quatre fils à base de la théorie des puissances instantanées $pq0$.

3.3 Identification de la séquence directe de la tension

3.3.1 Boucle à verrouillage de phase PLL

Née en 1932, par un ingénieur français qui s'appelle *Henri de Bellescize* à cette époque, son but était l'amélioration de la réception des signaux radioélectriques en modulation d'amplitude.

La boucle à verrouillage de phase, (*Phase Locked Loop PLL*), est une boucle de régulation de la tension du bus continu, c'est la technique la plus utilisée pour extraire la composante fondamentale directe de la tension dans les réseaux électriques basse tension. Les tensions mesurées au point de raccordement v_a, v_b et v_c sont transformées dans le repère fixe $\alpha\beta$ par la transformation de Concordia, comme elle permet aussi d'asservir une fréquence de sortie sur un multiple de la fréquence d'entrée. Si nous supposons que les tensions triphasées sont sinusoïdales et équilibrées [1][4]:

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = v_{md} \begin{bmatrix} \sin(\theta_d) \\ \sin(\theta_d - 2\pi/3) \\ \sin(\theta_d + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

v_{md} : Amplitude de la tension direct.

Les tensions v_α et v_β obtenues dans le repère $\alpha\beta$ auront comme phase instantanée θ_d , qui n'est autre que la phase instantanée réelle de la tension directe.

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{3}{2}} v_{md} \begin{bmatrix} \sin(\theta_d) \\ -\cos(\theta_d) \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

Ces tensions sont ensuite transformées dans un repère tournant par la transformation de Park,

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\hat{\theta}_d) & -\cos(\hat{\theta}_d) \\ \cos(\hat{\theta}_d) & \sin(\hat{\theta}_d) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{3}{2}} v_{md} \sin(\theta_d) \\ -\sqrt{\frac{3}{2}} v_d \cos(\theta_d) \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{3}{2}} v_{md} \begin{bmatrix} \cos(\theta_d - \hat{\theta}_d) \\ \sin(\theta_d - \hat{\theta}_d) \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

avec

$\hat{\theta}_d$: angle de rotation instantané, qui est l'intégrale de la pulsation $\hat{\omega}_d$ estimée par le correcteur PI.

v_d : l'angle de phase de la tension qui égale à $(\theta_d - \hat{\theta}_d)$.

La boucle à verrouillage de phase sera verrouillée lorsque $(\theta_d = \hat{\theta}_d)$, c'est-à-dire lorsque la phase estimée est égale à la phase réelle de la tension directe. Si cette condition est vérifiée

alors la tension sur l'axe q est nulle, c'est pourquoi la référence v_q^* doit être nulle. Un système PLL joue le rôle d'un filtre passe bas pour l'extraction de la phase et l'amplitude de la séquence directe fondamentale, c'est pourquoi la PLL doit être d'une bande passante la plus réduite possible [4] (voir la figure 3.5).

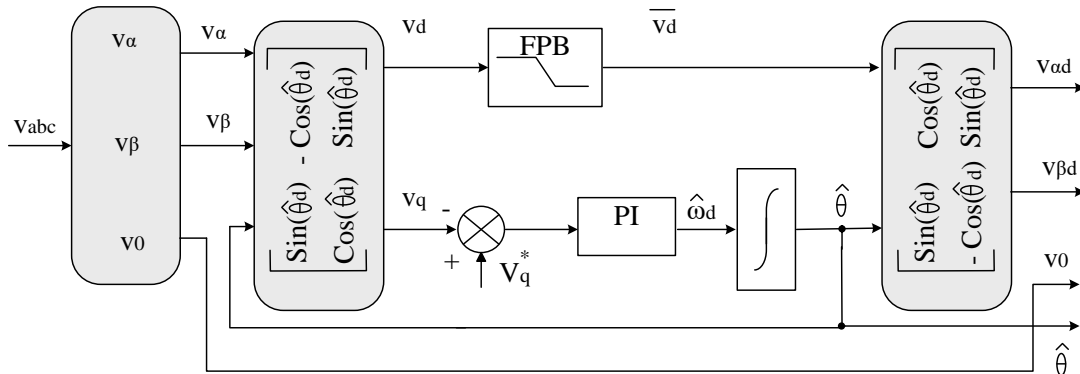


Figure 3.5. Algorithme d'identification de la séquence directe de la tension.

3.4 Stratégies de contrôle des courants

3.4.1 Principe de contrôle des courants

L'objectif de contrôle des courants du filtre actif, est de générer les ordres de commutation des interrupteurs, afin d'avoir les courants de sortie suivent le plus proche possible les consignes en module et en phase. La comparaison des courants i_f , injectés par l'onduleur avec les courants de référence i_{abc}^{ref} , dictés par la commande éloignée génère les signaux d'erreurs ε_{abc} , qui sont les entrées du contrôleur de courant. Celui-ci générera les signaux de commande T_{abc} , afin de réduire les erreurs [4].

3.4.1.1 Stratégie de commande de l'onduleur du filtre actif

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

Les deux principales stratégies de commande des convertisseurs statiques sont :

- la commande par hystérésis,
- la commande par Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) [29].

a. La commande par Hystérésis

La commande par hystérésis est une commande très simple, basée sur le principe décrit sur la figure 3.6. C'est une commande non linéaire, appelée aussi commande en tout ou

rien. Elle est basée sur la comparaison entre le courant de référence et le courant injecté par l'onduleur, afin de nous donner une erreur, cette erreur sera ensuite comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis qui a une largeur 2δ .

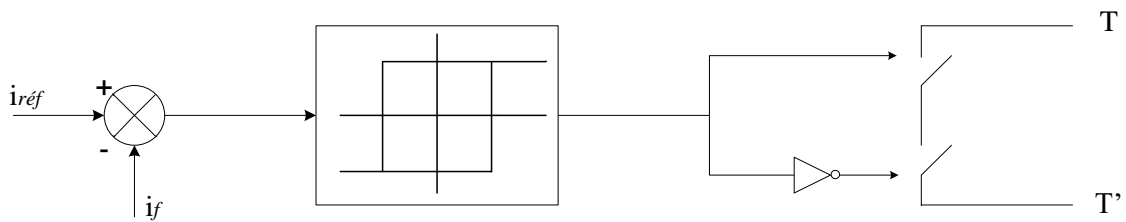
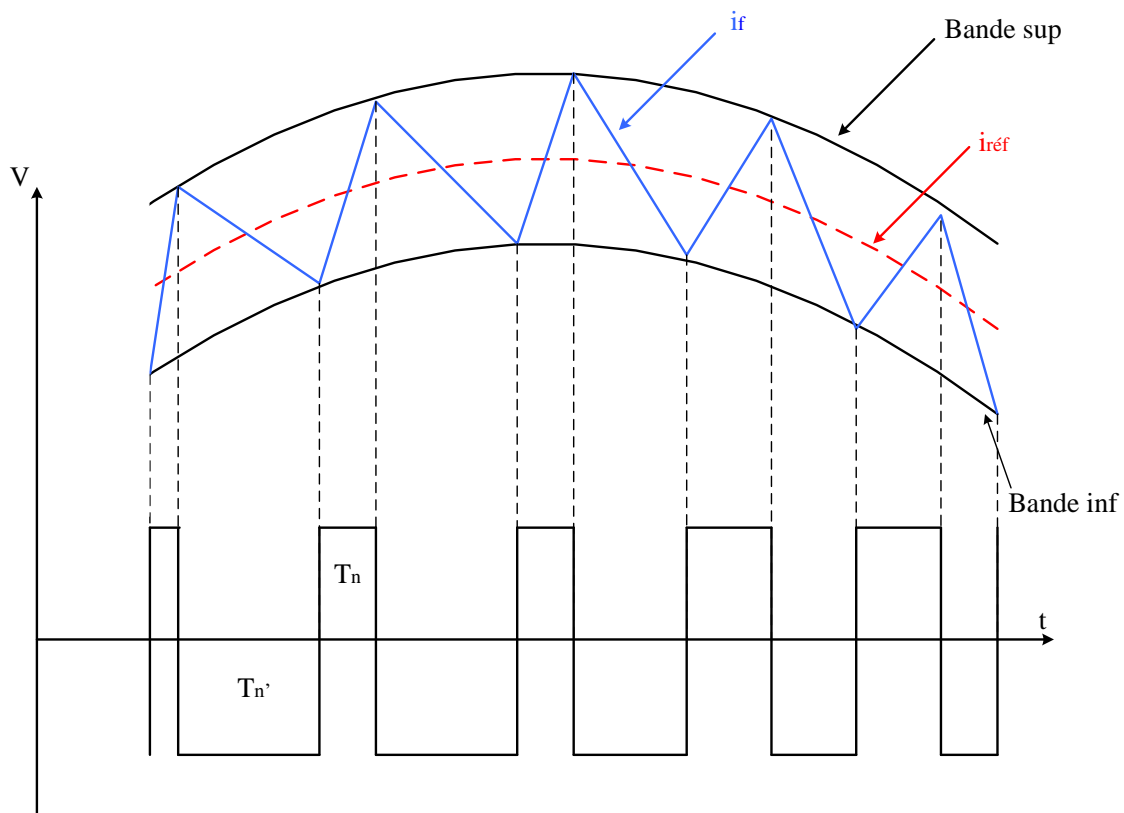
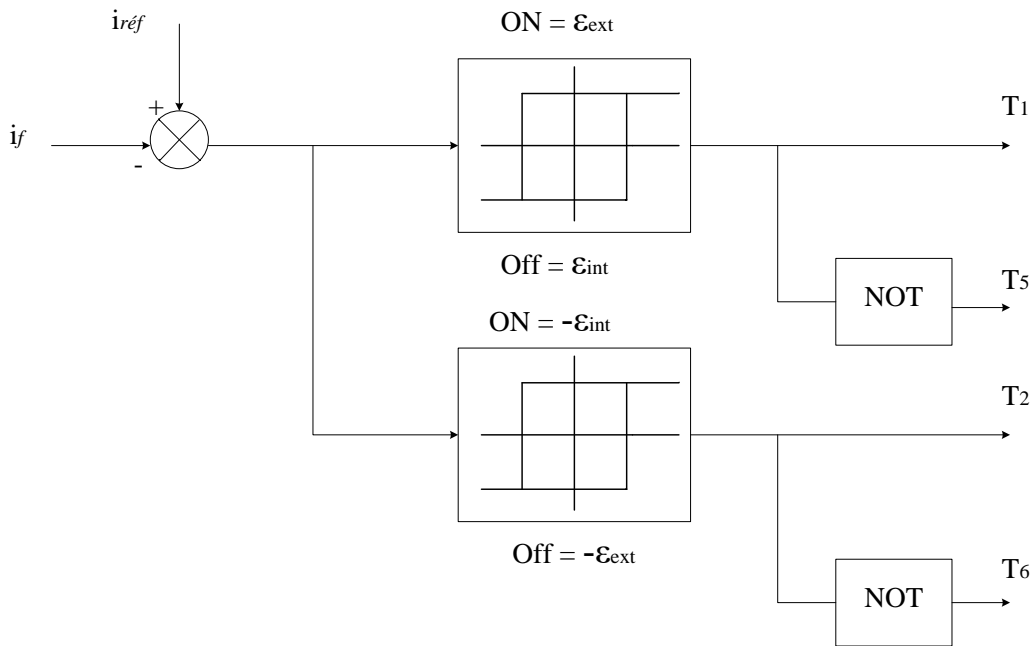


