

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Département de Génie électrique

Spécialité : Électrotechnique

Projet de fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en
Électrotechnique

Thème

***MODELISATION ET COMMANDE D'UN UPFC
UTILISE EN FILTRAGE DES COURANTS
HARMONIQUES D'UN RESEAU ELECTRIQUE***

Proposé et dirigé par :

Pr.E.M. BERKOUK

Étudie par :

BOUFASSA Rabah

MEKARNIA Omar

Promotion: Juin 2007

E.N.P. 10, Avenue Hassen-BADI, EL-Harrach, ALGER

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

و صَلَّى اللَّهُ وَ سَلَّمَ عَلَى نَبِيِّنَا مُحَمَّدٍ وَ عَلَى آلِهِ وَصَحَابَتِهِ الْكِرَامِ.

الْحَمْدُ لِلَّهِ الَّذِي بِنِعْمَتِهِ تَتِمُّ الصَّالِحَاتُ

REMERCIEMENTS

Nous remercions Dieu de nous avoir donné la force physique et morale pour accomplir ce travail.

Nous remercions notre encadreur Mr : E.M. BERKOUK pour leur aides, leurs encouragements et la patience avec laquelle il a bien travaillé avec nous en nous guidant et nous corrigeant durant toute l'année.

Nous adressons nos chaleureux remerciements aux membres du jury :

Pr.MO.MAHMOUDI
Mr.B.HMICI

Nous souhaitons également remercier tous les enseignants ayant assurés nos cours pendant nos années d'études

Dédicaces

Je dédie ce travail essentiellement à

➤ *MES PARENTS.*

➤ *Mes frères et mes sœurs.*

➤ *Toute ma famille*

➤ *Mon binôme OMAR*

➤ *Tous mes amis de la promotion d'Electrotechnique 2007*

Rabah BOUFASSA

Dédicaces

Je dédie ce travail essentiellement à

➤ *MES PARENTS.*

➤ *Mes frères et mes sœurs.*

➤ *Toute ma famille et proches*

➤ *Mon ami et frère SMAIL et tous mes amis*

➤ *Mon binôme RABAH*

➤ *Tous mes amis de la promotion d'Electrotechnique 2007*

Omar MEKARNIA

Nomenclature :

Symbole	Désignation	
V_{sk}	Tension simple du réseau k= (1,2 et 3)	220(V)
Ra	Résistance d'induit Ra	2.25 Ω
La	Inductance de l'induit La	0.03 H
Kf	Coefficient de frottement Kf	0.017 m.N/rd.s
$K\varphi$	Constantes Kc et Km	0.55 V/rd.s
J	Moment d'inertie J	0.04 kg. m^2
V_{nom}	Tension nominale	94 V
Inom	Courant nominal	4,5 A
Ω_{nom}	Vitesse nominale	1500 tr/mn
Cnom	Couple nominal	3 N.m
Rcc	Résistance de réseaux	
Lcc	Inductance de réseaux	
Amplitude	Amplitude des harmoniques	p.u

SOMMAIRE

INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
CHAPITRE I : LES PERTURBATIONS HARMONIQUES DANS LES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES ET LES SOLUTIONS DE DEPOLLUTION	3
I.1. INTRODUCTION.....	3
I.2 LES PERTURBATIONS HARMONIQUES DANS LES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES ...	3
I.2.1 Les principaux origines des harmoniques et interharmoniques	3
I.2.2 Caractérisations des harmoniques	4
I.2.3 Réglementation	6
I.3.EFFETS DES HARMONIQUES SUR LE RESEAU ELECTRIQUE.....	8
I.3.1 Généralités	8
I.3.2 Effet des harmoniques sur les machines tournantes	11
I.3.3 Effet des harmoniques sur les composants passifs du réseau	10
I.4. SOLUTION DE DEPOLLUTION DES HARMONIQUES.....	15
I.4.1 Solutions classiques	15
I.4.1.1 Agir sur la structure de l'installation	15
I.4.1.2 Augmentation de la puissance de court-circuit	15
I.4.1.3 Rééquilibrage des courants du réseau électrique	15
I.4.1.4 Surdimensionnement ou déclassement de l'installation électrique	16
I.4.1.5 Compensation de la puissance réactive	16
I.4.1 6 Filtrage passif	16
I.4.2 Nouvelles solutions de dépollution	17
I.4.2.1 Pont dodécaphasé	17
I.4.2.2 Les redresseurs à MLI	18
I.4.3 Filtres actifs	18
I.4.3.1 Filtre actif parallèle (F.A.P)	19
I.4.3.2 Filtre actif série (F.A.S)	20
I.4.3.3 Combinaison parallèle-série actifs (UPFC) ou (UPQC)	21
I.4.3.4 Combinaison hybride de filtres actifs et passifs	21
I.5. CONCLUSION	23

CHAPITRE II : METHODES D'IDENTIFICATION DES COURANTS

HARMONIQUES	24
II.1. INTRODUCTION	24
II.1. METHODE DES PUISSANCES REELLE ET IMAGINAIRE INSTANTANEEES	24
II.2.1 Principe de la méthode	24
II.2.2. Identification avec compensation de l'énergie réactive	26
II.2.2.1 Principe.....	26
II.2.2.2 Détermination de courant réactif I_{ffr}	27
II.2.3 Algorithme d'identification	29
II.2.4 Validation de la méthode d'identification des harmoniques	29
II.3 AUTRES METHODES	31
II.3.1 Méthode basée sur le principe du courant actif	31
II.3.1.1 Correspondance entre courants et puissances	31
II.3.1.2 Algorithme d'identification	32
II.3.2 Méthode de puissance instantanées p-q étendue	32
II.3.3 Méthodes des courants diphasés	33
II.4 CONCLUSION	35

CHAPITRE III : FILTRE ACTIF PARALLELE, MODELISATION, COMMANDE ET SIMULATION

36

III.1. INTRODUCTION	36
III.2. MODELISATION DU FILTRE ACTIF PARALLELE	36
III.2.1 Modélisation de l'onduleur triphasé à deux niveaux	37
III.2.1.1 Fonctions de conversion	38
III.2.1.2 Tensions composées a la sortie de l'onduleur	38
III.2.1.3 Tensions simples	38
III.3 COMMANDE DU FILTRE ACTIF PARALLELE	39
III.3.1 Commande par hystérésis	39
III.3.1.1 Principe	39
III.3.1.2. Algorithme	39
III.3.2 Commande MLI triangulo-sinusoidale	40
III.3.2.1 Principe	40
III.3.2.2. Algorithme	41
III.3.2.3 Dimensionnement du correcteur PI	41

III.3.2.4 Choix de L_f et R_f	41
III.4 APPLICATION DU FILTRE ACTIF PARALLELE A LA CHARGE NON	
LINEAIRE	42
III.4.1. Modélisation du réseau électrique	42
III.4.2. Modélisation de la charge polluante	43
III.4.3 Modélisation de la machine à courant continu	46
III.4.3.1 Equations de fonctionnement	46
III.4.3 Résultats de simulation en utilisant la commande par hystérésis	48
III.4.3.1 Sans compensation	48
III.4.3.2 Avec compensation	54
III.4.4 Interprétation des résultats en utilisant la commande par hystérésis	57
III.4.4.1 Sans compensation de l'énergie réactive	57
III.4.4.2 Avec compensation de l'énergie réactive	57
III.4.5 Résultats de simulation en utilisant la commande MLI	58
III.4.5.1 Sans compensation	58
III.4.5.1 Avec compensation	64
III.4.6 Interprétation des résultats en utilisant la commande par hystérésis	67
III.4.6.1 Sans compensation de l'énergie réactive	67
III.4.6.2 Avec compensation de l'énergie réactive	67
III.5 CONCLUSION	68
CHAPITRE IV : COMBINAISON PARALLELE – SERIE « UPFC »	69
IV.1. INTRODUCTION	69
IV.2 MODELISATION DE L'UPFC	69
IV.2.1 Structure générale de L'UPFC.....	69
IV.2.2 Principe de fonctionnement de l'UPFC	70
IV.2.3 Modélisation de la partie shunt	70
IV.2.4 Modélisation du redresseur MLI de courant à deux niveaux	70
IV.2.4.1 Modélisation de la boucle de courant (interne)	71
IV.2.4.2 Modélisation de la boucle de tension (externe)	72
IV.2.5 Dimensionnement des régulateur de courant et tension	73
IV.2.5.1-La boucle de courant	73
IV.2.5.2-La boucle de tension	74
IV.2.6 Les stratégies de commande appliquée au redresseur à MLI	75

IV.2.6.1	Commande par hystérésis	75
IV.2.6.2	Résultats de simulation	76
IV.2.6.3	Commande MLI triangulo-sinusoïdale	77
I	V.2.6.4 Résultats de simulation	78
IV.3	APPLICATION DE L'UPFC A LA CHARGE NON LINEAIRE	79
IV.3.1	Résultats de simulation en utilisant la commande par hystérésis	80
IV.3.1.1	Sans compensation	80
IV.3.1.2	Avec compensation	86
IV.3.2	Interprétation des résultats en utilisant la commande par hystérésis	89
IV.3.2.1	Sans compensation de l'énergie réactive	89
IV.3.2.2	Avec compensation de l'énergie réactive	89
IV.4	CONCLUSION	90
	CONCLUSION GÉNÉRALE	91

INTRODUCTION GENERALE :

Le développement croissant de l'industrie a poussé les recherches dans le domaine des semi conducteurs et en particulier dans le domaine de l'électronique de puissance. Les résultats de ces recherches sont très importants du point de vue industriel et économique vu que les performances des procédés sont nettement améliorées et le coût de fonctionnement des équipements est clairement diminuée, ce qui explique la grande utilisation des convertisseurs statiques dans l'industrie.

Malheureusement ces grands avantages ne manquent pas d'inconvénients ; le plus grand inconvénient est que les convertisseurs statiques sont des charges non linéaires qui absorbent l'énergie réactive et les courants non sinusoïdaux, ce qui est très mauvais pour le réseau électrique, car une dégradation de la qualité du courant et de la forme de tension sera une conséquence directe de l'utilisation de ces convertisseurs.

Actuellement, de nombreux compensateurs actifs sont proposés et étudiés, ils se distinguent par leur mode de connexion sur le réseau (série ou parallèle), par leur contrôle-commande (compensateurs générateur de courant ou générateur de tension) et par la structure électrotechnique de leur circuit de puissance (onduleur de tension ou de courant).

Dans notre travail, nous avons choisi d'étudier la combinaison parallèle-série utilisant un onduleur à deux niveaux qui est destiné au filtrage des courants harmoniques et la compensation de l'énergie réactive. Nous mettrons en évidence deux stratégies de commande, à savoir la commande triangulo-sinusoïdale symétrique, et la commande par hystérésis.

Ce mémoire est divisé en quatre chapitres :

Le premier chapitre sera consacré à la description des perturbations en courant et en tension pouvant intervenir dans un réseau électrique. Nous évoquerons la distribution harmonique avec ses principales sources telles que : les harmoniques de courants dus aux charges non linéaires, les conséquences et les normes inhérentes à ces perturbations seront

analysées. Dans ce chapitre, nous présenterons également les solutions traditionnelles et modernes de dépollution.

Dans le second chapitre, nous étudierons les méthodes d'identification des courants harmoniques et leurs applications à la détermination des courants harmoniques de référence que doit générer le filtre actif.

La méthode qu'on a utilisé est celle des puissances réelles et imaginaires instantanées. Nous passerons ensuite à la validation de cette dernière en vue d'un bon fonctionnement du filtre actif parallèle utilisé quelque soit la charge polluante raccordée au réseau.

Le troisième chapitre est réservé au filtre actif parallèle, il est partagé en trois parties essentielles : dans la première partie on modélisera le filtre actif parallèle, dans la deuxième partie nous aborderons les deux types de commandes utilisées : la commande par hystérésis et la commande MLI triangulo-sinusoïdal ; on terminera ce chapitre par les différents résultats de simulation avec et sans compensation de l'énergie réactive.

Dans le quatrième chapitre, on abordera la combinaison parallèle-série dite aussi « UPFC », on modélisera l'UPFC dans une première partie ensuite le redresseur MLI dans la seconde partie, et on terminera également le chapitre par les résultats de simulation.

Une conclusion générale clôturera ce mémoire.

CHAPITRE I :

LES PERTURBATIONS HARMONIQUES DANS LES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES ET LES SOLUTIONS DE DEPOLLUTION

I.1. INTRODUCTION :

Les réseaux de distribution modernes doivent faire face aux nouveaux défis et aux nouvelles opportunités d'un système électrique en pleine évolution technologique, du point de vue technique, le principal changement pour le réseau concerne la nature des charges connectées ; d'une part les charges passives classiques ont subi une évolution très importante et d'autre part de nouvelles charges actives ont été connectées au réseau. [ETX-03]. Plusieurs types de ces nouvelles charges engendrent des perturbations importantes dans le réseau électrique ; ces perturbations peuvent être classées sur deux catégories, qui sont:

- Des perturbations causées par les courants perturbateurs, tel que les courants harmoniques, les courants déséquilibrés et les courants réactifs.
- Des perturbations causées par les tensions perturbatrices, telle que les tensions harmoniques et les tensions déséquilibrées

Ce premier chapitre comporte trois parties ; dans la première partie on cite les différentes origines des harmoniques dans le réseau électrique, ainsi, l'étude des caractéristiques des harmoniques et la présentation des normes internationale définissent les limites imposées par la CEI.

La seconde partie est réservée à l'étude de l'influence des harmoniques sur les composantes passives et actives du réseau.

On termine ce chapitre en présentant les différentes solutions de dépollution possibles.

I.2 LES PERTURBATIONS HARMONIQUES DANS LES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES

I.2.1 Les principaux origines des harmoniques et interharmoniques :

Les harmoniques sont une superposition sur l'onde fondamentale à 50 Hz, d'ondes également sinusoïdales mais de fréquences multiples entier de celle du fondamental.

La principale source de la présence des harmoniques dans les réseaux électriques est l'utilisation de plus en plus croissante d'équipements de l'électronique de puissance a base de thyristors.

Les interharmoniques sont superposés a l'onde fondamentale mais ne sont pas des multiples entier de la fréquence du réseau. L'apparition des interharmoniques est en augmentation et leurs origines principales sont les convertisseurs de fréquence, les variateurs de vitesse et d'autres équipements similaires de contrôle - commande.

Les harmoniques sont générées par des charges non linéaires absorbant un courant non sinusoïdal. Actuellement, les équipements à base de thyristors constituent la principale source de ces harmoniques. Ces appareils, dont les caractéristiques électriques varient avec la valeur

**CHAPITRE I : LES PERTURBATIONS HARMONIQUES DANS LES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES
ET LES SOLUTIONS DE DEPOLLUTION**

de la tension, sont assimilables à des générateurs de courants harmoniques : appareils d'éclairage fluorescent, variateurs de vitesse, redresseurs, téléviseurs, ordinateurs, etc.

[OUL-05]

Le tableau I.1 montre quelques exemples de charges non linéaires fréquemment utiliser dans le réseau électrique

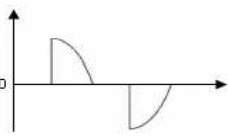
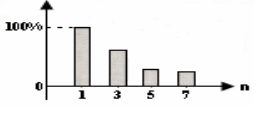

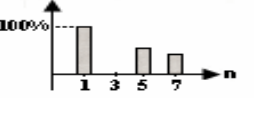
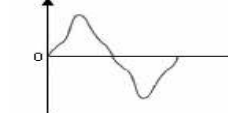
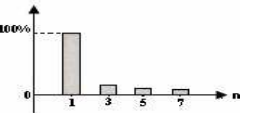
Type de charge	Appareils concernés	Courant absorbé	Spectre harmonique correspondant
Gradateur monophasé (commande par angle de phase)	Régulation de puissance de four à résistance Modulation de puissance des lampes halogènes		
Redresseur triphasé à thyristor	Variateur de vitesse des moteurs à courant continu et des moteurs synchrones		
Moteur asynchrone	Machines-outils Appareils électroménagers Ascenseurs.		

Tableau I.1 Exemples de charges polluantes. [KET-05]

I.2.2 Caractérisations des harmoniques :

Les harmoniques dans le réseau électrique peuvent être caractériser par différents grandeurs, parmi ces grandeurs on cite les plus important et les plus utiliser.

Le facteur de distorsion harmonique THD

Le facteur de distorsion harmonique noté **THD** est établi pour donner une idée sur l'amplitude de la perturbation harmonique ; il est donné par l'expression suivante :

$$\text{THD} = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \left(\frac{V_h}{V_1} \right)^2} \quad (\text{I.1})$$

V_1 : Valeur efficace de la tension fondamentale.

V_h : Valeur efficace de la tension harmonique du rang h

Ou encore par :

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

I_1 : Valeur efficace du courant fondamental.

I_h : Valeur efficace du courant harmonique du rang h

➤ **Le facteur de distorsion :**

Le facteur de distorsion noté **Fdis** donné par l'équation (I.2) nous renseigne sur la puissance déformante engendrée par les harmoniques, voir l'équation (I.3).[KET-05]

$$F_{\text{dis}} = \frac{I_{C1}}{I_C} \quad (\text{I.2})$$

I_{C1} : La valeur efficace du courant fondamental de charge.

I_C : La valeur efficace du courant de charge.

$$D = S \cdot [1 - (F_{\text{dis}})^2] \quad (\text{I.3})$$

D : Puissance déformante.

S : Puissance apparente.

Le facteur de distorsion F_{dis} vaut 1 lorsque le courant est parfaitement sinusoïdal et il décroît lorsque la déformation de l'onde s'accroît. [OUL-05]

➤ **Le facteur de puissance :**

La présence des harmoniques dans le réseau électrique inclut la notion de puissance déformante **D**, d'où la puissance apparente **S** sera exprimée sous la formule suivante :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad \text{(I.4)}$$

P : Puissance active.

Q : Puissance réactive.

Le facteur de puissance **F_p** est exprimé à l'aide de l'expression suivante :

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

Le facteur de puissance sera toujours inférieur à 1.

I.2.3 Réglementation :

Afin de limiter les perturbations et les dysfonctionnements causés par la présence des harmoniques dans le réseau électrique, la Commission Electrotechnique Internationale (**CEI**) a défini les niveaux des tensions et des courants harmoniques à ne pas dépasser par une série de norme de compatibilité électromagnétique CEI 61000

On cite par titre d'exemple les deux normes suivantes :

➤ **La norme CEI 61000-2-2 :**

Elle définit les niveaux de compatibilité de tensions harmoniques sur les réseaux publics basse tension. Elle est représentée sur le tableau I.2. Cette norme vise à protéger les équipements raccordés sur un réseau basse tension déformé.

Rangs impairs		Rangs impairs		Rangs pairs	
Rang	Taux (%)	Rang	Taux (%)	Rang	Taux (%)
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.3	6	0.5
13	3	21	0.2	8	0.5
17	2	>21	0.2	10	0.5
19	1.5			12	0.2
23	1.5			>12	0.2
25	1.5				
>25	$0.2+1.3 \times 25/h$				

Tableau I.2 : Niveaux de compatibilité pour les tensions harmoniques individuelles sur les réseaux publics basse tension (norme CEI 61000-2-2). [OUL-05]

➤ **La norme CEI 61000-3-2 :**

Cette norme représentée sur le tableau I.3 fixe la limitation des courants injectés dans le réseau public pour des équipements dont le courant par phase est inférieur à 16 A. Il s'agit des appareils du domaine domestique.

Harmoniques paires		Harmoniques impaires	
Rang harmonique	Courant harmonique maximal autorisé (A)	Rang harmonique	Courant harmonique maximal autorisé (A)
2	1.08	3	2.3
4	0.43	5	1.14
6	0.3	7	0.77
$8 \leq h \leq 40$	$0.23 \times 8/h$	9	0.40
		11	0.33
		13	0.21
		$15 \leq h \leq 39$	$0.15 \times 15/h$

Tableau **I.3** : Limite des composantes harmoniques en courant (norme CEI 61000-3-2)
[OUL-05]

Les normes citées sont obligatoires mais reste incomplètes et ne permettent pas de garantir totalement la compatibilité électromagnétique sur les réseaux publics.

C'est la raison pour laquelle EDF (en France) émet quelques recommandations concernant le raccordement des utilisateurs sur le réseau. Les limitations en tension harmonique que doivent respecter les clients d'EDF sont :

- Pour chaque rang pair, la tension harmonique est limitée à 0.6%,
- Pour chaque rang impair, la tension harmonique est limitée à 1%,
- Limitation du THD à 1.6%.

[ALA-02], [KET-05], [OUL-05].

I.3. EFFETS DES HARMONIQUES SUR LE RESEAU ELECTRIQUE:

I.3.1 Généralités : [ALA-02], [FET-06], [OUL-05].

Leurs effets sont liés à l'augmentation des valeurs crêtes (claquage diélectrique) et efficaces (échauffement supplémentaire) et au spectre en fréquence (vibration et fatigue mécanique) des tensions et des courants.

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

On peut classer ces effets en trois catégories, sont :

- **Les effets sur l'aspect économique :**
 - Une dégradation du rendement énergétique de l'installation (pertes d'énergie) ;
 - Un surdimensionnement des équipements ;
 - Une perte de productivité (vieillesse accéléré des équipements, déclenchements intempestifs) ;
 - L'influence sur les transformateurs du réseau (augmentation des pertes à vide à cause de l'effet particulier des courants harmoniques) ;
 - L'influence sur les câbles de HT (diminuent la durée de vie du câble, dégradation du matériel isolant).
 - Pertes supplémentaires dans les condensateurs, les transformateurs, ...;
 - Bruit additionnel des moteurs et d'autres appareils;

- L'influence sur le fonctionnement des redresseurs;
 - L'influence sur la télécommande dans les réseaux;
 - L'influence sur les condensateurs des réseaux.
- **Effets instantanés ou à court terme:**
- Déclenchements intempestifs des protections ;
 - Perturbations induites des systèmes à courants faibles (télécommande, télécommunication, écran d'ordinateur, téléviseur...);
 - Vibrations et bruits acoustiques anormaux (tableaux BT, moteurs, transformateurs);
 - Destruction par surcharge thermique de condensateurs;
 - Perte de précision des appareils de mesure.
- **Effets à long terme:**
- Une surcharge en courant provoque des échauffements supplémentaires donc un vieillissement prématuré des équipements ;
 - Echauffement des sources : transformateurs, alternateurs (par augmentation des pertes Joule, des pertes fer.....);
 - Fatigue mécanique (couples pulsatoires dans les machines asynchrones.....);
 - Echauffement des récepteurs : des conducteurs de phases et du neutre par augmentation des pertes Joule et diélectriques;
 - Destruction de matériels (condensateurs, disjoncteurs...);
 - Rayonnement électromagnétique perturbant les écrans (micro-ordinateurs, appareils de laboratoire.....).

Le tableau **I.4** résume les effets des harmoniques sur les différents dispositifs utilisés dans le réseau électrique.

Matériel	Effets
Condensateurs de puissance	Echauffement, vieillissement prématuré (claquage), résonance.
Moteurs	Pertes et échauffements supplémentaires. Réduction des possibilités d'utilisation à pleine charge. Couple pulsatoire (vibrations, fatigue mécanique). Nuisances sonores.
Transformateurs	Pertes (ohmique-fer) et échauffements supplémentaires. Vibrations mécaniques. Nuisances sonores.
Disjoncteurs	Déclenchements intempestifs (dépassements des valeurs crêtes de la tension...).
Câbles	Pertes diélectriques et ohmiques supplémentaires (particulièrement dans le neutre en cas de présence d'harmonique 3).
Ordinateurs	Troubles fonctionnelles.
Electronique de Puissance	Troubles liées à la forme d'onde (commutation, synchronisation).

Tableau. I.4: Effets des harmoniques [FET-06].

I.3.2 Effet des harmoniques sur les machines tournantes : [BON-00]

Les machines synchrones ou asynchrones, même alimentées par des courants parfaitement sinusoïdaux, sont elles-mêmes génératrices d'harmoniques ; à cause de la saturation du circuit magnétique, la répartition spatiale du flux tournant dans l'entrefer qui n'est pas rigoureusement sinusoïdale et les enroulements qui ne sont pas répartis tout au long des armatures mais logés dans des encoches.

➤ **Machines synchrones :**

Les courants harmoniques les plus importants circulant au stator d'une machine triphasée peuvent être groupés par paires :

5 et 7, 11 et 13, et plus généralement $6k-1$ et $6k+1$.

Si on suppose la machine bipolaire, le rotor tourne dans le sens direct à la vitesse ω , égale à la pulsation $2\pi f$ du fondamental des courants.

Les harmoniques de rang $6k-1$ créent un flux tournant dans le sens inverse à la vitesse $(6k-1)\omega$, donc à la vitesse $6k\omega$ par rapport au rotor et en sens inverse de celui-ci.

Les harmoniques de rang $6k+1$ créent un flux tournant dans le sens direct à la vitesse $(6k+1)\omega$, donc à la vitesse $6k\omega$ par rapport au rotor et dans le même sens que celui-ci.

Ces flux tournants créent dans le rotor des courants de fréquence $6kf$

La composition du champ direct de vitesse $6k\omega$ dans un sens avec un champ inverse de vitesse $6k\omega$ en sens inverse correspond à un champ elliptique, les axes de l'ellipse étant fixes par rapport au rotor.

Ce champ tournant elliptique est voisin de celui créé par un bobinage monophasé ; s'il est important on a des effets du même que ceux dus à l'interaction d'une armature monophasée avec une armature triphasée.

Dans le cas où la machine synchrone ne possède pas d'amortisseur, des courants de fréquence $6kf$ induits au rotor circulent dans le fer de celui-ci et dans les bobines inductrices, afin de compenser la variation de flux qui leur a donné naissance ; la résistance des circuits rotoriques empruntés par ces courants de fréquence $6kf$ étant relativement élevée, on constate une augmentation des pertes rotoriques et des échauffements supplémentaires par rapport au cas où les courants statoriques sont sinusoïdaux.

Si la machine est munie d'amortisseurs, c'est dans ceux-ci que se développe l'essentiel des courants de fréquence $6kf$.

En ce qui concerne les moteurs, on doit éviter les alimentations dont le taux d'harmoniques de tension dépasse 10%. Au delà, le rendement de la machine est fortement affecté, par ailleurs les harmoniques peuvent engendrer des bruits et des vibrations inacceptables.

➤ **Machines asynchrones :**

Le passage dans les enroulements statoriques du moteur asynchrone des courants harmoniques crée des couples moteurs s'il s'agit de systèmes directs (3k+1) ou des couples antagonistes s'il s'agit de systèmes inverses (3k-1). Mais ces couples sont d'ordinaire négligeables devant le couple dû au fondamental et même devant les couples parasites du moteur lui-même.

L'impédance permettant le passage d'une tension harmonique au courant correspondant diffère peu du produit de la réactance du moteur au démarrage par le rang d'harmonique.

A cause des harmoniques ce courant devient :

$$I \cong I_n \sqrt{1 + \sum_{h=2}^{\infty} \left(\frac{U_h}{hU_n}\right)^2} \quad (\text{I.6})$$

U_n : Tension nominale.

U_h : Valeur de l'harmonique h de tension.

I_n : Courant statorique nominal.

Les pertes Joule au stator augmentent sensiblement comme $(I / I_n)^2$.

Les pertes Joule au rotor sont plus affectées par les harmoniques que celles au stator car la résistance du rotor croît rapidement en fonction de la fréquence des courants qui y sont induits.

Aussi la norme CEI 892, qui définit les limites à respecter pour les moteurs asynchrones, utilise le taux d'harmoniques pondéré défini par :

$$TDH_M = \frac{1}{U_1} \left(\sum_{h=2}^{13} \frac{U_h^2}{h} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{I.7})$$

Pour les moteurs ordinaires, ce taux doit être inférieur à 2%.

Une règle pratique consiste, comme les moteurs synchrones, à ne pas dépasser un taux d'harmoniques en tension de 10% pour l'alimentation du moteur asynchrone.

I.3.3 Effet des harmoniques sur les composants passifs du réseau : [BON-00]

➤ Transformateur de puissance :

Dans un transformateur la présence d'harmoniques produit trois types d'effets :

A-Augmentation des pertes :

Les pertes dans le fer sont accrues du fait des harmoniques de la tension

- Augmentation des pertes par courants de Foucault par les courants supplémentaires induits dans les tôles.
- Augmentation des pertes par hystérésis par des cycles d'hystérésis secondaires.

Les pertes Joules dans les enroulements sont elles aussi accrues car la valeur efficace des courants est supérieur à celle de leur seul fondamental.

B-Augmentation du bruit :

Les courants harmoniques peuvent générer des forces électrodynamiques venant exciter des fréquences propres de la structure mécanique que constitue l'ensemble du transformateur ; les vibrations dues à de telles résonances mécaniques se traduisent par une augmentation plus au moins importante du bruit acoustique. Celui-ci est l'indice d'une fatigue mécanique anormale.

C-Création de surtension interne :

Des surtensions peuvent apparaître au sein même du transformateur dans des cas très particuliers de fonctionnement des convertisseurs qu'il alimente. Elle sont dues à des harmoniques anormaux ou à des interharmoniques non ou mal filtrés à leur sortie des convertisseurs et pour qui le transformateur, avec ses inductances et capacités réparties, constitue un circuit bouchon de grande impédance.

➤ **Condensateur :**

Du fait même de l'importance de leur rôle dans la limitation de la propagation des harmoniques, les condensateurs peuvent être soumis à des contraintes importantes liées aux harmoniques :

- En dérivant les courants harmoniques, il augmente la valeur efficace qui les traverse,
- En produisant involontairement ou volontairement dans le cas de filtrage, des phénomènes de résonance, ils augmentent la tension à leurs bornes.

Or la durée de vie d'un condensateur dépend :

- Des contraintes en tension qui s'exercent sur le diélectrique.
- Des échauffements qui apparaissent tant au niveau du diélectrique que des traversées du courant.

Donc, il faut s'assurer :

- Que la tension crête qui apparaît aux bornes du condensateur du fait de la présence des harmoniques ne dépasse pas les limites prescrites par le constructeur.
- Que les pertes totales sont acceptables.
- Que la valeur efficace du courant n'est pas excessive, afin de ne pas produire un échauffement excessif des traversées et des connexions internes et, par là, de l'enceinte.

➤ **Câbles de puissance :**

Les courants harmoniques passant dans un câble augmentent la valeur efficace du courant, et par là les pertes et l'échauffement. Ces augmentations sont plus générales pour les câbles que pour les lignes aériennes à cause de l'isolant qui entoure les conducteurs et dont l'échauffement accélère le vieillissement.

I.4. SOLUTIONS DE DEPOLLUTION DES HARMONIQUES :

I.4.1 Solutions classiques :

I.4.1.1 Agir sur la structure de l'installation :

Il est souhaitable d'alimenter un grand pollueur par un transformateur à part, afin de le séparer d'un récepteur sensible. Face à un pollueur moyen il est préférable d'effectuer l'alimentation par des câbles distincts au lieu de les connecter en parallèle. Une distribution en étoile permet le découplage par les impédances naturelles et/ou additionnelles [OUL-05].

I.4.1.2 Augmentation de la puissance de court-circuit :

L'impédance de court-circuit en un point du réseau est inversement proportionnelle à la puissance de court-circuit disponible en ce point. Aussi l'impact des harmoniques sera d'autant plus réduit si la puissance de court-circuit est grande [KET-05].

I.4.1.3 Rééquilibrage des courants du réseau électrique :

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

Une autre solution est l'installation d'un compensateur passif composé d'inductance et de condensateur. **La Figure I.1** montre ce compensateur, appelé *montage de Steinmetz*. Ce montage permet de présenter à 50 Hz une impédance équilibrée. Cependant, le *montage de Steinmetz* provoque un fort déséquilibre pour des fréquences différentes de 50 Hz, avec des résonances qu'il faut éviter d'exciter à proximité d'un générateur d'harmoniques [ALA-02].

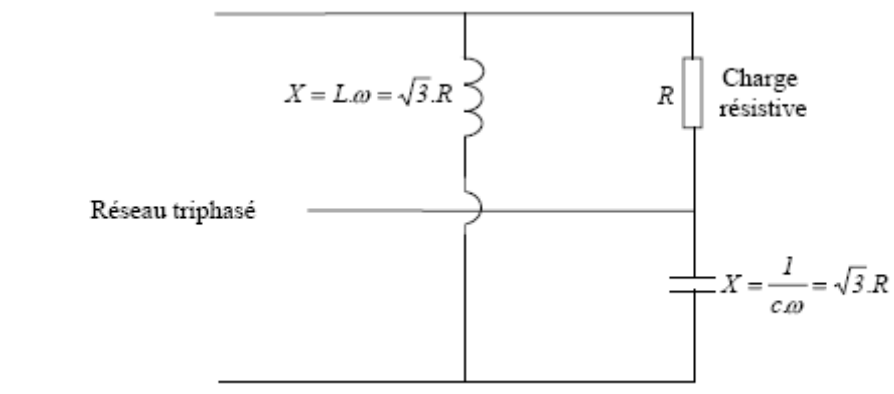


Fig.(I.1) : Montage de Steinmetz pour le rééquilibrage.

I.4.1.4 Surdimensionnement ou déclassement de l'installation électrique :

On procède généralement au surdimensionnement des équipements afin d'assurer leurs tenues aux surcharges harmoniques. Cette solution n'agit pas sur les harmoniques qui ne subissent aucune action curative de la part de l'utilisateur.

Par cette approche, les problèmes liés à la pollution harmoniques sont résolus pendant une durée limitée.

Le déclassement des équipements de distribution électrique soumis aux harmoniques est utilisé dans le cas des installations existantes. Cette méthode cause un surcoût de production et ne tire pas profit du potentiel réel de l'installation [OUL-05].

I.4.1.5 Compensation de la puissance réactive :

La puissance réactive est majoritairement consommée par les moteurs asynchrones et plus récemment par des dispositifs à base d'électronique de puissance. Différentes méthodes de compensation sont utilisées pour relever le facteur de puissance. La plus simple consiste à placer des batteries de condensateurs en parallèle avec le réseau. L'inconvénient de cette méthode réside dans le fait que la puissance réactive fournie par les condensateurs est constante et qu'elle ne s'adapte pas à l'évolution du besoin [ALA-02].

I.4.1 6 Filtrage passif :

Le principe du filtrage passif consiste à insérer en amont de la charge, un ou plusieurs circuits accordés sur les harmoniques à rejeter. Ainsi, pour filtrer un courant à une fréquence particulière, un filtre résonnant série est placé en parallèle sur le réseau. Cependant, ce type de filtre est très sélectif. Pour atténuer toute une bande de fréquences, un filtre passif amorti du second ordre est préférable. Le dimensionnement de ces filtres dépend des harmoniques à éliminer, des performances exigées, de la structure du réseau et de la nature des récepteurs. Par cette technique, il est en général plus aisé de rejeter les harmoniques de rang élevé que celles de rang faible.

Malgré sa large utilisation dans l'industrie, ce dispositif simple a tout de même certains inconvénients :

- Une connaissance approfondie de la configuration du réseau électrique est nécessaire,
- les variations de l'impédance du réseau peuvent détériorer les performances du filtre,
- le réseau peut former un système résonnant avec le filtre et les fréquences voisines de la fréquence de résonance sont amplifiées,
- équipements volumineux,

- inadaptabilité et perte d'efficacité lorsque les caractéristiques du réseau électrique évoluent. [OUL-05].

I.4.2 Nouvelles solutions de dépollution :

I.4.2.1 Pont dodécaphasé :

Deux redresseurs hexaphasés montés en série font composer ce pont, qui est le pont le plus utilisé (cas des puissances importantes). Donc, toujours dans le souci de repousser le premier harmonique présent sur un spectre pollué, l'association de deux ponts triphasés en série a été envisagée comme il est illustré sur le schéma de la figure (I.2) :

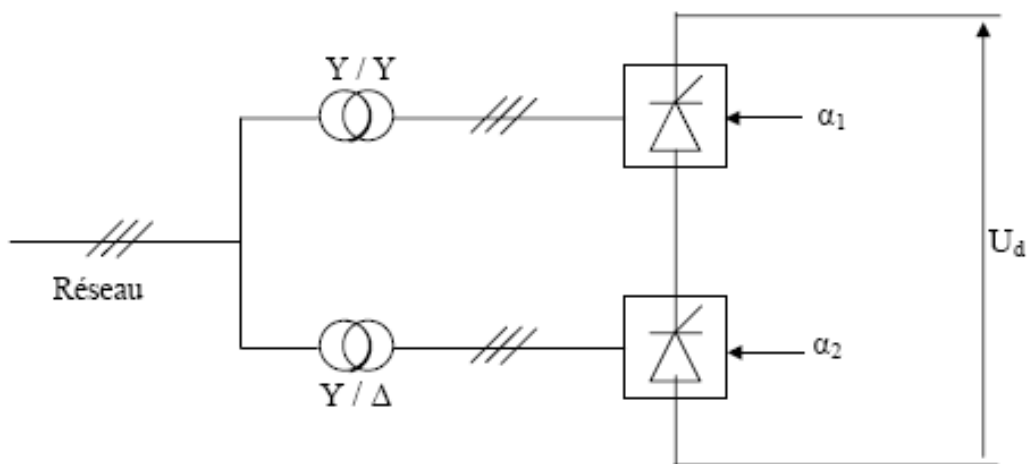


Fig. (I.2) : Pont dodécaphasé

L'utilisation d'un grand nombre de semi-conducteurs et de transformateurs à deux enroulements secondaires rendent cette solution onéreuse. Elle entraîne un coût supplémentaire et demande plus que le savoir faire habituel pour les mettre en oeuvre.

Ces solutions ne résolvent pas les problèmes causés par les charges polluantes qui existent sur le marché [KOU-06].

I.4.2.2 Les redresseurs à MLI :

Grâce à la stratégie de modulation de largeur d'impulsion, un convertisseur AC- DC à absorption sinusoïdale a été rendu possible. C'est une solution très efficace, cependant elle doit être généralisée, ce qui n'est pas le cas malheureusement de nos jours. Dans le cas monophasé, la structure la plus répandue est une mise en parallèle d'un pont redresseur monophasé à diode et d'un hacheur, tandis que dans le cas triphasé, c'est la structure en pont triphasé à base de GTO ou IGBT qui est la plus répandue. Cette solution permet de réduire les harmoniques produits par les convertisseurs AC- DC et il ne peut agir sur les harmoniques créés par d'autres sortes de charges polluantes. [KET-05].

I.4.3 Filtres actifs :

Les progrès réalisés durant ces dernières années dans le domaine des composants semi-conducteurs commandés ont rendu l'utilisation des filtres actifs intéressante. Ce sont aussi des convertisseurs à commutation forcée, utilisés pour la dépollution harmonique des réseaux.

Cette pollution a pour origine deux sources. Les harmoniques provenant du côté charge qui se comporte comme des sources de courant harmonique i_{dh} et ceux provenant du côté réseau qui sont des sources de tension harmonique V_{rh} .

La **figure (I.3)** schématise cette configuration. La première concerne des charges non linéaires placées en aval du point de raccordement considéré et la seconde résulte des charges non- linéaires connectées en amont sur d'autres départs du réseau.

Selon différentes conditions et différents objectifs, plusieurs approches du filtrage sont envisageables :

- Dépolluer une source polluée pour alimenter une charge sensible.
- Dépolluer une charge polluante pour protéger les autres utilisateurs du réseau.
- Réaliser simultanément ces deux types de dépollution.

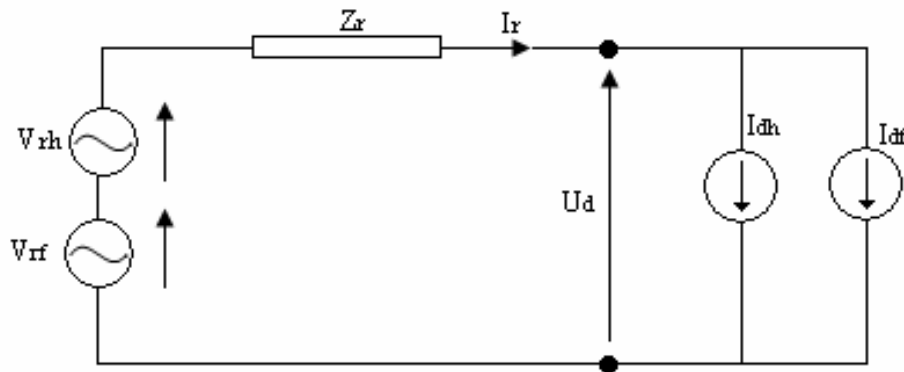


Fig. (I.3) : Sources d'harmoniques de tension et de courant

Une commande adéquate d'un onduleur permet d'opérer comme un filtre actif. En effet, en générant des courants ou des tensions harmoniques, le filtre actif peut être utilisé pour la dépollution du réseau. Il peut être connecté au réseau en série ou en parallèle selon qu'il compense les tensions ou les courants harmoniques.

I.4.3.1 Filtre actif parallèle (F.A.P) :

Le filtre actif connecté en parallèle sur le réseau, comme le montre la **figure (I.4)**, est le plus souvent commandé comme un générateur de courant. Il injecte dans le réseau des courants perturbateurs égaux à ceux absorbés par la charge polluante, mais en opposition de phase avec ceux-ci. Le courant côté réseau est alors sinusoïdal. Ainsi, l'objectif du filtre actif parallèle (F.A.P) consiste à empêcher les courants perturbateurs (harmoniques et réactifs) produits par des charges polluantes, de circuler à travers l'impédance du réseau, située en amont du point de connexion du filtre actif.

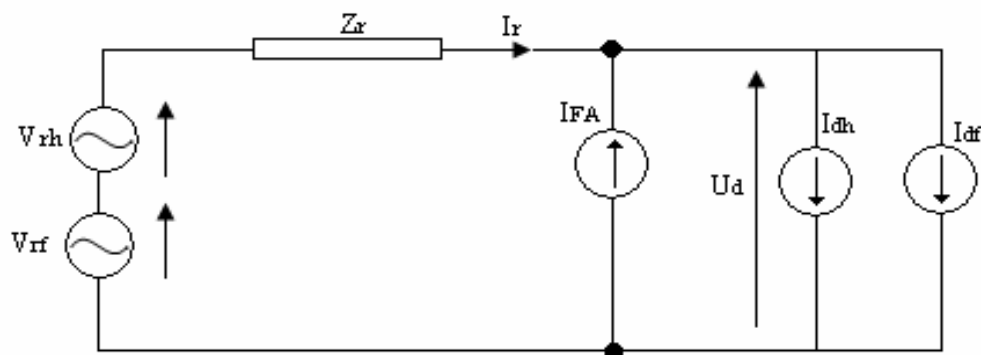


Fig. (I.4) : Filtre actif parallèle

Le filtre actif parallèle peut en même temps compenser le courant réactif mais avec un dimensionnement plus important. Il peut être utilisé suivant deux modes de fonctionnement :

➤ **Filtre dédié :**

Si les harmoniques à filtrer sont connus à priori, la commande du filtre actif est dédiée. L'exemple type est la suppression des premiers harmoniques du courant absorbé par un redresseur alimentant une charge fortement inductive. Dans ce cas, les harmoniques peuvent être approximativement estimés à partir de l'amplitude et la phase du courant fondamental.

➤ **Filtre adaptatif :**

Ce filtre est capable d'identifier par lui-même les harmoniques et de s'adapter automatiquement à leurs éventuelles harmoniques en opposition de phase.

Cette nouvelle solution plus performante est en cours d'étude et dans certains cas, au stade industriel grâce notamment à l'apport de l'évolution des techniques de commande et de mise en œuvre des semi-conducteurs de puissance.

I.4.3.2 Filtre actif série (F.A.S) :

Dans cette configuration, le filtre est placé en série sur le réseau. Ainsi, il compense la tension au point de connexion de la charge. La **figure (I.5)** illustre le cas où le filtre actif est destiné à isoler les installations sensibles des perturbations provenant du réseau telles que les harmoniques et les surtensions.

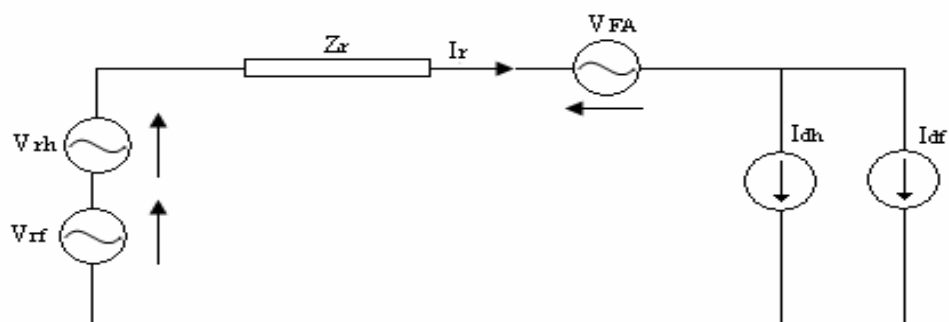


Fig. (I.5) : Principe de compensation des tensions harmoniques provenant du réseau

La tension aux bornes de la charge est sinusoïdale, mais ce qui n'est pas le cas du courant dans la source, car cette dernière est traversée par la totalité du courant de charge.

I.4.3.3 Combinaison parallèle-série actifs (UPFC) ou (UPQC) :

La 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.6)**. 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.

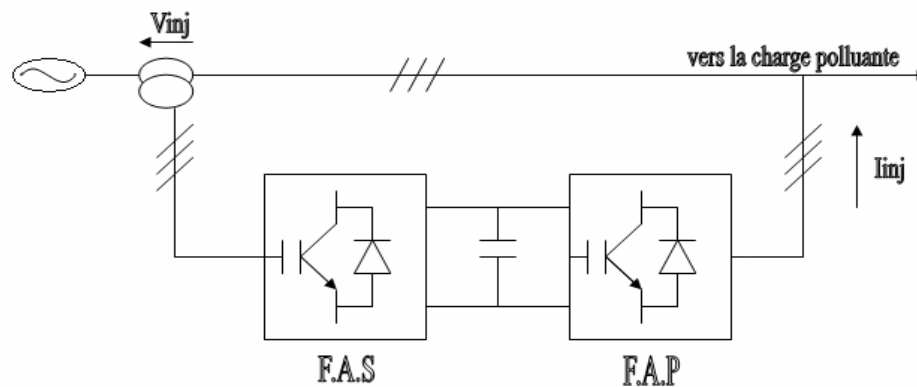


Fig. (I.6) : Combinaison parallèle-série actifs (UPQC)

I.4.3.4 Combinaison hybride de filtres actifs et passifs :

Afin de réduire le dimensionnement et par conséquent, le prix des filtres actifs, l'association de filtres actifs de faible puissance à des filtres passifs peut être une solution. Dans ce cas, les filtres passifs ont pour rôle d'éliminer les harmoniques prépondérants permettant de réduire le dimensionnement des filtres actifs qui ne compensent que le reste des perturbations.

Plusieurs configurations ont été présentées dans la littérature, les plus étudiées étant :

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

➤ **Filtre actif série avec des filtres passifs parallèles :**

Le rôle du filtre actif série dans ce cas, est d'empêcher les courants harmoniques de circuler vers le réseau et de les obliger à passer par les filtres passifs raccordés à leurs fréquences comme le montre la **figure (I.7)**.

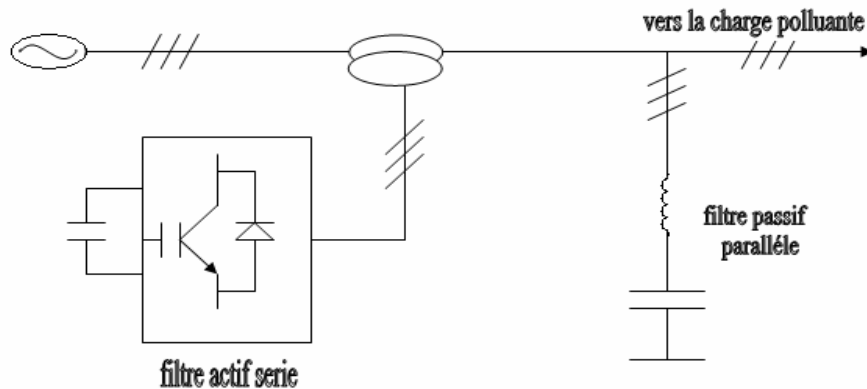


Fig. (I.7) : Filtre actif série et filtre passif parallèle

➤ **Filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles :**

Le principe de fonctionnement de cette configuration, présentée en **figure (I.8)**, est la même que la précédente avec l'avantage de réduire encore le dimensionnement du filtre actif série car le courant qui le traverse est plus faible. De plus, le filtre actif série est à l'abri d'un éventuel court-circuit de la charge.

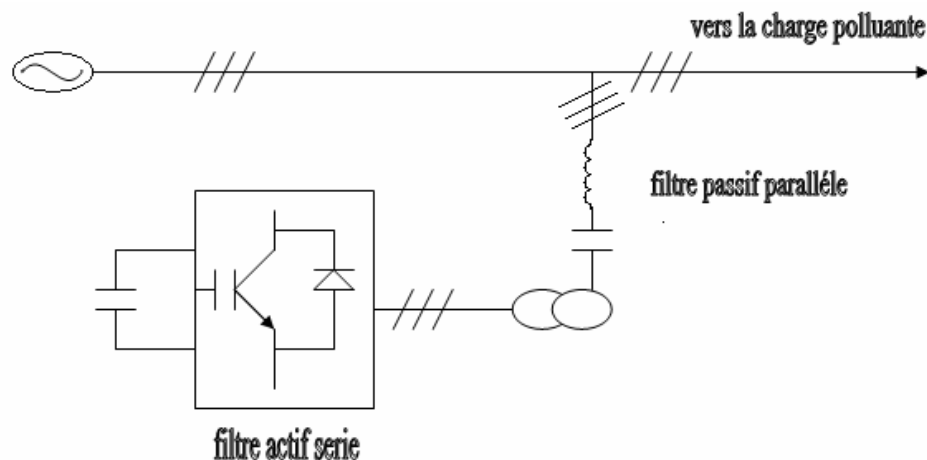


Fig. (I.8) : Filtre actif série connecté en série avec un filtre passif parallèle

➤ **Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle :**

Le rôle du filtre actif parallèle dans cette configuration, montrée en **figure (I.9)**, est la compensation des courants harmoniques basses fréquences émis par la charge polluante. Le filtre passif accordé sur une fréquence élevée, élimine les harmoniques hautes fréquences, y compris ceux créés par le filtre actif parallèle. Ce type de filtrage a déjà été appliqué à la compensation des courants harmoniques émis par un cyclo-convertisseur de forte puissance.

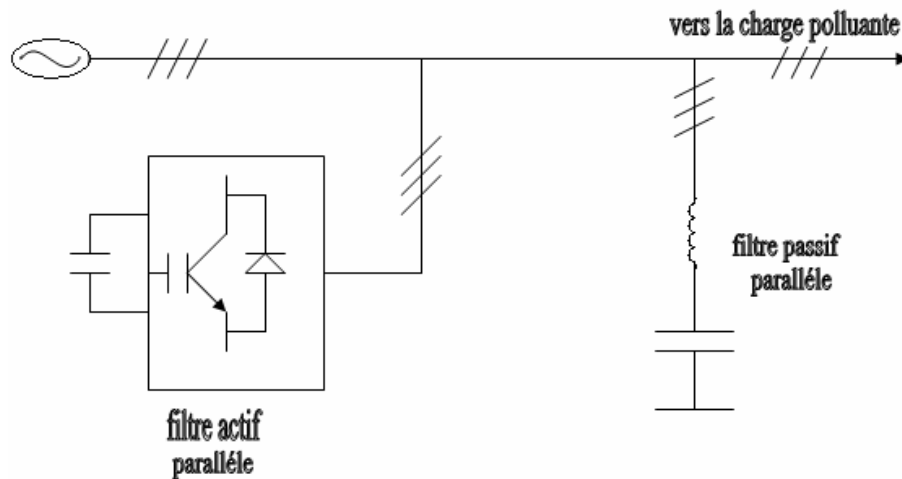


Fig. (I.9) : Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle

I.5 CONCLUSION :

Les charges dites non-linéaire, engendrent dans le réseau de distribution, des courants non-sinusoïdaux provoquant des perturbations envahissant ce dernier. Ces perturbations se répercutent sur la qualité de l'énergie électrique et sur le bon fonctionnement des installations.

Nous avons présenté les moyens actuels et à venir pour les réduire. Les solutions existantes, notamment les techniques de filtrage et compensation à base d'éléments passifs présentent de nombreuses contraintes. La solution la plus intéressante est l'utilisation du filtrage actif.

Dans le chapitre suivant, on présentera les méthodes d'identification des harmoniques en détaillant la méthode des puissances instantanées réelles et imaginaires qu'on a utilisé dans notre travail.

