

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

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



DOMAINE : SCIENCE ET TECHNOLOGIE
FILIERE : ELECTROMECHANIQUE
OPTION : ELECTROMECHANIQUE

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master

Par : NADJI DJAMEL
CHIKH NADIR

Intitulé

Etude des Filtres pour Amélioration de la
Qualité de l'Energie Electrique

Soutenu devant le jury composé de :

Dr. CHOUCHOU Abdelmadjid	Université Mohamed Boudiaf de M'sila	Président
Dr. BENYETTOU Loutfi	Université Mohamed Boudiaf de M'sila	Rapporteur
Dr. MAYOUF Messaoud	Université Mohamed Boudiaf de M'sila	Examineur

Juillet : 2021

Résumé

Le développement technologique, étroitement lié à l'électricité, a conduit à l'émergence de charges linéaires et non linéaires où les charges non linéaires absorbent des courants non sinusoïdaux, produisant des harmoniques dans le réseau électrique, et ces harmoniques affectent négativement la qualité de l'électricité.

Nous discutons des pertes électriques et les classons en types, où nous discutons dans chaque type les charges responsables des pertes et l'effet de ces pertes sur le réseau électrique et les équipements, ainsi que la méthode de calcul de ces pertes. Aussi, des solutions traditionnelles et modernes, en fin nous avons présenté Structure générale et le principe plus Stratégie de commande du filtre actif parallèle.

Remerciements

*Nous remercions Dieu qui nous a donné le
pouvoir et nous aidé à terminer ce modeste
travail.*

*Pour cette occasion, nous tenons à exprimer
nos plus vifs remerciements à tous ceux qui
nous ont aidé de loin ou de près à la
réalisation et à la mise au point de ce travail
et notre formation tout au long du cycle, en
particulier Mr. l'encadreur : **Mr,**
BENYETTOU Loutfi pour ses
critiques bienveillantes, ses précieux
conseils, sa confiance, sa patience, sa
disponibilité et son soutien indéfectible.
Nos remerciements vont ensuite à les
membres du jury d'avoir accepté de
participer à cette soutenance, d'évaluer ce
travail et de contribuer à son amélioration.
A tous les étudiants et les professeurs
du département d'électromécanique.
A tous nous disons merci !*

Dédicace

Jedédiercemodeste travail

A ma source éternelle d'inspiration,

demotivationet de bénédiction... mes

très chères parents Qu'ALLAH

lesprotèges.

Ma mère et toute la famille.

Mesamis.

Sommaire

Introduction générale	1
I CHAPITRE	3
I.1 INTERIDUCTION	3
I.2 Paramètres de la qualité de l'énergie électrique	4
I.2.1 Creux et coupures de tension	4
I.2.2 Fluctuations de tension (flickre):	5
I.2.3 Déséquilibre du système triphasé de tension	6
I.2.4 Variation de fréquence	7
I.3 Les harmoniques.....	9
I.3.1 Harmonique et inter harmonique	9
I.3.2 Sources d'harmonique	10
I.3.3 Conséquence des harmoniques	11
I.4 Grandeurs et caractéristiques des harmoniques.....	13
I.4.1 Range de l'harmonique	13
I.4.2 Valeur efficace d'une grandeur alternative	13
I.4.3 Série de Fourier.....	13
I.4.4 Taux d'harmonique de distorsion	14
I.4.5 Facteur de puissance F_p	14
I.4.6 Facteur de déformation V	15
I.4.7 Spectre de fréquence	15
I.5 Influence des harmoniques sur le facteur de puissance.....	15
I.6 Conclusion	16
Chapitre II	17
Introduction	18
LES NORMES IMPOSEES SUR LE THD	19
Solutions pour l'amélioration de la qualité d'énergie	23
Solutions traditionnelles.....	24
Solutions modernes.....	27
Filtrage Actif.....	28
Le Filtre Actif Parallèle (F.A.P)	28
Filtre actif série (FAS)	29
Combinaison parallèle-série actifs (UPQC)	29

Combinaison hybride active et passive.....	30
Conclusion.....	33
III Chapitre.....	34
III.1 Introduction	36
III.1.1 Structure générale et le principe de base de fonctionnement du FAP.....	38
III.1.2 Classement de filtre actif parallèle.....	39
III.2 Structure du filtre actif parallèle.....	40
III.2.1 Etude de la partie puissance	40
III.2.2 Etude de l'onduleur de tension.....	42
III.3 Stratégie de commande du filtre actif parallèle.....	46
III.4 Dimensionnement de l'ensemble réseau, filtre actif parallèle et charge polluante ...	47
III.4.1 Réseau électrique.....	48
III.4.2 Charge polluante	49
III.4.3 Filtre actif parallèle	50
Conclusion générale	63
Références bibliographiques	64

Liste de symbole

n : range de l'harmonique.

f_n : La fréquence de l'harmonique.

f_1 : La fréquence de fondamentale.

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

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

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

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

Q : La puissance réactive associée au courant fondamental.

D : La puissance déformante due aux harmoniques du courant.

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

F_{dis} : représente le facteur de distorsion.

P Puissance active

Q Puissance réactive

S Puissance apparente

Ud Tension continue à la sortie du redresseur

Id Courant continu fournit par le redresseur

If Courant efficace du filtre actif

Is Courant efficace de la source

fr Fréquence du réseau

m Indice de modulation

r Coefficient de réglage

Vp Amplitude de la porteuse

Rch, Lch Résistance et inductance côté continu

Rs, Ls Résistance et inductance de la source

Rc, Lc Résistance et inductance de la charge côté réseau

Vdc Tension aux bornes du condensateur

Cdc Capacité du condensateur

Scs Puissance apparente de court-circuit du réseau

Sch Puissance apparente de la charge non linéaire

Zn Impédance nominale du réseau

ie Courant de compensation

Liste de figure

Figure I.1 : Creux et coupures de tension.

Figure I.2 : Fluctuations de tension.

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

Figure I.4 : Variation de la fréquence

Figure I.5 : Les harmoniques

Figure I.6 : Tension composantes harmoniques

Figure I.7 : Le spectre des harmoniques

Figure I.8 : Le spectre des harmoniques du courant de la charge polluante.

Figure I.9 : Diagramme de Fresnel des puissances

Figure II.1 : Filtre passif résonnant (a : monophasé, b : triphasé).

Figure II.2 : Filtre passif série

Figure II.3 : Filtre passe-haut ou passif amorti.

Figure II.4:Filtre actif parallèle

Figure II.5 : Filtre actif série.

Figure II.6 : Filtre combiné parallèle-série (UPQC).

Figure II.7 : Filtre actif série est filtre passif parallèle

Figure II.8 : Filtre actif série connecté en série avec un filtre passif parallèle.

Figure II. 9 : Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle

Figure III. 1Structure de base d'un filtre actif parallèle . [25]

Figure III-2 Courant pollué, courant injecté et courant filtré [27].

Figure III-3 Configuration générale et le principe de base de fonctionnement du F AP

Figure III. 4: Structure d'un filtre actif parallèle

Figure III.5: Onduleur de tension

Figure III. 6: Onduleur de courant

Figure III.7: Principe de la commande des courants par hystérésis.

Figure III.8: Commande par hystérésis

Figure III.9: Principe de commande des courants par MLI

Figure III.10: Commande par modulation de largeur d'impulsions (a) signal de référence et de porteuse, (b) tension de sortie.

Figure III.12: Schéma de l'ensemble réseau, charge polluante et filtre actif parallèle.

Figure III.11: Schéma de principe de l'onduleur monophasé commandé par MLI sinus-triangle.

Liste de table

Tab.II.1. Limites des composantes harmoniques en courant.

Tab.II.2. Limites des émissions de courants harmoniques.

Tab. II.3. Niveaux de compatibilité des harmoniques de tension (CEI-1000-2-2).

Tab. II.4. Taux des harmoniques en tension à imposer pour vérifier l'immunité des appareils (CEI-61000-4-13).

Introduction générale

La qualité d'alimentation électrique est le degré auquel la tension, la fréquence et la forme d'onde d'un système d'alimentation électrique sont conformes aux spécifications établies. Une bonne qualité d'alimentation peut être définie comme une tension d'alimentation stable qui reste dans la plage prescrite, une fréquence alternative stable proche de la valeur nominale et une forme d'onde de courbe de tension lisse (ressemblant à une onde sinusoïdale). De manière générale, il est utile de considérer la qualité de alimentation comme la compatibilité entre ce qui sort d'une prise électrique et la charge qui y est branchée . Le terme est utilisé pour décrire l'énergie électrique qui entraîne une charge électrique et la capacité de la charge à fonctionner correctement. Sans la bonne alimentation, un appareil électrique (ou une charge) peut mal fonctionner, tomber en panne prématurément ou ne pas fonctionner du tout. Il existe de nombreuses façons dont l'énergie électrique peut être de mauvaise qualité et de nombreuses autres causes d'une telle énergie de mauvaise qualité.

L'industrie de l'énergie électrique comprend la production d'électricité (courant alternatif), le transport d'énergie électrique et finalement la distribution d'énergie électrique à un compteur d'électricité situé dans les locaux de l'utilisateur final de l'énergie électrique. L'électricité circule ensuite dans le système de câblage de l'utilisateur final jusqu'à ce qu'elle atteigne la charge. La complexité du système pour déplacer l'énergie électrique du point de production au point de consommation, combinée aux variations des conditions météorologiques, de la production, de la demande et d'autres facteurs, offre de nombreuses possibilités de compromettre la qualité de l'approvisionnement.

Bien que la "qualité de alimentation" soit un terme pratique pour beaucoup, c'est la qualité de la tension - plutôt que alimentation ou le courant électrique - qui est en fait décrite par le terme. La puissance est simplement le flux d'énergie et le courant demandé par une charge est largement incontrôlable.

Le premier chapitre est consacré à la présentation des perturbations dans les réseaux électriques d'alimentation, en courant et en tension, connectés à des charges polluantes, ainsi que les origines de ces perturbations et leurs conséquences sur les installations électriques.

Le deuxième chapitre est quelques normes d'harmoniques sont présentées. Après, les techniques et les méthodes de dépollution des réseaux électriques sont exposées. Ensuite nous présenterons les solutions de dépollution des réseaux électriques existantes, tant traditionnelles que modernes

Le troisième chapitre nous présenterons le principe de fonctionnement du filtre actif parallèle de puissance, la structure générale du FAP, les différentes stratégies de commande de l'onduleur de tension et le dimensionnement de l'ensemble réseau, charge polluante et filtre actif parallèle.

CHAPITRE I

LA QUALITÉ DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

I.1 INTRODUCTION

Le distributeur doit fournir à tous ses clients et utilisateurs une alimentation de bonne qualité sous la forme de trois tensions sinusoïdales formant un réseau triphasé équilibré. La qualité de cette puissance dépend de la tension aux points de contact. Cependant, cet effort est généralement sujet à des modifications lors de son transport jusqu'à ce qu'il atteigne le client industriel ou privé. Les origines de ces modifications sont nombreuses. Outre les accidents liés à la nature physique et physique des unités d'exploitation du réseau, il existe également des causes importantes propres au fonctionnement de certains récepteurs. Afin d'éviter des dysfonctionnements voire des destructions de composants du réseau électrique ou de récepteurs finaux, nous traiterons dans ce chapitre de ces pertes et de leurs différents types et effets.

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

La qualité d'énergie est un concept très large qui peut se définir par rapport à la continuité de la fourniture de l'énergie électrique et de la forme d'onde de la tension disponible.

L'évaluation de cette qualité consiste habituellement à caractériser les différents perturbations des électriques.

Les perturbations sont l'ensemble des phénomènes internes ou externes au réseau ayant un pouvoir de modifier d'une manière transitoire ou permanente en amplitude et/ou en forme les grandeurs électriques du réseau (courant, tension, fréquence). Ces perturbations peuvent être groupées en quatre catégories selon qu'elles affectent l'amplitude, la forme d'onde, la fréquence et la symétrie. Elles peuvent aussi être classées selon qu'elles soient permanentes, semi-permanentes ou aléatoires (foudre, court-circuit, manœuvre...).

Les perturbations électriques affectant l'un des quatre paramètres cités précédemment peuvent se manifester par :

I.2.1 Creux et coupures de tension

I.2.1.1 Définition

Le creux de tension est une diminution brutale de la tension à une valeur située entre 10 % et 90 % de la tension nominale pendant une durée allant de 10 ms jusqu'à quelques secondes, la figure I.1 montre un exemple de creux et de coupure de tension.

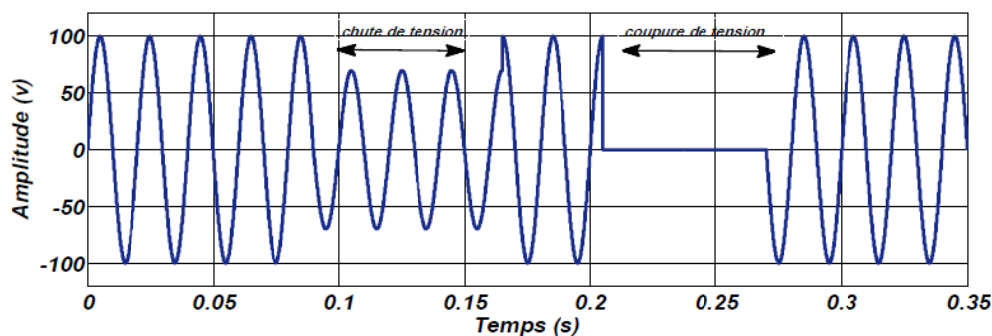


Figure I.1 : Creux et coupures de tension.

I.2.1.2 Origines

Les principales causes des creux de tension sont les perturbations dues à l'exploitation des réseaux comme la mise sous tension de gros transformateurs, enclenchement des condensateurs, simple démarrage de gros moteurs...etc. Les creux de tension sont aussi produits par des court-circuit survenant dans le réseau général ou dans les installations de la clientèle. Leur durée peut aller de 10 ms à plusieurs secondes, en fonction de la localisation du court-circuit et du fonctionnement des organes de protection [1].

I.2.1.3 Conséquences

Les creux de tension peuvent provoquer des perturbations sur les couples pour les machines tournantes, perturbation d'appareillage électronique, pannes intempestives, déclenchement d'équipements, lorsque leur profondeur et leur durée excèdent certaines limites (dépendant de la sensibilité particulière des charges). Les conséquences peuvent être extrêmement coûteuses (temps de redémarrage se chiffrant en heures, voire en jours ; pertes de données informatiques ; dégâts aux produits, voire aux équipements de production...) [2] [3] [4] [1].

I.2.2 Fluctuations de tension(flickre):

I.2.2.1 Définition

Les fluctuations de tension sont des variations périodiques ou erratiques de l'enveloppe de la tension. Ce sont des variations brutales de l'amplitude de la tension situées dans une bande de $\pm 10\%$ et se produisent sur un intervalle de temps de quelques centièmes de secondes.

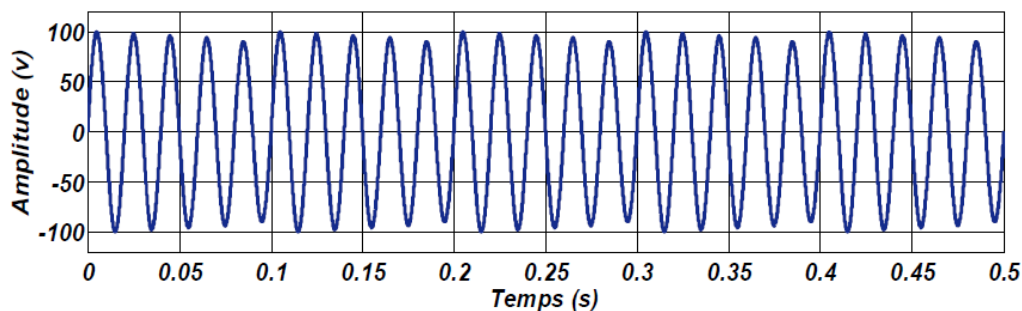


Figure I.2 : Fluctuations de tension.

I.2.2.2 Origines

L'origine principale de ces courants est le fonctionnement d'appareil dont la puissance absorbée varie de manière rapide, comme les fours à arc et des machines à souder. Ces fluctuations se traduisent par des variations d'intensité, visible au niveau de l'éclairage causant une gêne visuelle perceptible pour une variation de 1% de la tension. Ce phénomène de papillotement est appelé flickre. Un exemple de fluctuation de tension est montré dans la figure I.2.

I.2.2.3 Conséquences

Les fluctuations de tension est défini comme une impression d'instabilité de la sensation visuelle due à un stimulus lumineux dont la luminosité ou la couleur fluctuent dans le temps. Il peut gêner les personnes dans les ateliers, les bureaux, les locaux d'habitation en provoquant une fatigue visuelle et nerveuse [1].

I.2.3 Déséquilibre du système triphasé de tension

I.2.3.1 Définition

Lorsque les trois tensions ne sont pas identiques en amplitude et/ou ne sont pas décalées d'un angle de 120° les unes par rapport aux autres, on parlera de déséquilibre du système triphasé.

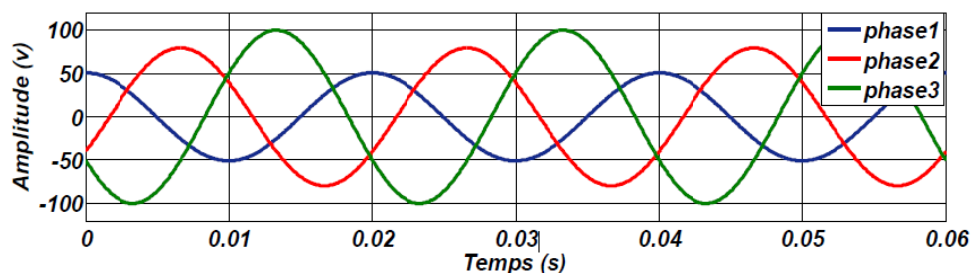


Figure I.3: Déséquilibre du système triphasé de tension.

I.2.3.2 Origines

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 [5]. Ceci est fréquent pour les récepteurs monophasés à basse tension. 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 (Voir figure I.3).

I.2.3.3 Conséquences

Mauvais fonctionnement 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 antirésonance 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 [6][1].

I.2.4 Variation de fréquence

I.2.4.1 Définition

Une variation sensible de la fréquence du réseau peut apparaître sur les réseaux des utilisateurs non interconnectés ou alimentés par une source thermique autonome (voir la figure I.4). Au niveau des réseaux de distribution ou de transport, cette variation de la fréquence est très rare et n'est présente que lors de circonstances exceptionnelles, comme dans le cas de certains défauts graves sur le réseau [7].