Figure 3.6. Principe de la commande par hystérésis.

L'erreur est contrainte à rester dans la bande d'hystérésis. Dès qu'il atteint la bande inférieure ou supérieure (figure 3.7), un ordre de commande sera envoyé de manière à le garder à l'intérieur de cette bande [29].



(a) Commande des interrupteurs par hystérésis.



(b) schémas du principe de la Commande par hystérésis

Figure 3.7. Commande par hystérésis.

b. La commande par Modulation de Largeur d’Impulsion (MLI)

En anglo-saxon *Pulse Width Modulation*, c'est la technique qui résout le problème de la maîtrise de la fréquence de commutation en fonctionnant avec une fréquence fixe facile à filtrer en aval de l'onduleur, elle est applicable à des systèmes linéaires, de fréquence de commutation constante. (voir la figure 3.8).

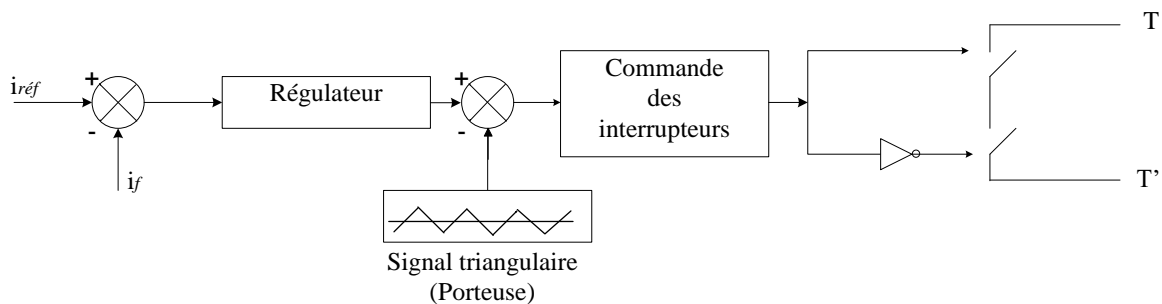


Figure 3.8. Principe de la commande par MLI.

Elle se base sur la comparaison d'une onde de modulation (porteuse), qui est en général un signal triangulaire de fréquence élevée chargée d'imposer les périodes de modulation, avec une onde de commande ou de référence, modulatrice, qui représente la tension de sortie souhaitée, cette tension de référence est déterminé par un régulateur à partir de l'écart entre le courant mesuré et sa référence. Le signal de commutation est déterminé à

partir de l'intersection de ces deux signaux comme le montre la figure 3.8. La sortie du comparateur fournit l'ordre de commande des interrupteurs [7][28].

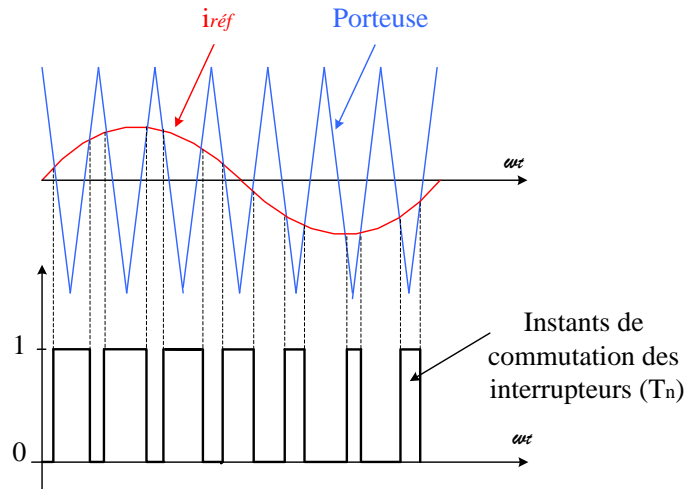


Figure 3.9. Commande Par Modulation de Largeur d'Impulsion MLI.

Deux paramètres caractérisent cette commande:

- L'indice de modulation « m ».

$$m = \frac{f_p}{f_m} \quad (3.26)$$

Avec $m > 1$.

- Le taux de modulation « r » appelé aussi coefficient de réglage en tension.

$$r = \frac{Vm_{max}}{Vp_{max}} \quad (3.27)$$

Avec $0 < r < 1$.

3.5 Régulation de la tension du bus continu de l'onduleur

La boucle de régulation de la tension du bus continu sert à maintenir la tension borne du condensateur à une valeur fixe, afin d'assurer la compensation des pertes dans le filtre et limiter les variations en régime dynamique. Les principales causes qui peuvent affecter cette tension sont les suivantes:

- Les pertes dans les interrupteurs;
- Les pertes dans le filtre de sortie.

Son principe est basé sur la comparaison entre la tension V_{dc} du bus continu et la consigne V_{dc}^* . L'erreur obtenu passe par un régulateur PI pour le maintenir limitée et oscillante autour de sa consigne [7][20].

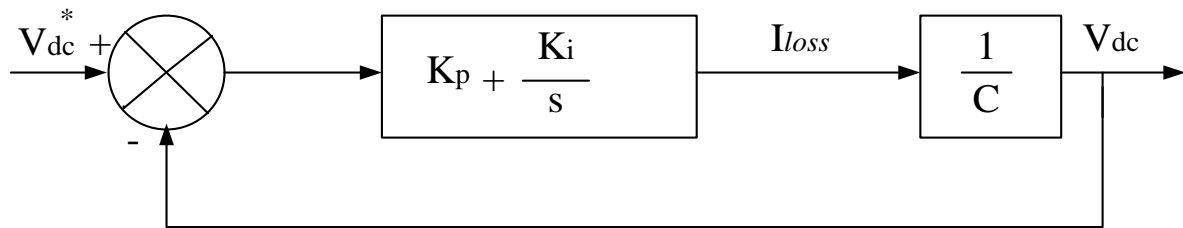


Figure 3.10. Boucle de régulation du bus continu.

A partir la figure 3.10, la fonction de transfert en boucle fermée de la régulation de la tension continue est la suivante :

$$F_{BF}(s) = \frac{1 + \frac{K_p}{K_i} s}{s^2 + 2\frac{K_p}{C}s + 2\frac{K_i}{C}} \quad (3.28)$$

La fonction de transfert obtenue est de deuxième ordre, La forme canonique du deuxième ordre est donnée comme suite:

$$FT(S) = \frac{\omega_c^2}{s^2 + 2\xi\omega_c s + \omega_c^2} \quad (3.29)$$

Par identification avec la forme canonique, les expressions des coefficients du régulateur PI sont comme suit :

$$K_i = \frac{1}{2} C \omega_c^2 \quad (3.30)$$

$$K_p = \xi \sqrt{2CK_i} \quad (3.31)$$

3.6 Simulation et interprétation

Dans le but de résoudre le problème de l'influence des charges non linéaires sur les courants de source, on opte pour la simulation que nous allons exposer dans cette partie.

La figure 3.11 représente le schéma *Simulink/SimPowerSystems* avec *Matlab* de l'ensemble réseau électrique, charge non linéaire équilibrée.

