

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 8 Mai 1945 – Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrotechnique et Automatique

Réf...../2025



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de MASTER Académique**

Domaine: Sciences et Technologie

Filière: Electromechanique

Spécialité: Electromechanique

Par: (Fareh Ezzine et Zaidi Raid Youcef)

Thème

**. Amélioration des performances du réseau électrique
pollué par les harmoniques en utilisant les techniques**

Soutenu publiquement, le / /, devant le jury composé de:

MR.KACHI Miloud	Professeur	Univ. Guelma	Président
MR. DOUKHI Nacer	MAA	Univ. Guelma	Directeur de mémoire
MD. BOUBIDI Assia	MCA	Univ. Guelma	Examineur
MR. TOUAHRI abdelwahab	MAA	Univ. Guelma	Examineur

Année Universitaire: 2024/2025

Remerciement

Je tiens tout d'abord à exprimer ma sincère gratitude à Monsieur Doukhi Nacer, mon encadrant, pour sa disponibilité, ses conseils précieux, et son accompagnement tout au long de la réalisation de ce mémoire. Sa rigueur scientifique et son soutien constant ont été d'une grande aide pour mener à bien ce travail.

J'adresse également mes remerciements les plus respectueux à l'ensemble des enseignants du département pour la qualité de l'enseignement dispensé durant mon cursus de Master, ainsi que pour leur engagement et leur encadrement bienveillant tout au long de ces années universitaires.

Je remercie aussi mes camarades, amis et toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire par leur aide, leurs conseils ou leur soutien moral.

Enfin, je dédie cette étape importante à ma famille, pour leur amour, leur patience, leur confiance et leur soutien indéfectible.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

À mon cher père, pour son soutien inestimable et ses
sacrifices silencieux.

À ma tendre mère, source d'amour, de patience et de
prières.

À mes frères, pour leur appui constant et leurs
encouragements.

À mes sœurs, pour leur affection et leur présence
réconfortante.

À mes camarades de promotion, avec qui j'ai partagé les
défis de ce parcours.

À mes amis fidèles, pour les moments de joie, de
motivation et de soutien.

Et avec une pensée très émue à la mémoire de mon ami
proche Khaled EZOUAOU.

Tu es parti trop tôt, mais ton souvenir vivra toujours dans
mon cœur.

Liste des figures

Chapitre 1 : Les harmoniques dans le réseau électrique

- Figure 1.1 : Exemple des harmoniques
- Figure 1.2 : Les inters et infra-harmoniques
- Figure 1.3 : Transformateur à couplage spécial
- Figure 1.4 : Redresseurs dodécophasés

Chapitre 2 : Les filtres actifs

- Figure 2.1 : Schéma de principe d'un filtre actif parallèle
- Figure 2.2 : Schéma de principe d'un filtre actif série
- Figure 2.3 : Filtre actif combiné parallèle-série
- Figure 2.4 : Filtre actif série + filtre passif parallèle (en parallèle)
- Figure 2.5 : Filtre actif série + filtre passif parallèle (en série)
- Figure 2.6 : Filtre actif parallèle + filtre passif parallèle
- Figure 2.7 : Filtre actif de puissance à structure tension
- Figure 2.8 : Filtre actif de puissance à structure courant
- Figure 2.9 : Convertisseur à structure tension à deux niveaux à trois bras

Chapitre 3 : Modélisation de l'association réseau électrique pollué-filtre actif parallèle (FAP)

- Figure 3.1 : Schéma synoptique de l'association filtre actif - réseau - charge polluante
- Figure 3.2 : Réseau triphasé équilibré
- Figure 3.3 : Charge polluante
- Figure 3.4 : Structure générale d'un onduleur
- Figure 3.5 : Interrupteurs de puissance
- Figure 3.6 : Potentiels de phase en pleine onde
- Figure 3.7 : Commande par hystérésis
- Figure 3.8 : Principe de la commande MLI
- Figure 3.9 : Commande des interrupteurs par MLI
- Figure 3.10 : Détermination des courants de référence (méthode classique des puissances instantanées)
- Figure 3.11 : Deux types de filtres d'extraction de composante harmonique
- Figure 3.12 : Algorithme de la méthode des puissances actives et réactives instantanées
- Figure 3.13 : Boucle de régulation de la tension continue
- Figure 3.14 : Schéma de régulation des courants du FAP

Chapitre 4 : Simulation numérique de l'association réseau électrique pollué-filtre actif parallèle (FAP)

- Figure 4.1 : Courant isa avant filtrage actif
- Figure 4.2 : Spectre harmonique du courant isa avant filtrage

- Figure 4.3 : Courant et tension de la source avant filtrage
- Figure 4.4 : Spectre harmonique après filtrage (commande hystérésis)
- Figure 4.5 : Spectre harmonique après filtrage (commande MLI)
- Figure 4.6 : isa (a), icha (b), ifa (c), déphasage isa-vsa (d)
- Figure 4.7 : isa (a), icha (b), ifa (c), tension de sortie onduleur (d)
- Figure 4.8 : isa (a), icha (b), ifa et iref (c), spectre harmonique de isa (d)

Liste des Tableaux

- Tableau (3.1) : Tensions fournies par un onduleur de tension à deux niveaux
- Tableau (4.1) : Paramètres de simulation numérique concernées les modèles étudiés

SOMMAIRE

Chapitre 1 : Les harmoniques dans le réseau électrique

• 1.1. Définition des harmoniques	1
• 1.2. Conséquence néfastes des harmoniques	3
• 1.3. Origine des harmoniques	3
• 1.4. Les différents effets des harmoniques	4
• 1.4.1. Effets des harmoniques sur le réseau électrique.....	4
• 1.4.2. Effets des harmoniques sur les appareils électrotechniques.....	5
• 1.4.3. Effets des harmoniques sur les composants passifs.....	6
• 1.5. Types de générateurs d'harmoniques	7
• 1.5.1. Génération des tensions harmoniques.....	7
• 1.5.2. Générateurs de courants harmoniques.....	8
• 1.6. Solutions traditionnelles de la pollution harmonique	9
• 1.6.1. Surdimensionnement de l'installation électrique.....	9
• 1.6.2. Augmentation de la puissance de court-circuit.....	10
• 1.6.3. Transformateur à couplage spécial.....	10
• 1.6.4. Modification du convertisseur polluant.....	11
• 1.6.4.1. Redresseurs dodécophasés.....	11
• 1.6.4.2. Méthodes d'injection d'harmonique dans le neutre.....	11
• 1.6.4.3. Transformateurs de réjection de l'harmonique 3.....	11
• 1.7. Nouvelles solutions	12
• Conclusion	12

Chapitre 2 : Les filtres actifs

• 2.1. Définition	13
• 2.2. Types des filtres actifs	13
• 2.2.1. Filtre actif de puissance parallèle.....	13
• 2.2.2. Filtre actif de puissance série.....	14
• 2.2.3. Filtre actif combiné parallèle-série.....	15
• 2.2.4. Filtre actif de puissance hybride.....	16
• 2.2.4.1. Filtre actif de puissance série en parallèle avec des filtres passifs parallèles.....	16
• 2.2.4.2. Filtre actif de puissance série en série avec des filtres passifs parallèles.....	16
• 2.2.4.3. Filtre actif de puissance parallèle en parallèle avec des filtres passifs parallèles.....	17
• 2.3. Classification des filtres actifs parallèles de puissance	18
• 2.3.1. Filtre actif de puissance à structure tension.....	18
• 2.3.2. Filtre actif de puissance à structure courant.....	18
• 2.3.3. Comparaison des deux structures.....	19
• 2.4. Structure général d'un filtre actif parallèle à structure tension	19
• 2.4.1. Etude et analyse de la partie de puissance.....	20

- 2.4.1.1. L'onduleur de puissance..... 20
- 2.4.1.2. Le système de stockage de l'énergie..... 20
- 2.4.1.3. Le filtre de découplage au réseau..... 20
- **2.5. Dimensionnement des paramètres du filtre actif parallèle..... 21**
- 2.5.1. Dimensionnement du condensateur de stockage d'énergie..... 21
- 2.5.2. Dimensionnement de L'inductance L_f 21

Chapitre 3 : Modélisation de l'association réseau électrique pollué-filtre actif parallèle (FAP)

- **3.1. Introduction..... 22**
- **3.2. Schéma synoptique de l'association réseau- filtre actif -charge polluante..... 22**
- **3.3. Modélisation de l'association réseau-filtre actif-charge polluante..... 22**
- 3.3.1. Modélisation du réseau..... 23
- 3.3.2. Modélisation de la charge polluante..... 23
- 3.3.3. Modélisation du filtre actif de puissance..... 24
- 3.3.3.1. L'onduleur de puissance..... 24
- 3.3.3.2. Tension à la sortie de l'onduleur..... 25
- **3.4. Techniques de commande du filtre actif de puissance parallèle..... 26**
- 3.4.1. Commande en plein onde..... 26
- 3.4.2. Commande par hystérésis..... 27
- 3.4.3. Commande par modulation de largeur de l'impulsion (MLI)..... 28
- 3.4.3.1. MLI sinus triangle..... 29
- **3.5. Etude de la partie commande..... 30**
- 3.5.1. Identification des courants de référence..... 30
- 3.5.1.1. Principe de fonctionnement de la méthode des puissances instantanées..... 30
- 3.5.1.2. Séparation des puissances perturbatrices..... 33
- 3.5.1.3. Calcul des courants perturbateurs..... 33
- 3.5.1.4. Algorithme d'identification..... 34
- **3.6. Régulation de la tension continue..... 35**
- **3.7. Régulation du courant du filtre actif parallèle..... 37**
- **Conclusion..... 38**