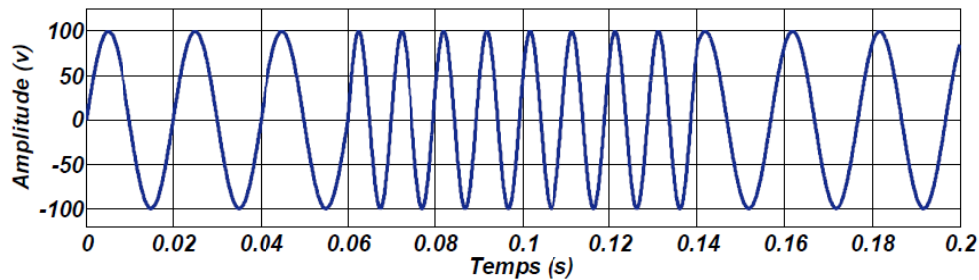


Figure I.4 : Variation de la fréquence

I.2.4.2 Origines

a. Raisons obstétriques

Les dysfonctionnements des générateurs des stations électriques dépendant des méthodes de production traditionnelles (stations à vapeur - gaz ... etc.) peuvent entraîner des fluctuations du réseau électrique, et ces pannes peuvent entraîner l'arrêt partiel ou total de la production d'énergie électrique de la centrale, provoquant une diminution de la fréquence du réseau. La diminution de la production des éoliennes est causée par: a) une diminution de la vitesse du vent ou de l'arrêt du vent, et par conséquent l'arrêt de la turbine, ou b) la présence d'orages qui nécessitent l'arrêt de la rotation des turbines pour éviter toute exposition à des dommages majeurs. Cette diminution de la production peut entraîner des fluctuations du réseau électrique. L'absence de rayonnement solaire dans les stations photovoltaïques en raison des intempéries et la présence d'un grand nombre de nuages entraîne une diminution de l'énergie produite, ce qui peut entraîner des fluctuations de le réseau électrique, ce qui affecte négativement la stabilité du réseau.

b. Raisons liées au transfert

Une coupure dans un câble haute tension provoque une coupure de l'alimentation des zones alimentées par le câble. Une panne des transformateurs les plus bas qui convertissent la tension de haute en basse ou vice versa entraîne également une coupure de l'alimentation.

c. Raisons liées à la consommation

L'une des grandes charges (usines - usines) s'est arrêtée à la suite d'un dysfonctionnement, ce qui entraîne un excès d'énergie dans le réseau. Une hausse brutale de la demande en dehors des heures de pointe attendues, ce qui conduit à un décalage de l'énergie générée avec la demande et donc la stabilité du réseau est affectée à son tour.

I.2.4.3 Conséquences

Le changement de tension entraîne un changement de fréquence du réseau électrique, ce qui pose des problèmes dans les charges alimentées par le réseau, car le changement de fréquence peut provoquer des dysfonctionnements des appareils électriques. Dans l'hypothèse où le changement se prolongerait pendant un certain temps, cela peut entraîner les protections sur les lignes de transport et de distribution en plus des protections dans les stations de production qui séparent les éléments qui les protègent, ce qui conduit à une coupure d'électricité pour les consommateurs. .

I.3 Les harmoniques

I.3.1 Harmonique et inter harmonique

La prolifération des équipements électriques utilisant des convertisseurs statiques a entraîné ces dernières années une augmentation sensible du niveau de pollution harmonique des réseaux électriques.

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.

Le passage de ces courants harmoniques dans les impédances du réseau électrique peut entraîner des tensions harmoniques aux points de raccordement et alors polluer les consommateurs alimentés par le même réseau électrique.

Les différents secteurs industriels concernés sont aussi bien du type secondaire (utilisation des gradateurs, des redresseurs, des variateurs de vitesse...), que du type tertiaire (informatique ou éclairage dans les bureaux, Commerces.....) ou domestique (téléviseurs, appareils électroménagers en grand nombre).

Inter harmoniques :Ce sont des composantes sinusoïdales avec des fréquences qui ne sont pas des fréquences multiples entières de celle du fondamental.

Infra harmoniques :Ce sont des composantes qui sont à des fréquences inférieures à celle du fondamental.

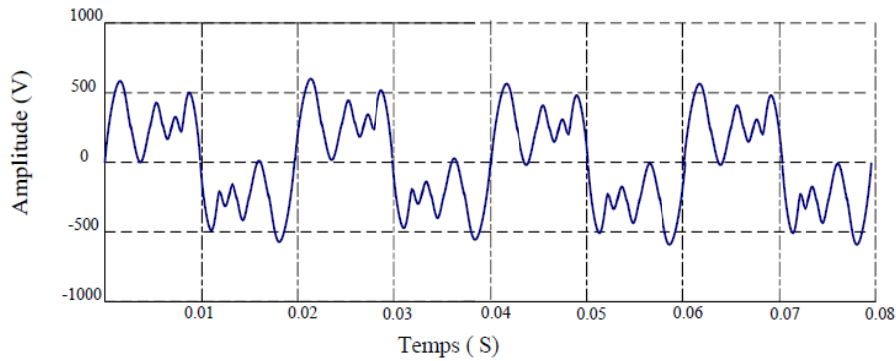


Figure I.5 : Les harmoniques

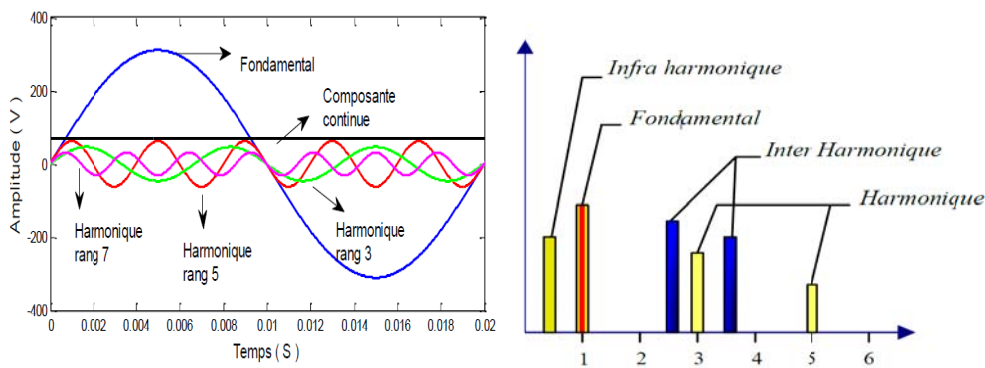


Figure I.6 :

Tension composantes harmoniques

Figure I.7 : Le spectre des harmoniques

I.3.2 Sources d'harmonique

La cause principale de l'existence des harmoniques de tension est l'injection des courants non sinusoïdaux par des charges non linéaires, ou des charges déséquilibrées branchées au réseau.

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

- Les redresseurs monophasés et triphasés.
- Les gradateurs utilisés dans les entraînements.
- Les systèmes d'éclairage et de chauffage et les systèmes de conduite des réseaux.
- Les variateurs de vitesse électroniques constitués principalement d'un convertisseur statique et d'une partie électronique, destinés à commander la vitesse d'un moteur électrique.

b. L'éclairage : L'éclairage, par lampes à décharge et tubes fluorescents, est générateur de courants harmoniques. Le taux individuel d'harmonique 3 peut même dépasser 100 % pour certaines lampes fluo-compactes modernes, d'où une attention particulière à porter à la détermination de la section et de la protection du conducteur neutre qui, véhiculant la somme des courants d'harmoniques 3 des trois phases, risque un échauffement important.

c. Les fours à arc : Dans le cas du four à arc à courant alternatif l'arc est non linéaire, dissymétrique et instable. Il va induire des spectres possédant des raies impaires, paires et un spectre continu (bruit de fond à toutes les fréquences). Le niveau spectral est en fonction du type de four, de sa puissance, de la période de fonctionnement considérée : fusion, affinage... Aussi seules des mesures peuvent déterminer le spectre de façon précise.

Dans le cas du four à arc à courant continu l'arc est alors alimenté par l'intermédiaire d'un redresseur. L'arc est plus stable qu'en courant alternatif. Le courant absorbé se décompose en un spectre semblable à celui d'un redresseur, et un spectre continu de niveau inférieur à celui d'un four à courant alternatif.

d. Les inductances saturées : De telles inductances ont leur impédance fonction de l'amplitude du courant qui les traverse, et de fait elles provoquent des déformations notables de ce courant. C'est le cas, dans une certaine mesure, des transformateurs à vide soumis à une surtension permanente.

e. Les machines tournantes : Les machines tournantes donnent des harmoniques de denture de rangs élevés et d'amplitudes souvent négligeables.

I.3.3 Conséquence des harmoniques

Une fois que les sources d'harmoniques sont bien définies, elles doivent être interprétées en termes de leurs effets sur les installations et les équipements électriques.

a. Effets instantanés:

C'est le cas des événements à durée courte qui peuvent instantanément affecter les installations électriques concernant les appareils produisant une image électronique (écran d'ordinateur, téléviseur), les appareils produisant un son censé être de bonne qualité (chaîne HI-FI, téléphone) ou la précision des appareils de mesure.

- **Les défauts de fonctionnements de certains équipements électriques:** En présence d'harmoniques, la tension et le courant peuvent changer plusieurs fois de signe dans une demi-période. Les appareils dont le fonctionnement est basé sur le passage à zéro des grandeurs électriques peuvent être affectés.

- **Troubles fonctionnels des micro-ordinateurs:** Les effets sur ces équipements peuvent se manifester par la dégradation de la qualité de l'image et par des couples pulsatiles des moteurs d'entraînement de disque.

- **Erreurs dans les appareils de mesure:** Certains appareils de mesure et les compteurs d'énergie à induction présentent des dégradations de mesure et des erreurs de lecture supplémentaires en présence d'harmoniques.

- **Vibrations et bruits:** Les courants harmoniques génèrent également des vibrations et des bruits acoustiques, principalement dans les appareils électromagnétiques (inductances, transformateurs et machines tournantes).

b. Effets à terme

Dans les machines tournantes, les transformateurs et les condensateurs, ils se manifestent par des échauffements supplémentaires; ce qui entraîne la destruction du matériel ou plus fréquemment une diminution de leur durée de vie par surcharge thermique.

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

- **Alternateurs:** pertes supplémentaires dans les enroulements statoriques et dans les amortisseurs liés à la circulation des courants harmoniques.
- **Lignes:** pertes ohmiques supplémentaires.
- **Transformateurs:** pertes supplémentaires dans les enroulements par *effet Joule* et dans le noyau par courant de Foucault.
- **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.
- **Moteur à courant alternatif:** pertes supplémentaires dans le fer et dans les enroulements plus l'échauffement du moteur.
- **Condensateur de puissance:** pertes diélectrique supplémentaires conduisant au vieillissement rapide du condensateur.

- **Lignes téléphoniques:** génération de bruits importants liés au couplage électromagnétique; Entre les lignes de puissance et les circuits de communication.

I.4 Grandeurs et caractéristiques des harmoniques

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

I.4.1 Range de l'harmonique

C'est le rapport de sa fréquence f_n à celle de la fondamentale (généralement la fréquence industrielle, 50 ou 60 Hz) :

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

n : range de l'harmonique.

f_n : La fréquence de l'harmonique.

f_1 : La fréquence de fondamentale.

I.4.2 Valeur efficace d'une grandeur alternative

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

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

I.4.3 Série de Fourier

Ceci revient à dire que : « tout signal périodiques de période $T= 1/f$, peut se décomposer en une somme infinie des termes sinus et cosinus de fréquences multiples de f ».

Mathématiquement, celas'écrit :

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cdot \cos(n\omega t) + b_n \cdot \sin(n\omega t)) \quad (I.3)$$

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

$$a_n = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cdot \cos(n\omega t) dt \quad (I.4)$$

$$b_n = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cdot \sin(n\omega t) dt \quad (I.5)$$

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

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

I.4.4 Taux d'harmonique de distorsion

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

$$\text{THD (\%)} = 100 \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} Y_n^2}}{Y_1} \quad (I.6)$$

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

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

I.4.5 Facteur de puissance F_p

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

$$F_p = \frac{P}{S} \quad (I.7)$$

I.4.6 Facteur de déformation v

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

$$V = \frac{F_P}{\cos \varphi_1} \quad (1.8)$$

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

I.4.7 Spectre de fréquence

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

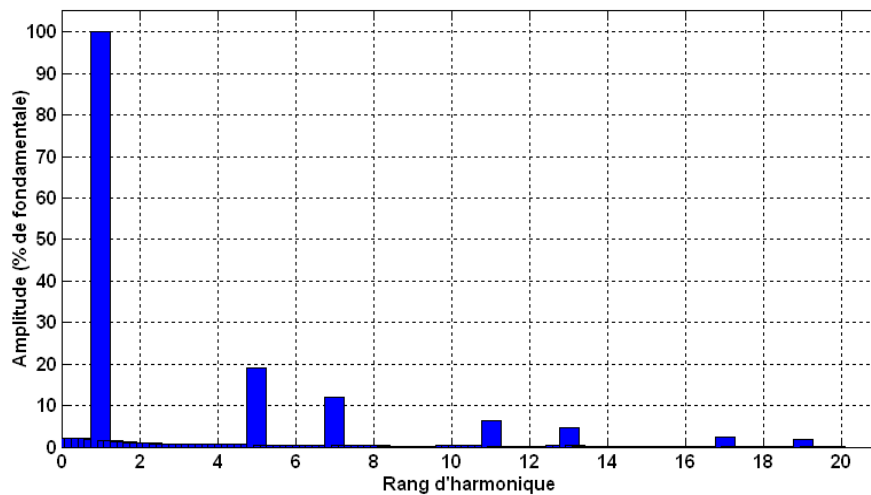


Figure I.8 : Le spectre des harmoniques du courant de la charge polluante.

I.5 Influence des harmoniques sur le facteur de puissance

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

En présence des harmoniques, la puissance apparente S est composée de trois parties active P , réactive Q et déformante D , cette dernière est la puissance provoquée par les courants harmoniques, tel que.

$$I = I_f + I_h \quad (1.9)$$

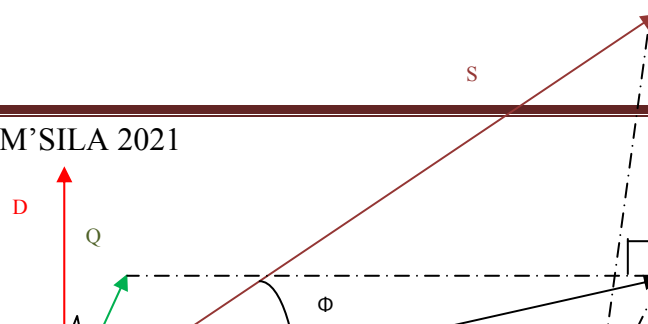


Figure I.9 : Diagramme de Fresnel des puissances.

Tel que :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (\text{I.10})$$

Q : La puissance réactive associée au courant fondamental.

D: La puissance déformante due aux harmoniques du courant.

L'équation de la puissance active est donnée par :

$$P = 3. U. I_1. \cos(\varphi_1) \quad (\text{I.9})$$

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

$$Q = 3. U. I_1. \sin(\varphi_1) \quad (\text{I.10})$$

Et

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

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

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

Où F_{dis} représente le facteur de distorsion.

I.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents types de perturbations et pertes qui peuvent être infligées aux réseaux électriques, où nous avons identifié la cause et l'effet de chaque type de perturbation, et nous avons parlé des harmoniques, comment les calculer, et les caractéristiques qui le distinguent, tout en abordant le pouvoir corrosif dans le cas des harmoniques.

CHAPITRE II

LES SOLUTIONS POUR L'AMÉLIORATION DE LA QUALITÉ D'ÉNERGIE

Introduction

L'énorme développement technologique à notre époque à travers la multiplicité des circuits électriques qui a résolu de nombreux problèmes jusqu'à ce que tout utilise l'électricité, mais ces circuits affectent directement les propriétés du réseau électrique et cet effet se traduit par des aspects négatifs pour le consommateur afin que les entreprises recherchent des solutions afin pour préserver les caractéristiques du réseau électrique. Dans ce chapitre, nous normes impose les THD et les présentons les solutions classiques et modernes pour dépolluer les réseaux électriques.

LES NORMES IMPOSEES SUR LE THD

Afin de garantir un niveau de qualité de l'énergie satisfaisant en limitant les effets des perturbations harmoniques, les distributeurs d'énergie et les utilisateurs sont amenés à respecter des normes et des recommandations qui définissent les règles relatives à la compatibilité électromagnétique (CEM) définies [8] :

- au niveau international par la CEI.
- au niveau européen par le CENELEC.
- au niveau français, par l'UTE et le CEF.

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

Afin de faciliter la connaissance des normes pour chaque domaine, les normes CEI qui couvrent tous les domaines de l'électrotechnique sont numérotées et référencées comme par exemple CEI 61000 sur la compatibilité électromagnétique et CEI 60063 qui définit les séries de valeurs normalisées pour les résistances et condensateurs,...etc. Les normes internationales publiées par la CEI dans les domaines de l'électricité et de l'électronique ont pour objectifs de

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

Au niveau international (CEI), les normes CEI 61000 publiées dans le domaine de la compatibilité électromagnétique (CEM) sont divisées en plusieurs parties, conformément à la structure suivante:

- 1- Généralités.
- 2- Environnement.
- 3- Limites.
- 4- Techniques d'essais et de mesures.
- 5- Guide d'installation et d'atténuation.
- 6- Normes génériques.

Chaque partie est divisée en plusieurs sous-parties dont certaines ont été rendues obligatoires par la directive 89/336/CEE dans l'Union Européenne et retranscrites dans les droits nationaux sous l'appellation NF EN 61000 (en France). L'application de ces directives

est obligatoire pour bénéficier du marquage CE (Communauté Européenne). L'apposition de marquage indique donc la conformité du produit aux exigences essentielles de ces directives afin d'avoir le droit de commercialiser les produits concernés dans l'Union Européenne.

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

- Pour un harmonique pair : $\frac{v_h}{v_1} \leq 0,6 \%$.
- Pour un harmonique impair $\frac{v_h}{v_1} \leq 1\%$.
- Pour le taux de distorsion global de tension : $THD < 1,6 \%$.

Il s'agit de limitations qui sont maintenant très anciennes (plus de 20ans). Ci-dessous, nous allons détailler les normes internationales les plus récentes concernant les courants et les tensions.