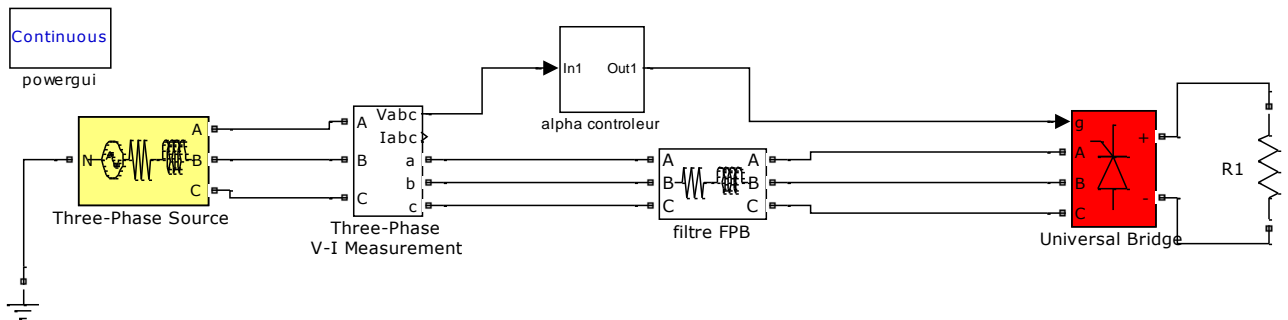


Figure 3.11. Le schéma *Simulink/SimPowerSystems* de l'ensemble réseau électrique, charge non linéaire équilibrée.

Les paramètres utilisés lors de la simulation sont:

Source:

Tension entre phase $U = 400 \text{ V}$

$$V = 230 \text{ V}$$

Fréquence

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

Impédance du réseau

$$L = 0.006 \text{ H}$$

$$r = 0.001 \Omega$$

La charge non linéaire:

Un pont redresseur à thyristors débite sur une charge résistive, avec des paramètres suivants:

Angle d'amorçage des thyristors $\alpha = 35^\circ$

La valeur de la charge résistive $R_{ch1} = 10 \Omega$

3.6.1 Simulation avant filtrage à charge équilibrée

a. Courant dans la source

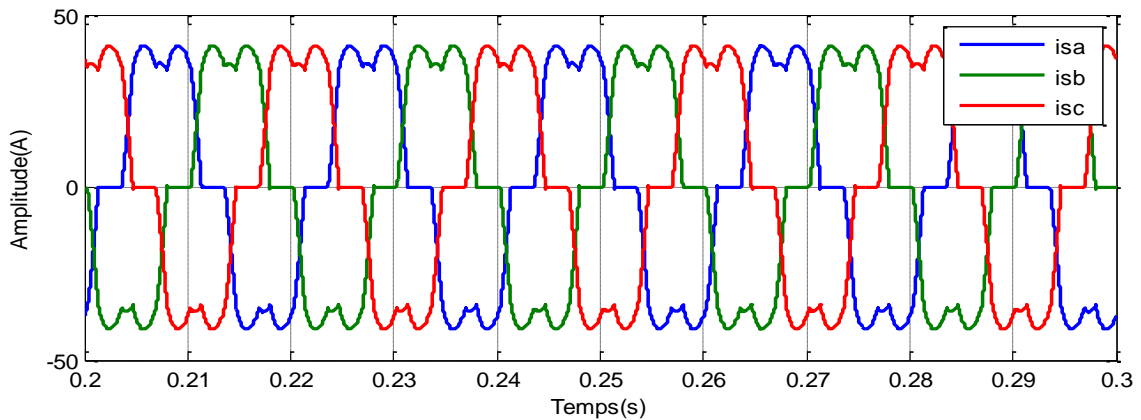
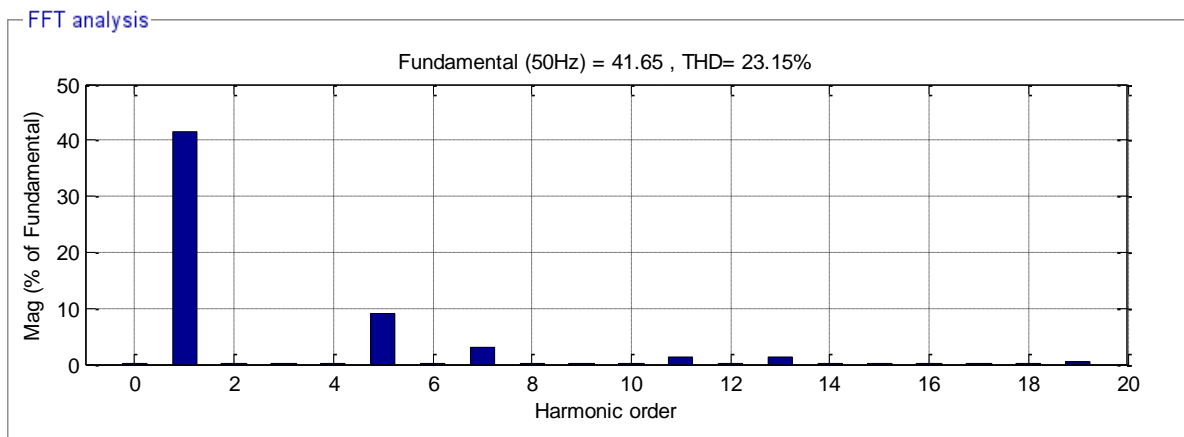


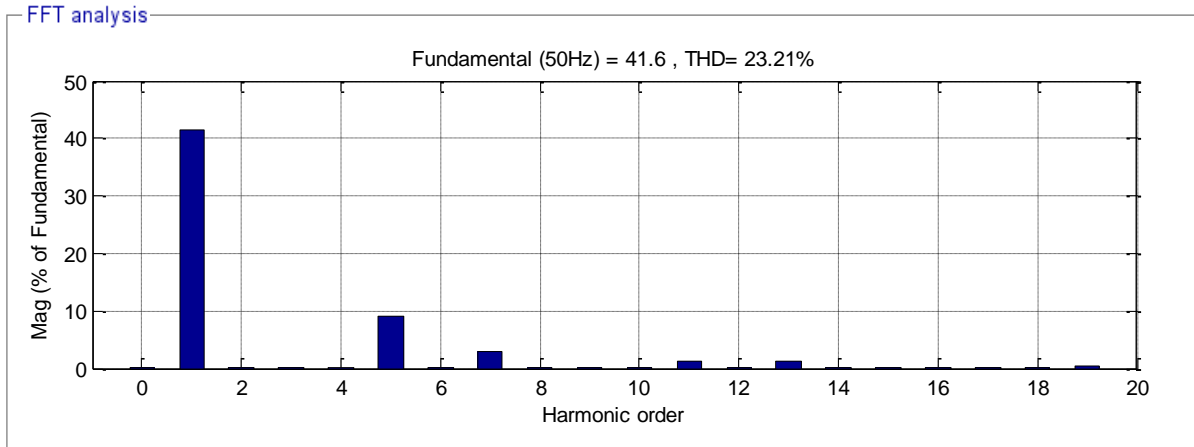
Figure 3.12: La forme d'onde des courants de charge avant filtrage.

Comme le montre la figure 3.12, les courants absorbés par la charge non linéaire ont une forme déformante, plus lointaine de la forme sinusoïdale. La propagation de ces ondes déformées provoque la pollution du réseau étudié.

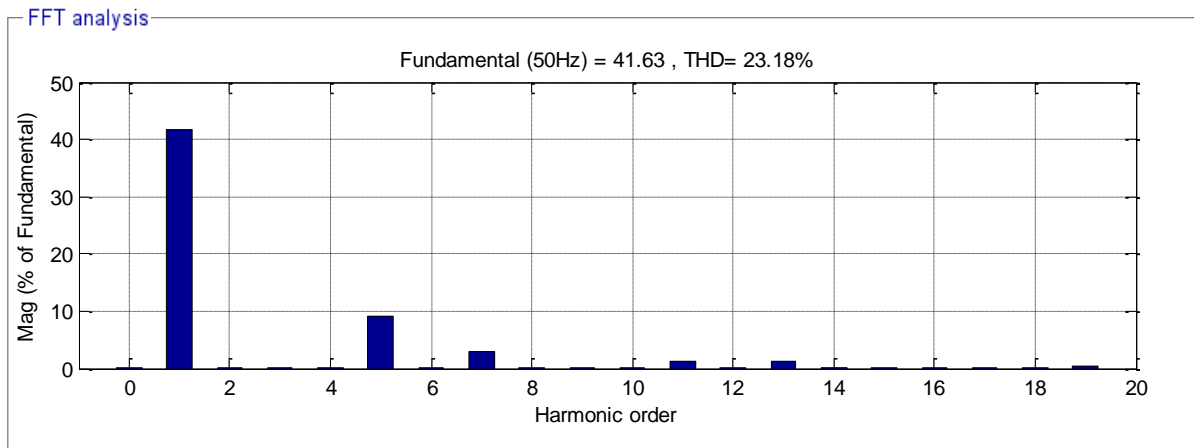
La figure 3.13, montre l'analyse harmonique des courants de charge (a, b et c).



