



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique



Université Ahmed Draya d'ADRAR

FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DES SCIENCES DE TECHNOLOGIE

Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de master

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Commande Electrique

Thème

Contribution à La Commande d'un filtre hybride
multiniveaux

Présenté par :

- Lenne Marwa
- Zeglaoui Ilham

Encadreur : Dr CHABANI Sououdi Boumediene

Université d'ADRAR

Membres de jury :

Examineur: Mme. Dr Bourbaai.W

Université d'ADRAR

Examineur : MR DHABI.H

Université d'ADRAR

Année Universitaire : 2020/2021

Dédicace

Marwa

C'est par un vif plaisir que je dédie ce modeste travail conçu comme fruit prés requis à:

A ma très chère mère

*Quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurai point te remercier
comme il se doit. Ton affection me couvre, ta bienveillance me
guide et ta présence à mes côtés a toujours été ma source de force
pour affronter les différents obstacles.*

A mon très cher père

*Tu as toujours été à mes côtés pour me soutenir et m'encourager.
Que ce travail traduit ma gratitude et mon affection.*

A mon cher mari

*Mon mari qui m'a soutenu et m'a donné la force d'étudier et de me troubler Réconciliation
entre eux et vie conjugale*

A mon cher et mon seul fils Adel

A mes sœurs et mon frère

A tout la famille L'ENNE

Et A ma belle famille

Ilham

Je dédie ce travail

A **mes parents** qui m'ont soutenu et encouragé durant ces années d'études.

Qu'ils trouvent ici le témoignage de ma profonde reconnaissance.

A mes frères, mes sœurs et Ceux qui ont partagé avec moi tous les moments d'émotion lors de la réalisation de ce travail. Ils m'ont chaleureusement supporté et encouragé tout au long de mon parcours.

A ma chère sœur **Zahra** et son mari **Elhaj Djeloule**, qui me donnent de l'amour et de la vivacité

et A sa fille **Hadjer**

A la famille **Zeglaoui** et **Yousfi**

A mes chères amis **Alia**, **Nadjet**, **Nabila** et **Kanza** qui m'ont toujours encouragé, et à qui je souhaite plus de succès.

A tous ceux que j'aime.

Merci !

Remerciment

Nous tient à exprimer toute notre reconnaissance à notre encadreur de mémoire, Dr CHABANI Sououdi Boumediene. Nous le remercions de nous avoir encadré, orienté, aidé et conseillé tout au long de ce travail.

Nous remercions sincèrement les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail.

Nous exprimons également notre gratitude à tous les professeurs et enseignants qui ont collaboré à notre formation depuis notre premier cycle d'étude jusqu'à la fin de notre cycle universitaire.

Sans omettre bien sûr de remercier profondément tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à réalisation du présent travail.

Liste des figures

Figure I. 1 Harmonique fondamentale et onde déformée.....	7
Figure I. 2 Décompositions d'un signal périodique ($h = 6 \pm 1$)	8
Figure I. 3 Synthèse d'une tension distordue à partir des harmoniques	10
Figure I. 4 Forme d'onde du courant absorbé par un ordinateur et spectre associé	11
Figure I. 5 Charge non-linéaire type source de courants harmoniques.....	13
Figure I. 6 Charge non-linéaire type source de tensions harmoniques	15
Figure I. 7 Schémas équivalents pour caractériser la déformation de la tension au point de raccordement.....	19
Figure I. 8 représentation vectorielle de la puissance apparente.....	22
Figure II. 1 Montage de Steinmetz pour le rééquilibrage	35
Figure II. 2 Filtre passif résonnant	36
Figure II. 3 Filtre passif amorti	36
Figure II. 4 Transformateur à secondaire zigzag et atténuation des harmoniques multiples de 3.....	39
Figure II. 5 Montage de 2 ponts redresseurs.	40
Figure II. 6 Branchement d'un filtre passif résonnant	41
Figure II. 7 Filtre passif amorti (passe-haut).....	42
Figure II. 8 Convertisseur « propre »	45
Figure II. 9 Redresseur triphasé de tension	45
Figure II. 10 Filtre actif parallèle (Shunt) type source de tension.....	48
Figure II. 11 Filtrage Actif shunt type source de courant	49
Figure II. 12 Filtre Actif shunt quatre fils avec un condensateur à point milieu	51
Figure II. 13 Filtre actif série	52
Figure II. 14 Combinaison parallèle-série actifs (UPQC).....	54
Figure III. 1 Classification des filtres hybrides	58
Figure III. 2 filtre actif série avec filtre passif parallèle.....	59
Figure III. 3 Filtre actif hybride avec transformateur.....	60
Figure III. 4 Filtre actif hybride sans transformateur	61
Figure III. 5 Filtre hybride composé d'un filtre actif shunt et un filtre passif parallèle.....	62
Figure III. 6 Association série d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif.....	63
Figure III. 7 Association d'un filtre actif série et d'un filtre passif.....	63
Figure III. 8 Topologie d'un redresseur triphasé à MLI de tension	64
Figure III. 9 Structure générale du filtre actif série.....	65
Figure III. 10 Partie puissance du filtre actif série	66
Figure III. 11 Schéma de modélisation du filtre de sortie.....	67
Figure III. 12 Diagramme représentant gain du filtre de sortie.....	69
Figure III. 13 Détermination de la tension de référence par la théorie	72

Figure III. 14 Commande du filtre hybride série	74
Figure IV. 1 Modèle du système étudié	76
Figure IV. 2 Les tensions de réseau	77
Figure IV. 3 L'analyse spectrale de la tension	77
Figure IV. 4 La tension continue.....	78
Figure IV. 5 Le courant continue	78
Figure IV. 6 Les trois courants du réseau.....	78
Figure IV. 7L'analyse spectrale du courant de réseau	79
Figure IV. 8 Les trois tensions de référence de la commande PQ	79
Figure IV. 9 Tension continue du filtre actif série	80
Figure IV. 10 Les tensions injectées	80
Figure IV. 11 Les tensions de la charge	80
Figure IV. 12 Les tensions de réseau	81
Figure IV. 13 L'analyse spectrale de la tension du réseau.....	81
Figure IV. 14 Le courant continue	81
Figure IV. 15 La tension continue.....	82
Figure IV. 16 Les trois courants de réseau.....	82
Figure IV. 17 Le courant de la charge continue	83
Figure IV. 18 La tension continue de la charge	83
Figure IV. 19 Les tensions de la charge	83
Figure IV. 20 Les courants de la charge.....	84
Figure IV. 21 Les tensions injectées du filtre actif série.....	84
Figure IV. 22 Tension continue du filtre actif série	84
Figure IV. 23 Les tensions de réseau	85
Figure IV. 24 Le spectre de la tension de réseau.....	85
Figure IV. 25 Les courants de réseau	85
Figure IV. 26 Le courant continu	86
Figure IV. 27 La tension continue.....	86
Figure IV. 28 La tension de la charge	87
Figure IV. 29 Les courants de la charge.....	87
Figure IV. 30Les tensions injectées par le filtre actif série.....	87
Figure IV. 31 Tension continue du filtre actif série	88
Figure IV. 32 Les tensions de réseau	88
Figure IV. 33Le spectre de la tension de réseau.....	88
Figure IV. 34 Les courants de réseau.....	89

Liste des tableaux

<i>Tableau I. 1 THDi pour quelques charges non linéaires</i>	24
Tableau I. 2 Limites des tensions harmoniques selon IEEE-519.....	26
Tableau I.3 Taux (en % de V1) des tensions harmoniques acceptables (CEI 61000-2-4).....	27
Tableau I. 4 : CEI 61000-3-2 : Limites d'émission de courants harmoniques des appareils basse tension de courant inférieur à 16A et de classe A.	28
Tableau I. 5 CEI 61000-3-4 : Limitation des émissions de courants harmoniques.....	29
Tableau I. 6 CEI 61000-4-13 : Taux des harmoniques en tension à utiliser pour vérifier l'immunité des appareils	30
Tableau I. 7 Limites de perturbations définies par EN 50160.....	31
Tableau II. 1 Courants harmoniques d'une alimentation à découpage en fonction de l'impédance de source.....	38
Tableau IV. 1 Comparaison des résultats.....	90

Table des matières

Introduction générale	1
Introduction Générale.....	1
Chapitre I :La pollution harmonique.....	2
I.1 Introduction :	3
I.2 Caractéristiques des perturbations électriques :.....	3
I.2.1 Déséquilibre du courant et de la tension.....	4
I.2.2 Creux de tension.....	5
I.2.3 Perturbations harmoniques en courant et en tension :	6
I.3 Les harmoniques	6
I.3.1 Définition des harmoniques	6
I.3.2 Notion de charges.....	9
I.3.3 Classification des harmoniques	9
I.3.4 Les origines des harmoniques.....	9
I.3.5 Les effets des harmoniques	16
I.4 Caractérisation des perturbations harmoniques	18
I.4.1.Les expressions des tensions et de courants instantanés.....	21
I.4.2.Puissance instantanée et puissance moyenne en régime déformé.....	21
I.4.3 Valeurs efficaces de la tension et du courant.....	22
I.4.4 Puissances apparente, active, réactive et de distorsion.....	22
I.4.5 Facteur de puissance FP	23
I.4.6 Distorsion harmonique individuelle $THDi$	24
I.4.7 Taux de distorsion harmonique	24
I.5 Normes et réglementations.....	25
I.6 Conclusion	32
Chapitre :II Les solutions de dépollution harmonique	33
II.1 Introduction	34
II.2 Solutions de dépollution des réseaux électriques.....	34
II.3 Solutions de dépollution classique.....	35
II.3.1 Dépollution des courants perturbateurs.....	35

II.3.2	Dépollution des tensions perturbatrices	37
II.3.4	Augmentation de la puissance de court-circuit.....	37
II.3.5	Transformateur à couplage spécial.....	38
II.3.6	Modification du convertisseur polluant.....	39
II.4	Filtrages passifs	40
II.4.1	Principe	41
II.4.2	Filtre passif résonnant.....	41
II.4.3	Filtre passif amorti (Passe Haut)	42
II.4.4	Inconvénients du filtrage passif.....	42
II.5	Solutions de dépollution modernes	43
II.5 .1	Les raisons qui nous imposent des nouvelles solutions	43
II.5.2	Dépollution des courants perturbateurs.....	44
II.5.3	Dépollution des tensions perturbatrices	44
II.5 .4	Convertisseurs «propres»	44
II.5.5	Compensation active des harmoniques	46
II. 6	FILTRES ACTIFS	47
II. 6.1	Le filtre actif parallèle (F.A.P)	47
II. 6.1 .1	Principe de fonctionnement	47
II. 6.1.2	Mise en œuvre	48
II.6.2	Filtre actif shunt à quatre fils.....	50
II.6.3	Le filtre actif série (F.A.S)	51
II.6.4	Filtre actif multiniveaux	53
II.6.5	Les inconvénients des filtres actifs :	54
II.6.6	La combinaison parallèle-série actifs (UPQC).....	54
II.7	Filtre hybride	55
II.8	Conclusion :	56

Chapitre III :Etude et Modélisation d'un filtre hybride multiniveaux..... 57

III.1	Introduction.....	58
III.2	Configuration des filtres hybrides.....	58
III.2	Filtre hybride combinant filtres actif et passif	59
III.2.1	Le filtre actif série avec des filtres passifs parallèles	59
III.2.2	Filtre hybride shunt avec transformateur	59
III.2.3	Filtre hybride shunt sans transformateur	60
III.2.4	Le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle	61
III.2.5	Association série d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif.....	62
III.2.6	Association d'un filtre actif série et d'un filtre passif série.....	63

III.3 Redresseur à MLI de tension.....	64
III .3 Structure générale du filtre actif	65
III.3.1 Partie puissance du filtre actif série	66
III.3.2 Circuit de Commande	70
III.4 Filtre hybride série (FHSS).....	73
Chapitre IV :Simulation et interprétation des résultats ..	75
IV.1 Introduction.....	76
IV.2 System étudié.....	76
IV.3 Filtrage actif série	79
IV.4 Filtre hybride série FHSS.....	82
IV.4 Filtre hybride série avec intégration parallèle (FHSIP)	86
IV.5 Interprétation des résultats	89
IV.8 Conclusion	90
Conclusion Générale.....	91
Conclusion Générale	92

Introduction générale

Introduction Générale

Ces dernières années, l'Algérie a consacré ses efforts à développer le domaine des énergies renouvelables et à s'éloigner de l'utilisation des énergies non renouvelables, mais le processus de production de cette énergie peut poser de nombreux problèmes, dont la dégradation de la qualité d'énergie qui devenue un sujet stratégique et par conséquent l'injection d'harmoniques dans le réseau et l'augmentation de la consommation de puissance réactive. D'autre part l'utilisation croissante des dispositifs d'électronique de puissance dans les systèmes électriques a entraîné de plus en plus de problèmes liés aux perturbations ou distorsions harmoniques des réseaux électriques. Ceux-ci peuvent provoquer un dysfonctionnement des machines ou peuvent les endommager complètement, et pour cette raison nous avons suggéré plusieurs solutions traditionnelles et modernes de dépollution pour éliminer ce problème et dernièrement nous avons présente une étude détaillé sur le filtre hybride.

L'objectif de ce mémoire est de tester l'efficacité de la structure du filtre hybride qui a plus avantageux qui offre la possibilité de la réduction des harmoniques. De manière à atteindre ces objectifs de recherche, ce mémoire sera divisé en quatre chapitres :

Nous commencerons ce travail par Le premier chapitre qui il sera consacré à la description des perturbations harmonique pouvant intervenir dans un réseau électrique. Les origines, les conséquences et les normes inhérentes à ces perturbations seront analysées.

Dans Le deuxième chapitre, nous présenterons également les solutions traditionnelles et modernes de dépollution. Finalement, nous détaillerons les avantages, inconvénients et les perspectives de développement des solutions de type filtre actif, aujourd'hui très utilisées dans l'industrie.

Le troisième chapitre représente une étude détaillé d'un filtre hybride avec sa modélisation.

La dernière partie de ce contexte à propos une simulation et interprétation des résultats.

Chapitre I

La pollution

harmonique

I.1 Introduction :

Modernisation des processus industriels, la sophistication machines et appareillages électriques a entraîné, ces dernières années, un développement important de l'électronique de puissance. Ces systèmes à base de semi-conducteurs (diodes, transistors, thyristors) destinés à réaliser : Des convertisseurs de puissance (Des redresseurs, Des onduleurs,...).

Ces convertisseurs sont utilisables dans les secteurs industriels (variateurs de vitesse, moteurs), tertiaire (informatique ou éclairage des bureaux, commerce,...) et domestique (téléviseurs, appareils électroménagers grand public,...). Ces dernières représentent, pour les réseaux électriques des charges « non linéaire ». Les charges non linéaires ont un très vaste domaine d'application mais malheureusement leur inconvénient major, est ils envois au réseau des courants non sinusoïdaux riche en "harmoniques". La problématique des harmoniques dans le réseau électrique, également appelée pollution harmonique.

Les courants harmoniques sont les composantes sinusoïdales d'un courant électrique périodique décomposé en série de Fourier. Les harmoniques ont une fréquence multiple de la fréquence fondamentale, généralement de 50 ou 60 Hertz, dans les réseaux électriques. Autrement dit, les harmoniques sont une description mathématique de la distorsion d'un signal a priori sinusoïdal. De même, les tensions harmoniques sont les composantes sinusoïdales d'une tension électrique périodique décomposée en série Fourier. Les courants harmoniques sont dus à la présence de charges électriques non linéaires dans un réseau électrique. Du fait des impédances du réseau, ces courants harmoniques sont la cause de l'apparition d'harmoniques de tensions qui affectent alors les autres clients du réseau de distribution.

Dans ce premier chapitre, des notions élémentaires d'analyse harmonique, les origines et les conséquences de la pollution harmonique sont exposés. Par suite, les normes et la réglementation en vigueur seront présentées.

I.2 Caractéristiques des perturbations électriques :

L'énergie électrique est fournie sous forme de tension constituant un système sinusoïdal triphasé dont les paramètres caractéristiques sont la fréquence, l'amplitude, la forme d'onde, le déséquilibre. La mesure de ces paramètres permet de juger la qualité de la tension. Une détérioration de l'un d'entre eux ou de plusieurs à la fois laisse supposer la présence d'une anomalie dans le réseau électrique [1]La qualité de la tension peut être affectée, soit du fait de

certaines incidents inhérents à la nature physique et aux sujétions liées à l'exploitation du réseau, soit du fait de certains récepteurs. Ces défauts se manifestent sous forme de différentes perturbations affectant un ou plusieurs des quatre paramètres précédemment définis. Quatre possibilités distinctes de perturbations peuvent être alors citées:

- **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 de l'amplitude** : il ne s'agit pas des variations lentes de tension qui sont corrigées par les transformateurs de réglage en charge, mais de variations rapides de tension ou de creux de tension se présentant souvent sous forme d'à-coups brusques. Les creux de tension peuvent être soit isolés, soit plus ou moins répétitifs, de forme régulière ou non;
- **La modification de la forme d'onde de la tension** : cette onde n'est alors plus sinusoïdale, et peut être considérée comme représentable par une onde fondamentale à 50 Hz, associée soit à des harmoniques de fréquence multiple entier de 50 Hz, soit même parfois à des ondes de fréquence quelconque;
- **Le déséquilibre du système triphasé** : Dans ce cas, les trois tensions ne sont pas identiques en amplitude et/ou ne sont pas déphasées de 120° les unes par rapport aux autres. Afin de bien analyser les pollutions des réseaux électriques en basse tension et, par conséquent, de trouver les meilleures méthodes de dépollution, nous distinguons deux types de perturbations, à savoir les perturbations de courant et celles de tension. [2]

I.2.1 Déséquilibre du courant et de la tension

I.2.1.1 Origine du déséquilibre

Un récepteur triphasé électrique qui n'est pas équilibré et que l'on alimente par un réseau triphasé équilibré conduit à des déséquilibres de tension dus à la circulation de courants non équilibrés dans les impédances du réseau. Ceci est fréquent pour les réceptrices monophasées basses tensions. Mais cela peut également être engendré, à des tensions plus élevées, par des machines à souder, des fours à arc ou par la traction ferroviaire.

I.2.1.2 Conséquences du déséquilibre

Il est plus intéressant d'aborder le problème du déséquilibre par type d'équipement. Le déséquilibre d'une installation triphasée peut entraîner un dysfonctionnement des appareils basses tensions connectés [3] : Mauvais fonctionnent d'un appareil monophasé alimenté par une tension très faible (lampe à incandescence qui fournit un mauvais éclairage), Destruction d'un appareil monophasé alimenté par une tension trop élevée, il peut être détruit (claquage d'un filament de lampe par surtension). Concernant les dispositifs triphasés d'électronique de puissance, principalement les ponts redresseurs, le fonctionnement en présence de déséquilibre entraîne l'apparition de composantes harmoniques non caractéristiques, notamment des harmoniques de rang multiple de 3. L'apparition de ces courants harmoniques peut poser des problèmes, comme la génération d'une anti-résonance lors du filtrage de l'harmonique de rang 5. Outre les effets classiques des harmoniques, ces fréquences non caractéristiques peuvent conduire, dans certains cas, au blocage de la commande. La conséquence des composantes inverses sur les machines tournantes est la création d'un champ tournant en sens inverse du sens de rotation normal, d'où un couple de freinage parasite et des pertes supplémentaires qui provoquent l'échauffement de la machine. Concernant l'effet du déséquilibre homopolaire, il faut signaler le risque d'échauffement du conducteur neutre dans un réseau BT qui, lorsque le conducteur est d'un diamètre trop faible, peut provoquer une rupture du conducteur ou un incendie.

I.2.2 Creux de tension

I.2.2.1 Origine des creux de tension

Un creux de tension est une diminution brusque de la tension de fourniture U_f . Cette diminution, située entre 90% et 10% de la tension nominale U_n , est suivie du rétablissement de la tension après un court laps de temps. Un creux de tension peut durer de 10 ms à 3 mn [4] La plupart des appareils électriques admettent une coupure totale d'alimentation d'une durée inférieure à 10 ms.

Il y a deux types de phénomène à l'origine des creux de tension :

- ceux provenant du fonctionnement d'appareils à charge fluctuante ou de la mise en service d'appareils appelant un courant élevé au démarrage (moteurs, transformateurs...etc.),

- ceux liés aux phénomènes aléatoires, comme la foudre ou tous les court-circuits accidentels sur les réseaux de distribution, ou les réseaux internes des clients (défaut d'isolation, blessure de câble, projection de branches sur les lignes aériennes).

Les creux de tension sont caractérisés par leur amplitude et par leur durée. Ils sont monophasés, biphasés ou triphasés suivant le nombre de phases concernées.

I.2.2 Conséquences des creux de tension :

Les creux de tension sont susceptibles de perturber le fonctionnement de certaines installations industrielles et tertiaires. En effet, ce type de perturbation peut causer des dégradations de fonctionnement des équipements électriques qui peuvent aller jusqu'à la destruction totale de ces équipements [5].

I.2.3 Perturbations harmoniques en courant et en tension :

C'est la plus importante caractéristique de déséquilibre électrique on va l'expliquer dans le prochain titre

I.3 Les harmoniques

I.3.1 Définition des harmoniques

Le terme 'Harmonique' a été originalement utilisé en relation avec le son et signifiait la vibration d'une corde ou d'une colonne d'air à fréquence multiple de celle du fondamental [6]. La même idée a été retenue dans le génie électrique quand la forme déformée de l'onde du courant ou de la tension est représentée, par la méthode bien connue de l'analyse de Fourier, comme étant la somme du fondamental et de la série des composantes harmoniques.

Mais ceci n'est validé que si l'onde distordue garde la même allure pour un nombre indéfini de cycles.

La variation en fonction du temps, des grandeurs électriques courants et tensions des réseaux industriels alternatifs, s'éloigne significativement de la sinusoïde pure figure I.1. La variation est en fait composée d'un certain nombre de sinusoïdes de fréquences différentes,

comprenant entre autres, une sinusoïde à fréquence industrielle dite sinusoïde fondamentale ou plus simplement : le fondamental.

« Grandeur harmonique » ou simplement « harmonique » C'est une des composantes sinusoïdales de la variation de la grandeur physique possédant une fréquence multiple de celle de la composante fondamentale. L'amplitude de l'harmonique est généralement de quelques pour cent de celle du fondamental. Rang de l'harmonique C'est le rapport de sa fréquence f_n à celle du fondamental.

(Généralement la fréquence industrielle, 50 ou 60 Hz) :

$$n = \frac{f_n}{f_1} \dots \dots \dots (I.1)$$

Par principe, le fondamental f_1 a le rang 1

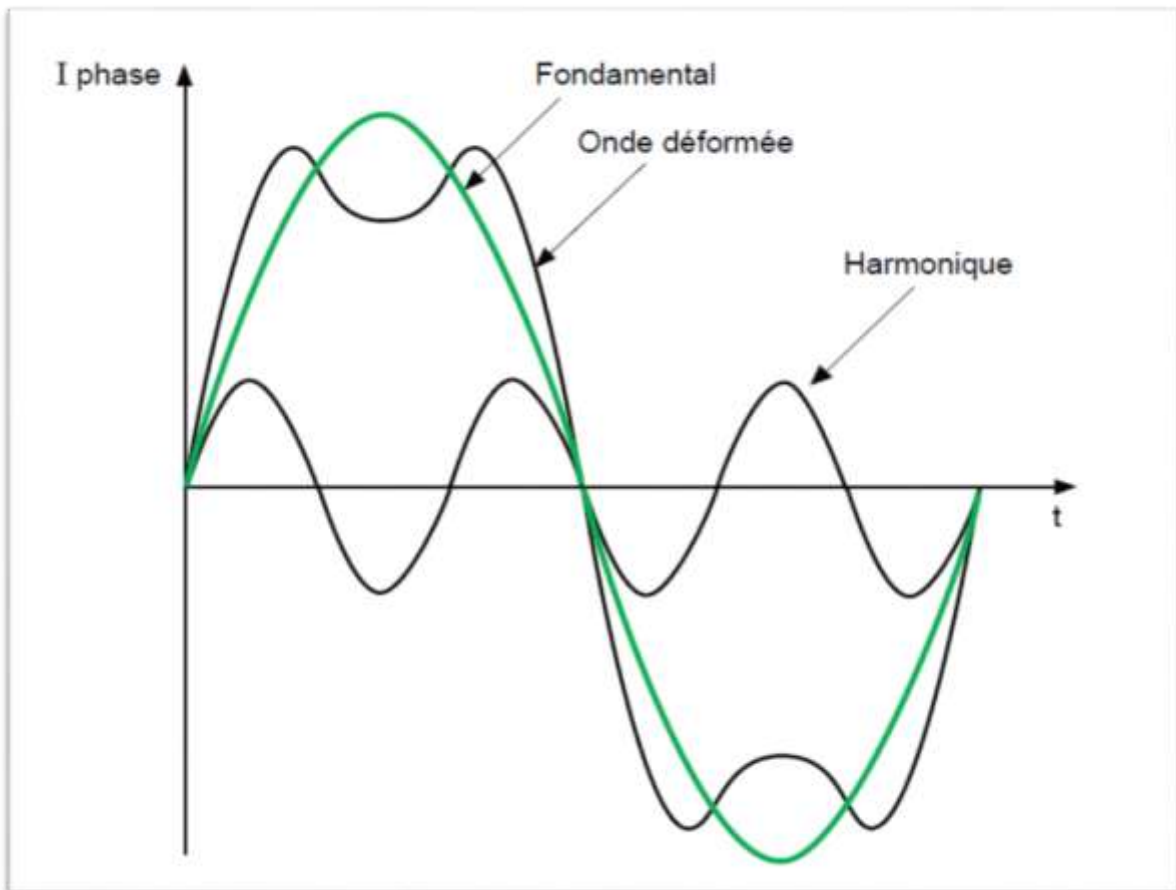


Figure I. 1 Harmonique fondamentale et onde déformée

La superposition des courants harmoniques sur le courant fondamental provoque les formes d'onde non sinusoïdales.

Figure 0I.2 montre la décomposition d'un signal périodique contient des harmoniques d'ordre $h = 6 \pm 1$ (les harmonique basse fréquences 5, 7, 11, 13,), ce signal est résulté de la sommation de cinq signales (fondamental et les quatre premiers harmoniques).

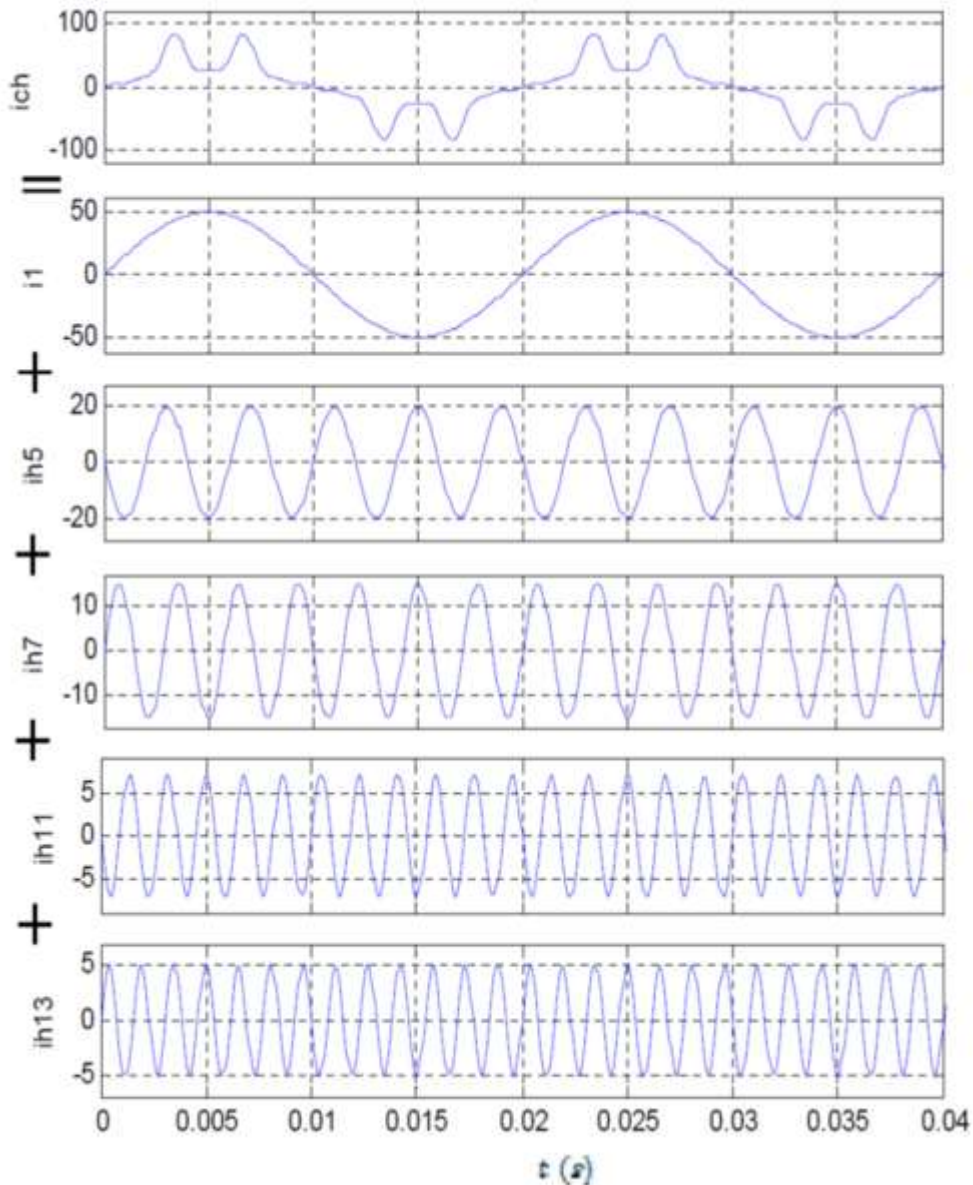


Figure I. 2 Décompositions d'un signal périodique ($h = 6 \pm 1$)

I.3.2 Notion de charges

Les récepteurs peuvent être classés en deux grandes familles principales :

1. Récepteurs linéaires (ou charges linéaires).
2. Récepteurs non-linéaires (ou charges non-linéaires).

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

Une charge est dite non-linéaire lorsque la relation tension/courant n'est plus linéaire. Un tel récepteur alimenté par une tension sinusoïdale, consomme un courant non-sinusoïdal. Par la suite, nous nous restreindrons aux charges non-linéaires triphasées, qui consomment un courant périodique, de même période que celle de la tension [7].

I.3.3 Classification des harmoniques

Le système triphasé équilibré non sinusoïdal est la superposition de trois systèmes triphasés équilibrés sinusoïdaux [8] :

- ✓ Systèmes *directs* dus au fondamental et aux harmoniques de rang impair égal à $3K+1$, soit 7, 13, 19, 25,... Ces harmoniques tendent à augmenter l'amplitude de la tension et du courant.
- ✓ Systèmes *inverses* dus aux harmoniques de rang impair égal à $3K-1$, soit 5, 11, 17, 23,... Ces harmoniques tendent à diminuer l'amplitude de la tension et du courant.
- ✓ Systèmes *homopolaires* dus aux harmoniques de rang impair égal à $3K$ (3, 9, 15, 21,...).

I.3.4 Les origines des harmoniques

Ces dernières années une augmentation sensible du niveau de pollution harmonique des réseaux électriques est due essentiellement à la prolifération des équipements électriques utilisant des convertisseurs statiques. Ces équipements électriques sont considérés comme des charges non linéaires émettant des courants harmoniques dont les fréquences sont des multiples entiers de la fréquence fondamentale, ou parfois à des fréquences quelconques. Ainsi, le passage de ces courants harmoniques dans les impédances du réseau électrique peut entraîner des tensions

harmoniques aux points de raccordement et alors polluer les consommateurs alimentés par le même réseau électrique [9].