CHAPITRE II :

METHODES D'IDENTIFICATION DES COURANTS HARMONIQUES

II.1. INTRODUCTION :

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

- Identification à partir de la détection du courant de la charge polluante,
- identification à partir de la détection du courant de la source,
- identification à partir de la détection de la tension de la source. [ALA-02].

La première méthode est la plus appropriée au filtre actif parallèle installé par le consommateur pour compenser les courants perturbateurs causés par ses charges polluantes. C'est pourquoi cette méthode de détection sera employée dans ce travail.

II.2. METHODE DES PUISSANCES REELLE ET IMAGINAIRE INSTANTANEEES :

II.2.1 Principe de la méthode :

Cette théorie définit les puissances instantanée active et réactive par l'intermédiaire de la transformation de CONCORDIA, tel que :

- Les puissances instantanées actives et réactives sont définies par :

$$\begin{bmatrix} V_{s\alpha} \\ V_{s\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{res1} \\ V_{res2} \\ V_{res3} \end{bmatrix} \quad (II.1)$$

(V_{res1} , V_{res2} , V_{res3}) étant les tensions simples de notre système triphasé.

$$\begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{res1} \\ I_{res2} \\ I_{res3} \end{bmatrix} \quad (II.2)$$

(I_{res1} , I_{res2} , I_{res3}) étant les courants de ligne de notre système triphasé.

Les puissances réelle et imaginaire instantanées, respectivement p et q sont données par la relation suivante:

$$p(t) = V_{res1} \cdot I_{res1} + V_{res2} \cdot I_{res2} + V_{res3} \cdot I_{res3} = V_{s\alpha} \cdot I_{s\alpha} + V_{s\beta} \cdot I_{s\beta} \quad (II.3)$$

$$q(t) = -\frac{1}{\sqrt{3}} \left((V_{res1} - V_{res2}) \cdot i_{res3} + (V_{res2} - V_{res3}) \cdot i_{res1} + (V_{res3} - V_{res1}) \cdot i_{res2} \right) \quad (II.4)$$

$$q(t) = V_{s\alpha} \cdot I_{s\beta} - V_{s\beta} \cdot I_{s\alpha}$$

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & V_{s\alpha} \\ -V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix} \quad (II.5)$$

$$\begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{V_{s\alpha}^2 + V_{s\beta}^2} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (II.6)$$

Il est possible de séparer le courant dans le repère (α, β) en trois termes, actif, réactif à la fréquence fondamentale et la somme des harmoniques, tel que :

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{p} \\ 0 \end{bmatrix}}_{\text{CourantActif}} + \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{q} \end{bmatrix}}_{\text{CourantRéactif}} + \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix}}_{\text{CourantHarmonique}} \quad (II.7)$$

Avec :

$$\Delta = V_{s\alpha}^2 + V_{s\beta}^2 \quad (II.8)$$

Les deux puissances instantanées p et q se décomposent en deux parties réelle et imaginaire:

$$\begin{cases} p & = \bar{p} + \tilde{p} \\ q & = \bar{q} + \tilde{q} \end{cases}$$

\bar{p} et \bar{q} représentent les puissances continues instantanées active et réactive liée à la composante fondamentale du courant.

\tilde{p} et \tilde{q} représentent les puissances alternatives instantanées active et réactive liées à la somme des composantes harmoniques du courant.

Les courants triphasés de référence i_{crefn} , (n=1, 2,3) sont obtenus à partir des courants diphasés

$i_{c\alpha}$ et $i_{c\beta}$ par la transformation inverse de CONCORDIA, soit :

$$\begin{bmatrix} i_{cref\ 1} \\ i_{cref\ 2} \\ i_{cref\ 3} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{c\ \alpha} \\ i_{c\ \beta} \end{bmatrix} \quad (II.9)$$

II.2.2. Identification avec compensation de l'énergie réactive :

II.2.2.1 Principe :

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

Pour cela, il faut premièrement identifier le courant de charge pour pouvoir connaître le courant du filtre i_f qu'il faut ajouter pour avoir un courant délivré par la source sinusoïdale et en phase avec la tension [KET-05].

Le courant i_f que doit fournir le filtre doit être égal à la différence entre le courant d'entrée i_c de la charge polluante, et le courant sinusoïdal de réseaux i_{res} .

Le courant généré par le filtre doit être égal à la somme d'une composante harmonique i_{fh} , servant à dépolluer le réseau, autrement dit à éliminer les harmoniques, et une composante fondamentale réactive i_{ffr} qui va servir à compenser l'énergie réactive, c'est-à-dire rendre le facteur de puissance unitaire. Donc il faut déterminer le courant réactif i_{ffr} qui doit généré le filtre actif pour compenser l'énergie réactive.

Ainsi, le courant généré par le filtre s'écrit :

$$i_f = i_{ffr} + i_{fh} = i_c - i_{res} \quad (II.10)$$

II.2.2.2 Détermination de courant réactif i_{ffr} :

Pour la détermination de courant réactif on utilise le même algorithme d'identification utilisé précédemment :

D'après l'équation (II.7) le courant réactif est défini par :

$$\begin{bmatrix} i_{fr\alpha} \\ i_{fr\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \underbrace{\begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix}}_{\text{Courant Réactif}} \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{q} \end{bmatrix} \quad (II.11)$$

Avec :

$$\Delta = V_{s\alpha}^2 + V_{s\beta}^2 \quad (II.12)$$

On fait passer les courants de charge $i_{r\alpha}$ et $i_{r\beta}$ par la transformation inverse de Concordia, soit :

$$\begin{bmatrix} i_{fr1} \\ i_{fr2} \\ i_{fr3} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{fr\alpha} \\ i_{fr\beta} \end{bmatrix} \quad (II.13)$$

Pour neutraliser cette puissance réactive, on fait une addition entre le courant harmonique généré par la charge et le courant réactif désigné par i_{ffr} pour permettre d'avoir le courant de référence que doit générer le filtre actif afin d'obtenir un courant de source sinusoïdal et en phase avec sa tension.

Alors :

$$i_{fref} = i_{href} + i_{ffr} \quad (II.14)$$

i_{fref} : le courant de référence que doit générer le filtre actif.

i_{href} : le courant harmonique généré par la charge.

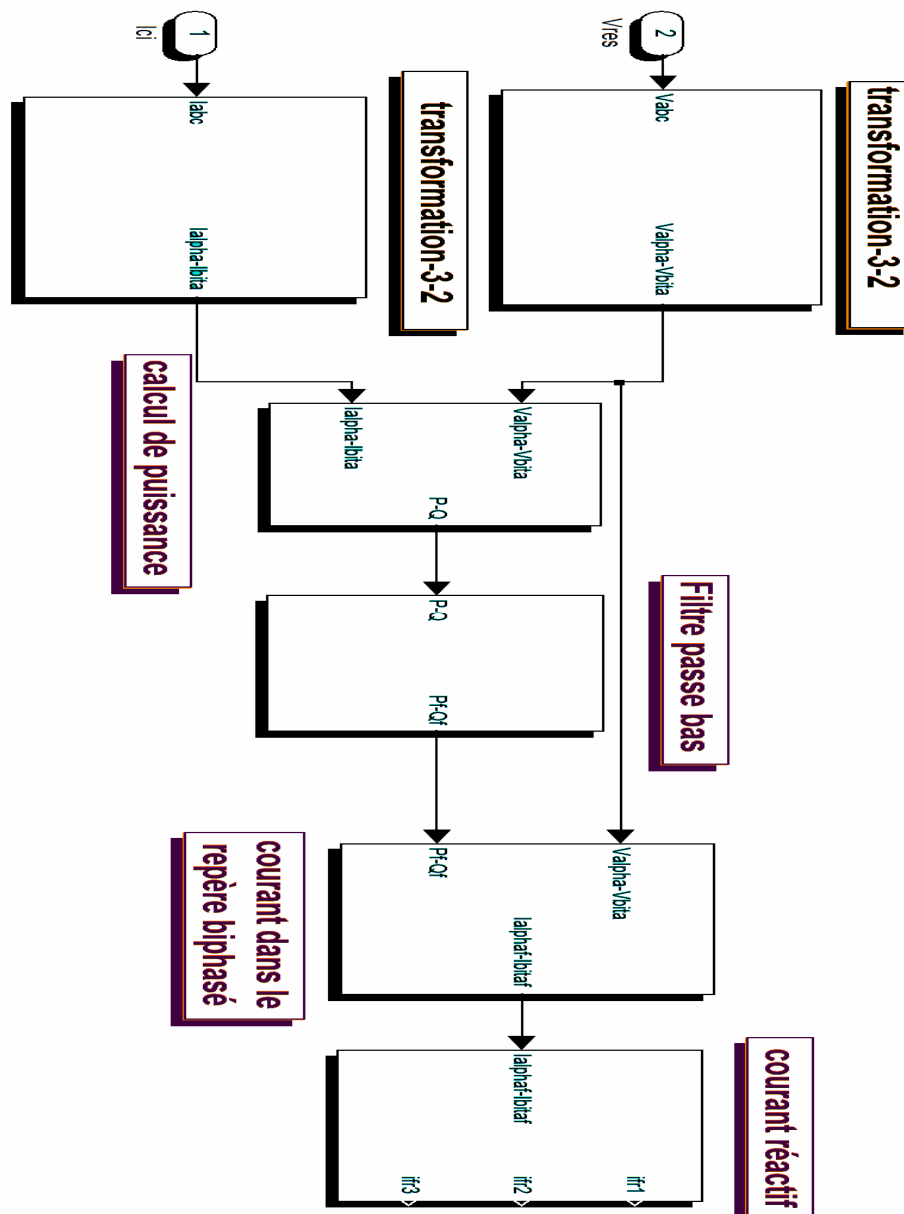
i_{ffr} : le courant réactif.

Une comparaison entre le courant réel du filtre actif i_f et le courant du filtre de référence i_{fref} , permet la détermination des commandes des interrupteurs.

Nous désignons par ε_k l'écart entre le courant de référence $\dot{\mathbf{i}}_{\text{fref}}$ et le courant réel de filtre $\dot{\mathbf{i}}_f$ tel que :

$$\varepsilon_k = \dot{\mathbf{i}}_{\text{fref}k} - \dot{\mathbf{i}}_{fk} \quad , k = \{1,2,3\} \quad (\text{II.15})$$

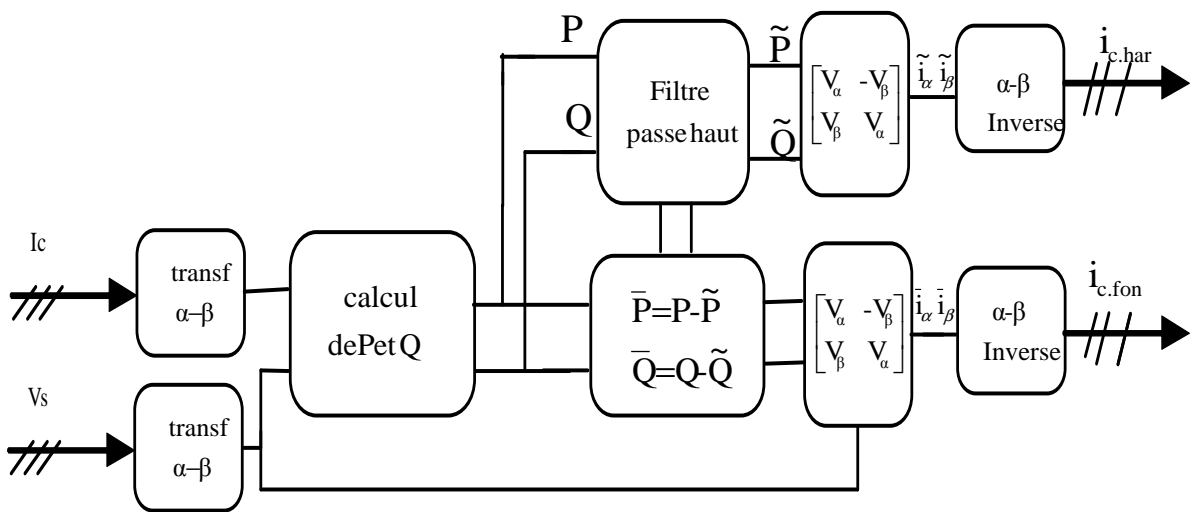
Le schéma de principe de la méthode de compensation de l'énergie réactive est le suivant :



(fig.II.1) : Modèle en simulink de calcul de courant réactive

II.2.3 Algorithme d'identification :

La (figure II.2) présente l'algorithme général du filtrage harmonique en utilisant la transformation $\alpha - \beta$. 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.

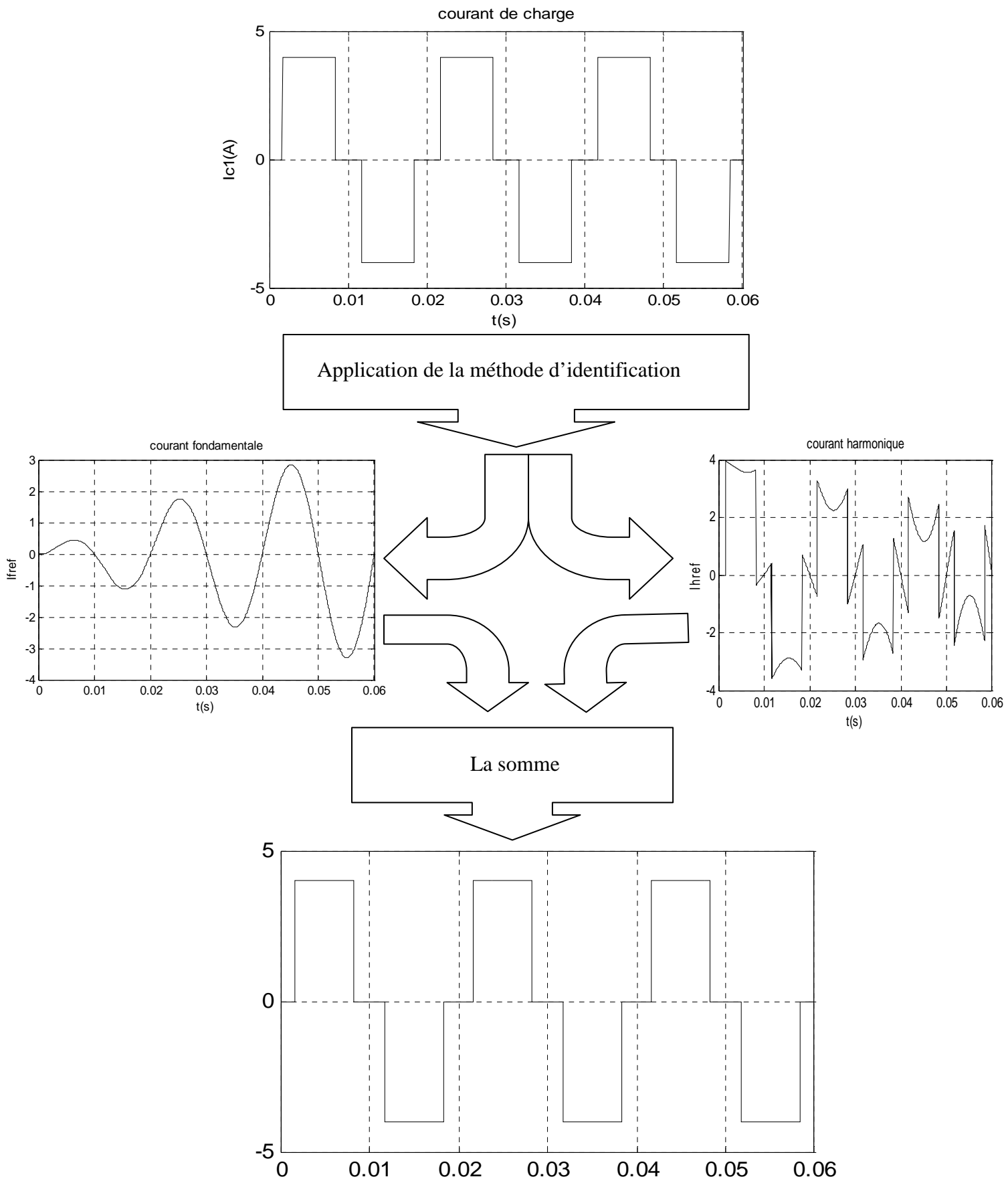


(fig.II.2) : algorithme d'identification des harmoniques.

II.2.4 Validation de la méthode d'identification des harmoniques :

Pour vérifier la validité de cette méthode d'identification des courants harmoniques, on prend des courants de charge triphasés quelconques i_{c1} , i_{c2} , i_{c3} .

Le courant i_{c1} est la somme d'une composante fondamentale i_{fond} et d'une composante harmonique. En appliquant la méthode directe à ce courant, et en suivant l'enchaînement proposé dans la (figure II.3), on aboutit alors à des résultats très satisfaisants.



(fig.II.3) : Vérification du fonctionnement de la méthode d'identification des courants harmoniques

II.3 AUTRES METHODES :

II.3.1 Méthode basée sur le principe du courant actif : [GHE-04]

Cette méthode est basée sur la décomposition de la puissance absorbée par une charge non linéaire en puissance active, réactive et déformante.

II.3.1.1 Correspondance entre courants et puissances :

Le courant total de la charge polluante i_c peut être subdivisé en deux parties : le courant actif et le courant non actif.

La puissance active p résulte du courant actif noté i_{cak} qui est proportionnel à la tension v_{sk} si celle-ci n'est pas déformée. On peut écrire :

$$i_{cak} = \frac{P}{3 \sum_{k=1} V_{sk}^2} \cdot v_{sk} = G \cdot v_{sk} \tag{II.16}$$

V_{sk} : tensions d'alimentation.

Où G est la conductance équivalente par phase de la charge.

Le courant non actif noté i_{cnk} est obtenu par la soustraction de i_{cak} du courant total, soit :

$$i_{cnk} = i_c - i_{cak} \tag{II.17}$$

Le courant non actif se décompose en parties réactive et déformante. Le courant réactif, en phase avec la tension en quadrature v'_{sk} , s'obtient, à partir de la puissance réactive, par l'expression suivante :

$$i_{crk} = \frac{Q}{3 \sum_{k=1} v_{sk}^2} \cdot v'_{sk} = Y \cdot v'_{sk} \tag{II.18}$$

Où Y est la susceptance équivalente par phase de la charge.

La composante déformante qui représente la somme de tous les courants harmoniques $i_{ck,h}$ s'obtient en retranchant les courants actifs et réactifs du courant total. Nous avons alors :

$$\sum_{h=2}^{\infty} i_{ck,h} = i_c - i_{cak} - i_{crk} \tag{II.19}$$

Ainsi chacune des trois composantes du courant absorbé par une charge non-linéaire ou déséquilibrée peut être calculée à partir de la connaissance de la tension au point de raccordement, supposée sinusoïdale, et du courant total.

II.3.1.2 Algorithme d'identification :

Cet algorithme permet d'obtenir, à partir de la mesure directe du courant de la charge polluante, les courants harmoniques que doit générer le compensateur actif.

On résume cet algorithme de la façon suivante :

- Les courants de la charge i_c ainsi que les tensions v_{ck} sont obtenus par mesure directe.
- En partant de la mesure des v_{sk} ($k=1,2,3$), on obtient les tensions en quadrature v'_{sk} par un circuit déphaseur.
- On obtient les puissances P et Q par intégration numérique ou en utilisant des filtres passe bas.

II.3.2 Méthode de puissance instantanées p-q étendue : [BRI-05]

La puissance active p et la puissance réactive q sont définies respectivement comme :

$$\begin{cases} p = V_{s1} \cdot i_1 + V_{s2} \cdot i_2 + V_{s3} \cdot i_3 \\ q = V'_{s1} \cdot i_1 + V'_{s2} \cdot i_2 + V'_{s3} \cdot i_3 \end{cases} \quad (II.20)$$

Où $(V'_{s1}, V'_{s2}, V'_{s3})$ est un système en quadrature retard sur (V_{s1}, V_{s2}, V_{s3}) respectivement de 90° :

Pour le cas d'un système triphasé à trois fils :

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0$$

L'expression des puissances instantanées p et q sera exprimée par :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{s1} - V_{s3} & V_{s2} - V_{s3} \\ V'_{s1} - V'_{s3} & V'_{s2} - V'_{s3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} \quad (II.21)$$

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta'} \begin{bmatrix} V'_{s2} - V'_{s3} & V_{s3} - V_{s2} \\ V'_{s3} - V'_{s1} & V_{s1} - V_{s3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (II.22)$$

$$\Delta' = (V_{s1} - V_{s3})(V'_{s2} - V'_{s3}) - (V'_{s1} - V'_{s3})(V_{s2} - V_{s3}) \quad (II.23)$$

Le courant de référence peut être calculé en utilisant les mêmes démarches de la méthode p-q :

$$\begin{bmatrix} i_{f1_ref} \\ i_{f2_ref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{C1} \\ i_{C2} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} i_{S1_ref} \\ i_{S2_ref} \end{bmatrix} \quad (\text{II.24})$$

$$\begin{bmatrix} i_{S1_ref} \\ i_{S2_ref} \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta'} \begin{bmatrix} V_2' - V_3' & V_3' - V_2' \\ V_3' - V_1' & V_1' - V_3' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_S \\ q_S \end{bmatrix} \quad (\text{II.25})$$

II.3.3 Méthodes des courants diphasés :

L'identification des composantes harmoniques se fait en général, soit dans l'espace des courants, soit dans l'espace des puissances. Contrairement aux méthodes basées sur la théorie des PIRI, la méthode des courants diphasés travaille dans l'espace des courants DQ. Elle requiert de ce fait moins de calcul tout en étant plus précise et plus robuste. [OUL-06] Considérons l'expression suivante, représentant les courants perturbés par des harmoniques dans un système électrique triphasé :

$$\begin{bmatrix} i_{L1} \\ i_{L2} \\ i_{L3} \end{bmatrix} = I_1 \begin{bmatrix} \cos(\omega t - \alpha_1) \\ \cos(\omega t - \alpha_1 - 2\pi/3) \\ \cos(\omega t - \alpha_1 + 2\pi/3) \end{bmatrix} + \sum_{n=2\dots N} I_n \begin{bmatrix} \cos(n\omega t - \alpha_n) \\ \cos(n\omega t - \alpha_n - 2\pi/3) \\ \cos(n\omega t - \alpha_n + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (\text{II.26})$$

La partie droite de l'expression (II.26) se décompose en deux termes. Le premier terme représente la fréquence fondamentale, alors que le second terme représente la somme des distorsions harmoniques.

Ces courants peuvent s'écrire dans l'espace $\alpha \beta$ à l'aide de la transformée de CONCORDIA exprimée par la matrice T_{32} :

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = T_{32}^T \begin{bmatrix} i_{L1} \\ i_{L2} \\ i_{L3} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{3}{2}} I_1 \begin{bmatrix} \cos(\omega t - \alpha_1) \\ \sin(\omega t - \alpha_1) \end{bmatrix} + \sum_{n=2\dots N} \sqrt{\frac{3}{2}} I_n \begin{bmatrix} \cos(n\omega t - \alpha_n) \\ \sin(n\omega t - \alpha_n) \end{bmatrix} \quad (\text{II.27})$$

En appliquant une transformation de Park avec un angle de $-\omega t$, les courants de (II.27) s'écrivent dans l'espace DQ avec i_D et i_Q comme indiqués ci-dessous :

$$\begin{bmatrix} i_D \\ i_Q \end{bmatrix} = P(-\omega t) \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{3}{2}} I_1 \begin{bmatrix} \cos(\alpha_1) \\ -\sin(\alpha_1) \end{bmatrix} + \sum_{n=2..N} \sqrt{\frac{3}{2}} I_n \begin{bmatrix} \cos(n\omega t - \alpha_n) \\ \sin(n\omega t - \alpha_n) \end{bmatrix} \quad (\text{II.28})$$

Chacun de ces courants peut être séparés en deux parties, une composante alternative et une composante continue, soit respectivement :

$$\begin{bmatrix} \bar{i}_D \\ \bar{i}_Q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{3}{2}} I_1 \begin{bmatrix} \cos(\alpha_1) \\ -\sin(\alpha_1) \end{bmatrix} \quad (\text{II.29})$$

$$\begin{bmatrix} \tilde{i}_D \\ \tilde{i}_Q \end{bmatrix} = \sum_{n=2..N} \sqrt{\frac{3}{2}} I_n \begin{bmatrix} \cos((n-1)\omega t - \alpha_n) \\ \sin(n\omega t - \alpha_n) \end{bmatrix} \quad (\text{II.30})$$

On peut voir que les composantes continues i_D et i_Q de (II.29) sont issues de la fréquence fondamentale. D'un autre côté, les composantes alternatives \tilde{i}_D et \tilde{i}_Q de (II.30) proviennent quand à elles des distorsions harmoniques.

L'objectif de la méthode revient à identifier les composantes continues et alternatives des courants DQ ou $\alpha \beta$ et la séparation peut se faire par un filtrage **[OUL-06]**.

Le calcul des courants de référence se fait en convertissant les courants donnés par (II.30) dans l'espace des courants triphasés en appliquant successivement les transformations inverses de Park et de CONCORDIA avec les matrices T_{32} et $P(\omega t)$. Les courants de référence résultants s'écrivent alors :

$$\begin{bmatrix} i_{ref1} \\ i_{ref2} \\ i_{ref3} \end{bmatrix} = T_{32} P(\omega t) \begin{bmatrix} \tilde{i}_D \\ \tilde{i}_Q \end{bmatrix}$$

II.4 CONCLUSION :

Dans ce chapitre, on a étudié une méthode d'identification des courants harmoniques et son application à la détermination des courants harmoniques de référence que doit générer le filtre actif. On a aussi présenté l'algorithme du filtrage actif avec compensation de l'énergie réactive.

On a cité en suite d'autres méthodes utilisées pour l'identification des courants harmoniques.

On peut conclure que la méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées est une méthode très simple à mettre en œuvre et conduit à de très bons résultats. Elle permet facilement, le passage d'un calcul des puissances active et réactive instantanées à la détermination des composantes harmoniques du courant de charge.

CHAPITRE III :
FILTRE ACTIF PARALLELE.
MODELISATION.
COMMANDE
ET SIMULATION

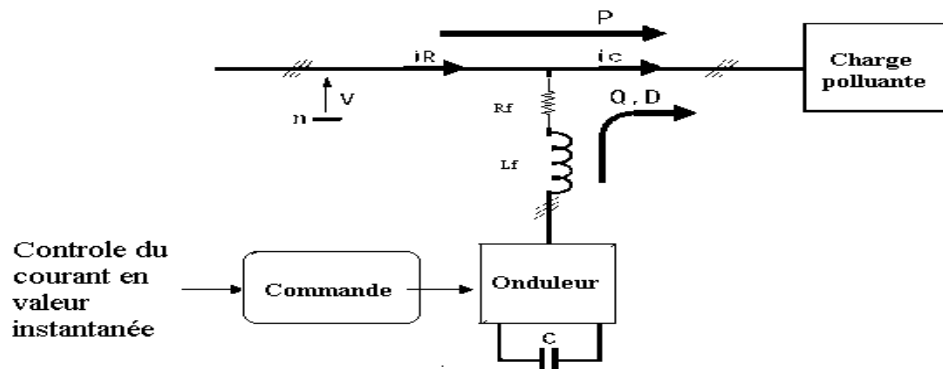
III.1 INTRODUCTION :

Vers la fin des années 60 plusieurs équipements utilisant l'électronique de puissance ont fait leurs apparitions. Ces derniers avaient l'avantage d'éliminer les parties mécaniques et d'avoir un temps de réponse très court. Ces équipements étaient constitués essentiellement d'une inductance en série avec un gradateur. Le retard à l'amorçage des thyristors permettait de régler l'énergie réactive absorbée par le dispositif. [GHO-03].

En effet tous les compensateurs parallèles injectent du courant au réseau via le point de raccordement. Quand une impédance variable est connectée en parallèle sur un réseau, elle consomme (ou injecte) un courant variable. Cette injection de courant modifie les puissances active et réactive qui transitent dans la ligne [BEL-01], [SON-99], [HIN-00].

Les progrès réalisés durant ces dernières années dans le domaine des composants semi-conducteurs commandés ont rendu l'utilisation des filtres actifs intéressante. Ce sont aussi des convertisseurs à commutation forcée, utilisés pour la dépollution harmonique des réseaux.

III.2. MODELISATION DU FILTRE ACTIF PARALLELE :



(Fig.III.1) : modèle du filtre actif.

Le filtre actif (ensemble Onduleur C, L_f , R_f) doit fournir la puissance déformante et (ou) la puissance réactive. Ainsi, le réseau fournit uniquement la puissance active.

Pour cela, le circuit de contrôle (boucles de régulation), en agissant sur la commande MLI, doit imposer la valeur instantanée du courant débité par l'onduleur ($i_{F1,2,3}$) de telle sorte que le courant fourni par le réseau ($i_{R1,2,3}$) soit sinusoïdal et en phase avec la tension simple correspondante ($V_{1,2,3}$).

Dans le cas général, le courant absorbé par la charge comporte une composante active (i_{Cfon}), une composante réactive (i_{Cr}) et une composante harmonique (i_{Ch}).

et : $i_C = i_{Cfon} + i_{Cr} + i_{Ch}$

Le compensateur actif ne peut absorber ou fournir de la puissance active (aux pertes près) puisqu'il ne comporte pas de source active[LAD-02].

• **Conséquences :**

$i_R = i_{Ca}$

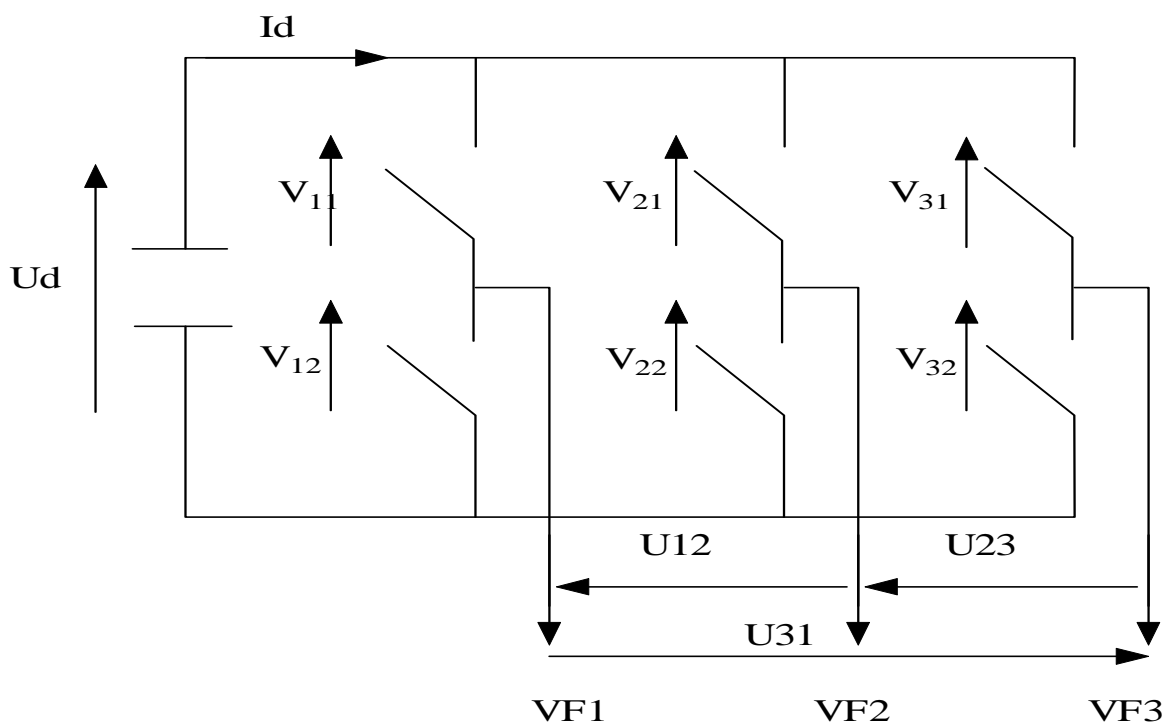
➤ Le réseau fournit la puissance active absorbée par la charge.

$i_F = i_{Cr} + i_{Ch}$

➤ Le filtre actif fournit la puissance réactive et déformante.

III.2.1 Modélisation de l'onduleur triphasé à deux niveaux :

La structure de l'onduleur triphasé est donnée sur la figure III.2.



(Fig.III.2) : modèle de l'onduleur triphasé.

III.2.1.1 Fonctions de conversion :

Soient :

$i=1, 2,3$ nombre de bras de l'onduleur.

$J=1,2$ représente les étages de l'onduleur.

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

$$F_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si l'interuptur } e \text{ est fermé} \\ 0 & \text{si l'interuptur } e \text{ est ouvert} \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

$$D'où : \begin{cases} I_{ij} = F_{ij} \cdot I_d \\ V_{ij} = (1 - F_{ij}) \cdot U_d \end{cases} \quad (\text{III.2})$$

Tel que I_{ij} et V_{ij} sont les courants qui traversent les interrupteurs et les tensions a leurs bornes.

III.2.1.2 Tensions composées a la sortie de l'onduleur :

Soient U_{12} , U_{23} et U_{31} les tensions composées délivrées par l'onduleur.

$$\begin{cases} U_{12} = V_{21} - V_{11} \\ U_{23} = V_{31} - V_{21} \\ U_{31} = V_{11} - V_{31} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} U_{12} = (F_{11} - F_{21}) \cdot U_d \\ U_{12} = (F_{21} - F_{31}) \cdot U_d \\ U_{12} = (F_{31} - F_{11}) \cdot U_d \end{cases} \quad (\text{III.3})$$

Par conséquent, les tensions composées s'expriment de la manière suivante :

$$\begin{pmatrix} U_{12} \\ U_{23} \\ U_{31} \end{pmatrix} = U_d \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} F_{11} \\ F_{21} \\ F_{31} \end{pmatrix} \quad (\text{III.4})$$

III.2.1.3 Tensions simples :

Les tensions simples V_{F1} , V_{F2} et V_{F3} sont données par :

$$\begin{pmatrix} V_{F1} \\ V_{F2} \\ V_{F3} \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} U_{12} \\ U_{23} \\ U_{31} \end{pmatrix} \quad (\text{III.5})$$

D'où :

$$\begin{pmatrix} V_{F1} \\ V_{F2} \\ V_{F3} \end{pmatrix} = \frac{1}{3} U_d \cdot \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_{11} \\ F_{21} \\ F_{31} \end{pmatrix} \quad (\text{III.6})$$

On exprime le courant redressé par :

$$I_d = F_{11} \cdot I_{F1} + F_{21} \cdot I_{F2} + F_{31} \cdot I_{F3} \quad (\text{III.7})$$

III.3 COMMANDE DU FILTRE ACTIF PARALLELE :

III.3.1 Commande par hystérésis :

III.3.1.1 Principe :

Le principe de la commande par hystérésis est basé sur la commande des interrupteurs de telle sorte que les variations du courant dans chaque phase soient limitées dans une bande enveloppant les courants de référence. Ce contrôle se fait par une comparaison permanente entre les courants réels et les courants de références.

Comme l'onduleur à deux niveaux possède deux états de commande possibles pour un bras j , alors nous utilisons un régulateur à hystérésis à une position.

III.3.1.2.Algorithme :

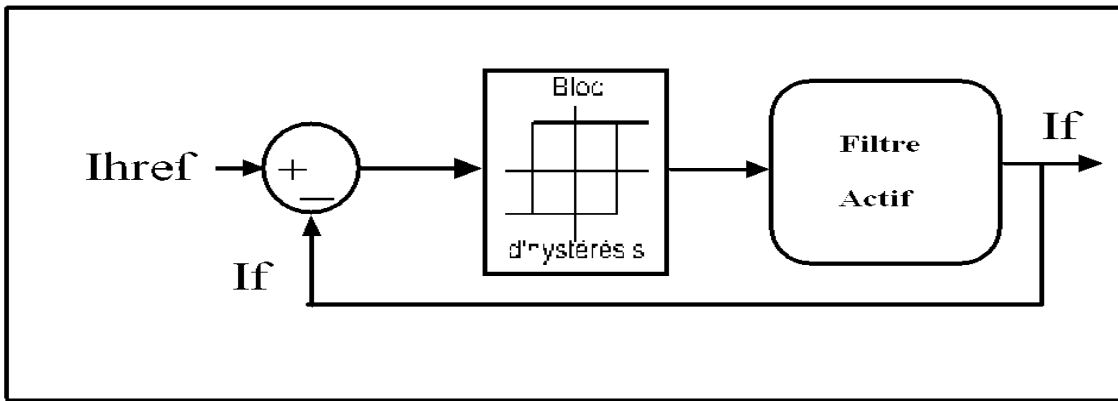
Nous désignons par ε_k l'écart entre le courant de référence i_{refj} et le courant réel i_{resj} tel que :

$$\varepsilon_i = i_{refi} - i_{réeli} \quad , i = \{1,2,3\}, j = \{1,2 \} \quad (\text{III.8})$$

L'algorithme de cette stratégie est donné comme suit :

$$\begin{cases} si \quad \varepsilon_i \geq \Delta i \Rightarrow B_{ij} = 1 \\ si \quad \varepsilon_i \leq -\Delta i \Rightarrow B_{ij} = 0 \end{cases} \quad (\text{III.9})$$

Δi : largeur de la bande d'hystérésis.



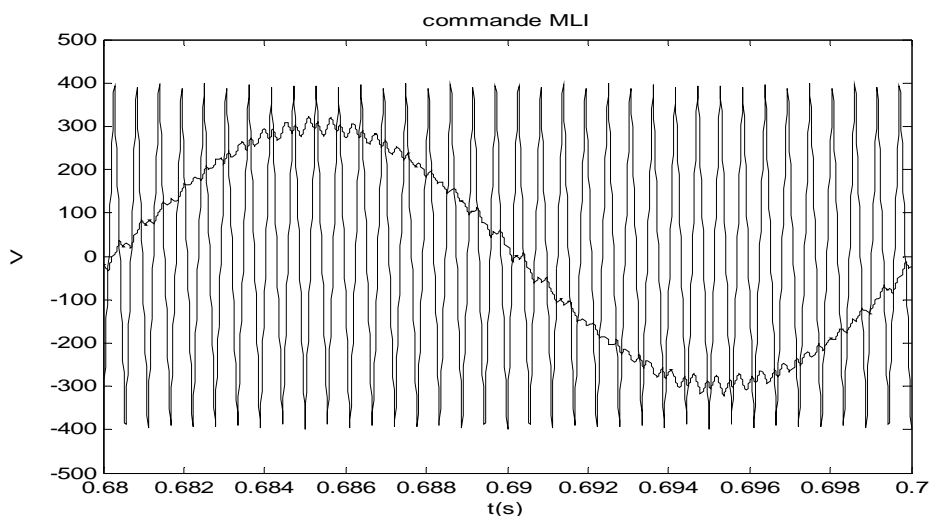
(Fig.III.3) : Schéma synoptique de la commande par régulateurs à hystérésis

III.3.2 Commande MLI triangulo-sinusoidale :

III.3.2.1 Principe :

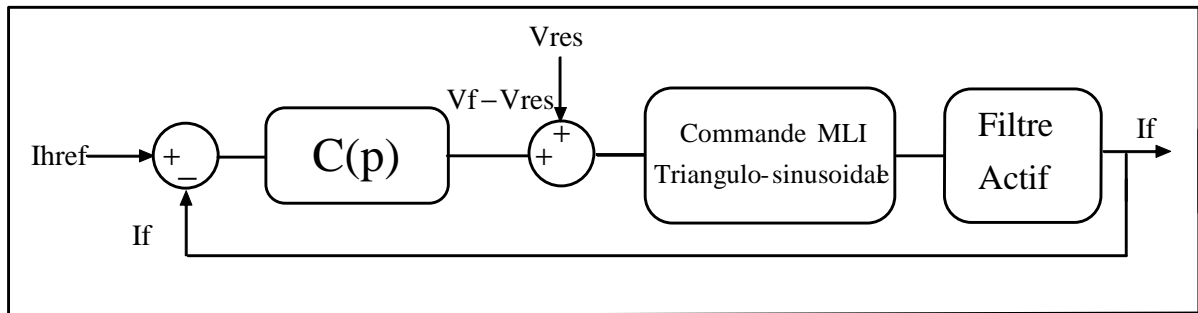
La modulation de Largeur d'Impulsion (En anglo-saxon Pulse Width Modulation) consiste à adopter une fréquence de commutation supérieure à la fréquence des grandeurs de sortie d'une succession de créneaux de largeurs convenables.

Ce contrôle met en oeuvre d'abord un régulateur qui, à partir de l'écart entre le courant et sa référence détermine la tension de référence de l'onduleur (modulatrice). Cette dernière est ensuite comparée avec une onde triangulaire symétrique, à fréquence élevée (porteuse) comme il est indiqué sur la figure (III.4). La sortie du comparateur fournit l'ordre de commande des interrupteurs. Dans ce système de contrôle, la fréquence de commutation est fixe, le réglage s'effectuant par variation du rapport cyclique des signaux de commande.



(Fig.III.4.a) : comparaison entre la modulatrice et porteuse

III.3.2.2. Algorithmme :



(Fig.III.4.a) : Schéma synoptique de la commande MLI triangulo-sinusoidale .

III.3.2.3 Dimensionnement du correcteur PI :

La fonction de transfert du correcteur PI est $C(p) = \frac{1 + pT_1}{pT_2}$ (III.10)

Où T_1 et T_2 sont deux constantes de temps à déterminer.

La fonction de transfert en boucle ouverte de l'onduleur à deux niveaux et le filtre R_f , L_f est :

$$FTBO = C(p) \cdot \frac{1}{R_f + L_f \cdot p} \quad (III.11)$$

Donc

$$FTBO = \frac{1 + pT_1}{pT_2} \cdot \frac{1/R_f}{1 + \frac{L_f}{R_f} \cdot p} \quad (III.12)$$

On pose $T_1 = L_f / R_f$ pour compenser la dynamique propre du système.

La fonction de transfert en boucle fermée sera alors :

$$FTBF = \frac{1}{1 + R_f \cdot T_2 \cdot p} = \frac{1}{1 + \tau \cdot p} = \frac{ih}{ihref} \quad \text{avec } \tau = R_f \cdot T_2 \quad (III.13)$$

$$\text{On prend } \tau = T_1/10 \Rightarrow T_2 = \frac{T_1}{10 \cdot R_f} \quad (III.14)$$

Ce choix permet d'améliorer le temps de réponse du système en boucle fermée.

III.3.2.4 Choix de L_f et R_f :

Le filtre actif est placé en parallèle avec le réseau par l'intermédiaire de trois inductances L_f et trois résistances R_f constituant un filtre passif placé entre le réseau et l'onduleur.

Les inductances et les résistances doivent être dimensionnés en intégrant les tensions et les courants harmoniques qui les solliciteront. Un bon dimensionnement nécessite donc la connaissance des courants harmoniques qui vont le traverser. Nous allons déterminer par simulation, les valeurs de L_f et R_f que nous fixerons pour toutes les simulations qui vont suivre. [KET-05].

On prend :

$$R_f = 0.1\Omega \text{ et } L_f = 3.10^{-3} \text{ H.}$$

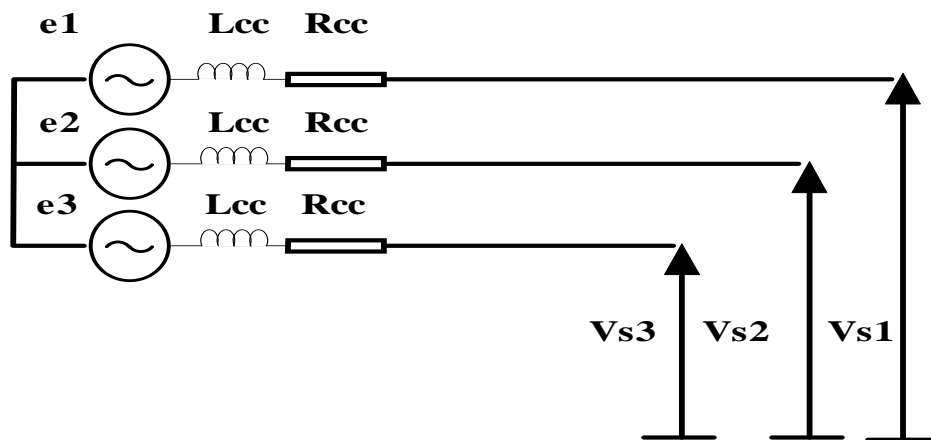
$$\text{On aura : } T_1 = T_2 = 3.10^{-2}.$$

III.4 APPLICATION DU FILTRE ACTIF PARALLELE A LA CHARGE NON LINEAIRE :

III.4.1. Modélisation du réseau électrique :

L'énergie électrique est distribuée sous forme de trois tensions sinusoïdales constituant le réseau triphasé équilibré, avec en série dans chaque phase, une impédance $Z_{cc}=R_{cc}+j.L_{cc}.w$, $w=2*\pi*f$

$$\begin{pmatrix} e1 \\ e2 \\ e3 \end{pmatrix} = \sqrt{2}.E. \begin{pmatrix} \sin(w.t) \\ \sin(w.t - 2.\frac{\pi}{3}) \\ \sin(w.t + 2.\frac{\pi}{3}) \end{pmatrix} \quad \text{(III.15)}$$



(Fig. III.5) : Schéma simplifié d'un réseau électrique.

III.4.2. Modélisation de la charge polluante :

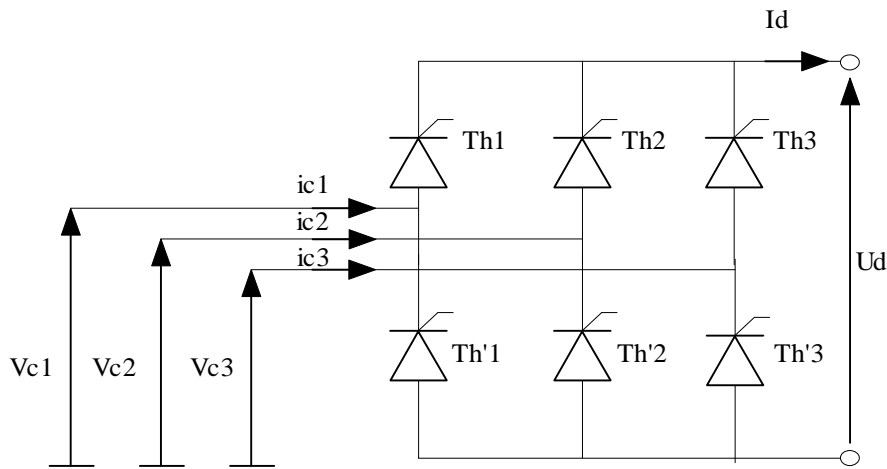
La charge polluante que nous avons utilisée dans notre étude est le redresseur triphasé à base des thyristors, structure en pont de Graëtz.

Le redresseur est alimenté par un réseau triphasé, représenté sur la figure (III.6) .

Ce redresseur génère les harmoniques de courant d'ordre $6k \pm 1$.

Le thyristor Th1 est débloqué avec un angle de retard α , donc pour $\omega.t = \alpha + \frac{\pi}{6}$.

Les autres thyristors sont débloqués de sixième de période en sixième de période dans l'ordre suivant : Th'3, Th2, Th'1, Th3, Th'2.



(Fig. III.6) : Schéma d'un redresseur triphasé à thyristors

En fonctionnement idéal des semi-conducteurs on résume les états de conduction de la tension redressée Ud et des courant i_{ci} , $i=1, 2,3$.

$$i_{ci} = X_i \cdot Id$$

$$Ud = \sum X_i \cdot V_i$$

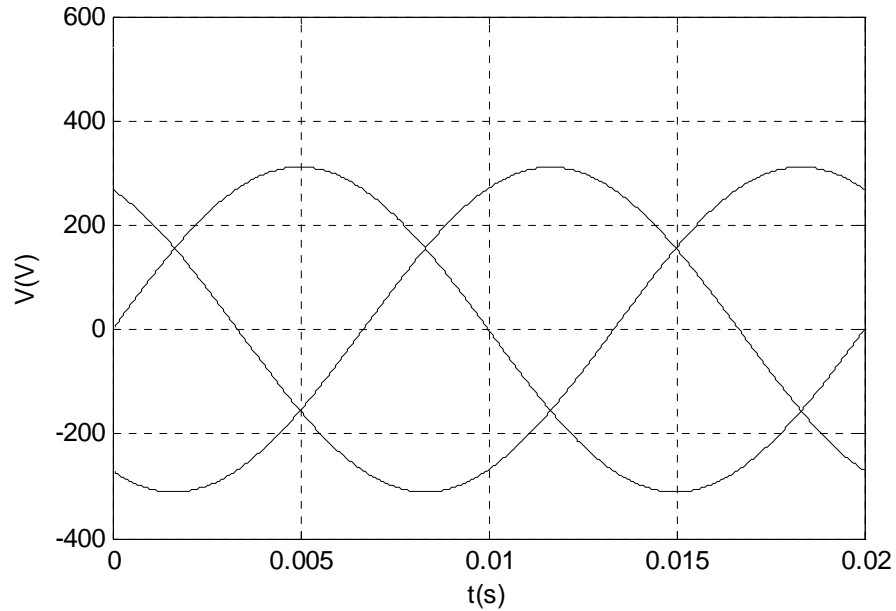
x_i : les fonctions de conversion des semi-conducteurs .

$$x_1 = \begin{cases} 1 & \alpha + \frac{\pi}{6} < \omega t < \alpha + 5 \cdot \frac{\pi}{6} \\ -1 & \alpha + 7 \cdot \frac{\pi}{6} < \omega t < \alpha + 11 \cdot \frac{\pi}{6} \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (III.16)$$

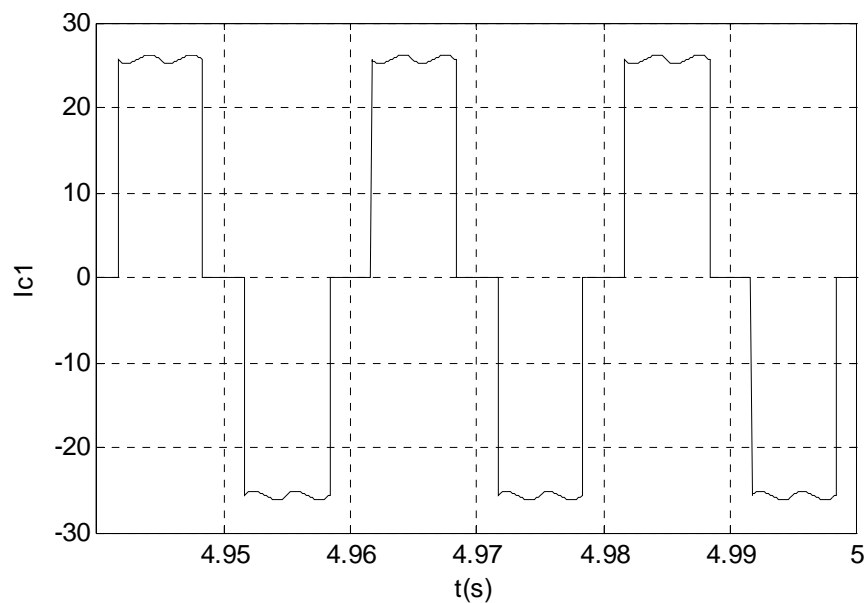
Les autres fonctions sont décalées de 120° et de 240°.

La figure (III.7) montre la forme d'onde de la tension redressée et le courant de charge.

➤ Pour $\alpha=0$ (redresseur triphasé à diode).

