

République Algérienne Démocratique Et Populaire

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen

Faculté de Technologie

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE POUR L'OBTENTION DU

DIPLOME DE MASTER

Spécialité : *Réseau Electrique Et Réseau Electrique Intelligent*

Préparé au Département de Génie Electrique et Electronique

Présenté par

Fatiha EMMERI & Zouleykha GHEMBAZA

Intitulé du mémoire

**Etude et simulation d'un circuit de commande pour filtre actif
de puissance à quatre bras pour un réseau à quatre fils**

Soutenu publiquement le 25 Juin 2015 devant la commission d'examen composée de :

A .KHAROUS	Président	M.C.A	U.A.B - Tlemcen
M.A.BRIKCI NIGASSA	Encadreur	M.A.A	U.A.B - Tlemcen
M.C. BENHABIB	Co-Encadreur	M.C.B	U.A.B - Tlemcen
A. MECHERNENE	Examineur	M.C.B	U.A.B - Tlemcen
S. CHAKROUNE	Examineur	M.A.B	U.A.B - Tlemcen

Année Universitaire : 2014 : 2015

Dédicaces

*Je dédie modestement le fruit de mes longues années d'étude
tout d'abord :*

**A mon très cher père qui mérite tout mon respect. Bahri*

**A la prunelle de mes yeux et la joie de ma vie
ma mère Belhadje Bahidja*

**A mon marie Khebichat Abdelkrim . Pour son
Soutien moral et les nombreux encouragements
que j'ai toujours reçue de sa part.*

*Je vous dis merci pour tout ce que vous avez fait et de ce que
vous me ferez plus tard, que dieu vous protège, vous laisse toujours
devant mes yeux et vous réserve une longue vie.*

Je le dédie aussi :

**A mes sœur : Fatiha, Hayat et l'adorable Zahia*

** A toute ma grande famille : mes Oncles, mes Tantes,
Cousines, Cousins.*

**A toutes et tous mes amis*

** Sans oublier toute la promotion de 2^{ème} Année Master
REFEI et CDM / 2015*

Avec qui j'ai partagé de très bons moments

Ghembaza Zouleykha

Dédicaces

Je dédie ce travail

A mon cher Père

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

A mes sœurs Samah et Imane, qui n'ont cessé d'être pour moi des exemples de persévérance, de courage et de générosité.

A mon frère Kheireddine

A tous les membres de la famille Emmeri, petits et grands

A mes chères ami(e),

Sans oublier toute la promotion de 2^{ème} Année Master REREI 2015

Emmeri Fatiha

Remerciements

*Avant tout, nous remercions notre Dieu le tout puissant de nous avoir
donné la force d'atteindre
notre but et d'accomplir notre travail.*

*Que nos remerciements les plus sincères s'adressent tout
particulièrement à notre encadreur Monsieur
M.A BRIKCI NIGASSA, Maitre-assistant et **M.C BENHABIB** qui nous
ont encadrées durant tout le long de ce travail, pour leur disponibilités,
leur conseils, pour leur patiences, leur soutien permanent et leur
encouragements qui
nous ont permis de mener à bien ce mémoire.*

*Nos remerciements vont également à Mr. **A. KHEROUS**, maître de
conférences a bien voulu présider notre jury de mémoire.*

*Nos vifs remerciements vont aussi à nos examinateurs Mr
A.MECHERNENE maitre de conférences et Mme **S.CHAKROUNE**
Maître de conférences pour avoir accepté d'être examinateurs de notre
travail.*

*Nos remerciements vont également à tous les personnes qu'on n'a pas
citées et qui ont de près ou de loin participé à la réalisation de ce travail*

Sommaire

Chapitre I : Qualité d'énergie des réseaux électrique

Introduction	5
I.1 Qualité de l'énergie	5
I.2 Caractéristiques et origines des perturbations électriques	5
I.3. Types de perturbation.....	6
I.3.1 Creux de tension.....	7
I.3.2 Fluctuations de la valeur efficace.....	7
I.3.3 Fluctuations de la fréquence.....	7
I.3.4 Déséquilibre du courant et tension des systèmes triphasés	7
I.3.5 Perturbations harmoniques en courant et en tension	7
I.4 Qualité de l'onde dans le réseau 4 fils	11
I.5 Moyen de protection des réseaux électriques.....	11
I.5.1 Surdimensionnement du neutre.....	11
I.5.2 Transformateurs déphaseurs	11
I.6 Choix du raccordement des charges polluantes au réseau	12
I.7 Solution classique de dépollution	13
I.7.1. Dépollution du courant.....	13
I.7.2 Solution modernes.....	14
I.8 Normes imposé sur le THD	17
I.9 Conclusion	17

Chapitre II Commande d'un filtre actif de puissance à quatre bras

Introduction.....	19
II.1 Description du système.....	19
II.1.1 Modèle du réseau	19
II.1.2 Modèle de la charge.....	20
II.1.3 Principe du filtre actif parallèle.....	21
II.2. Topologies de filtre actif de puissance parallèle relié à un réseau électrique à quatre fils	22
II.2.1. Il existe deux topologies de filtre actif parallèle à quatre fils, à savoir Filtre actif de puissance de tension a trois bras a point milieu	22
II.2.2. filtre actif de puissance de tension à quatre bras.....	22

II.2.3. Avantages et inconvénients des topologies de filtre actif de puissance parallèle relié à un réseau électrique à quatre fils.....	24
II.3. Structure d'un filtre actif parallèle à quatre bras	25
II.3.1. Onduleur	25
II.2.3. Filtre de découplage	28
II.2.4. système de stockage d'énergie	28
II.4. Stratégies de commande	28
II.4.1. Méthode des puissances réelle, imaginaire et homopolaire instantanées avec proposition d'une simplification	29
II.4.2. Méthode directe dite vecteur croisé « cross-vector »	33
II.4.3. Méthode directe dite théorie p-q-r	36
II.4.4. Méthode directe utilisant la théorie du référentiel lié au synchronisme(SRF)	39
II.5. Conclusion	41

Chapitre III : Résultats de simulation

Introduction.....	42
III.1. Description du réseau électrique sans filtre actif de puissance	42
III.2. Description du réseau électrique avec filtre actif de puissance	49
III.2.1 Méthode des puissances instantanées modifié «p-q-o »	50
III.2.2.Méthode directe dite vecteur croisé « cross-vector ».....	57
III.2.3.Méthode p-q-r :	64
III.2.4.Méthode directe utilisant la théorie du référentiel lié au synchronisme (SRF)	71.
.III.3.Interprétation des résultats :	78
.III.4. Conclusion	81

Conclusion Générale

Annexe

Bibliographie

Liste de figures

Figure I. 1 : Décomposition harmonique d'une onde polluée	10
Figure I. 2 : Utilisation des transformateurs déphaseurs pour éliminer le 5 ^{ème} et 7 ^{ème} harmoniques..	12
Figure I. 3: Raccordement des charges non linéaires sur un réseau électrique.	13
Figure I. 4 : Filtre actif parallèle.....	15
Figure I. 5: Filtre actif série (FAS)	15
Figure I. 6: Combinaison parallèle-série de filtres actifs	16
Figure I. 7 : Classification des filtres hybrides	17
Figure II. 1 : modèle du réseau.....	19
Figure II. 2: modèle de la charge	20
Figure II. 3: principe de filtre actif parallèle	21
Figure II. 4 : Système triphasé comportant le filtre actif parallèle à quatre fils avec un condensateur à point milieu	22
Figure II. 5 : Système triphasé comportant le filtre actif parallèle.....	23
Figure II. 6 : Convertisseur à quatre bras à structure tension utilisé dans un FAP relié à un réseau électrique à quatre fils	24
Figure II. 7: commande par hystérésis	26
Figure II. 8 : Principe de la commande par MLI.....	26
Figure II. 9 : commande d'un filtre actif de puissance par la méthode des puissances instantanées simplifiée	31
Figure II. 10: commande d'un filtre actif de puissance par la méthode directe dite Vecteur Croisé	34
Figure II. 11: commande d'un filtre actif de puissance par la méthode directe dite théorie p-q-r .	37
Figure II. 12: Commande d'un filtre actif de puissance par la méthode directe dite théorie SRF ...	39
Tableau II. 1:avantage et inconvénients des topologies de filtre actif de puissance relié a un reseau électrique à quatre bras	23
Tableau II. 2 : Tension générées par l'onduleur de tension a quatre bras	25
Tableau II. 3 : les modes de compensation de la commande des puissances instantanées	30
Tableau II. 4 : les modes de compensation de la commande dite cross – vector.....	33
Tableau II. 5: les modes de compensation de la commande p-q-r	36
Tableau II. 6: les modes de compensation de la commande dite du synchronisme lié au référentiel	38

Figure III. 1: Schéma d'un réseau triphasé à quatre fils alimentant trois charges non-linéaires	42
Figure III. 2: Tension triphasé coté source	44
Figure III. 3: Courant absorbé par une des charges non linéaire de la phase 1	44
Figure III. 4: FFT du courant de charge de la première phase.....	44
Figure III. 5: Courant du neutre sans filtre	45
Figure III. 6: Tension triphasé coté source	45
Figure III. 7: Courant de charge triphasé	45
Figure III. 8: FFT des trois phases des courants de charges	46
Figure III. 9: Courant de neutre	47
Figure III. 10: Tension de source triphasée.....	47
Figure III. 11: Courant de charge.....	47
Figure III. 12: Résultat des FFT pour les trois phases	48
Figure III. 13: Courant de neutre	49
Figure III. 14: Modèle de simulation	49
Figure III. 15: Tension triphasé de source	50
Figure III. 16: Courant de charge de la 1ère phase	50
Figure III. 17: Courant de filtre de la 1ère phase.....	51
Figure III. 18: Courant de source de la 1ère phase	51
Figure III. 19: Courant du neutre avant filtrage	51
Figure III. 20: Courant du neutre après filtrage	52
Figure III. 21: Tension aux bornes de condensateur	52
Figure III. 22: Tension de source triphasée.....	52
Figure III. 23: Courant de charge triphasé	53
Figure III. 24: Courant de filtre triphasé	53
Figure III. 25: Courant de source triphasé	53
Figure III. 26: Courant de neutre avant filtrage	54
Figure III. 27: Courant de neutre après filtrage	54
Figure III. 28: Tension à la borne de condensateur.....	54
Figure III. 29: Tension triphasé.....	55
Figure III. 30: Courant de charge triphasé	55
Figure III. 31: Courant de filtre des trois phases	55
Figure III. 32: Courant de filtre des trois phases	56
Figure III. 33: Courant de neutre avant filtrage	56
Figure III. 34: Courant de neutre après filtrage	56
Figure III. 35: Tension aux bornes de condensateur	57
Figure III. 36: Tension de source triphasée.....	57
Figure III. 37: Courant de charge de la 1ère phase.....	57
Figure III. 38: Courant de filtre de la 1ère phase.....	58
Figure III. 39: Courant de source de la 1ère phase après filtrage.....	58
Figure III. 40: Courant de neutre avant filtrage	58
Figure III. 41: Courant de neutre après filtrage	59
Figure III. 42: Tension aux bornes de condensateur	59
Figure III. 43: Tension triphasé.....	59
Figure III. 44: Courant de charge triphasé	60
Figure III. 45: Courant de filtre triphasé	60

Figure III. 46: Courant de source triphasé	60
Figure III. 47: Courant de neutre avant filtrage	61
Figure III. 48: Courant de neutre après filtrage	61
Figure III. 49: Tension de condensateur	61
Figure III. 50: Tension coté source des trois phases	62
Figure III. 51: Courant coté charge des trois phases.....	62
Figure III. 52: Courant de filtre des trois phases	62
Figure III. 53: courant coter source des trois phases	63
Figure III. 54: courant du neutre avant filtrage	63
Figure III. 55: courant du neutre après filtrage	63
Figure III. 56: tension aux bornes du condensateur	64
Figure III. 57: Tension de source triphasée.....	64
Figure III. 58: Courant de charge de la 1 ^{ère} phase	64
Figure III. 59: Courant de filtre de la 1 ^{ère} phase	65
Figure III. 60: Courant de source de la 1 ^{ère} phase	65
Figure III. 61: Courant de neutre avant filtrage	65
Figure III. 62: Courant de neutre après filtrage	66
Figure III. 63: Tension aux bornes de condensateur	66
Figure III. 64: Tension de source triphasée.....	66
Figure III. 65: Courant de charge triphasée	67
Figure III. 66: Courant de filtre triphasé.....	67
Figure III. 67: Courant de source triphasée.....	67
Figure III. 68: Courant de neutre avant filtrage	68
Figure III. 69: courant de neutre après filtrage	68
Figure III. 70: tension de condensateur.....	68
Figure III. 71: Tension de source triphasée.....	69
Figure III. 72: Courant de charge triphasé	69
Figure III. 73: Courant de source triphasé	69
Figure III. 74: Courant de source triphasé après filtrage	70
Figure III. 75: Courant de neutre avant filtrage	70
Figure III. 76: Courant de neutre après filtrage	70
Figure III. 77: Tension de condensateur	71
Figure III. 78: Tension de source triphasée.....	71
Figure III. 79: Courant de charge de la 1 ^{ère} phase.....	71
Figure III. 80: Courant de charge de la 1 ^{ère} phase.....	72
Figure III. 81: Courant de source de la 1 ^{ère} phase	72
Figure III. 82: Courant de neutre avant filtrage	72
Figure III. 83: Courant de neutre après filtrage	73
Figure III. 84: Courant de neutre avant filtrage	73
Figure III. 85: Tension de source triphasée.....	73
Figure III. 86: Courant de charge triphasée	74
Figure III. 87: courant de filtre triphasé.....	74
Figure III. 88: Courant de source triphasée.....	74
Figure III. 89: Courant de neutre avant filtrage	75
Figure III. 90: Courant de neutre après filtrage	75
Figure III. 91: Tension de condensateur	75
Figure III. 92: Tension de source triphasée.....	76
Figure III. 93: courant de charge triphasée	76
Figure III. 94: Courant de filtre triphasé.....	76
Figure III. 95: Courant de source triphasé	77
Figure III. 96: Courant de neutre avant filtrage	77
Figure III. 97: Courant de neutre après filtrage	77
Figure III. 98: Tension de condensateur	78

Liste des Tableaux

Tableau II. 1 : Avantages et inconvénients des topologies de filtre actif de puissance parallèle relié à un réseau électrique à quatre fils	24
Tableau II. 2 : Tension générées par l'onduleur de tension a quatre bras.	26
Tableau II. 3 : les modes de compensation de la commande des puissances instantanées.....	32
Tableau II. 4 : les modes de compensation de la commande dite cross – vector.....	34
Tableau II. 5: les modes de compensation de la commande p-q-r.....	37
Tableau II. 6: les modes de compensation de la commande dite du synchronisme lié au référentiel.....	40
Tableau III. 1: paramètre de simulation mode 01	43
Tableau III. 2: paramètre de simulation mode 02	43
Tableau III. 3: paramètre de simulation mode 03	43
Tableau III. 4: Paramètre de simulation du FAP	50
Tableau III. 5: THD des quatre commandes appliqué à notre système équilibré	78
Tableau III. 6: THD des quatre commandes appliqué à notre système déséquilibré avec un déséquilibre de charge.....	79
Tableau III. 7: THD des quatre commandes appliquées à notre système déséquilibré avec défaut monophasé	80

Glossaire

i_{ch}	<i>Courant de charge</i>
i_{chf}	<i>Courant fondamentale de la charge</i>
i_{chh}	<i>Courant harmonique de la charge</i>
i_{s123}	<i>Courant de source triphasé</i>
i_{c123}	<i>Courant de charge triphasé</i>
i_{f123}	<i>Courant injecter par le filtre triphasé</i>
l_{c123}	<i>L'inductance de ligne triphasée</i>
r_{c123}	<i>Résistance de ligne triphasée</i>
l_{f123}	<i>L'inductance de filtre de découplage triphasé</i>
r_{f123}	<i>Résistance de filtre de découplage triphasé</i>
l_{s123}	<i>L'inductance de source triphasée</i>
r_{s123}	<i>Résistance de source triphasée</i>
i_n	<i>Courant de neutre</i>
V_{s123}	<i>Tensions de la source</i>
V_n	<i>Tensions de neutre</i>
C	<i>Capacité du condensateur</i>
V_{dc}	<i>Tension aux bornes du condensateur</i>
i_f^*	<i>courant de référence</i>
i_f	<i>courant produit par l'onduleur</i>
FAP	<i>Filtre actif parallèle</i>
$IGBT$	<i>Insolated Gate Bipolar Transistor</i>
MLI	<i>Modulation par largeur d'impulsion</i>
FAP	<i>Filtre actif parallèle</i>
$UPQC$	<i>Conditionneur universel d'énergie électrique</i>
FPB	<i>Filtre passe bas</i>
PI	<i>Régulateur proportionnel intégral</i>
THD	<i>Taux de distorsion harmonique</i>
SVC	<i>Static var compensator</i>
FAS	<i>Filtre actif série</i>

Introduction Générale

L'énergie électrique est un facteur essentiel pour le développement que ce soit sur le plan de l'amélioration des conditions de vie ou sur le plan du développement des activités industrielles.

La qualité de cette énergie électrique est devenue de nos jours une grande préoccupation à la fois pour les consommateurs et les fournisseurs d'énergie. Aussi, des critères rigoureux de développement et d'exploitation des réseaux électriques sont de plus en plus exigés. Cela est d'autant plus vrai que les réseaux électriques sont de plus en plus soumis à des perturbations du type harmonique courant et/ou énergie réactive provenant principalement de charges non linéaires. Ces charges sont en général des systèmes commandés à base d'électronique de puissance, tels que les ponts redresseurs commandés ou non.

On assiste à une augmentation régulière de charges non linéaires en plus la possibilité d'apparition de certains défauts qui rendent la qualité de l'énergie très perturbée (harmoniques, déséquilibres, ...) avec une importante consommation de la puissance réactive.

Plusieurs solutions de dépollution des réseaux électriques ont été proposées dans la littérature. Celles qui répondent le mieux aux exigences industrielles sont les compensateurs actifs de puissance (parallèles, série et la combinaison parallèle-série).

Les filtres actifs de puissance compensent en temps réel les différents types de perturbations qu'elles soient courants ou tensions. Cependant, il est à noter que le contrôle des filtres actifs est délicat.

Parmi les filtres actifs le plus utilisés, nous citerons le filtre actif parallèle, connecté en parallèle avec le réseau où il devra injecter des courants harmoniques en opposition de phase par rapport au réseau qui viendront s'ajouter aux courants de charges non linéaires ce qui nous donnera côté source un courant sinusoïdal.

De manière à atteindre ces objectifs, notre mémoire sera divisé en trois chapitres tels que :

Le premier chapitre sera consacré à présenter les différents phénomènes qui affectent la qualité de l'énergie électrique, on citant les différentes solutions de dépollution possibles.

Le deuxième chapitre présentera, le principe de fonctionnement d'un filtre actif parallèle ainsi que ses topologies pour le cas d'un filtre actif de puissance à quatre bras. Une description des quatre méthodes d'extraction des courants de références sera présentée.

Le troisième et dernier chapitre couvrira la présentation des résultats des simulations obtenus pour les différentes stratégies de commande que ce soit en mode équilibré ou déséquilibré. Il s'en suivra une étude comparative pour les deux modes.

Chapitre I

Qualité d'Energie

des Réseaux Electriques

Introduction

L'électricité disponible au niveau des réseaux électriques devrait être sous une forme de tension sinusoïdale et de fréquence constante. Cependant les signaux réels disponibles ne le sont pas que ce soit pour les courants ou les tensions. Ceci est dû principalement à la présence de charges non linéaires. Il est à noter que les fournisseurs imposent à leurs clients le respect de normes relatives à la qualité électrique permettant de contenir ou d'éliminer les phénomènes perturbateurs.(Annexe 01)

Il devient nécessaire d'intégrer des compensateurs pour neutraliser les perturbations courants produite par des charges non linéaires ou à la suite de l'apparition de défauts, de sorte à garantir l'intégrité du signal produit par la source.

I.1 Qualité de l'énergie [1] [2]

Les problèmes de qualité d'énergie risquent d'affecter considérablement le fonctionnement des réseaux électriques, pouvant se présenter sous différentes formes :

- Interruption courts ;
- Creux de tension ;
- Tension et/ou courant transitoire ;
- Perturbation harmonique en courant et/ou en tension ;
- Déséquilibre de tension et courant.

I.2 Caractéristiques et origines des perturbations électriques [10] [6]

Les tensions d'un réseau électrique constituent un système triphasé équilibré dont la fréquence de base est de 50 Hz. Les paramètres caractéristiques d'un tel système sont les suivants :

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

Ces défauts se manifestent sous différentes formes de perturbations qui affectent un ou plusieurs des quatre paramètres précédemment définis. On a donc quatre possibilités distinctes de perturbations :

- *Les fluctuations de la fréquence à 50 Hz* : elles sont rares et ne sont observées que lors de circonstances exceptionnelles, par exemple, certains défauts graves du réseau, au niveau de la production ou du transport ;

- *Les variations rapides de tension* : appelée aussi creux de tension et se présentent souvent sous forme d'à-coups brusques. Les creux de tension peuvent être soit isolés, soit plus ou moins répétitifs, de formes régulières ou non ;

- *La modification de la forme d'onde de la tension* : cette onde n'est plus sinusoïdale et peut-être représentée par une onde fondamentale à 50 Hz, associée soit à des harmoniques de fréquences multiples entières de 50 Hz, soit même parfois à des ondes de fréquences quelconques ;

- La dissymétrie du système triphasé, que l'on appelle déséquilibre ;

- On peut en plus, mentionner un type particulier de perturbations difficiles à classer puisqu'il concerne tout à la fois l'amplitude et la forme d'onde : ce sont les variations transitoires d'amplitudes dont la durée est inférieure à 10 ms.

I.3. Types de perturbation [3]

Les perturbations peuvent se décliner sous différentes formes :

- Les courants perturbateurs comme les courants harmoniques, les courants déséquilibrés et la puissance réactive de la charge sont majoritairement émis par des charges non linéaires, à base d'électronique de puissance, et/ou déséquilibrées ;

- Les perturbations de tension comme les creux, les déséquilibres et les harmoniques de tension trouvent généralement leur origine dans le réseau électrique lui-même. Ces types de perturbations ont des effets très néfastes sur les équipements électriques. Ces effets peuvent aller de l'échauffement, à l'arrêt des machines tournantes jusqu'à leur destruction totale.

I.3.1 Creux de tension

On appelle creux de tension (toute diminution de la tension à une valeur située entre 1 et 90 % de la tension nominale et ce, pendant une durée allant de 10 ms à 1 min. Il est caractérisé par sa profondeur ΔU et sa durée ΔT . Par ailleurs, on peut noter qu'une coupure brève n'est qu'un cas particulier du creux de tension, sa profondeur est supérieure à 99 %.

Les principales causes des creux de tension sont les perturbations dues à l'exploitation des réseaux comme la mise sous tension de gros transformateurs, les court-circuit, enclenchement des condensateurs, simple démarrage de gros moteurs...etc.

I.3.2 Fluctuations de la valeur efficace

Les fluctuations de tensions sont des variations de basses fréquences de la valeur efficace de la tension. Ces variations ont une amplitude modérée mais peuvent se produire plusieurs fois par seconde et peuvent être cycliques ou aléatoires, elles sont désignées communément par effet Flicker.

I.3.3 Fluctuations de la fréquence

Les fluctuations de fréquences sont caractérisées par des variations de la valeur nominale de la fréquence « 50 Hz » résultant des variations de vitesses des alternateurs.

I.3.4 Déséquilibre du courant et tension des systèmes triphasés

Principalement le déséquilibre est dû à la connexion des charges monophasées qui induisent la circulation de courants non équilibrés dans les impédances du réseau ainsi que l'utilisation de machines à souder, les fours à arc de tension plus élevée.

I.3.5 Perturbations harmoniques en courant et en tension

a. Historique

« La notion des harmoniques est connue depuis longtemps dans le domaine musical. Lorsqu'une corde d'une certaine longueur est mise en branle, elle émet un son

dit fondamentale et des harmoniques supérieurs. Ces harmoniques correspondent à des sons associés à des cordes dont les longueurs sont deux fois, trois fois ...plus courtes que la corde initiale. Cette relation entre son musical et longueur était parfaitement maîtrisée dans la fabrication des instruments de musique. Par la suite, l'analogie avec le son musical servira à décrire d'autres grandeurs physiques. Dans ses études sur le mouvement des astres, J.Kepler (1571- 1631) assimilera la vitesse des planètes à

une hauteur musicale. Ce n'est qu'au XVIII^{ème} siècle que le mathématicien et philosophe d'Alembert (1717- 1783) établira une liaison entre la hauteur des planètes du son musical et une fréquence. Cette découverte s'applique à la musique mais également à tous les domaines concernés par des mouvements vibratoires. L'analyse harmonique sera plus approfondie plus tard par J.Fourier (1768- 1830). Il démontrera que toute fonction périodique, de module intégrable et à vibration bornée, peut se décomposer en une somme de composantes sinusoïdales, dénommées harmoniques ».[4]

Au début du siècle dernier les chercheurs commencèrent à étudier et à analyser les harmoniques dans les réseaux électriques, dans les circuits de redresseurs, ...

b. Origine et représentation [6] [10]

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

- *Convertisseurs statiques*

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

- Les redresseurs monophasés et triphasés. Ils génèrent des harmoniques dont la fréquence dépend sensiblement de la commande adoptée ;
- Les cyclo-convertisseurs utilisés pour régler la vitesse des moteurs à courant alternatif ;

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

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

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

- Les fours à arc et à induction ;

- Les transformations ;

- Les machines tournantes ;

- Inductances saturées, etc.

c. Conséquences de la présence d'harmoniques [5]

De nombreux effets produits par les harmoniques sur les installations et équipements électriques peuvent être observés :

- L'échauffement : surchauffe du neutre, surchauffe des transformateurs, déclenchement intempestif des coupe-circuit, surcharge des condensateurs, etc.;

- Problèmes causés par les tensions harmoniques : distorsion de la tension, ...

- Problèmes causés par les courants harmoniques au niveau de l'alimentation

- Surchauffe du neutre : dans un système triphasé, la tension est déphasée de 120° , si bien que lorsque les charges sont égales, le courant résultant dans le neutre est nul. Lorsque les charges ne sont pas équilibrées, seule la résultante de la somme des courants de retour se retrouve dans le neutre. Ce principe était admis et a conduit à un sous-dimensionnement du neutre.

d. Caractérisation et normes

d.1 Taux de Distorsion Harmonique

La mesure de cette pollution est très importante car elle permet de caractériser les installations et de s'assurer de la bonne qualité de l'énergie distribuée. Différents critères sont définis pour mesurer les perturbations harmoniques, mais c'est le taux de Distorsion Harmonique (Total harmonic distortion) THD qui est le plus employé : c'est le rapport

de la valeur efficace des harmoniques avec la valeur efficace du fondamental seul.

e. Décomposition harmonique d'une onde polluée

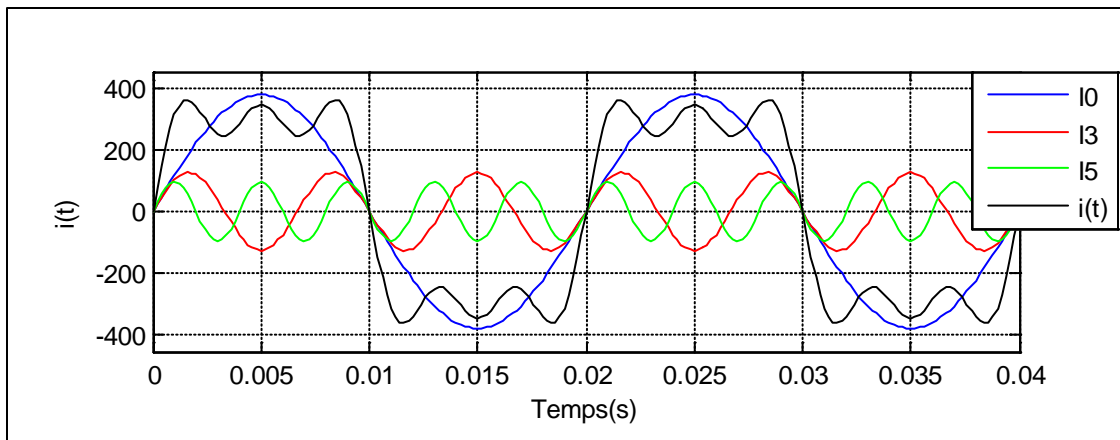


Figure I.1 : décomposition harmonique d'une onde polluée

La figure ci-dessus illustre l'allure d'une onde polluée par des harmoniques de rang 5 et 7. La décomposition de cette onde permet de mettre en évidence la composante fondamentale, ainsi que ces harmoniques considérées comme les plus néfastes. Il est à noter que dans les réseaux électriques triphasés, les principales composantes harmoniques sont des rangs 5, 7, 11 et 13 ($6 \cdot h \pm 1$, avec $h=1,2,\dots$).

L'un des convertisseurs les plus polluants, on citera les convertisseurs à diode sont très présents au niveau des charges et ce pour plusieurs raisons : ils sont non commandables et possèdent une durée de vie importante et un coût d'achat beaucoup plus faible que des solutions plus évoluées. Bien plus que les ordinateurs et autres téléviseurs, les redresseurs monophasés à diodes avec filtrage capacitif ont la particularité de générer les courants harmoniques.

I.4 Qualité de l'onde dans le réseau 4 fils [6]

Le réseau électrique triphasé à quatre fils, est caractérisé par :

- Un courant de neutre excessif due aux charges non linéaires déséquilibrées ;
- Surchauffe des circuits magnétiques, transformateurs et autres ;
- Des techniques passives peuvent être utilisées pour éliminer certain ordre harmonique

- Les techniques actives plus efficaces permettent :
 - la réduction jusqu'à l'élimination du courant neutre,
 - compensation des harmoniques,
 - compensation de la puissance réactive.

I.5 Moyen de protection des réseaux électriques

I.5.1 Surdimensionnement du neutre [7]

Dans un système équilibré, les composantes homopolaires au niveau du neutre sont nulles. Ceci n'est plus le cas pour les systèmes intégrant des charges non linéaires. Il est à noter que les courants homopolaires des harmoniques courants de rang multiple de 3 vont s'additionner dans le neutre. L'intensité de ces courants superposés peut endommager sérieusement le câble neutre. Afin d'empêcher l'usure prématurée du conducteur du neutre, il peut s'avérer avantageux de surdimensionner ce dernier. Cette solution consiste à doubler, voire même tripler les dimensions du neutre.

I.5.2 Transformateurs déphaseurs [6]

La solution pour la réduction des courants harmoniques est l'utilisation de transformateurs déphaseurs qui sont présentés dans la Fig.I.2. L'utilisation du transformateur triangle-triangle et du transformateur triangle-étoile pour alimenter les deux charges non linéaires identiques a pour effet d'éliminer les courants des 5^{ème} et 7^{ème} harmonique produit par ces deux charges. L'élimination de ces courants harmoniques est due au 30° de déphasages entre les connexions des deux transformateurs. Si les charges non linéaires sont identiques, les courants de 5^{ème} et 7^{ème} harmoniques sont éliminés au point commun de raccordement. Dans le cas contraire, un résidu de ces courants harmoniques sera toujours présent sur le réseau.

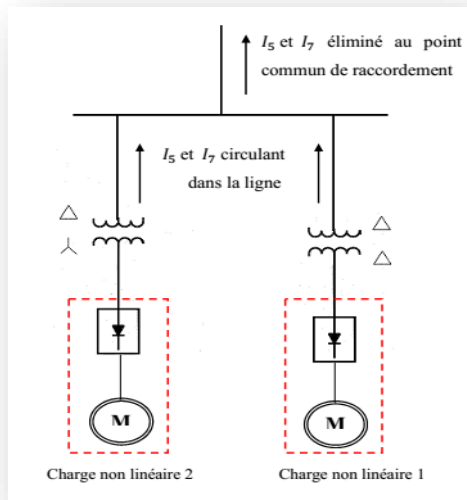


Figure I.2 : utilisation des transformateurs déphaseurs pour éliminer les 5^{ème} et 7^{ème} harmoniques

I.6 Choix du raccordement des charges polluantes au réseau

Il existe différentes techniques de branchement, à savoir :

- Branchement de la charge non-linéaire polluante sur la source d'impédance la plus faible

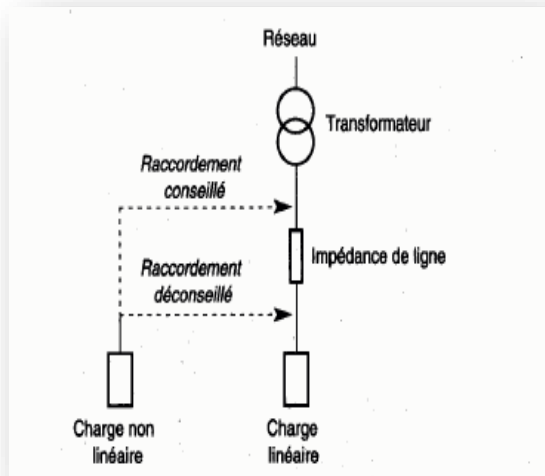


Figure I.3: raccordement des charges non linéaires sur un réseau électrique.