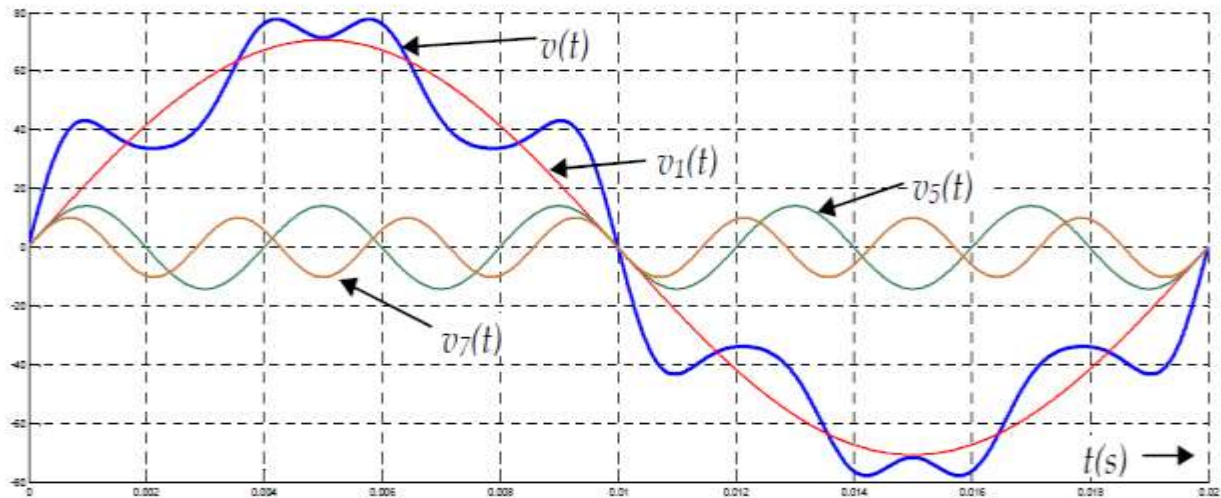


Figure I. 3 Synthèse d'une tension distordue à partir des harmoniques

La figure I.3 illustre un exemple de forme d'onde d'une tension distordue contenant, en plus du terme fondamental de fréquence 50Hz, deux harmoniques de rang impair 5, 7.

Les charges non linéaires représentent de nombreux équipements industriels et domestiques. Ces équipements possèdent en entrée un système de conversion d'énergie sous une forme donnée en une autre forme en adéquation avec l'utilisation voulue. C'est des convertisseurs statiques qui sont mis en œuvre et qui peuvent être répertoriée en quatre familles :

- ✓ Convertisseurs AC-DC, cela représente l'ensemble des redresseurs,
- ✓ Convertisseurs DC-DC, hacheurs et alimentations à découpage,
- ✓ Convertisseurs DC-AC, onduleurs de tension ou de courant,
- ✓ Convertisseurs AC-AC, gradateurs, convertisseurs de fréquences.
- ✓ A titre d'exemple la figure I.4 ci-dessous montre la forme d'onde du courant absorbé par un pont PD3 débitant sur une charge capacitive avec le relevé spectre de fréquence

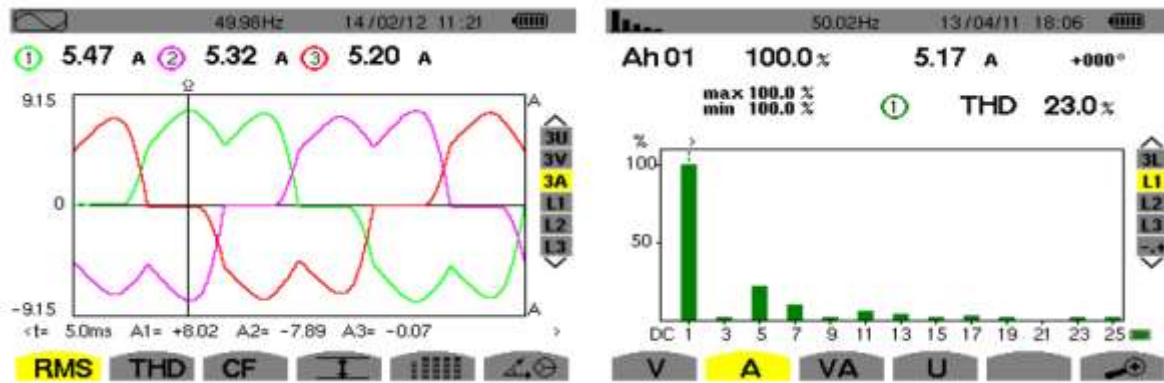


Figure I. 4 Forme d'onde du courant absorbé par un ordinateur et spectre associé

Les structures de ces convertisseurs sont valables en monophasé ou en triphasé et fonctionnent dans des gammes de puissance très grandes, de quelques VA à plusieurs MVA [5].

Ces dispositifs polluants sont classés en fonction des puissances et donc du niveau de perturbations qu'ils entraînent. Ainsi, les charges industrielles arrivent logiquement en première position et il est possible de recenser les applications suivantes :

- ✓ Systèmes utilisant des redresseurs à diodes ou à thyristors tels que les variateurs des moteurs électriques (à courant continu, asynchrones, synchrones), les fours à induction, les chargeurs de batterie, les électrolyseurs, les alimentations de secours.
- ✓ Les récepteurs utilisant l'arc électrique : fours à arc ou soudure à arc,
- ✓ Les variateurs de lumières à base de gradateurs,
- ✓ Les ballasts électroniques : lampes fluorescentes, à décharge ou à vapeur métallique (sodium, mercure),

Pour les charges électrodomestiques les plus couramment rencontrées sont :

- ✓ Téléviseurs et éléments périphériques,
- ✓ Micro-informatique,
- ✓ Four à micro-ondes,
- ✓ Aspirateurs,
- ✓ Robots ménagers.

Pour l'ensemble de ces charges polluantes, un critère supplémentaire est à prendre en compte, c'est le facteur d'utilisation. En effet, la quantification du taux d'harmonique dépend de la durée et de la simultanéité du fonctionnement de ces charges non linéaires. Certaines tranches horaires entraînent donc des 'pics' de pollution durant lesquels les taux d'harmoniques globaux

tendent à dépasser les niveaux acceptables définis par les normes en vigueur ou les recommandations.

Par ailleurs, des perturbations sur des rangs harmoniques non multiple entier du fondamental peuvent aussi exister. Ces derniers se dénomment inter ou infra harmoniques. Les inter-harmoniques sont des composantes sinusoïdales qui ne sont pas des fréquences entières de celle du fondamental. Les infra-harmoniques sont des composantes qui sont à des fréquences inférieures à celle du fondamental. Ces deux catégories de perturbations sont dues à des variations périodiques et aléatoires de la puissance absorbée par certains appareils (commande par train d'ondes, ...) [10].

Il est à noter que ces charges non linéaires sont typiquement classées en deux catégories :

- ✓ les charges type source de courants harmoniques
- ✓ Les charges type source de tensions harmoniques [11]

1.3.4. a) Charges non-linéaires types source de courants harmoniques

Toutes les charges non linéaires étaient représentées par convention comme sources de courants harmoniques. Cela est dû au fait que les courants appelés ont une allure non sinusoïdale imposée par les paramètres de la charge. Ces charges ont comme étage d'entrée un pont à thyristors ou à diodes avec une inductance de lissage à la sortie du pont comme l'illustre la figure I.5 (a). Les entraînements à vitesse variable des moteurs continus sont dans cette catégorie. Certains des entraînements à courants alternatifs et des alimentations à découpage peuvent être dans cette catégorie lorsqu'ils sont munis d'un filtre LC côté courant continu. [12]

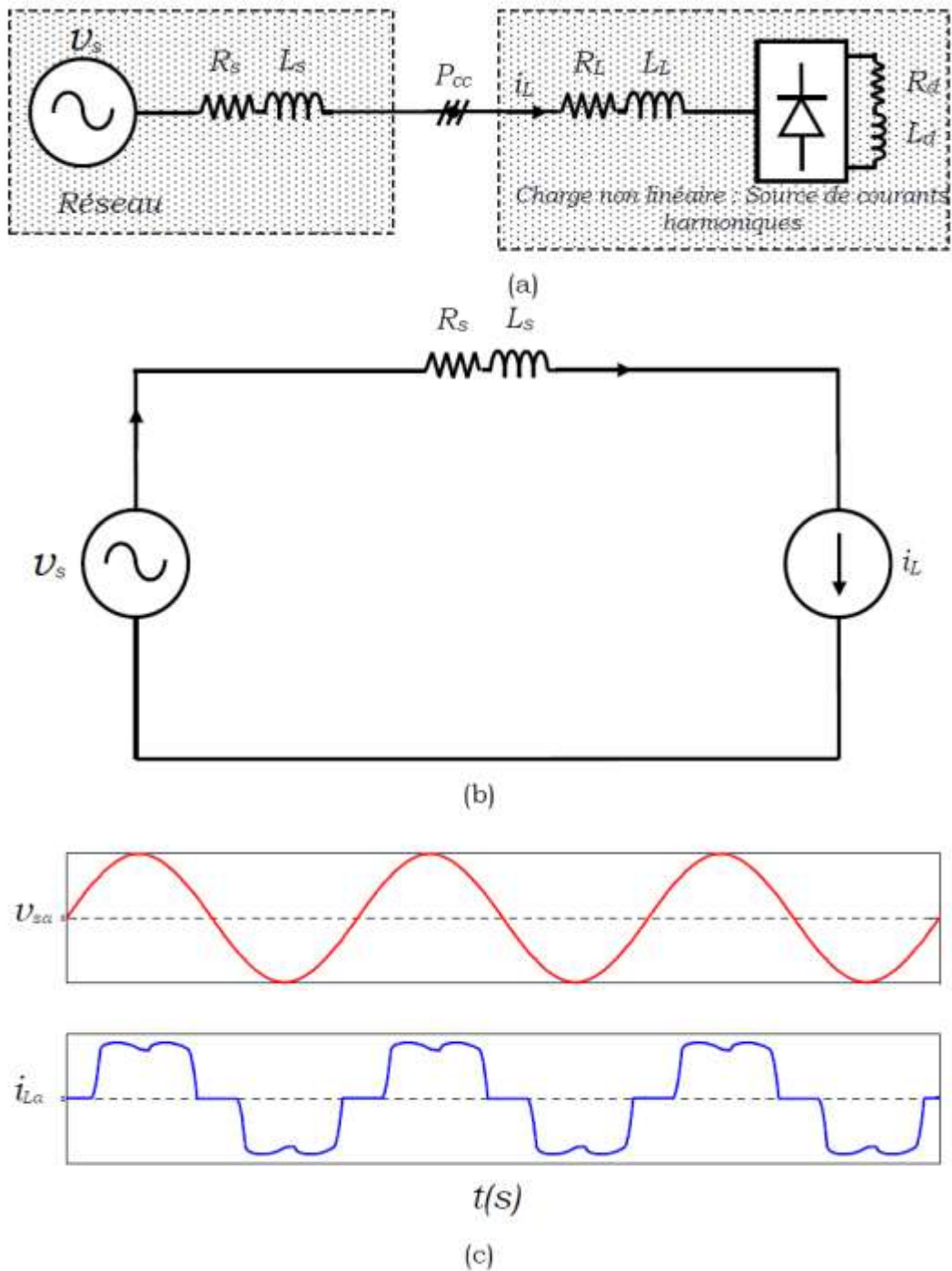


Figure I. 5 Charge non-linéaire type source de courants harmoniques

(a) Circuit de base d'un pont à six diodes débitant sur une charge inductive coté continu. (b) Circuit équivalent par phase. (c) Formes d'ondes de la tension simple et du courant de la phase (a).

Dans ces charges la réactance inductive est suffisamment élevée pour lisser le courant à la sortie du redresseur et rendre ainsi les courants à son entrée d'allure rectangulaire.

La figure I. 5 (c) représente les formes d'onde typiques du courant i_{La} et de la tension simple V_{sa} de la phase 'a', à l'entrée de la charge. Le fait que les caractéristiques et le contenu harmonique de ces courants soient indépendants des paramètres du système côté alternatif, la charge non linéaire se comporte comme source de courant. Par conséquent, elle est appelée charge non linéaire type source de courants harmoniques et elle est représentée par une source de courant i_L comme le montre le circuit équivalent par phase dans la figure I. 5 (b).

D'autres sources de courants harmoniques sont aussi identifiées, comme par exemple les variateurs de la fréquence (cycloconvertisseur), les non-linéarités dues à la magnétisation des transformateurs, les machines alternatives tournantes, les fours à arc, les chauffages par induction, les gradateurs de lumière, etc.

1.3.4.b) Charges non-linéaires types source de tensions harmoniques

La deuxième catégorie de charges polluantes regroupe les charges non linéaires possédant un pont à diodes comme étage d'entrée avec un condensateur de lissage côté continu comme le montre la figure I. 6 (a). Les formes d'onde de la tension simple v_{La} de la phase 'a' et de la tension composée $V_{L_{ab}}$ entre les phases 'a' et 'b' au point de raccordement ainsi que le courant i_{La} de la charge dans la phase 'a' sont présentés par la figure I. 6 (c).

Bien que le courant soit fortement déformé, sa composante harmonique dépend essentiellement de l'impédance côté alternatif et du déséquilibre du système des tensions de la source. Cependant, la distorsion dans les tensions à l'entrée du redresseur est imposée par le chargement du condensateur continu et est pratiquement indépendante de l'impédance côté alternatif. Par conséquent, ce type de charge se comporte comme source de tensions harmoniques. Le schéma équivalent par phase est illustré dans la figure I. 6 (b) où la charge est représentée par une source de tension V_L . Un exemple de ces charges est un entraînement à vitesse variable d'un moteur asynchrone ayant un pont à diodes et un condensateur du côté courant continu pour lisser la tension. Dans les conditions extrêmes, le THD de la tension ligne à ligne $V_{L_{ab}}$ est de l'ordre de 9% et celui du courant i_L consommé par la charge est d'environ 57% [12].

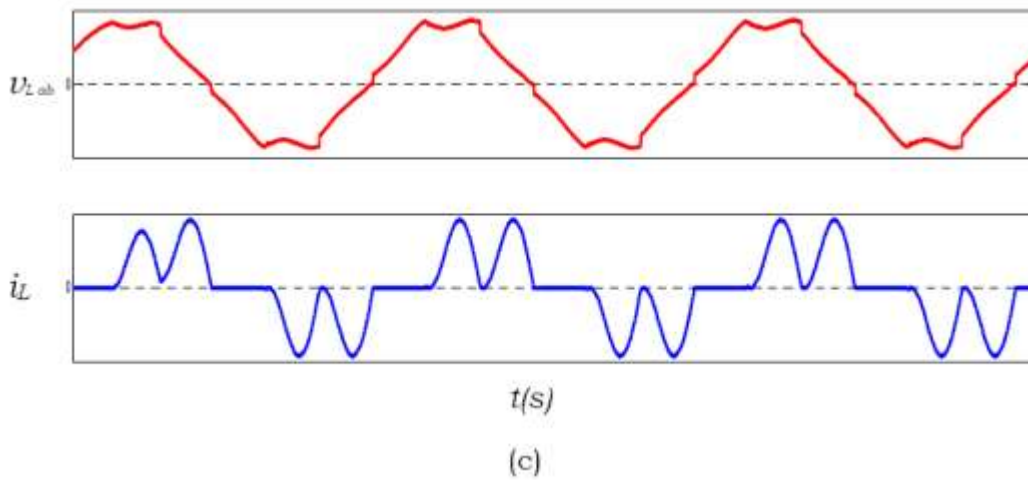
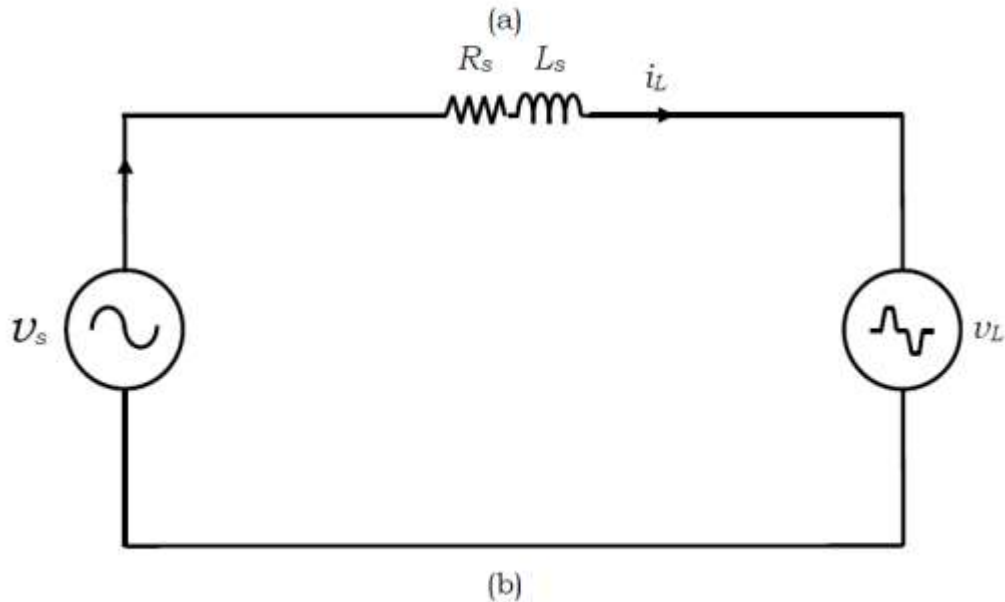
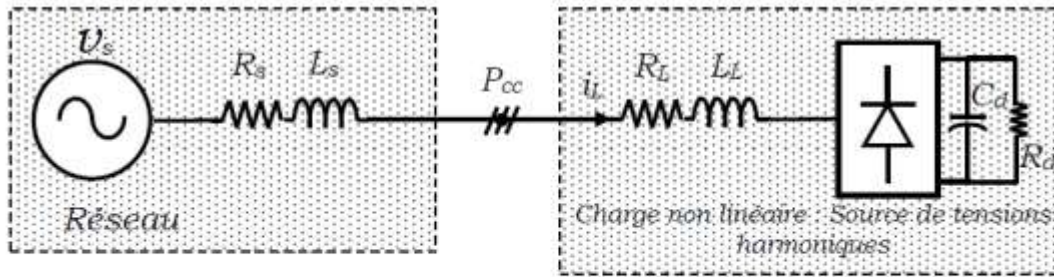


Figure I. 6 Charge non-linéaire type source de tensions harmoniques

(a) Circuit de bas d'un pont à six diodes débitant sur une charge capacitive coté continu. (b) Circuit équivalent par phase. (c) Formes d'ondes de la tension simple et du courant de la phase

Par ailleurs, d'autres récepteurs non linéaires monophasés se comportent aussi en source de tensions harmoniques, tels que les alimentations à découpage, les appareils domestiques, les téléviseurs, les micro-ordinateurs, les ballasts électroniques des tubes fluorescents, etc.

1.3.5 Les effets des harmoniques

Les tensions et courants harmoniques superposés à l'onde fondamentale conjuguent leurs effets sur les appareils et équipements utilisés. Ces grandeurs harmoniques ont des effets différents selon les récepteurs rencontrés : [13] [9]

1.3.5.1 Les effets instantanés

Ce sont des effets immédiats, ils se manifestent en même temps que l'apparition des harmoniques :

a) **Perturbation des systèmes électroniques**

- ✓ Dérangement des commutations des thyristors lorsque les grandeurs harmoniques déplacent le passage à zéro de la tension.
- ✓ Augmentation de la marge d'erreur sur les compteurs d'énergie à induction.
- ✓ Perturbation des récepteurs de télécommande utilisés par les distributeurs d'énergie, lorsque les tensions harmoniques sont de fréquence voisine de celle du système.

b) **Bruits et vibrations**

- ✓ Efforts électrodynamiques entraînant des vibrations et des bruits dans les appareils électromagnétiques (transformateurs, ...).
- ✓ Couples mécaniques pulsatoires, dus aux champs tournants harmoniques, donnant des vibrations dans les machines tournantes.

c) **Perturbations induites**

Ce sont essentiellement des effets sur les lignes à courants faibles, qui sont dus au couplage par diaphonie inductive, lorsqu'il y a présence d'harmoniques de rang élevé.

d) **Différences de potentiel entre masses**

La circulation de courants harmoniques dans le neutre entraîne une chute de tension dans ce conducteur.

1.3.5.2 Les effets différés :

Ce sont des effets qui apparaissent suite à une exposition prolongée à des courants harmoniques:

- Vieillissement accéléré des composants et des isolants par échauffement (l'impact dépend de la constante thermique de chaque élément).
- Raccourcissement de la longévité des appareils (usure des machines tournantes sous l'effet des couples pulsatoires, par exemple).
- Augmentation de la fréquence de l'entretien des équipements et de la machinerie.
- Surcharge du neutre

La liste suivante donne une idée de l'impact des harmoniques sur certains équipements à usage fréquent qui font partie intégrante du réseau électrique, telle que les :

- ✓ **alternateurs** : pertes supplémentaires dans les enroulements statoriques et dans les amortisseurs liées à l'augmentation de la valeur efficace du courant absorbé. Ces pertes provoquent un échauffement supplémentaire et réduisent également le rendement de ces machines ;
- ✓ **câbles électriques** : pertes Joule supplémentaires, surtout dans les câbles de retour du neutre où circulent les courants harmoniques homopolaires et corrosion des câbles en aluminium sous l'effet de la circulation de courants harmoniques pairs associés à une composante continue. La présence des harmoniques dans le réseau diminue aussi la capacité de transport en puissance active des lignes [12] ;
- ✓ **transformateurs** : ils sont les constituants les plus directement affectés par les courants harmoniques. Ces derniers produisent des pertes additionnelles dans les enroulements. Ces pertes ne sont pas seulement dues à l'effet Joule pelliculaire, mais aussi à des courants induits dans les bobinages, le noyau et les pièces métalliques par les composantes à hautes fréquences des champs de fuite;
- ✓ **moteurs à courant alternatif** : la déformation de la forme d'onde de la tension du réseau, due à l'interaction entre les courants harmoniques et l'impédance équivalente du réseau, influe sur le fonctionnement des machines électriques à courant alternatif en général et sur celui des moteurs asynchrones en particulier (pertes supplémentaires dans le fer et les enroulements et pulsation du couple) ;

- ✓ **condensateurs** : ils sont aussi très affectés par les courants harmoniques. Les condensateurs branchés en parallèle sur les réseaux pour la compensation de la puissance réactive (correction du facteur de puissance) ont des impédances d'autant plus faibles que la fréquence est élevée. Les courants harmoniques se superposent au courant fondamental et causent des pertes supplémentaires qui peuvent excéder la capacité thermique des condensateurs et réduire considérablement leur durée de vie. De plus, des phénomènes de résonance peuvent subvenir et soumettre les condensateurs à des surtensions, lesquelles sont susceptibles de les dégrader, voire de perforer leur isolation [14] ;
- ✓ **équipements à base d'électronique de puissance** : dysfonctionnement lié à la déformation de la tension qui peut créer des faux passages par zéro (perte de synchronisation) ;
- ✓ **ordinateurs** : troubles fonctionnels liés à la distorsion de la tension du réseau ;
- ✓ **réseaux de télécommunication** : génération de bruits importants liés au couplage électromagnétique entre les lignes de puissance et les circuits de communication. Dans des cas particuliers, surtout lors de résonances, une partie des réseaux de télécommunication peut être rendue inutilisable [9]

I.4 Caractérisation des perturbations harmoniques

La perturbation harmonique est généralement caractérisée par le taux de distorsion harmonique (THD) défini pour la tension ou le courant. Ce critère est le plus souvent employé pour quantifier le contenu harmonique d'un signal distordu.

Il mesure également le degré de déformation du signal apporté par les harmoniques par rapport à une onde sinusoïdale. Il va de soit que la répartition spectrale complète généralement l'information sur le THD en indiquant le rang des harmoniques dominants. Pour chiffrer la consommation de puissance réactive le facteur de puissance (FP) est généralement utilisé [14] .

Le courant absorbé par une charge non linéaire (convertisseur statique) n'est pas sinusoïdal, mais sa valeur moyenne sur chaque phase est souvent nulle. Dans ce cas, la décomposition en série de Fourier du courant donne :

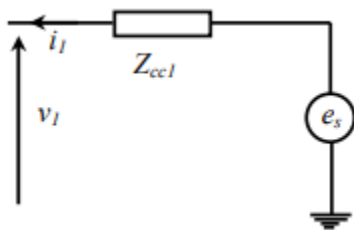
$$i(t) = \sqrt{2}I_1 \sin(\omega t + \alpha_1) + \sum_{h=2}^{\infty} \sqrt{2}I_h \sin(h\omega t + \alpha_h) \dots \dots \dots (I.2)$$

Avec :

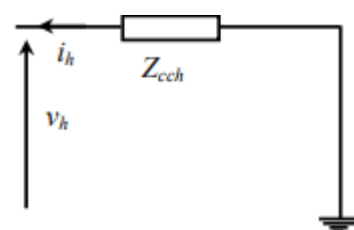
I_1, I_h : Valeur efficace du courant fondamental et du courant harmonique de rang h,
 α_1, α_h : Déphasage du courant fondamental et du courant harmonique de rang h, ω :
 pulsation fondamentale du réseau. Le taux de distorsion harmonique de ce courant s'exprime
 sous la forme suivante :

$$THDi = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \frac{I_h^2}{I_1^2}} \dots \dots \dots (I.3)$$

Pour étudier la déformation de la tension du réseau provoquée par le prélèvement de courants
 distordus, nous représentons la source d'énergie par une f.e.m (e_s) à la fréquence fondamentale
 mise en série avec une impédance variable avec la fréquence comme le montre la fig I.7.



(a) : pour la fréquence fondamentale



(b) : pour l'harmonique de rang h

Figure I. 7 Schémas équivalents pour caractériser la déformation de la tension au point de
 raccordement.

Sur ces schémas, les impédances représentent :

z_{cc1} : Impédance de court-circuit de la source à la fréquence fondamentale,

z_{cch} : Impédance de court-circuit de la source à la fréquence du rang h.

La tension au point de raccordement, $v(t)$, est composée de la somme ci-dessous :

$$v(t) = v_1(t) + \sum_{h=2}^n v_h(t) \dots \dots \dots (I.3)$$

Avec :

$$v_1(t) = e(t) - |Z_{cc1}| \cdot I_1 \sqrt{2} \sin (\omega t + \alpha_1 + \phi_{cc1}) \dots \dots \dots (I.4)$$

$$v_h(t) = -|Z_{cch}| \cdot I_1 \sqrt{2} \sin (h\omega t + \alpha_h + \phi_{cch}) \dots \dots \dots (I.5)$$

Où :

$|Z_{cc1}|, |Z_{cch}|$ Représente le module de z_{cc1} et z_{cch} respectivement.

ϕ_{cc1}, ϕ_{cch} Représente l'argument de z_{cc1} et z_{cch} respectivement.

De l'équation (I.4), on constate que la tension du réseau n'est plus sinusoïdale et est déformée par les courants harmoniques par l'intermédiaire de l'impédance de court-circuit. Pour la rendre sinusoïdale deux solutions sont possibles : modification de l'impédance du réseau ou annuler les harmoniques de courant.

Le taux de distorsion harmonique en tension est un paramètre qui sert à évaluer la déformation de la tension et s'exprime sous la forme suivante :

$$THD_v = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \frac{v_h^2}{v_1^2}} \dots \dots \dots (I.6)$$

Il est possible aussi de caractériser les harmoniques par leur participation dans la puissance apparente. Nous utilisons alors la notion de puissance déformante "D". Dans le cas d'un réseau équilibré à m phases, la puissance apparente S, la puissance active P et la puissance réactive q sont données par les relations suivantes :

$$S = m \sqrt{\sum_{h=1}^n V_h^2} \cdot \sqrt{\sum_{h=1}^n I_h^2} = m \cdot V_{eff} \cdot I_{eff} \dots \dots \dots (I.7)$$

$$P = m \sum_{h=1}^n V_h I_h \cos(\varphi_h) \dots \dots \dots (I.8)$$

$$q = m \sum_{h=1}^n V_h I_h \sin(\varphi_h) \dots \dots \dots (I.9)$$

A son tour la puissance déformante caractérisant la contribution des harmoniques est définie par la formule suivante :

$$D = m V_1 \sqrt{\sum_{h=2}^n I_h^2} \dots \dots \dots (I.10)$$

Finalement, le facteur de puissance s'exprime comme suit :

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{\sum_{h=1}^n V_h I_h \cos(\varphi_h)}{\sqrt{\sum_{h=1}^n V_h^2} \cdot \sqrt{\sum_{h=1}^n I_h^2}} \dots\dots\dots (I.11)$$

On constate que le facteur de puissance est dégradé par la présence des harmoniques.

Dans le cas d'un système triphasé alimentant une charge non linéaire équilibrée (cas du redresseur à diodes), les fondamentaux des courants absorbés composent un système direct (c'est-à-dire de même séquence que les tensions du réseau), les harmoniques multiples de 3, composent un système homopolaire (ils sont en phase), l'harmonique 5 un système inverse (la séquence des phases est inverse par rapport à celle du réseau), l'harmonique 7 un système direct,...

Différents facteurs sont définis pour caractériser les perturbations harmoniques. Le taux de distorsion harmonique et le facteur de puissance sont les plus significatifs pour quantifier respectivement les perturbations harmoniques et la consommation de la puissance réactive.

I.4.1. Les expressions des tensions et de courants instantanés

Sont données par :

$$v(t) = \sum_{n=1}^{\infty} v_n(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} V_{n.eff} \sin(n\omega t + \theta_n) \dots\dots\dots (I.12)$$

$$i(t) = \sum_{n=1}^{\infty} i_n(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} I_{n.eff} \sin(n\omega t + \phi_n) \dots\dots\dots (I.13)$$

Où :

$V_{n.eff}$: Valeur efficace de la tension harmonique de rang n

$I_{n.eff}$: Valeur efficace du courant harmonique de rang n

I.4.2. Puissance instantanée et puissance moyenne en régime déformé

$$p(t) = v(t)i(t) \dots\dots\dots (I.14)$$

$$p = \int_0^T v(t)i(t) dt \dots\dots\dots (I.15)$$

$$p = \sum_{n=1}^{\infty} V_{n.eff} I_{n.eff} \cos(\theta_n - \phi_n) = \sum_{n=1}^{\infty} p_n \dots\dots\dots (I.16)$$

I.4.3 Valeurs efficaces de la tension et du courant

$$V_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} V_{n,eff}^2} \dots\dots\dots (I.17)$$

$$I_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_{n,eff}^2} \dots\dots\dots (I.18)$$

I.4.4 Puissances apparente, active, réactive et de distorsion

En régime déformé, on doit modifier la définition de la puissance apparente pour qu'elle tienne compte du courant harmonique [15]:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \dots\dots\dots (I.19)$$

Où :

S : Puissance apparente.

P : Puissance active.

Q : Puissance réactive.

Nous voyons dans cette expression, un nouveau terme qui apparait, il s'agit de la puissance de distorsion D . La Figure I.8 illustre vectoriellement ces puissances.