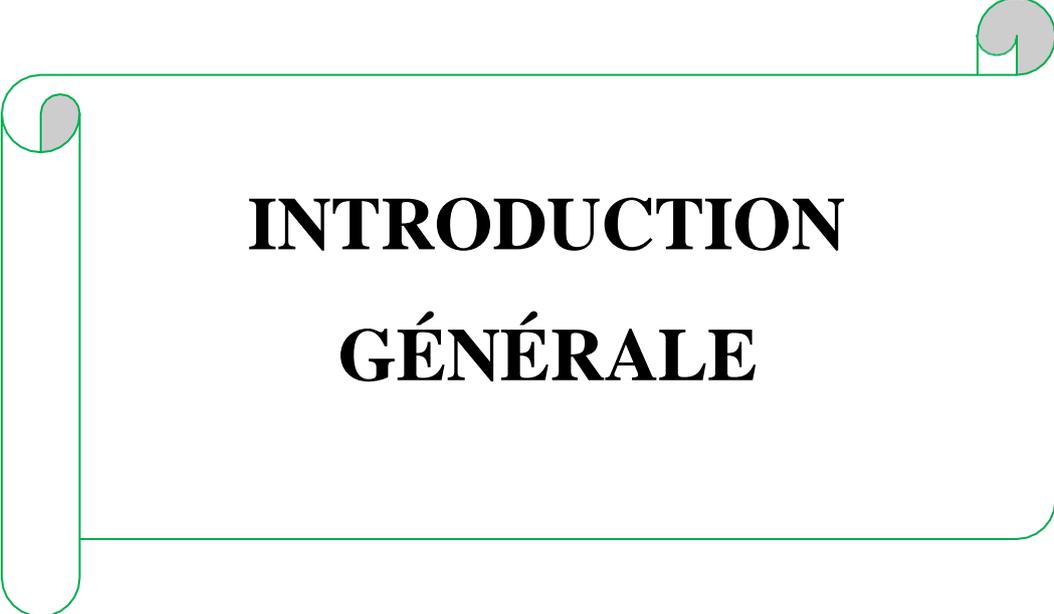
Chapitre 4 : Simulation numérique de l'association réseau électrique pollué-filtre actif parallèle (FAP)

- **4.1. Simulation numérique..... 39**
- 4.1.1. Etude du système avant insertion du filtre actif parallèle..... 40
- 4.1.2. Application du filtre actif parallèle..... 41
- 4.1.2.1. Cas d'une charge de type R..... 41
- 4.1.2.2. Cas d'une charge de type RL..... 44
- **4.2. Interprétation des résultats..... 45**
- **Conclusion..... 45**

Liste des Symboles

<i>Symbole</i>	<i>Désignation</i>
e_s	<i>La f.é.m. de la source</i>
V_s	<i>tension du réseau au point de raccordement du FAP</i>
V_{ch}	<i>Tension de la charge polluante</i>
V_f	<i>Tension de sortie du FAP</i>
i_s	<i>Courant de la source</i>
i_{ch}	<i>Courant de la charge polluante</i>
i_f	<i>Courants du FAP</i>
V_d	<i>Tension de sortie du redresseur</i>
V_{dc}	<i>Tension du bus continu</i>
I_d	<i>Courant fourni par le redresseur</i>
I_{dc}	<i>Courant fourni par le condensateur</i>
I_{ch}	<i>Courant efficace de la charge polluante</i>
I_{chh}	<i>Courant efficace harmonique de la charge polluante</i>
I_s	<i>Courant efficace de la source</i>
I_{sh}	<i>Courant efficace harmonique de la source</i>
I_{ref}	<i>Courant de référence</i>
V_{ref}	<i>Tension de référence</i>
R_{cc}, L_{cc}	<i>Résistance et inductance de court circuit</i>
R_s, L_s	<i>Résistance et inductance de la source</i>
R_c, L_c	<i>Résistance et inductance coté réseau</i>
R_{ch}, L_{ch}	<i>Résistance et inductance coté continu</i>
R_f, L_f	<i>Résistance et inductance du filtre de sortie</i>
C_{dc}	<i>Capacité du condensateur du bus continu</i>
f_r	<i>Fréquence du réseau</i>
f_p	<i>Fréquence de la porteuse</i>
f_s	<i>Fréquence de commutation</i>
ω_r	<i>Pulsation du réseau</i>
V_r	<i>Amplitude de la référence</i>
V_p	<i>Amplitude de la porteuse</i>
m	<i>Indice de modulation</i>
r	<i>Coefficient de réglage</i>
Z_{cc}	<i>Impédance de court circuit du réseau</i>
Z_s	<i>Impédance de la source</i>
Z_c	<i>Impédance de la charge coté réseau</i>
Z_{ch}	<i>Impédance de la charge cotée continu</i>
Z_f	<i>Impédance du filtre de sortie</i>
S_{cc}	<i>Puissance apparente de court circuit</i>
S_{ch}	<i>Puissance apparente de la charge</i>
P	<i>Puissance active</i>
q	<i>Puissance réactive</i>
D	<i>Puissance déformante</i>
S	<i>Puissance apparente</i>
$THDi$	<i>Taux de distorsion harmonique en courant</i>
$THDv$	<i>Taux de distorsion harmonique en tension</i>
v_α, v_β	<i>Tensions calculées dans le repère α-β</i>
I_α, I_β	<i>Courants calculés dans le repère α-β</i>

\mathcal{FP}	<i>Facteur de puissance</i>
F_{dis}	<i>Facteur de distorsion</i>
$F_{dép}$	<i>Facteur de déplacement</i>
H	<i>Largeur de la bande d'hystérésis</i>
T_k	<i>Temps d'application du vecteur non nul \vec{v}_k</i>
T_0	<i>Temps d'application du vecteur nul $v_{0,7,14}$</i>
T_s	<i>Période d'échantillonnage</i>



INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le développement rapide des équipements électroniques de puissance, des convertisseurs statiques, et des charges non linéaires dans les réseaux électriques modernes a entraîné une dégradation notable de la qualité de l'énergie électrique. Parmi les phénomènes perturbateurs les plus fréquents et les plus redoutés figurent les harmoniques, des composantes sinusoïdales de fréquence multiple de la fréquence fondamentale, qui affectent sérieusement le bon fonctionnement des réseaux électriques. Leur présence entraîne des surchauffes dans les équipements, une usure prématurée des transformateurs, une distorsion de la tension, des pertes supplémentaires dans les lignes, et une perturbation du fonctionnement des dispositifs de protection.

Face à cette pollution harmonique croissante, il est devenu impératif de mettre en œuvre des solutions efficaces pour préserver la qualité de l'énergie, la fiabilité des systèmes, et la continuité de service. Parmi les différentes méthodes de compensation des harmoniques, les filtres actifs de puissance (FAP) se sont imposés comme une solution performante et flexible. Contrairement aux filtres passifs, ces dispositifs, basés sur l'électronique de puissance et la commande numérique, sont capables d'injecter un courant de compensation parfaitement adapté, permettant une atténuation dynamique et sélective des harmoniques.

Le présent travail s'inscrit dans cette problématique et vise à étudier l'amélioration des performances d'un réseau électrique pollué par les harmoniques à travers l'utilisation des techniques de filtrage actif. Pour cela, nous nous appuyons à la fois sur une modélisation théorique du système et sur des simulations numériques permettant d'évaluer l'efficacité de la solution proposée.

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres principaux :

- **Le premier chapitre** est consacré à l'étude des harmoniques dans le réseau électrique. Il présente leur définition, leurs origines, les différents types d'harmoniques, leurs effets néfastes sur les équipements et les installations, ainsi que les principales méthodes de réduction, en particulier les limitations des solutions passives traditionnelles.
- **Le deuxième chapitre** aborde en détail les filtres actifs de puissance. Nous y décrivons leur principe de fonctionnement, leur rôle dans la compensation harmonique, leur constitution typique, les différentes topologies existantes (série, parallèle, hybride, etc.), ainsi que leurs avantages et leurs limites.
- **Le troisième chapitre** est dédié à la modélisation théorique de l'association entre un réseau électrique pollué et un filtre actif parallèle. Cette étape est cruciale pour comprendre le comportement dynamique du système, déterminer les grandeurs à compenser et développer les algorithmes de commande nécessaires.
- **Le quatrième et dernier chapitre** présente une étude de simulation numérique de la solution étudiée. À travers des scénarios représentatifs, nous analysons les performances du filtre actif dans la réduction des harmoniques et l'amélioration de la qualité de l'énergie. Les résultats obtenus sont interprétés, et des perspectives sont proposées pour de futures améliorations ou applications.

À travers cette étude, nous cherchons à démontrer l'intérêt des filtres actifs comme outil de compensation harmonique et à proposer une approche méthodologique complète pour leur intégration efficace dans un réseau électrique perturbé.

Chapitre 1

Les harmoniques dans le réseau électrique

1.1. Définition des harmoniques :

Les harmoniques sont une superposition sur l'onde fondamentale à 50 HZ, d'ondes également sinusoïdales mais de fréquences multiples entières de celle du fondamentale figure (1.1).

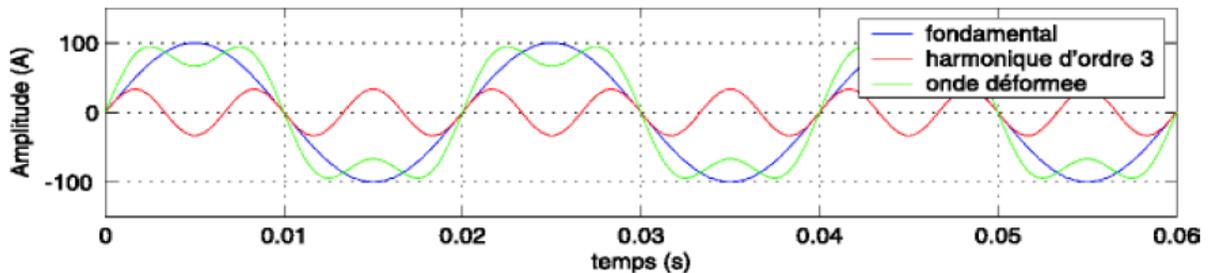


Figure 1.1. Exemple des harmoniques

Les harmoniques sont des tensions ou des courants sinusoïdaux dont la fréquence est un multiple entier de la fréquence fondamentale du réseau. En général, les harmoniques pairs sont négligeables et seuls les harmoniques impaires existent. Les principaux harmoniques présents sont le troisième, le cinquième, le septième et le neuvième [15].