(a) analyse spectrale de courant de charge (phase a)



(b) analyse spectrale de courant de charge (phase b)



(c) analyse spectrale de courant de charge (phase c)

Figure3.13. Analyse spectrale de courant de charge pour les phases a, b et c.

L'analyse spectrale de ces figures nous montre qu'en plus du fondamental, les courants absorbés par la charge non linéaire sont très riches en harmoniques du rang 5, 7, 11, 13...ect, avec un THD du fondamental égale à 23% pour les trois phases. Ces THDs sont égaux car notre charge utilisée est équilibrée. On compare ces résultats du THD avec celles imposées par la norme **CEI 61000-3-2**, on remarque qu'elles sont largement supérieures, donc cela exige un système de filtrage d'harmoniques.

3.6.2 Simulation après filtrage à charge équilibrée

Les paramètres utilisés lors de la simulation sont:

Filtre de raccordement $L_f=3.8e-3$ H

$r_f=0.06$ Ω

Bus continu $C=5e-3$ F

Tension de référence $V_{dc}^* = 500$ V

Avec

L_f, r_f : Impédance du filtre de raccordement.

C : Capacité du bus continu.

V_{dc}^* : Tension de référence du bus continu.

Régulateur PI

K_i : 600.

K_p : 700.

a. Courants de référence

La figure 3.14 présente la forme d'onde des courants injectés par le filtre actif à travers le filtre de raccordement dans les trois phases du réseau, ces ondes s'annulent avec les harmoniques détecté par le système d'identification du filtre actif dans le réseau électrique a fin d'avoir un signal sinusoïdale .

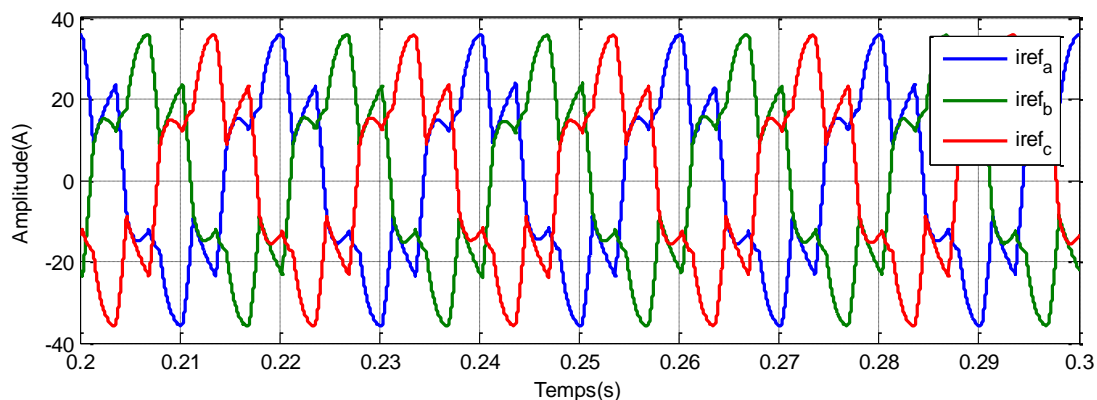


Figure3.14. Courants de références qu'on souhaite injecté dans le réseau.

b. Courant de référence et courant réel

Le courant de référence que l'onduleur doit suivre représenté en rouge dans la figure 3.14 à l'aide d'une commande spécifique qui s'appelle la commande par hystérésis, cette commande permet à l'onduleur de reproduire un courant de puissance du même signal représenté en bleu avec une faible tolérance acceptable, ce signal est l'onde la plus proche de l'opposé des harmonique qui propages dans cette phase.

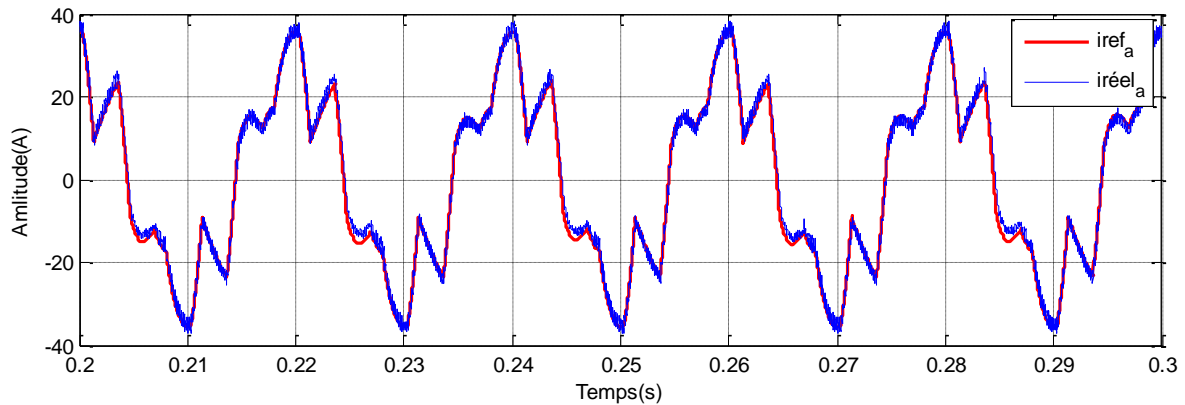


Figure3.15. Courant de référence et le courant réel.

c. Tension V_{dc} du bus continu

La figure ci-contre représente l'allure de tension du bus continu qu'est initialement nul et qui se charge à travers les phases du réseaux, le condensateur se charge et stabilise grâce à une boucle de régulation connecté directement au bloc d'identification à fin de réguler les courants de référence.

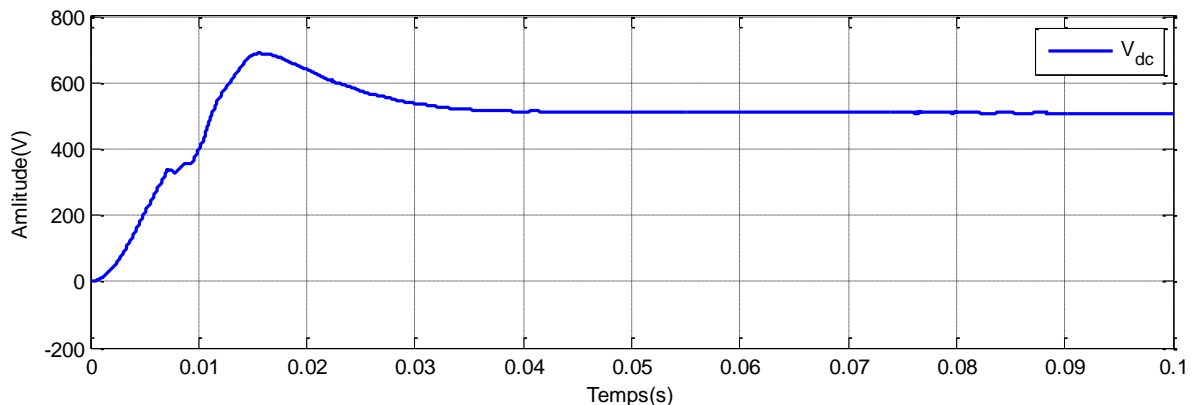


Figure 3.16. Tension V_{dc} du bus continu.