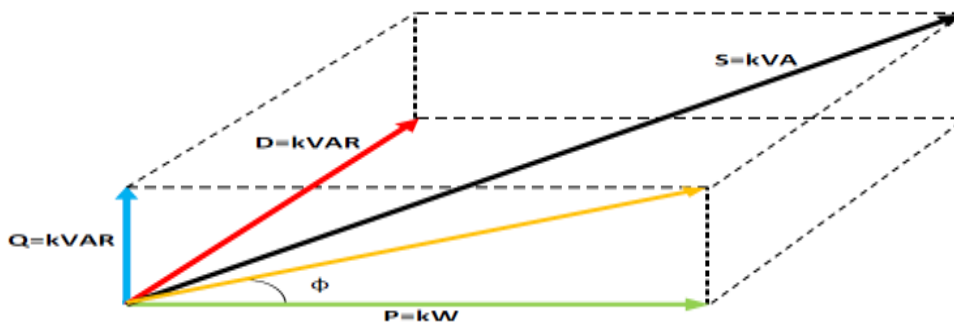


Figure I. 8 représentation vectorielle de la puissance apparente

En monophasé, si la tension et le courant instantanés ont pour expression :

$$v(t) = \sqrt{2} V_{eff} \sin(\omega t) \dots\dots\dots (I.20)$$

$$i(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} I_{n,eff} \sin(n\omega t + \phi_n) \dots\dots\dots (I.21)$$

Ce qui est le cas pour un réseau fort. Nous avons alors :

$$P = V_{eff} I_{1,eff} \cos(\phi_1) \dots\dots\dots (I.22)$$

$$Q = V_{eff} I_{1,eff} \sin(\phi_1) \dots\dots\dots (I.23)$$

$$S = V_{eff} I_{eff} \dots\dots\dots (I.24)$$

$$I_{eff} = \sqrt{I_{1,eff}^2 + I_{2,eff}^2 + I_{3,eff}^2 + \dots + I_{n,eff}^2} \dots\dots\dots (I.25)$$

$$D = V_{eff} \sqrt{I_{1,eff}^2 + I_{2,eff}^2 + I_{3,eff}^2 + \dots + I_{n,eff}^2} \dots\dots\dots (I.26)$$

I.4.5 Facteur de puissance F_P

Indépendamment du régime sinusoïdal ou déformé, le facteur de puissance est le rapport entre la puissance active et la puissance apparente. Cependant, le facteur de puissance s'en trouve modifié par la présence de la puissance de distorsion :

$$F_P = \frac{P}{S} \neq \cos\phi_1 \dots\dots\dots (I.27)$$

$$F_P = \frac{P}{S} = \frac{I_{1,eff}}{I_{eff}} \cos\phi_1 \dots\dots\dots (I.28)$$

$$F_{dis} = \frac{I_{1,eff}}{I_{eff}} \dots\dots\dots (I.29)$$

$$F_{dép} = \cos\phi_1 \dots\dots\dots (I.30)$$

$$F_P = F_{dép} \cdot F_{dis} \dots\dots\dots (I.31)$$

F_P : Facteur de puissance.

F_{dis} : Facteur de distorsion.

$F_{dép}$: Facteur de déplacement.

En régime déformé, le facteur de puissance devient le produit du facteur de déplacement et du facteur de distorsion. Les définitions précédentes s'appliquent tout aussi bien en régime monophasé qu'en régime triphasé équilibré.

I .4.6 Distorsion harmonique individuelle THD_i

C'est le rapport de la valeur efficace d'un harmonique d'ordre n à celle du fondamental

$$THD_i = \frac{I_{n.eff}}{I_{1.eff}} \dots\dots\dots (I.32)$$

I .4.7 Taux de distorsion harmonique

Deux taux de distorsion harmonique sont distingués :

- le taux de distorsion harmonique en courant, noté THD_i
- le taux de distorsion harmonique en tension, noté THD_v

Le premier s'exprime sous la forme :

$$THD_i = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{I_{cn}}{I_{c1}}\right)^2} \dots\dots\dots (I.33)$$

Le tableau I.1 indique le THD_i du courant pour différentes charges non linéaires

Charges non linéaires	THD _i %
Variateurs de vitesse	80
Alimentation de micro-ordinateur	70
Tubes fluorescents	>10

Tableau I. 1 THD_i pour quelques charges non linéaires

Le THD_i ne dépend que des valeurs efficaces du courant de charge. En revanche, le THD_v est fonction des courants harmoniques, caractérisant la charge, et de l'impédance de court-circuit, imposée par le réseau:

$$THD_v = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{V_{cn}}{V_{c1}}\right)^2} = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{|Z_{scc}^n| I_{cn}}{V_{c1}}\right)^2} \dots \dots \dots (I.34)$$

Ainsi, plus les impédances Z_{scc}^n ($n>1$) sont faibles, plus la distorsion en tension est faible. Le courant d'alimentation distordu est décrit par:

$$i_s(t) = i_{s1}(t) + \sum_{n \neq 1} i_{sn}(t) \dots \dots \dots (I.35)$$

$$f_n = n f_0 \dots \dots \dots (I.36)$$

$$i_s(t) = \sqrt{2} I_{s1} \sin(\omega_1 t - \phi_{s1}) + \sum_{n=2}^{\infty} \sqrt{2} I_{sn} \sin(\omega_n t - \phi_{sn}) \dots \dots \dots (I.37)$$

Afin de caractériser la déformation de courant d'alimentation, on définit le taux de distorsion harmonique THD_s

$$THD_{s,i} \% = 100 \times \sqrt{\left(\frac{I_s}{I_{s1}}\right)^2 - 1} \dots \dots \dots (I.38)$$

En général, les harmoniques pris en compte dans un réseau électrique sont inférieurs à 2500 Hz, ce qui correspond au domaine des perturbations basses fréquences au sens de la normalisation. Les harmoniques de fréquence plus élevée sont fortement atténués par l'effet de peau et par la présence des inductances de lignes. De plus, les appareils générant des harmoniques ont, en grande majorité, un spectre d'émission inférieur à 2500 Hz, c'est la raison pour laquelle le domaine d'étude des harmoniques s'étend généralement de 100 à 2500 Hz, c'est-à-dire des rangs 2 à 50.

1.5 Normes et réglementations

Les consommateurs ainsi que les distributeurs de l'énergie électrique sont conscients de l'importance d'une réglementation standard unique pour les problèmes de la pollution harmonique. Une telle réglementation universelle n'existe pas encore, cependant des organismes comme IEC (Commission Électrotechnique Internationale) en Europe [IEC 98] et IEEE en Amérique [IEEE 92], élaborent des normes efficaces qui peuvent être regroupées en trois catégories :

1. Niveaux de compatibilité harmonique en amont du point commun de raccordement :

- ✓ IEEE 519-1992
- ✓ IEC 61000-2-2
- ✓ IEC 61000-3-6

2. Limites sur l'émission harmonique des équipements :

- ✓ IEC 61000-3-2 (appareils de moins de 16 A par phase)
- ✓ IEC 61000-3-4 (appareils de plus de 16 A par phase)

3. Guide pour la mesure des harmoniques :

- ✓ IEC 61000-4-7

La norme IEEE-519, par exemple, définit des limites pour les tensions et courants harmoniques au point commun de raccordement (PCC) pour assurer le bon fonctionnement des récepteurs dans d'autres sites. À titre d'exemple, les taux individuels maximaux des tensions harmoniques ainsi que le THD à ne pas dépasser sont donnés dans le tableau I.2

Tension au jeu de barres	Composante harmonique individuelle maximale (%)	THD maximal (%)
69 kV et moins	3.0	5.0
115kV à 161 kV	1.5	2.5
Plus de 161 kV	1.0	1.5

Tableau I. 2 Limites des tensions harmoniques selon IEEE-519

D'autre part, les principales normes en matière de pollution harmonique basse tension sont définies au niveau international par la norme CEI 61000 [10].

CEI 61000-2-2 : cette norme fixe les limites de compatibilité pour les perturbations conduites basse fréquence et la transmission de signaux sur les réseaux publics d'alimentation basse tension. Les phénomènes perturbateurs incluent les harmoniques, inter-harmoniques, fluctuations de tension, creux de tension, déséquilibres de tension transitoires, etc.

CEI 61000-2-2 : Niveaux de compatibilité pour les tensions harmoniques individuelles sur les réseaux publics basse tension.

CEI 61000-2-4 : cette norme fixe les limites de compatibilité pour les réseaux industriels et non publics basse tension et moyenne tension, à l'exclusion des réseaux de navires, des avions, des plateformes offshore et des installations ferroviaires afin de pour établir les limites d'émission sur les réseaux industriels et de choisir les niveaux d'immunité des équipements inclus dans ces systèmes.

Rang harmonique	Classe 1 : matériels et systèmes sensibles	Classe 2 : réseaux industriels	Classe 3 : réseaux industriels perturbés
2	2	2	3
3	3	5	6
4	1	1	1.5
5	3	6	8
6	0.5	0.5	1
7	3	5	7
8	0.5	0.5	1
9	1.5	1.5	2.5
10	0.5	0.5	1
11	3	3.5	5
Pair >10	0.2	0.2	1
13	3	3	4.5
15	0.3	0.3	2
17	2	2	4
19	1.5	1.5	4
21	0.2	0.2	1.75
Impair >21 et ≠3h	0.2	0.2	1
23	1.5	1.5	3.5
25	1.5	1.5	3.5
Impair, >21 et ≠3h	0,2+12,5/h	0,2+12,5/h	5*(11/h) ^{1/2}
THD	5%	8%	10%

Tableau I.3 Taux (en % de V1) des tensions harmoniques acceptables (CEI 61000-2-4)

CEI 61000-3-2 : cette norme spécifie les limites pour les émissions de courant harmonique des matériels individuels raccordés aux réseaux publics pour les appareils consommant moins de 16A par phase.

Rang harmonique	Courant harmonique maximal autorisé (A)
2	1.08
3	2.30
4	0.43
5	1.14
6	0.30
7	0.77
$8 \leq h \leq 40$	$0,23*8/h$
9	0.40
11	0.33
13	0.21
$15 \leq h \leq 39$	$0,15*15/h$

Tableau I. 4 : CEI 61000-3-2 : Limites d'émission de courants harmoniques des appareils basse tension de courant inférieur à 16A et de classe A.

Le tableau I.4 indique les limites d'émission pour ces appareils faisant partie de la classe A, c'est-à-dire autres que les outils portatifs, appareils d'éclairage et appareils ayant un courant d'entrée à forme d'onde spéciale dont la puissance active est inférieure à 600W.

CEI 61000-3-4 : cette norme spécifie les limites pour les émissions de courant harmonique des équipements individuels d'intensité assignée supérieure à 16A et jusqu'à 75A. Ces limites s'appliquent aux réseaux publics de tensions nominales entre 230V (monophasée) et 600V (triphase).

Rang harmonique 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 ≤ 8/h

Tableau I. 5 CEI 61000-3-4 : Limitation des émissions de courants harmoniques

CEI 61000-4-13 : Le but de cette norme est d'établir une référence commune pour l'évaluation de l'immunité fonctionnelle des matériels électriques et électroniques soumis aux harmoniques et inter_harmoniques et aux fréquences des signaux transmis sur le réseau. Les niveaux proposés correspondent généralement aux environnements résidentiels, commerciaux, et de l'industrie légère. Elle donne les essais d'immunité basse fréquence aux harmoniques et inter-harmoniques incluant les signaux transmis sur le réseau électrique alternatif. Le tableau I.6 donne les taux des harmoniques en tension à utiliser pour vérifier l'immunité des appareils pour les matériels et systèmes sensibles (classe 1) et les réseaux industriels (classe 2)

Rang harmonique	Classe1 : matériels et systèmes sensibles	Classe 2 : réseaux industriels
3	8	8
5	8	12
7	6.5	10
9	2.5	4
11	5	7
13	4.5	6
15	-	3
17	3	5
19	2	5
21	-	2
23	2	4
25	2	4
27	-	2
29	1.5	4
31	1.5	3

Tableau I. 6 CEI 61000-4-13 : Taux des harmoniques en tension à utiliser pour vérifier l'immunité des appareils

D'autre part, pour assurer la compatibilité entre les installations sensibles alimentées par le réseau, il faut imposer des limites d'émission et donner des niveaux d'immunité suffisants.

Amplitude de la tension	<ul style="list-style-type: none"> • Pour chaque période d'une semaine 95% des valeurs efficaces moyennes sur 10 minutes doivent être dans la plage $V_n \pm 10\%$
Variations rapides de la tension	<ul style="list-style-type: none"> • De 5% à 10% de V_n (4 à 6% en moyenne tension)
Creux de tension	<ul style="list-style-type: none"> • Profondeur : entre 10% à 99% de V_n • Durée : entre 10 ms et 1 minute • Nombre : quelques dizaines à 1 millier par an
Coupures brèves	<ul style="list-style-type: none"> • Durée : jusqu'à 3 minutes • Nombre : quelques dizaines à plusieurs centaines par an
Coupures longues	<ul style="list-style-type: none"> • Durée : supérieure à 3 minutes • Nombre : entre 10 et 50 par an
Fréquence	<ul style="list-style-type: none"> • 50 Hz \pm 1% pendant 95% d'une semaine • 50Hz + 4%, 6% pendant 100% d'une semaine

Tableau I. 7 Limites de perturbations définies par EN 50160

Les caractéristiques principales de la tension fournie par un réseau de distribution (MT ou BT), définies par la norme Européenne EN 50160, précisent les tolérances qui doivent être garanties pour la tension et la fréquence ainsi que les niveaux des perturbations habituellement rencontrées [16].

I.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la distorsion harmonique et les différentes sources de perturbation affectant la forme d'onde des tensions du réseau électrique ainsi que leurs effets néfastes sur les équipements électriques qui y sont connectés.

Ces effets sont à l'origine d'échauffements et de dégradations du fonctionnement de ces équipements. Les normes imposées ont été également présentées. Elles fixent les limites de la génération d'harmonique.

Chapitre II

Les solutions de dépollution harmonique

II.1 Introduction

Dans tous les secteurs domestique et industriel, on observe une croissance progressive de générateurs d'harmoniques. Ce qui peut causer beaucoup de dégâts à tous les niveaux tels que le déclenchement intempestif des dispositifs de protection, des surcharges harmoniques, des niveaux élevés de distorsions des tensions et des courants, l'augmentation de la température dans les conducteurs et dans les générateurs et détérioration du qualité et la fiabilité d'un réseau alternation ce qu'il faut, une nécessité à de nombreuses applications solutions offrant aux clients un confort, une flexibilité et une efficacité inégalables. Parmi eux :

- L'adaptation de l'installation,
- L'utilisation de dispositifs particuliers dans l'alimentation,
- Le filtrage.

Dans ce chapitre on va étudier les solutions classique et moderne des pollutions harmoniques et les inconvénients de chaque solution.

II.2 Solutions de dépollution des réseaux électriques

Les perturbations engendrées par les charges non linéaires peuvent être atténuées soit :

- avec un système auxiliaire de filtrage pour les perturbations harmoniques ;
- En limitant la consommation de puissance réactive ;
- En modifiant la topologie du convertisseur pour limiter les propagations harmoniques;
- En augmentant la puissance de court-circuit du réseau par rapport à la puissance du générateur.....etc.

Alors, selon la littérature, les solutions les plus réponsus pour la dépollution des réseaux électriques peuvent être classées en deux groupes :

- Solutions traditionnelles (classiques) ;
- Solutions modernes [17].

II.3 Solutions de dépollution classique

II.3.1 Dépollution des courants perturbateurs

Afin de dépolluer les réseaux électriques de ce type de perturbation, plusieurs solutions ont été introduites dans la littérature.

II.3.1.1 Rééquilibrage des courants du réseau électrique

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

Une autre solution est l'installation d'un compensateur passif composé d'inductance et de condensateur. La Figure II.1 montre ce compensateur, appelé montage de Steinmetz [3]. Ce montage permet de présenter à 50 Hz une impédance équilibrée. Cependant, le montage de Steinmetz provoque un fort déséquilibre pour des fréquences différentes de 50 Hz, avec des résonances qu'il faut éviter d'exciter à proximité d'un générateur d'harmoniques.

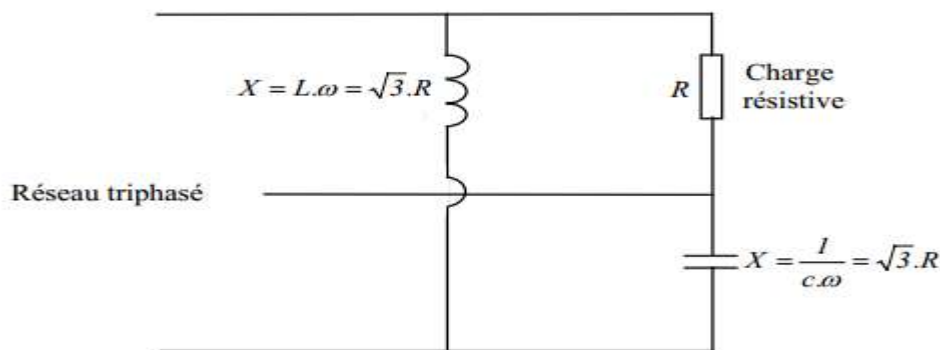


Figure II. 1 Montage de Steinmetz pour le rééquilibrage

II.3.1.2 Compensation de la puissance réactive

La puissance réactive est majoritairement consommée par les moteurs asynchrones et plus récemment par des dispositifs à base d'électronique de puissance. Différentes méthodes de compensation sont utilisées pour relever le facteur de puissance. La plus simple consiste à placer des batteries de condensateurs en parallèle avec le réseau. L'inconvénient de cette

méthode réside dans le fait que la puissance réactive fournie par les condensateurs est constante et qu'elle ne s'adapte pas à l'évolution du besoin.

II.3.1.3 Compensation des courants harmoniques

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

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

Le filtrage consiste à placer en parallèle sur le réseau d'alimentation une impédance de valeur très faible autour de la fréquence à filtrer et suffisamment importante à la fréquence fondamentale du réseau. Parmi les dispositifs de filtrage les plus répandus, on distingue le filtre passif résonnant (Figure II.2) et le filtre passif amorti ou passe-haut (Figure II.3).

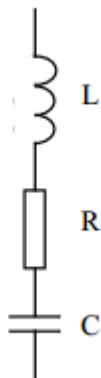


Figure II. 2 Filtre passif résonnant

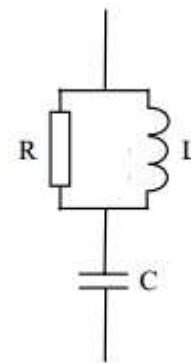


Figure II. 3 Filtre passif amorti

Le filtre résonnant est un filtre très sélectif. Il peut se connecter en parallèle avec d'autres filtres résonnants.

Le filtre passe-haut compense les harmoniques supérieurs ou égaux à sa fréquence propre. Il peut se connecter en parallèle avec d'autres filtres résonnants.

Ces dispositifs sont utilisés pour empêcher les courants harmoniques de se propager dans les réseaux électriques. Ils peuvent aussi être utilisés pour compenser la puissance réactive.

Malgré leur large utilisation dans l'industrie, ces dispositifs peuvent présenter beaucoup d'inconvénients :

- manque de souplesse à s'adapter aux variations du réseau et de la charge,
- équipements volumineux, problèmes de résonance avec l'impédance du réseau.

II.3.2 Dépollution des tensions perturbatrices

Les tensions perturbatrices dans un réseau électrique basse tension sont principalement les creux de tension, les tensions harmoniques et les tensions déséquilibrés. Ces deux dernières sont généralement causées par la circulation des courants harmoniques et/ou déséquilibrés.

Pour dépolluer les réseaux électriques de ces deux types de perturbation, on peut limiter la circulation des courants perturbateurs en utilisant les solutions traditionnelles présentées précédemment dans le cas des perturbations de courant.

Quant aux creux de tension, la solution la plus fréquente dans les milieux sensibles (hôpitaux, sites industriels...etc.) est d'utiliser des groupes électrogènes qui se substituent au réseau électrique.

Mais la limitation de la puissance de ces groupes ainsi que la qualité médiocre de l'énergie électrique fournie restent un problème.

Dans ce cas, les harmoniques ne subissent aucune action curative de la part de l'utilisateur. Les effets néfastes de la pollution harmonique sont à éviter pendant une durée limitée. Pour les installations nouvelles, on procède au surdimensionnement des équipements afin d'assurer leur tenue aux surcharges harmoniques. Dans le cas d'installations existantes, on décline les équipements de distribution électrique soumis aux harmoniques (câbles du neutre, transformateur).

Cette méthode ne permet pas de tirer profit du potentiel réel de l'installation. Il en résulte un accroissement important du coût de l'installation.

II.3.4 Augmentation de la puissance de court-circuit

En l'absence de tout phénomène de résonance, la puissance harmonique globale augmente lorsque la puissance de court-circuit diminue. On s'efforcera alors d'alimenter les équipements perturbateurs à partir du point du réseau où la puissance de court-circuit

disponible est la plus élevée. Les courants harmoniques des charges non linéaires étaient modélisés par des sources de courant indépendantes du réseau. Dans la réalité, ce modèle est très approximatif. Les courants harmoniques sont influencés par l'impédance du réseau amont. Lorsque celle-ci croit, en général les courants harmoniques décroissent. Ce qui signifie que pour augmenter l'impédance, on augmente la puissance de court-circuit. Des essais ont été réalisés sur une alimentation à découpage, en modifiant l'impédance de la source Tableau II.1 On peut constater que les harmoniques de courant de valeurs les plus élevées décroissent fortement lorsque l'impédance de la source croit.

Mais, l'utilisation de ces trois solutions précédentes n'est pas efficace en raison de leur coût élevé, en plus de nombreux autres problèmes.

II.3.5 Transformateur à couplage spécial

Le choix de couplages appropriés des transformateurs permet de limiter la circulation des courants harmoniques. L'utilisation d'un transformateur d'isolement, de rapport 1/1 à couplage triangle-étoile ou triangle-zigzag Figure II.4, empêche la propagation des courants harmoniques de rang 3 et leurs multiples circulant dans le neutre. Ce procédé n'a aucun effet sur les autres rangs harmoniques. Il limite au contraire la puissance disponible de la source et augmente l'impédance de ligne. Il en résulte une augmentation de la distorsion en tension due aux autres rangs harmoniques.

Z_s [%]	Facteur de puissance $F_p = \frac{p}{s}$	I_3 [%]	I_7 [%]	I_9 [%]	I_9 [%]	I_{11} [%]	I_{13} [%]	Taux de distorsion en tension
0.25	0.64	87	64	38	15	1	7	2.8
0.5	0.65	85	60	33	11	4	7	3.5
1	0.68	81	52	24	6	7	6	5.4
2	0.72	76	42	14	7	6	3	7.5
4	0.75	69	29	8	8	4	4	11.2
6	0.77	63	21	8	6	3	3	14.2
8	0.78	59	17	8	5	3	2	16.8

Tableau II. 1 Courants harmoniques d'une alimentation à découpage en fonction de l'impédance de source

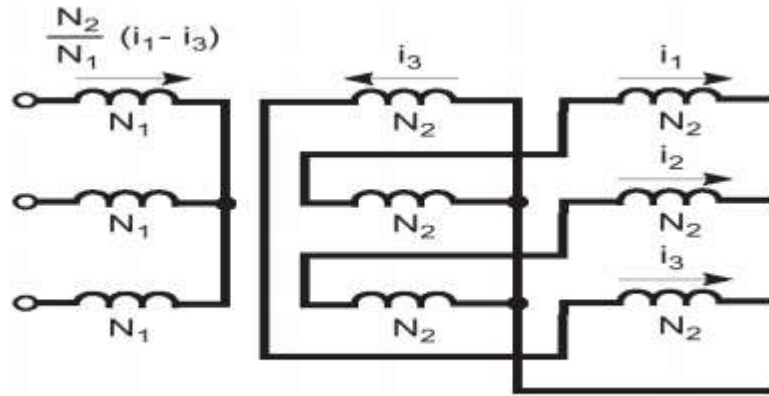


Figure II. 4 Transformateur à secondaire zigzag et atténuation des harmoniques multiples de 3.

L'utilisation des transformateurs primaires étoiles (sans neutre) et à secondaires zigzags est une solution intéressante. Ce couplage permet d'avoir le minimum de distorsion au secondaire. En effet, dans ce cas, les courants harmoniques de rang $3 \cdot h$ ne circulent pas au primaire du transformateur et l'impédance Z_s ne dépend que des enroulements secondaires.

II.3.6 Modification du convertisseur polluant

Afin de limiter les risques de pollution d'un réseau électrique, il est parfois possible de remplacer la structure du convertisseur de puissance et/ou de sa commande pour intervenir, directement, sur la source des perturbations. Plusieurs solutions sont envisageables, parmi elles, on cite [18].

II.3.6.1 Redresseurs dodécophasés

Il s'agit de connecter 2 ponts triphasés, judicieusement déphasés, en parallèle côté réseau et reliés côté redressé. Le déphasage est obtenu à l'aide d'un transformateur à 2 secondaires bobinés l'un en triangle et l'autre en étoile Figure II.5.

II.3.6.2 Méthodes d'injection d'harmonique dans le neutre

Ces techniques réduisent de manière significative les harmoniques créés au secondaire d'un transformateur triphasé alimentant un pont redresseur à diodes, en injectant un courant de fréquence multiple de 3 dans le neutre [19].

III.3.6.3 Transformateurs de réjection de l'harmonique 3

L'originalité est de réduire l'influence de l'harmonique 3 en insérant dans le circuit, un transformateur étoile-triangle ou zigzag-triangle, fonctionnant à vide, pour créer une circulation de flux de fréquence multiple de 3 [20].

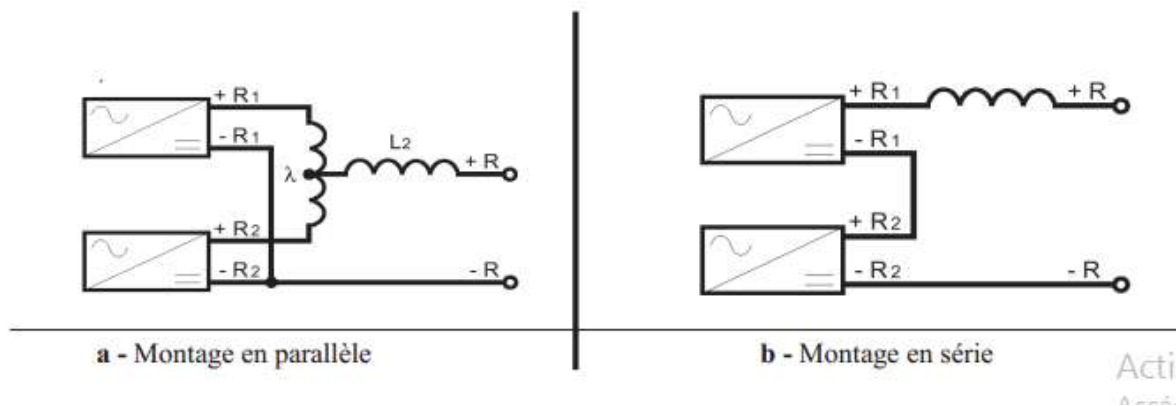


Figure II. 5 Montage de 2 ponts redresseurs.

II.4 Filtrages passifs

Elles apportent une solution facile et rapide pour certains cas de perturbations bien localisées et utilisent des composants passifs (inductances, condensateurs, transformateurs) et /ou des branchements qui modifient le schéma de l'installation communément appelé filtres passifs. Le rôle de ces filtres est l'absorption des harmoniques et la réduction concomitante du THD Leur principe consiste à placer, en parallèle avec le réseau d'alimentation, une impédance de valeur très faible autour de la fréquence à filtrer et suffisamment importante à la fréquence fondamentale du réseau [21]. Il s'agit notamment de mettre en œuvre les moyens suivants : parmi les dispositifs de filtrage les plus répandus, on distingue le filtre passif résonnant et le filtre passif amorti ou passe-haut [22].

II.4.1 Principe

Le principe d'un filtre passif est de modifier localement l'impédance du réseau, de façon à « dériver » les courants harmoniques et à éliminer les tensions harmoniques y afférentes. Des éléments capacitifs et inductifs sont, en effet, associés de manière à obtenir une résonance série accordée sur une fréquence choisie. Une connaissance précise des rangs harmoniques logiciels de simulation. En fonction de l'atténuation harmonique recherchée, différents types de filtres passifs sont utilisés.

Ils peuvent être classifiés selon leur emplacement, leur mode de connexion au circuit principal, leur degré d'amortissement ainsi que les fréquences de leurs résonances. On distingue généralement un filtre shunt et un filtre série. Par ailleurs, le filtre shunt est utilisé exclusivement du côté courant alternatif pour les raisons suivantes :

- Le filtre série peut porter le courant en entier à partir du circuit principal et doit être isolé de la terre. Le filtre shunt, par contre, porte uniquement le courant harmonique et peut être lié à la terre à l'une des extrémités.
- A la fréquence fondamentale, un filtre shunt à l'avantage de fournir de la puissance réactive alors qu'un filtre série consomme de la puissance réactive.
- Pour des performances égales, un filtre shunt est beaucoup moins cher qu'un filtre série. [23]

II.4.2 Filtre passif résonnant

Il est constitué d'un circuit RLC en série accordé sur une fréquence déterminée. Ce filtre est très sélectif [24]. La figure II.6 présente le schéma de branchement du filtre et l'évolution de leur impédance en fonction de la fréquence.

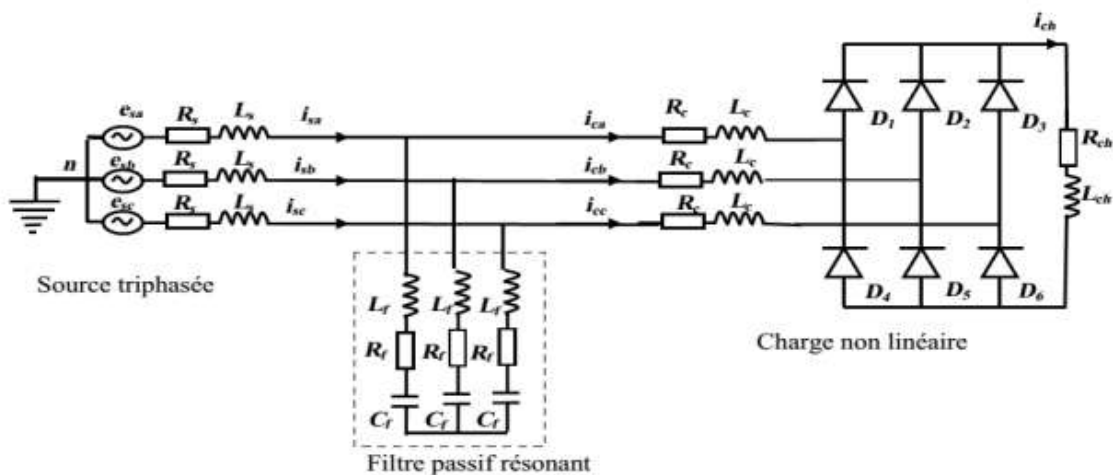


Figure II. 6 Branchement d'un filtre passif résonnant

Le filtre à une impédance équivalente Z_{eq} donnée par :

$$Z_{eq} = \frac{1-LC\omega^2+jRC\omega}{jC\omega} \dots\dots\dots (II.1)$$

II.4.3 Filtre passif amorti (Passe Haut)

Ce filtre présente une faible impédance sur une large bande de fréquence. Il est beaucoup moins sélectif et réduit les harmoniques supérieures au voisinage de leurs rangs d'accord. La figure II.7 représente le schéma de branchement d'un filtre amorti et l'évolution de son impédance en fonction du rang harmonique. Ce filtre présente des performances moins bonnes que celles du filtre résonnant. En revanche, les conséquences d'une variation de la capacité ou de la fréquence sont très limitées [25] .