Les inter-harmoniques sont superposées à l'onde fondamentale, mais ne sont pas des multiples entiers de la fréquence du réseau. L'apparition des inter-harmoniques est en augmentation et leurs origines principales sont les convertisseurs de fréquences Figure (1.2).

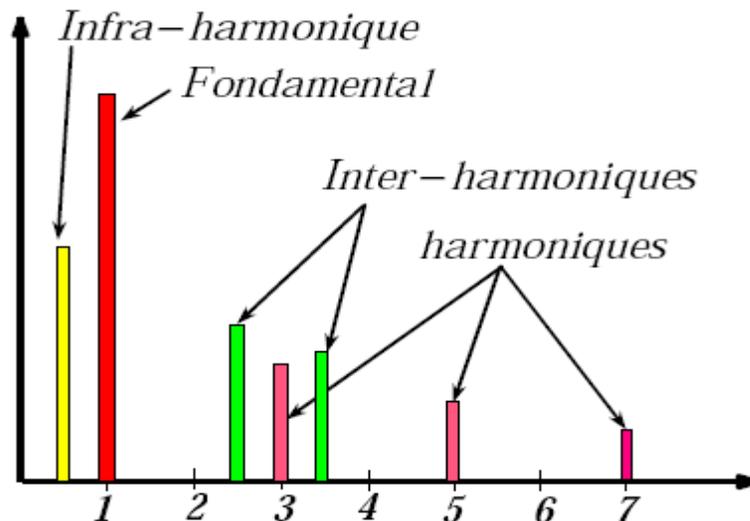


Figure 1.2. Les inters et infra harmoniques

Ils sont produits dans de faibles proportions par les appareils de production et de distribution d'électricité. La grande majorité des sources d'harmoniques sont constituées :

De charges industrielles [16].

- Équipements d'électronique de puissance : redresseurs, onduleurs.....
- Charges utilisant l'arc électrique : machine à souder, éclairage (tube fluorescents), four à arc.
- Muni de convertisseurs ou d'alimentation à découpage : four à micro-ondes, ordinateur, imprimante, téléviseur, plaque à induction.

1.2. Conséquence néfastes des harmoniques :

Les tensions et les courants harmoniques ont des effets indésirables et néfastes sur le fonctionnement, la rentabilité et la durée de vie de certains équipements électriques [18]:

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

1.3. Origine des harmoniques :

La cause principale de l'existence des harmoniques de tension est l'injection des courants non sinusoïdaux par des charges non linéaires, ou des charges déséquilibrées branchées au réseau [17].

La prolifération des équipements électriques utilisant des convertisseurs statiques a entraîné une augmentation sensible du niveau de pollution harmonique des réseaux électriques. Ces équipements sont considérés comme des charges non linéaires émettant des courants

harmoniques dont les fréquences sont des multiples entiers de la fréquence fondamentale. Le passage de ces courants harmoniques dans les impédances du réseau électrique peut entraîner des tensions harmoniques aux points de raccordement et alors polluer les consommateurs alimentés par le même réseau électrique. [8].

Parmi ces équipements on peut citer :

- Convertisseurs de puissance (alternatif/continu –continu/alternatif).
- Variateurs électroniques de vitesse.
- Ordinateurs et autres dispositifs électroniques, Fours à arc électrique.
- Transformateurs, Convertisseurs d'énergie éolienne et photovoltaïque.

1.4. Les différents effets des harmoniques :

1.4.1. Effets des harmoniques sur le réseau électrique :

De nombreux effets des harmoniques sur les installations et les équipements électriques peuvent être cités tels que les déformations des formes d'ondes entraînant des dysfonctionnements,

L'augmentation des valeurs crêtes créant des claquages diélectriques ou des valeurs efficaces induisant des échauffements et donc des pertes supplémentaires aussi bien en courant qu'en tension, ainsi qu'un étalement spectral provoquant des vibrations et des fatigues mécaniques. Les effets de ces perturbations peuvent se classer en deux types instantanés et à long terme [7-8].

Effets instantanés ou à court terme :

Parmi les effets instantanés des harmoniques, on peut citer les points suivants :

- Dysfonctionnements des dispositifs de commande ou de régulation;
- Vibrations dans les moteurs électriques alternatifs à cause des couples mécaniques pulsatoires dus aux champs tournants harmoniques ;
- Interférences avec les systèmes de télécommande à distance utilisés par les distributeurs d'énergie ;
- Déclenchement intempestif des circuits de protection.

Effets à long terme :

Les effets à long terme des harmoniques sont récapitulés comme suite :

- Vieillesse prématuré des moteurs électriques alternatifs du fait des pertes cuivre et fer supplémentaires.
- Echauffements et pertes joules supplémentaires des câbles et des équipements
- Surchauffe du neutre. En effet dans un système triphasé équilibré.
- Pertes supplémentaires dans les transformateurs ou les inductances dues à l'effet de Peau dans le cuivre, à l'hystérésis et aux courants de Foucault dans le circuit magnétique.
- Fatigue mécanique des équipements à cause des vibrations et des couples pulsatoires,
- vieillissement des isolants. Il peut être dû soit à une contrainte en tension consécutive à la présence de tensions harmoniques, et donc à une augmentation locale des courants de fuite, soit à l'échauffement exagéré provoqué par l'échauffement des conducteurs.

1.4.2. Effets des harmoniques sur les appareils électrotechniques [3] :

a_ Machines tournantes :

Les machines synchrones ou asynchrones, même alimentées par des courants parfaitement sinusoïdaux, sont elles-mêmes génératrices d'harmoniques à cause de la saturation du circuit magnétique, d'où la répartition spatiale du flux tournant dans l'entrefer qui n'est pas rigoureusement sinusoïdal. ·

b_ Machine synchrone :

Les courants harmoniques générés dans le réseau provoquent des échauffements dans les machines synchrones dus aux pertes cuivre et aux pertes fer. Ces effets sont limités lorsque la machine ne tourne pas à pleine charge.

Dans une machine synchrone le rotor et le champ tournant tournent à la même vitesse de synchronisation (300tr /min pour une machine à une paire de pôles) mais le champ harmonique tourne à une vitesse différente car les harmoniques de rang $(3k-1)$ créent un flux tournant dans le sens inverse à la vitesse $(3k-1)\omega$, donc à la vitesse $3k\omega$ par rapport au rotor et

en sens inverse de celui-ci. Les harmoniques de rang $3k+1$ créent aussi un flux tournant dans le sens direct à la vitesse $(3k+1)\omega$, donc à la vitesse $3k\omega$ par rapport au rotor et dans le même sens que celui-ci. En ce qui concerne les moteurs, on doit éviter les alimentations dont le taux d'harmoniques de tension dépasse 10%. Au delà, le rendement de la machine est fortement affecté.

Par ailleurs, les harmoniques peuvent engendrer des bruits, des pertes rotoriques, des échauffements et des vibrations inacceptables.

c_ Machines asynchrones :

Le passage des courants harmoniques dans les enroulements statoriques du moteur asynchrone crée des couples moteurs s'il s'agit de systèmes directs $(3k+1)$ ou des couples antagonistes s'il s'agit de systèmes inverses $(3k-1)$.

1.4.3. Effets des harmoniques sur les composants passifs [2] :

a- Transformateur de puissance :

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

- Augmentation des pertes par courants de Foucault.
- Augmentation des pertes par effet hystérésis dans le noyau magnétique.
- Augmentation des pertes Joule dans les enroulements qui sont aussi accrues car la valeur efficace des courants est supérieure à celle de leur seul fondamental.
- Augmentation du bruit

b- Condensateur :

En présence de charges non linéaires générant des harmoniques, il est nécessaire de surdimensionner les condensateurs en tension, ils doivent résister à une tension efficace (tenant compte des tensions harmoniques) égale à 110% de la tension nominale fondamentale du condensateur.

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

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

c- Câbles de puissance :

La circulation des courants harmoniques dans un câble électrique augmente la valeur efficace du courant, qui se traduit par des pertes Joule selon la loi d'ohm.

En outre, les courants admissibles varient en fonction des déséquilibres et des courbes de charge.

1.5. Types de générateurs d'harmoniques [3][4] :

1.5.1. Génération des tensions harmoniques :

a- Alternateurs :

Les alternateurs de centrales de production fournissent une tension d'alimentation qui contient très peu d'harmoniques. Le contenu harmonique de la tension générée par les alternateurs est lié à la qualité du bobinage et des pièces polaires qui assurent la forme sinusoïdale d'onde. Aussi, un groupe électrogène génère des harmoniques de taux ($< 0.5\%$) à vide et inférieur à (1%) lorsqu'il est en pleine charge sur une charge linéaire.

b- Transformateurs :

Les transformateurs peuvent être des générateurs de tension harmoniques lorsqu'ils fonctionnent en régime saturé (le taux de distorsion harmonique est $< 1\%$).

c- Charges électrodomestiques :

Ce terme englobe tous les appareils domestiques de faible puissance tels que les récepteurs de télévision, les magnétoscopes, etc... Ces charges sont présentes en grand nombre sur le réseau

et, bien que de puissance unitaire réduite, elles sont responsables d'une part importante de la pollution harmonique.

1.5.2. Générateurs de courants harmoniques [2] :

a- Moteur asynchrone :

Les perturbations harmoniques dans ces machines sont dues aux courants magnétisants, aux fréquences de dentures ainsi qu'au glissement de la machine asynchrone.

b- Alimentation sans interruption ASI :

Ces dispositifs ont des performances très intéressantes pour la protection du matériel contre les creux de tension et coupures. En revanche, ils ont parfois des limitations dans le domaine harmonique qu'il convient de connaître pour bien les maîtriser. Elles alimentent généralement des charges non linéaires comme le matériel informatique.