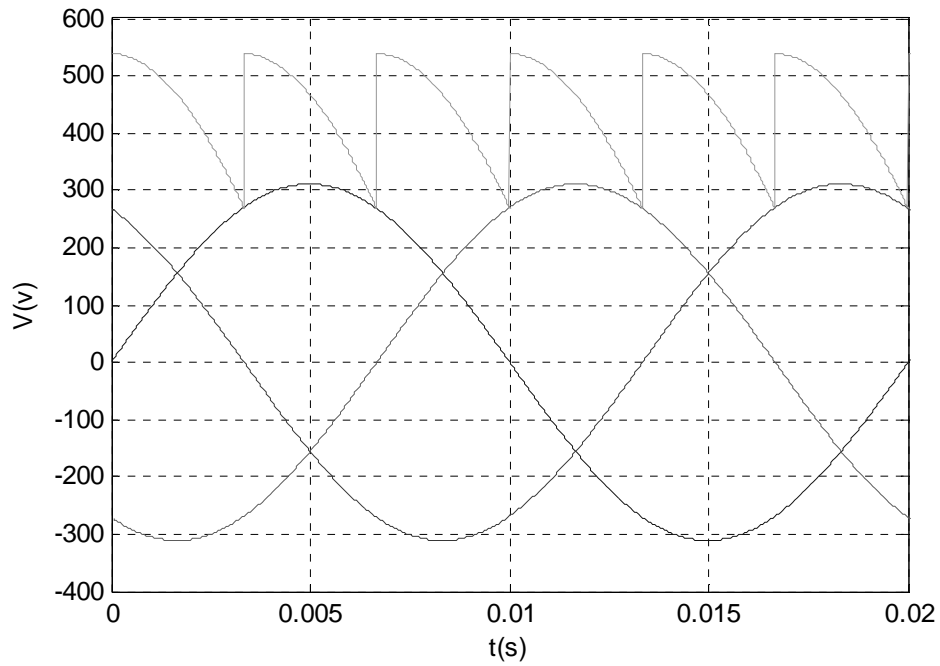


(Fig. III.7.a) : La forme d'onde de la tension redressée

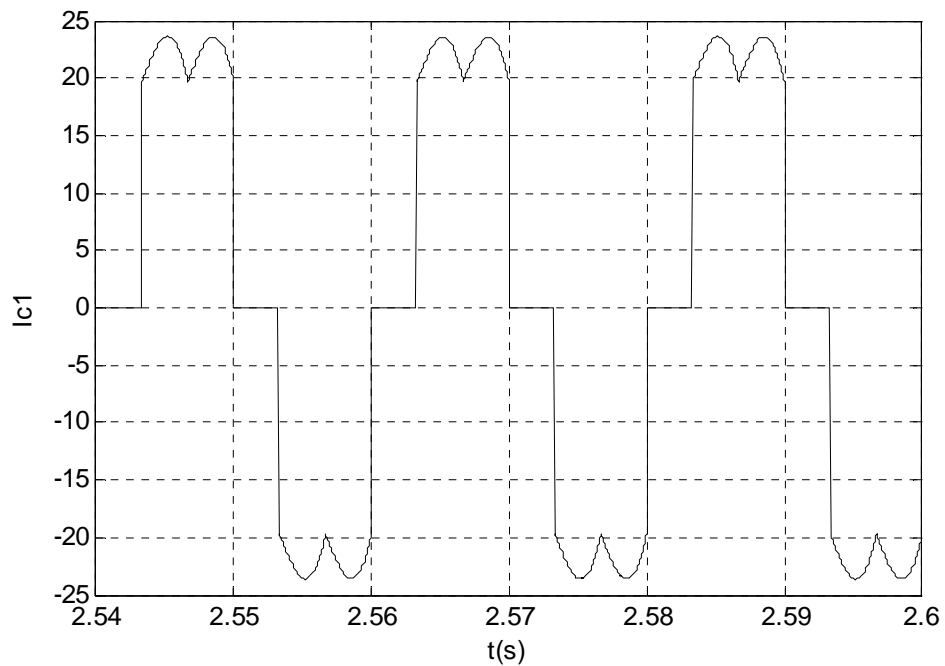


(Fig. III.7.b) : La forme d'onde du courant de charge.

➤ Pour $\alpha=30^\circ$



(Fig. III.7.c) : La forme d'onde de la tension redressée



(Fig. III.7.d) : La forme d'onde du courant de charge.

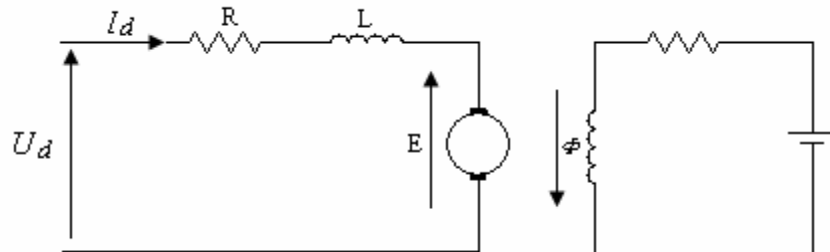
III.4.3 Modélisation de la machine à courant continu : [KET-05].

III.4.3.1 Equations de fonctionnement :

Les principales équations décrivant le fonctionnement du moteur à courant continu alimenté par un pont redresseur sont :

a) Equation électrique :

Le moteur à courant continu peut être représenté par le schéma équivalent de la figure (III.8)



(Fig. III.8) : Schéma équivalent du moteur à courant continu

Le courant d'induit I est défini en fonction de la tension d'alimentation U par :

$$U_d = E + R \cdot I_d + L \frac{dI_d}{dt} \quad (III.17)$$

b) Equation mécanique :

Le théorème des moments cinétiques sur l'arbre moteur donne une relation supplémentaire qui relie le couple moteur C_m à l'inertie totale J rapporté à l'arbre moteur et au couple résistant C_r également rapporté à l'arbre moteur. En ajoutant un frottement visqueux proportionnel à la vitesse angulaire N, on obtient :

$$J \cdot \frac{dN}{dt} = C_m - C_r - K_f \quad (III.18)$$

c) Equation de conversion :

Le moteur à courant continu est caractérisé par le fait que le couple moteur C_m est proportionnel au flux et au courant d'induit, avec :

$$\boxed{C_m = K_m \cdot \phi \cdot I_d} \quad \text{(III.19)}$$

D'autre part, la force contre-électromotrice E est proportionnelle au flux et à la vitesse de rotation angulaire N , ce qui donne la relation :

$$\boxed{E = K_c \cdot \phi \cdot N} \quad \text{(III.20)}$$

la puissance P disponible sur l'arbre du moteur est donnée par :

$$\boxed{P = E \cdot I_d = K_c \cdot \phi \cdot N \cdot I_d} \quad \text{(III.21)}$$

Cette puissance peut aussi s'exprimer en fonction du couple moteur C_m

$$\boxed{P = C_m \cdot N = K_m \cdot \phi \cdot N \cdot I_d} \quad \text{(III.22)}$$

Et en tenant compte de l'équation (III.20), il vient :

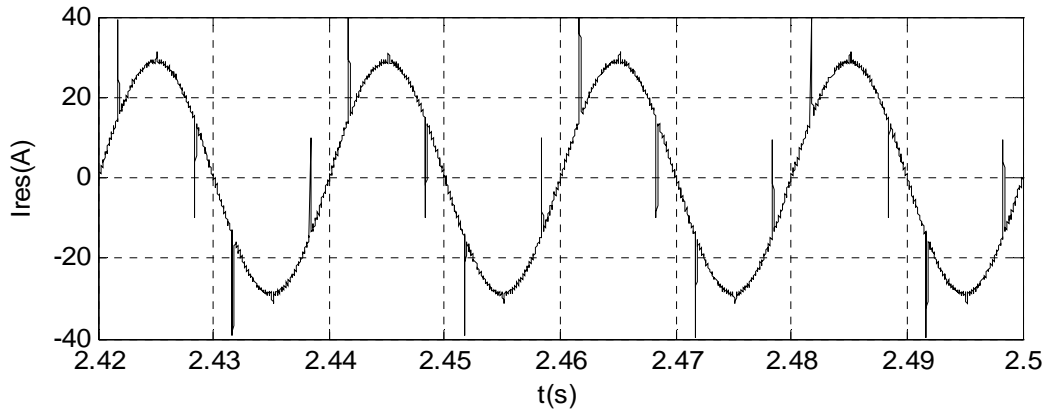
$$\boxed{K_c = K_m}$$

R, L, J, K_m sont des paramètres constants et U_d, E, I_d, C_m, C_r et N des variables, ces variables n'interviennent que par elles-mêmes et par leurs dérivées par rapport au temps. Elles sont liées entre elles par des relations somme et multiplication par une constante. Ces relations sont donc linéaires.

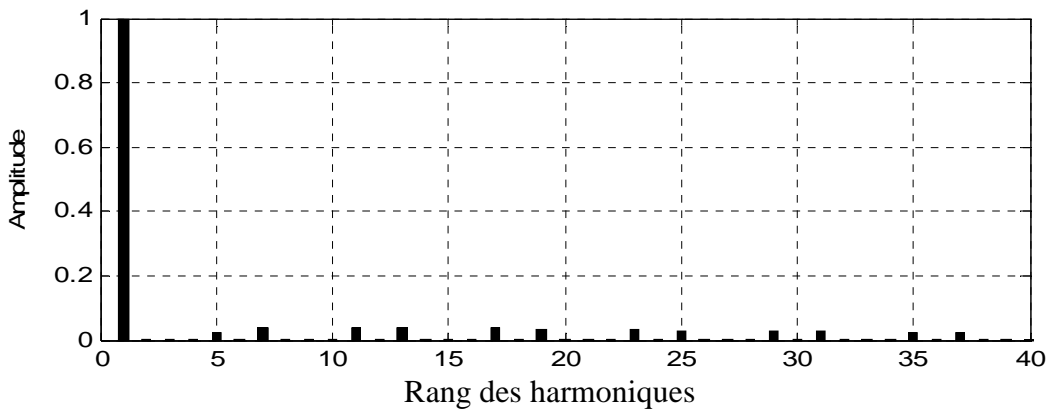
III.4.3 Résultats de simulation en utilisant la commande par hystérésis :

III.4.3.1 Sans compensation :

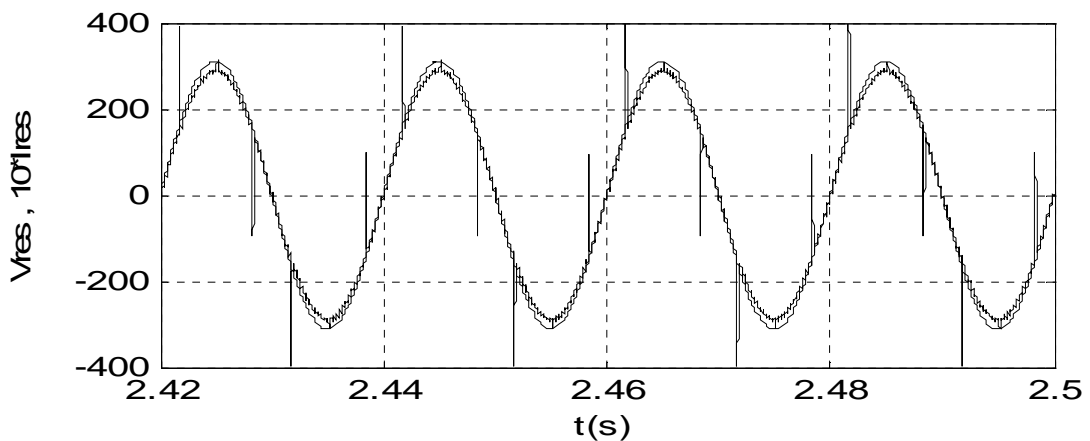
Pour $\alpha=0$



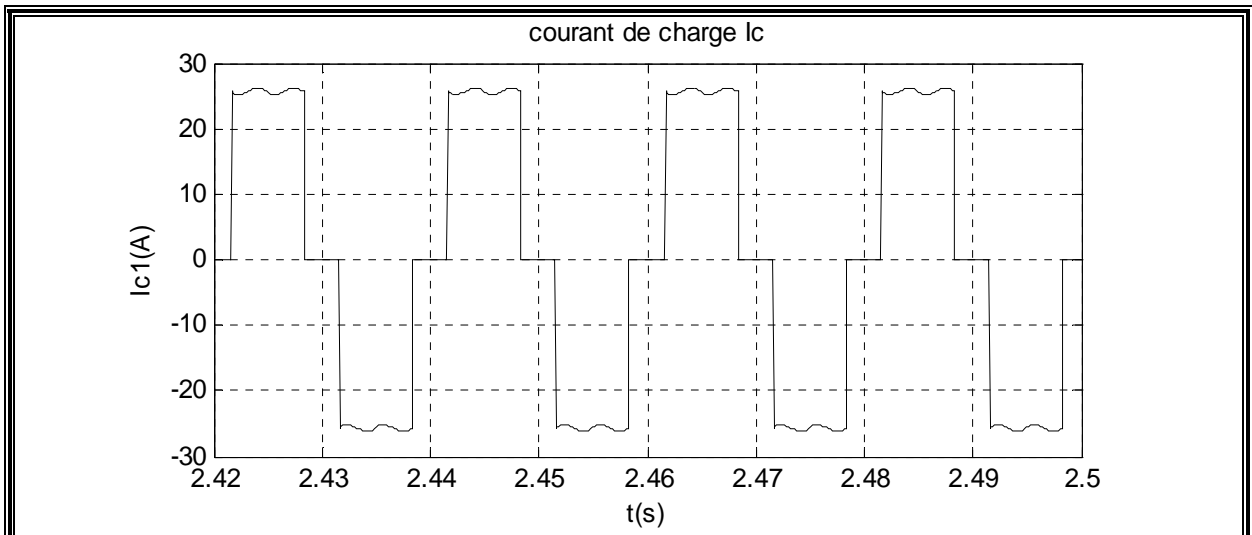
(Fig. III.9.a) : Courant de réseau après filtrage



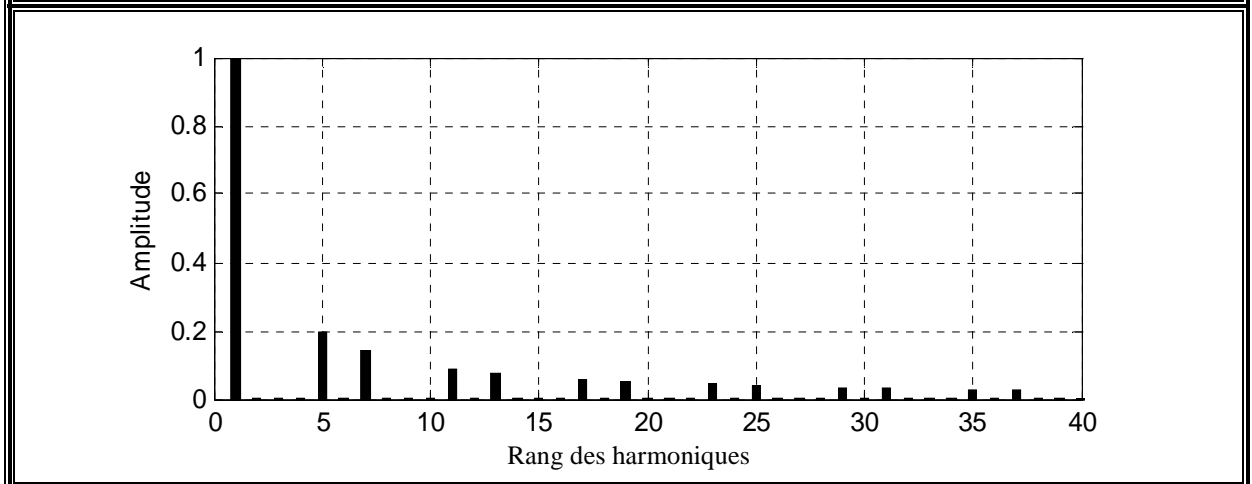
(Fig. III.9.b) : Spectre du courant de réseau après filtrage



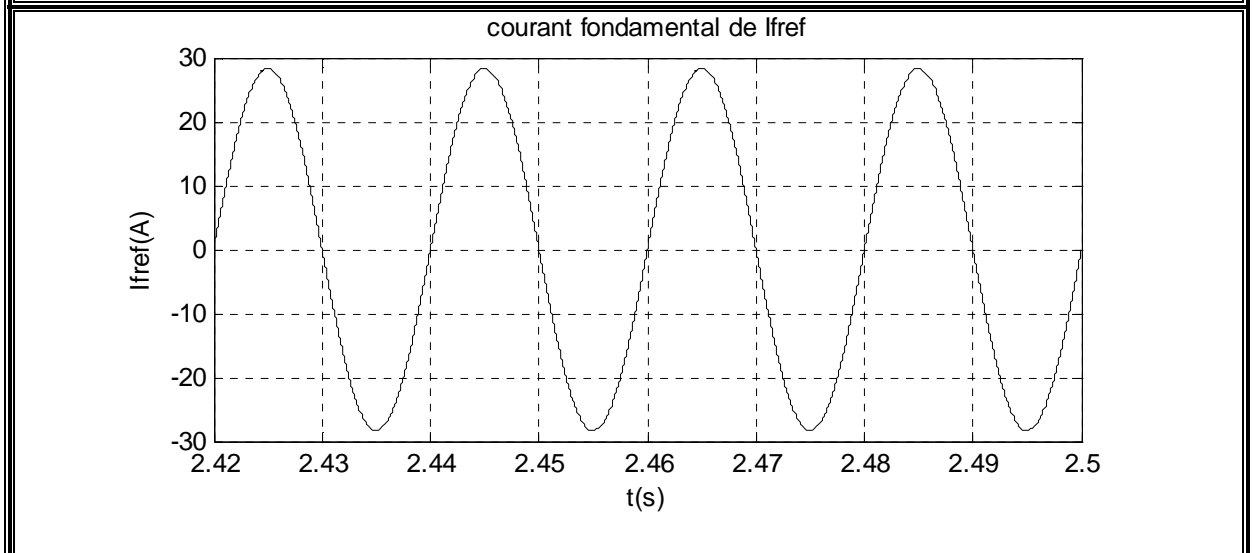
(Fig. III.9.c) : Tension et courant de réseau après filtrage



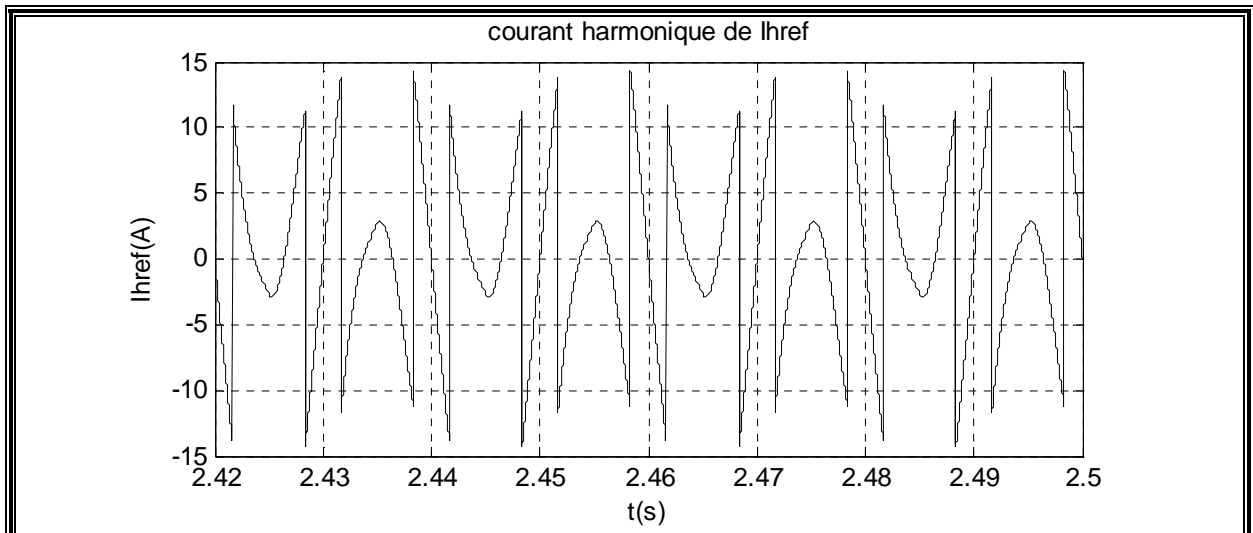
(Fig. III.9.d) : Courant de charge



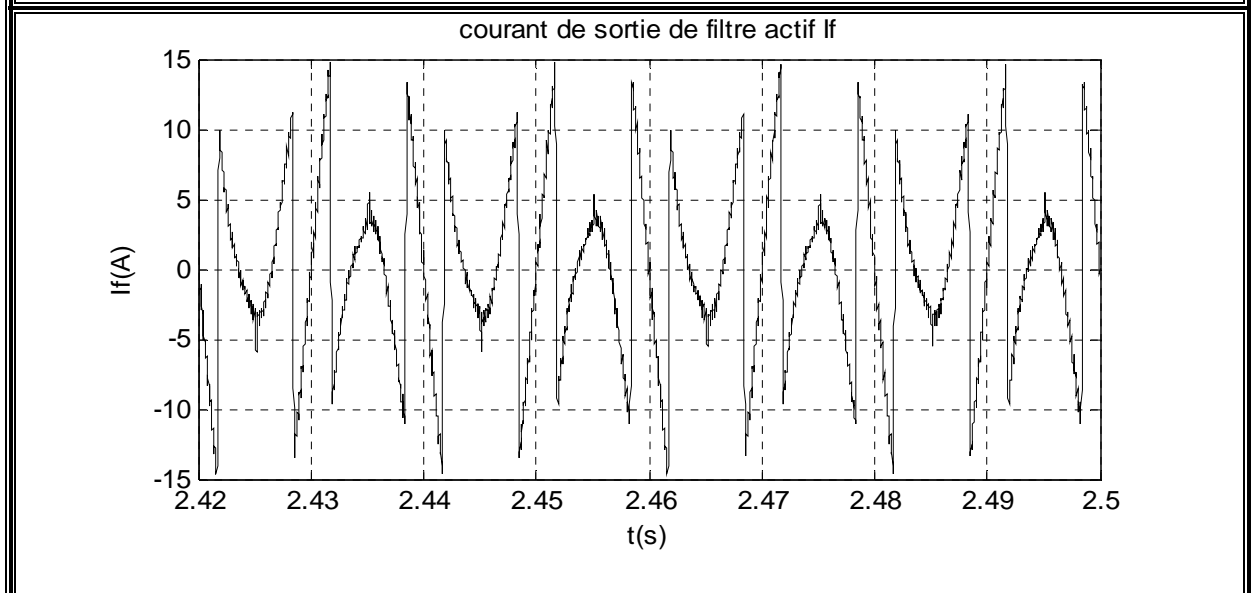
(Fig. III.9.e) : Spectre du courant de charge



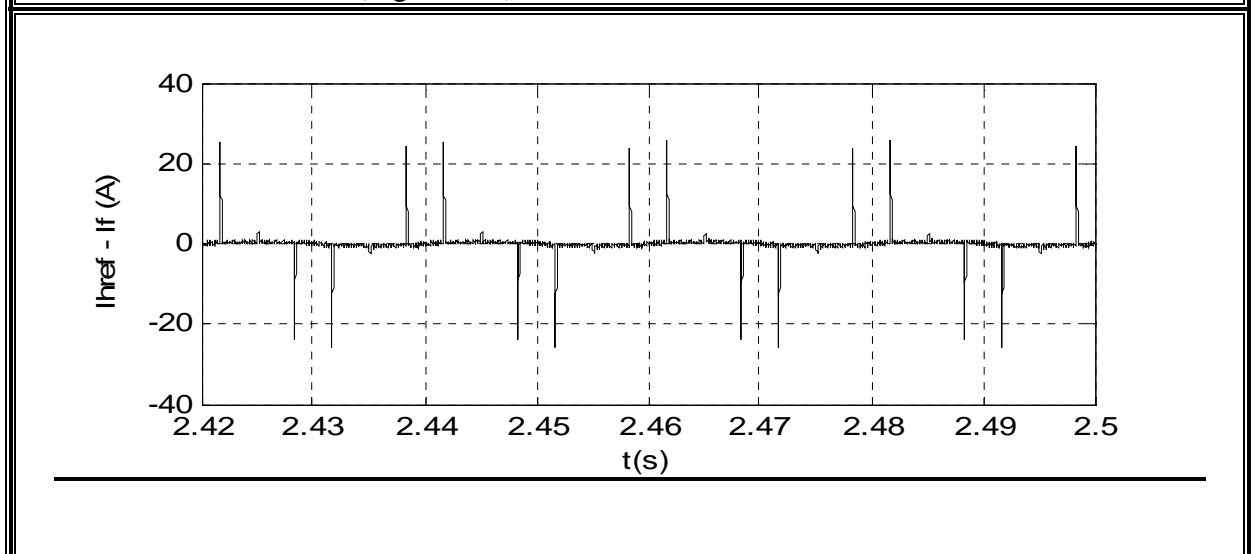
(Fig. III.9.f) : Courant fondamental de référence



(Fig. III.9.g) : Courant harmonique de référence

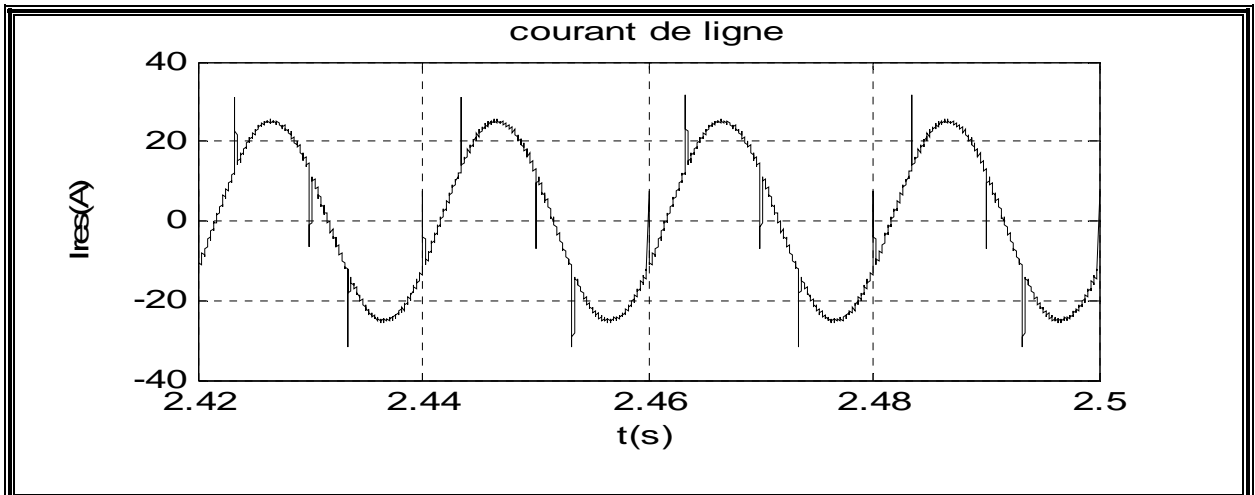


(Fig. III.9.h) : Courant de sortie du filtre actif

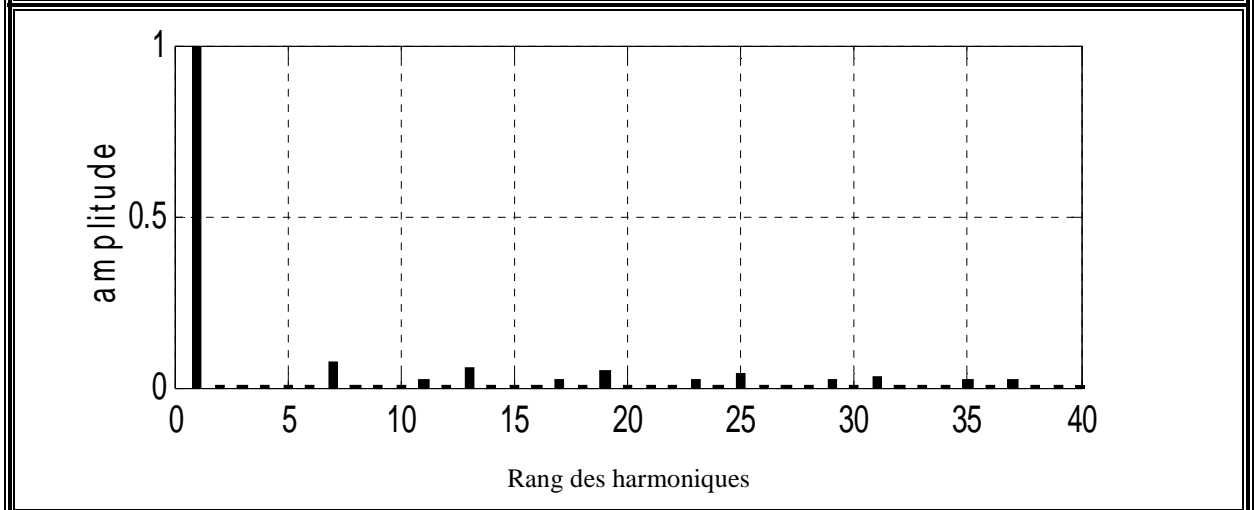


(Fig. III.9.i) : Courant : ($I_{href} - I_f$) « erreur »

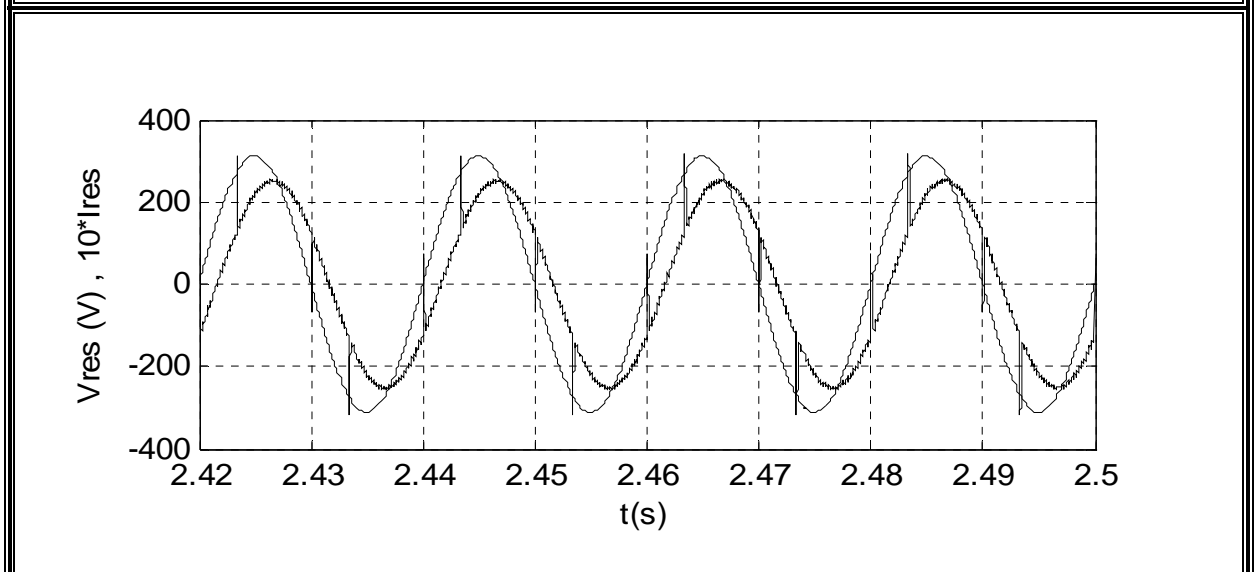
Pour $\alpha=30^\circ$



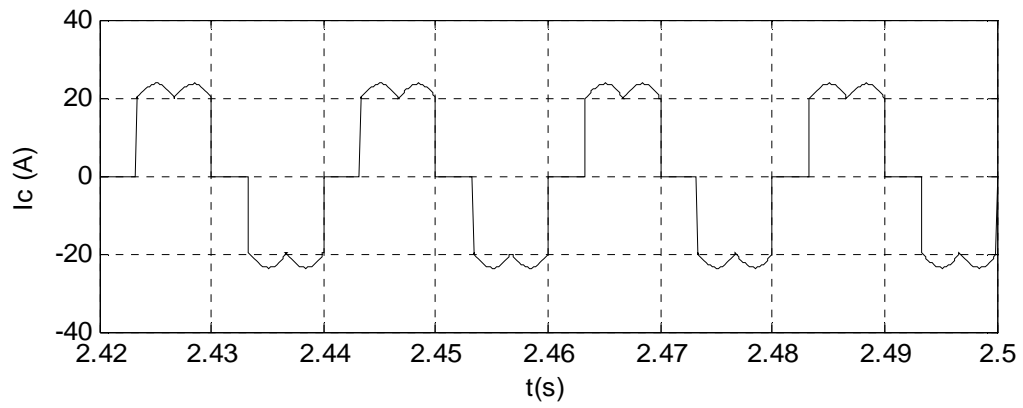
(Fig. III.10.a) : Courant de réseau après filtrage



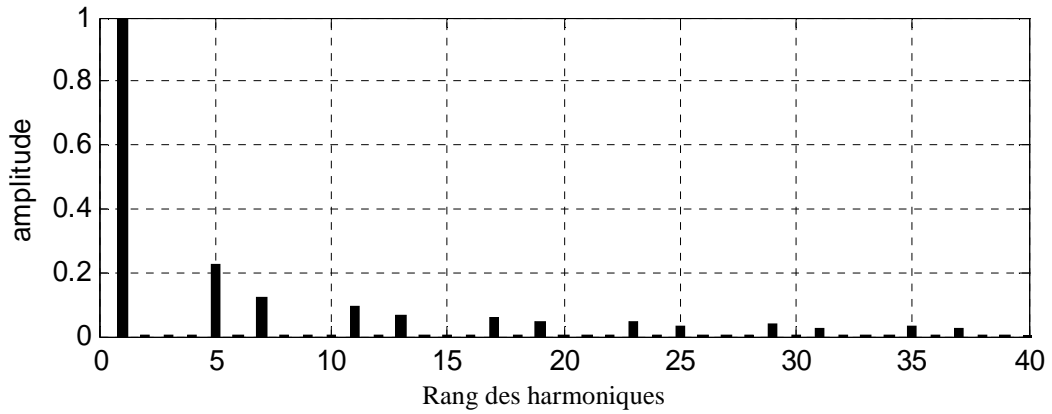
(Fig. III.10.b) : Spectre du courant de réseau après filtrage



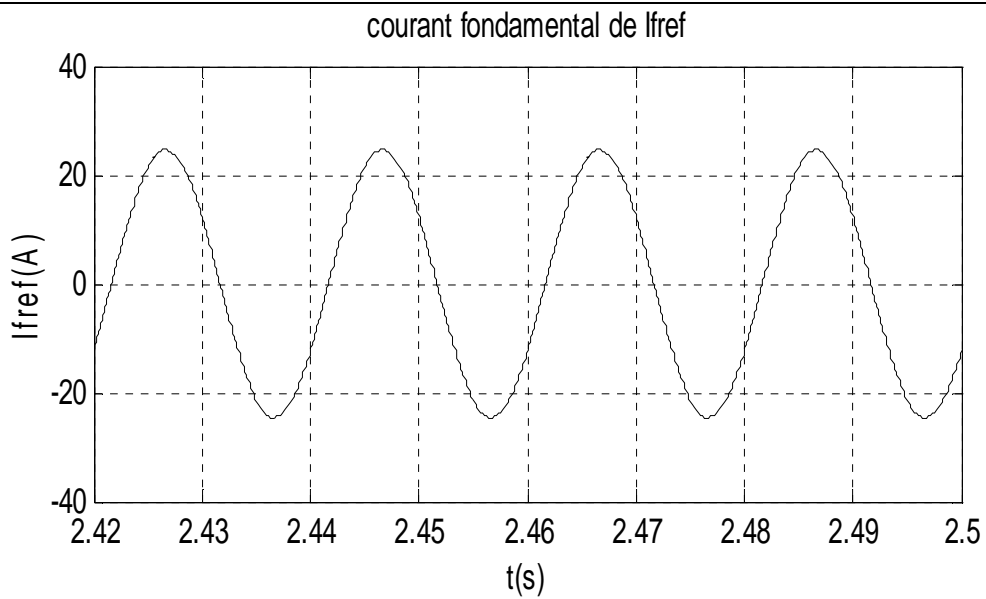
(Fig. III.10.c) : Tension et courant de réseau après filtrage



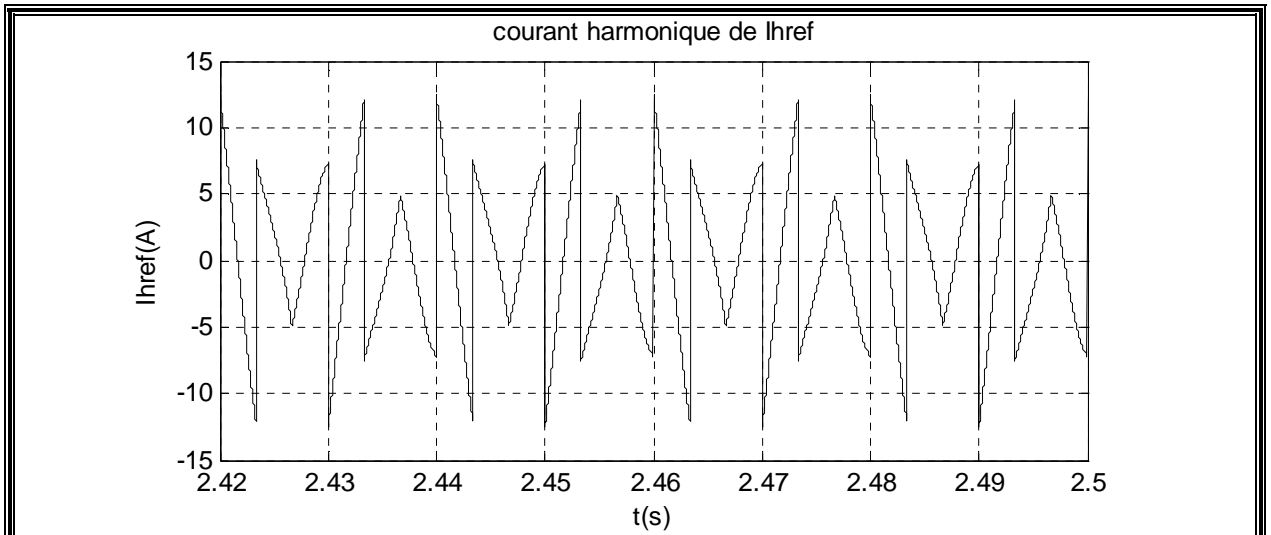
(Fig. III.10.d) : Courant de charge



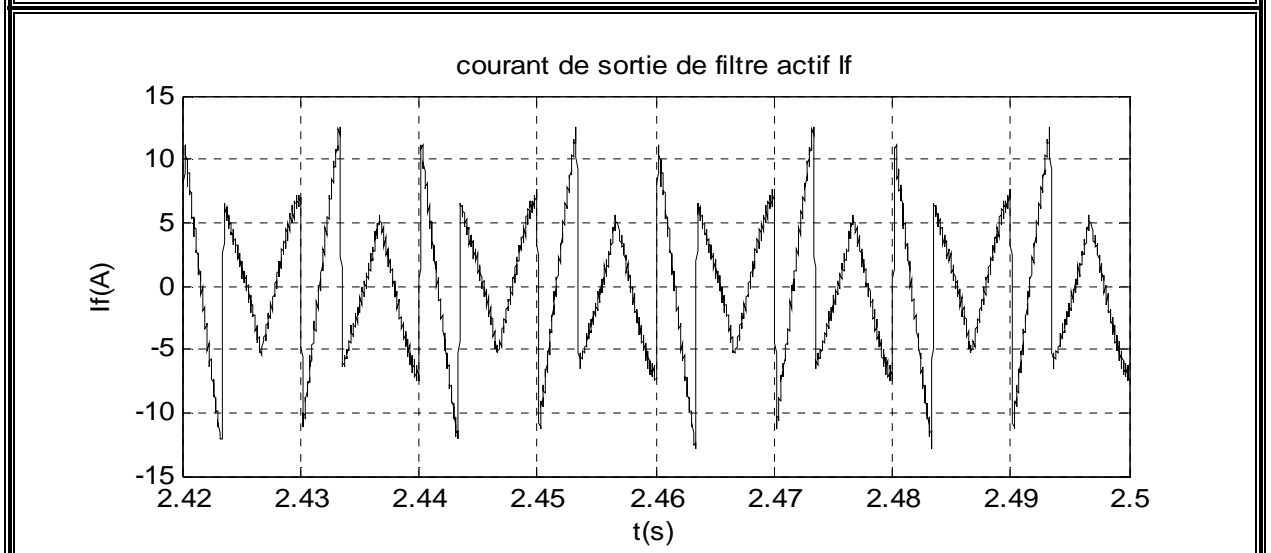
(Fig. III.10.e) : Spectre du courant de charge



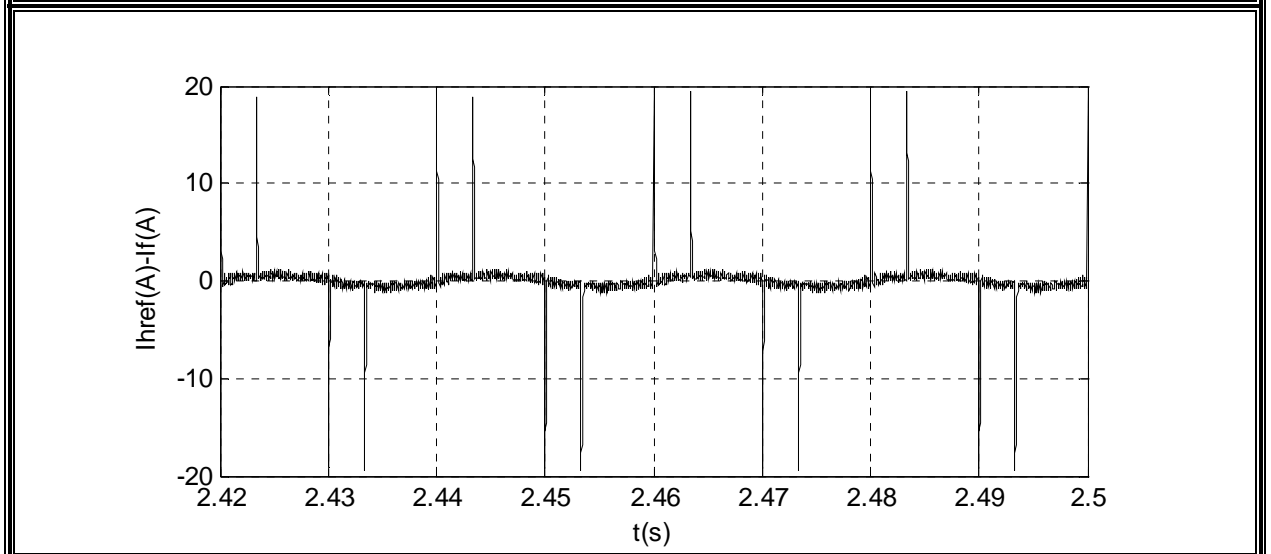
(Fig. III.10.f) : Courant fondamental de référence



(Fig. III.10.g) : Courant harmonique de référence



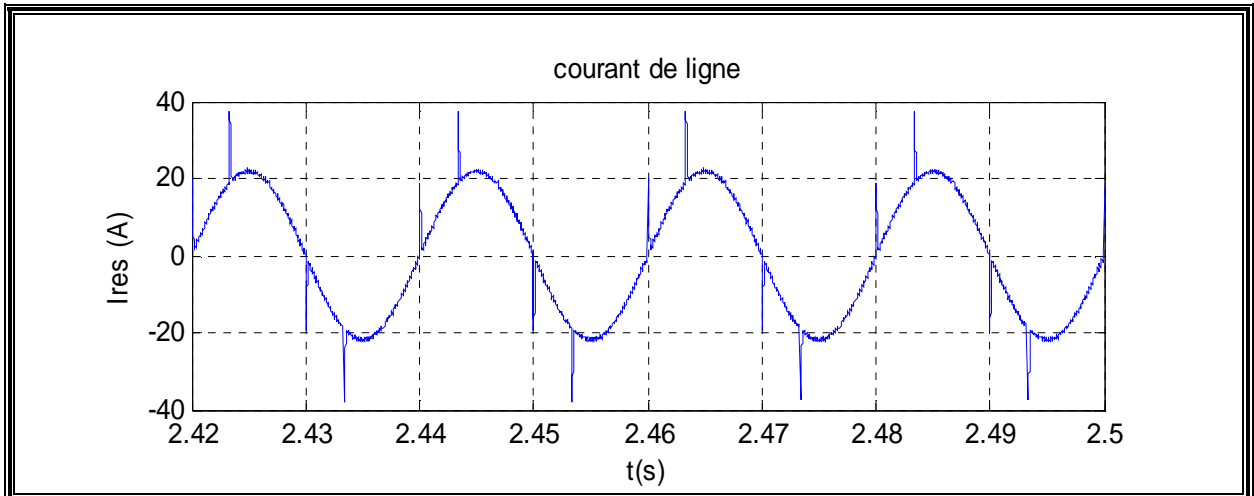
(Fig. III.10.h) : Courant de sortie du filtre actif



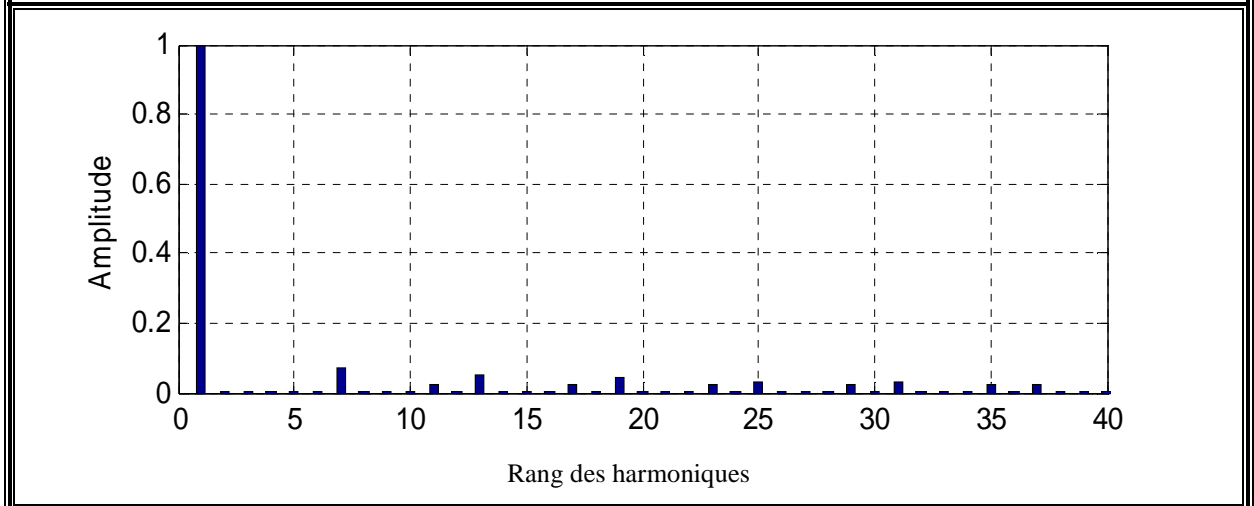
(Fig. III.10.i) : Courant : (Ihref - If) « erreur »

III.4.3.2 Avec compensation :

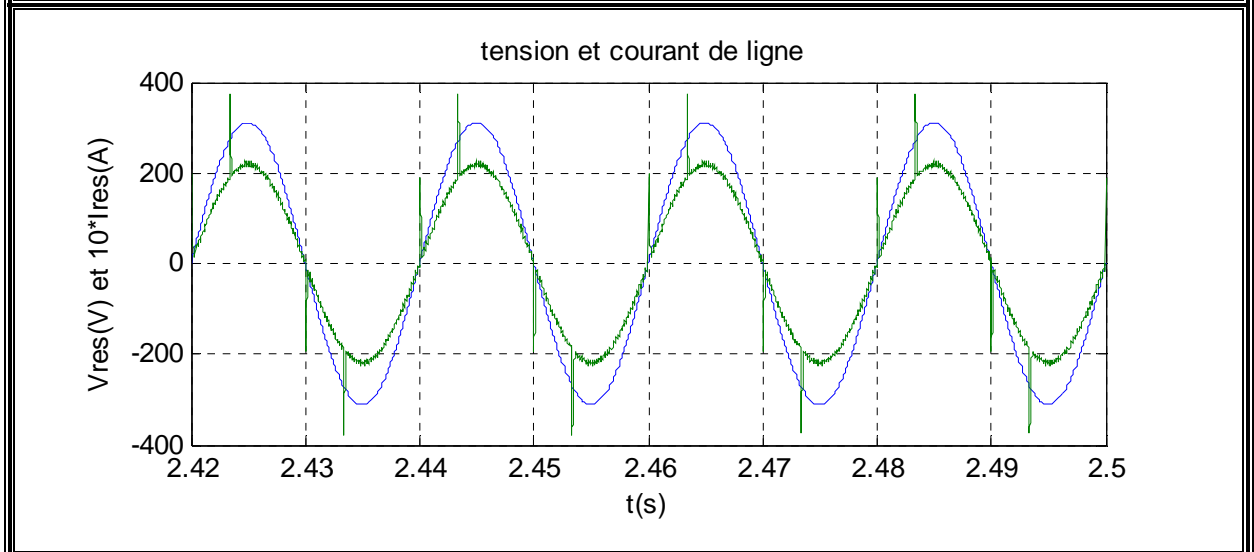
Pour $\alpha=30^\circ$



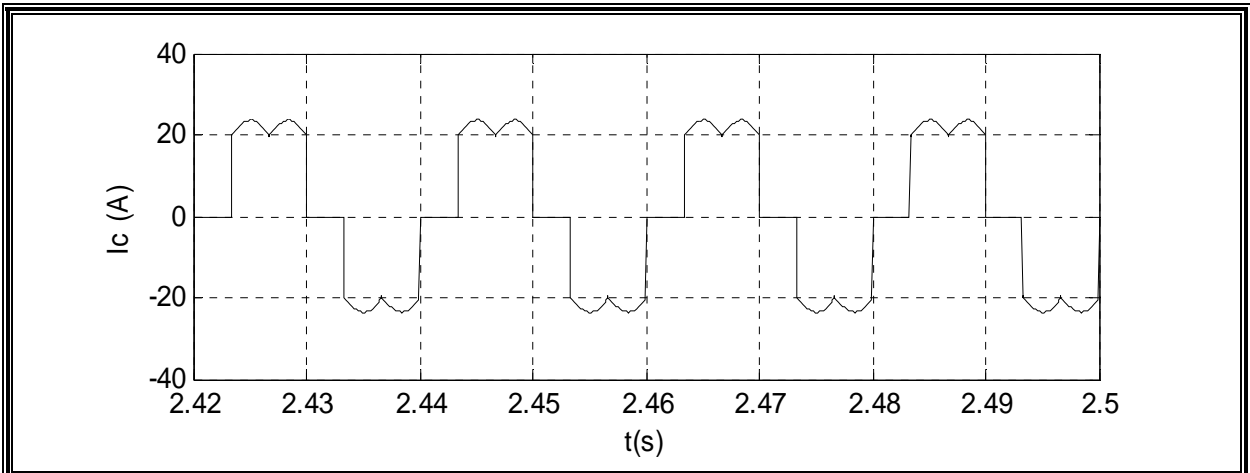
(Fig. III.11.a) : Courant de réseau après filtrage



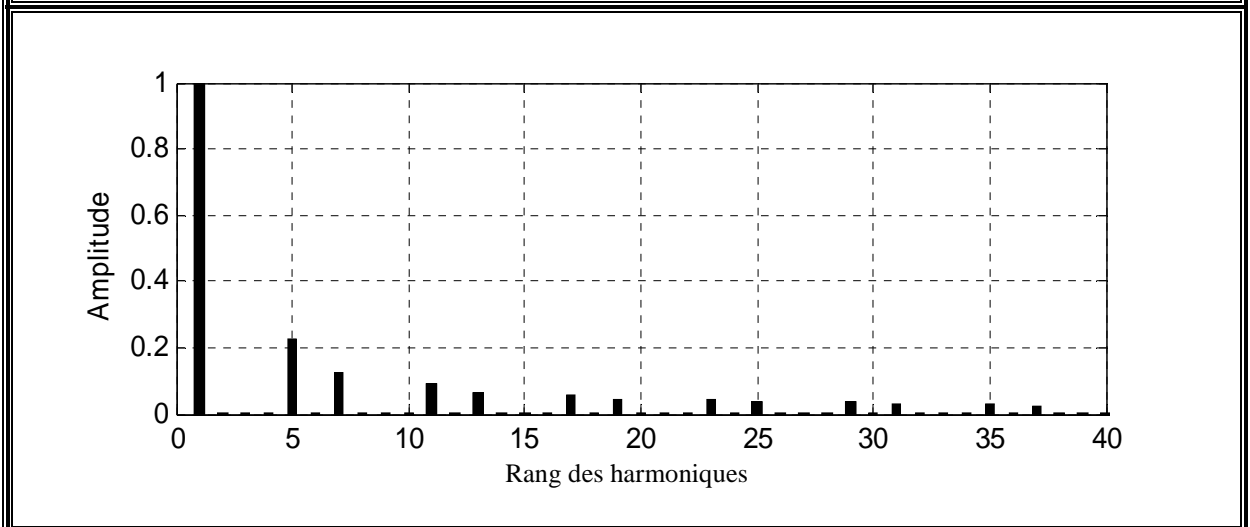
(Fig. III.11.b) : Spectre du courant de réseau après filtrage