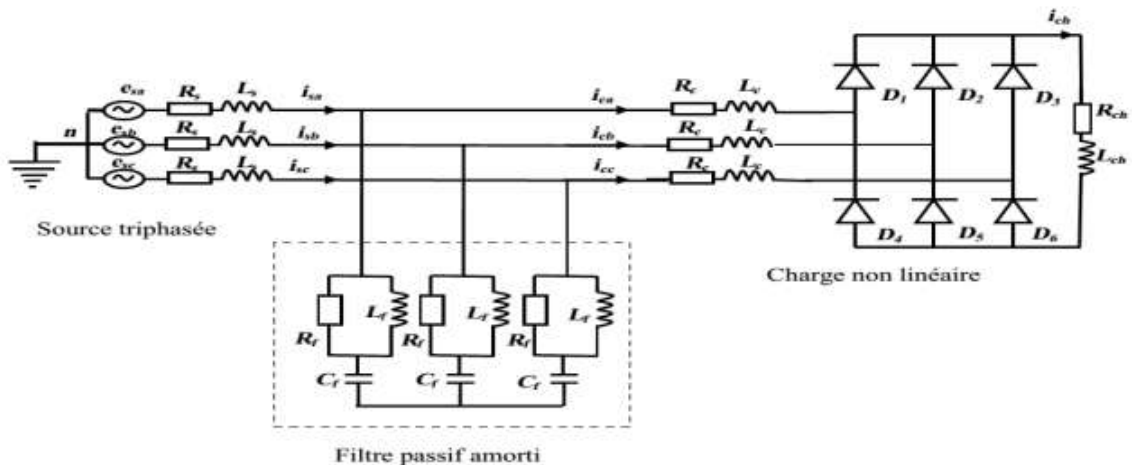


Figure II. 7 Filtre passif amorti (passe-haut)

Le filtre à une impédance équivalente Z_{eq} donnée par [21]:

$$Z_{eq} = \frac{1-LC\omega^2+j\frac{L}{R}\omega}{\frac{L}{R}C\omega^2+jC\omega} \dots\dots\dots (II.2)$$

II.4.4 Inconvénients du filtrage passif

Une connaissance approfondie de la configuration du réseau électrique est nécessaire ;

- Les variations de l'impédance du réseau peuvent détériorer la performance du filtre ;

- Le réseau peut former un système résonnant avec un filtre et les fréquences voisines de la fréquence de résonance sont amplifiées ;
- Equipement volumineux ;
- Inadaptabilité et perte d'efficacité lorsque les caractéristiques du réseau électrique évoluent [21].

II.5 Solutions de dépollution modernes

II.5 .1 Les raisons qui nous imposent des nouvelles solutions

Deux raisons principales ont conduit à concevoir une nouvelle structure de filtrage moderne et efficace appelée filtre actif de puissance.

- La première raison est due aux inconvénients inhérents des solutions traditionnelles de dépollution qui ne répondent plus à l'évolution des charges et des réseaux électriques. En effet, les méthodes dites « classiques » de filtrage ou de dépollution des réseaux électriques présentent un certain nombre d'inconvénients. Le plus important d'entre eux est sans doute le fait d'être sensible aux évolutions de l'environnement. Ils voient leur efficacité baisser avec les variations des perturbations (variation des fréquences et des amplitudes des harmoniques).
- La seconde raison fait suite à l'apparition de nouveaux composants à commutation forcée, comme les transistors bipolaires, les thyristors GTO et les transistors IGBT qui a permis de réaliser de nouvelles structures qui assurent le contrôle de la forme d'onde de la phase du courant d'entrée. Le but de ces filtres est de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à compenser les perturbations responsables de la dégradation des performances des équipements et installations électriques. Ainsi le filtrage actif tend à annuler les courants harmoniques en injectant dans la source perturbatrice des courants harmoniques d'amplitudes identiques, mais en opposition de phases à l'aide d'un pont onduleur. A cet effet, une mesure du courant de la charge non linéaire permet de connaître le courant à fournir.

Alors, Les solutions de dépollution traditionnelle ne répondant plus à l'évolution des réseaux électriques et des charges à protéger, comme nous venons de le décrire précédemment, d'autres solutions modernes ont été proposées.

II.5.2 Dépollution des courants perturbateurs

La première solution de dépollution consiste à fabriquer la charge la moins polluante possible, comme le pont redresseur dodécaphasé, de manière à réduire le taux d'émission d'harmoniques. Les appareils à prélèvement sinusoïdal sont aussi proposés pour la compensation des harmoniques et de la puissance réactive [26]. Cependant, ces solutions entraînent un coût supplémentaire et demandent plus que le savoir-faire habituel pour les mettre en œuvre. De plus, ces solutions ne résolvent pas les problèmes causés par les charges polluantes qui existent sur le marché.

Afin d'accompagner l'évolution des contraintes du fournisseur et du consommateur sans imposer un changement aux installations, une famille de filtres actifs parallèles a été proposée comme une solution de dépollution des perturbations en courant [27].

II.5.3 Dépollution des tensions perturbatrices

D'autres solutions modernes pour la compensation des creux de tension se basent sur l'utilisation de dispositifs de compensation à réserve d'énergie comme les ASIs (Alimentation Sans Interruption) [28]. Ces dispositifs sont intercalés en série entre le réseau polluant et l'installation à désensibiliser pour assurer une fourniture de l'énergie électrique même pendant les creux de tension ou les coupures brèves. Le problème est la limitation en puissance de ces dispositifs et leur autonomie qui n'est pas toujours adaptée à la durée des creux de tension ou aux coupures brèves.

Afin de réaliser une solution flexible universelle de dépollution de toutes les perturbations de tension des réseaux électriques, une famille de filtres actifs séries a été proposée [29].

II.5.4 Convertisseurs «propres»

Qu'il s'agisse de redresseurs, de chargeurs de batteries, de variateurs de vitesse pour moteur à courant continu ou de convertisseurs de fréquence, l'élément en relation directe avec le réseau reste un « redresseur ». C'est ce même composant, et plus généralement l'étage d'entrée (puissance et commande), qui détermine le comportement harmonique du système complet [30].

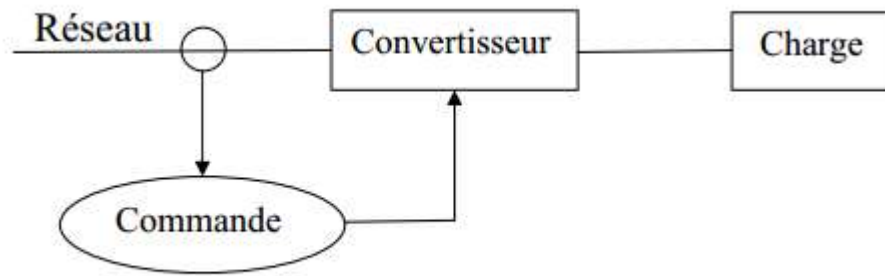


Figure II. 8 Convertisseur « propre »

II.5.4.1 Redresseur à commande MLI

Contrairement aux redresseurs classiques, les redresseurs MLI sont réalisés à l'aide de semi-conducteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture. La possibilité de commande à l'ouverture permet un contrôle total du convertisseur, parce que les interrupteurs peuvent être commutés, selon les besoins, aussi bien à la fermeture qu'à l'ouverture avec une fréquence assez élevée. Le redresseur de tension fonctionne en gardant la tension du bus continu à une valeur de référence désirée, en utilisant une commande en boucle fermée, comme montré dans la figure ci-dessous [31] .

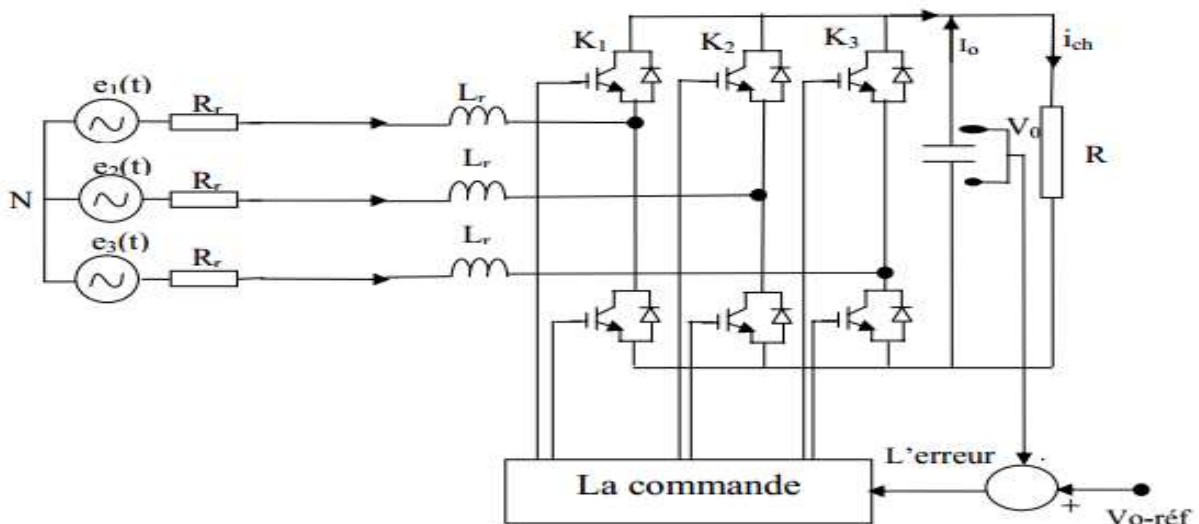


Figure II. 9 Redresseur triphasé de tension

. Pour accomplir cette tâche, la tension du bus continu V_0 est mesurée et comparée avec une référence V_{0-ref} , le signal d'erreur produit de cette comparaison est employé pour commuter les six interrupteurs du redresseur à la fermeture et à l'ouverture. De cette façon, la puissance peut s'écouler dans les deux sens selon les conditions sur la tension du bus continu V_0 mesurée aux bornes du condensateur C.

Quand le courant i_{ch} est positif (fonctionnement redresseur), le condensateur C est déchargé, et le signal d'erreur demande au bloc de commande plus de puissance de la source alternative. Le bloc de commande prend la puissance de la source alternative en produisant un signal MLI approprié pour les six interrupteurs. De cette façon, un écoulement de courant de la source alternative au côté continu, et la tension de condensateur est récupéré. Inversement, quand i_{ch} devient négatif (fonctionnement onduleur), le condensateur C est surchargé, et le signal d'erreur demande au bloc de commande pour décharger le condensateur, et la puissance retourne à la source alternative. La commande MLI non seulement peut contrôler la puissance active, mais également la puissance réactive, ce type du redresseur permet la correction du facteur de puissance. En outre, les formes d'onde des courants de la source peuvent être maintenues comme presque sinusoïdales, ce qui réduit la distorsion de la source.

II.5.5 Compensation active des harmoniques

Cette pollution a pour origine deux sources, les harmoniques provenant du côté charge qui se comporte comme des sources de courant harmonique i_h et ceux provenant de côté réseau qui sont des sources de tension harmonique V_h . Selon différentes conditions et différents objectifs, plusieurs approches du filtrage sont envisageables :

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

Une commande adéquate d'un onduleur lui permet d'opérer comme un filtre actif. En effet, en générant des courants ou des tensions harmoniques, l'onduleur peut être utilisé pour la dépollution du réseau. Il peut être connecté au réseau en série ou en parallèle selon qu'il compense les tensions ou les courants harmoniques [30].

Pour fournir aux consommateurs une bonne qualité de l'énergie électrique, même dans les conditions de fonctionnement les plus perturbées, les filtres actifs sont proposés comme des solutions avancées de dépollution des réseaux électriques. En effet, ces solutions peuvent

s'adapter aux évolutions de la charge et du réseau électrique et ceci sans toucher aux installations du fournisseur d'énergie et du consommateur

II. 6 FILTRES ACTIFS

L'apparition de nouveaux composants semi-conducteurs, comme les thyristors GTO et les transistors IGBT, a permis d'envisager de nouvelles solutions de compensation des perturbations des réseaux électriques. Les filtres actifs constituent une alternative intéressante aux solutions classiques. Flexibles car auto-adaptatifs, ils viennent s'ajouter à des structures déjà existantes de convertisseurs. Ils peuvent également être utilisés comme complément aux solutions traditionnelles de dépollution. Le rôle d'un filtre actif est de compenser en temps réel les perturbations, en tout ou en partie, présentes dans les réseaux électriques.

Dans cette partie du chapitre, nous allons introduire les principales structures, proposées dans la littérature, à savoir les filtres actifs parallèle, série, combiné parallèle-série et les structures hybrides actif-passif.

II. 6.1 Le filtre actif parallèle (F.A.P)

II. 6.1 .1 Principe de fonctionnement

Le filtre actif connecté en parallèle sur le réseau, comme le montre la Fig. I.6, est le plus souvent commandé comme un générateur de courant [32], [26].

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

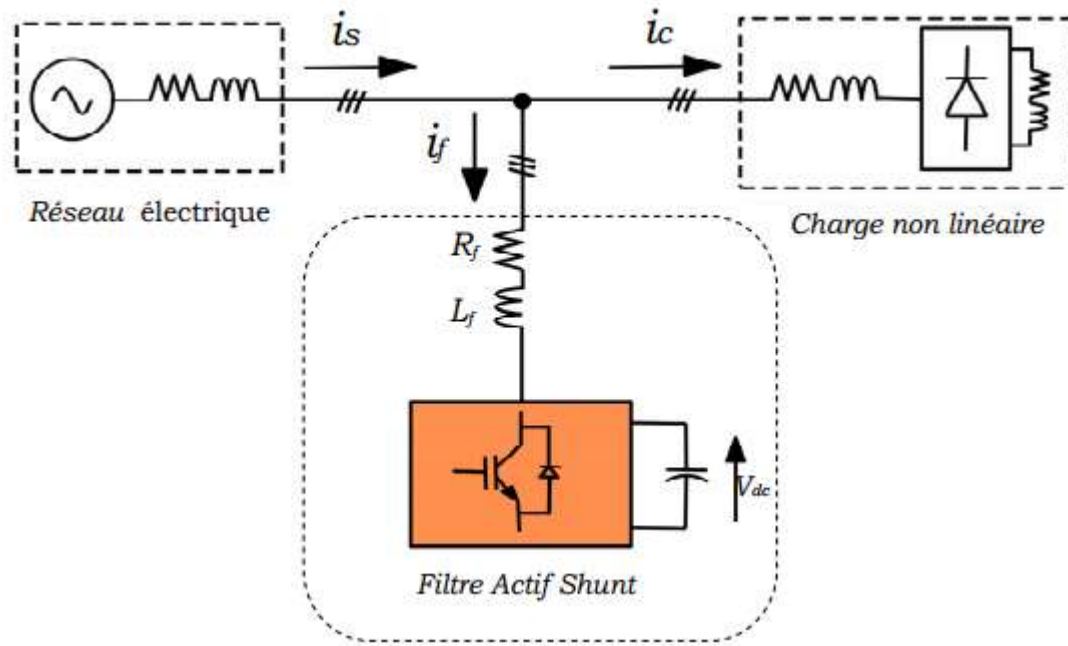


Figure II. 10 Filtre actif parallèle (Shunt) type source de tension

II. 6.1.2 Mise en œuvre

Les premiers principes de fonctionnement des filtres actifs parallèles ont été présentés dans la littérature dès le début des années 1970 [33]. En 1976, une première famille de filtre actif parallèle a été conçue à partir d'onduleurs à transistors de puissance commandés en MLI [27]. Ces premiers dispositifs de puissance étaient alors proposés pour la seule compensation des courants harmoniques. Cependant, à cette époque, il était encore difficile de concevoir ce type de système pour des applications industrielles. En effet, dans ces années-là, il était presque impossible de trouver, sur le marché, des interrupteurs de puissance capables de fonctionner aux fréquences de commutation et aux niveaux de puissance exigés par la réalité industrielle. Cette barrière technologique sera franchie, dès 1977, lors de la conception d'un premier prototype de filtre actif parallèle à base de thyristors à commutations naturelles pour la compensation de courant harmonique [34]. Cependant, l'application des onduleurs à base de thyristor a tout de suite posé le problème de la génération non désirée de composantes injectées sur le réseau à la fréquence de commutation. La même raison a également empêché l'utilisation de compensateurs statiques parallèles à thyristors, lesquels avaient été conçus pour la compensation conjointe de la puissance réactive et des courants déséquilibrés [35].

Au cours des années 1980, des progrès importants dans le domaine des semi-conducteurs ont permis de développer de nouveaux composants de puissance associant hautes fréquences de

commutation et fortes puissances. Profitant de ces avancées, et de l'avènement des interrupteurs de puissance du type GTO et IGBT, de nombreux onduleurs de puissance, commandés en MLI, ont pu être conçus en vue de répondre aux contraintes industrielles de conception des filtres actifs parallèles [36], [37]. Ainsi, ces derniers ont commencé à être commercialisés et installés à travers le monde, et plus spécialement dans les pays les plus industrialisés comme le Japon. Ces premiers prototypes ne compensaient alors que les perturbations harmoniques de courant. Suite à ces premiers développements, d'autres types de filtre actif parallèle ont pu être réalisés pour compenser à la fois la puissance réactive, et/ou les harmoniques et les déséquilibres de courant [38]. Actuellement, les filtres actifs parallèles sont essentiellement installés par les consommateurs industriels. L'évolution future de ces dispositifs de puissance pourrait autoriser le fournisseur d'énergie à prendre un rôle plus important, en lui permettant de les installer lui-même. Cette approche permettrait d'amortir la propagation des harmoniques causées par la résonance, laquelle peut être observée entre les inductances du réseau et les batteries de condensateur installées pour améliorer le facteur de puissance.

De même, des filtres actifs parallèles installés par le fournisseur auraient aussi pour objectif de réduire la distorsion harmonique de tension en amont, côté réseau électrique.

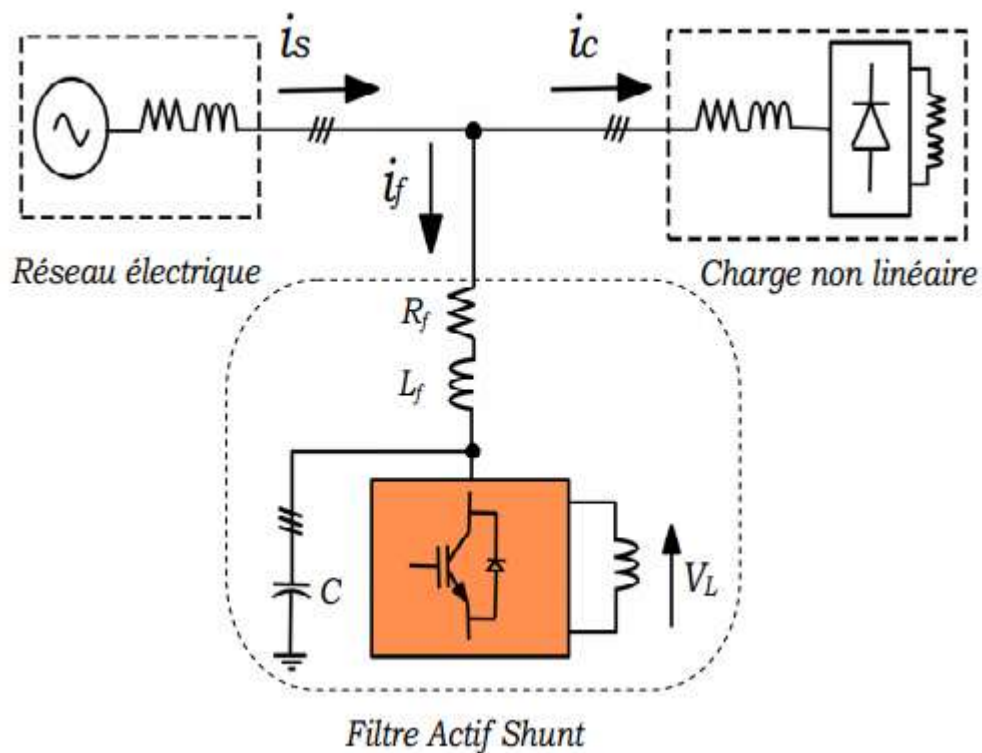


Figure II. 11 Filtrage Actif shunt type source de courant

Il se compose d'un commutateur de courant avec une inductance côté continu et un filtre de raccordement capacitif côté réseau.

Actuellement, en dépit des travaux de recherche basés sur le commutateur de courant, l'onduleur de tension est le plus préféré à cause de son meilleur rendement, de son faible coût et de son volume plus réduit que celui de l'onduleur de courant. Par ailleurs, les modules à $IGBT_S$ disponibles actuellement sur le marché sont bien adaptés aux onduleurs de tension car en général une diode en antiparallèle est rajoutée pour chaque IGBT. Le commutateur de courant exige en série avec chaque IGBT une diode anti-retour dans le but de sa protection. De plus, un aspect vient clore provisoirement le choix : le commutateur de courant ne peut pas être utilisé avec des topologies multi-niveaux classiques [39] .

II.6.2 Filtre actif shunt à quatre fils

Un réseau triphasé à quatre fils (avec le neutre) peut alimenter plusieurs charges monophasées. Ces dernières peuvent causer un courant harmonique excessif dans le neutre, une surcharge de la puissance réactive et un déséquilibre. Pour réduire ces problèmes, des compensateurs à quatre fils ont été développés dans les références [39] .

II.6.2.1 Filtre actif de type source de tension à quatre fils avec un condensateur à point milieu

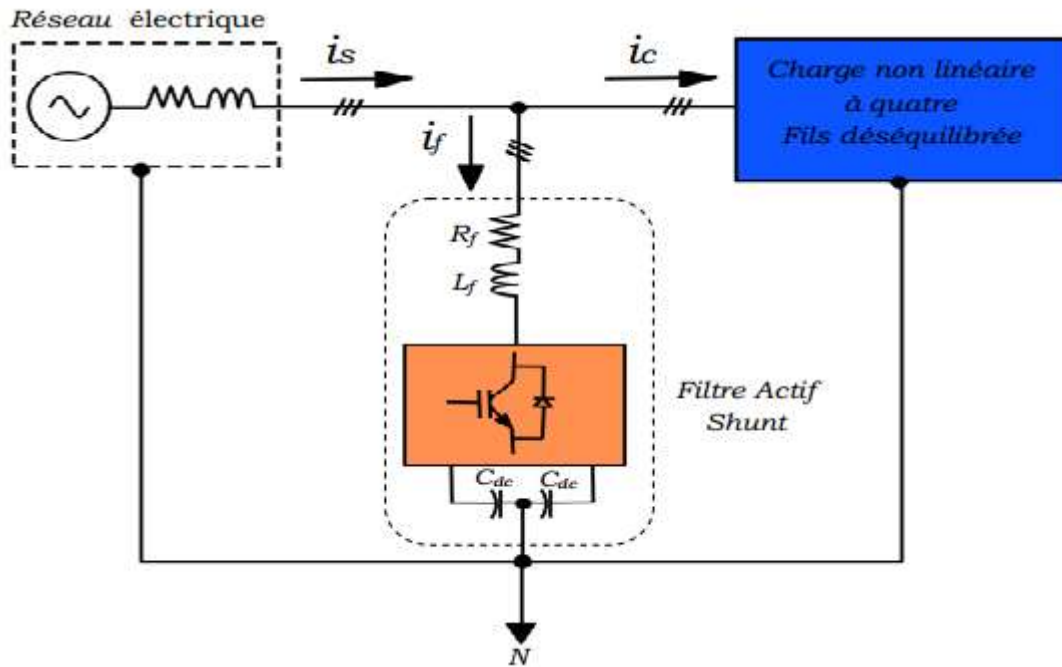


Figure II. 12 Filtre Actif shunt quatre fils avec un condensateur à point milieu

La topologie du filtre actif shunt de type source de tension à quatre fils avec un condensateur à point milieu est illustré par la figure I.10. Cette topologie est employée pour des puissances réduites car le courant du neutre traverse les condensateurs [40].

II.6.3 Le filtre actif série (F.A.S)

II.6.3.1 Principe de fonctionnement

Le filtre actif série se comporte dans ce cas, comme le montre la Fig. II.13, comme une source de tension qui s'oppose aux tensions perturbatrices (creux, déséquilibre, harmonique) venant de la source et également à celles provoquées par la circulation des courants perturbateurs à travers l'impédance du réseau [41] Ainsi la tension aux bornes de la charge à protéger est purement sinusoïdale.

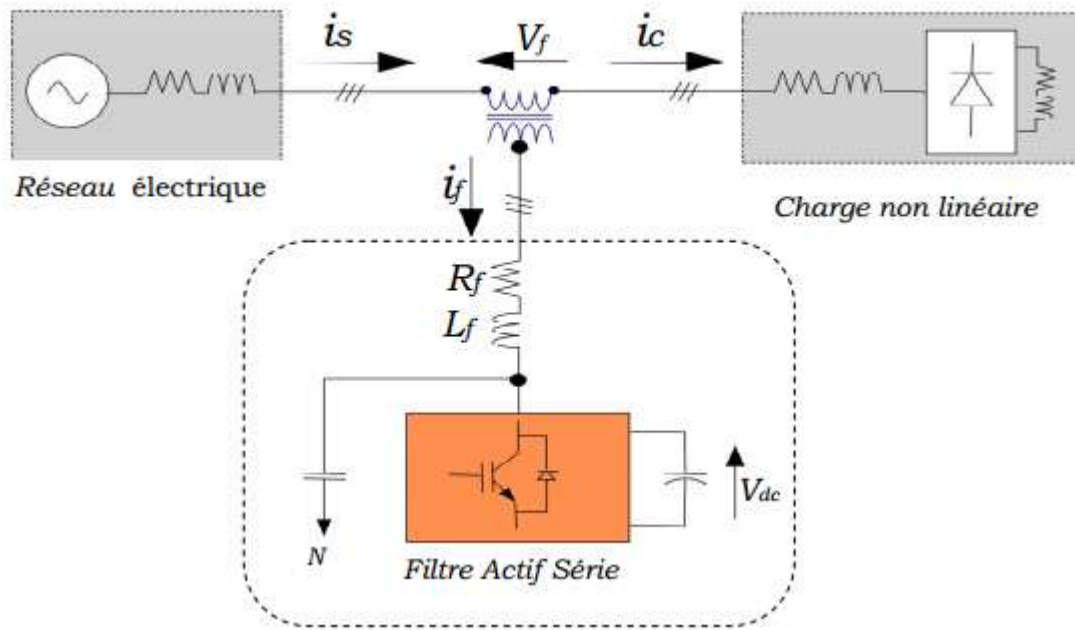


Figure II. 13 Filtre actif série

II.6.3.2 Mise en œuvre

Le filtre actif Série (F.A.S) est une solution adaptée à la compensation des tensions perturbatrices, harmoniques, déséquilibrées et des creux de tension. Ces perturbations trouvent généralement leurs origines dans le réseau lui-même mais peuvent parfois être provoquées par les charges elles-mêmes.

En 1976, une famille de filtres actifs séries avec des onduleurs à transistors contrôlés en MLI a été présentée [27]. Un compensateur statique pour le rééquilibrage de la tension du réseau électrique a été proposé en 1985. La génération, par l'onduleur à thyristors, des composantes non désirées, ayant une faible fréquence de commutation, a découragé l'avancement pratique de cette solution.

En 1990, un compensateur de tension à base d'onduleur de tension triphasé a été proposé pour compenser le déséquilibre de tension de réseau électrique [42]

Depuis, beaucoup de travaux ont été consacrés à l'amélioration de la qualité de compensation du déséquilibre de la tension du réseau.

II.6.4 Filtre actif multiniveaux

Au cours des dernières années, et afin d'améliorer les performances des filtres, les onduleurs multiniveaux sont introduits dans le domaine de moyenne tension et grande puissance, en raison de leurs divers avantages tels que [43] [44]:

- ✓ Les performances spectrales des formes d'onde des grandeurs de sortie d'un onduleur multiniveaux sont supérieures à celles des onduleurs à deux niveaux.
- ✓ La tension des dispositifs existants peut être augmentée plusieurs fois sans complication au niveau des tensions statiques et dynamiques. Les convertisseurs utilisés dans l'industrie sont :
 - FLC : F Lying Capacitor, introduit par T.Meynard et H.Foch en 1992 amélioré, par les mêmes auteurs, par une autre structure en 2002. Cette structure proposé pour résoudre d'une part le problème de balancement de tension, et d'autre part le nombre excessif de diodes. Le principal désavantage de cette topologie c'est la commande du système devient difficile avec l'augmentation des niveaux.
 - NPC : Neutral Point Clamped, (connu aussi onduleur multi niveaux à diode de bouclage), c'est une structure qui a été introduite par Nabae en 1981, depuis, plusieurs travaux ont été réalisés sur ce type de convertisseur [3-4]. Pour l'obtention d'une tension de N niveaux, N-1 capacités, et L diodes ($L = 3(N-1) (N-2)$). Les tensions aux bornes des condensateurs sont toutes égales à $E/(N-1)$ tel que E est la tension totale du bus continu. Pour N=5, on a besoin de 36 diodes, cependant ces diodes non seulement augmentent le coût de ce type du convertisseur mais créent un problème d'encombrement et l'inégalité des tensions inverses supportées par les diodes.
 - SCHB : Series Cascaded H-Bridge introduit par Hammond en 1997, une évolution a été proposée en 2006 par Ceglia et al. La modularité de sa structure permet facilement son extension à un nombre élevé de cellules sur chaque phase, sans complexité supplémentaire ; Du point de vue du nombre de composants, la valeur de tension de sortie obtenu à chaque phase, de la simplicité et de la facilité de commande, l'onduleur en cascade paraît être la solution multiniveaux la plus avantageuse, surtout lorsque le nombre de niveaux devient important. Dans la suite de notre étude, on utilisera cette topologie.

II.6.5 Les inconvénients des filtres actifs :

Toutefois, le filtrage actif présente quelques inconvénients :

- Le filtrage actif n'est possible que dans le cas des réseaux de faible puissance ;
- Il penne la compensation de l'énergie réactive, mais à un coût très élevé par rapport au filtrage passif ;
- Son coût est beaucoup plus élevé que celui du filtrage passif.

II.6.6 La combinaison parallèle-série actifs (UPQC)

La combinaison parallèle-série actifs, aussi appelée Unified Power Quality Conditioner (UPQC), résulte de l'association des deux filtres actifs parallèle et série, comme le montre la Fig. II.15. Profitant des avantages des deux filtres actifs, l'UPQC assure un courant et une tension sinusoïdaux du réseau électrique à partir d'un courant et d'une tension perturbés de celui-ci [21].

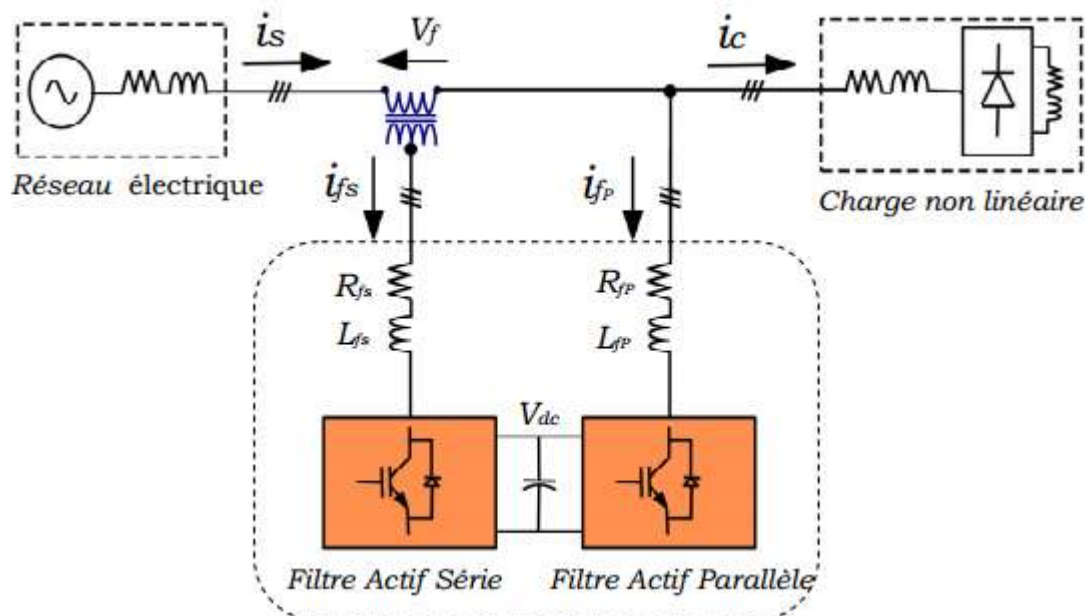


Figure II. 14 Combinaison parallèle-série actifs (UPQC)

Cette configuration est considérée comme un filtre actif idéal qui élimine les harmoniques de tension et de courant. Elle est capable de délivrer une puissance propre sous des pollutions harmoniques assez élevées, de compenser le déséquilibre de tension et de courant. Ce pendant son cout est assez élevé et sa commande est complexe du fait qu'il y a beaucoup de semi-conducteurs qui rentrent en jeu.

