

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE
N° D'ORDRE : CSE 252



DOMAINE : SCIENCE ET TECHNOLOGIE
FILIERE : GENIE ELECTRIQUE
OPTION : COMMANDE DES SYSTEMES
ELECTRIQUES

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Par : TELLI Abdelwahab
CHOUIDIRA Ibrahim

Intitulé

COMMANDE PAR LOGIQUE FLOUE D'UN
FILTRE ACTIF PARALLELE AVEC CORRECTION
DU FACTEUR DE PUISSANCE

Soutenu devant le jury composé de :

Mr. MEKKI Hamza	Université M'sila	Président
Mr. BEDBOUDI Mohamed	Université M'sila	Rapporteur
Mr. HAMMOUCHE Abdelaziz	Université M'sila	Examineur

Année universitaire : 2016 /2017



Remerciements

Nous rendons nos profondes gratitude à Dieu le tout puissant qui nous a aidés à réaliser ce modeste travail.

Nous somme très reconnaissant à Monsieur BEDBOUDI Mohamed pour nous avoir encadré et en particulier son soutien, ses conseils et sa patience. Son expérience et sa connaissance ont contribué à notre formation scientifique.

Nous tenons à remercier vivement les membres de jury d'examen pour avoir accepté d'évaluer ce travail.

Nous exprimons toute nos gratitude à nos parents, nos frères, nos sœurs qui nous ont apporté soutien et encouragements tout au long de nos études. Nous leurs réservons une pensée toute particulière.

Enfin, merci à nos amis qui ont partagé au quotidien nos espoirs et nos inquiétudes, qui nous ont réconforté dans les moments difficiles et avec qui nous avons partagé d'inoubliables instants de détente.

SOMMAIRE

Introduction générale.....	01
Chapitre I	perturbations et pollution harmonique des réseaux électriques
I.1 Introduction.....	02
I.2 Paramètres de la qualité de l'énergie électrique.....	02
I.2.1 Creux et coupures de tension.....	02
I.2.2 Fluctuations de tension.....	03
I.2.3 Déséquilibre du système triphasé de tension.....	03
I.2.4 Variation de fréquence.....	04
I.2.5 Charges linéaires et non linéaires.....	04
I.3 Les harmoniques.....	05
I.3.1 Effets des harmoniques.....	05
I.3.2 Source d'harmoniques.....	07
I.4 Caractérisation des perturbations harmoniques.....	07
I.4.1 Grandeur harmonique.....	08
I.4.2 Rang de l'harmonique.....	08
I.4.3 Valeur efficace d'une grandeur alternative.....	08
I.4.4 Série de Fourier.....	08
I.4.5 Taux d'harmonique de distorsion.....	09
I.4.6 Facteur de puissance F_p	09
I.4.7 Facteur de déformation V	09
I.4.8 Spectre de fréquence.....	09
I.5 Influence des harmoniques sur le facteur de puissance.....	10
I.6 Les solutions traditionnelles.....	11
I.6.1 Utilisation d'inductances anti-harmoniques.....	11
I.6.2 Augmentation de la puissance de court-circuit.....	11
I.6.3 Les filtres passifs.....	11
I.6.3.1 Filtres passifs résonants.....	11
I.6.3.2 Filtres passifs amortis.....	12
I.6.4 Les avantages et les inconvénients des filtres passifs.....	12
I.7 Solutions modernes.....	13
I.7.1 Filtres actifs.....	13
I.7.1.1 Filtre actif parallèle.....	13
I.7.1.2 Filtre actif série.....	14
I.7.1.3 Combinaison filtre actif série-parallèle.....	14
I.7.1.4 Filtrage hybride.....	15
I.8 Conclusion.....	15
Chapitre II	Filtrage actif parallèle et identification des courants harmoniques
II.1 Introduction.....	16
II.2 Rôle du filtre actif.....	16
II.3 Filtre actif parallèle.....	17
II.3.1 Structure générale d'un filtre actif parallèle.....	17
II.4 Onduleur de tension à deux niveaux.....	18
II.4.1 Structure générale.....	18
II.4.2 Modélisation de l'onduleur triphasé à deux niveaux.....	18

II.5 Modélisation du réseau électrique.....	20
II.6 La charge polluante.....	21
II.6.1 Le redresseur à thyristors.....	21
II.6.2 Etude de la tension de charge.....	22
II.6.3 Etude du courant.....	23
II.6.3.1 Le courant de charge.....	23
II.6.3.2 Les courants des lignes.....	24
II.6.3.3 Développement en série (harmonique courant).....	24
II.7 Résultats de simulation.....	26
a-Pour $\alpha=0^\circ$	26
b-Pour $\alpha=30^\circ$	27
c-Pour $\alpha=60^\circ$	28
II.8 Interprétation.....	29
II.9 Identification des courants harmoniques de référence.....	29
II.9.1 Méthodes du domaine fréquentiel.....	29
II.9.2 Méthode du domaine temporel.....	29
II.10 Stratégie d'identification.....	30
II.11 Principe du fonctionnement de la méthode des puissances instantanées.....	30
II.11.1 Généralités sur les puissances instantanées.....	30
II.11.2 Séparation des puissances.....	31
II.12 Calcul des courants perturbateurs.....	32
II.12.1 Algorithme d'identification des courants harmoniques.....	33
II.13 Résultats de simulation.....	33
a-Pour $\alpha=0^\circ$	33
b-Pour $\alpha=30^\circ$	34
c-Pour $\alpha=60^\circ$	35
II.14 Interprétation.....	36
II.15 Conclusion.....	37

Chapitre III

Commande par logique floue du filtre actif parallèle

III.1 Introduction.....	38
III.2 La logique floue.....	38
III.2.1 Domaine d'application.....	38
III.3 Principe de la logique floue.....	38
III.4 Eléments de base de la logique floue.....	39
III.4.1 Variables linguistiques.....	40
III.4.2 Ensembles floue.....	40
III.4.3 Fonctions d'appartenance.....	40
III.4.4 Opérateurs de la logique floue.....	41
III.4.5 Règles floues.....	42
III.5 Commande par logique floue.....	42
III.5.1 Constitution d'un système floue	42
III.5.1.1 Interface de fuzzification.....	43
III.5.1.2 Base de règles.....	43
III.5.1.3 Mécanisme d'inférence floue.....	43
III.5.1.4 Interface de Défuzzification.....	43
III.6 Stratégies de commande de l'onduleur deux niveaux.....	44
III.6.1 Commande de l'onduleur par hystérésis à bande fixe.....	45

III.6.2 Commande par hystérésis à bande floue.....	45
III.7 Principe de la commande hystérésis à bande floue.....	47
III.8 Association réseau-charge non linéaire- onduleur avant et après compensation.....	47
III.9 Résultats de simulation.....	49
III.9.1 Commande par hystérésis pour bande fixe $\Delta h=0.1A$	49
a-Pour $\alpha=0^\circ$	49
b-Pour $\alpha=30^\circ$	50
c-Pour $\alpha=60^\circ$	51
III.9.2 Commande par hystérésis pour bande fixe $\Delta h=1A$	52
a-Pour $\alpha=0^\circ$	52
b-Pour $\alpha=30^\circ$	53
c-Pour $\alpha=60^\circ$	54
III.10 Interprétation.....	55
III.11 Commande hystérésis à bande floue.....	56
a-Pour $\alpha=0^\circ$	56
b-Pour $\alpha=30^\circ$	57
c-Pour $\alpha=60^\circ$	58
III.12 Interprétation.....	59
III.13 Variation de charge (pour $\alpha=0^\circ$).....	60
III.14 Interprétation.....	61
III.15 Réglage de la tension d'entrée de l'onduleur.....	61
III.15.1 Résultat de simulation.....	62
III.16 Interprétation.....	63
III.17 Conclusion.....	63

Chapitre IV Filtrage actif parallèle avec compensation de l'énergie réactive

IV.1 Introduction.....	64
IV.2 Effets de circulation de l'énergie réactive.....	64
IV.3 Principe du filtrage actif avec compensation d'énergie réactive.....	64
IV.4 Principe de la méthode.....	65
IV.4.1 Expression du courant de charge dans le repère (α, β)	66
IV.4.2 Mise en œuvre de deux filtres passe bas pour l'extraction du courant de source de référence.....	66
IV.5 Application de principe du filtrage actif avec compensation de l'énergie réactive sur une charge non linéaire.....	67
IV.6 Résultats de simulation.....	68
a-Pour $\alpha=0^\circ$	68
b-Pour $\alpha=30^\circ$	69
c-Pour $\alpha=60^\circ$	70
IV.7 Interprétation.....	71
IV.8 Conclusion.....	71
Conclusion générale.....	72
Annexe.....	74

LISTE DES FIGURES

Liste des figures

Figure I.1 : Creux de tension et coupure.....	03
Figure I.2 : Fluctuations de tension.	03
Figure I.3 : Déséquilibre du système triphasé de la tension.....	04
Figure I.4 : Variation de fréquence.....	04
Figure I.5 : Les harmoniques.....	05
Figure I.6 : Le spectre des harmoniques du courant de la charge polluante.....	09
Figure I.7 : Diagramme de Fresnel des puissances.....	10
Figure I.8 : Filtre passif résonnant.....	12
Figure I.9 : Filtre amorti.....	12
Figure I.10 : Filtre actif parallèle.....	13
Figure I.11 : Filtre actif série.....	14
Figure I.12 : Combinaison Filtre parallèle-série UPQC.....	14
Figure II.1 : Principe du filtrage actif.....	16
Figure II.2 : Structure générale du filtre actif parallèle.....	17
Figure II.3 : Schéma d'un onduleur de tension triphasé.....	18
Figure II.4 : Interrupteurs de puissance.....	18
Figure II.5 : Modèle équivalent de l'onduleur à deux niveaux.....	19
Figure II.6 : Schéma symbolique d'un réseau électrique.....	21
Figure II.7 : Redresseur à thyristors.....	22
Figure II.8 : La forme rectangulaire du courant d'entrée du pont à thyristor.....	24
Figure II.9 : Tension de charge et courant de charge.....	26
Figure II.10 : Courant de ligne I_{c1} et son spectre avant filtrage.....	26
Figure II.11 : Courants de ligne I_{c2} et I_{c3}	26
Figure II.12 : Tension de charge et courant de charge.....	27
Figure II.13 : Courant de ligne I_{c1} et son spectre avant filtrage.....	27
Figure II.14 : Courants de ligne I_{c2} et I_{c3}	27
Figure II.15 : Tension de charge et courant de charge.....	28
Figure II.16 : Courant de ligne I_{c1} et son spectre avant filtrage.....	28
Figure II.17 : Courants de ligne I_{c2} et I_{c3}	28
Figure II.18 : Séparation des puissances.....	32
Figure II.19 : Schéma bloc de la méthode d'identification des courants harmoniques.....	33
Figure II.20 : Courant harmonique I_{1har} identifié et son spectre.....	33
Figure II.21 : Courant harmonique I_{2har} et I_{3har} identifié.....	34

Figure II.22 : Spectre des courants de ligne et d'harmonique identifié.....	34
Figure II.23 : Courant harmonique I_{1har} identifié et son spectre.....	34
Figure II.24 : Courant harmonique I_{2har} et I_{3har} identifié.....	35
Figure II.25 : Spectre des courants de ligne et d'harmonique identifié.....	35
Figure II.26 : Courant harmonique I_{1har} identifié et son spectre	35
Figure II.27 : Courant harmonique I_{2har} et I_{3har} identifié.....	36
Figure II.28 : Spectre des courants de ligne et d'harmonique identifié.....	36
Figure III.1 : Classification des personnes en trois ensembles selon la logique classique...	39
Figure III.2 : Classification des personnes en trois ensembles selon la logique floue.....	39
Figure III.3 : Différentes formes des fonctions d'appartenance.....	41
Figure III.4 : Schéma synoptique d'un contrôleur flou.....	42
Figure III.5 : Défuzzification par centre de gravité.....	44
Figure III.6 : Commande par hystérésis pour l'onduleur.....	45
Figure III.7 : Principe de contrôle des courants par la technique d'hystérésis.....	45
Figure III.8 : Les fonctions d'appartenance des variables.....	46
Figure III.9 : Principe de la Commande hystérésis à bande floue	47
Figure III.10 : Association réseau-charge non linéaire-onduleur avant et après compensation...	48
Figure III.11 : Courant injecté par l'onduleur et courant de source de la première phase...	49
Figure III.12 : Courant de référence, injecté et leurs spectres.....	49
Figure III.13 : Tension, courant et spectre de courant après filtrage.....	49
Figure III.14 : Courant injecté par l'onduleur et courant de source de la première phase...	50
Figure III.15 : Courant de référence, injecté et leurs spectres.....	50
Figure III.16 : Tension, courant et spectre de courant après filtrage.....	50
Figure III.17 : Courant injecté par l'onduleur et courant de source de la première phase...	51
Figure III.18 : Courant de référence, injecté et leurs spectres.....	51
Figure III.19 : Tension, courant et spectre de courant après filtrage.....	51
Figure III.20 : Courant injecté par l'onduleur et courant de source de la première phase...	52
Figure III.21 : Courant de référence, injecté et leurs spectres.....	52
Figure III.22 : Tension, courant et spectre de courant après filtrage.....	52
Figure III.23 : Courant injecté par l'onduleur et courant de source de la première phase...	53
Figure III.24 : Courant de référence, injecté et leurs spectres.....	53
Figure III.25 : Tension, courant et spectre de courant après filtrage.....	53
Figure III.26 : Courant injecté par l'onduleur et courant de source de la première phase...	54
Figure III.27 : Courant de référence, injecté et leurs spectres.....	54
Figure III.28 : Tension, courant et spectre de courant après filtrage.....	54

Figure III.29 : Courant injecté par l'onduleur et courant de source de la première phase...	56
Figure III.30 : Courant de référence, injecté et leurs spectres.....	56
Figure III.31 : Tension, courant et spectre de courant après filtrage.....	56
Figure III.32 : Courant injecté par l'onduleur et courant de source de la première phase...	57
Figure III.33 : Courant de référence, injecté et leurs spectres.....	57
Figure III.34 : Tension, courant et spectre de courant après filtrage.....	57
Figure III.35 : Courant injecté par l'onduleur et courant de source de la première phase...	58
Figure III.36 : Tension et Courant de source après filtrage.....	58
Figure III.37 : Tension, courant et spectre de courant après filtrage.....	58
Figure III.38 : Courant de ligne I_{cl} avant filtrage.....	60
Figure III.39 : Courant harmonique I_{1har} identifié	60
Figure III.40 : Courant injecté par le filtre I_{fl}	60
Figure III.41 : Courant de source après filtrage.....	60
Figure III.42 : Boucle de régulation de la tension continue.....	61
Figure III.43 : Tension et courant après filtrage	62
Figure III.44 : Tension de stockage et sa référence.....	63
Figure IV.1 : Filtrage actif avec compensation de l'énergie réactive.....	65
Figure IV.2 : Schéma bloc de la commande avec compensation de l'énergie réactive.....	66
Figure IV.3 : Les filtres passe-bas.....	66
Figure IV.4 : Les grandeurs simulées pour la commande par hystérésis à bande floue dans le cas $\alpha=0^0$	68
Figure IV.5 : Les grandeurs simulées pour la commande par hystérésis à bande floue dans le cas $\alpha=30^0$	69
Figure IV.6 : Les grandeurs simulées pour la commande par hystérésis à bande floue dans le cas $\alpha= 60^0$	70

TABLE DES NOTATIONS ET LISTE DES TABLEAUX

Table des notations et symboles

Chapitre I

h	Rang d'harmonique
Y_{eff}	Valeur efficace d'un signal
$T(s)$	Période d'un signal
THD	Taux distorsion harmonique
F_p	Facteur de puissance
V	Facteur de déformation
I	Courant total (fondamental+ harmonique)
V_h	Tension d'harmonique de rang h
P	Puissance active
Q	Puissance réactive
S	Puissance apparente
D	Puissance déformante
m_c	Nombre de convertisseur
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion
$V_s(V)$	Tension de réseau

Chapitre II

$I_{s1}, I_{s2}, I_{s3}(A)$	Courant de source après filtrage
$I_{c1}, I_{c2}, I_{c3}(A)$	Courant de la charge polluante
S_i	Interrupteur bidirectionnel
$V_{dc}(V)$	Tension continue
$V_0(V)$	Tension du milieu 0
T_1	Thyristor numéro1
q	Nombre de phase
ω (rad/s)	Pulsation électrique
$I_{s1\text{eff}}, I_{s2\text{eff}}, I_{s3\text{eff}}(A)$	Valeurs efficaces du courant
$I_{h1\text{eff}}(A)$	Valeur efficace du courant harmonique
$I_{ch}(A)$	Courant de charge
$V_{ch}(V)$	Tension de charge
$V_{\alpha, \beta}(V)$	Les tensions du réseau électrique au point de raccordement du filtre actif dans le repère stationnaire

$I_{\alpha, \beta}$ (A)	Les courants du réseau électrique dans le repère stationnaire
$p(t)$	Puissance réelle instantanée
$p_0(t)$	Puissance homopolaire instantanée
$P(t)$	Puissance active instantanée
$Q(t)$	Puissance réactive instantanée
$F(S)$	Fonction de transfert du filtre passe-bas
$I_{1har}, I_{2har}, I_{3har}$ (A)	Courant de référence (identifié)

Chapitre III

x^*	centre de gravité
$\Delta h(A)$	Bande d'hystérésis
μ_A, μ_B	fonctions d'appartenance
$I_f(A)$	Courant du filtre

Chapitre IV

$I_k(A)$	Courant généré par l'onduleur
$I_{s-ref}(A)$	Courant de source de référence
$I_{s-max}(A)$	Valeur maximale du courant
$I_{k-ref}(A)$	Courant du filtre de référence

Liste des Tableaux

Tableaux	Titre	Page
Tableau (I.1)	Effets des harmoniques sur quelques matériels	06
Tableau (I.2)	Principales charges polluants	07
Tableau (III.1)	Implication floue	41
Tableau (III.2)	Règles de la commande floue	46
Tableau (III.3)	Le THD obtenu avant et après filtrage à bande fixe	55
Tableau (III.4)	Le THD obtenu avant et après filtrage à bande fixe et à bande floue	59
Tableau (III.5)	Le THD obtenu avant et après filtrage à bande floue avec régulation de la tension continue de l'onduleur	63
Tableau (IV.1)	Le THD obtenu pour la commande floue du FAP avant filtrage et après filtrage et compensation de l'énergie réactive	71

INTRODUCTION

GENERALE

Introduction générale

La prolifération de perturbations électriques est due à un nombre croissant de charges non linéaires présentes dans les lignes électriques (tels que les convertisseurs, les ordinateurs personnels, les appareils à tubes fluorescents, etc...). La problématique relevée de la pollution harmonique dans les réseaux électriques de distribution devient de plus en plus préoccupante avec l'accroissement de l'usage des charges non-linéaires. Tous ces appareils possèdent la particularité d'absorber des courants non sinusoïdaux et donc d'introduire dans les lignes électriques des pollutions harmoniques en courant. Les composantes harmoniques générées se propagent dans l'ensemble du réseau de distribution électrique sous la forme de courants qui peuvent sérieusement affecter d'autres appareils en allant parfois même jusqu'à les détériorer. Depuis quelques années, les Filtres Actifs Parallèles (FAP) se sont révélés être des techniques efficaces pour la compensation des composantes harmoniques. Ces filtres cherchent à identifier les composantes harmoniques afin de les réinjecter efficacement dans le réseau électrique en opposition de phase. Ils sont également capables de corriger le facteur de puissance et de compenser l'éventuel déséquilibre d'un système triphasé. De plus, les FAP peuvent être insérés aisément dans les installations existantes de distribution électrique sans nécessiter de grandes modifications. Reconnus pour leur facilité de mise en œuvre, pour leur robustesse et leur fiabilité, ils représentent aujourd'hui la technique la plus largement employée pour dépolluer les systèmes électriques [9]. Ce mémoire est composé de quatre chapitres :

- Dans le premier chapitre, nous étudierons les perturbations et la pollution harmonique du réseau électrique et l'application des solutions classiques et modernes pour dépolluer les réseaux électriques.
- Dans le deuxième chapitre, nous présenterons la structure générale pour étudier le filtre actif parallèle et la charge non linéaire. Ensuite nous aborderons l'identification des courants harmoniques par la méthode des puissances.
- Dans le troisième chapitre, nous présenterons les outils de base de la logique floue et son application pour la compensation des courants harmoniques.
- Dans le quatrième chapitre nous exposerons le concept de la compensation de l'énergie réactive en rendant le facteur de puissance unitaire.

Ce mémoire sera clôturé par une conclusion générale et les perspectives envisagées pour un futur travail.

Chapitre I

PERTURBATIONS ET POLLUTION HARMONIQUE DES RESEAUX ELECTRIQUES

I.1 Introduction

Le distributeur d'énergie doit fournir à l'ensemble de ses clients et utilisateurs une énergie de bonne qualité sous la forme de trois tensions sinusoïdales constituant un réseau triphasé équilibré. La qualité de cette énergie dépend de celle de la tension aux points de raccordement. Toutefois, cette tension subit généralement des altérations durant son transport jusqu'à son arrivée chez le client industriel ou particulier. Les origines de ces altérations sont nombreuses ; outre les incidents relatifs à la nature physique et matérielle des organes d'exploitation du réseau, il existe aussi des causes intrinsèques spécifiques au fonctionnement de certains récepteurs particuliers. Afin d'éviter le dysfonctionnement, voire la destruction des composants du réseau électrique ou des récepteurs finaux, il est indispensable de comprendre l'origine des harmoniques et de chercher les solutions adéquates pour les supprimer [1]. Nous commencerons ce chapitre par un exposé sur les paramètres de la qualité de l'énergie électrique. Nous parlerons également de la perturbation harmonique, l'effet des harmoniques sur les récepteurs électriques. Ensuite, nous présentons les solutions classiques et modernes pour dépolluer les réseaux électriques.

I.2 Paramètres de la qualité de l'énergie électrique

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

- La fréquence.
- L'amplitude.
- La forme d'onde qui doit être sinusoïdale.
- La symétrie du système triphasé, caractérisée par l'égalité des modules des trois tensions et de leurs déphasages relatifs.

La qualité de l'énergie peut être affectée, soit du fait de certains incidents inhérents à la nature physique et aux sujétions liées à l'exploitation du réseau, soit du fait de certains récepteurs. Ces défauts se manifestent sous forme de différentes perturbations affectant un ou plusieurs des quatre paramètres précédemment définis. On a donc quatre possibilités distinctes de perturbation [1] :

I.2.1 Creux et coupures de tension

Un creux de tension est une diminution de la tension à une valeur située entre 1 et 90% de la tension nominale et d'une durée allant de 10 ms jusqu'à 1 minute. Une coupure brève est un cas particulier du creux de tension.

Les creux de tension sont dus à l'apparition de défauts sur l'installation ou sur le réseau de distribution. Les coupures brèves sont généralement la cause de manœuvres des automatismes

des réseaux de distribution (réenclencher, isolations de défaut), la figure I-1 montre un exemple de creux et de coupure de tension.

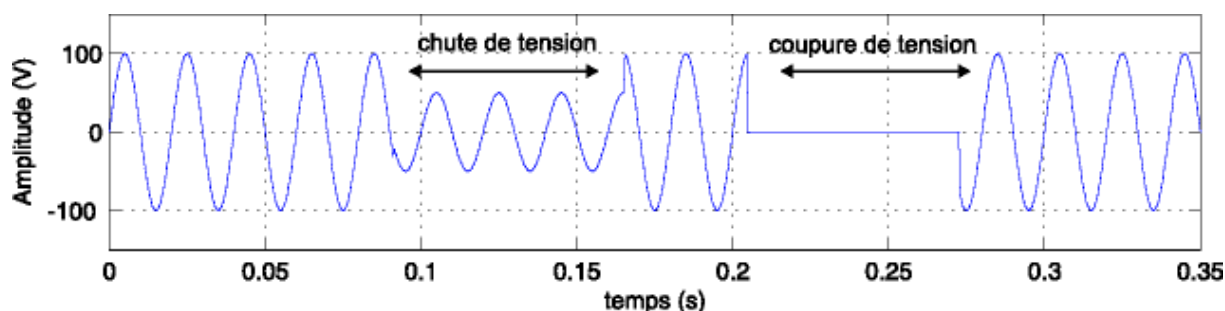


Figure I.1 : Creux de tension et coupure.

I.2.2 Fluctuations de tension

Les variations de tension sont des variations de la valeur efficace ou de la valeur crête d'amplitude inférieure à 10 % de la tension nominale et les fluctuations de tension sont des suites de variations de tension ou des variations cycliques ou aléatoires de l'enveloppe d'une tension dont les caractéristiques sont la fréquence de la variation et l'amplitude, un exemple de fluctuation de tension est montré dans la figure I.2.

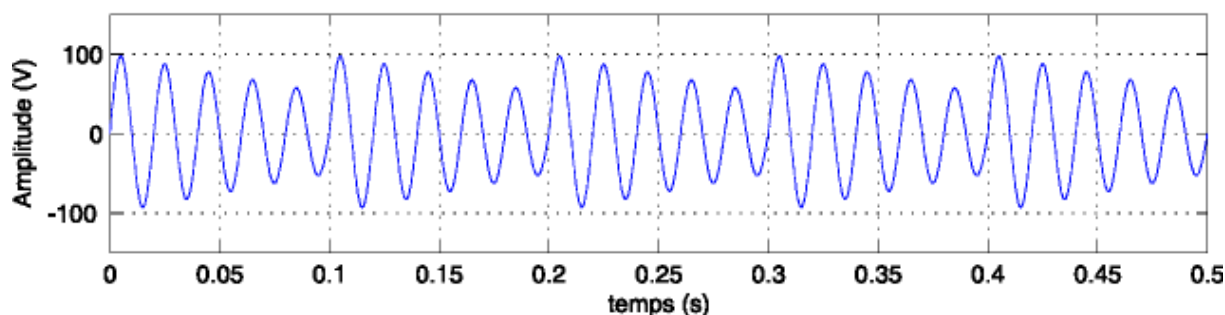


Figure I.2 : Fluctuations de tension.

I.2.3 Déséquilibre du système triphasé de la tension

Le distributeur d'électricité fournit à l'utilisateur un ensemble de trois tensions sinusoïdales appelé système triphasé. Ces trois tensions ont théoriquement la même valeur efficace et sont également décalées d'un angle de 120° les unes par rapport aux autres. Lorsque les trois tensions ne sont pas identiques en amplitude et/ou ne sont pas décalées d'un angle de 120° les unes par rapport aux autres, on parlera de déséquilibre du système triphasé, comme le montre la figure I.3.

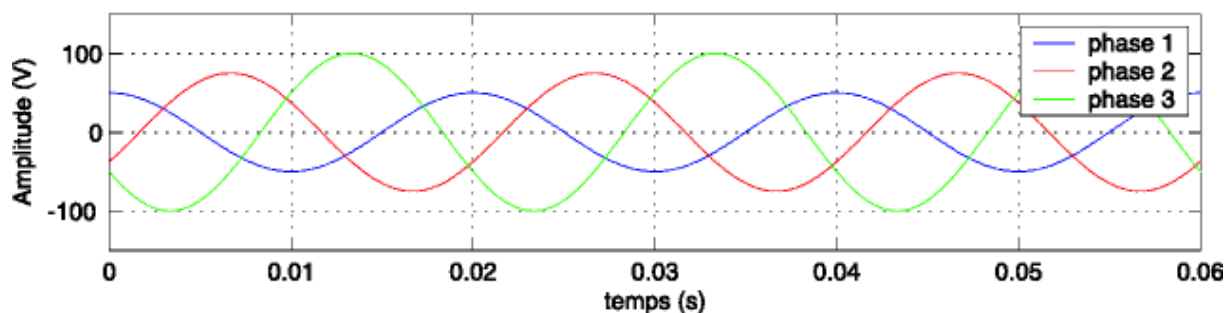


Figure I.3 : Déséquilibre du système triphasé de la tension.

I.2.4 Variation de fréquence

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

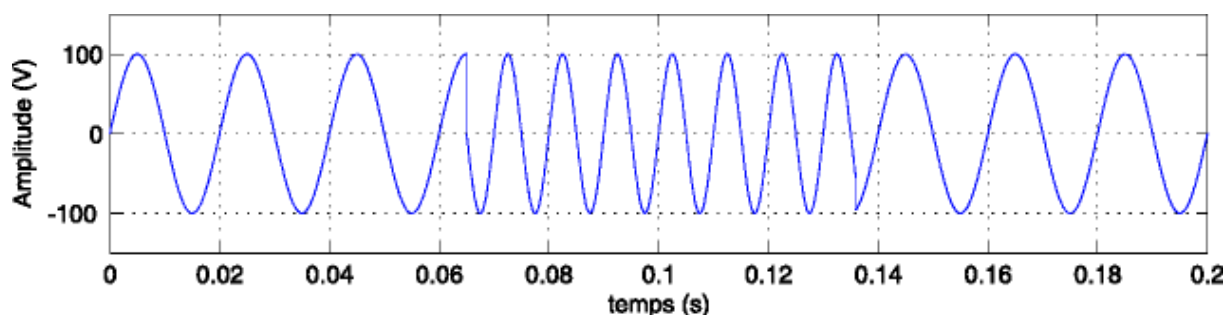


Figure I.4 : Variation de fréquence.

I.2.5 Charges linéaires et non linéaires

Les récepteurs peuvent être classés en deux familles principales :

- les récepteurs linéaires (ou charges linéaires).
- les récepteurs non-linéaires (ou charges non-linéaires).

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

Une charge est dite non-linéaire lorsque la relation entre la tension et le courant n'est plus linéaire. Un tel récepteur alimenté par une tension sinusoïdale, consomme un courant non-sinusoïdal [2].

I.3 Les harmoniques

L'expansion de l'emploi des charges électriques non linéaires durant les dernières années a significativement contribué à la propagation des harmoniques dans les systèmes d'électronique de puissance. Comme ces charges sont indispensables pour différents besoins domestiques et industriels. Les déformations du courant et de la tension peuvent perturber le fonctionnement normal d'autres équipements électriques. C'est pourquoi, les distributeurs d'énergie ayant la contrainte de fournir une tension sinusoïdale, prennent en charge l'atténuation des perturbations harmoniques au moyen d'installation de forte puissance. Cependant, les nouvelles réglementations internationales imposent aux consommateurs des limites aux harmoniques, engendrées par leurs systèmes, tant en courant qu'en tension, ainsi, le filtrage des composantes harmoniques est au centre des préoccupations des distributeurs d'une part et des utilisateurs d'énergie électrique d'autre part [2], comme le montre la figure I.5.

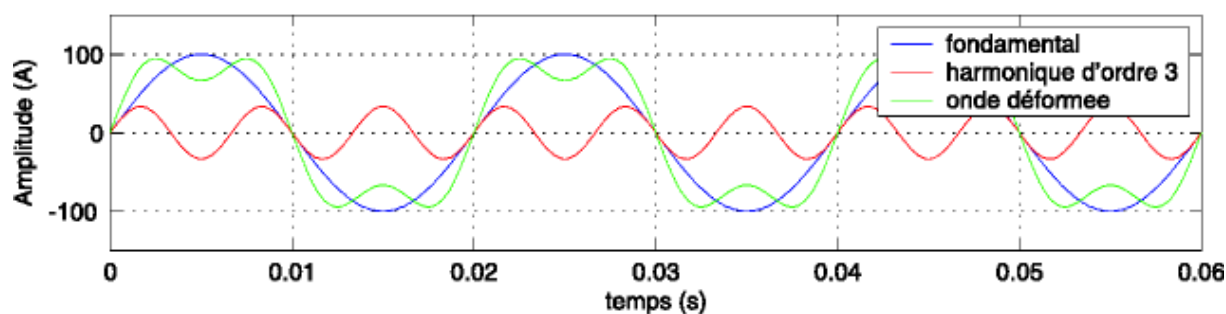


Figure I.5 : Les harmoniques.

I.3.1 Effets des harmoniques

Les courants et les tensions harmoniques ont des effets néfastes sur le fonctionnement, la rentabilité et la durée de vie de certains équipements électriques, les plus importantes sont :

- l'échauffement : les pertes totales par effets Joule sont la somme de celles du fondamental et des harmoniques.
- Vieillessement des installations est souvent dû à une contrainte en tension consécutive à la présence de la tension harmonique.
- L'interférence dans les systèmes de communication.
- Dysfonctionnement de certains équipements : en présence d'harmonique, le courant et la tension peuvent changer plusieurs fois de signe au cours d'une demi-période [3].

Le tableau I.1 ci-dessous résume l'ensemble des matériels électriques perturbés par la pollution harmonique.

Nature du matériel électrique	Effet de la pollution harmonique
Machines tournantes. Moteurs triphasés. Alternateurs	Echauffement supplémentaire (effet Joule) dans les enroulements statoriques, couples oscillatoires. augmentation du bruit.
Transformateurs	Pertes supplémentaires dans le fer (par courants de Foucault) et dans les enroulements (par effet Joule). Risque de saturation en présence d'harmoniques paires.
Câbles	Augmentation des pertes surtout dans le câble de neutre où s'ajoutent les harmoniques de rang 3 et multiple de 6, pertes diélectriques supplémentaires.
Electronique de puissance (ponts redresseurs à thyristors, transistor,... etc.)	Troubles fonctionnels liés à la forme d'onde (commutation synchronisation).
Condensateurs de puissance	Pertes diélectriques supplémentaires aboutissant à un vieillissement prématuré des condensateurs
Ordinateurs	Dysfonctionnement lié aux couples pulsatoires des moteurs d'entraînement des supports magnétiques.
Dispositifs de protection (fusibles, disjoncteurs magnétothermiques)	Fonctionnement intempestif.
Téléviseurs	Déformation d'image.
Lampes à décharge	Risque de vacillement sous l'effet de l'harmonique de rang 2.

Tableau I.1 : Effets des harmoniques sur quelques matériels.

I.3.2 Source d'harmoniques

La cause principale de l'existence des harmoniques est l'injection des courants non sinusoïdaux par des charges non linéaires, ainsi les charges déséquilibrées branchées au réseau. Le tableau I.2 montre quelques sources d'harmoniques [4].

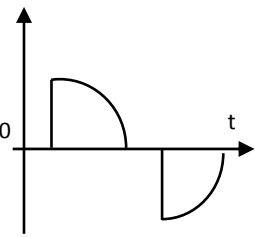
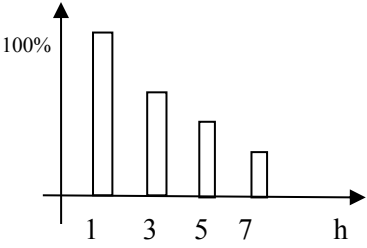
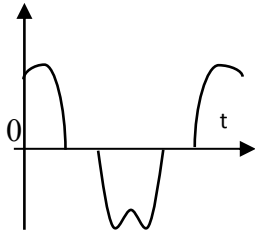
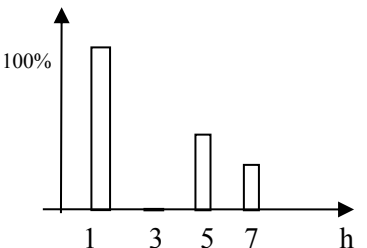
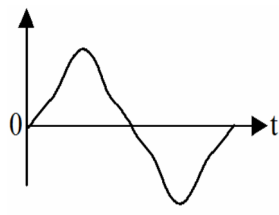
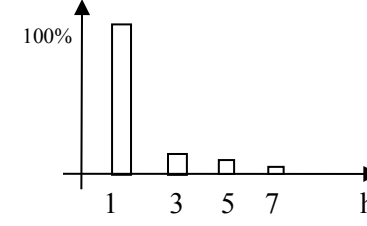
Type de charge	Appareils concernés	Courant absorbé	Spéctre harmonique correspondant
Gradateur monophasé	Régulation de puissance de fours à résistance. Modulation de puissance des lampes halogènes		
Redresseur triphasé à thyristor	Variateur de vitesse des moteurs à courant continu et des moteurs synchrones		
Moteur asynchrone	-Machines-outils -Appareils électroménagers -Ascenseurs		

Tableau I.2 Principales charges polluantes.