d. Courant de source après filtrage à charge équilibré

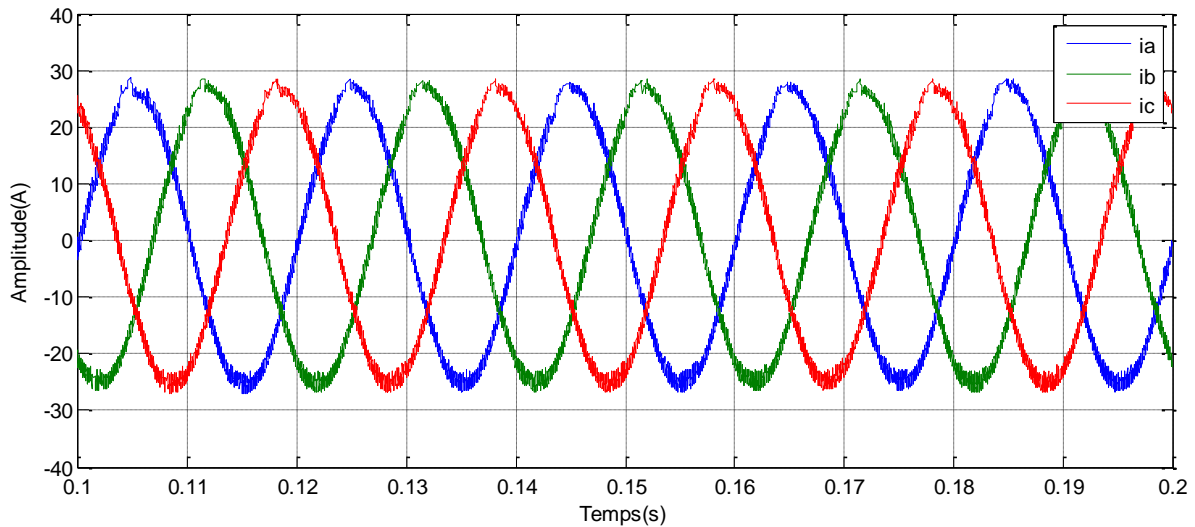
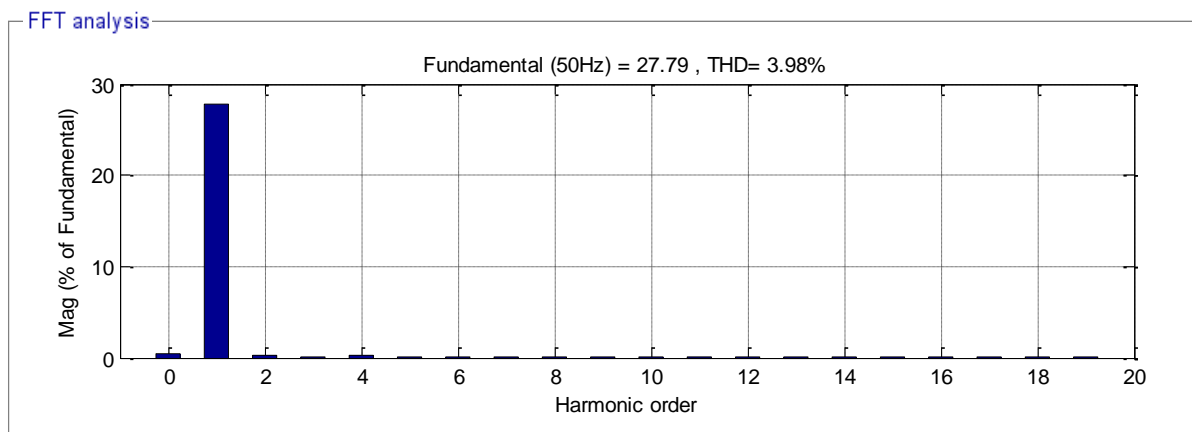
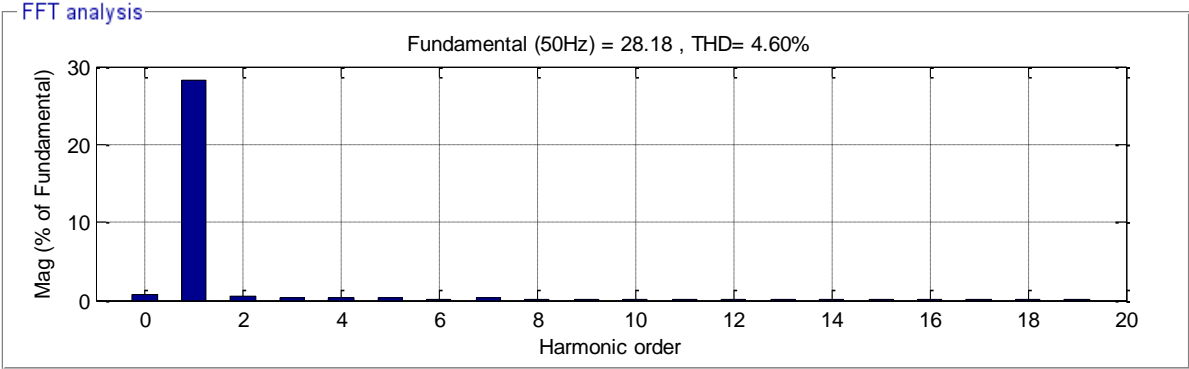


Figure3.17. Courant de source après filtrage en régime permanent.

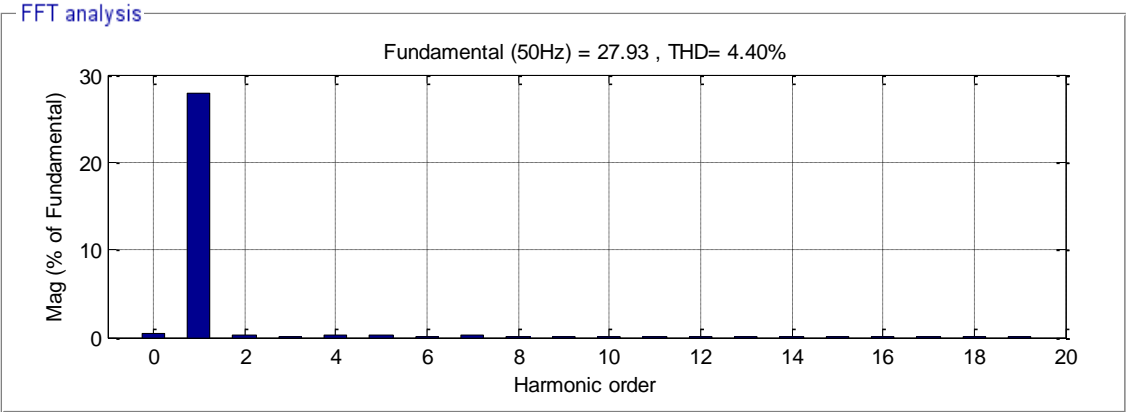
La figure ci-dessus, nous montre les courants triphasés générés par la source après l'élimination des harmoniques qui circulaient dans les trois phases du réseau. On remarque que les courants de la source sont bien compensés et ne présente plus de perturbation et ont une forme plus proche d'une sinusoïde, on comparant avec ceux de la figure 3.12.



(a) analyse spectrale de courant de charge (phase a)



(b) analyse spectrale de courant de charge (phase b)



(c) analyse spectrale de courant de charge (phase c)

Figure3.18. Analyse spectrale de courant de charge pour les phases a, b et c.

3.6.3 Simulation avant filtrage à charge déséquilibrée

La figure 3.19 représente le schéma *Simulink/SimPowerSystems* avec *Matlab* de l'ensemble réseau électrique, charge non linéaire déséquilibrée.

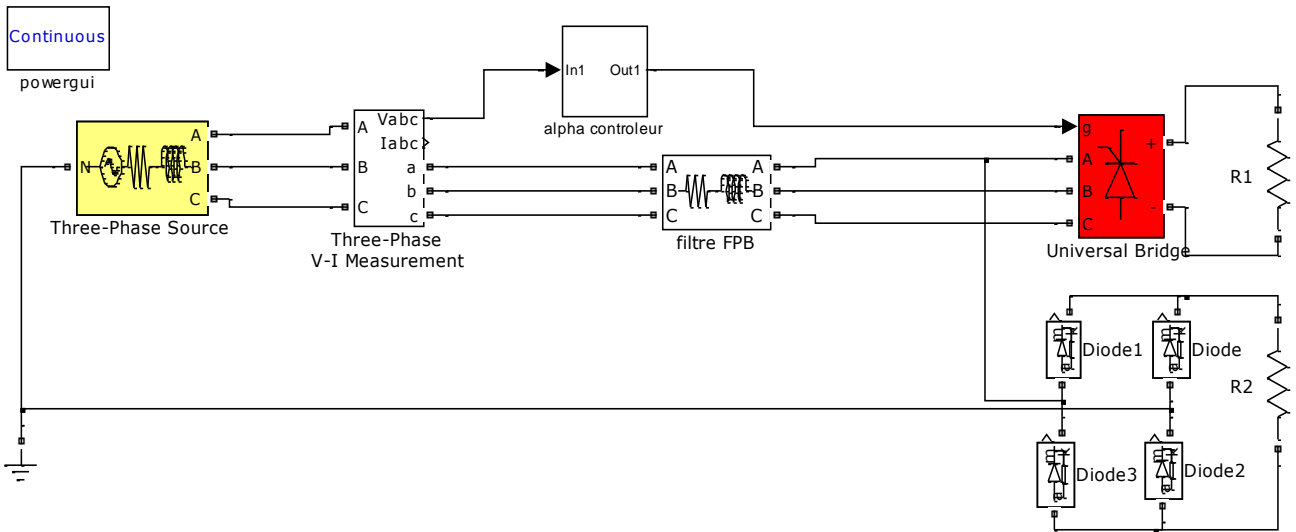


Figure 3.19. Le schéma *Simulink/SimPowerSystems* de l'ensemble réseau électrique, charge non linéaire déséquilibrée.

La résistance $R_{ch2}=90 \Omega$

a. Le courant dans le neutre avant compensation à charge déséquilibrée

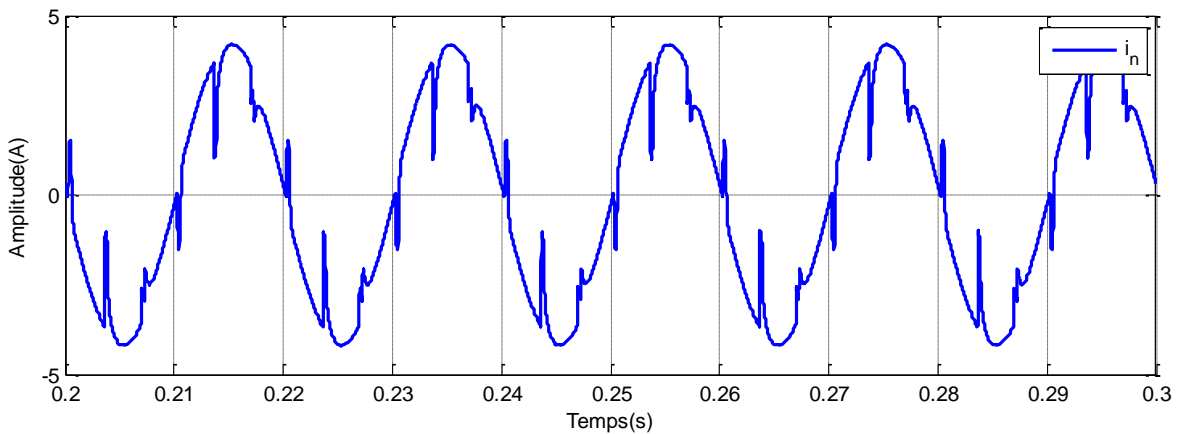


Figure 3.20. Le courant dans le neutre avant compensation.

