

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU



FACULTÉ DE GENIE ELECRIQUE ET DINFORMATIQUE

DÉPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

de MASTER ACADEMIQUE

DOMAINE : sciences et Technologies

FILIERE : Electrotechnique

SPECIALITE : Réseaux Electriques

Présentée par :

Kassia AHMED YAHIA

Lydia BOUDJDAIMI

Theme:

Etude et simulation d'un Filtre Actif

Parallèle Dans un Réseau Electrique

Mémoire soutenu publiquement le 01/07/2024 devant le jury composé de :

M Farid LAMANI

MAA, UMMTO, président

M Hamza BESSAI

MAA, UMMTO, Encadrant M

Kousseila MESBAH MCA,

UMMTO, Examineur

Année universitaire 2023/2024

Remerciements

Je tiens à exprimer ma plus profonde gratitude à Monsieur Bessai Hamza, mon encadreur, pour son soutien indéfectible et ses précieux conseils tout au long de ce travail de mémoire. Sa rigueur scientifique, sa disponibilité et ses encouragements constants ont été essentiels à la réalisation de ce projet. Son expertise et son expérience ont été une source inestimable de connaissances et d'inspiration, me guidant avec pertinence et patience dans chaque étape de cette recherche.

Je souhaite également remercier l'ensemble des enseignants de département électrotechnique, dont les enseignements et les échanges m'ont permis d'acquérir les compétences nécessaires à la réalisation de ce travail. Leurs cours et leurs conseils avisés ont contribué à enrichir mes connaissances et à aiguiser mon esprit critique.

Mes remerciements s'adressent également à l'équipe administrative de département Electrotechnique, pour leur aide logistique et leur soutien tout au long de mon parcours académique. Leur efficacité et leur disponibilité ont grandement facilité mes démarches et m'ont permis de me concentrer pleinement sur mes études.

Je tiens également à remercier mes collègues et amis pour leurs encouragements et leur soutien moral tout au long de cette aventure académique. Leur présence et leurs discussions stimulantes ont été une source de motivation et d'enrichissement personnel.

Enfin, je souhaite exprimer ma reconnaissance à ma famille, dont l'amour, la patience et le soutien inconditionnel ont été les piliers de ma réussite. Leur confiance en moi et leurs encouragements constants m'ont donné la force de surmonter les défis et de persévérer jusqu'à l'achèvement de ce mémoire.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

✚ A mes très chers parents pour leurs sacrifices et

leurs soutiens et leur confiance.

✚ A mon cher mari, qui ma encourager à continuer

mon cursus universitaire.

✚ A mes frères, Anis, Lyes et Rabah

✚ A tous mes amis (es)



Lydia



À la mémoire de ma chère mère,

Ce mémoire est dédié à toi, qui as toujours été ma source de force et d'inspiration, même si tu n'es plus physiquement présente parmi nous.

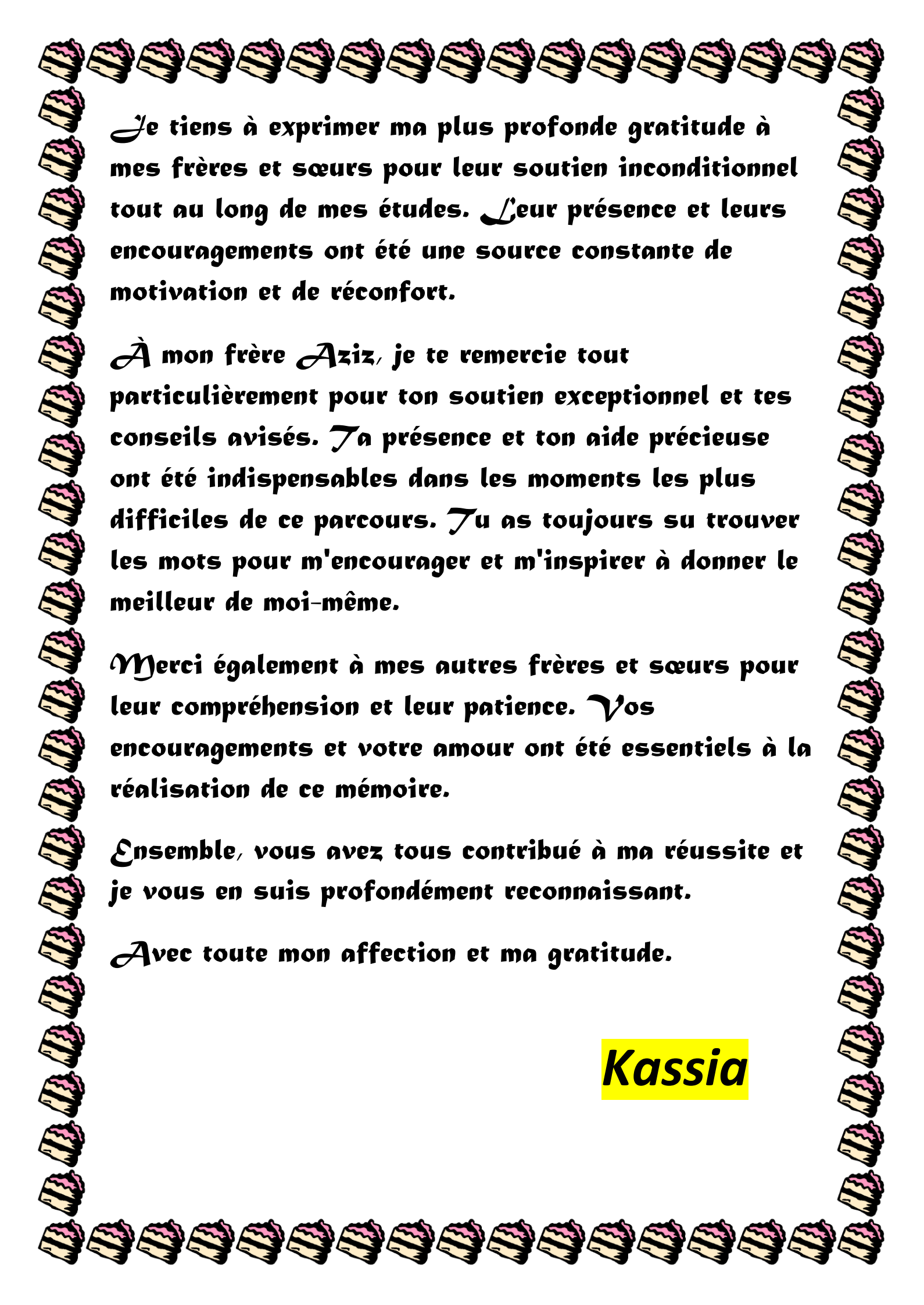
Ta bienveillance, ton amour et tes sacrifices ont forgé la personne que je suis aujourd'hui. Ton esprit continue de me guider et de m'encourager à chaque étape de ma vie.

Tu resteras à jamais dans mon cœur, et ce travail est le reflet de ton héritage et de tes enseignements. Chaque page de ce mémoire est une manifestation de ton influence et de ton amour indéfectible.

Avec une infinie gratitude et tout mon amour.



Kassia



Je tiens à exprimer ma plus profonde gratitude à mes frères et sœurs pour leur soutien inconditionnel tout au long de mes études. Leur présence et leurs encouragements ont été une source constante de motivation et de réconfort.

À mon frère Aziz, je te remercie tout particulièrement pour ton soutien exceptionnel et tes conseils avisés. Ta présence et ton aide précieuse ont été indispensables dans les moments les plus difficiles de ce parcours. Tu as toujours su trouver les mots pour m'encourager et m'inspirer à donner le meilleur de moi-même.

Merci également à mes autres frères et sœurs pour leur compréhension et leur patience. Vos encouragements et votre amour ont été essentiels à la réalisation de ce mémoire.

Ensemble, vous avez tous contribué à ma réussite et je vous en suis profondément reconnaissant.

Avec toute mon affection et ma gratitude.

Kassia

Introduction générale..... 1

Chapitre I

I.1 Introduction2

I.2 Qualité de l'énergie.....3

I.3 Perturbations des réseaux électriques.....4

I.3.1 Creux et coupures de tension.....4

I.3.2 Fluctuations de tension.....4

I.3.3 Déséquilibre du système triphasé de tension.....5

I.3.4 Variation de fréquence.....5

I.4 Généralités sur les harmoniques5

I.4.1 Types des harmoniques.....6

I.4.2 Harmoniques de courant et de tension.....6

I.4.2.1 Courants harmoniques.....7

I.4.2.2 Tension harmonique.....7

I.5 Généralités sur l'analyse harmonique.....7

I.6 Effets des harmoniques.....7

I.7 Caractéristiques des perturbations harmoniques8

I.8 Normes et Réglementation8

I.9 Solutions de dépollution du réseau électrique.....8

Table des matières

I.9.1 Solutions traditionnelles de la dépollution.....	9
I.9.1.1 Agir sur la structure de l'installation.....	9
I.9.1.2 Compensation.....	9
I.9.1.3 Augmentation de la puissance de court-circuit.....	9
I.9.1.4 Surdimensionnement ou déclassement de l'installation électrique.....	9
I.9.1.5 Rééquilibrage des courants du réseau électrique.....	9
I.9.1.6 Filtrage passif.....	10
I.9.2 Solutions modernes de la dépollution.....	10
I.9.2.1 Pont dodécaphasé.....	11
I.9.2.2 Les redresseurs à MLI.....	11
I.9.2.3 Filtres actifs.....	12
a) Le filtre actif parallèle (FAP)	12
b) Le filtre actif série (FAS)	13
c) La combinaison parallèle-série actifs (UPQC).....	13
d) Combinaison hybride active et passive.....	14
I.10 Conclusion.....	21

CHAPITRE II

II.1 Introduction.....	21
II.2 Structure générale d'un filtre actif shunt.....	21
II.2.1 Etude de la partie puissance.....	22
I.2.1.1 Onduleur de tension.....	22
I a- Structure générale	23
b- Tension fournie par l'onduleur	23
II.2.1.2 Le filtre de sortie	25
II.2.1.3 Elément de stockage d'énergie.....	26
II.2.2 Etude de la partie commande.....	27
II.2.2.1 Méthodes d'identification des courants perturbés	27
II.2.2.2 Système à base de PLL.....	27
II.2.2.3 Commande de l'onduleur.....	28
II.2.2.4 Régulation de tension continue.....	28
II.2.2.5 Régulation des courants	32
II.2.2.5.1 Le choix des régulateurs.....	32
II.2.2.5.2 Régulation par PI	33
II.3 Modèle des courants de sortie du filtre actif.....	35
II.4 Modélisation du réseau.....	36
II.5 Modélisation de la charge polluante.....	37
II.6 Conclusion.....	38

Table des matières

Chapitre III

III.1 Introduction.....	37
III.2 Méthodes d'identification des grandeurs harmoniques.....	37
III.2.1 Domaine fréquentiel.....	37
III.2.1.1 Méthodes de Fourier & de la FFT.....	38
III.2.1.2 Technique de la multiplication sinusoïdale.....	38
III.2.2 Domaine temporel.....	38
III.2.2.1 Méthode des puissances instantanées :.....	38
III.2.2.2 Méthode de détection synchrone.....	42
III.3.1. Techniques de Commande	44
III.4. Conclusion.....	48

Chapitre IV

IV. 1 Introduction	49
IV .2 Simulation et analyse des résultats	52
IV .3 Conclusion	54
Conclusion Générale.....	55
Bibliographie.....	56

Introduction générale

La qualité de l'énergie électrique est un enjeu majeur dans les réseaux de distribution modernes, notamment en raison de l'augmentation des dispositifs électroniques et des charges non linéaires. Ces dernières génèrent des harmoniques, des distorsions de la forme d'onde de la tension et du courant, qui peuvent entraîner des dysfonctionnements, des surcharges, et une dégradation des équipements électriques. Par conséquent, la réduction des harmoniques et l'amélioration de la qualité de l'énergie sont devenues des priorités pour les ingénieurs et les chercheurs dans le domaine des réseaux électriques.

Le filtrage actif se présente comme une solution efficace pour atténuer ces perturbations harmoniques. Contrairement aux filtres passifs traditionnels, les filtres actifs utilisent des composants électroniques pour générer des signaux de compensation en temps réel, éliminant ainsi les harmoniques indésirables. Cette technologie permet non seulement de réduire les harmoniques mais aussi de s'adapter dynamiquement aux variations des charges et des conditions du réseau.

Ce mémoire vise à explorer en profondeur le concept de filtrage actif dans les réseaux électriques. L'objectif principal est de modéliser et simuler un filtre actif utilisant une commande par hystérésis, une technique de contrôle reconnue pour sa simplicité et son efficacité. La commande par hystérésis permet un suivi rapide et précis des courants de référence, garantissant ainsi une compensation harmonique efficace.

Le mémoire est structuré en plusieurs chapitres, chacun abordant une facette spécifique du sujet :

- 1.** : *perturbations des réseaux électriques et principe de compensation.*
- 2.** : *Etude, modélisation et régulation d'un filtre actif parallèle*
- 3.** : *Commande d'un filtre actif par Les méthodes d'identification des harmoniques.*
- 4.** : *Simulation de l'ensemble réseau-filtre actif shunt-charge polluante*

Chaque chapitre contribue à une compréhension globale du filtrage actif et de son potentiel pour améliorer la qualité de l'énergie dans les réseaux électriques. Les simulations effectuées dans MATLAB avec une commande par hystérésis constituent une partie essentielle de cette étude, fournissant des résultats concrets et des preuves de concept pour l'application pratique de ces technologies.

En conclusion, ce mémoire vise à fournir une analyse approfondie et des solutions pratiques pour la mise en œuvre de filtres actifs en parallèle dans les réseaux électriques, contribuant ainsi à la réduction des perturbations harmoniques et à l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique.

Chapitre 1

***Perturbations des réseaux électriques et
principe de compensation***

I.1 Introduction

L'énergie électrique, principalement produite et distribuée sous forme de tensions triphasées sinusoïdales, permet de fournir la puissance électrique nécessaire aux différentes charges sur le réseau électrique. Lorsque la forme d'onde de la tension n'est plus sinusoïdale, on rencontre des perturbations qui peuvent affecter le bon fonctionnement de nombreux équipements et de charges raccordés au réseau. Dans ces conditions, des problèmes de compatibilité électromagnétique peuvent survenir entre ces éléments connectés au réseau.

L'utilisation croissante des équipements de l'électronique de puissance sur les réseaux électriques contribue à la détérioration de la tension d'alimentation. En effet, ces charges dites déformantes sont non linéaires et appellent du réseau électrique un courant non sinusoïdal possédant un contenu harmonique. Ces courants harmoniques circulant à travers les impédances du réseau peuvent, lorsqu'ils sont importants en amplitude, créer des tensions harmoniques et ainsi perturber le fonctionnement des autres équipements branchés au point commun de raccordement.

L'objet de ce premier chapitre est d'analyser, l'influence des perturbations et des courants harmoniques au réseau électrique. Nous présentons également dans cette partie les normes et les réglementations adoptées dans ce domaine et nous étudierons les différentes solutions traditionnelles et avancées permettant l'atténuation des effets les plus néfastes.

I.2 Qualité de l'énergie [1]

La qualité de l'énergie est une notion assez large qui recouvre à la fois la qualité de la fourniture électrique, la qualité de l'onde de tension et la qualité des courants. Lorsque la tension est présente, les principaux phénomènes pouvant l'affecter sont d'une part les variations lentes : creux de tension, surtensions, coupures, déséquilibres et d'autre part des variations rapides : surtensions transitoires, flicker.

Ainsi que les harmoniques, la qualité des courants reflète par contre la possibilité des charges à fonctionner sans perturber ni réduire l'efficacité du système de puissance. C'est pourquoi certains considèrent que la qualité de l'électricité se réduit à la qualité de la tension.

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

- La fréquence,
- L'amplitude des trois tensions,
- La forme d'onde,
- Le déséquilibre.

I.3 Perturbation des réseaux électriques

Les perturbations électriques affectant l'un des quatre paramètres cités auparavant, peuvent se manifester par : un creux ou une coupure de tension, une fluctuation de tension, un déséquilibre du système triphasé de tension, une variation de la fréquence, la présence d'harmoniques et/ou d'inter harmoniques.

I.3.1 Creux et coupures de tension

Un creux de tension est défini comme une baisse soudaine de 10% à 90% de la tension nominale pour une durée de 10ms jusqu'à 1min. Généralement, les creux de tension sont des perturbations (et non des pannes ou des interruptions) de moins d'une seconde présentant une baisse de tension de 60 % ou moins.

Une coupure brève représente une chute de tension supérieure à 90% de la valeur nominale et d'une durée de 10ms à 1min.

Les creux de tension et les coupures brèves sont causés par des phénomènes aléatoires. Ces phénomènes concernent soit le réseau du distributeur, soit le réseau de l'utilisateur.

La figure 1.1 montre un exemple de creux et de coupure de tension.

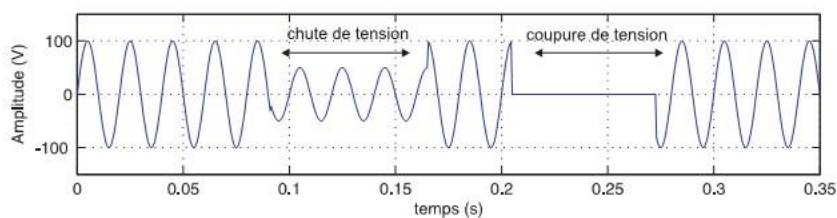


Figure (I.1) : Creux et coupures de tension

I.3.2 Fluctuations de tension

Les fluctuations de tension sont des variations rapides de tension, répétitives ou aléatoires (figure 1.2), elles sont provoquées par des variations rapides de puissance absorbée ou produite par des installations telles que les soudeuses, fours à arc, éoliennes...etc.