Au niveau international (CEI), les normes CEI-1000 définissent les niveaux des courants et des tensions harmoniques à respecter. Le tableau. I.1 présente la norme CEI-1000-3-2 qui fixe la limitation des courants injectés dans un réseau public basse tension pour des équipements dont le courant par phase est inférieur à 16A. Il s'agit là des appareils du domaine domestique. Aussi, du fait de leur puissance, les équipements industriels sont exclus du champ d'application de cette norme [8].

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

Tab.II.1. Limites des composantes harmoniques en courant.

La norme (CEI-1000-3-4) spécifie les limites d'émissions de courants harmoniques des équipements individuels d'intensité assignée supérieure à 16A et jusqu'à 75A. Ces limites

s'appliquent aux réseaux publics de tensions nominales comprises entre 230 V (monophasé) et 600 V (triphase).

Rang	Courant harmonique en % du fondamental
3	21.6
5	10.7
7	7.2
9	3.8
11	3.1
13	2.0
15	0.7
17	1.2
19	1.1
21	≤ 0.6
23	0.9
25	0.8
27	≤ 0.6
29	0.7
31	0.7
≥ 33	≤ 0.6
pair	≤ 0.6 ou $0.158/h$

Tab.II.2. Limites des émissions de courants harmoniques.

Les normes CEI-1000-2-2 et CEI-1000-2-4 précisent le niveau des harmoniques de tension à respecter au point de raccordement sur les réseaux de distribution basse tension, public et industriel respectivement. Le tableau I.3 présente les niveaux de compatibilité pour les tensions harmoniques sur les réseaux publics basse tension.

Harmoniques impairs non multiples de 3		Harmoniques impairs multiples de 3		Harmoniques pairs	
Rang	Tension harmonique en % du fondamental	Rang	Tension harmonique en % du fondamental	Rang	Tension harmonique en % du fondamental
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.3	6	0.5
13	3	21	0.2	8	0.5
17	2	> 21	0.2	10	0.5
19	1.5			12	0.2
23	1.5			> 12	0.2
25	1.5				
>25	$0.2+0.5*25/k$				

Tab. II.3. Niveaux de compatibilité des harmoniques de tension (CEI-1000-2-2).

La norme CEI 61000-4-13 précise les essais d'immunité basse fréquence aux harmoniques et inter-harmoniques incluant les signaux transmis sur le réseau électrique. Le tableau I.4 indique les taux des harmoniques en tension à utiliser pour vérifier l'immunité des appareils pour les matériels et systèmes sensibles et les réseaux industriels.

Rang harmonique	Matériels et systèmes sensibles %	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

Tab. II.4. Taux des harmoniques en tension à imposer pour vérifier l'immunité des appareils (CEI-61000-4-13).

Compte tenu de toutes ces normes imposées par la réglementation CEM, nous avons besoin de mettre en œuvre des moyens efficaces afin de limiter la propagation de la pollution harmonique des réseaux de distribution d'énergie. De plus, les normes actuelles ne sont pas tout à fait satisfaisantes car elles ne tiennent pas compte de l'influence du réseau et de la déformation initiale de la tension. Par ailleurs, elles paraissent un peu laxistes pour les appareils de faibles puissances [9]. Il faudrait donc s'attendre, dans l'avenir proche, à des normes plus strictes et surtout à des restrictions financières plus contraignantes qui justifient davantage des travaux comme le notre dans le domaine de la qualité de l'énergie.

Solutions pour l'amélioration de la qualité d'énergie

L'objectif de l'amélioration de la qualité de l'énergie est l'élimination ou la minimisation des perturbations en tension et/ou en courant dans les réseaux électriques, là où le niveau de la qualité n'est pas suffisamment élevé pour une charge donnée, quand les coûts

et les inconvénients de son dysfonctionnement sont inacceptables. L'aspect de la qualité de l'énergie est très large, par conséquent son amélioration peut s'étendre à l'amélioration de plusieurs facteurs comme : l'architecture du réseau, les automatismes de réalimentation, le niveau de fiabilité de ses ouvrages, leurs protections, et leurs maintenances. De manière générale, il y a deux stratégies pour améliorer la qualité de l'énergie :

1. Les solutions préventives : c'est une stratégie basée sur la modification des caractéristiques des charges perturbatrices ou du réseau, ou encore le remplacement des sources de pollution classiques par des topologies à prélèvement sinusoïdal afin d'éviter l'apparition des perturbations.

2. Les solutions correctives : cette solution consiste à compenser les perturbations déjà générées par les charges polluantes. Dans ce contexte, on distingue deux types des filtres classés selon leurs constructions, **le filtre passif** où il est basé dans sa construction sur les composants passifs (inductances et condensateurs), tandis que **le filtre actif** est basé sur les convertisseurs statiques (généralement onduleur de tension ou de courant).

Pour ne pas charger ce présent chapitre, nous nous intéressons dans ce qui suit à la deuxième solution et particulièrement au filtrage actif des harmoniques.

Solutions traditionnelles

L'existence de perturbations dans un réseau électrique conduit à prendre impérativement des dispositifs afin d'atténuer ou d'éliminer leurs conséquences sur les équipements électriques et sur les réseaux électriques [10]. Sur cette base on va décrire de manière sommaire les principaux dispositifs existants utilisés pour le traitement des perturbations :

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 [10].

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 [10]. Parmi les dispositifs de filtrage les plus répandus, on distingue les filtres passifs qui contribuent à la compensation d'énergie réactive [11]. Parmi les filtres passifs, on peut citer :

Filtre passif résonant

Il est constitué par la mise en série d'une inductance, d'une résistance, et d'un condensateur. La figure (II.1) montre clairement le montage de ce dernier ainsi que son avec la ligne de l'impédance en fonction de la fréquence [12].

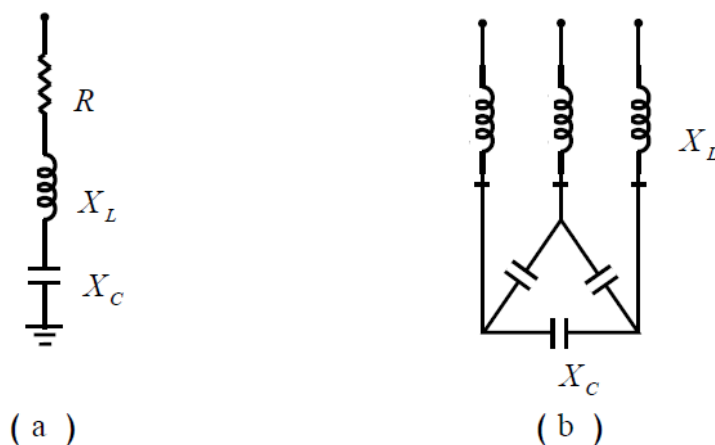


Figure II.1 : Filtre passif résonant (a : monophasé, b : triphasé).

Ce type de filtre est caractérisé par l'emplacement de trois filtres, deux pour les harmoniques d'ordre inférieurs et un filtre pour les harmoniques d'ordres supérieurs, c'est-à-dire pour un pont triphasé nous avons besoin d'un filtre passe bas pour le cinquième et l'autre pour le septième harmonique et d'un filtre passe haut pour tous les harmoniques au-delà de la 11ème [13].

Filtre passif série

Le principe est le même que le précédent, mais au lieu de piéger les harmoniques, on les empêche de remonter à la source. Un exemple de filtre passif série est le circuit bouchon [14].

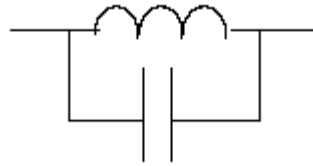


Figure II.2 : Filtre passif série

Filtre passe-haut

Le Filtre passe haut est moins sélectif et atténue les harmoniques inférieures ou voisines de sa fréquence de coupure. La figure (II.3) représente l'évolution de son impédance en fonction de la fréquence [15].

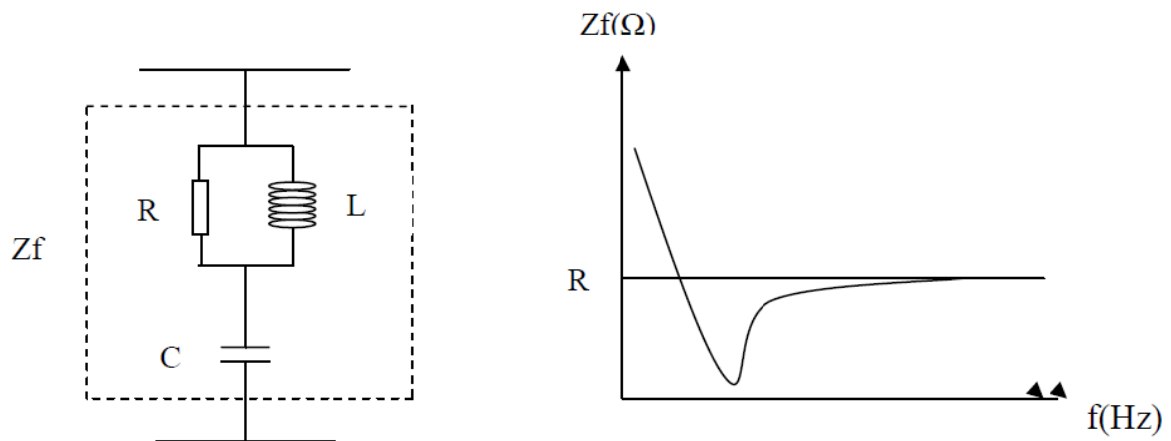


Figure II.3 : Filtre passe-haut ou passif amorti.

Le filtre passe haut assure l'atténuation des harmoniques dans une plage plus large de fréquence que le filtre résonnant, mais contribue à améliorer sensiblement le taux de distorsion harmonique globale d'une installation polluée. Le filtre passe haut peut être associé à un filtre résonnant dans certaines applications industrielles. Pour des installations utilisant le filtrage harmonique, on peut concevoir la mise en œuvre d'un filtre résonnant pour les rangs 5 et 7, associé à un filtre passe haut accordé pour un harmonique de rang 13 par exemple. 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 plusieurs inconvénients [16]:

- manque de la souplesse à s'adapter aux variations du réseau et de la charge.
- équipements volumineux.

- problèmes de résonance avec l'impédance du réseau.

Avantages et Inconvénients des filtres passifs

Bien que les filtres passifs n'éliminent pas les harmoniques dans une grande plage, néanmoins, il est utilisé en raison de certaines caractéristiques importantes qui sont décrits comme suit [11] :

- Ils sont plus simples à configurer et à construire.
- Ils possèdent un faible coût initial et de maintenance (par rapport au filtre actif).

Certains inconvénients majeurs des filtres passifs sont cités ci-dessous :

- la nécessité d'une connaissance approfondie de la configuration du réseau électrique.
- Equipement volumineux.
- L'état de résonance dans le filtre peut créer un problème avec les charges et le réseau, entraînant des fluctuations de tension.
- La réponse du filtre est statique, c'est-à-dire, si la variation de charge introduit de nouvelles composantes harmoniques, le filtre doit être redessiné, ce qui augmente les coûts de maintenance et d'exploitation du filtre.
- Les problèmes de déséquilibre de la charge ne peuvent pas être résolus.

En raison des inconvénients cités ci-dessus et l'apparition de nouveaux composants semi-conducteurs comme les thyristors GTO et les transistors IGBT, des nouvelles structures des filtres moderne, appelées filtres actifs de puissance sont conçu pour générer en temps réel des courants ou des tensions harmoniques de manière à ce que le courant est la tension du réseau soient sinusoïdaux et parfois opérant avec un facteur de puissance unitaire.

Solutions modernes

Deux raisons principales ont conduit à concevoir une nouvelle structure de filtrage moderne et efficace appelée filtre actif. 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. La seconde raison fait suite à l'apparition de nouveaux composants semi-conducteurs, comme les thyristors GTO et les transistors IGBT. 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.

Nous citerons trois topologies possibles de filtres actifs :

- Le filtre actif parallèle (SFAP) : conçu pour compenser toutes les perturbations de courant comme les harmoniques, les déséquilibres et la puissance réactive.
- Le filtre actif série (FAS) : conçu pour compenser toutes les perturbations de tension comme les harmoniques, les déséquilibres et les creux de tension.
- La combinaison parallèle-série actifs : solution universelle pour compenser toutes les perturbations en courant et en tension [17].

Filtrage Actif

Le filtrage actif constitue aujourd'hui une solution plus sophistiquée que le filtrage passif, bénéficiant des technologies les plus performantes et constamment améliorée par les constructeurs. Le principe de fonctionnement du filtre actif réside dans le fait que celui-ci produit des courants qui s'opposent aux courants harmoniques créés par les charges non linéaires, tendant ainsi à rétablir un courant appelé du réseau quasi sinusoïdal. Ces filtres actifs sont encore appelés compensateurs actifs.

Ils sont utilisés en parallèle ou en série d'une installation nécessitant un traitement harmonique. Dans ce qui suit, nous donnons les structures les plus utilisées dans la littérature, à savoir les filtres parallèle série, combiné parallèle-série et les structures hybrides actifs passifs [18].

Le Filtre Actif Parallèle (F.A.P)

Appelé aussi compensateur shunt, il est connecté en parallèle sur le réseau de distribution (figure 1.4). Il est le plus souvent commandé comme un générateur de courant. Il restitue dans le réseau électrique les courants harmoniques i_{inj} égaux à ceux absorbés par la charge non linéaire mais en opposition de phase, de telle sorte que le courant fourni par le réseau I_s soit sinusoïdal et en phase avec la tension simple correspondante. Son indépendance vis-à-vis de la source et de la charge lui assure auto-adaptabilité, fiabilité et performance [17].

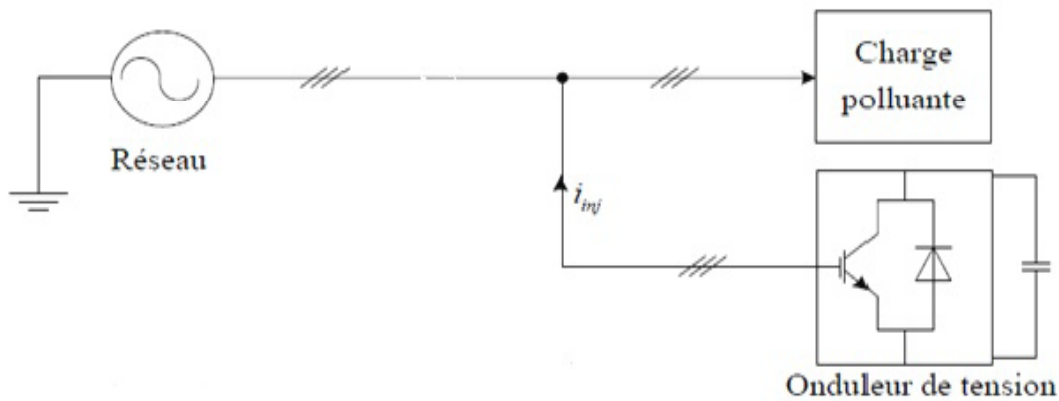


Figure II.4: Filtre actif parallèle.

Filtre actif série (FAS)

Le filtre actif série engendre des tensions harmoniques V_h dont la somme avec la tension réseau V_s est une onde sinusoïdale (figure I.5). Il est destiné à protéger les installations sensibles aux perturbations provenant du réseau telles que les harmoniques en tension, les Surtensions. En revanche, le filtrage série ne permet pas de compenser les courants harmoniques consommés par la charge [19].

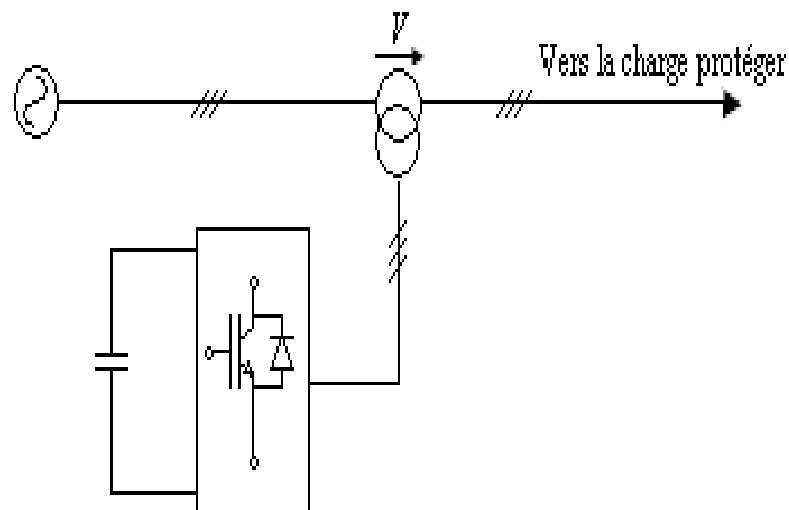


Figure II.5 : Filtre actif série.

Combinaison parallèle-série actifs (UPQC)

Cette combinaison parallèle-série actifs, aussi appelée (Unified Power Quality Conditionner) (UPQC), résulte de l'association des deux filtres actifs parallèle et série,

comme le montre la Figure (I.6). Profitant des avantages des deux filtres actifs, l'UPQC assure un courant et une tension sinusoïdaux du réseau électrique à partir d'un courant et d'une tension perturbés de celui-ci [18].

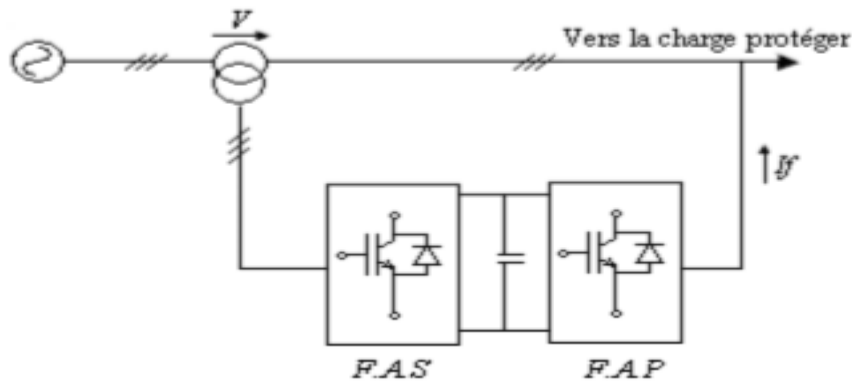


Figure II.6 : Filtre combiné parallèle-série (UPQC).