Les limitations proviennent, d'une part, de la puissance de court-circuit disponible en aval de l'onduleur et d'autre part, de la qualité de la sinusoïde produite par le montage onduleur, en sortie de l'ASI.

c- Convertisseurs d'électronique de puissance :

Comme les :

- Redresseurs monophasés (micro-ordinateurs, imprimantes et périphériques d'ordinateurs, variateurs de vitesse pour les moteurs à courant alternatif, téléviseurs...etc.).
- Gradateurs à angle de phase (commande de four électrique, régulation de puissance, démarreurs progressifs des moteurs ...etc.).
- Redresseurs triphasés à base de semi- conducteurs (variation de vitesse du moteur, four à induction, électrolyseurs ...etc.).

d- Eclairage :

On distingue trois types de lampes qui produisent des courants harmoniques :

- Les lampes à fluorescence.
- Les lampes à vapeur haute pression.
- Les lampes fluo-compactes.

La génération d'harmoniques dans ces lampes est liée à la nature fortement non linéaire du phénomène entraînant l'illumination ainsi qu'à la présence d'un ballast.

e- Appareils à arc électrique :

Les appareils à arc électrique regroupent les fours à arc à courant alternatif dont la puissance peut atteindre plusieurs dizaines de « MW », et les machines de soudure à l'arc, à courant alternatif ou continu. Certaines perturbations harmoniques sont dues essentiellement aux imperfections de construction (dissymétrie, distribution non sinusoïdale du champ dans les alternateurs, saturation des circuits magnétiques...etc.).

1.6. Solutions traditionnelles de la pollution harmonique :

L'existence des perturbations dans un réseau électrique conduit à prendre, impérativement, des dispositions afin d'atténuer ou d'éliminer leurs conséquences sur les équipements électriques et sur les réseaux électriques. Sur cette base, il semble donc nécessaire de décrire de manière sommaire les principaux dispositifs et solutions existants utilisés pour le traitement de perturbations.

1.6.1. Surdimensionnement de l'installation électrique :

Dans ce cas, les harmoniques ne subissent aucune action curative de la part de l'utilisateur. Les effets néfastes de la pollution harmonique sont à éviter pendant une durée limitée. Pour les installations nouvelles, on procède au surdimensionnement des équipements afin d'assurer leur résistance aux surcharges harmoniques. Dans le cas d'installations existantes, on décline les équipements de distribution électrique soumis aux harmoniques (câbles du neutre, transformateur). Cette méthode ne permet pas de tirer profit du potentiel réel de l'installation. Il en résulte un accroissement important du coût de l'installation.

1.6.2. Augmentation de la puissance de court-circuit :

En l'absence de tout phénomène de résonance, la puissance harmonique globale augmente lorsque la puissance de court-circuit diminue. On s'efforcera alors d'alimenter les équipements perturbateurs à partir du point du réseau où la puissance de court-circuit disponible est la plus élevée. Les courants harmoniques des charges non linéaires étaient modélisés par des sources de courant indépendantes du réseau. Dans la réalité, ce modèle est très approximatif. Les courants harmoniques sont influencés par l'impédance du réseau amont. Lorsque celle-ci croît, en général les courants harmoniques décroissent. Ce qui signifie que pour augmenter l'impédance, on augmente la puissance de court-circuit. Des essais ont été réalisés sur une alimentation à découpage, en modifiant l'impédance de la source (TAB. 3.1). On peut constater que les harmoniques de courant de valeurs les plus élevées décroissent fortement lorsque l'impédance de la source croît.

1.6.3. Transformateur à couplage spécial :

Le choix de couplages appropriés des transformateurs permet de limiter la circulation des courants harmoniques. L'utilisation d'un transformateur d'isolement, de rapport 1/1 à couplage triangle-étoile ou triangle-zigzag Figure (1.3), empêche la propagation des courants harmoniques de rang 3 et leurs multiples circulant dans le neutre. Ce procédé n'a aucun effet sur les autres rangs harmoniques. Il limite au contraire la puissance disponible de la source et augmente l'impédance de ligne. Il en résulte une augmentation de la distorsion en tension due aux autres rangs harmoniques.

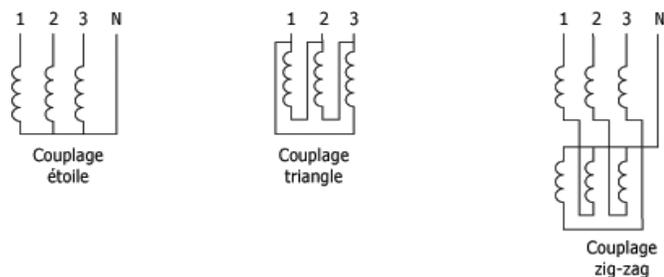


Figure 1.3. Transformateur à couplage spécial

1.6.4. Modification du convertisseur polluant :

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

1.6.4.1. Redresseurs dodécophasés :

Il s'agit de connecter 2 ponts triphasés, judicieusement déphasés, en parallèle côté réseau et reliés côté redressé. Le déphasage est obtenu à l'aide d'un transformateur à 2 secondaires bobinés l'un en triangle et l'autre en étoile (Fig. 1.4).

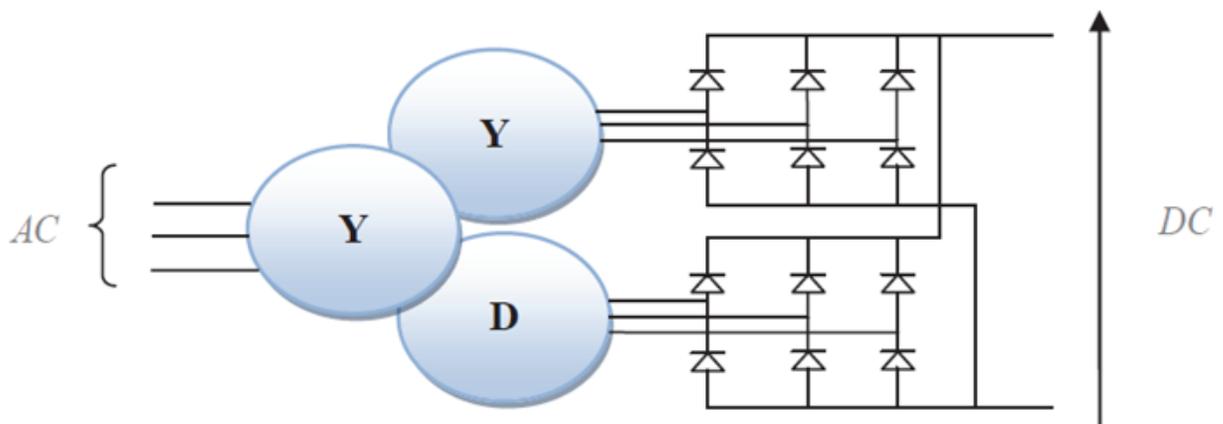


Figure 1.4. Redresseurs dodécophasés

1.6.4.2. Méthodes d'injection d'harmonique dans le neutre :

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

1.6.4.3. Transformateurs de réjection de l'harmonique 3 :

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

1.7. Nouvelles solutions :

Le développement récent des semi-conducteurs de puissance, entièrement, commandables, les thyristors, les GTO et les IGBT et en particulier, la maîtrise de leur mise en œuvre et l'existence de nouvelles méthodes de traitement numérique du signal ont permis de développer un moyen moderne et efficace d'élimination des perturbations harmoniques : le filtre actif ou compensateur actif d'harmoniques.

Un filtre actif de puissance est un dispositif qui satisfait la fonction de dépollution harmonique. A la différence, un conditionneur actif de puissance est un dispositif qui satisfait la fonction de dépollution de plusieurs perturbations telles que les chutes de tension, les déséquilibres..., incluant le traitement harmonique [21,22].

Conclusion :

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

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

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

Chapitre 2

Les filtres actifs

2.1. Définition :

Le but de ces filtres actifs est de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à ce que le courant ou la tension redevienne sinusoïdale et parfois avec facteur de puissance unitaire. Le filtre actif est connecté au réseau soit en parallèle, soit en série suivant qu'il est conçu respectivement pour compenser les courants ou les tensions harmoniques, soit associé à des filtres passifs pour constituer ce qu'on appelle les filtres hybrides.

2.2. Types des filtres actifs :

Nous citerons trois topologies possibles de filtres actifs :

- Filtre actif parallèle (FAP),
- Filtre actif série (FAS)
- Filtre actif combiné parallèle-série.

2.2.1. Filtre actif de puissance parallèle :

Le filtre actif parallèle (Fig.2.1) peut être considéré comme un générateur de courant ou de tension. Dans le cas de générateur de courant, ce filtre est commandé de façon à injecter au réseau des courants égaux à ceux générés par la charge, mais de phases opposées. Le courant de source après compensation est sinusoïdal. Par contre, la tension au point de connexion ne sera sinusoïdale que si la source de tension du réseau est exempte d'harmoniques. Le dimensionnement du filtre actif dépend du courant harmonique à fournir. En plus, le filtre peut aussi compenser le courant réactif mais avec un dimensionnement plus important.

Lorsque celui-ci se comporte comme un compensateur de courants harmoniques, il permet de supprimer au point de raccordement tous les harmoniques de courants de charges non linéaires. Par contre, lorsqu'il se comporte comme un compensateur de tension harmonique, il permet alors de maintenir sinusoïdale la tension au point de raccordement quel que soit le courant absorbé par la charge et quel que soit la qualité de la source de tension.

En général, le filtre actif parallèle est utilisé pour la dépollution des réseaux BT et MT. Son indépendance totale vis-à-vis de la source et de la charge lui confère une bonne auto-adaptabilité avec des performances appréciables [22].