L'origine principale de ces courants est le fonctionnement d'appareil dont la puissance absorbée varie de manière rapide. 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.

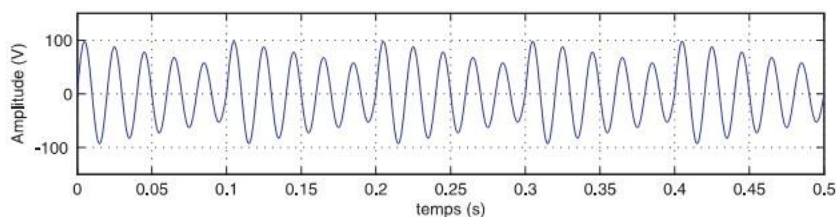


Figure (I.2) : Fluctuations de tension.

I.3.3 Déséquilibre du système triphasé de tension

Lorsque les trois tensions qui composent le réseau triphasé ne sont pas identiques (amplitude différente, fréquence différente ou déphasage différent de 120 degrés), ou lorsque les trois éléments qui composent le récepteur triphasé ne sont pas identiques (impédance différente, résistance différente ou réactance différente/ou nature différente) ; Alors les trois courants qui alimentent le récepteur triphasé ne sont pas identiques : amplitude différente, fréquence

différente, ou déphasage différent de 120 degrés ; On dit alors que le système triphasé est déséquilibré .

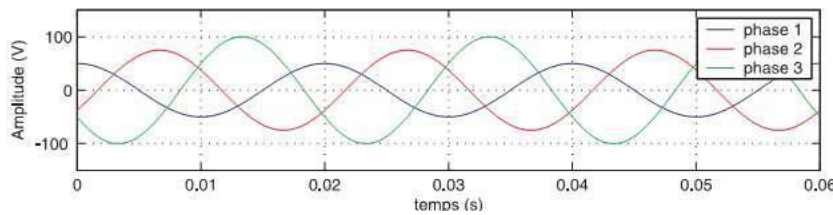


Figure (I.3) : Déséquilibre du système triphasé de tension.

I.3.4 Variation de fréquence

Une variation sensible de la fréquence du réseau peut apparaître sur les réseaux des utilisateurs non interconnectés ou alimentés par une source thermique autonome.

Dans des conditions normales d'exploitation, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle $50\text{Hz} \pm 1\%$

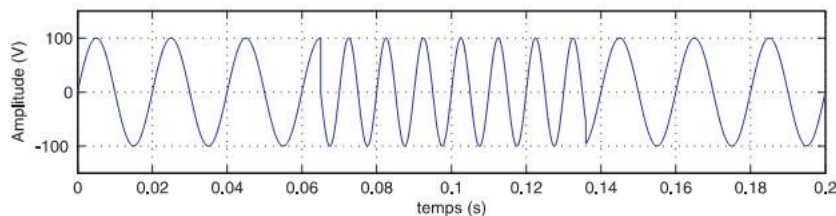


Figure (I 4) : Variation de fréquence.

I.4 Généralités sur les harmoniques [1]

La présence d'harmoniques est synonyme d'une onde de tension ou de courant déformée. La déformation de l'onde de tension ou de courant signifie que la distribution de l'énergie électrique est perturbée et que la qualité de l'énergie n'est pas optimale.

Les courants harmoniques sont générés par les charges non-linéaires connectées au réseau. La circulation des courants harmoniques crée des tensions harmoniques à travers les impédances du réseau, et donc une déformation de la tension d'alimentation.

Une perturbation harmonique est définie comme une déformation de la forme d'onde d'un signal sinusoïdal pur. Sur le réseau électrique, les perturbations de la forme d'onde sont principalement dues à la présence des charges non linéaires.

Les harmoniques circulant aux réseaux dégradent la qualité de l'énergie, et sont ainsi à l'origine de nombreuses nuisances :

- Surcharge des réseaux de distribution par l'augmentation du courant actif/efficace,
- Surcharge des conducteurs de neutre en raison de la sommation des harmoniques de rang 3 créés par les charges monophasées,
- Surcharge, vibrations et vieillissement des alternateurs, transformateurs, moteurs, ronflement des transformateurs,
- Surcharge et vieillissement des condensateurs de compensation d'énergie réactive,
- Déformation de la tension d'alimentation pouvant perturber des récepteurs sensibles,
- Perturbation des réseaux de communication ou des lignes téléphoniques.

I.4.1 Types des harmoniques

En générale, on distingue les harmoniques de rangs pairs (2, 4, 6,8 ...etc.) et les harmoniques de rangs impairs (3, 5,7 ...etc.) plus influentes, dans les réseaux industriels. Il existe aussi d'autres types d'harmoniques tels que :

Les inters harmoniques : Ce sont des composantes sinusoïdales d'une grandeur qui n'est pas une fréquence multiple entière de celle du fondamentale.

Les infra harmoniques : Ce sont des composantes de fréquences inférieures à celle du fondamentale .

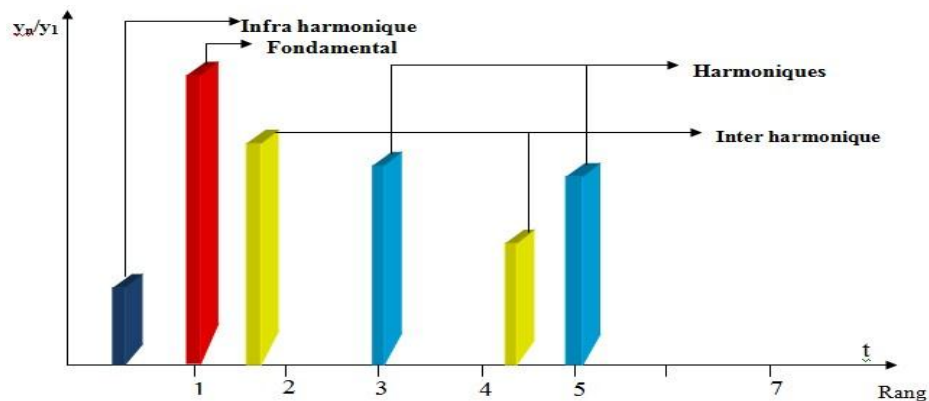


Figure (I. 5) : Représentation d'inters-harmoniques et d'infra-harmoniques. [2]

I.4.2 Harmoniques de courant et de tension

I.4.2.1 Courants harmoniques

Dans la plupart des cas, les harmoniques présents sur les réseaux électriques proviennent de l'utilisation de charges non linéaires.

On dit qu'une charge est non linéaire quand, soumise à une tension sinusoïdale à 50 Hz, elle n'absorbe pas un courant sinusoïdal à cette fréquence (c'est le cas des variateurs de vitesse, fours à arc, micro-ordinateur etc.....)

Ces charges se comportent approximativement comme des sources de courant harmonique, c'est-à-dire que le courant harmonique est fixé par la charge et non pas par l'impédance ou la tension du réseau sur lesquelles elles sont raccordées.

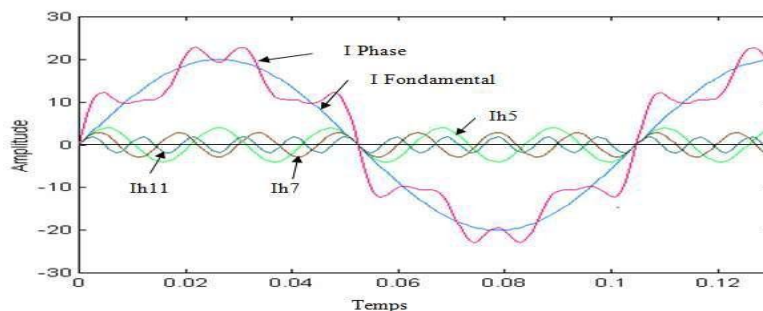


Figure (I. 6) : La représentation de la forme de l'onde d'un courant déformé avec les différents courants harmoniques le constituant.

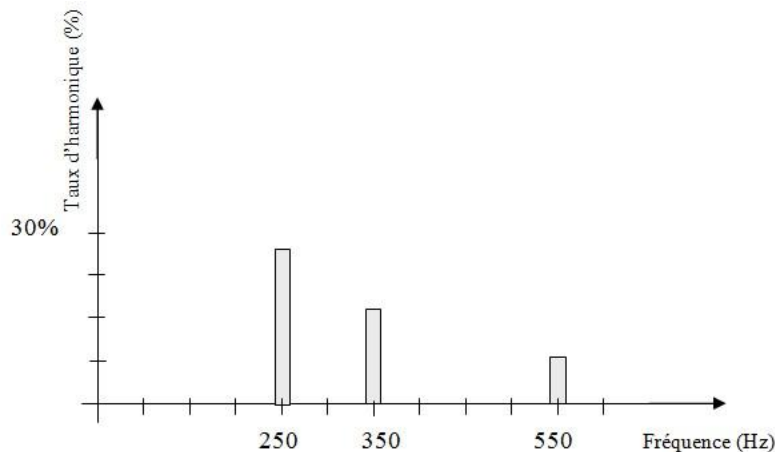


Figure (I. 7) : Représentation spectrale des harmoniques.

I.4.2.2 Tension harmonique

On peut également parler de source de tension pour décrire l'état d'un réseau perturbé par une forte charge non linéaire.

Dans ce cas, si l'on s'intéresse à l'étude de raccordement d'un récepteur de faible puissance, sa connexion au réseau ne modifie pas sensiblement le niveau précédent.

I.5 Généralités sur l'analyse harmonique

Un réseau de distribution électrique permet d'alimenter des récepteurs ou des charges à l'aide de tension monophasée ou triphasée dite sinusoïdale et de fréquence constante produite par des générateurs ou des sources de très fortes puissances par rapport à celle consommée au point d'utilisation. L'énergie est produite par des centrales nucléaire, thermique, hydraulique ou à base de sources renouvelables et des réseaux de distribution assurent le transport jusqu'au lieu de consommation. A ce niveau il existe deux catégories de récepteurs distincts : les charges dites linéaires et les charges dites non linéaires. Dans le premier cas, les variations des courants restent proportionnelles à la variation de la tension appliquée avec l'introduction d'un déphasage lié à la nature de la charge.

I.6 Effets des harmoniques

Les tensions et courants harmoniques superposés à l'onde fondamentale conjuguent leurs effets sur les appareils et équipements utilisés. Les effets les plus connus des harmoniques sont la destruction de condensateurs et de disjoncteurs suite à de fortes intensités dans les réseaux internes

En présence des harmoniques, la valeur efficace résultante est la somme des valeurs efficaces de toutes les harmoniques et la fondamentale qui traversent le circuit. Les appareils dimensionnés pour un courant fondamental donné peuvent être soumis à de sévères contraintes supplémentaires. Alors comme traitement traditionnel de ces harmoniques on sur dimensionne ou on déclassé les installations.

Donc les courants et tensions harmoniques ont des effets néfastes sur le fonctionnement, ainsi que la rentabilité et la durée de vie de certains équipements électriques. Parmi ces effets instantanés, on peut citer :

Perturbation des électroniques des dispositifs de mesure et de protection ;
Perturbation des lignes de téléphones proches de lignes de puissance ;
Résonance ;
Vibration et bruits ;

En ce qui concerne les effets à long terme on cite :

L'usure mécanique des matériaux due aux vibrations ;
L'échauffement qui réduit la durée de vie de matériels (condensateur, transformateur, machine tournantes).

I.7 Caractéristiques des perturbations harmoniques

La perturbation harmonique est généralement caractérisée par le taux de distorsion harmonique (THD) défini pour la tension ou le courant. Ce critère est le plus souvent employé pour quantifier le contenu harmonique d'un signal distordu. Il mesure également le degré de déformation du signal apporté par les harmoniques par rapport à une onde sinusoïdale. Il va de soi que la répartition spectrale complète généralement l'information sur le THD en indiquant le rang des harmoniques dominants. Pour chiffrer la consommation de puissance réactive le facteur de puissance (FP) est généralement utilisé [4].

Le courant absorbé par une charge non linéaire (convertisseur statique) n'est pas sinusoïdal, mais sa valeur moyenne sur chaque phase est souvent nulle. Dans ce cas, la décomposition en série de Fourier du courant donne : [3]

$$i(t) = \sqrt{2}I_1 \sin(\omega t + \alpha_1) + \sum_{h=2}^{\infty} \sqrt{2}I_h \sin(h\omega t + \alpha_h) \quad (1.1)$$

Avec : I_1, I_h : valeur efficace du courant fondamental et du courant harmonique de rang h ,
 α_1, α_h : déphasage du courant fondamental et du courant harmonique de rang h ,
 ω : Pulsation fondamentale du réseau.

Le taux de distorsion harmonique de ce courant s'exprime sous la forme suivante :

$$THD_i = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \frac{I_h^2}{I_1^2}} \quad (1.2)$$

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

$$iTHD_v = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \frac{V_h^2}{V_1^2}} \quad (1.3)$$

Il est possible aussi de caractériser les harmoniques par leur participation dans la puissance apparente. Nous utilisons alors la notion de puissance déformante "D".

Dans le cas d'un réseau équilibré à m phases, la puissance apparente S , la puissance active P et la puissance réactive Q sont données par les relations suivantes :

$$S = m \sqrt{\sum_{h=1}^n V_h^2} \cdot \sqrt{\sum_{h=1}^n I_h^2} = m \cdot V_{eff} \cdot I_{eff} \quad (1.4)$$

$$P = m \sum_{h=1}^n V_h I_h \cos(\varphi_h) \quad (1.5)$$

$$q = m \sum_{h=1}^n V_h I_h \sin(\varphi_h) \quad (1.6)$$

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

$$D = m V_1 \sqrt{\sum_{h=1}^n I_h^2} \quad (1.7)$$

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

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{\sum_{h=1}^n V_h I_h \cos(\varphi_h)}{\sqrt{\sum_{h=1}^n V_h^2} \cdot \sqrt{\sum_{h=1}^n I_h^2}} \quad (1.8)$$

On constate que le facteur de puissance est dégradé par la présence des harmoniques. Dans le cas d'un système triphasé alimentant une charge non linéaire équilibrée (cas du redresseur à diodes), les fondamentaux des courants absorbés composent un système direct (c'est-à-dire de même séquence que les tensions du réseau), les harmoniques multiples de 3, composent un système homopolaire (ils sont en phase), l'harmonique 5 un système inverse (la séquence des phases est inverse par rapport à celle du réseau), l'harmonique 7 un système direct, ... Différents facteurs sont définis pour caractériser les perturbations harmoniques. Le taux de distorsion harmonique et le facteur de puissance sont les plus significatifs pour quantifier respectivement les perturbations harmoniques et la consommation de la puissance réactive.

I.8 Normes et Réglementation [4]

La C.E.I. (Commission Electrotechnique Internationale) et l'I.E.E. E (Institute of Electrical and Electronics Engineers) sont les deux principaux organismes internationaux de normalisation dans le domaine de l'électrotechnique et particulièrement dans le domaine des Perturbations électriques. La CEI est un organisme officiel composé de comités nationaux de

63 pays, tandis que l'IEEE est une association professionnelle américaine. Contrairement à L'IEEE qui utilise la notion de "qualité de l'énergie" dans ses normes, la CEI préfère plutôt le concept de "Compatibilité Electromagnétique". Les émissions harmoniques sont aussi soumises à différentes dispositions normatives et réglementaires :

- Normes de compatibilité adaptées aux réseaux,
- Normes d'émission applicables aux produits générateurs d'harmoniques,
- Recommandations des distributeurs d'énergie applicables aux installations.

Les normes de la CEI sont regroupées dans la publication CEI-61000. On peut y retrouver les normes qui établissent des limites pour les émissions de courants harmoniques (CEI 61000-3-2, CEI 61000-3-4 et 61000-3-6), celles qui établissent le niveau de compatibilité (CEI 61000-2-4 et 61000-2-2) et qui déterminent le taux de distorsion harmonique de la tension de référence sur le réseau.

Les normes ci-dessus sont obligatoires mais restent incomplètes et ne permettent pas de garantir totalement la compatibilité électromagnétique sur les réseaux publics.

C'est la raison pour laquelle la compagnie EDF (Electricité de France) émet quelques recommandations concernant le raccordement des utilisateurs sur le réseau. Par exemple, les limitations en tension harmonique à respecter par ses clients sont :

- Pour chaque rang pair, la tension harmonique est limitée à 0,6%,
- Pour chaque rang impair, la tension harmonique est limitée à 1%,
- Limitation du THD à 1,6%.

Dans le cadre du contrat EMERAUDE signé avec ses abonnés tarif vert (tarif pour les entreprises dont la puissance compteur est supérieure à 250kVA), il y a un engagement réciproque : de qualité, pour EDF, et de limitation de pollution de la part de l'abonné. En plus, EDF autorise ses clients à consommer de la puissance réactive, sans être facturé, jusqu'à 40% de la puissance active absorbée.

I.9 Solutions de dépollution du réseau électrique

Deux types de solutions sont envisageables. La première consiste à utiliser des convertisseurs statiques moins ou peu polluants, tandis que la seconde consiste en la mise en œuvre d'un filtrage des composantes harmoniques. La première classe de solutions s'intéresse à la conception tandis que la seconde consiste à compenser les courants ou les tensions harmoniques. Deux groupes de solutions de dépollution pour compenser toutes les perturbations peuvent être distingués : les solutions traditionnelles et les solutions modernes.

I.9 Solutions de dépollution du réseau électrique

Afin de dépolluer les réseaux électriques, plusieurs solutions ont été proposées dans la littérature, dont le but est de limiter la propagation et l'effet des harmoniques dans les réseaux électriques.

I.9.1.1 Agir sur la structure de l'installation

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

I.9.1.2 Compensation

Il consiste à superposer à la source de perturbation une autre source d'énergie capable d'absorber ou de compenser les composantes non souhaitées.