Le signal du courant dans le neutre est presque sinusoïdale, qui est le résultat de l'addition des courants de charge et l'existence d'un tel courant est causée par le déséquilibre des courants de charge, avec une valeur d'amplitude considérable qui peut s'amplifier avec un déséquilibre simultané sur les trois phases.

Pour la compensation de ce courant et le redressement des courants de source, plusieurs solutions sont envisagées dont on choisit dans le cadre de notre travail le filtrage actif, ce choix est motivé par sa facilité de mise en œuvre.

b. Courant de source avant filtrage à charge déséquilibrée

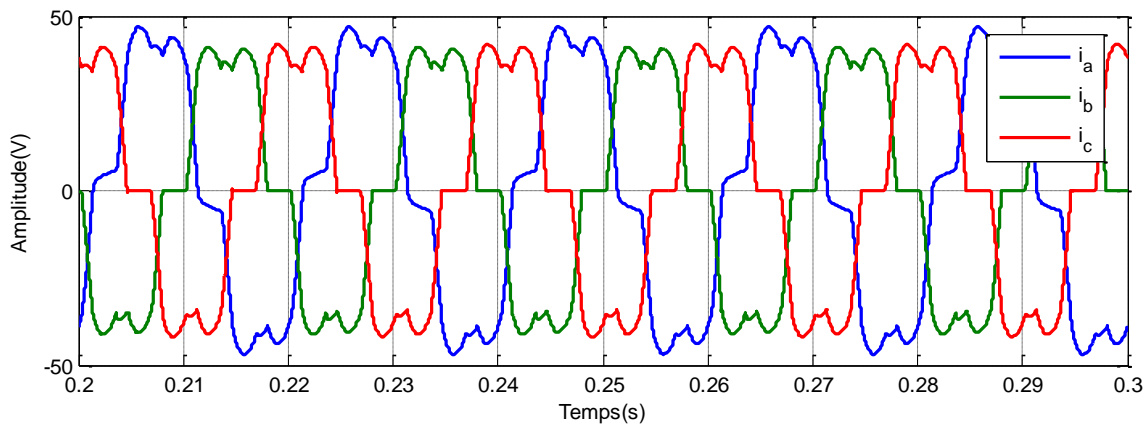
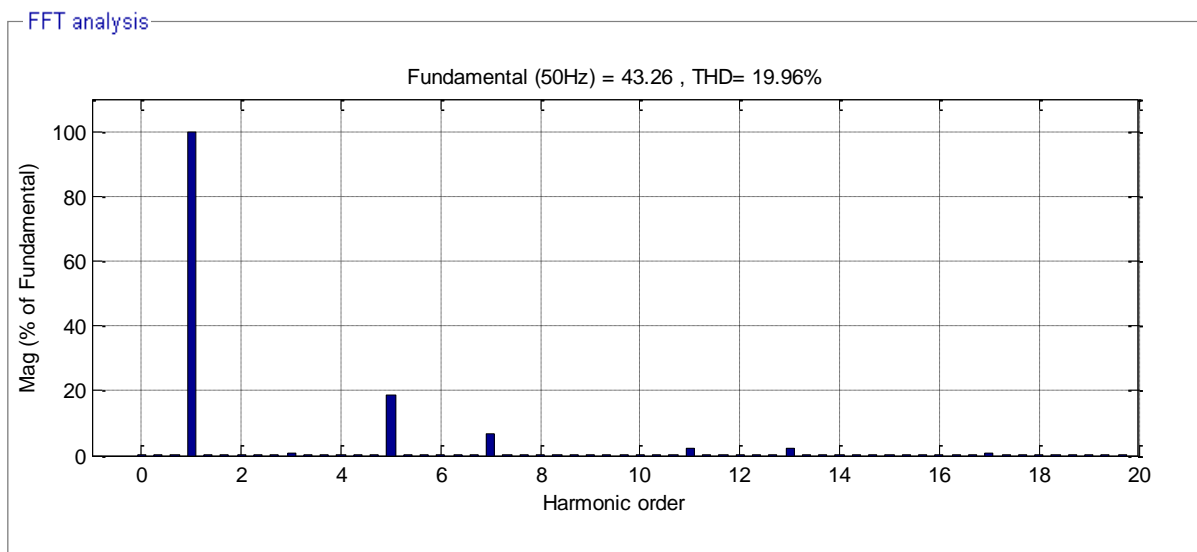
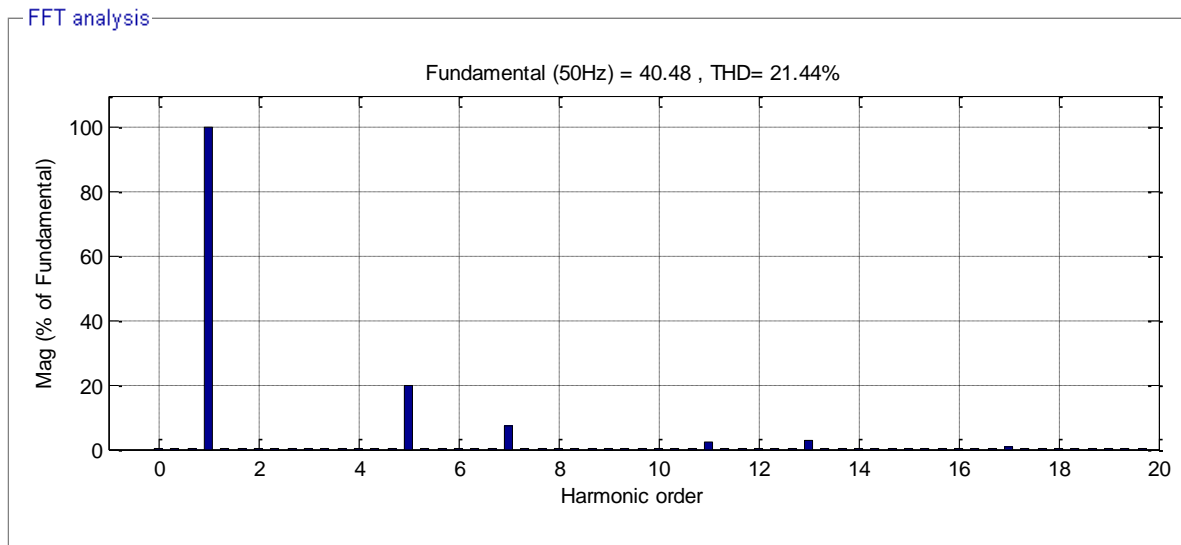


Figure 3.21. Courant de source avant filtrage.

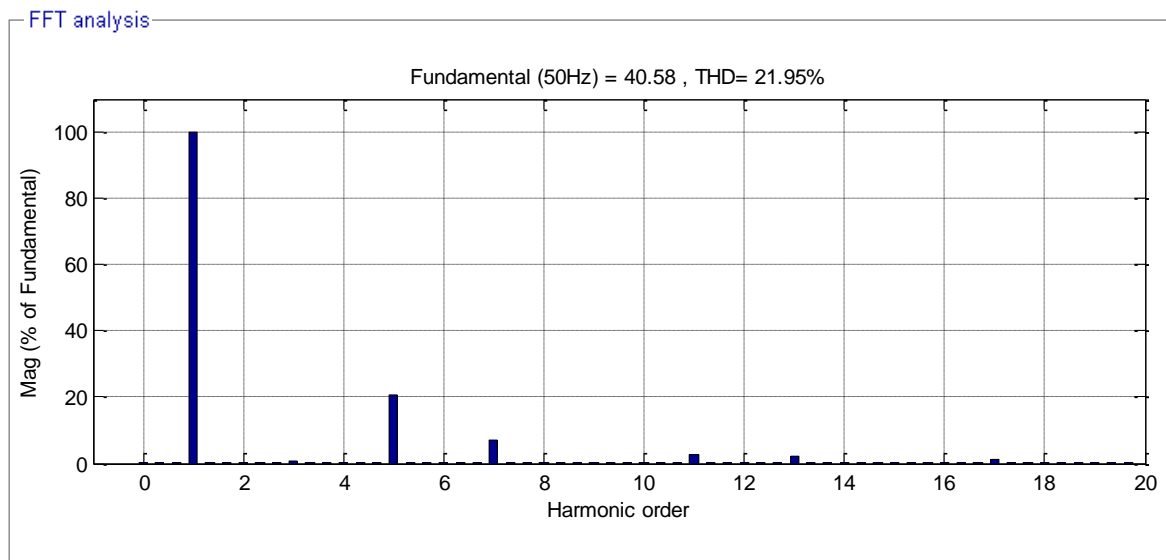
Les courants consommé par la charge montré dans cette figure est déséquilibré causé par la charge monophasé et l'allure loin d'être sinusoïdale. Ces ondes déformantes se propage et cause des perturbation sur le réseau étudié .