II.7 Filtre hybride

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

Il est rappelé que le filtre actif shunt est destiné à la compensation des harmoniques engendrés par des charges type source de courants harmoniques et le filtre actif série est capable de compenser les harmoniques des charges type source de tensions harmoniques [11].

Cependant, ces filtres actifs utilisés seuls comportent certains inconvénients :

- Le faible rendement et la limitation de la bande passante à haute puissance détériorent la qualité de la compensation de ces filtres.
- Les harmoniques d'ordres supérieurs dus au fonctionnement des interrupteurs du filtre actif peuvent être absorbés par des filtres passifs branchés sur le même réseau sans que cette compensation supplémentaire soit prévue lors de la conception de ces filtres passifs.
- Un filtre actif shunt doit supporter la tension du réseau au point de raccordement et un filtre actif série est traversé par le courant total de ligne.

De ce fait, les filtres hybrides traitent et mitigent les problèmes rencontrés avec les filtres passifs et avec les filtres actifs purs. Par conséquent, les filtres actifs hybrides améliorent les caractéristiques de compensation des filtres passifs ce qui peut conduire à une réduction de la puissance du filtre actif.

D'autre part, les filtres hybrides peuvent être classés selon le nombre d'éléments mis en œuvre dans la topologie étudiée (filtres actifs et filtres passifs), le système traité (monophasé, triphasé à trois fils et triphasé à quatre fils) et le type d'onduleur utilisé (structure de tension ou de courant).

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

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

II.8 Conclusion

Plusieurs solutions traditionnelles et modernes de dépollution ont été présentées dans ce chapitre. La solution classique à base de filtres passifs est souvent pénalisée en termes d'encombrement et de résonance. De plus, les filtres passifs ne peuvent pas s'adapter à l'évolution du réseau et aux charges polluantes.

Récemment, en plus du filtrage des harmoniques, les filtres actifs parallèles et séries et leur combinaison, sont étudiés pour la compensation de tous les types de perturbations susceptibles d'apparaître dans un réseau électrique BT. En effet, profitant des progrès réalisés dans le domaine de l'électronique de puissance, ces solutions peu encombrantes n'occasionnent aucune résonance avec les éléments passifs du réseau et font preuve d'une grande flexibilité face à l'évolution du réseau électrique et de la charge polluante.

- Le filtre actif parallèle peut être installé pour compenser toutes les perturbations de courant comme les harmoniques et les déséquilibres.

- Le filtre actif série peut être installé pour compenser toutes les perturbations de tension comme les harmoniques, les déséquilibres et les creux de tension.

Chapitre III

Etude et Modélisation d'un filtre hybride multiniveaux

III.1 Introduction

Dans ce chapitre on va voir les topologies de filtres hybrides associées à différentes stratégies de commandes afin d'améliorer la qualité de l'énergie mais surtout pour réduire le dimensionnement du filtre actif de puissance et par conséquent son coût .Puis , on présentera une étude plus détaillée du filtre actif , de sa structure et de sa commande, afin l'identification des tensions de références en travaillant principalement avec la méthode des puissances instantanées .

III.2 Configuration des filtres hybrides

Les filtres hybrides peuvent être classés selon le nombre d'éléments mis en œuvre dans la topologie étudiée (filtres actifs et filtres passifs), le système traité (monophasé, triphasé trois fils et triphasé quatre fils) et le type d'onduleur utilisé (structure tension ou courant). La figure III.1 présente quelques configurations de filtres hybrides selon le type de système étudié et les éléments associés [45] .

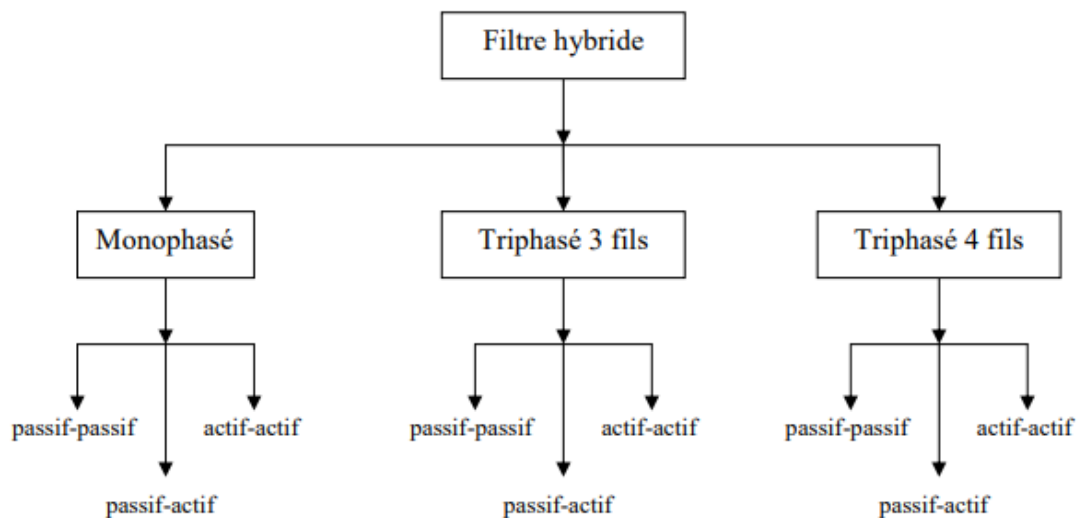


Figure III. 1 Classification des filtres hybrides

III.2 Filtre hybride combinant filtres actif et passif

III.2.1 Le filtre actif série avec des filtres passifs parallèles

Le rôle du filtre actif série dans ce cas est d'empêcher les courants harmoniques de circuler vers le réseau et de les obliger à passer par les filtres passifs raccordés à leurs fréquences comme le montre la Figure III.2. [46].

À la fréquence fondamentale, le filtre actif laisse passer un courant égal à la somme du courant fondamental de la charge avec le courant fondamental du filtre passif.

À la fréquence des harmoniques le filtre actif s'impose comme isolateur (circuit-ouvert) obligeant ainsi la totalité des courants harmoniques de la charge à traverser le filtre passif. La tension harmonique aux bornes du filtre passif est considérée comme un inconvénient cette topologie. D'autres inconvénients se manifestent, notamment l'isolation et la protection du filtre actif, et l'influence des dysfonctionnements du filtre actif sur la charge. [47]

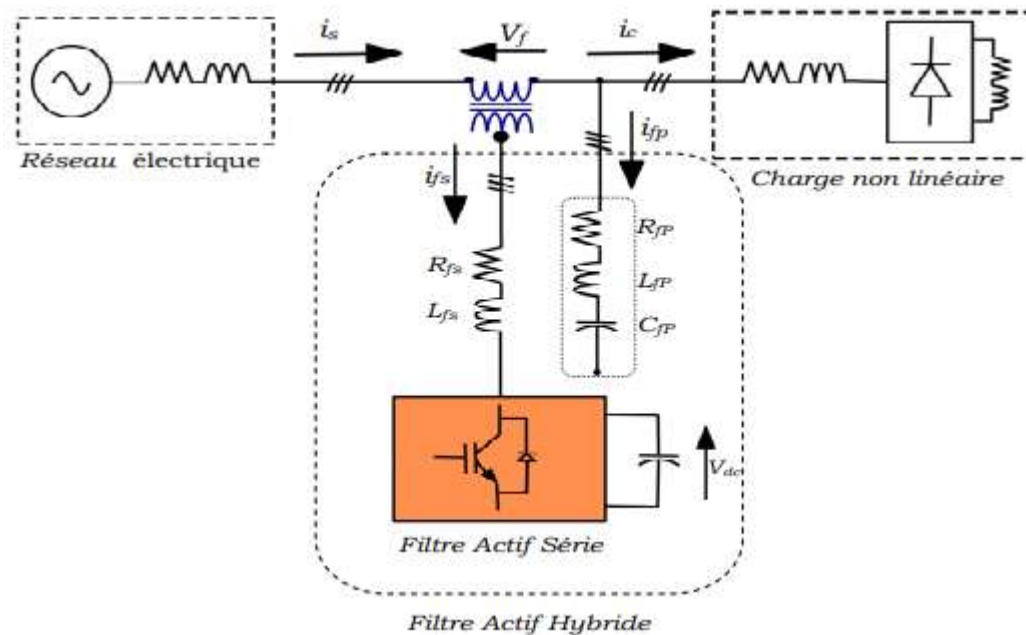


Figure III. 2 filtre actif série avec filtre passif parallèle

III.2.2 Filtre hybride shunt avec transformateur

Le principe de fonctionnement de cette configuration, présentée par la Figure III.3, est le même que le précédent avec l'avantage de réduire encore le dimensionnement du filtre actif série, car le courant qui le traverse est moins important. De plus, le filtre actif série est à l'abri d'un

éventuel court-circuit de la charge. En effet, cette topologie n'est pas adaptée pour traiter un réseau à fort taux de pollution de la tension amont; néanmoins, ses performances minimisent le dimensionnement des filtres passifs et complètent leurs effets. Inversement, dans une installation existante, le rajout d'un compensateur actif de puissance réduite permet d'améliorer l'efficacité des filtres passifs existants. Dans cette configuration, le compensateur n'agit que sur les courants harmoniques, et améliore l'efficacité des filtres passifs en évitant l'amplification des tensions harmoniques qui sont en amont aux fréquences d'antirésonances des filtres passifs. De même, il atténue fortement les courants harmoniques entre la charge et la source par abaissement de l'impédance globale (filtres passifs plus compensateurs actifs). En plus, puisque le compensateur actif n'est pas traversé par la totalité du courant réseau, son dimensionnement (et en particulier celui du coupleur magnétique) peut être réduit. Cette structure est donc bien adaptée à traiter les réseaux de puissances et tensions élevées, tout en assurant le réphasage des composantes fondamentales. Son principal inconvénient est que les filtres passifs sont définis en fonction de la nature de chaque charge ce qui nécessite toujours une étude préalable.

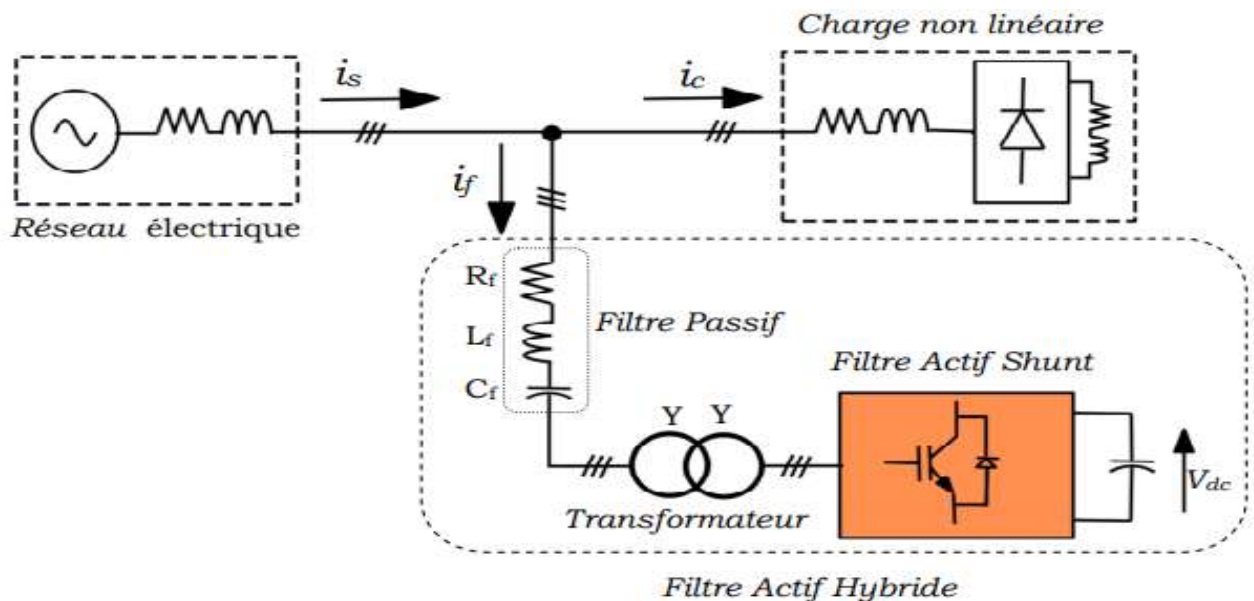


Figure III. 3 Filtre actif hybride avec transformateur

III.2.3 Filtre hybride shunt sans transformateur

La topologie du filtre hybride shunt triphasé sans transformateur est illustrée à la Figure III.4. Le filtre hybride shunt triphasé est composé d'un filtre passif accordé à la 5^{ème} ou 7^{ème} harmonique, et un filtre actif de dimensionnement réduit formé par un onduleur de type source de tension. Le filtre actif joue un rôle essentiel en réduisant les harmoniques de courant de

source. Dans ce cas, le filtre passif se comporte comme une faible impédance à la fréquence d'accord et comme une grande impédance à la fréquence fondamentale [48] .

Ce système présente deux avantages :

- le dimensionnement en puissance du filtre actif est encore plus réduit du fait que le courant qui le traverse est plus faible
- le filtre actif est à l'abri d'un éventuel court-circuit de la charge.

Dans cette configuration, le compensateur n'agit que sur les courants harmoniques, et améliore l'efficacité des filtres passifs en évitant l'amplification des tensions harmoniques qui sont en amont aux fréquences d'antirésonances des filtres passifs. De même, il atténue fortement les courants harmoniques entre la charge et la source par abaissement de l'impédance globale (filtres passifs plus compensateurs actifs). En plus, puisque le compensateur actif n'est pas traversé par la totalité du courant réseau, son dimensionnement (et en particulier celui du coupleur magnétique) peut être réduit. Cette structure est donc bien adaptée à traiter particulièrement les réseaux de puissances et tensions élevées. Pour toutes ces raisons, nous avons retenu cette topologie pour le reste de notre étude concernant le filtre actif hybride.

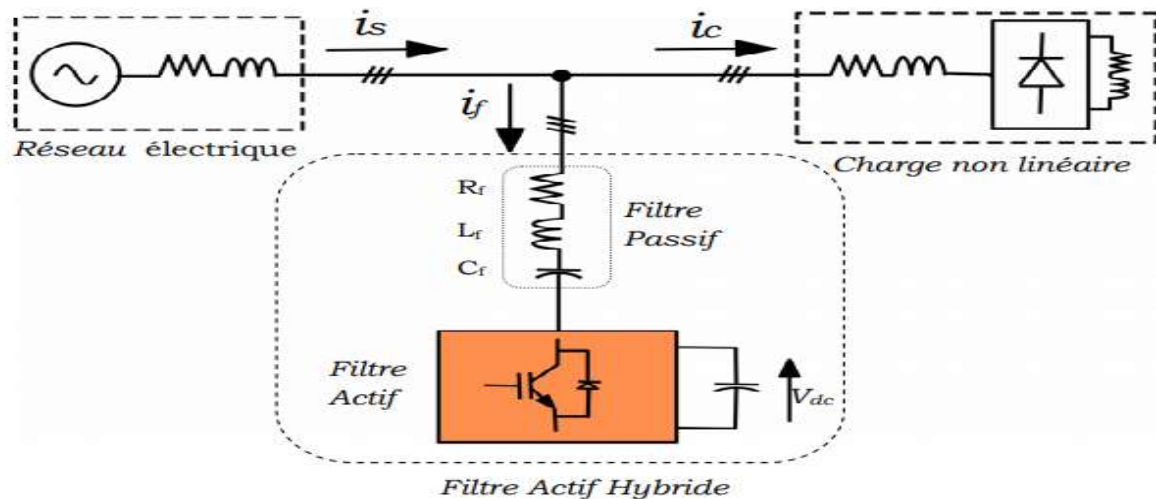


Figure III. 4 Filtre actif hybride sans transformateur

III.2.4 Le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle

Le rôle du filtre actif parallèle dans cette configuration, montrée en Figure III.5, est la compensation des courants harmoniques de basses fréquences émis par la charge polluante [49]. Alors que le filtre passif accordé sur une fréquence élevée, élimine les harmoniques

hautes fréquences y compris ceux créés par le filtre actif parallèle. En outre, cette combinaison permet d'introduire un bon amortissement pour éviter le problème d'antirésonance [50].

Ici encore le filtre actif et le filtre passif complètent leurs actions. Il peut être intéressant de limiter l'action du compensateur actif aux seuls rangs non traités par les filtres passifs.

Cette structure permet selon le cas :

- D'améliorer la dépollution obtenue avec les filtres passifs seuls;
- De limiter le nombre de rangs de filtres passifs;
- D'améliorer les performances du compensateur actif seul (pour une même puissance efficace du compensateur actif).

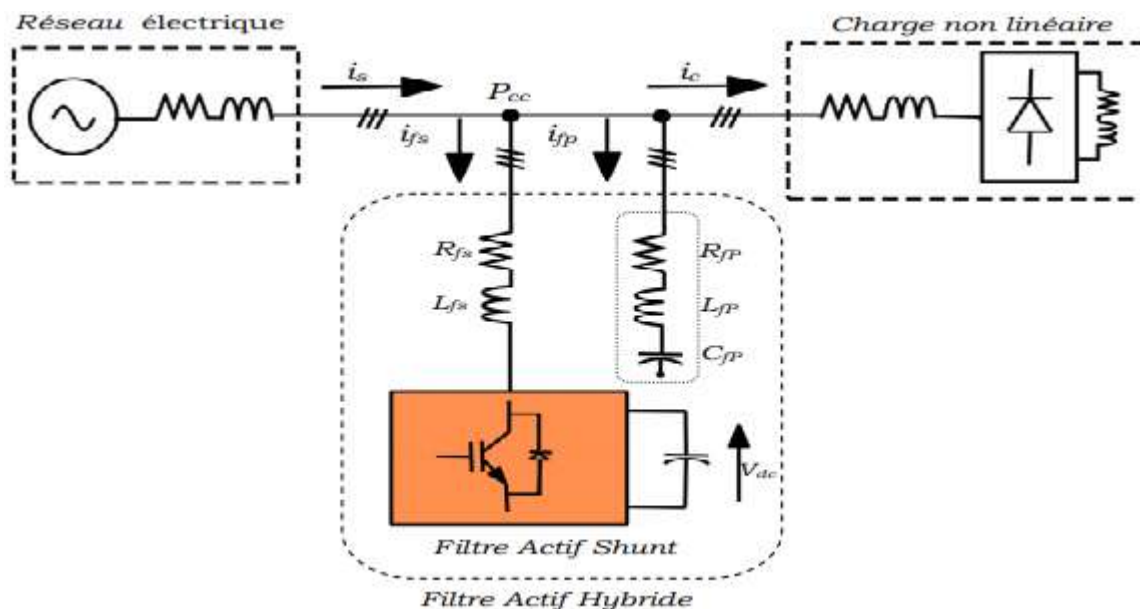


Figure III. 5 Filtre hybride composé d'un filtre actif shunt et un filtre passif parallèle

III.2.5 Association série d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif

Dans cette configuration, les deux filtres actif et passif sont directement connectés en série, sans l'intermédiaire d'un transformateur. L'ensemble est connecté en parallèle sur le réseau comme le décrit la figure III.6

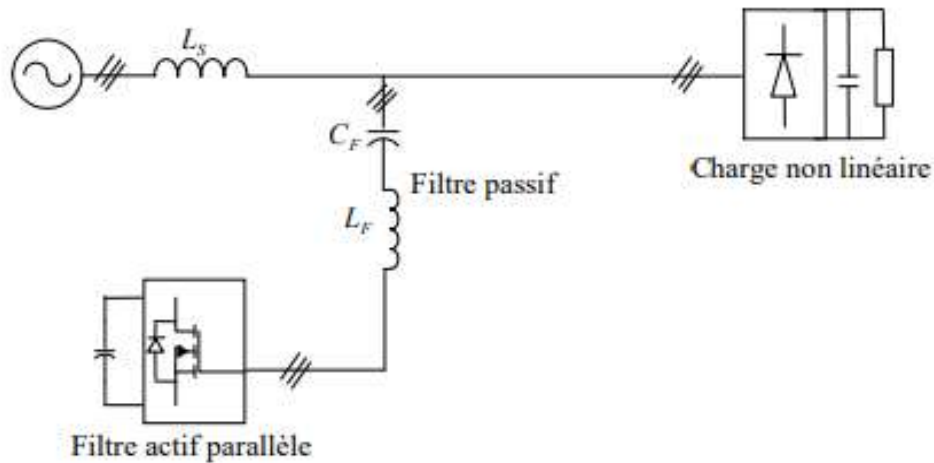


Figure III. 6 Association série d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif

Dans ce cas, le filtre passif se comporte comme une impédance faible à la fréquence d'accord et comme une grande impédance à la fréquence fondamentale. Ce système présente deux avantages : le dimensionnement en puissance du filtre actif est encore plus réduit du fait que le courant qui le traverse est plus faible et le filtre actif est à l'abri d'un éventuel court-circuit de la charge [21].

III.2.6 Association d'un filtre actif série et d'un filtre passif série

Cette structure permet de réduire les risques d'antirésonance entre les éléments des filtres passifs et l'impédance du réseau. Dans ce cas, le filtre actif série agit comme une résistance vis-à-vis des courants harmoniques et les oblige à circuler dans le filtre passif, tout en restant transparent à la fréquence fondamentale. La figure III.7 illustre cette topologie [51].

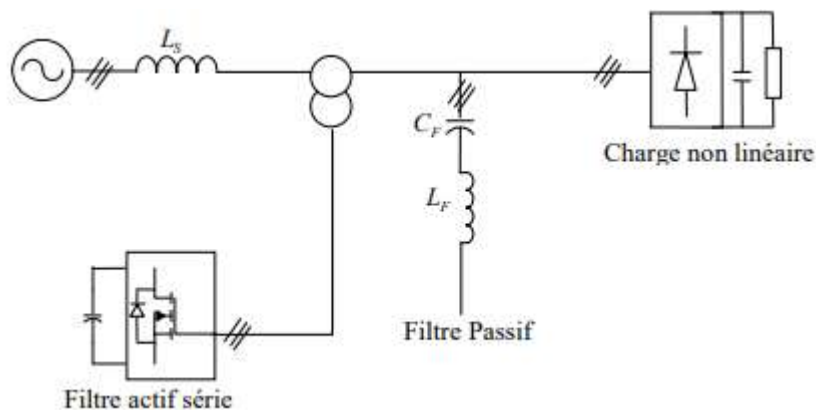


Figure III. 7 Association d'un filtre actif série et d'un filtre passif

III.3 Redresseur à MLI de tension

Le redresseur MLI de tension est simplement un onduleur de tension utilisé à l'envers permet de produire une tension continue à partir d'un réseau alternatif (comme un redresseur à diodes), mais en absorption sinusoïdale de courant, donc à facteur de puissance unitaire [52] figure III.8 Chaque interrupteur est constitué d'un IGBT (composant commandé à l'amorçage et au blocage) et d'une diode en antiparallèle. Cet interrupteur est unidirectionnel en tension et bidirectionnel en courant. Ainsi, ce convertisseur, de la part de sa structure, est réversible en courant. Il peut donc contrôler de façon instantanée la forme d'onde des courants prélevés sur le réseau [9]]. Il alimente alors une charge (active ou passive) en continu à partir d'un réseau alternatif, le courant absorbé étant sinusoïdal et, éventuellement, en phase avec la tension du réseau correspondante. Ces redresseurs sont capables de fonctionner en mode redresseurs et mode générateurs, ce qui leurs permet de contrôler l'écoulement des puissances active et réactive, dans les deux sens, sur un large spectre d'harmoniques, le redresseur à MLI de tension est préféré pour divers applications, principalement pour l'entraînement réglables de vitesse des machines électriques et l'alimentation en tension continue des charges électriques. Le seul inconvénient du redresseur à MLI, par rapport aux convertisseurs, réside essentiellement dans son prix et le nombre d'interrupteurs de puissance utilisés et sa complexité de commande pour avoir de hautes performances, la structure multiniveaux peut encore augmenter les performances du redresseur MLI.

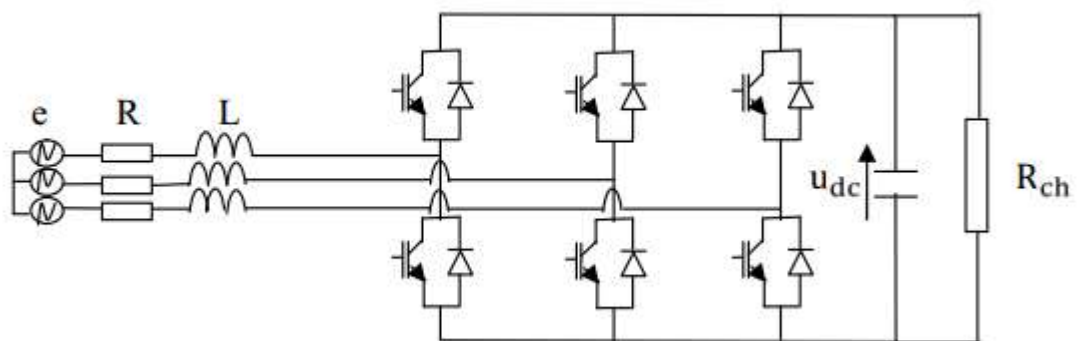


Figure III. 8 Topologie d'un redresseur triphasé à MLI de tension

III .3 Structure générale du filtre actif

Le filtre actif série est une solution pour protéger des charges sensibles contre les perturbations de tension du réseau électrique. Il s'insère entre le réseau perturbé et la charge à protéger par l'intermédiaire d'un transformateur d'injection de tension. Plusieurs structures de filtre actif série ont été proposées [12] La plus utilisée, présentée sur la Figure III.9, est composée d'une partie puissance et d'une partie contrôle-commande.

La partie puissance est constituée d'un onduleur de tension triphasé à commande MLI, d'éléments de stockage d'énergie avec un système d'alimentation DC, d'un filtre de sortie du deuxième ordre, et de trois transformateurs monophasés d'injection de tension. Le filtre actif série est protégé contre un court-circuit en aval côté charge par un système by-pass. La partie contrôle-commande comporte l'identification des tensions perturbatrices, la régulation des tensions injectées et la commande des interrupteurs de l'onduleur, souvent en MLI, comme le montre la Figure III.9.

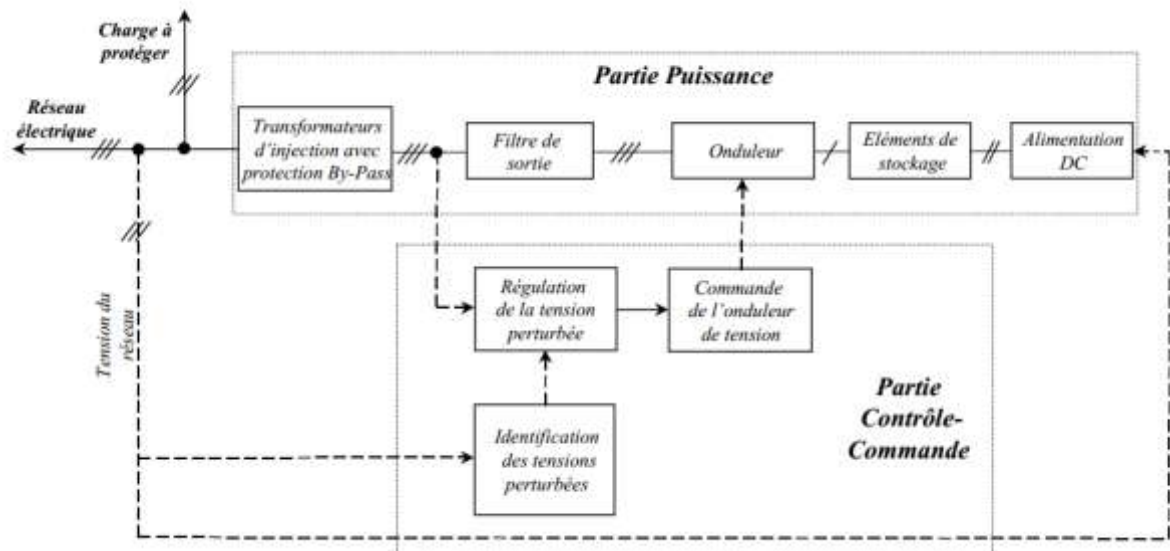


Figure III. 9 Structure générale du filtre actif série

III.3.1 Partie puissance du filtre actif série

Dans ce paragraphe, on va détailler les éléments constitutifs de cette partie de la structure. Nous commencerons par une étude de l'onduleur en passant par le filtre de sortie et en terminant par les transformateurs d'injection de tension et la protection contre les défauts côté charge.

III.3.1.1 Onduleur de tension

L'onduleur de tension fait l'interface entre deux types de source : une source de courant côté alternatif et une source de tension côté continu. La présence de ces deux sources implique de respecter, comme nous l'avons déjà fait dans le chapitre II, certaines règles de fonctionnement :

- la source de tension aux bornes de l'onduleur ne doit jamais être court-circuitée, les deux interrupteurs d'un même bras doivent donc avoir deux commandes complémentaires,
- la source de courant côté alternatif ne doit jamais être en circuit ouvert, le courant circulant doit toujours trouver un chemin libre d'où la mise en antiparallèle de diodes avec les interrupteurs.

L'onduleur de tension employé se compose de six interrupteurs repartis, d'une façon symétrique, sur trois bras à interrupteurs commandés à la fermeture et à l'ouverture (IGBT, GTO) avec des diodes en antiparallèle, comme le montre la Figure III.10.

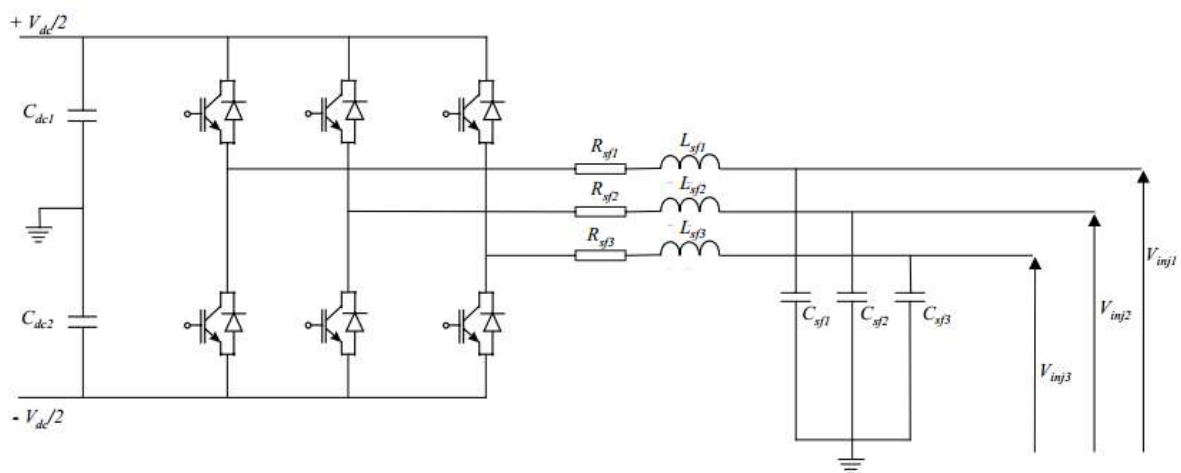


Figure III. 10 Partie puissance du filtre actif série

III.3.1.2 Système de stockage de l'énergie

La partie continue est réservée par une source de tension continue, sous forme d'un générateur à courant continu, ou bien d'un système de stockage capacitif à base des batteries, qui joue le rôle de lissage de la tension redressée par un convertisseur AC-DC traditionnel [53]. Le choix des paramètres du système de stockage (V^*_{dc} et C_{dc}) a une influence directe sur la dynamique du filtre actif série et sur ses performances de compensation. D'une part, une tension V^*_{dc} élevée améliore la dynamique du filtre actif série.