Ces systèmes sont généralement des compensateurs d'harmoniques et/ou d'énergie réactive placés, selon la nature de la perturbation à éliminer.

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.

I.9.1.3 Augmentation de la puissance de court-circuit

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

I.9.1.4 Surdimensionnement ou déclassement de l'installation électrique

L'objectif n'est pas d'éliminer les courants harmoniques circulant dans l'installation électrique, mais plutôt de « faire avec », en évitant leurs conséquences. Au Moment de la conception d'une installation nouvelle, l'idée consiste à surdimensionner tous les éléments de l'installation susceptibles de véhiculer des courants harmoniques, à savoir les transformateurs, les câbles, les disjoncteurs, les groupes électrogènes et les tableaux de distribution. La solution la plus largement utilisée est le surdimensionnement du conducteur neutre.

Par cette approche, les problèmes liés à la pollution harmoniques sont résolus pendant une durée limitée. Le déclassement des équipements de distribution électrique soumis aux harmoniques est utilisé dans le cas des installations existantes. Cette méthode cause un surcoût de production et ne tire pas profit du potentiel réel de l'installation.

I.9.1.5 Rééquilibrage des courants du réseau électrique

C'est une solution qui permet de répartir les charges d'une manière identique sur les trois phases. En effet, les charges monophasées et biphasées mal réparties engendrent des courants déséquilibres dans un réseau électrique basse tension.

I.9.1.6 Filtrage passif

C'est la solution classique pour améliorer de la qualité d'énergie, elle repose sur le principe de piéger les harmoniques dans des éléments passifs (R, L, C) connectés, en dérivation au réseau, formant des impédances dont la fréquence de résonance est accordée à celle de l'harmonique de courant que l'on veut atténuer ou éliminer.

Parmi les dispositifs du filtrage les plus répandus, on distingue le filtre passif résonnant et le filtre passif amorti ou passe-haut.

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

- 1- Manque de souplesse à s'adapter aux variations du réseau et de la charge.
- 2- Equipements volumineux.
- 3- Problème de résonance avec l'impédance du réseau.
- 4- Inadaptabilité et perte d'efficacité lorsque les caractéristiques du réseau électrique évoluent.

I.9.2 Solutions modernes de la dépollution[4]

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. En effet, les méthodes dites "classiques" de filtrage ou de dépollution des réseaux électriques présentent un certain nombre d'inconvénients. Le plus important d'entre eux est sans doute le fait d'être sensible aux évolutions de l'environnement.

Ils voient leur efficacité baisser avec les variations des perturbations (variation des fréquences et des amplitudes des harmoniques).

La deuxième 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.

I.9.2.1 Pont dodécaphasé

Ce pont est composé de deux redresseurs hexaphasés montés en série, ce pont le plus utilisé dans des applications avec des puissances importantes (Figure 1.8).

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

Cette solution ne résolve pas les problèmes causés par les charges polluantes qui existent sur le marché .

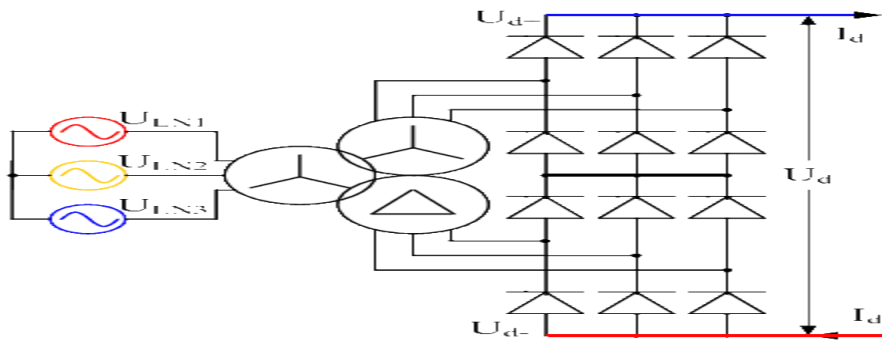


Figure (I. 8) : Pont dodécaphasé

I.9.2.2 Les redresseurs à MLI

Les convertisseurs AC/DC à absorption sinusoïdale sont réalisés grâce à la stratégie de modulation de largeur d'impulsion MLI, C'est une bonne solution, cependant elle doit être généralisée, ce qui n'est pas le cas malheureusement de nos jours. Dans le cas monophasé, la structure la plus répandue est une mise en parallèle d'un pont redresseur monophasé à diode et d'un hacheur, tandis que dans le cas triphasé, c'est la structure en pont triphasé à base de GTO ou IGBT qui est la plus répandue. Cette solution permet de réduire les harmoniques produits par les convertisseurs AC/DC et elle ne peut agir sur les harmoniques créés par d'autres sortes de charges polluantes.

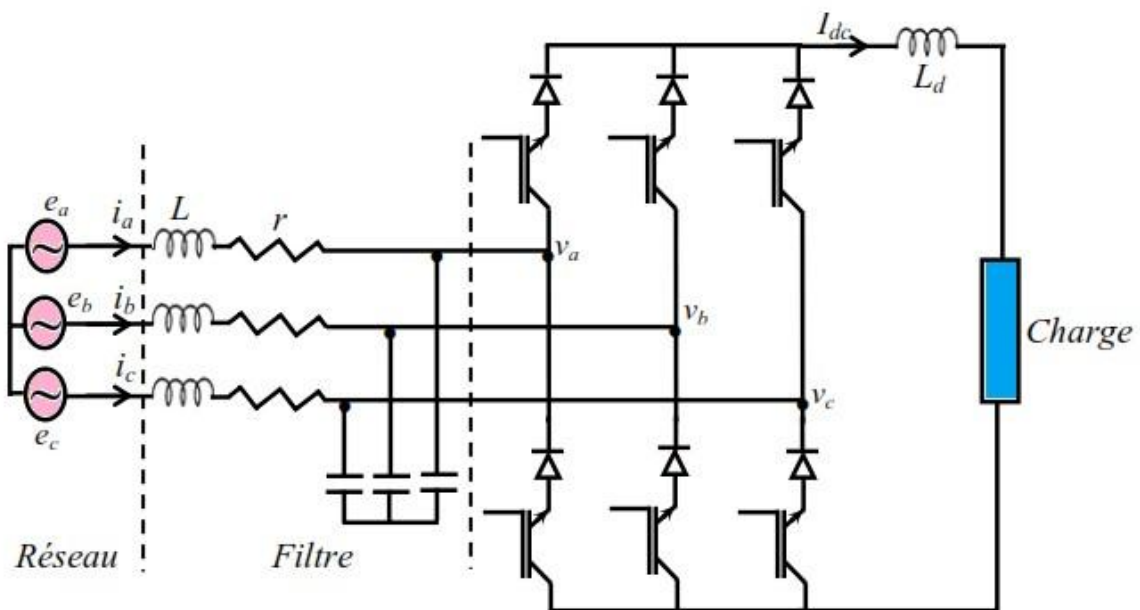


Figure (I. 9) : Topologie d'un redresseur à MLI triphasé de courant.

I.9.2.3 Filtrés actifs

Les filtres actifs constituent une alternative intéressante aux solutions classiques.

Flexibles car auto-adaptatifs, ils viennent s'ajouter à des structures déjà existantes de convertisseurs. Ils peuvent également être utilisés comme complément aux solutions traditionnelles de dépollution.

Pour fournir aux consommateurs une énergie électrique de qualité, même dans les conditions de fonctionnement les plus perturbées, les filtres actifs sont proposés comme des solutions de dépollution des réseaux électriques. Donc le but de ces filtres est de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à ce que le courant ou la tension redevienne sinusoïdale.

Il existe trois topologies possibles de filtres actifs :

a) Le filtre actif parallèle (FAP) :

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

Il est conçu pour compenser les perturbations de courant comme les harmoniques, les déséquilibres et la puissance réactive.

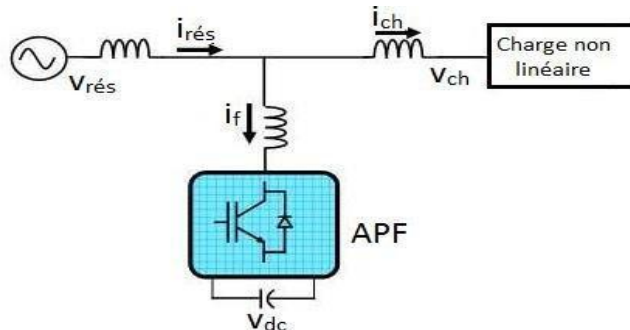


Figure (I.10) : Filtre actif parallèle.

b) Le filtre actif série (FAS) :

Le rôle d'un FAS est de modifier localement l'impédance du réseau. Il se comporte comme une source de tension harmonique qui annule les tensions perturbatrices (creux, déséquilibre, harmonique) venant de la source et celles générées par la circulation de courants perturbateurs à travers l'impédance du réseau. Ainsi, la tension aux bornes de la charge peut être rendue sinusoïdale. Cependant, le FAS ne permet pas de compenser les courants harmoniques consommés par la charge.

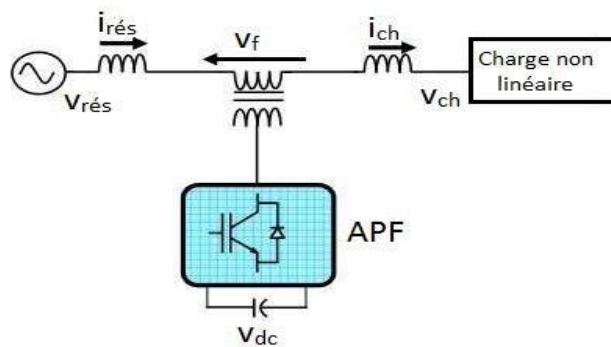


Figure (I.11) : Filtre actif série.

Il est conçu pour compenser les perturbations de tension comme les harmoniques, les déséquilibres et les creux de tension.

c) La combinaison parallèle-série actifs (UPQC) :

La figure I.12 illustre l'association de deux filtres actifs parallèle et en série, appelée également « Unified Power Quality Conditioner » (UPQC). Cette structure bénéficie des avantages des deux types de filtres actifs série et parallèle. Ainsi, elle permet d'assurer simultanément un courant sinusoïdal et une tension du réseau électrique également Sinusoïdale.

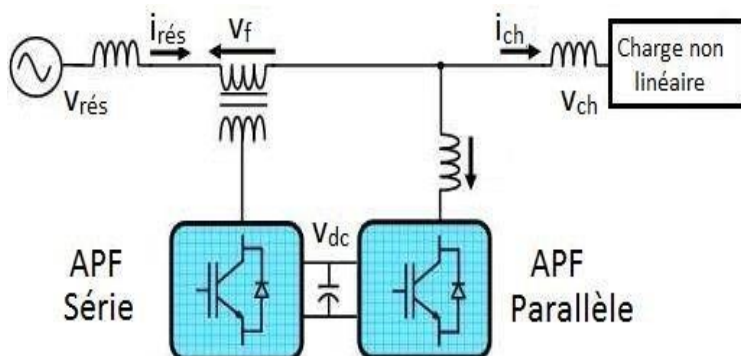


Figure (I.12) : Combinaison parallèle-série de filtres actifs.

d) Combinaison hybride active et passive : [5]

Le filtre hybride est une topologie de filtre qui combine les avantages des filtres passifs et des filtres actifs. Pour cette raison, il est considéré comme l'une des meilleures solutions pour filtrer les harmoniques de courant des réseaux de distribution. Une des principales raisons de l'utilisation du filtre actif hybride est liée au développement des semi-conducteurs de puissance tels que les transistors de puissance de types MOSFET ou IGBT.

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

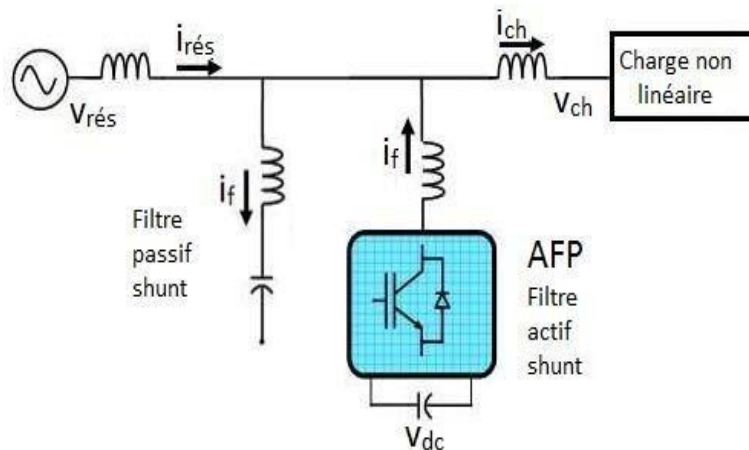
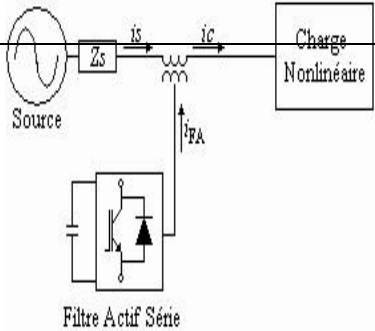
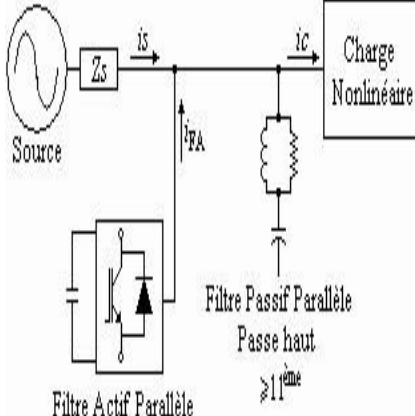


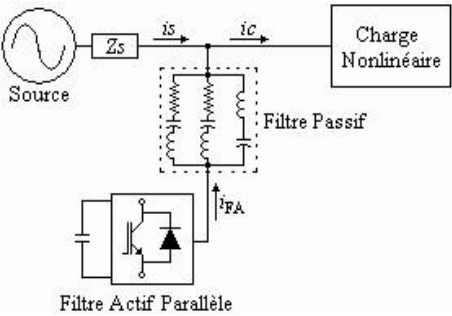
Figure (I.13) : Combinaison hybride active et passive.

Afin de réduire le dimensionnement et par conséquent le prix des filtres actifs, l'association des filtres actifs de faibles puissances à des filtres passifs peut être une solution

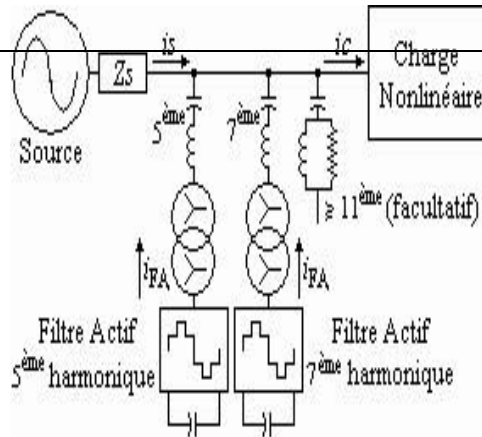
Tableau (I.1) : Récapitulatif des configurations de base des filtres actifs. [6]

Type	Configuration	Avantages / Inconvénients
1. (F.A.P)		<p>Avantages : Elimination des courants harmoniques, compensation de l'énergie réactive, correction de puissance, rééquilibrage des courants de la charge non-linéaire.</p> <p>-Inconvénient : Coût et pertes élevés, Limité aux charges de faible et moyenne puissance, risque d'écoulement des courants de compensation dans les filtres passifs raccordés au même réseau.</p>

<p>2. (F.A.S)</p>	 <p>Source Z_s i_s i_c Charge Nonlinéaire</p> <p>Filtre Actif Série i_{FA}</p>	<p>Avantages :</p> <p>Isolation et absorption des harmoniques, rééquilibrage et régulation des tensions alimentant la charge non-linéaire.</p> <p>-Inconvénients : Coût et pertes élevés, difficulté de protéger le filtre actif contre les surintensités, incapacité à contrôler l'énergie réactive.</p>
<p>3. (F.A.P & F.P.P)</p>	 <p>Source Z_s i_s i_c Charge Nonlinéaire</p> <p>Filtre Actif Parallèle i_{FA}</p> <p>Filtre Passif Parallèle Passe haut $\geq 11^{ème}$</p>	<p>Avantages :</p> <p>Dimensionnement réduit du filtre actif destiné seulement aux basses fréquences harmoniques, applicabilité aux fortes puissances, régulation de l'énergie réactive, suppression des creux de tension des fours à arc et des cyclo convertisseurs.</p> <p>Inconvénients :</p> <p>Les courants de compensation peuvent circuler dans les filtres passifs, les courants harmoniques peuvent transiter dans le filtre actif.</p>

<p>4. (F.A.S & F.P.P)</p>		<p>- Avantages : Taux plus réduit du filtre actif destiné seulement à améliorer les caractéristiques de compensation du filtre passif, aucun risque de circulation dans le filtre actif.</p> <p>-Inconvénients : Difficulté à protéger le filtre actif contre les surintensités, incapacité à contrôler l'énergie réactive.</p>
<p>5. (Mise en série Actif & passif)</p>		<p>Avantages : Taux plus réduit du filtre actif destiné seulement à améliorer les caractéristiques de filtrage du filtre passif, aucun risque de circulation d'harmoniques dans le filtre actif, protection du filtre actif contre les surintensités, pas de grande nécessité aux transformateurs de couplage.</p> <p>-Inconvénients : Incapacité à contrôler l'énergie réactive.</p>

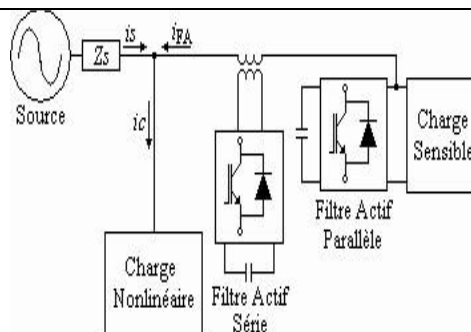
6. Actif parallèle
Dédié aux 5^{ème} et
7^{ème} harmoniques



-Avantages :

Isolation source-charge aux fréquences dominantes (5^{ème} et 7^{ème}) obéissance à la norme standard IEEE 519, applicabilité aux charge de forte puissance, taux très réduits des filtres actifs (1% à 2%), moindre pertes par commutation en comparant avec les onduleurs MLI, et équilibre des puissances des bus continus des deux onduleurs.