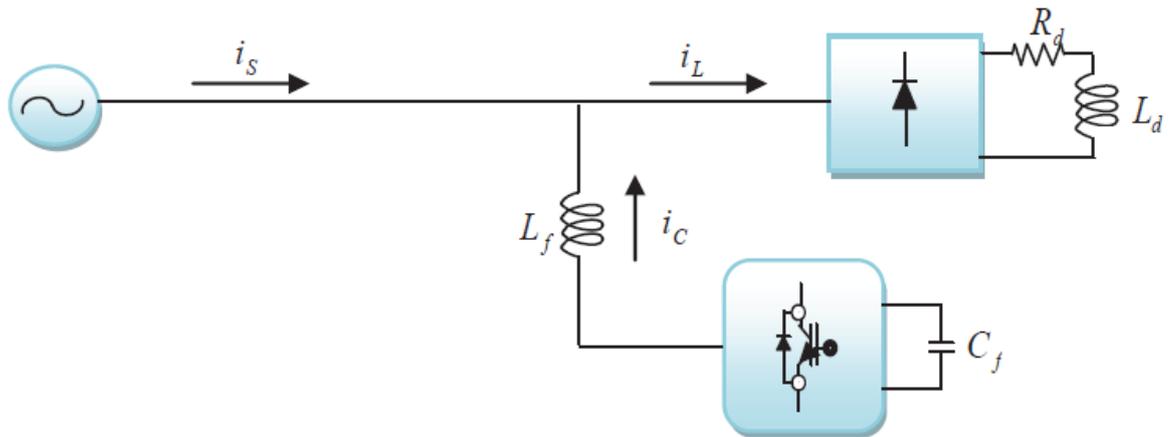


Figure 2.1. Schéma de principe d'un Filtre actif parallèle

2.2.2. Filtre actif de puissance série :

Ce type de compensateur connecté en série sur le réseau de distribution se comporte comme une source de tension harmonique qui s'oppose à une éventuelle tension harmonique venant de la source. Il s'oppose, également, à celle provoquée par la circulation du courant harmonique de la charge polluante à travers l'impédance du réseau rendant sinusoïdale la tension aux bornes de la charge polluante. Son rôle d'isolateur empêche les courants harmoniques de remonter vers le réseau [23]. Dans ce cas, le filtre protège les installations sensibles des perturbations provenant du réseau tel que les harmoniques, les surtensions et les déséquilibres. Si la charge génère des courants harmoniques, le filtre série ne permet pas de corriger ces courants et en cas de court-circuit de la charge, le compensateur doit supporter toute la tension du réseau et tout le courant de court-circuit. D'où, un moyen de protection s'avère indispensable qui lui compense soit les courants harmoniques consommés par la charge ou par la distorsion de tension déjà présente sur le réseau [24]. Le montage est représenté à la figure (2.2).

Pour ce cas, le filtre actif série se comporte comme une impédance infinie aux fréquences harmoniques et comme une impédance nulle à la fréquence fondamentale. Son rôle d'isolateur empêche ainsi les courants harmoniques de remonter vers le réseau. Toutefois, la mise en œuvre de la topologie d'un filtre actif série présente quelques inconvénients :

Il est toujours parcouru par la totalité du courant absorbé par la charge, y compris le courant fondamental. En cas de court-circuit de la charge, le filtre actif de puissance série

devient la seule charge du réseau et risque d'être détruit. Ceci nécessite des protections supplémentaires.

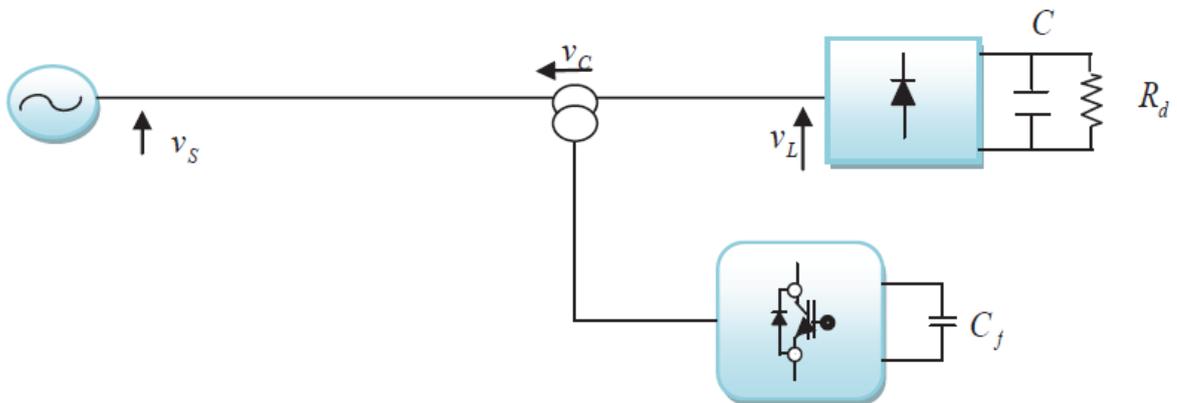


Figure 2.2. Schéma de principe d'un Filtre actif série

2.2.3. Filtre actif combiné parallèle-série :

L'UPQC (Unified Power Quality Conditioner) est principalement la combinaison de deux filtres actifs série et parallèle (Figure 2.3) qui partagent la même capacité sur le bus continu [02]. Ce type de dispositif est capable à la fois de régler la tension du réseau et d'éliminer les harmoniques. Il est considéré comme le plus puissant dispositif et il est capable d'effectuer efficacement toutes les tâches de conditionnement de puissance. Cependant, son prix important et la complexité de commandes de nombreux interrupteurs limitent son utilisation à des applications critiques comme l'équipement médical.

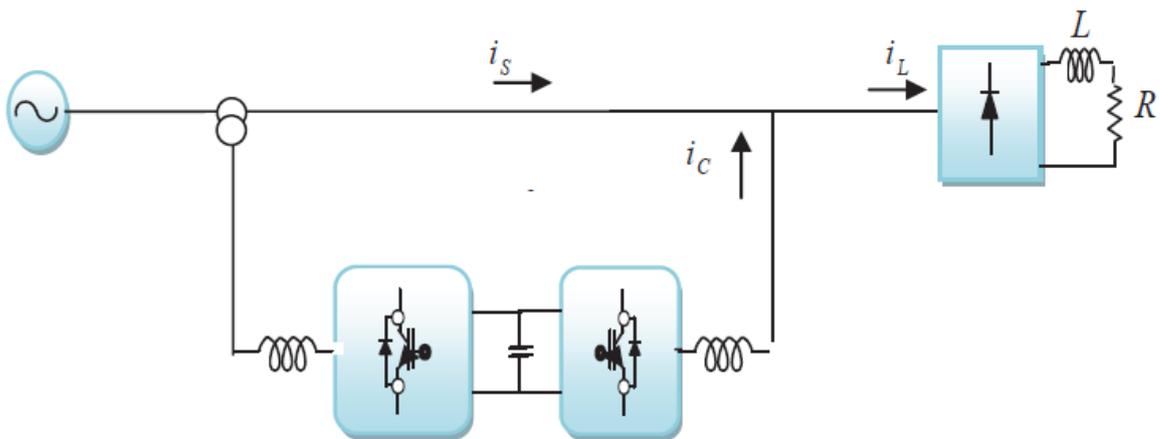


Figure 2.3. Filtre actif combiné parallèle-série

2.2.4. Filtre actif de puissance hybride :

C'est l'association de filtres actifs séries de faibles puissances à des filtres passifs. Cette solution semble être prometteuse car elle réduit le dimensionnement du filtre actif de puissance, par conséquent, leurs prix.

De plus, leurs potentialités d'application ne cessent de s'accroître et la fréquence de commutation est, considérablement, réduite [25]. Différentes configurations existent, parmi elles, on présente :

2.2.4.1. Filtre actif de puissance série en parallèle avec des filtres passifs parallèles :

Le schéma de principe de ce système de filtrage est donné par la figure (2.4). Il est constitué de filtres passifs accordés aux fréquences des harmoniques prépondérantes tels que le 5ème et le 7ème harmonique et d'un filtre actif série dont le rôle est de renforcer l'efficacité des filtres passifs en empêchant les courants harmoniques de remonter. Il réduit, ainsi, les risques d'antirésonance entre les éléments du filtre passif et l'impédance du réseau [26].

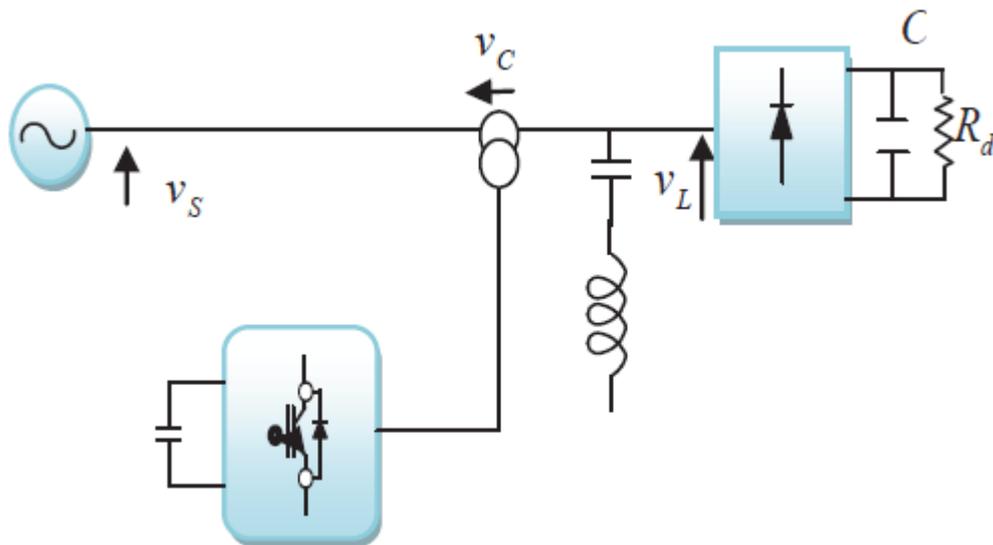


Figure 2.4. Filtre actif série en parallèle avec un filtres passif parallèle

2.2.4.2. Filtre actif de puissance série en série avec des filtres passifs parallèles :

Dans cette configuration, le filtre actif est placé en série avec les filtres passifs parallèles telle que le montre la figure (2.5). Cette structure à 2 avantages. D'une part, le courant qui le traverse est moins important. Par conséquent, la puissance du filtre actif série est plus faible que celle du filtre hybride. D'autre part, le filtre actif série n'étant plus connecté en

série avec la charge, par conséquent, en cas de court-circuit dû à cette même charge, le filtre actif n'est plus affecté [27].