III.3.1.3 Filtre de sortie

Le filtre de sortie d'un filtre actif série est généralement un filtre passif du deuxième ordre (L_{sf} , R_{sf} , C_{sf}), comme le montre la Figure III.11. L'ensemble onduleur et filtre de sortie se comportant comme une source de tension, le filtre de sortie sert d'une part à atténuer les composantes dues aux commutations de l'onduleur, d'autre part à connecter le filtre actif au réseau électrique.

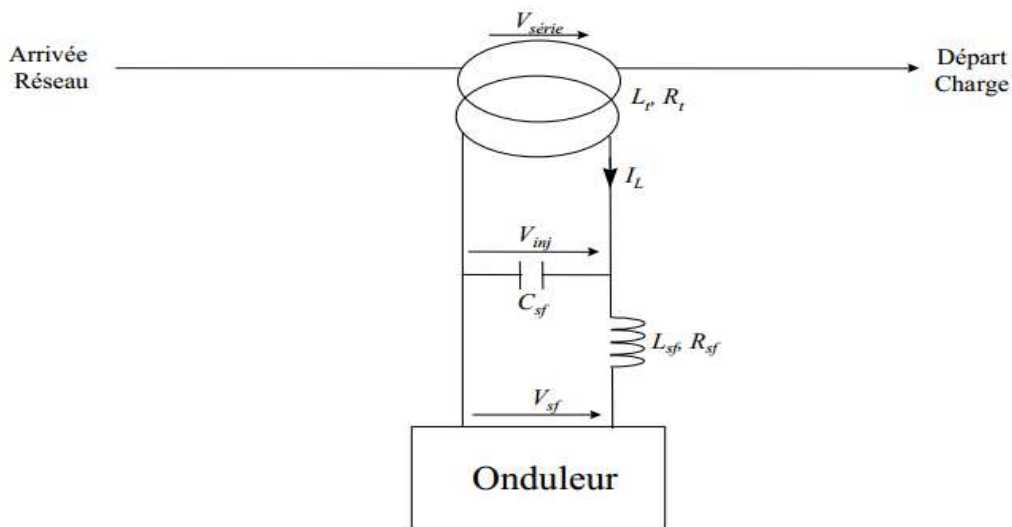


Figure III. 11 Schéma de modélisation du filtre de sortie

A partir de la Figure III.11, avec V_{sf} la tension de sortie de l'onduleur, V_{inj} la tension aux bornes du condensateur C_{sf} , et I_L le courant de la charge à protéger, les équations qui modélisent le filtre de sortie sont :

$$V_{inj}(s) = \frac{B_1(s)}{A(s)} V_{sf}(s) + \frac{B_2(s)}{A(s)} I_L(s) \dots \dots \dots (III.1)$$

$$\begin{cases} A(s) = a_1 s^2 + a_2 s + a_3 \\ B_1(s) = b_0 \\ B_2(s) = (b_{21}s + b_{22}) \end{cases} \dots \dots \dots (III.2)$$

Et :

$$\begin{cases} a_1 = L_{sf} \cdot C_{sf} \\ a_2 = R_{sf} \cdot C_{sf} \\ a_3 = 1 \\ b_0 = 1 \\ b_{21} = L_{sf} \\ b_{22} = R_{sf} \end{cases} \dots \dots \dots (III.3)$$

$(B1/A)(s)$ représente la fonction de transfert du filtre de sortie correspondant au système d'origine, et $(B2/A)(s)$ la fonction de transfert correspondant au modèle de perturbation. Ces perturbations sont causées par le passage du courant de la charge à protéger I_L .

La fréquence de résonance f_{cs} du système d'origine est donnée par la relation (III.4)

$$f_{cs} = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L_{sf} \cdot C_{sf}}} \dots \dots \dots (III.4)$$

Le filtre de sortie du deuxième ordre est dimensionné pour rejeter les composantes dues à la fréquence de commutation de l'onduleur qui vaut 12 kHz dans ce travail. Pour cela un rejet de

-55 dB, permettant de négliger les composantes hautes fréquences passant du côté réseau électrique, est obtenu pour une fréquence de 500 Hz, comme le montre la Figure III.12.

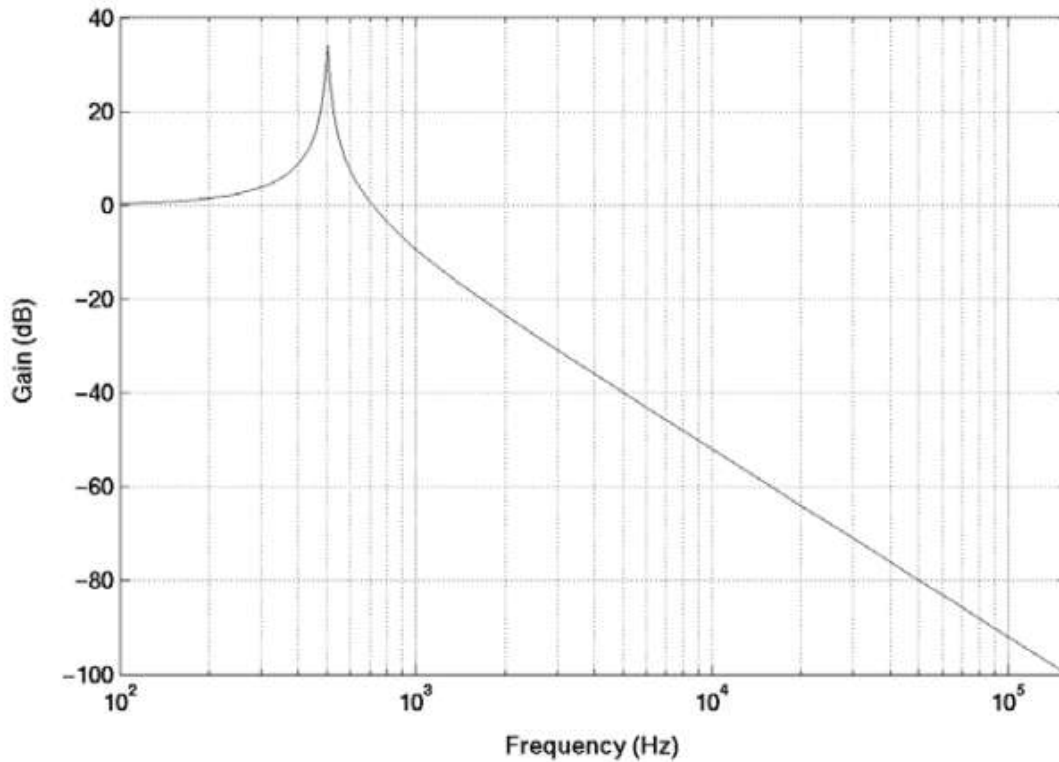


Figure III. 12 Diagramme représentant gain du filtre de sortie

La résistance d'amortissement R_{sf} est choisie pour que le facteur de qualité Q, donné par l'équation (III.5).

Soit $Q=50$.

$$Q = \frac{1}{R_{sf}} \cdot \sqrt{\frac{L_{sf}}{C_{sf}}} \dots\dots\dots(III.5)$$

III.3.1.4 Transformateurs d'injection et protection du F.A.S

Les transformateurs d'injection de tension (L_t, R_t).permettent d'injecter en série avec le réseau électrique et avec le taux de transformation souhaité la tension produite par l'onduleur Par conséquent, ces transformateurs, considérés comme des transformateurs de courant, permettent de réduire, par leurs taux de transformation, le courant de la charge traversant l'onduleur de tension. A cela s'ajoute que ces transformateurs, grâce à leurs caractéristiques magnétiques de saturation, contribuent à la protection du filtre actif série contre les défauts côté charge [42].

Les désavantages de l'emploi de ces transformateurs sont leurs coûts élevés et la chute de tension occasionnée par leurs inductances de fuite (L_t, R_t).

Le choix d'un filtre actif série sans transformateur d'injection nécessite l'emploi de trois onduleurs de tension monophasés avec trois sources continues indépendantes. Cette solution augmentant l'énergie nécessaire pour compenser les mêmes creux de tension, un filtre actif série

avec un onduleur multicellulaire et un seul bus continu a été proposé [54].

Dans ce travail, trois transformateurs d'injection de tension seront employés et dimensionnés

pour supporter le courant de la charge à protéger et la tension maximale injectée au réseau électrique. Le taux de transformation sera unitaire.

Le filtre série est protégé contre un court-circuit en aval côté charge par un système by-pass,

constitué par une impédance variante, par deux thyristors en antiparallèle en série avec une petite

résistance, et par des transformateurs à circuit magnétique saturable [42].

III.3.2 Circuit de Commande

On se propose d'étudier les éléments qui constituent la partie commande de filtre actif série. L'objectif de la commande de l'onduleur est de déterminer les instants d'ouverture et de fermeture des interrupteurs qui le composent de façon à obtenir une tension de sortie synthétisant les perturbations mais en opposition de phase [55] [56].

III.3.2.1 La commande par hystérésis

La commande par hystérésis, appelée aussi commande en tout ou rien, est une commande non linéaire qui utilise l'erreur existante entre la tension de référence et la tension produite par l'onduleur. L'erreur est comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis. Dès que l'erreur atteint la bande inférieure ou supérieure, un ordre de commande est envoyé de manière à rester à l'intérieur de la bande.

La simplicité de la mise en œuvre, est le principal avantage de cette technique. D'autre part, les commutations évoluant librement à l'intérieur de bande d'hystérésis, on ne peut maîtriser correctement le spectre haut fréquence dû aux fréquences de commutations. [57] Finalement, la rapidité du contrôle par hystérésis donne de meilleures performances

dynamiques et statiques. C'est la raison pour laquelle nous avons choisi ce type de commande pour la simulation du filtre actif série.

III.3.2.1 Méthode des puissances instantanée

L'algorithme de la théorie de puissances instantanées active et réactive pour le filtre actif série est d'utiliser les valeurs instantanées des tensions et courants mesurés. La méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées basée essentiellement sur le principe de la puissance active $p(t)$ et réactive $q(t)$ instantanées a pour but de détermination de la tension fondamentale et de la tension harmonique d'une tension du réseau perturbé.

On note respectivement :

- (v_{L1}, v_{L2}, v_{L3}) : Les tensions de la charge
- (i_{s1}, i_{s2}, i_{s3}) : Les courants de source de notre système triphasé.

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{s\alpha} & i_{s\beta} \\ i_{s\beta} & -i_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{L\alpha} \\ V_{L\beta} \end{bmatrix} \dots\dots\dots(III.8)$$

D'autre part, les puissances réelles et imaginaires peuvent être représentées comme suit :

$$\begin{cases} p = \beta/\circ + \bar{p} \\ q = \phi/\bar{q} \end{cases} \dots\dots\dots(III.9)$$

\bar{p} : est une puissance continue liée à la composante fondamentale active de la tension de source.

\bar{q} : est une puissance continue liée à la composante fondamentale réactive de la tension de source.

β' c et q_1 : sont des puissances alternatives liées à la somme des composantes harmoniques de la tension.

La compensation d'harmoniques par le compensateur actif série se fait par la génération de ces dernières [58] :

$$\begin{cases} p^* = \beta/\circ \\ q^* = \phi/\bar{q} \end{cases} \dots\dots\dots(III.10)$$

De la relation (III.10) donnant les puissances réelle et imaginaire instantanées découle l'expression suivante pour les courants :

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} & i_{s\beta} \\ i_{s\beta} & -i_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p^* \\ q^* \end{bmatrix} \dots\dots\dots(III.11)$$

$$\Delta = i_{s\alpha}^2 + i_{s\beta}^2 \dots\dots\dots(III.12)$$

$$\begin{bmatrix} V_\alpha^* \\ V_\beta^* \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} & i_{s\beta} \\ i_{s\beta} & -i_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{p} \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} & i_{s\beta} \\ i_{s\beta} & -i_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{q} \end{bmatrix} + \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} & i_{s\beta} \\ i_{s\beta} & -i_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta \partial \\ q/ \end{bmatrix} \dots\dots\dots(III.13)$$

Cette expression montre donc que l'identification des différentes composantes de la tension dans le repère (α - β) revient à séparer les termes continus et les termes alternatifs des puissances réelles et imaginaire instantanées pour obtenir la relation (III.13), donc on utilise des filtres passe-bas ou passe-haut dont la fréquence de coupure nous permettra de négliger les ondulations à sa sortie.

Pour choisir le filtre le plus adapté pour séparer la composante continue de la composante harmonique de puissance active, on note que le résidu harmonique du filtre passe bas est plus faible que celui du filtre passe haut.

Donc nous avons choisir pour l'extraction des composants continue un filtre passe bas du second ordre car moins complexe que les filtre d'ordres élevés avec une fréquence de coupure qui nous permettra de négliger les ondulations à sa sortie. La relation (III.14) permet l'extraction des tensions de référence $V_{1,2,3}^*$:

$$\begin{bmatrix} V_1^* \\ V_2^* \\ V_3^* \end{bmatrix} = \sqrt{2/3} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3/2} \\ -1/2 & -\sqrt{3/2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_\alpha^* \\ V_\beta^* \end{bmatrix} \dots\dots\dots(III.14)$$

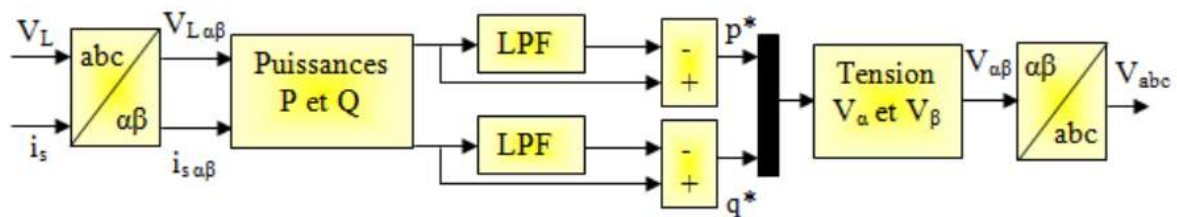


Figure III. 13 Détermination de la tension de référence par la théorie

III.4 Filtre hybride série (FHSS)

La topologie qui sera analysée ici est composée d'un filtre actif connecté en série avec l'alimentation et un filtre passif connecté en série à la charge, HSSF. Le filtre passif est accordé à la fréquence des harmoniques de tension les plus significatives. Il existe différentes topologies de filtre passif, en fonction du nombre d'énergie éléments de stockage [59], bien que, d'un point de vue pratique, certains d'entre eux soient difficiles à mettre en œuvre [60]. Le filtre passe-bande est le plus simple de tous et le plus utilisé. son principal avantage est qu'il a une impédance sensiblement nulle à la résonance fréquence, ce qui en fait un puits presque parfait à cette fréquence.

Pour l'analyse de la configuration HSSF, la première étape consiste à choisir le condensateur. La tension nominale du condensateur doit être comprise entre 10% et 25% de la tension d'alimentation du réseau. D'autre part, la puissance réactive requise par la charge est également prise en compte [61] Cette puissance est généralement déterminée à partir de la mesure de la puissance de charge, son facteur de puissance et son facteur de déplacement.

Après avoir sélectionné le condensateur, l'inductance de la bobine est déterminée, en considérant que la fréquence de résonance est donnée par :

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{L C}} \dots\dots\dots(III.15)$$

Par conséquent, pour éliminer l'ordre harmonique h, l'inductance est réglée sur :

$$L = \frac{1}{(2\pi hf)^2 C} \dots\dots\dots(III.16)$$

Généralement, lors de la conception du filtre, il est habituel de considérer une harmonique un peu plus basse que la résonance idéale (par exemple, si vous voulez régler le filtre pour la 5ème harmonique, les calculs sont faits pour h = 4,7). Il s'agit d'une pratique courante motivée par la réduction de la capacité avec le vieillissement, et les tolérances dans la construction des bobines. De plus, le réglage fin le rend plus sujet à la surcharge en raison de l'harmonique proche de la source. Cependant, pour un bon choix des composants, il faut le vérifier par simulation; il est donc nécessaire de choisir un modèle aussi précis que possible pour le comportement du système au point de connexion du filtre.

La commande comprend deux boucles :

- une boucle « feedforward » pour supprimer l'harmonique de tension de rang faible
- une boucle « feedback » pour supprimer les autres harmoniques présents dans le spectre harmonique des tensions de la charge.

La commande requiert en effet des filtre passe bas LPF pour la boucle « feedback » et deux filtre passe haut HPF pour la boucle « feedforward » comme il est indiqué sur la figure III.14.

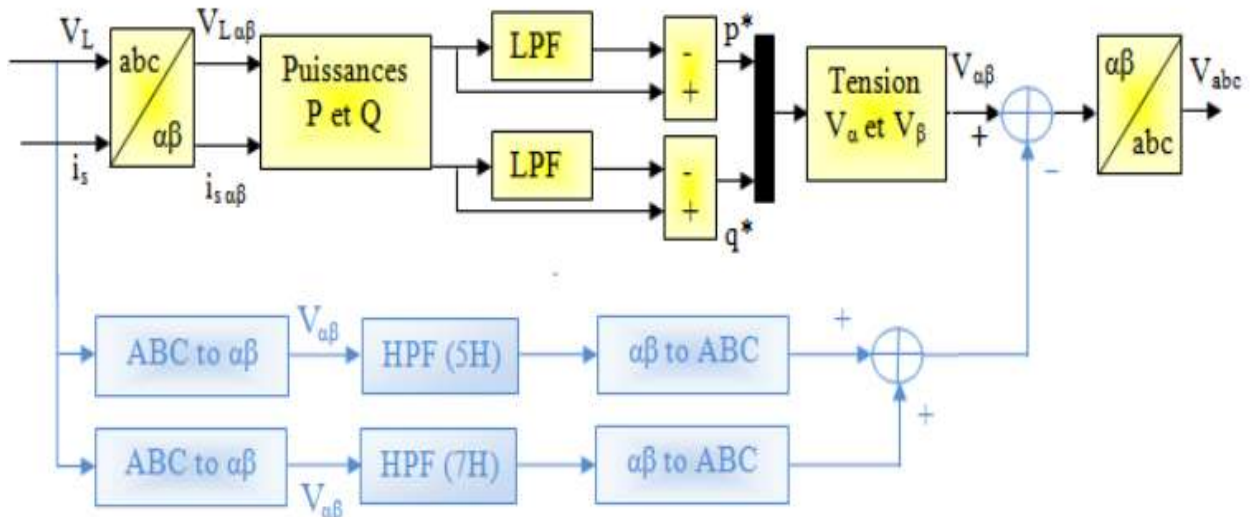


Figure III. 14 Commande du filtre hybride série

Ces boucles seront éliminées le cas de commande de la structure filtre hybride série avec intégration parallèle.

III.5 Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté les topologies de filtres hybrides associées à différentes stratégies de commandes. Ces topologies ont pour but de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à ce que le courant et la tension du réseau redeviennent sinusoïdaux. Les différents types de commande en tension du filtre actif série de puissance utilisés dans le but de résoudre les problèmes liés à pollution harmonique due essentiellement à la présence croissante des charges non linéaires dans les réseaux électriques. Ensuite, nous avons exposé un tour d'horizon des différentes techniques d'extraction des références harmoniques pour la compensation.

Chapitre IV

Simulation et interprétation des résultats

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre on va faire la simulation de notre system étudié filtre hybride série qui présente une pollution intéressante de la tension. D'abord on va voir les allures des grandeurs de la partie continue de la charge et l'analyse spectrale du courant de réseau .En suit, on commande le filtre actif série et voir les allures de tension de réseau et la tension de charge .On garde les mêmes paramètres et on interprète les résultats pour le filtrage hybride série et le filtrage hybride série avec intégration parallèle. En fin, on interprète les résultants finals.

IV.2 System étudié

Une source de tension composée de $220 \cdot \sqrt{3}$ V, 50 Hz alimente une charge polluante de tension sous forme d'un convertisseur AC-DC traditionnel à diode connecte à une charge continue à basé d'une résistance $R_1 = 20\Omega$, en parallèle avec une capacité $C_1 = 2000 \mu\text{F}$, cette charge sera couplée à une deuxième charge en parallèle $R_2 = 20\Omega$, $C_2 = 2000 \mu\text{F}$ à $t = 0,15\text{s}$.

Le modèle globale de simulation est représenté par la figure IV.1 suivante.

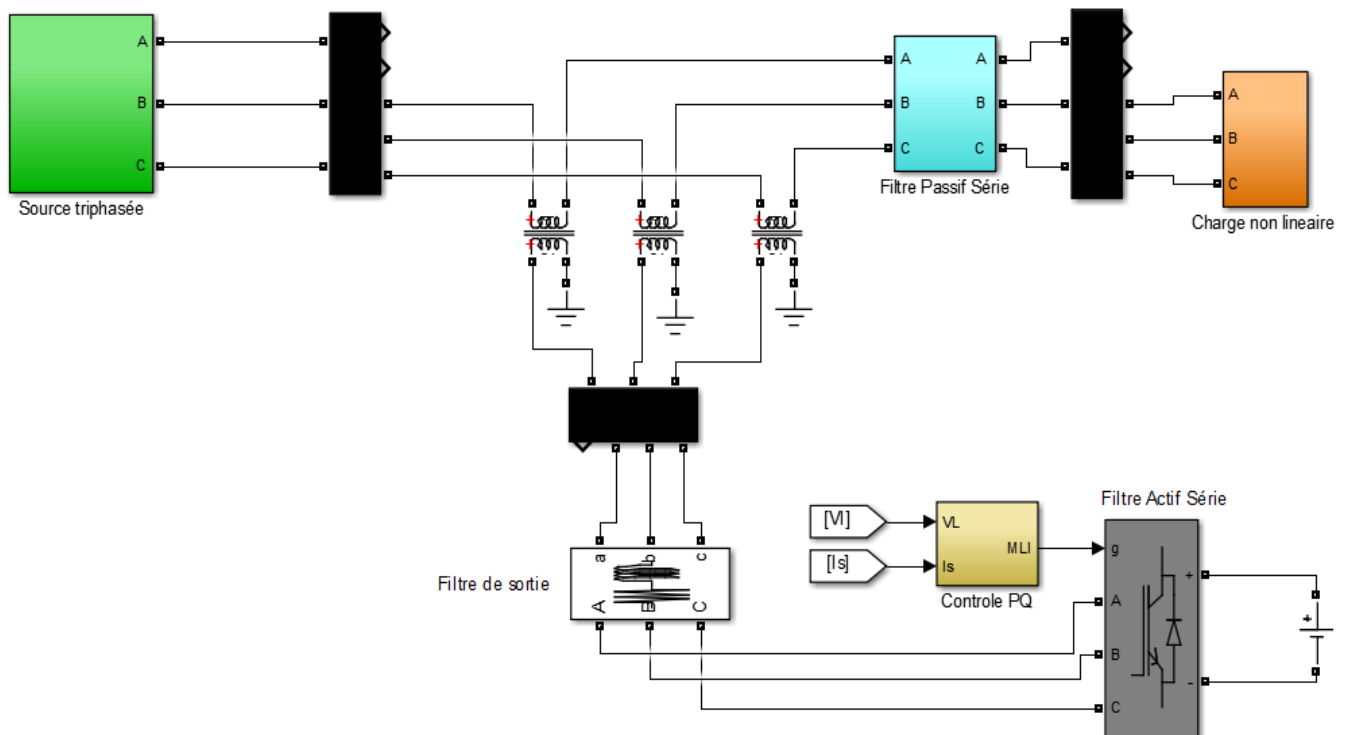


Figure IV. 1 Modèle du système étudié

Les allures des trois tensions de réseau sont présentées sur la figure IV.2 ; ainsi leur analyse spectrale sur la figure IV.3.

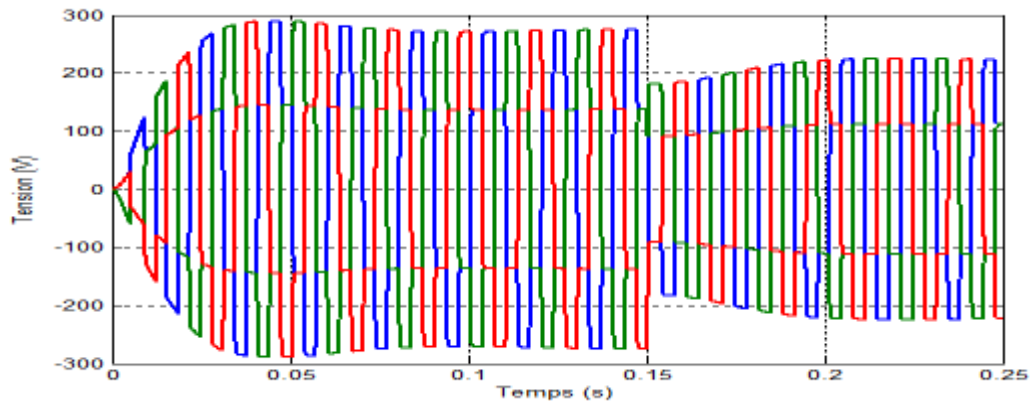


Figure IV. 2 Les tensions de réseau

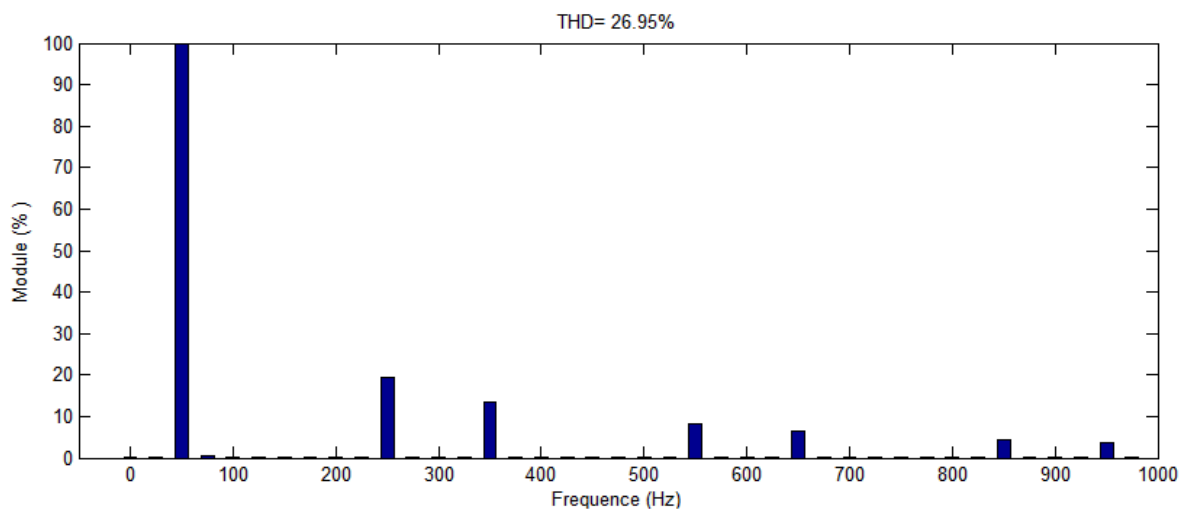


Figure IV. 3 L'analyse spectrale de la tension

Les grandeurs de la partie continue de la charge sont présentées sur les figures IV.4 et IV.5 respectivement.

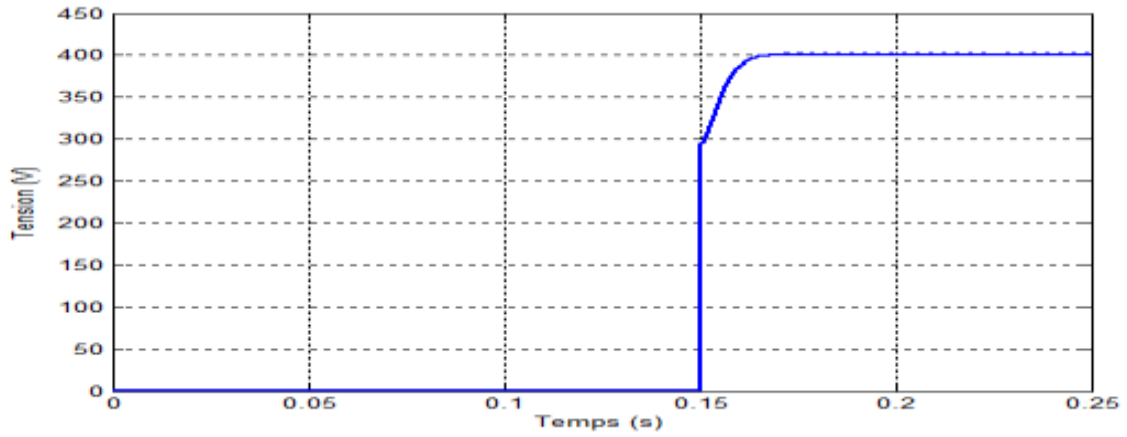


Figure IV. 4 La tension continue

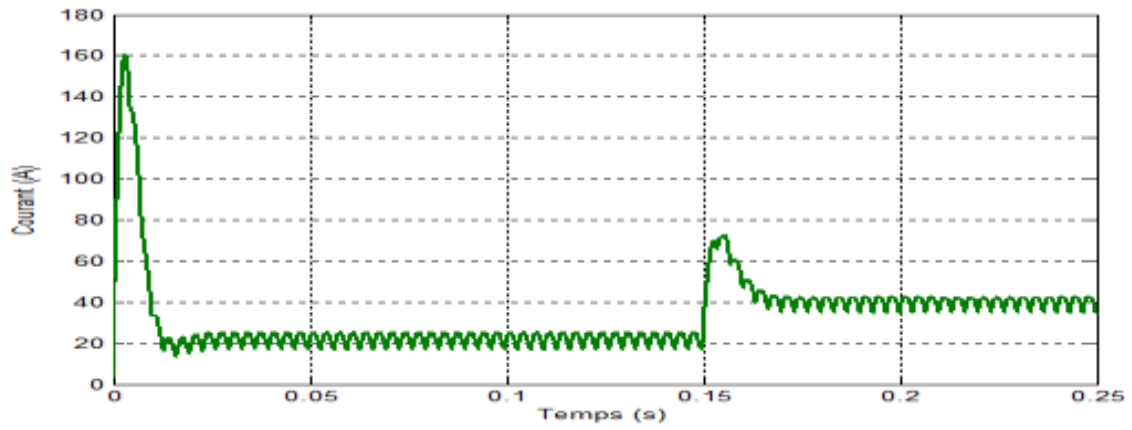


Figure IV. 5 Le courant continue

La figure IV. 6 présentes les courants de réseau qu'ils sont les mêmes courants de la charge.

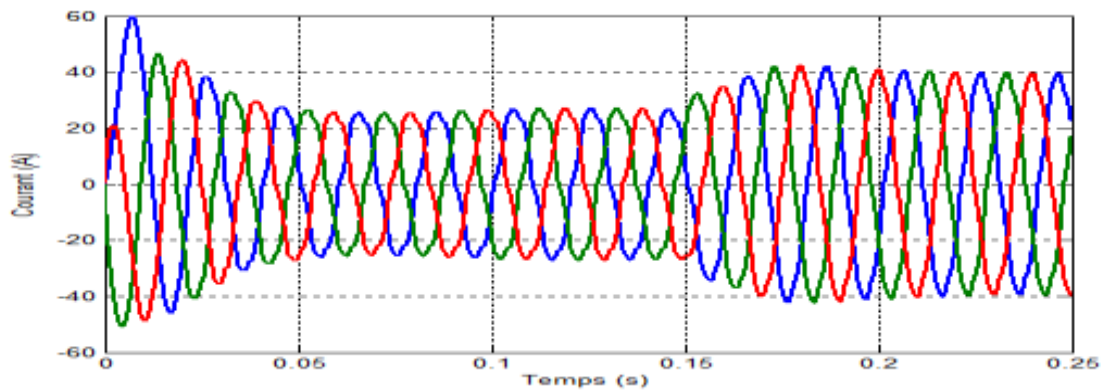


Figure IV. 6 Les trois courants du réseau

Le spectre des harmoniques de courant est donné par la figure IV.7.