7. Combinaison
Actif Parallèle &
Actif Série

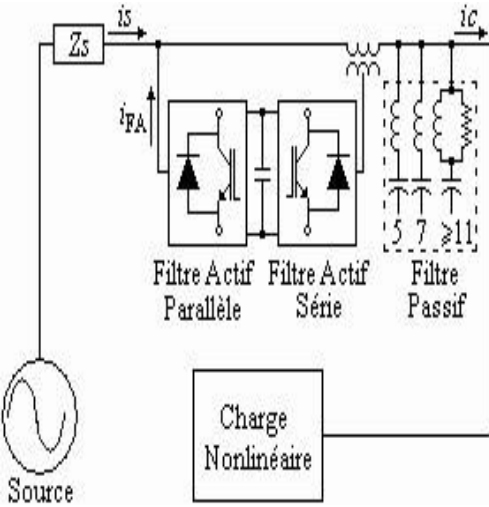


-Avantage :

Isolation d'harmoniques entre la charge sensible placée en aval et la charge non-linéaire placée en amont, régulation de la tension continue commune aux deux filtres actif, des distorsions de la tension d'entrée.

-Inconvénients :

Incapacité de rééquilibrage des courants de charge et de compensation du courant du neutre.

<p>8. Hybride : Actif Parallèle, Actif Série & Passif Parallèle</p>		<p>Avantages :</p> <p>Elimination d'harmoniques et des courants de séquence négative, régulation de la tension continue commune aux deux filtres actifs, correction des distorsions et des déséquilibres de la tension d'entrée, compensation des creux de tension.</p> <p>-Inconvénients :</p> <p>fluctuations à basses fréquences de la puissance active à partir ou vers le filtre série lors de l'absorption des creux de tension.</p>
<p>9. DC Actif Parallèle & DC Actif Série</p>		<p>Avantages :</p> <p>Elimination des courants harmoniques du côté alternatif AC et des ondulations de la tension redressée du côté continu DC.</p>
<p>10. DC Actif Parallèle pour HVDC</p>		<p>-Avantages :</p> <p>Elimination des courants et tensions harmoniques engendrés par les systèmes HDVC (haute tension continue) et de traction.</p>

I.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons illustré, en premier lieu, le phénomène des harmoniques, leurs caractéristiques, leurs sources, leurs conséquences et leurs effets néfastes sur les équipements électriques qui y sont connectés. Ces effets sont à l'origine d'échauffements et de dégradations du fonctionnement de ces équipements. Les normes imposées ont été également présentées. Elles fixent les limites de la génération d'harmoniques.

Plusieurs solutions traditionnelles et modernes de dépollution ont été présentées. Nous avons montré que la solution classique à base de filtres passifs est souvent pénalisante en termes d'encombrements et de résonance. En revanche, la solution des filtres actifs parallèles et en séries avec leurs combinaisons se présente comme la meilleure jusqu'à ce jour pour tous types de perturbations susceptibles d'apparaître dans le réseau électrique. Par conséquent, un domaine de recherche a émergé pour les scientifiques afin d'élaborer des solutions de compensation pour cette pollution harmonique.

Ainsi, le choix de la topologie du filtre actif parallèle se présente comme la solution la plus standard pour le filtrage des courants harmoniques.

Dans ce contexte, nous avons pu mettre en évidence la contribution de l'électronique de puissance dans la lutte contre les harmoniques et l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique. Et par conséquent nous avons retenu l'application au filtrage actif parallèle pour la suite de ce mémoire.

Chapitre 2

*Etude, modélisation et régulation d'un
filtre actif parallèle*

II.1 Introduction

Les inconvénients que présentent les méthodes de dépollution discutées dans le chapitre précédent tel que l'apparition des résonances dans le filtre passif et les progrès réalisés durant ces dernières années dans le domaine des composants semi-conducteurs commandables ont rendu l'utilisation des filtres actifs intéressante.

Dans ce chapitre, nous procéderons à une étude détaillée du filtre actif parallèle et son système de régulation. Le principe du filtre actif est d'injecter un courant harmonique en opposition de phase, de même forme et même amplitude que celui généré par la charge polluante. Un dispositif d'identification du contenu harmonique de la charge polluante est indispensable. L'onduleur est chargé de reproduire fidèlement ce contenu harmonique. Les performances de cet onduleur dépendent de la constance de sa tension d'entrée. Un régulateur de cette tension est également indispensable. En plus du filtrage des harmoniques, le filtre actif peut également jouer le rôle de correction du facteur de puissance.

II.2 Structure générale d'un filtre actif shunt

La Figure (II-1) donne la structure générale du filtre actif parallèle, se présentant la forme de deux blocs : la partie puissance et la partie commande.

La partie puissance est constituée :

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

La partie commande quant à elle est constituée :

- D'un bloc d'identification des courants perturbés, muni d'un système à base de PLL.
- D'un régulateur de la tension continue appliquée aux éléments de stockage d'énergie.
- D'un régulateur du courant injecté sur le réseau à partir de l'onduleur de tension.
- D'un circuit de commande de l'onduleur de tension.

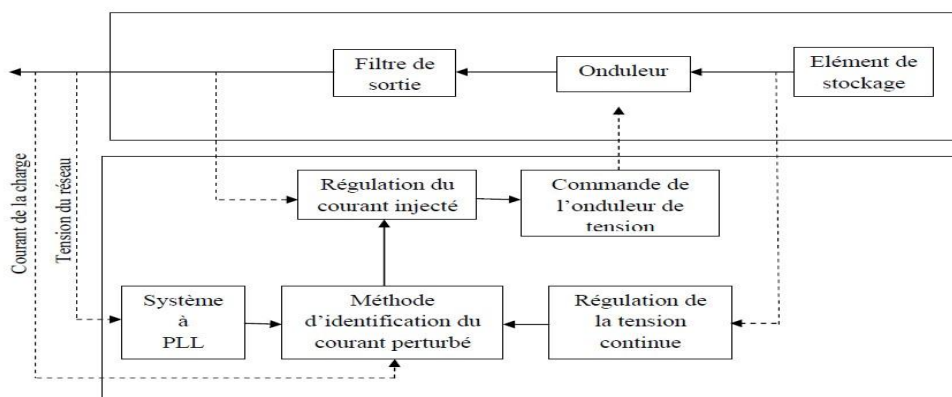


Figure II-1 : Structure générale du filtre actif shunt

II.2.1 Etude de la partie puissance

II.2.1.1 Onduleur de tension

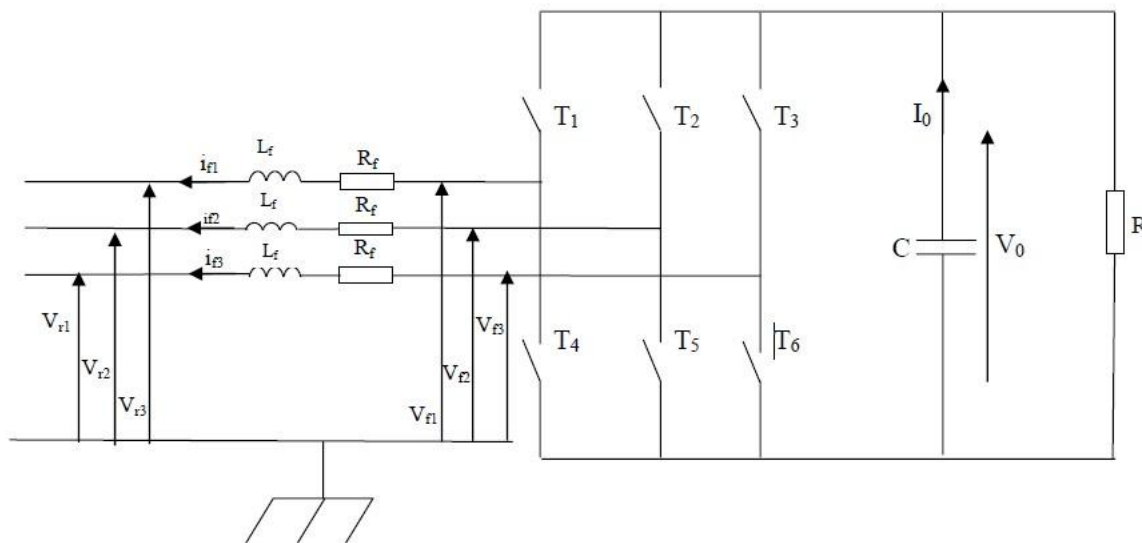
a- Structure générale [7]

L'onduleur de tension, de par sa capacité à réaliser un grand nombre de fonctionnalités, a été naturellement mis à contribution pour réaliser des objectifs de compensation.

L'onduleur de tension est composé de trois bras, chacun à deux interrupteurs bidirectionnels en courant commandés à l'amorçage et au blocage, ils sont réalisés avec un transistor (MOSFET, IGBT, GTO) associé à une diode en antiparallèle pour obtenir la réversibilité en courant.

Le stockage de l'énergie se fait dans un condensateur C qui joue le rôle d'une source de tension continue V_0

L'onduleur de tension est connecté au réseau électrique via un filtre passif appelé aussi filtre de sortie.



Figure(II.2) : Filtre actif à structure tension

Au cours de son fonctionnement, le convertisseur statique relie par l'intermédiaire de ses interrupteurs une source de tension avec une source de courant entre lesquelles il assure le contrôle et l'échange d'énergie.

Pour que cette liaison puisse se faire, il faut respecter deux règles essentielles :

- Deux interrupteurs d'un même bras ne peuvent être fermés simultanément sous peine de court-circuiter le condensateur de stockage, mais ils peuvent être tous les deux ouverts pendant un temps d'attente appelé temps mort inséré entre la commande de blocage d'un interrupteur et la commande d'amorçage de l'autre. Toutefois, avec l'hypothèse des commutations instantanées, ce mode de fonctionnement ne sera pas pris en compte.

Chapitre 2 : Etude, modélisation et régulation d'un filtre actif parallèle

- Une source de courant ne doit jamais être ouverte ce qui impose la présence de la diode antiparallèle.

b- Tension fournie par l'onduleur

L'ouverture et la fermeture des interrupteurs de l'onduleur sont désignées par les fonctions de connexion (u_1, u_2, u_3) définies ci-dessous : [7]

$$\begin{aligned} u_1 &= \begin{cases} 1 & T_1 \text{ fermé et } T_4 \text{ ouvert} \\ 0 & T_1 \text{ ouvert et } T_4 \text{ fermé} \end{cases} \\ u_2 &= \begin{cases} 1 & T_2 \text{ fermé et } T_5 \text{ ouvert} \\ 0 & T_2 \text{ ouvert et } T_5 \text{ fermé} \end{cases} \\ u_3 &= \begin{cases} 1 & T_3 \text{ fermé et } T_6 \text{ ouvert} \\ 0 & T_3 \text{ ouvert et } T_6 \text{ fermé} \end{cases} \end{aligned} \quad (\text{II-1})$$

Dans l'hypothèse d'un système équilibré, les tensions du réseau sont supposées triphasées et sinusoïdales de fréquence (50 Hz), elles sont définies par :

$$v_{ri} = V_m \sin \left[\omega t - (i-1) \frac{2\pi}{3} \right] \quad (i = 1, 2, 3) \quad (\text{II-2})$$

$$\text{Avec : } v_{r1} + v_{r2} + v_{r3} = 0 \quad (\text{II-3})$$

V_m et ω sont respectivement, l'amplitude de la tension et la pulsation du réseau.

Les tensions entre phase imposées par l'onduleur sont alors :

$$\begin{bmatrix} V_{f1} - V_{f2} \\ V_{f2} - V_{f3} \\ V_{f3} - V_{f1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 - u_2 \\ u_2 - u_3 \\ u_3 - u_1 \end{bmatrix} V_0 \quad (\text{II-4})$$

Le courant délivré par la capacité est :

$$i_0 = -C \frac{dV_0}{dt} = \sum_{i=1}^3 (u_i i_{fi}) - \frac{V_0}{R} \quad (\text{II-5})$$

V_{f1}, V_{f2}, V_{f3} sont les tensions par rapport au point neutre, elles vérifient l'équation :

$$\begin{bmatrix} V_{f1} \\ V_{f2} \\ V_{f3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{r1} \\ V_{r2} \\ V_{r3} \end{bmatrix} + L_f \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{f1} \\ i_{f2} \\ i_{f3} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_f & 0 & 0 \\ 0 & R_f & 0 \\ 0 & 0 & R_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{f1} \\ i_{f2} \\ i_{f3} \end{bmatrix} \quad (\text{II-6})$$

Sachant que la somme des courants du filtre actif est nulle :

$$i_{f1} + i_{f2} + i_{f3} = 0 \quad (\text{II-7})$$

On déduit des équations (II-3), (II-6) et (II-7)

$$V_{f1} + V_{f2} + V_{f3} = 0 \quad (\text{II-8})$$

Les équations (II-4) et (II-8) donnent :

$$\begin{bmatrix} V_{f1} \\ V_{f2} \\ V_{f3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} \frac{V_0}{3} \quad (\text{II-9})$$

Les variables u_1, u_2, u_3 prennent chacune deux valeurs possibles, il en résulte huit états possibles pour les tensions V_{f1}, V_{f2}, V_{f3} résumés dans le tableau (II-1)

Tableau (II.1) : Tensions délivrées par l'onduleur

Etat	u_1	u_2	u_3	v_{f1}	v_{f2}	v_{f3}
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	1	$-\frac{1}{3}V_0$	$-\frac{1}{3}V_0$	$\frac{2}{3}V_0$
3	0	1	0	$-\frac{1}{3}V_0$	$\frac{2}{3}V_0$	$-\frac{1}{3}V_0$
4	0	1	1	$-\frac{2}{3}V_0$	$\frac{1}{3}V_0$	$\frac{1}{3}V_0$
5	1	0	0	$\frac{2}{3}V_0$	$-\frac{1}{3}V_0$	$-\frac{1}{3}V_0$
6	1	0	1	$\frac{1}{3}V_0$	$-\frac{2}{3}V_0$	$\frac{1}{3}V_0$
7	1	1	0	$\frac{1}{3}V_0$	$\frac{1}{3}V_0$	$-\frac{2}{3}V_0$
8	1	1	1	0	0	0

II.2.1.2 Le filtre de sortie [7]

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 :

$$\frac{d}{dt} \vec{i}_{h-ch} = \frac{d}{dt} \vec{i}_{inj} \quad (\text{II-10})$$

Avec : i_{h-ch} le courant harmonique de la charge et i_{inj} le courant du filtre actif,

- Empêcher les composantes dues aux commutations de se propager sur le réseau électrique.
- L'inconvénient du filtre de sortie utilisé, filtre de premier ordre, c'est qu'il ne peut pas vérifier les deux critères au même temps, car pour satisfaire l'égalité (II-10) et donc améliorer les performances de compensation, l'inductance L_f doit être relativement faible. Néanmoins, cela entraîne la propagation de ses composantes sur le réseau ce qui affecte les installations et équipements électriques voisins.

Ainsi le bon dimensionnement du filtre de sortie utilisé dépend du compromis à trouver entre la dynamique et l'efficacité du filtre actif parallèle. La solution qui permet d'arriver à un bon compromis est celle qui consiste en l'installation d'un filtre passif auxiliaire :

- ✚ Soit en amont du côté réseau, dans ce cas les harmoniques à filtrer sont ceux du courant après compensation et le signal utile se limite au fondamental.
- ✚ Soit à la sortie de l'onduleur, dans ce cas les harmoniques à filtrer sont ceux du courant de l'onduleur et le signal utile est constitué de l'ensemble des contre harmoniques. Cette configuration permet d'inclure le filtre auxiliaire au filtre actif sans modifier la structure déjà existante.

Néanmoins, le filtre auxiliaire engendre des effets indésirables sur le réseau tel que la résonance avec d'autres éléments passifs voisins, une consommation de puissance active à travers sa résistance d'amortissement et une dégradation de performances à cause du vieillissement de leurs composants.

Dans la suite de ce travail, l'onduleur étant muni d'un filtre de sortie, le filtre auxiliaire est un filtre de deuxième ordre inséré au niveau de la ligne.