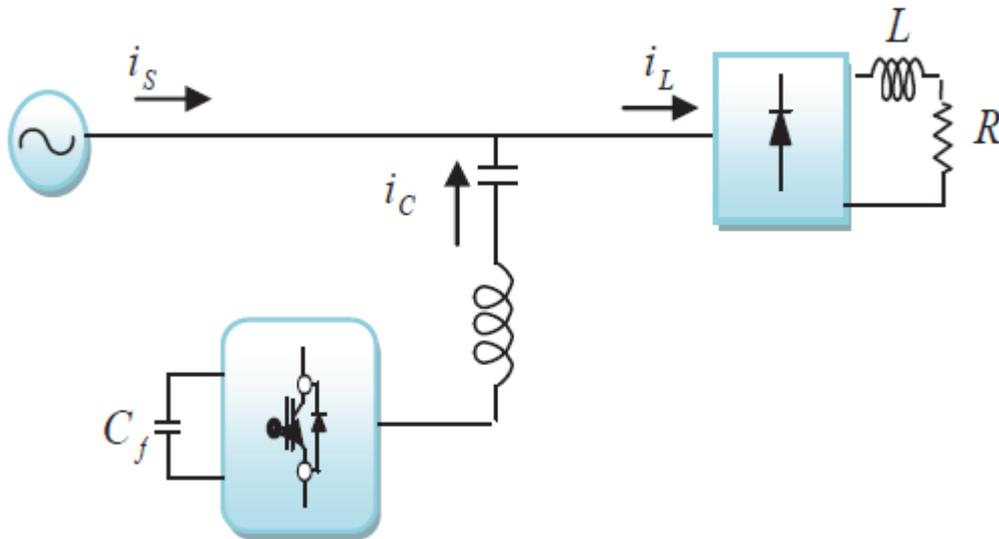


Figure 2.5. Filtre actif série en série avec un filtres passif parallèle

2.2.4.3. Filtre actif de puissance parallèle en parallèle avec des filtres passifs parallèles :

Le rôle du filtre actif parallèle dans cette configuration, montrée en figure (2.6), est la compensation des courants harmoniques basses fréquences émis par la charge polluante. Le filtre passif accordé sur une fréquence élevée, élimine les harmoniques hautes fréquences y compris ceux créés par le filtre actif parallèle.

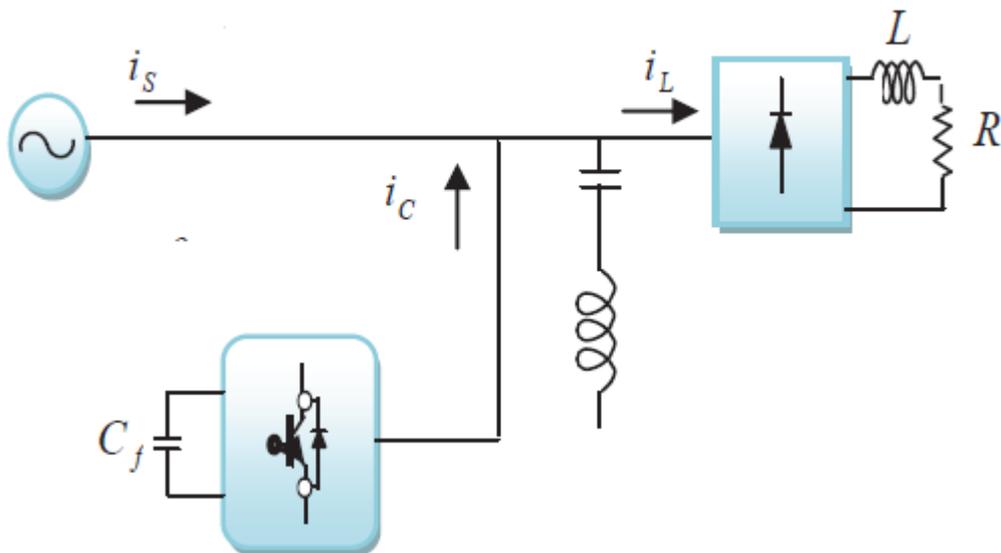


Figure 2.6. Filtre actif parallèle en parallèle avec un filtre passif parallèle

2.3. Classification des filtres actifs parallèles de puissance :

Il ya deux structures généraux des filtres actifs de puissance qui sont :

2.3.1. Filtre actif de puissance à structure tension :

L'onduleur de tension connecté en parallèle au réseau est illustré par la figure (II.2). Le condensateur C joue le rôle d'une source de tension continue. La tension à ses bornes V_c doit être positive et maintenue quasiment constante.

L'onduleur de tension est relié au réseau par l'intermédiaire d'un filtre L_c . Deux rôles sont dévolus à ce filtre : d'une part transformer les variations de tension en variations de courant, d'autre part filtrer les fréquences de commutations des bras d'onduleur. Les interrupteurs de l'onduleur sont réversibles en courant. Ils sont constitués de semi-conducteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture en antiparallèle avec une diode [].

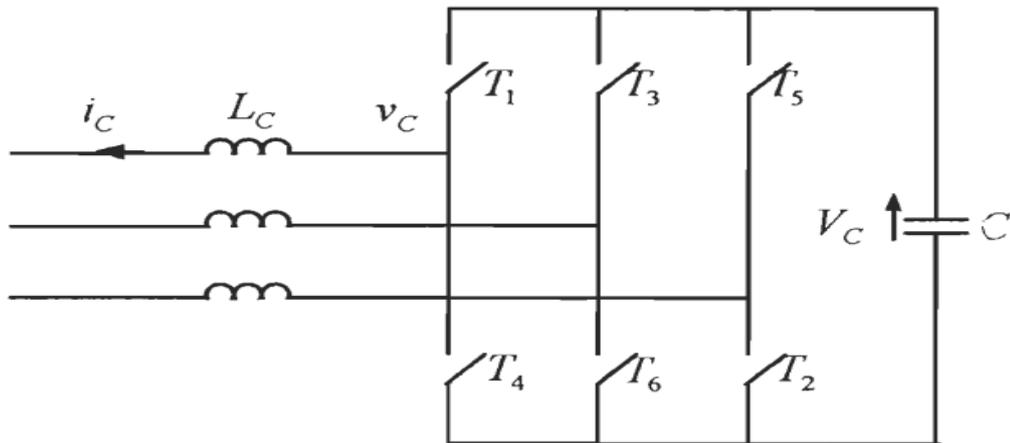


Figure 2.7. Filtre actif de puissance à structure tension

2.3.2. Filtre actif de puissance à structure courant :

La figure (II.3) représente le schéma de principe d'un onduleur de courant. L'inductance L joue le rôle d'une source de courant continu. Le courant I_c traversant cette inductance est maintenu quasiment constant pour ne pas dégrader les performances du filtre actif [].

L'onduleur de courant est relié au réseau par l'intermédiaire d'un filtre passe-bas du second ordre constitué d'une inductance L_c et d'une capacité . Les interrupteurs sont unidirectionnels. Ils sont formés par des transistors commandés à l'ouverture et à la fermeture. Ceux-ci ne pouvant supporter de tension inverse, ils nécessitent une diode en série.

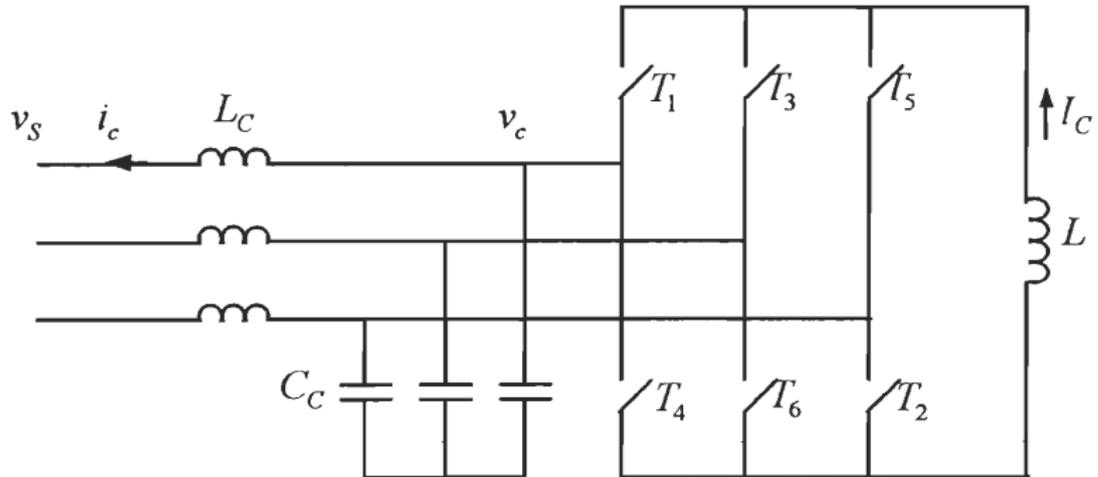


Figure 2.8. Filtre actif de puissance à structure courant

2.3.3. Comparaison des deux structures :

En faible et moyenne puissance : Le stockage de l'énergie dans un condensateur (structure tension) est plus efficace et moins coûteux.

En forte puissance : le stockage de l'énergie dans une inductance (structure courant) est plus adapté.