- Éviter le raccordement d'un récepteur sensible aux déformations à proximité d'une charge polluante.
- Séparer les charges polluantes des charges sensibles et utiliser la puissance de court-circuit la plus élevée.
- Séparation des sources polluante est possible mais coûteuse (un transformateur spécifique pour la charge polluante).

I.7 Solution classique de dépollution [9]

I.7.1 Dépollution du courant

a. Compensation de la puissance réactive

Le placement de la batterie de condensateurs en parallèle avec le réseau est l'une des techniques utilisées pour augmenter le facteur de puissance.

b. Compensation des courants harmoniques

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

- Augmentation de la puissance de court-circuit du réseau et l'utilisation de convertisseurs peu polluants qui ont pour effet de réduire la distorsion harmonique.
- Utilisation de dispositifs de filtrage pour réduire la propagation des harmoniques produite par des charges non linéaires. Le filtre passif consiste à implanter en parallèle sur le réseau électrique une impédance de très faible valeur autour de la fréquence à filtrer.

c. Dépollution des tensions

Pour dépolluer le réseau électrique des perturbations dues aux tensions harmoniques et/ou déséquilibrées, il suffit de limiter la circulation des courants perturbateurs (harmonique et/ou déséquilibre) en utilisant des solutions présentées dans le cas des perturbations de courant.

I.7.2 Solution modernes

a. La dépollution des perturbations de type courant

La première consiste à développer des charges les moins polluantes possibles telles que le pont redresseur.

Les familles de filtres actifs de puissance les SVC, UPQC, FACTS, etc. sont proposées comme solution de dépollution.

b. La dépollution de type tension

Afin de réaliser une solution universelle de dépollution de toute la perturbation de tension des réseaux électriques, une famille de filtres actifs série a été proposer dans la littérature. [6]

Les filtres actifs sont proposés comme des solutions performantes de dépollution des réseaux électriques du fait qu'ils peuvent s'adapter à l'évolution de la charge et du réseau électrique sans pour autant toucher aux installations du fournisseur d'énergie ni à celle du consommateur.

Les filtres actifs de puissance fournissent une flexibilité vu leur auto-adaptation à l'évolution du système en assurant une comparaisent en temps réel de la totalité ou d'une partie des perturbations présentent dans le réseau.

Le filtre actif de puissance se présente dans la littérature sous différentes configuration : (1)-parallèle ; (2)-série ; (3)-hybrides :

- **Filtre actif parallèle** [10]

Le FAP se connecte en parallèle avec le réseau et injecte en temps réel les composantes harmoniques inverses des courants harmonique gènerées par les charges non linéaires connectées au réseau. Ainsi, le courant fourni par la source d'énergie devient sinusoïdal.

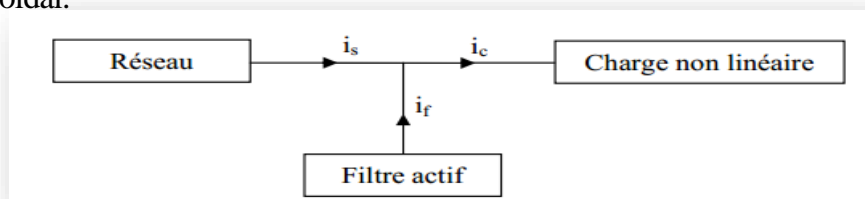


Figure I.4 : filtre actif parallèle

- **Filtre actif série (FAS)**

Le FAS se comporte comme une source de tension harmonique qui annule les tensions perturbatrices (creux, déséquilibre, harmonique) venant de la source et celles générées par la circulation de courants perturbateurs à travers l'impédance du réseau.

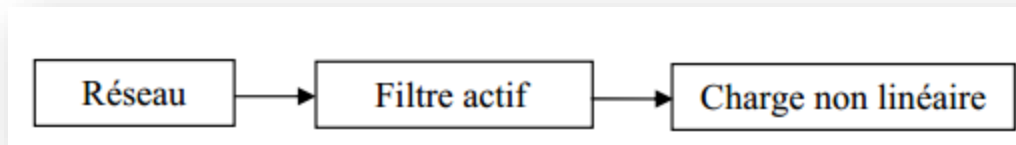


Figure I.5 : filtre actif série (FAS)

- **Combinaison parallèle-série de filtres actifs**

La figure I.6 illustre l'association de deux filtres actifs parallèles et série, également appelée conditionneur de puissance. Cette structure bénéficie des avantages des deux types de filtres actifs série et parallèle. Ainsi, elle permet d'assurer simultanément un courant et une tension du réseau électrique sinusoïdale

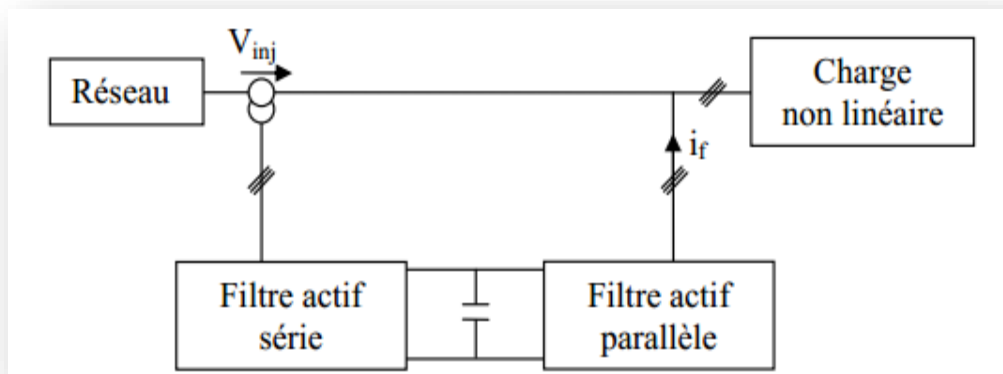


Figure I.6 : combinaison parallèle-série de filtres actifs

- **Filtre hybride**

Le filtre hybride est une topologie de filtre qui combine les avantages des filtres passifs et des filtres actifs. Pour cette raison, il est considéré comme l'une des meilleures solutions pour filtrer les harmoniques de courant des réseaux de distribution. Une des principales raisons de l'utilisation du filtre actif hybride est liée au

développement des semi-conducteurs de puissance tel que les transistors de puissance du types MOSFET ou IGBT.

De plus, du point de vue économique, le filtre hybride présente un atout majeur : il permet de réduire le coût du filtre actif, considéré comme un obstacle majeur à l'utilisation de filtres actifs.

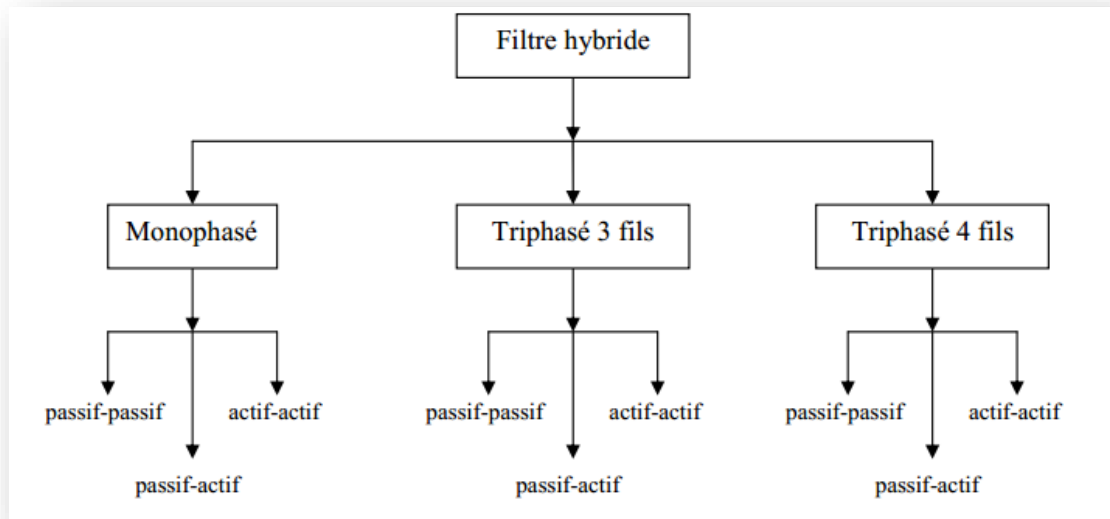


Figure I.7 : classification des filtres hybrides

I.8 Normes imposé sur le THD [8]

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

- au niveau international par la CEI,
- au niveau européen par le CENELEC,

En effet, ces normes ont été établies par des groupes d'experts internationaux, qui représentent les constructeurs, les utilisateurs de matériels, ainsi que par des représentants de laboratoires d'essais, des consultants et des universitaires spécialistes du domaine considéré. (Voir annexe 01)

I.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les principales perturbations qui peuvent apparaître dans les réseaux de distribution, leur origine et conséquences sur les charges connectés.

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

Notre objectif étant fixé sur la dépollution de perturbation du type courant due à des différentes charges non-linéaire, seule la solution de filtrage active parallèle de puissance sera analysée dans ce mémoire.

Chapitre II

Commande d'un filtre actif de puissance à quatre bras

Introduction

Le filtrage actif de puissance parallèle (FAP) est une solution moderne et efficace permettant de compenser les courants harmoniques et l'énergie réactive lorsque le réseau électrique est équilibré ou déséquilibré. Il s'insère entre le réseau et la charge non linéaire. Les performances d'un filtre actif parallèle dépendent en grande partie de la topologie utilisée, de la dynamique des algorithmes d'extraction et du contrôle des courants. Dans ce chapitre nous présentons une description générale des différentes parties constituant un filtre actif parallèle à quatre bras.

II.1 Description du système

Dans cette partie, le système utilisé est une source de tension triphasée à quatre fils, trois charges non linéaires monophasées, et d'un filtre actif parallèles à quatre bras avec sa commande.

II.1.1 Modèle du réseau d'alimentation

La source de tension que nous allons utiliser est un système triphasée à quatre fils (trois phases + neutre) ayant une inductance l_s et une résistance r_s comme le montre la figure suivante :

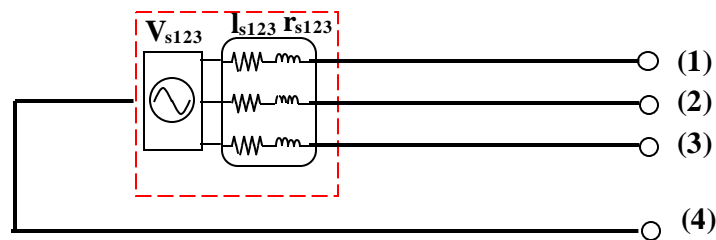


Figure II.1 : modèle du réseau

II.1.2 Modèle de la charge

La charge utilisée dans notre système est une charge non linéaire constituée de trois charges monophasée de type pont redresseur monophasée à diode débitant chacune d'elles sur une charge r-l, comme illustre la figure ci-dessous.

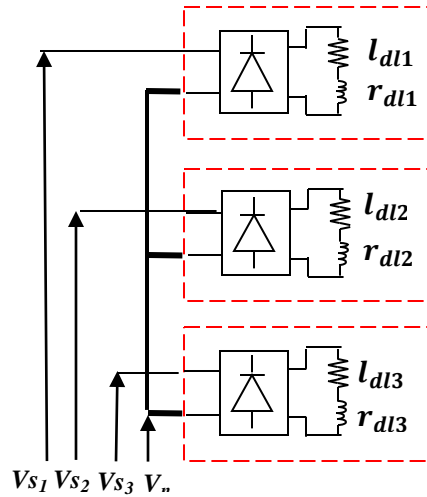


Figure II.2 : modèle de la charge

La charge non linéaire produit des harmoniques de courant et les transmet sur le réseau. Nous aurons ainsi au point de raccordement de la charge au réseau une pollution harmonique.

Le courant circulant dans la charge se décompose en une composante fondamentale i_{chf} et une composante harmonique i_{chh} : [11]

$$i_{ch} = i_{chf} + i_{chh} \quad (\text{II.1})$$

Avec pour le fondamental :

$$i_{chf}(t) = I_1 * \sqrt{2} * \sin(\omega t + \varphi_1) \quad (\text{II.2})$$

Et pour les harmoniques :

$$i_{chh}(t) = \sum_{h=2}^{\infty} I_h * \sqrt{2} * \sin(h\omega t + \varphi_h) \quad (\text{II.3})$$

Les courants harmoniques peuvent avoir des répercussions néfastes sur le réseau électrique. Pour cela, il est intéressant de les éliminer en utilisant un filtre actif de puissance pour améliorer les performances du réseau électrique. [12]

II.1.3 Principe du filtre actif parallèle

Le filtre actif parallèle est le plus souvent commandé comme un générateur de courant, il génère des courants harmoniques, en opposition de phase avec les courants harmoniques générés par la charge ce qui donne des courants sinusoïdaux côté source.

En général, le filtre actif parallèle est utilisé pour la dépollution des réseaux Basse Tension et Moyenne Tension. Son impédance totale vis-à-vis de la source et de la charge lui confère une bonne auto-adaptabilité avec des performances appréciables. Sa structure générale est la suivante :

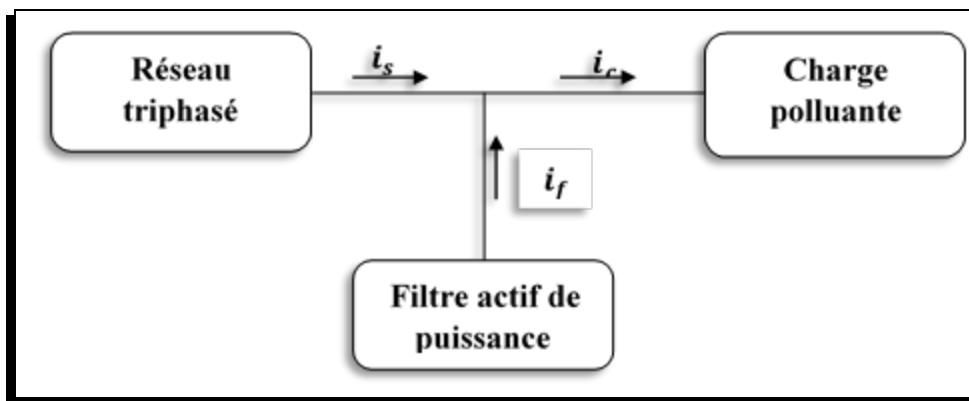


Figure II.3 : principe de filtre actif parallèle

Actuellement, les filtres actifs parallèles sont essentiellement installés par les consommateurs industriels.

Nous spécifions deux types de filtres actifs parallèles, le filtre actif à structure tension et le filtre actif à structure courant. Nous nous intéressons dans notre étude uniquement au filtrage actif parallèle à structure tension. De plus nous nous intéressons aux topologies de filtre actif de puissance qui sont relié aux réseaux électriques quatre fils.

II.2 Topologies de filtre actif de puissance parallèle relié à un réseau électrique à quatre fils

Il existe deux topologies de filtre actif parallèle à quatre fils, à savoir :

II.2.1 Filtre actif de puissance de tension a trois bras a point milieu

La configuration du filtre actif de puissance de tension à trois bras à point milieu est illustrée dans la figure II.4. Cette topologie est constituée de six interrupteurs réversibles en courant commandés à la fermeture et à l'ouverture en antiparallèle avec une diode. Ainsi, le filtre actif de puissance est constitué d'un onduleur triphasé à trois bras, le quatrième bras est constitué de deux condensateurs dont le point milieu est relié au neutre du réseau électrique. [13]

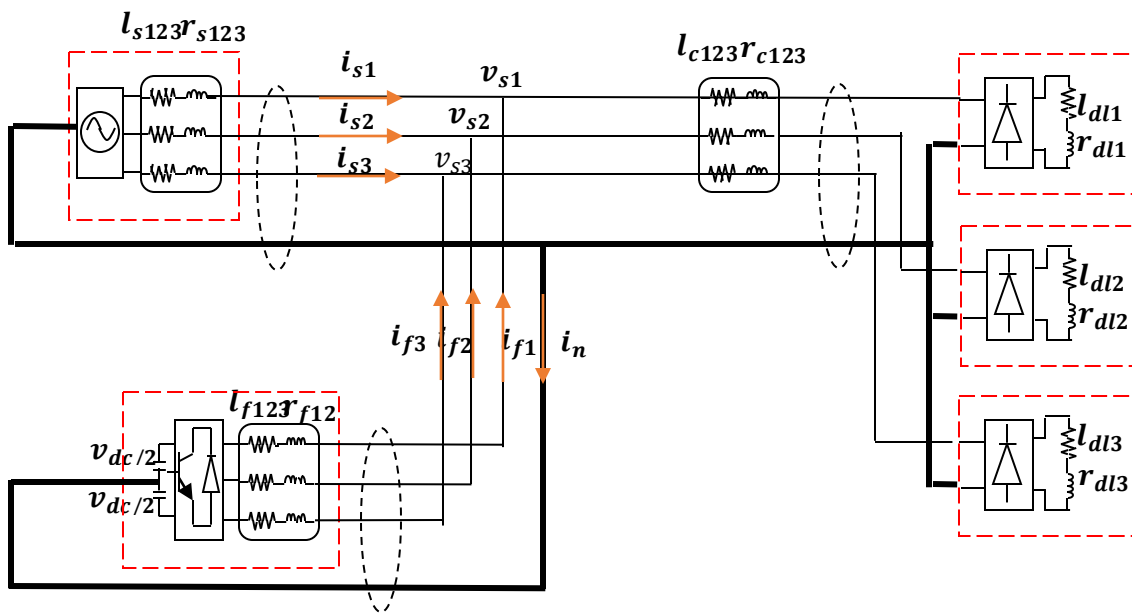


Figure II.4 : système triphasé comportant le filtre actif parallèle à quatre fils avec un condensateur à point milieu

II.2.2 filtre actif de puissance de tension à quatre bras

Cette configuration de filtre actif de puissance de tension est constituée de quatre bras, dont chaque bras est constitué d'IGBT et ou le quatrième bras est relié au neutre comme le montre la figure II.5

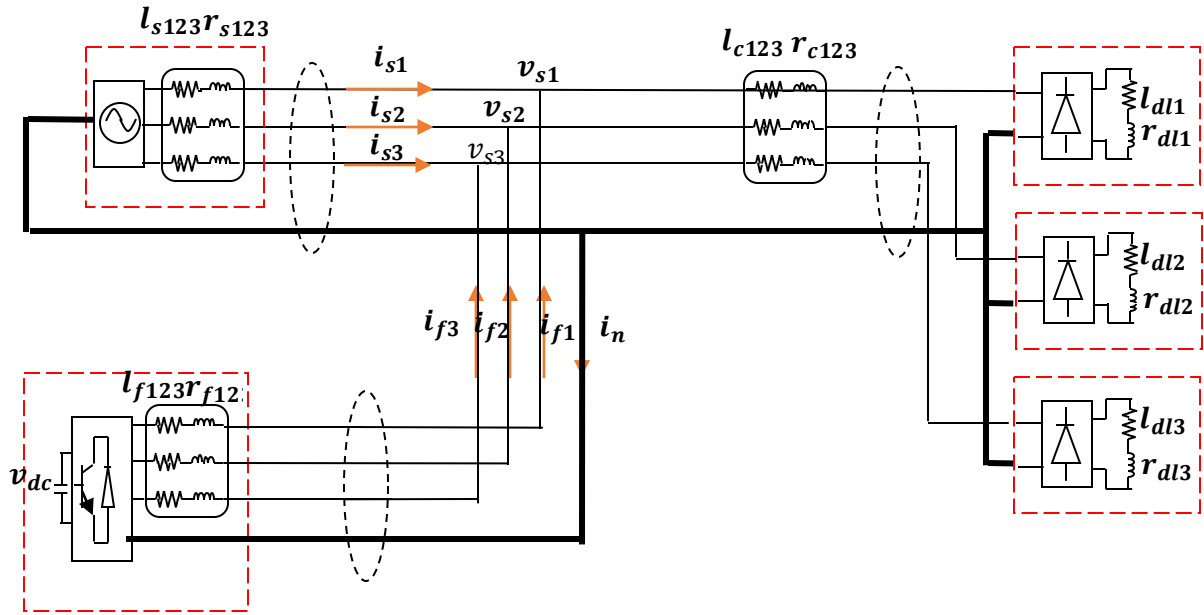


Figure II.5 : système triphasé comportant le filtre actif parallèle à quatre bras et quatre fils

II.2.3 Avantages et inconvénients des topologies de filtre actif de puissance parallèle relié à un réseau électrique à quatre fils

La différence qui existe entre les deux topologies peut être résumée dans le tableau suivant : [14]

Topologie	Avantages	Inconvénients
3 bras avec point milieu Capacitif	<ul style="list-style-type: none"> *Nombre réduit de semi-conducteur (6 IGBT). *Moins de pertes par conduction et par commutation. 	<ul style="list-style-type: none"> *Surdimensionnement des trois bras. *Contrôle judicieux du potentiel de point milieu. *Stockage important d'énergie dans les condensateurs
4 bras	<ul style="list-style-type: none"> *Meilleure contrôlabilité de courant. *Faible condensateur côté bus continu. *Plus de degré de liberté. 	<ul style="list-style-type: none"> *16 composants semi-conducteurs. *Plus de pertes par conduction et par commutation

Tableau II.1 : avantages et inconvénients des topologies de filtre actif de puissance parallèle relié à un réseau électrique à quatre fils

II.3 Structure d'un filtre actif parallèle à quatre bras

Comme nous l'avons dit précédemment, un filtre actif de puissance est constitué par un onduleur de tension et connecté en parallèle sur le réseau par un filtre de découplage (l_f, r_f). La capacité C côté continue de l'onduleur se comporte comme une source de tension continue. La tension V aux bornes du condensateur doit être positive et maintenue constante par la commande.

Ainsi, on distingue trois éléments dans la partie puissance :

- un onduleur de tension.
- un filtre de découplage.
- Système de stockage d'énergie

II.3.1 Onduleur

Concernant le filtre actif de puissance à quatre bras, c'est une configuration qui est utilisée afin d'éviter le recours à un élément de stockage à point milieu comme celle de la configuration précédente. Elle est constituée de huit interrupteurs réversibles en courant, commandés à la fermeture et à l'ouverture. La figure suivante donne le schéma de principe de cette topologie. [5]

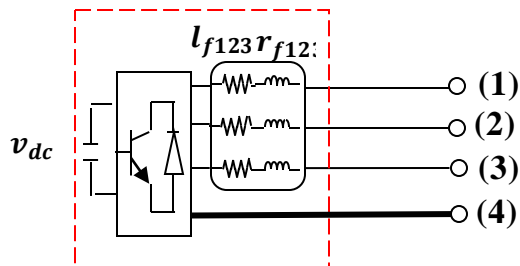


Figure II.6 : convertisseur à quatre bras à structure tension utilisé dans un FAP relié à un réseau électrique à quatre fils

Les états de commutation pour l'onduleur à quatre bras sont présentés dans le tableau suivant :

K	s_4	s_3	s_2	s_1	v_{f3}	v_{f2}	v_{f1}
0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	1	0	0	V_{dc}
2	0	0	1	0	0	V_{dc}	0
3	0	0	1	1	0	V_{dc}	V_{dc}
4	0	1	0	0	V_{dc}	0	0
5	0	1	0	1	V_{dc}	0	V_{dc}
6	0	1	1	0	V_{dc}	V_{dc}	0
7	0	1	1	1	V_{dc}	V_{dc}	V_{dc}
8	1	0	0	0	$-V_{dc}$	$-V_{dc}$	$-V_{dc}$
9	1	0	0	1	$-V_{dc}$	$-V_{dc}$	0
10	1	0	1	0	$-V_{dc}$	0	$-V_{dc}$
11	1	0	1	1	$-V_{dc}$	0	0
12	1	1	0	0	0	$-V_{dc}$	$-V_{dc}$
13	1	1	0	1	0	$-V_{dc}$	0
14	1	1	1	0	0	0	$-V_{dc}$
15	1	1	1	1	0	0	0

Tableau II.2 : tension générées par l'onduleur de tension a quatre bras

Différents types de commande existent dans la littérature pour contrôler l'onduleur, on peut citer la commande par hystérésis et la commande MLI.

II.3.1.1 Commande par hystérésis

La commande par hystérésis est très utilisée en raison de sa facilité d'utilisation. En fait, cette stratégie assure un contrôle satisfaisant de courant sans nécessiter une connaissance approfondie du modèle du système à contrôler ou de ses paramètres.

La figure II.7 montre le principe de fonctionnement de l'hystérésis. La différence entre le courant de référence i_f^* et le courant produit par l'onduleur i_f génère une erreur. Cette erreur est ensuite comparé à un modèle appelé hystérésis pour fixer les ordres de commande des interrupteurs. Cette commande, cependant,

présente un inconvénient majeur : elle ne permet pas de contrôler la fréquence de commutation du semi-conducteur.

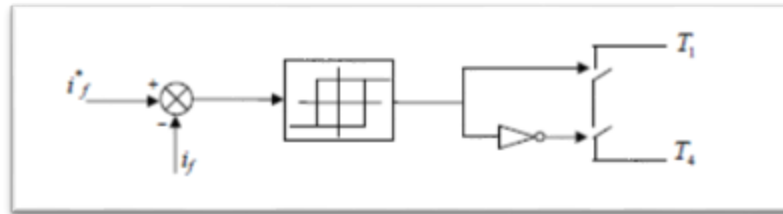


Figure II. 7 : commande par hystérésis

II.3.1.2 commande MLI (Modulation a largeur d'impulsion) :

La figure II.8 illustre le principe de contrôle par MLI. Dans ce cas, la différence entre le courant référence i_f^* et le courant réel i_f génère une erreur qui est appliquée à l'entrée d'un régulateur. Le signal de sortie du régulateur, appelé modulateur, est ensuite comparé à un signal triangulaire de fréquence fixe (porteuse) afin de déterminer les ordres de commutations des interrupteurs. La fréquence de la porteuse triangulaire est fixe.

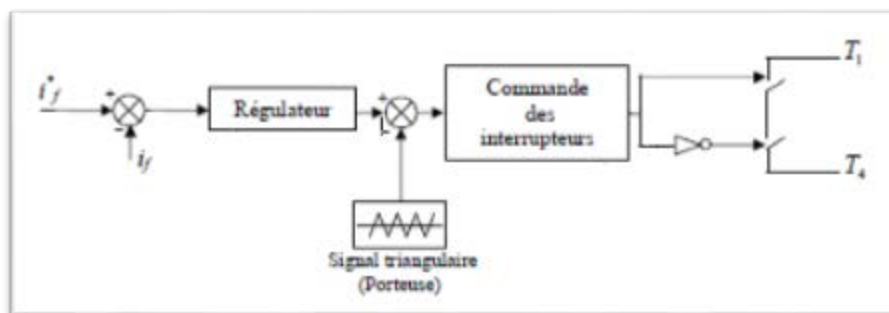


Figure II.8 : principe de la commande par MLI

II.3.2 Filtre de découplage

Le but du filtre de découplage est de permettre la connexion de l'onduleur de tension au réseau électrique qui est très souvent considéré comme une source de courant qui génère des courants harmoniques à partir de la différence des tensions entre la sortie du pont onduleur et le réseau . Ce filtre est un filtre qui limite certes la dynamique du courant mais réduit en même temps la propagation sur le réseau électrique des composantes harmoniques dues aux commutations. Nous avons utilisé

un filtre entre l'onduleur et le réseau électrique qui se compose d'une inductance l_f de résistance interne r_f .

II.3.3 système de stockage d'énergie :

Le stockage de l'énergie du côté continu se fait souvent par un système de stockage capacitif représenté par un condensateur C qui joue le rôle d'une source de tension continue V_{dc} . Le choix des paramètres du système de stockage (V_{dc} et C) se répercute sur la dynamique et sur la qualité de compensation du filtre actif parallèle. En effet, une tension V_{dc} élevée améliore la dynamique du filtre actif. De plus, les ondulations de la tension continue V_{dc} , causées par les courants engendrés par le filtre actif sont limitées par le choix de C , qui peuvent dégrader la qualité de compensation du filtre actif parallèle. Ces fluctuations sont d'autant plus importantes que l'amplitude du courant du filtre est grande et que sa fréquence est faible.

II.4 Stratégies de commande

Nous avons mentionné plus haut qu'une MLI ou une hystérésis compare un signal réel au signal de référence. Le signal de référence est en fait réalisé par la commande de notre filtre actif de puissance. La méthode d'identification la plus utilisée pour générer les courants de références est la méthode des puissances instantanée. Elle offre l'avantage de choisir la perturbation à compenser avec précision, rapidité et facilité d'implantation. Cette méthode est souvent utilisée pour compenser les courants harmoniques et la puissance réactive. Il existe plusieurs autres méthodes telles que:

II.4.1 Méthode des puissances instantanées réelle, imaginaire et homopolaire modifié p-q-o [13]

Cette méthode introduite par Akagi, exploite la transformation de Concordia des tensions simples de source et courants de ligne, afin de calculer les puissances réelle, imaginaire et homopolaire instantanées. Elle permet aussi de transformer la composante fondamentale en une composante continue et les composantes harmoniques en composantes oscillatoire. Cette transformation est nécessaire si nous

voulons éliminer facilement la composante continue. Nous allons tout d'abord présenter cette méthode de manière générale.

Son principe est comme suite : Soient respectivement les tensions simples et les courants de ligne d'un système triphasé avec homopolaires, $v_{s1}(t), v_{s2}(t), v_{s3}(t)$ et $i_{c1}(t), i_{c2}(t), i_{c3}(t)$.

La transformation de Concordia permet de ramener ce système triphasé des axes 1-2-3 aux axes α - β -0, comme le montre les deux relations suivantes : [14]

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{s1} \\ v_{s2} \\ v_{s3} \end{bmatrix} \quad (\text{II.4})$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{c1} \\ i_{c2} \\ i_{c3} \end{bmatrix} \quad (\text{II.5})$$

Nous obtenons alors :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \\ p_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta & 0 \\ -v_\beta & v_\alpha & 0 \\ 0 & 0 & v_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.6})$$

Avec p la puissance réelle, q la puissance imaginaire et p_0 la puissance homopolaire.

Ces puissances peuvent s'écrire comme la somme d'une composante continue et d'une composante harmonique :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \\ p_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{p} & + & \tilde{p} \\ \bar{q} & + & \tilde{q} \\ \bar{p}_0 & + & \tilde{p}_0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.7})$$

Avec \bar{p}, \bar{q} et \bar{p}_0 les composantes continues de p, q et p_0 ,
et \tilde{p}, \tilde{q} et \tilde{p}_0 les composantes harmoniques de p, q et p_0 .

À partir d'équation (II.6), nous pouvons déduire les expressions des composantes du courant de charge selon les axes α - β -0:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta & 0 \\ -v_\beta & v_\alpha & 0 \\ 0 & 0 & v_0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} p \\ q \\ p_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{v_0(v_\alpha^2+v_\beta^2)} \begin{bmatrix} v_\alpha v_0 & -v_\beta v_0 & 0 \\ v_\beta v_0 & v_\alpha v_0 & 0 \\ 0 & 0 & (v_\alpha^2+v_\beta^2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ p_0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.8})$$

Ce qui nous donne après développement :

$$i_0 = (v_\alpha^2 + v_\beta^2) \frac{p_0}{v_0(v_\alpha^2+v_\beta^2)} = i_0 \quad (\text{II.9})$$

$$i_\alpha = \frac{v_\alpha}{(v_\alpha^2+v_\beta^2)} p - \frac{v_\beta}{(v_\alpha^2+v_\beta^2)} q \quad (\text{II.10})$$

$$i_\beta = \frac{v_\beta}{(v_\alpha^2+v_\beta^2)} p + \frac{v_\alpha}{(v_\alpha^2+v_\beta^2)} q \quad (\text{II.11})$$

Nous remarquons de ces équations qu'il est possible de simplifier la commande des puissances réelle, imaginaire et homopolaire instantanées comme suite :

En utilisant une PLL qui génère des tensions équilibrées dans les axes α - β sans homopolaire et synchrones à la tension fondamentale du réseau électrique [4], nous obtenons :

$$v_\alpha = \sqrt{3} V_s \sin(\theta) \quad (\text{II.12})$$

$$v_\beta = -\sqrt{3} V_s \cos(\theta) \quad (\text{II.13})$$

L'avantage de la transformation α - β -0 est la séparation des séquences homopolaire du système triphasé de courant ou de tension.

Nous obtenons l'expression suivante pour les puissances réelle et imaginaire à partir de l'équation (II.5), (II.12), (II.13) :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{II.14})$$

Les puissances réel p , imaginaire q peuvent alors s'écrire comme suite :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{p} & + & \tilde{p} \\ \bar{q} & + & \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (\text{II.15})$$

Avec \bar{p} et \bar{q} les composantes continues de p et q .

et \tilde{p} et \tilde{q} les composante harmonique de p et q .