Ce filtre est formé d'une inductance L_1 et d'une capacité C_1 en série avec une résistance r_1 qui permet d'introduire un amortissement, comme le montre la figure (II-3)

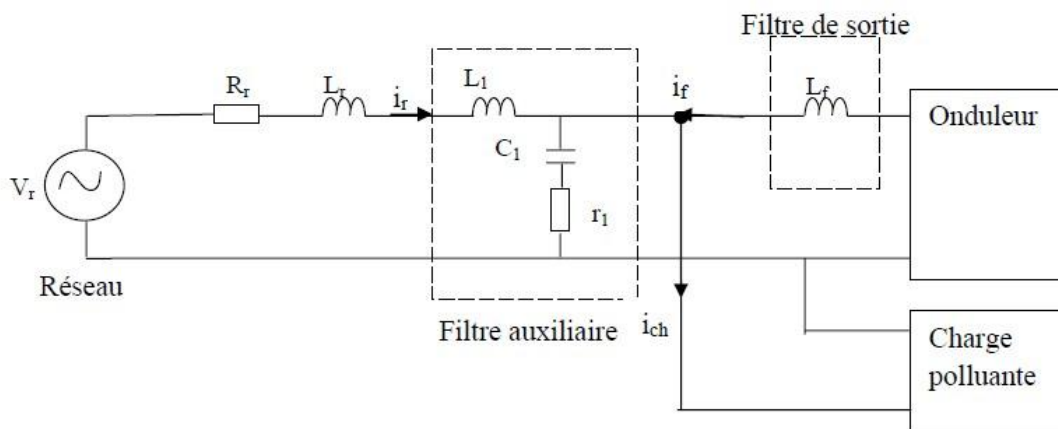


Figure (II-3) : Insertion des filtres de sortie et auxiliaire

II.2.1.3 Elément de stockage d'énergie. [7]

Le stockage d'énergie du côté continu se fait souvent par un système capacitif représenté par un condensateur C qui joue le rôle d'une source de tension continue flottante V_0 comme le montre la figure (II-2).

Le choix des paramètres du système de stockage (V_0 et C) se répercute sur la dynamique et sur la qualité de compensation du filtre actif parallèle. En effet une tension V_0 élevée améliore la dynamique du filtre actif. D'un autre côté les ondulations de la tension continue V_0 , causées par les courants engendrés par le filtre actif et limitées par le choix de C , 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 grand et que sa fréquence est faible. Pour cette raison, nous pouvons estimer que seuls les quarante premiers harmoniques sont pris en compte dans le choix des paramètres du système de stockage.

II.2.2 Etude de la partie commande

II.2.2.1 Méthodes d'identification des courants perturbés [8]

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

La première utilise la transformée de Fourier rapide dans le domaine fréquentiel, pour extraire les harmoniques du courant.

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.

Une autre méthode, appelée la méthode de détection synchrone et repose sur la transformée de Park.

L'étude détaillée de ces méthodes d'identification feront l'objet d'un chapitre à part.

II.2.2.2 Système à base de PLL

Comme la tension du réseau est souvent perturbée et distordue, et afin de généraliser l'application des méthodes d'identification des grandeurs harmoniques à tout type de tension, un système à base de *PLL* (Phase Locked Loop ou Boucle à Verrouillage de Phase) peut être utilisé.

Le principe de la PLL utilise une propriété fondamentale de la transformation de Park, à savoir que si la dérivée de l'angle instantané intervenant dans la transformation est égale à la pulsation du système triphasé et équilibré de tension, alors les composantes selon les axes d et q seront constantes.

Les tensions simples $V_{r123}(\theta)$, mesurées au point de raccordement, passent d'abord par la transformation de Concordia. Les tensions obtenues $V_{\alpha, \beta}$ seront par la suite transformées en composantes de Park à travers une rotation d'un angle estimé θ_e du plan α - β vers le plan d - q . L'angle θ_e est issu de l'intégration de l'estimation de la pulsation ω_e déterminée par un régulateur de type PI.

On souhaite que la pulsation ω_e du repère tournant soit identique à la pulsation ω des tensions $V_{r123}(\theta)$, cela revient à fixer la tension de référence en jouant sur V_d .

Ainsi la PLL ne sera verrouillée que lorsque l'angle estimé est égal à l'angle de la tension directe.

II.2.2.3 Commande de l'onduleur

Le but de la commande de l'onduleur est de permettre la meilleure reproduction des courants perturbés 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'impulsion (MLI).

II.2.2.4 Régulation de tension continue

La source d'alimentation du filtre n'est pas une source de tension autonome mais c'est une source flottante.

La tension aux bornes de la source flottante n'est pas constante à cause de sa sensibilité aux échanges de puissance entre la charge polluante et le réseau, c'est le filtre actif qui fournira la puissance nécessaire pour rétablir l'équilibre. Le régime transitoire de la charge non linéaire et les pertes dans les composants de puissance font aussi varier la tension aux bornes du condensateur.

Une boucle externe de tension s'avère alors nécessaire, car elle permet de :

- 1) Maintenir la tension, côté continu, de l'onduleur constante tout en assurant une compensation des pertes dans le filtre actif.
- 2) Limiter ses variations en régime dynamique afin préserver les performances de la commande.

Pour maintenir la tension aux bornes de la source flottante constante, il suffit alors de déterminer l'amplitude du courant actif I_0 qui est nécessaire pour produire la puissance active absorbée par le filtre, et on l'ajoute aux références de courants.

Dans le repère de Park dq, la dynamique du convertisseur est donnée sous la forme suivante : [7], [9]

$$\begin{aligned}\frac{di_{fd}}{dt} &= -\frac{R_f}{L_f} i_{fd} + \omega i_{fq} - \frac{V_0}{L_f} u_d + \frac{v_{rd}}{L_f} \\ \frac{di_{fq}}{dt} &= -\frac{R_f}{L_f} i_{fq} - \omega i_{fd} - \frac{V_0}{L_f} u_q + \frac{v_{rq}}{L_f} \\ \frac{dV_0}{dt} &= -\frac{V_0}{RC} + \frac{3}{2C} (i_{fd} u_d + i_{fq} u_q)\end{aligned}\tag{II-11}$$

On suppose que la dynamique de la boucle interne des courants est suffisamment rapide de telle sorte que l'on puisse admettre que les variables internes ont déjà atteint leurs valeurs de référence et quelles se trouvent dans leurs état stationnaire (commande en cascade).

D'où :

$$\begin{aligned}
 i_{fd} &= i_{fdref} \\
 i_{fq} &= i_{fqref} \\
 \frac{di_{fd}}{dt} &= 0 \\
 \frac{di_{fq}}{dt} &= 0
 \end{aligned}
 \tag{II-12}$$

La commande en état stationnaire est donnée par l'expression suivante :

$$\begin{cases}
 u_d = \frac{L_f}{V_0} \left(-\frac{R_f}{L_f} i_{fdref} + \omega i_{fqref} + \frac{V_{rd}}{L_f} \right) \\
 u_q = \frac{L_f}{V_0} \left(-\frac{R_f}{L_f} i_{fqref} - \omega i_{fdref} + \frac{V_{rq}}{L_f} \right)
 \end{cases}
 \tag{II-13}$$

Les tensions de la source étant parfaites :

$$\begin{bmatrix} V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix} = V_m \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}
 \tag{II-14}$$

En remplaçant (II.13) dans la troisième expression de (II-11) on aura :

$$\frac{dV_0}{dt} = -\frac{V_0}{RC} + \frac{3L_f}{2C} \left[-\frac{R_f}{L_f} (i_{fdref}^2 + i_{fqref}^2) + \frac{V_{rd}}{L_f} i_{fdref} \right]
 \tag{II-15}$$

En considérant que :

$$\left[\frac{R_f}{L_f} (i_{fdref}^2 + i_{fqref}^2) \right] \ll V_m i_{fdref}
 \tag{II-16}$$

Pour des raisons de linéarité on néglige la chute de tension aux bornes de la résistance R devant la tension V_m et on choisit d'asservir non pas directement la tension continue mais son carré V_0^2

La relation (II.15) se simplifie et devient :

$$\frac{dV_0}{dt} = \frac{3L_f}{2C} \frac{1}{V_0} \left[\frac{V_m}{L_f} i_{fdref} \right] - \frac{V_0}{RC} \quad (\text{II-17})$$

En multipliant par V_0 on aura :

$$V_0 \frac{dV_0}{dt} = \left[\frac{3L_f}{2C} \frac{1}{V_0} \left[\frac{V_m}{L_f} i_{fdref} \right] - \frac{V_0}{RC} \right] V_0 \quad (\text{II-18})$$

Ensuite en faisant un changement de variable $Z = V_0^2$ on obtient :

$$\frac{1}{2} \frac{dZ}{dt} = \frac{3}{2C} V_m i_{fdref} - \frac{Z}{RC} \quad (\text{II-19})$$

D'où :

$$\frac{dZ}{dt} = \frac{3}{C} V_m i_{fdref} - \frac{2Z}{RC} \quad (\text{II-20})$$

Le point d'équilibre est obtenu pour $\frac{dZ}{dt} = 0$, l'expression (II.20) s'écrit alors sous la forme suivante :

$$Z_{oeq} = \frac{3RV_m}{2} i_{fdeq} = V_{oeq}^2 \quad (\text{II-21})$$

Le modèle (II.20) est linéaire, il est directement utilisé pour la mise en œuvre d'une boucle linéaire de régulation.

Dans le domaine de Laplace, la relation (II.20) est exprimée par :

$$F(s) = \frac{Z}{i_{fdeq}} = \frac{3V_m}{2} \frac{1}{1 + \frac{RC}{2}s} \quad (\text{II-22})$$

La régulation de la tension représentée ci-dessous est réalisée grâce à un régulateur du type PI dont le réglage est basé sur la fonction de transfert $F(s)$. L'action intégrale est fréquemment combinée à l'action proportionnelle, dans le but d'améliorer le régime permanent sans avoir à dégrader le régime transitoire. La raison de cette combinaison est que l'action intégrale seule améliore le régime permanent tout en détériorant le régime transitoire. Quand à l'action proportionnelle, elle offre la possibilité de modifier en même temps le régime transitoire et le régime permanent.

La fonction de transfert du régulateur PI s'écrit :

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (\text{II-23})$$

Avec :

K_p : Gain proportionnel

K_i : Gain intégral

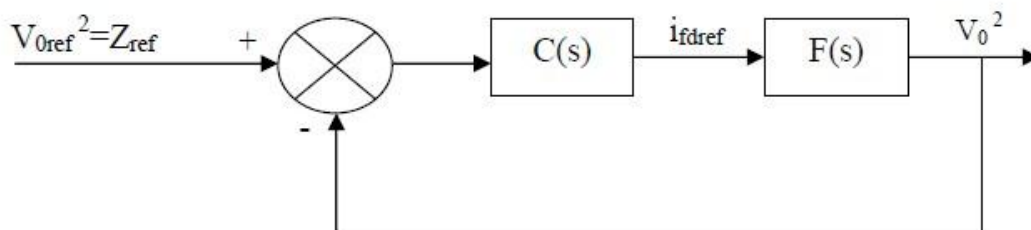


Figure (II-4) : Boucle de régulation de la tension continue

$$F(s) = \frac{3RV_m}{2} \frac{1}{1 + \frac{RC}{2}s} = \frac{K}{1 + \tau s} \quad (\text{II-24})$$

Avec : K est le gain statique tel que :

$$K = \frac{3R}{2} V_m \quad (\text{II-25})$$

τ Constante de temps, telle que :

$$\tau = \frac{RC}{2} \quad (\text{II-26})$$

Un filtre passe bas est ajouté à la sortie du régulateur afin d'éviter que les oscillations de basse fréquence « 30 Hz » des grandeurs du côté continu de l'onduleur ne se répercutent sur la commande. Les constantes K_p et K_i du régulateur PI sont données par les équations suivantes :

$$K_p = \frac{\tau}{K\tau_d}, \quad K_i = \frac{1}{K\tau_d} \quad (\text{II-27})$$

La constante est choisie en fonction de la période de la grandeur à réguler ($\tau_d = T, 2T..$)

• Calcul de la tension de référence V_{0ref}

La tension nécessaire pour que l'onduleur puisse poursuivre un harmonique précis, sachant que le système est équilibré, c'est-à-dire que la composante homopolaire est nulle, est donnée par la relation suivante

$$V_{0ref} > 2(V_m + L_r \omega i I_{ondi}) \quad (\text{II-28})$$

Tel que :

i compris entre 1 et k (étant le rang maximal des harmoniques)

Et $I_{ondi} = \max\{I_{0n} I_{chn}, (2 < n < k)\}$

II.2.2.5 Régulation des courants [10]

Le choix du régulateur du courant du filtre actif se fait en fonction des objectifs de régulation et de l'ordre du filtre de sortie

II.2.2.5.1 Le choix des régulateurs

Un régulateur doit satisfaire les objectifs généraux de la régulation ainsi que les contraintes liées au rejet des perturbations tel que :

1. Minimiser l'écart entre la référence et la grandeur asservie.
2. La rapidité de réponse.
3. Rejet des perturbations sans modifier le fondamental qui véhicule l'essentiel de la puissance consommée.
4. Etre robuste aux incertitudes sur les paramètres ainsi qu'à la variation de charge.

L'utilisation d'un régulateur PI est appropriée en raison de sa simplicité, et son efficacité de minimiser le déphasage entre les courants identifiés et ceux injectés par le filtre actif.

II.2.2.5.2 Régulation par PI

Pour le réglage des courants à la sortie du filtre actif, on utilise un régulateur classique proportionnel intégral PI qu'on dimensionne en utilisant la méthode de compensation de pôles.

Sachant que :

$$\begin{aligned} L_s &= L_f + L_1 \\ R_s &= R_f + r_1 \end{aligned}$$

$\beta_i (i = 1, 2, 3 \text{ avec } -1 < \beta < 1)$ sont les signaux de commande de l'onduleur.

Les équations de courant s'écrivent :

$$\begin{cases} L_s \frac{di_{f1}}{dt} = v_{r1} - R_s i_{f1} - \beta_1 \frac{V_0}{2} \\ L_s \frac{di_{f2}}{dt} = v_{r2} - R_s i_{f2} - \beta_2 \frac{V_0}{2} \\ L_s \frac{di_{f3}}{dt} = v_{r3} - R_s i_{f3} - \beta_3 \frac{V_0}{2} \end{cases} \quad (\text{II-29})$$

D'où :

$$\begin{cases} \frac{di_{f1}}{dt} = \frac{v_{r1}}{L_s} - \frac{R_s}{L_s} i_{f1} - \beta_1 \frac{V_0}{2L_s} \\ \frac{di_{f2}}{dt} = \frac{v_{r2}}{L_s} - \frac{R_s}{L_s} i_{f2} - \beta_2 \frac{V_0}{2L_s} \\ \frac{di_{f3}}{dt} = \frac{v_{r3}}{L_s} - \frac{R_s}{L_s} i_{f3} - \beta_3 \frac{V_0}{2L_s} \end{cases} \quad (\text{II-30})$$

On remarque à partir de l'équation (II-30) que les courants « i_{f1} » sont indépendants. Il suffit de dimensionner un régulateur pour une phase et l'appliquer aux autres phases.

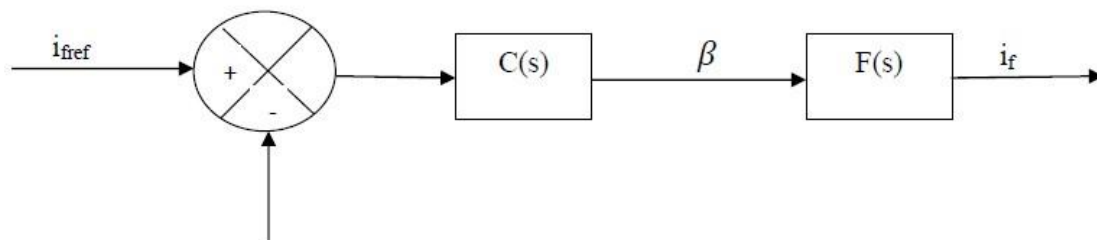


Figure (II.5) : Boucle à régulation du courant du filtre actif [5]

Chapitre 2 : Etude, modélisation et régulation d'un filtre actif parallèle

La fonction de transfert du régulateur PI dans le plan de Laplace étant :

$$C(s) = k_p \frac{s + \frac{k_i}{k_p}}{s} \quad (\text{II-31})$$

D'après (II-30), l'expression du courant est la suivante :

$$\frac{di_{fi}}{dt} = \frac{v_{ri}}{L_s} - \frac{R_s}{L_s} i_{fi} - \beta i \frac{V_0}{2L_s} \quad i = 1, 2, 3 \quad (\text{II-32})$$

Pour simplifier le calcul des paramètres du régulateur PI, on ajoute à l'expression le terme $(-v_r / L_s)$

D'où on écrit dans le plan de Laplace :

$$F(s) = \frac{I_f(s)}{\beta} = \frac{-\frac{V_0}{2L_s}}{s + \frac{R_s}{L_s}} \quad (\text{II-33})$$

Les paramètres du régulateur PI (k_p et k_i) sont donnés par les équations suivantes :

$$k_p = \frac{2L_s}{\tau_s V_0} \quad (\text{II-34})$$
$$k_i = \frac{R_s}{L_s} k_p$$

τ_s doit être inférieure à la plus petite constante de temps.