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

2.4. Structure général d'un filtre actif parallèle à structure tension :

Un filtre actif est constitué généralement de deux parties :

La partie de puissance comporte les blocs de :

- Un onduleur de puissance,
- Un système de stockage d'énergie ;
- Et un filtre de découplage au réseau.

La partie de commande regroupe les éléments suivants :

- L'identification des courants de références ;
- Un régulateur de la tension continue ;
- Un système de commande de l'onduleur de puissance.

2.4.1. Etude et analyse de la partie de puissance :

2.4.1.1. L'onduleur de puissance :

La figure (2.9) montre la configuration la plus répandue de l'onduleur de puissance. Ici le montage est constitué de trois bras connectés en parallèle avec les trois phases du réseau triphasé, chaque bras comporte deux interrupteurs réversibles en courant qui sont des convertisseurs statiques à base de semi-conducteur commandé à l'ouverture et à la fermeture comportant une diode en antiparallèle, la capacité C joue le rôle d'une source de tension continue qui alimente le filtre actif parallèle. La tension V_{dc} à leurs bornes doit également constante pour ne pas dépasser la limite en tension des semi conducteurs d'une part et pour ne pas dégrader les performances et la qualité de filtrage d'autre part.

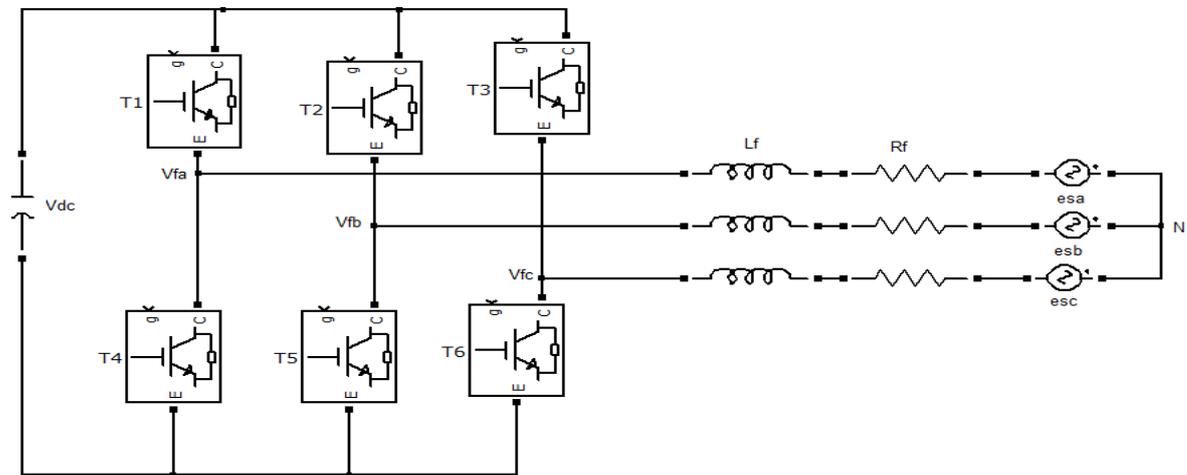


Figure 2.9 : Convertisseur à structure tension à deux niveaux à trois bras

2.4.1.2. Le système de stockage de l'énergie :

Le stockage d'énergie du côté continue se fait souvent par un système capacitif représenté par un condensateur C qui joue le rôle d'une source de tension continue flottante V_e .

La capacité Cdc se calcul de la relation simple suivante :

$$C_{dc} = \frac{I_h}{\varepsilon \cdot \omega_h V_{dc}} \quad (2.1)$$

Avec ω_h la pulsation la plus faible des harmoniques à compenser.

2.4.1.3. Le filtre de découplage au réseau :

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, c'est-à-dire réaliser l'égalité ;

$$\frac{d}{dt} I_{h-ch} = \frac{d}{dt} I_{inj} \quad (2.2)$$

Avec I_{h-ch} le courant harmonique de la charge et I_{inj} le courant injecté par le filtre actif.

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

2.5. Dimensionnement des paramètres du filtre actif parallèle :

2.5.1. Dimensionnement du condensateur de stockage d'énergie :

Les changements transitoires dans la puissance instantanée absorbée par la charge provoquent des fluctuations dans la tension V_{dc} aux bornes du condensateur. L'amplitude de cette fluctuation peut être contrôlée par un choix judicieux de la valeur du condensateur. La surtension maximal que peut subir le condensateur est donnée par : [08]

$$V_{dc-max} = \frac{1}{C_{dc}} \int_{\theta_1}^{\theta_2} i_{dc}(t) dt + V_{dc} \quad (2.3)$$

Avec : $(\theta_1 \text{ et } \theta_2) \in [0, 2\pi]$

La capacité C_{dc} s'exprimera par la relation suivante :

$$C_{dc} = \frac{1}{\Delta V_{dc}} \int_{\theta_1}^{\theta_2} i_{dc}(t) dt \quad (2.4)$$

La valeur moyenne du courant i_{dc} absorbé par le condensateur est donné par :

$$\int_{\theta_1}^{\theta_2} i_{dc}(t) dt = I_{fm} \int_{\theta_1}^{\theta_2} [\sin(\omega t) + \sin(\omega t + 2\pi/3)] dt \quad (2.5)$$

I_{fm} Étant l'amplitude max du courant i_{FA} et ΔV_{dc} les fluctuations de la tension du bus continue sont de l'ordre de 5% de V_{dc} .

2.5.2. Dimensionnement de l'inductance L_f :

Le dimensionnement de L_f est réalisé avec la contrainte que pour une fréquence de commutation donnée, la pente du courant i_f est plus petite que celle d'une porteuse triangulaire définissant cette fréquence de commutation. La pente de la porteuse triangulaire γ est définie par [08] :

$$\gamma = 4V_p f_c \quad (2.6)$$

Telle que : V_p est l'amplitude de l'onde triangulaire, f_c est la fréquence de commutation des interrupteurs du filtre actif.

La pente maximal de i_f , dans le cas d'un filtre actif à point milieu, est donnée par :

$$\gamma = \frac{di_f}{dt} = \frac{0.5 V_{dc} \pm V_{sm}}{L_f} \quad (2.7)$$

D'où une valeur de L_f estimée à :

$$L_f = \frac{0.5 V_{dc} \pm V_{sm}}{4 V_p f_c} \quad (2.8)$$

Où : V_{sm} est l'amplitude de la tension d'alimentation du réseau.

Chapitre 3

Modélisation de l'association réseau électrique pollué-filtre actif parallèle (FAP)

3.1. Introduction :

Vus les nombreux inconvénients que présentent les différentes méthodes de dépollution discutées dans les chapitres précédents, on a rendu l'utilisation des filtres actifs intéressante. Son principe de fonctionnement est d'injecter un courant harmonique en opposition de phase, de même forme et même amplitude que celui généré par la charge polluante.

L'étude par simulation d'un système quelconque passe par sa modélisation. Ainsi dans ce chapitre nous aborderons la modélisation des différentes parties du système global, réseau électrique équilibré, filtre actif parallèle et charge polluante.

3.2. Schéma synoptique de l'association réseau- filtre actif -charge polluante:

Le filtre actif parallèle n'est rien d'autre qu'un onduleur de tension commandé en courant qui possède une source dite flottante (capacité) et qui est connecté au réseau perturbé par un filtre inductif comme représenté par la figure (3.1) [15.]

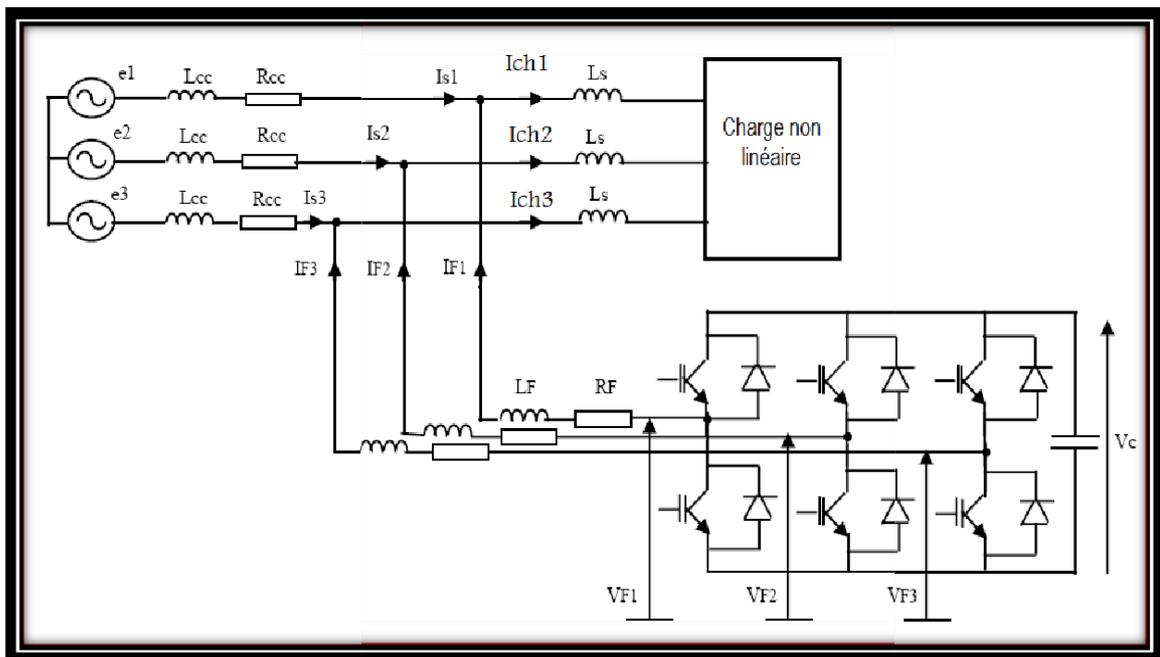


Figure 3.1 : Schéma synoptique de l'association filtre actif - réseau - charge polluante

3.3. Modélisation de l'association réseau-filtre actif-charge polluante :

La modélisation d'un système revient à trouver les équations mathématiques qui décrivent son fonctionnement.