L'expression des courants en fonction des puissances instantanées dans le plan α - β est alors donnée par :

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (\text{II.16})$$

En utilisant l'équation (II.5) nous pouvons réécrire la matrice (II.16) sous la forme suivante :

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta & 0 \\ v_\beta & v_\alpha & 0 \\ 0 & 0 & (v_\alpha^2 + v_\beta^2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.17})$$

Suivant la fonction que nous donnons au filtre actif de puissance, nous pouvons compenser soit les harmoniques de courant et l'énergie réactive ou uniquement l'un des deux.

Le tableau suivant résume les modes de compensation possibles :

	Compensation des harmoniques de courant	Compensation de l'énergie réactive	Compensation des harmoniques de courant et de l'énergie réactive
Paramètre de contrôle	$p_f = \tilde{p}$ et $q_f = \tilde{q}$	$p_f = 0$ et $q_f = \bar{q}$	$p_f = \tilde{p}$ et $q_f = q$

Tableau II.3 : les modes de compensation de la commande des puissances instantanées

Si nous voulons compenser à la fois les harmoniques de courant et l'énergie réactive l'équation (II.17) deviendra :

$$\begin{bmatrix} i_{f\alpha}^{ref} \\ i_{f\beta}^{ref} \\ i_{f0}^{ref} \end{bmatrix} = \frac{1}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} \begin{bmatrix} v_{\alpha} & -v_{\beta} & 0 \\ v_{\beta} & v_{\alpha} & 0 \\ 0 & 0 & (v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ q \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.18})$$

Enfin, il est aisé d'obtenir les courants de référence selon les axes 123 par la transformation inverse de Concordia :

$$\begin{bmatrix} i_{f1}^{ref} \\ i_{f2}^{ref} \\ i_{f3}^{ref} \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{f\alpha}^{ref} \\ i_{f\beta}^{ref} \\ i_{f0}^{ref} \end{bmatrix} \quad (\text{II.19})$$

La figure II.9 illustre l'identification des courants de référence lors de la compensation simultanée des courants harmoniques et de l'énergie réactive par la méthode des puissances instantanée.

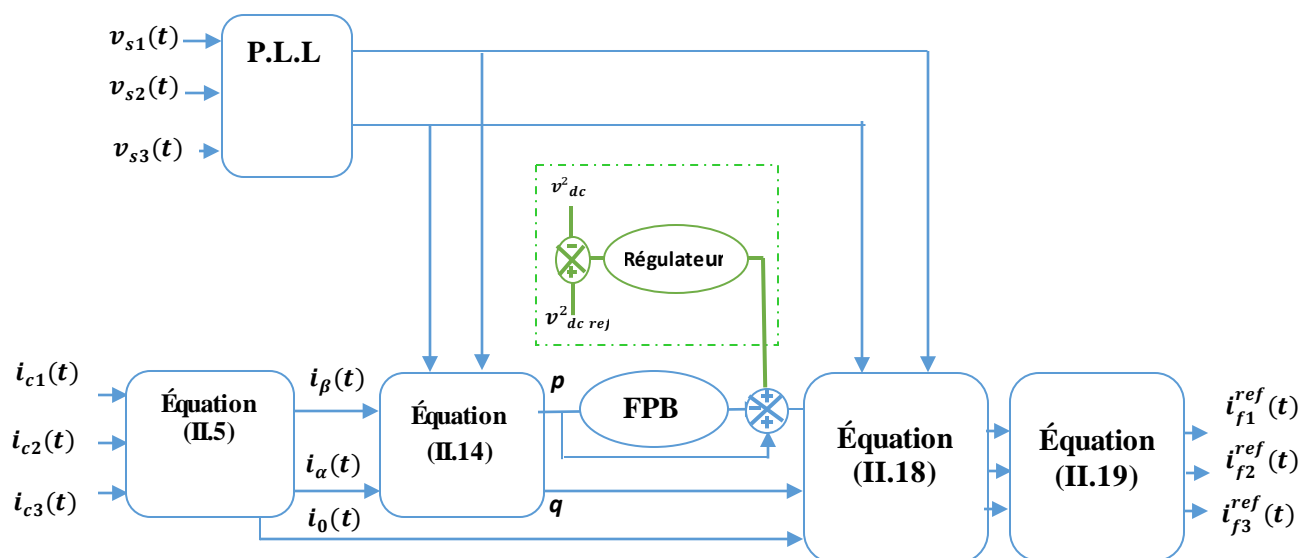


Figure II.9 : commande d'un filtre actif de puissance par la méthode des puissances instantanées simplifiée

II.4.2 Méthode directe dite vecteur croisé « cross-vector » :

Cette méthode introduite par [15], repose sur le même principe de la méthode des puissances instantanées mais ses auteurs donnent une nouvelle définition des puissances instantanées qui est comme suite :

Soient respectivement les tensions simples et les courants de ligne d'un système triphasé avec homopolaire $v_{s1}(t), v_{s2}(t), v_{s3}(t)$ et $i_{c1}(t), i_{c2}(t), i_{c3}(t)$.

La transformation de Concordia permet de ramener ce système triphasé des axes 1-2-3 aux axes α - β -0, comme le montre les deux relations suivantes :

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{s1} \\ v_{s2} \\ v_{s3} \end{bmatrix} \quad (\text{II.20})$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{c1} \\ i_{c2} \\ i_{c3} \end{bmatrix} \quad (\text{II.21})$$

Nous avons alors les puissances instantanées comme suite :

$$\begin{bmatrix} p \\ q_0 \\ q_\alpha \\ q_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_0 & v_\alpha & v_\beta \\ 0 & -v_\beta & v_\alpha \\ v_\beta & 0 & -v_0 \\ -v_\alpha & v_0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{II.22})$$

Ainsi, les courants en fonction des puissances seront égaux à :

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{(v_\alpha^2 + v_\beta^2 + v_0^2)} \begin{bmatrix} v_0 & 0 & v_\beta & v_\alpha \\ v_\alpha & -v_\beta & 0 & v_0 \\ v_\beta & v_\alpha & -v_0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q_0 \\ q_\alpha \\ q_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{II.23})$$

Suivant la fonction que nous voulons donner au filtre actif de puissance, nous pouvons ici aussi compenser soit les harmoniques de courant et l'énergie réactive ou uniquement l'un d'eux. Le tableau suivant résume les modes de compensations possibles.

	Compensation des harmoniques de courant	Compensation de l'énergie réactive	Compensation des harmoniques de courant et de l'énergie réactive
Paramètres de contrôle	$p_f = \tilde{p}$ et $q_{f0} = \tilde{q}_0$ $q_{f\alpha} = \tilde{q}_\alpha$ $q_{f\beta} = \tilde{q}_\beta$	$p_f = 0$ et $q_{f0} = \bar{q}_0$	$p_f = \tilde{p}$ et $q_{f0} = q_0$ $q_{f\alpha} = q_\alpha$ $q_{f\beta} = q_\beta$

Tableau II.4 : les modes de compensation de la commande dite cross – vector

Si nous voulons compenser à la fois les harmoniques de courant et l'énergie réactive, l'équation deviendra égale à :

$$\begin{bmatrix} i_{f0}^{ref} \\ i_{f\alpha}^{ref} \\ i_{f\beta}^{ref} \end{bmatrix} = \frac{1}{(v_\alpha^2 + v_\beta^2 + v_0^2)} \begin{bmatrix} v_0 & \mathbf{0} & v_\beta & v_\alpha \\ v_\alpha & -v_\beta & \mathbf{0} & v_0 \\ v_\beta & v_\alpha & -v_0 & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ q_0 \\ q_\alpha \\ q_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{II.24})$$

Ainsi, après le choix des paramètres de commande, les courants de référence sont donnés par la transformation inverse de Concordia :

$$\begin{bmatrix} i_{f1}^{ref} \\ i_{f2}^{ref} \\ i_{f3}^{ref} \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \mathbf{0} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{f\alpha}^{ref} \\ i_{f\beta}^{ref} \\ i_{f0}^{ref} \end{bmatrix} \quad (\text{II.25})$$

La figure II.10 illustre l'identification des courants de référence lors de la compensation simultanée des courants harmoniques et de l'énergie réactive par la Méthode directe dite vecteur croiser « Cross-Vector » :

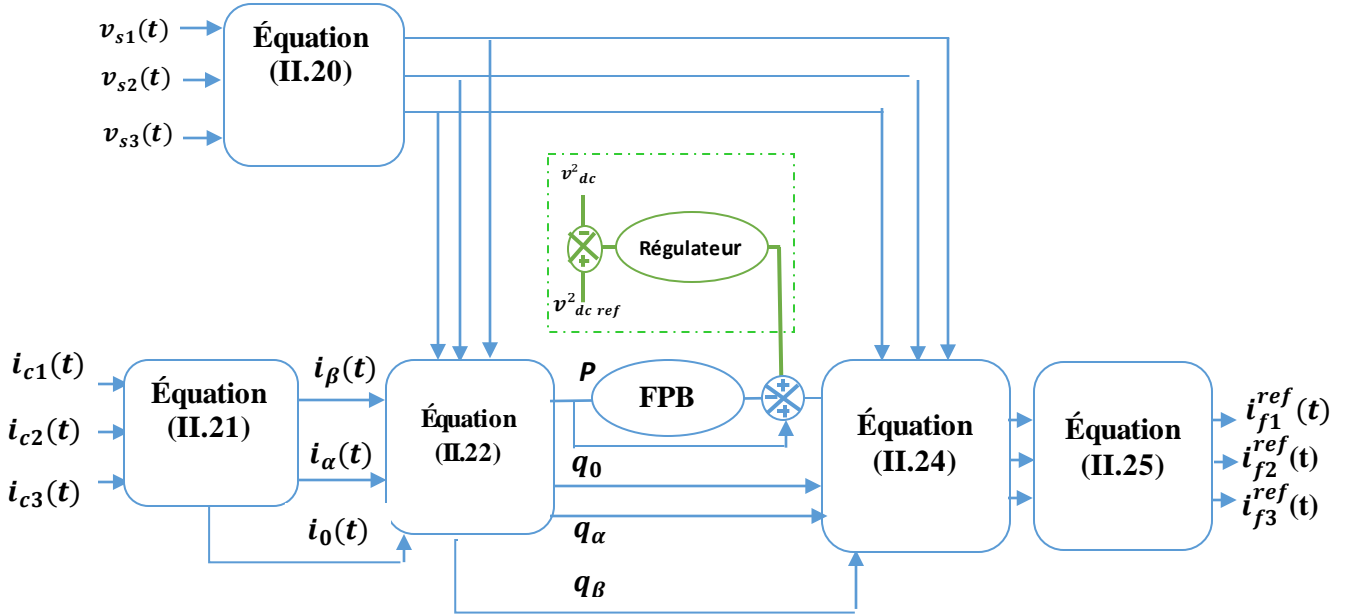


Figure II.10 : commande d'un filtre actif de puissance par la méthode directe dite Vecteur Croisé

II.4.3 Méthode directe dite théorie p-q-r : [13]

Cette méthode introduite par KIM, réalise une double transformation, à savoir une première transformation des tensions simples et des courants de ligne des axes a-b-c aux axes α - β -0, puis une seconde transformation des axes α - β -0 aux axes p-q-r. Son principe est énoncé comme suit :

Soient respectivement les tensions simples et les courants de ligne d'un système triphasé avec homopolaires $v_{s1}(t), v_{s2}(t), v_{s3}(t)$ et $i_{c1}(t), i_{c2}(t), i_{c3}(t)$.

En utilisant la transformation de Concordia nous obtenons les deux relations suivantes :

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_0 \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{s1} \\ v_{s2} \\ v_{s3} \end{bmatrix} \quad (\text{II.26})$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{c1} \\ i_{c2} \\ i_{c3} \end{bmatrix} \quad (\text{II.27})$$

La seconde transformation appelée p-q-r, nous donnera :

$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_q \\ i_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{V_\alpha}{V_{\alpha\beta 0}} & \frac{V_\beta}{V_{\alpha\beta 0}} & \frac{V_0}{V_{\alpha\beta 0}} \\ -\frac{V_\beta}{V_{\alpha\beta}} & \frac{V_\alpha}{V_{\alpha\beta}} & 0 \\ -\frac{V_\alpha V_0}{V_{\alpha\beta} V_{\alpha\beta 0}} & -\frac{V_\beta V_0}{V_{\alpha\beta} V_{\alpha\beta 0}} & \frac{V_{\alpha\beta}}{V_{\alpha\beta 0}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.28})$$

$$\text{Avec } V_{\alpha\beta} = \sqrt{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \text{ et } V_{\alpha\beta 0} = \sqrt{V_\alpha^2 + V_\beta^2 + V_0^2}$$

Les puissances active et réactive instantanées sont alors données par l'expression suivante :

$$\begin{bmatrix} p \\ q_r \\ q_q \end{bmatrix} = V_{\alpha\beta 0} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_p \\ i_q \\ i_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.29})$$

Ce qui nous donne les courants dans le repère p-q-r :

$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_q \\ i_r \end{bmatrix} = \frac{1}{V_{\alpha\beta 0}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q_r \\ q_q \end{bmatrix} \quad (\text{II.30})$$

Suivant la fonction que nous donnons au filtre actif de puissance, nous pouvons ici aussi compenser soit les harmoniques de courant et l'énergie réactive ou uniquement l'un des deux. Le tableau suivant résume les modes des compensations possibles :

	Compensation des harmoniques de courant	Compensation des harmoniques de courant et de l'énergie réactive
Paramètres de contrôle	$p_f = \tilde{p}$ et $q_{fr} = \tilde{q}_r$ $q_{fq} = \tilde{q}_q$	$p_f = \tilde{p}$ et $q_{fr} = q_r$ $q_{fq} = q_q$

Tableau II.5: les modes de compensation de la commande p-q-r

Si nous voulons compenser simultanément les harmoniques de courant et l'énergie réactive, l'équation (II.31) deviendra :

$$\begin{bmatrix} i_p^{ref} \\ i_q^{ref} \\ i_r^{ref} \end{bmatrix} = \frac{1}{V_{\alpha\beta 0}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ q_r \\ q_q \end{bmatrix} \quad (II.31)$$

Ce qui donne dans les axes α - β -0 :

$$\begin{bmatrix} i_\alpha^{ref} \\ i_\beta^{ref} \\ i_0^{ref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{V_\alpha}{V_{\alpha\beta 0}} & -\frac{V_\beta}{V_{\alpha\beta 0}} & -\frac{V_\alpha V_0}{V_{\alpha\beta} V_{\alpha\beta 0}} \\ \frac{V_\beta}{V_{\alpha\beta 0}} & \frac{V_\alpha}{V_{\alpha\beta 0}} & -\frac{V_\beta V_0}{V_{\alpha\beta} V_{\alpha\beta 0}} \\ \frac{V_0}{V_{\alpha\beta 0}} & 0 & \frac{V_{\alpha\beta}}{V_{\alpha\beta 0}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_p^{ref} \\ i_q^{ref} \\ i_r^{ref} \end{bmatrix} \quad (II.32)$$

Ainsi, après le choix des paramètres de commande, il est aisé de remonter aux courants de référence par la transformation inverse de Concordia :

$$\begin{bmatrix} i_{f1}^{ref} \\ i_{f2}^{ref} \\ i_{f3}^{ref} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{f\alpha}^{ref} \\ i_{f\beta}^{ref} \\ i_{f0}^{ref} \end{bmatrix} \quad (II.33)$$

La figure (II.12) illustre l'identification des courants de référence lors de la compensation simultanée des courants harmoniques et de l'énergie réactive par la méthode directe dite théorie p-q-r.

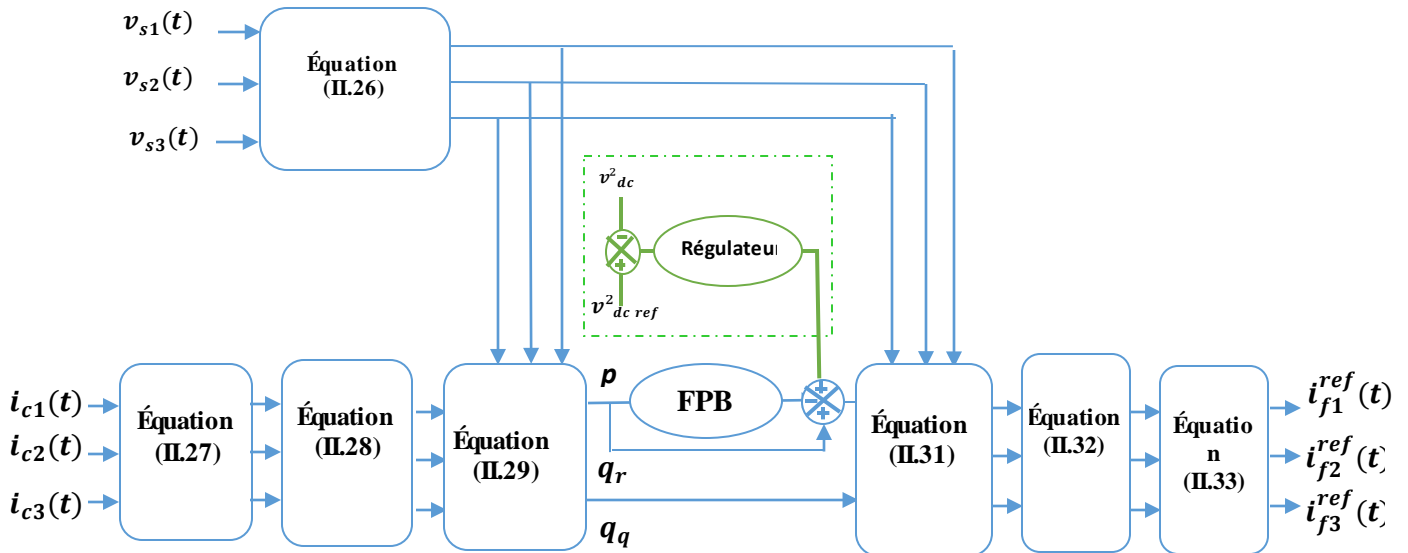


Figure II.12 commande d'un filtre actif de puissance par la méthode directe dite théorie p-q-r

II.4.4 méthode directe utilisant la théorie du référentiel lié au synchronisme(SRF) :

Cette méthode donne de très bons résultats pour le réseau électrique triphasé à trois fils, c'est pour cela qu'il a également été développé pour les réseaux électriques à 4fils. Cette commande est comme suite :

Soient les courants de lignes d'un système triphasé avec neutre $i_{c1}(t), i_{c2}(t), i_{c3}(t)$.

LA transformation de Concordia nous donne la relation suivante :

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{c1} \\ i_{c2} \\ i_{c3} \end{bmatrix} \quad (\text{II.34})$$

Grâce à une PLL générant les signaux $\sin(\hat{\theta})$ et $\cos(\hat{\theta})$ synchronisé à la tension du réseau électrique, nous obtenons dans les axes d-q les courants suivants :

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_{q\alpha} \\ i_{q\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \sin(\hat{\theta}) & -\cos(\hat{\theta}) \\ 0 & \cos(\hat{\theta}) & \sin(\hat{\theta}) \\ -\cos(\hat{\theta}) & 0 & 0 \\ -\sin(\hat{\theta}) & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{II.35})$$

Les composants i_d et i_q peuvent alors être exprimés comme la somme d'une composante continue et d'une composante alternative, comme suite :

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{i}_d \\ \bar{i}_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \tilde{i}_d \\ \tilde{i}_q \end{bmatrix} \quad (\text{II.36})$$

Avec \bar{i}_d et \bar{i}_q les composantes continues de i_d et i_q .

Et \tilde{i}_d et \tilde{i}_q les composantes harmoniques de i_d et i_q .

Suivant la fonction que nous donnons au filtre actif de puissance, nous pouvons soit compenser les harmoniques de courant et l'énergie réactive ou uniquement l'un deux. Le tableau suivant résume les modes de compensation :

	Compensation des harmoniques de courant	Compensation de l'énergie réactive	Compensation des harmoniques de courant et de l'énergie réactive
Paramètres de contrôle	$i_{dc} = \bar{i}_d$ $i_{qc} = \bar{i}_q$	$i_{dc} = 0$ $i_{qc} = \bar{i}_q$	$i_{dc} = \bar{i}_d$ $i_{qc} = \bar{i}_q$

Tableau(II.6) : les modes de compensation de la commande dite du synchronisme lié au référentiel

Pour compenser à la fois les harmoniques de courant et l'énergie réactive l'équation(II.35) devient :

$$\begin{bmatrix} i_{f0}^{ref} \\ i_{f\alpha}^{ref} \\ i_{f\beta}^{ref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\cos(\hat{\theta}) & -\sin(\hat{\theta}) \\ \sin(\hat{\theta}) & \cos(\hat{\theta}) & 0 & 0 \\ -\cos(\hat{\theta}) & \sin(\hat{\theta}) & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{i}_d \\ \tilde{i}_q \\ i_{q\alpha} \\ i_{q\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{II.37})$$

Les courants de référence ont obtenu en utilisant transformation inverse de Concordia :

$$\begin{bmatrix} i_{f1}^{ref} \\ i_{f2}^{ref} \\ i_{f3}^{ref} \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{f\alpha}^{ref} \\ i_{f\beta}^{ref} \\ i_{f0}^{ref} \end{bmatrix} \quad (\text{II.38})$$

La figure II.13 illustre l'identification des courants de référence lors de la compensation simultanée des courants harmoniques et de l'énergie réactive par la Méthode directe utilisant la théorie du référentiel lié au synchronisme(SRF) :

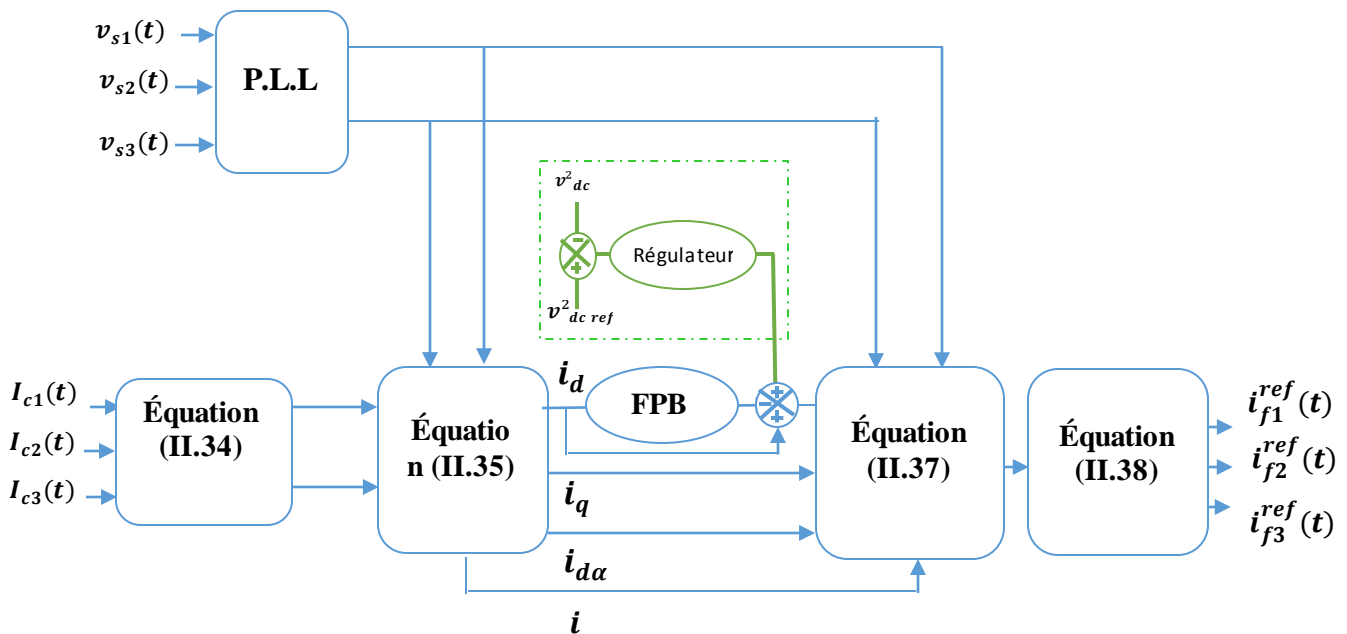


Figure II.13 commande d'un filtre actif de puissance par la méthode directe dite théorie SRF

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le principe du filtre actif parallèle comme une solution de dépollution des courants harmonique et énergies réactif produite par des charges non-linéaires.

Nous avons présenté pour cela l'onduleur, l'élément de stockage et le filtre de découplage, ainsi que les différentes stratégies de commandes pour la commande d'un filtre actif de puissance à quatre bras pour la compensation des réseaux électriques à quatre fils.

Chapitre III

Résultats de simulations

Introduction

Le filtrage actif parallèle de puissance (FAP) à quatre bras est une des solutions modernes et efficaces permettant d'éliminer les harmoniques de courant ainsi que l'énergie réactive produite par la charge. Cette technique pouvant être appliquée que ce soit en mode équilibré ou pas.

Dans ce chapitre nous allons présenter les résultats de simulations pour nos quatre commandes suivies d'une étude comparative.

III.1 Description du réseau électrique sans filtre actif de puissance

Avant de commencer d'appliquer nos commandes à notre système, il nous faut connaître les performances de notre réseau sans filtrage. A cet effet, une première série de simulations sera établis sans FAP que ce soit en régime équilibré et déséquilibré.

On considère le réseau électrique à quatre fils connecté à trois charges monophasées, comme le montre la figure III.1 ci-dessous.

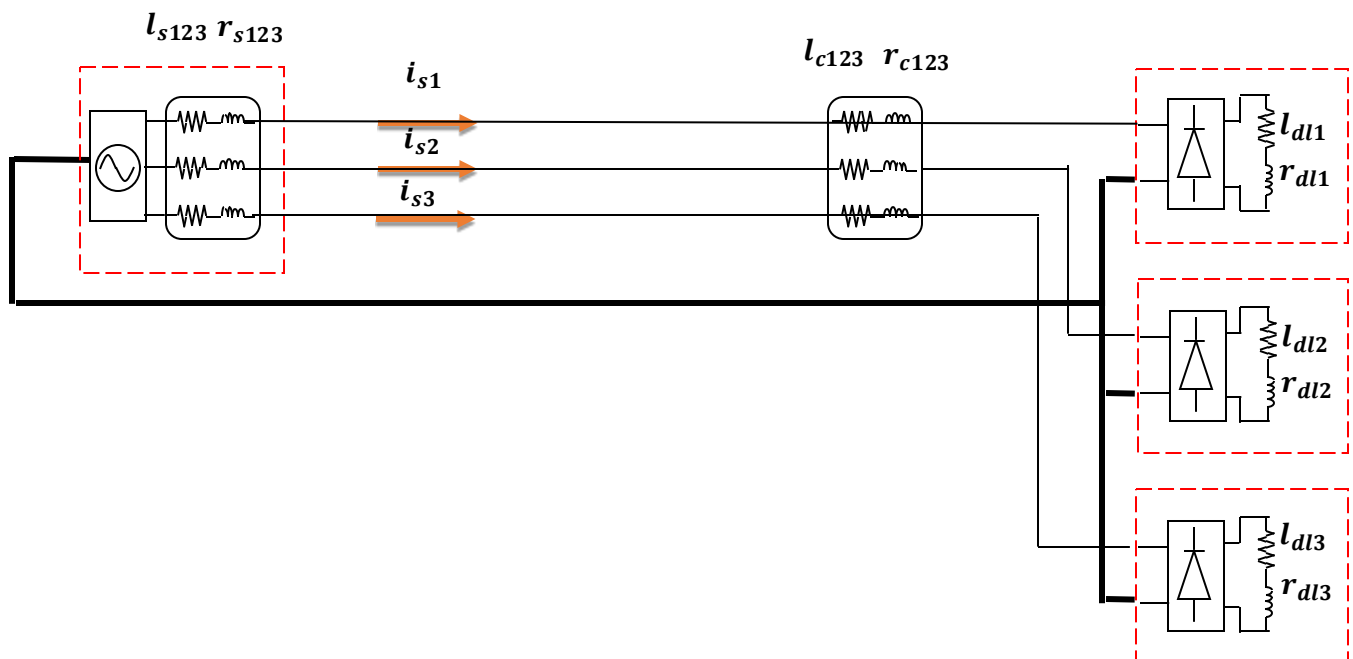


Figure III.1 : schéma d'un réseau triphasé à quatre fils alimentant trois charges non-linéaires

Les paramètres du système sont comme suit :

- **Système équilibré sans FAP :**

$V_{s\ eff}[V]$	$f[Hz]$	$r_s [m\Omega]$	$l_s [\mu H]$	$r_c [m\Omega]$	$l_c [\mu H]$	$r_{d123} [\Omega]$	$l_{d123} [mH]$
240	50	3.63	14.12	12.87	105.98	5	30

Tableau III.1 : paramètre de simulation mode 01

- **Système déséquilibré sans FAP :**

1^{er} cas : déséquilibre de charges

$V_{s\ eff}[V]$	$f[Hz]$	$r_s [m\Omega]$	$l_s [\mu H]$	$r_c [m\Omega]$	$l_c [\mu H]$
240	50	3.63	14.12	12.87	105.98
$r_{d11} [\Omega]$	$l_{d11} [mH]$	$r_{d12} [\Omega]$	$l_{d12} [mH]$	$r_{d13} [\Omega]$	$r_{d13} [mH]$
0.2	1	0.79	4.8	0.3	4

Tableau III.2 : paramètre de simulation mode 02

2^{ème} cas : défaut monophasé de la phase 02

$V_{s\ eff}[V]$	$f[Hz]$	$r_s [m\Omega]$	$l_s [\mu H]$	$r_c [m\Omega]$
240	50	3.63	14.12	12.87
$l_c [\mu H]$	$r_{d11} [\Omega]$	$l_{d11} [mH]$	$r_{d13} [\Omega]$	$r_{d13} [mH]$
105.98	5	30	5	30

Tableau III.3 : paramètre de simulation mode 03

Les résultats de simulation que nous obtenons sont comme suite :

▪ *Cas d'un réseau électrique équilibré :*

On remarque que la tension coté source est sinusoïdale.