II.3 Modèle des courants de sortie du filtre actif

Le modèle mathématique des courants de sortie du filtre actif se présente comme suit :

$$L_f \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{f1} \\ i_{f2} \\ i_{f3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} \frac{V_0}{3} - \begin{bmatrix} V_{r1} \\ V_{r2} \\ V_{r3} \end{bmatrix} \quad (\text{II-35})$$

Chapitre 2 : Etude, modélisation et régulation d'un filtre actif parallèle

Avec :

u_1, u_2, u_3 : Les signaux de commande de l'onduleur

La tension du bus continu est donnée par :

$$C \frac{dV_0}{dt} = \sum_{i=1}^3 u_i i_{fi} - \frac{V_0}{R}$$

II.4 Modélisation du réseau

Le réseau est représenté par une source de tension triphasée sinusoïdale et équilibrée $e_i(t)$ en série avec une impédance de court-circuit Z_{cc} comme le montre la figure (II-6).

$$e_i(t) = \sqrt{2} E \sin\left(\omega t - (i-1) \frac{2\pi}{3}\right), \quad i = 1, 2, 3 \quad (\text{II-36})$$

$$Z_{cc} = R_r + jL_r \omega \quad (\text{II-37})$$

Avec :

ω : Pulsation du réseau

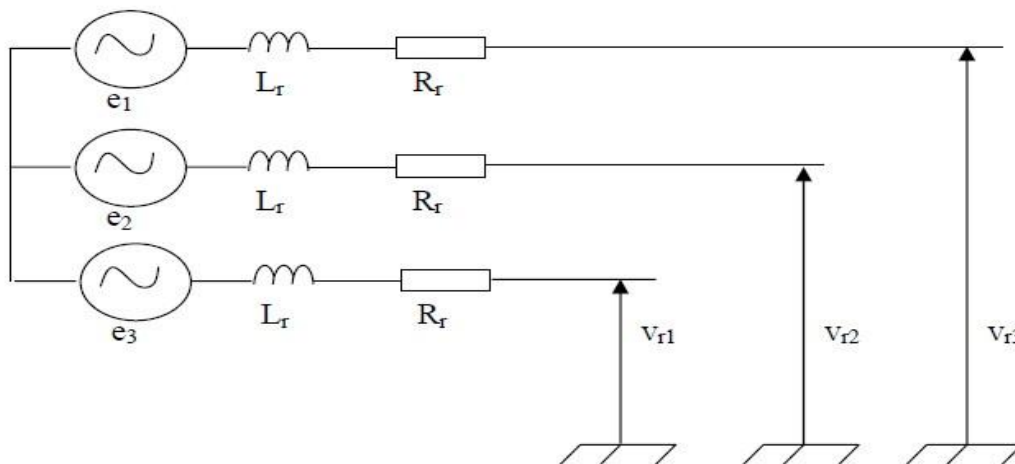


Figure (II-6) : Schéma du réseau

II.5 Modélisation de la charge polluante [10]

La charge polluante utilisée est un redresseur triphasé à diodes débitant sur une charge résistive R_{ch} en série avec une inductance L_{ch} , elle est illustrée par la figure (II-7).

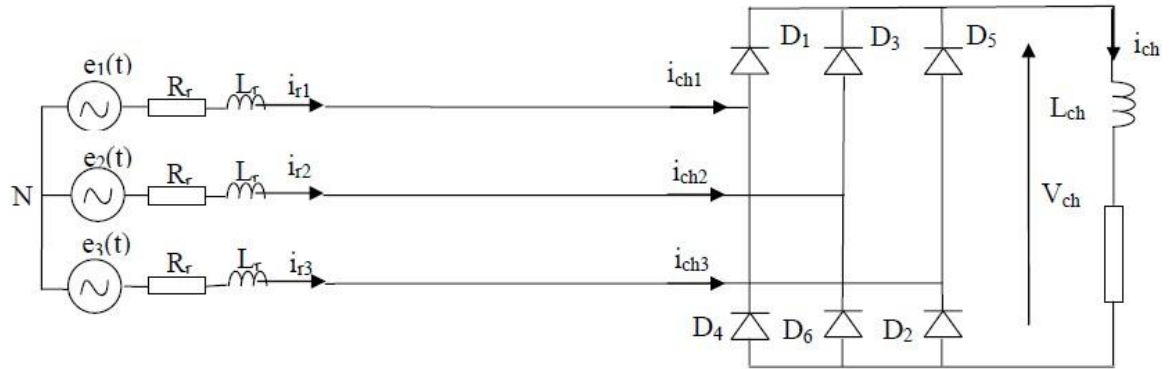


Figure II-7 : Schéma de la charge polluante (redresseur à diodes).

II.6 Conclusion.

Dans ce chapitre nous avons présenté et décrit tous les composants du filtre actif parallèle. Nous avons ensuite modélisé chaque élément du dispositif complet en mettant l'accent sur :

- les méthodes d'identification des courants harmoniques,
- les méthodes de commande de l'onduleur
- la régulation des courants de référence
- la régulation de la tension du bus continu.

Les chapitres suivants traiteront respectivement des méthodes d'identification du contenu harmonique de la charge polluante et des méthodes de commande de l'onduleur.

Chapitre 3

*Commande d'un filtre actif par Les méthodes
d'identification des harmoniques.*

III.1 Introduction

Comme il a été présenté dans le chapitre précédent, un filtre actif est essentiellement constitué d'un onduleur. Le bon choix de la méthode d'identification des grandeurs de référence (courant de référence dans le cas d'un filtre actif parallèle, tension de référence dans le cas d'un filtre actif série), est primordial afin que le filtre actif puisse remplir les tâches pour lesquelles il est destiné.

Dans la littérature, différentes méthodes d'identification des courants perturbés ont été développées. Ces méthodes ont pour rôle d'améliorer les performances des systèmes classiques de dépollution des installations électriques.

L'objectif de la commande appliquée à l'onduleur du filtre actif est de déterminer les instants d'ouvertures et de fermetures des interrupteurs qui permettent d'obtenir une tension de sortie, côté alternatif, qui suit le plus fidèlement possible la consigne.

Différents types de méthodes de commande de l'onduleur sont recensés dans la littérature, on peut citer la commande par hystérésis et la commande à Modulation de Largeurs d'Impulsions (MLI).

III.2 Méthodes d'identification des grandeurs harmoniques [11]

Selon leur champ de calcul, les méthodes d'identification des grandeurs harmoniques sont classées dans deux domaines, *fréquentiel* et *temporel*.

III.2.1 Domaine fréquentiel

Les méthodes appartenant à ce domaine sont basées sur l'analyse de Fourier appliquée aux grandeurs distordues (courants ou tensions) afin d'en extraire les signaux de compensation. En utilisant la transformée de Fourier, les composantes harmoniques de compensation sont d'abord séparées des signaux harmoniques polluants et sont ensuite combinées pour générer les consignes.

La fréquence de commutation des semi-conducteurs du filtre actif est généralement maintenue deux fois plus grande que les fréquences harmoniques dans l'objectif d'avoir une compensation effective.

L'application de la transformée de Fourier (système d'équations non linéaires) est un calcul encombrant ; il en résulte un temps de réponse relativement lent.

Parmi les méthodes appartenant à cette classe, on peut citer :

III.2.1.1 Méthodes de Fourier & de la FFT

En utilisant la transformée rapide de Fourier (*Fast Fourier Transform FFT*), la composante harmonique du signal peut être reconstituée en éliminant la composante fondamentale du signal transformé. Après, la FFT inverse est appliquée pour l'obtention du signal final dans le domaine temporel.

L'inconvénient majeur de cette technique est le retard de réponse engendré. En effet, le système a besoin de prendre des échantillons d'une période complète afin de générer les coefficients de Fourier. Par conséquent, cette méthode ne convient qu'aux systèmes à variation lente dans le temps.

III.2.1.2 Technique de la multiplication sinusoïdale [1]

Cette méthode consiste à multiplier le signal par une onde sinusoïdale d'une fréquence fondamentale puis on passe à l'intégration du résultat de la multiplication. Par conséquent, tous les harmoniques de rangs élevés peuvent être éliminés par l'utilisation d'un simple filtre passe-bas.

Cependant, là aussi, la performance est encore lente (plus d'un cycle complet).

III.2.2 Domaine temporel

Les méthodes de compensation dans le domaine temporel sont basées sur la détermination instantanée des grandeurs de compensation des courants/tensions harmoniques.

Généralement, les courants de référence sont requis non seulement pour la compensation des courants harmoniques mais également pour remplacer les déficits de la puissance réactive et les fluctuations du bus continu du filtre actif. Fondamentalement, les différents schémas proposés essayent d'inclure la composante réactive afin d'éliminer les courants harmoniques et de corriger le facteur de puissance. Beaucoup de méthodes entrent dans cette catégorie, notamment :

III.2.2.1 Méthode des puissances instantanées : [7]

Cette méthode exploite la transformation α - β pour obtenir les puissances réelles et imaginaires.

Notons par (v_α, v_β) et (i_α, i_β) les composantes orthogonales du repère α - β associées respectivement aux tensions de raccordement du filtre actif parallèle (v_r) et aux courants absorbés par les charges polluantes (i_r). La transformation α - β -0 triphasée permet d'écrire, la relation des tensions suivante :

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{r1} \\ v_{r2} \\ v_{r3} \end{bmatrix} \quad (\text{III-1})$$

Et la relation des courants ci-dessous :

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{r1} \\ i_{r2} \\ i_{r3} \end{bmatrix} \quad (\text{III-2})$$

Les composantes avec l'indice (0) représentent les séquences homopolaires du système triphasé de courant et de tension.

On considère que le réseau étudié est à neutre isolé et composé de trois fils ce qui empêche la circulation des composantes homopolaires.

La puissance active p et la puissance réactive q sont exprimées par la matrice suivante :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{III-3})$$

Dans le cas général, chacune des puissances p et q comporte une partie continue et une partie alternative, ce qui nous permet d'écrire l'expression ci-dessous :

$$p = \bar{p} + \tilde{p} \quad (\text{III-4})$$

$$q = \bar{q} + \tilde{q}$$

Avec :

- \bar{p} Une puissance continue liée à la composante fondamentale active du courant et de la tension,
- \bar{q} Une puissance continue liée à la composante fondamentale réactive du courant et de la tension,
- \tilde{P} et \tilde{q} des puissances alternatives liées à la somme des composantes harmoniques du courant et de la tension.

Afin d'isoler les puissances actives et réactives conventionnelles, il faut connaître avec précision les fréquences des pulsations des puissances instantanées formées à partir de la relation (III.3).

Après avoir identifié les pulsations des puissances instantanées, le filtre de puissance chargé d'isoler les puissances active et réactive conventionnelles peut être dimensionné. Un circuit constitué d'un filtre passe bas avec un soustracteur peut être employé, comme la présente la figure (III-1).

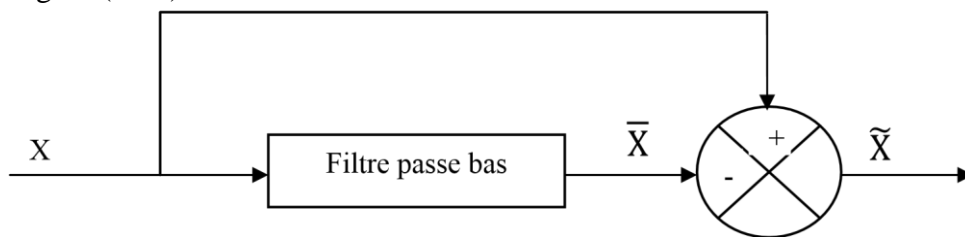


Figure (III-1) : Schéma représentant le principe de séparation des puissances

La fréquence de coupure, $f_0 = \omega_0 / 2\pi$, est choisie pour que le filtre de puissance puisse bloquer toute composante perturbatrice des puissances instantanées \tilde{X} . Elle doit aussi permettre le passage des composantes continues représentant les puissances active et réactive à la fréquence fondamentale \bar{X} . Cette fréquence est donc choisie selon le type de la charge, soit :

- 60 Hz pour un courant de charge équilibré avec un temps de réponse du filtre de 20 ms,
- 20 Hz pour un courant de charge déséquilibré avec un temps de réponse du filtre de 60ms.

En inversant la relation (III.3), nous pouvons recalculer les courants dans le repère α - β comme le montre l'équation (III.5)

$$\begin{bmatrix} i_{ref\alpha 1} \\ i_{ref\beta 1} \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_0 - \tilde{p} \\ -\tilde{q} \end{bmatrix} \quad (III-5)$$

Avec : $\Delta = v_\alpha^2 + v_\beta^2$ supposé constant dans l'hypothèse d'une tension sinusoïdale équilibrée du réseau électrique.

Cette expression montre donc que l'identification des différentes composantes du courant dans le repère (α - β) revient à séparer des termes continus des puissances réelle et imaginaire instantanées.

$$\begin{bmatrix} i_{ref\alpha 2} \\ i_{ref\beta 2} \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ -\bar{q} \end{bmatrix} \quad (III-6)$$

$$\begin{bmatrix} i_{ref\alpha} \\ i_{ref\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_0 - \tilde{p} \\ -\bar{q} - \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (III-7)$$

Les courants perturbateurs triphasés qui représentent les courants identifiés, dits courants de référence (i_{ref}), sont calculés à partir de la transformation α - β (Concordia) inverse.

$$\begin{bmatrix} i_{ref1} \\ i_{ref2} \\ i_{ref3} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ref\alpha} \\ i_{ref\beta} \end{bmatrix} \quad (III-8)$$

La méthode des puissances instantanées est illustrée par la figure (III-2) :

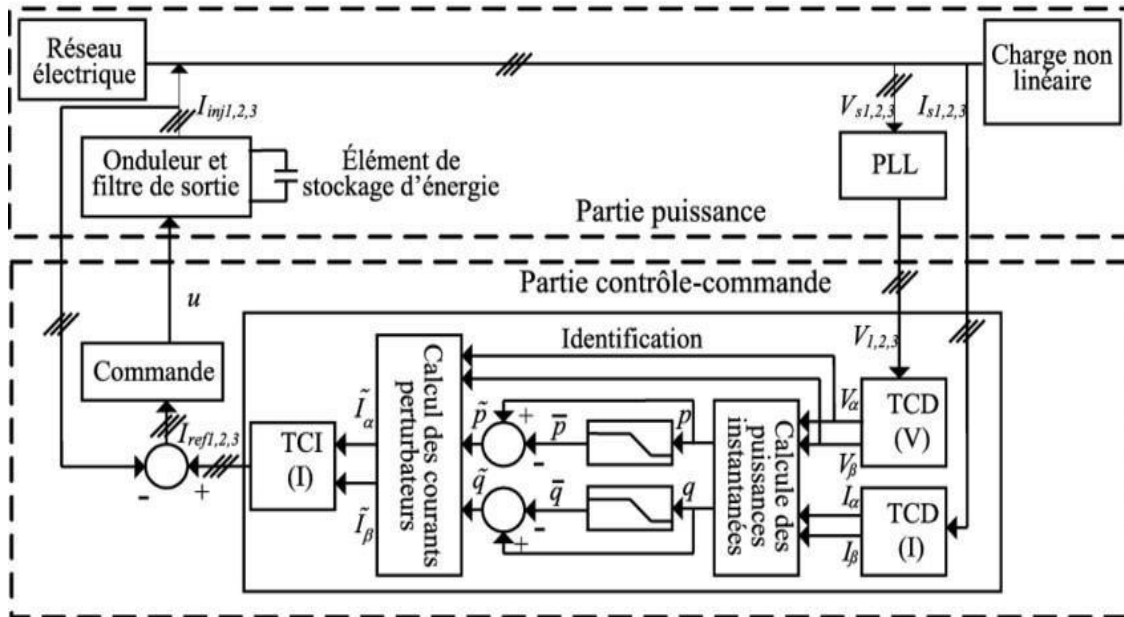


Figure (III-2): Structure d'un filtre actif shunt basé sur la méthode des puissances instantanées

III.2.2.2 Méthode de détection synchrone [12]

La méthode de détection synchrone appelée aussi méthode des courants instantanés, travaille dans l'espace de Park dq, elle requiert de ce fait moins de calcul tout en étant plus précise et plus robuste.

Tout comme la méthode des puissances instantanées, la méthode de détection synchrone n'est applicable que si la tension du réseau est parfaitement sinusoïdale et équilibrée.

D'abord on ramène les courants triphasés de la charge polluante dans le domaine de Park comme suit :

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \sin\theta & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} \quad (III-9)$$

Comme pour la méthode des puissances instantanées, on considère que le réseau étudié est composé de trois fils.

θ : est l'angle de la transformation de Park.

Dans le domaine de la dépollution des réseaux électriques, la pulsation de référence est fixée : c'est la pulsation du réseau notée ω . L'angle de la transformation de Park est défini par :

$$\theta = \omega t \quad (III-10)$$

Les courants harmoniques sont composés d'une composante continue liée au fondamental, et d'une composante alternative liée aux harmoniques.

$$\begin{aligned} i_d &= \overline{i_d} + \tilde{i}_d \\ i_q &= \overline{i_q} + \tilde{i}_q \end{aligned} \quad (\text{III-11})$$

Pour séparer ces deux composantes du courant et extraire la composante continue, on utilise un filtre passe bas et un soustracteur comme dans la figure (III.1).

Finalement, pour calculer les courants perturbateurs triphasés qui représentent les courants identifiés, dits courants de référence i_{ref} , on utilise la transformé inverse de Park. Ces courants sont donnés par :

$$\begin{bmatrix} i_{refd} \\ i_{refq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_0 - \tilde{i}_d \\ -\tilde{i}_q \end{bmatrix} \quad (\text{III-12})$$

Avec :

I_0 : L'amplitude du courant actif fondamental nécessaire à la régulation de la tension continue. Les références des phases étant prises selon la tension de la phase (1) et le courant I_0 étant un courant actif, donc en phase avec cette tension, sa composante de Park selon l'axe q est nulle.

D'où :

$$\begin{bmatrix} i_{ref1} \\ i_{ref2} \\ i_{ref3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{i_d} \\ \overline{i_q} \end{bmatrix} \quad (\text{III-13})$$

La méthode de détection synchrone permet la compensation de l'énergie réactive en utilisant l'expression suivante :

$$\begin{bmatrix} i_{refd} \\ i_{refq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\tilde{i}_q \end{bmatrix} \quad (\text{III-14})$$

Et pour compenser la puissance réactive et l'ensemble des harmoniques simultanément, on utilise la relation suivante :

$$\begin{bmatrix} i_{refd} \\ i_{refq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_0 - \tilde{i}_d \\ -\tilde{i}_q - \tilde{i}_q \end{bmatrix} \quad (\text{III-15})$$

III.3.1. Techniques de Commande [13]

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. L'erreur est comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis. Dès que l'erreur atteint la bande inférieure ou supérieure, un ordre de commande est envoyé de manière à rester à l'intérieur de la bande. La simplicité de la mise en œuvre, comme le montre la Figure (IV-3), est le principal atout de cette technique. En revanche, les commutations évoluant librement à l'intérieur de la bande d'hystérésis, on ne peut maîtriser correctement le spectre des hautes fréquences dû aux fréquences de commutations.