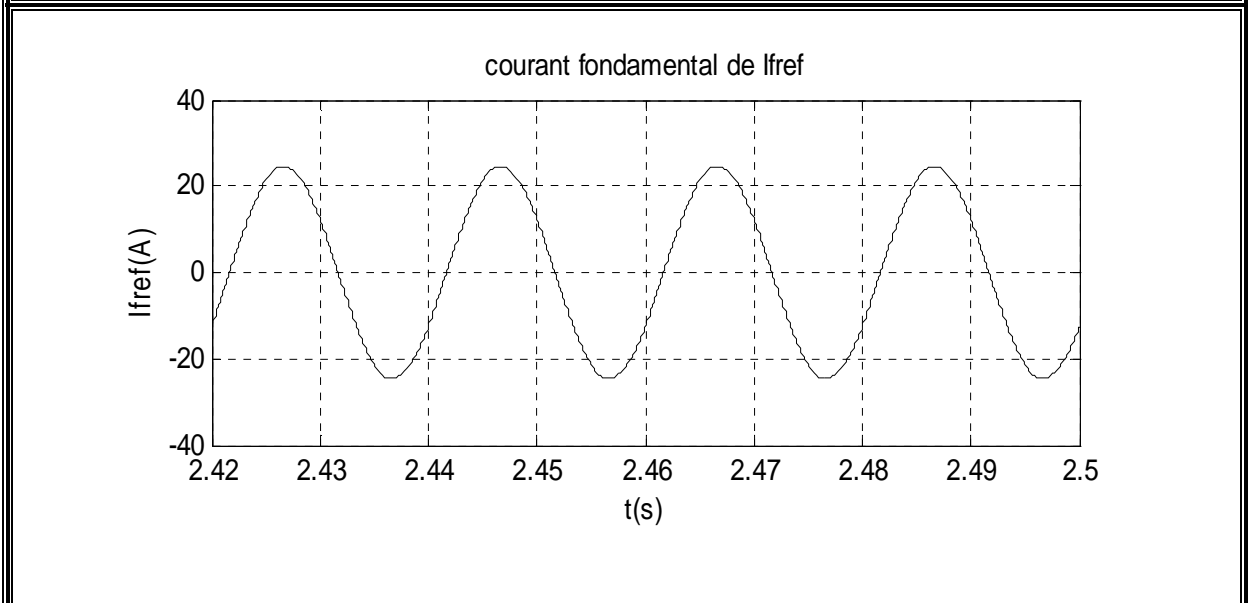
(Fig. III.11.c) : Tension et courant de réseau après filtrage



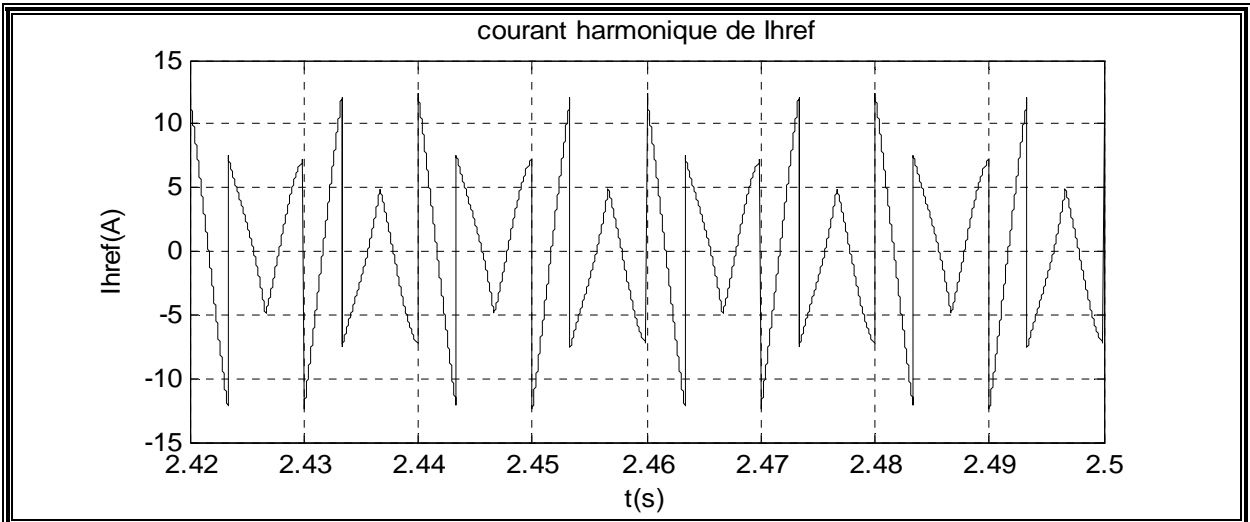
(Fig. III.11.d) : Courant de charge



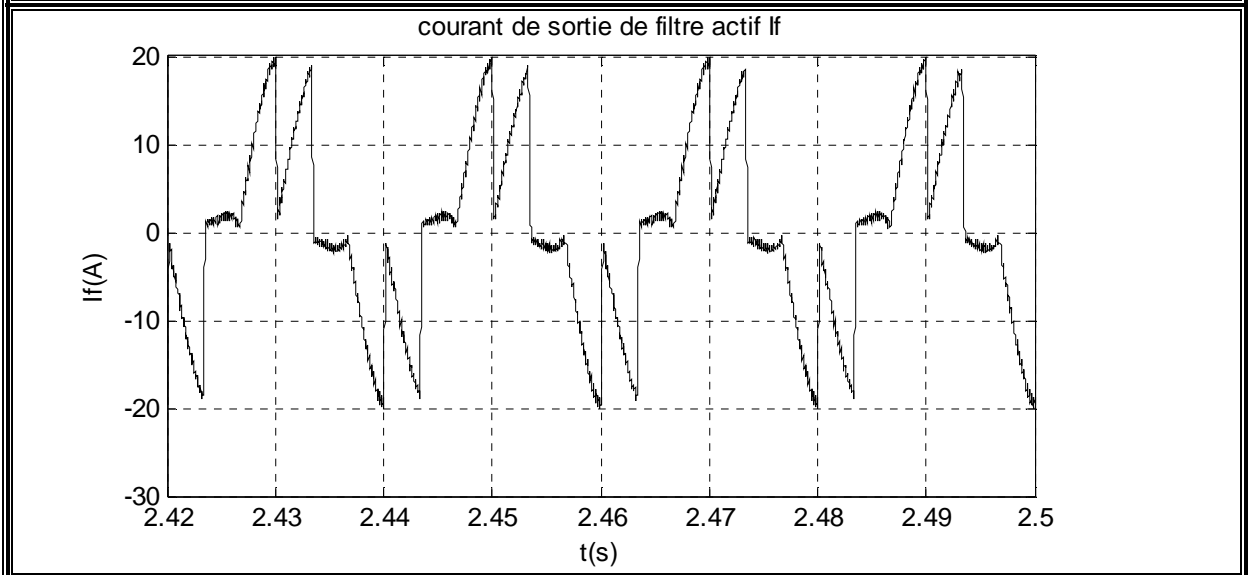
(Fig. III.11.e) : Spectre du courant de charge



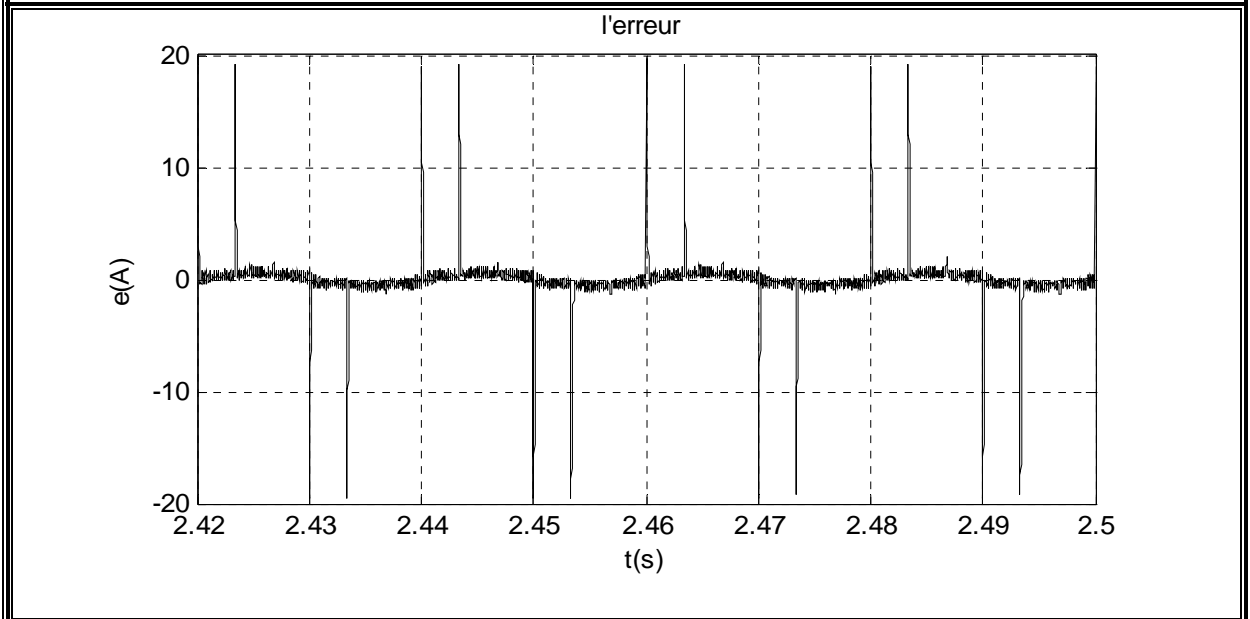
(Fig. III.11.f) : Courant fondamental de référence



(Fig. III.11.g) : Courant harmonique de référence



(Fig. III.11.h) : Courant de sortie du filtre actif



(Fig. III.11.i) : Courant : ($I_{href} + I_r - I_f$) « erreur »

III.4.4 Interprétation des résultats en utilisant la commande par hystérésis :**III.4.4.1 Sans compensation de l'énergie réactive :**

Le filtre actif est appliqué pour une charge non linéaire constituée d'un pont redresseur à thyristors débitant sur un moteur à courant continu.

Les figures (Fig. III.9) et (Fig. III.10) montrent les formes des grandeurs simulées du système en régime permanent, en charge. Ces simulations sont réalisées pour la stratégie de commande par hystérésis pour $\Delta i = 0.05$.

On constate que les courants du filtre suivent bien leurs références. Après identification des courants harmoniques par la méthode directe, on remarque que les courants harmoniques générés par le filtre ont la même forme que ceux demandés par la charge polluante.

Cependant, à cause de la présence de $L_f(di/dt)$, ces courants ne peuvent pas suivre leurs références au niveau des variations brusques. D'où l'apparition des piques au niveau du courant de source qui est sinusoïdal. [KET-05].

Dans le cas du redresseur à diodes ($\alpha = 0$), on remarque que le courant est en phase avec la tension du réseau. Par contre, pour le redresseur à thyristors ($\alpha = 30$ et $\alpha = 60$ voir l'annexe 1 pour $\alpha = 60^\circ \ll \pi/3 \gg$), le courant est déphasé par rapport à la tension du réseau, et ce déphasage augmente en fonction de l'angle d'amorçage.

III.4.4.2 Avec compensation de l'énergie réactive :

En utilisant la même stratégie de commande que précédemment, on applique le filtre actif pour une charge non linéaire constituée d'un pont redresseur à thyristors débitant sur un moteur à courant continu.

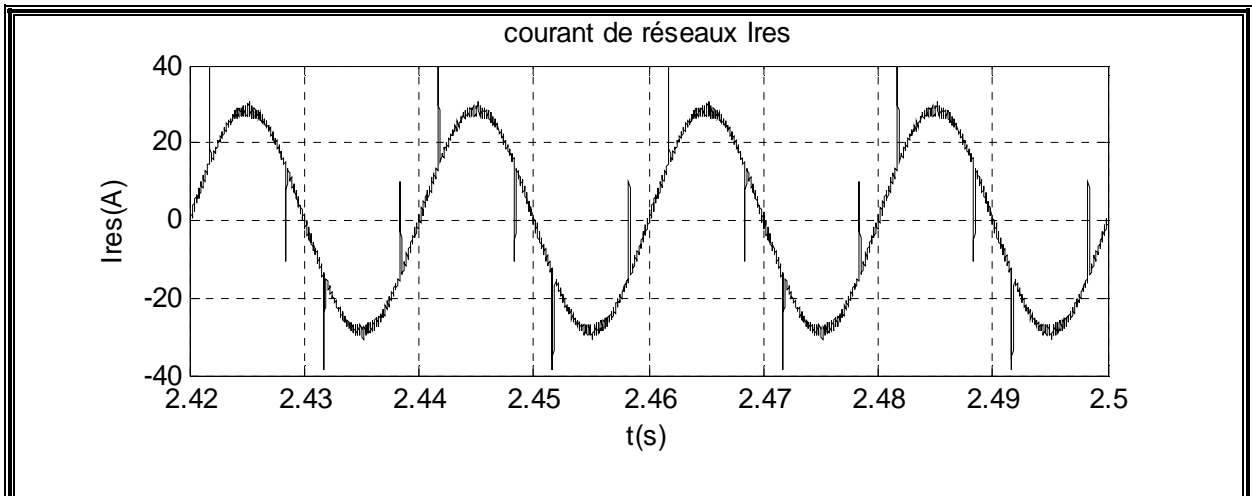
Les figures (Fig. III.11) montrent respectivement les formes des grandeurs simulées du redresseur à thyristors pour 2 angles d'amorçage différents $\pi/6$ et $\pi/3$ (voir l'annexe 1 pour $\alpha = 60^\circ \ll \pi/3 \gg$), en régime permanent.

On remarque que le courant de source, pour le filtrage avec compensation d'énergie réactive, est en phase avec sa tension, ce qui n'est pas le cas pour le filtrage sans compensation d'énergie réactive. D'où la compensation totale de l'énergie réactive, c'est-à-dire un facteur de puissance unitaire coté réseau.

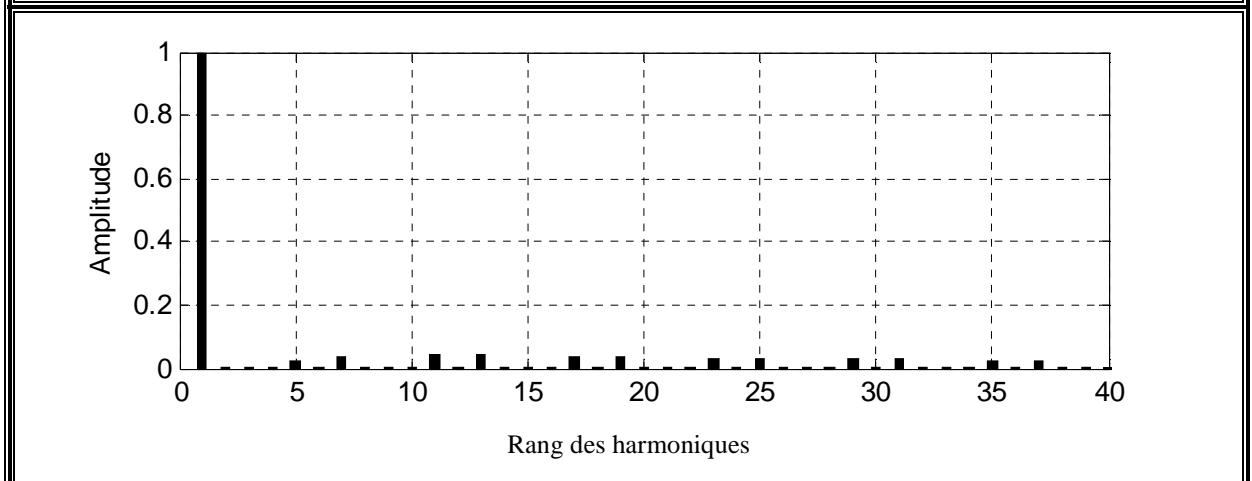
III.4.5 Résultats de simulation en utilisant la commande MLI :

III.4.5.1 Sans compensation :

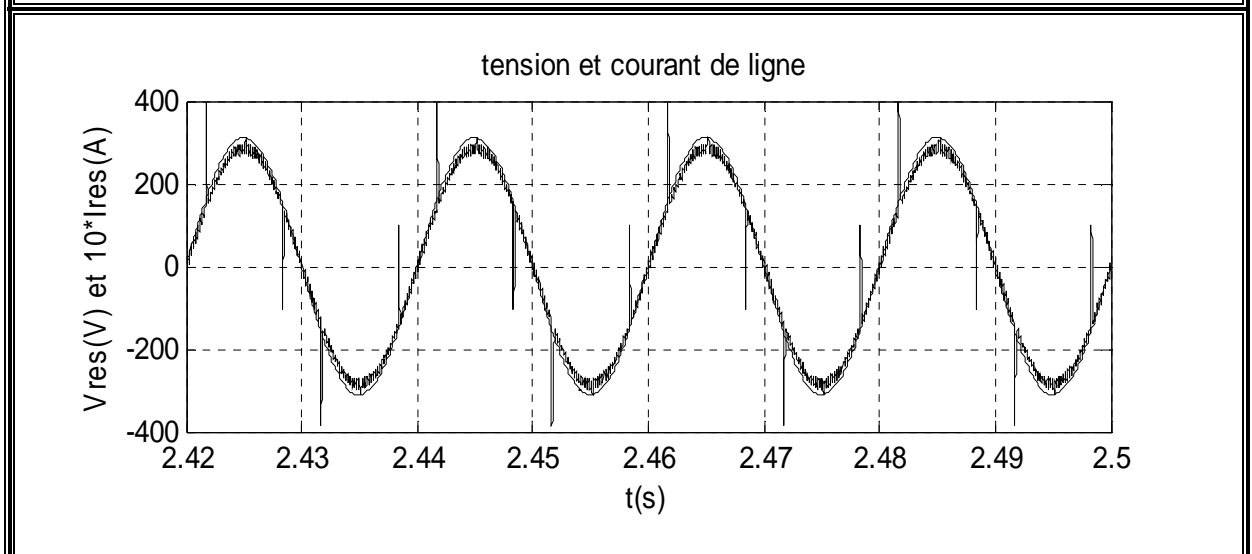
Pour $\alpha=0$



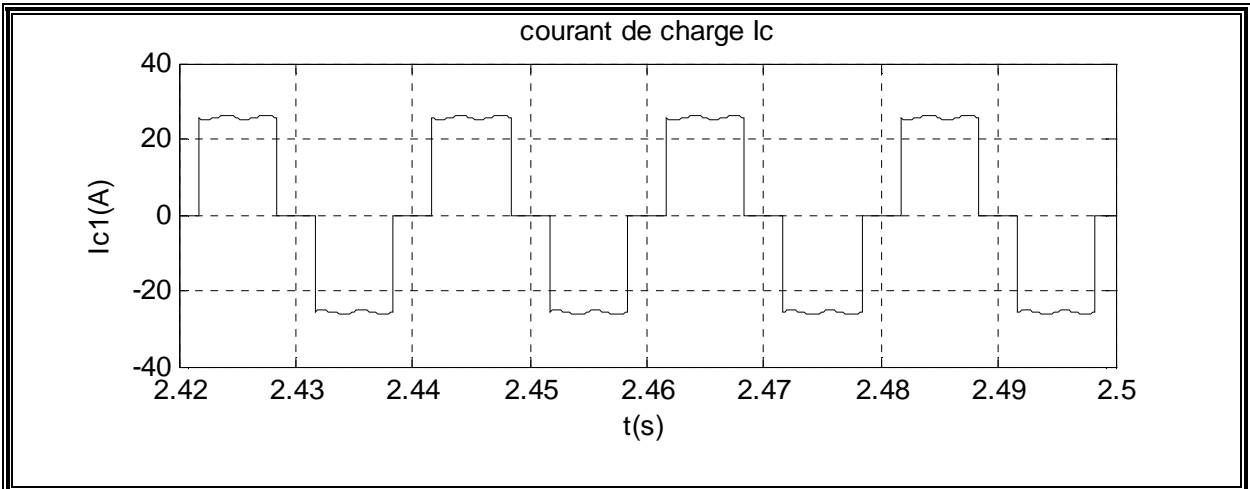
(Fig. III.12.a) : Courant de réseau après filtrage



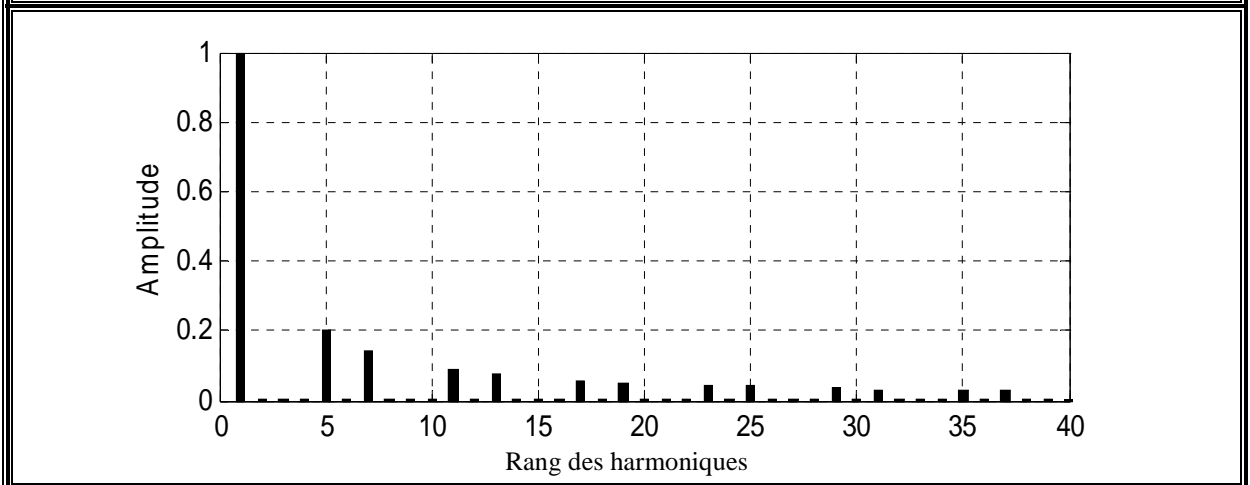
(Fig. III.12.b) : Spectre du courant de réseau après filtrage



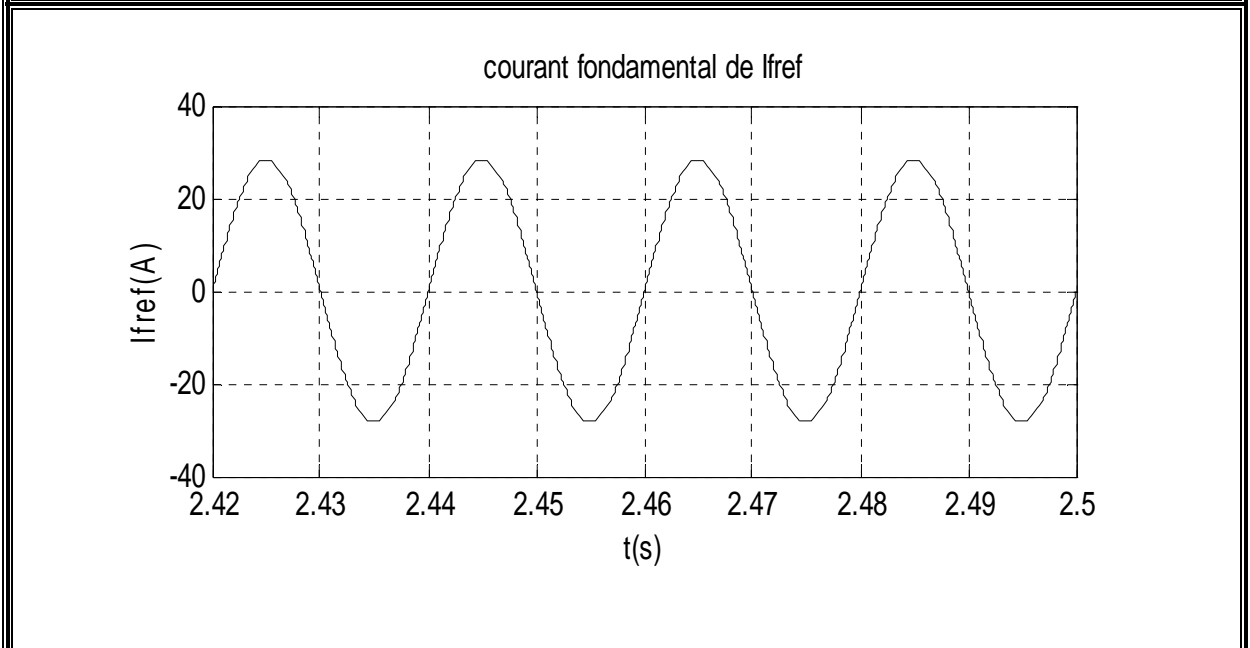
(Fig. III.12.c) : Tension et courant de réseau après filtrage



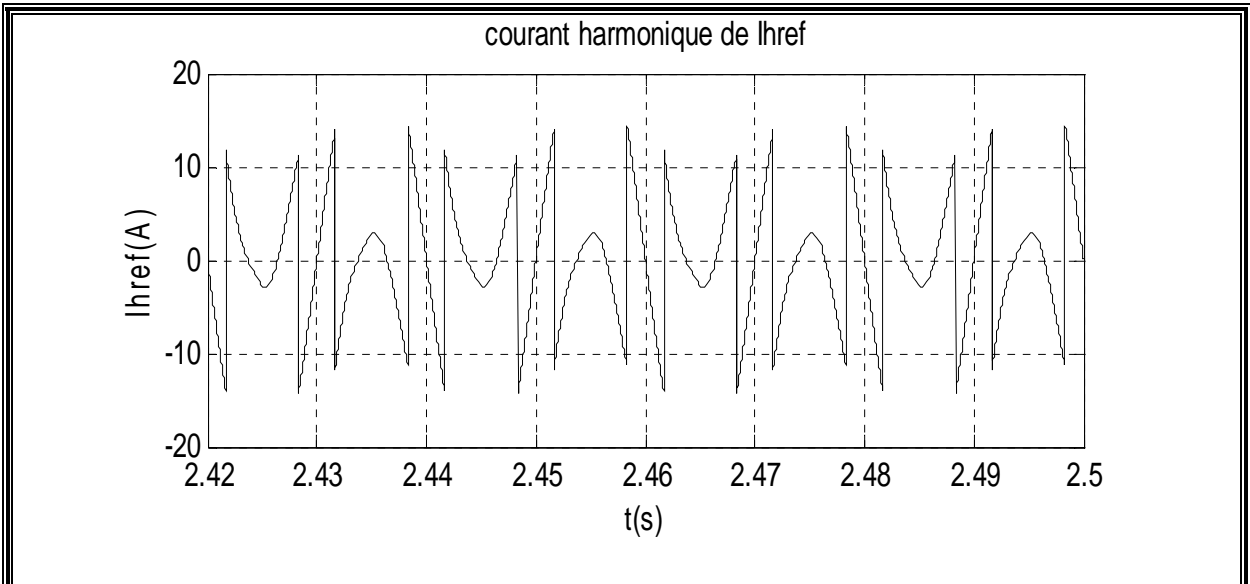
(Fig. III.12.d) : Courant de charge



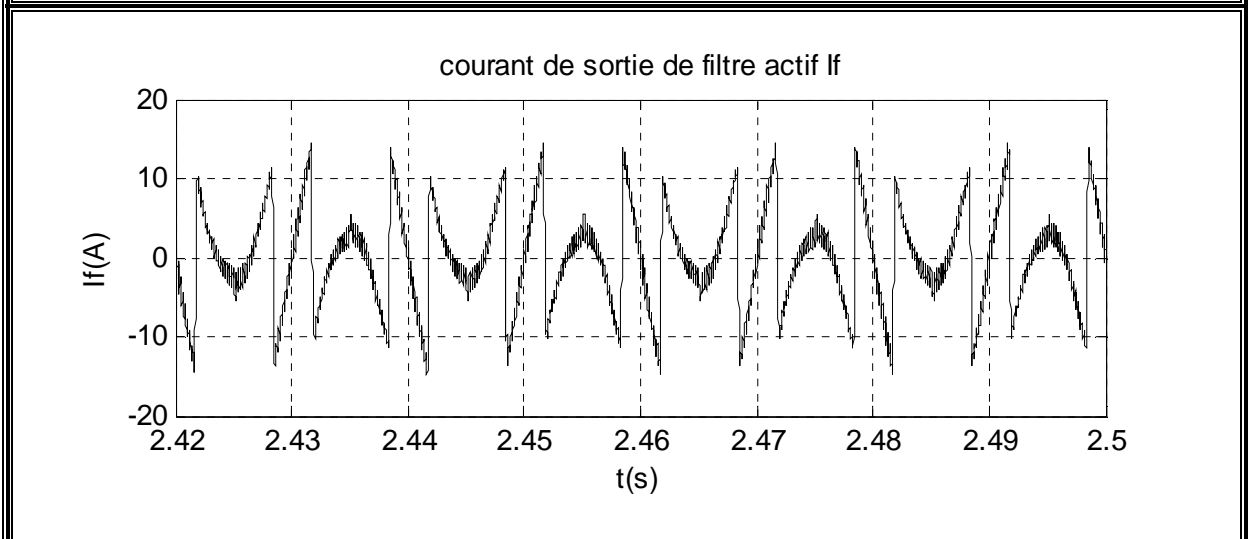
(Fig. III.12.e) : Spectre du courant de charge



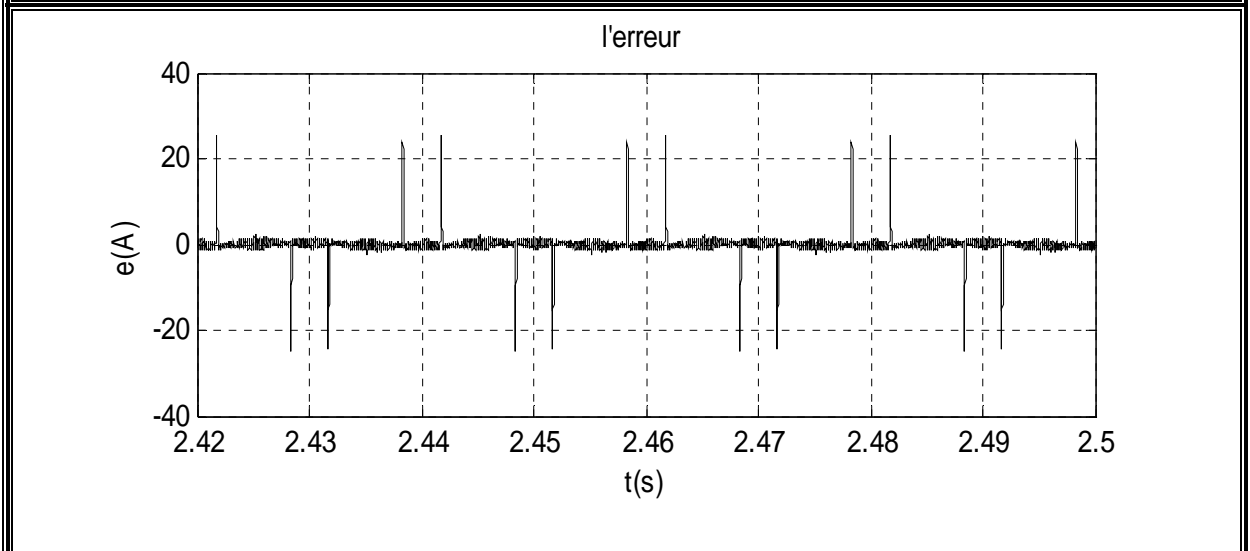
(Fig. III.12.f) : Courant fondamental de référence



(Fig. III.12.g) : Courant harmonique de référence

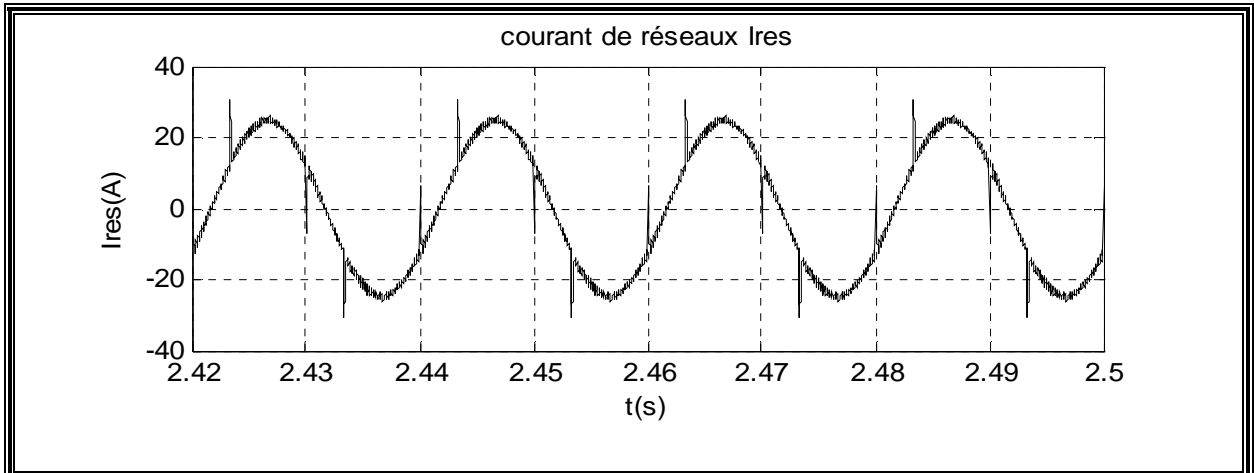


(Fig. III.12.h) : Courant de sortie du filtre actif

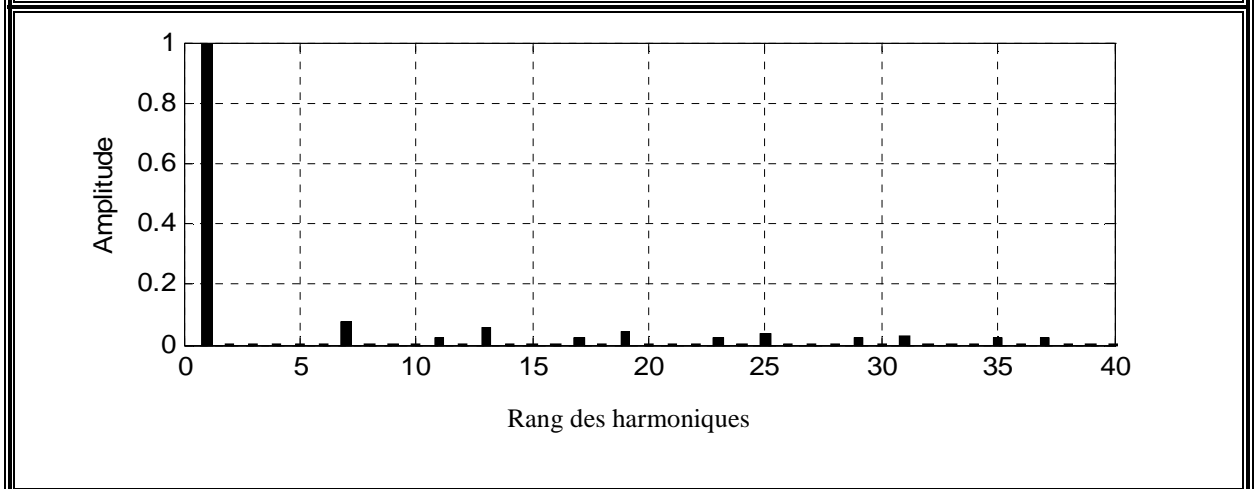


(Fig. III.12.i) : Courant : $(I_{href} - I_f)$ « erreur »

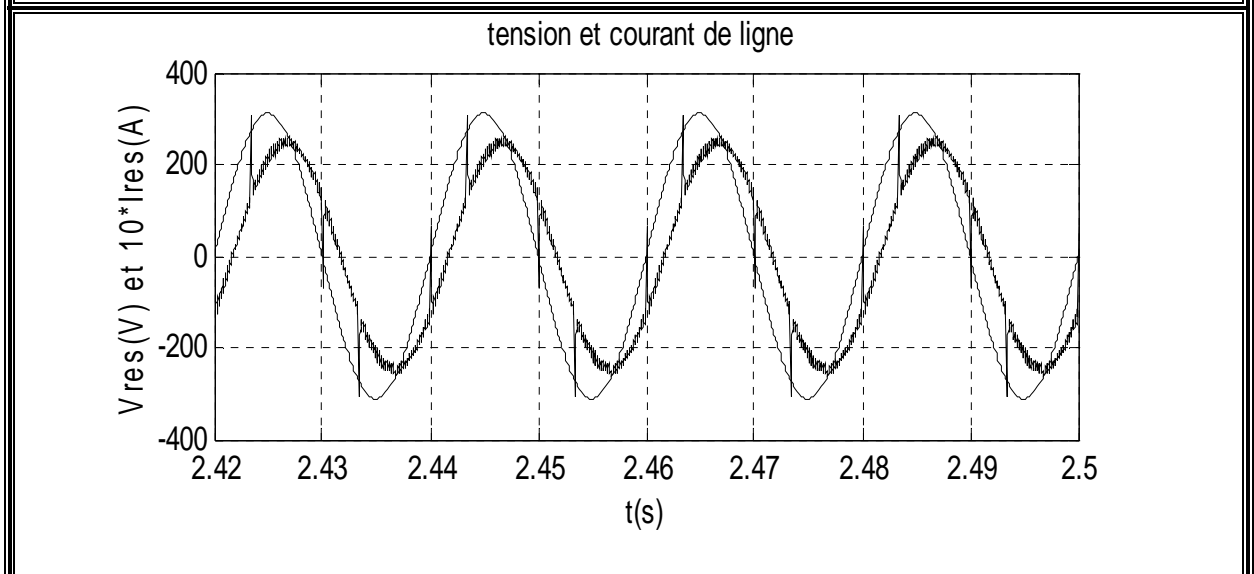
Pour alpha=30



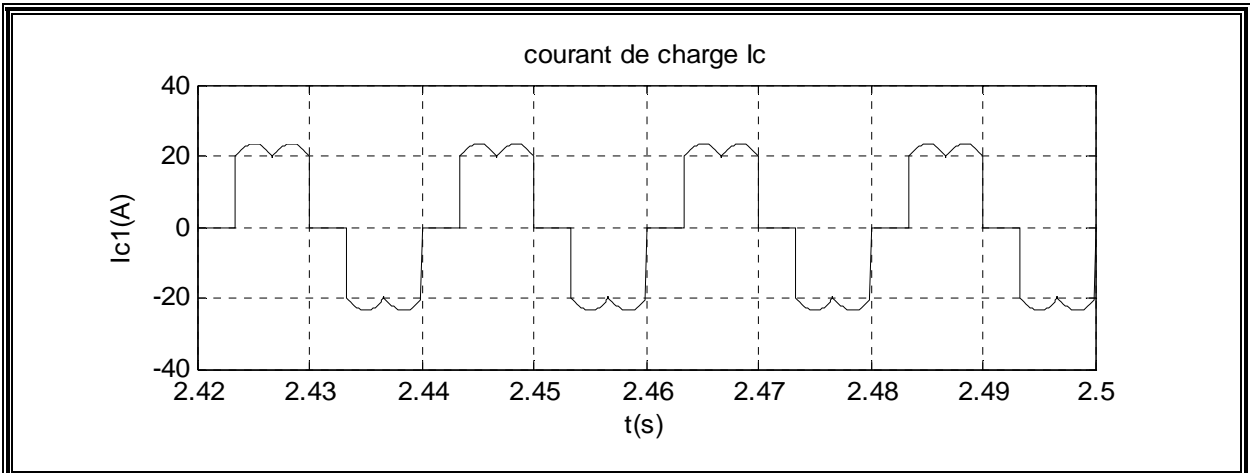
(Fig. III.13.a) : Courant de réseau après filtrage



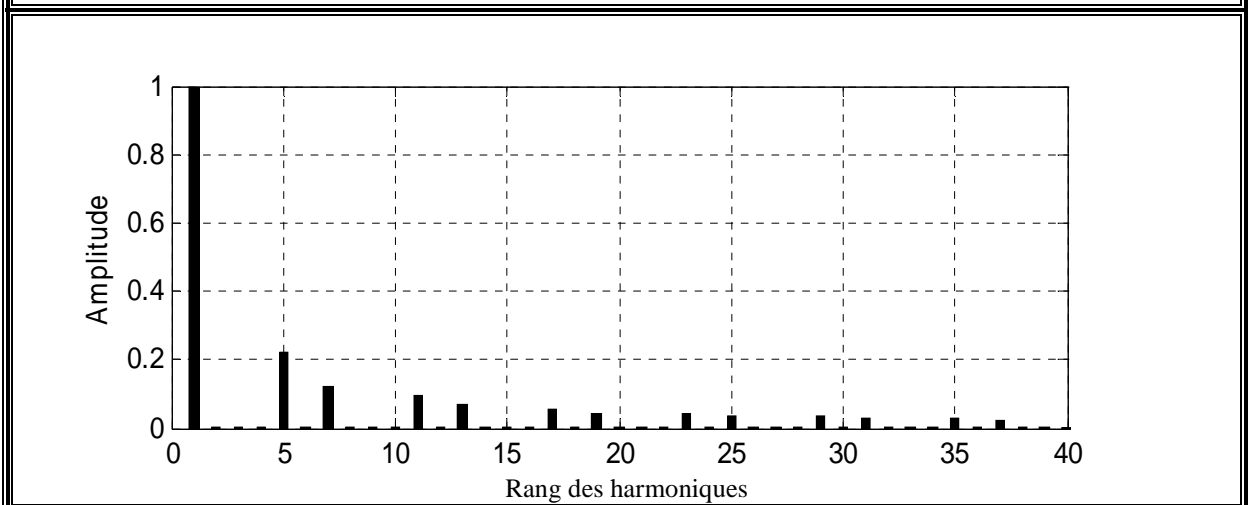
(Fig. III.13.b) : Spectre du courant de réseau après filtrage



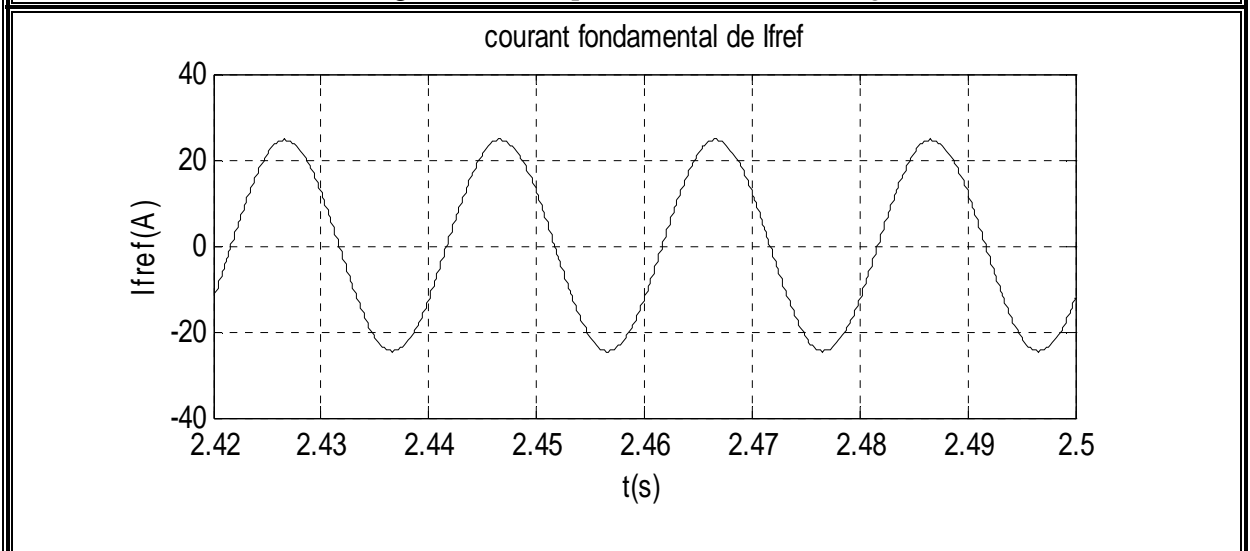
(Fig. III.13.c) : Tension et courant de réseau après filtrage



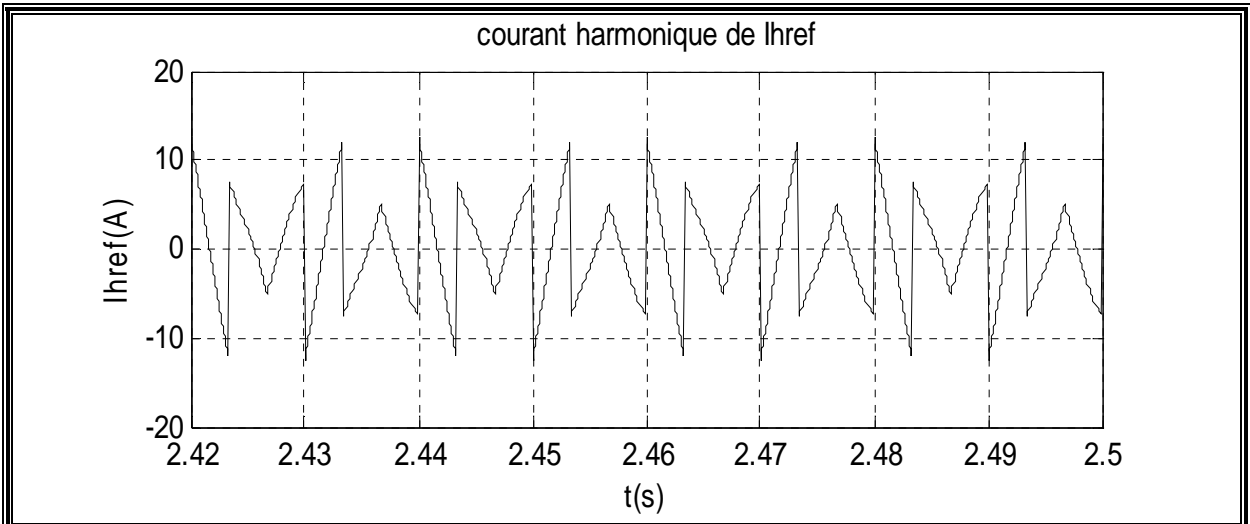
(Fig. III.13.d) : Courant de charge



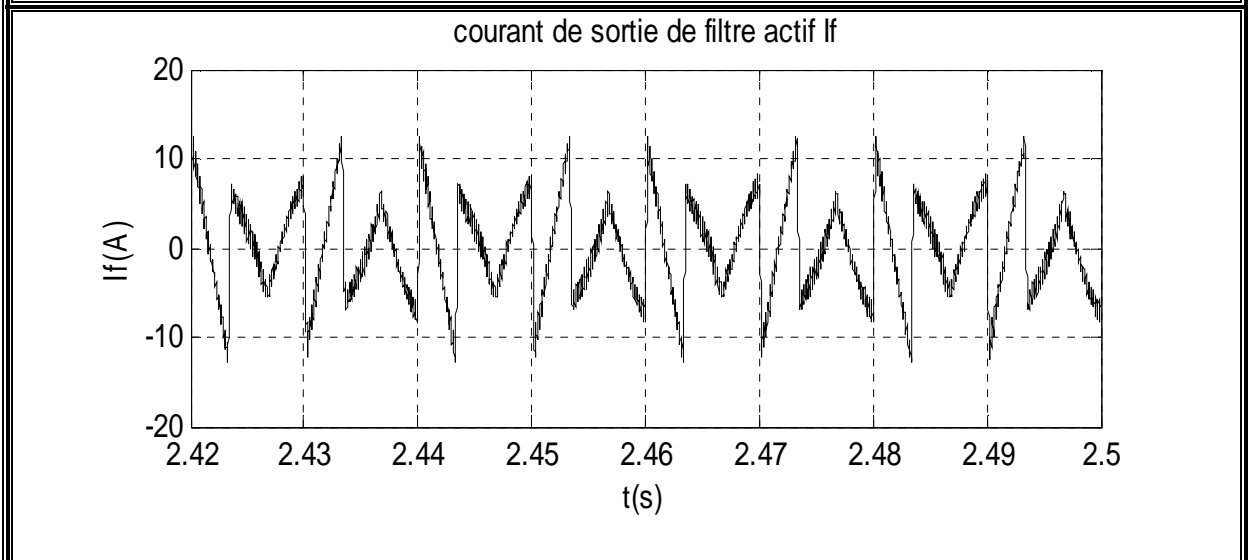
(Fig. III.13.e) : Spectre du courant de charge



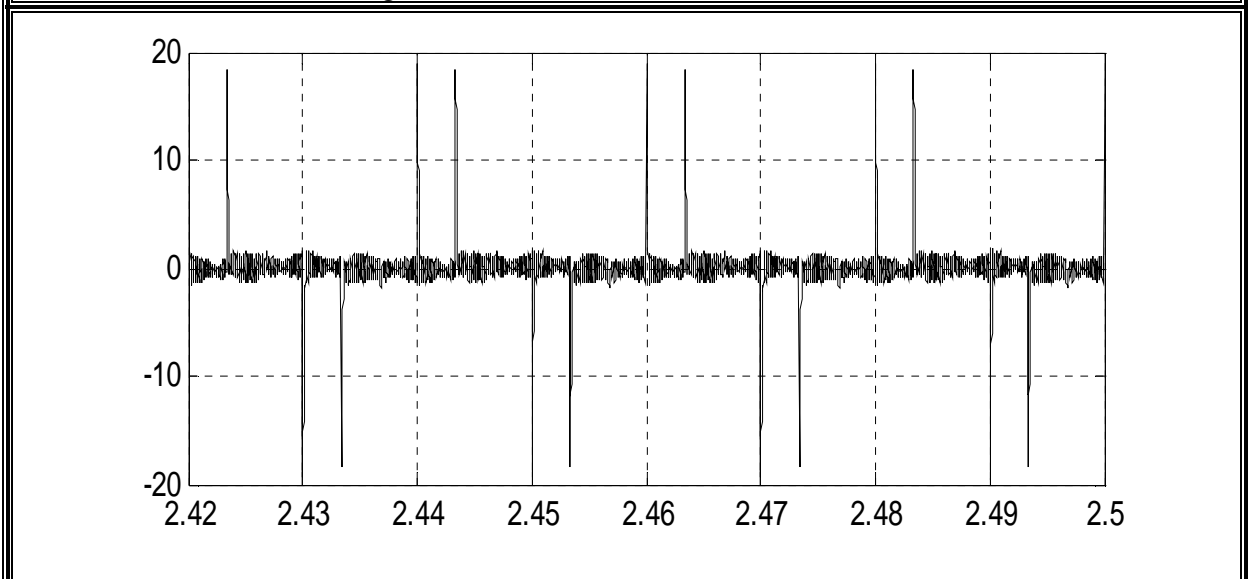
(Fig. III.13.f) : Courant fondamental de référence



(Fig. III.13.g) : Courant harmonique de référence



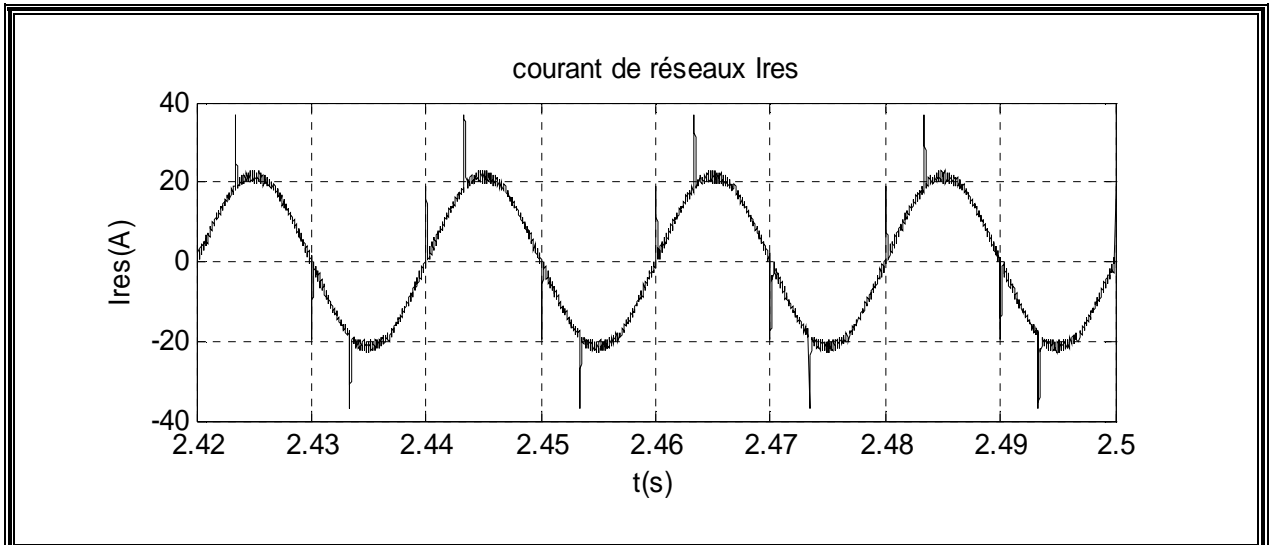
(Fig. III.13.h) : Courant de sortie du filtre actif