Il existe plusieurs autres groupes mixtes de filtres actifs avec cette fois des filtres passifs:

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

Combinaison hybride active et passive

Afin de réduire le dimensionnement et par conséquent le prix des filtres actifs, l'association de filtres actifs de faible puissance à des filtres passifs peut être une solution. Dans ce cas, les filtres passifs ont pour rôle d'éliminer les harmoniques prépondérants permettant de réduire le dimensionnement des filtres actifs qui ne compensent que le reste des perturbations. Plusieurs configurations ont été présentées dans la littérature, les plus étudiées étant :

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

Le filtre actif série avec des filtres passifs parallèles:

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

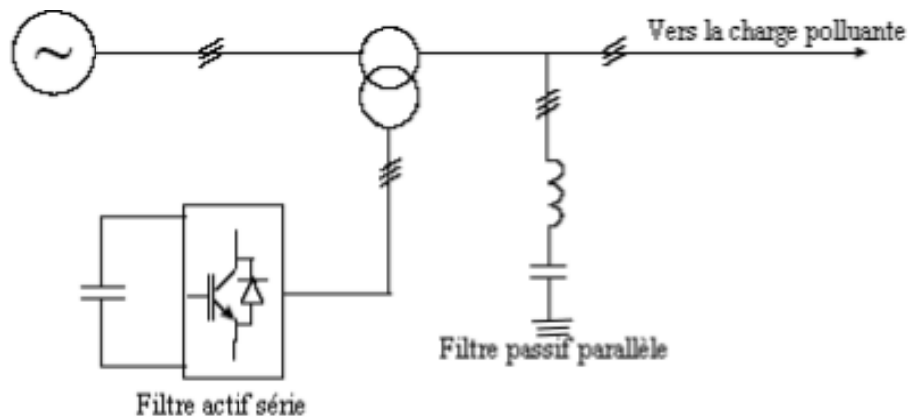


Figure II.7 : Filtre actif série est filtre passif parallèle

Le filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles

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

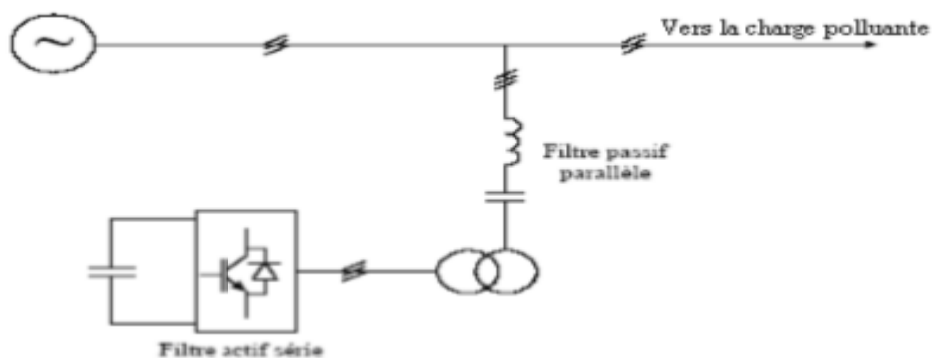


Figure II.8 : Filtre actif série connecté en série avec un filtre passif parallèle.

Le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle

Le rôle du filtre actif parallèle dans cette configuration, montrée en figure (I.9), est la compensation des courants harmoniques basses fréquences émis par la charge polluante. Le filtre passif accordé sur une fréquence élevée, élimine les harmoniques hautes fréquences y compris ceux créés par le (F A P). Ce type de filtrage a déjà été appliqué à la compensation des courants harmoniques émis par un cyclo convertisseur de forte puissance [20]

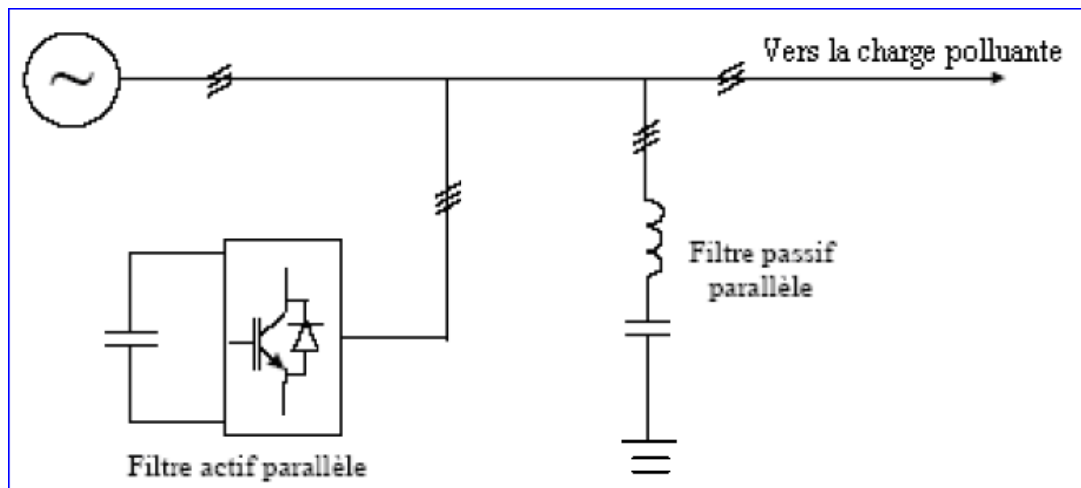


Figure II. 9 : Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté plusieurs solutions traditionnelles et modernes de dépollution. 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 des 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 perturbation susceptible d'apparaître dans un réseau électrique basse tension. 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 (FAP) peut être installé pour compenser toutes les perturbations de courant comme les harmoniques et la puissance réactive. Le filtre actif série (FAS) peut être installé pour compenser toutes les perturbations de tension comme les harmoniques et les creux de tension. La combinaison parallèle-série actifs (UPQC) est la solution universelle pour compenser toutes les perturbations en courant et en tension. D'autres solutions de dépollution consistent à associer des filtres actifs et passifs pour trouver un compromis entre l'efficacité de compensation et le coût. Ces solutions peuvent être des solutions futures très prometteuses. Les méthodes de régulation avancées que nous appliquerons dans le cas du filtre actif parallèle monophasé et triphasé, seront étudiées dans les prochains chapitres.

CHAPITRE III

FILTRE ACTIF PARALLELE DE PUISSANCE, PRINCIPE, STRATEGIE DE COMMANDE

III.1 Introduction

Ces dernières années, l'utilisation extrême des convertisseurs de puissance et d'autres charges non linéaires dans les réseaux et dans l'installation industrielle est observée qu'il détériore la tension du système d'alimentation et les formes d'onde du courant.

Grâce au développement qu'a connu la technologie des semi-conducteurs de puissance entièrement commandable comme: GTO, IGBT, MOSFET, qui a donné l'apparition des convertisseurs de puissance comme AC-DC (redresseur à commande MU) qui permettant à un meilleur contrôle de facture de puissance et compensation de certains harmoniques de basse fréquence [21]. De plus, ce progrès dans le domaine de semi-conducteur de puissance permet d'envisager une nouvelle solution de compensation des perturbations du réseau électrique, appelée filtrage actif [22,21].

Afin de réduire les harmoniques au niveau du réseau électrique, nous proposons dans ce travail le filtrage actif parallèle, par les avantages qu'il représente, tel que l'adaptation aux variations de la charge polluante. Le filtre actif parallèle est un onduleur de tension à modulation de largeur d'impulsions, il injecte dans le réseau des courants harmoniques égaux et en opposition de phase à ceux absorbés par la charge polluante. Cette structure a pour vocation d'éliminer de façon active tout ou une partie des harmoniques de courant. Dans ce chapitre nous étudierons la structure générale, les différentes stratégies de commande de l'onduleur de tension et le dimensionnement du filtre actif parallèle.

III.2. Filtre actif parallèle

L'application du filtre actif parallèle est le type le plus couramment utilisé aujourd'hui, en raison de sa topologie bien connue et sa simplicité d'installation [23].

Un filtre actif parallèle (F AP) également appelé compensateur shunt, il consiste comme une source de courant harmonique contrôlable, qui compense le courant harmonique généré par la charge non linéaire [23, 24].

La figure III-1 représente la configuration de base d'un F AP. Ce filtre est constitué d'un onduleur connecté en parallèle avec le réseau par l'intermédiaire d'un filtre passif appelé: filtre de découplage, et une source de stockage d'énergie. Ces deux derniers éléments déterminent la nature de filtre actif parallèle soit structure de tension ou structure de courant.

Cependant, le F AP à structure tension est le plus fréquemment utilisé dans les applications industrielles. Nous avons donc choisi le F AP à structure de tension dans notre travail [25-26].

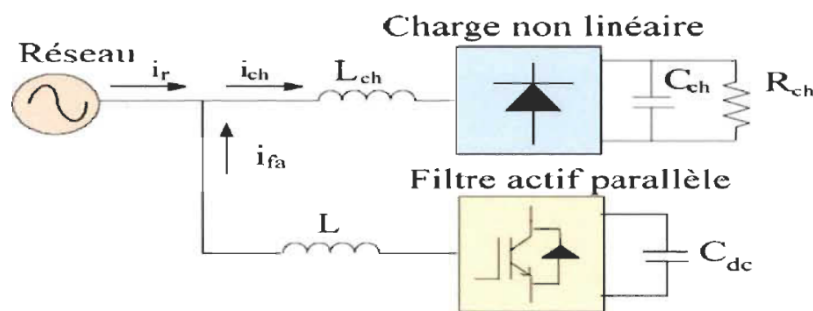


FIGURE III. 2 Structure de base d'un filtre actif parallèle .[25]

La fonctionnalité d'un FAP consiste à injecter en temps réel un compensateur harmonique de même amplitude et de phase opposé que celui absorbé par la charge polluante connectée au réseau électrique. Ainsi le courant déformé fourni par la source d'énergie devient sinusoïdal comme illustré dans la figure III-2. Dans certaines conditions, le F AP peut être utilisé pour la compensation de l'énergie réactive et pour amortir la résonance due à l'interaction entre la ligne et le filtre passif [25-26]. Donc, l'objectif du filtre actif parallèle consiste à empêcher les composants perturbateurs (harmoniques, énergies réactives et déséquilibres), produits par des charges non linéaires [25].

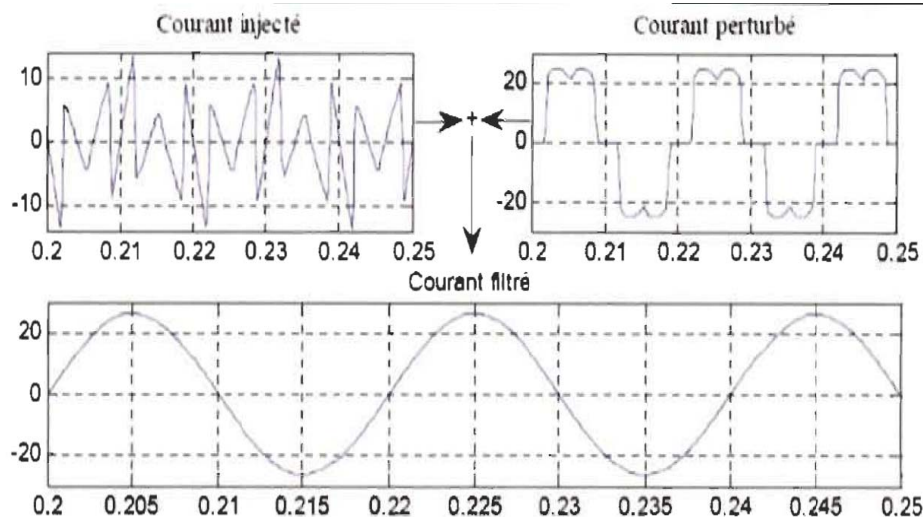


Figure III-2 Courant pollué, courant injecté et courant filtré [27].

III.1.1 Structure générale et le principe de base de fonctionnement du FAP

Le schéma de configuration et le principe de base de fonctionnement du filtre actif parallèle sont illustrés dans la figure III-3.

Le système se compose généralement d'un réseau électrique, une charge non linéaire qui produit des harmoniques et consomme de l'énergie réactive et le filtre de puissance active pour éliminer ces harmoniques.

Le circuit de l'identification de distorsion du courant sépare le courant harmonique $i_{lh}(t)$ du courant de charge $i_l(t)$, qu'il est inversé pour produire un signal de commande afin de compenser le signal de courant harmonique; c'est-à-dire: $i_e^* = -i_{lh}$, de sorte que, le circuit de commande de l'onduleur génère des impulsions de commutation et l'onduleur produit un courant de compensation i_c , qui suit sa référence (i_e^*) [28.29], afin que : . . . * Le ::::;Le,Puis :

$$i_l = i_{lf} + i_{lh} \quad (1)$$

$$i_s = i_l + i_c = i_l + i_c^* = i_l - i_{lh} = i_{lf} \quad (2)$$

Par conséquent, le courant de réseau i_s ne contient que la composante fondamentale i_{lf} , de sorte que la fonction de compensation de l'harmonique est réalisée.

Si le filtre actif doit à la fois compenser le courant harmonique et l'énergie réactive, il est nécessaire d'ajouter uniquement le composant réactif du courant de charge au signal de compensation du courant.

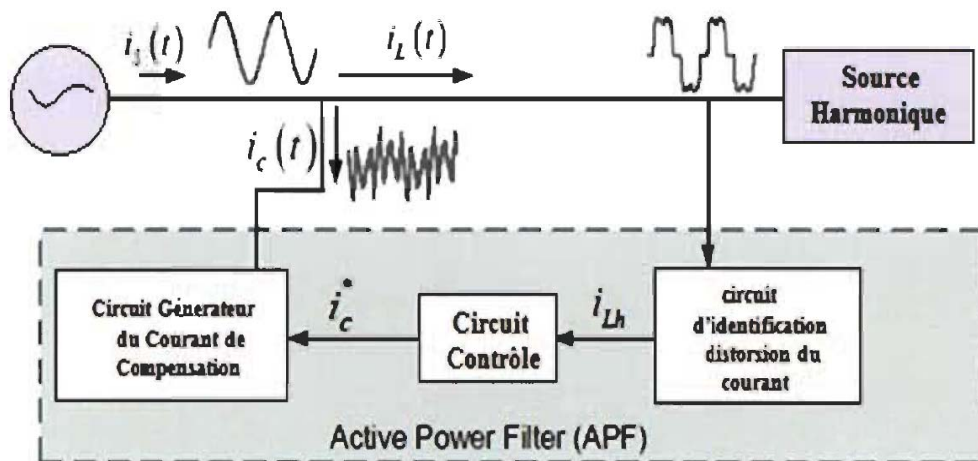


Figure III-3 Configuration générale et le principe de base de fonctionnement du F AP

III.1.2 Classement de filtre actif parallèle

Plusieurs types de filtres actifs parallèles peuvent être distingués, ils sont rangés de différentes façons, suivant le nombre des phases et la technologie de convertisseur de tension et sa topologie [30, 26, 31, 32].

Le premier classement est basé sur le nombre de phases, on peut classer le F AP comme suit:

- Filtre actif parallèle monophasé ou triphasé.
- Filtre actif parallèle raccordé avec le neutre ou non.
- Filtre actif parallèle se servant d'un convertisseur de tension ou un commutateur de courant.

Nous allons montrer de quelques topologies de cette classification dans l'annexe A1.

Le deuxième type de classification de F AP est basé sur la technologie du convertisseur de tension et sa configuration. La topologie de filtre actif parallèle utilisée peut-être avec [30,26, 30]:

- Un onduleur de tension standard à deux niveaux (Voltage Source Inverter VSI) ;
- Un onduleur de tension multi niveaux (ex : onduleur à trois-niveaux (NPC)) ;
- Un onduleur matriciel sans étage continu.

Nous allons montrer de quelques topologies de cette classification dans l'annexe A2.

III.2 Structure du filtre actif parallèle

Les filtres actifs sont constitués de deux parties distinctes: une partie puissance, une partie commande (figure III.4). La première se compose d'un onduleur, d'un filtre de couplage au réseau et d'une source d'énergie. Ces deux derniers déterminent la nature du filtre actif. Il peut être à structure tension ou courant suivant qu'il est réalisé à l'aide d'un onduleur de tension ou de courant.

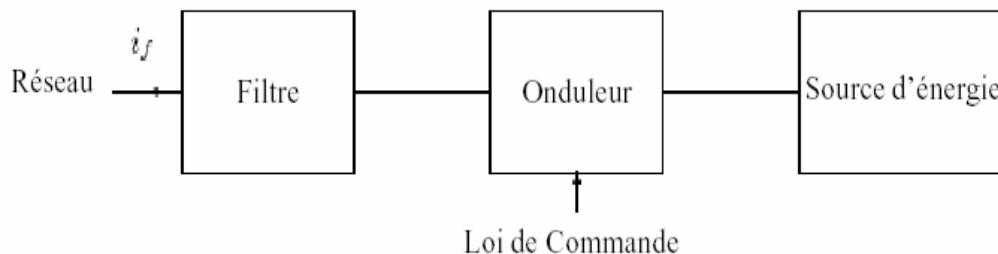


Figure III. 4: Structure d'un filtre actif parallèle

- **La partie puissance est constituée :**
 - d'un onduleur à base d'interrupteurs de puissance, commandables à l'ouverture et à la fermeture (GTO, IGBT, MOSFET, etc....) avec des diodes en antiparallèle.
 - d'un circuit de stockage d'énergie.
 - d'un filtre de sortie.
- **La partie commande est constituée :**
 - de la méthode d'identification des courants perturbés.
 - de la régulation de la tension continue appliquée aux éléments de stockage d'énergie.
 - de la régulation du courant injecté sur le réseau à partir de l'onduleur de tension.
 - de la commande de l'onduleur de tension.

III.2.1 Etude de la partie puissance

- **Structure tension**

L'onduleur de tension connecté en parallèle au réseau est illustré par la figure III.5 [33]. La capacité C_f joue le rôle d'une source de tension continue. La tension à ses bornes V doit

être positive et maintenue quasiment constante. Ses fluctuations doivent être faibles d'une part pour ne pas dépasser la limite en tension des semi-conducteurs constituant les interrupteurs, d'autre part pour ne pas dégrader les performances du filtre actif.

L'onduleur de tension est relié au réseau par l'intermédiaire d'un filtre du premier ordre constitué d'une inductance L_f . Deux rôles sont dévolus à ce filtre: d'une part transformer les variations de tension V_f en variations de courant, d'autre part filtrer les fréquences de commutation des bras d'onduleur.

Les interrupteurs de l'onduleur sont réversibles en courant. Ils sont constitués de semi-conducteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture en antiparallèle avec une diode [34].