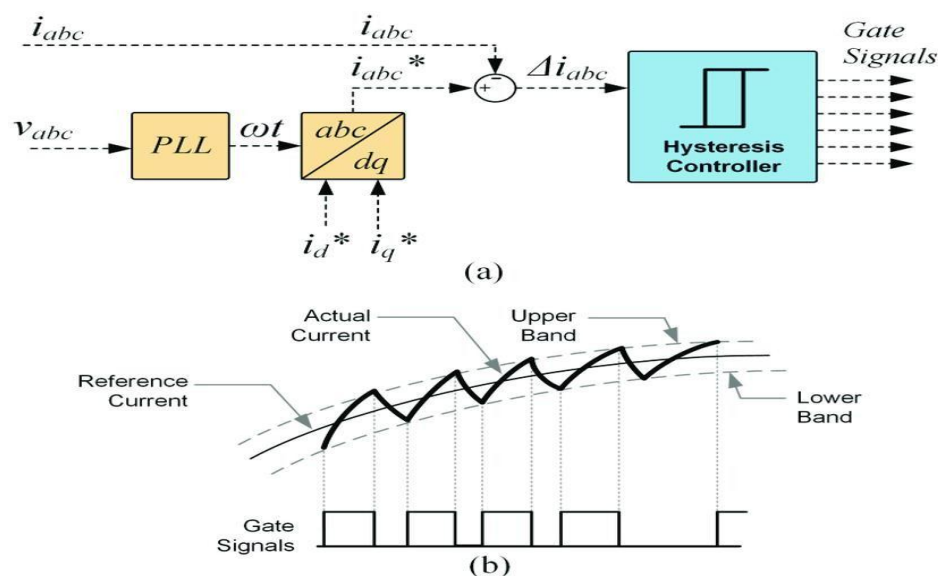


Figure (III-3) : Principe du contrôle par hystérésis

Afin de résoudre ce problème de la maîtrise des fréquences de commutation et de sa répercussion sur les interrupteurs, une autre stratégie de commande peut être proposée 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. De plus, le fonctionnement avec une fréquence de commutation quasi fixe nous empêche de conserver l'avantage d'une rapidité illimitée obtenue par la commande par hystérésis.

Commande par modulation de largeur d'impulsion [14]

La technique de commande par MLI résout le problème de la maîtrise de la fréquence de commutation en fonctionnant avec une fréquence fixe facile à filtrer en aval de l'onduleur.

La plus simple et la plus connue des modulations de largeur d'impulsion est sans doute la MLI à échantillonnage naturel, dite MLI intersective. Cette technique de commande met en œuvre d'abord un régulateur qui détermine la tension de référence de l'onduleur (modulatrice) 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. Le schéma de principe est donné par la Figure (IV-4)

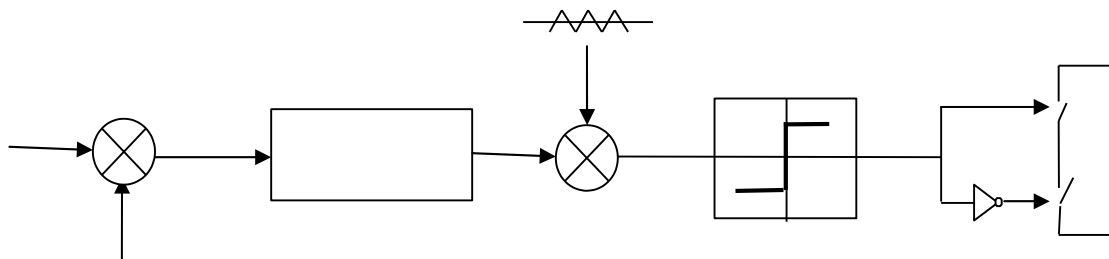


Figure (III-4): Principe de commande des courants par MLI

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.

Caractéristiques de la commande MLI [15]

Quand la référence est sinusoïdale, deux paramètres suffisent pour caractériser la commande :

L'indice de modulation M et le coefficient de réglage en tension r .

$$M = \frac{f_p}{f_m} \quad (IV-1)$$

Avec : f_p : Fréquence de la porteuse
 f_m : Fréquence de la modulatrice.

Le coefficient de réglage en tension r tel que :

$$r = \frac{v_m}{v_p} \quad (IV-2)$$

Avec : v_m : Amplitude de la tension de référence (modulatrice).
 v_p : Valeur crête de l'onde porteuse.

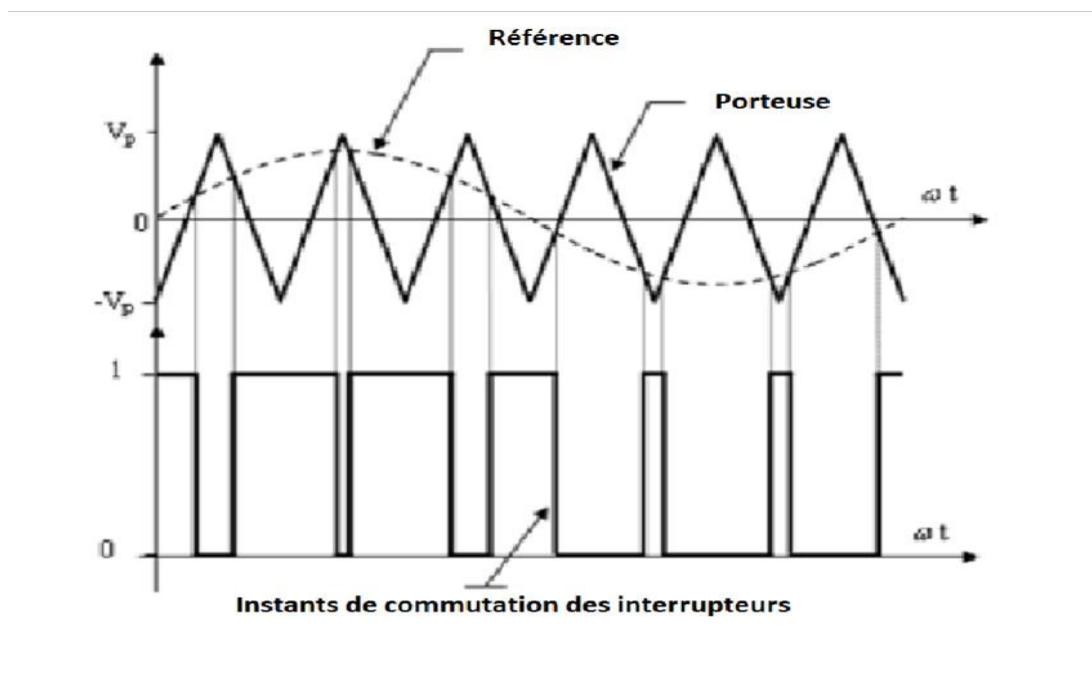


Figure (III-5): Principe de la MLI

Pour choisir la période T du signal MLI, on joue à la fois sur le diviseur d'horloge et sur la valeur de ICR1, sachant que la période T est égale à deux fois la valeur de ICR1 multipliée par la période de l'horloge et divisée par le diviseur d'horloge. Le même compteur peut servir à générer des interruptions. [14]

III.4. Conclusion

Parmi les différentes commandes appliquées à l'onduleur permettant d'obtenir la meilleure reproduction possible des courants de référence, nous avons détaillé dans ce chapitre les deux types de commande les plus utilisées : la commande par hystérésis et la MLI, qui jouent un rôle dans le choix des éléments constitutifs de la partie commande du filtre actif.

La commande par hystérésis est excellente dans la mesure où elle assure une bonne réponse de l'onduleur vis-à-vis des changements rapides des courants de référence, en revanche son inconvénient est les commutations évoluant librement à l'intérieur de la bande d'hystérésis. La technique de commande par MLI résout le problème de la maîtrise de la fréquence de commutation mais elle nécessite des régulateurs de courants.

Chapitre 4

*Simulation de l'ensemble réseau-filtre actif
shunt-charge polluante.*

IV. 1 Introduction

Dans ce chapitre, nous nous concentrons sur la simulation d'un filtre actif dans un réseau électrique en utilisant MATLAB, avec une commande par hystérésis. La commande par hystérésis est une technique largement utilisée en raison de sa simplicité et de son efficacité pour le contrôle en temps réel. Elle est particulièrement bien adaptée pour les applications nécessitant un suivi rapide et précis des courants de référence, comme dans le cas des filtres actifs.

Les filtres actifs jouent un rôle crucial dans la compensation des harmoniques et l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique. Leur capacité à générer des courants de compensation en temps réel permet de maintenir la pureté du signal électrique, réduisant ainsi les perturbations causées par les harmoniques. La commande par hystérésis, en particulier, offre des avantages significatifs en termes de rapidité de réponse et de robustesse face aux variations du système.

[15]

L'objectif principal de ce chapitre est de détailler la méthodologie de simulation d'un filtre actif avec commande par hystérésis dans MATLAB. Cette approche permettra de valider l'efficacité du filtre actif dans un environnement simulé avant toute implémentation pratique.

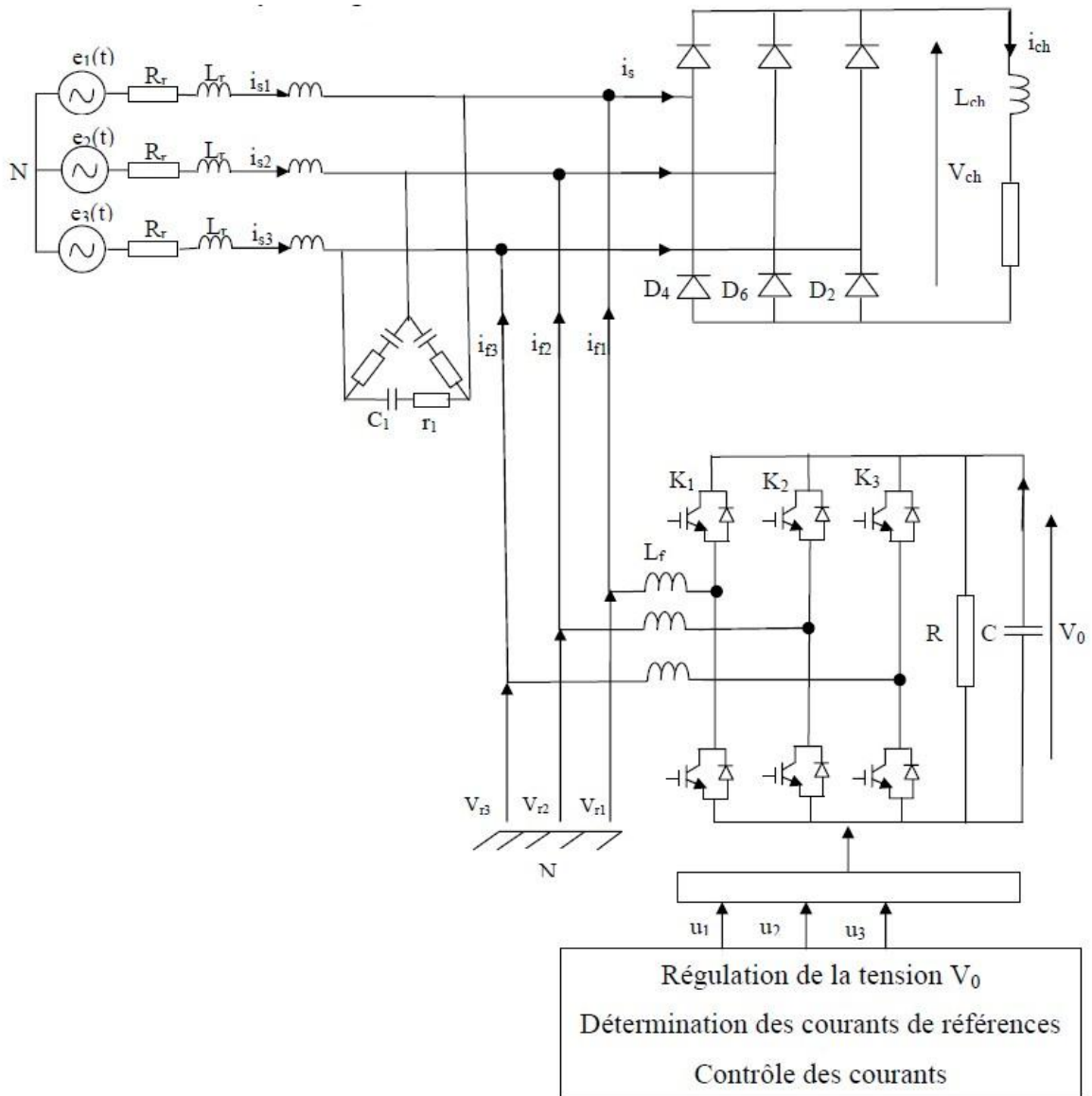


Figure (IV -1) : Schéma du système global

Paramètres de simulation :

Les données de simulation utilisées sont : [1]

Source :

Tension efficace : $V_s = 220 \text{ v}$

La fréquence : $f = 50 \text{ Hz}$

Impédance de réseau :

$L_r = (19,4 \text{ e-}6) \text{ H}$

$R_r = (0,25 \text{ e-}3) \Omega$

Côté continu de la charge polluante :

$L = (1 \text{ e-}3)$

$R_{ch} = 6,5 \Omega$

$L_{ch} = (20 \text{ e-}3) \text{ H}$

$L_f = (3 \text{ e-}3) \text{ H}$

La valeur de la tension continue en régime permanent est choisie $V_o = 840 \text{ v}$.

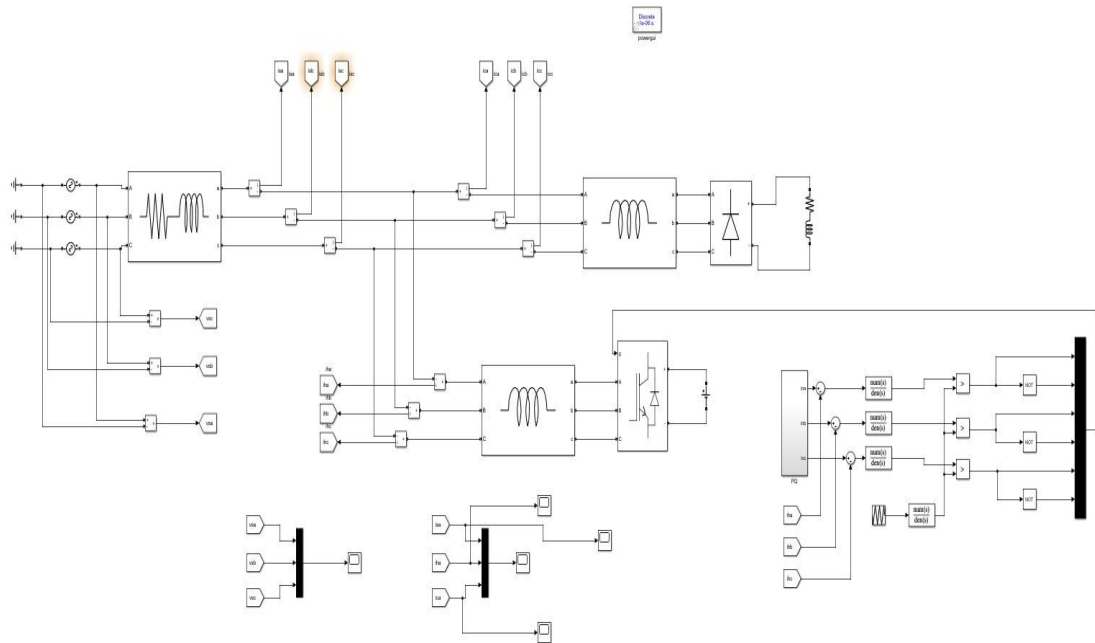


Figure (IV-2) : schéma global sous Simulink

IV.2 Simulation et analyse des résultats

Avant filtrage :

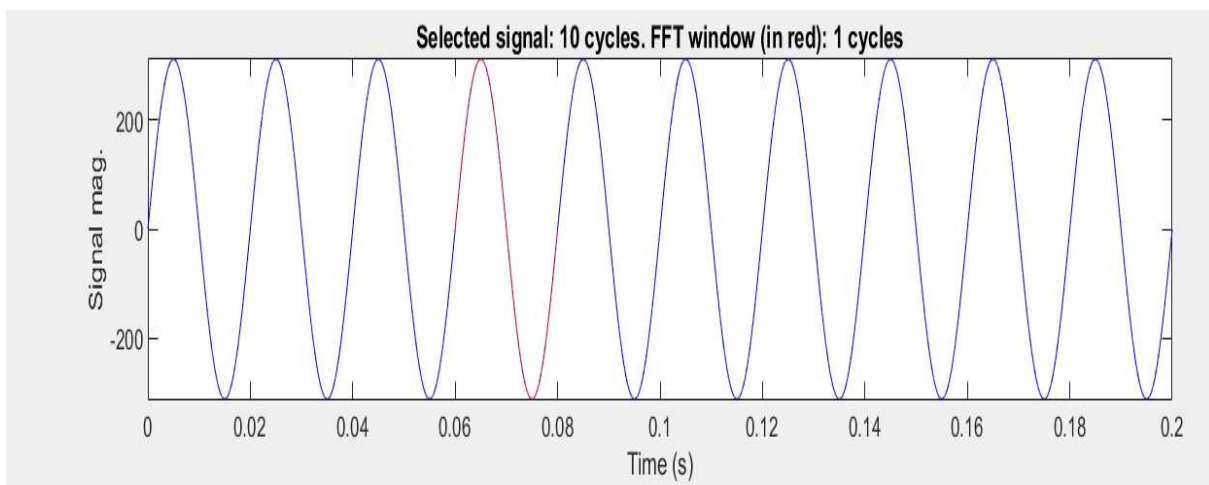


Figure (IV.3) : tension de source (Vs)