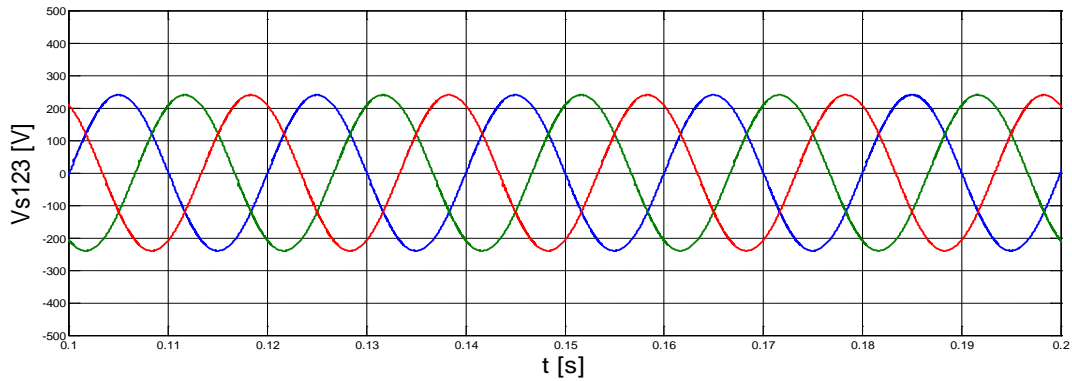


Figure III.2 : tensions triphasé coté source

Le courant absorbé par une les charges non linéaire de la phase 1 est présenté par la figure suivante :

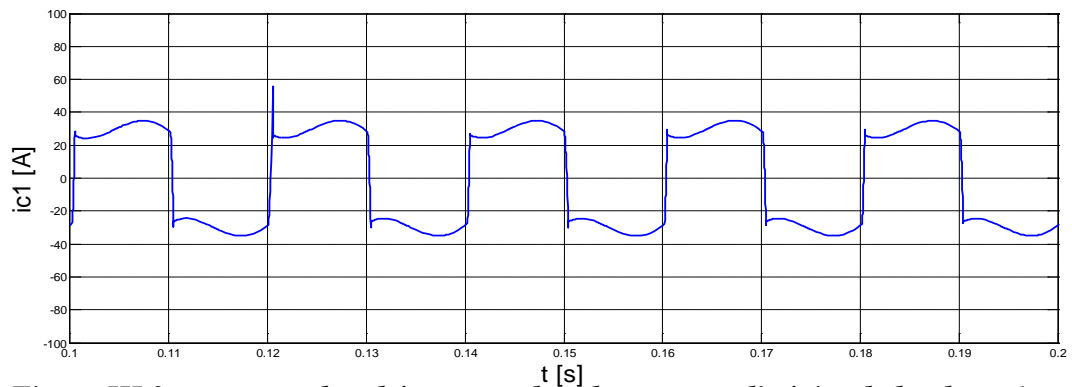


Figure III.3 : courant absorbé par une des charges non linéaire de la phase 1

La FFT du courant de la figure III.3 nous donne :

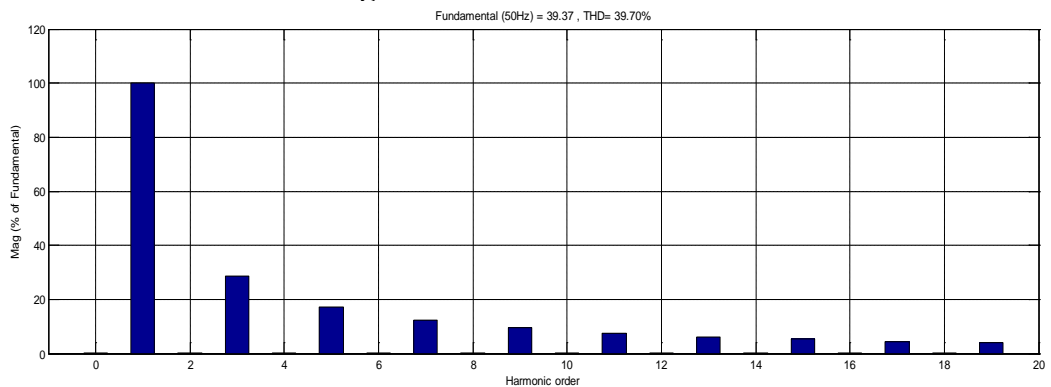


Figure III.4 : FFT du courant de charge de la première phase

Le courant que nous observons au niveau du neutre est de la forme suivante :

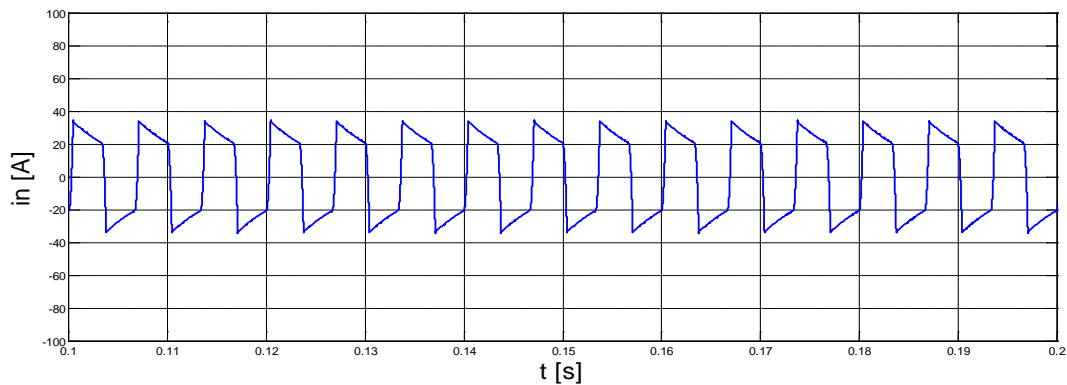


Figure III.5 : courant du neutre sans filtre

Ces figures nous montrent que les charges non linéaires génèrent des harmoniques de courant au niveau de chaque phase et au niveau du neutre.

▪ Pour un réseau électrique déséquilibré

Pour le 1^{er} cas

La tension coté source est sinusoidale et équilibré :

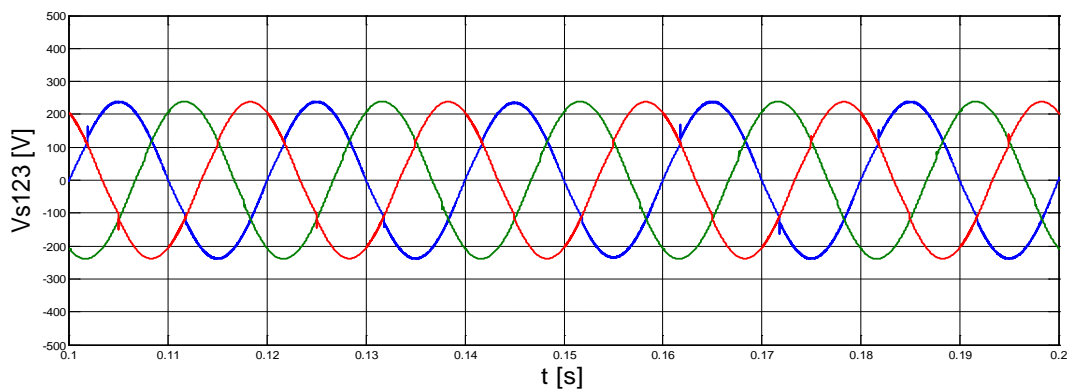


Figure III.6 : tensions triphasé coté source

Par contre, les courants absorbés par les charges non linéaires présentées par la figure suivante sont déséquilibrés :

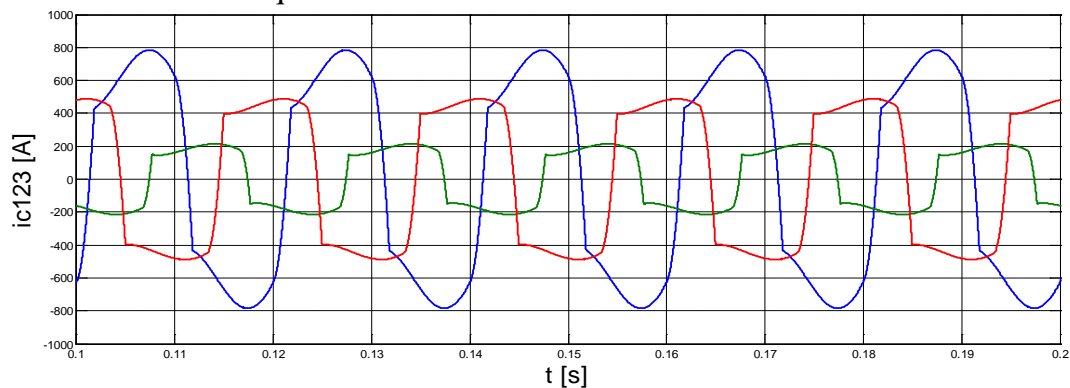


Figure III.7 : courants de charge triphasé

La FFT du courant de la figure III.8 de chaque phase est alors comme suite :

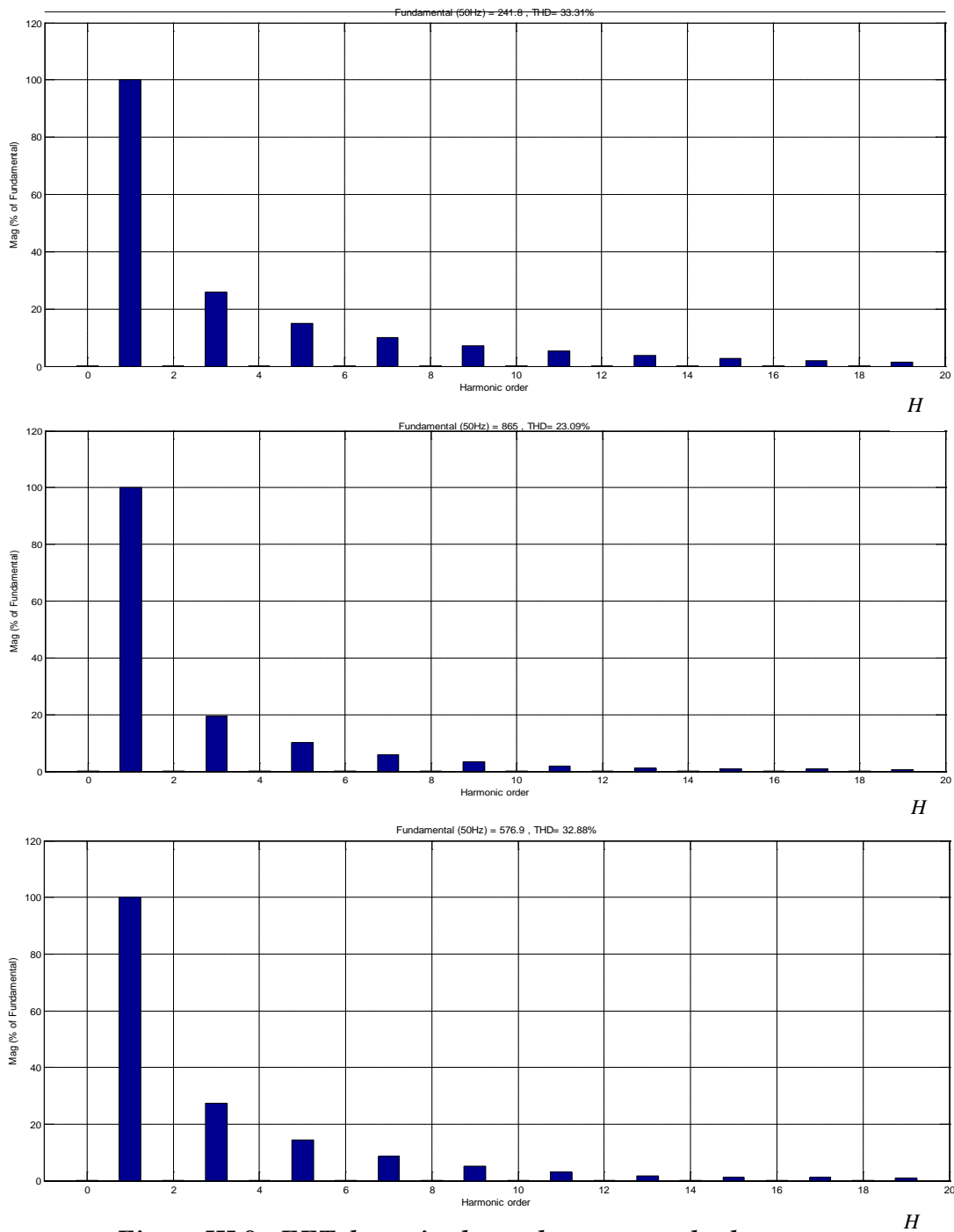


Figure III.8 : FFT des trois phases des courants de charges

Nous remarquons dans la figure III.8 que les harmoniques sont fortement présentes au niveau des trois phases.

Le courant que nous observons au niveau du neutre est de la forme suivante :

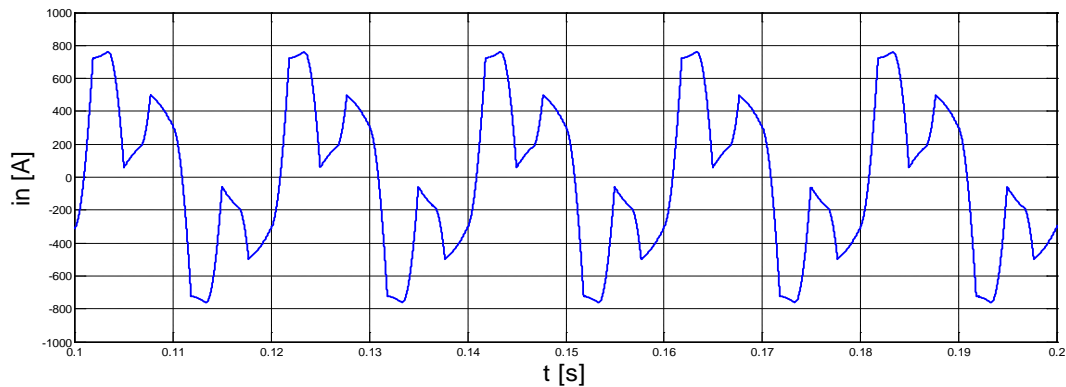


Figure III.9 : courant de neutre

Nous remarquons de la figure III.9 que les harmoniques dans le neutre en augmenté par rapport à un réseau électrique équilibré.

Pour le 2^{ème} cas :

Les tensions coté source forme un signal sinusoïdale équilibré :

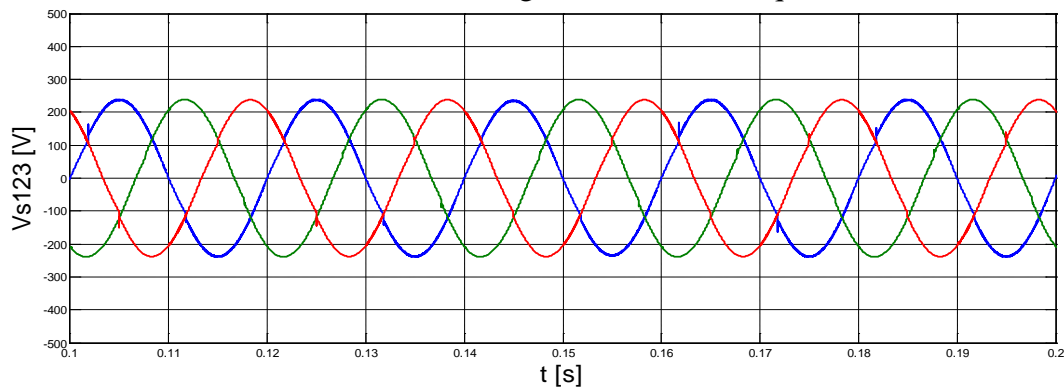


Figure III.10 : tensions de source triphasée

Par contre, les courants absorbés par les charges non linéaires présentées par la figure suivante sont déséquilibrés

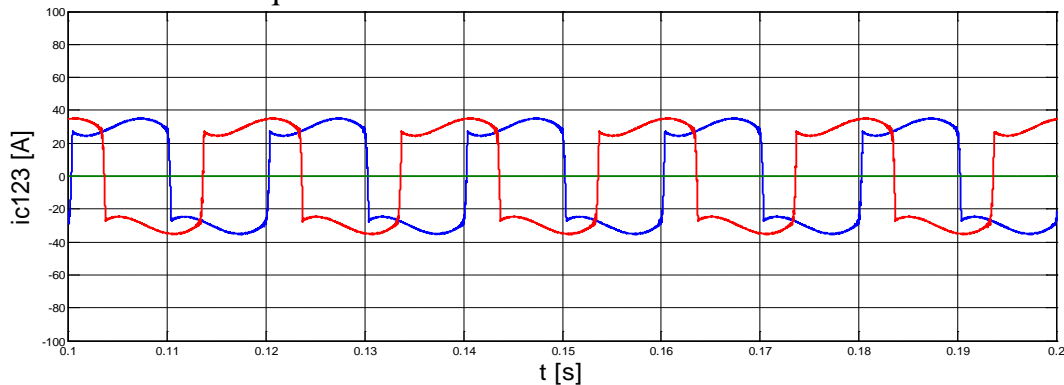
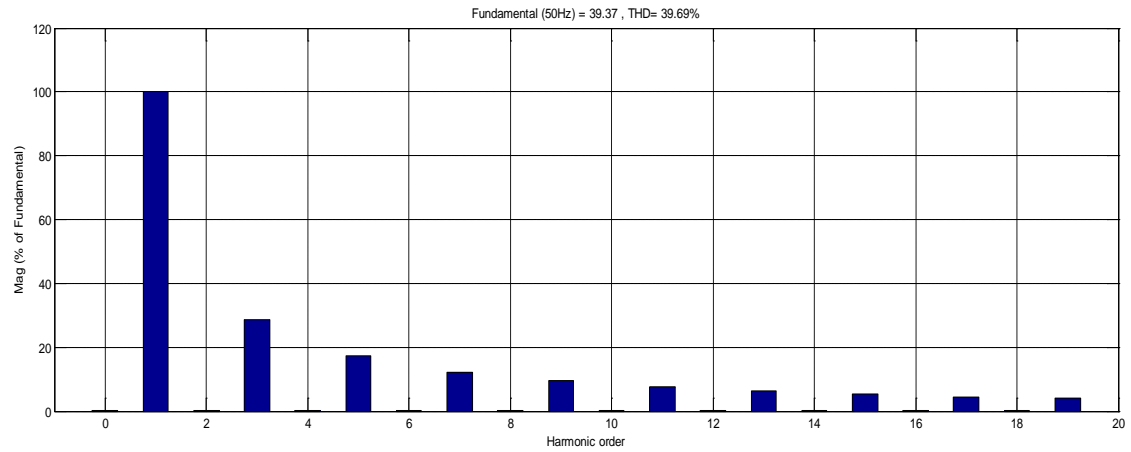
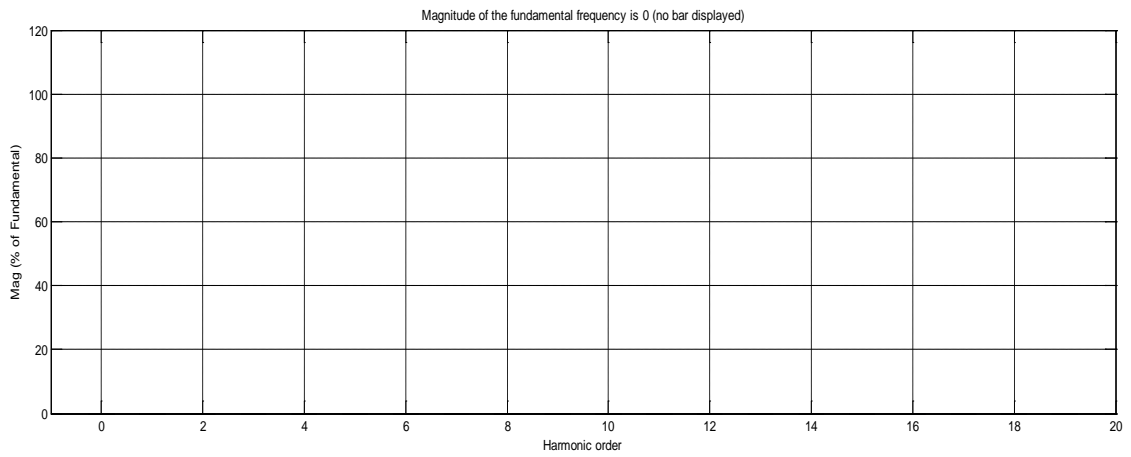


Figure III.11 : courants de charge

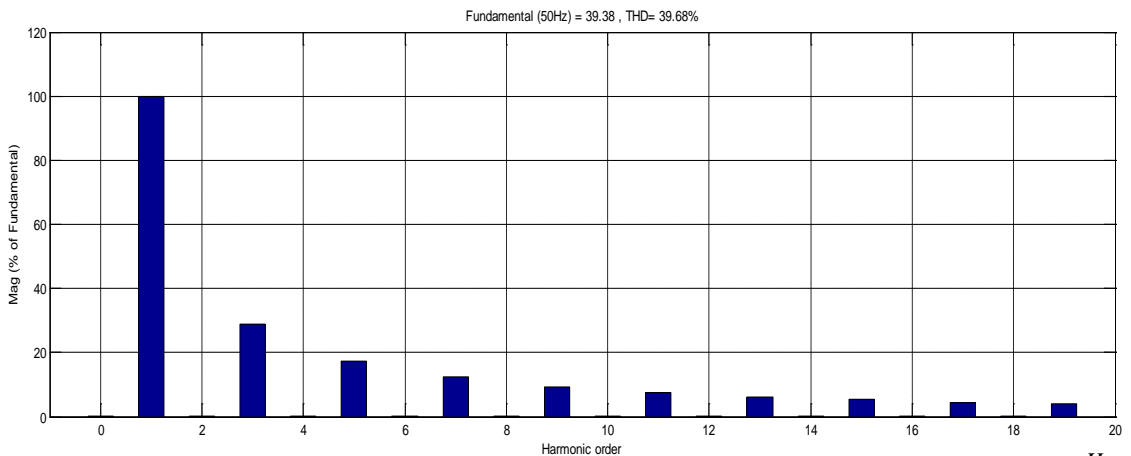
La FFT du courant de la figure III.12 de chaque phase est alors comme suite :



H



H



H

Figure III.12 : résultat des FFT pour les trois phases

Nous remarquons que les FFT des phases une et trois sont identique par contre nous n'avons aucun résultat pour la phase deux, ceci est du au fait du défaut monophasé sur cette phase

Le courant que nous observons au niveau du neutre est de la forme suivante :

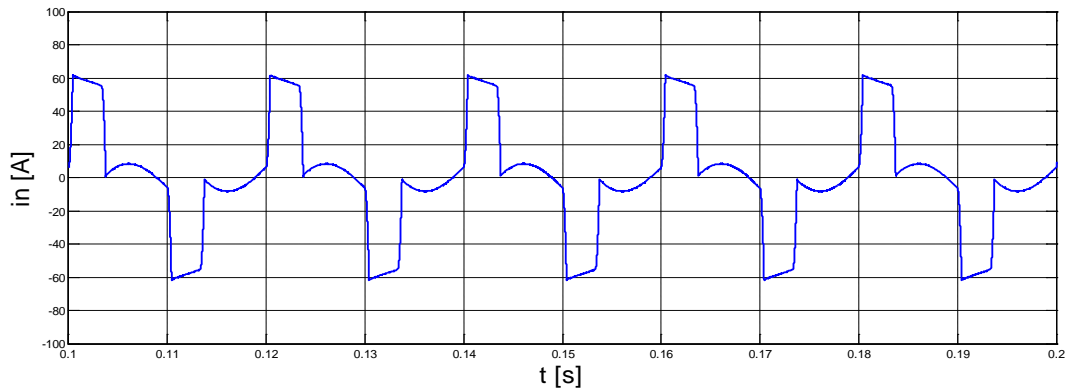


Figure III.13 : courant de neutre

Nous remarquons de la figure III.13 représentant de l'évolution du courants traversant le neutre que les harmoniques dans le neutre en augmenté par rapport à un réseau électrique équilibré.

III.2 Description du réseau électrique avec filtre actif de puissance

Après avoir décrit notre réseau électrique connecté à trois charges monophasées non linéaire, nous allons introduire maintenant un filtre actif de puissance parallèle entre la source et les charges non linéaire monophasé. Nous obtenons ainsi la figure suivante :

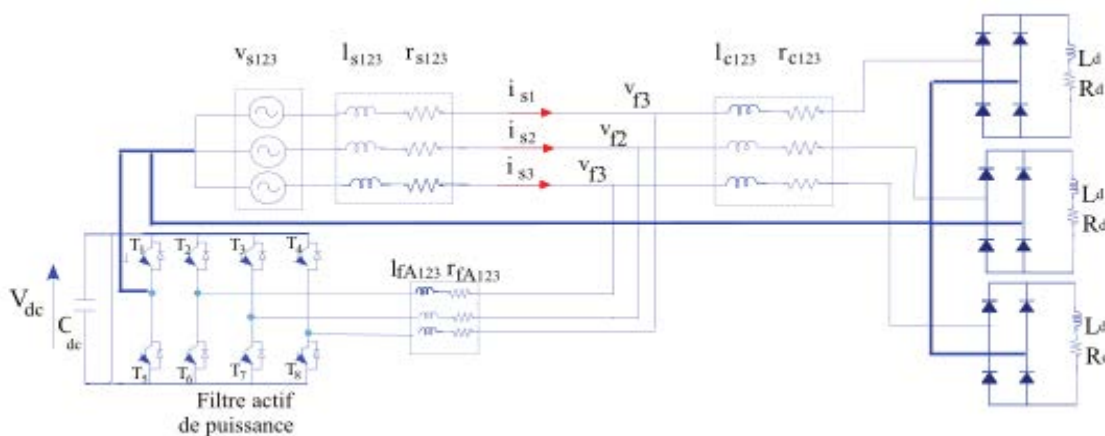


Figure III.14 : modèle de simulation

En plus des paramètres présentés dans les tableaux III.1, III.2 et III.3 nous donnons les paramètres du filtre actif de puissance à quatre bras dans le Tableau III.4 :

r_f [$m\Omega$]	l_f [μH]	C_{dc} [mF]	V_{dc} [V]
5	200	8	700

Tableau III.4 : paramètres de simulation du FAP

Nous avons utilisé quatre commandes de filtre actif de puissance afin de montrer l'efficacité d'élimination des harmoniques de courant générés par les charges non linéaires. Les commandes que nous avons choisies d'utiliser sont :

III.2.1 Méthode des puissances instantanées réelle, imaginaire et homopolaire modifiée « p-q-o » [13]

- Lorsque le réseau électrique est équilibré :

Nous avons lorsque le réseau électrique est équilibré les trois tensions cotées source qui sont sinusoïdales.

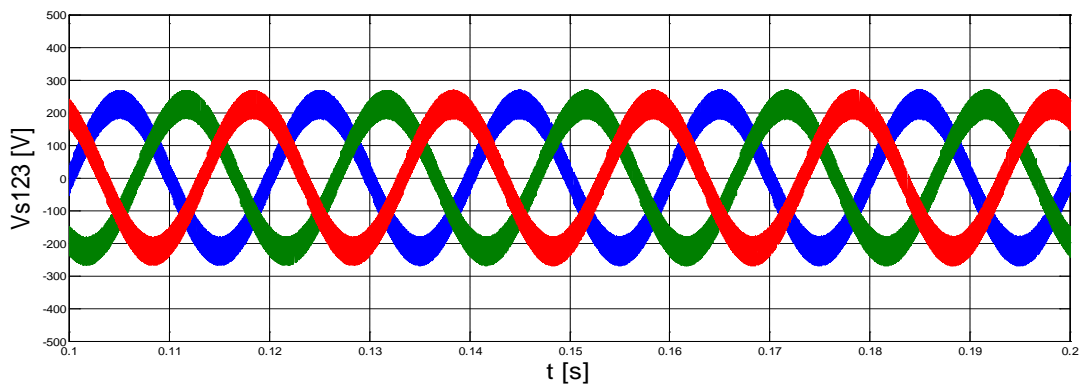


Figure III.15 : tensions triphasées de source

Sachant que le courant coté charge est représenté par la figure suivante :

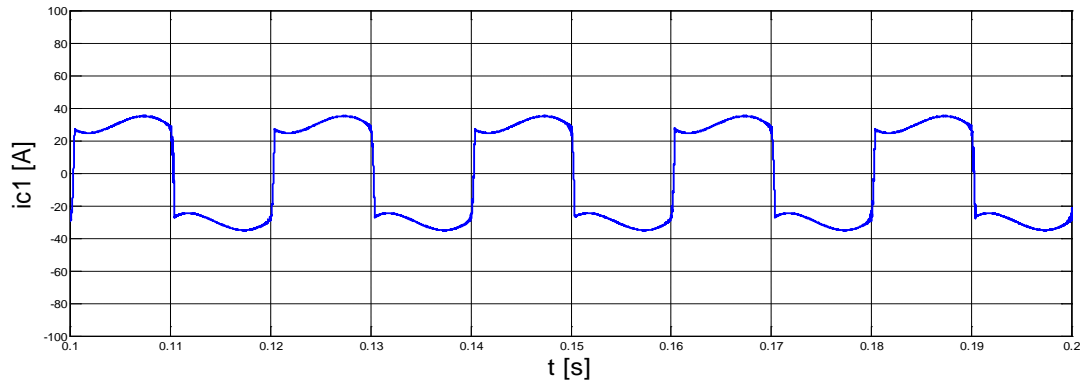


Figure III.16 : courant de charge de la 1ère phase

Nous obtenons le courant injecté par le filtre actif de puissance pour une phase comme suite :

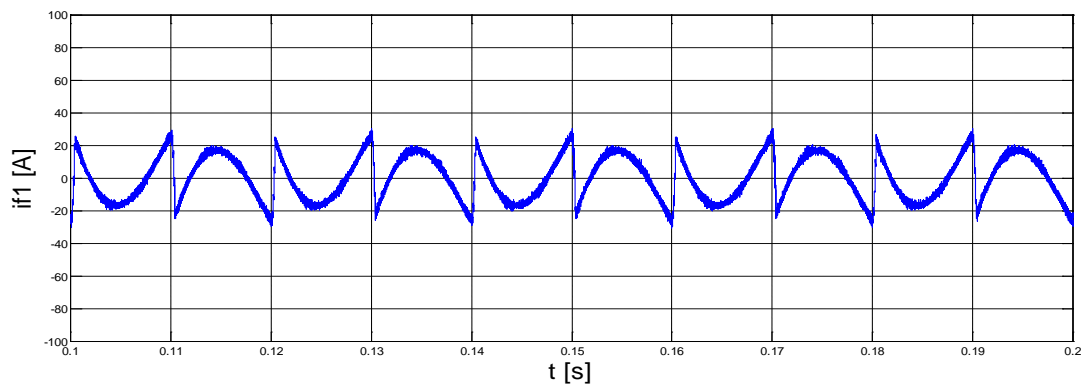


Figure III.17 : courant de filtre de la 1^{ère} phase

Le courant de source après filtrage nous donne la figure suivante :

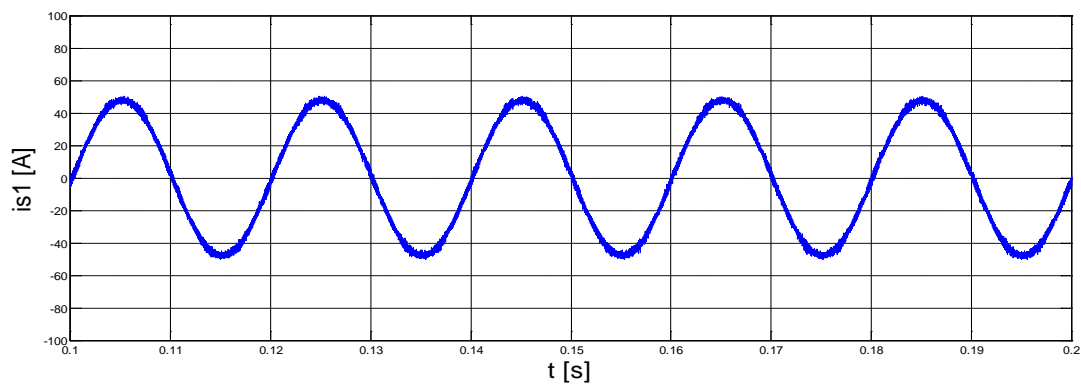


Figure III.18 : courant de source de la 1^{ère} phase

Nous remarquons que le filtre actif de puissance parallèle élimine très bien les harmoniques de courant.

Si nous visualisons le courant au niveau du neutre, nous aurons :

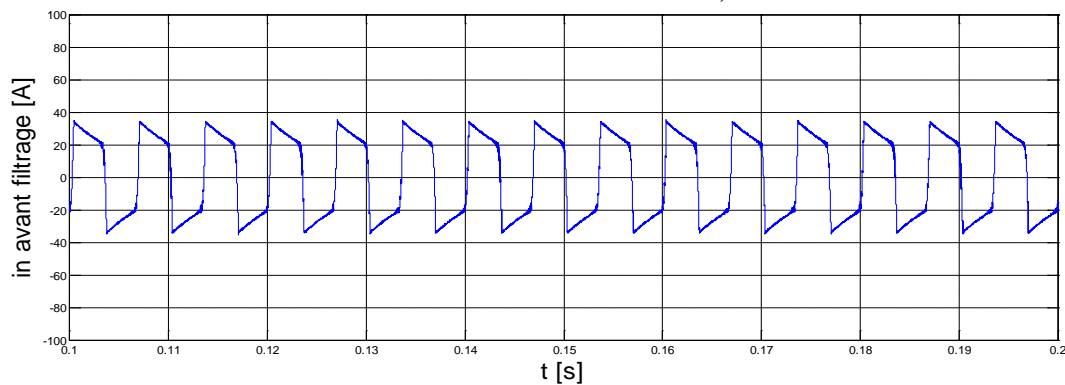


Figure III.19 : courant du neutre avant filtrage

La forme d'onde du courant du neutre après filtrage est comme suite :

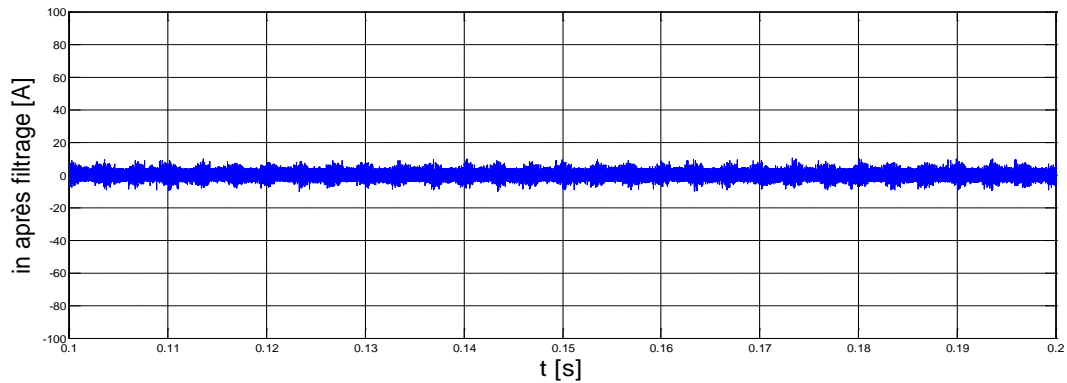


Figure III.20 : courant du neutre après filtrage

La tension aux bornes du condensateur est constante .