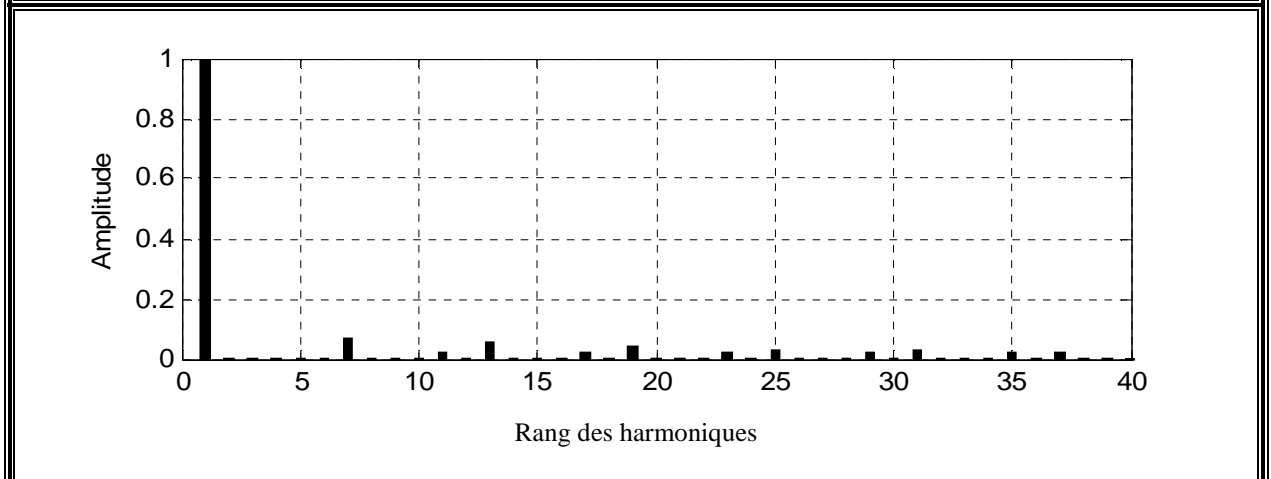
(Fig. III.13.i) : Courant : $(I_{href} - I_f)$ « erreur »

III.4.5.2 Avec compensation :

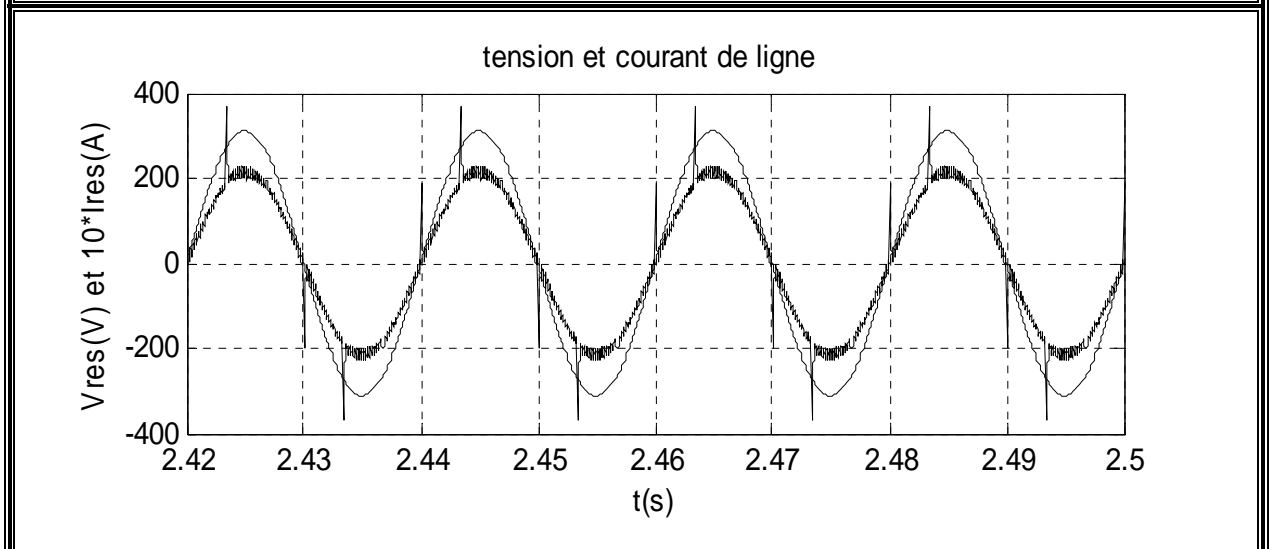
Pour $\alpha=30^\circ$



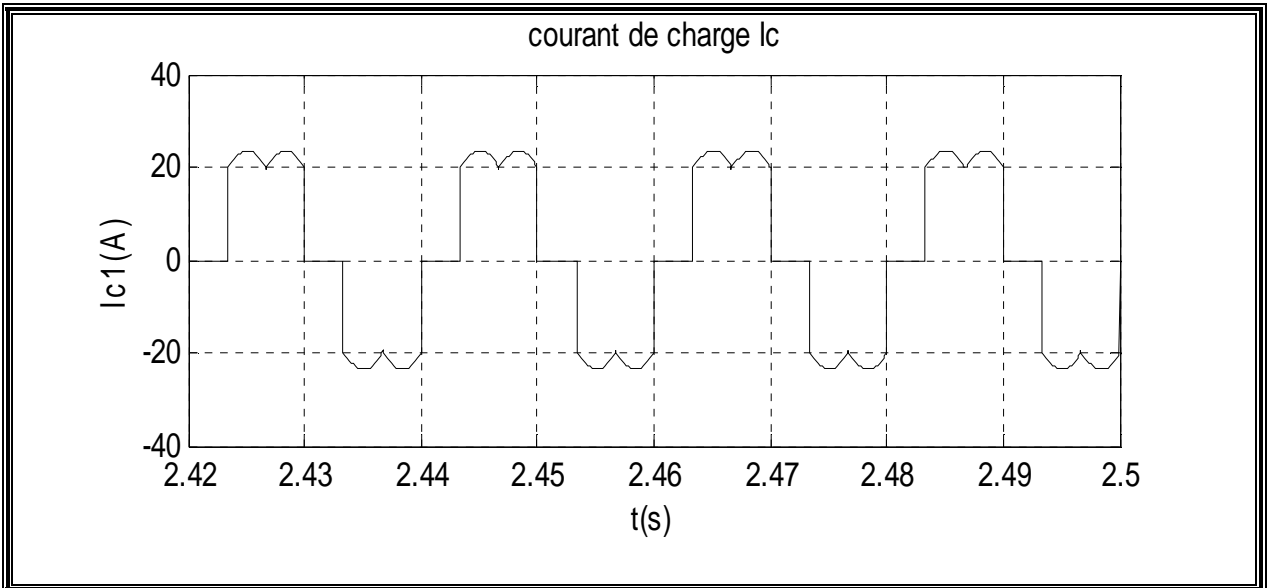
(Fig. III.14.a) : Courant de réseau après filtrage



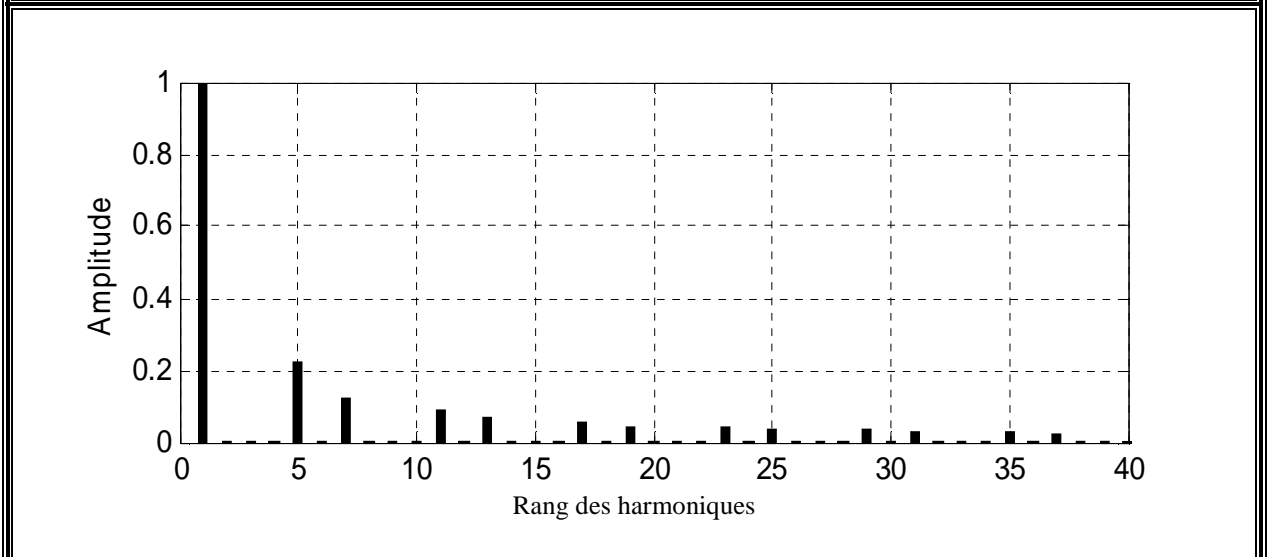
(Fig. III.14.b) : Spectre du courant de réseau après filtrage



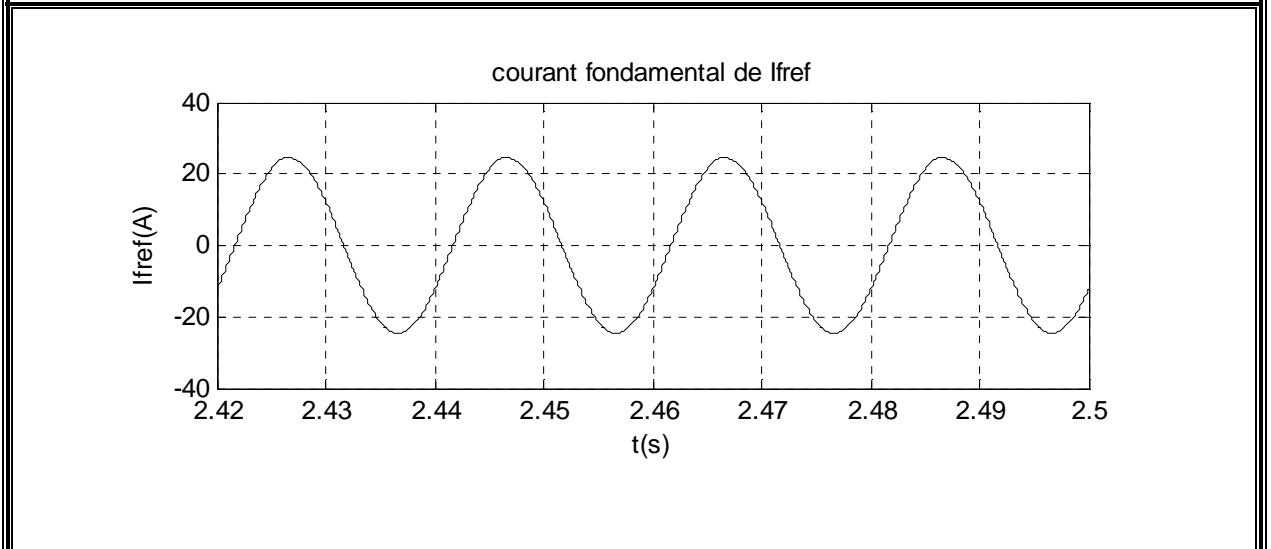
(Fig. III.14.c) : Tension et courant de réseau après filtrage



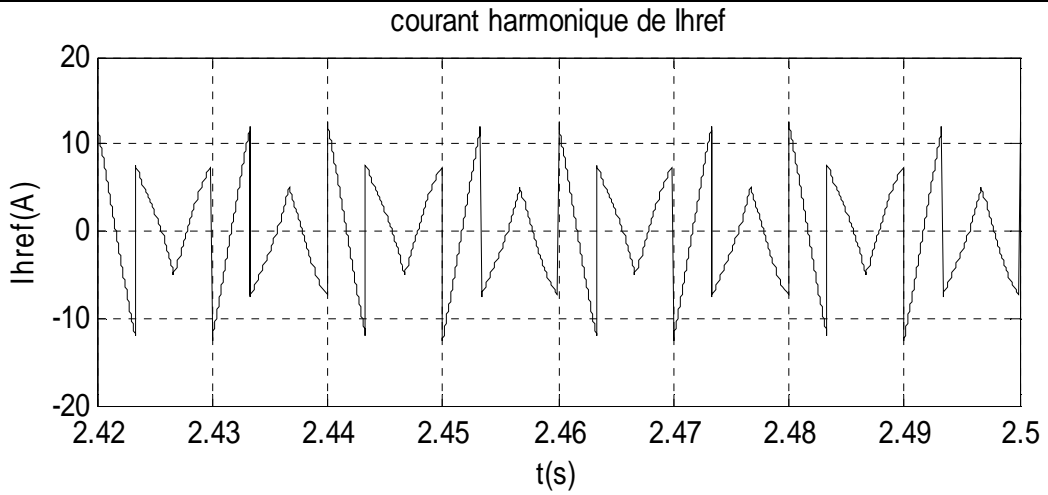
(Fig. III.14.d) : Courant de charge



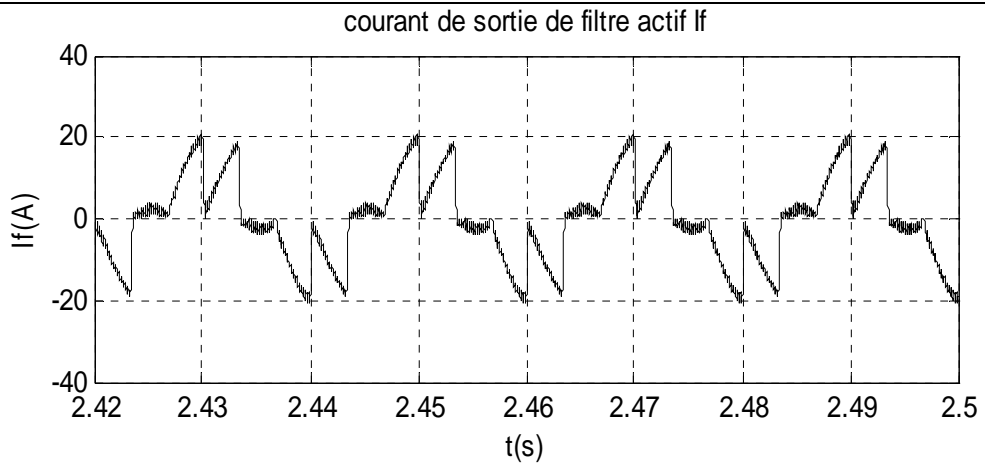
(Fig. III.14.e) : Spectre du courant de charge



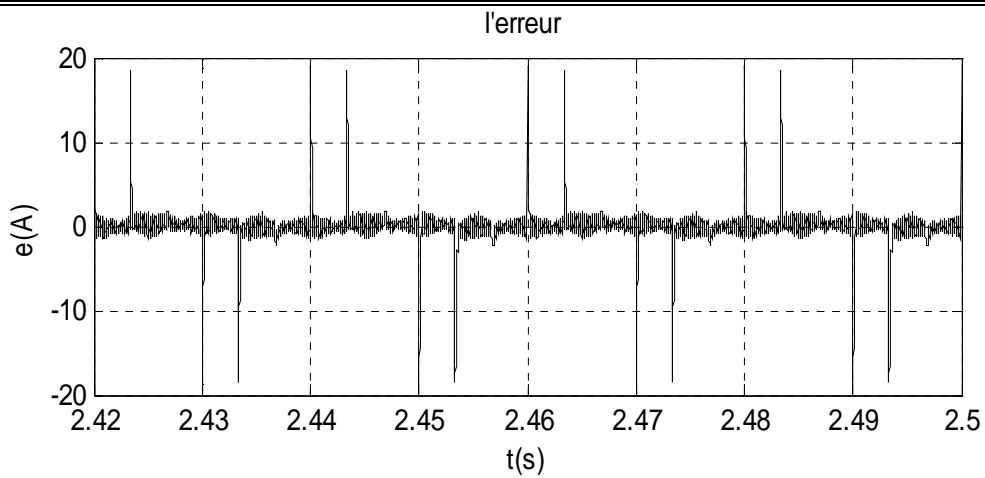
(Fig. III.14.f) : Courant fondamental de référence



(Fig. III.14.g) : courant harmonique de référence



(Fig. III.14.h) : courant de sortie du filtre actif



(Fig. III.14.i) : Courant : $(I_{href} + I_r - I_f)$ « erreur »

III.4.6 Interprétation des résultats en utilisant la commande MLI :**III.4.6.1 Sans compensation de l'énergie réactive :**

Le filtre est commandé par la stratégie de commande triangulo-sinusoïdale symétrique. On l'applique pour une charge non linéaire constituée d'un pont redresseur à diodes (Pour $\alpha = 0$) et d'un pont redresseur à thyristors (Pour $\alpha = 30^\circ$ et $\alpha = 60^\circ$) débitant sur une machine à courant continue.

On remarque que les courants harmoniques générés par le filtre suivent leurs références. Ce qui valide l'algorithme de commande que l'on a utilisé. A cause de la présence de $Lf(di/dt)$, ces courants ne peuvent pas suivre leurs références au niveau des variations brusques. D'où l'apparition des piques au niveau du courant de source qui est sinusoïdal.

Les figures (Fig. III.12) et (Fig. III.13) montrent respectivement les formes des courants simulés pour la stratégie de commande triangulo-sinusoïdale à porteuse symétrique, dans le cas d'un redresseur à diodes puis d'un redresseur à thyristors pour 2 angles d'amorçage $\pi/6$ et $\pi/3$ (**voir l'annexe 2 pour $\alpha = 60^\circ \ll \pi/3 \gg$**), pour $m=36$.

On constate que le courant est en phase avec la tension du réseau dans le cas du redresseur à diodes. Par contre, pour le redresseur à thyristors, le courant est déphasé par rapport à la tension du réseau, et ce déphasage augmente en fonction de l'angle d'amorçage.

III.4.6.2 Avec compensation de l'énergie réactive :

En utilisant la même stratégie de commande que précédemment, on applique le filtre actif pour une charge non linéaire constituée d'un pont redresseur à thyristors débitant sur une machine à courant continue.

Les figures (Fig. III.14) montrent respectivement les formes des courants simulés du redresseur à thyristors pour 2 angles d'amorçage différents $\pi/6$ et $\pi/3$ (**voir l'annexe 2 pour $\alpha = 60^\circ \ll \pi/3 \gg$**), pour $m=36$.

On remarque que les courants générés par le filtre suivent bien leurs références. Par contre, ces courants ne peuvent pas suivre leurs références au niveau des variations brusques à cause de la présence de $Lf(di/dt)$, il y a alors une apparition de piques au niveau du courant de source qui est sinusoïdal. **[KET-05]**.

On constate que le courant de ligne, après compensation des courants harmoniques et d'énergie réactive, est sinusoïdal et en phase avec sa tension. Ce qui n'est pas le cas pour le filtrage sans compensation d'énergie réactive.

III.5 CONCLUSION :

Dans ce chapitre, on a étudié les performances des algorithmes de commande du filtre actif parallèle appliqué sur la charge dynamique non linéaire.

Les résultats de simulation montrent l'efficacité de la méthode directe « méthode des puissances instantanées réelles et imaginaires. » à identifier les courants harmoniques afin qu'ils soient filtrés. Les stratégies de commande utilisées ont prouvées leurs performances en vue du bon fonctionnement du filtre avec et sans compensation de l'énergie réactive.

Finalement, l'utilisation de l'onduleur à deux niveaux pour le filtrage actif permet non seulement l'élimination des courants harmoniques, mais aussi la compensation de l'énergie réactive.

CHAPITRE IV :

COMBINAISON

PARALLELE - SERIE

« UPFC »

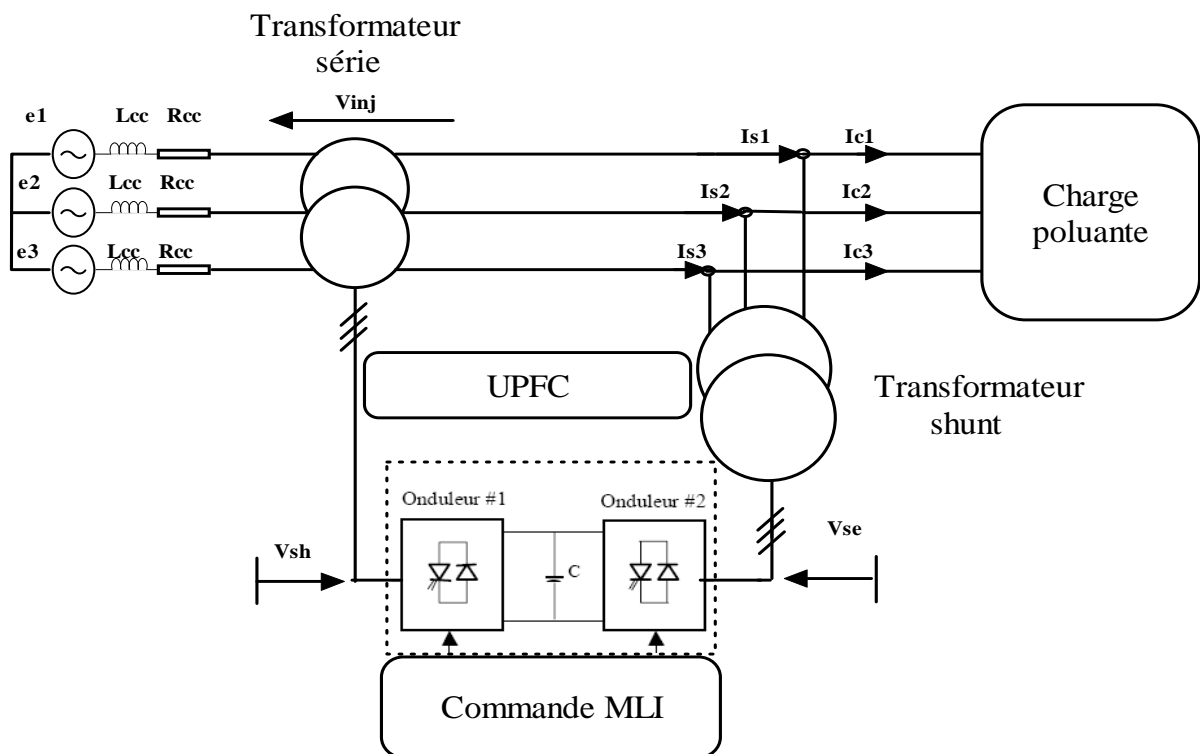
IV.1 INTRODUCTION :

Nous avons étudié dans le chapitre I, les type des perturbations des réseaux électriques et les trois type du système FACTS : parallèle, série et hybride « série-parallèle ». L'UPFC (Unified Power Flow Controller), appelé aussi Déphaseur Régulateur Universel (DRU) ou variateur de charge universel, est l'un des plus performants des composants FACTS. Il est capable de contrôler, simultanément et indépendamment, la puissance active et la puissance réactive de la ligne. Afin de pouvoir étudier le comportement du système et la synthèse des lois de commande, il est nécessaire d'établir la modélisation des différentes parties du système globale de L'UPFC.

IV.2 MODELISATION ET COMMANDE DE L'UPFC :

IV.2.1 Structure générale de L'UPFC :

Le dispositif UPFC est constitué de deux onduleurs triphasés à deux niveaux, l'un connecté en parallèle au réseau par l'intermédiaire d'un transformateur triphasé et l'autre connecté en série avec le réseau via trois transformateurs monophasés dont les primaires sont reliés, entre eux, en étoile. Les deux onduleurs sont interconnectés par un bus continu et par un condensateur de filtrage comme indiqué sur la figure IV.1 [GHO-03].



(Fig.IV.1) : Schéma simplifié d'un UPFC connecté au réseau électrique.

IV.2.2 Principe de fonctionnement de l'UPFC :

L'onduleur série injecte une tension à la même fréquence que celle du réseau et dont l'amplitude et la phase sont ajustables. Ce réglage d'amplitude et de phase permet d'obtenir trois modes de fonctionnement de la partie série :

- Contrôle de tension : la tension injectée est en phase avec celle du nœud S (nœud de raccordement au réseau électrique).
- Contrôle de l'impédance de ligne : la tension injectée est en quadrature avec le courant de ligne. Ce mode permet de faire varier l'impédance de la ligne comme un compensateur série.
- Contrôle de phase : l'amplitude et la phase de la tension injectée sont calculées de manière à obtenir le même module de la tension avant et après l'UPFC.

Le but principal de ces trois modes de fonctionnement est le contrôle des puissances active et réactive qui transitent dans la ligne. De plus, l'UPFC est capable de combiner les différentes compensations et de basculer d'un mode de fonctionnement à un autre [BEL-01].

La partie shunt peut être utilisée afin de compenser la puissance réactive pour le maintien du plan de la tension au nœud S et éventuellement fournir de la puissance active injectée dans le réseau par la partie série.

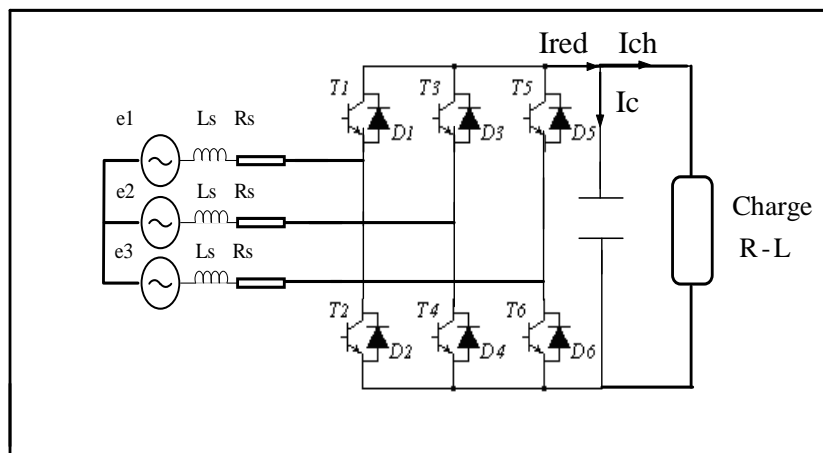
IV.2.3 Modélisation de la partie shunt :

La partie shunt de l'UPFC est identique à celle du filtre actif parallèle, c'est un onduleur triphasé à deux niveaux, cette partie est bien détaillée dans le chapitre précédent.

(Voir : « III.2.1 Modélisation de l'onduleur triphasé à deux niveaux. p37. »).

IV.2.4 Modélisation du redresseur MLI de courant à deux niveaux :

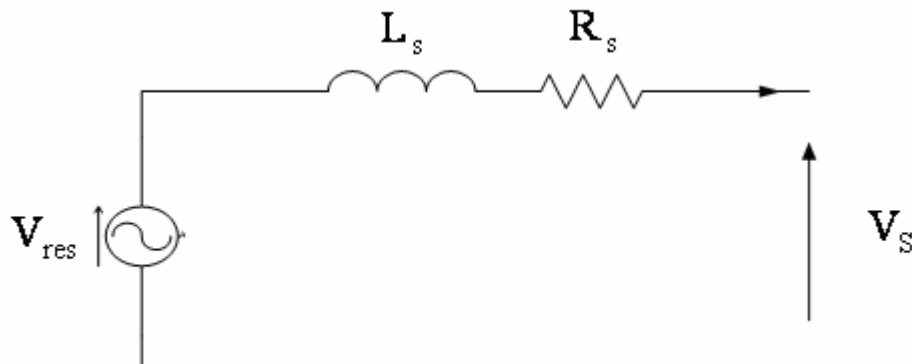
La figure IV.2 représente un dispositif qui permet de générer des tensions à partir d'un réseau alternatif. C'est un convertisseur alternatif-continu dit redresseur à deux niveaux



(Fig.IV.2) : Redresseur de courant triphasé à MLI à deux niveaux

IV.2.4.1 Modélisation de la boucle de courant (interne) :

Le filtre intermédiaire entre le réseau et le redresseur triphasé à deux niveaux peut être modélisé par le circuit monophasé $R_s L_s$ représenté par la figure IV.3.



(Fig.IV.3) : Modélisation d'une phase du réseau.

En appliquant les lois de Kirchhoff pour ce circuit on trouve les équations suivantes :

$$V_{resk} = L_s \frac{di_{sk}}{dt} + R_s i_{sk} + V_s \quad (IV.1)$$

Avec : $k=1,2$ et 3

V_s la tension d'entrée du redresseur MLI à deux niveaux qui peut s'écrire sous la forme suivant :

$$\begin{bmatrix} V_{s1} \\ V_{s2} \\ V_{s3} \end{bmatrix} = \frac{U_c}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{11} \\ F_{21} \\ F_{31} \end{bmatrix} \quad (IV.2)$$

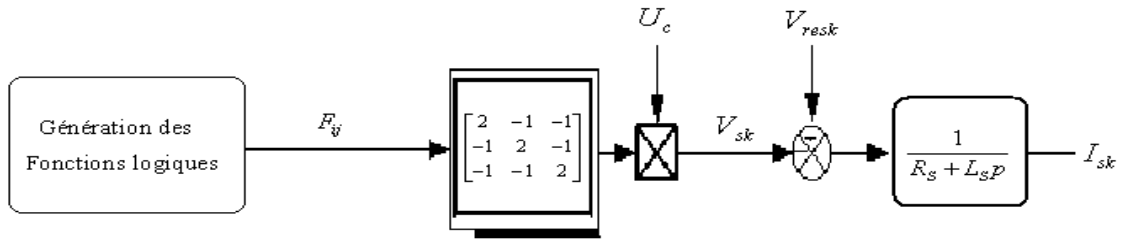
La relation (IV.2) a été détaillée dans le chapitre précédent (p.39)

Dans le cas général, les onduleurs sont naturellement réversibles. Comme ils peuvent fonctionner en onduleur et transférer l'énergie de la source de tension continue à la source de courant alternatif, ils peuvent aussi fonctionner en redresseurs et assurer le transfert d'énergie dans le sens inverse.

La fonction de transfert en boucle ouverte de la boucle de régulation de courant s'écrit donc :

$$G(S) = \frac{i_{sk}}{V_{resk} - V_{sk}} = \frac{1}{R_s + L_s p} \quad (IV.3)$$

Le modèle de commande du redresseur MLI à deux niveaux est donné par la figure IV.4.



(Fig.IV.4) : Modèle de commande du redresseur MLI à deux niveaux

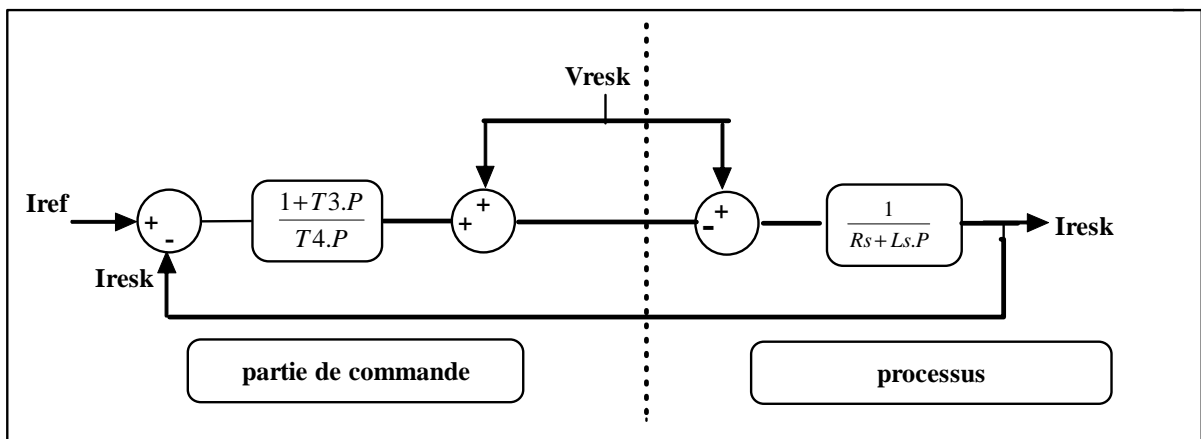


Fig.IV.5 Algorithme de réglage de courant du redresseur triphasé à deux niveaux

IV.2.4.2 Modélisation de la boucle de tension (externe) :

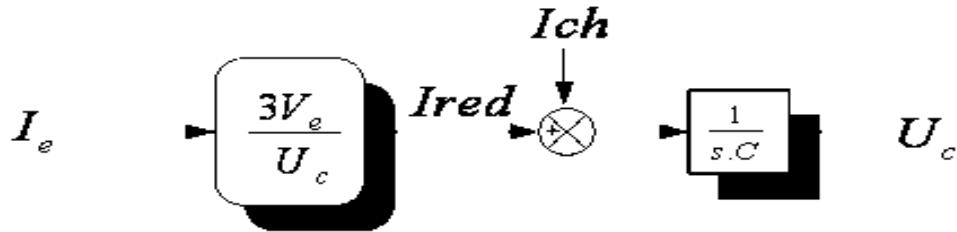
La boucle de tension impose la valeur efficace I_{eff} des courants de référence du réseau. Pour modéliser cette boucle de tension, on utilise le principe de la conservation de la puissance instantanée avec l'hypothèse d'un redresseur sans pertes :

$$\begin{cases} P_e = \sum_{k=1}^3 \left(V_{resk} \cdot i_{sk} - R_s \cdot i_{sk}^2 - \frac{1}{2} \cdot L_s \cdot \frac{di_{sk}^2}{dt} \right) \\ P_{ch} = U_c \cdot I_{red} = U_c (i_c + i_{ch}). \end{cases} \quad (IV.4)$$

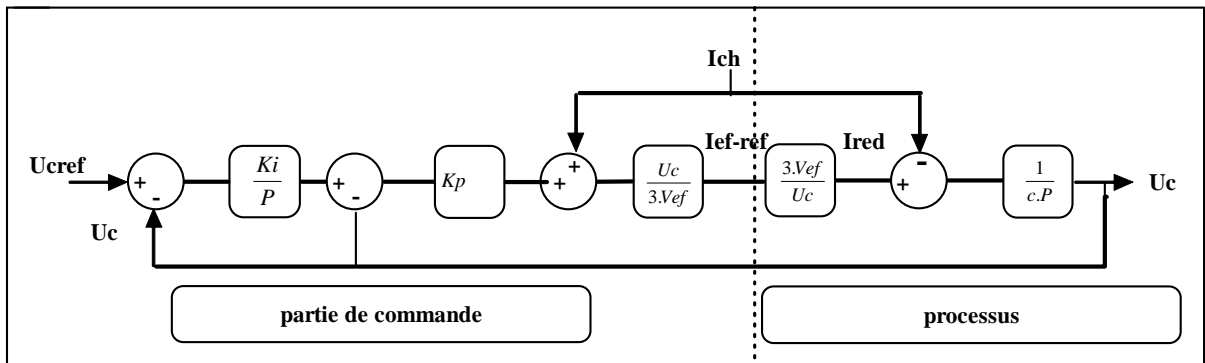
En négligeant la puissance dissipée par effet Joule dans les résistance R_s du réseau, et on supposant que les courants du réseau sont sinusoïdaux et en phase avec leurs tensions correspondantes, on peut écrire alors :

$$P = 3.V_{eff}I_e = U_c \cdot I_{red} \quad (IV.5)$$

Le modèle de la boucle de tension déduit de la relation (IV.4) est représenté par la figure (IV.6).



(Fig.IV.6) : Modèle de la boucle de tension du redresseur triphasé à deux niveaux.



(Fig.IV.7) : Algorithme de réglage de la tension redressée U_c du redresseur triphasé à deux niveaux.

IV.2.5 Dimensionnement des régulateurs de courant et de tension:

IV.2.5.1-La boucle de courant :

La fonction de transfert du correcteur PI est :

$$G(p) = \frac{1 + pT_3}{pT_4} \quad (IV.6)$$

Où T_3 et T_4 sont deux constantes de temps à déterminer.

La fonction de transfert en boucle ouverte de redresseur à deux niveaux et le filtre R_s, L_s est :

$$FTBO = G(p) \cdot \frac{1}{R_s + L_s \cdot p} \quad (IV.7)$$

Donc :

$$FTBO = \frac{1+pT_3}{pT_4} \cdot \frac{1/R_s}{1+\frac{L_s}{R_s} \cdot p} \quad (IV.8)$$

On pose $T_3 = \frac{L_s}{R_s}$ pour compenser la dynamique propre du système.

La fonction de transfert en boucle fermée sera alors :

$$FTBF = \frac{1}{1+R_s \cdot T_3 \cdot p} = \frac{1}{1+\tau \cdot p} = \frac{i_{resk}}{i_{refk}} \quad (IV.9)$$

Avec : $\tau = R_s \cdot T_3$

On prend : $\tau = \frac{T_3}{10} \Rightarrow T_4 = \frac{T_3}{10 \cdot R_s}$

Ce choix permet d'améliorer le temps de réponse du système en boucle fermée.

On prend :

$R_s = 0.5\Omega$ et $L_s = 5 \cdot 10^{-3} \text{ H}$.

$T_3 = 10^{-2} \text{ s}$

$T_4 = 2 \cdot 10^{-3} \text{ s}$

IV.2.5.2-La boucle de tension :

L'algorithme de l'asservissement de la tension continue U_c est donné dans la figure IV.6 après compensation des courants de charge i_{ch} .

La fonction de transfert est :

$$F_1 = \frac{U_c}{Y_{ref}} = \frac{1}{1+\frac{c}{K_p} \cdot p} = \frac{1}{1+\tau_1 \cdot p} \quad (IV.10)$$

Avec : $\tau_1 = \frac{c}{K_p}$

On pose la valeur de $\tau_1 = 0.0125 \text{ s}$ d'où : $K_p = 0.4 \text{ V/A}$

La fonction de transfert en boucle fermée sera alors :

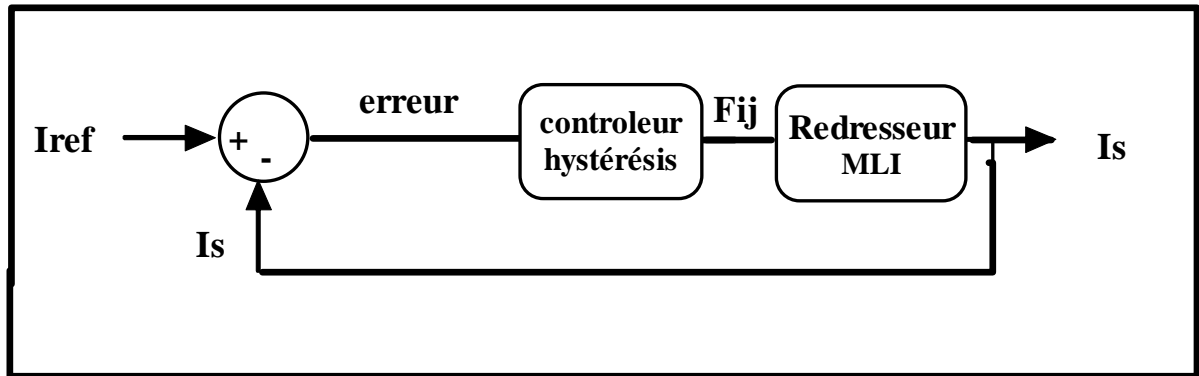
$$FTBF = \frac{U_c}{U_{cref}} = \frac{1}{1+T_i \cdot p + T_i \cdot \tau_1 \cdot p^2} \quad (IV.11)$$

On utilise le critère d'ajustement optimale avec un amortissement $\varphi = 63.5^\circ$ et $\Delta\varphi = 4.3\%$

On trouve que $\frac{T_i}{\tau_i} = 2$ donc $\frac{1}{K_i} = T_i = 0.025 \Rightarrow K_i = 40 \text{ V/A}$

IV.2.6 Les stratégies de commande appliquée au redresseur à MLI :

IV.2.6.1 Commande par hystérésis:



(Fig.IV.8) : Schéma synoptique de la commande par à hystérésis appliquée au redresseur à MLI

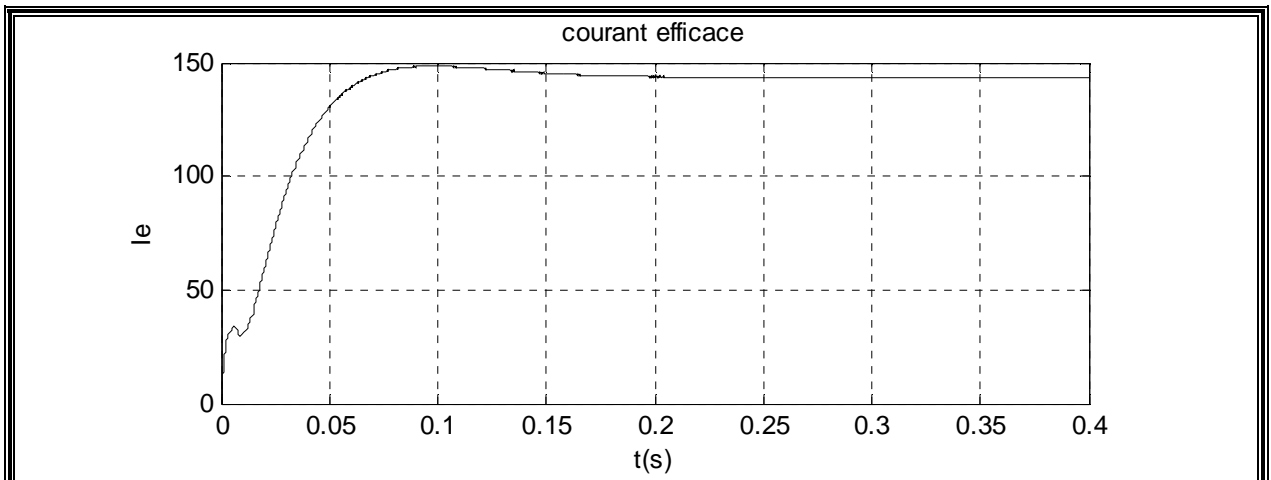
Le principe de cette commande à été établit dans le chapitre III, cette commande permet d’avoir un courant de réseau pratiquement sinusoïdal et en phase avec la tension. Les courants de référence qui alimentent notre redresseur à deux niveaux sont définis par le système ci-dessous.

$$\begin{cases} i_{ref\ 1} = \sqrt{2} I_e \sin \omega t \\ i_{ref\ 2} = \sqrt{2} I_e \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ i_{ref\ 3} = \sqrt{2} I_e \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (IV.12)$$

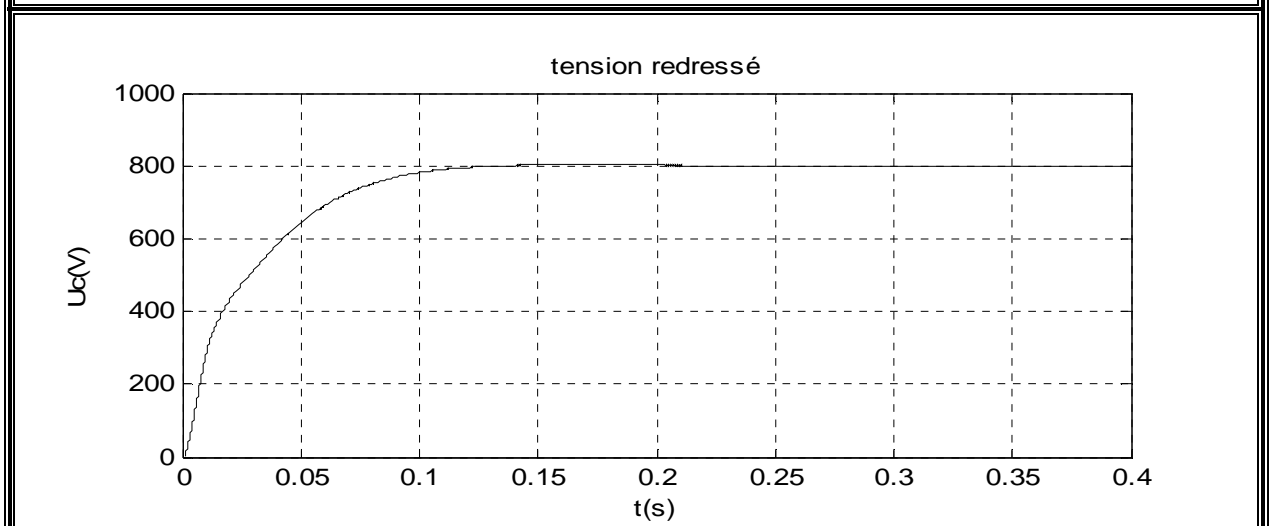
Où I_e la valeur efficace de courant calculé par l’algorithme de réglage de la tension continue afin de vérifier la conservation de la puissance à l’entré du redresseur.

IV.2.6.2 Résultats de simulation :

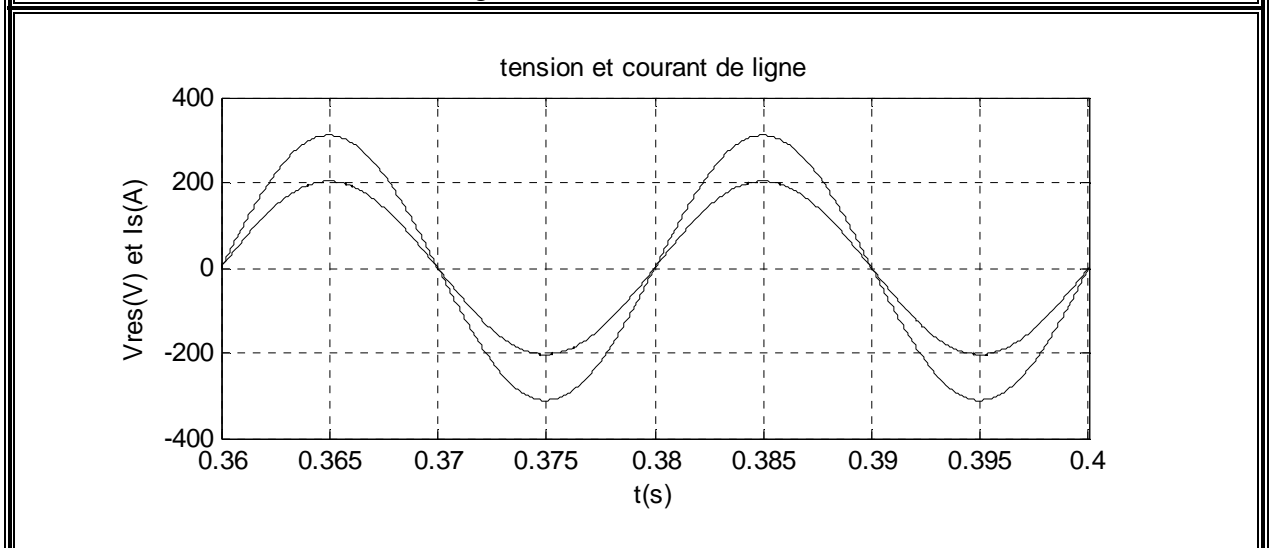
Avec : charge $R=10 \Omega$,



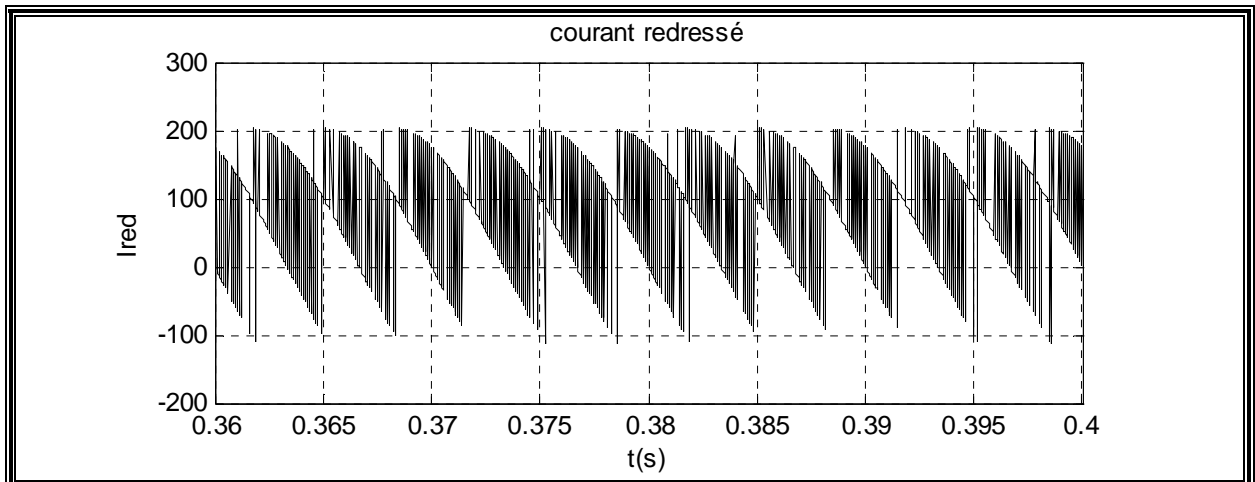
(Fig. IV.9.a) : Courant efficace



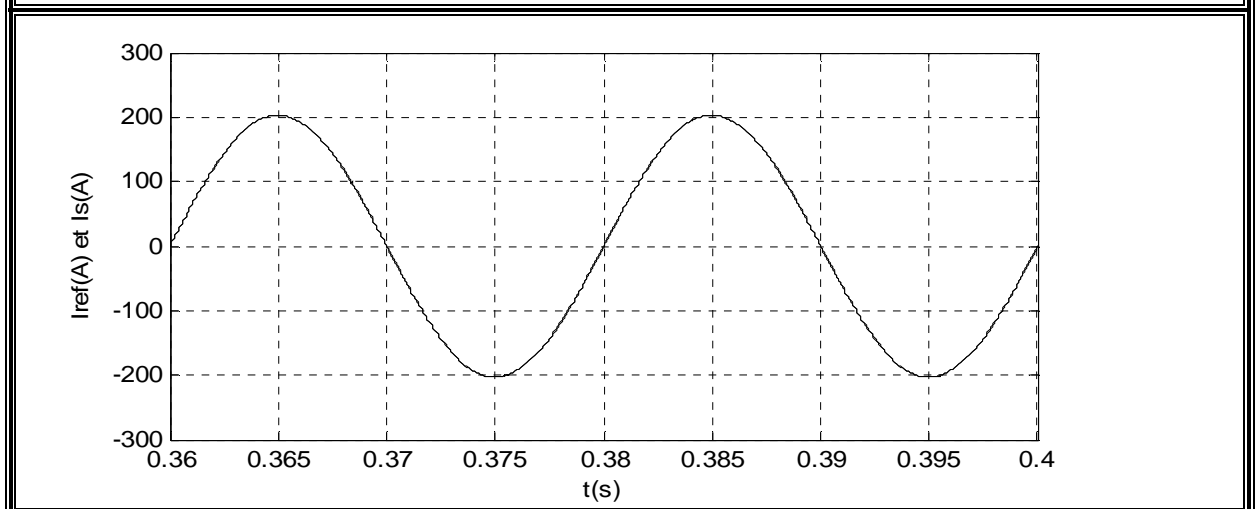
(Fig. IV.9.b) : Tension redressée



(Fig. IV.9.c) : Tension et courant de réseau



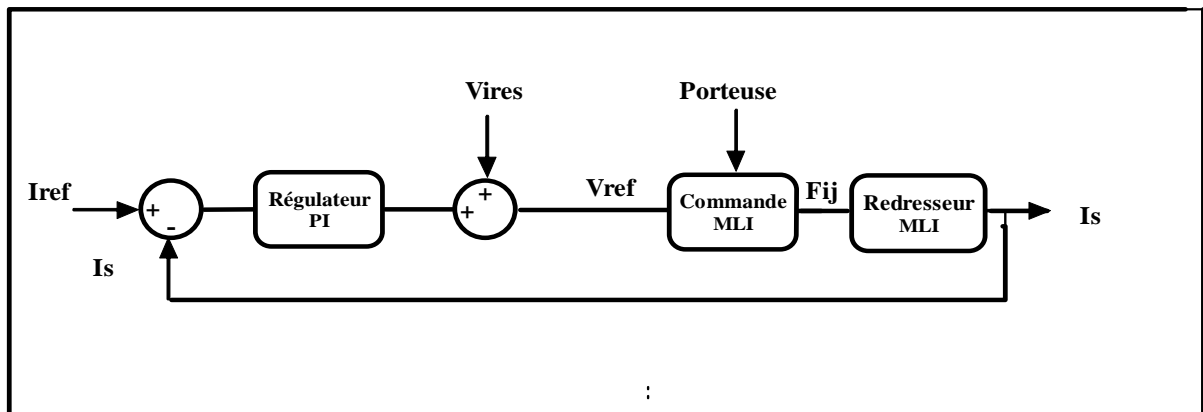
(Fig. IV.9.d) : Courant redressé



(Fig. IV.9.e) : courant de réseau coté redresseur et courant de référence

IV.2.6.3 Commande MLI triangulo-sinusoidale :