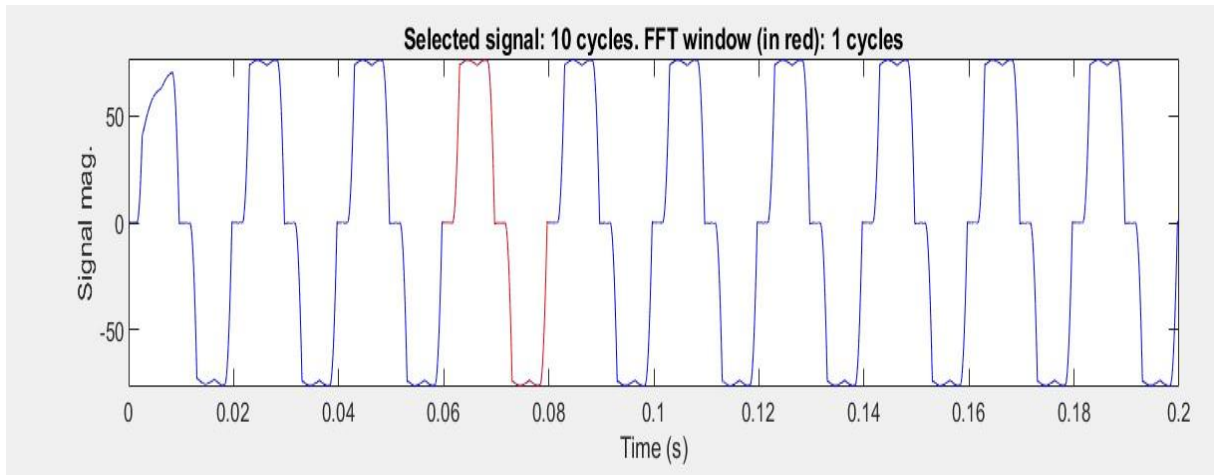


Figure (IV. 4) : Courant de source avant filtrage (I_s)

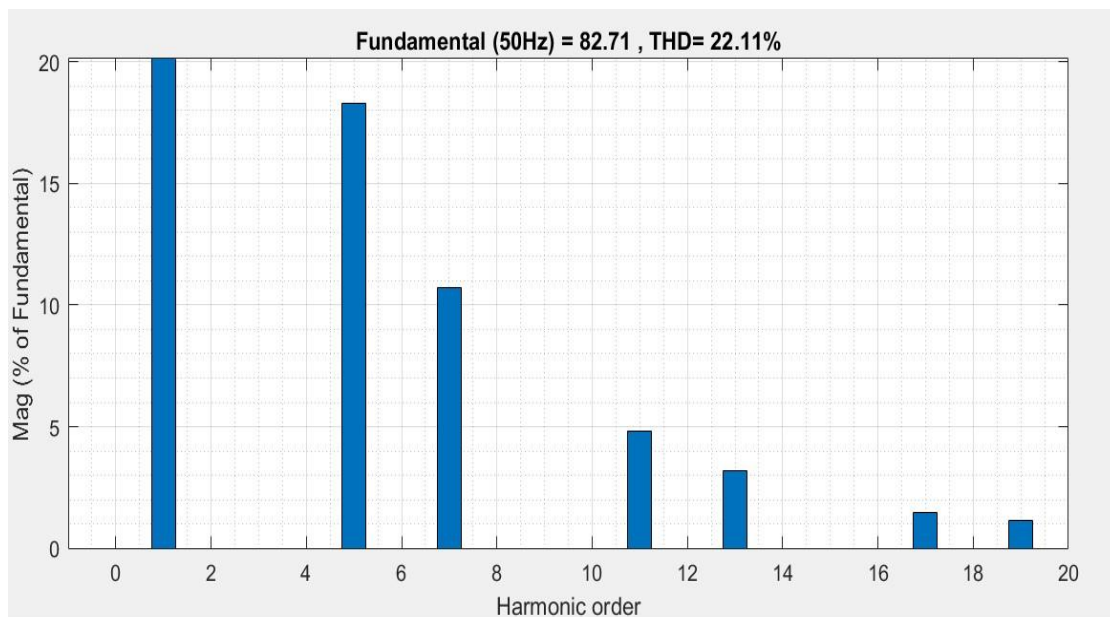


Figure (IV.5) : spectre harmonique du courant de source avant filtrage

Interprétation :

Les résultats de simulation indiquent que le courant de source avant le filtrage est fortement perturbé avec un THD de 22,11%, montrant une déformation significative de la forme d'onde due à la présence de multiples harmoniques. Les figures mettent en évidence la nécessité de mettre en place des mesures de filtrage pour réduire les harmoniques et améliorer la qualité de l'énergie dans le réseau électrique.

L'implémentation de filtres actifs, commandés par une technique efficace telle que la commande par hystérésis, pourrait atténuer ces perturbations en générant des courants de compensation pour neutraliser les harmoniques, conduisant ainsi à une forme d'onde plus proche de la sinusoïde idéale et à une réduction du THD.

Apres filtrage :

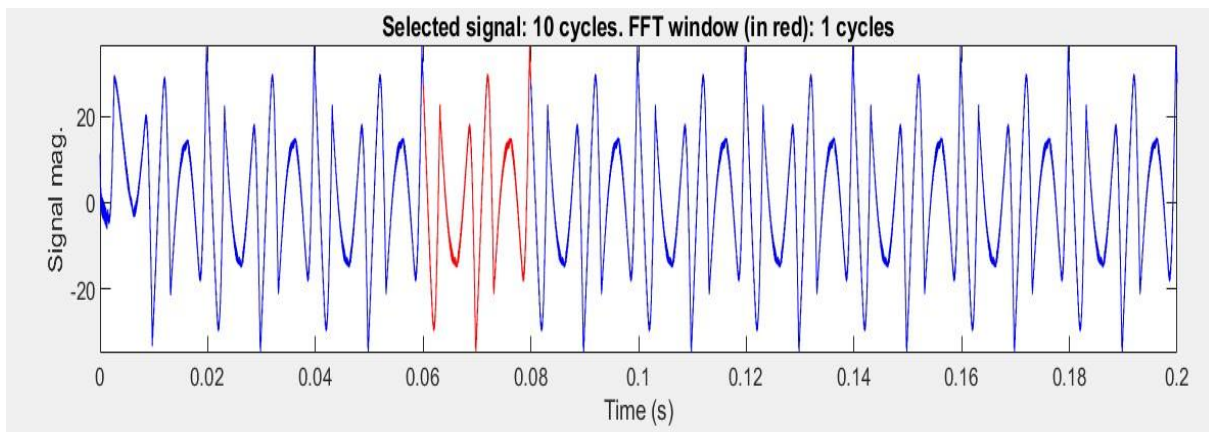


Figure (IV .6) : Courant injectée par le filtre Ih

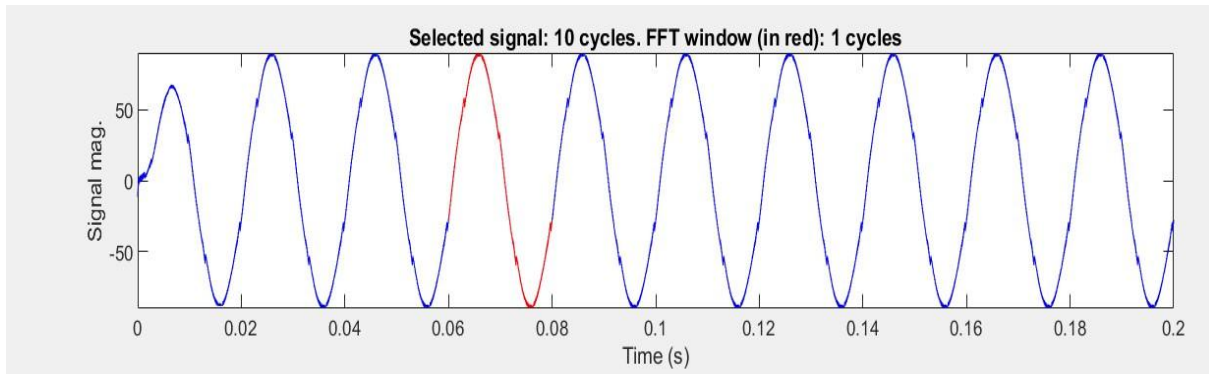


Figure (IV. 7) : Courant de source (I_s) après filtrage

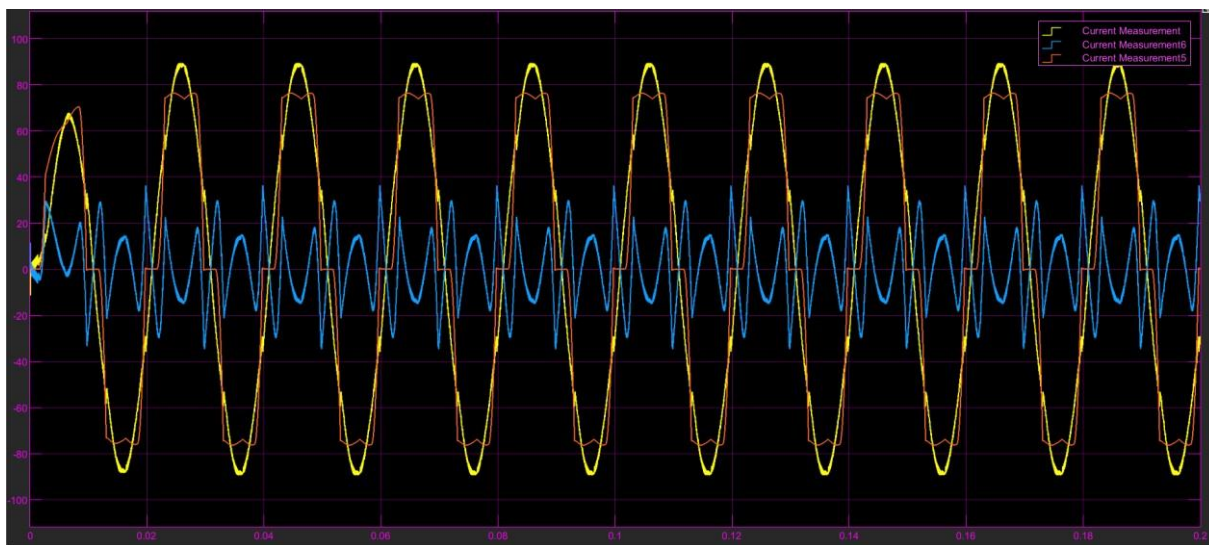


Figure (IV-8) : Courant ($I_{s1}(A)$) et tension ($V_{s1}(v)$) de source après filtrage

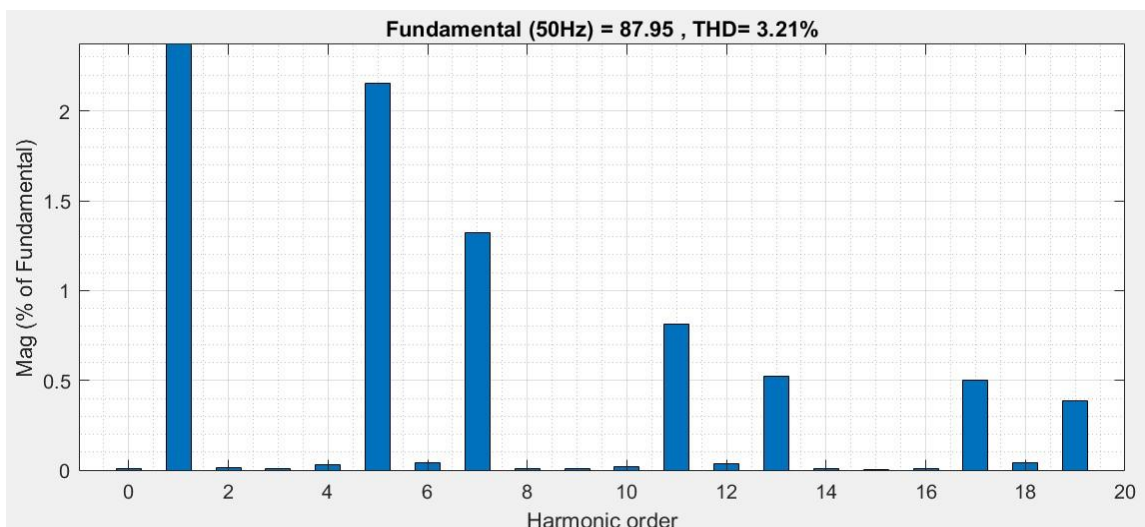


Figure (IV.9) : spectre harmonique du courant de source après filtrage

Interprétation :

: Le THD de 3,21% est souvent en dessous des seuils de tolérance définis par les normes de qualité de l'énergie, assurant la conformité aux réglementations.

Les résultats de la simulation après filtrage montrent une amélioration remarquable de la qualité du courant de source. La réduction du THD de 22,11% à 3,21% indique que le filtre actif avec commande par hystérésis a efficacement atténué les harmoniques.

IV.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exploré la simulation d'un filtre actif utilisant une commande par hystérésis dans MATLAB. Les étapes de modélisation du système, la mise en œuvre des algorithmes de commande et l'analyse des résultats ont été détaillées. Les simulations ont démontré que la commande par hystérésis permet une compensation efficace des harmoniques, améliorant ainsi la qualité de l'énergie électrique. Les résultats obtenus confirment la validité de cette approche, offrant une base solide pour des développements futurs et des applications pratiques des filtres actifs dans les réseaux électriques.

Conclusion générale

Nous avons mis en évidence le rôle crucial des filtres actifs dans l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique. Les harmoniques, générées par les charges non linéaires, causent de nombreux problèmes tels que les surcharges, les échauffements et les dysfonctionnements des équipements. Le filtrage actif offre une solution efficace pour atténuer ces perturbations.

La commande par hystérésis, grâce à sa simplicité et sa robustesse, s'est révélée être une méthode de contrôle efficace pour les filtres actifs. Elle permet un suivi rapide et précis des courants de référence, assurant ainsi une compensation dynamique des harmoniques.

La simulation sous MATLAB a permis de modéliser avec précision le comportement d'un filtre actif avec commande par hystérésis. Nous avons pu observer les performances du système en termes de réduction des harmoniques et d'amélioration de la qualité de l'énergie.

Bien que la commande par hystérésis soit efficace, il serait intéressant d'explorer d'autres algorithmes de contrôle, comme les contrôles prédictifs ou adaptatifs, pour améliorer encore les performances des filtres actifs.

Bibliographie

[1] Bouabibsa. M et Hafirassou. Ayyoub

« Amélioration de la qualité d'énergie dans le Réseau électrique par la technique UPQC et identification des courants harmoniques »

Mémoire d'ingénieur , Université Abdelhafid boussouf –MILA.2020

[2] Jianhong. XU

« Filtrage actif parallèle des harmoniques des réseaux de distribution d'électricité »

Thèse de Doctorat de l'institut national polytechnique de lorraine 20 janvier 1994

[3] : Mohamad Alaa Eddine Alali

« Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension ».

Thèse de Doctorat. Université Louis Pasteur Strasbourg I, 2002

[4] Alloui.N

« Contribution à l'amélioration de la qualité de l'énergie dans les réseaux Électriques en utilisant les Filtres Hybrides » thèse de Doctorat, Université de Batna2 le

09/10/2017.

[5] BACHAR.R

«Commande Prédictive Appliquée au Filtre Actif, Thèse de Doctorat ,

Université Mohamed

Khider– Biskra, 28/04/2019

[6] Yetter .M et Debla. N

« Commande d'un Filtre Actif Parallèle

À trois niveaux (NPC) Par différentes stratégies de commande »

Mémoire d'ingénieur ,Université mohamed boudiaf - m'sila 2017 /2018

[7] : KEBIRI Samia

« Etude d'un filtre actif parallèle multiniveaux ».

Mémoire de Magister. Université UMMTO de TIZI-OUZOU, 2009

[8] Moussa. O

« Étude des harmoniques et techniques de commandes du filtre actif »

Mémoire de Magister , Université de Batna 22 -16_2017.

[9]: DJ. FERHAT, B. HALLOU, F. HAMAS

« Etude d'un filtre actif parallèle monophasé commandé par MLI ».

Mémoire d'ingénieur en électrotechnique. Université UMMTO de TIZIOUZOU,2003

Bibliographie

[10] **L. Gyugyi et E.C. Strycula,**

« Active AC power filters », IEEE/IAS Annual Meeting, pp. 529-535. 1976.

[11] **Chennai. S**

« Etude, Modélisation & Commande des Filtres Actifs : Apport des Techniques de l'Intelligence Artificielle » Mémoire d'ingénieur ,Université Mohamed

Khider – Biskra

19 / 09 / 2013

[12] **CHEBAB.**

« Commande par Mode Glissant d'un Système Photovoltaïque Connecté à un Réseau Electrique et Associé à un Filtre Actif Parallèle»

Thèse de Doctorat , Université Oum El Bouaghi 2021

[13] **Bachir. A et Merabti.M**

« Étude et simulation d'un filtre actif parallèle Multi-niveaux ».

Mémoire d'ingénieur ,Université Aboubakr Belkaïd– Tlemcen –le 30/ 09/2020,

[14] **GHADBANE. I**

« Commande d'un Filtre Actif Triphasé Parallèle Par Différents Régulateurs »

Mémoire de Magister Université Mohamed Kheider - Biskra 24/02/2011

[15] **Messallem. S et Hammadi.Z et Medaoui. B**

« Validation de technique de Commande d'un filtre actif parallèle »

Mémoire d'ingénieur, Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued 2021.