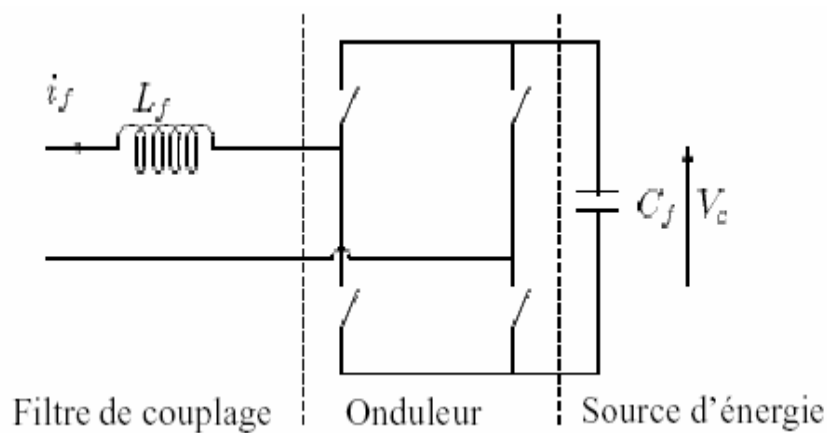


Figure III.5: Onduleur de tension

- **Structure courant**

La figure III.6 représente le schéma de principe d'un onduleur de courant [33]. L'inductance joue le rôle d'une source de courant continu. Le courant i_l traversant cette inductance est maintenu quasiment constant pour ne pas dégrader les performances du filtre actif.

L'onduleur de courant est relié au réseau par l'intermédiaire d'un filtre passe-bas du second ordre constitué d'une inductance L_f et d'une capacité C_f . Ainsi le courant i_f du filtre actif est égal au courant délivré par l'onduleur filtré par le filtre LC dont la fréquence propre est $1 / 2\pi\sqrt{L_f C_f}$. La bande passante du filtre actif est donc essentiellement imposée par le choix de L_f et de C_f . Ceux-ci peuvent être dimensionnés de manière à atténuer la fréquence de commutation des interrupteurs de l'onduleur.

Les interrupteurs sont unidirectionnels. Ils sont formés par des transistors commandés à l'ouverture et à la fermeture. Ceux-ci ne pouvant supporter de tension inverse, ils nécessitent une diode en série [35].

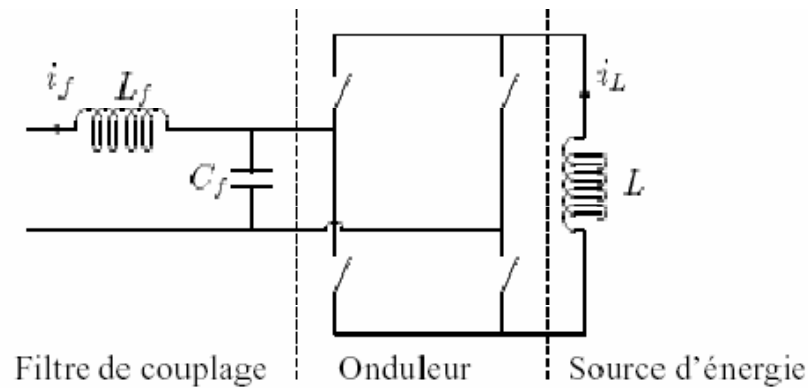


Figure III. 6: Onduleur de courant

Comparaison des deux structures

- **Dimensionnement des circuits de stockage**

Pour les faibles puissances, le stockage de l'énergie dans un condensateur (structure tension) est plus efficace et moins coûteux. En revanche, pour les fortes puissances une inductance (structure courant) est plus adaptée.

- **Protection contre les surtensions et surintensités**

Les interrupteurs constituant un onduleur de tension doivent être protégés contre les surintensités tandis qu'un onduleur de courant nécessite une protection contre les surtensions. Cette dernière est plus complexe à réaliser technologiquement.

Ainsi, pour des installations de faible ou de moyenne puissance, la structure tension semble mieux adaptée et plus simple à réaliser [33]. Par conséquent, nous avons retenu cette structure par la suite.

III.2.2 Etude de l'onduleur de tension

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion continue - alternative à partir d'une source de tension continue, on peut obtenir à la sortie une tension alternative. Donc, il est possible de produire à la sortie du convertisseur une tension alternative, par une séquence de commande adéquate des interrupteurs. Cette tension peut comporter un ou plusieurs créneaux par alternance suivant qu'il s'agit d'une commande à un créneau par alternance, ou d'une commande de modulation de largeur d'impulsions (MLI).

Le but de la commande de l'onduleur est de permettre la meilleure reproduction des courants de référence, à travers les ordres de commande appliqués aux interrupteurs de puissance. Les deux principales familles de commande des convertisseurs statiques sont :

- la commande par hystérésis

- la commande par modulation de largeur d'impulsions.

III.2.2.1 Commande par hystérésis

La commande par hystérésis, appelée aussi commande en tout ou rien, est une commande non linéaire qui utilise l'erreur existant entre le courant de référence et le courant produit par l'onduleur, cette erreur est comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis, comme le montre la figure III.7.

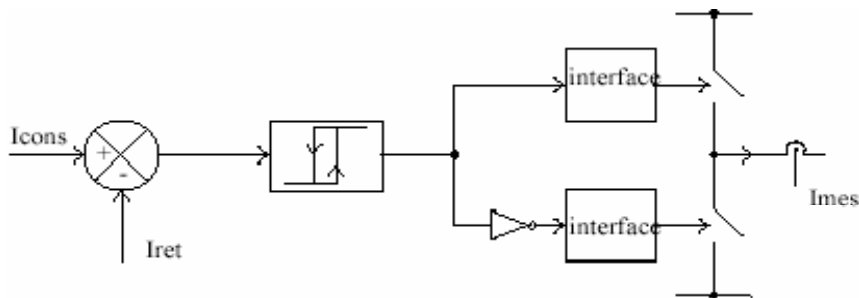


Figure III.7: Principe de la commande des courants par hystérésis.

Dès que l'erreur atteint la bande inférieure ou supérieure (figure III.8), un ordre de commande est envoyé de manière à rester à l'intérieur de la bande. La simplicité est le principal avantage de cette technique. En revanche, les commutations évoluant librement à l'intérieur de la bande d'hystérésis, on ne peut pas maîtriser correctement le spectre haute fréquence dû aux fréquences de commutations.

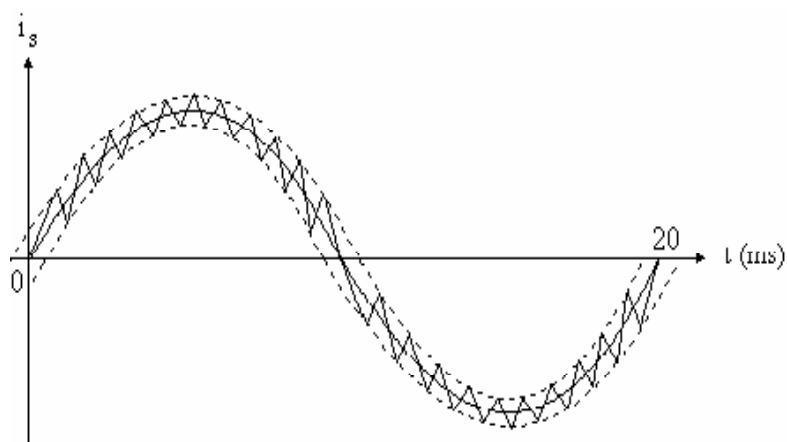


Figure III.8: Commande par hystérésis

Ce problème peut être résolu par une autre stratégie de commande qui peut être proposé à savoir la commande par hystérésis modulée. Mais dans cette stratégie de commande, il est difficile de définir la largeur de la bande de l'hystérésis [35].

III.2.2.2 Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI)

Pour résoudre les problèmes précédents, nous introduisons une deuxième famille de commande de l'onduleur : la technique de commande par MLI, qui résout le problème de la maîtrise de la fréquence de commutation, dont le schéma de principe est donné par la figure III.9.

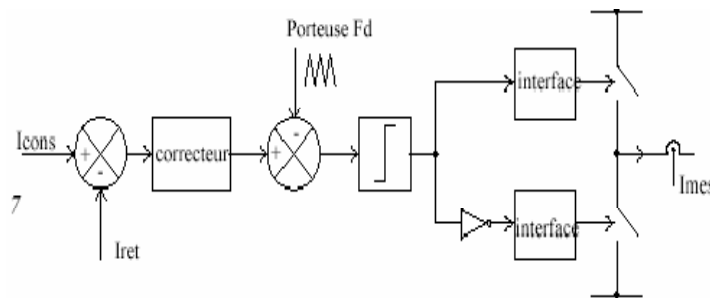


Figure III.9: Principe de commande des courants par MLI.

La plus simple et la plus connue des modulations de largeur d'impulsion est sans doute la MLI à échantillonnage naturel, comme le montre la figure III.10.

Cette technique de commande met en œuvre d'abord un régulateur qui détermine la tension de référence de l'onduleur à partir de l'écart entre le courant mesuré et sa référence. Cette dernière est ensuite comparée avec un signal triangulaire (porteuse à fréquence élevée fixant la fréquence de commutation). La sortie du comparateur fournit l'ordre de commande des interrupteurs.

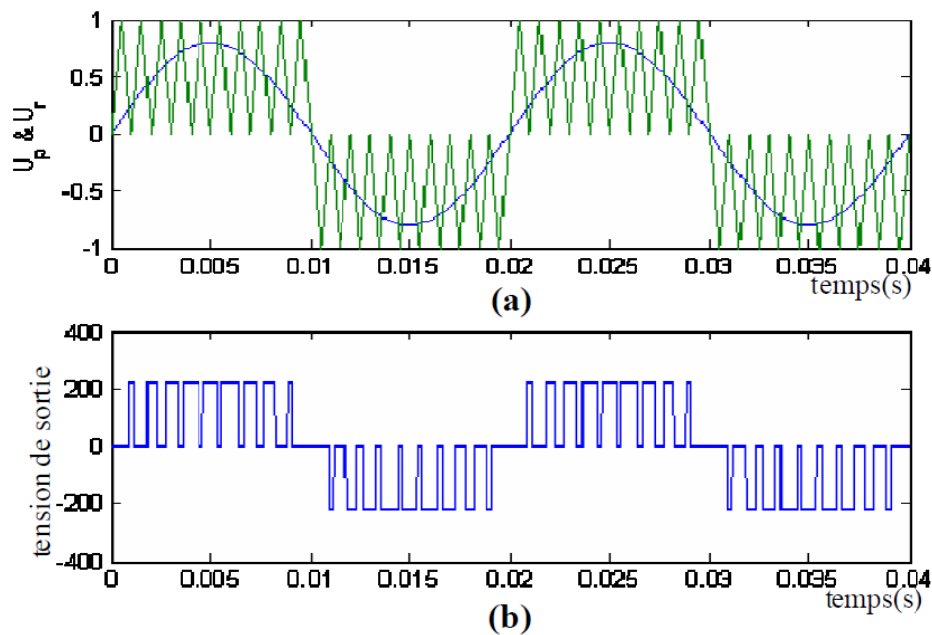


Figure III.10: Commande par modulation de largeur d'impulsions

(a) signal de référence et de porteuse, (b) tension de sortie.

D'autres techniques de MLI existent également dans la littérature comme la MLI à échantillonnage régulier où on peut distinguer deux méthodes :

- La MLI à échantillonnage régulier symétrique où la référence est échantillonnée à chaque période de la porteuse.
- La MLI à échantillonnage régulier asymétrique où la référence est échantillonnée à la demi-période de la porteuse.

Plus récemment, nous avons vu apparaître une technique de commande, dite commande à modulation vectorielle. Cette dernière diffère des techniques présentées précédemment par le fait qu'elle ne s'appuie pas sur des modulations appliquées à chacun des interrupteurs.

III.2.2.3 Principe de la commande MLI sinus-triangle

Le signal de commande des interrupteurs est généré à partir de la comparaison du signal de référence sinusoïdal de fréquence $f_r=1/T_r$ et du signal de modulation triangulaire ou porteuse de fréquence $f_p = 1/T_p$ (figure III.11).

Deux paramètres principaux caractérisent la commande à MLI:

- L'indice de modulation : $m = f_p/f_r$, avec $m \gg 1$.
- Le coefficient de réglage : $r = V_{rmax} / V_{pmax}$, Généralement r est compris entre zéro et un.

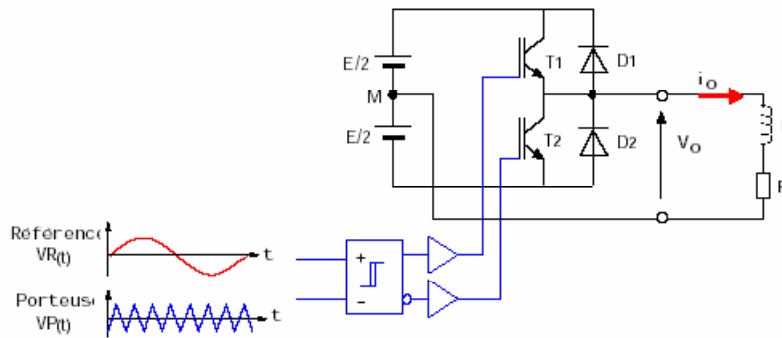


Figure III.11: Schéma de principe de l'onduleur monophasé commandé par MLI sinusoïdal.

III.3 Stratégie de commande du filtre actif parallèle

Afin de commander le filtre actif parallèle, nous devons d'abord identifier les courants harmoniques de la charge polluante, qui servent en effet comme références du filtre actif parallèle. Donc, la stratégie de commande du FAP se base sur la détection des courants perturbateurs dans le domaine temporel. Trois possibilités d'identification des courants perturbateurs peuvent être utilisées [36, 37] :

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

Les différentes méthodes d'identification de courant perturbateur peuvent être regroupées en deux familles :

La première famille utilise la transformée de Fourier rapide dans le domaine fréquentiel, pour extraire les harmoniques de courant. Cette méthode est bien adaptée aux charges où le contenu harmonique varie lentement. Elle donne aussi l'avantage de sélectionner les harmoniques individuellement. Il est à noter que cette méthode nécessite une grande capacité de calcul [38].

La deuxième famille est basée sur le calcul des puissances instantanées dans le domaine temporel. Certaines de ces méthodes se basent sur le calcul des puissances harmoniques de la charge non linéaire. D'autres peuvent être utilisées pour compenser à la fois les courants harmoniques et la puissance réactive, en se basant sur la soustraction de la partie fondamentale active du courant total [39].

Récemment, des nouvelles méthodes d'identification donnent le choix de compenser un, plusieurs ou voire même tous les types de courants perturbateurs. En effet, en se basant sur la régulation de la tension continue et sur celles du réseau électrique aux points de raccordement, nous pouvons compenser à la fois tous les courants perturbateurs, tout en offrant la possibilité de réguler la tension de la charge [40]. Cette méthode, qui ne peut être implantée que numériquement, ne garantit pas une compensation parfaite de la puissance réactive, de même que la régulation de tension n'assure pas toujours une bonne qualité à la tension de la charge.

Une autre méthode, appelée méthode de détection synchrone, reposant sur la transformée de Park a été proposée [41]. Cette méthode se base essentiellement sur le calcul de la pulsation fondamentale obtenue par une PLL. Cela exige une précision parfaite du calcul de cette pulsation afin de ne pas avoir des courants identifiés erronés.

Enfin, la méthode d'identification la plus utilisée est celle appelée méthode des puissances réelles et imaginaires instantanées [42]. Cette méthode offre l'avantage de choisir la perturbation à compenser avec précision, rapidité et facilité d'implantation. Pour toutes ces raisons nous avons retenu cette méthode d'identification pour le reste de notre étude. En effet, afin de pouvoir compenser les courants harmoniques, les courants déséquilibrés et la puissance réactive conjointement ou individuellement, cette méthode nous a semblé la mieux appropriée.

III.4 Dimensionnement de l'ensemble réseau, filtre actif parallèle et charge polluante

Dans cette partie, nous étudions le dimensionnement du réseau, de la charge polluante et celui du filtre actif parallèle FAP (figure III.12). La charge polluante est un pont redresseur triphasé à diodes alimentant une charge RL série ou RC parallèle et le réseau d'alimentation est un réseau triphasé de tension (220/380 V, 50 Hz) de puissance nominale apparente de 400 KVA.

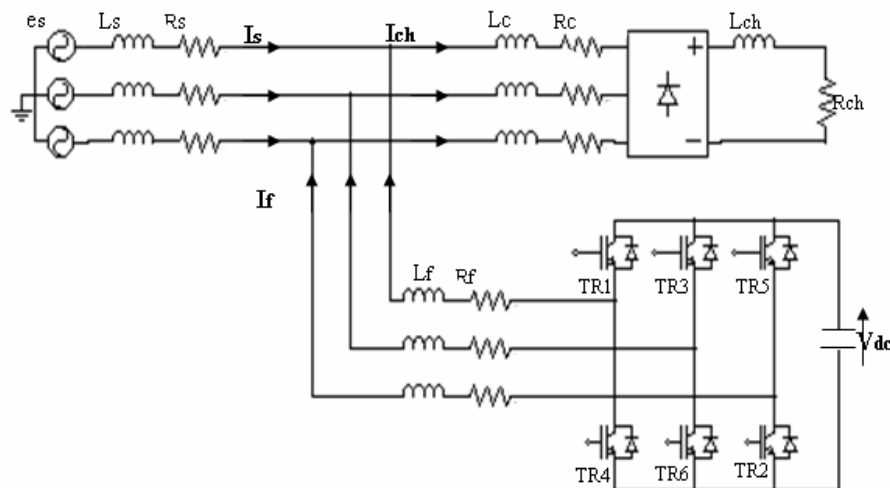


Figure III.12: Schéma de l'ensemble réseau, charge polluante et filtre actif parallèle.

III.4.1 Réseau électrique

Le réseau électrique est représenté par un poste de transformation représenté par la f.e.m du réseau, une inductance L_s et une résistance R_s . En tenant compte de la norme CEI 61000-3-12, si faudrait que l'ensemble réponde à la spécification suivante :

$$S_{cc} / S_{ch} \geq 30$$

Avec

S_{cc} : puissance apparente de court-circuit du réseau.

S_{ch} : puissance apparente de la charge non linéaire.

Pour notre étude on a choisi un rapport $S_{cc} / S_{ch} = 30$, ce qui donne une puissance de court-circuit égale à :

$$S_{cc} = 30 \cdot 400 = 12 \text{ MVA}$$

L'importance de l'effet inductif sur l'effet résistif est prise en compte de manière à avoir

$$X_s = 10R_s$$

Donc :

$$Z_s = \frac{3V_s^2}{S_{cc}} = R_s \sqrt{101} \tag{III.1}$$

Ce que donne :

$$R_s = 1.2 \text{ m}\Omega \text{ et } L_s = 38.2 \mu\text{H}$$

III.4.2 Charge polluante

La charge polluante se compose d'une inductance L_c et d'une résistance R_c et d'un redresseur triphasé en pont à diodes alimentant une charge RL série ou une charge RC parallèle.