I.4 Caractérisation des perturbations harmoniques

Différentes grandeurs sont définies pour caractériser la distorsion en régime déformé. Le Taux global de Distorsion Harmonique (THD) et le facteur de puissance sont les plus employés pour quantifier respectivement les perturbations harmoniques et la consommation de puissance réactive [2].

I.4.1 Grandeur harmonique

C'est l'une des composantes sinusoïdales de la variation de la grandeur physique possédant une fréquence multiple de celle de la composante fondamentale. L'amplitude de l'harmonique est généralement de quelques pour cent de celle du fondamental.

I.4.2 Rang de l'harmonique

C'est le rapport de sa fréquence f_h à celle du fondamental (généralement la fréquence industrielle, 50 ou 60 Hz) : $h = \frac{f_h}{f_1}$

Par principe, le fondamental f_1 a le rang 1.

I.4.3 Valeur efficace d'une grandeur alternative

Il y a identité entre l'expression usuelle de cette valeur efficace calculée à partir de l'évolution temporelle de la grandeur alternative ($y(t)$) et l'expression calculée à partir de son contenu harmonique :

$$Y_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T Y_{(t)}^2 dt} = \sqrt{\sum_{n=1}^{n=\infty} Y_n^2} \quad (I.1)$$

Notons qu'en présence d'harmoniques, les appareils de mesure doivent avoir une bande passante élevée (> 1 kHz).

I.4.4 Série de Fourier

Ceci revient à dire que : « tout signal, périodique de période $T=1/f$, peut se décomposer en une somme infinie de termes sinus et cosinus de fréquences multiples Mathématiquement, cela s'écrit :

$$S(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_0^{\infty} (a_n \cdot \cos(n\omega t) + b_n \cdot \sin(n\omega t)) \quad (I.2)$$

La valeur a_0 représente la valeur moyenne de $S(t)$. On calcule les coefficients a_n et b_n avec les formules suivantes :

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cdot \cos(n\omega t) dt \quad \text{et} \quad b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cdot \sin(n\omega t) dt \quad (I.3)$$

De plus, il existe quelques prés requis qui permettent de ne pas faire de calculs inutiles :

- Si la fonction est paire, les coefficients b_n sont nuls.
- Si la fonction est impaire, les coefficients a_n sont nuls.
- Si la fonction possède une symétrie sur ses deux demi-périodes, les termes d'indice pairs sont nuls.

I.4.5 Taux d'harmonique de distorsion

Le taux de distorsion est un paramètre qui définit globalement la déformation de la grandeur alternative :

$$\text{THD (\%)} = 100 \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^{n=\infty} Y_n^2}}{Y_1} \quad (\text{I.4})$$

Y_1 : La valeur efficace de la composante fondamentale (du courant ou de la tension).

Y_n : Les valeurs exactes des différentes composantes harmoniques (du courant ou de la tension).

I.4.6 Facteur de puissance F_p

Le facteur de puissance F_p est le rapport de la puissance active P à la puissance apparent S . En présence harmonique la puissance apparent S est composé trois parties : la puissance active P Réactive Q et D déformante.

$$F_p = \frac{P}{S} \quad (\text{I.5})$$

I.4.7 Facteur de déformation V

Il permet de définir la relation entre le facteur de puissance F_p et le facteur $\cos \varphi_1$.

$$V = \frac{F_p}{\cos \varphi_1} \quad (\text{I.6})$$

Remarque : le facteur de déformation V est égal à 1 dans le cas où les tensions et les courants sont parfaitement sinusoïdaux.

I.4.8 Spectre de fréquence

C'est la représentation de l'amplitude des harmoniques en fonction de leur rang, la valeur des harmoniques étant généralement exprimée en pourcentage du fondamental par un histogramme figure I.6 [2].

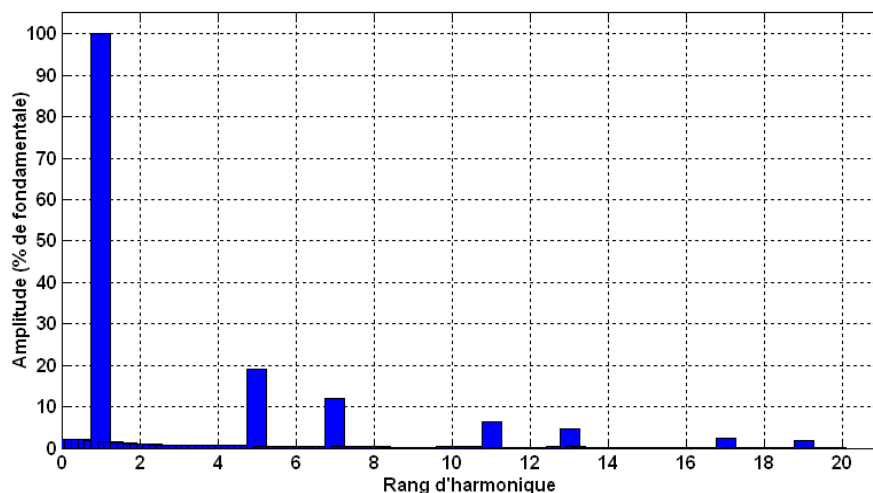


Figure I.6 : Le spectre des harmoniques du courant de la charge polluante.

I.5 Influence des harmoniques sur le facteur de puissance

Normalement, pour un signal sinusoïdal le facteur de puissance est donné par rapport entre la puissance P et puissance apparente S .

En présence des harmoniques, la puissance apparente S est composée de trois parties active P , réactive Q et déformante D , cette dernière est la puissance provoquée par les courants harmoniques, tel que $I = I_f + I_h$. (I.7)

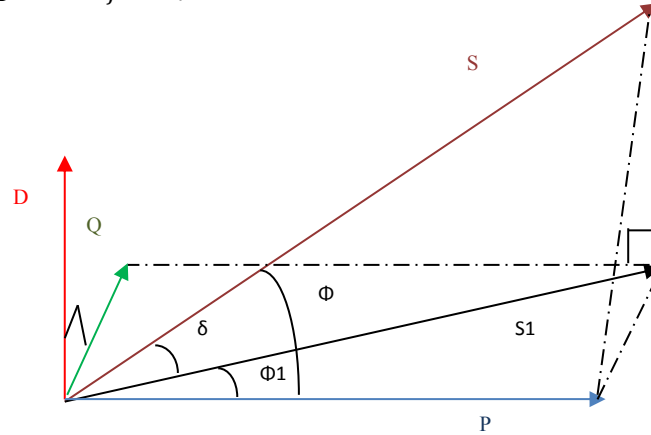


Figure I.7 : Diagramme de Fresnel des puissances.

Tel que :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (I.8)$$

Où

Q : La puissance réactive associée au courant fondamental.

D : La puissance déformante due aux harmoniques du courant.

L'équation de la puissance active est donnée par :

$$P = 3 \cdot U \cdot I_1 \cdot \cos(\varphi_1) \quad (I.9)$$

φ_1 : Représente le déphasage entre le courant fondamental et la tension.

$$Q = 3 \cdot U \cdot I_1 \cdot \sin(\varphi_1) \quad (I.10)$$

Et

$$D = 3 \cdot U \cdot \sqrt{\sum_{h=2}^n I_h^2} \quad (I.11)$$

Finalement le facteur de puissance est donné par l'expression :

$$F_p = F_{dis} \cdot \cos(\varphi_1) = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad (I.12)$$

Où F_{dis} représente le facteur de distorsion [5].

I.6 Les solutions traditionnelles

Ce sont des techniques qui doivent être connues par tous les électriciens. Elles apportent une solution facile et rapide pour certains cas de perturbations bien localisées et utilisent des composants passifs (inductances, condensateurs, transformateurs) et/ou des branchements qui modifient le schéma de l'installation [2].

I.6.1 Utilisation d'inductances anti-harmoniques

Cette disposition consiste à protéger les condensateurs, destinés à améliorer le facteur de puissance, en plaçant une inductance en série. Cette inductance est calculée de façon à ce que la fréquence de résonance ne corresponde à aucun des harmoniques présents [6].

I.6.2 Augmentation de la puissance de court-circuit

La puissance harmonique augmente lorsque la puissance de court-circuit diminue si l'on ne prend pas en compte les phénomènes de résonance. La diminution de l'impédance totale en amont de la charge non-linéaire permet de réduire la tension créée par les harmoniques de courant, et donc de diminuer le taux de distorsion harmonique en tension au point de raccordement. En revanche, les courants harmoniques ne sont pas atténués [7].

I.6.3 Les filtres passifs

Cette solution de dépollution consiste à placer en parallèle sur le réseau d'alimentation une impédance très faible autour de la fréquence à filtrer et suffisamment importante à la fréquence fondamentale du réseau. Parmi les dispositifs du filtrage les plus répandus, On distinguera deux types de filtres assurant la limitation des tensions harmoniques :

- filtre passif résonnant.
- filtre passif amorti ou passe-haut.

I.6.3.1 Filtres passifs résonants

Il est constitué par la mise en série d'une inductance, d'une résistance, et d'un condensateur. La figure I.8 montre clairement le montage de ce dernier ainsi que leurs impédances en fonction de la fréquence. Ce type de filtre est caractérisé par l'emplacement de trois filtres, deux pour les harmoniques d'ordre inférieurs et un filtre pour les harmoniques d'ordres supérieurs, c'est-à-dire pour un pont triphasé nous avons besoin d'un filtre passe bas pour le cinquième et l'autre pour le septième harmonique et d'un filtre passe haut pour tous les harmoniques au-delà de la 11ème [8].

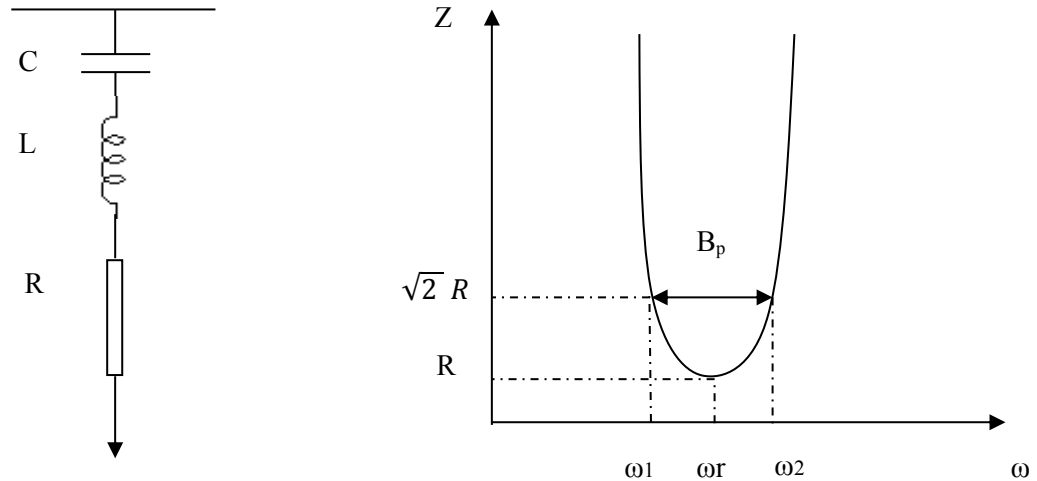


Figure I.8 : Filtre passif résonnant.

I.6.3.2 Filtres passifs amortis

Le filtre amorti peut réduire le risque de résonance non souhaitée, et permet de réduire considérablement la taille du filtre passif [12], comme le montre la figure I.9.

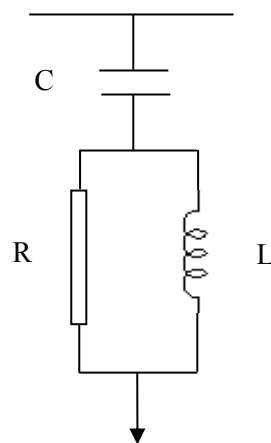


Figure I.9 : Filtre amorti.

I.6.4 Les avantages et les inconvénients des filtres passifs

Le filtrage passif a déjà largement fait ses preuves dans le milieu industriel grâce à son coût faible, son efficacité et son adaptation pour des réseaux de forte puissance [10]. Cependant Il présente les inconvénients suivants :

- L'impédance du réseau en présence des filtres passifs peut faire apparaître de résonances.
- Le filtrage passif peut absorber les courants harmoniques d'autres charges non linéaires et dans ce cas, le filtre passif peut être surchargé.
- Le filtrage passif est peu flexible et, en cas de modifications dans le réseau, il peut avoir du mal à s'adapter aux nouveaux besoins du filtrage.

I.7 Solutions modernes

Les solutions de dépollution traditionnelle ne répondant plus à l'évolution des réseaux électriques et des charges à protéger, comme nous venons de le décrire précédemment, d'autres solutions modernes ont été proposées. Pour fournir aux consommateurs une bonne qualité de l'énergie électrique, même dans les conditions de fonctionnement les plus perturbées, les filtres actifs sont proposés comme des solutions avancées de dépollution des réseaux électriques [11].

I.7.1 Filtres actifs

Le filtrage actif constitue aujourd'hui une solution plus sophistiquée que le filtrage passif, bénéficiant des technologies les plus performantes et constamment améliorée par les constructeurs. Le principe de fonctionnement du filtre actif réside dans le fait que celui-ci produit des courants qui s'opposent aux courants harmoniques créés par les charges non linéaires, tendant ainsi à rétablir un courant appelé du réseau quasi sinusoïdal. Ces filtres actifs sont encore appelés compensateurs actifs. Ils sont utilisés en parallèle ou en série d'une installation nécessitant un traitement harmonique. Dans ce qui suit, nous donnons les structures les plus utilisées dans la littérature, à savoir les filtres parallèle série, combiné parallèle-série et les structures hybrides actifs -passifs [12].

I.7.1.1 Filtre actif parallèle

Ce filtre est le plus souvent commandé comme un générateur de courant, il génère des courants harmoniques, en opposition de phase avec le réseau, afin que la somme avec ceux-ci soit nulle. On obtient alors des courants sinusoïdaux au niveau du réseau. Il permet donc de supprimer au point de raccordement tous les harmoniques de courants de charge non linéaire. Il peut aussi fonctionner comme un compensateur de tensions harmoniques dont il permet de maintenir sinusoïdale la tension au point de raccordement quel que soit le courant absorbé par la charge ou la qualité de la source de tension. En générale, le filtre actif parallèle est utilisé pour la dépollution des réseaux BT et MT [13]. Ce type de configuration est indiqué par la figure I.10 :

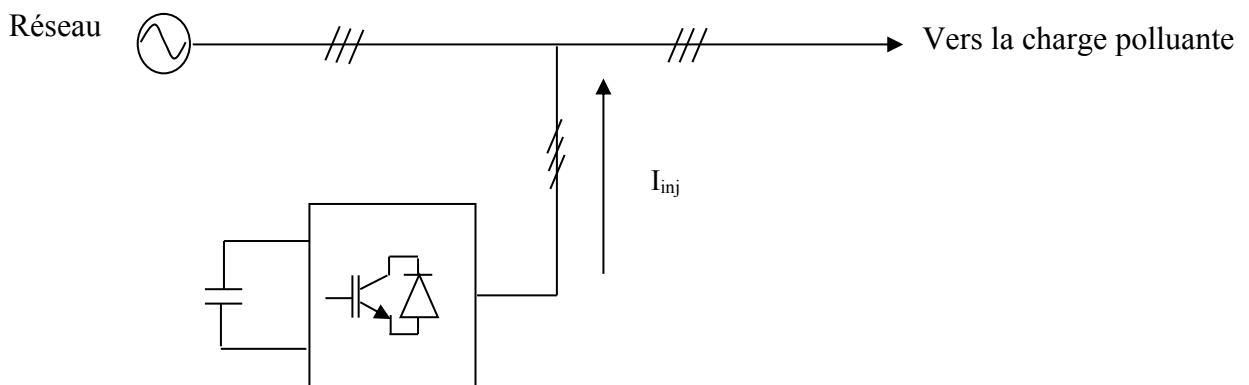


Figure I.10 : Filtre actif parallèle.

I.7.1.2 Filtre actif série

C'est une solution pour protéger les charges sensibles contre les perturbations de tension du réseau électrique. Donc l'objectif (compensateur de tension harmonique) est de jouer le rôle d'une source de tension qui fournit la tension harmonique [13]. Ce type de configuration est indiqué par la figure I.11 :

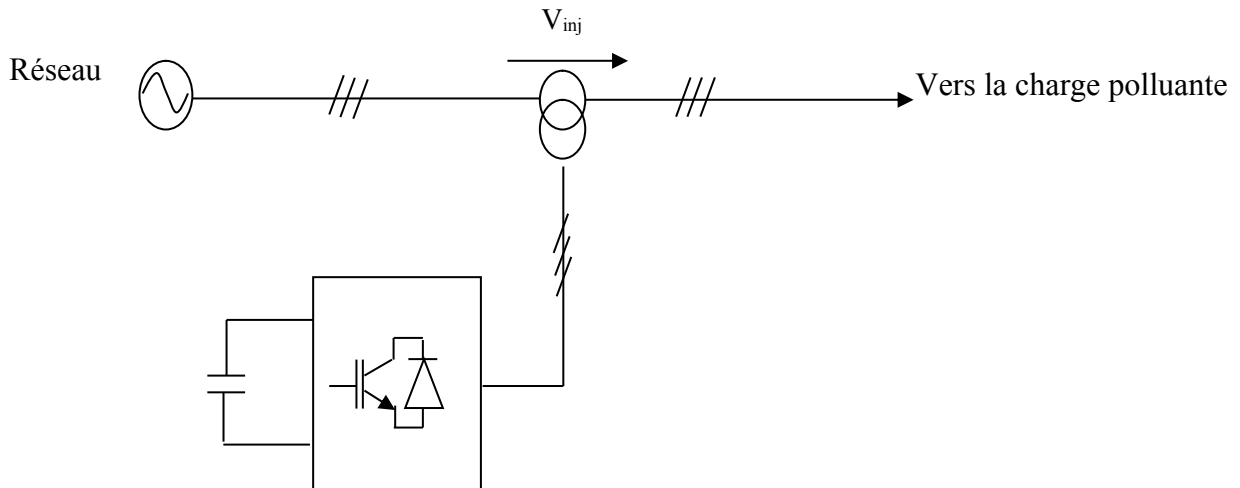


Figure I.11 : Filtre actif série.

I.7.1.3 Combinaison filtre actif série-parallèle (UPQC)

Cette combinaison parallèle-série actifs, aussi appelée Unified Power Quality Conditioner (UPQC), résulte de l'association des deux filtres actifs parallèle et série, comme le montre la figure I.12. Profitant des avantages des deux filtres actifs, l'UPQC assure un courant et une tension sinusoïdaux du réseau électrique à partir d'un courant et d'une tension perturbés de celui-ci.

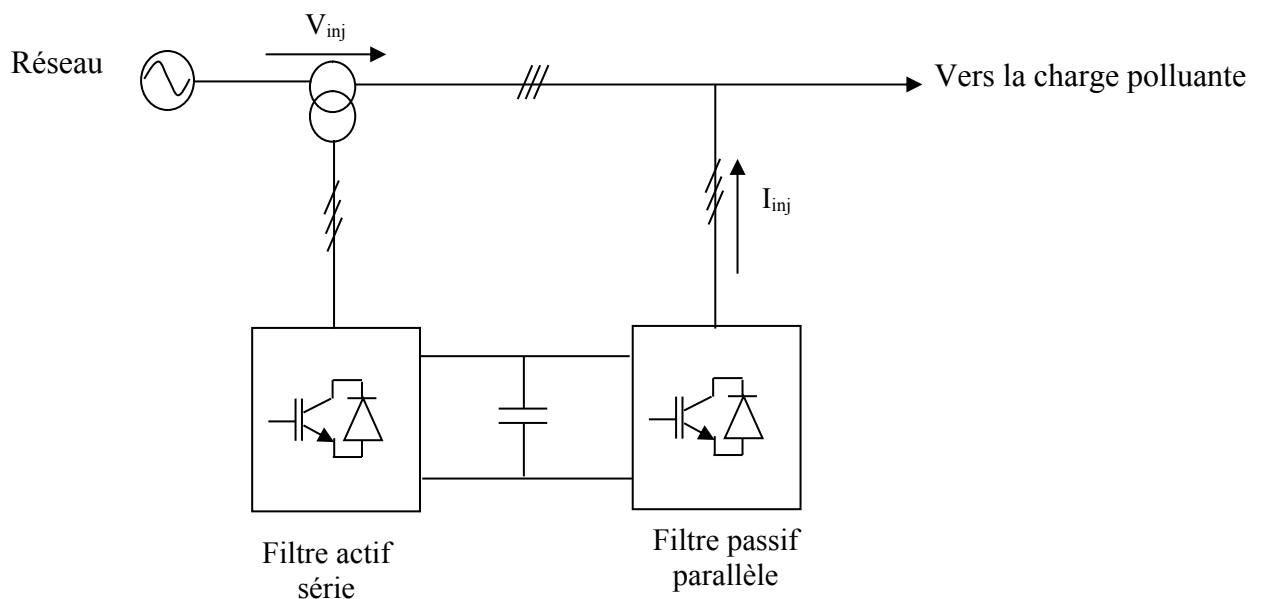


Figure I.12 : Combinaison Filtre parallèle-série UPQC.

I.7.1.4 Filtrage hybride

Le filtrage mixte ou hybride résulte de l'association d'un filtre passif et d'un filtre actif.

L'intérêt des filtres mixtes est que le filtre passif prend en charge la compensation d'une grande partie des harmoniques, le filtre actif maintient les performances de filtrage en fonction de l'évolution de la charge du réseau. Ainsi la puissance du convertisseur qui constitue le filtre actif est fortement diminuée grâce aux éléments passifs. Ces structures permettent donc d'optimiser le rapport performance / coût et d'avoir une meilleure tenue en tension [2]. On a plusieurs structures de filtre actif par exemple :

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

I.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents types de perturbations qui peuvent polluer les réseaux électriques. En plus nous avons parlé des harmoniques et des déséquilibres de courant et de tension et la puissance réactive qui ont des effets néfastes sur les équipements électriques. Ensuite, pour diminuer les effets de ces perturbations harmoniques, Plusieurs solutions traditionnelles et modernes ont présenté. Récemment, en plus du filtrage des harmoniques, les filtres actifs parallèles et séries, et leur combinaison, sont étudiés pour la compensation de tous les types de perturbation susceptible d'apparaître dans un réseau électrique basse tension. En effet, profitant des progrès réalisés dans le domaine de l'électronique de puissance. Le filtre actif parallèle peut être installé pour compenser toutes les perturbations de courant comme les harmoniques, les déséquilibres et la puissance réactive. Le filtre actif série peut être installé pour compenser toutes les perturbations de tension comme les harmoniques. La combinaison parallèle-série actifs est la solution universelle pour compenser toutes les perturbations en courant et en tension. D'autres solutions de dépollution consistent à associer des filtres actifs et passifs pour trouver un compromis entre l'efficacité de compensation et le coût. Ces solutions peuvent être des solutions futures très prometteuses. Les filtres hybrides étant conçus essentiellement pour dépolluer les réseaux électriques des courants harmoniques. Dans le prochain chapitre, nous présenterons l'étude du filtre actif parallèle, la charge non linéaire et l'identification des courants harmoniques.

Chapitre II

FILTRAGE ACTIF PARALLELE ET IDENTIFICATION DES COURANTS HARMONIQUES

II.1 Introduction

La prolifération de perturbations électriques est due à un nombre croissant de charges non linéaires présentes dans les lignes électriques. Tous ces appareils possèdent la particularité d'absorber des courants non sinusoïdaux et donc d'introduire dans les lignes électriques des pollutions harmoniques en courant.

Les filtres actifs parallèles se sont révélés être des techniques efficaces pour la compensation des composantes harmoniques. Dans ce chapitre nous allons étudier le filtre actif parallèle. Sa structure a été divisée en deux parties, la partie puissance et la partie commande. Dans la partie puissance on a les trois principaux blocs de cette structure, l'onduleur de tension, l'élément de stockage d'énergie et le filtre de sortie. Dans la partie commande, on a l'identification des courants perturbateurs, la régulation du courant injecté par l'onduleur et la régulation de la tension continue. Aussi nous présenterons la modélisation du réseau électrique et la charge non linéaire.

II.2 Rôle du filtre actif

Dans le cas idéal le rôle du filtre actif consiste à éliminer tous les harmoniques produits par la charge non linéaire en fournissant à tous instants des harmoniques égaux en amplitude et en opposition de phase à ceux produits par la charge, et ceci afin que le courant dans la ligne reste purement sinusoïdal et égale au fondamental du courant de charge [14].

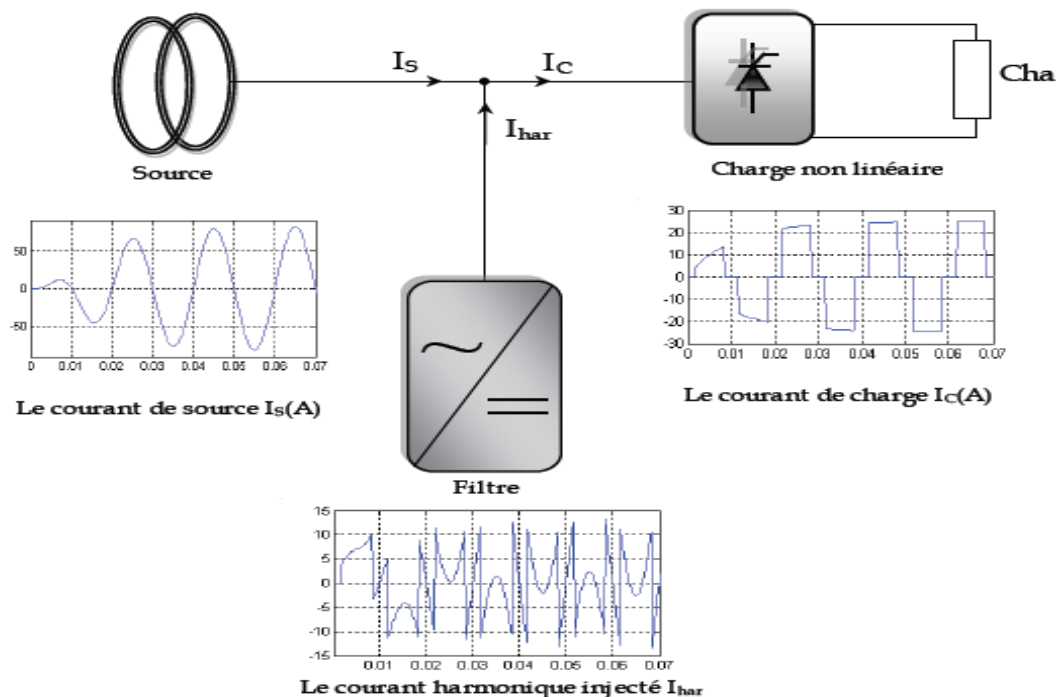


Figure II.1 : Principe du filtrage actif.

II.3 Filtre actif parallèle

II.3.1 Structure générale d'un filtre actif parallèle

La structure générale du filtre actif parallèle est présentée dans la figure II.2 sous la forme de deux blocs : la partie puissance et la partie commande [14].

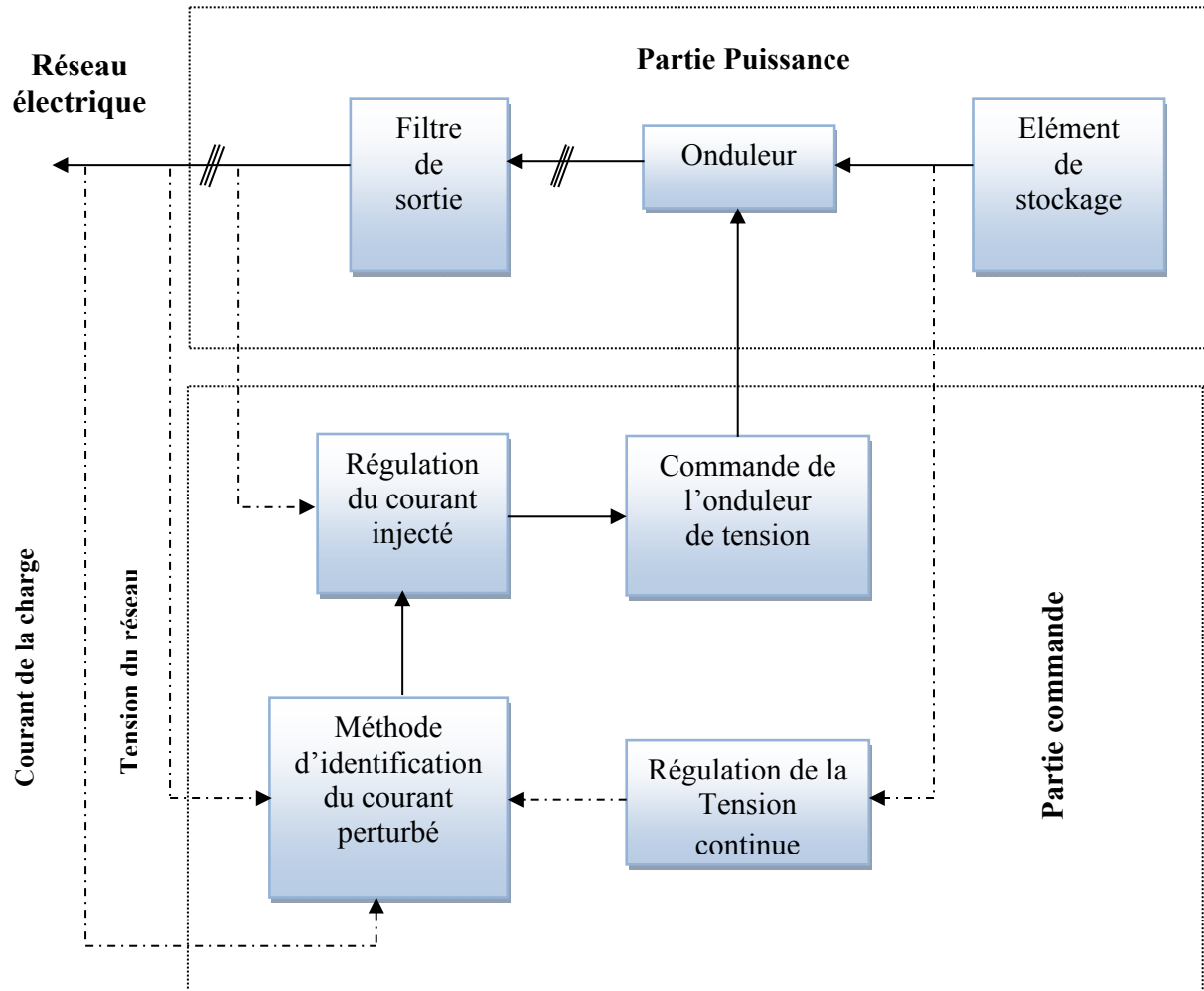


Figure II.2 : Structure générale du filtre actif parallèle.

La partie puissance est constituée de :

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

La partie commande est constituée de :

- La méthode d'identification des courants perturbés.
- La régulation du courant injecté sur le réseau à partir de l'onduleur de tension.
- La régulation de la tension continue.

II.4 Onduleur de tension à deux niveaux

II.4.1 Structure générale

L'onduleur utilisé par le FAP est un onduleur triphasé à structure de tension. Ce dernier est représenté par la figure II.3 et se compose de trois bras à interrupteurs réversibles en courant, commandés à la fermeture et à l'ouverture. Dans la pratique, chaque interrupteur est un transistor IGBT et d'une diode montée en antiparallèle. Le stockage de l'énergie du côté continu se fait par l'intermédiaire d'un condensateur C_{dc} de tension V_{dc} [15].

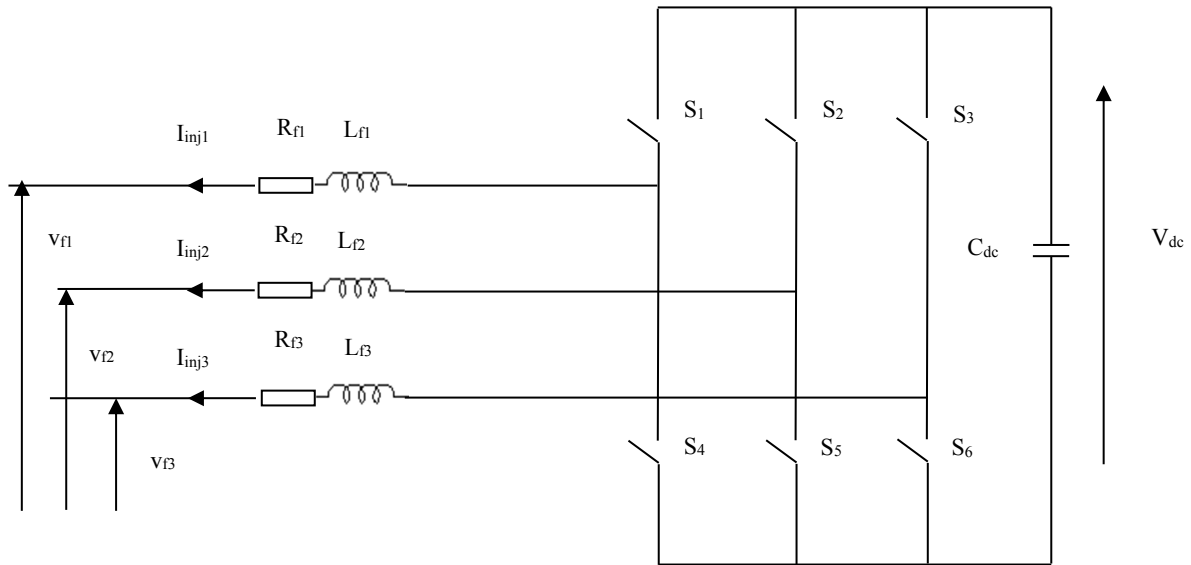


Figure II.3 : Schéma d'un onduleur de tension triphasé.

La symétrie des onduleurs à deux niveaux permet leur modélisation par bras. Après avoir modélisé chaque couple transistor – diode par un seul interrupteur bidirectionnel « S_i ». Il devient possible de déduire un modèle complet de l'onduleur figure II.4.

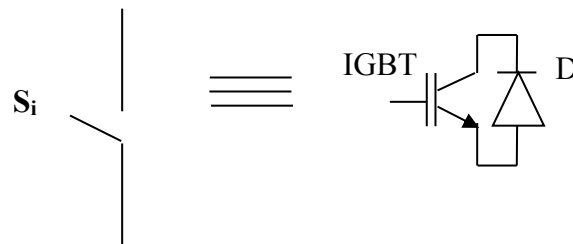


Figure II.4 : Interrupteurs de puissance.

II.4.2 Modélisation de l'onduleur triphasé à deux niveaux

L'onduleur triphasé à deux niveaux, se compose de trois bras et une source de tension continue. Chaque bras est formé de deux interrupteurs en série. Chaque interrupteur comporte un transistor et une diode. La figure II.5 donne une représentation schématique de cet onduleur.