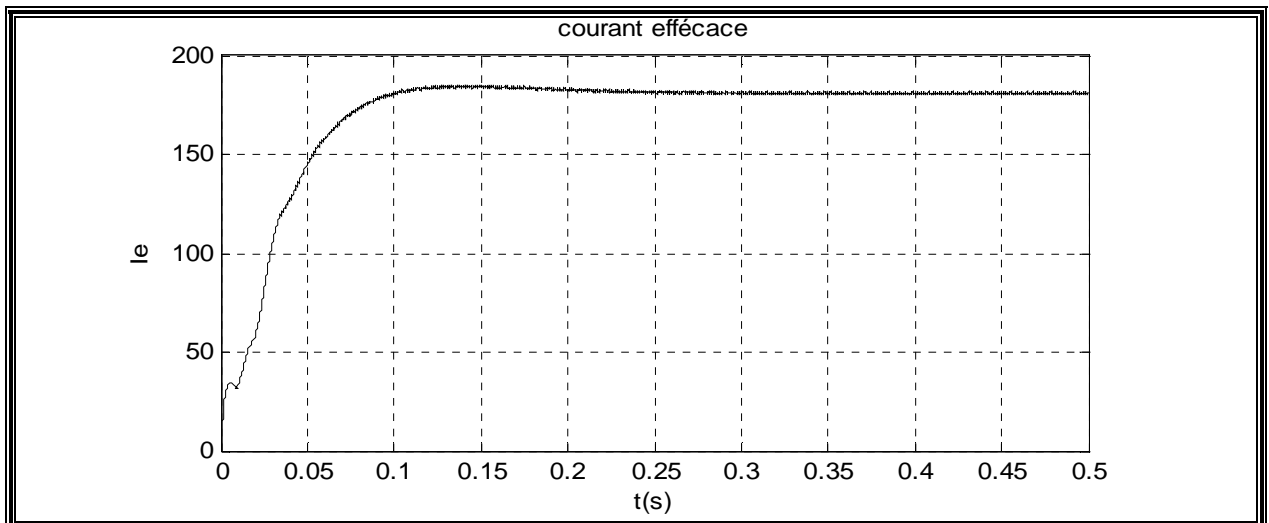
Le principe de cette commande à été aussi établit dans le chapitre III, on établit seulement le schéma synoptique de la commande MLI triangulo-sinusoidale appliquée au redresseur à MLI



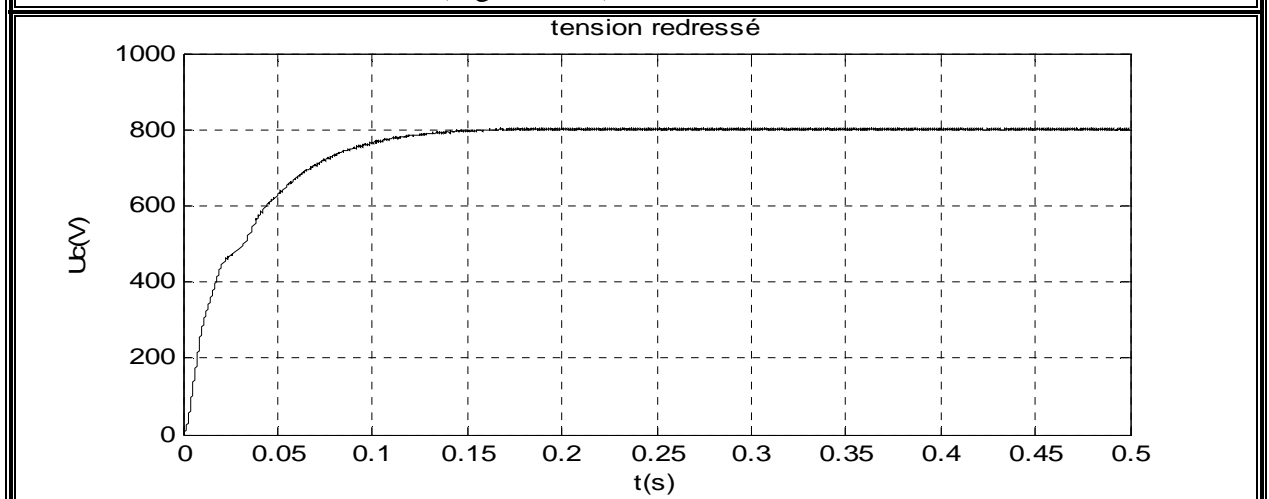
(Fig.IV.8) : Schéma synoptique de la commande MLI triangulo-sinusoidale appliquée au redresseur à MLI

IV.2.6.4 Résultats de simulation :

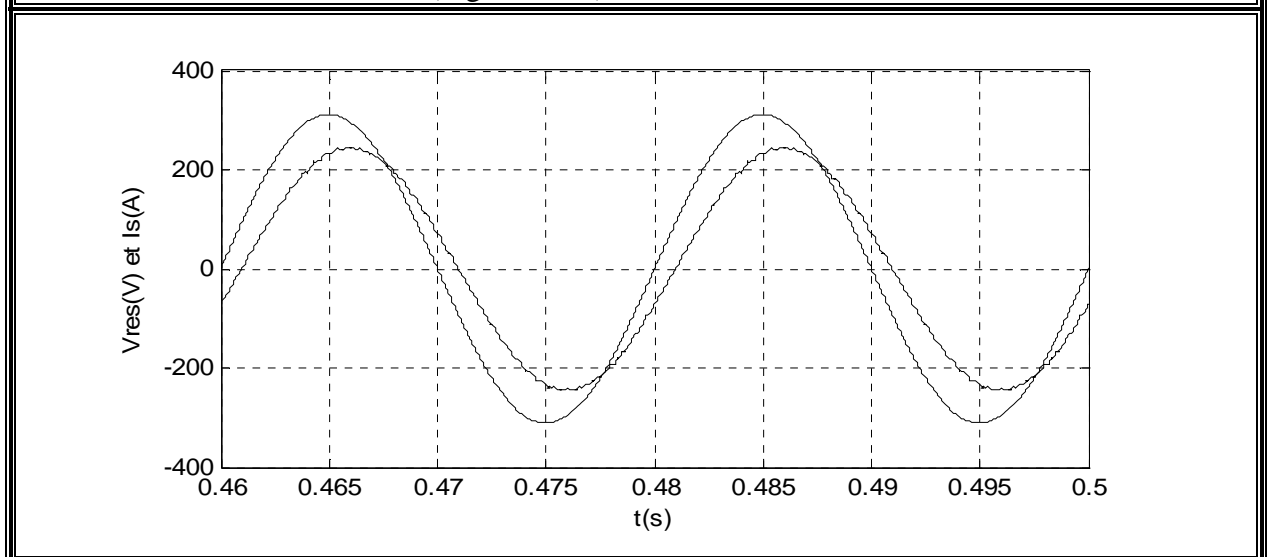
Avec : $m=36$, charge $R=10 \Omega$



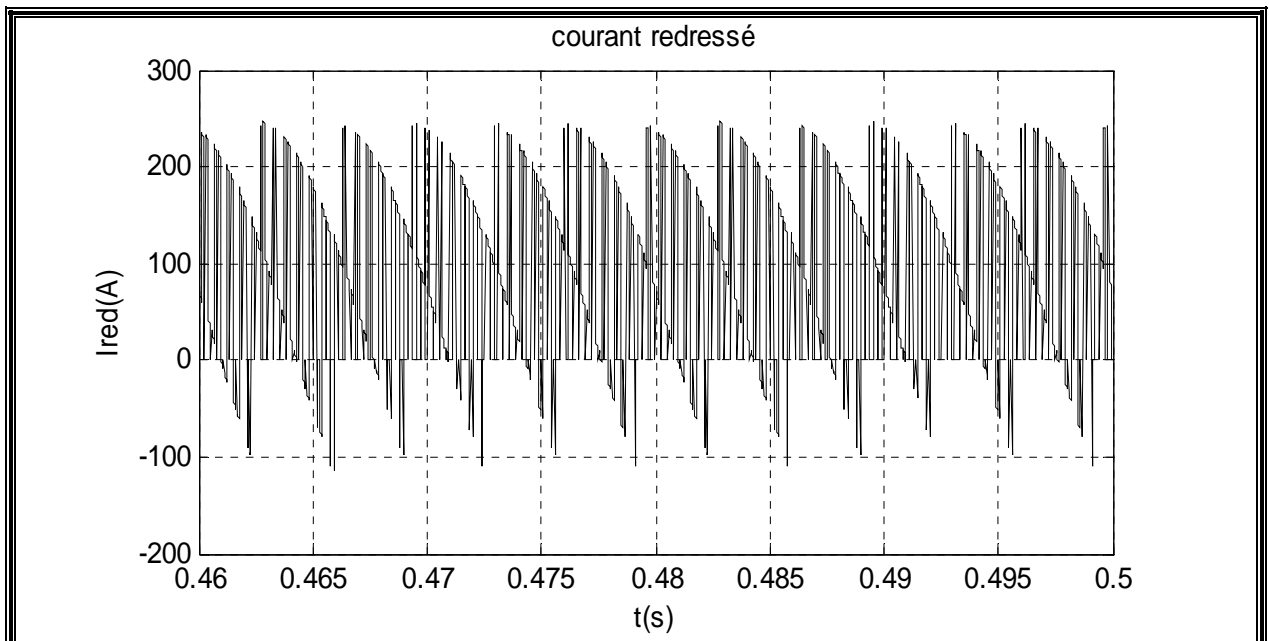
(Fig. IV.10.a) : Courant efficace



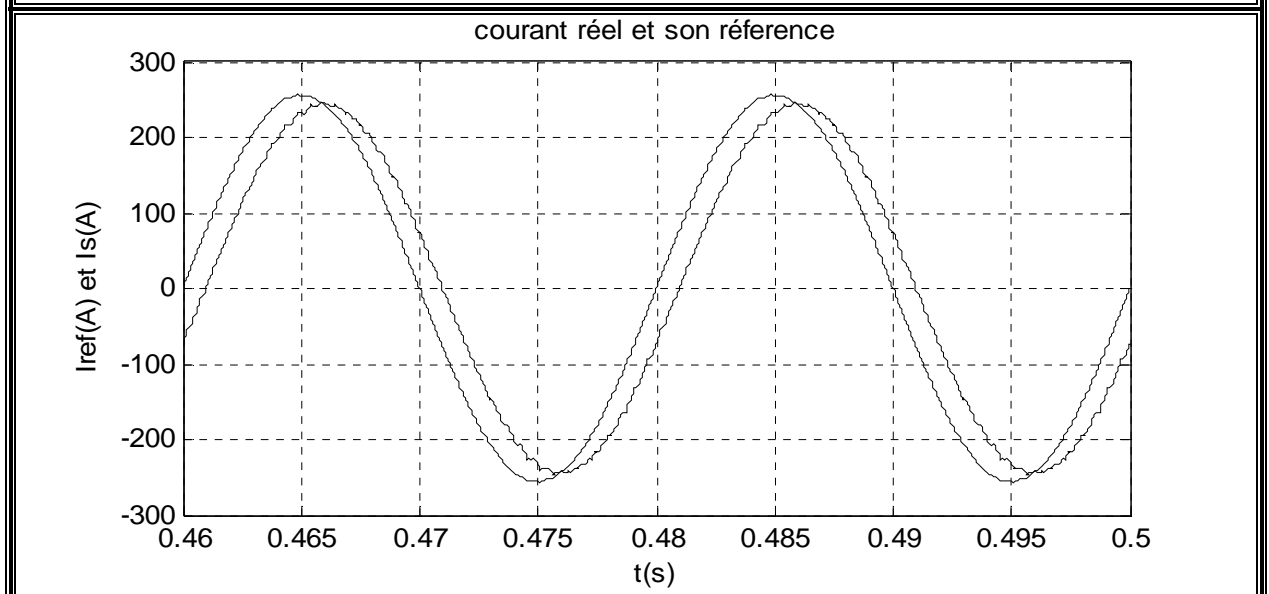
(Fig. IV.10.b) : Tension redressée



(Fig. IV.10.c) : Tension et courant de réseau



(Fig. IV.10.d) : Courant redressé



(Fig. IV.10.e) : courant de réseau coté redresseur et courant de référence

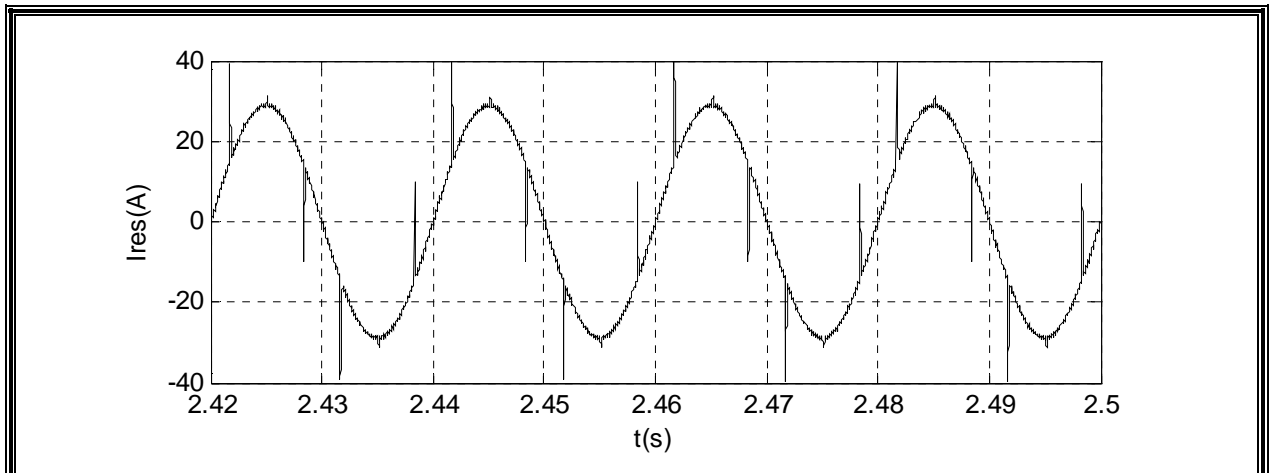
IV.3 APPLICATION DE L'UPFC A LA CHARGE NON LINEAIRE :

La charge non linéaire est la même que dans le chapitre précédent, c'est un pont redresseur à thyristors débitant sur un moteur à courant continu.

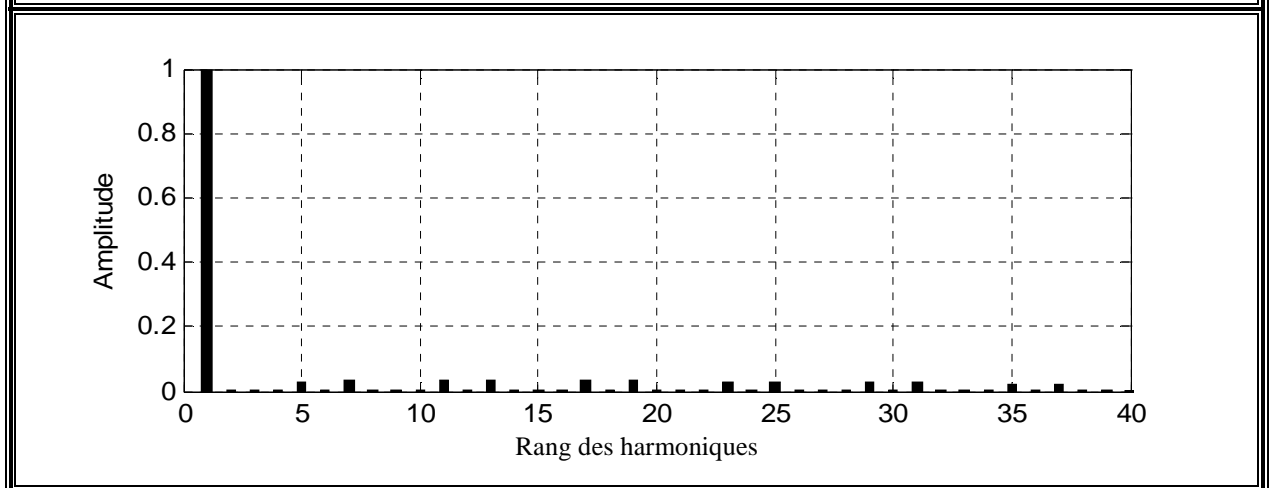
IV.3.1 Résultats de simulation en utilisant la commande par hystérésis :

IV.3.1.1 Sans compensation :

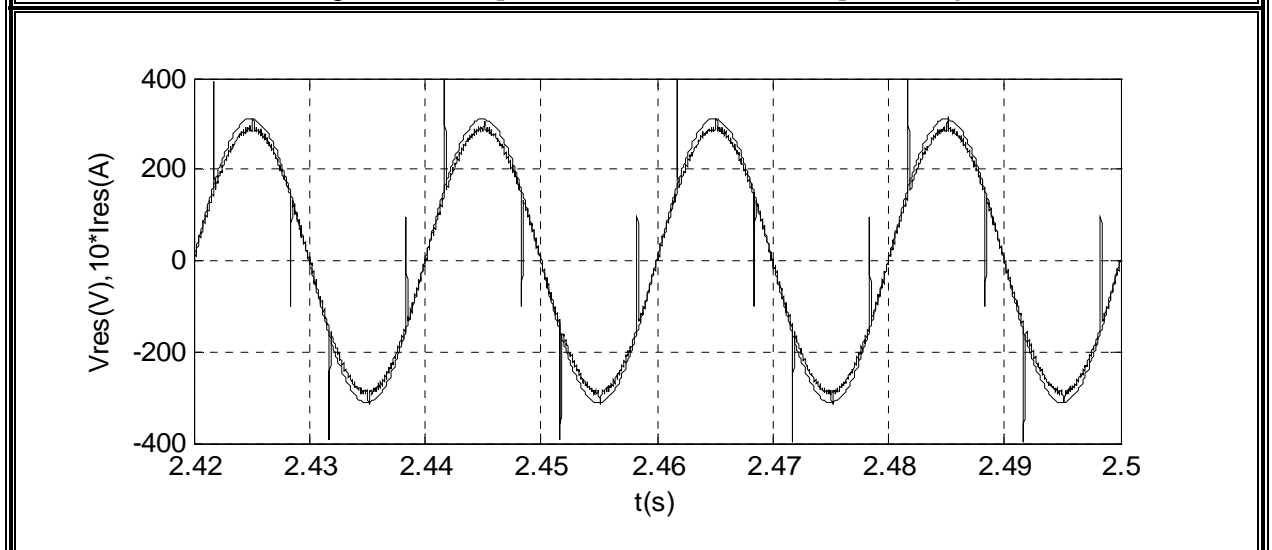
Pour $\alpha=0$



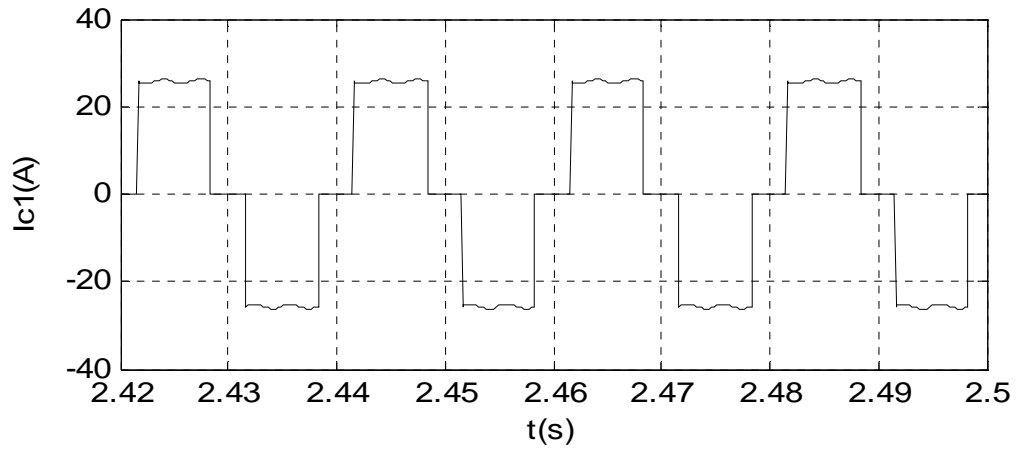
(Fig. IV.9.a) : Courant de réseau après filtrage



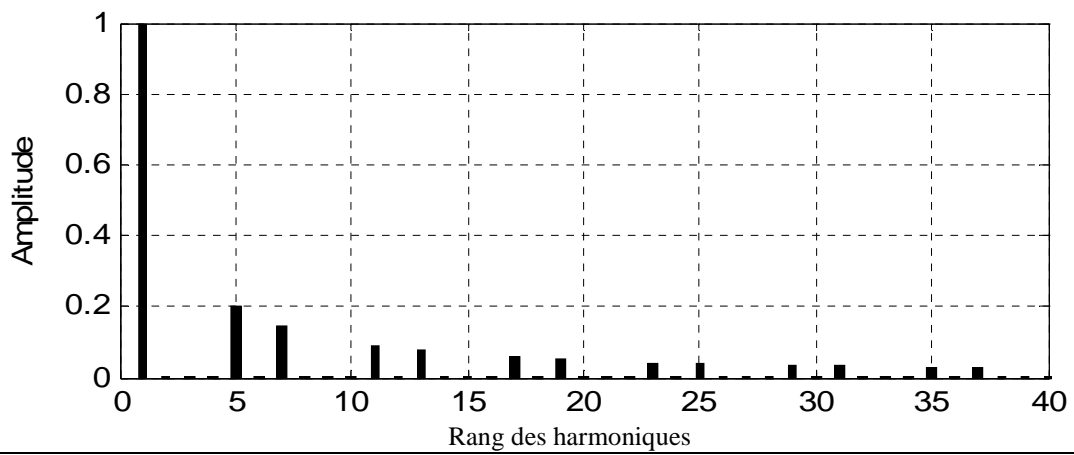
(Fig. IV.9.b) : Spectre du courant de réseau après filtrage



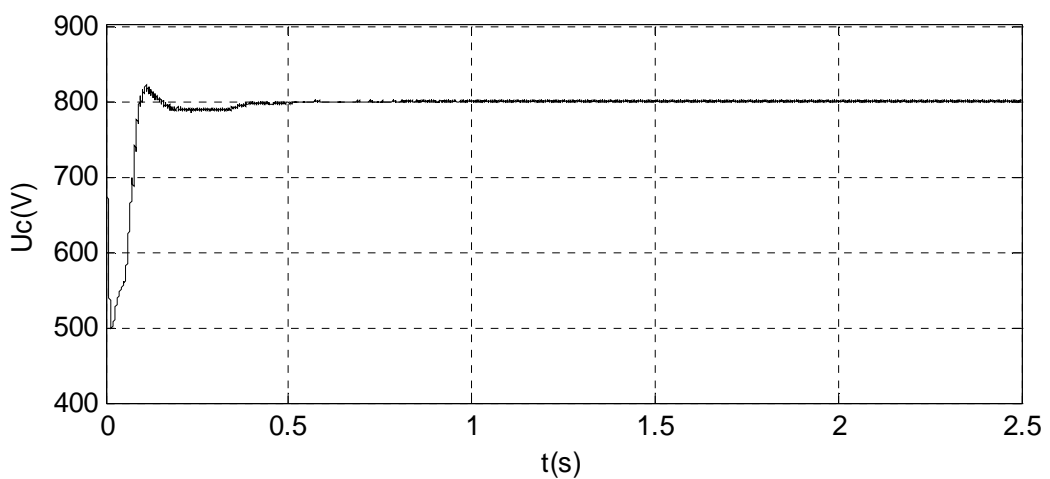
(Fig. IV.9.c) : Tension et courant de réseau après filtrage



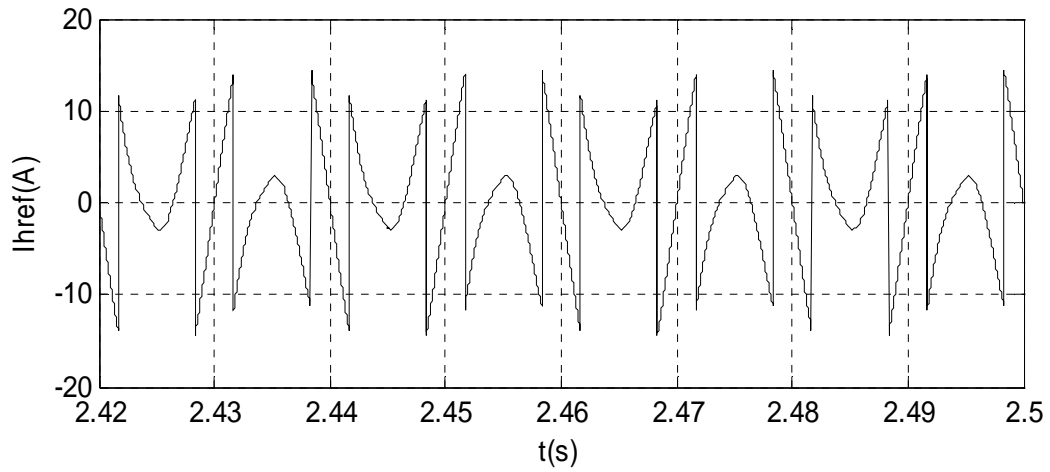
(Fig. IV.9.d) : Courant de charge



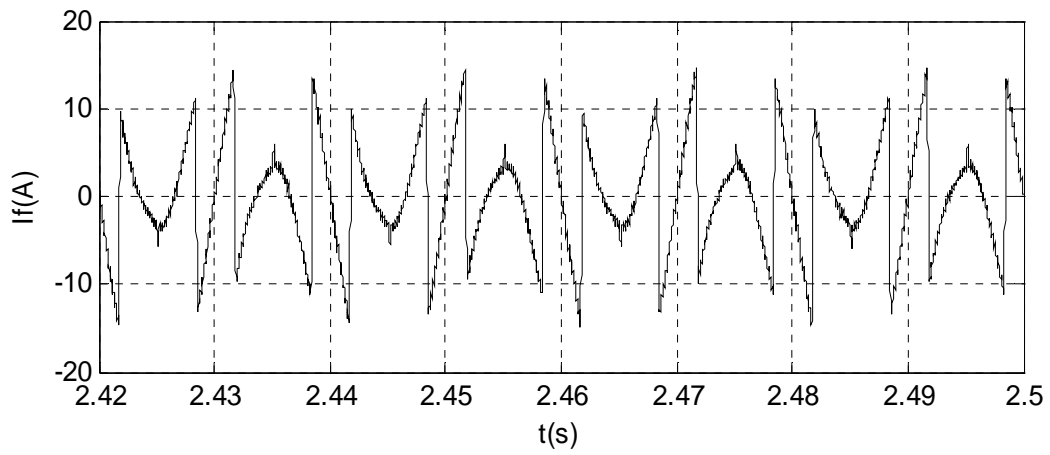
(Fig. IV.9.e) : Spectre du courant de charge



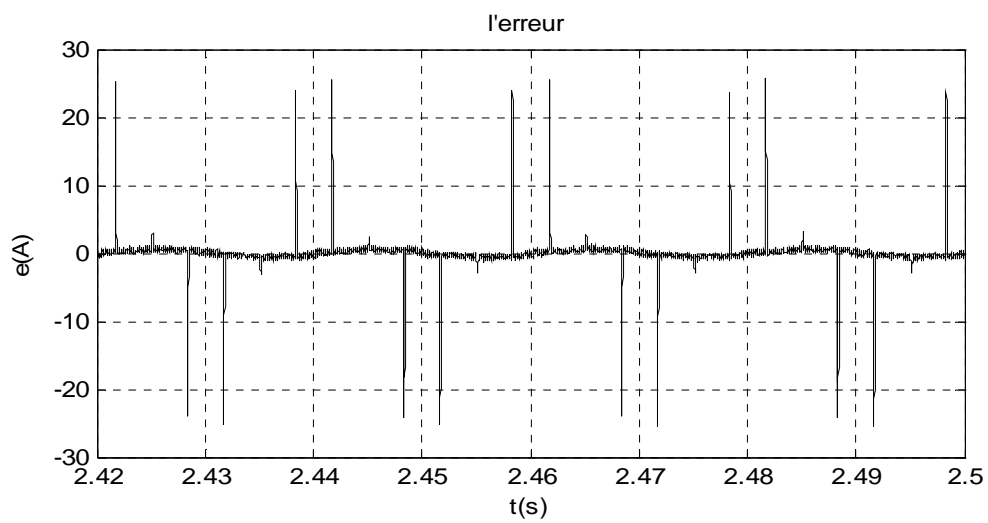
(Fig. IV.9.f) : Tension U_c du bus continu



(Fig. IV.9.g) : Courant harmonique de référence

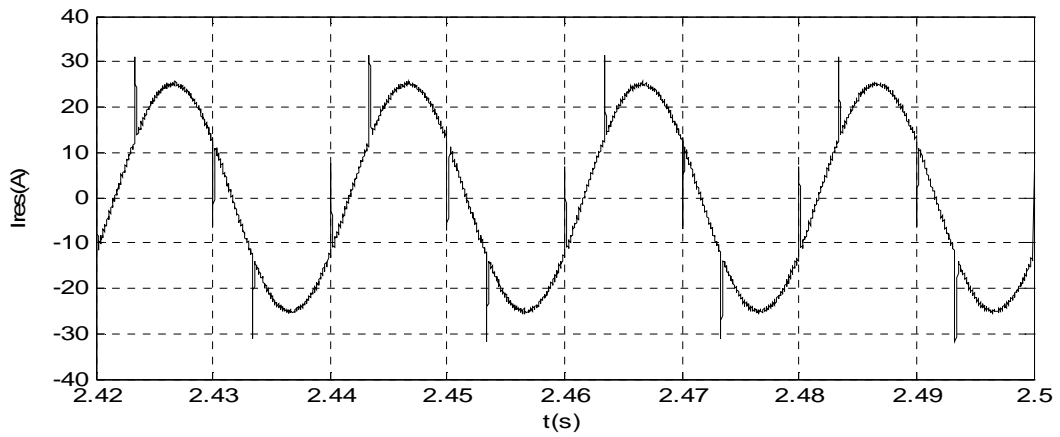


(Fig. IV.9.h) : Courant de sortie du filtre actif

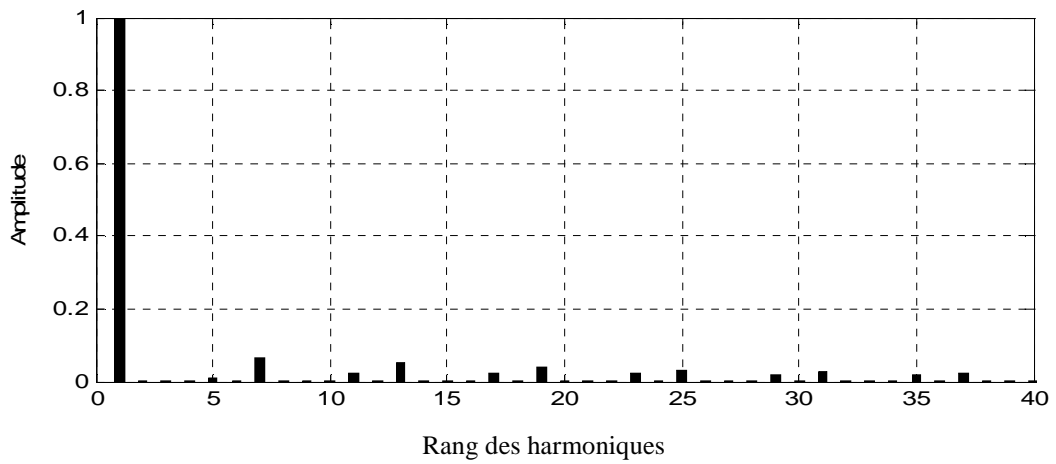


(Fig. IV.9.i) : Courant : ($I_{href} - I_f$) « erreur »

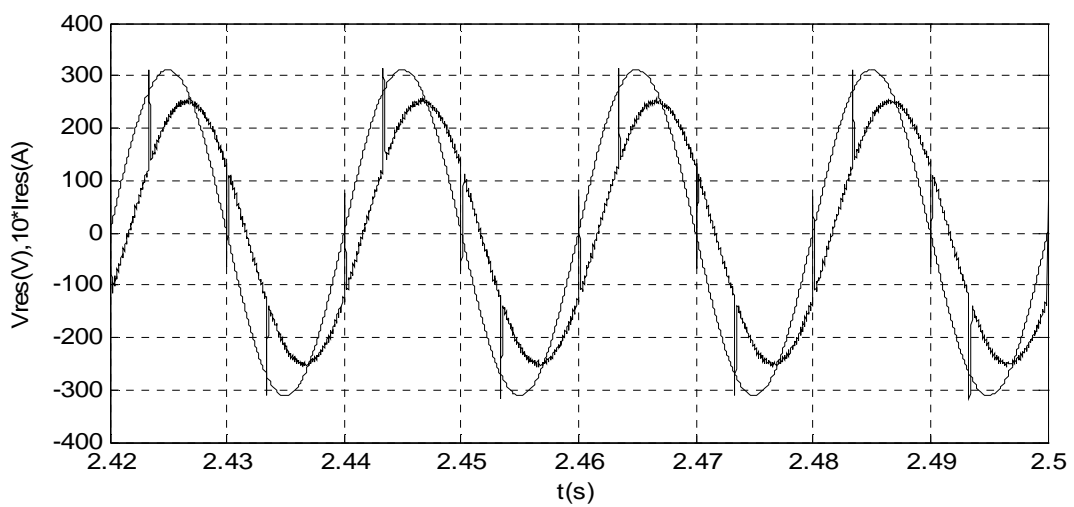
Pour $\alpha=30^\circ$



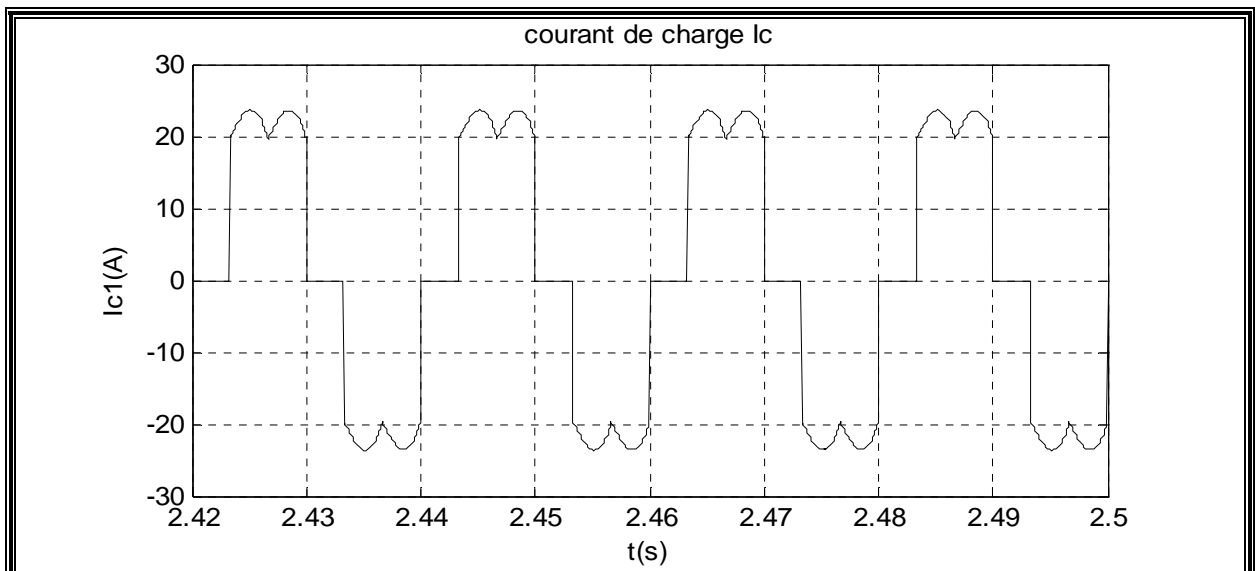
(Fig. IV.10.a) : Courant de réseau après filtrage



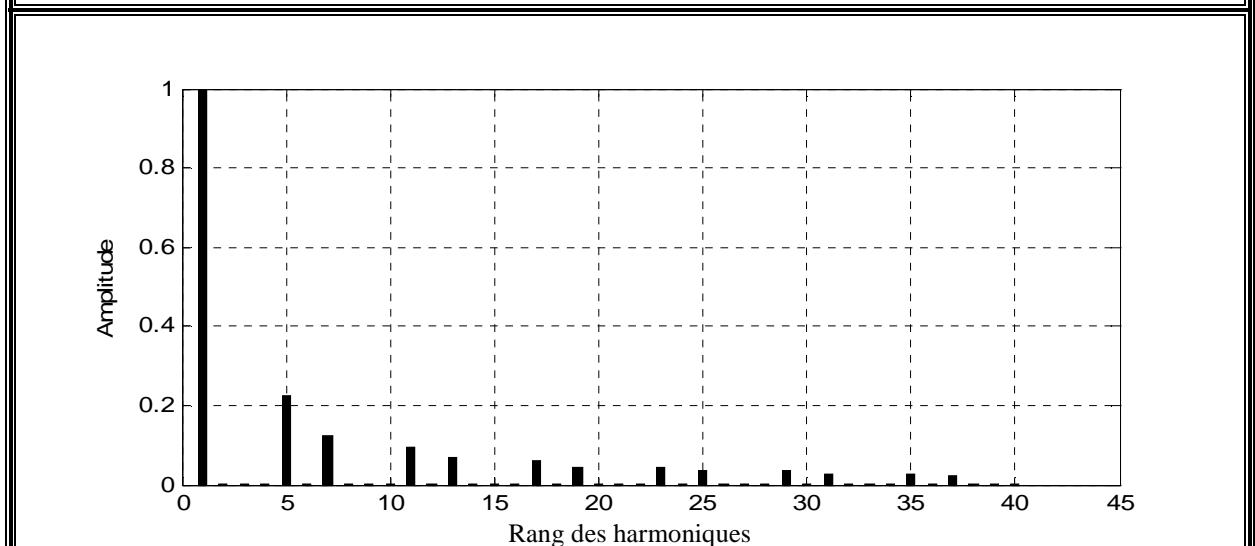
(Fig. IV.10.b) : Spectre du courant de réseau après filtrage



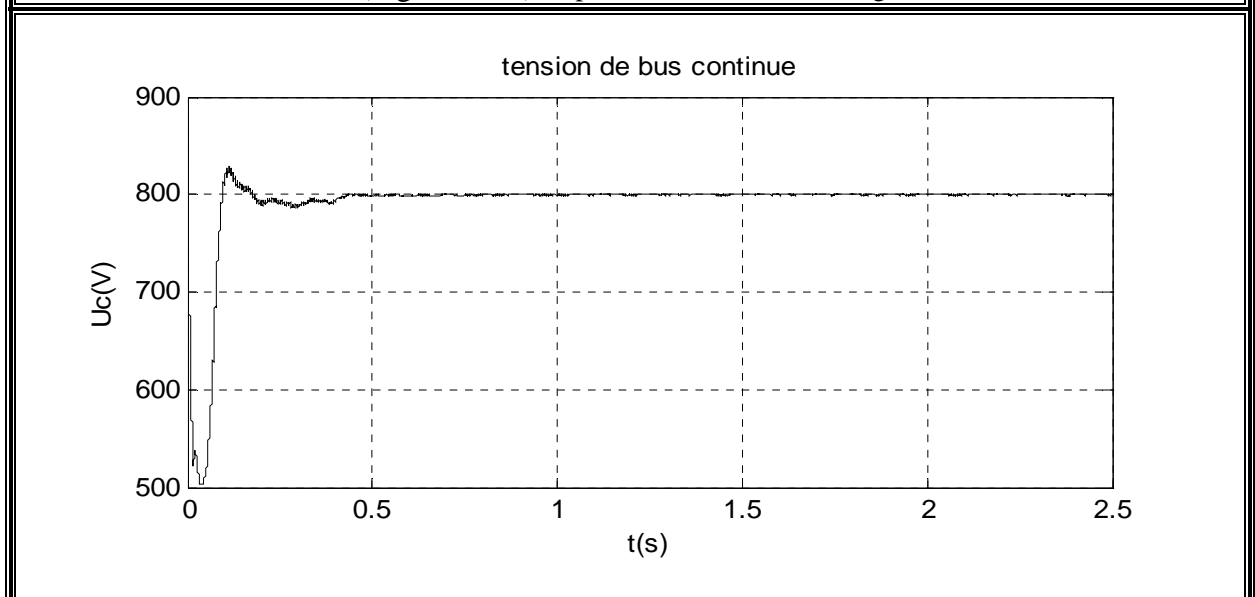
(Fig. IV.10.c) : Tension et courant de réseau après filtrage



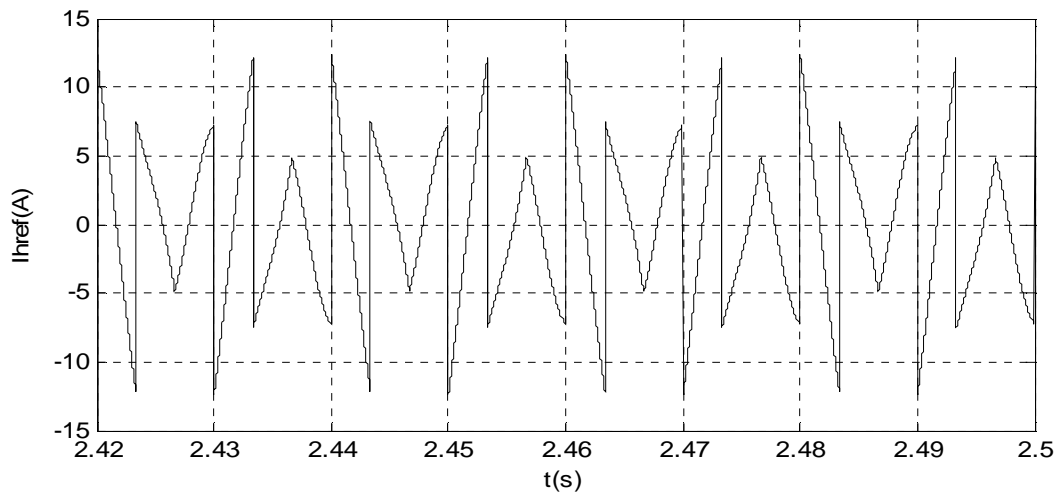
(Fig. IV.10.d) : Courant de charge



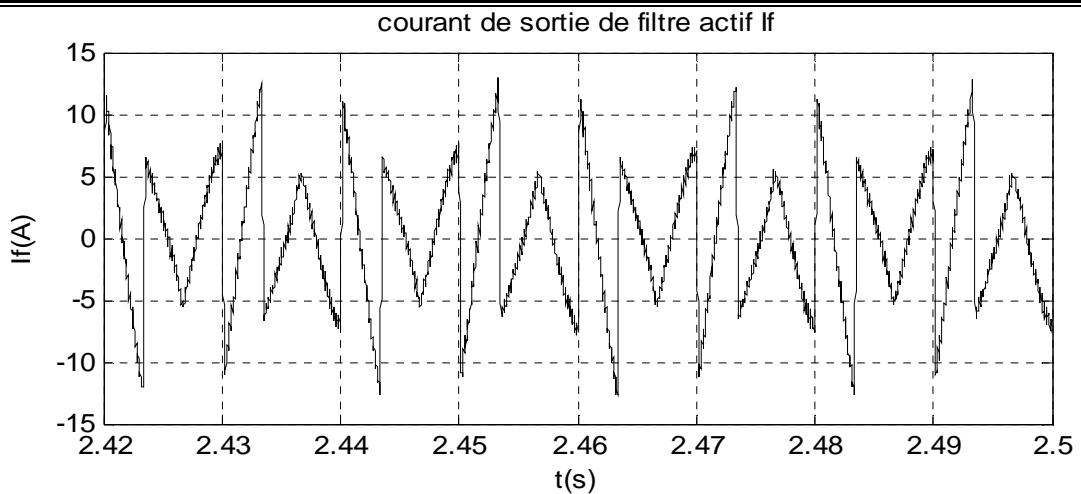
(Fig. IV.10.e) : Spectre du courant de charge



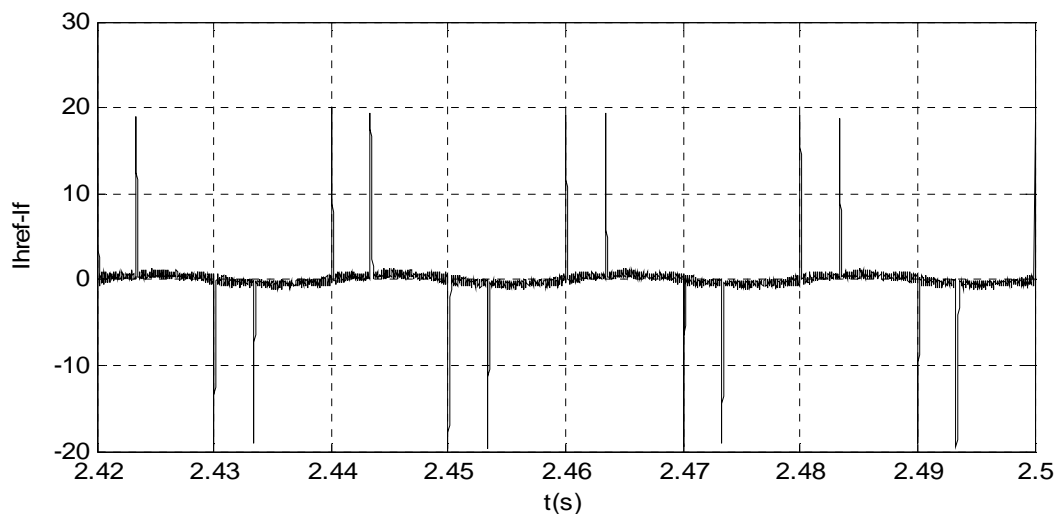
(Fig. IV.10.f) : Tension U_c du bus continu



(Fig. IV.10.g) : Courant harmonique de référence



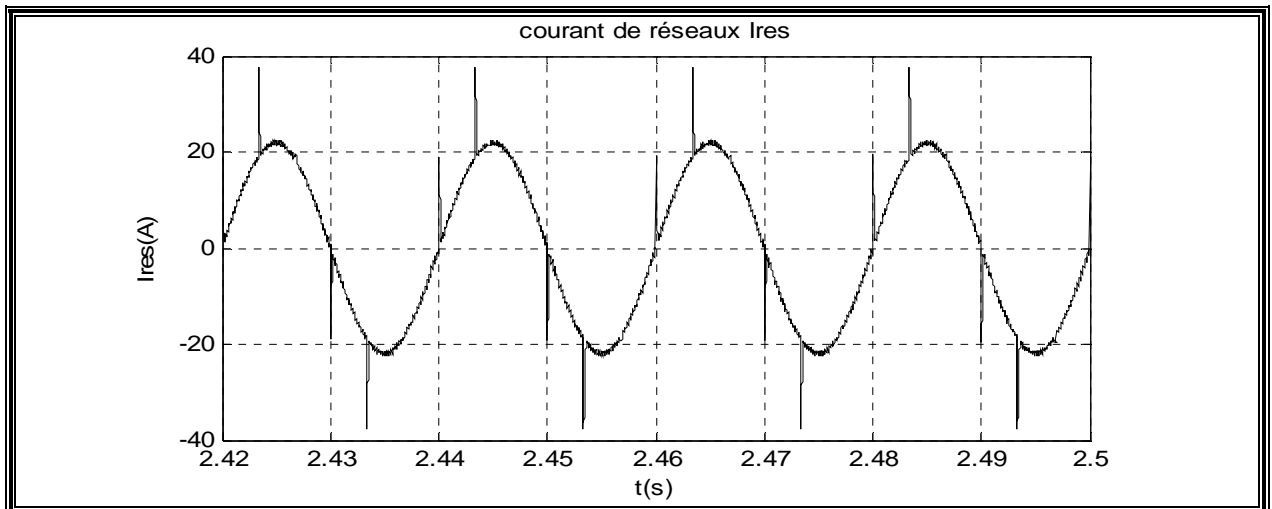
(Fig. IV.10.h) : Courant de sortie du filtre actif



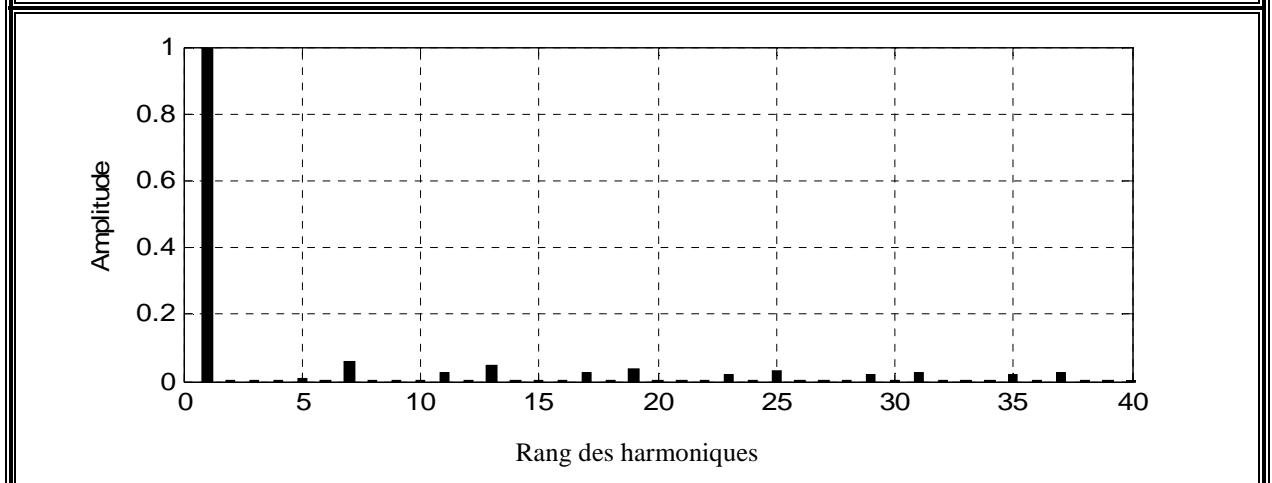
(Fig. IV.10.i) : Courant : ($I_{href} - I_f$) « erreur »

IV.3.1.2 Avec compensation :

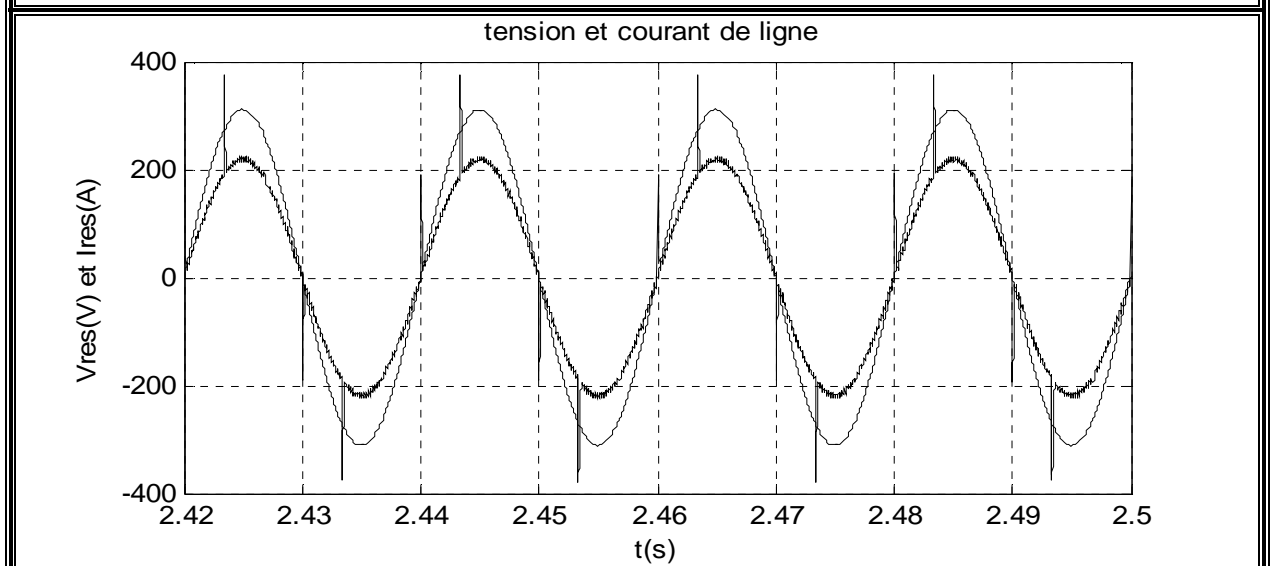
Pour $\alpha=30^\circ$



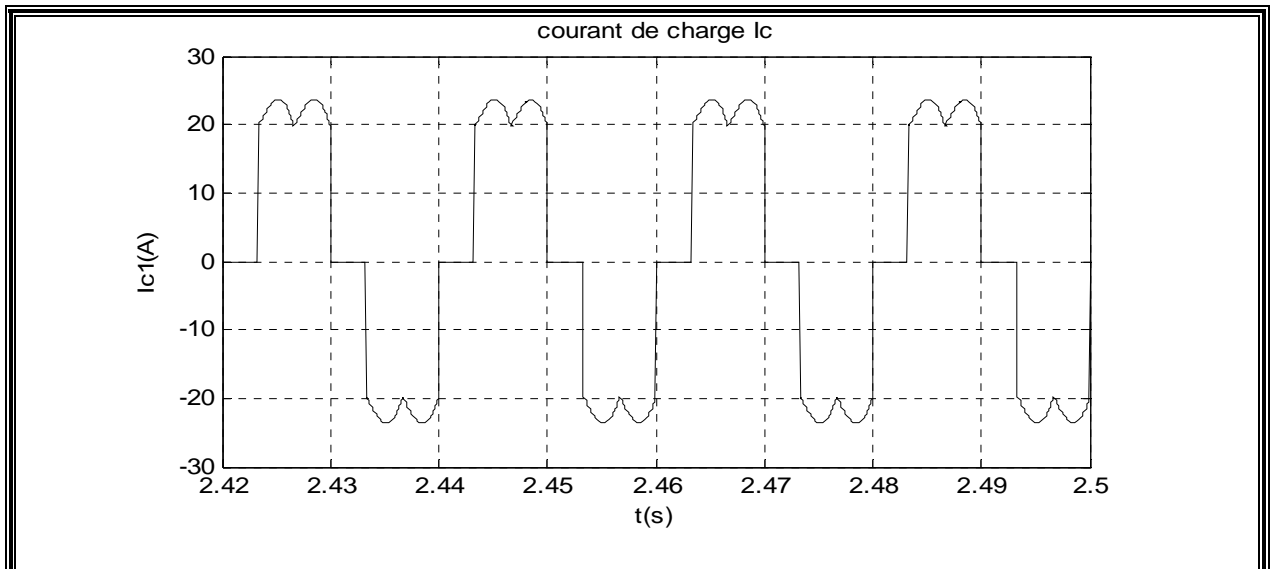
(Fig. IV.11.a) : Courant de réseau après filtrage