Calcul de l'inductance L_c et de la résistance R_c

Pour notre étude on prend pour l'ensemble réseau, transformateur et câbles des valeurs tel que :

$$X_t = X_s + X_c = 5\%Z_n \quad (III.2)$$

$$R_t = R_s + R_c = 1\%Z_n \quad (III.3)$$

$$Z_n = \frac{3V_n^2}{S_n} = 0.363\Omega \quad (III.4)$$

Avec

Z_n : impédance nominale du réseau.

Ce qui donne :

$$L_c = 19.6 \mu H$$

$$R_c = 2.4 m\Omega$$

Redresseur triphasé en pont à diodes

La valeur moyenne de la tension à la sortie du redresseur est donnée par l'expression suivante :

$$U_d = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} V_n = 2.34 V_s = 515v \quad (III.5)$$

$$I_d = \frac{S_n}{U_d} = 776A \quad (III.6)$$

La résistance de la charge du redresseur est égale à :

$$R_{ch} = \frac{U_d}{I_d} = 0.66A \quad (III.7)$$

La tension redressée présente une ondulation de fréquence égale à 300 Hz. Pour obtenir un courant lissé à la sortie du redresseur, il faut que la constante de temps du circuit $T_{ch} = R_{ch} \cdot L_{ch}$ soit supérieur à T_{ond} , on prend une inductance avec une valeur égale à :

$$L_{ch} = 2 mH.$$

III.4.3 Filtre actif parallèle

Dans cette partie, nous étudions la puissance apparente du filtre actif parallèle, de manière à évaluer, du point de vue économique, les possibilités de compensation pour tout type de perturbations de courant.

Avant de débiter cette étude, nous devons connaître les valeurs de tension et de courant que doit supporter chaque interrupteur de l'onduleur. Généralement, ces interrupteurs sont choisis pour supporter individuellement la tension continue V_{cd} et la valeur crête du courant du filtre actif I_{inj} tout en tenant compte des composantes dues aux découpages [43].

Compensation des courants harmoniques

La puissance apparente d'une charge non linéaire (S_{ch}) est composée de trois termes de puissance : la puissance active P_{ch} , la puissance réactive Q_{ch} et la puissance déformante D_{ch} , comme l'indique l'expression suivante:

$$S_{ch} = \sqrt{P_{ch}^2 + Q_{ch}^2 + D_{ch}^2} = 3V_s I_{ch} \quad (\text{III.8})$$

avec

V_s : la tension du réseau au point de raccordement.

I_{ch} : le courant de la charge non linéaire.

La puissance apparente du filtre actif (S_f) compensant le courant harmonique I_h , injecté par un pont redresseur triphasé à diodes, est donnée par l'équation suivante :

$$S_f = \sqrt{D_{ch}^2} = 3V_s I_h \quad (\text{III.9})$$

Le courant harmonique I_h qui doit être crée par le filtre actif peut s'écrire de la façon suivante :

$$I_h = \sqrt{I_s^2 + I_{1ch}^2} \quad (\text{III.10})$$

avec

I_{1ch} le courant fondamental consommé par la charge non linéaire.

Le courant fondamental et le courant de la charge peuvent exprimés en fonction du courant direct de la charge non linéaire I_d , comme suite :

$$I_s = \sqrt{\frac{2}{3}} I_d \quad (\text{III.11})$$

$$I_{1ch} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d \quad (III.12)$$

Le rapport des puissances filtre actif charge (τ_h) peut être exprimé dans ce cas par la relation suivante :

$$\tau_h = \frac{S_f}{S_{ch}} = \frac{3V_s I_h}{3V_s I_{ch}} \quad (III.13)$$

Des expressions (III.10), (III.11) et (III.12), nous obtenons le rapport des puissances égale à :

$$\tau_h \% = \frac{\sqrt{\pi^2 - 9}}{\pi} \approx 30\% \quad (III.14)$$

La puissance apparente du filtre actif est égale à **30%** de puissance apparente de la charge polluante

Lorsque la charge non linéaire est composée d'un redresseur triphasé à thyristors alimentant une charge RL série, le courant de la charge dépend de l'angle de retard α , comme le montre l'expression (III.15).

$$I_{d\alpha} = \frac{U_d}{R_{ch}} \cos \alpha = I_d \cos \alpha \quad (III.15)$$

Le rapport des puissances filtre actif charge (τ_h) devient égale à :

$$\tau_{h\alpha} \% = \frac{\sqrt{\pi^2 - 9}}{\pi} \cos \alpha = 0.3 \cos \alpha = \tau_h \cos \alpha \quad (III.16)$$

La figure III.13 montre la variation du rapport des puissances $\tau_{h\alpha}$, du filtre actif parallèle par rapport à celle de la charge non linéaire, en fonction de l'angle de retard α des thyristors.

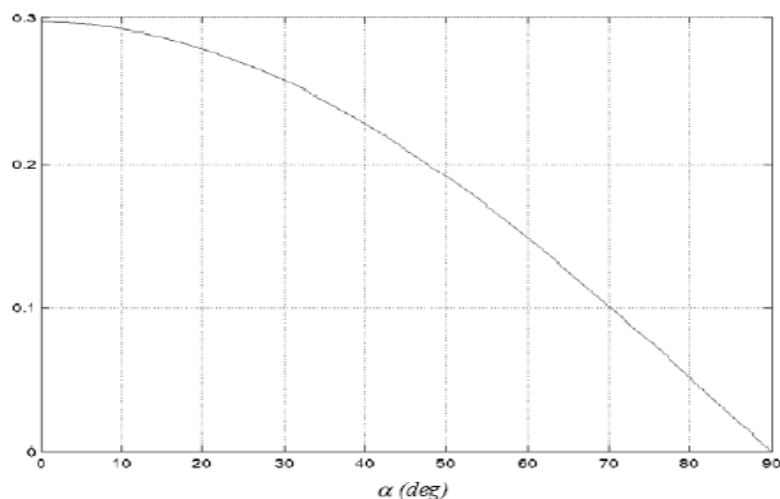


Figure III.13: Rapport des puissances du filtre actif parallèle et de la charge non linéaire pour la compensation des courants harmoniques

A partir de la figure III.12, on constate que pour $\alpha=0$, la puissance maximale du filtre actif est de $S_f \approx 30\% S_{ch}$. Cette puissance diminue avec l'augmentation de l'angle de retard (α) grâce à la diminution du courant harmonique

Compensation des courants harmoniques et de la puissance réactive

Dans cette étude, nous nous intéresserons au calcul du rapport des puissances apparentes dans le cas de la compensation des courants harmoniques et de la puissance réactive consommés par la même charge non linéaire. Dans ce cas, le rapport des puissances apparentes (τ_{hr}) du filtre actif parallèle par rapport à celle de la charge non linéaire est donné par la relation suivante :

$$\tau_{hr} = \frac{S_f}{S_{ch}} = \frac{\sqrt{Q_{ch}^2 + D_{ch}^2}}{3V_s I_{ch}} \quad (III.17)$$

Cette dernière relation peut également s'écrire sous la forme suivante :

$$\tau_{hr} = \frac{S_f}{S_{ch}} = \frac{\sqrt{(3V_s I_h)^2 + (3V_s I_{1ch} \sin \alpha)^2}}{3V_s I_{ch}} \quad (III.18)$$

En reportant les relations (III.10), (III.11) et (III.12) dans la relation (III.18), on obtient l'expression du rapport des puissances τ_{hr} suivante :

$$\tau_{hr} = \cos \alpha \sqrt{1 - \frac{9}{\pi^2} \cos^2 \alpha} \quad (III.19)$$

La figure (III.14) illustre le rapport des puissances τ_{hr} en fonction de l'angle de retard des thyristors α de la charge non linéaire.

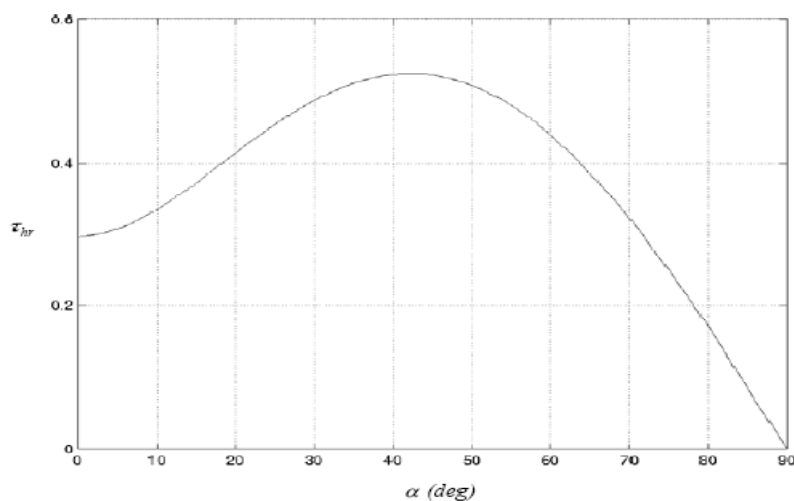


Figure III.14: Rapport des puissances du filtre actif parallèle et de la charge non linéaire pour la compensation des courants harmoniques et de la puissance réactive

A partir de la figure III.14, on constate que pour un angle de retard $\alpha=0$, on trouve le même rapport de puissance que celui obtenu dans le cas de compensation précédent ($S_f \approx 30\% S_{ch}$). Par contre, dans ce cas de compensation, le filtre actif atteint ici un rapport maximum de puissance de $S_f \approx 52\% S_{ch}$ pour un angle de $\alpha \approx 42^\circ$.

Dans ce cas, le filtre actif parallèle, peut être utilisé pour compenser à la fois les courants harmoniques et la puissance réactive.

Le filtre actif est un onduleur de tension triphasé à IGBT avec des diodes montées en antiparallèles.

Ces composants sont choisis généralement pour supporter la tension V_{dc} et la valeur maximale du courant du filtre actif. La puissance du filtre est égale à :

$$S_f \approx 30\% S_{ch} = 30.400 / 100 = 120 \text{ KVA}$$

- **Calcul du système de stockage d'énergie.**

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

La tension continue V_{dc} doit être assez élevée pour améliorer la commandabilité du filtre actif, tout en respectant la tension de seuil des interrupteurs. En respectant ce compromis, on opte pour une tension continue :

$$V_{dc} = 800 \text{ V}$$

La capacité du condensateur est choisie pour minimiser l'ondulation de la tension continue V_{dc} . En utilisant la relation (III.20), on obtient une capacité de

$$C_{dc} = \frac{V_s \max \Delta I_{ch} T}{V_{fref}^2 - V_{fmin}^2} \quad (\text{III.20})$$

$$C_{dc} = 4000 \mu F$$

- **Calcul du filtre de découplage.**

Le filtre de sortie est un filtre passif utilisé pour connecter l'onduleur de tension au réseau électrique. Le filtre de sortie est dimensionné pour satisfaire les deux critères suivants :

- assurer la dynamique du courant :

$$\frac{d}{dt} I_{h-ch} = \frac{d}{dt} I_{inj} \text{ (III.21)}$$

avec

I_{h-ch} : le courant harmonique de la charge

I_{inj} : le courant injecté par le filtre actif,

- empêcher les composantes dues aux commutations de se propager sur le réseau électrique

Le filtre de sortie est composé d'une inductance L_f de résistance interne R_f , il ne permet pas de satisfaire simultanément les deux critères de dimensionnement du filtre de sortie. En effet, seule une valeur relativement faible de L_f peut réaliser une bonne dynamique du filtre actif en satisfaisant l'égalité (III.20). Malheureusement, une valeur faible de L_f permet à la majorité des composantes dues aux commutations de se retrouver côté réseau et par conséquent d'affecter les installations et les équipements électriques. Inversement, une valeur relativement élevée de

L_f va empêcher ces composantes de se propager sur le réseau électrique mais affectera la dynamique du filtre actif et dégradera alors la qualité de compensation.

Le bon dimensionnement du filtre de sortie du premier ordre dépendra donc du compromis à trouver entre la dynamique et l'efficacité du filtre actif parallèle.

Dans notre cas, le filtre actif est un onduleur de tension, les tensions générées par celui-ci sont sous forme d'impulsions et causent des ondulations de courants. Ces ondulations sont difficiles à atténuer par l'augmentation de L_f , car on est obligé d'augmenter la tension continue V_{dc} afin de conserver les performances du filtre actif. En utilisant la relation III.22, on obtient une inductance de :

$$L_f = \left[\frac{|V|_s - |V_{dc}|}{di_L} \right] dt \quad \text{(III.22)}$$

$$L_f = 150 \mu H \quad \text{et} \quad R_f = 5 m\Omega$$

III.4.4 Résultats de la simulation

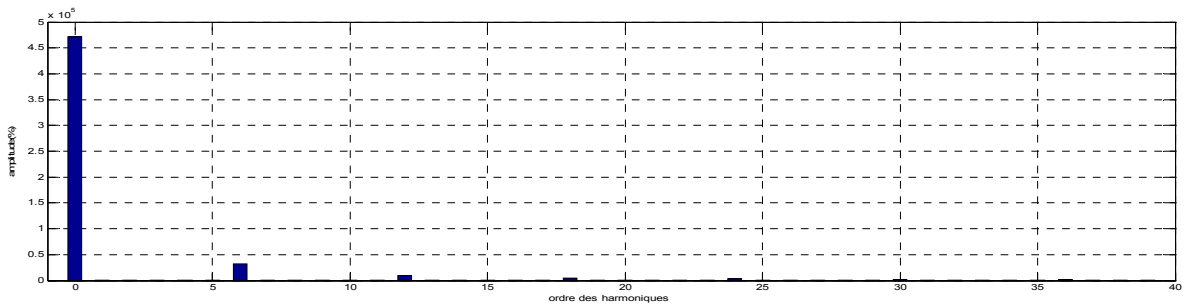
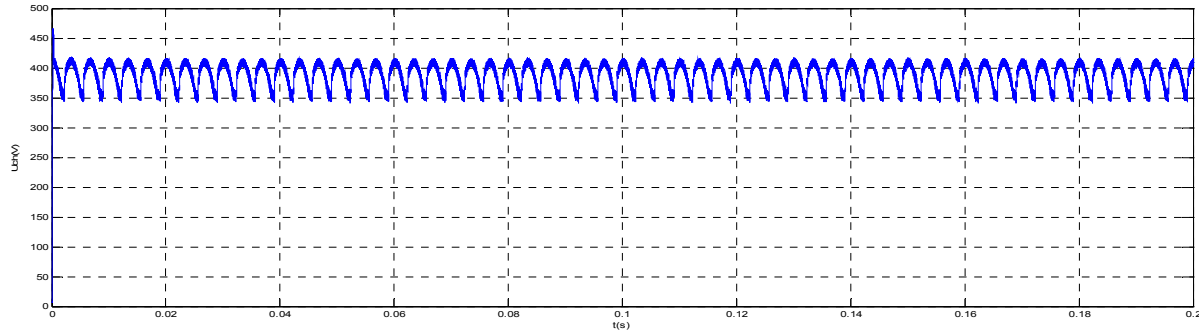


Figure III.15 Tension de charge et son spectre de fréquence

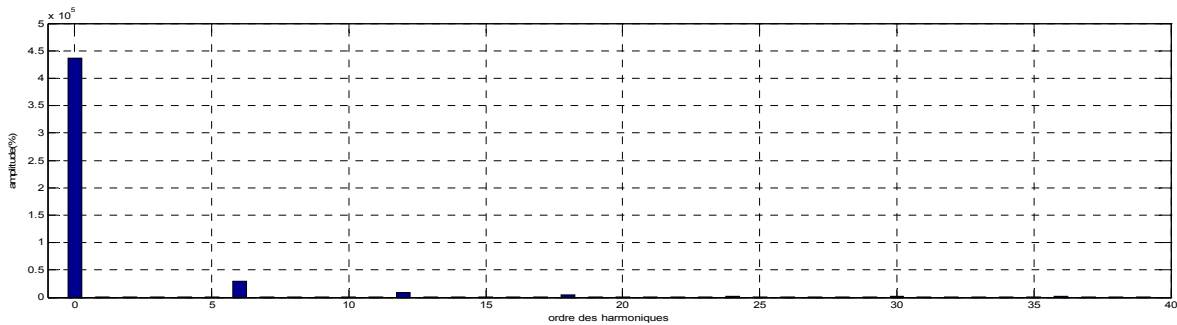
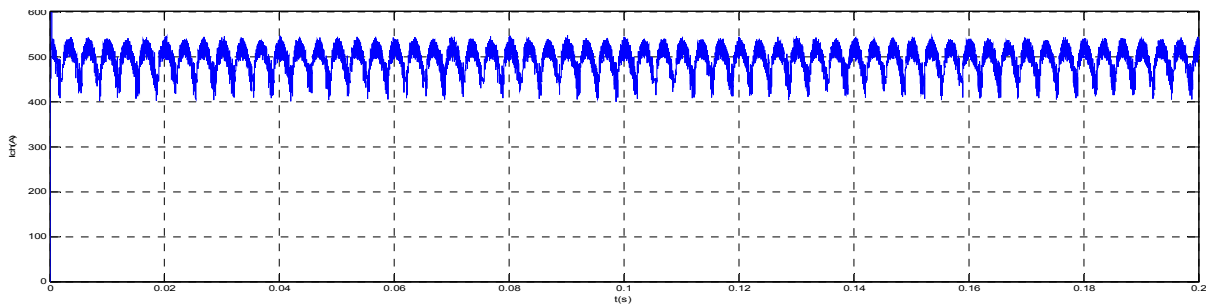
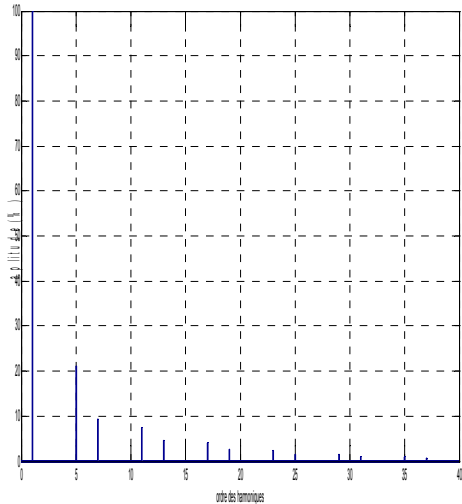
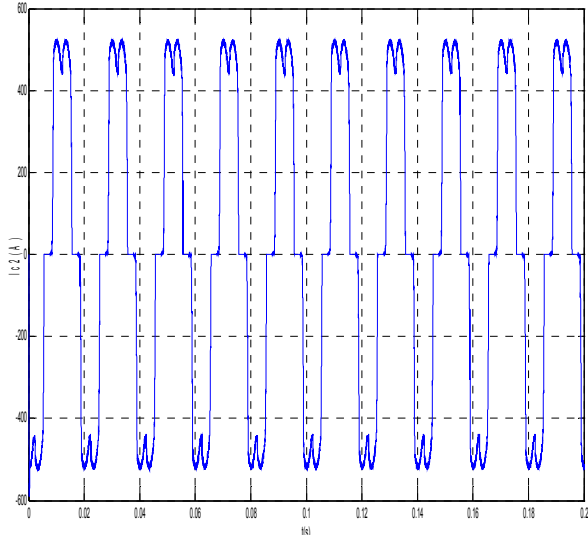
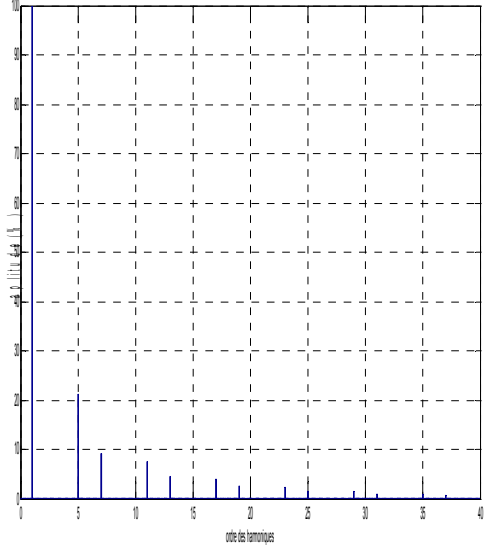
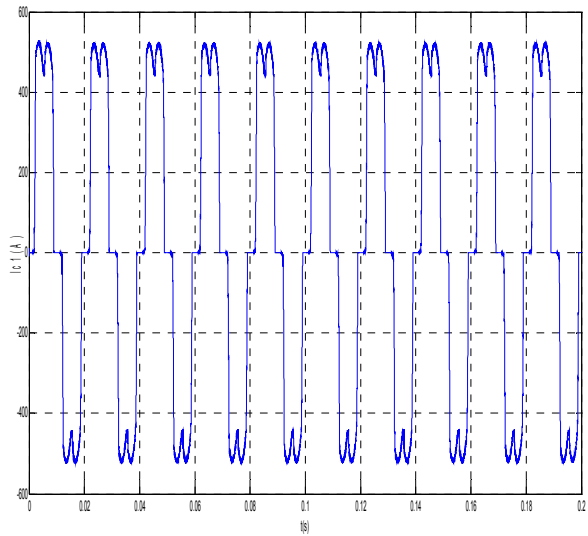


Figure III.16 Courant de charge et son spectre de fréquence.