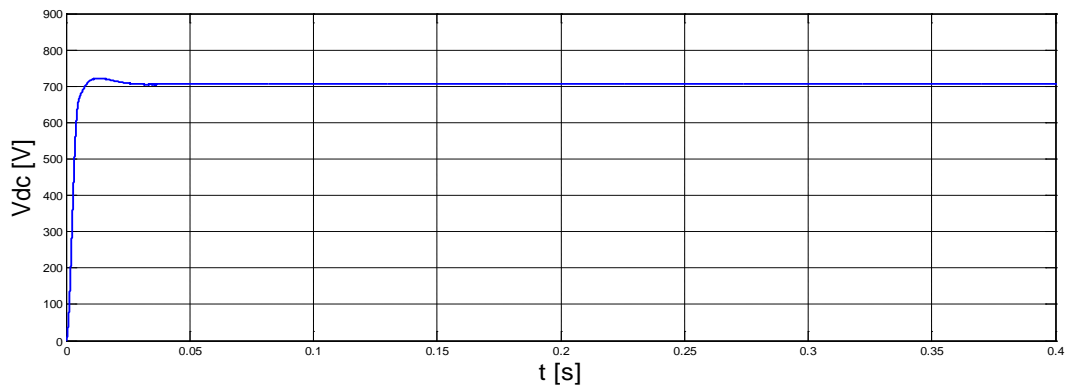


Figure III.21 : tension aux bornes de condensateur

▪ Lorsque le réseau électrique est déséquilibré :

Pour le 1^{ème} cas :

Nous obtenons lorsque le réseau électrique est équilibré trois tensions sinusoïdale cotées source.

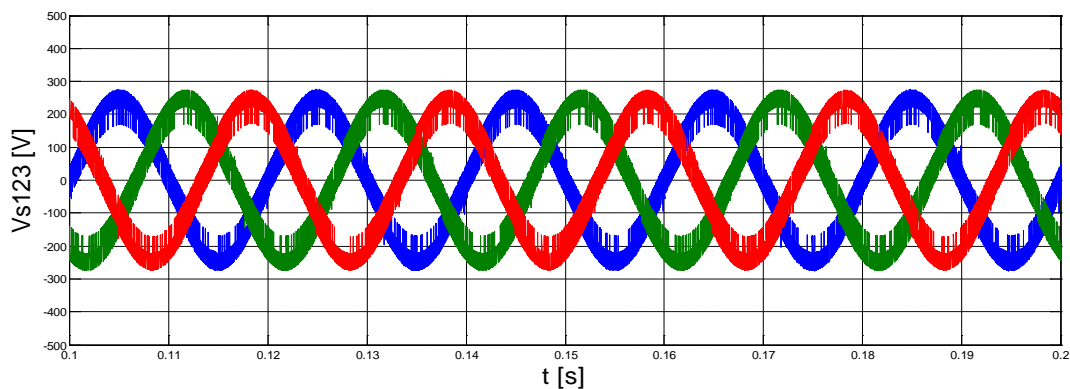


Figure III.22 : tensions de source triphasée

Sachant que les courants coté charge lorsqu'ils sont déséquilibrés et représenté par la figure suivante :

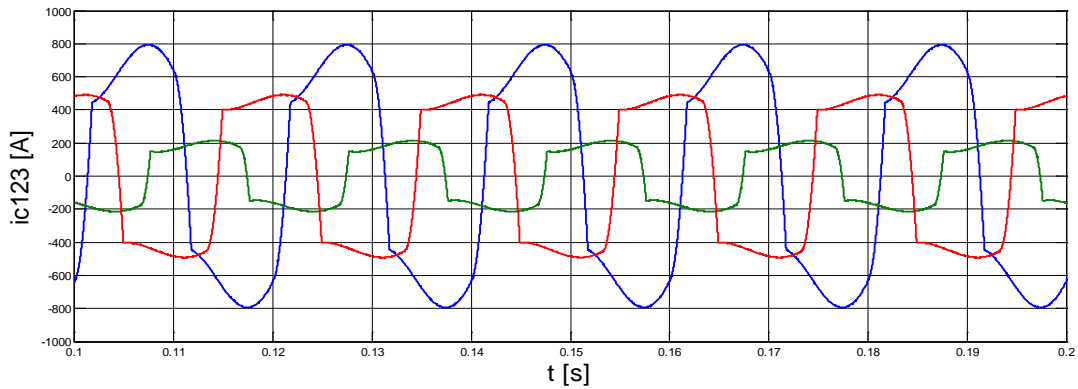


Figure III.23 : courants de charge triphasé

Nous obtenons les courants injectés par le filtre actif de puissance pour chaque phase comme suite :

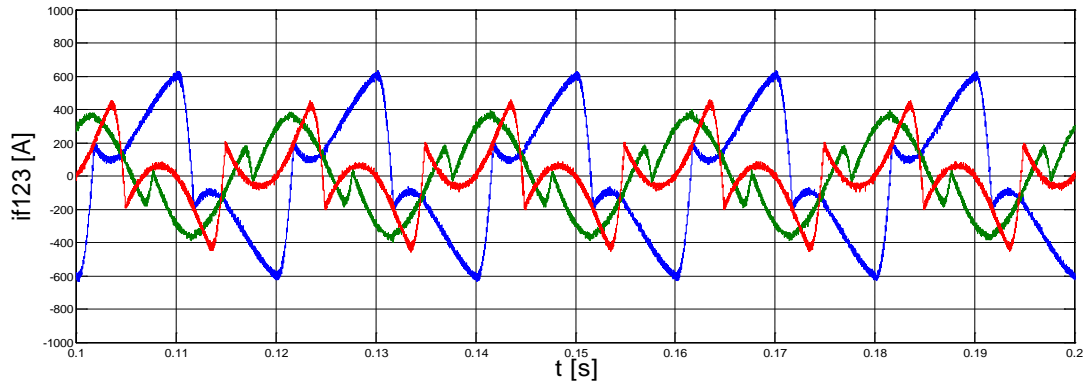


Figure III.24 : courants de filtre triphasé

Les courants de source après filtrage nous donnent la figure suivante :

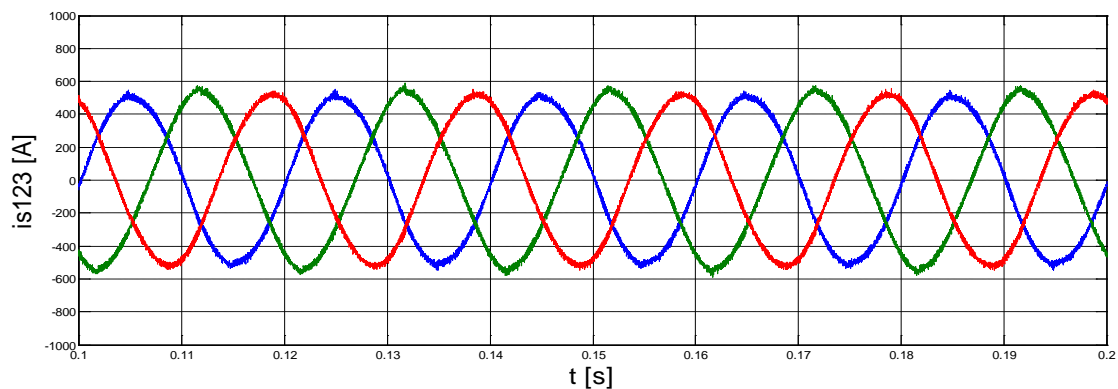


Figure III.25 : courants de source triphasé

Nous remarquons dans la figure III.25 que les harmoniques de courant de chaque phase ont été compensés. Nous remarquons également que le déséquilibre de courant a été fortement atténué.

De plus si nous comparons les signaux de la figure III.22 et III.25, nous remarquons que la compensation de l'énergie réactive a été réalisée.

Si nous observons le courant au niveau du neutre, nous avons le courant avant filtrage comme suite :

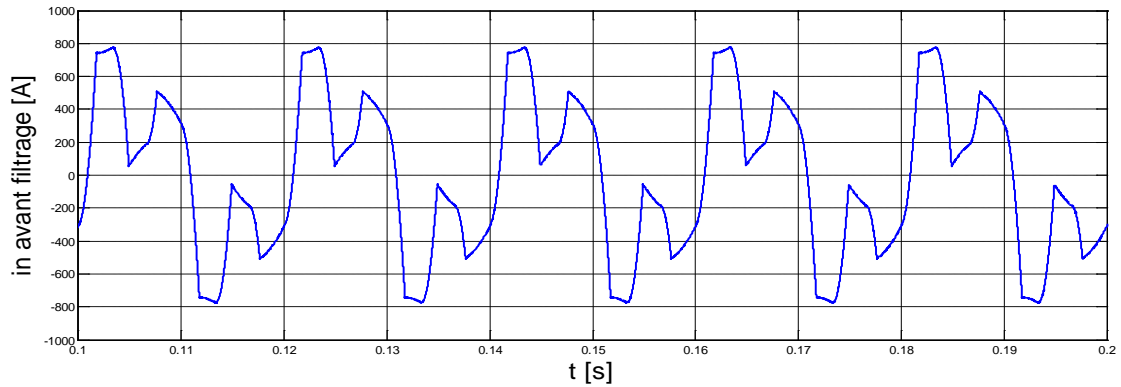


Figure III.26 : courant de neutre avant filtrage

Et le courant du neutre après filtrage comme suite :

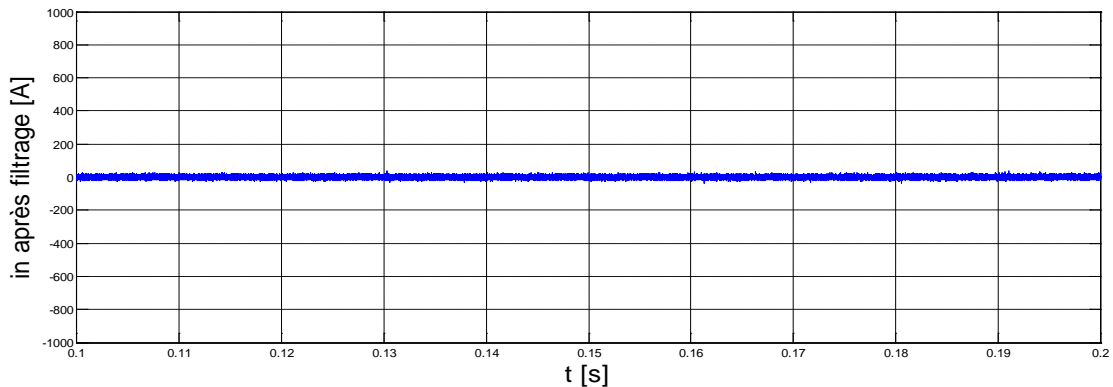


Figure III.27 : courant de neutre après filtrage

La tension moyenne aux bornes du condensateur est constante.

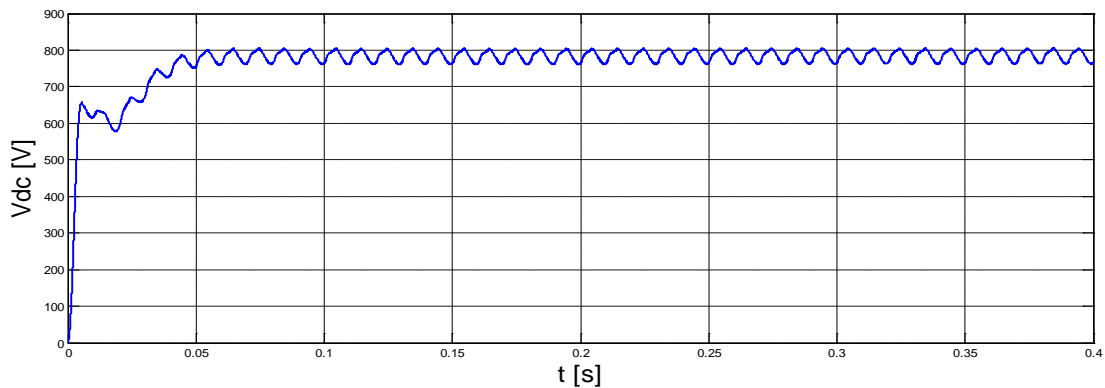


Figure III.28 : tension à la borne de condensateur

Pour le 2^{ème} cas :

Lorsque le réseau électrique est équilibré les trois tensions cotées source sont sinusoïdaux.

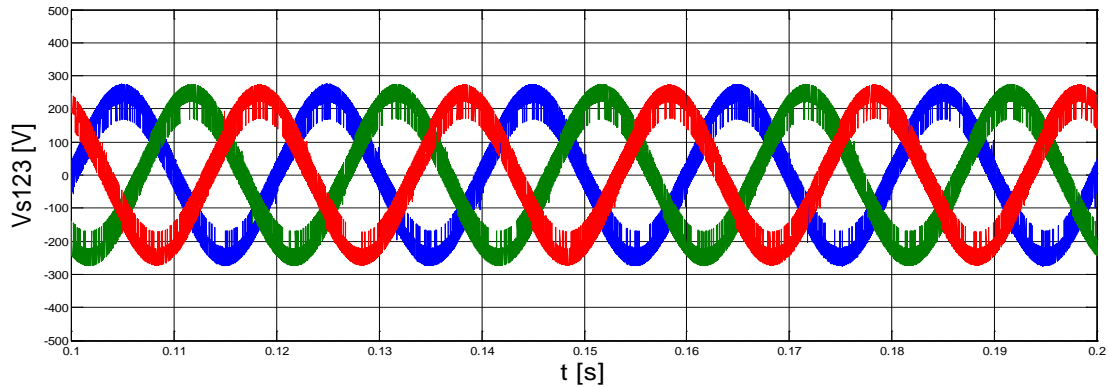


Figure III.29 : tensions triphasé

Sachant que les courants coté charge lorsqu'ils sont déséquilibrés et représenté par la figure suivante :

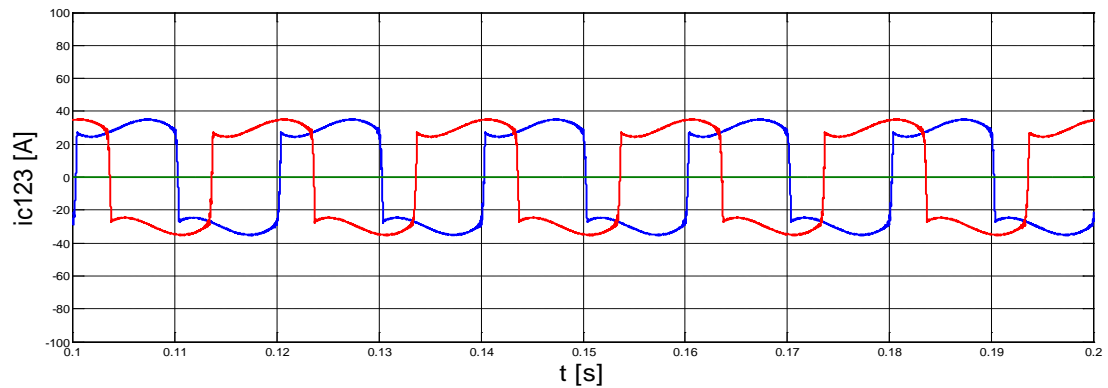


Figure III.30 : courants de charge triphasé

Nous obtenons les courants injectés par le filtre actif de puissance pour chaque phase comme suite :

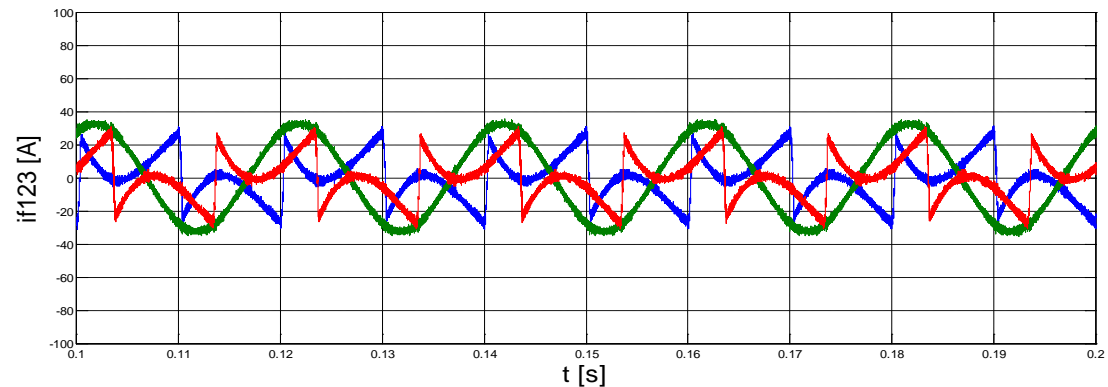


Figure III.31 : courants de filtre des trois phases

Les courants de source après filtrage nous donnent la figure suivante :

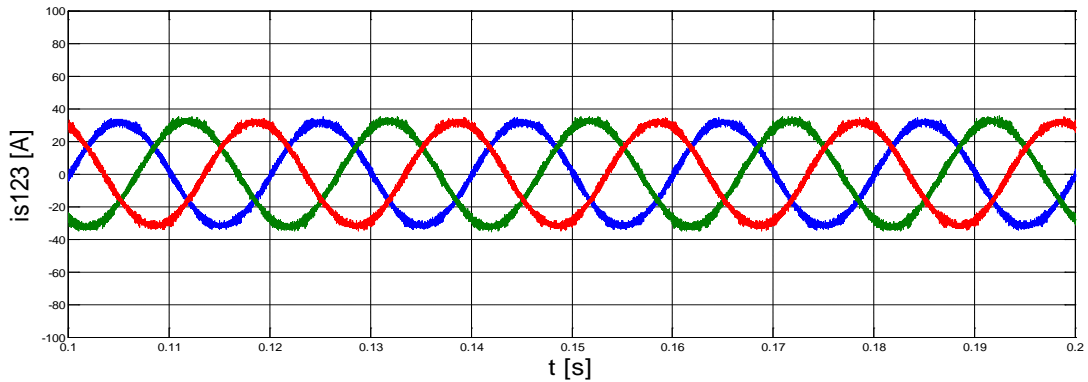


Figure III.32 : courants de filtre des trois phases

Nous remarquons dans la figure III.32 que les harmoniques de courant de chaque phase ont été compensés. Nous remarquons aussi que le déséquilibre a été nettement atténué. De plus, si nous comparons les signaux de la figure III.29 et III.32, nous remarquons que la compensation de l'énergie réactive a été réalisée.

Le signal du courant du neutre avant filtrage est comme suite :

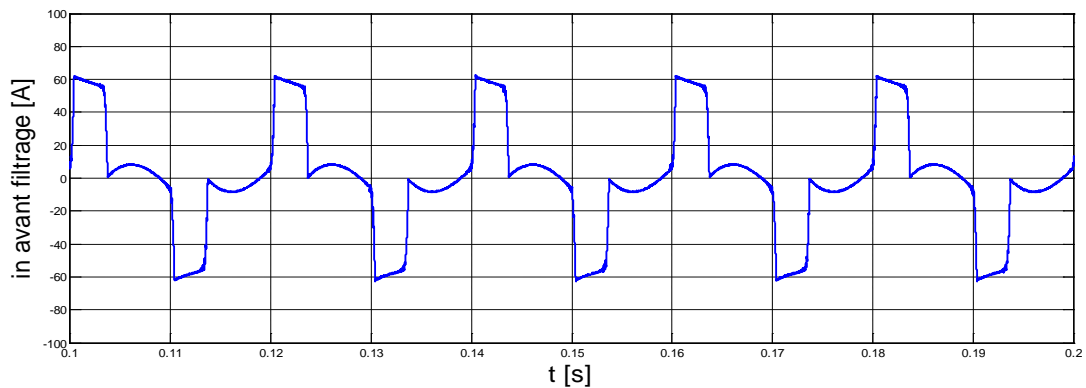


Figure III.33 : courant de neutre avant filtrage

Et le courant du neutre après filtrage comme suite

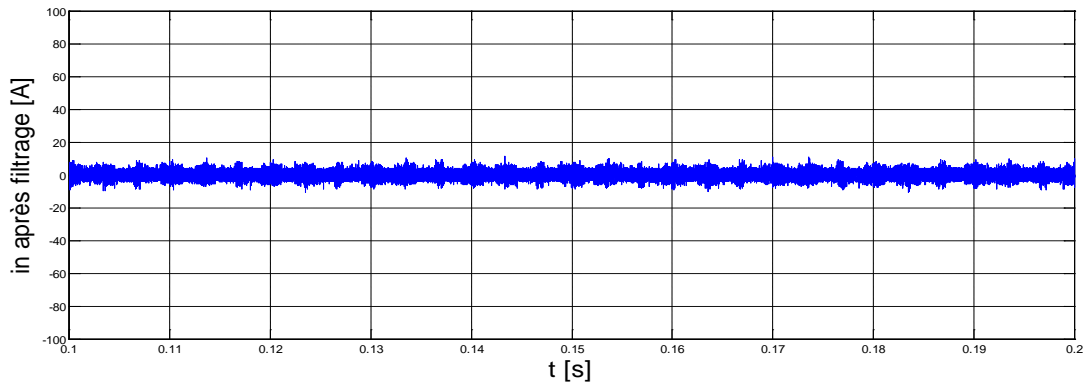


Figure III.34 : courant de neutre après filtrage

La tension aux bornes du condensateur est constante.

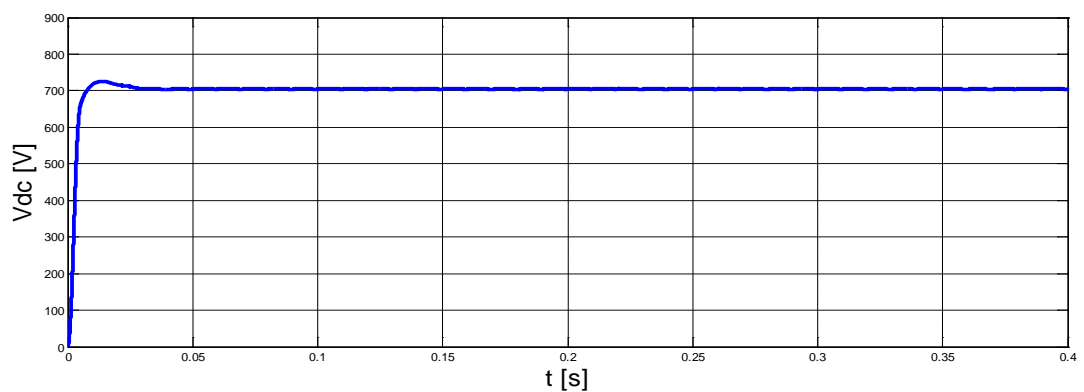


Figure III.35 : tension aux bornes de condensateur

III.2.2 Méthode directe dite vecteur croisé « cross-vector »

- **Pour le cas du réseau électrique équilibré**

Nous avons lorsque le réseau électrique est équilibré les trois tensions cotées source qui sont sinusoïdale mais avec une légère perturbation harmonique.

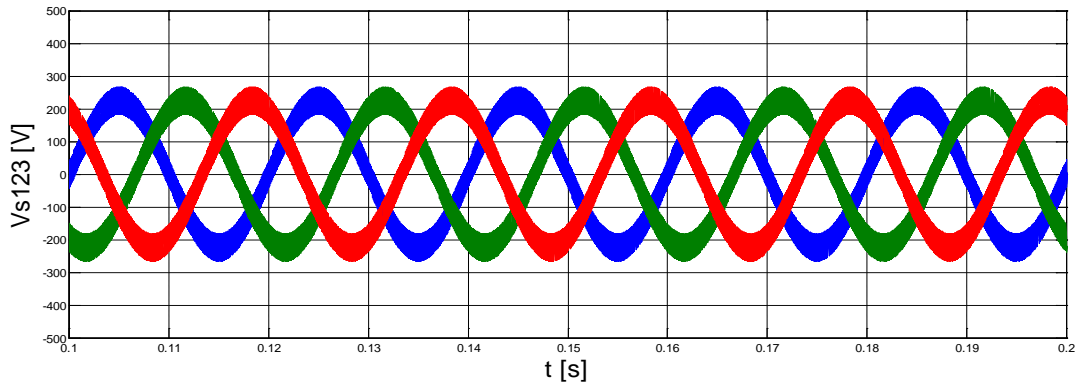


Figure III.36 : tensions de source triphasée

Sachant que le courant coté charge et représenté par la figure suivante :

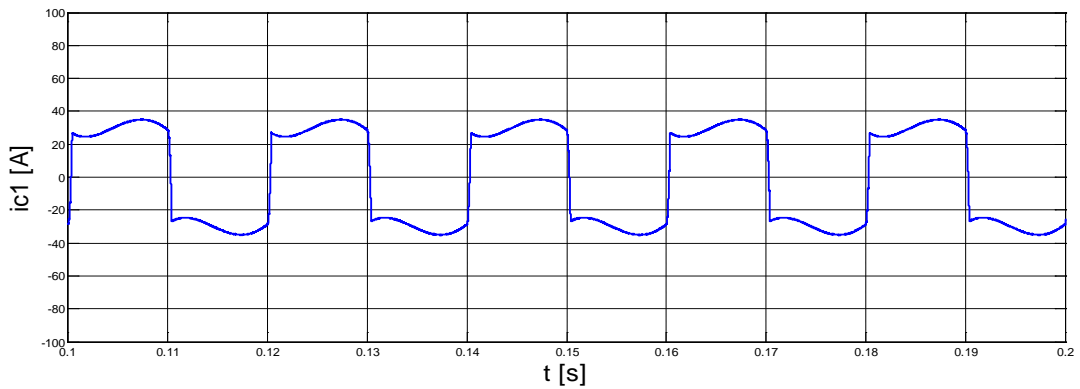


Figure III.37 : courant de charge de la 1^{ère} phase

Le courant injecté par le filtre actif de puissance pour une phase et comme suite :

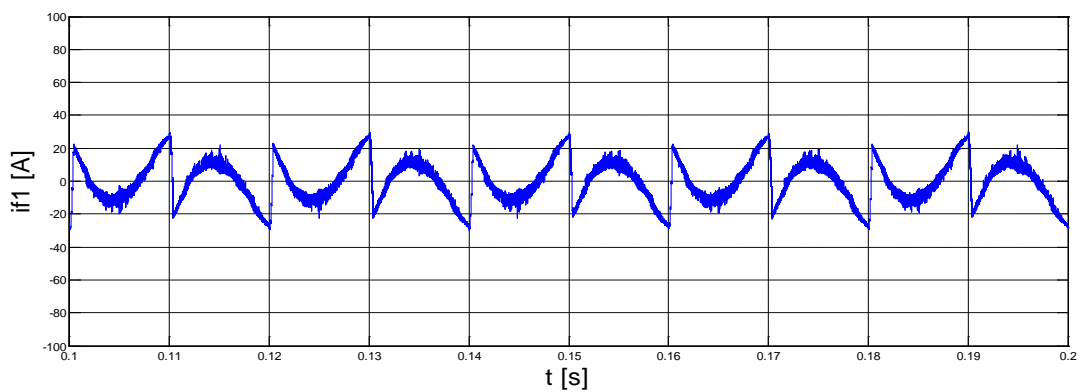


Figure III.38 : courant de filtre de la 1^{ère} phase

Le courant de source après filtrage nous donne la figure suivante :

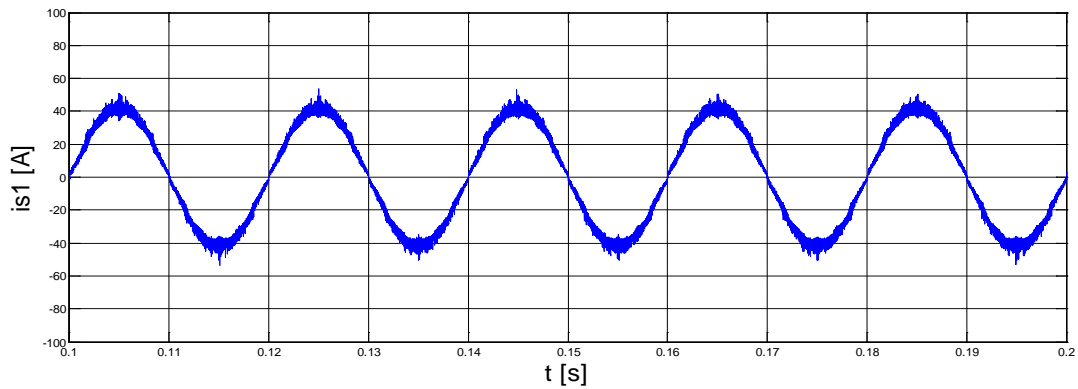


Figure III.39 : courant de source de la 1^{ère} phase après filtrage

Nous remarquons que le filtre actif de puissance parallèle élimine très bien les harmoniques de courant.

Le courant au niveau du neutre avant filtrage et comme suite :

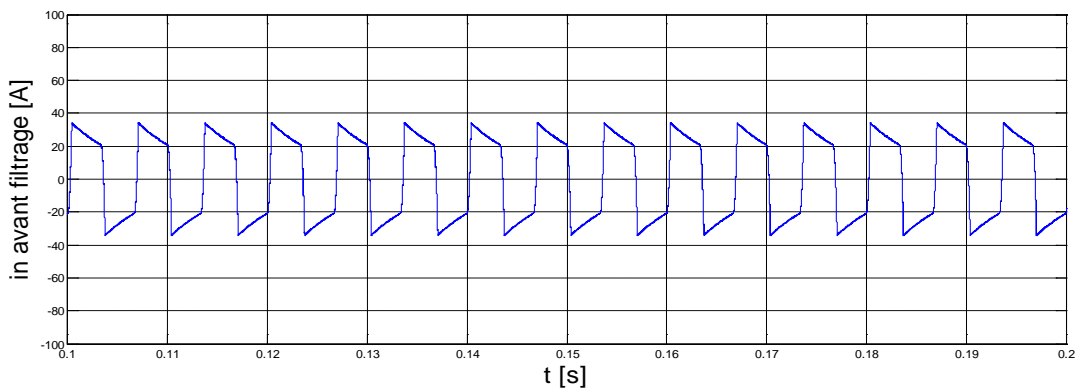


Figure III.40 : courant de neutre avant filtrage

Le courant du neutre après filtrage comme suite :

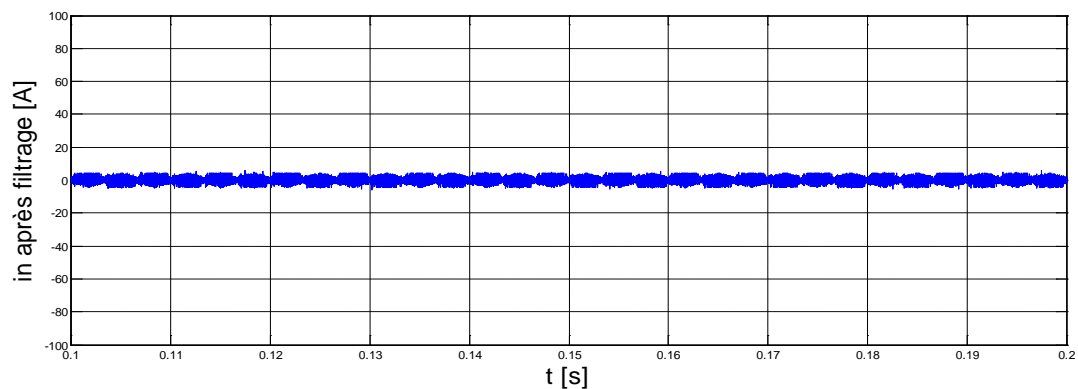


Figure III.41 : courant de neutre après filtrage

La tension aux bornes du condensateur est constante.

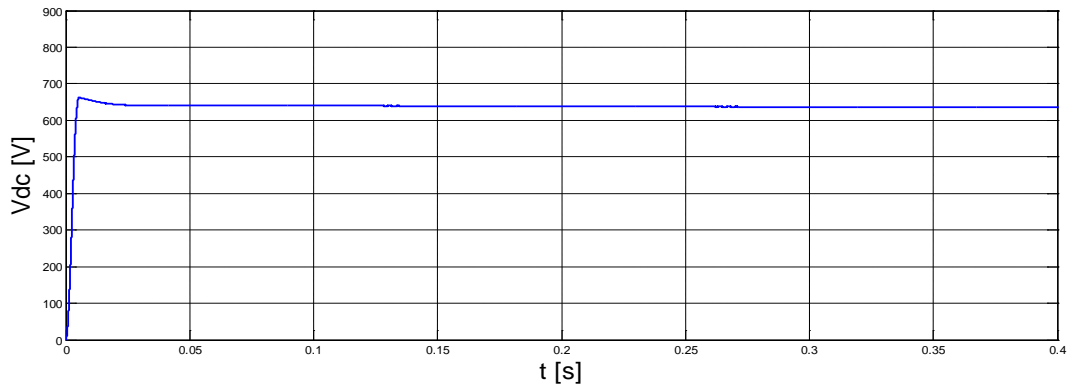


Figure III.42 : tension aux bornes de condensateur

- Pour le cas du réseau électrique est déséquilibré :

Pour le 1^{er} cas :

Nos trois tensions de sources sont sinusoïdale mais avec une légère perturbation harmonique.