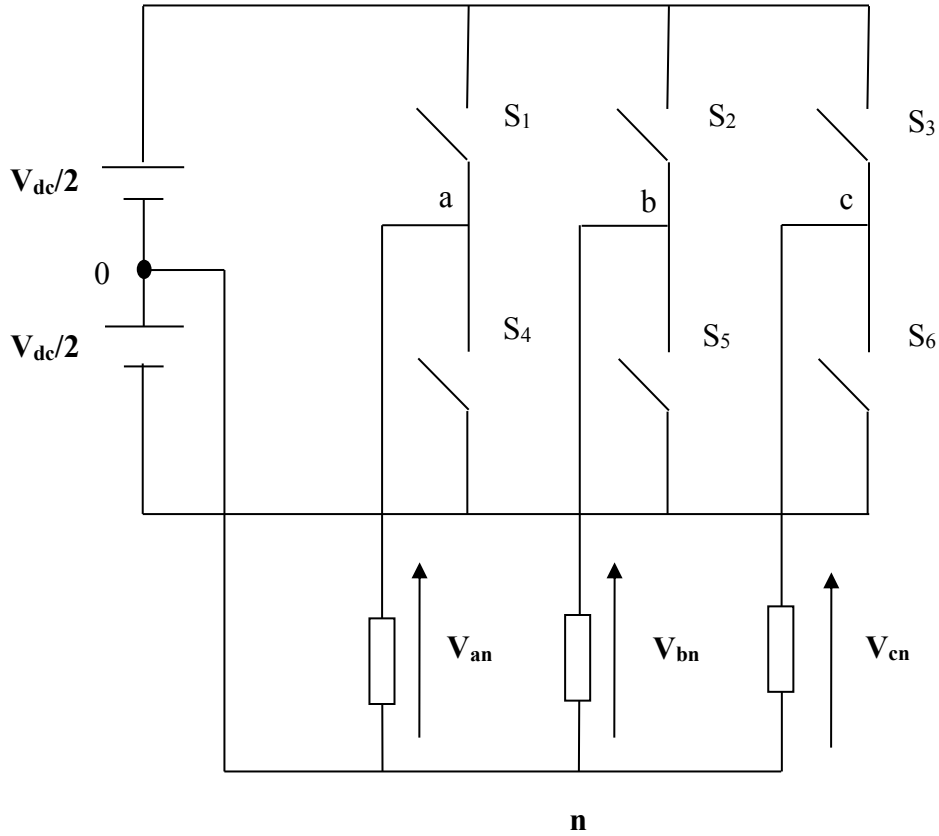


Figure II.5 : Modèle équivalent de l'onduleur à deux niveaux.

Pour exprimer les tensions de sortie de l'onduleur en fonction de la tension dans l'étage continu et de l'état des commutateurs, ces états doivent d'être définis pour les trois bras :

*Tension entre a, b, c et 0(neutre) :

➤ Bras 1 :

$$V_{a0} = V_a - V_0 \begin{cases} +\frac{V_{dc}}{2} & \text{si } S_1 \text{ est fermé} \\ -\frac{V_{dc}}{2} & \text{si } S_4 \text{ est fermé} \end{cases} \quad (\text{II.1})$$

➤ Bras 2 :

$$V_{b0} = V_b - V_0 \begin{cases} +\frac{V_{dc}}{2} & \text{si } S_2 \text{ est fermé} \\ -\frac{V_{dc}}{2} & \text{si } S_5 \text{ est fermé} \end{cases} \quad (\text{II.2})$$

➤ Bras 3 :

$$V_{c0} = V_c - V_0 \begin{cases} +\frac{V_{dc}}{2} & \text{si } S_3 \text{ est fermé} \\ -\frac{V_{dc}}{2} & \text{si } S_6 \text{ est fermé} \end{cases} \quad (\text{II.3})$$

*Les tensions simples V_{an} , V_{bn} et V_{cn} :

Si la charge est équilibrée et couplée en étoile : la somme des courants de ligne est nulle, ce qui implique que la somme des tensions simples est égale à zéro, donc:

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad (\text{II.4})$$

A partir des relations précédentes, on tire :

$$\begin{aligned}
V_{an} &= \frac{1}{3} [2(V_a - V_0) - (V_b - V_0) - (V_c - V_0)] \\
V_{bn} &= \frac{1}{3} [2(V_b - V_0) - (V_a - V_0) - (V_c - V_0)] \\
V_{cn} &= \frac{1}{3} [2(V_c - V_0) - (V_a - V_0) - (V_b - V_0)]
\end{aligned} \tag{II.5}$$

***Tension composée V_{ab} , V_{bc} et V_{ca} :**

De ces tensions simples, on déduit les tensions composées entre les bornes de sortie de l'onduleur, tel que :

$$\begin{aligned}
V_{ab} &= (V_{an} - V_{bn}) \\
V_{bc} &= (V_{bn} - V_{cn}) \\
V_{ca} &= (V_{cn} - V_{an})
\end{aligned} \tag{II.6}$$

De ces équations on tire :

$$\begin{aligned}
V_{an} &= \frac{1}{3} (V_{ab} - V_{ca}) = \frac{1}{3} [2V_{a0} - V_{b0} - V_{c0}] \\
V_{bn} &= \frac{1}{3} (V_{bc} - V_{ab}) = \frac{1}{3} [2V_{b0} - V_{a0} - V_{c0}] \\
V_{cn} &= \frac{1}{3} (V_{ca} - V_{bc}) = \frac{1}{3} [2V_{c0} - V_{a0} - V_{b0}]
\end{aligned} \tag{II.7}$$

On définit les fonctions logiques de connexion par S_{ij} tel que :

$$V_{ij} = (1 - S_{ij}) \cdot V_{dc} \tag{II.8}$$

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{dc}(S_1 - S_2) \\ V_{bc} = V_{dc}(S_2 - S_3) \\ V_{ca} = V_{dc}(S_3 - S_1) \end{cases} \tag{II.9}$$

Ainsi l'onduleur a comme modèle mathématique l'équation suivante :

$$\begin{pmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{pmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} \tag{II.10}$$

II.5 Modélisation du réseau électrique

Le réseau est assimilable à une source de tension sinusoïdale en série avec une impédance, dit de court-circuit, d'où la représentation du réseau par un système de f.e.m triphasé équilibré en série avec une impédance figure II.6.

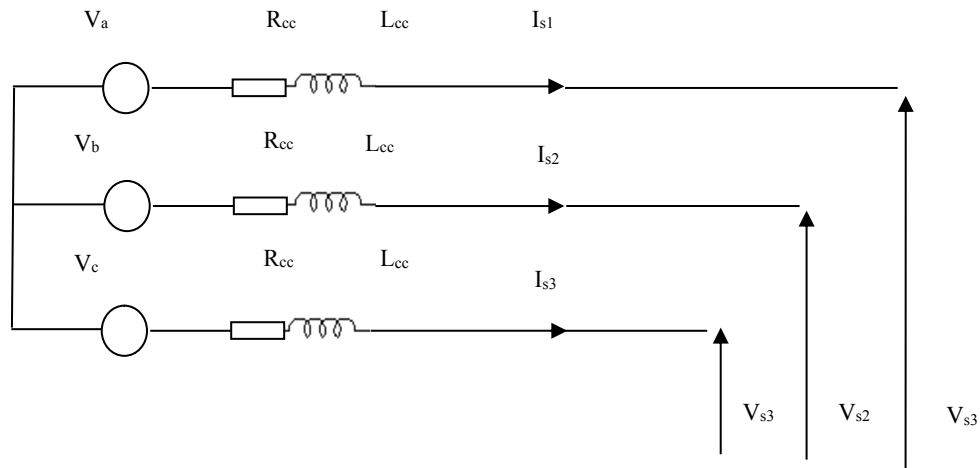


Figure II.6 : Schéma symbolique d'un réseau électrique.

Avec :

$$\begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix} = \sqrt{2} V_{eff} \begin{pmatrix} \sin(\theta) \\ \sin(\theta - 2 \cdot \frac{\pi}{3}) \\ \sin(\theta - 4 \cdot \frac{\pi}{3}) \end{pmatrix} \quad (II.11)$$

Où : $\theta = \omega t$

$\omega = 2\pi \cdot f_r$: pulsation du réseau [2].

II.6 La charge polluante

Les redresseurs sont les convertisseurs de l'électronique de puissance qui assurent la conversion alternative-continue (AC/DC). Alimentés par une source de tension alternative, ils permettent d'alimenter en courant continu le récepteur branché à leur sortie [2]. On utilise des redresseurs chaque fois qu'on a besoin des sources continues sachant que l'énergie électrique est disponible en alternative.

II.6.1 Le redresseur à thyristors

Le redresseur triphasé à thyristors ou pont de Graëtz triphasé figure II.7 constitue l'un des montages de l'électronique de puissance les plus répandus dans le secteur industrie. Il permet de réguler la puissance délivrée à une charge en modifiant la tension continue appliquée à ses bornes à l'aide des thyristors. Ceci se fait en jouant sur l'angle de commande des gâchettes, est défini par l'écart entre l'amorçage commande et l'amorçage naturel des thyristors ses utilisateurs sont nombreux :

- La commande en vitesse variable des moteurs à courant continu.
- la commande en vitesse variable des machines synchrones.
- les électrolyseurs [8].

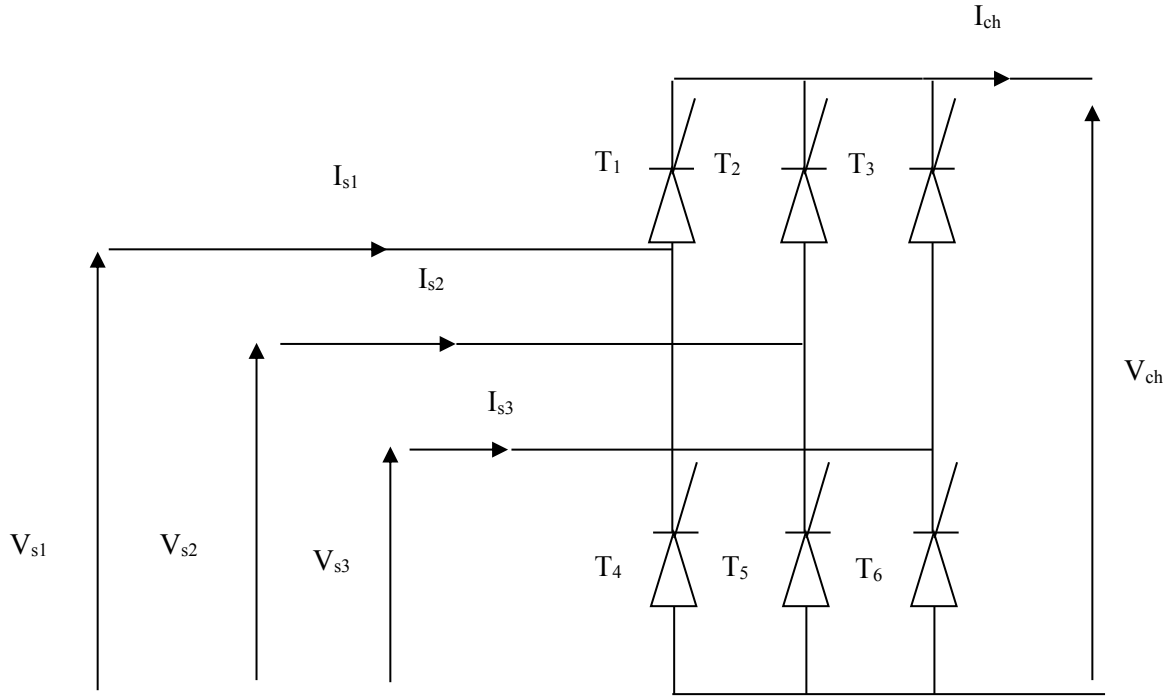


Figure II.7 : Redresseur à thyristors.

II.6.2 Etude de la tension de charge

Le commutateur le plus positive délivre une tension formée de q portion de sinusoïde par période de la tension de réseau.

Le commutateur plus positif donne une tension :

$$V_m - V_0 = V_1 \text{ pour } \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{q} + \alpha < \omega.t < \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{q} + \alpha$$

$$V_m - V_0 = V_2 \text{ pour } \frac{\pi}{2} - \frac{3\pi}{q} + \alpha < \omega.t < \frac{\pi}{2} + \frac{5\pi}{q} + \alpha \quad (\text{II.12})$$

$$V_m - V_0 = V_3 \text{ pour } \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{q} + \alpha < \omega.t < \frac{\pi}{2} + \frac{3\pi}{q} + \alpha$$

Le commutateur plus négatif donne une tension :

$$V_n - V_0 = V_1 \text{ pour } \frac{3\pi}{2} - \frac{\pi}{q} + \alpha < \omega.t < \frac{3\pi}{2} + \frac{\pi}{q} + \alpha$$

$$V_n - V_0 = V_2 \text{ pour } \frac{3\pi}{2} + \frac{\pi}{q} + \alpha < \omega.t < \frac{3\pi}{2} + \frac{3\pi}{q} + \alpha \quad (\text{II.13})$$

$$V_n - V_0 = V_3 \text{ pour } \frac{3\pi}{2} + \frac{3\pi}{q} + \alpha < \omega.t < \frac{3\pi}{2} + \frac{5\pi}{q} + \alpha$$

La tension de charge V_{ch} est donnée par la différence :

$$V_{ch} = (V_m - V_0) - (V_n - V_0) \quad (\text{II.14})$$

La valeur moyenne

La valeur moyenne de la tension redressée est donnée par :

$$V_{ch\ moy} = (V_m - V_0)_{moy} - (V_n - V_0)_{moy} \quad (II.15)$$

Tel que, pour $\frac{3\pi}{2} - \frac{\pi}{q} + \alpha < \omega \cdot t < \frac{3\pi}{2} + \frac{\pi}{q} + \alpha$

$$(V_m - V_0)_{moy} = \frac{q}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{q} + \alpha}^{\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{q} + \alpha} v\sqrt{2} \sin(\omega t) d\omega t \quad (II.16)$$

$$(V_m - V_0)_{moy} = \frac{q}{\pi} v\sqrt{2} \sin \frac{q}{\pi} \cos \alpha \quad (II.17)$$

Et de même manière pour $(V_n - V_0)_{moy}$:

$$(V_n - V_0)_{moy} = \frac{q}{\pi} v\sqrt{2} \sin \frac{q}{\pi} \cos \alpha \quad (II.18)$$

Donc : La tension moyenne redressée est donnée par la relation suivante :

$$V_{ch\ moy} = (V_m - V_0)_{moy} - (V_n - V_0)_{moy} = \frac{q}{\pi} v\sqrt{2} \sin \frac{q}{\pi} \cos \alpha + \frac{q}{\pi} v\sqrt{2} \sin \frac{q}{\pi} \cos \alpha$$

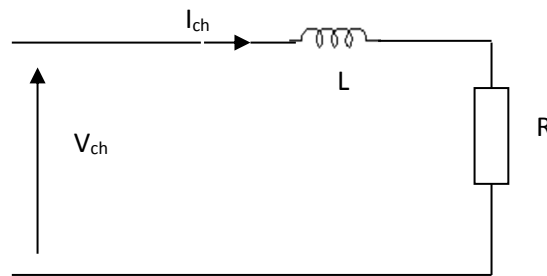
$$V_{ch\ moy} = 2 \left(\frac{q}{\pi} v\sqrt{2} \sin \frac{q}{\pi} \cos \alpha \right) \quad (II.19)$$

La tension redressée efficace est donnée par :

$$V_{ch\ eff} = v\sqrt{2} \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{3\sqrt{3}}{\pi} \cos(2\alpha)} \quad (II.20)$$

II.6.3 Etude du courant**II.6.3.1 Le courant de charge**

A partir de la maille présentée ci-dessous on déduit l'équation (II.22) du courant de charge



$$V_{ch} = R \cdot I_{ch} + L \frac{dI_{ch}}{dt} \quad (II.21)$$

$$I_{ch} \dot{+} \frac{R}{L} I_{ch} = \frac{1}{L} V_{ch} \quad (II.22)$$

II.6.3.2 Les courants des lignes

Dans le cas générale d'un redresseur l'expression du courant de ligne est donnée par :

$$I_{s1} = \begin{cases} +I_{ch} & \text{si } \frac{\pi}{6} + \alpha + 2k\pi < \theta < \frac{5\pi}{6} + \alpha + 2k\pi \\ 0 & \text{si } \begin{cases} \alpha + 2k\pi < \theta < \frac{\pi}{6} + \alpha + 2k\pi \\ \frac{5\pi}{6} + \alpha + 2k\pi < \theta < \frac{7\pi}{6} + \alpha + 2k\pi \\ \frac{11\pi}{6} + \alpha + 2k\pi < \theta < \frac{12\pi}{6} + \alpha + 2k\pi \end{cases} \\ -I_{ch} & \text{si } \frac{7\pi}{6} + \alpha + 2k\pi < \theta < \frac{11\pi}{6} + \alpha + 2k\pi \end{cases} \quad (II.23)$$

Chaque enroulement secondaire est connecté à deux thyristors.

Il est parcouru par I_{ch} pendant l'intervalle (T/q) ou le thyristor de premier groupe débite, et par $(-I_{ch})$ pendant l'intervalle de durée (T/q) ou c'est celle du second groupe qui conduit. Ainsi

$I_{s1} = +I_{ch}$, quand T_1 conduit.

$I_{s1} = -I_{ch}$, quand T_4 conduit.

$I_{s1} = 0$, quand T_1, T_4 ne conduisent.

Les courants ont donc pour valeur efficace : $I_{s1 \text{ eff}} = I_{ch} \sqrt{\frac{2}{q}}$ (II.24)

II.6.3.3 Développement en série (harmonique courant)

Un réseau alimentant un montage redresseur fournit à celui-ci un courant presque rectangulaire comme montre la figure II.8.

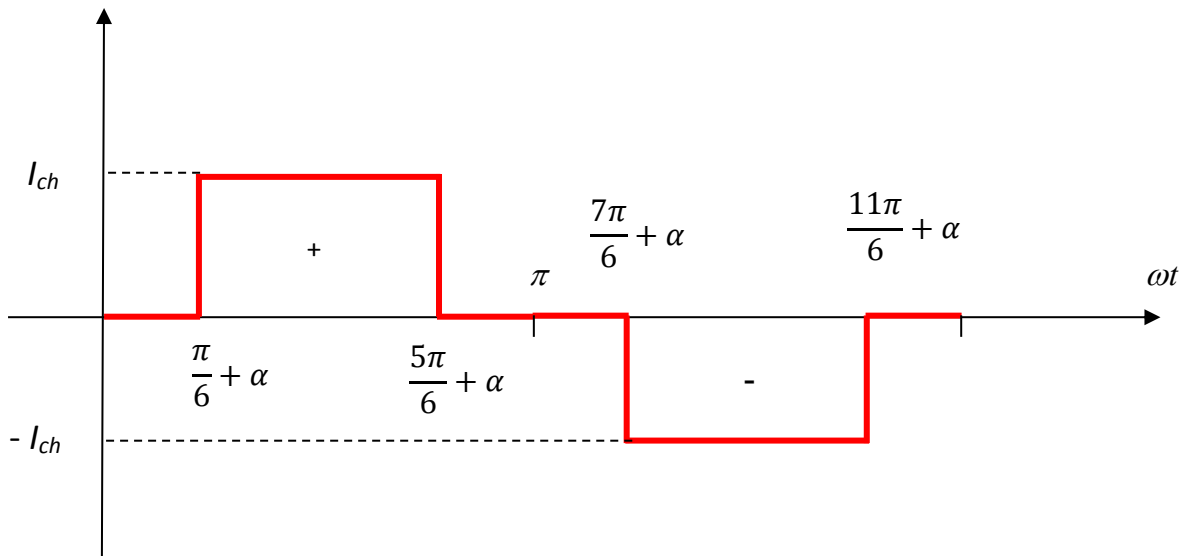


Figure II.8 : La forme rectangulaire du courant d'entrée du pont à thyristor.

I_{s2} et I_{s3} sont décalés respectivement de 120° et 240° par rapport à I_{s1} . En réalité la forme des ondes de courant ne sont pas rectangulaire (créneau), mais ont une forme ondulée due à la présence d'une inductance en aval avec le redresseur [2].

Pour décomposer ces courants on appliquera le théorème de Fourier :

$$s(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cdot \cos(n\omega t) + b_n \cdot \sin(n\omega t) \quad (\text{II.25})$$

$I_{s1}(t)$ est impaire (symétrie par rapport à l'origine) donc $a_0 = a_n = 0$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} I_{s1}(t) \sin(n\omega t) d\omega t \quad (\text{II.26})$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_{\frac{5\pi}{6}+\alpha}^{\frac{5\pi}{6}} I_{ch}(t) \sin(n\omega t) d\omega t + \frac{1}{\pi} \int_{\frac{7\pi}{6}+\alpha}^{\frac{11\pi}{6}+\alpha} (-I_{ch})(t) \sin(n\omega t) d\omega t \quad (\text{II.27})$$

Pour $\alpha=0^\circ$ et après le calcul on trouve :

$$b_n = \frac{2I_{ch}}{n\pi} [(1 - (-1)^n)] \cos\left(\frac{n\pi}{6}\right) \quad (\text{II.28})$$

$$b_n = \begin{cases} 0 & \text{si } n \text{ pair} \\ \frac{4I_{ch}}{n\pi} \cos\left(\frac{n\pi}{6}\right) & \text{si } n \text{ impair} \\ 0 & \text{si } n \text{ multiple de } 3 \end{cases} \quad (\text{II.29})$$

Donc :

$$n=1, [5,7], [11,13], [17,19], [23,25], \dots, [6k-1, 6k+1], \text{ et } k=1,2,3,\dots \quad (\text{II.30})$$

$$I_{s1} = \sum_{n=1}^{\infty} b_n \cdot \sin(n\omega t). \quad (\text{II.31})$$

$$I_{s1}(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4I_{ch}}{n\pi} b_n \cdot \cos\left(\frac{n\pi}{6}\right) \cdot \sin(n\omega t) \quad (\text{II.32})$$

Le courant d'entrée du redresseur de la première phase est donné par la relation suivante :

$$I_{s1}(t) = 2I_{ch} \frac{\sqrt{3}}{\pi} \left[\sin(n\omega t) - \frac{1}{5} \sin(5\omega t) - \frac{1}{7} \sin(7\omega t) + \frac{1}{11} \sin(11\omega t) - \frac{1}{13} \sin(13\omega t) - \dots \right]$$

La valeur efficace du courant fondamentale est :

$$I_{s1\text{feff}} = I_{ch} \frac{\sqrt{6}}{\pi} \quad (\text{II.33})$$

La valeur efficace du courant fondamentale est :

$$I_{1\text{hareff}} = 0.03I_{ch} \quad (\text{II.34})$$

II.7 Résultats de simulation

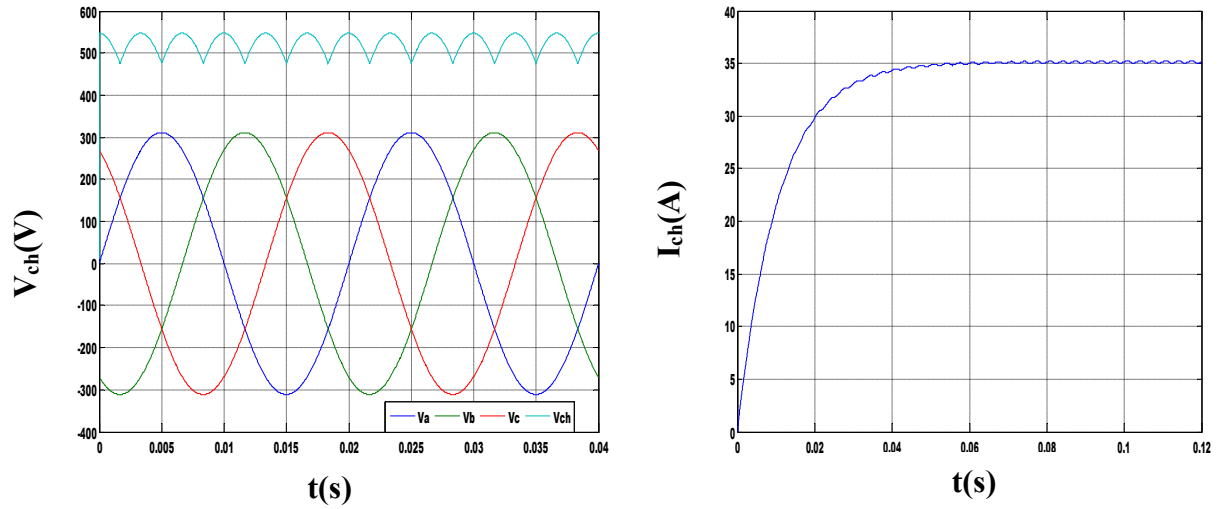
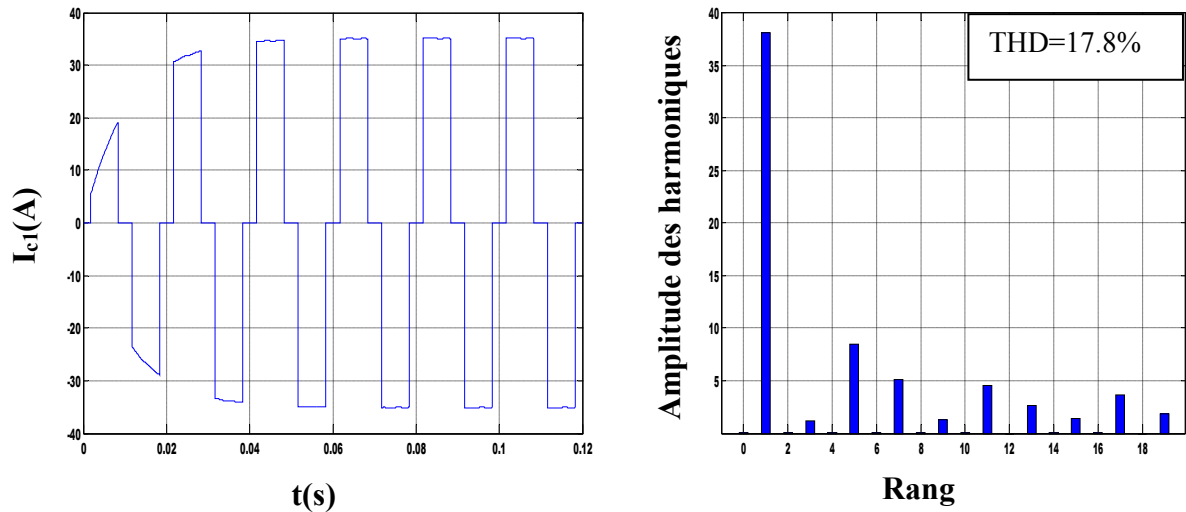
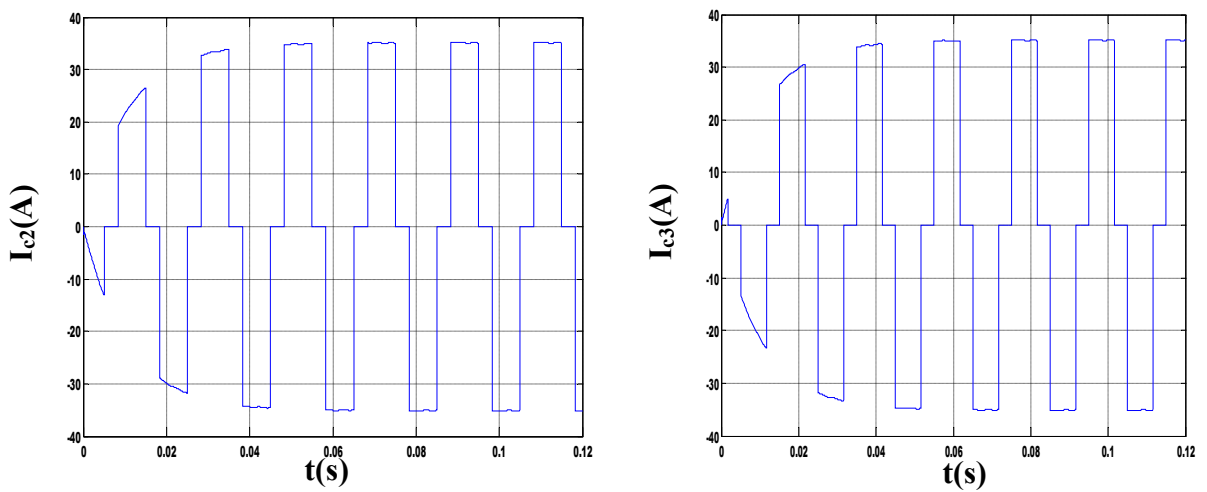
a-Pour $\alpha=0^\circ$ 

Figure II.9 : Tension de charge et courant de charge.

Figure II.10 : Courant de ligne I_{c1} et son spectre avant filtrage.Figure II.11 : Courants de ligne I_{c2} et I_{c3} .

b-Pour $\alpha=30^\circ$

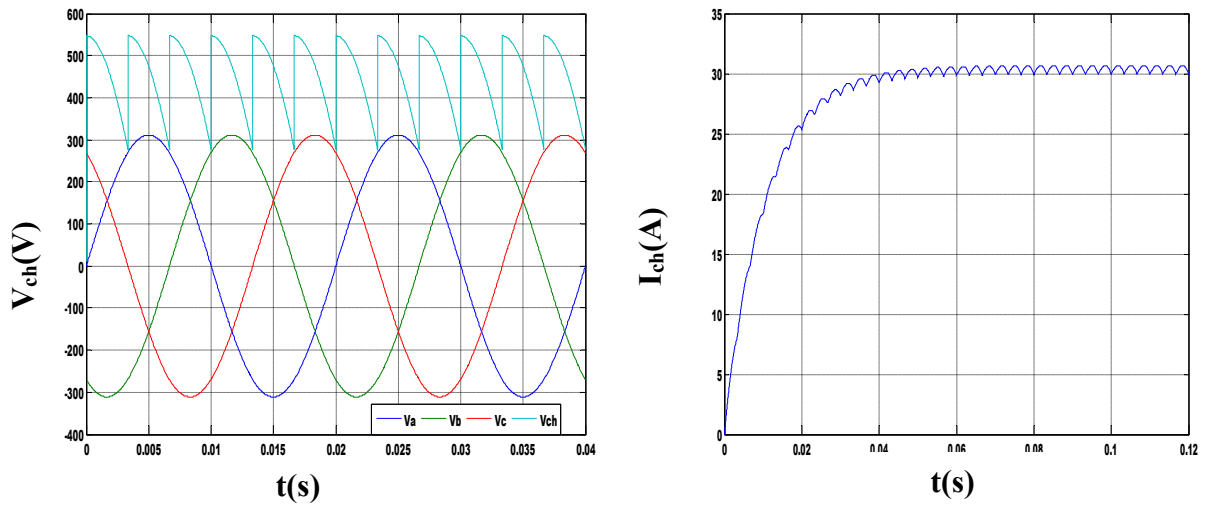


Figure II.12 : Tension de charge et courant de charge.

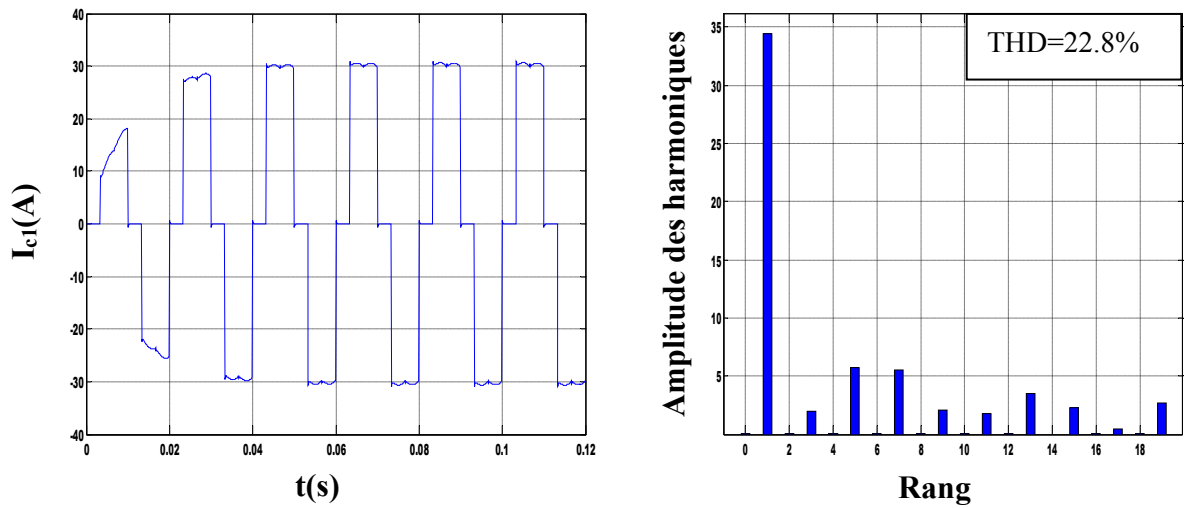


Figure II.13 : Courant de ligne I_{c1} et son spectre avant filtrage.

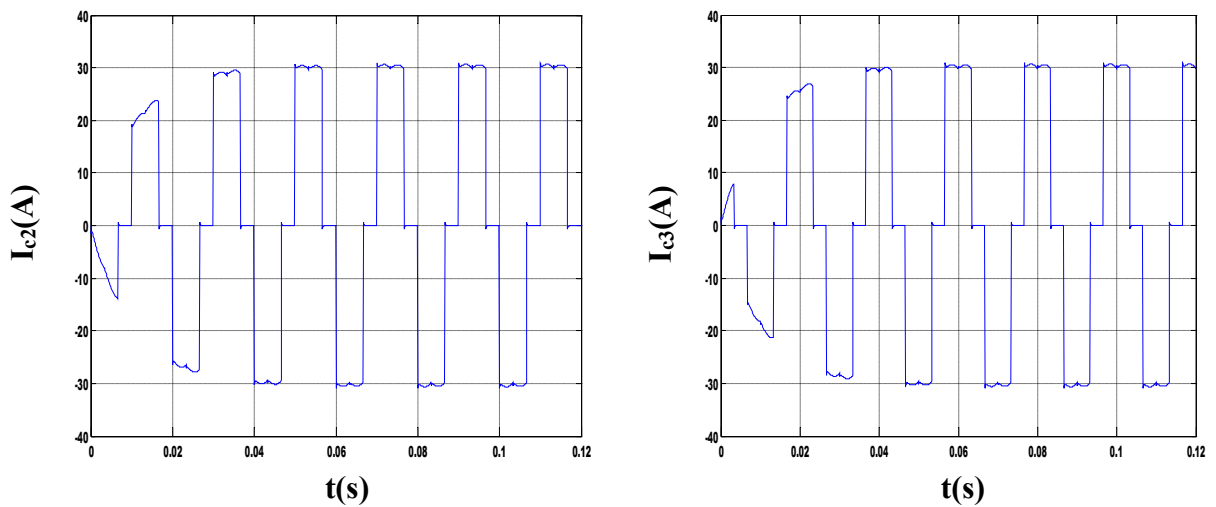


Figure II.14 : Courants de ligne I_{c2} et I_{c3} .

c-Pour $\alpha=60^\circ$

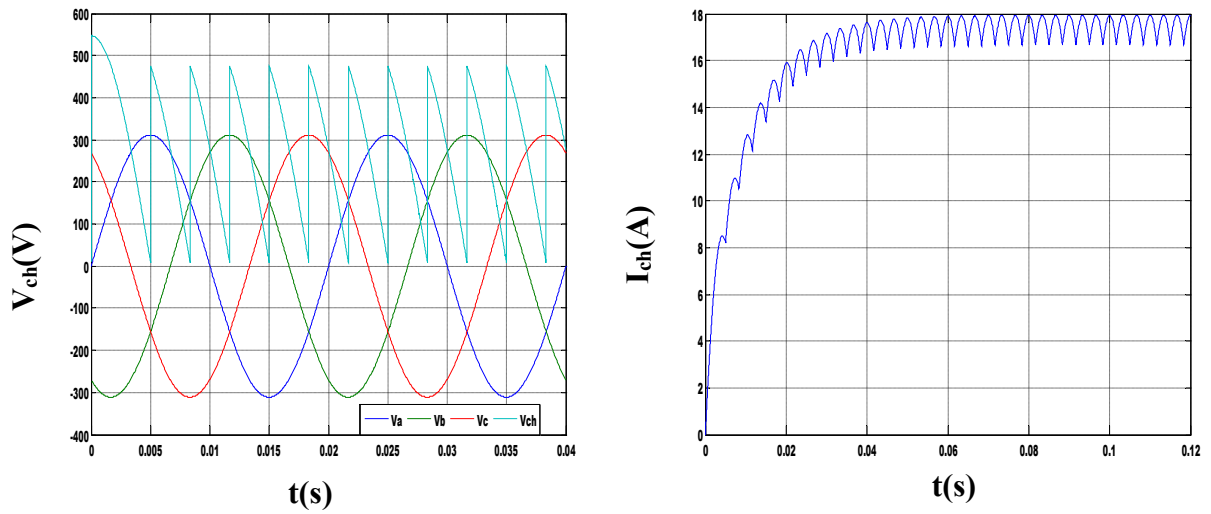


Figure II.15 : Tension de charge et courant de charge.