(a) analyse spectrale de courant de charge (phase a)



(b) analyse spectrale de courant de charge (phase b)



(c) analyse spectrale de courant de charge (phase c)

Figure 3.22. Analyse spectrale de courant de charge pour les phases déséquilibrées(a, b et c).

L'analyse harmonique des courants de phase (a) consommés par la charge principale plus la charge monophasé nous montre un Taux de Déformation Harmonique très élevé de 19%

3.6.4. Simulation après filtrage à charge déséquilibrée

a. Courant de source après filtrage

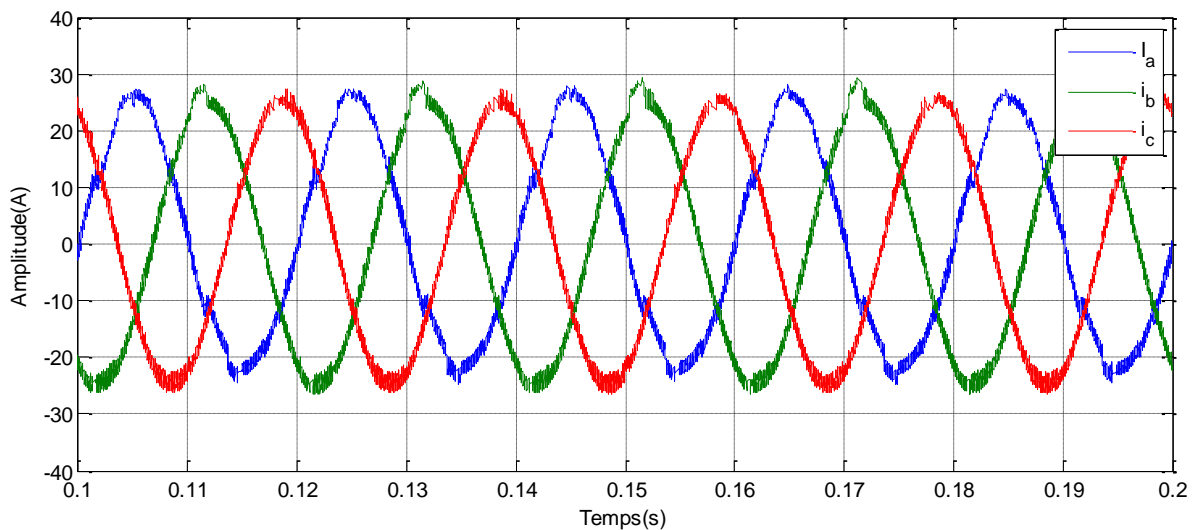
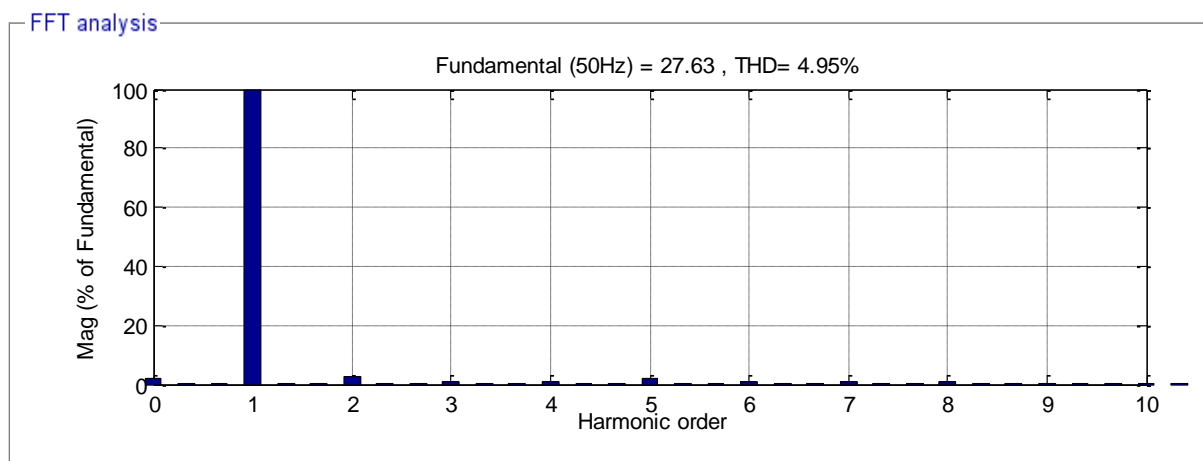


Figure 3.23. Courant de source après filtrage.

La figure ci-dessus, nous montre les courants triphasés générés par la source après compensation et l'élimination des harmoniques qui circulaient dans les trois phases du réseau. On remarque que les courants coté source ne sont plus perturbés par les harmoniques comparée avec la figure 3.21. Ces signaux ont une forme plus proche d'un sinusoïde, ainsi que les amplitudes de ces trois phases sont égales, il ont résulte un système triphasé équilibré.



(a) analyse spectrale de courant de charge (phase a)

Figure 3.24. Analyse spectrale de courant de charge pour les phases a, b et c.

L'analyse spectrale de la phase (a) après compensation est représenté sur la figure ci-dessus :

L'apparition de l'harmonique de fréquence 0Hz ce qu'on appel rang zéro, veut dire que c'est un courant de signal continu.

Les amplitudes des harmoniques de rang 3, 5, 7, 11, 13, 17, 19.....etc. Sont plus proche de zéro et le THD est réduit de 21.39% à 4.95%.

b. Le courant dans le neutre après compensation

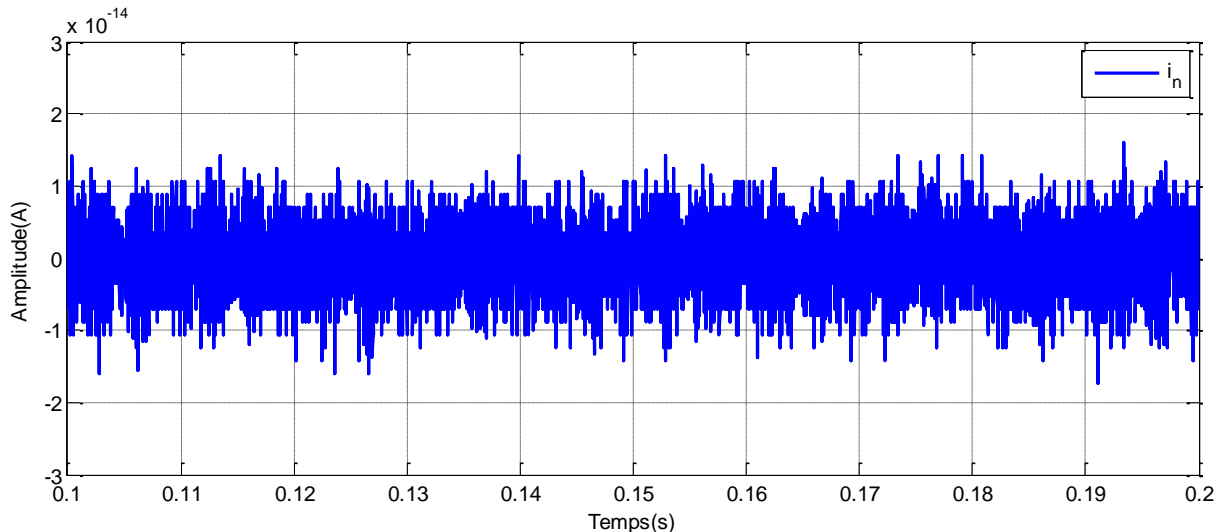


Figure 3.25. Le courant dans le neutre après compensation.

Après compensation du déséquilibre, nous observons la disparition du courant homopolaire qu'est égal à zéro (de 3A à une valeur de 10^{-14} A).

On constate que notre système de filtrage étudié ne repose pas seulement sur l'élimination des harmoniques mais aussi de compenser le déséquilibre des phases provoqué par la charge secondaire.

Conclusion

Notre étude dans cette partie a pour objectif de contrôler des perturbations et de commander le filtre actif à quatre bras à base d'un onduleur de tension.

Nous avons simulé sous Matlab un réseau électrique au quel une charge non linéaire est y raccordée et nous avons obtenus les résultats avant et après compensation via un filtre actif parallèle d'où nous avons déduit l'efficacité de ce système de filtrage. Après l'intervention de notre système de compensation, le THD est bien amélioré à des valeurs qui s'adapte à la normes standard **CEI 61000-3-2**.

Pour assurer que notre filtre actif est à la hauteur d'agir dans toutes les situations critiques, nous avons déséquilibré la charge, après simulation, une compensation du déséquilibre est effectuée.

D'après les résultats obtenus dans cette partie, on peut donner les qualités requises de filtrage actif étant une solution technique qui contribue au raffinement du qualité d'énergie électrique.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Dans un réseau de distribution, des différentes charges sont connectées, elles peuvent être linéaires ou non linéaires, équilibrées ou déséquilibrées. Une charge non linéaire, à base d'électronique de puissance est la cause principale, de perturbations dans un réseaux de distribution. Cette charge impose un courant qui n'est pas proportionnel à la tension sinusoïdale, c'est-à-dire déformés.