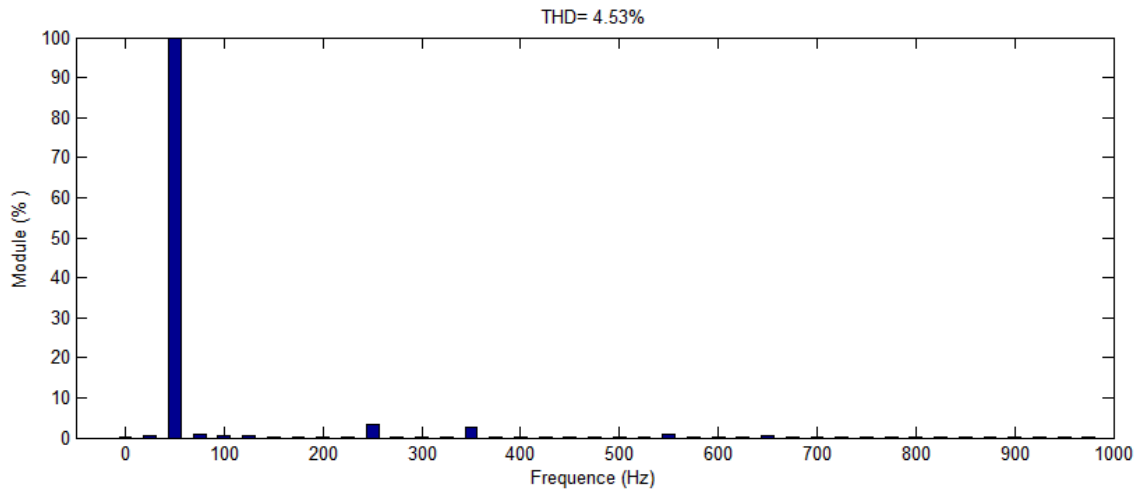


Figure IV. 7L'analyse spectrale du courant de réseau

IV.3 Filtrage actif série

La partie de filtre actif série est représenté par un onduleur a deux niveaux alimenté par un générateur continue de 100V. L'onduleur est connecté à un filtre de sortie $R_f = 0.1 \Omega$, $L_f=13\text{mH}$, est relié au système précédent à travers un transformateur de couplage série.

Les figures suivantes présentent les trois tensions de référence de la commande PQ et la tension continue fournie au filtre actif.

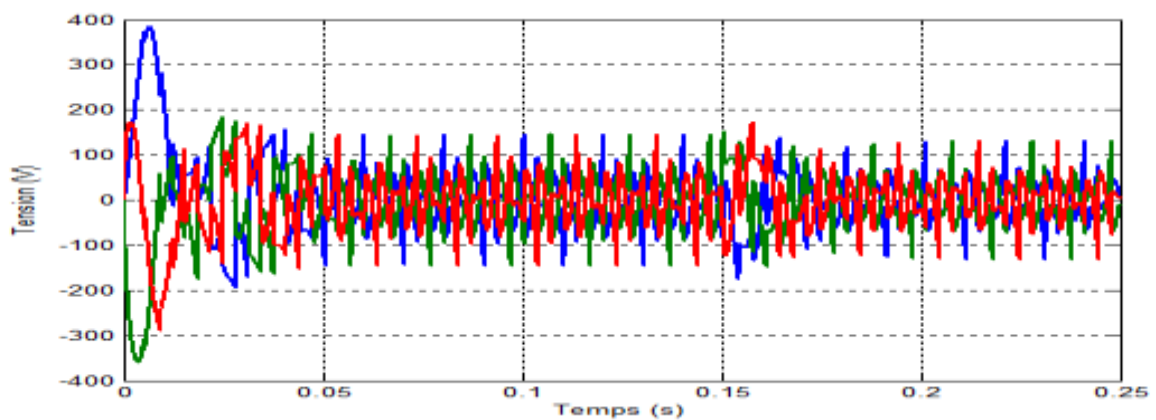


Figure IV. 8 Les trois tensions de référence de la commande PQ

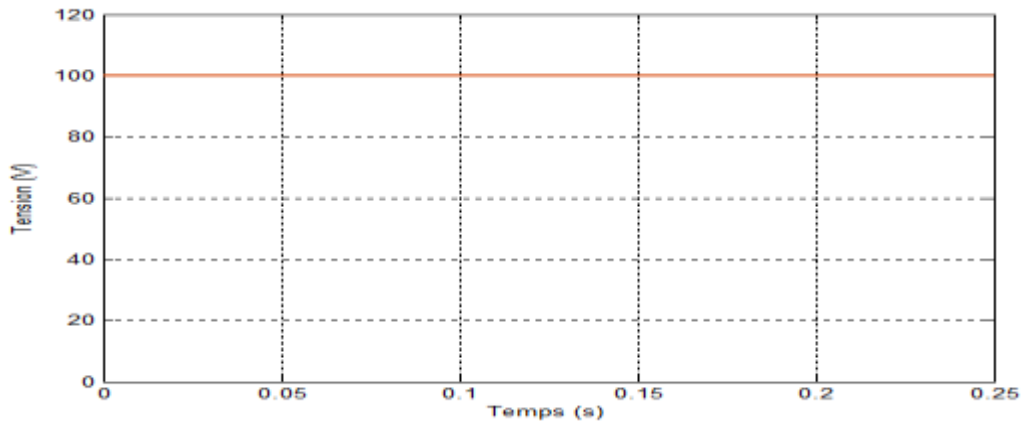


Figure IV. 9 Tension continue du filtre actif série

Les tensions injectées sont présenté par la figure IV.10.

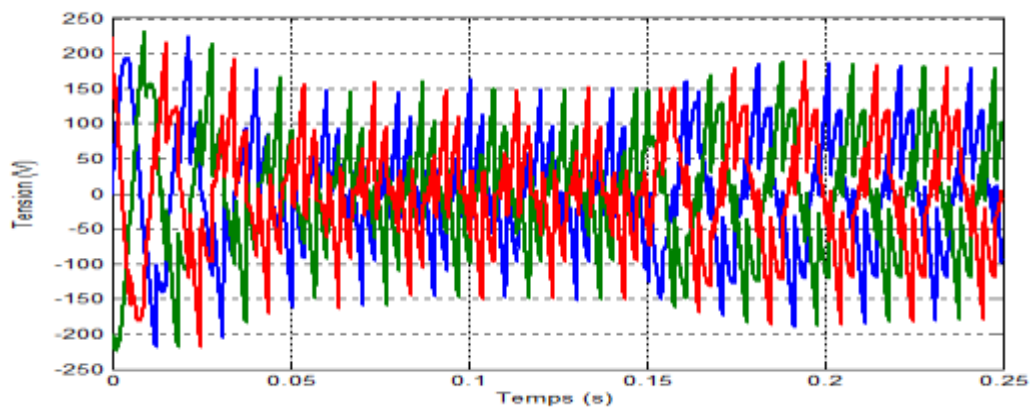


Figure IV. 10 Les tensions injectées

La figure IV.11 représente les trois tensions de la charge

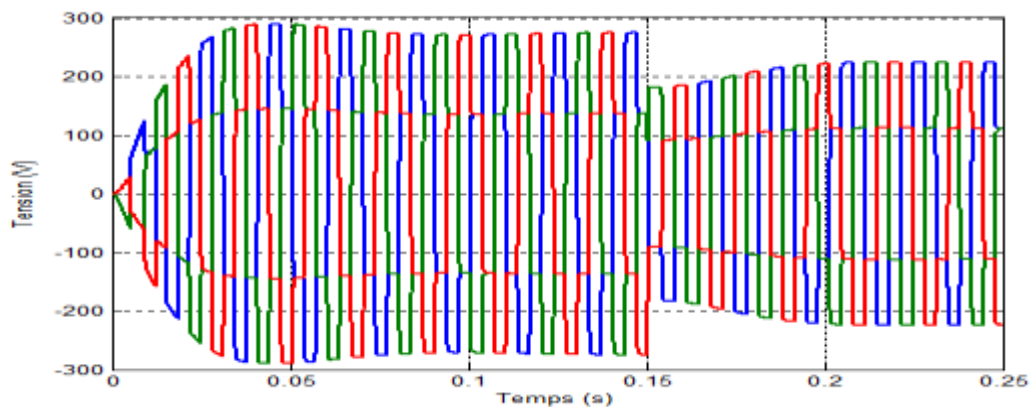


Figure IV. 11 Les tensions de la charge

Les tensions de réseau sont représentées par la figure IV.12

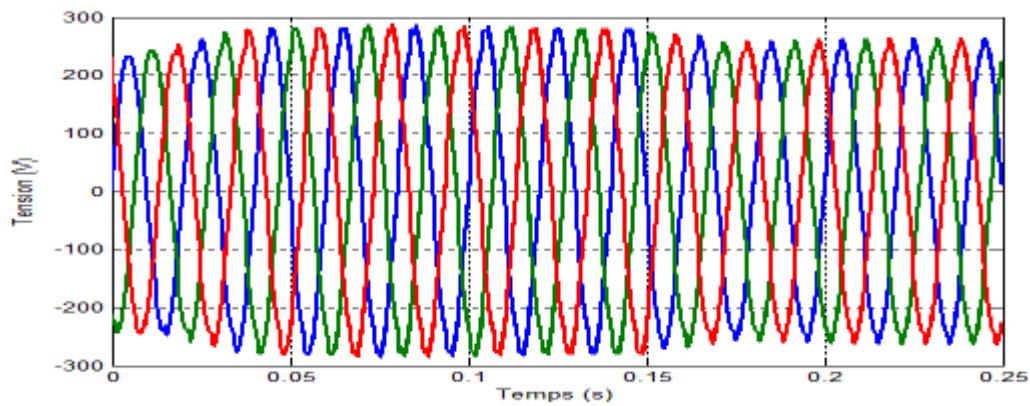


Figure IV. 12 Les tensions de réseau

La figure IV.13 présente l'analyse spectrale de la tension du réseau.

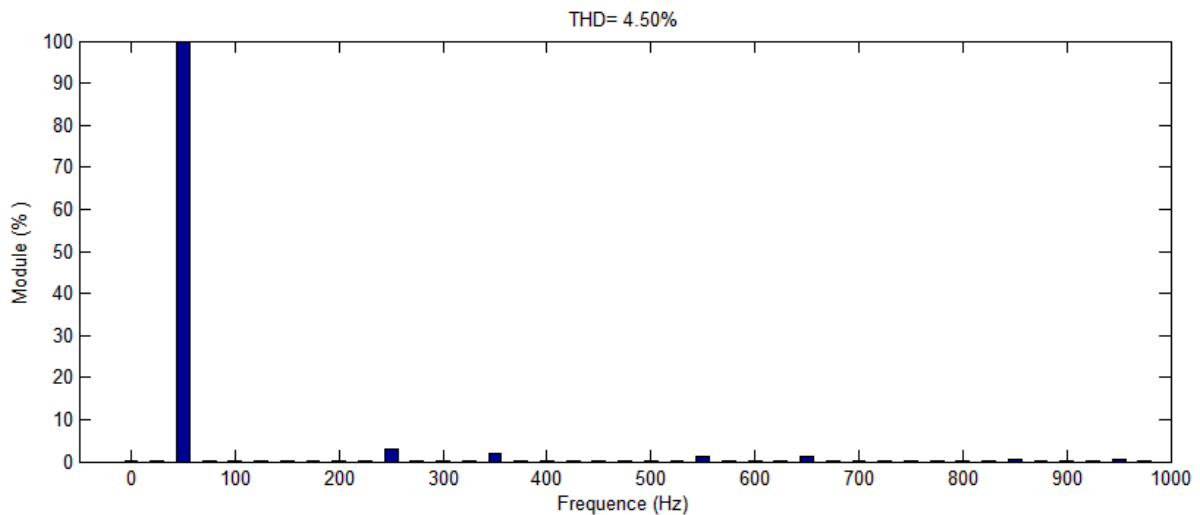


Figure IV. 13 L'analyse spectrale de la tension du réseau

Le courant continu de la charge est donné par la figure IV.14.

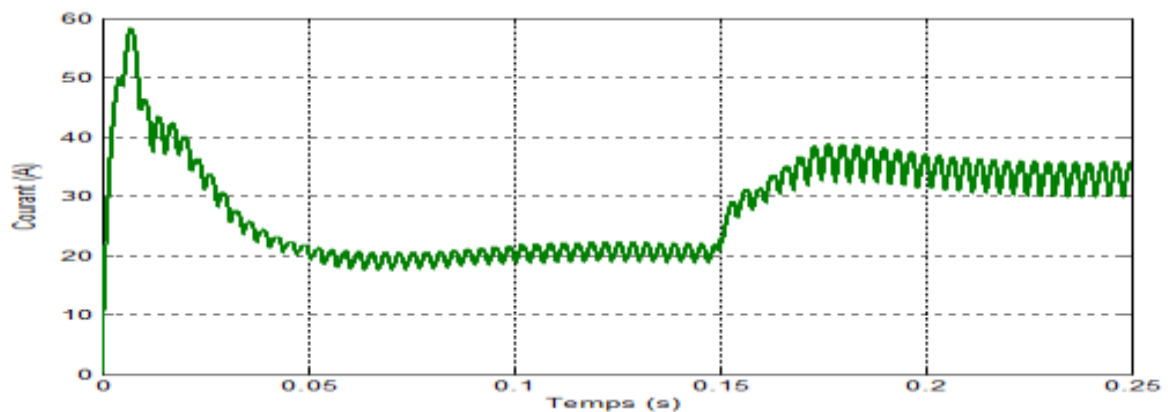


Figure IV. 14 Le courant continue

La tension continue de la charge est mentionnée sur la figure IV.15.

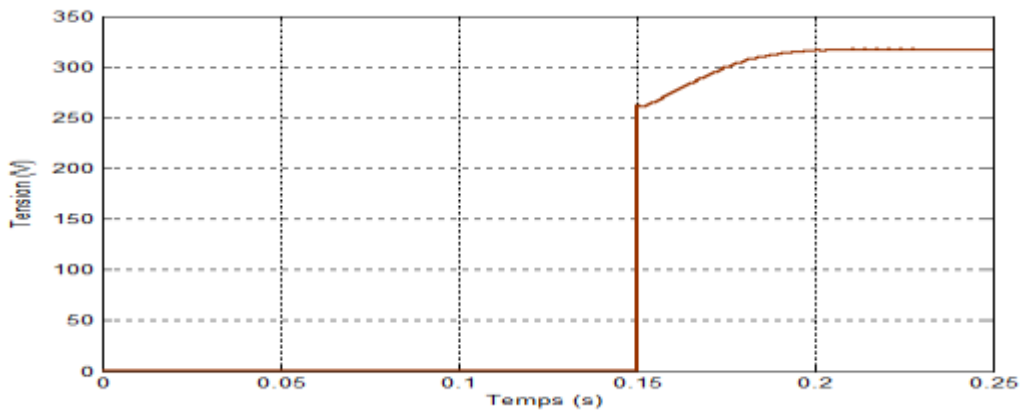


Figure IV. 15 La tension continue

La figure IV.16 décrit les trois courants de réseau.

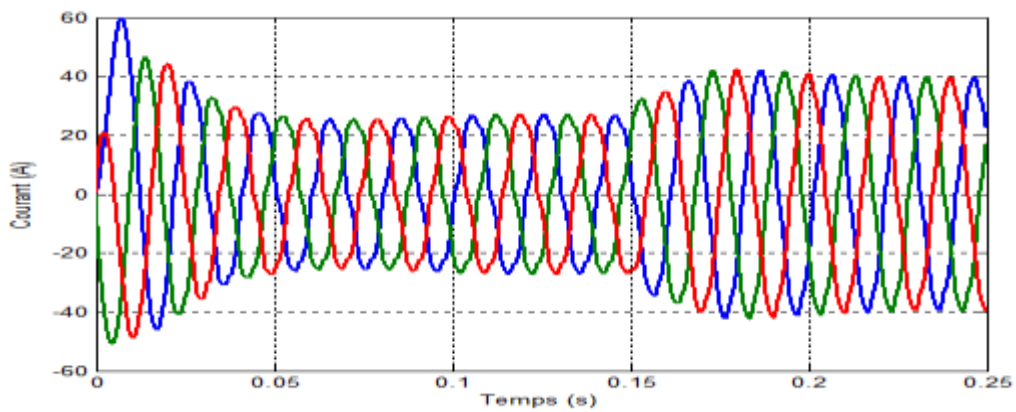


Figure IV. 16 Les trois courants de réseau

IV.4 Filtre hybride série FHSS

On garde les mêmes paramètres précédents, les paramètres du filtre passif série sont : $L_p=10\text{mH}$, et la capacité du filtre passif offre une puissance réactive capacitive de 3kvar.

Les grandeurs de la partie continue de la charge sont présentées sur les figures IV.17 et IV.18 respectivement

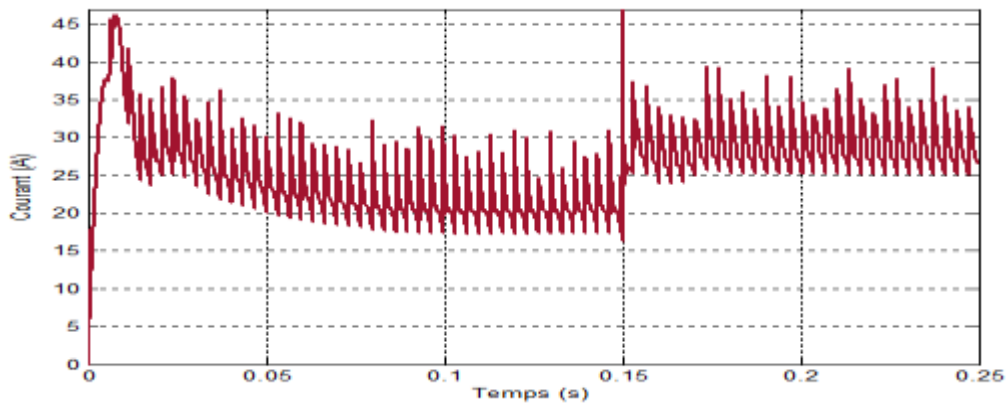


Figure IV. 17 Le courant de la charge continue

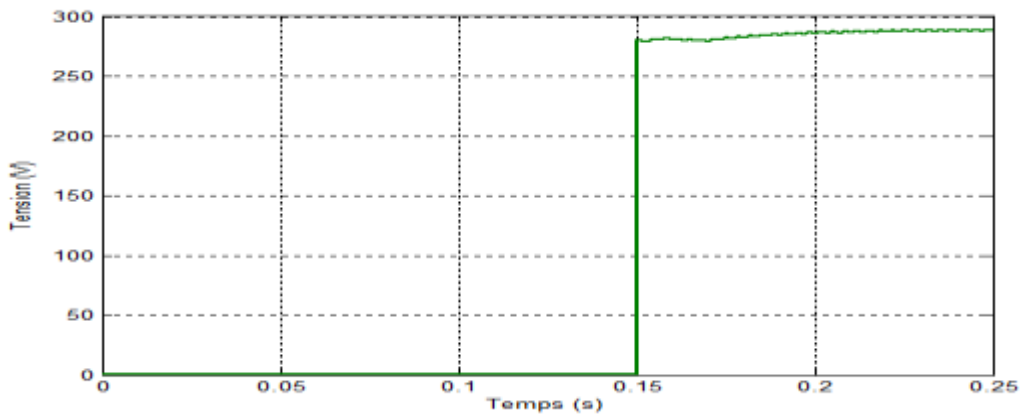


Figure IV. 18 La tension continue de la charge

Figure IV.19 présente les trois tensions de la charge.

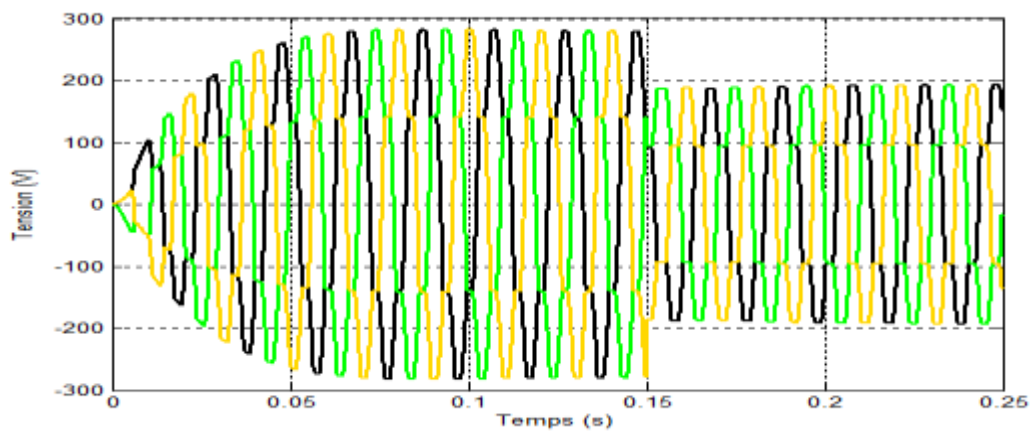


Figure IV. 19 Les tensions de la charge

Figure IV.20 présentes les courants de la charge.

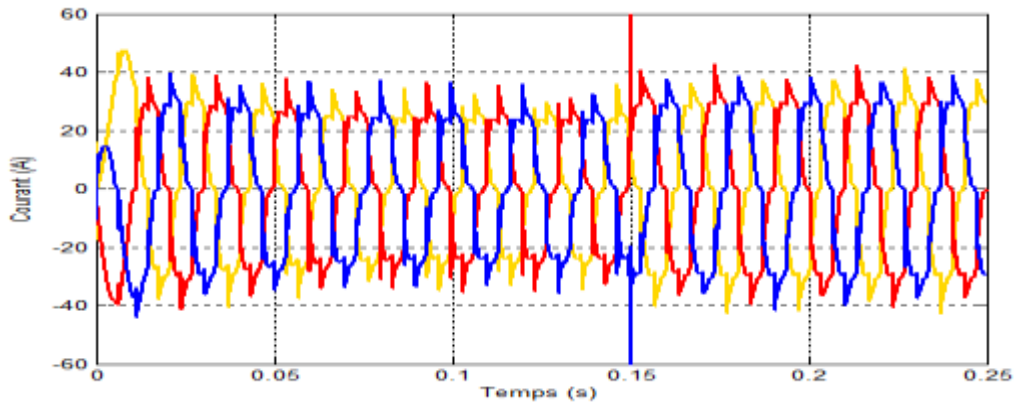


Figure IV. 20 Les courants de la charge

Les tensions injectées sont présenté par la figure IV.21.

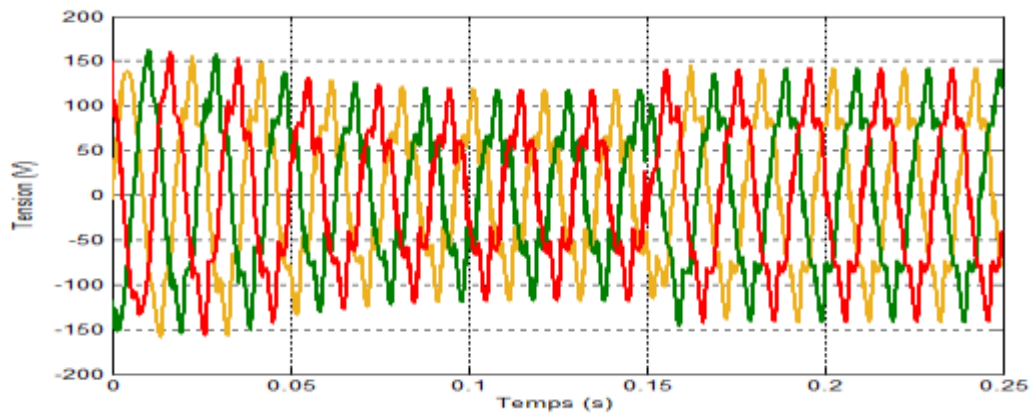


Figure IV. 21 Les tensions injectées du filtre actif série

La tension continue du filtre actif série est présentée par la figure IV.22.

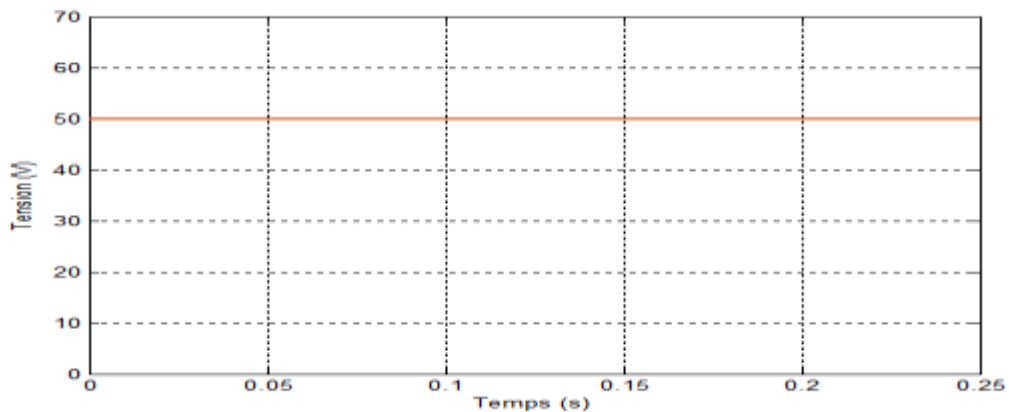


Figure IV. 22 Tension continue du filtre actif série

Les tensions de réseau sont représentées par la figure IV.23.

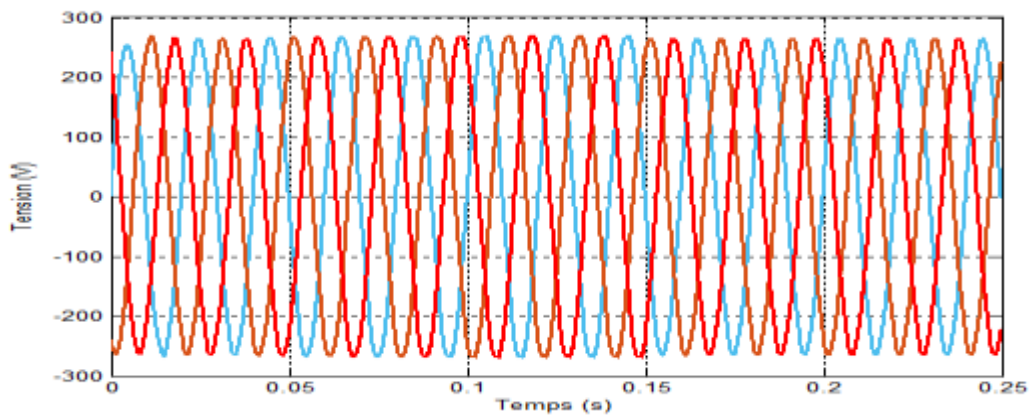


Figure IV. 23 Les tensions de réseau

La figure IV.24 illustre l'analyse spectrale de la tension du réseau.

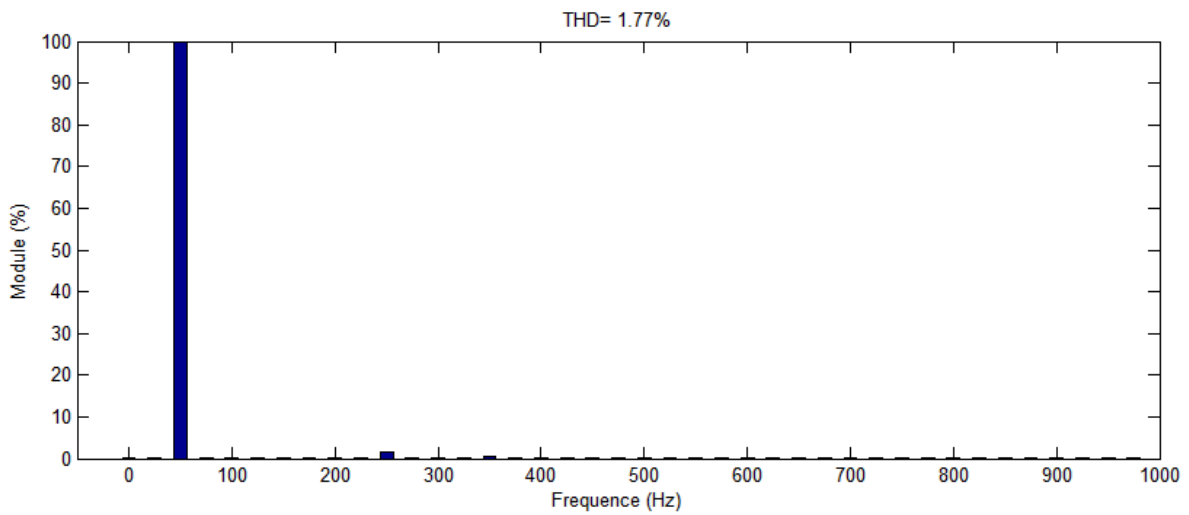


Figure IV. 24 Le spectre de la tension de réseau

La figure IV.25 décrit les trois courants de réseau.

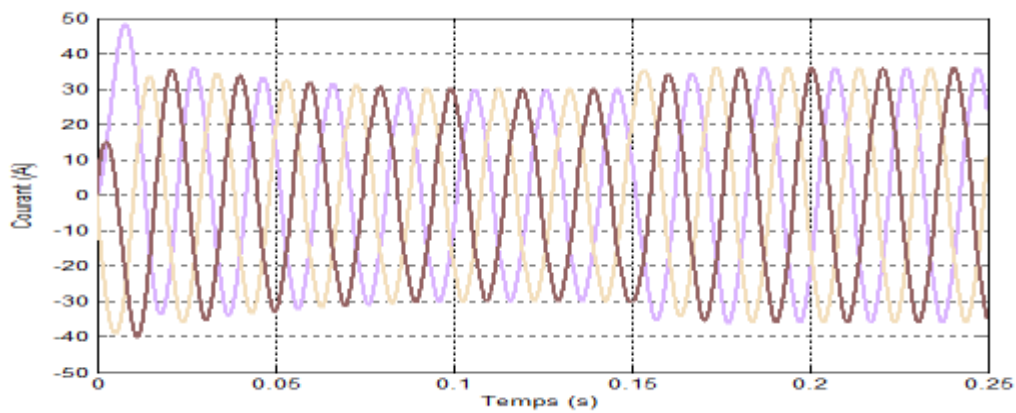


Figure IV. 25 Les courants de réseau

IV.4 Filtre hybride série avec intégration parallèle (FHSIP)

On garde les mêmes paramètres précédents, les paramètres du filtre passif série sont : $L_p=10\text{mH}$, et la capacité du filtre passif offre une puissance réactive capacitive de 3kvar .

Le courant et la tension du coté continu de la charge sont présentées sur les figures IV.26 et IV.27.