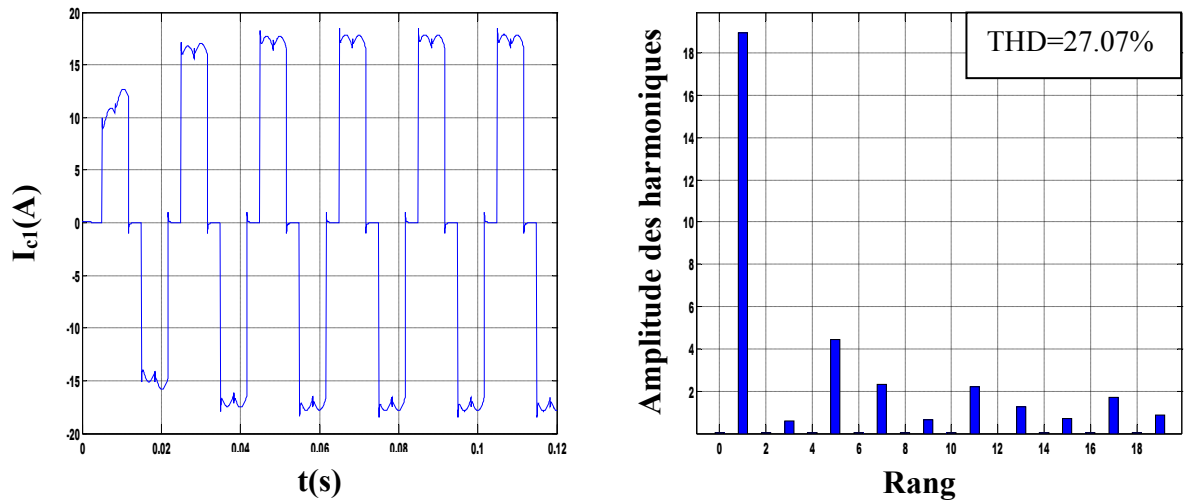


Figure II.16 : Courant de ligne I_{c1} et son spectre avant filtrage.

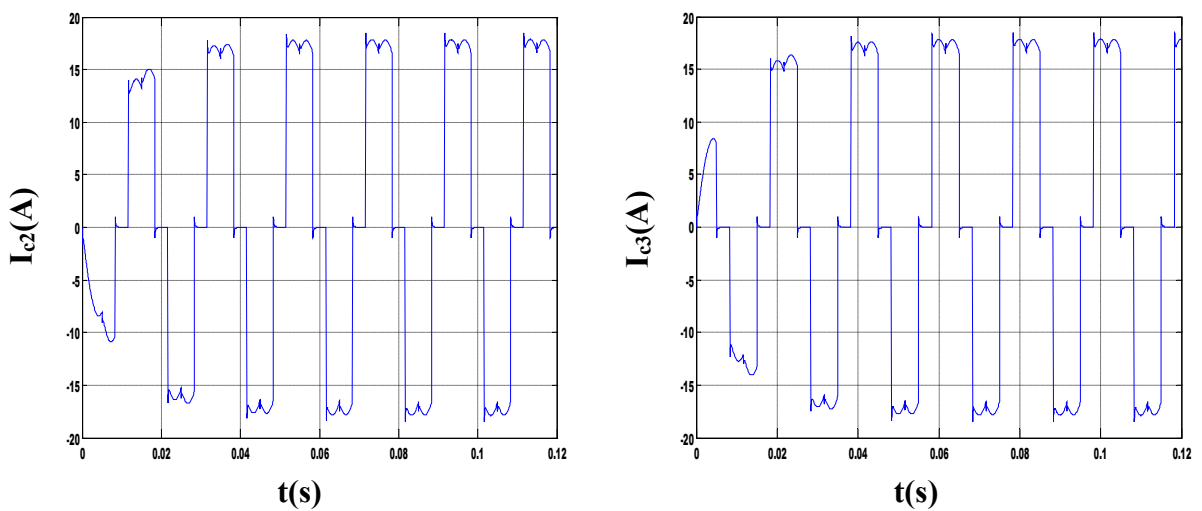


Figure II.17 : Courants de ligne I_{c2} et I_{c3} .

II.8 Interprétation

Les figures (II-9-12-15) montrent les résultats obtenus avec le pont à thyristor qui alimente une charge de type RL, pour les angles d'amorçage (0° , 30° et 60°), de la tension et le courant de charge.

Les figures (II-10-11-13-14-16-17) avec les angles d'amorçage (0° , 30° et 60°), présentent les trois courants de lignes sous forme quasi-rectangulaire en raison de l'existence des harmoniques (5.7.9.11.13.19..), comme illustrée dans le spectre de courant de ligne.

Aussi les figures (II-11.14.17) montrent la présence de la fondamentale (du rang 1) avec un THD avant filtrage pour les angles d'amorçages comme suit :

* $\alpha = 0^\circ$ THD = 17.8%.

* $\alpha = 30^\circ$ THD = 22.89%.

* $\alpha = 60^\circ$ THD = 27.07%.

II.9 Identification des courants harmoniques de référence

II.9.1 Méthodes du domaine fréquentiel

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

Les inconvénients les plus importants de ces méthodes sont des résultats moyens en régime transitoire et un volume de calcul et une allocation de mémoire très considérables [12].

II.9.2 Méthode du domaine temporel

Les méthodes du domaine temporel permettent une réponse plus rapide et requièrent moins d'opérations que les méthodes précédentes. Le principe de ce type de méthodes est la séparation du fondamental ou de certains harmoniques du reste des harmoniques par filtrage. Les méthodes les plus importantes sont [12] :

- La théorie P-Q de la puissance instantanée.
- Algorithme du Repère de Référence Synchronisé (SRF).
- Algorithme de la détection synchronisée (SDA).
- Algorithme Fryze-Bucholz Depenbanck (FBD).
- La méthode sinusoïdale Généralisée de Fryze (SGF).

- La méthode basée sur le courant actif.
- La méthode tri-monophasée.
- La méthode basée sur la régulation de la tension.

II.10 Stratégie d'identification

La stratégie de commande se base sur la détection des courants perturbateurs dans le domaine temporel. Il existe 3 possibilités d'identification des courants perturbateurs.

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

La première méthode est la plus utilisée pour le filtre actif parallèle pour compenser les courants perturbateurs causés par les charges polluantes. Cette méthode de détection sera employée dans cette étude [12].

II.11 Principe du fonctionnement de la méthode des puissances instantanées

II.11.1 Généralités sur les puissances instantanées

En présence des harmoniques, la puissance apparente est composée de trois parties : active (P), réactive (Q) et déformante (D) comme le montre la relation :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (\text{II.35})$$

Cette méthode exploite la transformation (α - β) pour obtenir les puissances réelles et imaginaires. Notons par (V_α, V_β) et (I_α, I_β) les composantes orthogonales du repère α - β associées respectivement aux tensions de raccordement du filtre actif parallèle (V_s) et aux courants absorbés par les charges polluantes (I_s).

La transformation de CLARK permet d'obtenir un système triphasé de tension (V_A, V_B, V_C) ou de courant (I_A, I_B, I_C) de somme nulle un vecteur caractérisé par projections (V_α et V_β) ou (I_α et I_β), la relation des tensions suivante [12] :

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.36})$$

La relation des courants ci-dessous :

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.37})$$

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

$$\begin{cases} P(t) = V_{s1} I_{s1} + V_{s2} I_{s2} + V_{s3} I_{s3} = p(t) + p_0(t) \\ p(t) = V_\alpha I_\alpha + V_\beta I_\beta \\ p_0(t) = V_0 I_0 \end{cases} \quad (II.38)$$

Avec $p(t)$ la puissance réelle instantanée, $p_0(t)$ la puissance homopolaire instantanée. L'avantage de la transformation (α - β -0) est la séparation des séquences homopolaires du système triphasé de courant ou de tension. De la même manière, la puissance imaginaire instantanée peut s'écrire sous la forme suivante :

$$Q(t) = -\frac{1}{\sqrt{3}}[(V_{s1} - V_{s2})I_{s3} + (V_{s2} - V_{s3})I_{s1} + (V_{s3} - V_{s1})I_{s2}] = V_\alpha I_\beta - V_\beta I_\alpha \quad (II.39)$$

Les puissances réelle et imaginaire instantanées notée par P et Q , sont définies par la relation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_\alpha & V_\beta \\ -V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} \quad (II.40)$$

Dans le cas général, chacune de ces puissances peut être décomposée en un terme p_f ou q_f correspondant à sa valeur moyenne et un terme p_h ou q_h correspondant à sa fluctuation, ce qui nous permet d'écrire l'expression ci-dessous :

$$\begin{cases} P = p_f + p_h \\ Q = q_f + q_h \end{cases} \quad (II.41)$$

Avec :

- p_f une puissance continue liée à la composante fondamentale active du courant et de la tension.
- q_f une puissance continue liée à la composante fondamentale réactive du courant et de la tension.
- p_h et q_h des puissances alternatives liées à la somme des composantes perturbatrices du courant et de la tension [2].

II.11.2 Séparation des puissances

Les puissances définies précédemment contiennent un terme constant relatif au fondamentale ainsi qu'un terme alternatif correspondant aux harmoniques ; afin de ne garder que la partie relative aux harmoniques, la composante continue de la puissance doit être filtrée. Cette séparation peut être réalisée en utilisant l'un des deux artifices de filtrage, un filtre passe-haut ou un filtre passe-bas comme l'indique la figure ci-dessous [3].

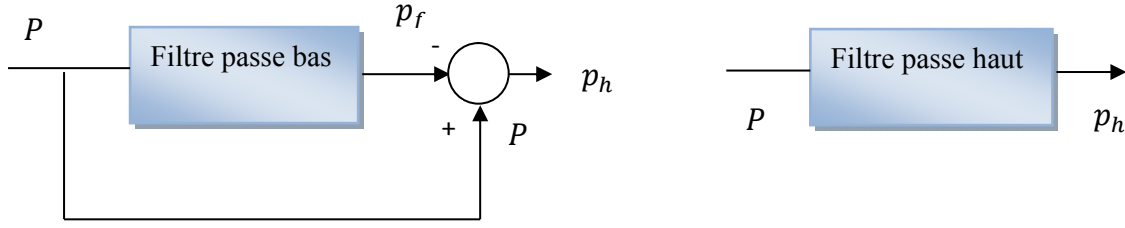


Figure II.18 : Séparation des puissances.

L'ordre de ce filtre passe-bas définit la dynamique et l'efficacité de la méthode d'identification. La relation suivante donne l'expression générale de la fonction de transfert d'un filtre passe-bas du deuxième ordre que nous allons l'utiliser :

$$F(s) = \frac{1}{(1 + \tau \cdot s)^2} \quad (\text{II.42})$$

II.12 Calcul des courants perturbateurs

De l'équation (II.40) nous pouvons recalculer les courants dans les repaires (α , β) comme suit :

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} \quad (\text{II.43})$$

Tel que

$$\Delta = V_\alpha^2 + V_\beta^2 \quad (\text{II.44})$$

Avec Δ supposé constant dans l'hypothèse d'une tension sinusoïdale équilibrée du réseau électrique.

D'après les équations (II.40), et (III.41) nous pouvons séparer le courant dans le repaire (α , β) en trois composantes, active et réactive à la fréquence fondamentale et les harmoniques [11].

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_f \\ 0 \end{bmatrix}}_{\text{Courant actif}} + \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ q_f \end{bmatrix}}_{\text{Courant réactif}} + \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_h \\ q_h \end{bmatrix}}_{\text{Courant harmonique}} \quad (\text{II.45})$$

Les composantes harmoniques des courants seront :

$$\begin{bmatrix} I_{1har} \\ I_{2har} \\ I_{3har} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_h \\ q_h \end{bmatrix} \quad (\text{II.46})$$

II.12.1 Algorithme d'identification des courants harmoniques

L'algorithme d'identification que nous avons défini peut être représenté par le synopsis de la figure II-19. Par souci de simplification, nous décrirons les matrices des relations (II-36 et II-37), après avoir enlevé les composantes homopolaires.

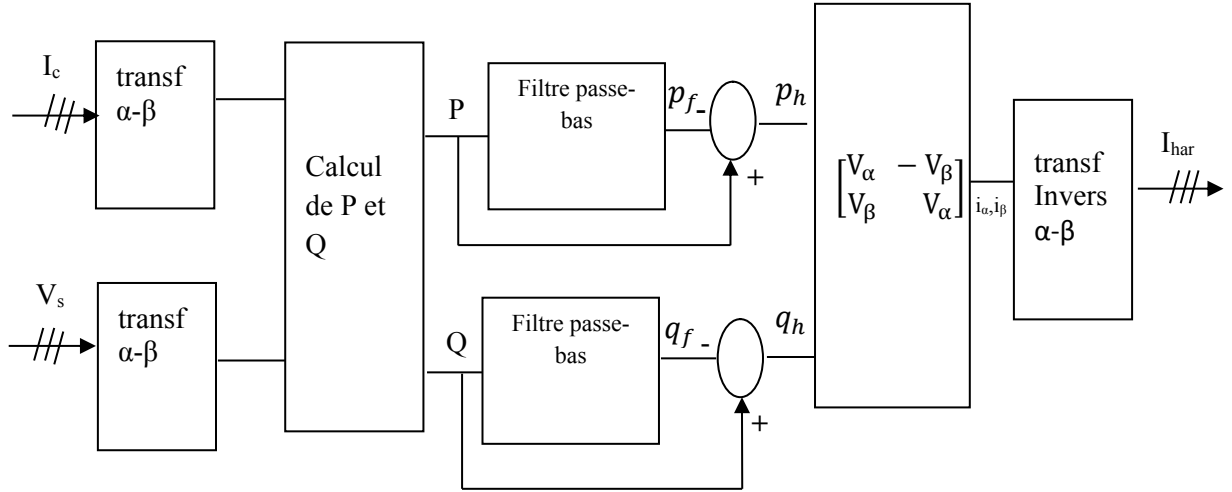


Figure II.19 : Schéma bloc de la méthode d'identification des courants harmoniques.

Dans la figure II.19, nous avons présenté le schéma de l'algorithme d'identification des courants harmoniques, qui est constitués essentiellement, par des blocs de la matrice de transformation (α, β), des filtres passent bas afin d'enlever les composantes continues des puissances, et les différents blocs de calcul du courant harmonique.

II.13 Résultats de simulation

a-Pour $\alpha=0^\circ$

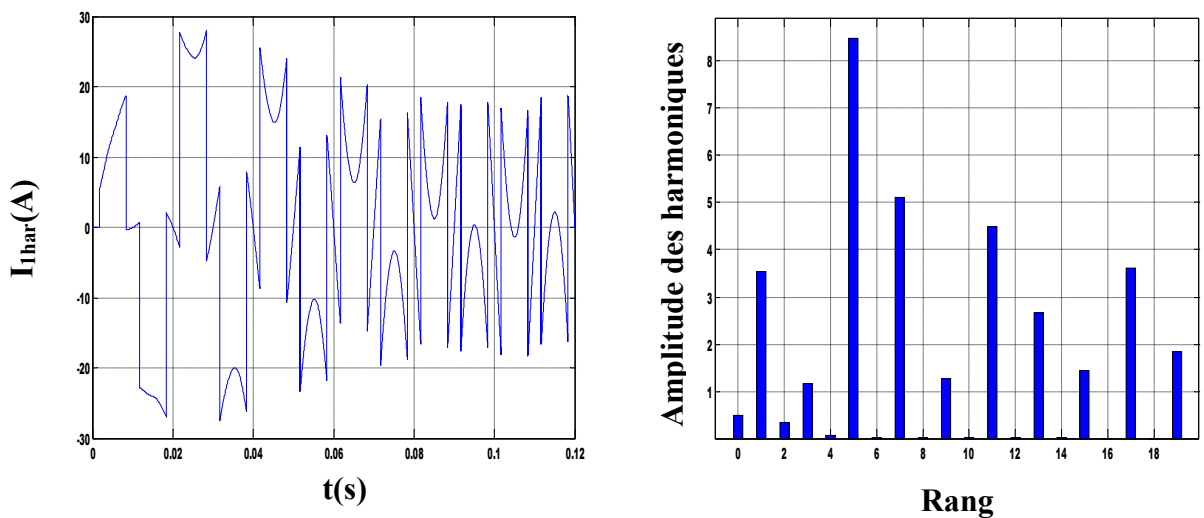


Figure II.20 : Courant harmonique I_{har} identifié et son spectre.

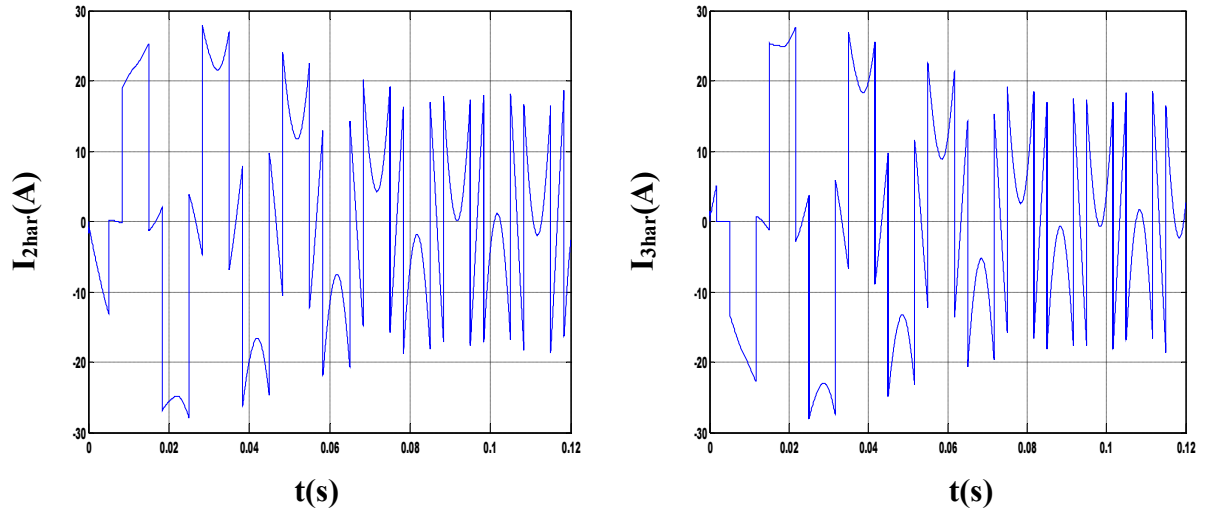
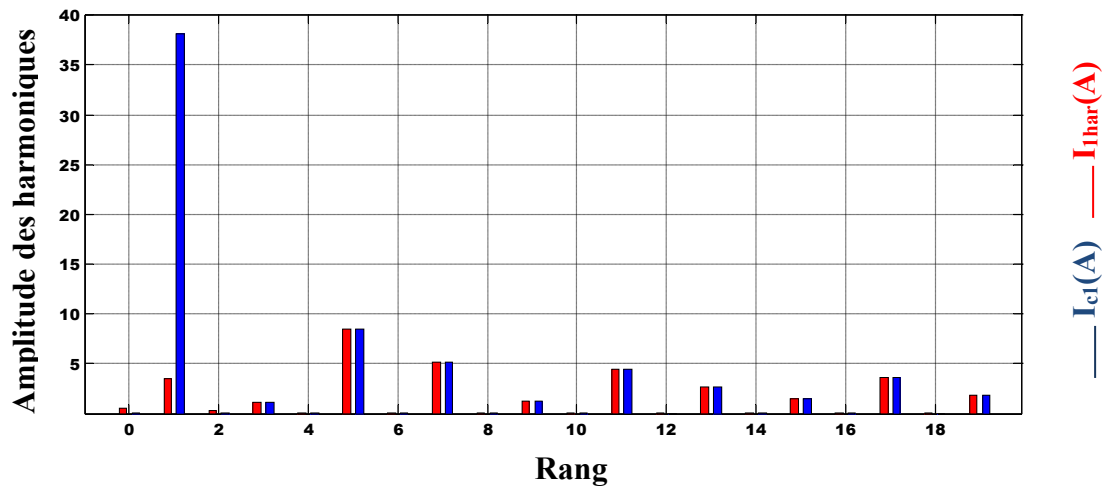
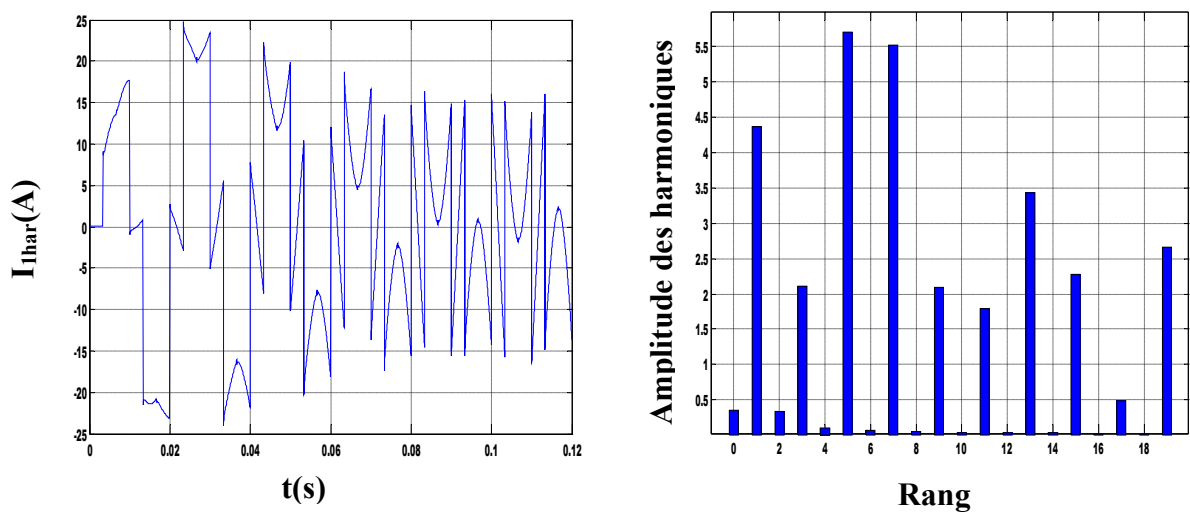
Figure II.21 : Courant harmonique I_{2har} et I_{3har} identifié.

Figure II.22 : Spectre des courants de ligne et d'harmonique identifié.

b-Pour $\alpha=30^\circ$ Figure II.23 : Courant harmonique I_{1har} identifié et son spectre.

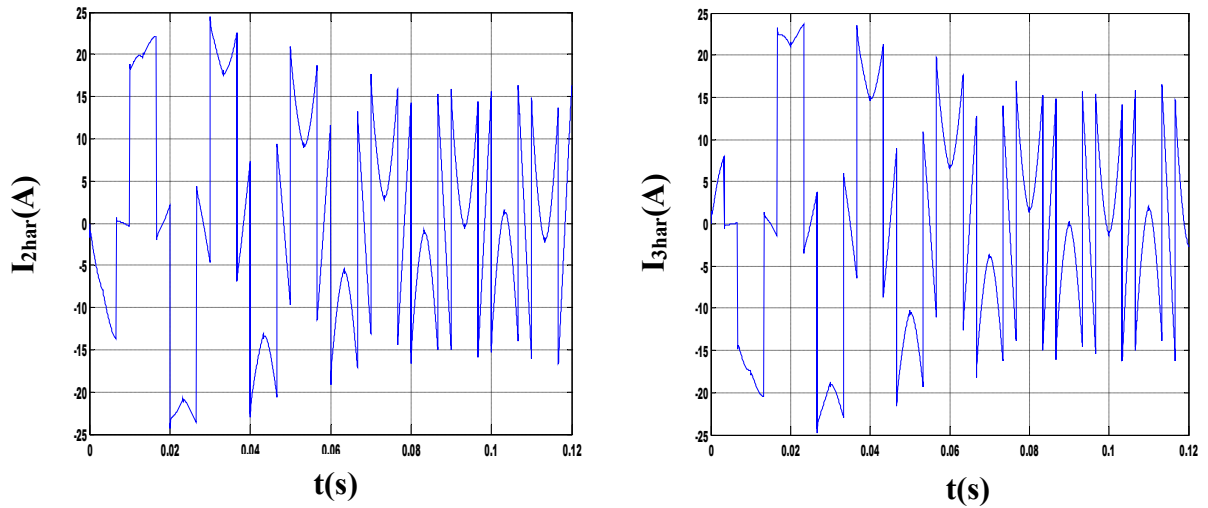
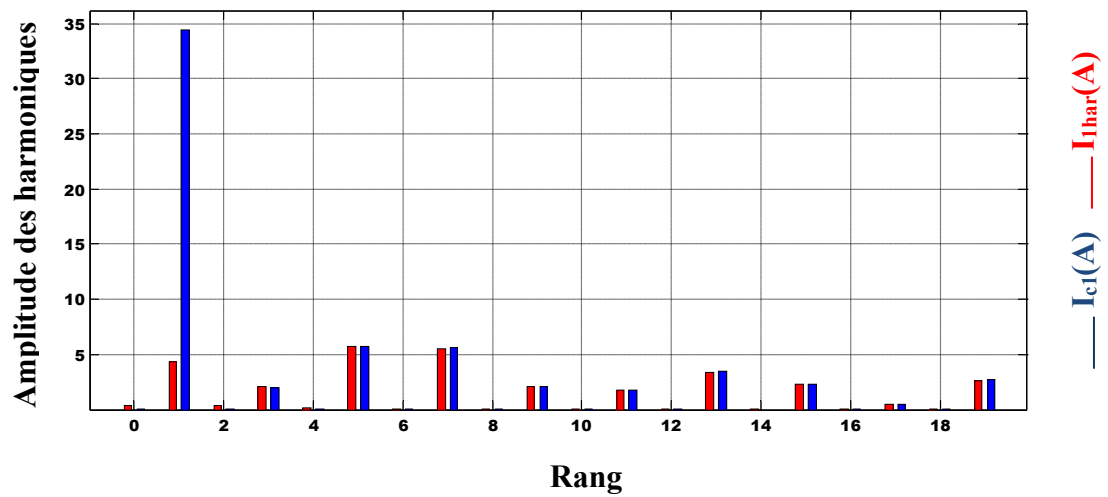
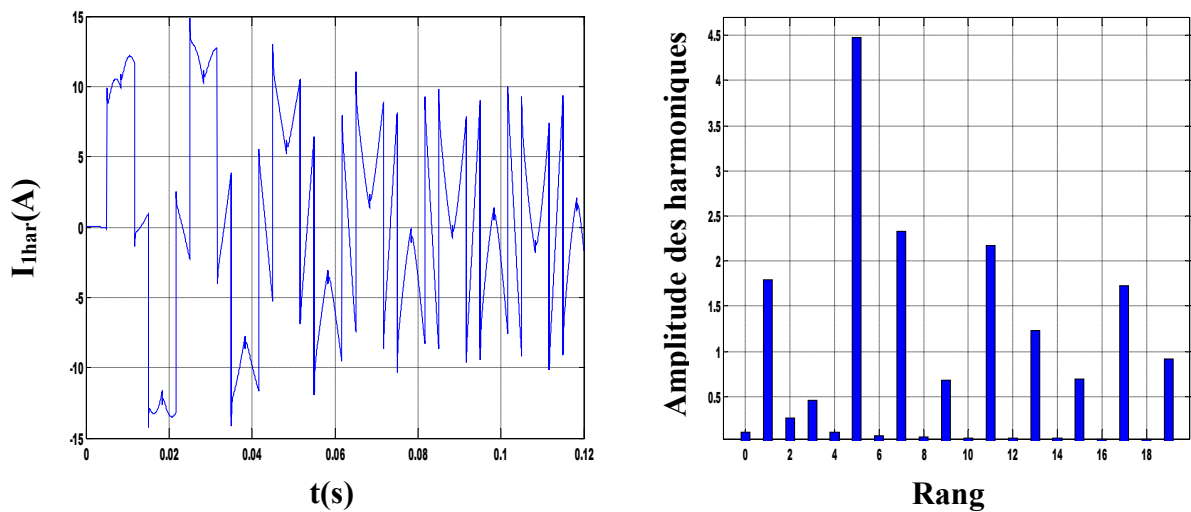
Figure II.24 : Courant harmonique I_{2har} et I_{3har} identifié.

Figure II.25 : Spectre des courants de ligne et d'harmonique identifié.

c-Pour $\alpha=60^\circ$ Figure II.26 : Courant harmonique I_{1har} identifié et son spectre.

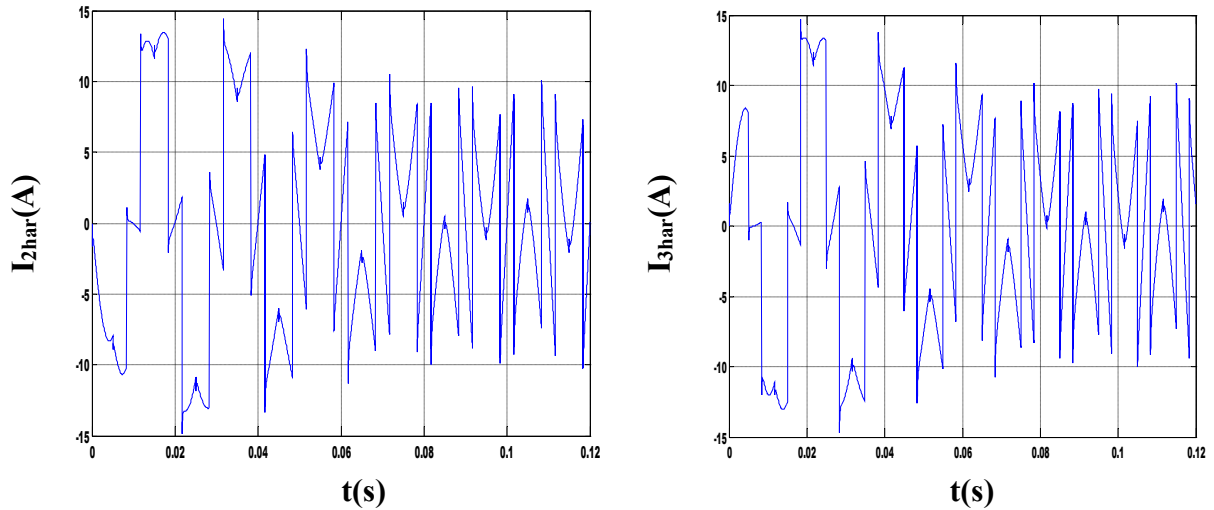


Figure II.27 : Courant harmonique I_{2har} et I_{3har} identifié.

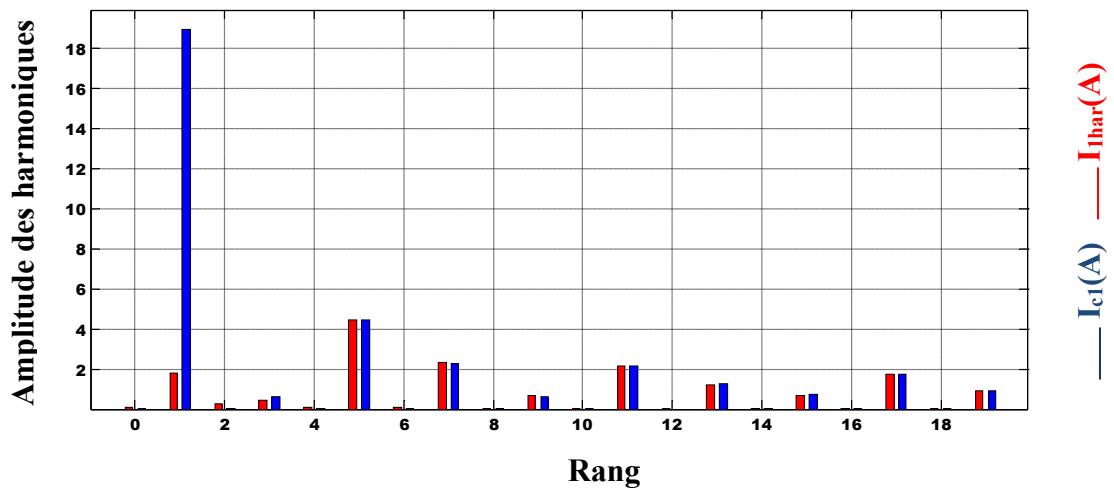


Figure II.28 : Spectre des courants de ligne et d'harmonique identifié.

II.14 Interprétation

La méthode d'identification des courants harmoniques se compose de différents blocs de calcul (courant de charge, la tension de réseau, et tous les blocs nécessaires pour le calcul du courant) pour aboutir aux courants harmoniques comme il est représenté par les figures (II-20-21-23-24-26-27), pour les angles d'amorçage (0° , 30° et 60°). Les figures (II-22-25-28) ci-dessus montrent la coïncidence entre le spectre de courant de ligne et le spectre du courant d'harmonique identifié, on remarque l'absence de la composante fondamentale du courant harmonique identifié par rapport à celle du courant de ligne.

Les courants de références sont bien identifiés par la méthode des puissances instantanées ce qui assure une bonne simulation. Ceci permet également d'injecter des courants harmoniques des onduleurs qui suivent les courants identifiés.

II.15 Conclusion

Dans ce deuxième chapitre on a présenté la structure générale du filtre actif parallèle. Cette structure a été partagée en deux parties :

- la partie puissance constituée de l'onduleur de tension, la source de tension continue et le filtre de sortie (Filtre R L).
- la partie commande incluant l'identification des courants harmoniques par la méthode de puissances instantanées, et la régulation du courant injecté sur le réseau à partir de l'onduleur et la régulation de la tension continue. Ainsi on a présenté la modélisation et la simulation de la charge polluante. Aussi ce chapitre dévoile le principe d'identification des courants harmoniques par la méthode des puissances réelles et imaginaires instantanées qui a été utilisée pour générer les courants de références. La variation de l'angle d'amorçage du pont à thyristor engendre un changement des allures des tensions et courants de charge. Dans le prochain chapitre on présentera les outils de logique floue et son application sur le filtre actif parallèle.

.

Chapitre III

COMMANDE PAR LOGIQUE

FLOUE DU FILTRE ACTIF

PARALLELE

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, on présentera le rôle et on recherchera d'améliorer les performances de l'onduleur à deux niveaux pour compenser les courants harmoniques, ces améliorations peuvent être plus importantes par l'insertion des différentes stratégies de commande. Ces stratégies ont pour objectif à éliminer certains rangs d'harmonique, ainsi que la réduction des perturbations conduites par les convertisseurs statique.

Pour cela, on étudiera deux stratégies différentes qui sont :

- La commande par hystérésis à bande fixe.
- La commande par hystérésis à bande floue.