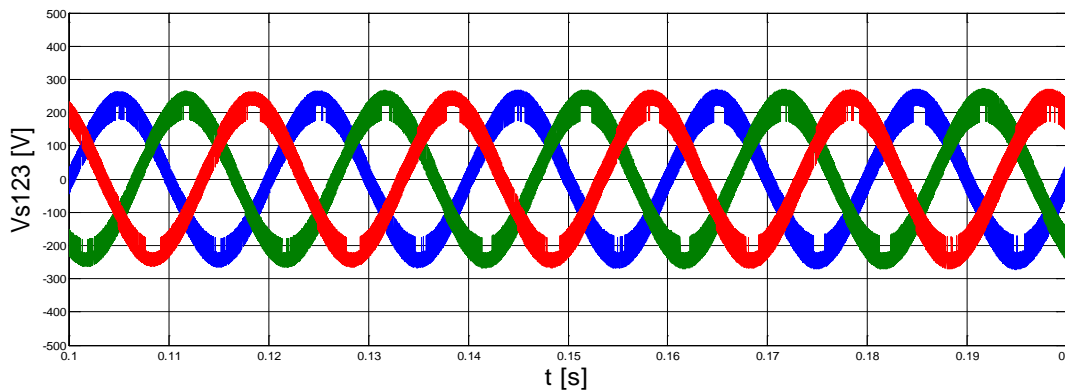


Figure III.43 : tensions triphasé

Nous remarquons que les courants coté charge en régime déséquilibrés sont fortement déséquilibré.

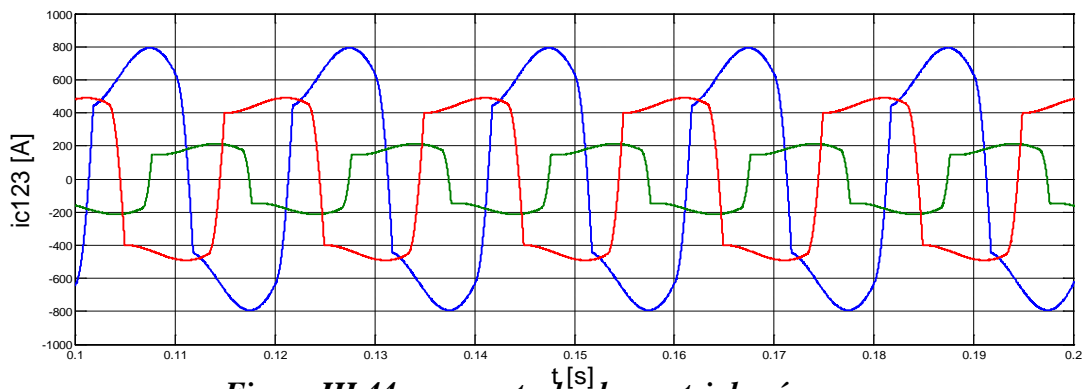


Figure III.44 : courants de charge triphasé

Les courants injectés par le filtre actif de puissance pour chaque phase comme suite :

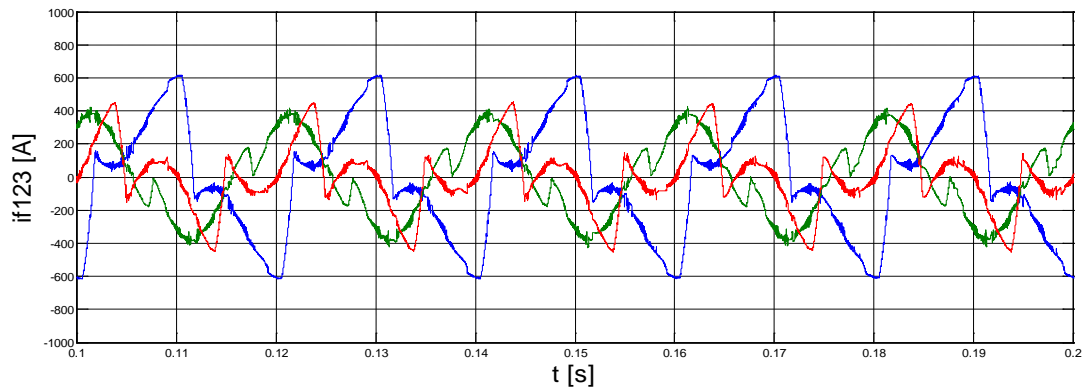


Figure III.45 : courants de filtre triphasé

Les courants de source après filtrage nous donnent la figure suivante :

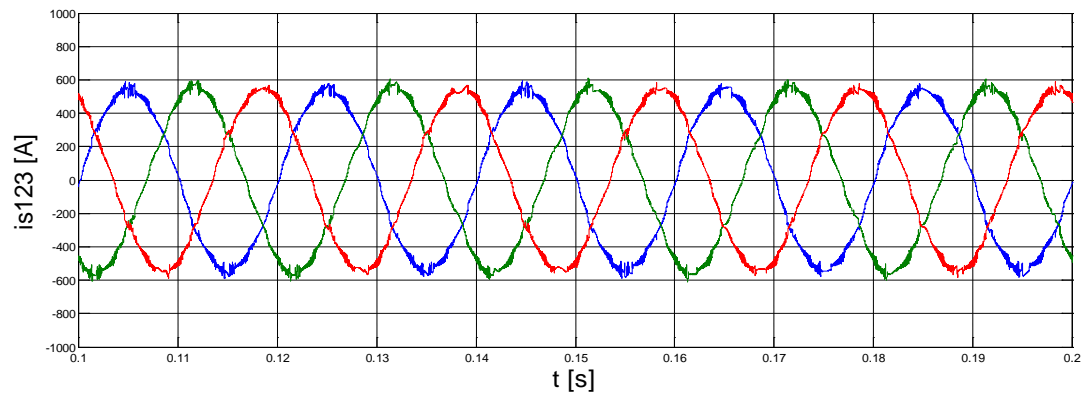


Figure III.46 : courants de source triphasé

Nous remarquons dans la figure III.46 que les harmoniques de courant de chaque phase ont été compensés ainsi que le déséquilibre en amplitude. De plus, si nous comparons les signaux des figures III.43 et III.46, nous remarquons que la compensation de l'énergie réactive a aussi été réalisée.

Le courant, nous avons le courant du neutre avant filtrage est comme suite :

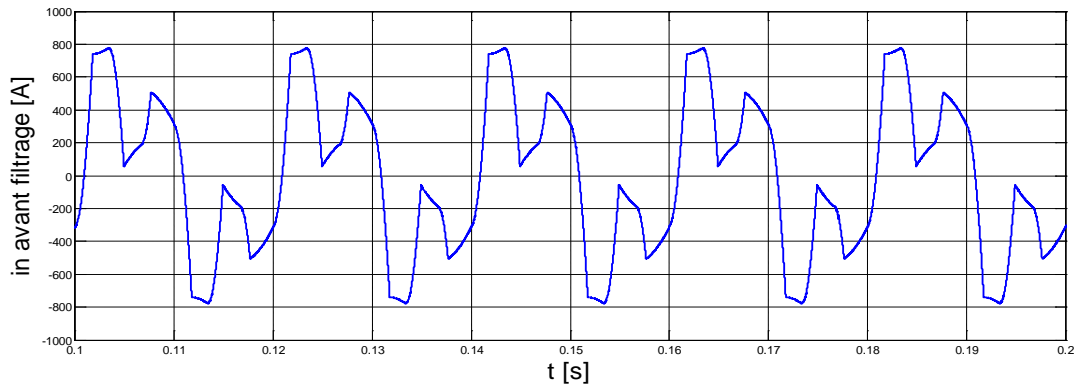


Figure III.47 : courant de neutre avant filtrage

Le signal du courant du neutre après filtrage est comme suite :

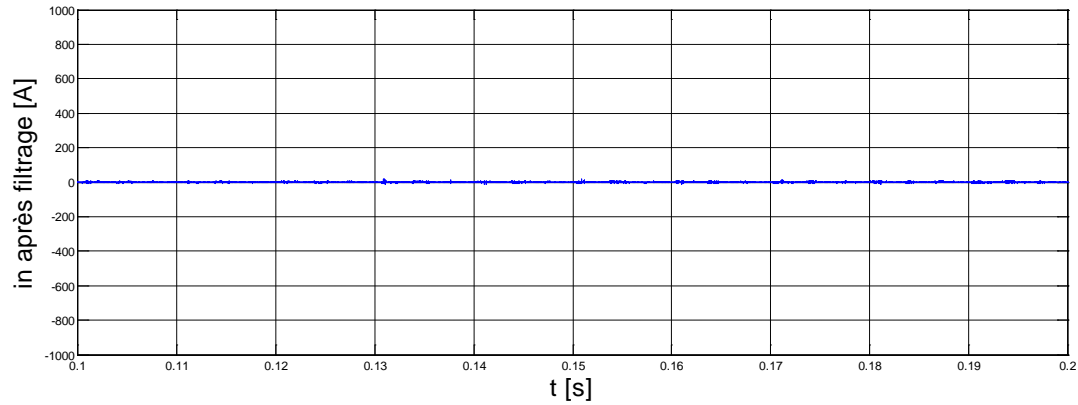


Figure III.48 : courant de neutre après filtrage

La tension moyenne aux bornes du condensateur est constante.

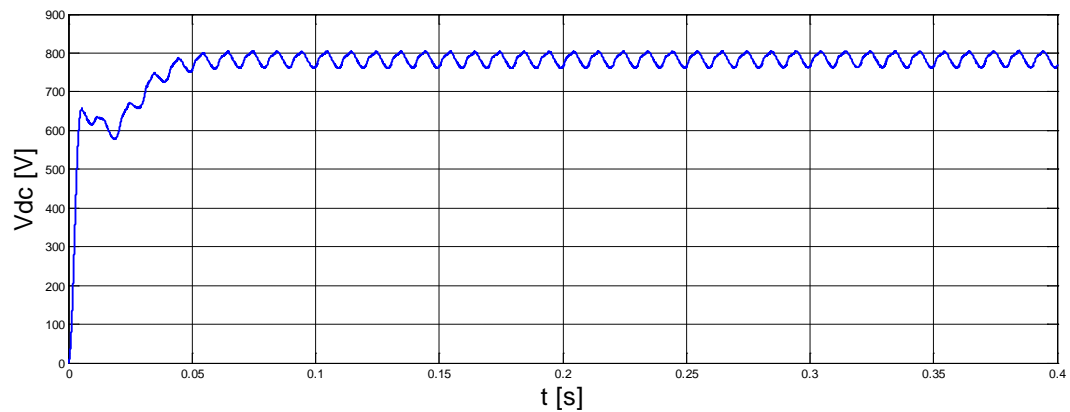


Figure III.49 : tension de condensateur

Pour le 2^{ème} cas :

Lorsque le réseau électrique est équilibré, les trois tensions cotées source sont sinusoïdale.

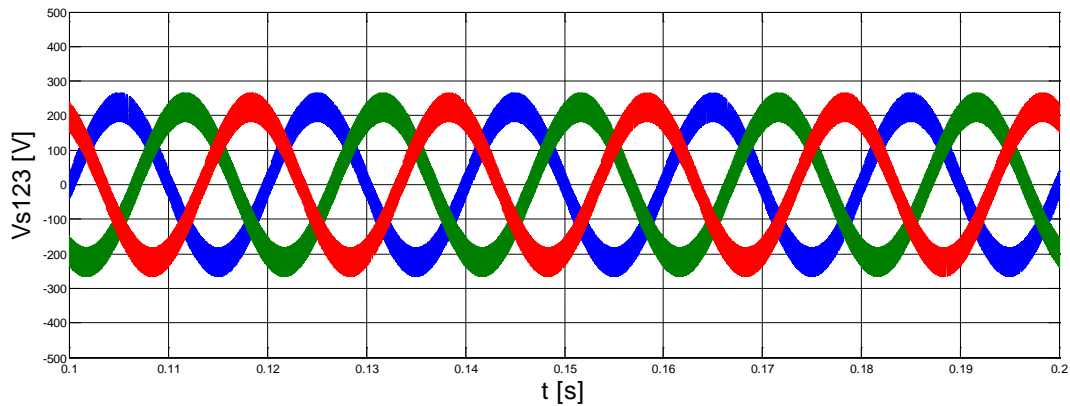


Figure III.50 : tensions coté source des trois phases

Sachant que les courants coté charge lorsqu'ils sont déséquilibrés et représenté par la figure suivante :

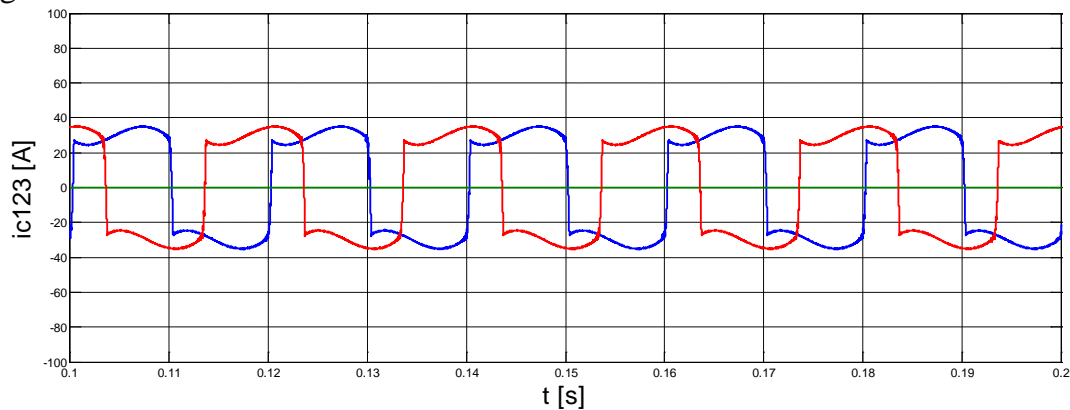


Figure III.51 : courants coté charge des trois phases

Nous obtenons les courants injectés par le filtre actif de puissance pour chaque phase comme suite :

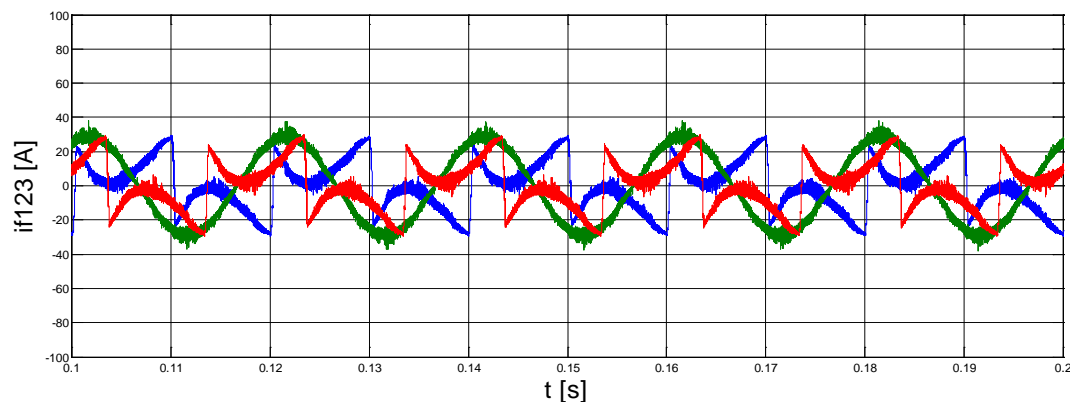


Figure III.52 : courants de filtre des trois phases

Les signaux des courants de source après filtrage sont comme suite :

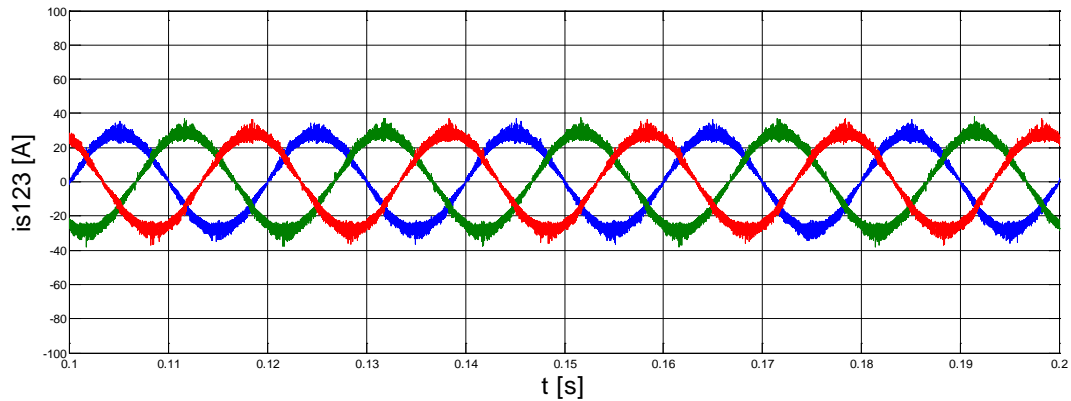


Figure III.53 : courants de source des trois phases

Nous remarquons bien que dans la figure III.53, les harmoniques de courant ainsi que le déséquilibre pour chaque phase ont été compensés. De plus si nous comparons les signaux des figures III.50 et III.53, nous déduisons que la compensation de l'énergie réactive a été réalisée.

Si nous observons le courant au niveau du neutre avant filtrage, on aura :

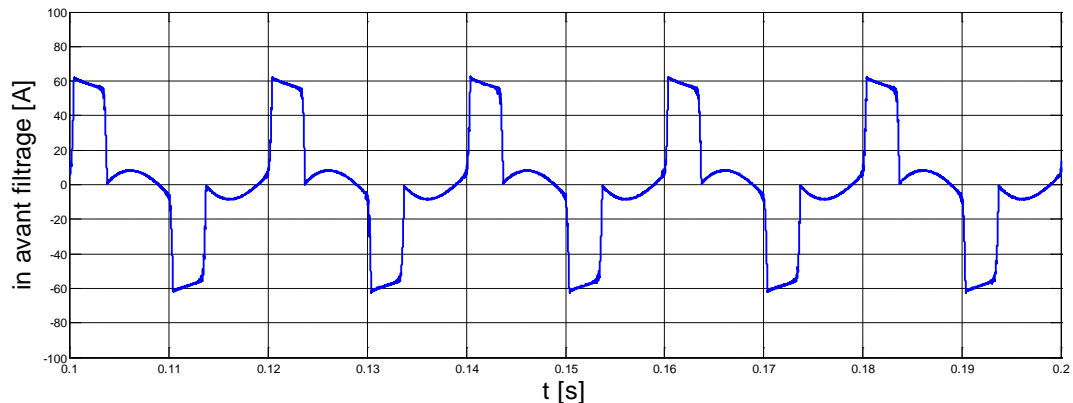


Figure III.54 : courant du neutre avant filtrage

Le courant du neutre après filtrage est comme suite :

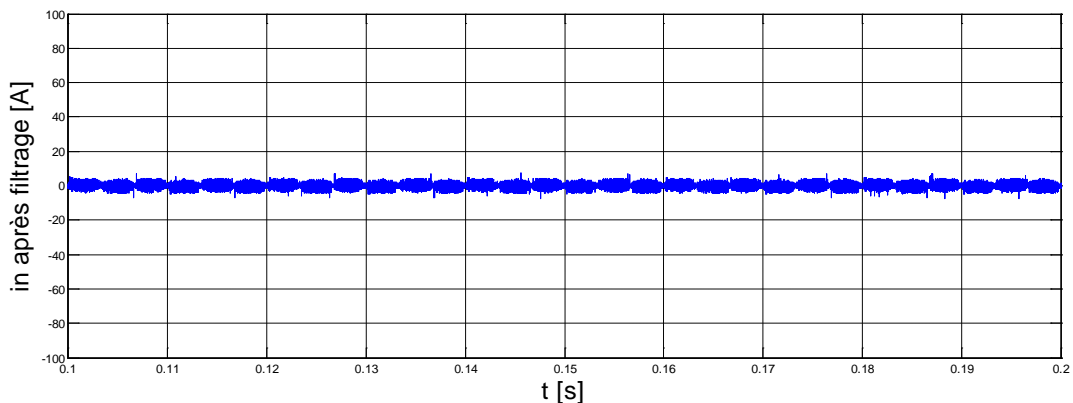


Figure III.55 : courant du neutre après filtrage

La tension aux bornes du condensateur qui est quasiment constante.

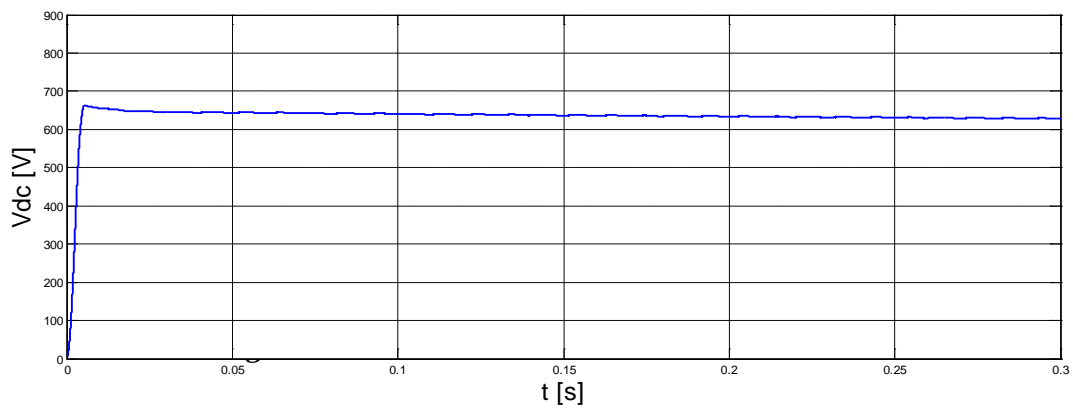


Figure III.56 : tension aux bornes du condensateur

III.2.3 Méthode p-q-r :

- Pour le cas du réseau électrique équilibré :

Les trois tensions sources sont sinusoïdales.

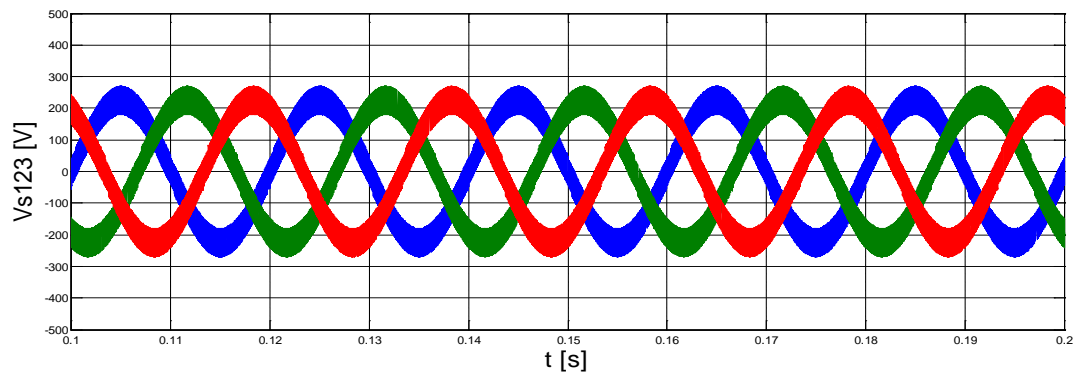


Figure III.57 : tensions de source triphasée Le

courant de charge est représenté par la figure suivante :

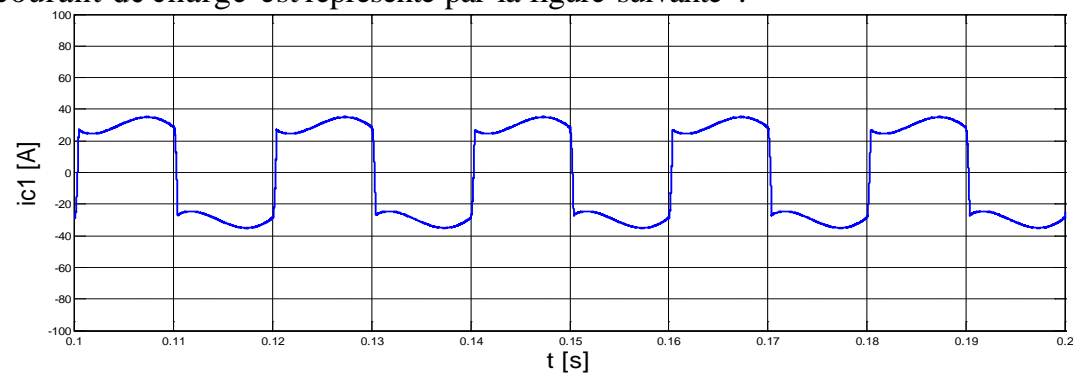


Figure III.58 : courant de charge de la 1^{ère} phase

Le courant injecté par le filtre actif de puissance pour la première phase est comme suite :

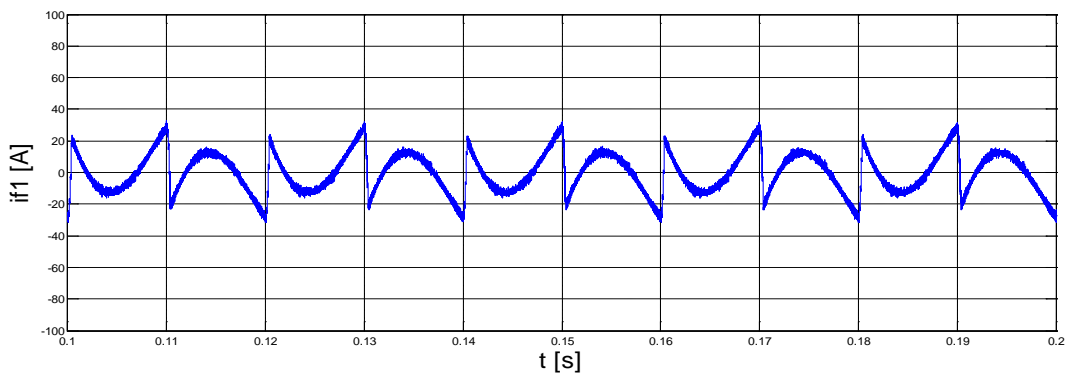


Figure III.59 : courant de filtre de la 1^{ère} phase

Le courant de source après filtrage est représenté par la figure ci-dessous :

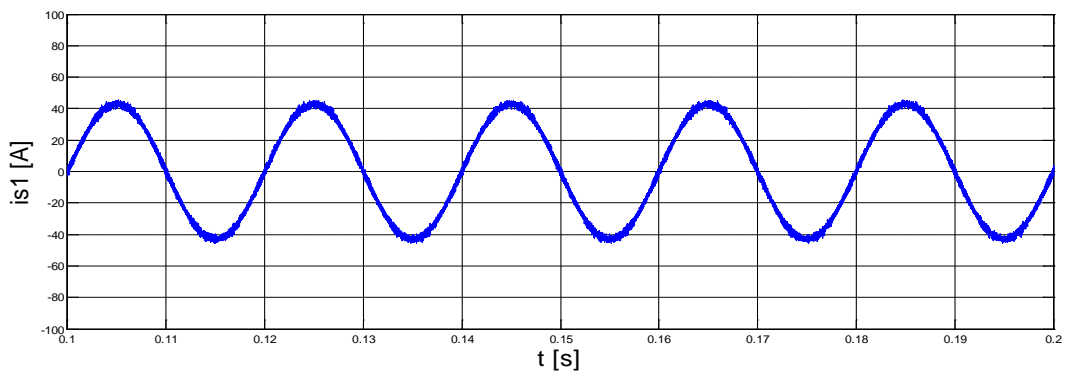


Figure III.60 : courant de source de la 1^{ère} phase

Nous remarquons que le filtre actif de puissance parallèle élimine très bien les harmoniques de courant.

Si nous observons le courant au niveau du neutre, nous avons le courant avant filtrage comme suite :

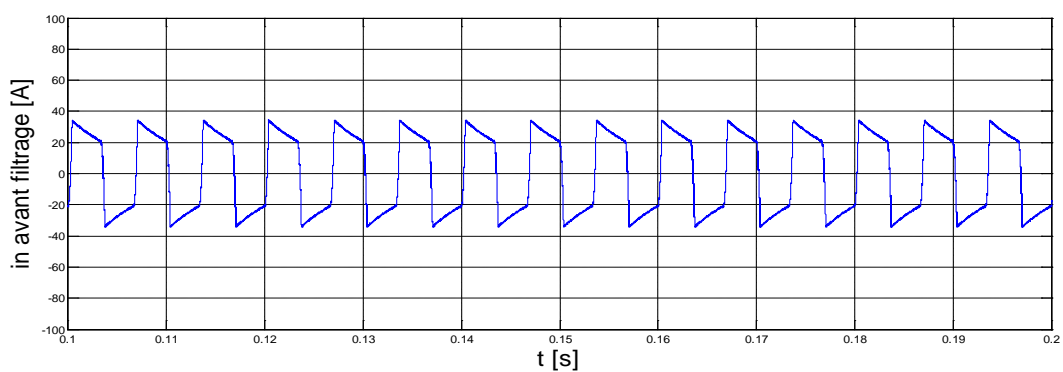


Figure III.61 : courant de neutre avant filtrage

Le courant du neutre après filtrage comme suite :

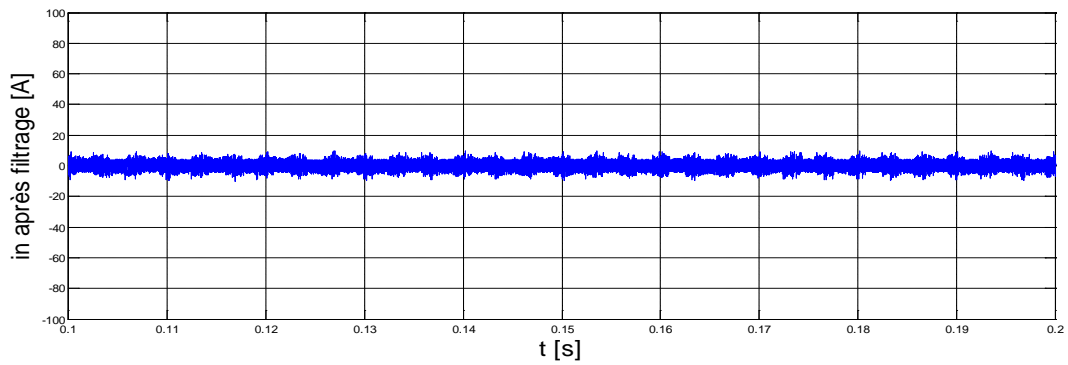


Figure III.62 : courant de neutre après filtrage

La tension aux bornes du condensateur qui est constante.

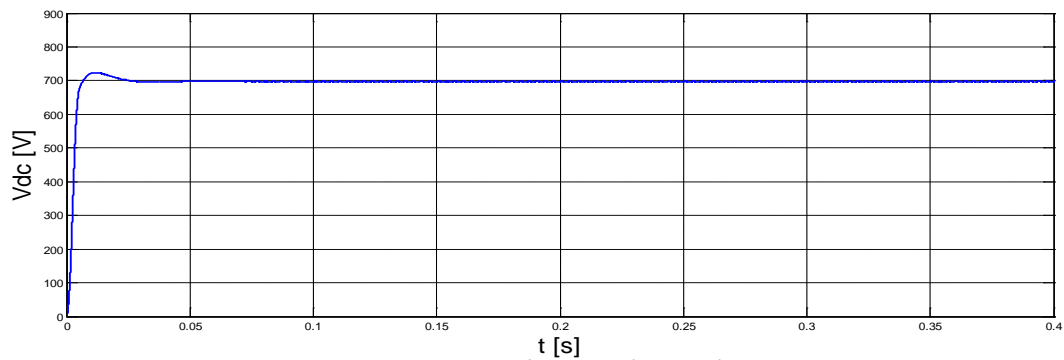


Figure III.63 : tension aux bornes de condensateur

- Pour le cas du réseau électrique déséquilibré :

Pour le 1^{er} cas

Nous avons lorsque le réseau électrique est équilibré les trois tensions cotées source qui sont sinusoïdale mais avec une légère perturbation harmonique.