Dans ce travail, nous avons effectué une analyse et une simulation pour le filtre actif à quatre fils quatre bras, qui est pour objectif la dépollution du réseau électrique de ces perturbations générées par les charges polluantes. Pour cela, nous avons partagé ce mémoire en trois chapitres, qui sont les suivants :

Dans un premier temps, nous avons présenté les sources de perturbation, leurs origines ainsi que leurs impacts sur le réseau et les équipements électriques, comme on a présenté les solutions envisageables pour réduire leurs effets et même les éliminer. Parmi les solutions proposées, le filtrage actif qui est une nouvelle solution pour la dépollution harmonique.

Deuxièmement nous avons étudié le filtre actif à quatre fils quatre bras, sa structure générale en présentant sa partie puissance ainsi que son principe de fonctionnement. Une modélisation pour le filtre actif, la charge non linéaire et le réseau électrique a été faite.

Finalement, nous avons étudié la partie contrôle-commande, nous avons présenté la méthode d'identification des courants de références avec la méthode des puissances instantanées. Comme nous avons présenté les deux stratégies de contrôle des courants, la commande par Hystérésis) et la commande par Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI). Une régulation de la tension du bus continu a été faite.

L'utilisation du logiciel Matlab Simulink/SimPowerSystems, nous a permet de simuler un système avec une charge équilibré et une charge déséquilibrée et afin de faire face aux différents problèmes posés sur la pollution et le filtrage des réseaux. Les résultats du la Simulation obtenus ont montré les avantages du filtre actif sur le filtrage des harmoniques et la compensation de déséquilibre par une analyse spectrale des harmoniques.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] **Djaffar OULD ABDESLAM**, " Techniques neuromimétiques pour la commande dans les systèmes électriques: application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basse tension", thèse doctorat, université de HAUTE-ALSACE, 08 décembre 2005.
- [2] "**DOSSIER Puissance, Energie et Perturbations « Harmoniques»**", Fiche d'application « **Harmoniques**», ed 1-Service Communication 05/2008, France, 3pages, Pdf.
- [3] **Abdeslem SAHLI**, "Filtrage actif et contrôle de puissances: application aux systèmes photovoltaïques interconnectés au réseau", mémoire Magister, Université FERHAT Abbas-Sétif- UFAS (ALGERIE), 2012.
- [4] **Farid HAMOUDI**, " Contribution aux stratégies de commande avancées d'un filtre actif shunt à quatre fils", thèse doctorat, Université El-Hadj Lakhder Batna, 27 Juin 2012.
- [5] **R. Calvas**, " Les perturbations électriques en BT ", Cahier technique n° 141, 2001, édition-Schneider Electric, Grenoble-France, 30 pages.
- [6] **Houari BOUDJELLA** ,"Contrôle des puissances et des tensions dans un réseau de transport au moyen de dispositifs FACTS (SVC)", mémoire magister, Université Djillali Liabes Sidi Bel Abbes, 23 Janvier 2008.
- [7] **Mohamad Alaa Eddin ALALI**," Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension", thèse doctorat, Université Louis Pasteur – Strasbourg I-France, 12 Septembre 2002.
- [8] **Aziz BOUKADOUM**, " Contribution à l'analyse et la réduction de la pollution harmonique dans le réseau électrique", mémoire magister, université BADJI MOKHTAR ANNABA, 21 Octobre 2007.
- [9] **Abdelkader YOUSFI**, " Amélioration de la qualité d'énergie électrique en utilisant un onduleur de tension à cinq niveaux", mémoire magistère, Université Hassiba Benbouali-Chlef, 27 Mai 2008.
- [10] **Christophe PRÉVÉ, Robert JEANNOT**, "CAHIER TECHNIQUES SCHNEIDER-ELECTRIC ", «Guide de conception des réseaux électriques sur les harmoniques», n° : 6 883 427/A, Février 1997, 930p.
- [11] **Omar BOUHALLI**, " Contribution des convertisseurs multiniveaux au raccordement de la production d'origine éolienne sur un réseaux électrique", thèse doctorat, Ecole Nationale Polytechnique Ecole Centrale de Lille, 19 Avril 2007.
- [12] **Abdelmadjid CHAOUI**, " Filtrage actif triphasé pour charge non linéaire", thèse doctorat, Ecole supérieure d'ingénieurs de Poitiers, 05 Octobre 2010.

- [13] **J. Schonek**, " Les singularités de l'harmonique 3", Cahier technique n° 202, 2000, édition-Schneider Electric, Grenoble-France, 20 pages.
- [14] **E. Bettega et J-N. Fiorina**, " Harmoniques : convertisseurs propres et compensateurs actifs ", Cahier technique n° 183, 2000, édition-Schneider Electric, Grenoble-France, 35 pages.
- [15] **Sanae RECHKA**, " Étude de méthodes de filtrage des harmoniques dans les réseaux électriques de distribution", thèse doctorat, Université du Québec à trois-rivières, Avril 2002.
- [16] **Redouane OUGUERGOUZ, Asmahane MOUALEK**, "Analyse et simulation d'un filtre actif à quatre fils à base d'un onduleur à trois niveaux", mémoire master, Université de Béjaia, 2015/2016.
- [17] **Abdelfettah BOUSSAID**, "Filtrage actif des harmoniques dans les réseaux électriques. Contribution à l'amélioration de l'énergie électrique", thèse doctorat, Université des frères Mentori-Constantine, 05 Janvier 2017.
- [18] **Said ZELLOUMA, Abdellah ZIDANE**" Compensation des harmoniques et de la puissance réactive à l'aide du filtre actif parallèle ", mémoire master, Université Echahid Hamma Lakhder d'El-Oued, Juin 2015.
- [19] **Salim CHENNAI**, "Etude, Modélisation & Commande des Filtres Actifs : Apport des Techniques de l'Intelligence Artificielle", thèse doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra, 19 Septembre 2013.
- [20] **Abdelfettah BOUSSAID**, " Filtrage actif des harmoniques dans les réseaux électriques. Contribution à l'amélioration de l'énergie électrique ", mémoire magister, Université des frères MENTOURI - Constantine, 5 Janvier 2017.
- [21] **Rabie ALLAHOUM**, " Contribution à l'étude du filtre actif parallèle de puissance à trois niveaux ", mémoire magister, Université El-Oued, 2012.
- [22] **Boubakeur BOUGHAZI**, " Etude et réalisation d'un filtre actif parallèle de puissance", mémoire magister, Université d'Oran, 28 Janvier 2013.
- [23] **Tarek BENNAIDJA**, " Filtrage actif pour les réseaux déséquilibrés et distordus", mémoire magister, Université Ferhat Abbas- Sétif-1-, 2014.
- [24] **Moussa OUSSAMA**, "Etude des harmoniques et techniques de commandes du filtre actif ", mémoire magister, Université de Batna 2.
- [25] **Mohamed Muftah ABDUSALAM**, "Structures et stratégies de commande des filtres actifs parallèle et hybride avec validations expérimentales", thèse doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, 29 mai 2008.

- [26] **Kamel DJAZIA**, "Etude des filtres actifs pour réseaux déséquilibrés et distordus", thèse doctorat, Université Ferhat ABBAS – Sétif 1, 21 Octobre 2015.
- [27] **Abdelhamid HAMADI**, "Contribution à l'étude des filtres hybrides de puissance utilisés pour améliorer la qualité de l'énergie dans le réseau électrique de distribution ", thèse doctorat, Ecole de technologie supérieure, Université du Québec, 14 Septembre 2010.
- [28] **Mustapha SARRA**, "Contribution à l'étude des filtres actifs hybrides", thèse doctorat, Université Ferhat ABBAS – Sétif 1, 29 mai 2008.
- [29] **Amar OMEIRI**, " Simulation d'un filtre actif parallèle de puissance pour la compensation des harmoniques de courant ", thèse doctorat, Université BADJI Mokhtar Annaba, 2007.

Résumé

Le travail présenté dans ce mémoire s'intéresse à l'étude d'une technique de compensation, via un filtre actif à quatre fils, à base d'un onduleur de tension. Il a pour but de réduire et d'éliminer les perturbations causées par des charges non linéaires. L'identification des courants de références, le contrôle de la tension du bus continu et le contrôle des courants injectés par l'onduleur ont été élaborés. Pour l'identification, nous avons développé la méthode des puissances instantanées, grâce à une PLL (Boucle à verrouillage de phase) qui nous permet d'avoir une bonne identification de la séquence directe fondamentale des tensions perturbées. Pour le contrôle de l'onduleur, nous avons utilisé la commande à hystérésis à fin d'engendrer des courants opposés aux harmoniques polluants. Finalement une simulation a été faite avec des résultats satisfaisants.

Abstract

The work presented in this master report focuses on the study of a compensation technique, via an active four-wire filter, based on a voltage inverter. Its purpose is to reduce and eliminate disturbances caused by non-linear loads. Identification of the reference current, control of the DC bus voltage and control of the currents injected by the inverter have been developed. For identification, we have developed the instantaneous power method, thanks to a PLL (Phase Locked Loop) which allows us to have a good identification of the fundamental direct sequence of disturbed voltages. For the control of the inverter, we used the hysteresis control to generate currents opposing polluting harmonics. Finally, a simulation was made with satisfactory results.