III.2 La logique floue

Aujourd'hui, la logique floue (en anglais fuzzy logic) est de grande actualité. Il s'agit d'une nouvelle méthode de traitement pour les problèmes de réglage ou de commande.

III.2.1 Domaine d'application

Les systèmes flous ont été utilisés dans une large variété d'applications industrielles, gestionnaires et médicales. Parmi ses applications on peut citer [23] :

- Systèmes audio-visuels (appareils de photos autofocus, caméscope à stabilisateur d'images, photocopieurs, ...).
- Appareils électroménagers (lave-linge, aspirateurs, autocuiseurs, ...etc.).
- Systèmes autonomes mobiles.
- Systèmes de transport (train, métro, ascenseur, ...).
- Systèmes de contrôle/commande dans la plupart des domaines industriels de production

III.3 Principe de la logique floue

La logique floue repose sur la théorie des ensembles flous développée par LOTFIA ZADEH début des années 1960, (automaticien contemporain de kalman de l'université de Californie de Berkeley) [21]. A côté d'un formalisme mathématique fort développé, nous préférons aborder la présentation de manière intuitive [12]. Le terme «logique floue » a deux aspects :

- Le premier correspond à tous les développements concernant la théorie des ensembles flous.
- Le deuxième représente une extension de la logique classique dans le but de raisonner sur des connaissances imparfaites.

Pour le cas de la logique classique (logique de Boole) qui admet deux valeurs 0 ou 1, la classification des personnes selon leurs âges pourrait se faire comme illustré dans la figure III.1.

Toutes les personnes âgées de moins de 30 ans appartiennent à l'ensemble jeune et toutes les personnes âgées de plus 50 ans sont considérées comme appartenir à l'ensemble « âgé ».

Cependant une telle logique de classification n'est même pas logique car la question qui se pose : pourquoi une personne âgée de 50 ans doit être considérée comme appartenant à l'ensemble « âgé » ? En réalité un tel passage se fait progressivement et individuellement. En outre lors de la classification par logique classique on ne prend pas en considération des personnes situées dans la zone « entre deux âges ».

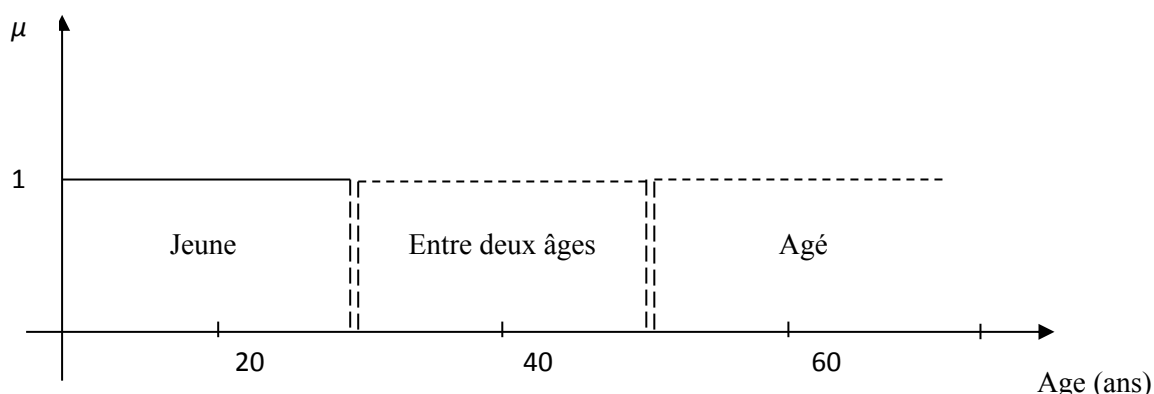


Figure III.1 : Classification des personnes en trois ensembles selon la logique classique.

La logique floue, dont la fonction d'appartenance peut prendre n'importe quelle valeur entre 0 et 1 permet de tenir compte de cette réalité. Il est donc possible de trouver une autre classification pour l'exemple précédent à l'aide de la logique floue. Les limites ne varient pas soudainement mais progressivement comme le montre la figure III.2.

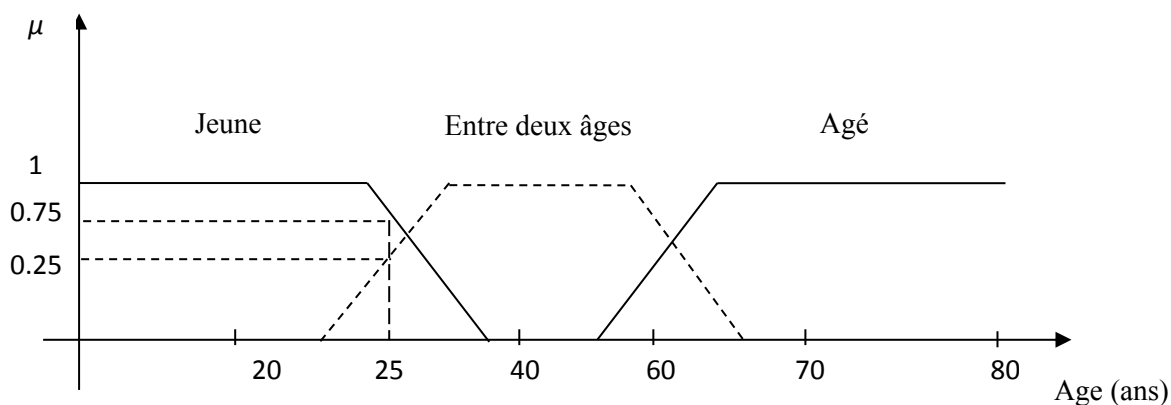


Figure III.2 : Classification des personnes en trois ensembles selon la logique floue.

III.4 Éléments de base de la logique floue

Dans cette partie, on va exposer d'une façon non exhaustive les éléments de base de la logique floue.

III.4.1 Variables linguistiques

La description imprécise d'une certaine situation, d'un phénomène ou d'une grandeur physique ne peut se faire que par des expressions relatives ou floues à savoir: grand, petit, positif, négatif, nul, chaud, froid, etc. Ces différentes classes d'expressions floues dénommées ensembles flous constituent ce que on appelle les variables linguistiques.

Afin de pouvoir traiter numériquement ces variables linguistiques (normalisées généralement sur un intervalle bien déterminé appelé univers de discours), il faut les soumettre à une définition mathématique à base de fonctions d'appartenance qui montrent le degré de vérification de ces variables linguistiques relativement aux différents sous-ensembles flous de la même classe [22].

III.4.2 Ensembles floue

Dans la théorie classique des ensembles, c'est la fonction caractéristique qui définit l'ensemble. Cette fonction ne prend que les deux valeurs discrètes 0 (l'élément n'appartient pas ...) ou 1 (l'élément appartient à l'ensemble). Par contre l'élément de base de la logique floue est l'ensemble flou ; défini par une fonction d'appartenance qui peut prendre toutes les valeurs réelles comprises entre 0 et 1 et qui joue un rôle fondamental pour le passage du qualitatif au quantitatif. Le concept de ce dernier a pour but d'éviter le passage brusque d'une classe à une autre et de permettre des graduations dans l'appartenance d'un élément à une classe ; c'est-à-dire d'autoriser un élément à appartenir plus ou moins fortement à une classe [17].

III.4.3 Fonctions d'appartenance

Afin de pouvoir traiter numériquement les variables linguistiques, il faut les soumettre à une définition mathématique à base de fonctions d'appartenance qui montrent le degré de vérification de ces variables aux différents sous-ensembles.

Les fonctions d'appartenance peuvent théoriquement prendre n'importe quelle forme, mais en général, les fonctions d'appartenance les plus utilisées sont définies par des formes géométriques ou des fonctions, on cite les suivantes:

Les fonctions d'appartenance sont le plus souvent représentées par les fonctions triangulaire et trapézoïdale, donc par des segments de droite, les fonctions sont alors dites linéaires par morceaux.

Dans la plupart des cas, et en particulier pour le réglage par la logique floue, ces deux formes sont suffisantes pour délimiter des ensembles flous [23].

Généralement, les plus souvent utilisées sont les fonctions de forme trapézoïdale ou triangulaire ou gaussiennes.

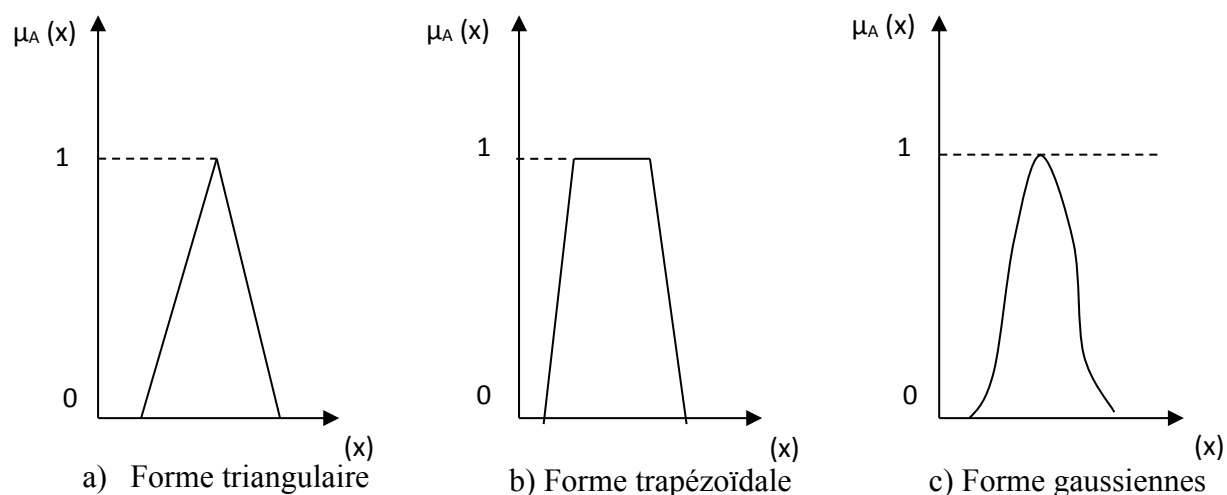


Figure III.3 : Différentes formes des fonctions d'appartenance.

III.4.4 Opérateurs de la logique floue

Une fois les ensembles flous définis, des opérations mathématiques concernant ce type d'ensembles ont été développées. Les opérateurs mathématiques élaborés ressemblent beaucoup à ceux reliés à la théorie des ensembles conventionnels. Les opérateurs de l'intersection, l'union, la complémentation et l'implication sont traduites, par les opérations « *ET*, *OU*, *NON* et *ALORS* » respectivement. Soient *A* et *B* deux ensembles flous, dont les fonctions d'appartenance sont μ_A et μ_B respectivement, le tableau suivant résume quelques fonctions utilisées pour réaliser les différentes opérations. D'autre part, Pour cette opération, il existe encore plusieurs méthodes. Les plus souvent utilisées sont données par le tableau suivant [16].

Différents appellations	Implication flou
Zadeh	$\text{Max} \{ \min((\mu_A(x), \mu_B(y)), 1 - \mu_A(x)) \}$
Mamdani	$\text{Min}(\mu_A(x), \mu_B(y))$
Reichenbach	$1 - (\mu_A(x) + \mu_A(y)) \cdot \mu_B(y)$
Willmott	$\text{Max} \{ 1 - \mu_A(x), \min((\mu_A(x), \mu_B(y)), 1 - \mu_A(x)) \}$
Diénes	$\text{Max} (1 - \mu_A(x), \mu_B(y))$
Brown goldi	$\mu_A(x) \leq \mu_B(y)$
Lukasiewicz	$\text{Min} (1, 1 - \mu_A(x) + \mu_B(y))$
Larsen	$(\mu_A(x), \mu_B(y))$

Tableau III.1 : Implication floue.

III.4.5 Règles floues

La règle floue est une relation exprimée à l'aide d'une implication entre deux propositions floues, par exemple, considérons deux variables linguistiques (V_1, U, T_{v1}) (V_2, U, T_{v2}) et les deux propositions suivantes ' V_1 est A', ' V_2 est B', ou A et B sont deux ensembles flous de V_1 et V_2 . On peut définir la règle floue par l'expression, si V_1 est A Alors V_2 est B.

Généralement, plusieurs règles floues sont nécessaires pour prendre une décision face à une situation donnée. On s'intéresse au cas de plusieurs règles floues dans le domaine de la commande et la régulation. Les règles floues peuvent être décrites de plusieurs façons [17]:

*Linguistiquement * Symboliquement * Par matrice d'inférence

III.5 Commande par logique floue

La commande floue est certainement le domaine d'application de la logique floue le plus utilisé. Son but est, comme en automatique classique de gérer un processus selon une consigne désirée, par action sur des grandeurs physiques. Sa particularité est de reproduire le comportement d'un opérateur humain, plutôt que de réaliser un modèle mathématique du système [24].

III.5.1 Constitution d'un système floue

Un système flou est composé de quatre parties essentielles [25]:

- La base de connaissance constituée d'une base de données et d'une base de règles.
- Le système d'inférence.
- L'interface de fuzzification.
- L'interface de défuzzification.

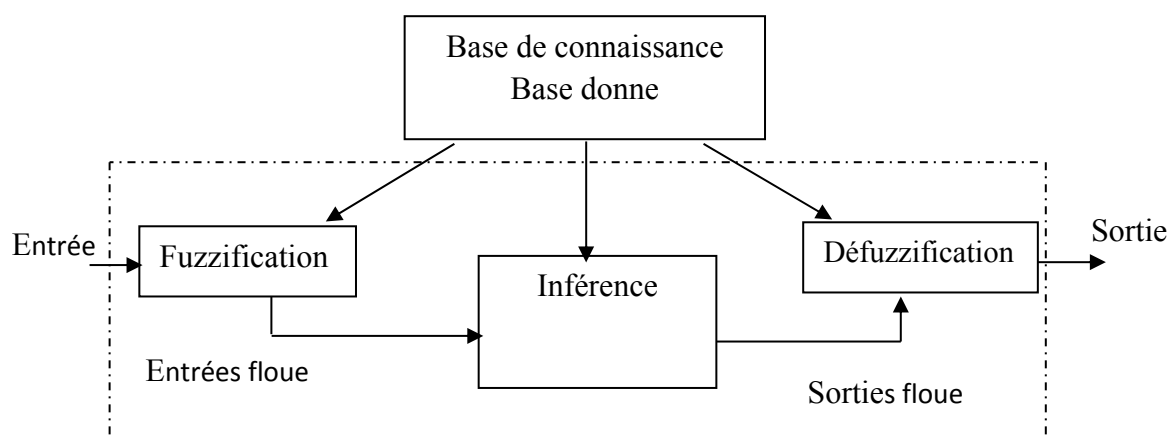


Figure III.4 : Schéma général d'un système floue [25].

III.5.1.1 Interface de fuzzification

La fuzzification est l'opération de projection des variables physiques réelles sur des ensembles flous caractérisant les valeurs linguistiques prises par ces variables. Le bloc de fuzzification effectue les fonctions suivantes [23]:

- établit les plages de valeurs pour les fonctions d'appartenance à partir des valeurs des variables d'entrées.
- effectue une fonction de fuzzification qui convertit les données d'entrée en valeurs linguistiques convenables qui peuvent être considérées comme l'étiquette des ensembles flous. Cette opération doit être effectuée dans un domaine normalisé généralement par l'intervalle $[-1,1]$ afin de faciliter le calcul.

III.5.1.2 Base de règles

C'est la collection de règle qui permet de lier les variables floues d'entrée et de sortie, elles ont la forme: "if- then" ou "si-alors", elles peuvent être écrites textuellement faisant appel à des entrées et à des sorties et elles sont données par des experts d'une manière directe numériques ou par des termes ou variables linguistique à travers des fonctions d'appartenance [25].

III.5.1.3 Mécanisme d'inférence floue

Le principe de cette opération consiste à établir la liaison entre les grandeurs d'entrée du régulateur exprimées par des termes linguistiques et la variable de sortie sous sa forme linguistique à partir d'une parfaite connaissance du système à régler et d'une expertise concernant le fonctionnement du processus à régler. Les trois méthodes d'inférence les plus usuelles sont :

- Max-Produit.
- Somme-produit.
- Max-Min (Implication de Mamdani).

III.5.1.4 Interface de Défuzzification

Comme nous avons vu dans la section précédente, les méthodes d'inférence fournissent un résultat qui est une fonction d'appartenance. Or, la sortie du contrôleur est en général une grandeur continue, prenant sa valeur dans un intervalle. La défuzzification est le traitement qui permet de définir une correspondance entre le résultat de l'inférence et la grandeur continue fournie en sortie [26].

Plusieurs stratégies de Défuzzification ont été développées. Les plus utilisées sont :

a) Méthode du maximum

Comme son nom l'indique, la commande en sortie est égale à la commande ayant la fonction d'appartenance maximale.

La méthode du maximum simple, rapide et facile mais elle introduit des ambiguïtés et une discontinuité de la sortie (parfois on trouve deux valeurs maximales).

b) Méthode de la moyenne des maxima

Elle considère, comme valeur de sortie, la moyenne de toutes les valeurs pour lesquelles la fonction d'appartenance issue de l'inférence est maximale.

c) Méthode du centre de gravité

La méthode du centre de gravité c'est la méthode de Défuzzification la plus utilisée, son principe repose sur la détermination de l'abscisse du centre de gravité x^* de la fonction d'appartenance résultante de l'inférence $\mu C(z)$. Cette abscisse correspond à la valeur de sortie du régulateur [17].

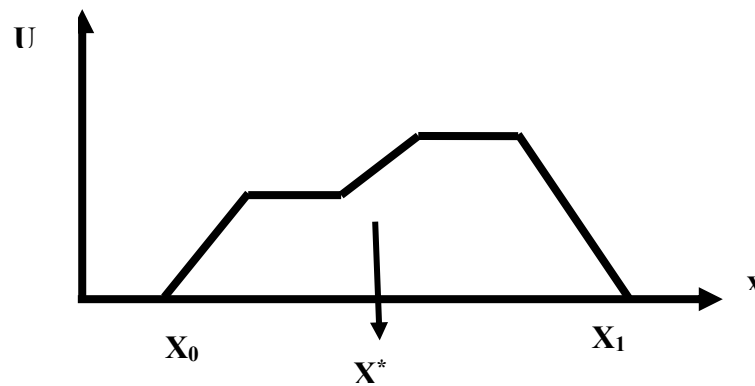


Figure III.5 : Défuzzification par centre de gravité.

$$X^* = \frac{\int_{x_0}^{x_1} x \cdot U(x) \cdot dx}{\int_{x_0}^{x_1} U(x) \cdot dx}$$

III.6 Stratégies de commande de l'onduleur deux niveaux

Le but de la commande de l'onduleur est de permettre la meilleure reproduction des courants ou des tensions perturbés de référence, à travers les ordres de commande appliqués aux drivers interrupteurs de puissance, on peut commander les convertisseurs statiques par deux stratégies différentes qui sont :

- La commande par hystérésis à bande fixe.
- La commande par hystérésis à bande floue.

Ces études ont montrées également que les onduleurs triphasés offrent une grande amélioration sur la qualité des tensions de sortie.

Dans ce chapitre, on étudiera l'onduleur de tension triphasé et les stratégies de commandes et technique d'hystérésis avec les deux types de commande de la bande fixe et de la bande floue [12].

III.6.1 Commande de l'onduleur par hystérésis à bande fixe

La commande par hystérésis permet de fixer un courant de référence dans les lignes du réseau électrique, c'est une commande non linéaire qui utilise l'erreur existant entre les courants de références et le courant produit par l'onduleur, cette erreur est comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis. [12]. Dès que l'erreur atteint la bande inférieure ou supérieure, un ordre de commande est envoyé de manière à rester à l'intérieur de la bande, comme le montre la figure III.5.

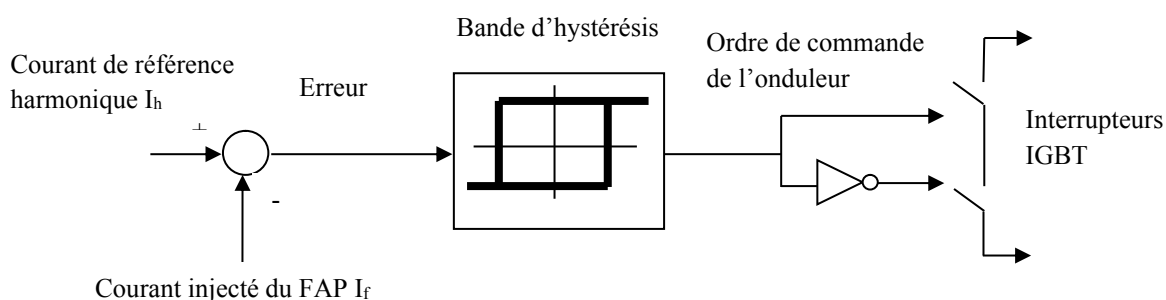


Figure III.6 : Commande par hystérésis pour l'onduleur.

- Si : $\Delta I \geq h$ la tension est forcé à son niveau minimal pour faire décroître le courant.
- Si : $\Delta I \leq -h$ la tension est forcé à son niveau maximal pour faire accroître le courant.

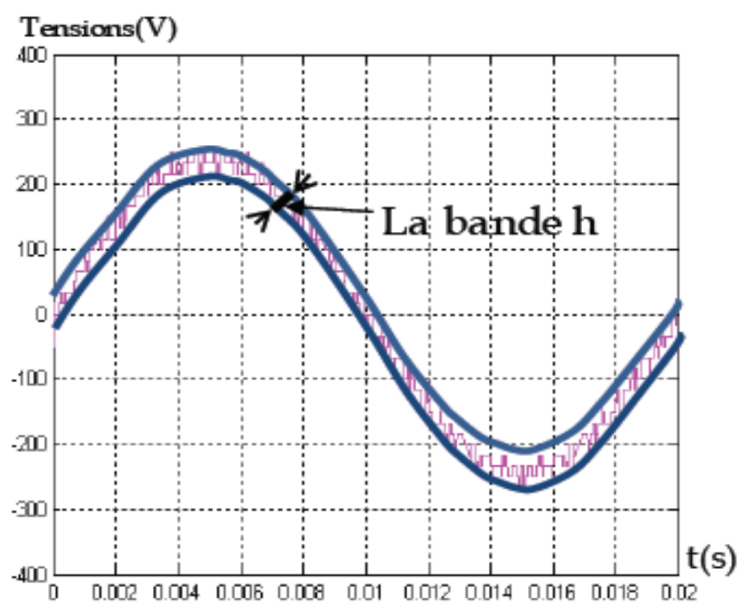


Figure III.7 : Principe de contrôle des courants par la technique d'hystérésis.

III.6.2 Commande par hystérésis à bande floue

Cette technique de modulation consiste également à réduire les écarts entre les courants de références et les courants générés par le filtre actif et cela à fréquence constante. Les variables de

l'équation peuvent être facilement implantées avec la logique floue tout en améliorant les performances du filtre actif. Dans cette étude, on prend comme variable de sortie la bande hystérésis et comme variable d'entrée, la dérivée du courant du filtre injecté di^*/dt et de la tension du réseau $V_s(t)$. On notera que pour la variable de sortie les fonctions d'appartenance correspondant aux sous-ensembles flous sont : TPP : Très Petit Positif, PP : Petit Positif, PM : Moyen Positif, PG : Grand Positif, TPG : Très Grand Positif. Chaque variable d'entrée est transformée en grandeur linguistique à cinq sous-ensemble floue PG : Grand Positif, PM : Moyen Positif, EZ : Environ Zéro, NM : Négatif Moyen, NG : Négatif Grand, comme le montre la figure (III.8). Les règles de commande sont résumées dans la matrice d'inférence en tableau III.2 [18].

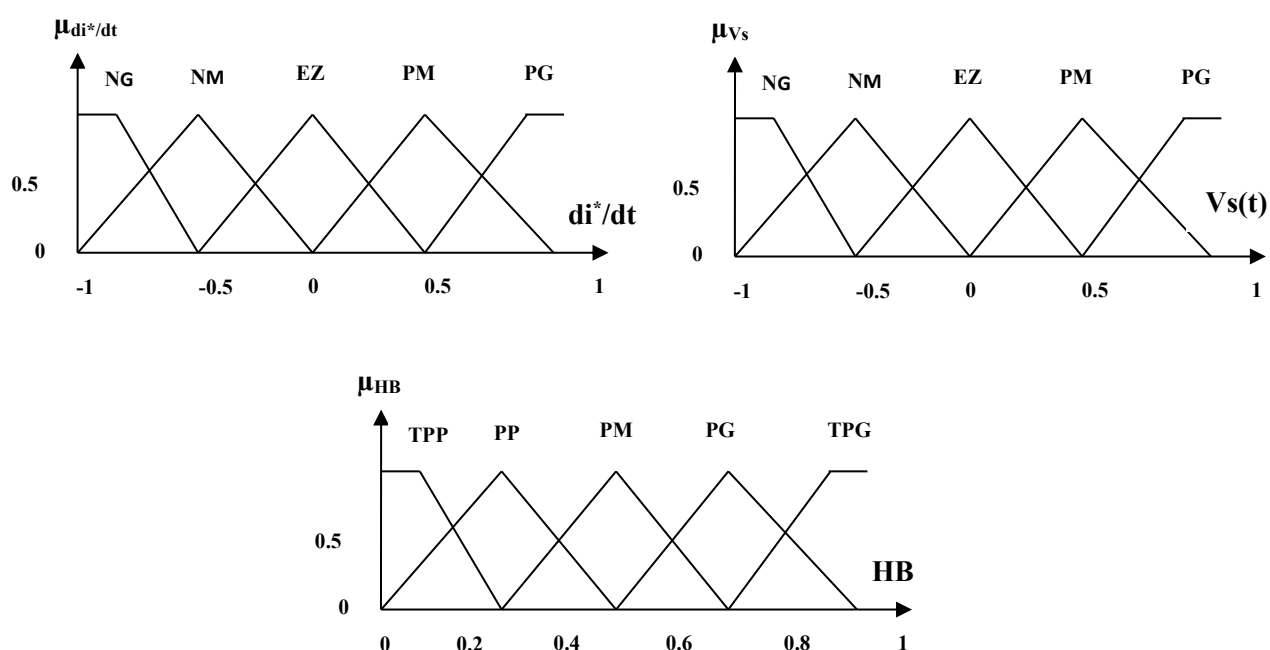


Figure III.8 : Les fonctions d'appartenance des variables.

di^*/dt $V_s(t)$	NG	NM	EZ	PM	PG
NG	PP	PP	PM	PP	PP
NM	PP	PM	PG	PM	PP
EZ	TPP	PM	TPG	PM	TPP
PM	PP	PM	PG	PM	PP
PG	PP	PP	PM	PP	PP

Tableau III.2 : Règles de la commande floue.

III.7 Principe de la commande hystérésis à bande floue

Le principe de la commande hystérésis à bande floue est expliqué dans la figure III.9 :

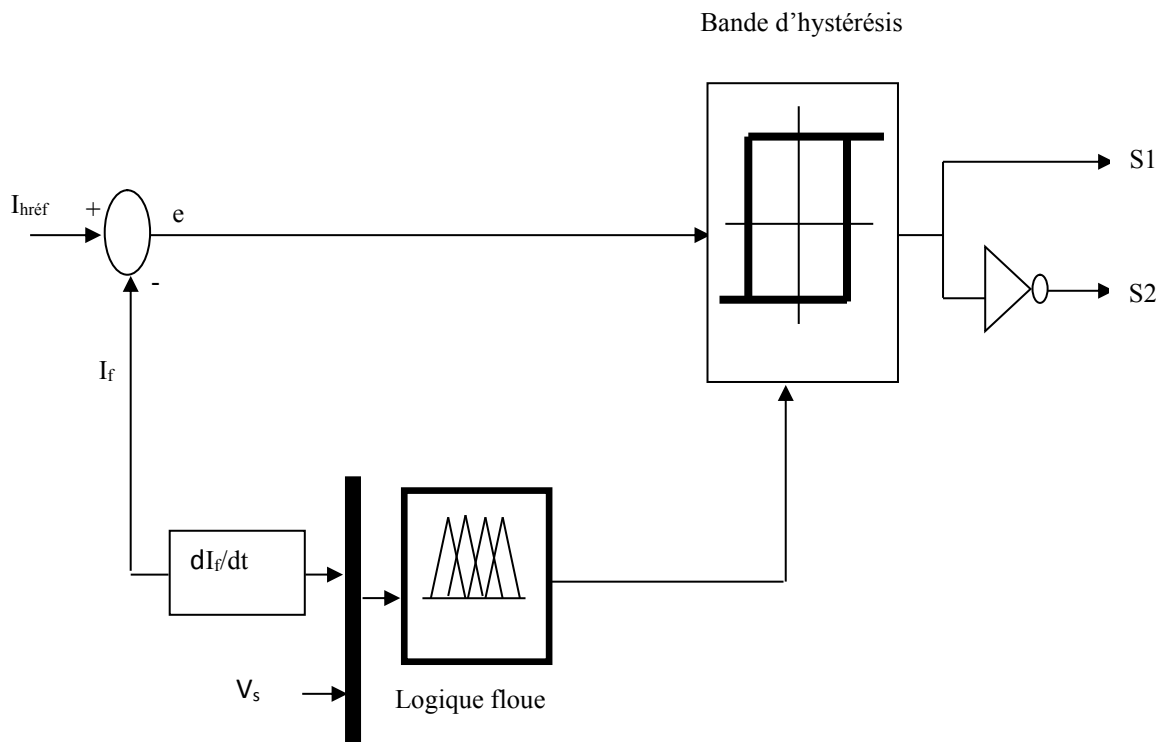


Figure III.9 : Principe de la Commande hystérésis à bande floue.

III.8 Association réseau-charge non linéaire- onduleur avant et après compensation

Le schéma de la figure III.8 présente le système étudié dans ce travail. Il est constitué d'un réseau électrique équilibré alimentant un redresseur commandé hexa-phasé (à thyristor) et d'un l'onduleur à deux niveaux.

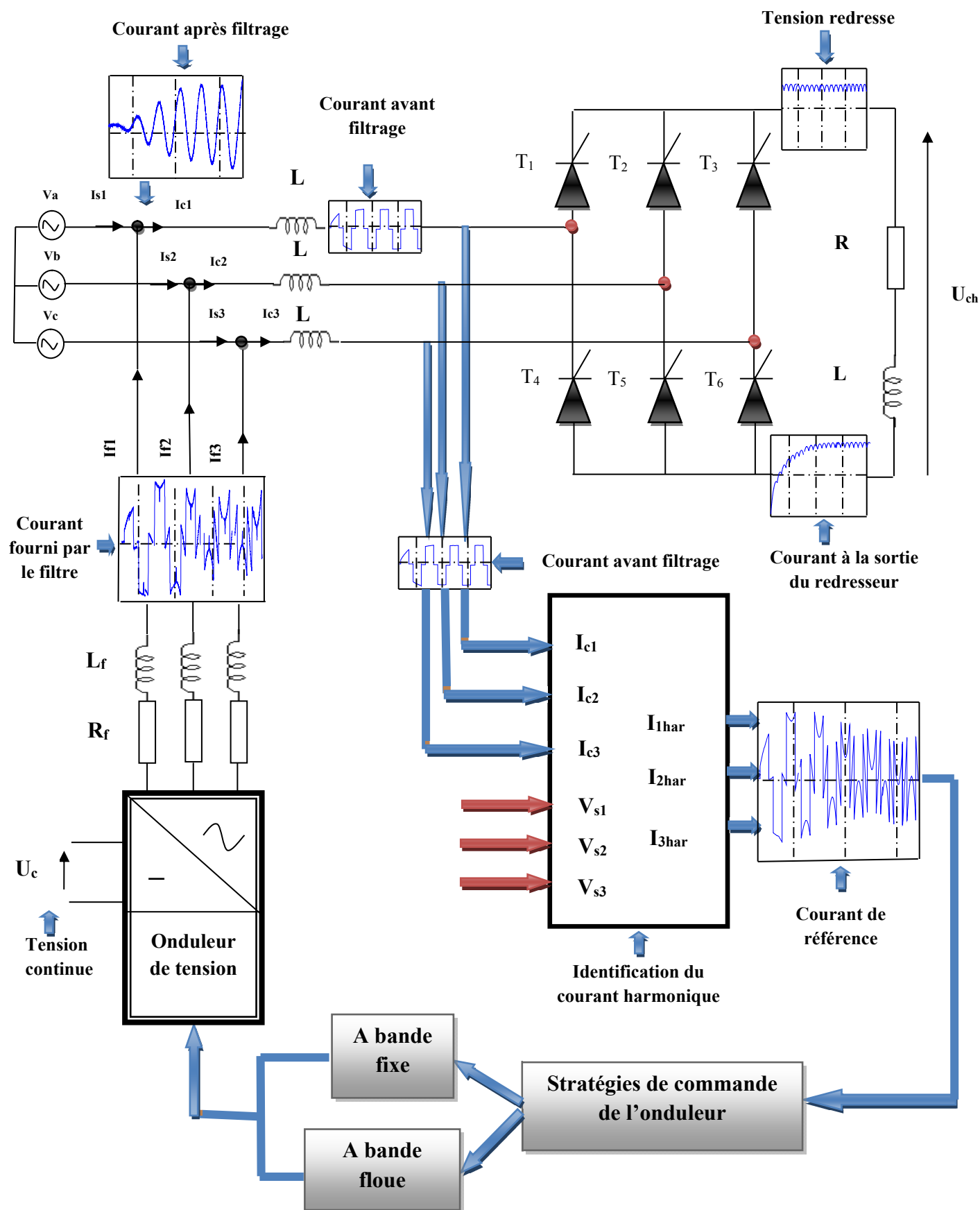


Figure III.10 : Association réseau-charge non linéaire-onduleur avant et après compensation.

III.9 Résultats de simulation

III.9.1 Commande par hystérésis pour bande fixe $\Delta h=0.1A$

a-Pour $\alpha=0^\circ$

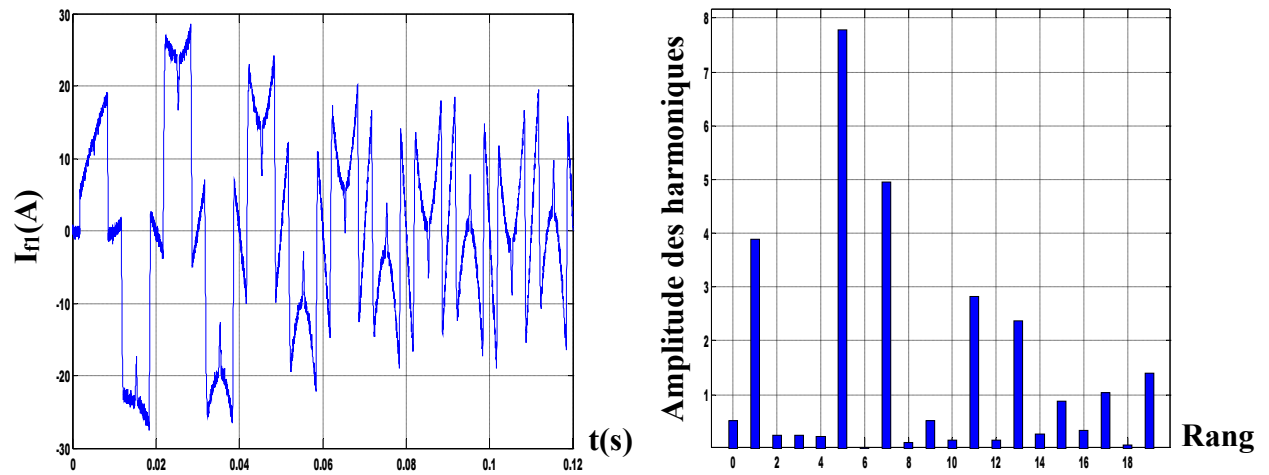


Figure III.11 : Courant injecté par l'onduleur et courant de source de la première phase.