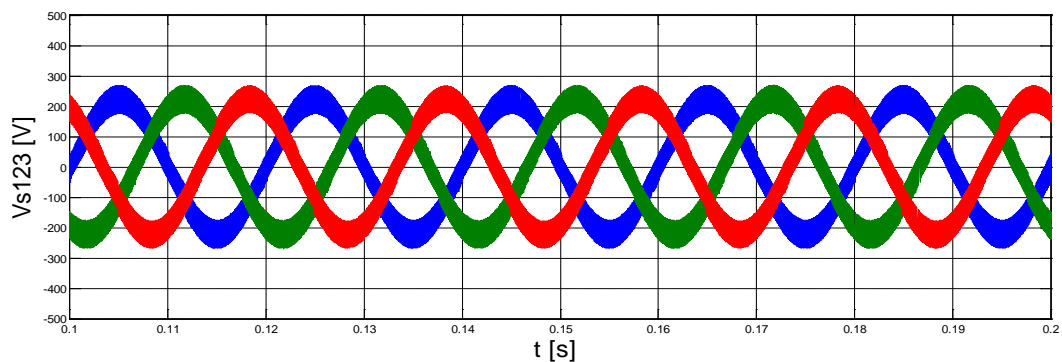


Figure III.64 : tensions de source triphasée

Sachant que les courants coté charge lorsqu'ils sont déséquilibrés et représenté par la figure suivante :

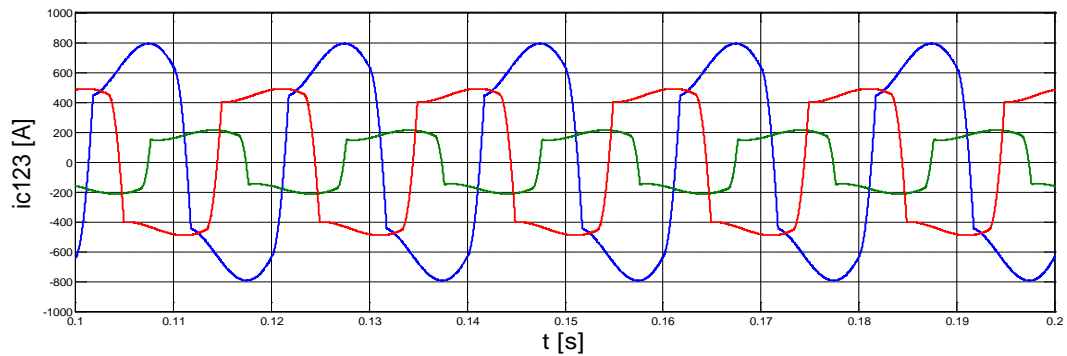


Figure III.65 : courants de charge triphasée

Nous obtenons les courants injectés par le filtre actif de puissance pour chaque phase comme suite :

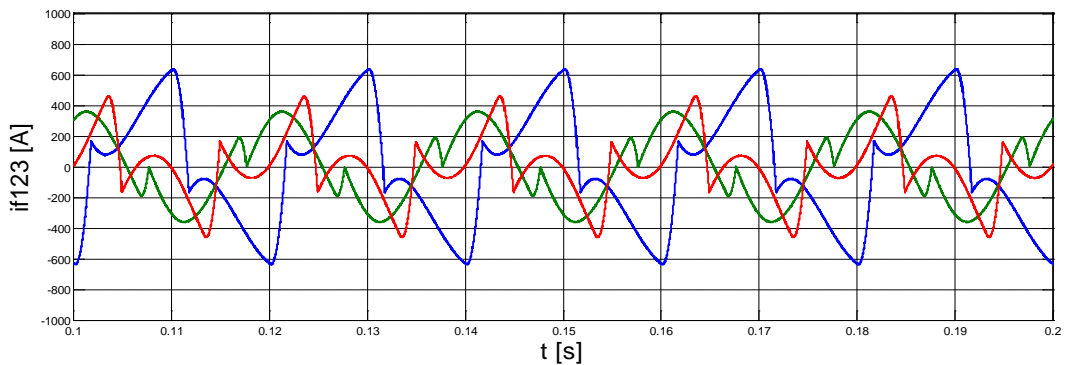


Figure III.66 : courants de filtre triphasé

Les courants de source après filtrage nous donnent la figure suivante :

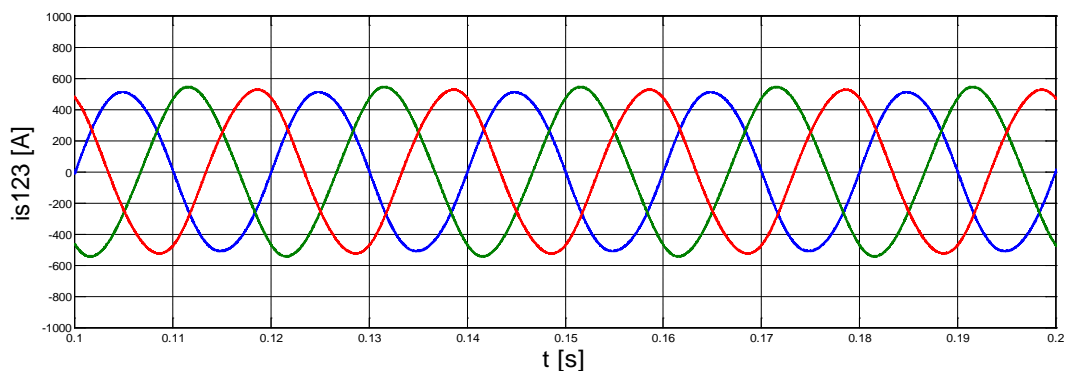


Figure III.67 : Courant de source triphasée

Nous remarquons dans la figure III.67 que les harmoniques de courant de chaque phase ont été compensés. Nous remarquons aussi que le déséquilibre a été atténué. A partir des figure III.64 et III.67 nous pouvons déduire que les courants et tensions de source sont en phase .

Le signal du courant du neutre avant filtrage et comme suite :

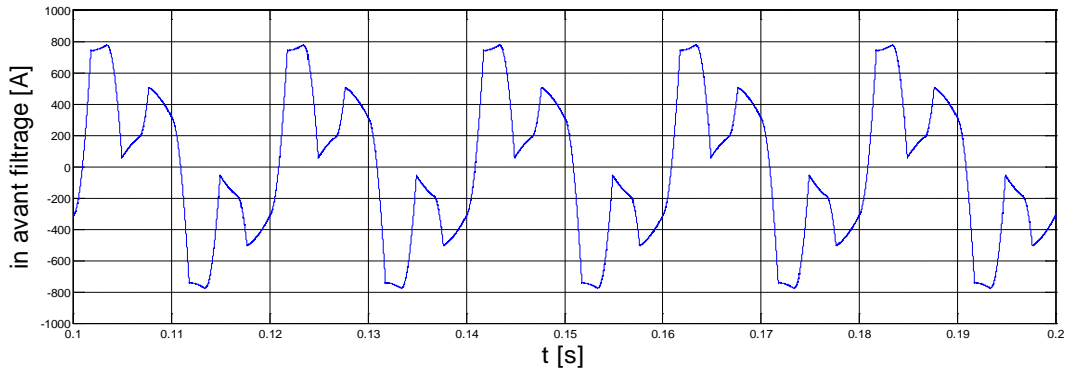


Figure III.68 : courant de neutre avant filtrage

Et le courant du neutre après filtrage comme suite :

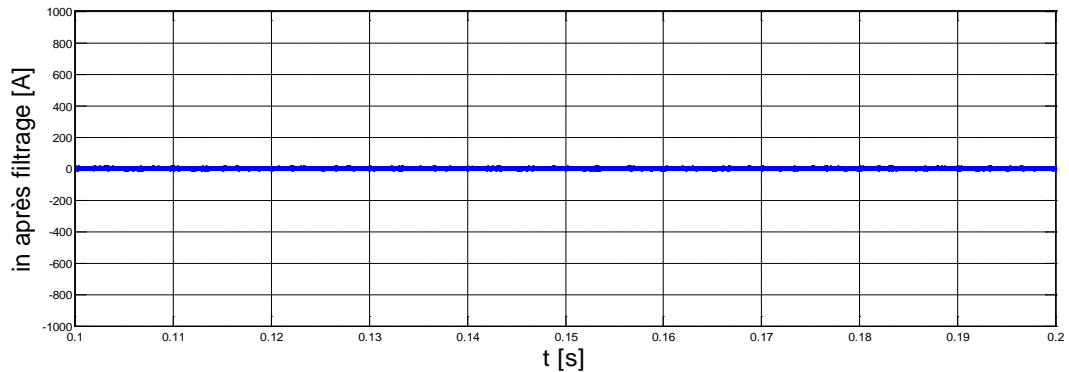


Figure III.69 : courant de neutre après filtrage

L'allure de la tension moyenne aux bornes du condensateur est

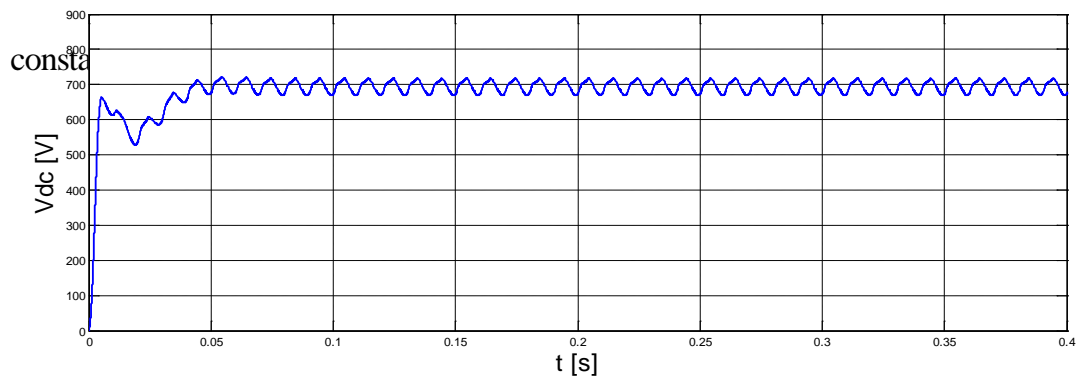


Figure III.70 : tension de condensateur

Pour le 2^{ème} cas :

Nous avons lorsque le réseau électrique est équilibré les trois tensions cotées source qui sont sinusoïdale mais avec une légère perturbation harmonique.

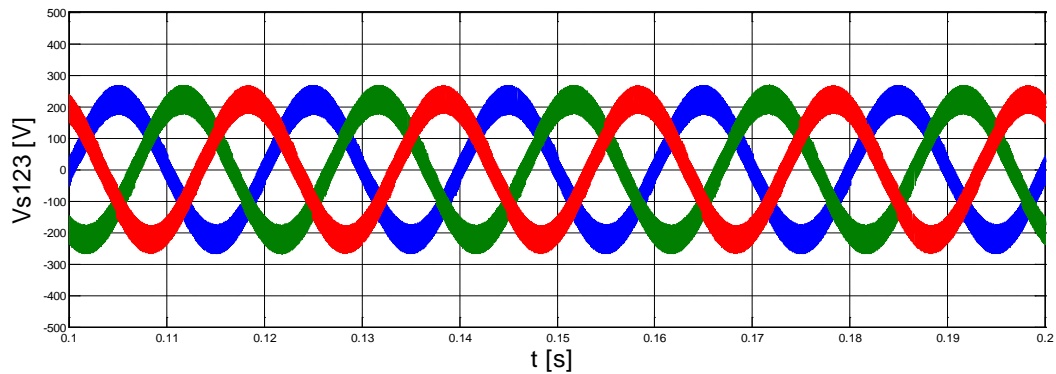


Figure III.71 : tensions de source triphasée

Sachant que les courants coté charge lorsqu'ils sont déséquilibrés et représenté par la figure suivante :

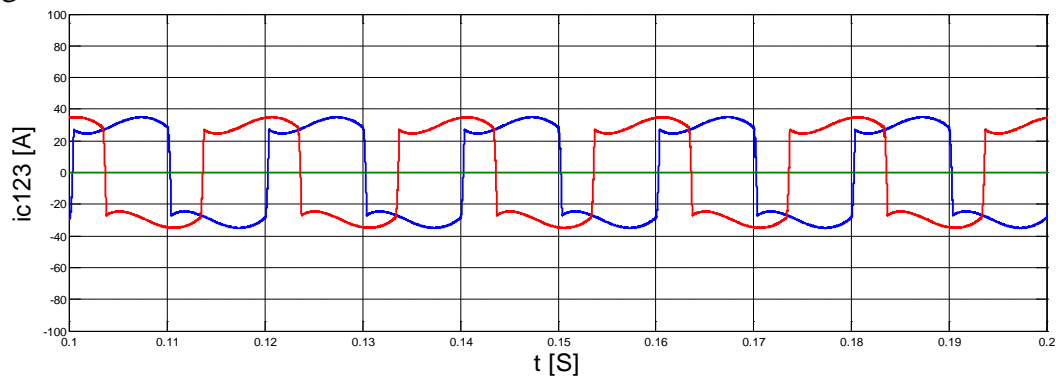


Figure III.72 : courants de charge triphasé

Nous obtenons les courants injectés par le filtre actif de puissance pour chaque phase et comme suite :

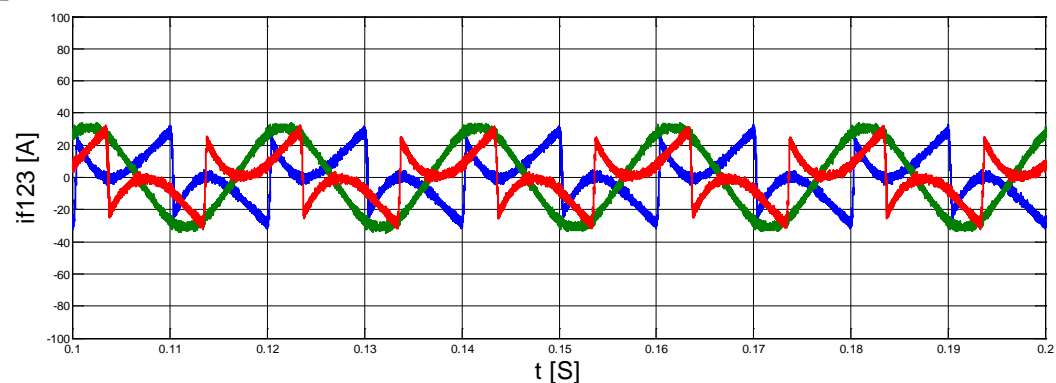


Figure III.73 : courants de source triphasé

Les courants de source après filtrage nous donnent la figure suivante :

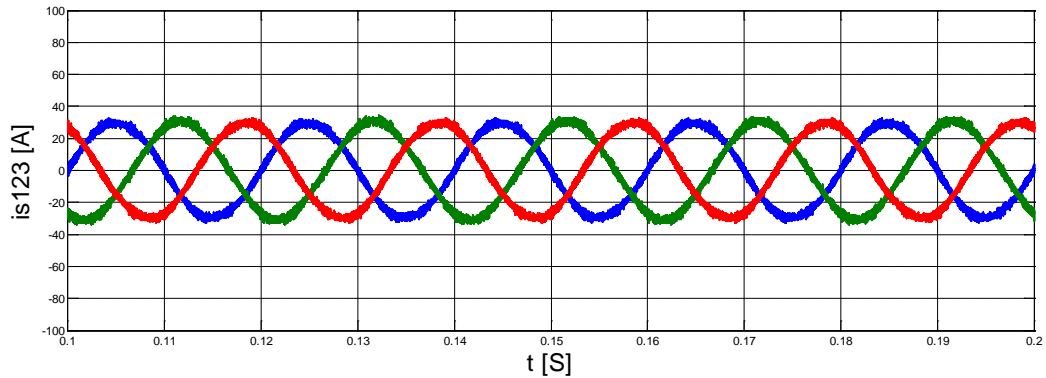


Figure III.74 : courants de source triphasé après filtrage

A partir des figures III.71 et III.74 nous pouvons conclure que les courants harmoniques et l'énergie réactive ont été clairement compensés.

Le signal du neutre avant filtrage est représenté comme suite :

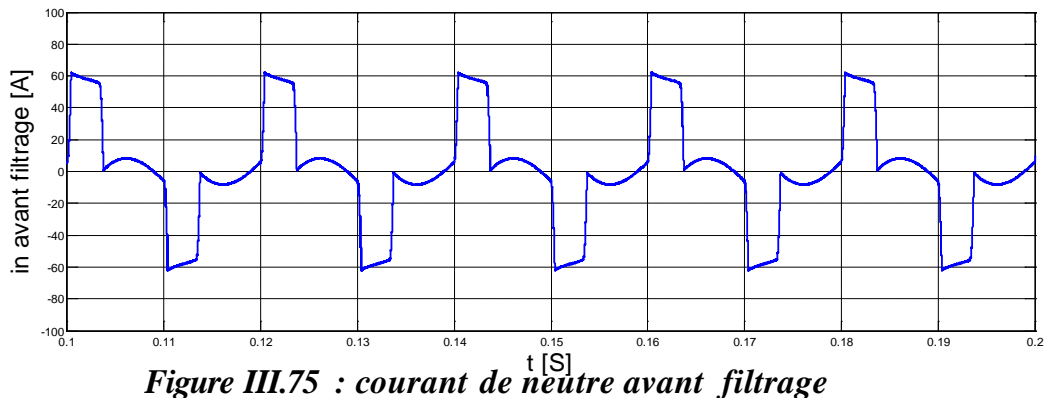


Figure III.75 : courant de neutre avant filtrage

Et le courant du neutre après filtrage comme suite :

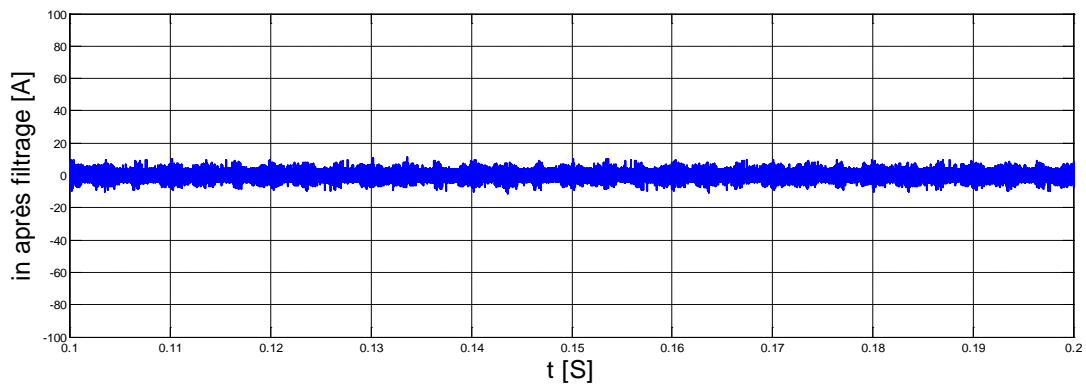


Figure III.76 : courant de neutre après filtrage

La tension aux bornes du condensateur est constante.

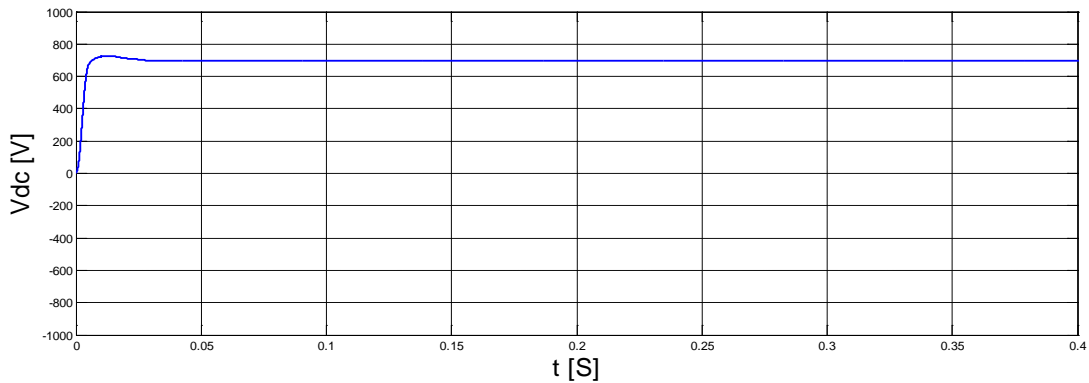


Figure III.77 : tension de condensateur

III.2.4 méthode directe utilisant la théorie du référentiel lié au synchronisme (SRF)

- Pour le cas du réseau électrique est équilibré :

Nous avons lorsque le réseau électrique est équilibré les trois tensions cotées source qui sont sinusoïdale mais avec une légère perturbation harmonique.

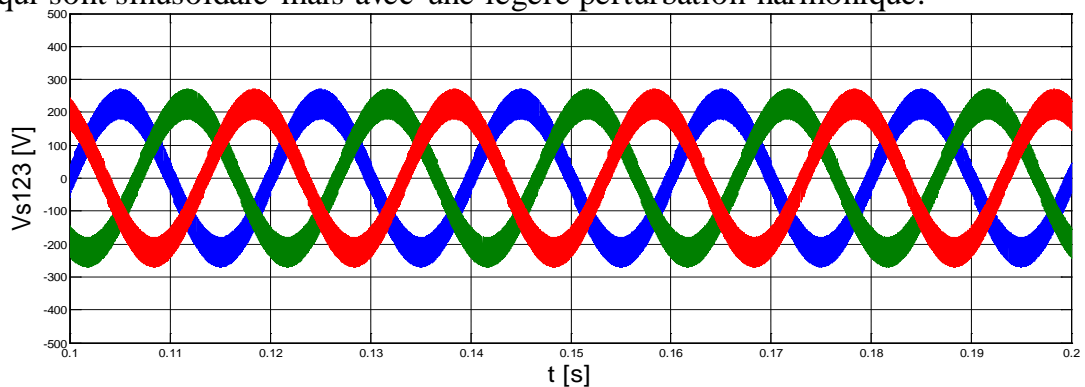


Figure III.78 : tensions de source triphasée

Le courant coté charge et représenté par la figure suivante :

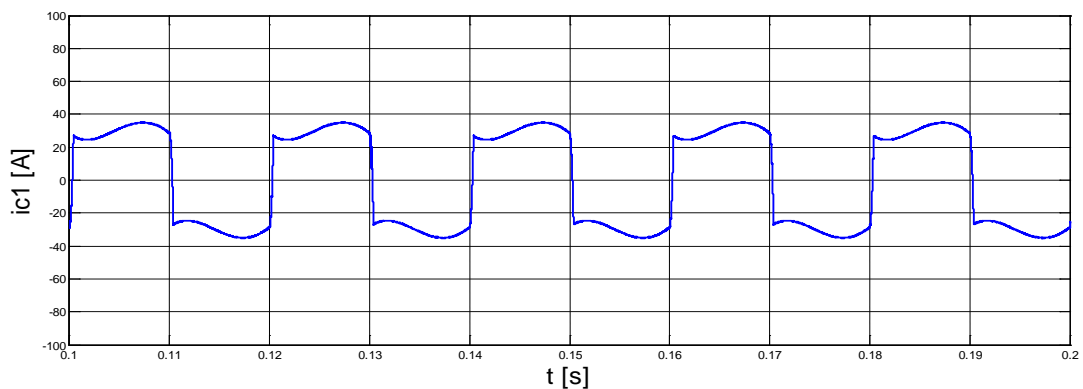


Figure III.79 : courant de charge de la 1^{ère} phase

Le signal du courant harmonique injecté par le filtre actif de puissance pour la phase une et comme suite :

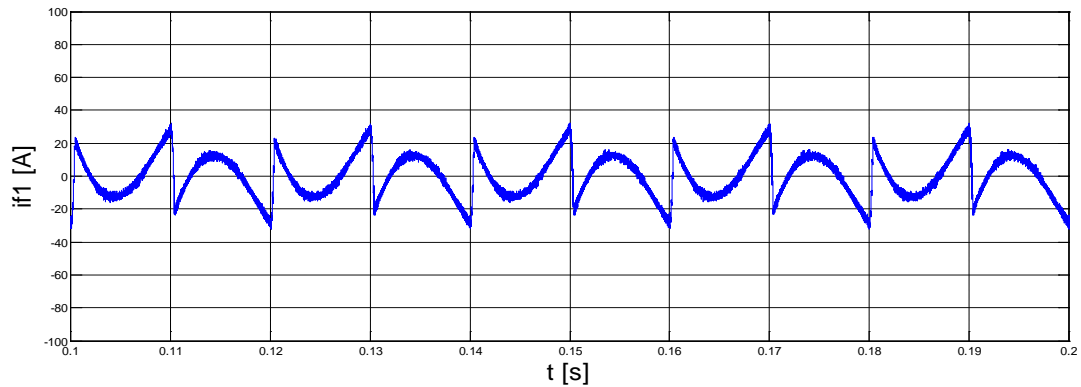


Figure III.80 : courant de charge de la 1^{ère} phase

Le signal du courant de source après filtrage est :

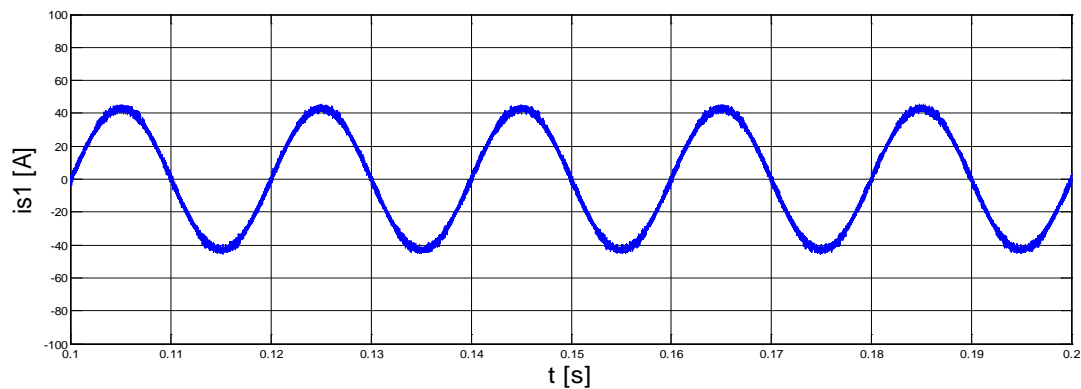


Figure III.81 : courant de source de la 1^{ère} phase

Nous remarquons que le filtre actif de puissance parallèle élimine très bien les harmoniques de courant. Nous observons aussi que le courant au niveau du neutre est comme suite :

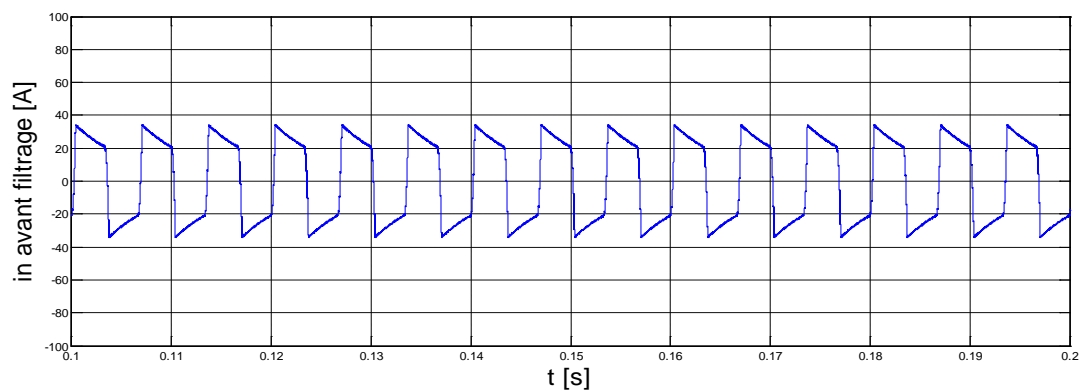


Figure III.82 : courant de neutre avant filtrage

Le courant du neutre après filtrage comme suite :

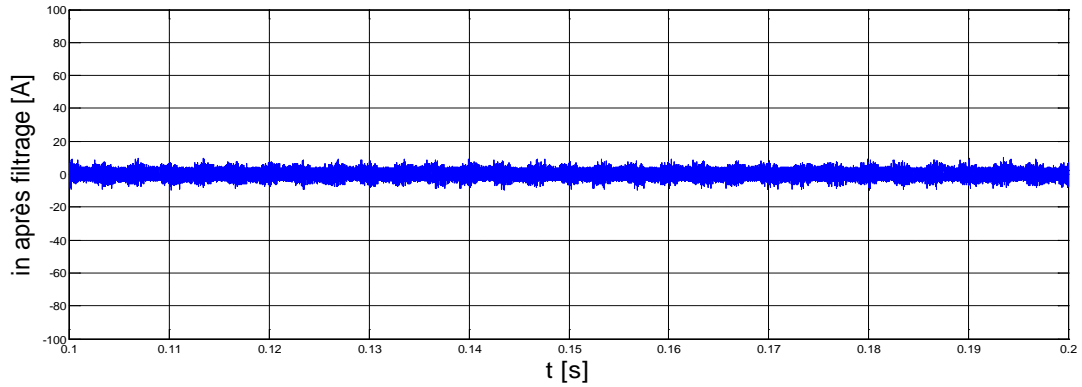


Figure III.83 : courant de neutre après filtrage

La tension aux bornes du condensateur est constante.

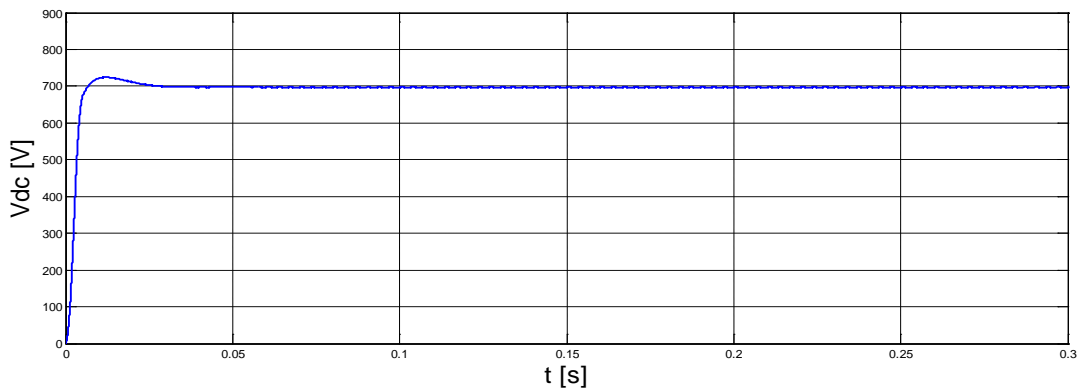


Figure III.84 : courant de neutre avant filtrage

▪ Pour le cas du réseau électrique est déséquilibré :

Pour le 1^{er} cas

Le réseau électrique est équilibré et sinusoïdale.