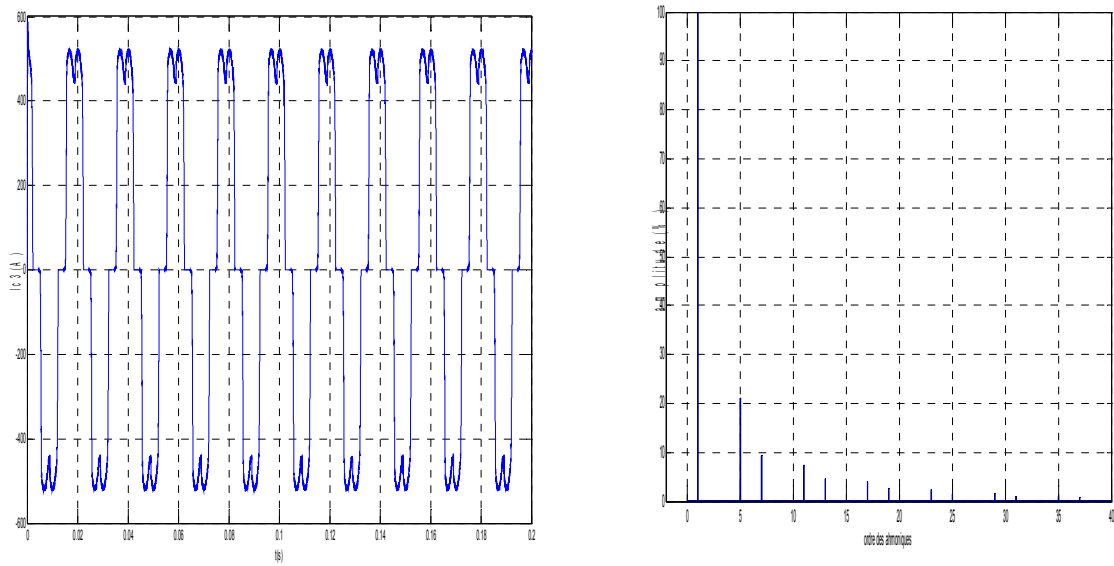
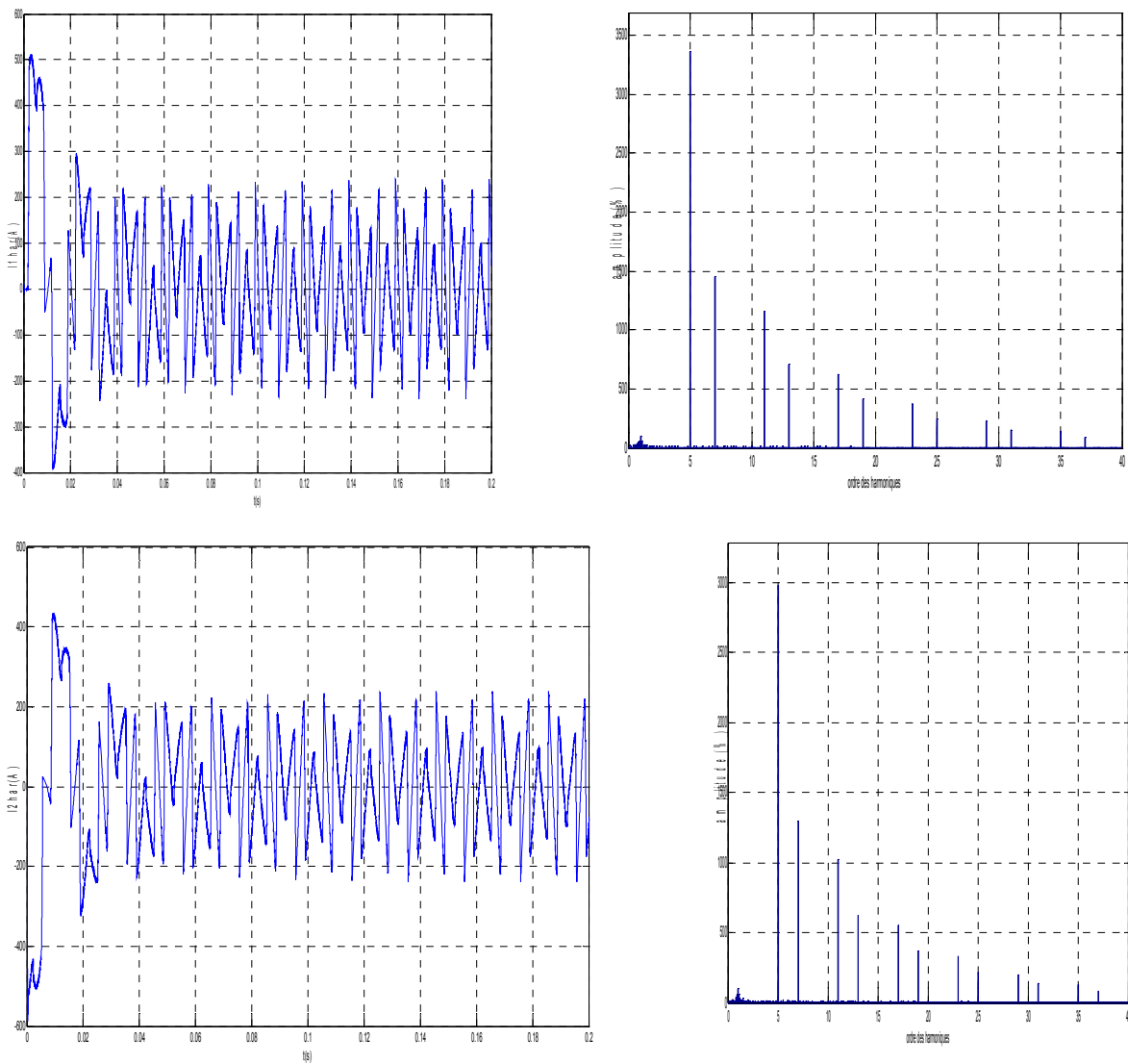


Figure III.17 Les courants de lignes de chaque phase et leurs spectres frequentiels



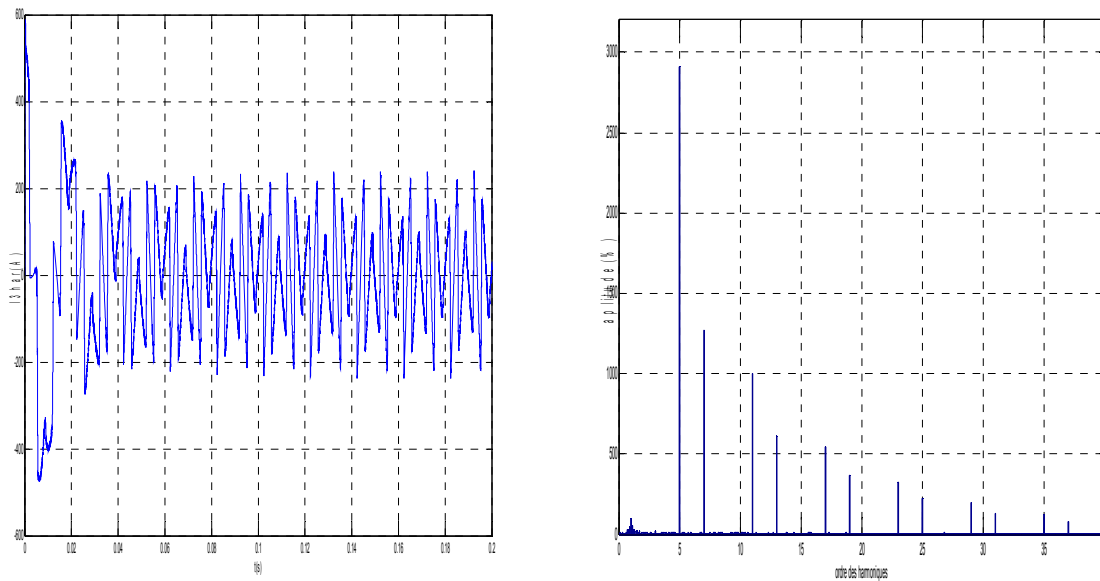


Figure III.18 Les courants harmoniques de référence et leurs spectres

- Stratégie de commande à hystérésis par la méthode de puissances instantanées

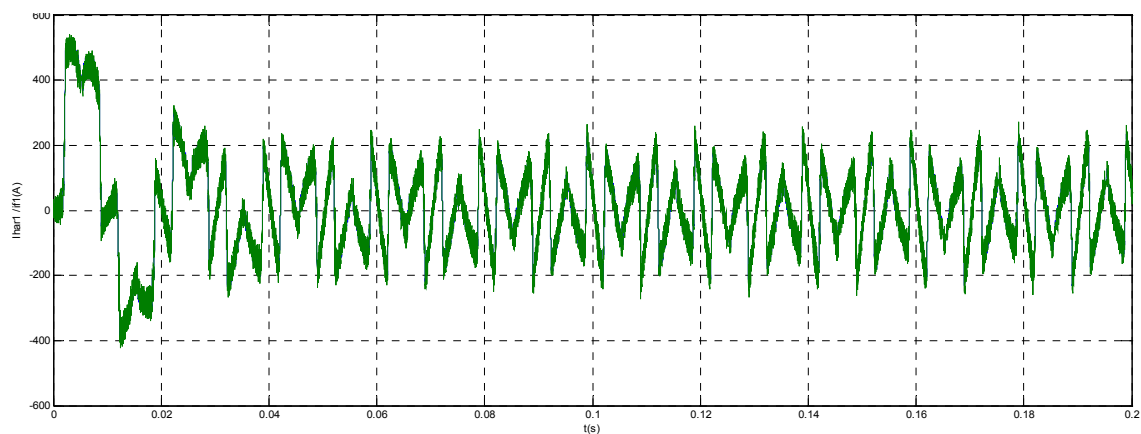


Figure III.19 Courants référence et injecté de la première phase pour la commande hystérésis

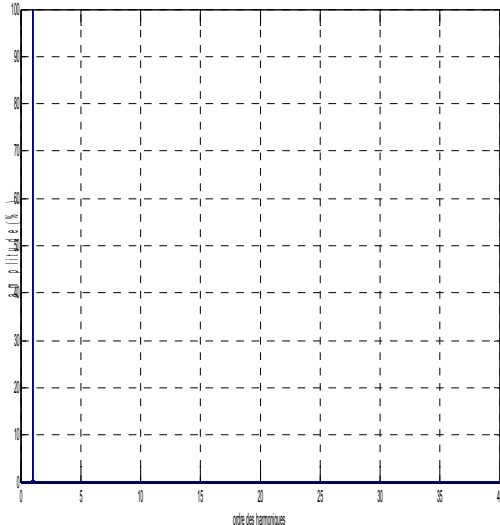
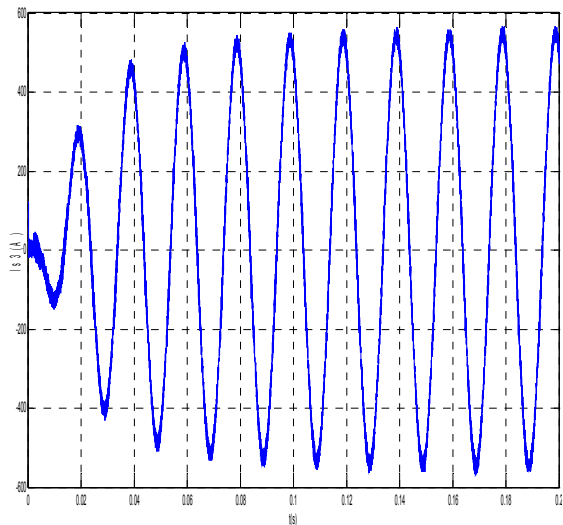
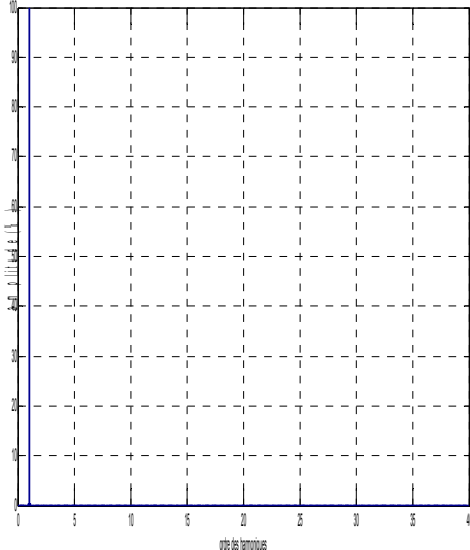
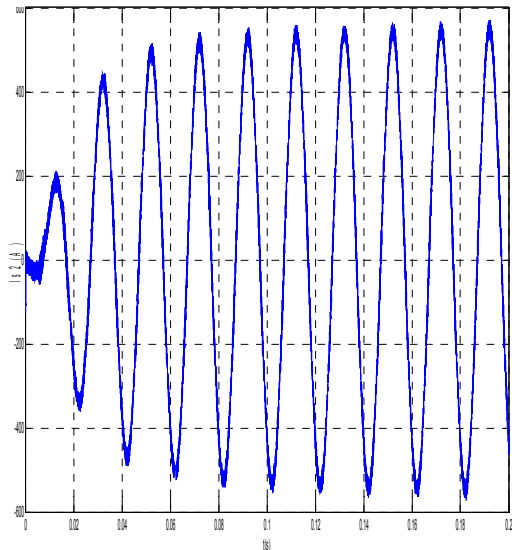
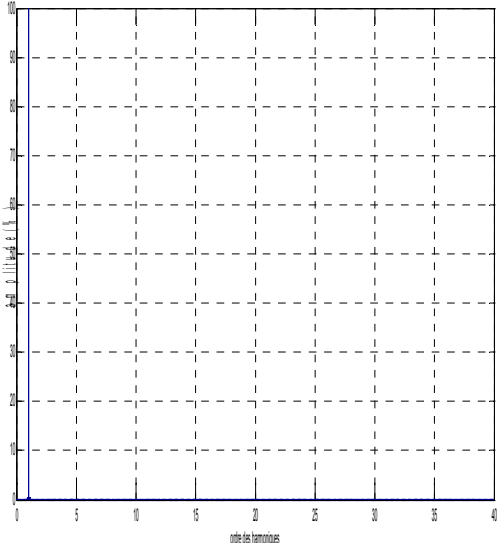
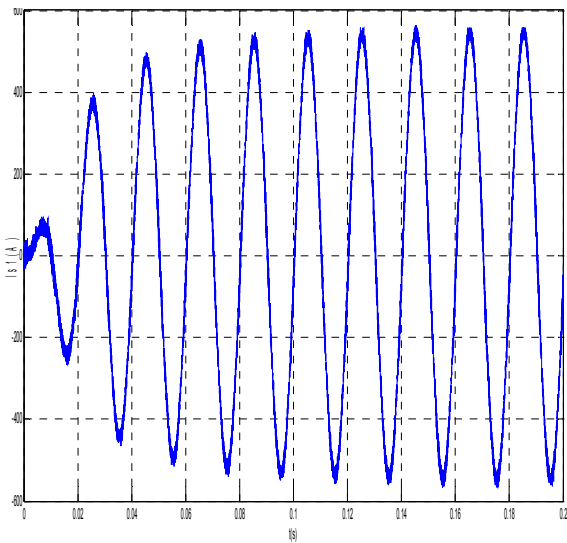


Figure III.20 Courants de source après filtrage et leurs spectres fréquentiels pour la commande hystérésis