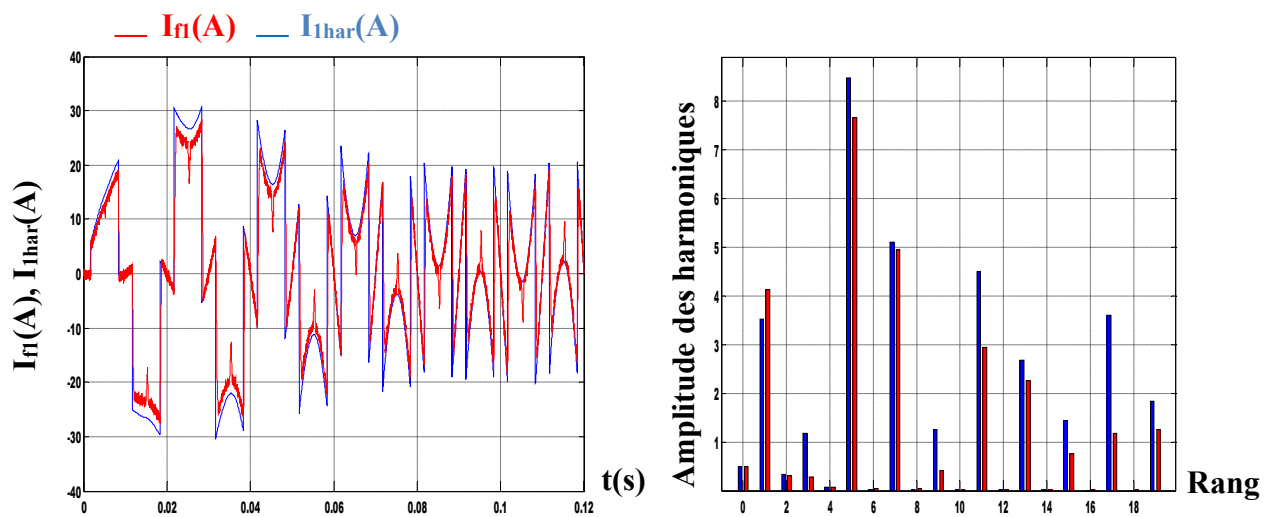


Figure III.12 : Courant de référence, injecté et leurs spectres.

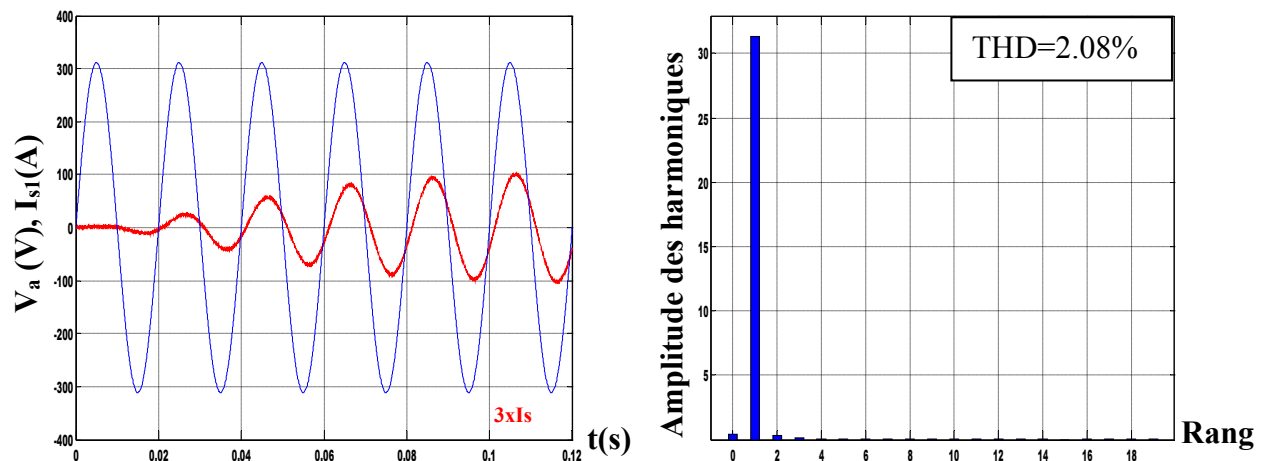


Figure III.13 : Tension, courant et spectre de courant après filtrage.

b-Pour $\alpha=30^\circ$

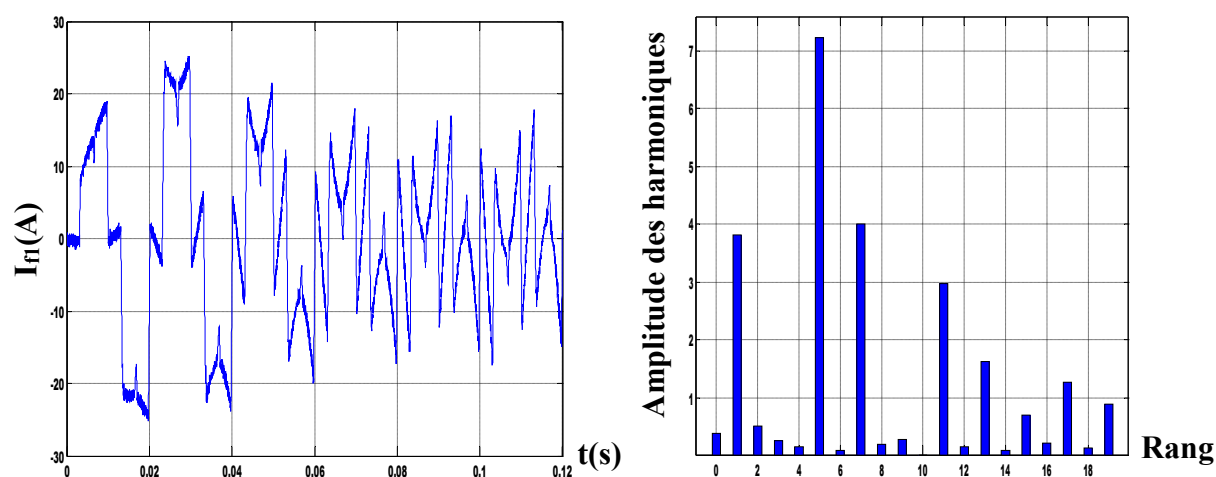


Figure III.14 : Courant injecté par l'onduleur et courant de source de la première phase.

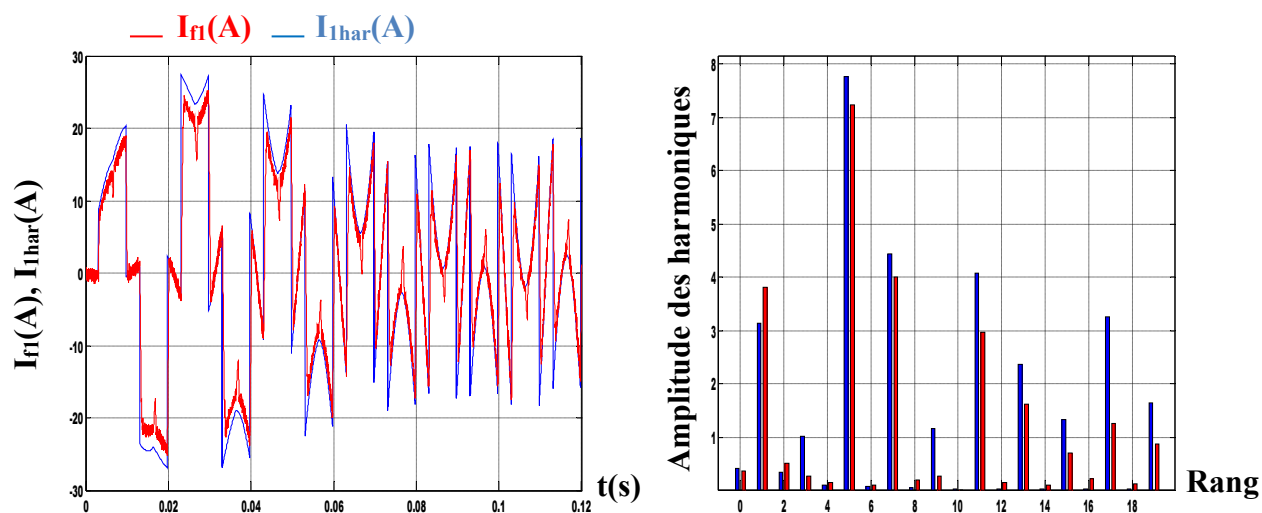


Figure III.15: Courant de référence, injecté et leurs spectres.

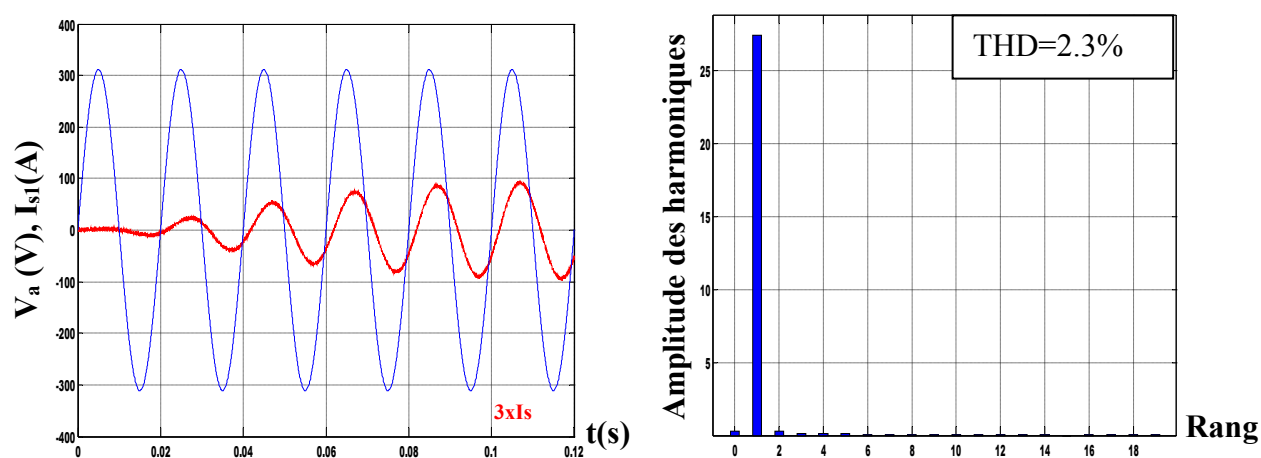


Figure III.16 : Tension, courant et spectre de courant après filtrage.

c-Pour $\alpha=60^\circ$

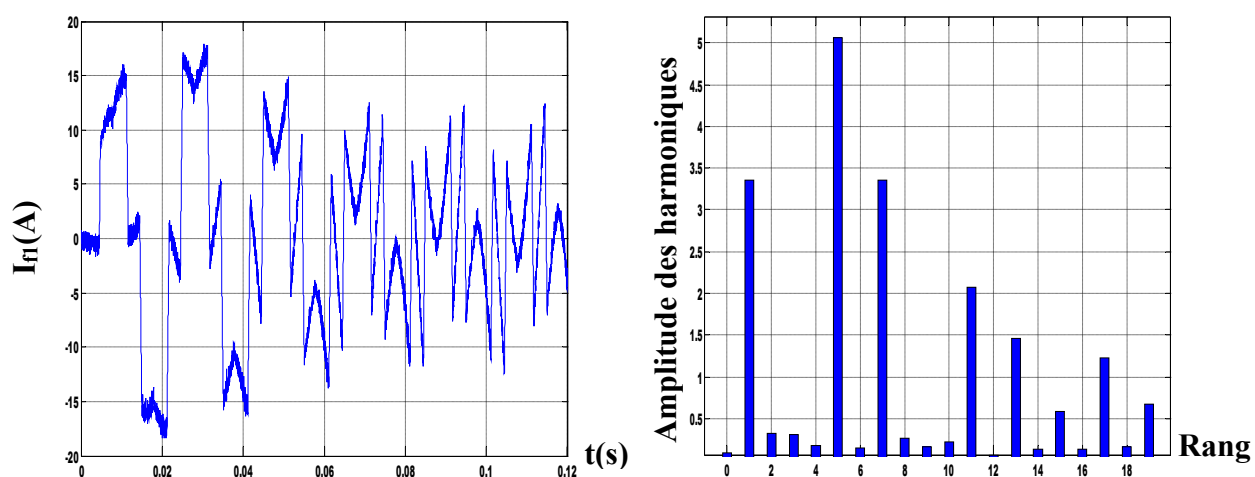


Figure III.17 : Courant injecté par l'onduleur et courant de source de la première phase.

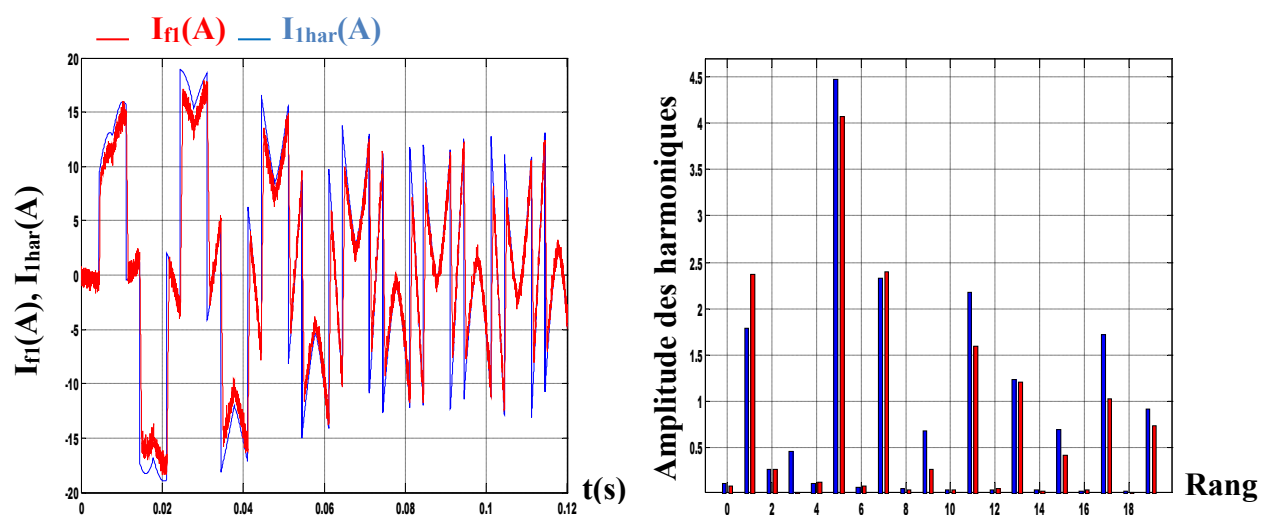


Figure III.18 : Courant de référence, injecté et leurs spectres.

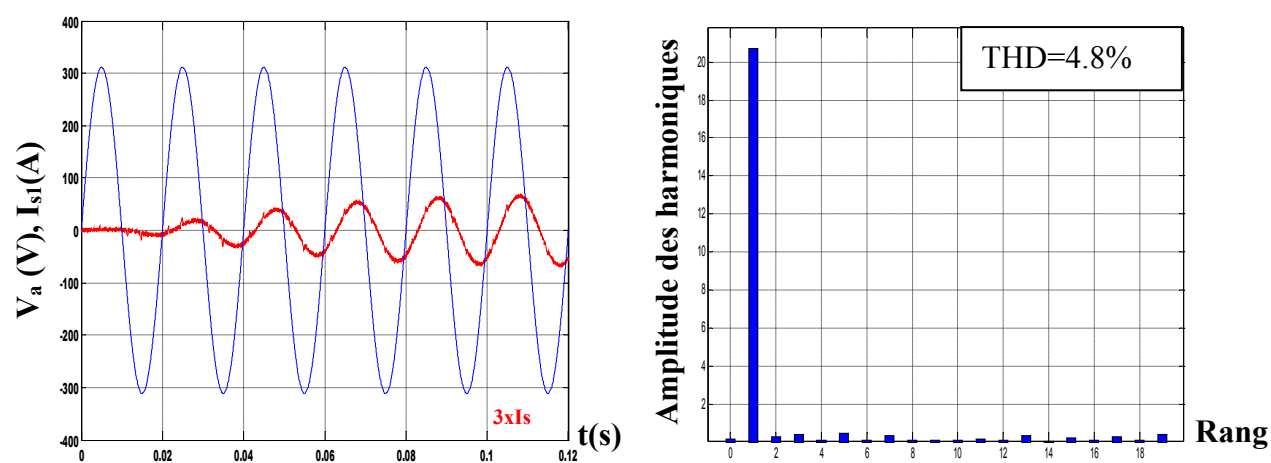


Figure III.19 : Tension, courant et spectre de courant après filtrage.

III.9.2 Commande par hystérésis pour bande fixe $\Delta h=1A$

a-Pour $\alpha=0^\circ$

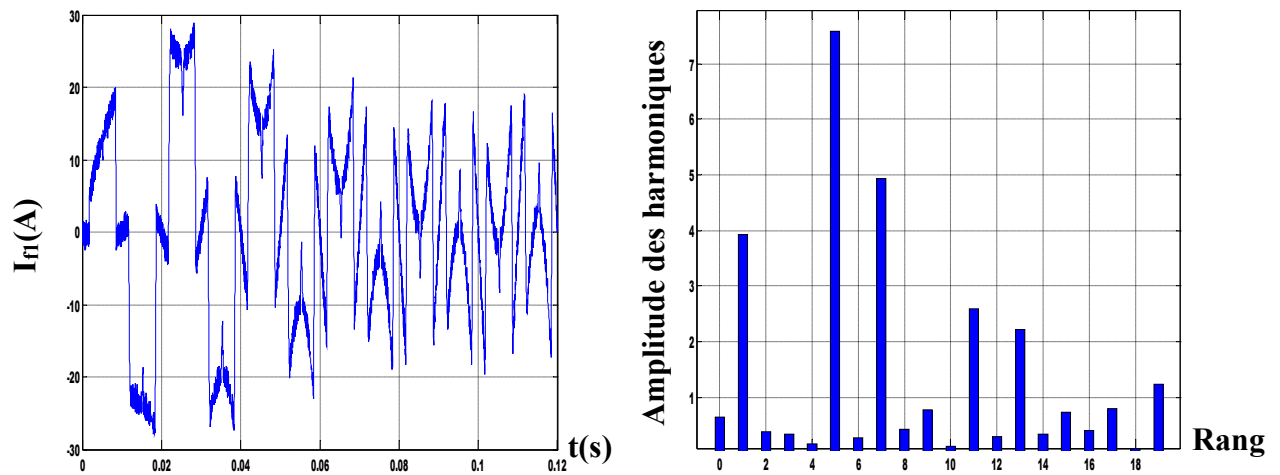


Figure III.20 : Courant injecté par l'onduleur et courant de source de la première phase.

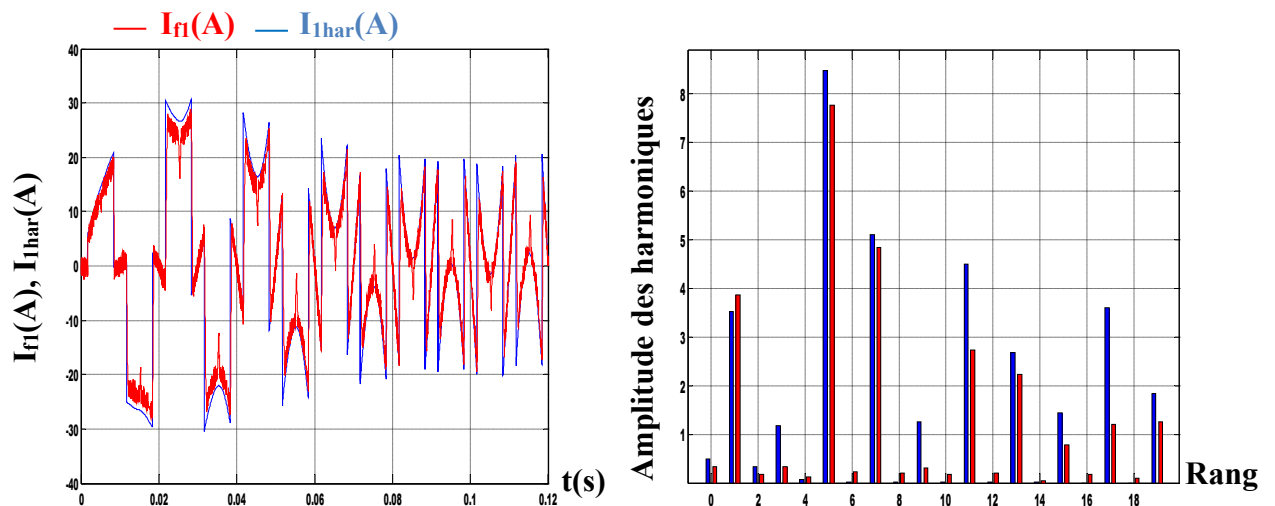


Figure III.21 : Courant de référence, injecté et leurs spectres.

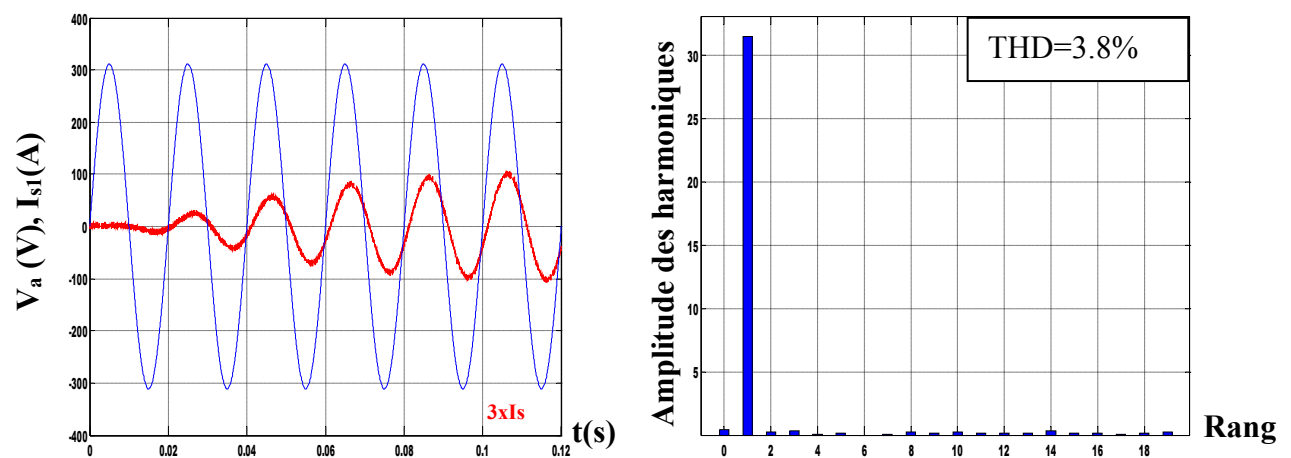


Figure III.22 : Tension, courant et spectre de courant après filtrage.

b-Pour $\alpha=30^\circ$

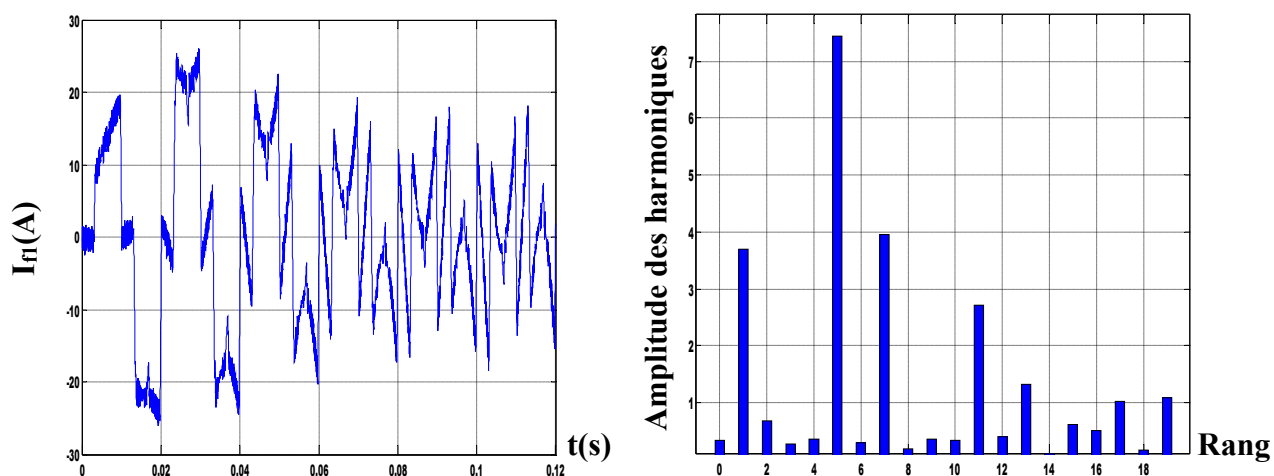


Figure III.23 : Courant injecté par l'onduleur et courant de source de la première phase.

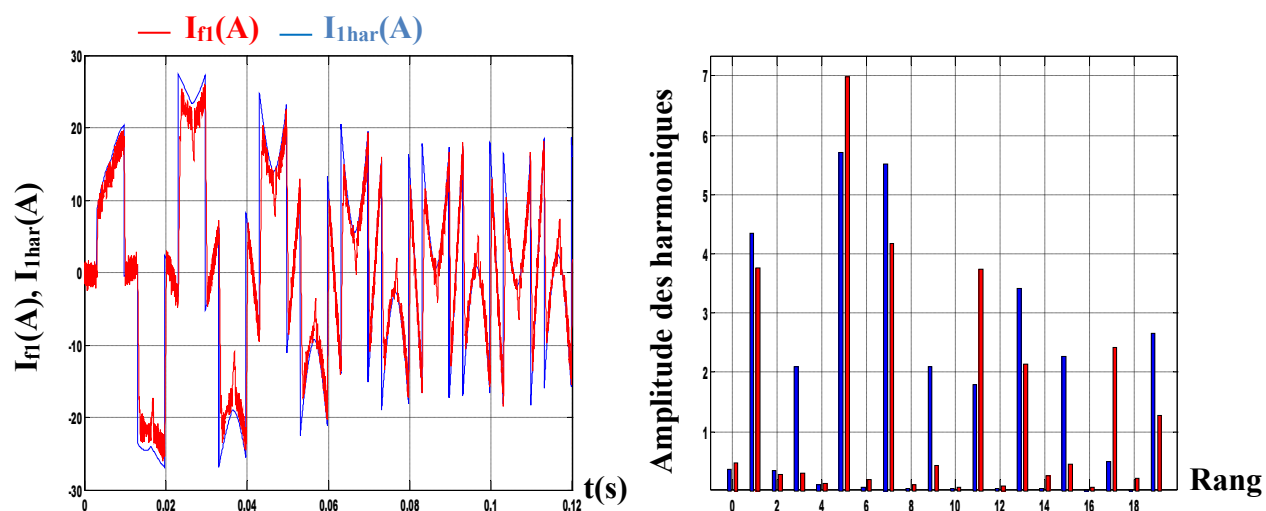


Figure III.24 : Courant de référence, injecté et leurs spectres.

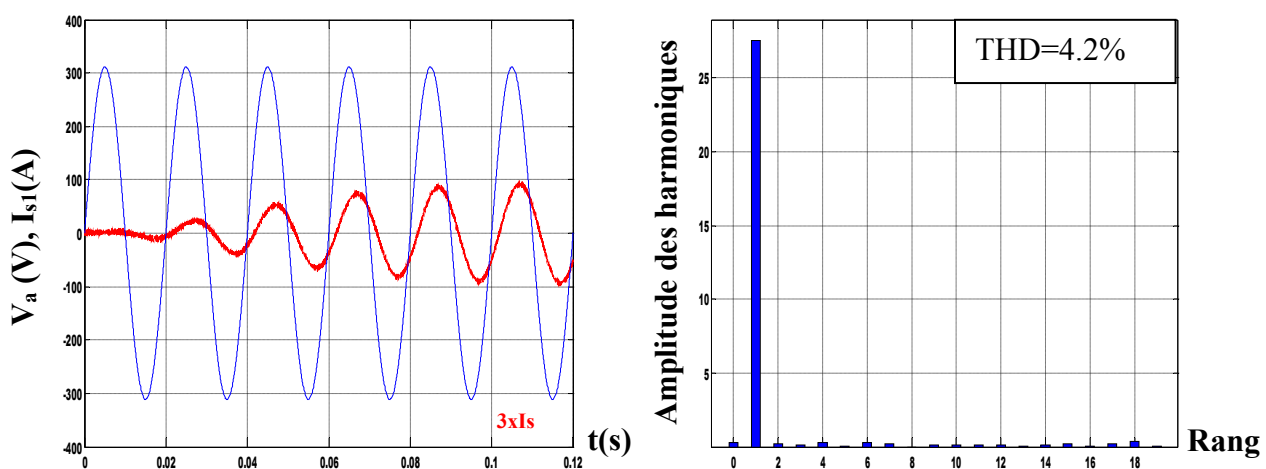


Figure III.25 : Tension, courant et spectre de courant après filtrage.

c-Pour $\alpha=60^\circ$

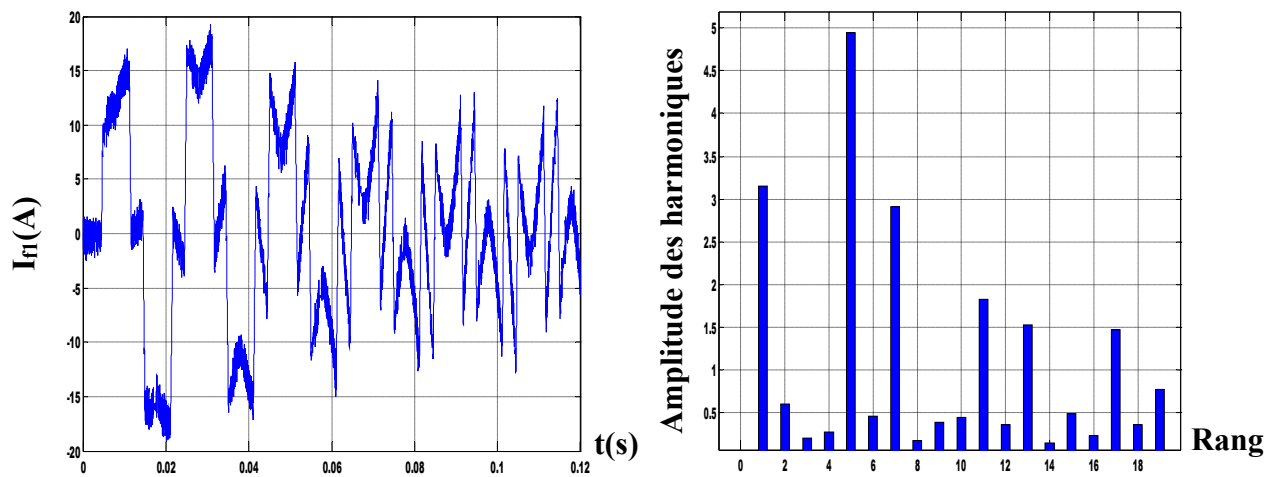


Figure III.26 : Courant injecté par l'onduleur et courant de source de la première phase.

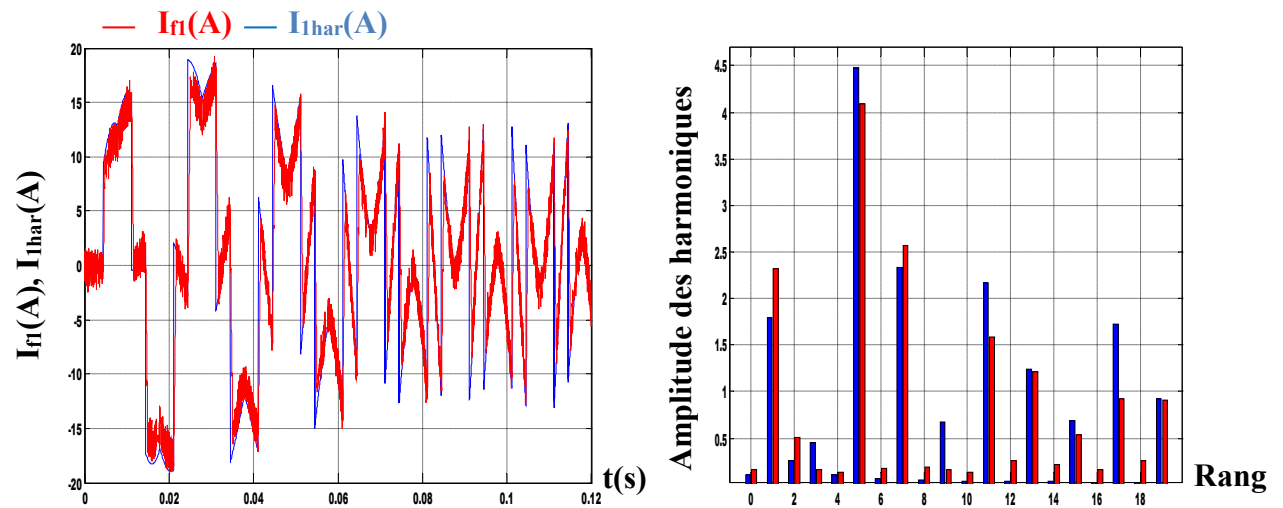


Figure III.27 : Courant de référence, injecté et leurs spectres.

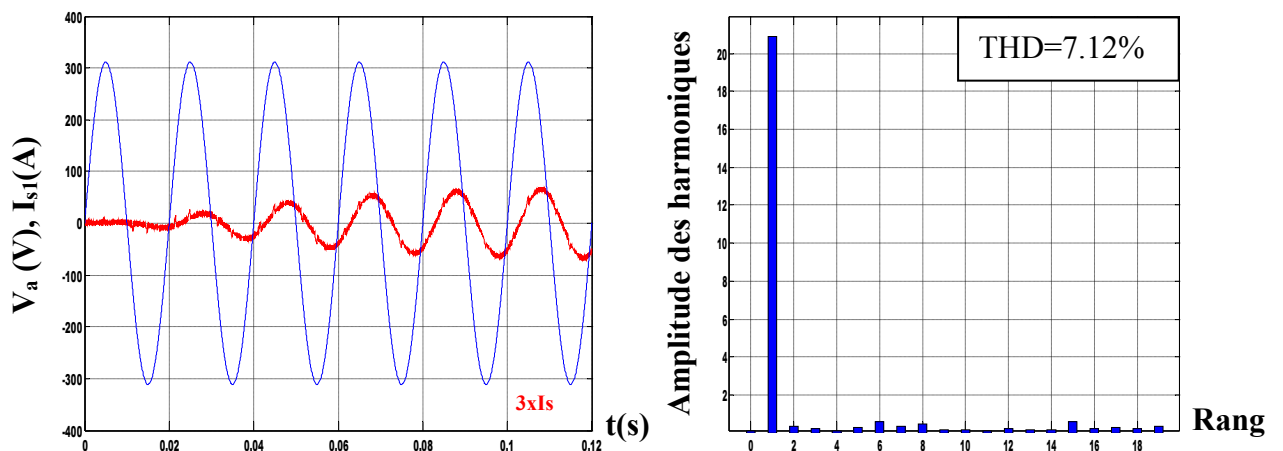


Figure III.28 : Tension, courant et spectre de courant après filtrage.