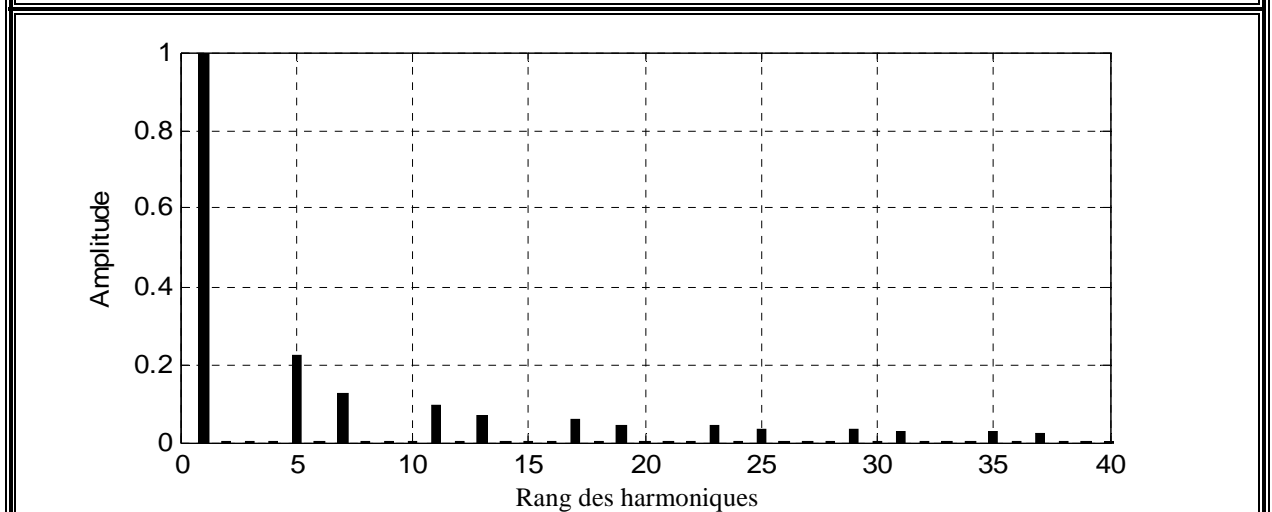
(Fig. IV.11.b) : Spectre du courant de réseau après filtrage



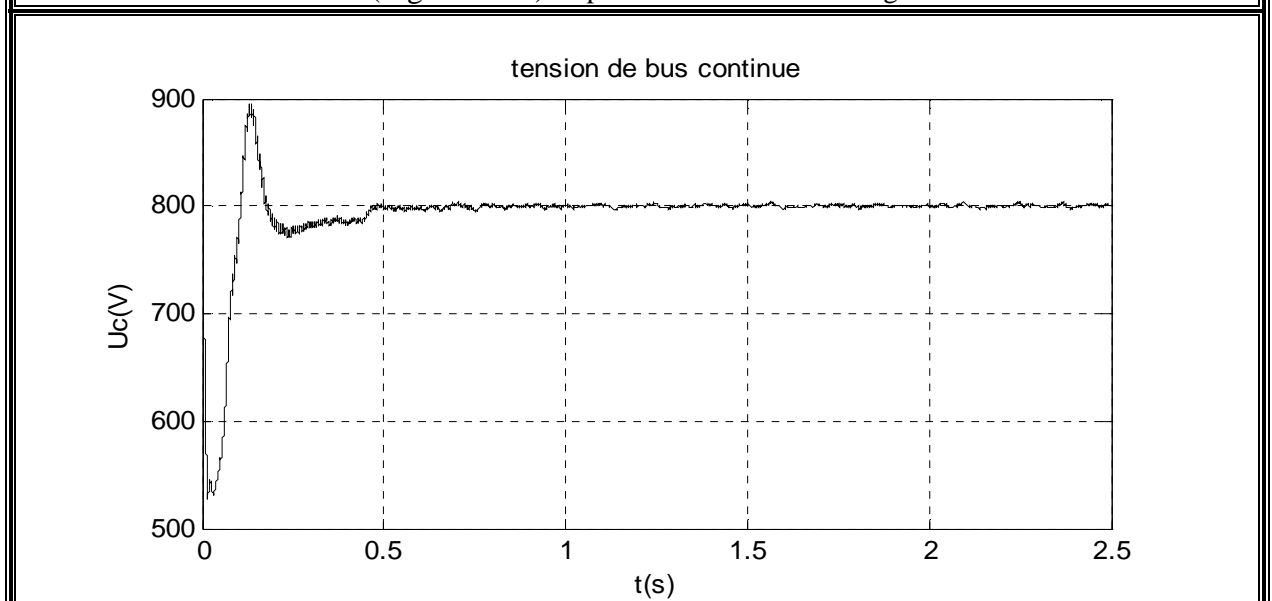
(Fig. IV.11.c) : Tension et courant de réseau après filtrage



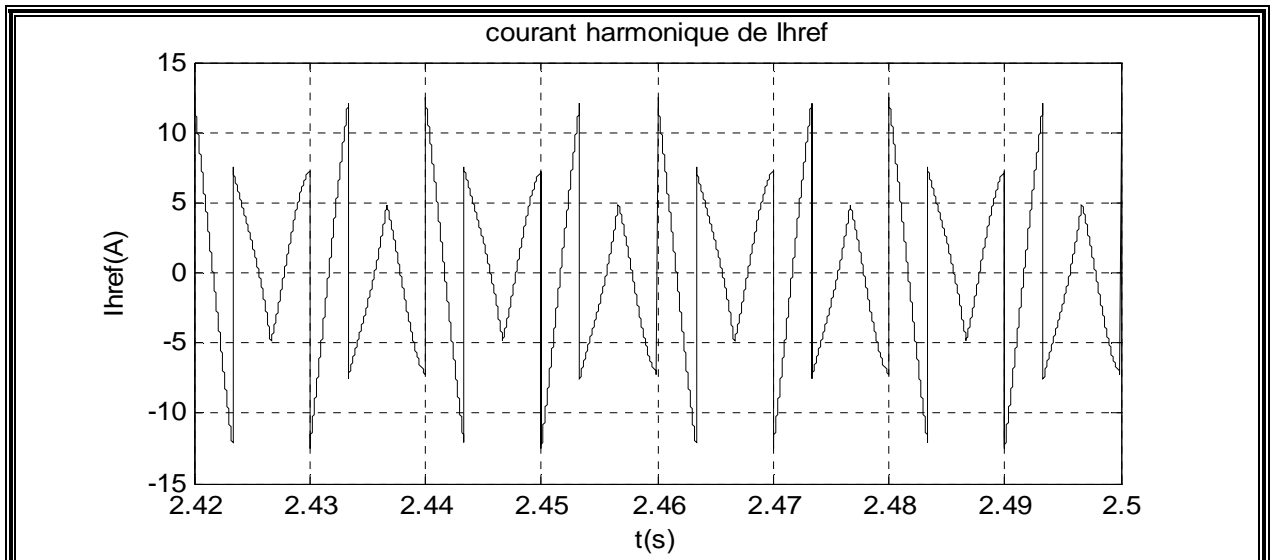
(Fig. IV.11.d) : Courant de charge



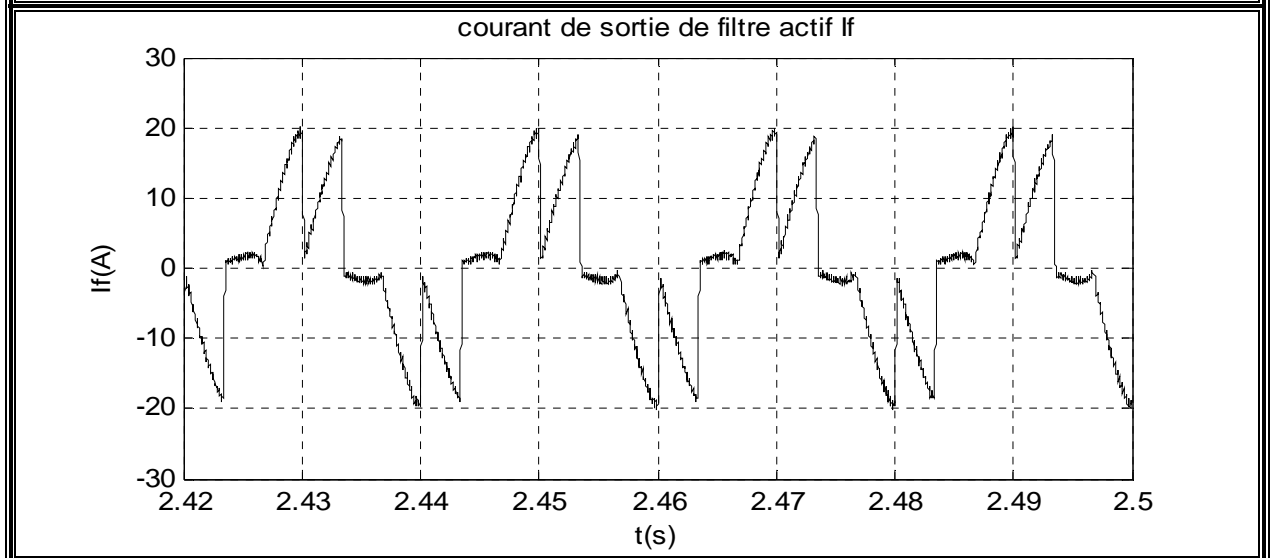
(Fig. IV.11.e) : Spectre du courant de charge



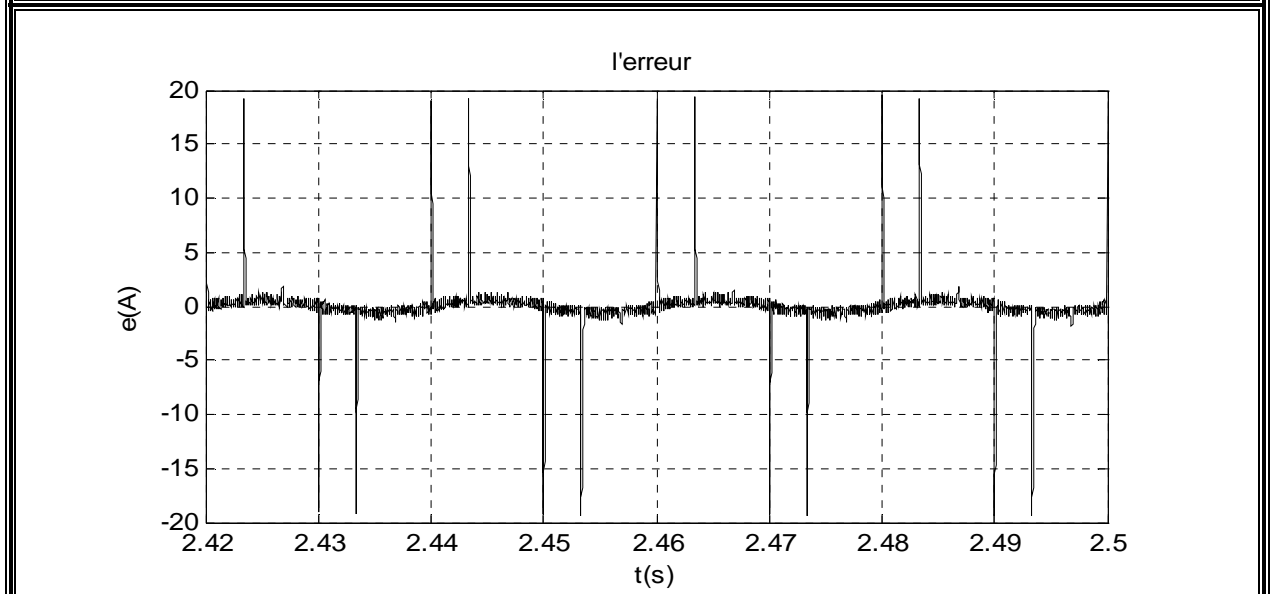
(Fig. IV.11.f) : Tension U_c du bus continu



(Fig. IV.11.g) : Courant harmonique de référence



(Fig. IV.11.h) : Courant de sortie du filtre actif



(Fig. IV.11.i) : Courant : ($I_{href} + I_r - I_f$) « erreur »

IV.3.2 Interprétation des résultats en utilisant la commande par hystérésis :**IV.3.2.1 Sans compensation de l'énergie réactive :**

L'UPFC est appliqué pour une charge non linéaire constituée d'un pont redresseur à thyristors débitant sur un moteur à courant continu.

Les figures (Fig. IV.9) et (Fig. IV.10) montrent les formes des grandeurs simulées du système en régime permanent. Ces simulations sont réalisées pour la stratégie de commande par hystérésis pour $\Delta i = 0.05$.

On constate que les courants l'UPFC suivent bien leurs références. Après identification des courants harmoniques par la méthode directe, on remarque que les courants harmoniques générés par le filtre ont la même forme que ceux demandés par la charge polluante, les figures (Fig. IV.9.i) et (Fig. IV.10.i) montrent que l'erreur peut être négligeable, ce qui explique le bon fonctionnement de la commande.

Cependant, à cause de la présence de $L_f(di/dt)$, ces courants ne peuvent pas suivre leurs références au niveau des variations brusques. D'où l'apparition des pics au niveau du courant de source qui est sinusoïdal. [KET-05].

Dans le cas du redresseur à diodes ($\alpha = 0$), on remarque que le courant est en phase avec la tension du réseau. Par contre, pour le redresseur à thyristors ($\alpha = 30$ et $\alpha = 60$), le courant est déphasé par rapport à la tension du réseau, et ce déphasage augmente en fonction de l'angle d'amorçage.

Les figures (Fig. IV.9.f) et (Fig. IV.10.f) montrent que la tension de bus continu est très bien réglée en régime permanent ce qui assure l'asservissement de bus continu.

IV.3.2.2 Avec compensation de l'énergie réactive :

En utilisant la même stratégie de commande que précédemment, on applique l'UPFC à une charge non linéaire constituée d'un pont redresseur à thyristors débitant sur un moteur à courant continu.

On remarque que le courant de source, pour le filtrage avec compensation d'énergie réactive, est en phase avec sa tension, ce qui n'est pas le cas pour le filtrage sans compensation d'énergie réactive. D'où la compensation totale de l'énergie réactive, c'est-à-dire un facteur de puissance unitaire coté réseau.

La figure (Fig. IV.11.f) montre que la tension de bus continu est très bien réglée en régime permanent ce qui assure l'asservissement de bus continu.

IV.4 CONCLUSION :

On a commencé ce chapitre par la structure générale et le principe de fonctionnement de l'UPFC. Dans ce chapitre également, on a étudié les performances des algorithmes de commande de l'UPFC appliqué sur la charge dynamique non linéaire.

Les résultats de simulation montrent l'efficacité de la méthode directe « méthode des puissances instantanées réelles et imaginaires. » à identifier les courants harmoniques afin qu'ils soient filtrés aussi, les stratégies de commande utilisés ont prouvées leurs performances en vue du bon fonctionnement du filtre avec et sans compensation d'énergie

Enfin, en plus des avantages qui possède le filtre actif parallèle, l'utilisation de l'UPFC pour le filtrage actif des harmoniques rend notre système plus autonome, et a plus de capacités d'être réaliser pratiquement.

CONCLUSION GENERALE :

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre de la recherche de nouvelles solutions de dépollution des réseaux électriques. L'une de ces solutions est l'UPFC.

A la lumière de l'étude bibliographique, nous avons pu constater que les recherches sur les compensateurs actifs sont bien répondues dans le monde non seulement pour la compensation des harmoniques mais également pour éliminer les différents types de perturbations pouvant affecter le réseau et aussi compenser l'énergie réactive.

Dans le chapitre I, nous avons montré l'influence des harmoniques sur le réseau électrique, cette influence est clairement vu en plusieurs points, par exemple la dégradation du facteur de puissance et l'échauffement des appareils électriques. On a également cité sans détailler les solutions pouvant remédier à ce problème de pollution harmonique.

Pour déterminer les courants harmoniques de référence, on a utilisé dans le chapitre II la méthode des puissances réelles et imaginaires instantanées. La simulation numérique nous a démontré la grande efficacité et la précision de celle-ci, on a également montré et expliqué d'autres méthodes d'identification des harmoniques dans ce chapitre.

Le développement du modèle du filtre actif parallèle a été élaboré dans le chapitre III, qui englobe aussi les deux stratégies de commande, à savoir :

- La commande triangulo-sinusoidale symétrique.
- La commande par hystérésis.

Ce filtre actif parallèle est un onduleur triphasé à deux niveaux alimenté par une tension constante simulée par une batterie. On a terminé ce chapitre par les résultats de simulation de l'application de ce filtre à une charge non linéaire constituée par un redresseur à thyristor débutant sur une machine à courant continu.

Afin de rendre notre système plus autonome et plus pratique, dans le chapitre IV on alimente le bus continu par un redresseur MLI à deux niveaux, ce qui donne naissance à l'UPFC qui est appliqué ensuite à la charge non linéaire.

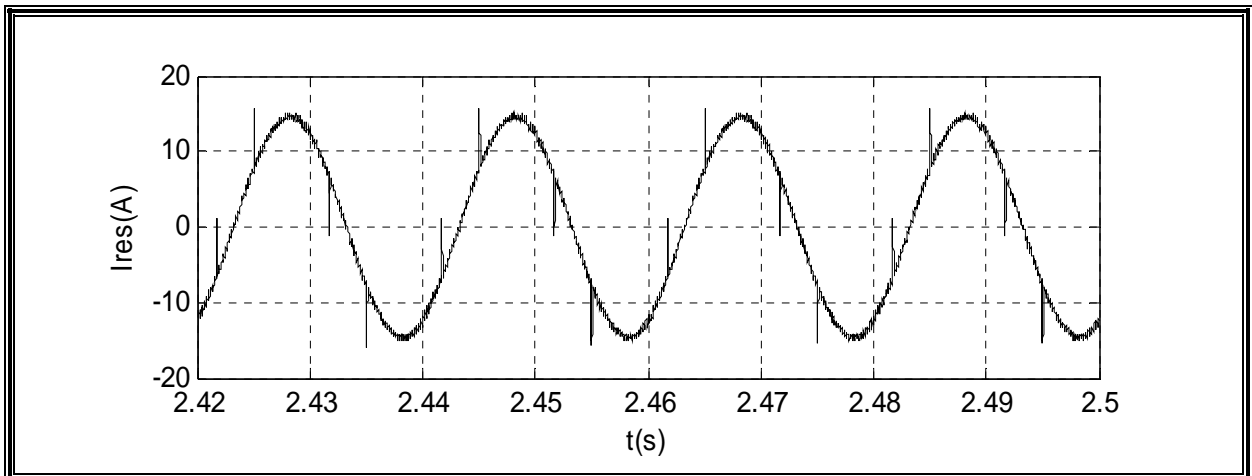
Pour des applications spéciales, qui ont besoin d'une tension strictement sinusoïdale et d'une qualité d'énergie meilleure, un travail en perspective est conseillé afin d'utiliser l'UPFC en filtrage des harmoniques de tension et de courant en même temps.

ANNEXE 1

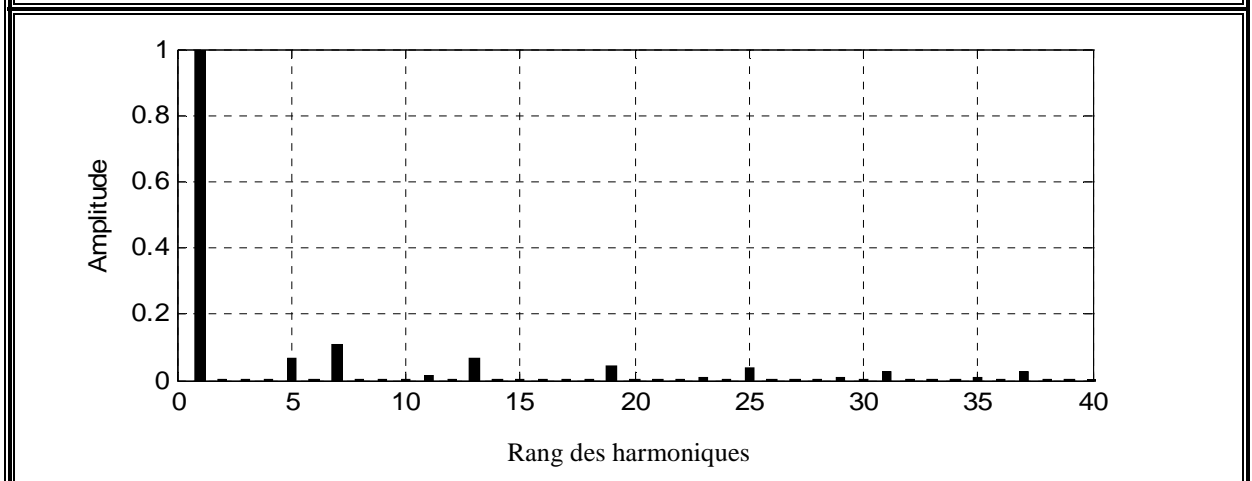
Résultats de simulation de l'application du filtre actif parallèle à la charge non linéaire en utilisant la commande par hystérésis :

Sans compensation :

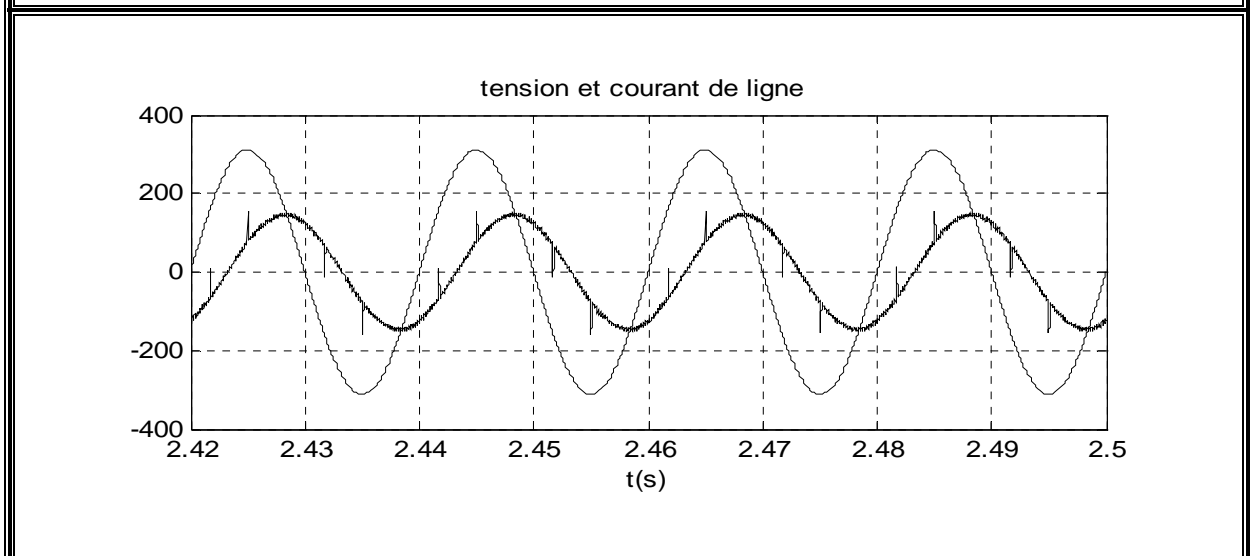
Pour $\alpha=60^\circ$:



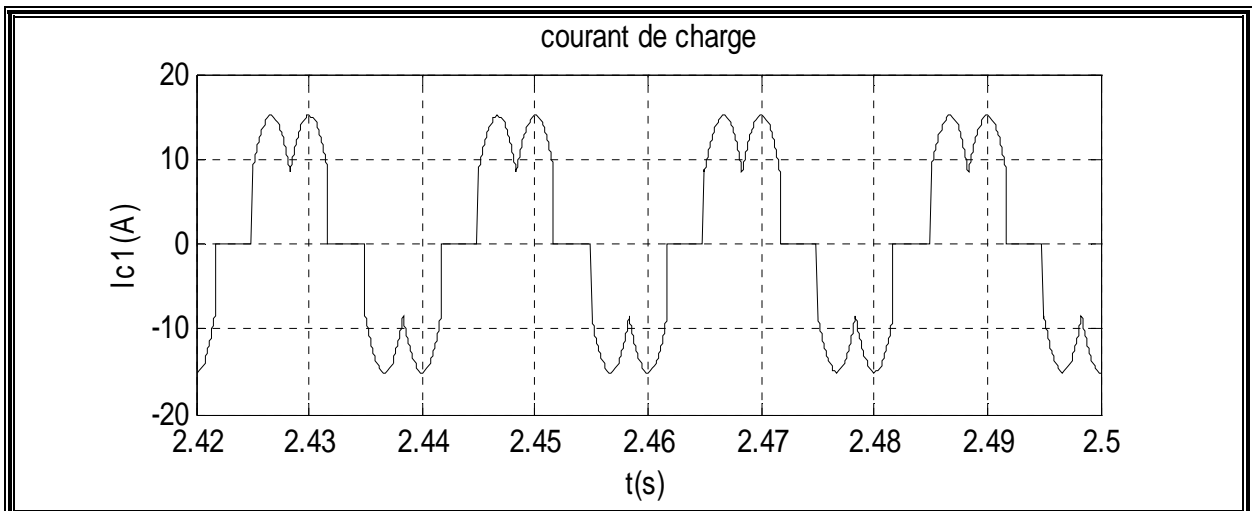
(Fig. III.15.a) : Courant de réseau après filtrage



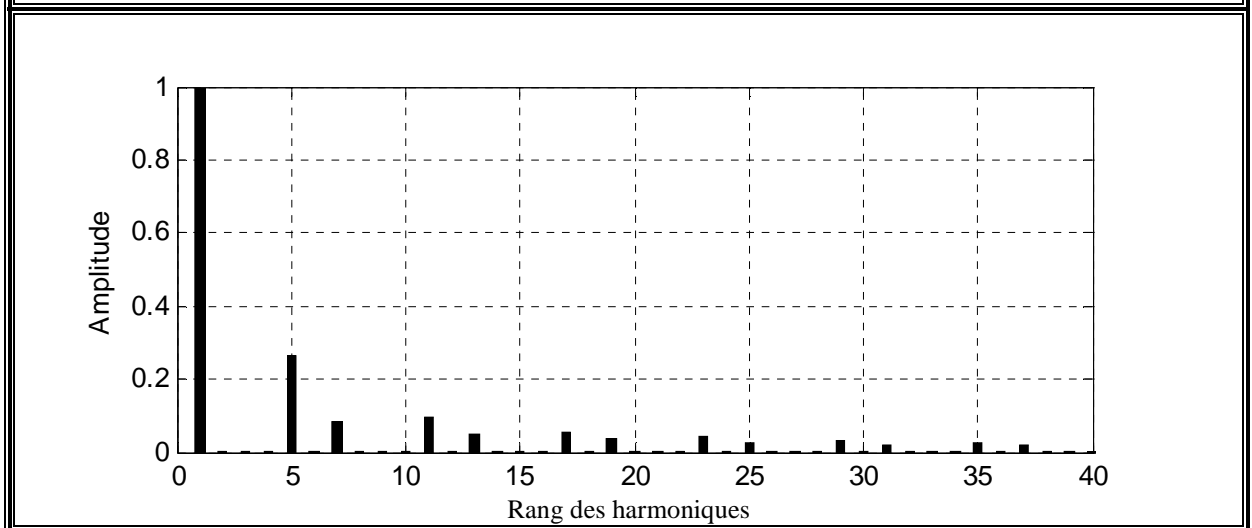
(Fig. III.15.b) : Spectre du courant de réseau après filtrage



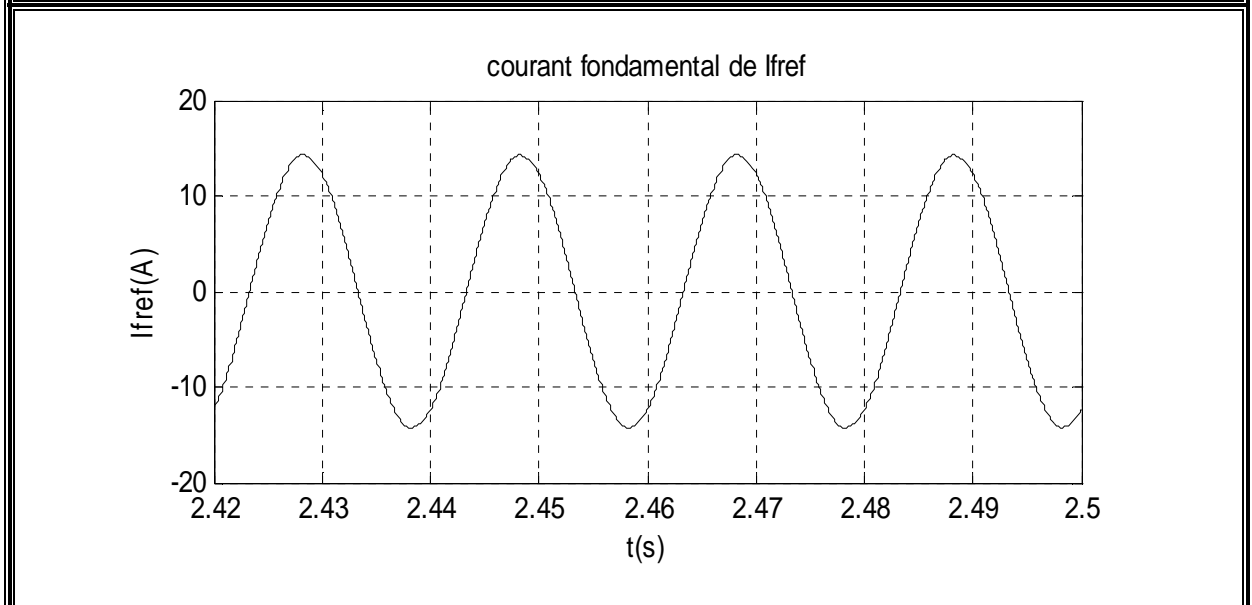
(Fig. III.15.c) : Tension et courant de réseau après filtrage



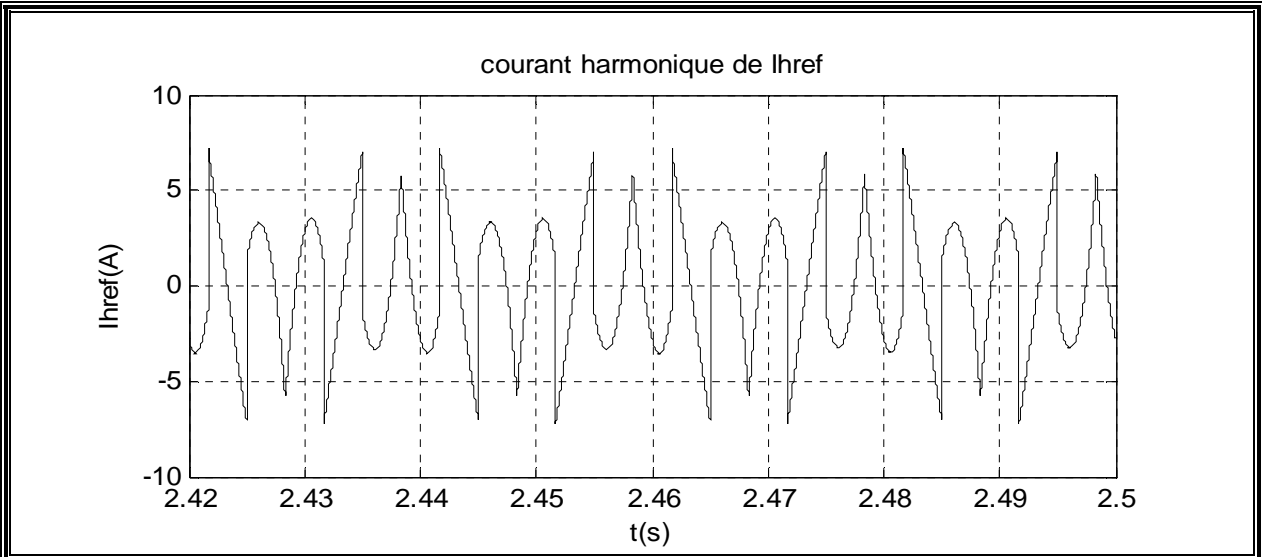
(Fig. III.15.d) : Courant de charge



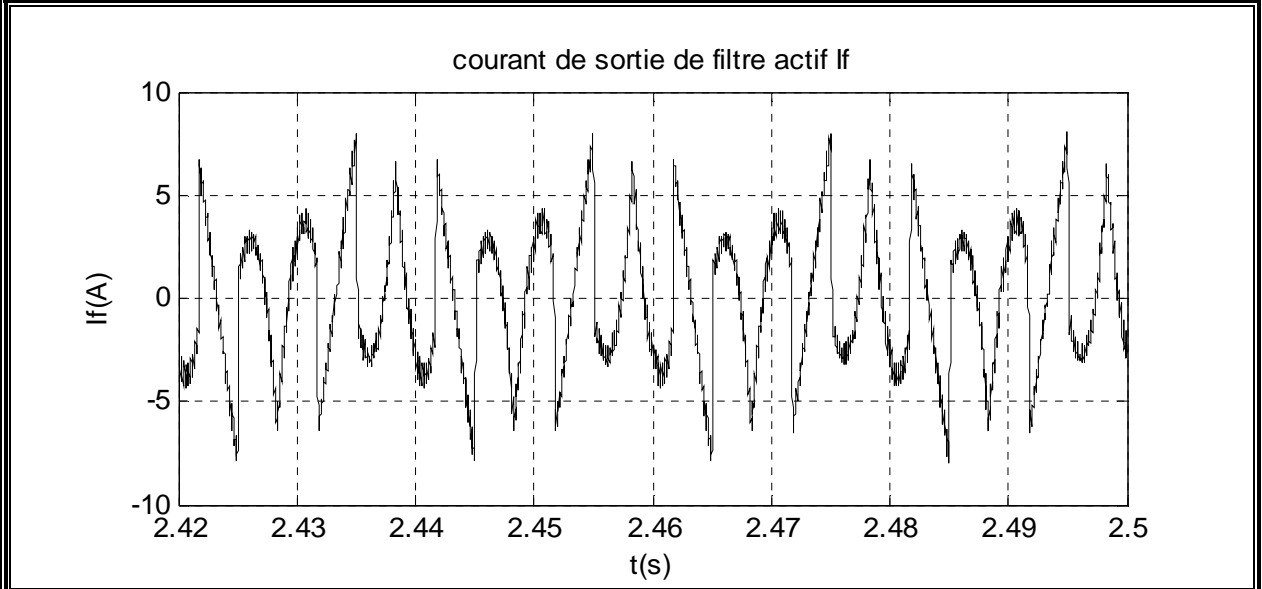
(Fig. III.15.e) : Spectre du courant de charge



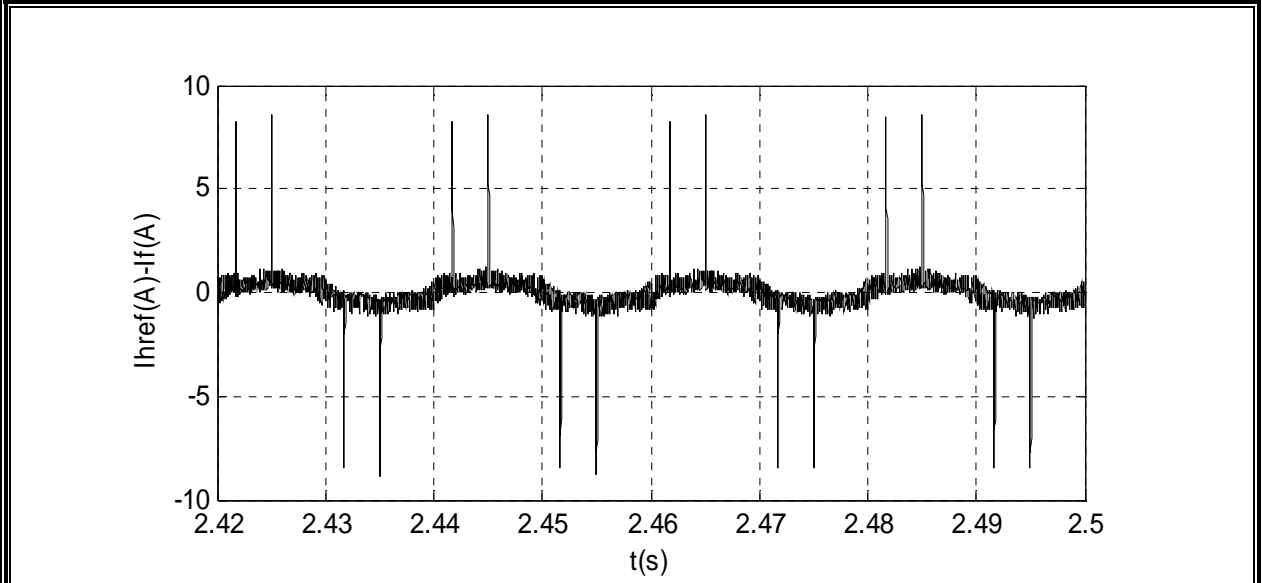
(Fig. III.15.f) : Courant fondamental de référence



(Fig. III.15.g) : Courant harmonique de référence



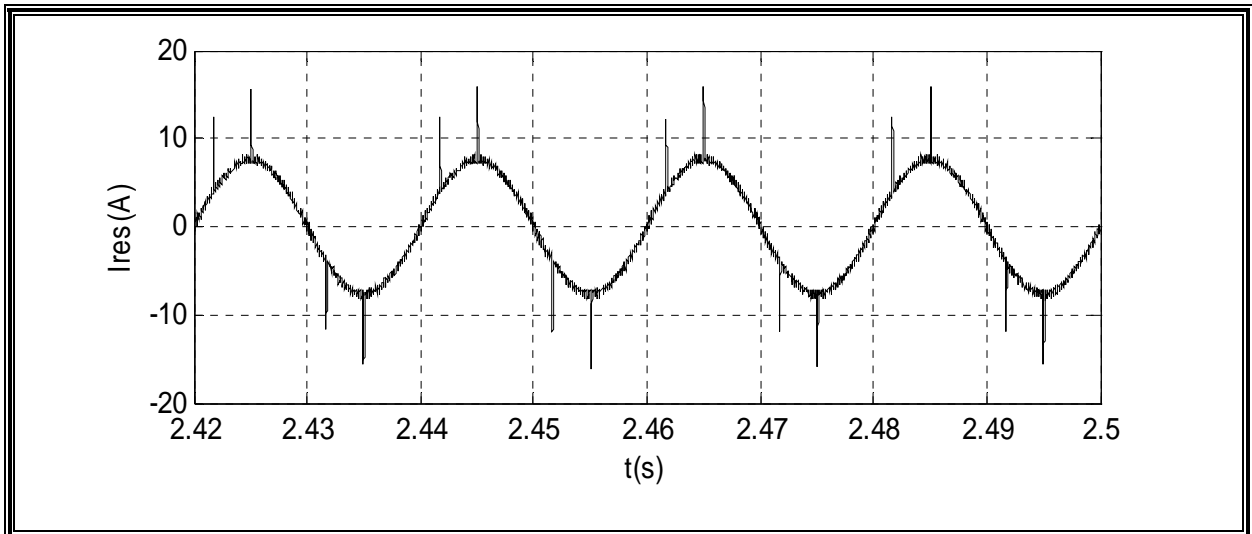
(Fig. III.15.h) : Courant de sortie du filtre actif



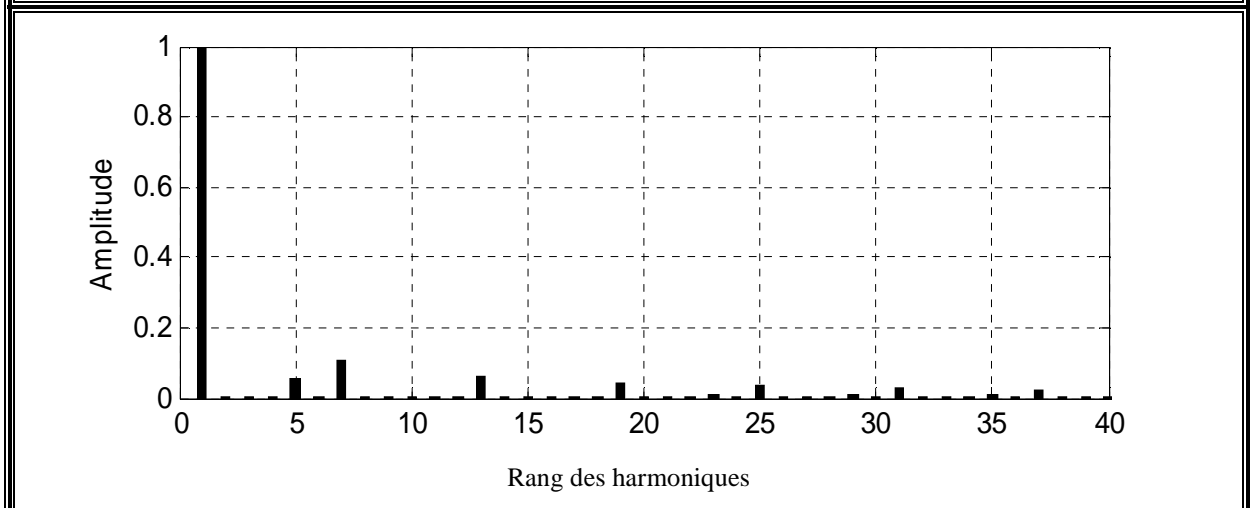
(Fig. III.15.i) : Courant Courant : $(I_{href} - I_f)$ « erreur »

Avec compensation :

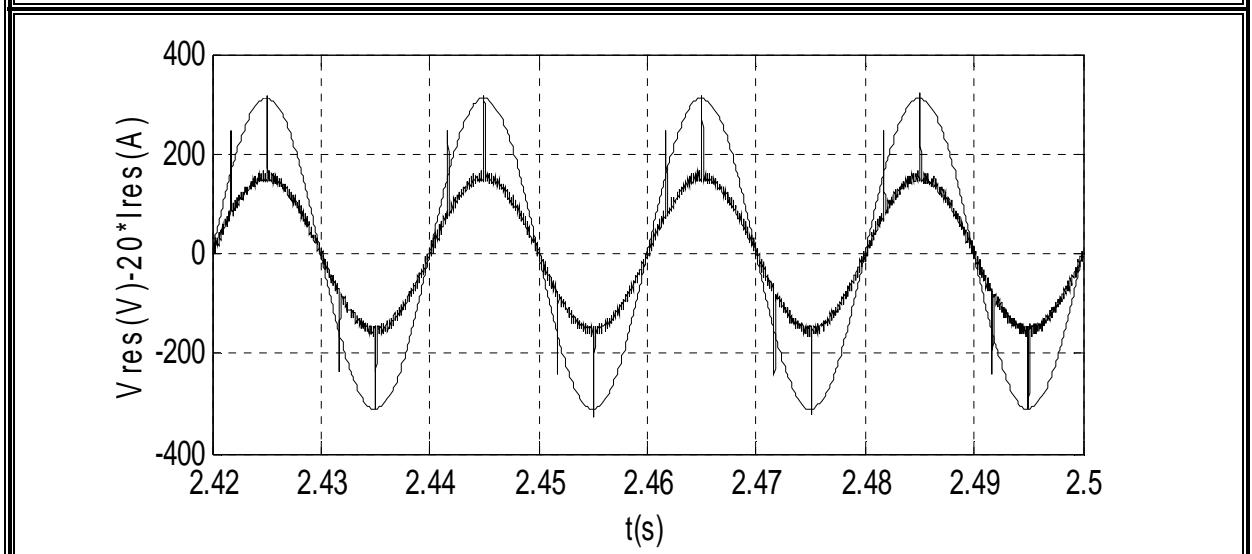
Pour $\alpha=60^\circ$



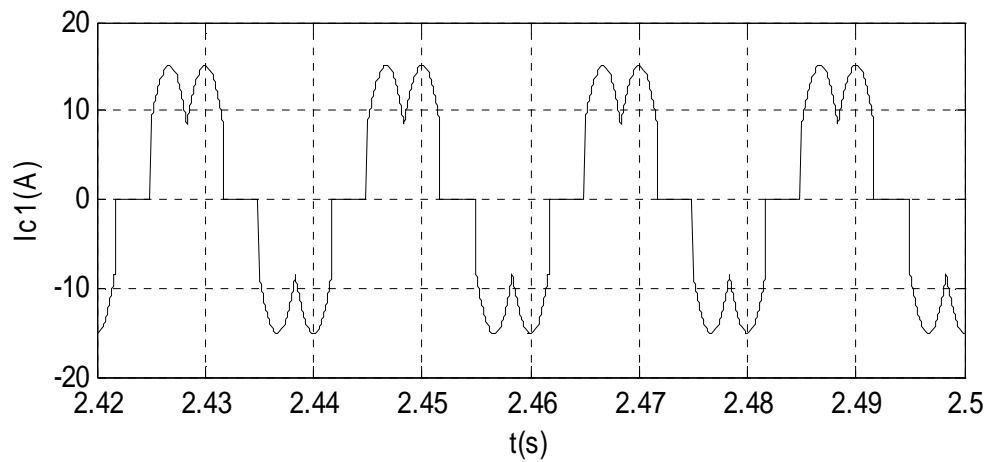
(Fig. III.16.a) : Courant de réseau après filtrage



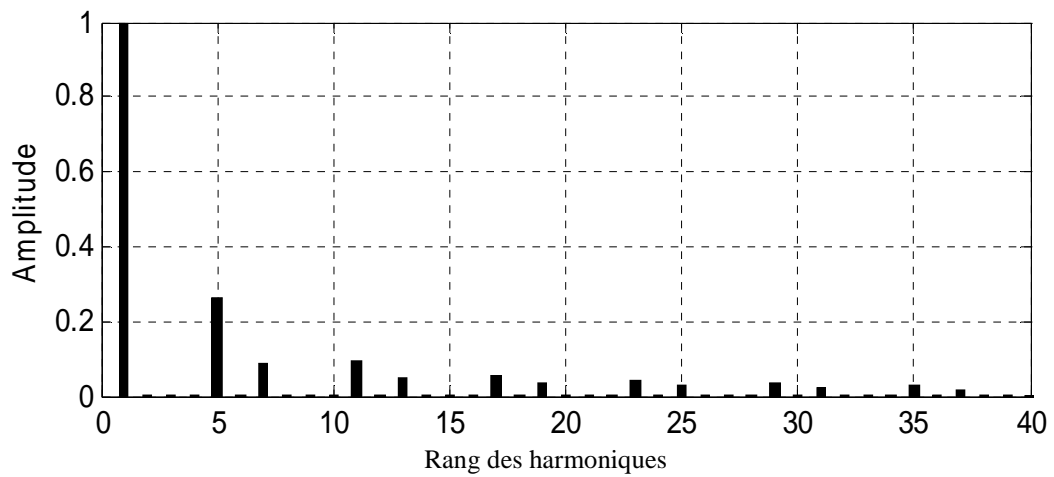
(Fig. III.16.b) : Spectre du courant de réseau après filtrage



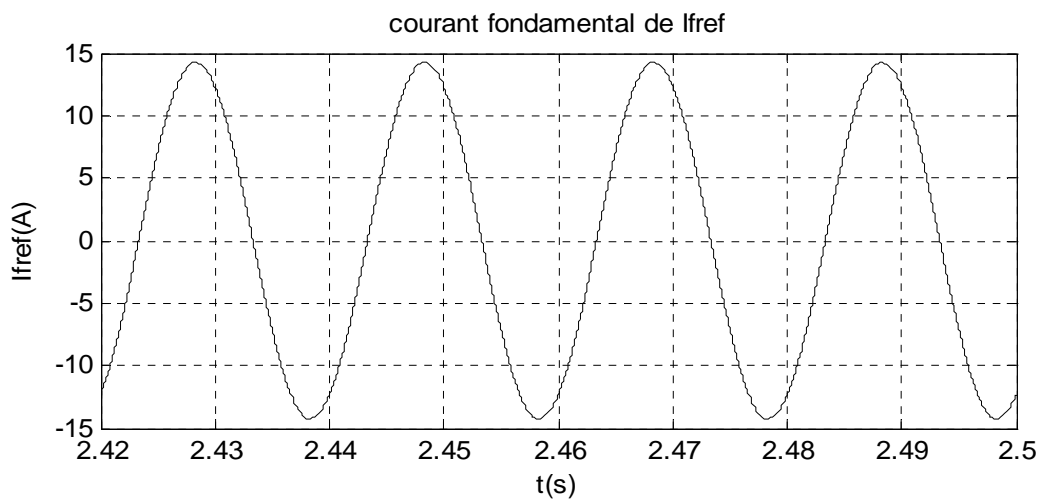
(Fig. III.16.c) : Tension et courant de réseau après filtrage



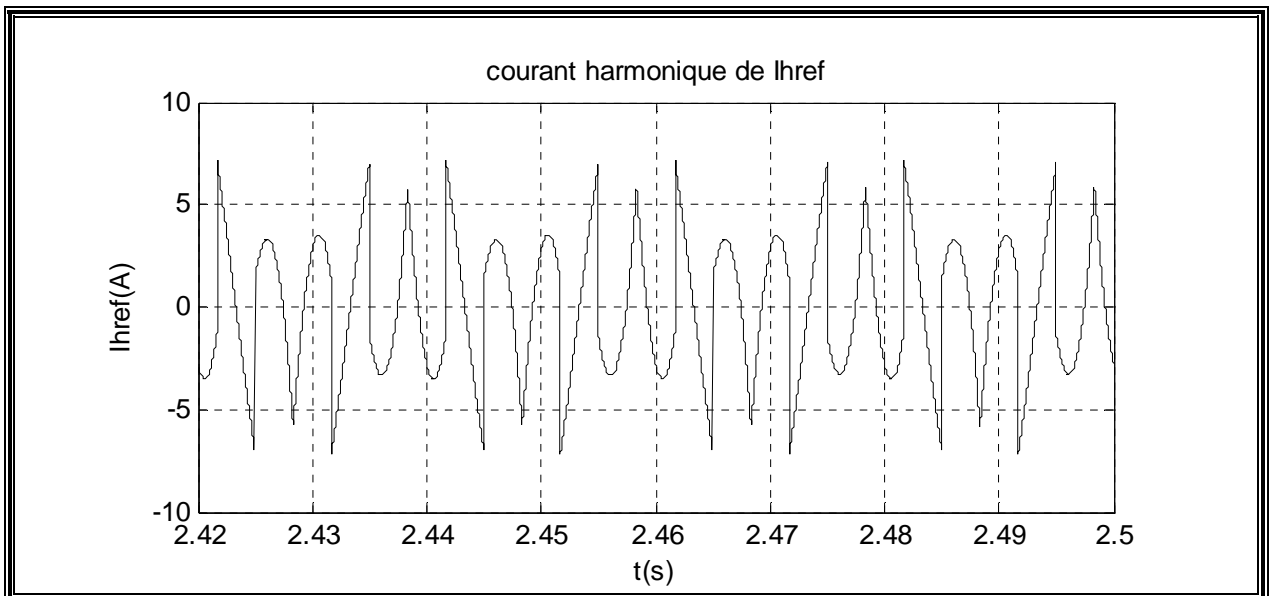
(Fig. III.16.d) : Courant de charge



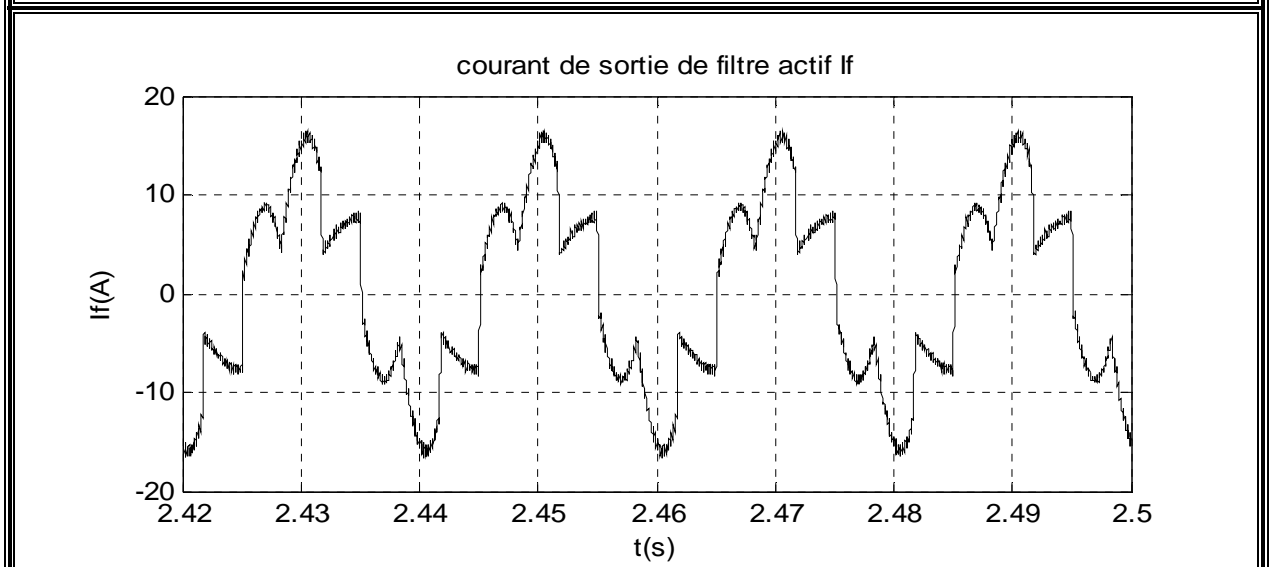
(Fig. III.16.e) : Spectre du courant de charge