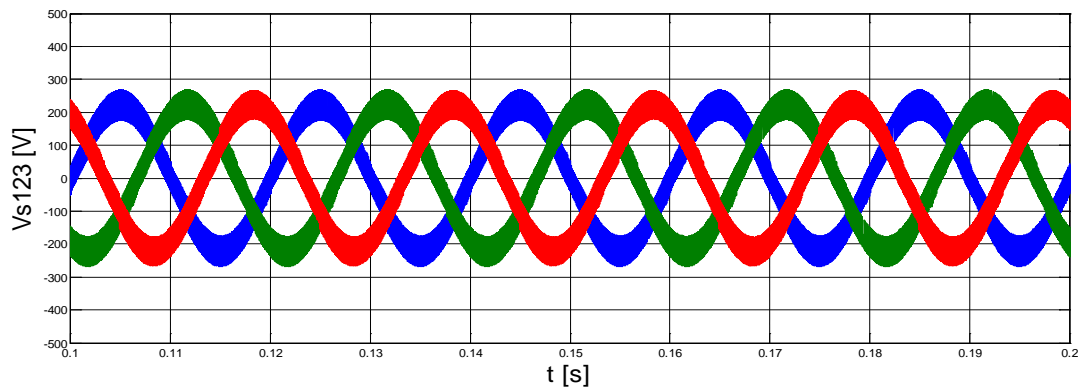


Figure III.85 : tensions de source triphasée

Les signaux des courants coté charge en mode déséquilibrés sont illustré da courbe suivante :

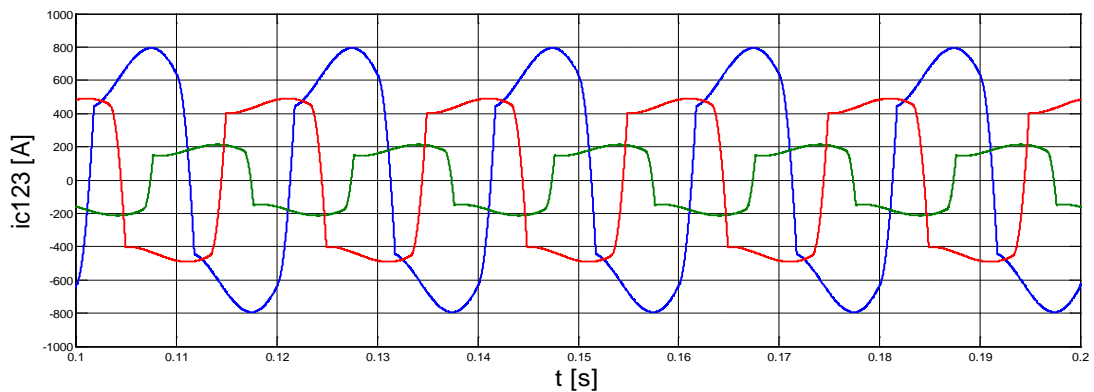


Figure III.86 : courants de charge triphasée

Les signaux des courants injectés par le filtre actif de puissance pour chaque phase sont etcomme suite :

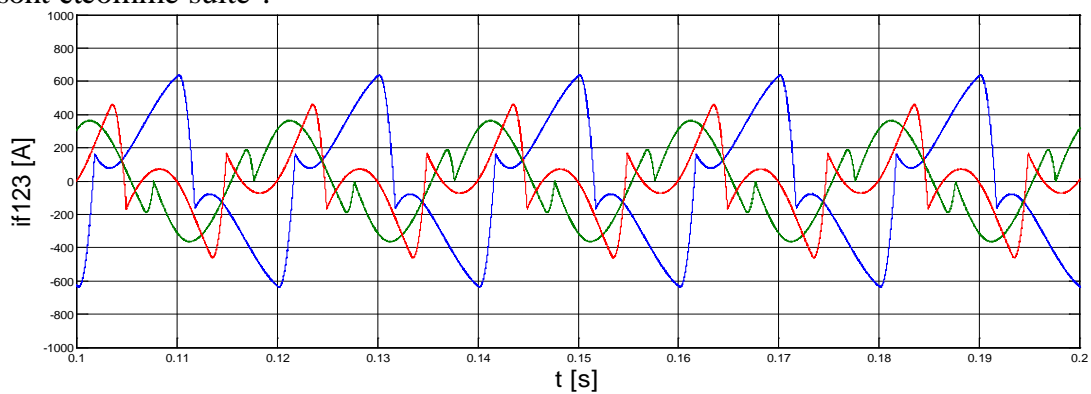


Figure III.87 : courants de filtre triphasé

Les signaux de courants de source après filtrage :

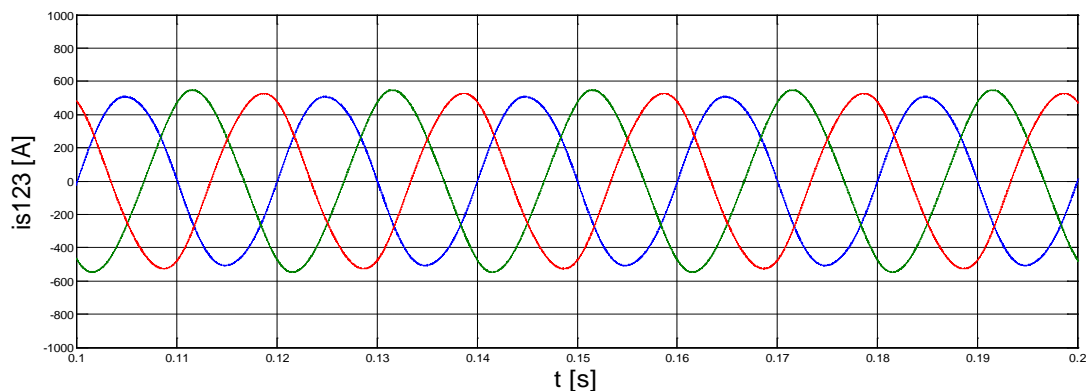


Figure III.88 : courants de source triphasée

Dans les figures III.85 à III.88 les signaux des courants harmoniques pour chaque phase a été compensé avec élimination de la puissance réactive.

Le signal du courant du neutre avant filtrage est comme suite

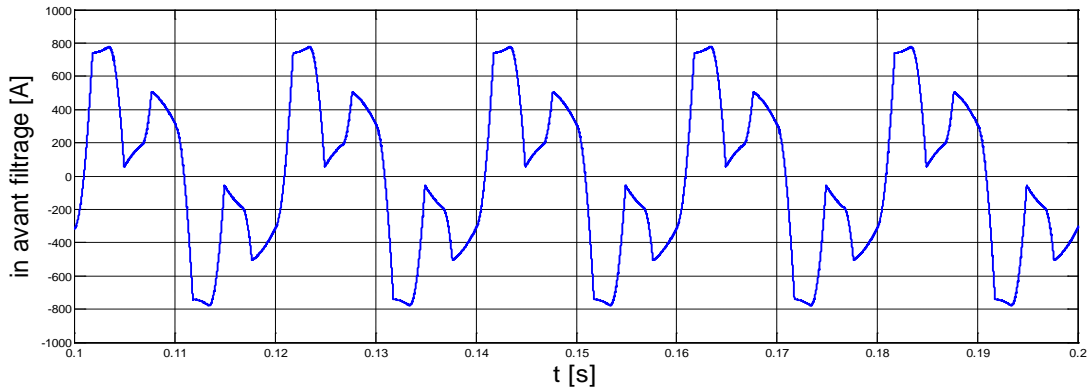


Figure III.89 : courants de neutre avant filtrage

Le signal du courant du neutre après filtrage :

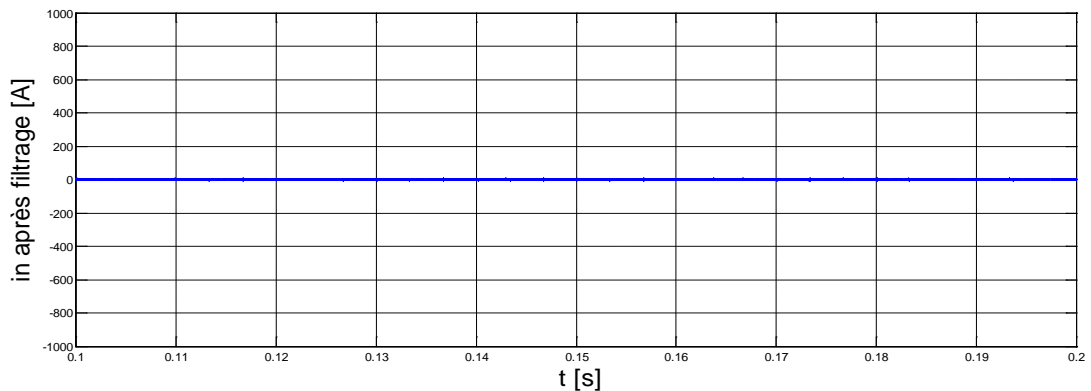


Figure III.90 : courant de neutre après filtrage

Le signal de la tension moyenne aux bornes du condensateur est constant

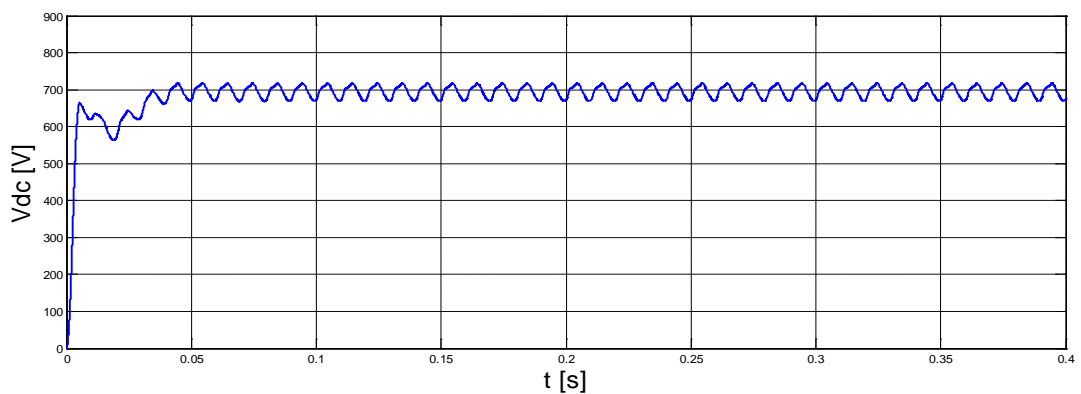


Figure III.91 : tension de condensateur

Pour le 2^{eme} cas

Le réseau électrique à des signaux tensions équilibré

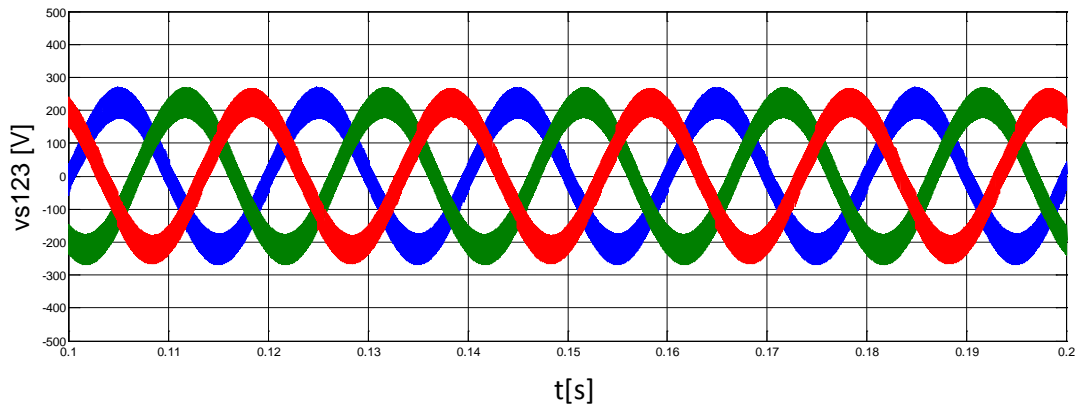


Figure III.92 : tensions de source triphasée

Sachant que les courants coté charge lorsqu'ils sont déséquilibrés et représenté par la figure suivante :

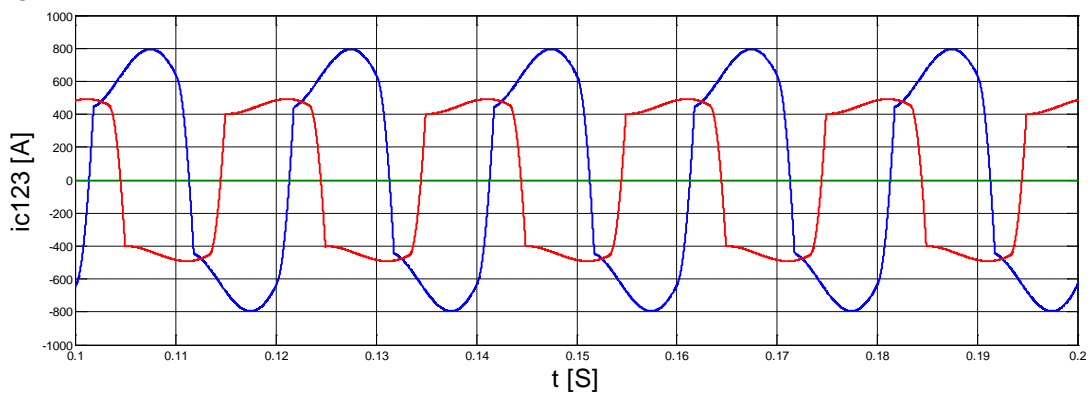


Figure III.93 : courants de charge triphasée

Nous obtenons les courants injectés par le filtre actif de puissance pour chaque phase et comme suite :

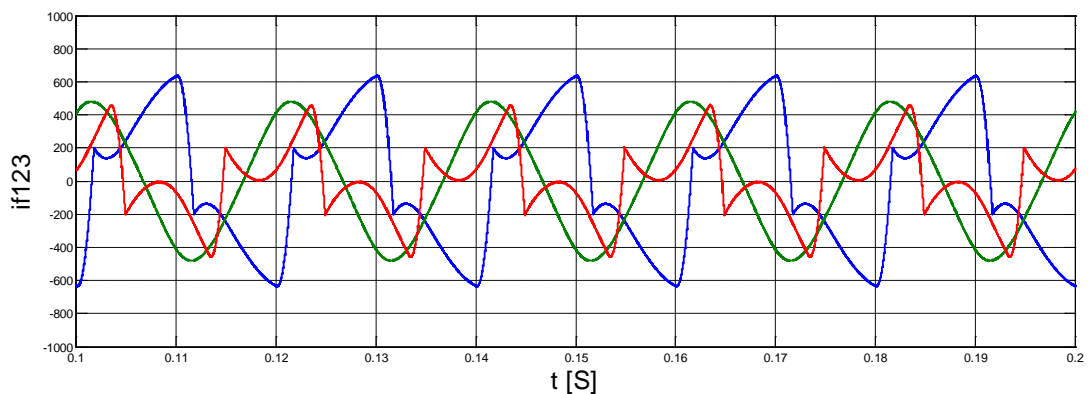


Figure III.94 : courants de filtre triphasé

Les courants de source après filtrage nous donnent la figure suivante :

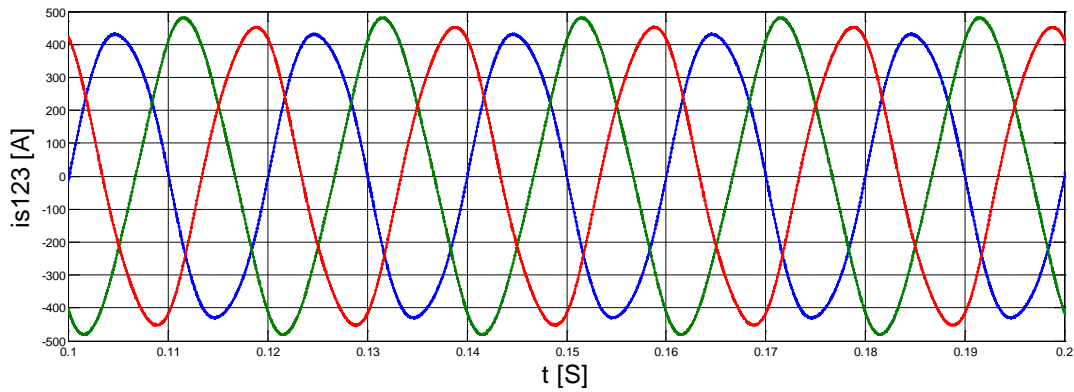


Figure III.95 : courants de source triphasé

Nous remarquons que dans la figure III.95 les courants harmoniques de chaque phase ont été compensés. De plus la tension dans les figures III.92 et III.95 illustre le déphasage nul entre la tension et le courant de source.

Le signal du courant du neutre avant filtrage et comme suite :

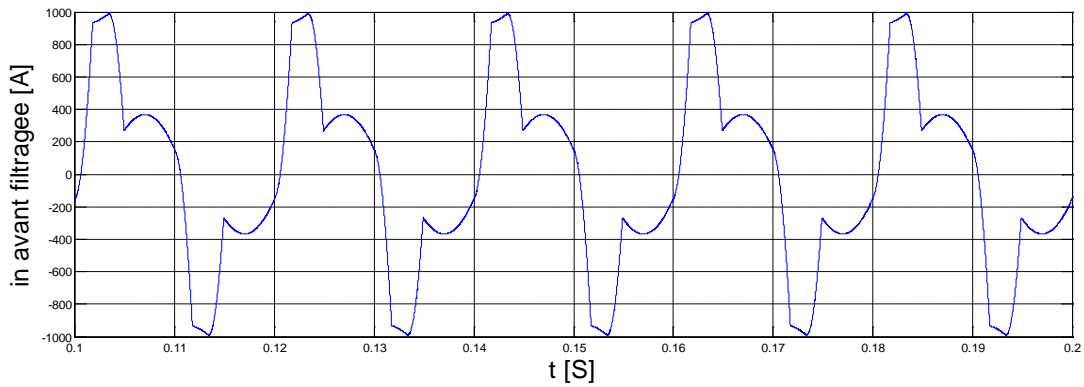


Figure III.96 : courant de neutre avant filtrage

Et le signal du courant du neutre après filtrage est :

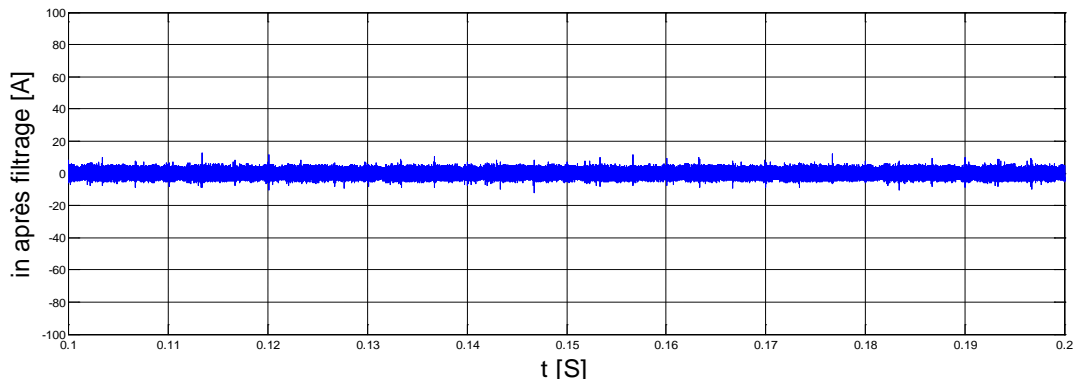


Figure III.97 : courant de neutre après filtrage

La tension moyenne aux bornes du condensateur est constante

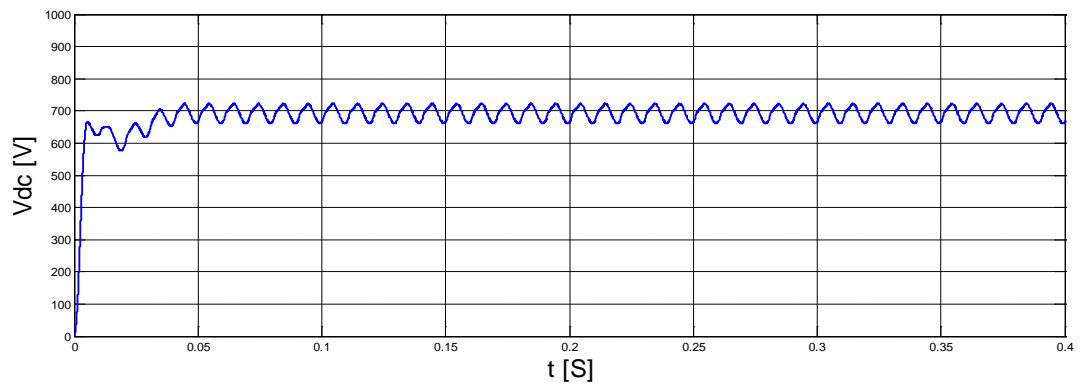


Figure III.98 : tension de condensateur

III.3 Interprétation des résultats :

Après avoir effectué les différentes séries de simulations pour les quatre techniques, il est judicieux d'effectuer un récapitulatif des résultats sous de tableau nous permettant de faire une étude comparative principalement vis-à-vis des THD des courants de source après filtrage.

- Cas du système équilibré :

	Méthode p-q-o modifié	Méthode vecteur croisé	Méthode p-q-r	Méthode d-q (SRF)
<i>THD phase 1 avant filtrage</i>	39.97	39.99	39.97	39.98
<i>THD phase 1 après filtrage</i>	2.45	5.35	2.63	2.52

Tableau III.5 : THD des quatre commandes appliqué à notre système équilibré

• Cas du système déséquilibré (déséquilibre des charges)

Phase 1	Sans filtrage	Avec filtrage			
		p-q-o modifier	cross vector	p-q-r	d-q (SRF)
1	100	100	100	100	100
3	19.30	0.75	2.08	1.43	2.31
5	10.23	0.34	1.57	0.90	0.14
7	5.93	0.40	0.69	1	0.10
9	3.46	0.11	0.66	0.74	0.02
11	1.99	0.15	0.99	0.79	0.01
13	1.22	0.24	0.53	0.85	0.01
15	0.92	0.11	0.19	0.64	0.01
17	0.81	0.09	0.84	0.57	0.00
19	0.70	0.15	0.80	0.71	0.00
THD%	23.09	1.36	4.19	2.90	2.33

Phase 2	Sans filtrage	Avec filtrage			
		p-q-o modifier	Cross vector	p-q-r	d-q (SRF)
1	100	100	100	100	100
3	25.91	1	2.07	1.71	2.26
5	15.01	0.39	0.53	0.78	0.21
7	10.05	0.41	0.44	0.63	0.11
9	7.14	0.16	0.82	0.65	0.02
11	5.21	0.23	1.06	0.74	0.01
13	3.83	0.26	0.79	0.80	0.01
15	2.81	0.12	0.60	0.78	0.01
17	2.05	0.10	0.75	0.71	0.00
19	1.49	0.18	0.74	0.61	0.00
THD%	33.31	1.64	3.91	2.88	2.28

Phase 3	Sans filtrage	Avec filtrage			
		p-q-o modifier	Cross vector	p-q-r	d-q (SRF)
1	100	100	100	100	100
3	27.46	0.99	1.43	1.03	2.47
5	14.53	0.13	1.06	0.19	0.09
7	8.52	0.17	1.15	0.39	0.08
9	5.05	0.24	0.58	0.08	0.02
11	2.94	0.14	0.15	0.29	0.01
13	1.76	0.02	0.33	0.12	0.01
15	1.26	0.15	0.52	0.17	0.01
17	1.09	0.05	0.86	0.17	0.00
19	0.97	0.03	1.03	0.09	0.00
THD%	32.88	1.42	3.50	1.28	2.48

Tableau III.6 : THD des quatre commandes appliqué à notre système déséquilibré avec un déséquilibre de charge

• Cas du système déséquilibré (défaut monophasé)

Phase 1	Sans filtrage	Avec filtrage			
		p-q-o modifier	Cross vector	p-q-r	d-q (SRF)
1	100	100	100	100	100
3	28.77	0.89	1.23	0.77	2.11
5	17.30	0.33	1.00	0.38	0.42
7	12.25	0.24	0.74	0.28	0.24
9	9.40	0.03	0.31	0.17	0.09
11	7.54	0.10	0.82	0.07	0.07
13	6.24	0.21	0.49	0.19	0.23
15	5.26	0.11	0.17	0.25	0.19
17	4.50	0.07	0.26	0.11	0.02
19	3.89	0.13	0.08	0.15	0.14
THD%	39.69	3.63	6.80	4.13	4.37

Phase 2	Sans filtrage	Avec filtrage			
		p-q-o modifier	Cross vector	p-q-r	d-q (SRF)
1	0.00	100	100	100	100
3	0.00	0.67	0.71	0.64	1.94
5	0.00	0.64	0.86	0.49	0.49
7	0.00	0.29	0.49	0.16	0.20
9	0.00	0.05	0.30	0.09	0.02
11	0.00	0.16	0.84	0.05	0.05
13	0.00	0.10	0.32	0.09	0.03
15	0.00	0.05	0.04	0.03	0.02
17	0.00	0.10	0.05	0.10	0.07
19	0.00	0.11	0.03	0.07	0.10
THD%	0.00	3.74	6.67	4.18	4.27

Phase 3	Sans filtrage	Avec filtrage			
		p-q-o modifier	Cross vector	p-q-r	d-q (SRF)
1	100	100	100	100	100
3	28.77	0.82	1.26	0.83	2.07
5	17.30	0.43	1.04	0.38	0.31
7	12.25	0.23	0.69	0.33	0.25
9	9.39	0.07	0.26	0.13	0.07
11	7.54	0.14	0.80	0.07	0.08
13	6.24	0.20	0.40	0.21	0.22
15	5.26	0.17	0.20	0.21	0.17
17	4.50	0.07	0.32	0.07	0.05
19	3.89	0.11	0.15	0.11	0.13
THD%	39.68	3.58	6.87	4.12	4.32

Tableau III.7 : THD des quatre commandes appliqué à notre système déséquilibré avec défaut monophasé

Lorsque le réseau électrique est équilibré, nous remarquons que la méthode des puissances instantanée modifiée p-q-o nous donne le meilleur résultat vu que son THD est le plus faible, autrement dit cette technique permet une meilleure élimination des courants harmoniques.

Les résultats de simulation pour nos deux régimes déséquilibrés (déséquilibre de charge, défaut monophasé) ont confirmé que la méthode des puissances instantanée p-q-o nous les résultats les plus performant vu les THD obtenus après filtrages pour les quatre méthodes étudiées.

Conclusion

Suite à nos différentes simulations, en utilisant quatre techniques d'extraction de courants de référence et ce quel que soit le mode : équilibré ou déséquilibré, nous a permis de déduire qu'un choix judicieux de techniques d'extraction des courants de référence permet d'aboutir à des courants de source à très faible THD.

Dans le cadre de ce projet, nous avons fait un survol des causes de la pollution harmonique sur les réseaux, des effets ainsi que des moyens existants qui permettent de les minimiser. Nous avons essayé de présenter le fonctionnement du filtrage actif parallèle d'une manière plus simple. On a ensuite étudié la structure générale du filtre actif parallèle en présentant la partie puissance et la partie commande.

Dans le premier chapitre, on a présenté les principales perturbations qui affectent les réseaux électriques, leurs origines et conséquences sur les charges connectés. Différentes solutions ont été présentées telles que les filtres passifs, actifs utilisés pour compenser les perturbations.

Notre objectif étant fixé sur la dépollution de perturbation du type courant due à des charges non-linéaire, seule la solution de filtrage active parallèle de puissance a été retenue et analysée dans notre mémoire.

Dans le second chapitre, nous avons présenté le principe du filtre actif parallèle comme une solution de dépollution en temps réel des courants harmonique et énergies réactif produite par des charges non-linéaires. Nous avons présenté pour cela l'onduleur ainsi que le filtre de découplage, avec les différentes stratégies d'extraction des courants de références : « p-q-o modifié, cross vector, p-q-r, d-q (SFR) » pour commander le filtre actif de puissance à quatre bras de façon directe.

Dans le dernier chapitre, nous avons présenté nos résultats de simulation avec les quatre techniques d'extraction de courants de références que ce soit en régime équilibré ou déséquilibré sous forme de charge déséquilibré ou suite à un défaut monophasé, afin d'effectuer une étude comparative qui a aboutit à identifier la technique p-q-o modifié comme la méthode qui nous a donné les meilleurs résultats en terme de THD..

Annexe

Normalisation :

Les normes internationales publiées par la CEI dans les domaines de l'électricité et de l'électronique ont pour objectifs de :

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

Pour les réseaux électriques, les recommandations d'EDF pour les tensions sont :

- Pour un harmonique pair : $\leq V1 \text{ Vh } 0,6 \%$,
- Pour un harmonique impair : $\leq V1 \text{ Vh } 1 \%$,
- Pour le taux de distorsion global de tension : $\text{THD} < 1,6 \%$. Il s'agit de limitations qui sont maintenant très anciennes (plus de 20ans).

Le tableau. A.1 présente la norme CEI-1000- 3-2 qui fixe la limitation des courants injectés dans un réseau public basse tension pour des équipements dont le courant par phase est inférieur à 16 A. Il s'agit là des appareils du domaine domestique. Aussi, du fait de leur puissance, les équipements industriels sont exclus du champ d'application de cette norme.

Harmoniques impairs		Harmoniques pairs	
rang	Courant harmonique admissible maximal (A)	Rang	Courant harmonique admissible maximal (A)
3	2.30	2	1.08
5	1.14	4	0.43
7	0.77	6	0.30
9	0.40	$8 \leq h \leq 40$	$0.23 * 8 / h$
11	0.33		
13	0.21		
$15 \leq h \leq 39$	$0.15 * / 15 h$		

Tableau A.1 : Limites des composantes harmoniques en courant

La norme (CEI-1000-3-4) spécifie les limites d'émissions de courants harmoniques des équipements individuels d'intensité assignée supérieure à 16A et jusqu'à 75A. Ces limites s'appliquent aux réseaux publics de tensions nominales comprises entre 230 V (monophasé) et 600 V (triphase).

Rang	Courant harmonique en % du fondamental
3	21.6
5	10.7
7	7.2
9	3.8
11	3.1
13	2.0
15	0.7
17	1.2
19	1.1
21	≤ 0.6
23	0.9
25	0.8
27	≤ 0.6
29	0.7
31	0.7
≥ 33	≤ 0.6
pair	≤ 0.6 ou 0.15 8/ h

Tableau A.2 : Limites des émissions de courants harmoniques

Bibliographie

- [1] Abdeslem SAHLI, « *Filtrage actif et contrôle de puissances : application aux systèmes photovoltaïques interconnectés au réseau.* », Mémoire de magister de l'université Ferhat Abbas – Sétif, 2012
- [2] Abdallah ZEGAOUI, « *étude et simulation d'un Compensateur de Rééquilibrage de la Tension d'un Réseau Basse Tension* », Mémoire de magister Université Hassiba Ben Bouali - CHLEF -2002
- [3] Samira CHALAH, « *analyse stochastique de la résultante de l'injection de courant harmonique dans un réseau électrique* », Mémoire de magister de l'Université de Tizi-Ouzou ,2012
- [4] *la pollution harmonique (problème et solution), mai 2010*
- [5] Chapman DAVID, « *Guide power quality* », Juillet 2002
- [6] Kamel AL HADDAD, « *La qualité de l'énergie électrique* », Montreal Canada, 2005
- [7] Noureddine HAMOUDA, « *Etude Comparative des Techniques de Filtrage des Harmoniques de Courant* », thèse de magister Université Ferhat Abbas, Sétif, 2010
- [8] M. Damien Flieller, « *Etude de stratégies de commande d'un filtre actif de type parallèle en vue d'assurer la compensation des harmoniques et du déséquilibre*», Université Catholique de Louvain, 2006
- [9] M.A. BRIKCI NIGASSA, « *Etude comparative des méthodes d'extraction des courants de référence appliquées au filtre actif de puissance parallèle* », Mémoire de magister, USTO, 2004

- [10] Hanane KHOUARA, « application d'un filtre actif série au control de la tension à réseau à basse tension », Mémoire d'ingénieur d'Etat, Université de BATNA, 2006
- [11] Abdelmadjid CHAOUI « Filtrage Actif Triphasé Pour Charges Non Linéaires », Mémoire de magister, université de Sétif , 2010.
- [12] Djamel NEKKAR, « Contribution à l'étude des Stratégies de Commande des Filtres Actifs Triphasés », Mémoire de magister, université de souk-Ahras, 2014
- [13] M.C. BENHABIB « *Contribution à l'étude des différente topologies et commande des filtre actif parallèle à structure tension : modélisation, simulation et validation expérimentale de la commande* », Thèse de doctorat, Université de Nancy, 2004
- [14] M. ELBAR, B. NAAS1, « Application d'un Filtre Actif Quatre Bras à Trois Niveau à La Compensation des Harmoniques d'un Réseau à Quatre Fils »,
- [15] PENG ,F.Z. LAI, J.S , «Generalized instantaneous reactive power theory for three-phase power systems », IEEE Trans. On IM, vol.45, n.1, 2001

Résumé:

La qualité des réseaux électriques et fortement tributaire des techniques de compensation au niveau des différentes charges non linéaires présentes dans le réseau. C'est ce qui explique que la qualité de l'onde électrique est loin d'être parfaite, à cause de l'utilisation des charges non linéaires qui génèrent des harmoniques de courant et consomment de la puissance réactive.

A cet effet, notre mémoire traite de l'étude théorique avec une simulation numérique du fonctionnement d'un filtre actif parallèle à quatre bras que ce soit en mode équilibré ou déséquilibré permettant de compenser les harmoniques, les puissances réactives.

On a proposé quatre méthodes d'extraction des courants de référence à savoir: la méthode des puissances instantanées modifié p-q-o, cross vector, p-q-r, d-q (SFR). Par l'intermédiaire de simulations sous environnement Matlab/Simulink SimPower, une série de simulation ont été présentés pour mesurer les performances des quatre techniques suivie d'une étude comparative.

Abstract

The quality of electrical networks and heavily dependent on compensation techniques in the various nonlinear loads present in the network. This is why the quality of the electric wave is far from perfect, because of the use of non-linear loads that generate current harmonics and consume reactive power.

To this end, our brief deals with the theoretical study with a numerical simulation of the operation of a crossover parallel four-link either in balanced or unbalanced fashion to compensate harmonics, reactive power.

We proposed four methods of extracting reference currents namely: modified method of instantaneous power pqo, cross vector, pqr, dq (LICO). Through simulations in Matlab / Simulink environment SIMpower, a series of simulations were presented for measuring the performance of four techniques followed by a comparative study.

ملخص

جودة شبكات الكهرباء وتعتمد بشكل كبير على التقنيات التعويض في مختلف الأحمال غير الخطية الموجودة في الشبكة. هذا هو السبب في أن نوعية الموجة الكهربائية بعيدة عن الكمال، وذلك بسبب استخدام الأحمال غير الخطية التي تولد التوافقيات الحالية وتستهلك قوة رد الفعل.

تحقيقاً لهذه الغاية، وصفنا قصيرة بيننا وبين الدراسة النظرية والمحاكاة العددية للتشغيل كروس موازية أربعة الارتباط إما بطريقة متوازنة أو غير متوازنة لتعويض التوافقيات، قوة رد الفعل.

اقترحنا أربعة أساليب استخراج التيارات المرجعية وهي: طريقة معدلة من حظية pqo السلطة، ناقلات الصليب، (PQR، DQ إلى أي سي). من خلال المحاكاة في Matlab / السيمولينك البيئة SIMpower، تم تقديم سلسلة من عمليات المحاكاة لقياس أداء أربع تقنيات تليها دراسة مقارنة.