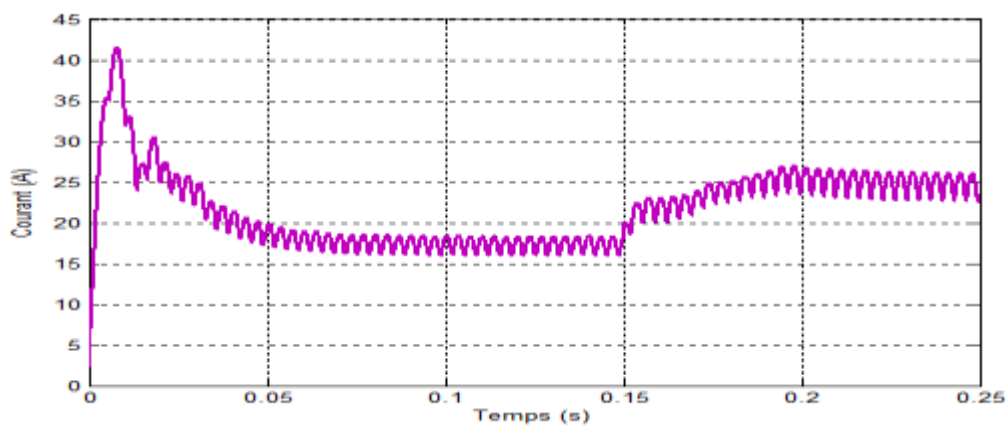


Figure IV. 26 Le courant continu

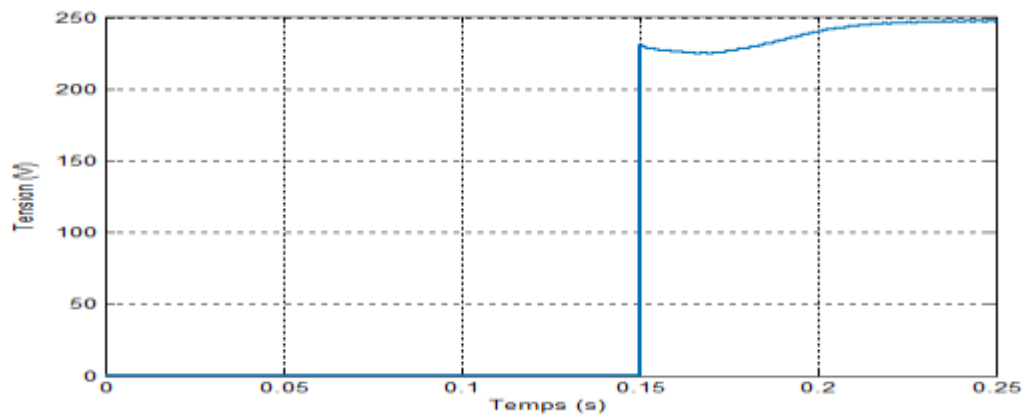


Figure IV. 27 La tension continue

Figure IV.28 présente la tension de la charge.

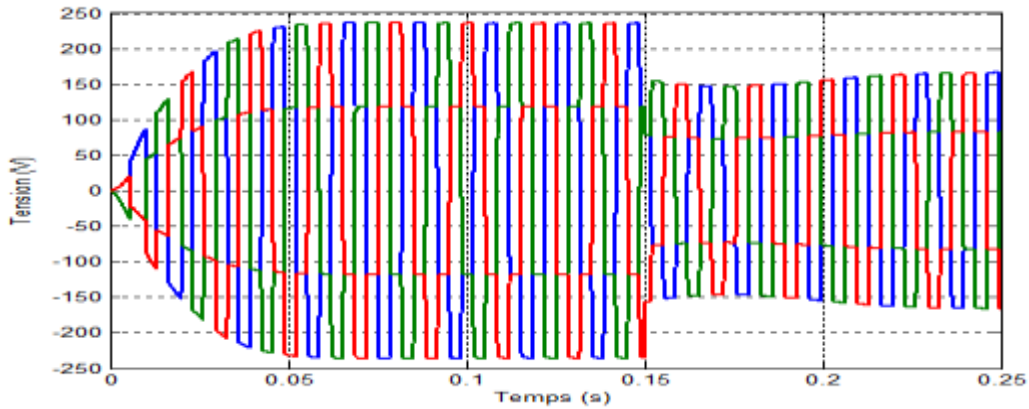


Figure IV. 28 La tension de la charge

Le courant de la charge est mentionné sur la figure IV.29 suivante.

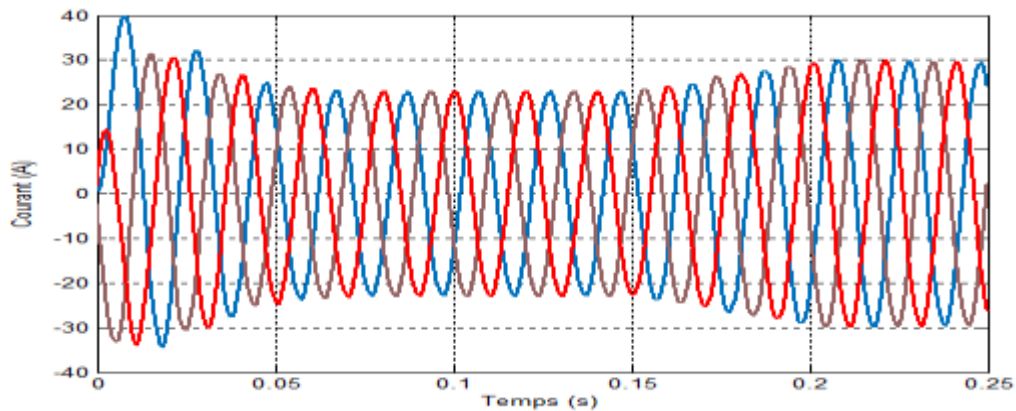


Figure IV. 29 Les courants de la charge

Les tensions injectées sont présentés par la figure IV.30.

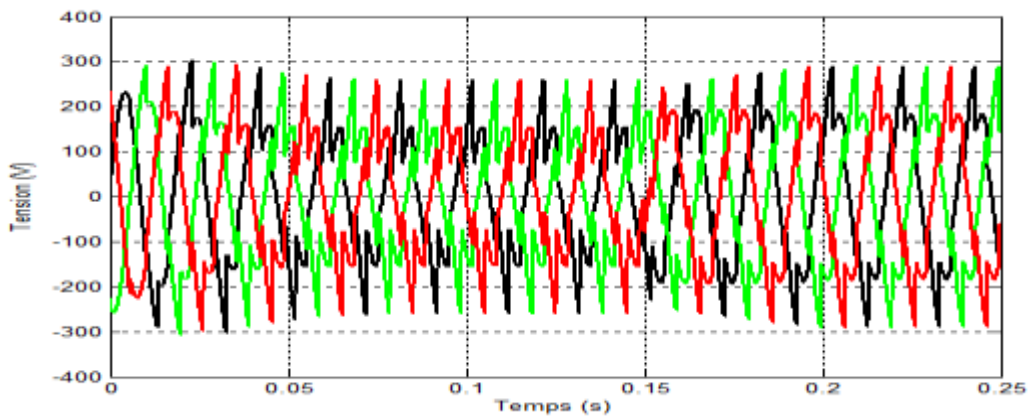


Figure IV. 30 Les tensions injectées par le filtre actif série

La tension continue appliquée au filtre actif série est donnée par la figure IV.31.

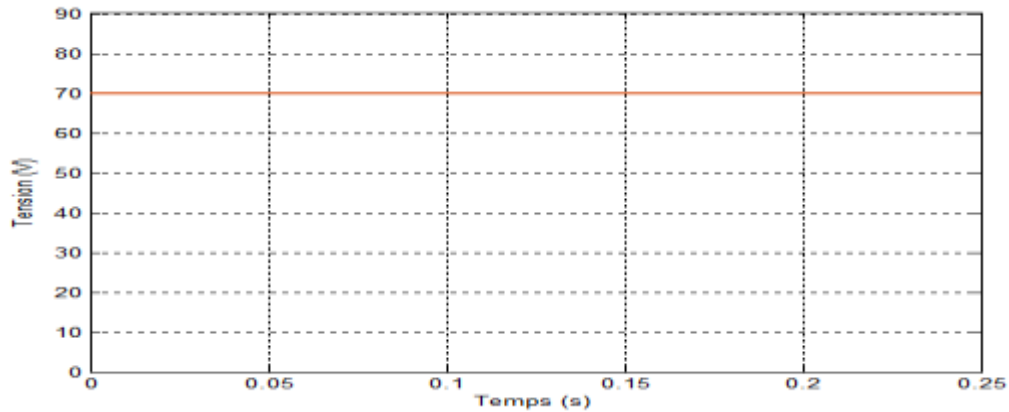


Figure IV. 31 Tension continue du filtre actif série

Les tensions de réseau sont présentées par la figure IV.32.

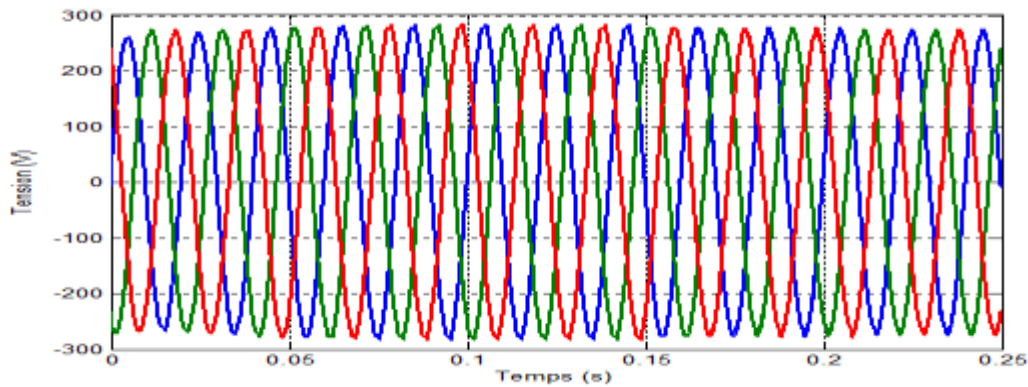


Figure IV. 32 Les tensions de réseau

La figure IV.33 montre le spectre de la tension du réseau.

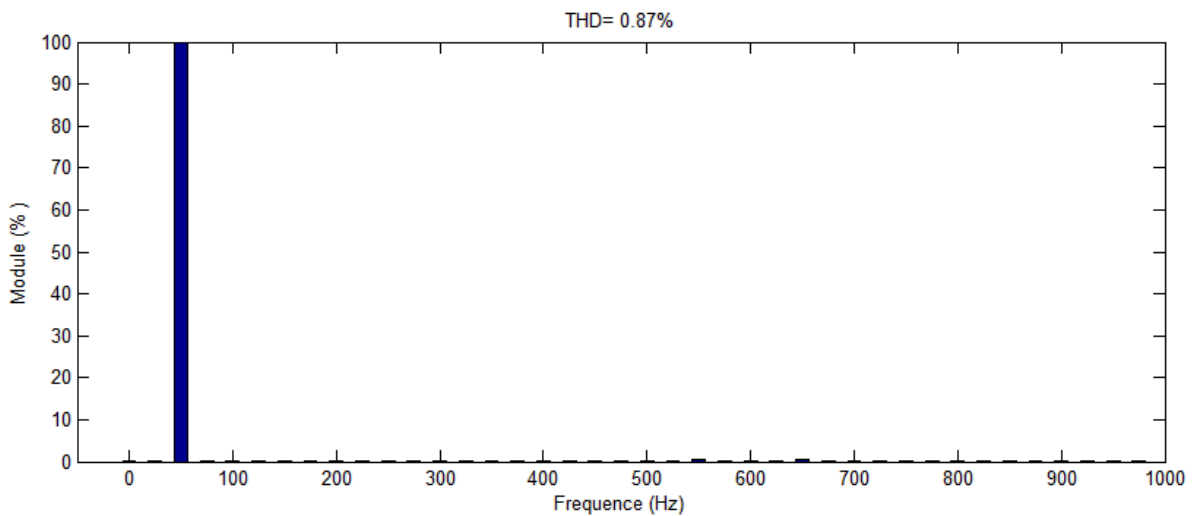


Figure IV. 33Le spectre de la tension de réseau

Finalement, la figure IV.34 illustre l'allure du courant de réseau.

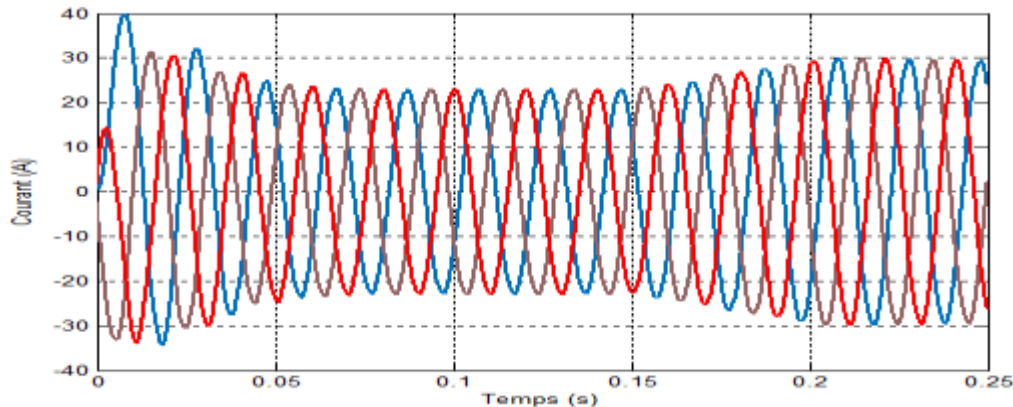


Figure IV. 34 Les courants de réseau

IV.5 Interprétation des résultats

Le système étudié est un réseau qui présente une pollution intéressante de la tension d'un THDv de 26.95 % et un courant lisse d'une valeur acceptable de THDi de 4.53%.

On peut dire que la charge polluante est une charge polluante de tension et ceci nous conduit à utiliser de technique de filtrage de tension, ce qui ouvre la porte devant l'utilisation d'un filtre actif série.

L'impact du filtre actif série est important, il permet de réduire la valeur de THDv à 4,50%. Le courant de réseau garde sa forme.

On observe une diminution de la tension continue d'une valeur presque de 80 V et une diminution de tension continue avec 5A et ceci après la variation de la charge.

L'utilisation du filtre actif série permet de protéger la charge et éliminer les augmentations du courant dans le régime transitoire de 160A vers 58A et au moment de variation de la charge de 70A à 35A.

On observe que le filtre hybride série arrive à nettoyer bien les tensions de réseau, et il offre la possibilité aussi de compenser la variation de la tension d'une façon remarquable lorsqu'on compare les deux figures IV.2 et IV.23 de la tension de source.

Le tableau suivant illustre une comparaison des résultats obtenus entre le filtre actif série et le filtre hybride série.

La dernière structure utilisée le filtre hybride série FHSIP présente la meilleure solution sur le plan de filtrage de la tension réseau, ce qui concerne le lissage et limitation du courant continu cette technique est plus efficace que les premiers, cependant pour avoir une meilleur valeur de THD_v, elle demande de plus de tension continu au niveau de filtre actif série par rapport à la structure FHSS ; le tableau IV.1 présente une comparaison des résultats de filtrage des trois techniques.

Système :	Sans filtrage	Avec FAS	Avec FHSS	Avec FHSIP
THD _v	26,95%	4,50%	1,77%	0,87%

Tableau IV. 1 Comparaison des résultats

IV.8 Conclusion

Le filtre actif série arrive à nettoyer les tensions de réseau, avec une suppression acceptable des rangs d'harmoniques traduit par un THD_v de 4.5%. L'introduction de la structure hybride FHSS permette d'améliorer encore la qualité de la tension avec un THD_v de 1,77%, cette technique offre la réduction de la partie continue du filtre passif de plus de 50%. L'utilisation du troisième choix, concernant le filtre hybride série FHSIP c'est le plus efficace sur le plan de réduction du taux d'harmonique, elle présente un THD_v de 0,87%, mais elle peut demander de plus de tension continue par rapport à la structure FHSS.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Ce travail de fin étude présente une étude, une modélisation et la commande d'un système basée sur le filtrage hybride. L'objet de notre travail est d'introduire un filtre hybride qui se compose essentiellement d'une partie puissance et d'une partie commande-contrôle pour éliminer les pollutions créées par les différentes charges non linéaires, tels que les courants harmoniques et le réactif du courant même dans le cas des charges linéaire.

Le premier chapitre a été consacré à la problématique des perturbations ou distorsions harmoniques générées par les charges non linéaires connectées aux réseaux électriques. L'augmentation régulière du nombre de dispositifs d'électronique de puissance utilisés dans les systèmes électriques ne fait qu'accentuer ces perturbations. En outre, les origines et les effets néfastes de ces perturbations ont été abordés et les normes en vigueur ont été présentées. Ces normes, notamment imposées aux distributeurs d'énergie, autorisent cependant la génération d'harmoniques dans certaines limites. En outre, le respect de ces normes motive l'étude.

Au deuxième chapitre, nous avons présenté le développement de méthodes efficaces pour dépolluer les réseaux électriques, comme par exemple les dispositifs de filtrage actif, objets de ce manuscrit. Nous avons alors présenté, de manière générale, les solutions traditionnelles et modernes utilisées en filtrage : filtres passifs, filtres actifs ou bien encore la combinaison des deux et les avantages et les inconvénients de chacun.

Le troisième chapitre est plus particulièrement dédié à l'étude des topologies de filtres hybrides associées à différentes stratégies de commandes. Ces topologies ont pour but de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à ce que le courant et la tension du réseau redeviennent sinusoïdaux. Nous avons d'abord dressé l'état de l'art des différents types de commande en tension du filtre actif série de puissance utilisés dans le but de résoudre les problèmes liés à la pollution harmonique due essentiellement à la présence croissante des charges non linéaires dans les réseaux électriques. Ensuite, nous avons exposé un tour d'horizon des différentes techniques d'extraction des références harmoniques pour la compensation l'étude du filtre actif série.

Dans le dernier chapitre nous avons fait une simulation de notre système étudié, L'ensemble des simulations a été effectué à l'aide des outils MATLAB/Simulink. On constate que le filtre actif série arrive à nettoyer les tensions de réseau, avec une suppression acceptable des rangs d'harmoniques traduit par un THDv de 1.28%. L'introduction de la structure hybride FHSS permet de améliorer encore la qualité de la tension avec un THDv de 1,77%, cette technique offre la réduction de la partie continue du filtre passif de plus de 50%. L'utilisation du troisième choix, concernant le filtre hybride série FHSIP c'est le plus efficace sur le plan de réduction du taux d'harmonique, elle présente un THDv de 0,87%, mais elle peut demander de plus de tension continue par rapport à la structure FHSS.

Les travaux de recherche que nous avons rapportés dans ce mémoire répondant aux exigences que nous nous sommes déjà fixées, en l'occurrence étude par simulation et validation expérimentale des filtres actifs séries et hybride série d'améliorer la qualité de l'énergie en rendant les courants sinusoïdaux et en phase avec les tensions du réseau électrique.

Référenc

Références

- [1] D. T et M. P, les harmoniques sur les réseaux électrique, Eyrolles, 1998.
- [2] *Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension*, Université Louis Pasteur Strasbourg I: Thèse de Doctorat , 2002.
- [3] M. P, P. P et D. G, Notes EDF éd., 1996.
- [4] G. Desquilbet, C. Foucher et P. fauquembergue, *Statistical analysis of volatge dips*, Notes EDF éd., 1995.
- [5] P.Meynaud, Qualité de la tension dans les réseaux &lectriques, vol. 260, techniues de l'ingénieur, traité Génie électrique, 1990, pp. 1-25.
- [6] H.djeghloud, *Réduction des harmoniques utilisant un filtre actif parallèle trois niveaux commandés en MLI*, Mémoire de magister de Constantine , 2003.
- [7] T.Gouraud, *Identification et rejet de perturbations harmoniques dans des réseaux de distribution électrique*, 1997.
- [8] G. Séguier et F. Notelet, *electrotechnique industrielle*, Paris: Entreprise Moderne d'Edition, 1983.
- [9] A.Bouafia, *Technique de commande prédictive et flou pour les systems d'électronique de puissance: Application aux redresseurs à MLI*, Sétif, Algerie, thèse de doctorat en cotutelle, Université Ferhat Abbas , 2010.
- [10] A.Chaoui, *Filtrage Actif Triphasé pour charges non linéaires*, Sétif,Algerie, These de doctorat an cotutelle,Université Ferhat Abbas, 2010.
- [11] N.Mendalek, *Qualité de l'onde électrique et moyens de mitigation*, Canada, Thèse de doctorat en génie ,ETS, Université de Québec, 2003.
- [12] G. Olivier et R. Bouchard, *Presse Internationale Polytechnique*, 2ème édition éd., 1999.
- [13] A. Nia, *Contribution à l'étude théorique et expérimental d'un filtre actif parallèle à commande analogique et numérique temps réel*, Nancy, Thèse de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, 1996.
- [14] M. Khor, *Amélioration de la qualité de l'énergie à l'aide de compensateurs actifs : série, parallèle ou conditionneurs unifiés de réseaux électriques*, Nante, thèse de doctorat de l'école Polytechnique de l'université de Nante, 2006.

- [15] *La Maîtrise Des Harmoniques*”. Dans *La Lettre Des Applications Industrielles Et Du Matériel Electrique*, 1997.
- [16] Y.Abdelli, *Etude et commande de convertisseurs statiques multifonctions en vue de l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique*, Nantes: thèse de doctorat de l'université de Nantes, 2005.
- [17] *Contribution à l'étude des stratégies d'identification harmoniques et de commande basées sur les techniques avancées pour les compensateurs actifs des réseaux électriques*.
- [18] R. P. Stratford, *Harmonic pollution on power systems-a change in philosophy*, 1980, pp. 617-623.
- [19] C. Gombert, *Simulation temps-réel des dispositifs d'électronique de puissance dédiés aux réseaux d'énergie électrique*, thèse de doctorat Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, 2005.
- [20] Pejovic, Predrag et Z. Janda, *An improved current injection network for three-phase high-power-factor rectifiers that apply the third harmonic current injection*, vol. 47, *Industrial electronics, IEE Transactions on*, 2000, pp. 497-499.
- [21] M.A.E.Alali, *Contribution à l'Etude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension*, Strasbourg, Thèse de doctorat, Université de Louis Pasteur, 2002.
- [22] B.Szabados, *Répercussions sur le réseau électrique de l'alimentation des convertisseurs de grande puissance*, RGE, 1984, pp. 791-796.
- [23] *ÉTUDE DE MÉTHODES DE FILTRAGE DES HARMONIQUES DANS LES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES DE DISTRIBUTION*.
- [24] *Contribution à l'étude du filtrage d'harmoniques des réseaux de distribution à l'aide de l'association de filtres actif et passif parallèle*, Lorraine: thèse de doctorat de l'I.N.P, janvier 1995.
- [25] D. Abdeslam, *techniques neuromimétiques pour la commande dans les systèmes électriques : application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basses tension*, thèse de doctorat ,Université de Haute Alsace, 2005.
- [26] H. Quassimi, *Conception de convertisseurs alternatifs – continu mono-étage à absorption sinusoïdale*, Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, 18 Juin 1998.
- [27] L. G. a. E. Strycula, *Active AC power filters*, IEEE/IAS Annual Meeting, 1976, pp. 529-535.
- [28] *Creux de tension et coupeuses brèves*, Groupe de travail UIE power quality: Guide sur la qualité de l'électricité pour l'alimentation des installations industrielle, partie 2, 1996.

- [29] L. a. E. Strycula, *Active AC power filters*, 1976, pp. 529-535.
- [30] A. Tarik, *Etude d'un filtre actif shunt triphasé commandé par hystérésis ».Mémoire d'ingénieur en électrotechnique.*, Université UMMTO de TIZIOUZOU, 2005.
- [31] A. Boulahia, *Etude des convertisseurs statiques destinés à la qualité de l'énergie électrique».Mémoire de Magister.*, Université de CONSTANTINE, 2009.
- [32] *Filtrage actif parallèle des harmoniques des réseaux de distribution d'électricité », Nancy: Thèse de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, 20 janvier 1994.*
- [33] T. H.Sasaki, *A new method to eliminate ac harmonic currents by magnetic compensation-consideration on basic design*, vol. 90, IEE Trans, 1971, pp. 2009-2019.
- [34] a. a. N.Mohan, *Active filters for ac harmonic suppression*, A77 026-8: IEEE/PES winter meeting, 1977.
- [35] B. T. M. Grandpierre, *A static power device to rebalance and compensate reactive power in three phase network: design and control*, I. I. a. Soc, Éd., Annual meeting, 1977, pp. 127-135.
- [36] T. N. S. N. H. Kawahira, *Active power filters*, Tokyo,Japon, 1983, p. 918.
- [37] A. N. a. S. A. H. Akagi, *Control strategy of active power filters using multiple voltage-source PWM converters*, vol. 22, IEEE Tans, on Industry applications, 1986, pp. 460-465.
- [38] B. Z. B. Z. K. A.-H. A. Chandra, *An improved control algorithm of shunt active filter for voltage regulation, harmonic elimination, power factor correction and balancing of nonlinear loads*, vol. 15, IEEE Trans on power electronics, May 2000, pp. 495-507.
- [39] A. S. e. a. Y. Pal, *A Review of Compensating Type Custom Power Devices for Power Quality Improvement*, 2008, pp. 1-8.
- [40] M. J. H. ., e. a. [Aredes, *Three-phase four-wire shunt active filter control strategies*, vol. 12, IEEE Transactions on Power Electronics, 1997, pp. 311-318.
- [41] *Développement d'un contrôle commande pour un compensateur série de creux de tension. Validation par simulation du fonctionnement avec des charges industrielles*, Toulouse : thèse de l'institut National Polytechnique de Toulouse, 30 Octobre 1999.
- [42] P. D. Z. G. J. L. Moràn, *Three-phase solid-state voltage compensator system*, vol. 15, Can. J. Elect. Comp. Eng, 1990, pp. 27-35.
- [43] B. F. Bimal. k, *Expert system, fuzzy logic, and neural network, applications in power electronics and motion control*, vol. 82, proceed. Of the IEEE, august 1994.

- [44] H. Buhler, *Réglage par logique floue*, presses polytechnique et université romande, Paris, 1994.
- [45] V. V. A. C. a. K. A.-H. B. Singh, *Hybrid filters for power improvement*, vol. 152, IEE, Proc - Gener. Transm. Distrib, 2005.
- [46] M.X.Wang, *Filtrage actif de puissance : Etudes et réalisation d'un filtre actif à commande numérique temps réel*, Thèse de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, 18 Décembre 1992.
- [47] P. P.Salmeron, *A Control Strategy for Hybrid Power Filter to Compensate Four-Wires Three-Phase Systems*, vol. 25, IEEE Transactions On Power Electronics, 2010, pp. 1923-1931.
- [48] S. S. Y. T. H. Akagi, *Comparisons in circuit configuration and filtering performance between hybrid and pure shunt active filters*, vol. 2, Industry Applications Conference (I.A.S), 2003, pp. 1195-1202.
- [49] H. Akagi, *Active harmonic filters*, vol. 93, IEEE Trans. of Power Electronics, Dec 2005, pp. 2128-2141.
- [50] H. T. Y. e. a. Fujita, *A hybrid active filter for damping of harmonic resonance in industrial power Systems*, vol. 15, IEEE Transactions on Power Electronics, 2000, pp. 215-222.
- [51] N.Bruyant, *Etude et commande généralisées de filtres actifs parallèles, compensation global ou sélective des harmoniques, régime équilibré ou déséquilibré*, France: Thèse de doctorat de l'université de Nantes, 1999.
- [52] N.Belhaouchet, *Fonctionnement à fréquence de commutation constante des convertisseurs de puissance en utilisant des techniques de commande avancées, application : amélioration de la qualité de l'énergie*, Université Ferhat Abbas-Sétif : Thèse de Doctorat , Juillet 2011.
- [53] P. L. C. T.Esram, *Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques*, vol. 22, IEEE Transactions On, Energy Conversion, Jun 2007, pp. 439-449.
- [54] T. M. J. E. A.J. Visser, *Directed-coupled cascaded multilevel sag compensator*, IEEE 31 st annual power electronics specialists conference, June 2000, pp. 18-23.
- [55] L. Hu et al., "Sliding mode extremum seeking control based on improved invasive weed optimization for MPPT in wind energy conversion system," *Appl. Energy*.
- [56] L. H. e. al, *Sliding mode extremum seeking control based on improved invasive weed optimization for MPPT in wind energy conversion system*, vol. 248, *Appl. Energy*, April, 2019, pp. 567-575.
- [57] *Système photovoltaïque en auto consommation.*

- [58] V. O. E. B. A. a. L. A. Salas, *Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems*, vol. 11, Solar Energy Materials and Solar Cells, 2006, pp. 1555-1578.
- [59] P. L. C. T. Esham, *Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques*, vol. 22, IEEE Transactions On, Energy Conversion, Jun 2007, pp. 439-449.
- [60] M. E. R. D. P. Hohm, *Comparative study of maximum power point tracking algorithms using an experimental programmable, maximum power point tracking test bed*, IEEE Photovoltaic Specialists Conference, PVSC 2000, Sept 2000, pp. 1699-1702.
- [61] W. G. D. W. Xiao, *Evaluating maximum power point tracking performance by using artificial lights*, vol. 3, Industrial Electronics Society, IEEE IECON'04, Nov 2004, pp. 2883-2887.
- [62] N.Mendalek, *Qualité de l'onde électrique et moyens de mitigation*, 2003Canada.
- [63] M. J. H. ., e. a. Aredes, *Three-phase four-wire shunt active filter control strategies*, vol. 12, IEEE Transactions on Power Electronics, 1997.

ملخص

أصبحت جودة الكهرباء موضوعًا استراتيجيًا، والظواهر المهيمنة الرئيسية هي التوافقيات في شبكة الطاقة، ليست ظاهرة جديدة. يتم إنشاء التشوه التوافقي عن طريق الأحمال غير الخطية المتصلة بشبكة والتي تمتص التيارات غير الجيبية. تؤدي التوافقيات والاختلالات وغيرها من المشكلات إلى إضعاف كفاءة النظام الإجمالية وعامل الطاقة. للتعامل مع هذه المشكلة، فإن الحل الكلاسيكي هو استخدام المرشحات السلبية. هذا الحل هو الأكثر انتشارًا والأبسط والأرخص عمليًا، لكن التصفية السلبية تطرح بعض المشكلات: عدم القدرة على التكيف أثناء الاختلافات في مقاومة الشبكة، والحمل، والرنين المحتمل مع مقاومة الشبكة. الهدف من عملنا هو إدخال مرشح هجين للقضاء على التلوث الناتج عن الأحمال غير الخطية المختلفة. التوافقيات الكلمات الرئيسية، التصفية السلبية، عامل التصفية النشط، عامل التصفية الهجين، استراتيجيات التحكم.

Résumé :

La qualité de l'électricité est devenue un sujet stratégique, les principaux phénomènes qui dégradent sont les harmoniques dans le réseau électrique, n'est pas un phénomène nouveau. La distorsion harmonique est générée par les charges non linéaires connectées au réseau et qui absorbent des courants non sinusoïdaux. Les harmoniques et Les déséquilibrés et autres problèmes conduit à un affaiblissement du rendement global du système et du facteur de puissance. Pour faire face à ce problème, la solution classique consiste l'utilisation des filtres passifs. Cette solution est la plus répandue et pratiquement la plus simple et la moins chère mais le filtrage passif pose certains problèmes : manque d'adaptabilité lors de variations de l'impédance du réseau, de la charge et résonance possible avec l'impédance du réseau. L'objet de notre travail est d'introduire un filtre hybride pour éliminer les pollutions créées par les différentes charges non linéaires. Mots-clés harmoniques, filtrage passif, filtre actif, filtre hybride, Stratégies des Commandes.

Summary :

The quality of electricity has become a strategic subject, the main degrading phenomena are the harmonics in the power grid, is not a new phenomenon. Harmonic distortion is generated by non-linear loads connected to the network and which absorb non-sinusoidal currents.

Harmonics and imbalances and other problems lead to a weakening of the overall system efficiency and power factor. To deal with this problem, the classic solution is to use passive filters. This solution is the most widespread and practically the simplest and cheapest, but passive filtering poses certain problems: lack of adaptability during variations in network impedance, load and possible resonance with network impedance.

The object of our work is to introduce a hybrid filter to eliminate the pollution created by the various non-linear loads.

Keywords harmonics, passive filtering, active filter, hybrid filter, Control Strategies.