V.3.1. Stratégie de commande à MLI par la méthode de puissances instantanées

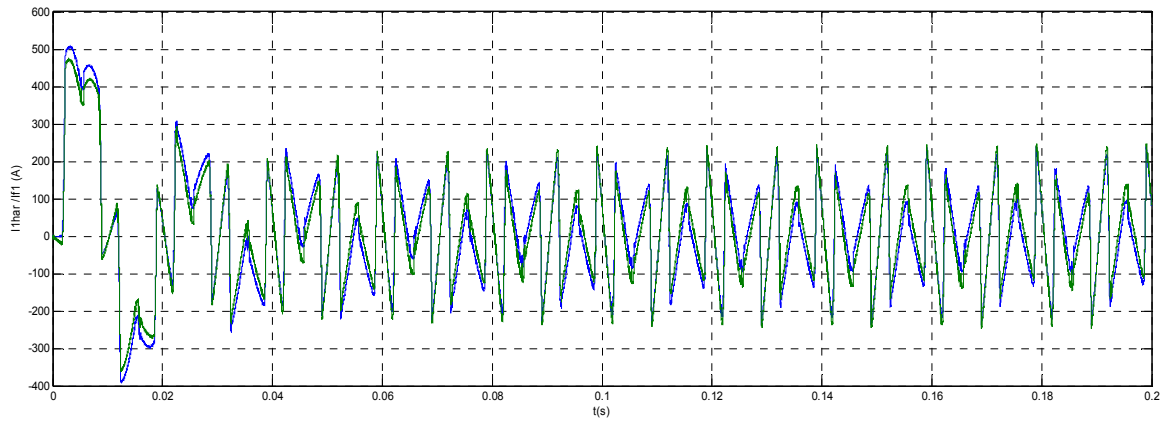
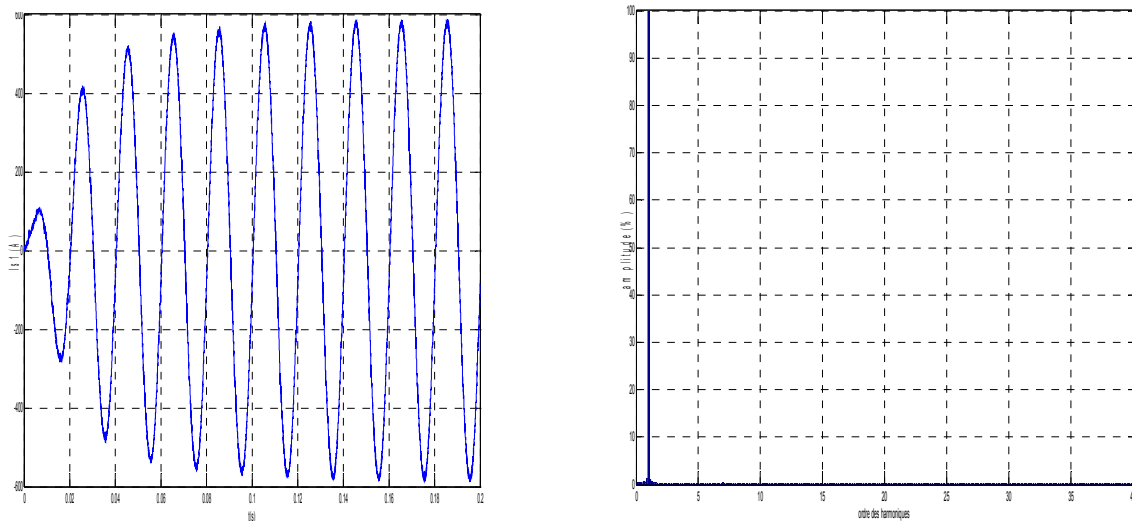


Figure III.21 Courants de référence et injecté de la première phase pour la commande MLI



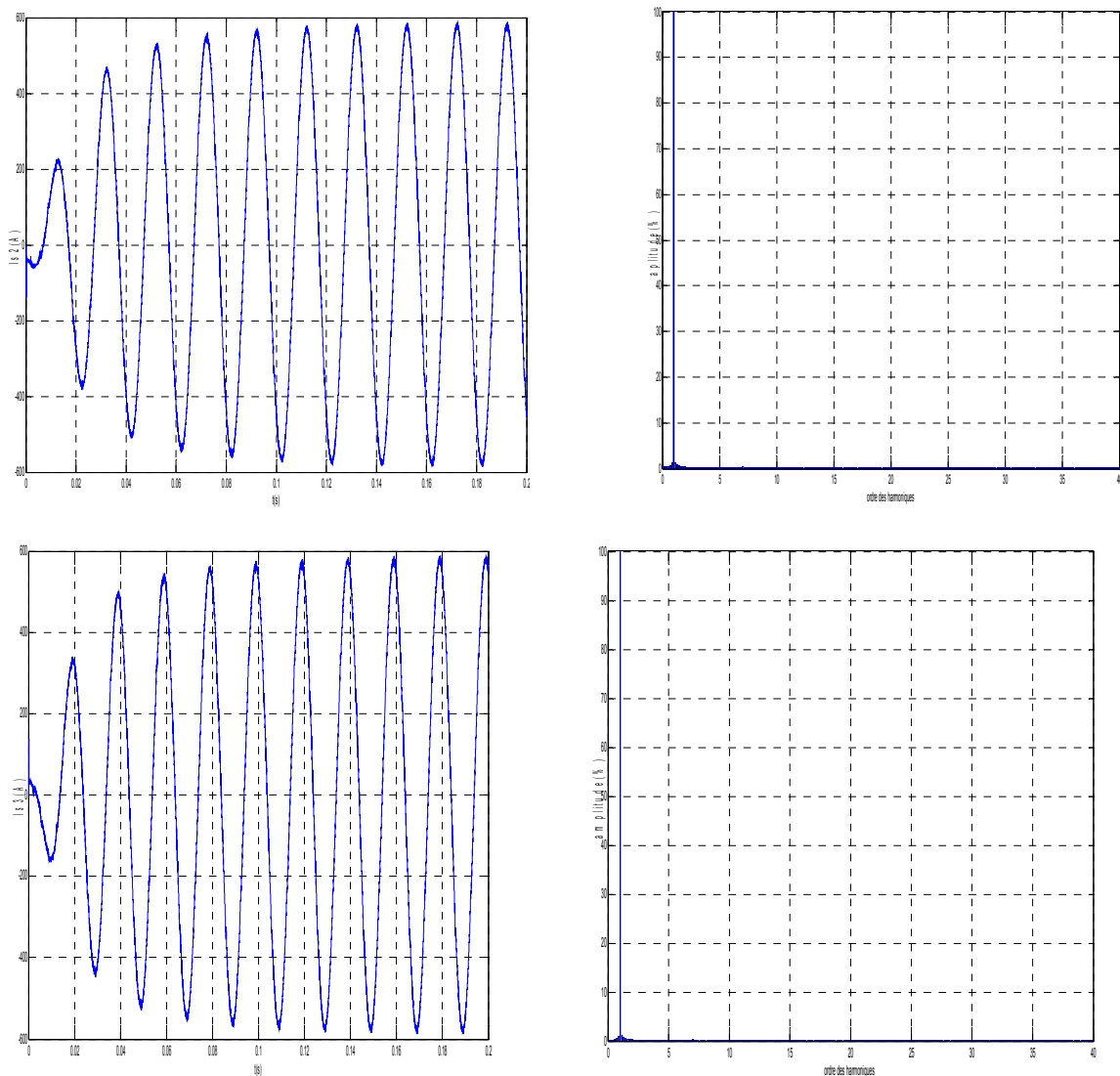


Figure III.22 Courants de source après filtrage et leurs spectres fréquentiels pour la commande MLI

V.4. Interprétation des résultats

.Les figures (III.16) montrent respectivement les tensions de charge et courant de charge et leur spectre de fréquence

Les figures (III.17) illustrent les courants de lignes et leur spectre fréquentiel, on note dans cette dernière que c'est les courants de lignes ont une forme rectangulaire ceci est due à la charge non linéaire et leur spectre fréquentiel des courants de ligne présente la présence de plusieurs harmoniques tel que sont $THDI = 25.75\%$

Les figures (III.19 et 21) montrent respectivement le Courant de références et injectés pour la première phase pour la commande hystérésis et MLI et ce qui traduit que si notre onduleur puisse injecter un courant qui suit sa référence, on aura un Courant de source sinusoïdale.

Les figures (III.20) montrent les courants de source après filtrage et leurs spectres fréquentiels pour la commande hystérésis, on remarque une amélioration de la qualité des courants et réduction du THD = 1.76%.

Les figures (III.22) montrent les courants de source après filtrage et leurs spectres fréquentiels pour la commande MLI, on remarque une amélioration de la qualité des courants et réduction du THD = 1.25%.

III.6. Conclusion.

Dans ce chapitre nous avons présenté le principe de fonctionnement du filtre actif parallèle de puissance, la structure générale du FAP, les différentes stratégies de commande de l'onduleur de tension et le dimensionnement de l'ensemble réseau, charge polluante et filtre actif parallèle et décrivons deux méthodes de calculs des courants de référence pour l'élimination des courants harmoniques dans un réseau électrique. La première méthode basée sur la transformation de Concordia pour le calcul des puissances réelles et imaginaires instantanées, tandis que la seconde méthode est basée sur l'identification à partir de la détection du courant de la source.

Conclusion générale

L'Objectif de ce travail est de compenser en même temps les courants harmoniques et la puissance réactive consommée par les charges non-linéaires connectées aux réseaux électriques. Le premier chapitre a été consacré à la problématique des perturbations harmoniques générées par les charges non linéaires connectées aux réseaux électriques, Les origines et les effets néfastes de ces perturbations ont été abordés. Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté les normes imposées sur le THD. Plusieurs solutions traditionnelles et modernes de dépollution ont été présentées ainsi que leurs avantages et inconvénients. Dans le troisième chapitre, nous avons présenté Structure générale et le principe plus Stratégie de commande du filtre actif parallèle.

Références bibliographiques

- [1] T. MAHNI «Etude et Conception d'un Filtre Actif Parallèle Triphasé à Quatre Fils en vue de sa Commande par des Méthodes d'Intelligence Artificielle». Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider Biskra, 2017.
- [2] F. HAMOUDI. « Commande Robuste d'un Filtre Actif Shunt à Quatre Fils ». Mémoire de Magister, Université de Batna, 2008.
- [3] I. EXEBERRIA-OTADUI. « Evaluation of Different Strategies for Series Voltage Sag Compensation ». IEEE, P. 1797-1802, 2002.
- [4] F. FORNANI, R. PROCOPIO and H. J. BOLLEN.« SSC Compensation Capability of Unbalanced Voltage Sags ». IEEE Transaction on Power Delivery, V. 20, N° 03, p 2030-2037, 2005.
- [5] S. BEN ALI et S. BOUHANAK «Etude et Simulation d'un Filtre Active Parallèle à Quatre Fils». Mémoire de magister, Université echahidhamalakhder d'el-oued , 2015.
- [6] M. Al. ALALI. « Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension ». Thèse Doctorat de l'Université Louis Pasteur Strasbourg I, 2002.
- [7] L.BILAL et O.ABANA «Stratégies de Commande d'un Filtre Active Parallèle Triphasé». Mémoire de master, Université echahidhamalakhder d'el-oued , 2012.
- [8] C. DEWEZ, « Modélisation d'un filtre actif parallèle triphasé pour la dépollution harmonique et synthèse d'une commande basée sur le rejet de perturbations ». Thèse de doctorat de l'université de Poitiers, France, (2007).
- [9] T. GOURAUD, « Identification et rejet de perturbations harmoniques dans des réseaux de distribution électrique ». Thèse, Nantes, France, (1997).
- [10] MOHAMAD ALAA EDDIN ALALI «Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension (Automatisation des systèmes de puissance électriques)» Thèse de Doctorat, Strasbourg 12 Septembre 2002.
- [11] OULD-OUALI SAMI HASSANI «Etude et réalisation d'un filtre actif parallèle commandé par logique floue»Mémoire de magister de l'EMP, 2002.
- [12] BADACHE ZOHIR et SACI ABDESLAM «Etude et simulation d'un filtre actif parallèle en utilisant un onduleur à trois niveaux à structure NPC pour la compensation des courant harmoniques » Mémoire d'ingénieur, université de M'sila, 2005-2006.
- [12] Benkechida Noureddine «Identification de courant harmonique généré par une charge non linéaire» Mémoire d'ingénieur, université de M'sila, 2005. [7] E. MASADA.E, HEYAFUNE.K «A harmonic Control Scheme for the Active Power Filter», EPE Brussels, 1985, pp.229-234.
- [13] Ghennam Tarek «Etude et réalisation d'un compensateur actif de puissance commandé par DSP»Mémoire de magister. Ecole militaire polytechnique, 2004.

[14] E. MASADA.E, HEYAFUNE.K «A harmonic Control Scheme for the Active Power Filter», EPE Brussels, 1985, pp.229-234.

[15] BADACHE ZOHIR et SACI ABDESLAM «Etude et simulation d'un filtre actif parallèle en utilisant un onduleur à trois niveaux à structure NPC pour la compensation des courant harmoniques » Mémoire d'ingénieur, université de M'sila, 2005-2006.

[16] Ghennam Tarek «Etude et réalisation d'un compensateur actif de puissance commandé par DSP»Mémoire de magister. Ecole militaire polytechnique, 2004.

[17] H. Djeghloud : "Filtrage actif de puissance", Thèse de Doctorat, Université de Constantine ,2007.

[18] A. Med Elhadi: " Étude comparative de différentes méthodes de compensation active d'énergie électrique ", mémoire de Master. Université de M'sila, 2013.

[19] S. Bouguerra& I. BOURENNANE : "Filtrage actif parallèle des réseaux électriques avec compensation de l'énergie réactive", mémoire d'ingénieur. Université de M'sila, 2007.

2016 PDF

[20] CHAOUI, Abdelmadjid. « Filtrage actif triphasé pour charges non linéaires ». Thèse de doctorat. UnivSetif 2010.

La source

21 H. Kouara, "Contribution au contrôle d'un filtre actif parallèle triphasé à quatre fils dans un milieu perturbé," Thèse de Doctorat en Électrotechnique, Université de Batna, Algérie, 2015.

22 M. A. E. Alali, "Contribution à l'Étude des Compensateurs Actifs des Réseaux électriques Basse Tension," Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg, France, 2002.

[23] B. Boukezata, "Étude et commande d'une chaîne de conversion d'énergie d'un système solaire photovoltaïque," Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas, Sétif 1 , Algérie, 2018.

[24] S. Beaulieu, "Étude et mise au point d'un filtre actif d'harmoniques en vue d'améliorer la qualité de l'alimentation électrique," Mémoire de Maîtrise en Ingénierai, Université du Québec à Chicoutimi, Canada, 2007.

[25] A. L. de Heredia Bermeo, "Commandes avancées des systèmes dédiés à l'amélioration de la qualité de l'énergie: de la basse tension à la montée en tension," Thèse de Doctorat en Génie électrique, Institut National Polytechnique de GrenobleINPG, France, 2006.

- [26] H. Akagi, "Active harmonic filters," *Proceedings of the IEEE*, vol. 93, pp. 2128-2141, 2005.
- [27] I. Ghadbane, "Commande d'un Filtre actif Triphasé Parallèle par Différents Régulateurs," Mémoire de Magister en Électrotechnique, Faculté des Sciences et de la Technologie, Université Mohamed Kheider - Biskra, 2011.
- [28] G. Son, H.-J. Kim, and B.-H. Cho, "Improved modulated carrier control with on-time doubler for a single-phase shunt active power filter," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 33, pp. 1715-1723, 2018.
- [29] A. E. M. Bouzid, P. Sicard, A. Cheriti, H. Chaoui, and P. M. Koumba, "Adaptive hysteresis CUI tent control of active power filters for power quality improvement," in *2017 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC)*, 2017, pp. 1-8
- 30 S. Chennai, "Étude, Modélisation & Commande des Filtres actifs : Apport des Techniques de l'Intelligence artificielle," Thèse de Doctorat en Sciences, Université de Biskra, Algérie, 2013.
- [31] K. Archana, M. Sumukha, and T. M. Mohammed, "Power Quality Improvement using Shunt Active Filter," *2017 International Conference on Current Trends in Computer, Electrical, Electronics and Communication (CTCEEC)*, 2017, pp. 622-626.
- [32] S. karimi, "Continuité de service des convertisseurs triphasés de puissance et prototypage "FPGA in the loop": application au filtre actif parallèle," Thèse de Doctorat en Génie électrique, Université Henri Poincaré, Nancy-I, France, 2009.
- [33] - Xu (J.), « Filtrage actif parallèle des harmoniques des réseaux de distribution d'électricité », INPL, Thèse de doctorat, 1994.
- [34] - Segulier (G.) et Labrique (F.), *La conversion continu alternatif*, Tec & doc Lavoisier, 1989, Les convertisseurs de l'électronique de puissance, volume 4.
- [35] - Mohamad AlaaEddinAlali, « Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension », Thèse de Doctorat de l'Université de Louis Pasteur, Strasbourg, 12 Septembre 2002
- [36] - H. Akagi, « New trends in active filters for power conditioning », *IEEE Trans. on Industry applications*, vol. 32, No. 6, pp. 1312-1322, November/December 1996.
- [37] - H. Akagi, « Control strategy and site selection of a shunt active filter for damping of harmonic propagation in power distribution systems », *IEEE Trans. on power delivery*, vol.

- 12, No. 1, pp. 354-363, January 1997. [39] - T. Nakajima, E. Masada, « An active power filter with monitoring of harmonicspectrum », EPE-89, 3rd European conference on power electronics and applications, Aachen, Germany, 1989
- [38] - T. Nakajima, E. Masada, « An active power filter with monitoring of harmonicspectrum », EPE-89, 3rd European conference on power electronics and applications, Aachen, Germany, 1989.
- [39] - L. Benchaita, « Etude, par simulation numérique et expérimentation, d'un filtre actif parallèle à structure courant avec une nouvelle méthode de contrôle-commande »
Thèse de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy 30 Octobre 1998.
- [40] - A. Chandra, B. Zingh, B.N. Zingh, K. Al-Haddad, « An improved control algorithm ofshunt active filter for voltage regulation, harmonic elimination, power factor correction and balancing of nonlinear loads », IEEE Trans. on power electronics, vol.15, No. 3, pp. 495-507, May 2000.
- [41] - S. Guffon, « Modélisation et commandes a structure variable de filtres actifs de puissance » Thèse de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, 24 Juillet 2000.
- [42] - H. Akagi, Y. Kanazawa and A. Nabae, « Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuits », Proceeding 1983 International power electronics conférence. Tokyo, Japan, PP. 1375-13 86, 1983.
- [43] - M.A.E. Alali, S. Saadate, Y.A. Chapuis, F. Braun, « Energetic study of a shunt activeconditioner compensating current harmonics, power factor and unbalanced », EPE-PEMC 2000, Kotic, Slovak Republic, vol. 5, pp. 211-216, September 2000.