III.10 Interprétation

Les figures ci-dessus montrent :

- L'amélioration de la forme des courants de source après filtrage.
- La minimisation de la bande d'hystérésis (de $\Delta h=1$ à $\Delta h=0.1$ A) nous a permis d'avoir des courants de réseau plus sinusoïdaux pour chaque angle d'amorçage (0° , 30° et 60°).
- La diminution de la bande d'hystérésis permet une amélioration de la qualité des courants obtenus pour chaque angle d'amorçage (0° , 30° et 60°), comme illustré dans le tableau III.3.

α Δh		0°		30°		60°	
		Avant THD%	Après THD%	Avant THD%	Après THD%	Avant THD%	Après THD%
A bande fixe	0.1	17.8	2.08	22.89	2.3	27.07	4.8
	1	17.8	3.8	22.89	4.2	27.07	7.12

Tableau III.3 : Le THD obtenu avant et après filtrage à bande fixe.

- On a utilisé une inductance après le point de raccordement du filtre actif pour éliminer la présence des pics au niveau des courants de source..

III.11 Commande hystérésis à bande floue

a-Pour $\alpha=0^\circ$

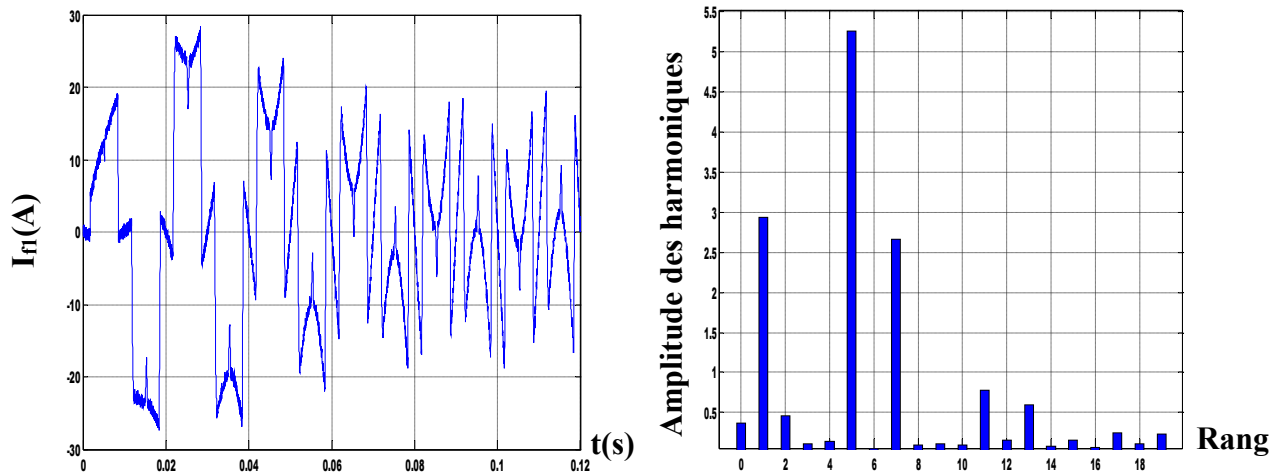


Figure III.29 : Courant injecté par l'onduleur et courant de source de la première phase.

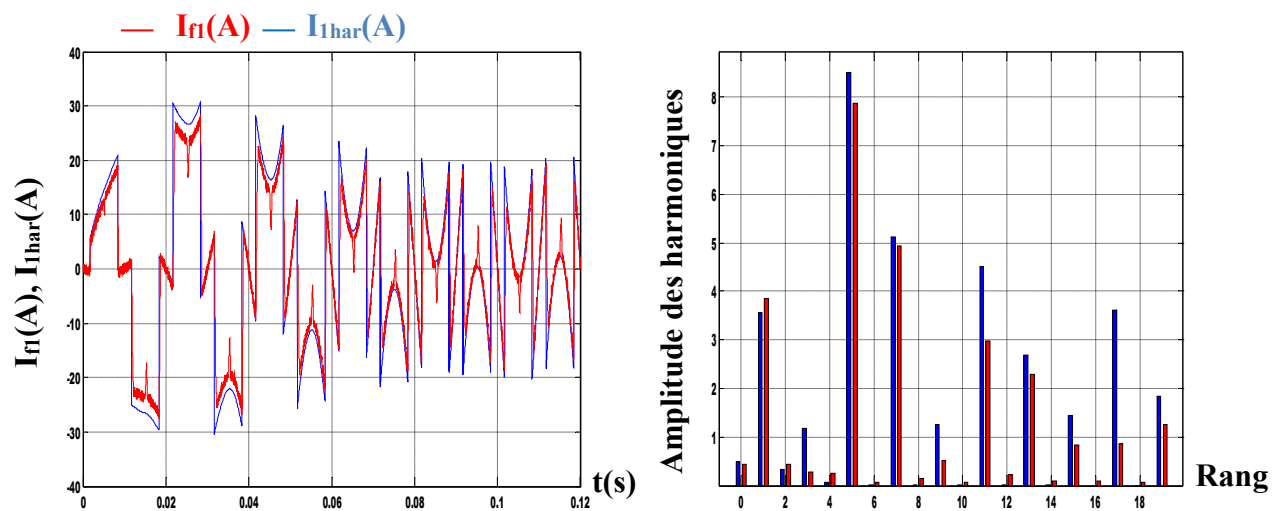


Figure III.30 : Courant de référence, injecté et leurs spectres.

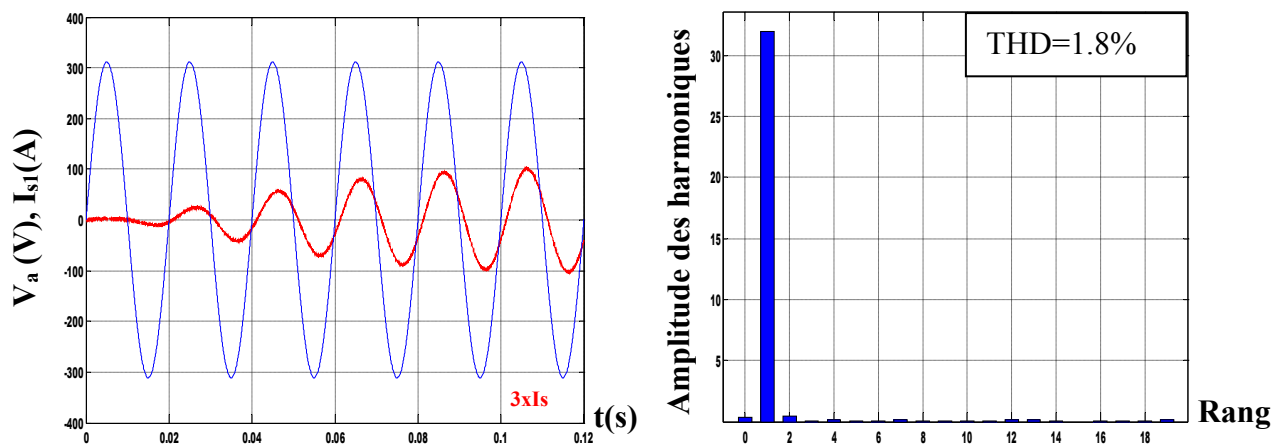


Figure III.31 : Tension, courant et spectre de courant après filtrage.

b-Pour $\alpha=30^\circ$

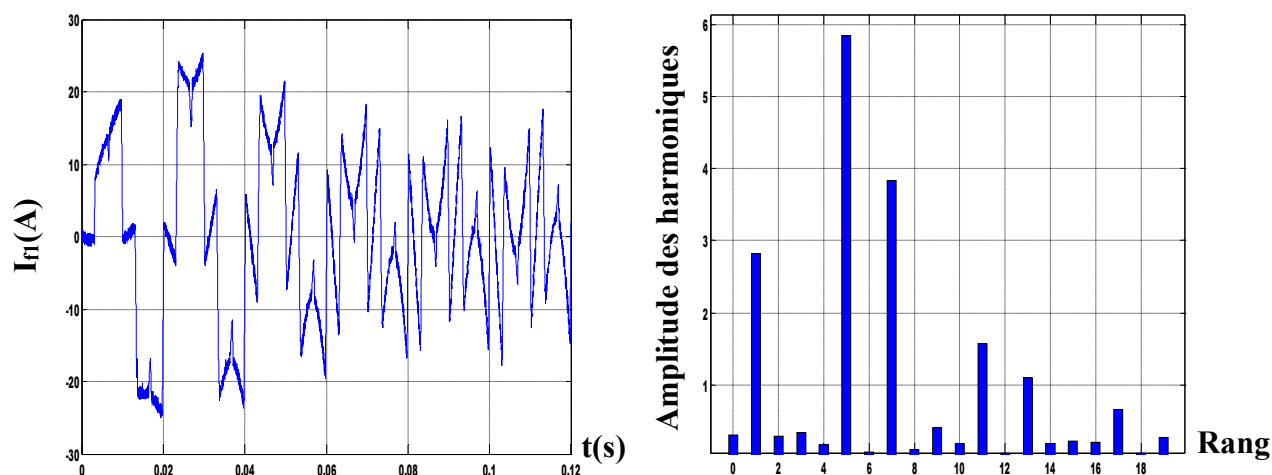


Figure III.32 : Courant injecté par l'onduleur et courant de source de la première phase.

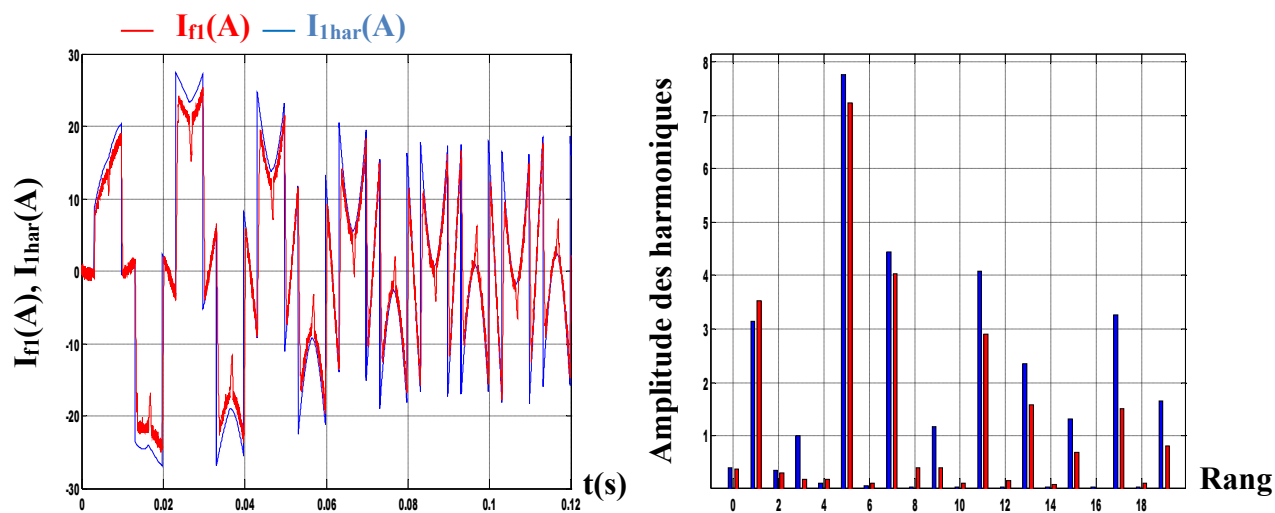


Figure III.33 : Courant de référence, injecté et leurs spectres.

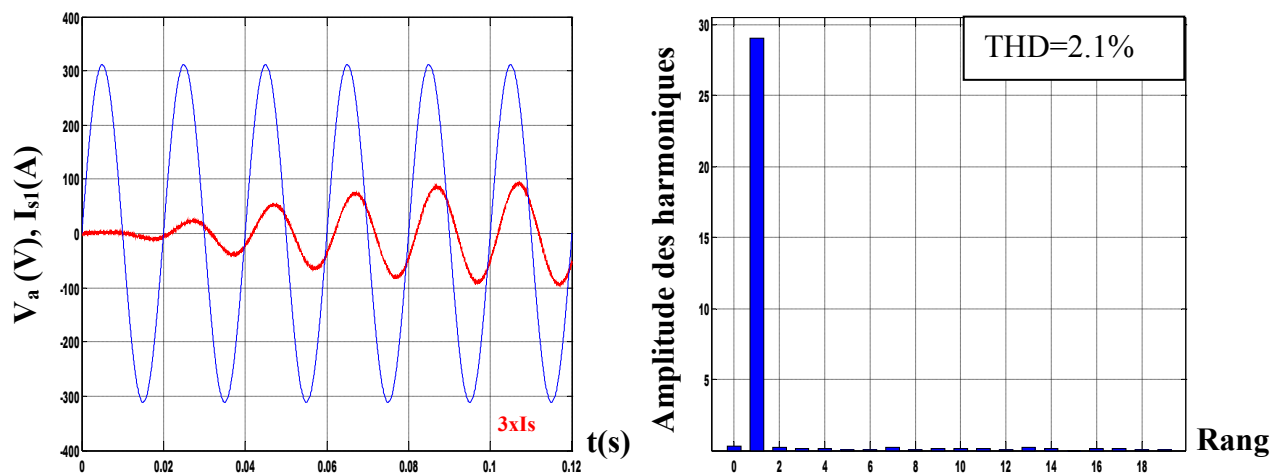


Figure III.34 : Tension, courant et spectre de courant après filtrage.

c-Pour $\alpha=60^\circ$

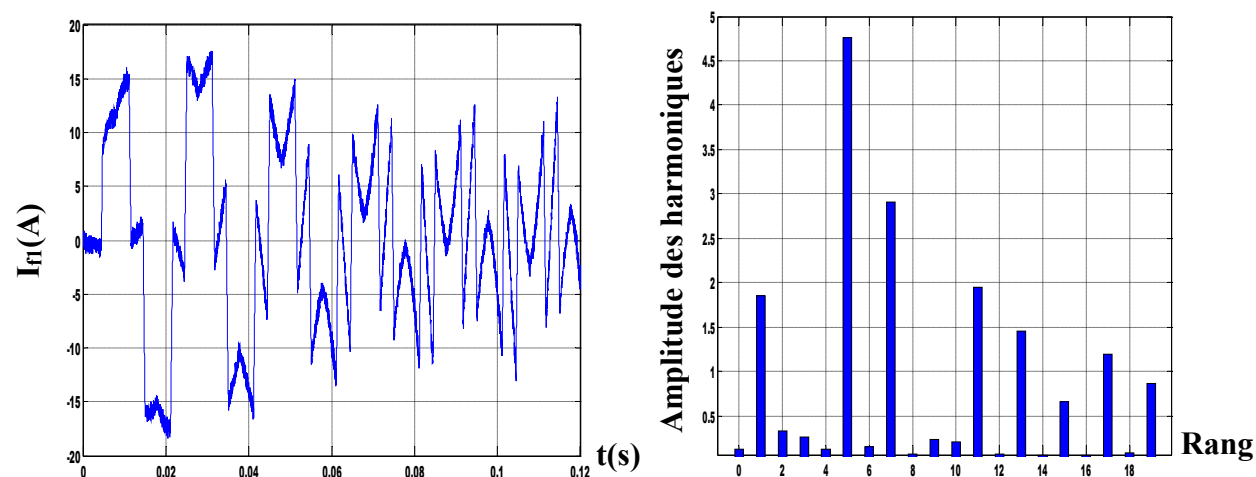


Figure III.35 : Courant injecté par l'onduleur et courant de source de la première phase.

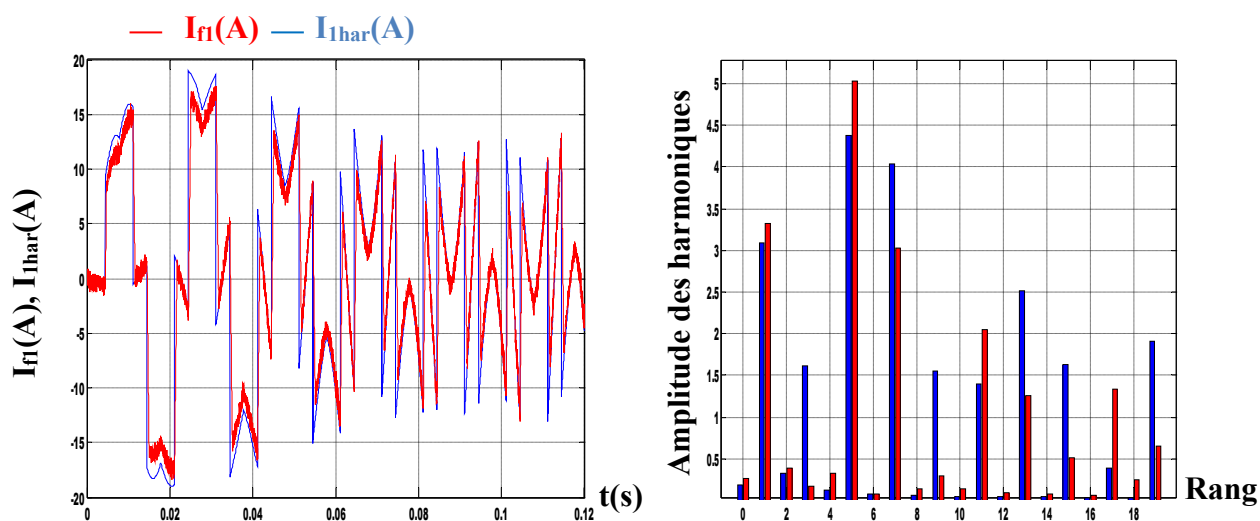


Figure III.36 : Tension et Courant de source après filtrage.

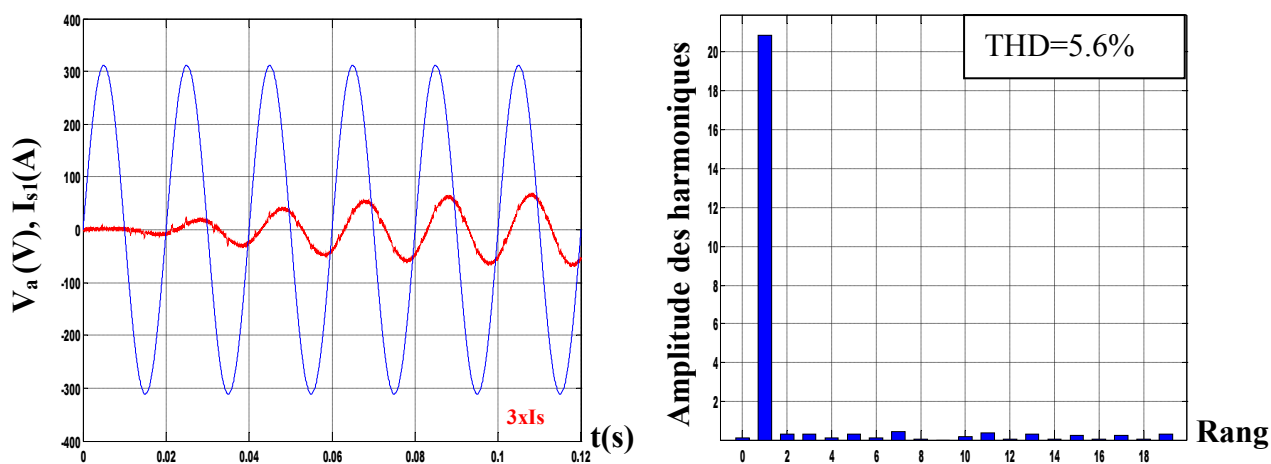


Figure III.37 : Tension, courant et spectre de courant après filtrage.

III.12 Interprétation

Les figures précédentes montrent :

- L'amélioration de la forme des courants de source après filtrage.
- La stratégie hystérésis à bande floue a fourni des bonnes performances des courants à injecter dans le réseau par rapport à la stratégie hystérésis à bande fixe.
- La commande hystérésis à bande floue présente en plus une bonne qualité de filtrage.
- La diminution du gain d'hystérésis à bande floue (de $\Delta h=1$ à $\Delta h=0.1A$) nous a permis d'avoir des courants de réseau plus sinusoïdaux pour chaque angle d'amorçage (0° , 30° et 60°).
- Le tableau III.4 montre l'amélioration de la qualité de courant de source pour chaque largeur max (0.1 et 1), avant et après filtrage, par rapport la commande à bande hystérésis fixe.

La bande α		0°		30°		60°	
		Avant THD%	Après THD%	Avant THD%	Après THD%	Avant THD%	Après THD%
A bande floue	Largeur max $\Delta h=0.1$	17.8	1.8	22.89	2.1	27.07	4.2
	Largeur max $\Delta h=1$	17.8	2.8	22.89	3.01	27.07	5.6
A bande fixe	$\Delta h=0.1$	17.8	2.08	22.89	2.3	27.07	4.8
	$\Delta h=1$	17.8	3.8	22.89	4.2	27.07	7.12

Tableau III.4 : Le THD obtenu avant et après filtrage à bande fixe et à bande floue.

- On a utilisé une inductance après le point de raccordement du filtre actif pour éliminer la présence des pics au niveau des courants de source.

III.13 Variation de charge (pour $\alpha=0^\circ$)

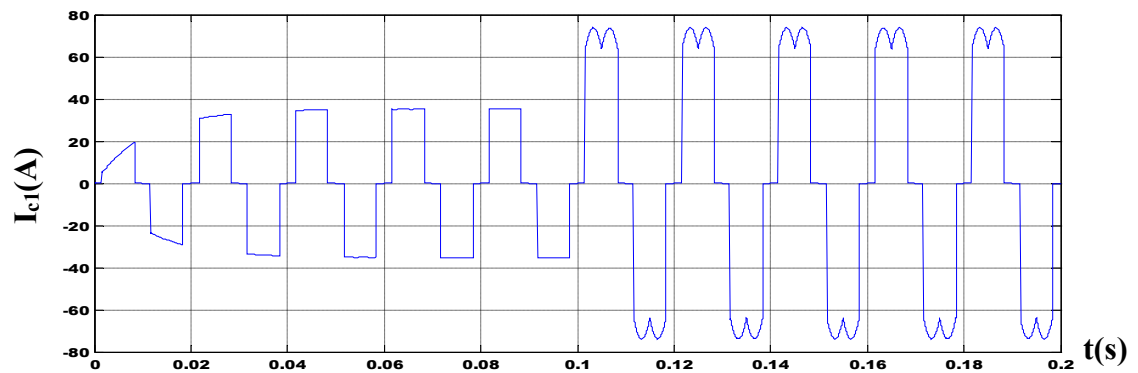


Figure III.38: Courant de ligne I_{c1} avant filtrage.

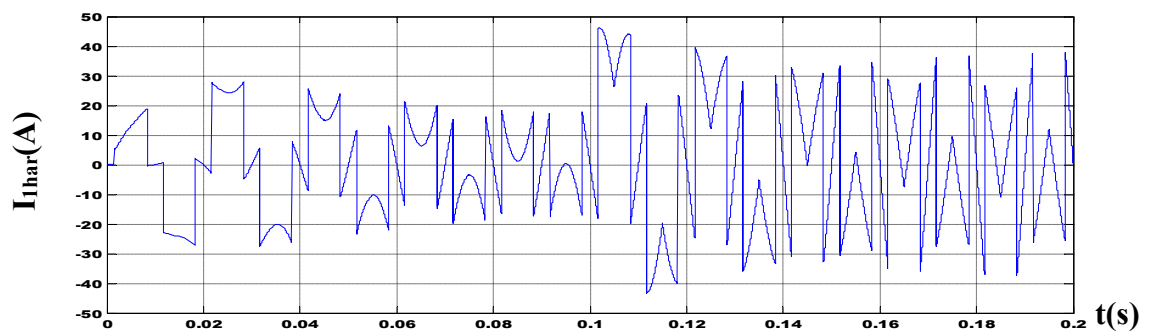


Figure III.39 : Courant harmonique I_{har} identifié.

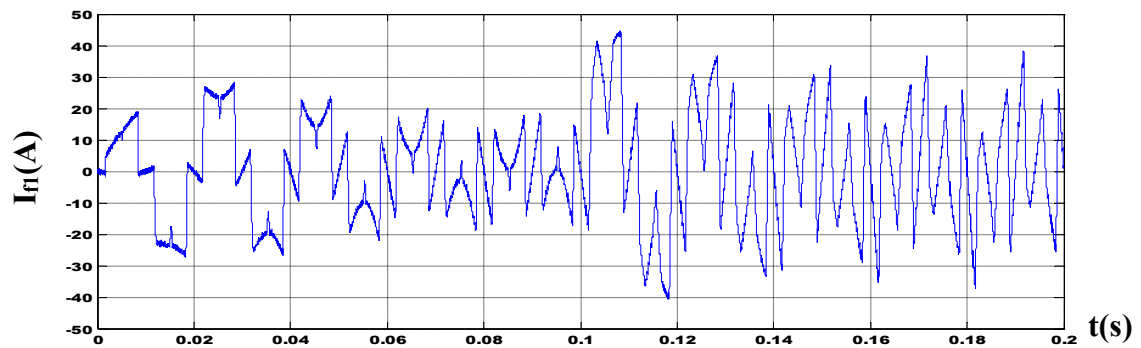


Figure III.40 : Courant injecté par le filtre I_{fi} .

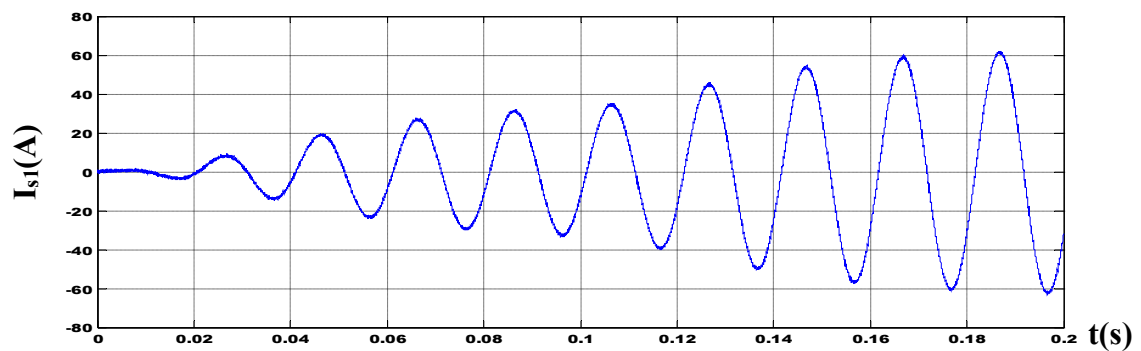


Figure III.41 : Courant de source après filtrage.

III.14 Interprétation

Les figures ci-dessus montrent :

- La robustesse de la commande par logique floue pour la variation de la charge non linéaire.
- L'adaptation et l'efficacité du filtre actif parallèle aux variations de la charge non linéaire.

III.15 Réglage de la tension d'entrée de l'onduleur

La tension continue V_{dc} aux bornes du condensateur de stockage, doit être maintenue constante.

La cause de variation de cette tension est l'échange de puissance active avec le réseau.

Les fluctuations de cette tension doivent être faibles d'une part pour ne pas dépasser la limite en tension des semi-conducteurs constituant les interrupteurs, et d'autre part pour ne pas dégrader les performances du filtre actif. Afin d'assurer le rôle de source de tension continue, une régulation de cette tension est nécessaire.

Pour assurer la régulation de la tension continue, on peut utiliser un régulateur PI. Si on néglige les pertes au niveau de l'onduleur et dans le filtre de sortie. Pour la régulation de la tension d'entrée de l'onduleur de tension on peut écrire [19] :

$$P_{dc} = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} C_{dc} V_{dc}^2 \right) \quad (III.1)$$

Appliquons la transformation de Laplace sur cette relation, nous obtenons

$$P_{dc}(s) = \frac{1}{2} s C_{dc} V_{dc}^2(s) \quad (III.2)$$

La tension aux bornes du condensateur est donnée par

$$V_{dc}^2(s) = \frac{2P_{dc}(s)}{s C_{dc}} \quad (III.3)$$

A partir de la relation (III.3), et en tenant compte du régulateur (PI), la boucle de régulation de tension continue peut être représentée par la figure III.42. Le choix des paramètres K_{pdc} et K_{idc} aura pour objectif d'obtenir un temps de réponse minimal afin de ne pas nuire la dynamique du filtre actif [12].

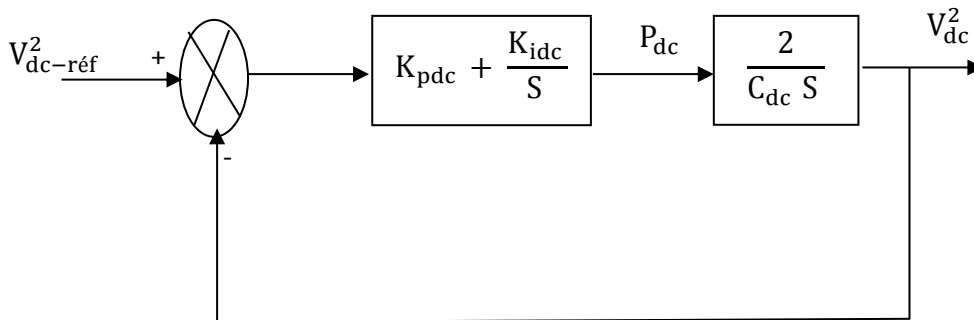


Figure III.42 : Boucle de régulation de la tension continue.

A partir de la figure III.42, la fonction de transfert représentant la régulation en boucle fermée de la tension continue est donnée par :

$$F(s) = \frac{1 + \frac{K_{pdc}}{K_{idc}}s}{s^2 + 2\frac{K_{pdc}}{C_{dc}}s + 2\frac{K_{idc}}{C_{dc}}} \quad (III.4)$$

Comparant cette équation avec la forme générale d'une fonction de transfert de deuxième ordre, On trouve :

$$K_{idc} = \frac{1}{2} C_{dc} \omega_c^2 \quad (III.5)$$

Tel que : $\omega_c = 2\pi f_c$ et $K_{pdc} = \xi \sqrt{2 C_{dc} K_{idc}}$

III.15.1 Résultat de simulation

Cette simulation a été réalisée avec les paramètres suivants :

- La valeur de tension continue est égale à 700V.
- Le filtre d'extraction passe-bas est du deuxième ordre avec une fréquence de coupure de 8Hz.
- Valeur du condensateur d'entrée de l'onduleur est égale $C = 2.10^{-3}$ F.
- On a choisi la valeur de $\xi=0.707$ pour un bon coefficient d'amortissement du système.

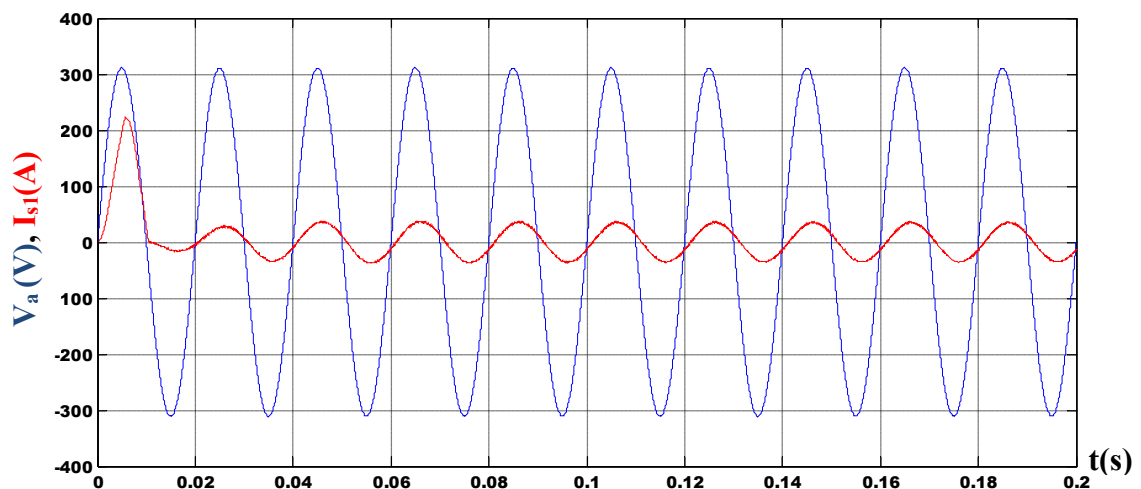


Figure III.43 : Tension, courant après filtrage.

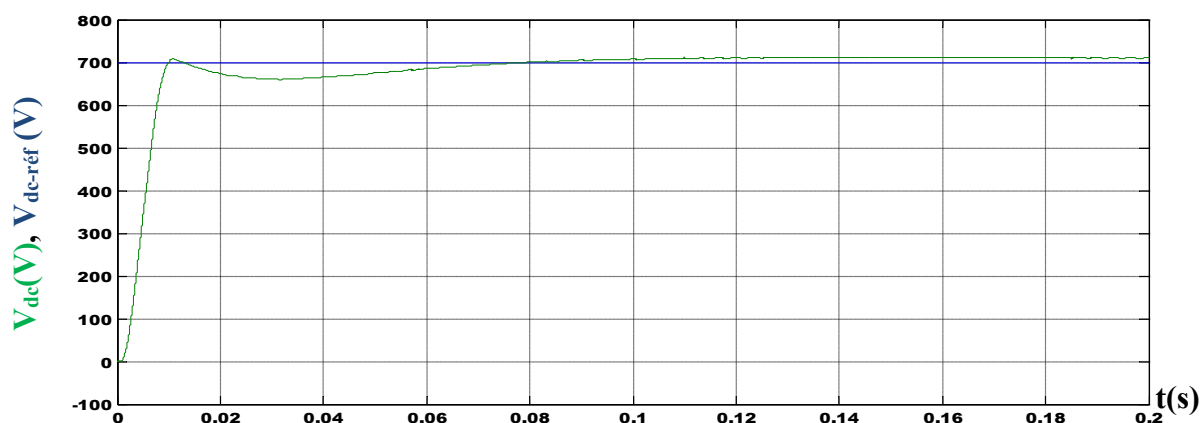


Figure III.44 : Tension de stockage et sa référence.

III.16 Interprétation

La figure III.43 présente le courant de la première phase du réseau après le filtrage et la tension de stockage et sa référence.

Le tableau III.5 montre l'amélioration de la qualité du courant de source pour chaque angle d'amorçage ($0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$), pour la commande à bande floue, avec condensateur, ce qui confirme la bonne qualité de filtrage observé dans l'analyse temporelle des courants de la source.

α		0°		30°		60°	
		Avant THD%	Après THD%	Avant THD%	Après THD%	Avant THD%	Après THD%
La bande							
bande floue	$\Delta h=0.1$	17.8	1.9	22.89	2.1	27.07	3.6

Tableau III.5 : Le THD obtenu avant et après filtrage à bande floue avec régulation de la tension continue de l'onduleur.

III.17 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté le rôle de l'onduleur à 2 niveaux et le filtre parallèle (R_f , L_f) pour l'élimination des courants harmoniques, les deux stratégies de commande hystérésis à bande fixe et commande hystérésis à bande floue utilisées ont montré une bonne compétence à résoudre ce problème.

La commande hystérésis à bande floue a fourni des courants de réseau moins riche en harmonique par rapport à la commande hystérésis à bande fixe.

Dans le prochain chapitre nous présenterons le filtrage actif parallèle par logique floue avec compensation de l'énergie réactive

Chapitre IV

FILTRAGE ACTIF PARALLELE AVEC COMPENSATION DE L'ENERGIE REACTIVE

IV.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons montré l'utilisation du filtre actif commandé par la logique floue pour éliminer les courants harmoniques et les effets néfastes sur la forme du courant du réseau électrique, nous allons en revanche dans ce chapitre, exposer le concept de la compensation de l'énergie réactive en rendant le facteur de puissance unitaire.

IV.2 Effets de circulation de l'énergie réactive

La circulation de l'énergie réactive dans le réseau autrement dit l'échange de l'énergie réactive entre le réseau et la charge a de grands effets indésirables. Parmi ces effets, on distingue [20] :

- Surconsommation du courant.
- Echauffement dans les transformateurs et machines tournantes.
- Echauffement des câbles et tableaux de distribution.
- Déclenchement intempestif des disjoncteurs.
- Dysfonctionnement de charge sensible.
- Destruction de condensateur (résonance).