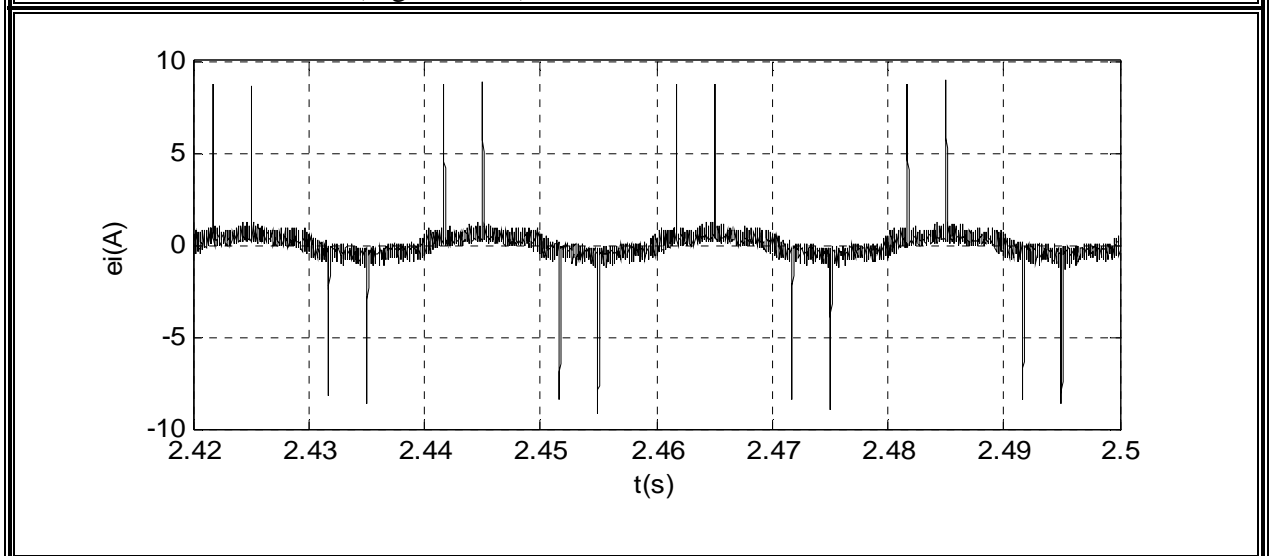
(Fig. III.16.f) : Courant fondamental de référence



(Fig. III.16.g) : Courant harmonique de référence



(Fig. III.16.h) : Courant de sortie du filtre actif



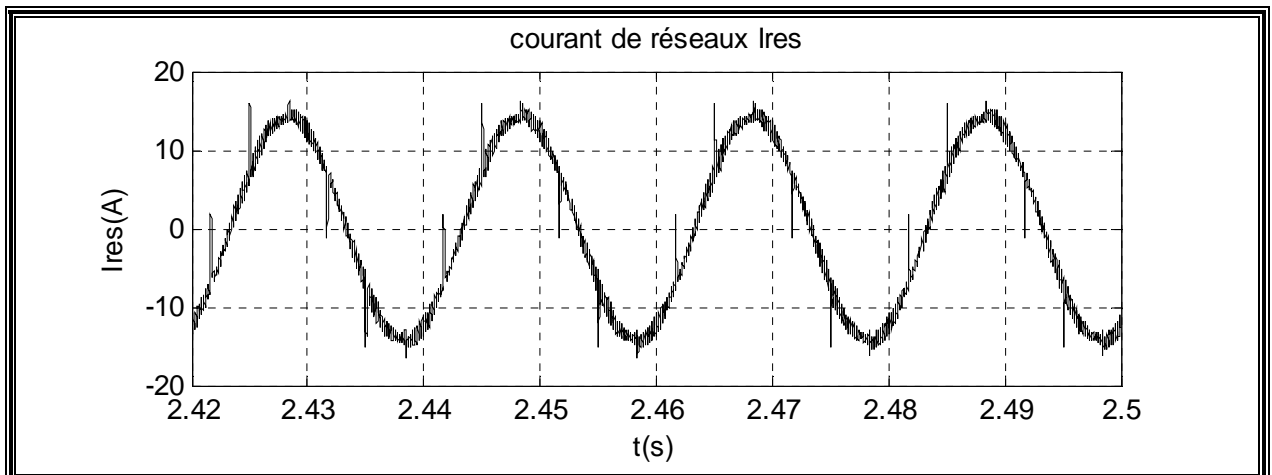
(Fig. III.16.i) : Courant : $(I_{href} + I_r - I_f)$ « erreur »

ANNEXE 2

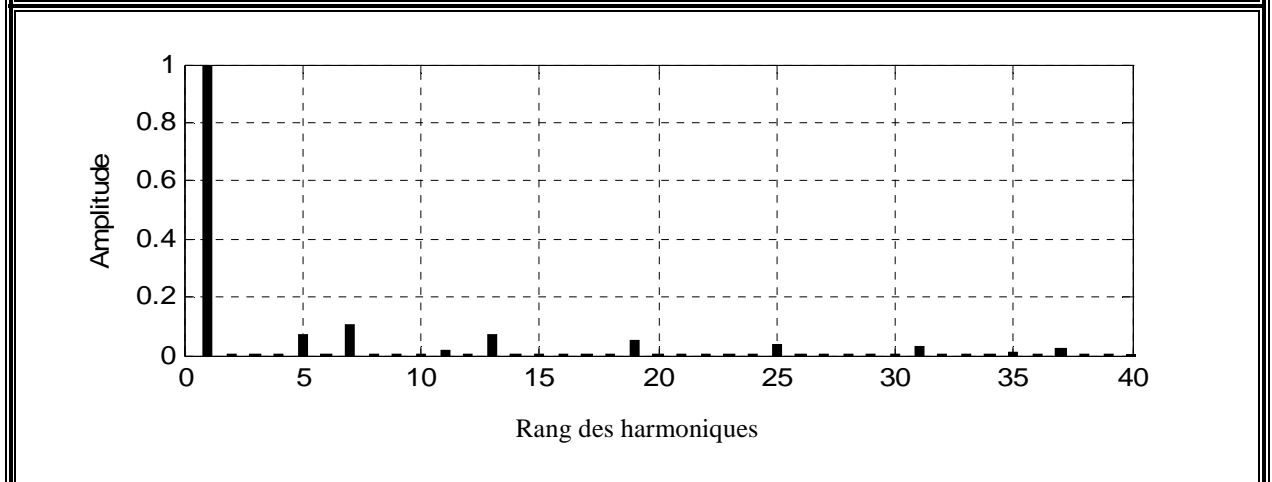
Résultats de simulation de l'application du filtre actif parallèle à la charge non linéaire en utilisant la commande MLI :

Sans compensation :

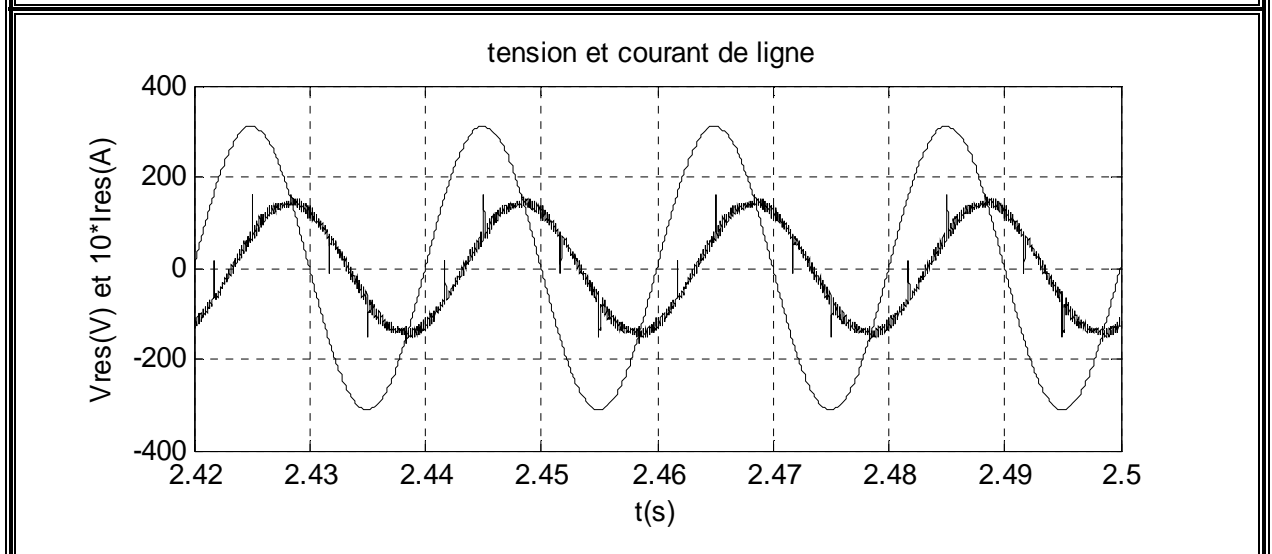
Pour $\alpha=60^\circ$



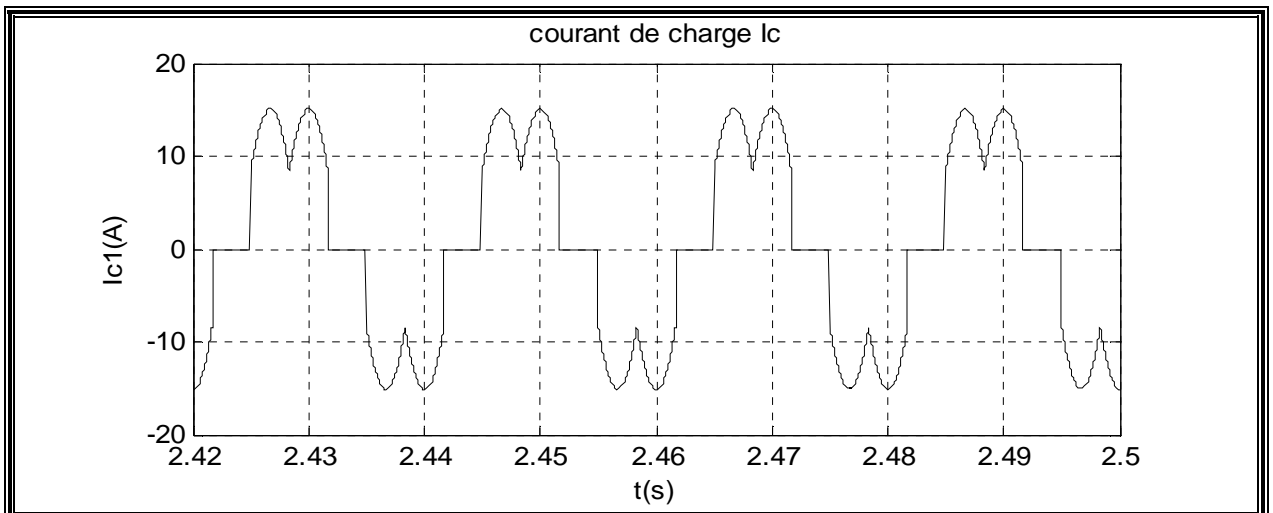
(Fig. III.17.a) : Courant de réseau après filtrage



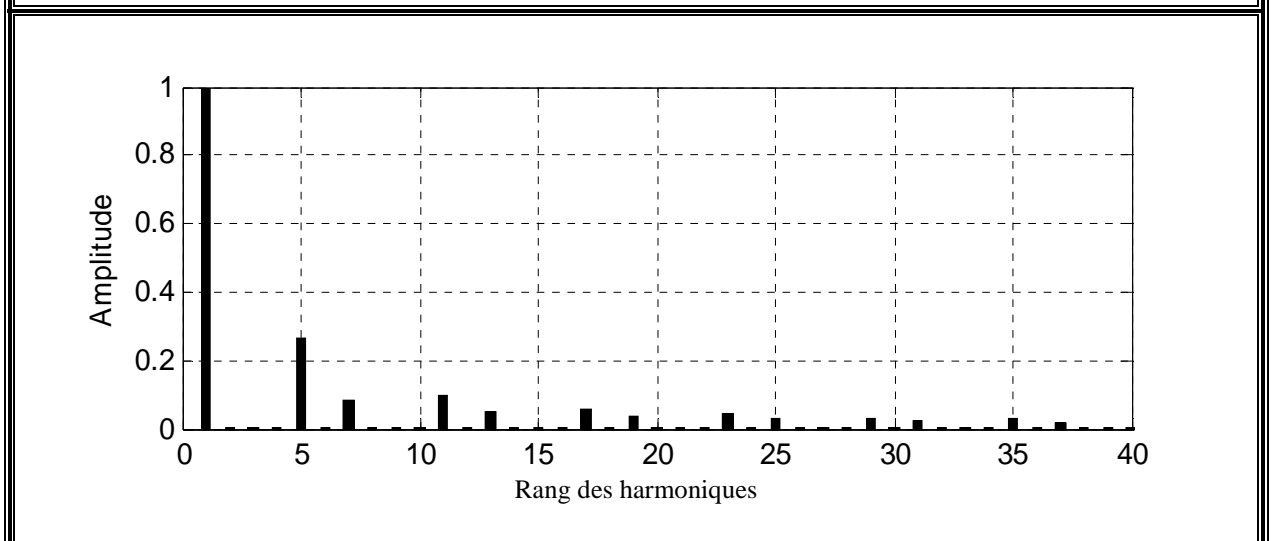
(Fig. III.17.b) : Spectre du courant de réseau après filtrage



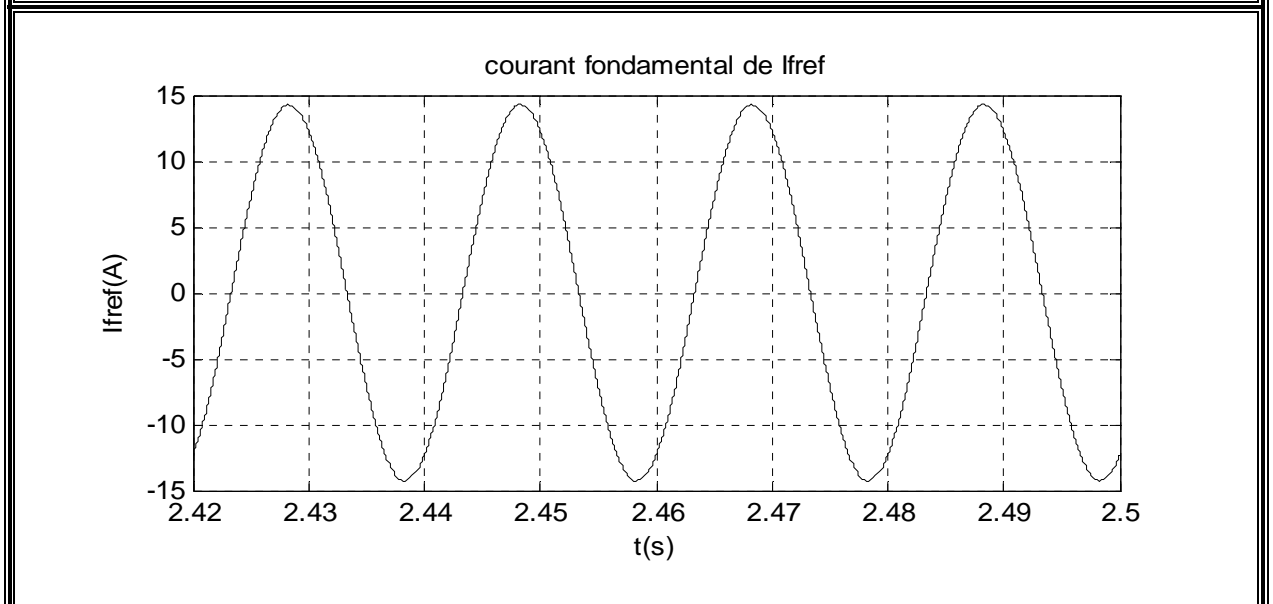
(Fig. III.17.c) : Tension et courant de réseau après filtrage



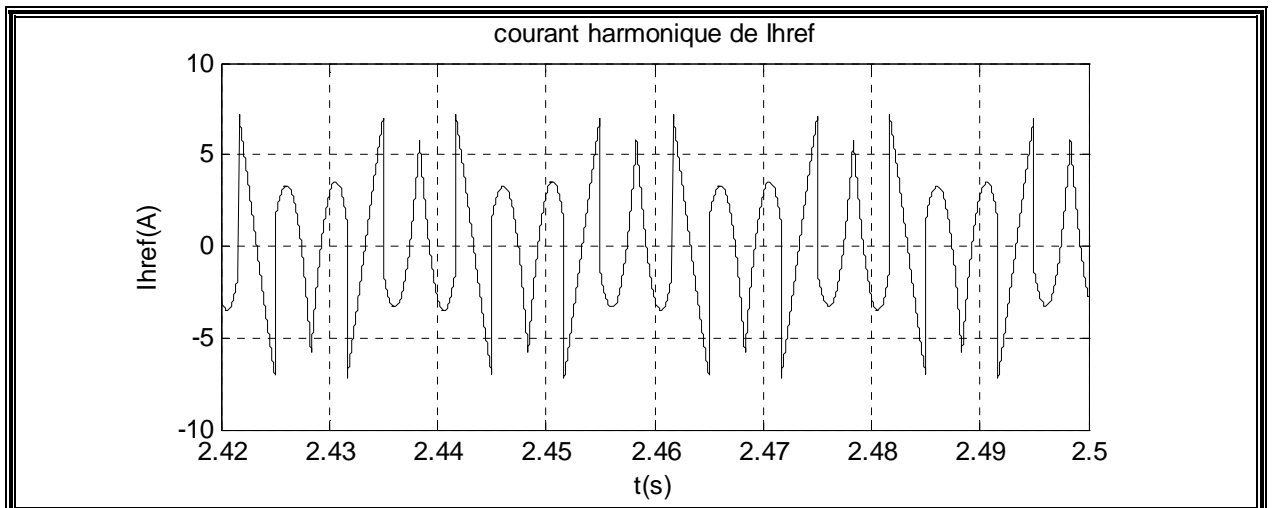
(Fig. III.17.d) : Courant de charge



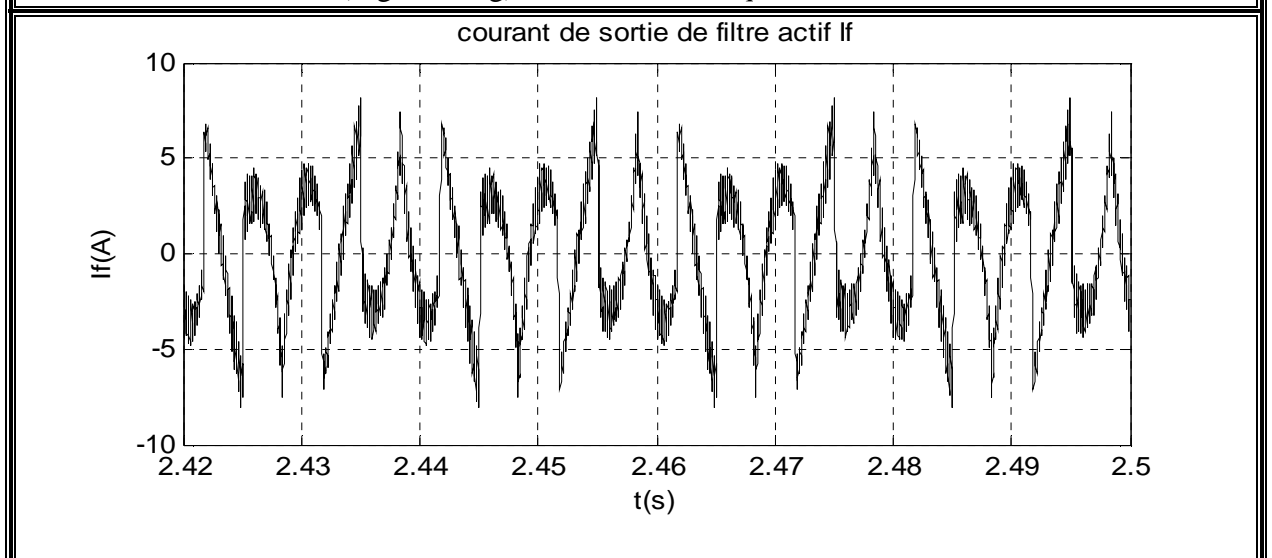
(Fig. III.17.e) : Spectre du courant de charge



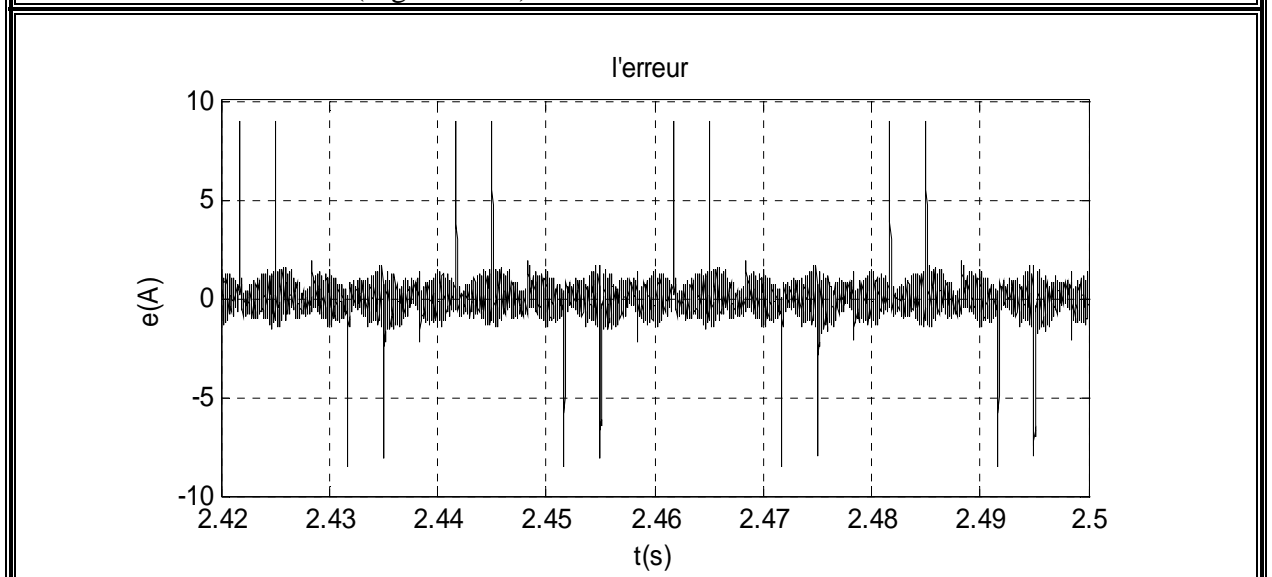
(Fig. III.17.f) : Courant fondamental de référence



(Fig. III.17.g) : Courant harmonique de référence



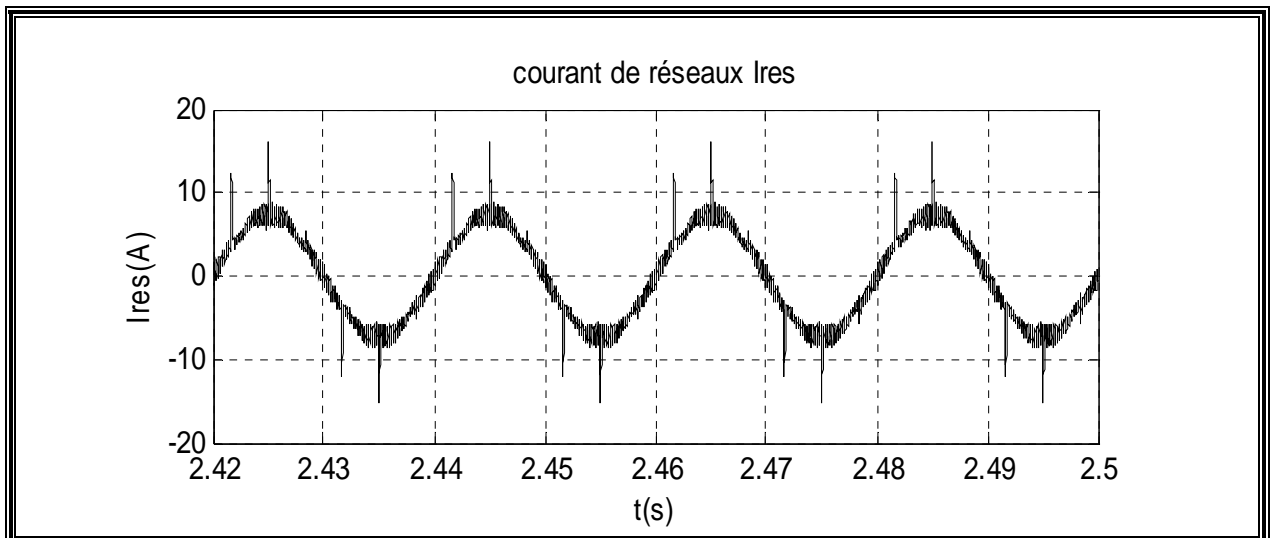
(Fig. III.17.h) : Courant de sortie du filtre actif



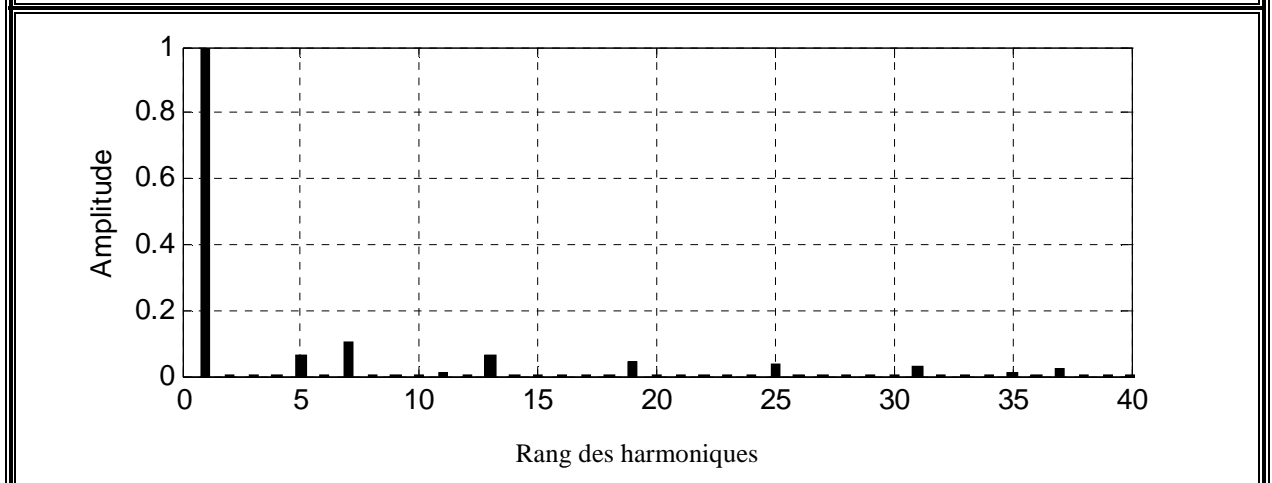
(Fig. III.17.i) : Courant Courant : (Ihref-If) « erreur »

Avec compensation :

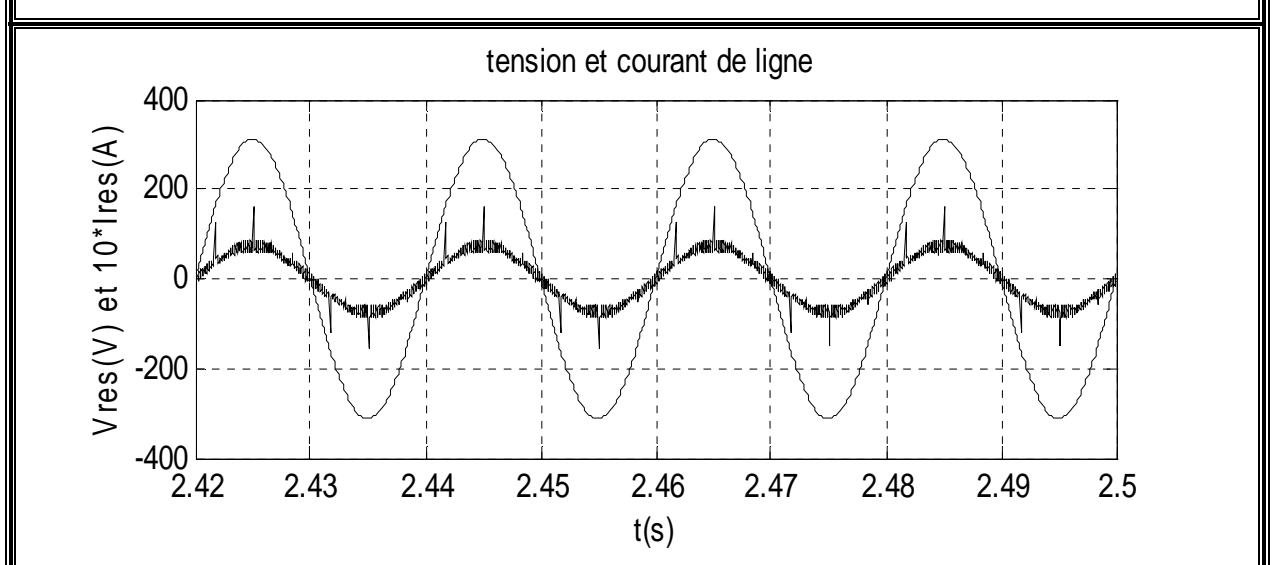
Pour $\alpha=60^\circ$



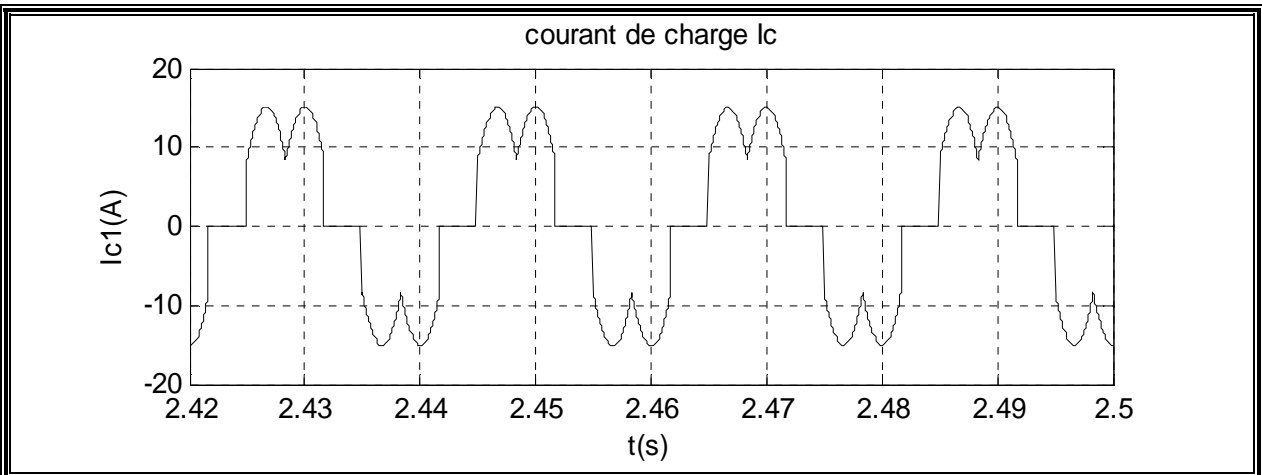
(Fig. III.18.a) : Courant de réseau après filtrage



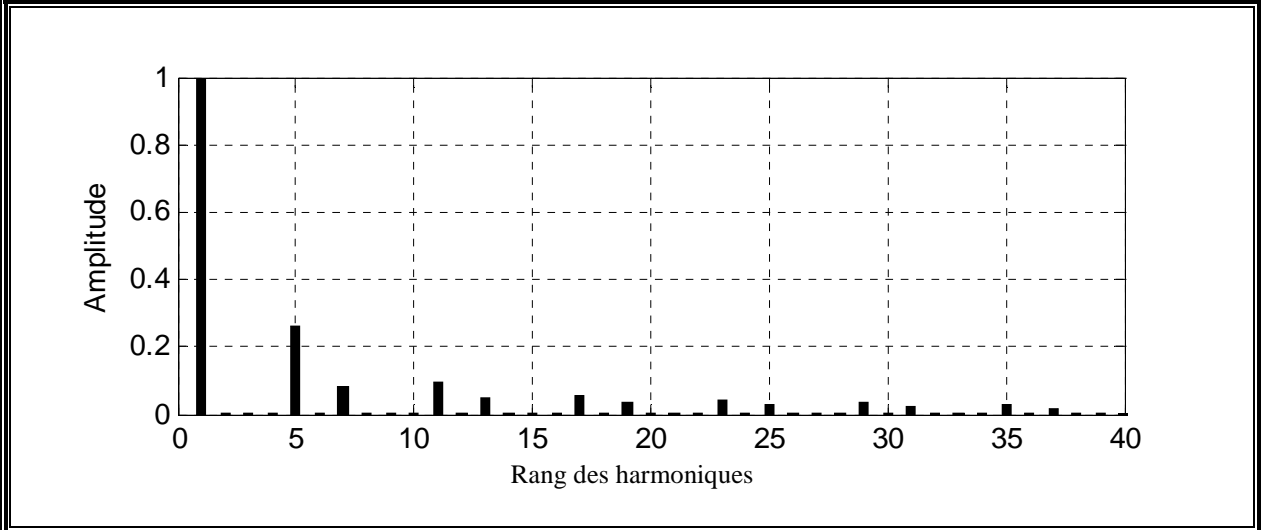
(Fig. III.18.b) : Spectre du courant de réseau après filtrage



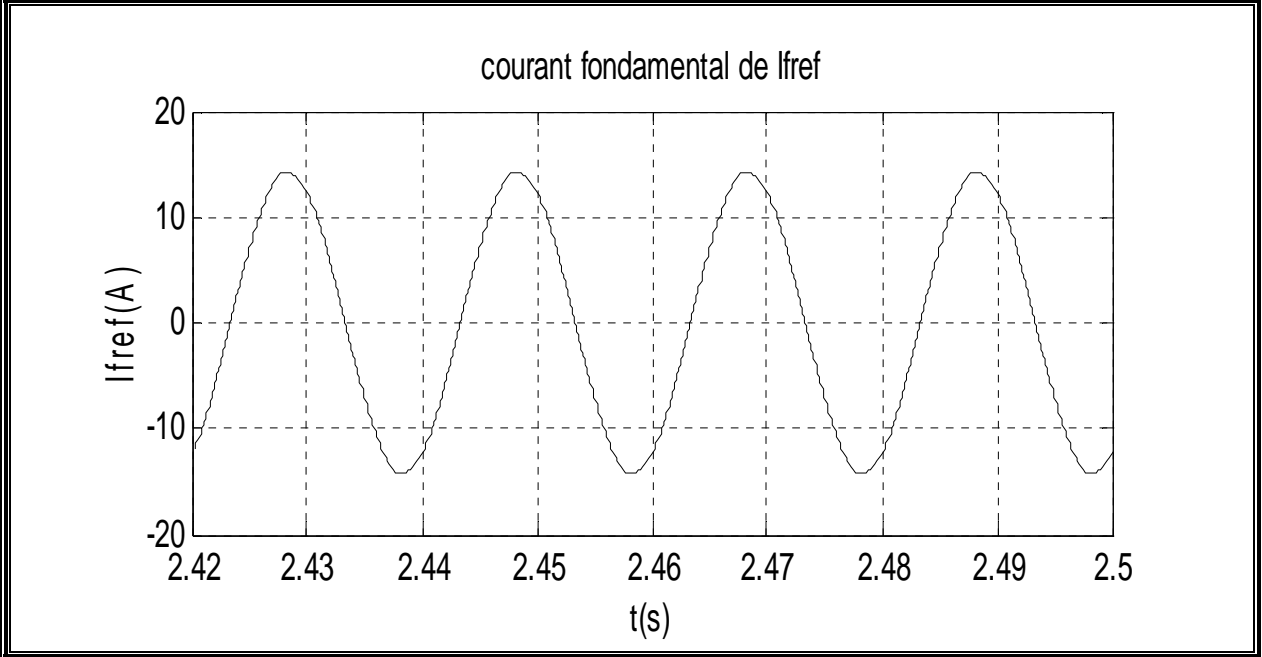
(Fig. III.18.c) : Tension et courant de réseau après filtrage



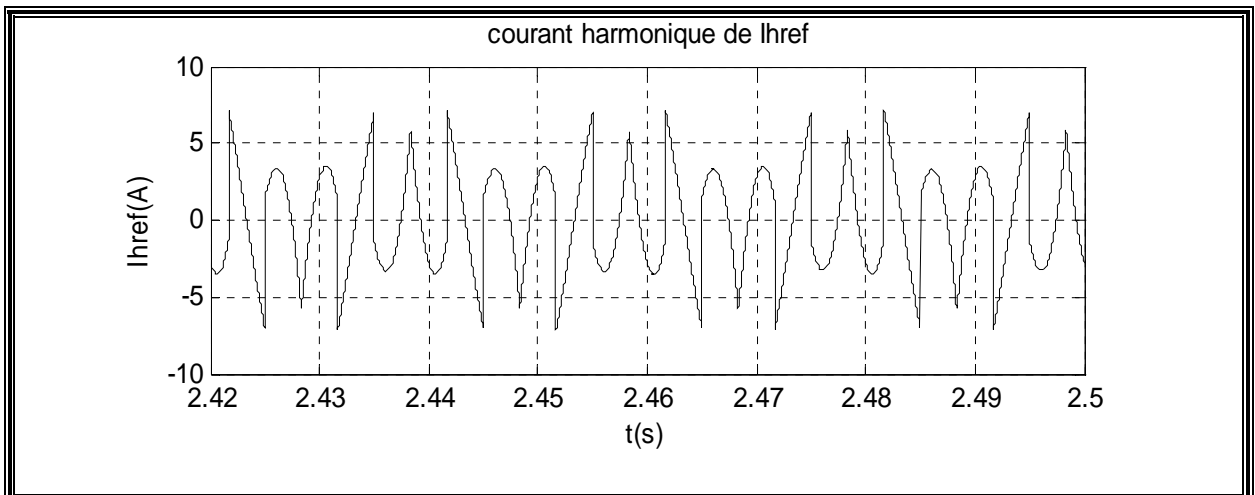
(Fig. III.18.d) : Courant de charge



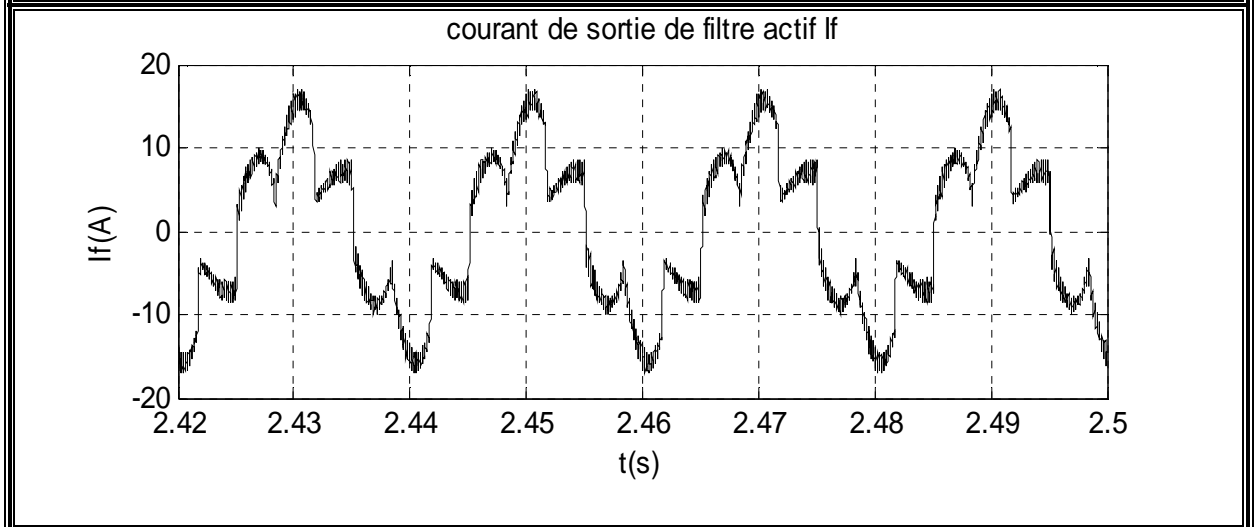
(Fig. III.18.e) : Spectre du courant de charge



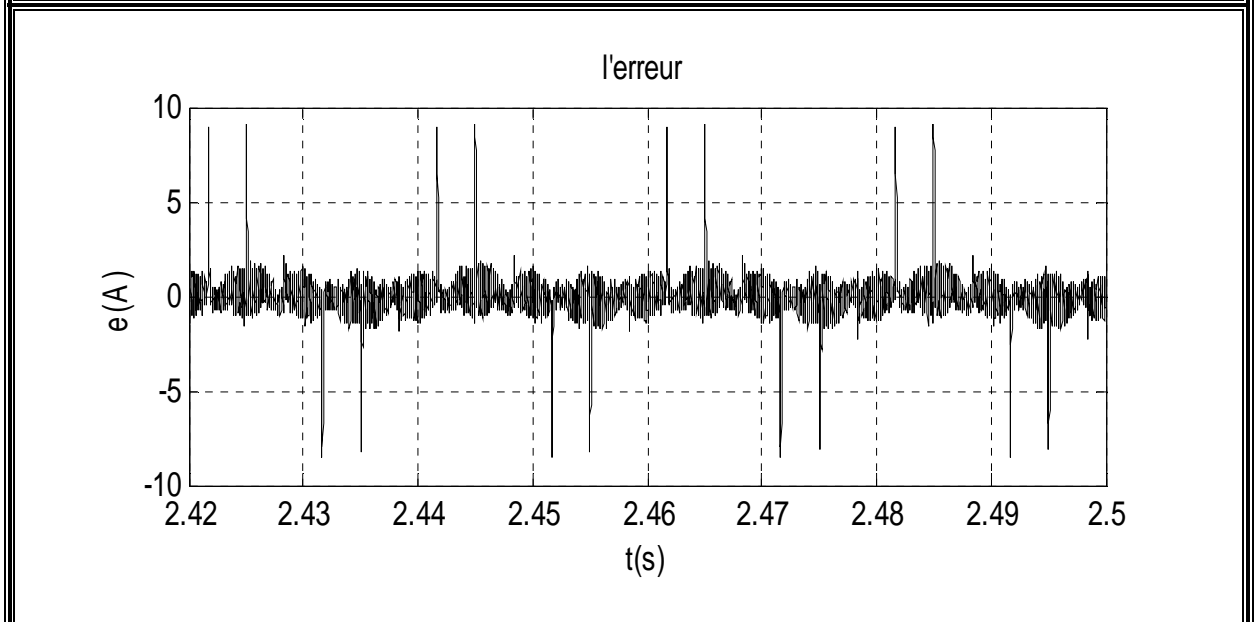
(Fig. III.18.f) : Courant fondamental de référence



(Fig. III.18.g) : Courant harmonique de référence



(Fig. III.18.h) : Courant de sortie du filtre actif



(Fig. III.18.i) : Courant : $(I_{href} + I_r - I_f)$ « erreur »

BIBLIOGRAPHIE

[ABD-99] Y. Abdelli, 1999.

« Filtrage actif parallèle à trois niveaux, principe de réglage et stabilisation ». Mémoire d'ingénieur d'état en électrotechnique, ENP, 1999.

[ALA-02] M.A.E. Alali, 2002.

« Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension ». Thèse de doctorat l'université de Louis Pasteur, Strasbourg I, 12 Septembre 2002.

[ALI-95] K. Aliouane, 1995.

« Contribution à l'étude du filtrage des harmoniques des réseaux de distribution à l'aide de l'association des filtres passifs et filtres actifs ». Thèse de doctorat de l'INPL, 1995.

[BEL-01] K. Belacheheb, 2001.

« Contribution à l'étude des systèmes de compensation FACTS en général, UPFC en particulier, pour le contrôle du transit de puissance dans un réseau de transport. ». Thèse de doctorat de l'université de HENRI POINCARÉ NANCY I, 21 Juin 2001.

[BEN-01] T. Benslimane, 2001.

« Commande numérique d'un filtre actif parallèle autonome ». Thèse de magister de l'école militaire polytechnique, 2001.

[BEN-02] R.Ben hadj, A.Bouakache, 2002.

« Filtrage actif de courant harmonique appliqué au réseau électrique ». Thèse d'ingénieur d'état en automatique. ENP, 2002.

[BER-95] E.M.Berkouk, 1995.

« Contribution à la conduite des machines asynchrones monophasée et triphasée alimenté par des convertisseurs directs, et indirects. Application aux gradateurs et aux onduleurs multiniveaux. ». Thèse de doctorat du CNAM. Paris 1995.

[BON-00] J. Bonal - G. Segurier, 2000.

« Entraînement électrique à vitesses variables. volume 3 : interaction convertisseur-reseau et convertisseur-moteur –charge ». Technique et documentation, 2000.

[BOU-06] A.Igougil,Y.Boudjema, 2006.

« Etude du changeur de fréquence à cinq niveaux à cellules imbriquées. Application à la conduite de la machine asynchrone. ». Thèse d'ingénieur d'état en électrotechnique de l'USTHB, 2006.

[BRI-05] M. A. Brikci Nigassa, B. Mazari, 2005.

« Méthodes d'extraction de courants de référence d'un filtre actif parallèle de puissance en régime déséquilibré ». Université Des Sciences et de la Technologie d'Oran – « Mohamed Boudiaf ».2005.

[ETX-03] I.Etxeberria-Otadui, 2003.

«Les systèmes de l'électronique de puissance dédiés à la distribution électrique – Application a la qualité de l'énergie. ». Thèse de doctorat de l'institut national polytechnique de Grenoble, le 26 septembre 2003.

[FET-06] C.Fetha, 2006.

« Analyse et amélioration de l'indice de la non symétrie de tension dans la qualité de l'énergie électrique ». Thèse de doctorat de Université de Batna 27 Mai 2006.

[GHE-04] T. Ghennam, 2004.

« Etude et réalisation d'un compensateur actif de puissance commandé par DSP ». Thèse de magister EMP, 2004.

[GHO-03] E. Gholipour Shahraki, 2003.

« Apport de l'UPFC à l'amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques ». Thèse de doctorat de Université HENRI POINCARÉ, NANCY-I. Le 13 Octobre 2003.

[HIN-00] N.G. Hingorani and L. Gyugyi, 2000.

« Understanding FACTS. », IEEE Press., New York ,2000.

[KET-05] B.Ketem, N.Mehenni , 2005.

« Application des onduleurs multi niveaux au filtrage actif des réseaux ». Mémoire d'ingénieur d'état en électrotechnique de l'USTHB, 2005.

[KOU-06] H.Kouara,2006.

« Application d'un filtre actif série au contrôle de la tension d'un réseau basse tension ». Thèse de magister en électrotechnique de Université de Batna 08 février 2006

[LAD-02] P. Ladoux, G. Ollé, 2002.

«Compensateur d'harmoniques et de puissance reactive » Publication RESELEC 2002

[LAR-98] Larouci, 1998.

« Onduleur à trois niveaux utilisé en filtrage actif parallèle ». Mémoire d'ingénieur d'état en électrotechnique, ENP, 1998.

[OUL-05] Dj.Ould Abdeslam, 2005.

« Techniques neuromimétiques pour la commande dans les systèmes électriques : application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basse tension. ». Thèse de doctorat de l'Ecole Doctorale PLURIDISCIPLINAIRE Jean - Henri LAMBERT, 2005.

[OUL-06] Ould Abdeslam, D., Wira, P., Flieller, D., and Mercklé, J.2006.

« Une nouvelle approche neuromimétique pour l'identification et la compensation des harmoniques dans les systèmes électriques. ». International Conference on Electrical Engineering and its Applications, Sidi Bel-Abbes, Algeria, 2006.

[SON-99] A. Sonnenmoser and P.W. Lehn 1999.

« Line current balancing with a Unified Power Flow Controller ». IEEE Trans. On Power Delivery , vol. 14,No. 3, pp. 1151- 1157, July 1999.

Résumé :

Dans un réseau électrique basse tension, les harmoniques, la puissance réactive, les déséquilibres de courant et de tension, et les creux de tension ont des effets néfastes sur les équipements électriques.

Dans cette thèse, nous avons abordé les structures de filtres actifs parallèles et combinées (UPFC) en vue d'étudier la compensation des perturbations des courants harmoniques susceptibles d'apparaître dans le réseau électrique.

Nous avons élaboré deux modèles de commande de la cascade redresseur à deux niveaux - onduleurs à deux niveaux (ou UPFC), les deux techniques de commandes sont : la commande MLI et la commande par hystérésis, elles sont appliquées pour l'onduleur ainsi que pour le redresseur.

Mots clés

Filtre actif parallèle, redresseur MLI, UPFC, harmoniques, compensation de la puissance réactive, méthodes d'identification.

Abstract

In an electrical network, unbalanced and harmonic currents generated by nonlinear and unbalanced loads can cause harmonics and unbalanced voltage. These voltage perturbations along with voltage sag can strongly degrade customer power quality.

Nowadays, the active filters such as shunt, and combined shunt-series (UPFC) are studied as a flexible solution to compensate all harmonics current perturbations.

We modelled each element of the cascading; two techniques control by the PWM and control by current hysteresis are applied for the tow level inverter and tow level converter.

Key words

Shunt actif filter, PWM converter UPFC, harmonics, compensated reactive power, voltage sag, control, poles placement, experimental feasibility.

ملخص:

في الشبكات الكهربائية ذات التوتر المنخفض، الاضطرابات الناتجة عن التيار غير الخطي والاستطاعة الرديئة و عدم توازن التوتر و التيار لهم نتائج سلبية على التجهيزات الكهربائية.

في هذه الأطروحة، تناولنا هياكل المرشحات النشيطة المتوازية و المدمجة (UPFC) من أجل دراسة و تصحيح الاضطرابات الناتجة عن التيار و الممكن وجودها في الشبكة الكهربائية.

لقد قمنا أيضا بإنشاء نظامين للتحكم في (UPFC) هما نظام MLI و نظام hystérésis ، كلا النظامين مطبقان على المقوم ثلاثي الطور ذو الطابقين و المموج ثلاثي الطور ذو الطابقين.

كلمات مفتاحية:

مرشح نشيط متوازن، مقوم MLI ، UPFC ، الاضطرابات، مموج ثلاثي الطور ذو طابقين ، الاستطاعة الرديئة.