IV.3 Principe du filtrage actif avec compensation d'énergie réactive

La compensation de l'énergie réactive consiste à rendre le déphasage entre le courant et la tension de source nul, autrement dit un facteur de puissance unitaire.

Pour cela, il faut premièrement identifier le courant de charge pour pouvoir connaître le courant de filtre I_f qu'il faut ajouter pour avoir un courant délivré par la source sinusoïdal et en phase avec la tension.

Le courant I_f que doit fournir le filtre doit être égale à la différence entre le courant d'entrée I_c de la charge polluant, et le courant sinusoïdal I_{s-ref} (courant de source de référence).

Pour la détermination de la valeur maximale I_{s-max} du courant de source de référence I_{s-ref} on a deux possibilités qui sont [20] :

- La première possibilité est l'utilisation d'un filtre passe-bas, suivi par un redresseur monophasé et un filtre passe-bas intermédiaire.
- La deuxième possibilité est l'utilisation de la transformation α - β .

Le courant généré par le filtre doit être égal à la somme d'une composante harmonique I_h , servant à dépolluer le réseau, autrement dit éliminer les harmonique, et une composante fondamentale I_f qui va servir à compenser l'énergie réactive, c'est-à-dire rendre le facteur de puissance unitaire comme le montre la figure IV.1, ainsi, le courant généré par le filtre s'écrit

$$I_k = I_f + I_h = I_c - I_s \quad (IV.1)$$

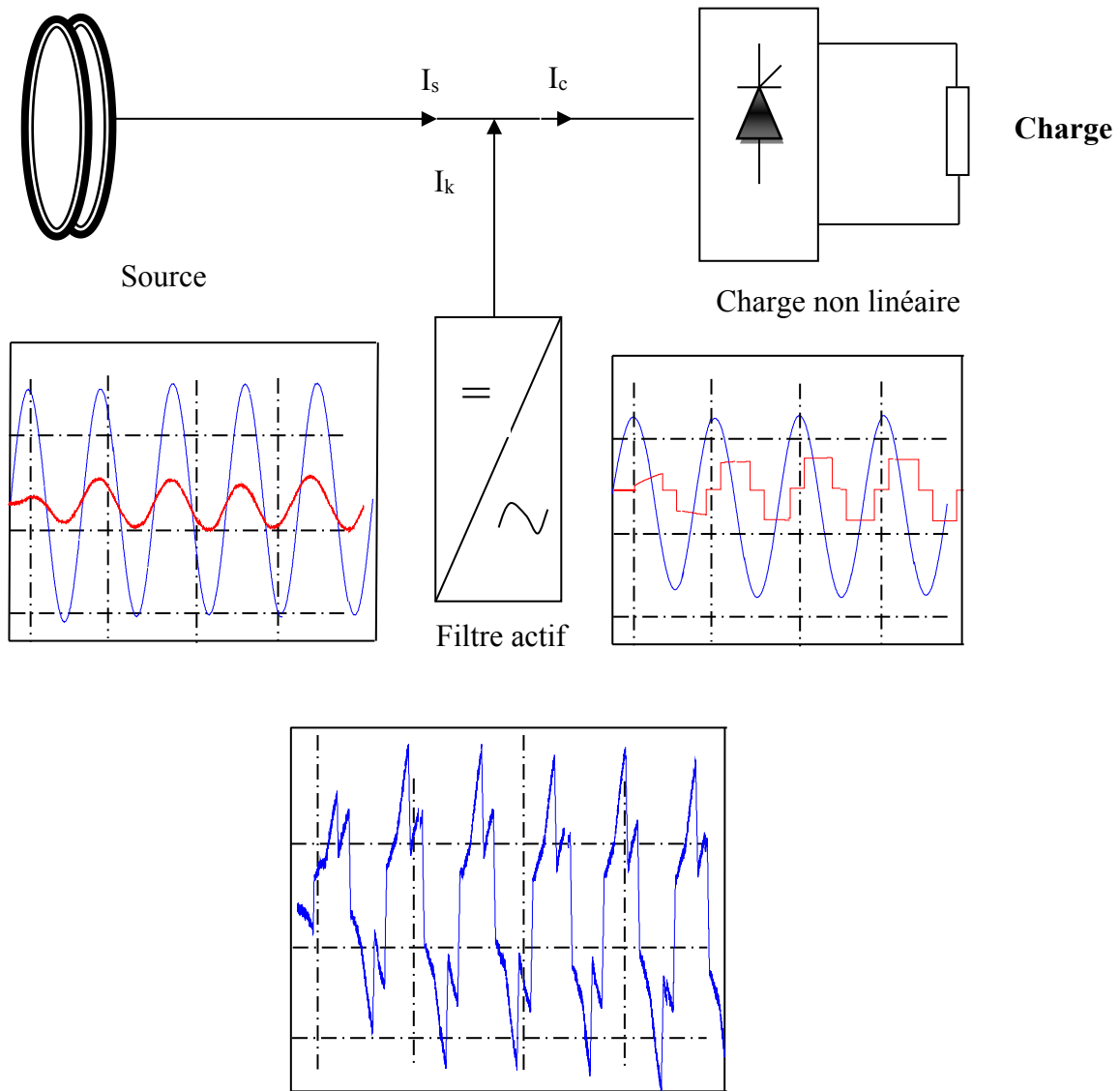


Figure IV.1 : Filtrage actif avec compensation de l'énergie réactive.

IV.4 Principe de la méthode

On fait passer les courants de charge du réseau triphasé (I_{c1} , I_{c2} , I_{c3}) par la transformation (α , β), autrement dit, trouver les deux composantes I_α et I_β . Après avoir trouvé ces deux composantes, on fait passer chacune par un filtre passe-bas pour avoir ses composantes fondamentales, comme explique l'algorithme de la figure IV.2. La racine carrée de ces dernières nous spécifie la valeur maximale du courant de source de référence. En multipliant cette valeur par la sinusoïde $\sin(\omega t + \varphi)$ en phase avec la tension du réseau correspondante, on aura le courant de source référence I_{s-ref} . L'extraction de ce dernier du courant de charge donne le courant de référence du filtre [2]. On prend comme variable de sortie la bande hystérésis et comme variable d'entrée, la dérivée du courant de référence di_k^*/dt et de la tension du réseau $V_s(t)$. On notera que pour la variable de sortie les fonctions d'appartenance correspondant aux sous-ensembles flous.

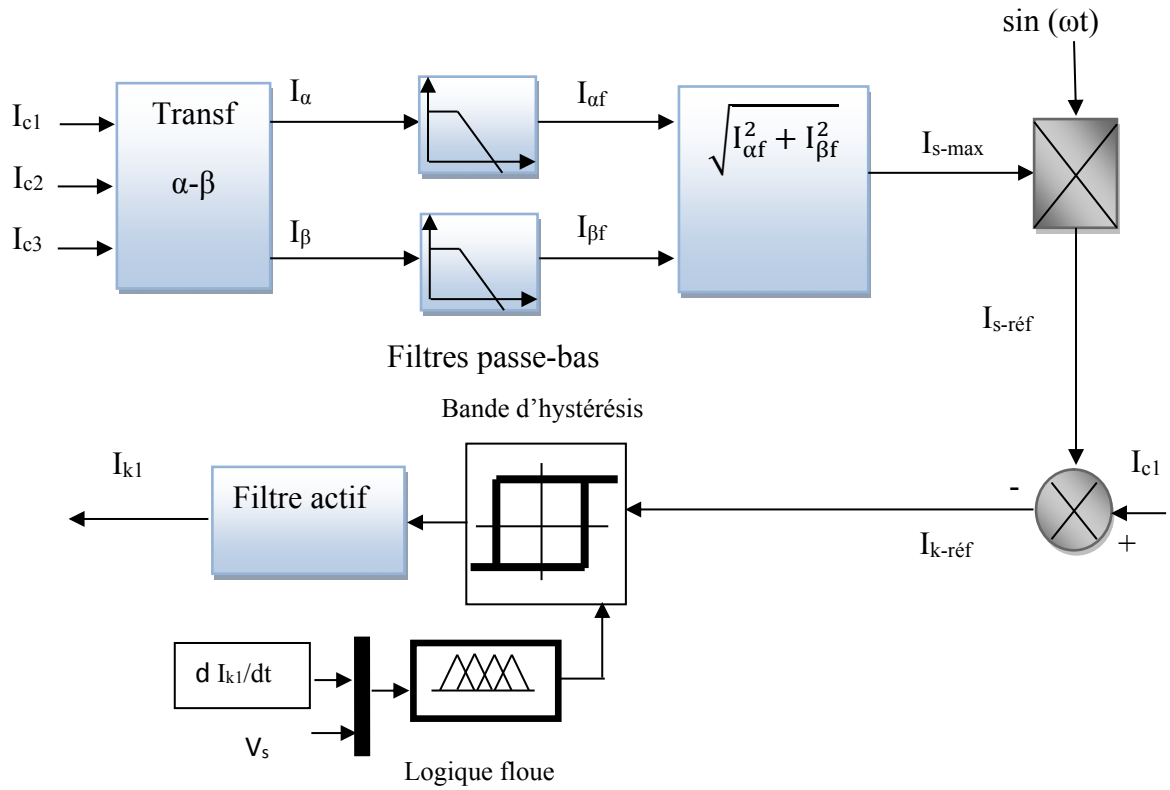


Figure IV.2 : Schéma bloc de la commande avec compensation de l'énergie réactive.

IV.4.1 Expression du courant de charge dans le repère (α , β)

L'expression des courants de charge dans le repère (α , β) est donnée par l'équation suivante :

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (\text{IV.2})$$

IV.4.2 Mise en œuvre de deux filtres passe bas pour l'extraction du courant de source de référence

La composante fondamentale des courants I_α et I_β peut être tirée, en faisant passer chacun dans filtre passe-bas, figure IV.3.

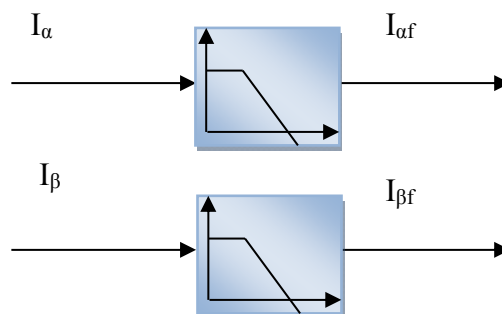


Figure IV.3 : Les filtres passe-bas.

On a choisi d'utiliser deux filtres passe-bas de deuxième ordre, ils ont une fréquence de coupure $f_c=50\text{Hz}$.

La fonction de transfert du filtre est donnée par :

$$F(s) = \frac{1}{(1+\tau.s)^2} \quad \text{Filtre passe-bande deuxième ordre.}$$

Avec : $1/\tau = 2.\pi.f_c$.

D'où, la valeur maximale du courant de source de référence est :

$$I_{\max} = \sqrt{I_{\alpha f}^2 + I_{\beta f}^2} \quad (\text{IV.3})$$

En multipliant cette valeur par $\sin(\omega t + \varphi)$ on trouve :

$$I_{s\text{-ref}} = I_{\max} \sin(\omega t + \varphi)$$

La phase φ permet de contrôler l'énergie réactive fournie par le réseau (source). Pour neutraliser cette puissance réactive, on imposera un déphasage nul ($\varphi = 0$) entre le courant et la tension de source.

(IV.4)

$$I_{s\text{-ref}} = I_{\max} \sin(\omega t)$$

Une soustraction entre le courant de charge et le courant de source de référence, permet d'avoir le courant de référence que doit générer le filtre actif afin d'obtenir un courant sinusoïdal et en phase avec la tension. D'où

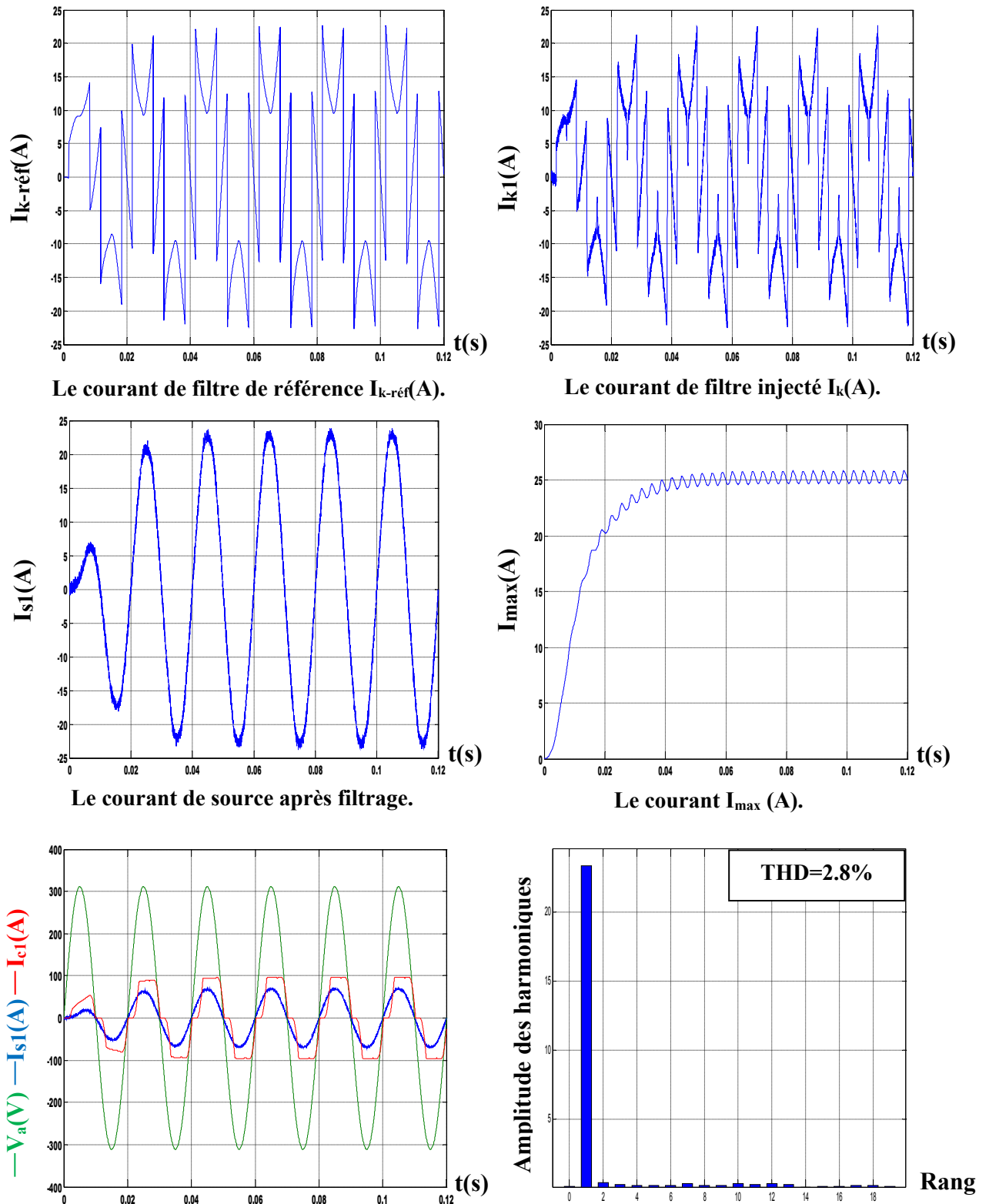
$$I_{k\text{-ref}} = I_c - I_{s\text{-ref}} \quad (\text{IV.5})$$

Une comparaison entre le courant réel du filtre actif I_k et le courant du filtre de référence $I_{k\text{-ref}}$, permet la détermination des commandes des interrupteurs de ce dernier [2].

IV.5 Application de principe du filtrage actif avec compensation de l'énergie réactive sur une charge non linéaire

L'algorithme général du filtre actif d'harmonique avec compensation d'énergie réactive, en utilisant la transformation (α, β), le courant de source de référence déterminé par cette méthode est soustrait du courant de charge pour déterminer le courant filtre de référence. Ce dernier est comparé au courant réel généré par le filtre pour déterminer la commande des interrupteurs du filtre actif [2]. Le principe de cette méthode est appliqué sur une charge non linéaire « pont redresseur à thyristors », pour trois angles d'amorçage (0° , 30° et 60°) pour la commande du filtre actif, en utilisant la commande par hystérésis à bande floue.

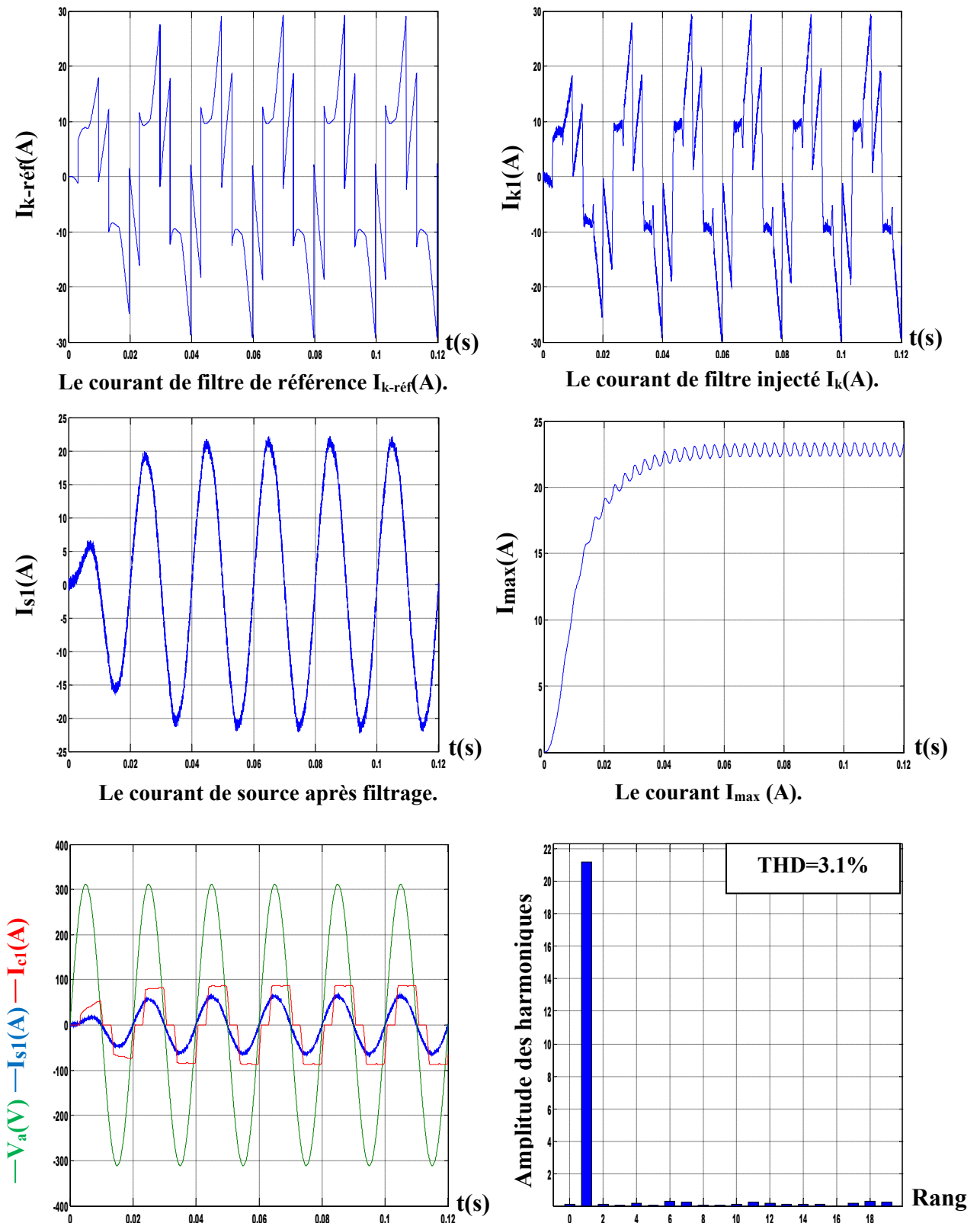
IV.6 Résultats de simulation

a-Pour $\alpha=0^\circ$ 

La tension de source, courant de charge et le courant de source avec son spectre après filtrage.

Figure IV.4 : Les grandeurs simulées pour la commande par hystérésis à bande floue dans le cas $\alpha=0^\circ$.

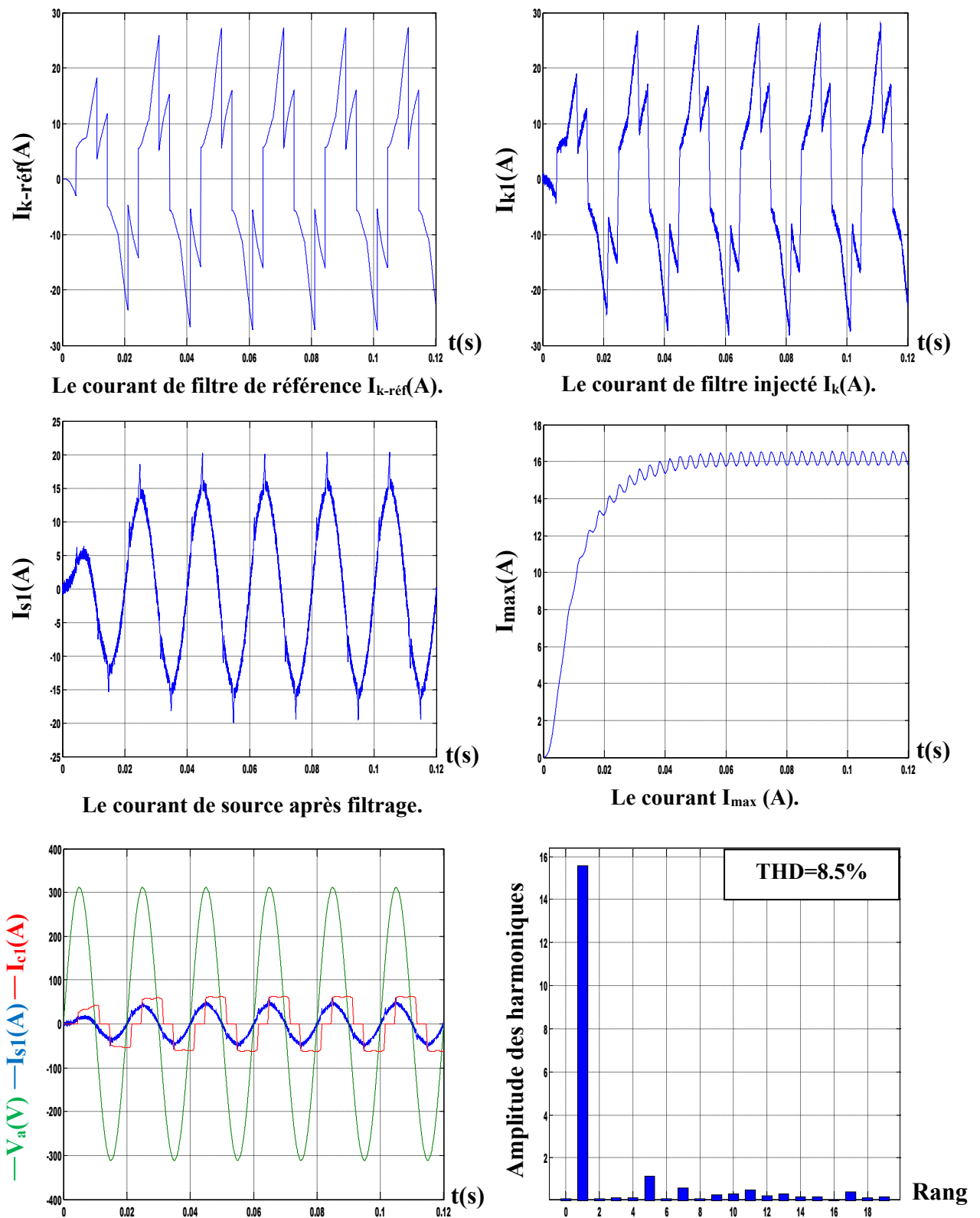
b-Pour $\alpha=30^\circ$



La tension de source, courant de charge et le courant de source avec son spectre après filtrage.

Figure IV.5 : Les grandeurs simulées pour la commande par hystérésis à bande floue dans le cas $\alpha=30^\circ$.

c-Pour $\alpha=60^\circ$



La tension de source, courant de charge et le courant de source avec son spectre après filtrage.

Figure IV.6 : Les grandeurs simulées pour la commande par hystérésis à bande floue dans le cas $\alpha=60^\circ$.

IV.7 Interprétation

Les figures (IV.4, IV.5, IV.6 et IV.7) ont montrés que :

- Le filtre actif parallèle est une technique moderne pour éliminer les harmoniques de courant.
- On remarque le déphasage est nul pour les angles d'amorçage (0° , 30° et 60°), ce qui signifie la correction de facteur de puissance.
- La commande par hystérésis à bande floue permet d'avoir une amélioration de la qualité des courants comme montre le tableau IV.1 :

α Bande	0°		30°		60°	
	Avant THD%	Après THD%	Avant THD%	Après THD%	Avant THD%	Après THD%
A bande floue	17.8	2.8	22.89	3.1	27.07	8.5

Tableau IV.1 : Le THD obtenu pour la commande floue du FAP avant filtrage et après filtrage et compensation de l'énergie réactive.

- Nous avons utilisé une inductance après le point de raccordement du filtre actif pour éliminer la présence des pics au niveau des courants de source.

IV.8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté le rôle du filtre actif parallèle commandé par logique floue avec compensation de l'énergie réactive et les courants harmoniques. On note que la commande hystérésis à bande floue nous a permet d'obtenir des meilleurs résultats, et cela est montré à travers le THD obtenu. Les résultats de simulation montrent l'efficacité de la stratégie de commande hystérésis à bande floue par rapport à celle de la bande fixe.

CONCLUSION

GENERALE

Conclusion générale

Dans le présent travail, nous avons étudié le rôle du filtre actif parallèle commandé par la logique floue pour la dépollution des réseaux électriques. La pollution en harmonique est l'un des problèmes majeurs qui dégrade la qualité d'énergie électrique dans les réseaux de distribution. La circulation des courants harmoniques dans les lignes et entre les charges est difficile à prédire et à contrôler. Dans cette situation, il existe des méthodes classiques qui peuvent diminuer les effets néfastes des harmoniques et des méthodes modernes qui les éliminent complètement tel que le filtrage actif.

Notre travail s'articule autour de quatre chapitres dont le premier a été consacré à la présentation des différents types de perturbations qui peuvent polluer le réseau électrique et à la définition des harmoniques et des équilibres de courants et de tensions.

Dans le deuxième chapitre, nous nous sommes focalisés sur la structure générale des filtres actifs parallèles. Cette structure est divisée en deux parties : la partie puissance constituée de l'onduleur de tension à deux niveaux, la source de tension continue et le filtre de sortie (filtre R L). La deuxième partie est la partie commande incluant l'identification du courant harmonique par la méthode de puissances instantanées et la régulation du courant injecté sur le réseau. Ainsi, nous avons présenté la modélisation et la simulation de la charge polluante.

Le troisième chapitre a porté sur le rôle de l'onduleur à deux niveaux et le filtre actif parallèle pour l'élimination du courant harmonique. Pour identifier les courants harmoniques, nous avons choisi la méthode de puissances réelles et imaginaires. En outre, nous avons travaillé sur deux stratégies de commande à savoir : la commande hystérésis à bande floue et la commande hystérésis à bande fixe. La commande hystérésis à bande floue a fourni de courant de réseau moins riche en harmonique.

Dans le quatrième et dernier chapitre, nous avons présenté le rôle du filtre actif parallèle commandé par la logique floue avec compensation de l'énergie réactive. Il est à noter que la commande hystérésis à bande floue nous a permis d'obtenir de meilleurs résultats, et cela a été montré à travers le THD obtenu.

La logique floue est une technique de l'intelligence artificielle qui ne nécessite pas la connaissance exacte du modèle mais elle se repose sur l'expertise humaine.

Enfin les résultats de simulation obtenus sont satisfaisants. Le filtrage actif parallèle s'adapte au changement de la charge et permet de rendre le réseau plus stable avec un facteur de puissance unitaire.

Afin d'améliorer les performances de la commande du filtre actif parallèle par logique floue, nous proposons comme perspectives :

- La réalisation pratique de ce travail.
- L'utilisation d'autres structures d'onduleurs tels que les onduleurs trois niveaux afin d'améliorer les performances du filtre actif parallèle.
- L'utilisation d'autres techniques de commande de l'intelligence comme les réseaux de neurones dans la commande du filtre actif parallèle.

ANNEXE

Paramètres utilisés

Paramètres de la source :

La tension simple : $V=220\text{ V}$ et la fréquence : $f=50\text{ hz}$

$$V_a=220\sqrt{2}\sin(\omega t).$$

$$V_b=220\sqrt{2}\sin(\omega t - 120).$$

$$V_c=220\sqrt{2}\sin(\omega t + 120).$$

Paramètres du filtre actif :

$$R_f=0.2\ \Omega.$$

$$L_f=0.004\text{ H}.$$

Paramètres de la charge :

$$R_{ch1}=14.6\ \Omega.$$

$$R_{ch2}=7.3\ \Omega.$$

$$L_{ch}=0.155\text{ H}.$$

Paramètres de l'onduleur :

$$V_{dc}=700\text{ V}.$$

$$C=2 \cdot 10^{-3}\text{ F}.$$

Paramètres du régulateur PI :

$$K_i=2.53.$$

$$K_p=0.07.$$

BIBLIOGRAPHIE

- [1] **OMEIRI Amar**, « Simulation d'un filtre actif parallèle de puissance pour la compensation des harmoniques de courant », thèse de doctorat, université d'Annaba, 2007.
 - [2] **BOUGUERRA Samir et BOURENNANE Ibrahim**, « Filtrage actif parallèle des réseaux électriques avec compensation de l'énergie réactive », mémoire d'ingénieur, université de M'sila, 2007.
 - [3] **BEN MEDDOUR Mostefa**, « Contribution à l'étude du filtrage actif parallèle des harmoniques dans les réseaux électriques », mémoire d'ingénieur, université Biskra, 2011.
 - [4] **GHASSOULI Nabil et RAOUACHE Noui**, « application du filtrage actif parallèle sur une charge dynamique non linéaire », mémoire d'ingénieur, université de M'sila, 2007.
 - [5] **BOUCIF Abdelmalek**, « Filtrage actif d'un réseau électrique », mémoire de master, université de Biskra, 2014.
 - [6] **Eric BETTEGA et Jean Noël FIORINA**, « Harmoniques, convertisseurs propres et compensateurs actifs », Cahier Technique Schneider Electric n° 183, 2000.
 - [7] **M.A.E ALLALI**, « Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension », thèse de doctorat, ULP Strasbourg, 2002.
 - [8] **BENKECHIDA Noureddine**, « Identification de courant harmonique généré par une charge non linéaire », mémoire d'ingénieur, université de M'sila, 2005.
 - [9] **BOUDJEDAIMI Madjid**, « Commande d'un onduleur avec des approches neuromimétiques pour la compensation des courants harmoniques dans les réseaux électriques », International Conference on Electrical Engineering and its Applications (ICEEA), Sidi Bel-Abbes, 2008.
 - [10] **DJEGHLOUD HIND**, « Filtrage actif de puissance », université de Constantine, thèse de doctorat, 2007.
 - [11] **D. OULD ABEDSLAM**, « Technique neurométrique pour la commande dans les systèmes électriques : application au filtrage actif parallèle dans les réseaux basse tension », thèse de doctorat, université de Haut Alsace, 2005.
 - [12] **BAKHI Hamza**, « Commande d'un Filtre Actif Triphasé Shunt par Logique Floue », mémoire de master, universitaire de M'sila, 2015.
 - [13] **GAOUAR Fateh et Ouled Dje Sidi**, « Commande d'un filtre actif série », mémoire d'ingénieur, université de M'sila, 2010.
 - [14] **KEBIRI Samia**, « Modélisation et simulation d'un filtre actif multiniveaux », mémoire de magister, université Tizi-ouzou, 2009.
 - [15] **ABDUSALAM Mohamed Muftah**, « Structures et stratégies de commande des filtres actifs parallèle et hybride avec validations expérimentales », thèse de doctorat, université de Lorraine, Nancy, 2008.
-

- [16] **M. Fodil**, « Commande Adaptative par Logique Floue de la Machine Asynchrone », mémoire de magister, université de M'sila, 2007.
- [17] **M. MEKKI Idriss**, « Commande vectorielle de la machine asynchrone à double alimentation MADA à base d'un régulateur flou », mémoire de master, université de M'sila, 2014.
- [18] **F. Mekri, B. Mazari**, « Etude et simulation des différents type de contrôle d'un Filtre Actif de Puissance », article d'un séminaire à Oran, 2002.
- [19] **ALLAHOUM Rabie**, « Contribution à l'étude du filtre actif parallèle de puissance à trois niveaux », mémoire de magister, université d'El-Oued, 2012.
- [20] **ABBEDELLI Youcef, KROUMA Mohammed Issam**, « Filtrage actif parallèle à trois niveaux: principe, réglage et stabilisation », mémoire d'ingénieur, école nationale polytechnique d'Alger, 2009.
- [21] **HAMICHE Larbi**, «Amélioration des paramètres du filtre actif par l'utilisation d'un régulateur a logique flou», mémoire de magister, université d'Annaba, 2009.
- [22] **BOUAFIA Abdelouahab**, «techniques de commande prédictive et floue pour les systèmes d'électronique de puissance: application aux redresseurs a MLI», thèse de doctorat, université Sétif, 2010.
- [23] **TOUAL Belkacem**, «Modélisation et Commande Floue Optimisée d'une Génératrice à Double Alimentation, Application à un Système Eolien à Vitesse Variable», mémoire de magister, université Batna, 2010.
- [24] **K.Nabti**, «Contribution à la Commande de la Machine Asynchrone par DTC et Logique Floue», Mémoire de Magister, université de Constantine, 2006.
- [25] **MIHOUB Youcef**, «Commande floue adaptative de la machine asynchrone», thèse de Doctorat, université d'Oran, 2012.
- [26] **MOKEDDEM Diab**, «Contrôle Flou des Processus Biotechnologiques à Base d'Algorithmes Génétiques», thèse de Doctorat, université Sétif, 2010.
-



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME
MASTER EN GENIE ELECTRIQUE
OPTION : COMMANDE DES SYSTEMES ELECTRIQUES

Proposé et dirigé par :

Mr. BEDBOUDI Mohamed

Présenté par :

TELLI Abdelwahab

CHOUIDIRA Ibrahim

Thème

**COMMANDE PAR LOGIQUE FLOUE D'UN FILTRE ACTIF PARALLELE AVEC
CORRECTION DU FACTEUR DE
PUISSANCE**

Résumé

Dans un réseau électrique basse tension, les harmoniques, la puissance réactive, les déséquilibres de courant et de tension ont des effets néfastes sur les équipements électriques. Ce mémoire présente l'étude et la commande d'un filtre actif parallèle pour l'amélioration de la qualité de l'énergie d'un réseau électrique. A cet effet, un rappel des différents types de perturbations électriques a été réalisé. La stratégie de commande employée est la stratégie à hystérésis à bande floue. Cette commande a été utilisée pour atteindre un double objectif : avoir un courant côté réseau sinusoïdal d'une part et d'autre part rendre le déphasage entre la tension et ce courant nul ce qui permet d'avoir un facteur de puissance unitaire. Les résultats de simulation obtenus ont montrés de bonnes performances pour le contrôle proposé.

Mots clés

Redresseur commandé, harmonique, identification, bande floue, facteur de puissance, THD.