3.3.1. Modélisation du réseau :

Le réseau est assimilable à une source de tension sinusoïdale en série avec une impédance, dite de court circuit, d'où la représentation du réseau par un système de f.e.m. triphasées équilibrées en série avec une impédance (figure 3.2).

$$\begin{matrix} e_1 & \sin(\theta) \\ \{e_2 = \sqrt{3} * 220 * \{ (\theta - 2 * \pi / 3) \\ e_3 & \sin(\theta - 4 * \pi / 3) \end{matrix} \quad (3.1)$$

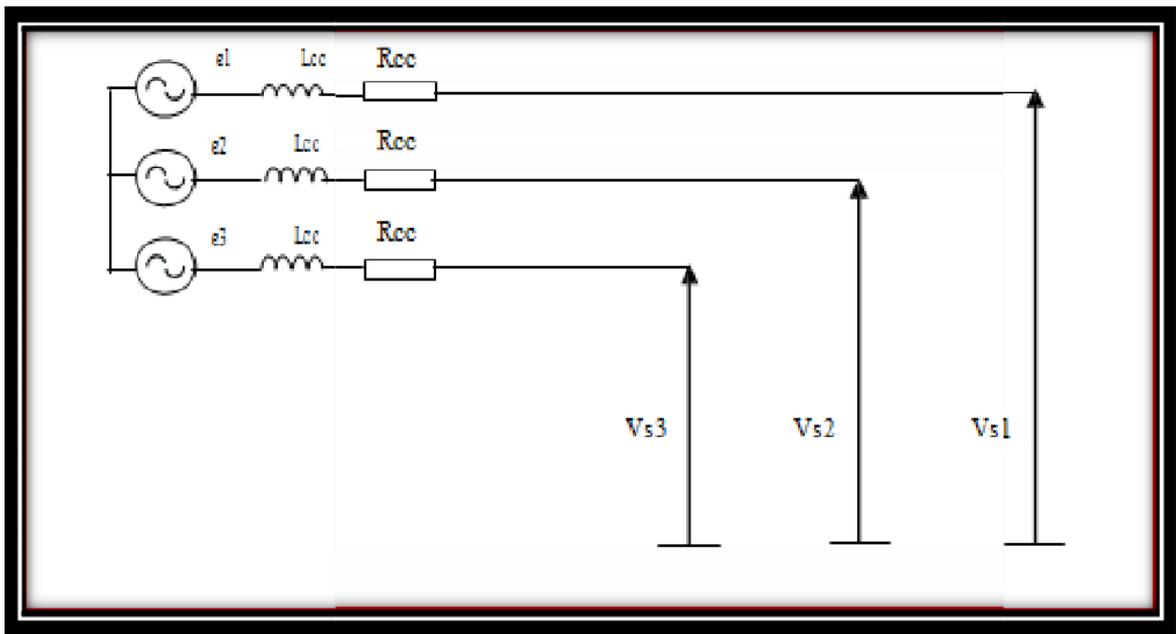


Figure 3.2 : Schéma synoptique d'un réseau triphasé équilibré

3.3.2. Modélisation de la charge polluante [16] :

La charge polluante qu'on vient d'étudier consomme un courant harmonique qui s'écrit sous la forme suivante :

$$\begin{cases} i_{ch1}(t) = I \cdot \cos(\theta - \varphi) + \sum_{h=2}^{\infty} I_h \cdot \cos(h\omega t - \varphi_h) \\ i_{ch2}(t) = I \cdot \cos(\theta - \varphi - \frac{2\pi}{3}) + \sum_{h=2}^{\infty} I_h \cdot \cos(h\omega t - \varphi_h - h \cdot \frac{2\pi}{3}) \\ i_{ch3}(t) = I \cdot \cos(\theta - \varphi - \frac{4\pi}{3}) + \sum_{h=2}^{\infty} I_h \cdot \cos(h\omega t - \varphi_h - h \cdot \frac{4\pi}{3}) \end{cases} \quad (3.2)$$

I : Valeur efficace du courant fondamental.

I_h : Valeur efficace du courant harmonique de rang h.

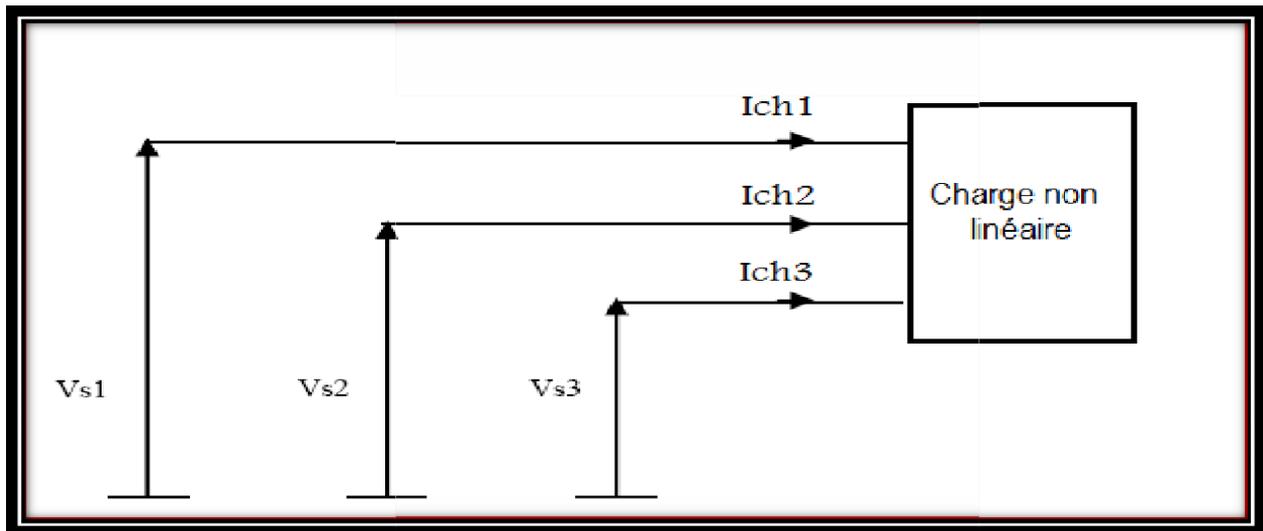


Figure 3.3 : Schéma synoptique d'une charge polluante

3.3.3. Modélisation du filtre actif de puissance :

3.3.3.1. L'onduleur de puissance :

Un onduleur est un convertisseur statique, assurant la conversion continue alternative. Il est constitué de six interrupteurs bidirectionnels en courant et unidirectionnels en tension qui commutent de manière à imposer des tensions simples alternatives en sortie de l'onduleur, figure (3.4).

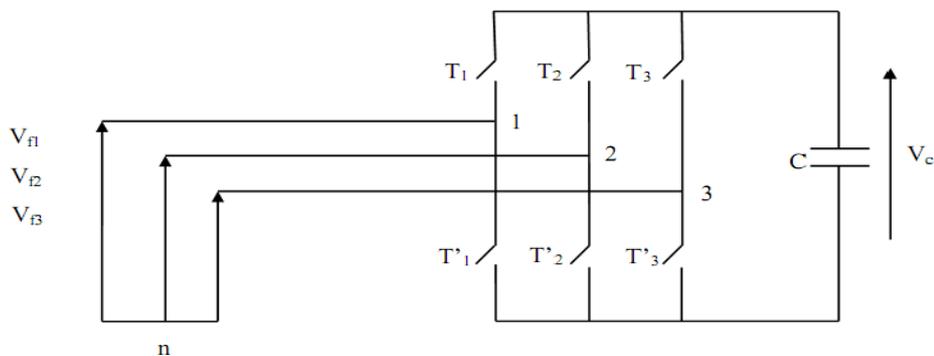


Figure 3.4 : Structure général d'un onduleur

Les interrupteurs supposés idéaux, sont toujours constitués d'un semi-conducteur commandable à l'ouverture et à la fermeture (GTO, IGBT) connecté en antiparallèle avec une diode.

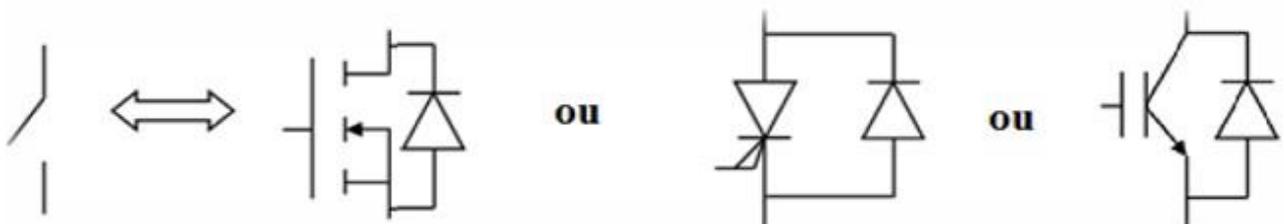


Figure 3.5 : Interrupteurs de puissance

3.3.3.2. Tension à la sortie de l'onduleur :

En considérant les différents états des interrupteurs, on peut déduire l'ensemble des tensions délivrées par l'onduleur pour la configuration triphasée étudiée.

Appelons T_k et T'_k les interrupteurs idéaux, connectés sur la phase k ($k = 1, 2, 3$). C_k et C'_k sont les commandes logiques qui leur sont associées.

On a :

$$C_k = 1 \quad \Rightarrow \quad T_k \text{ passant et } T'_k \text{ ouvert.}$$

$$C'_k = 0 \quad \Rightarrow \quad T_k \text{ ouvert et } T'_k \text{ passant.}$$

On définit les vecteurs des tensions triphasées $[V_f]_n$ et $[V_f]_M$ ainsi que le vecteur des variables logiques $[C]$:

$$[V_f]_n = \begin{bmatrix} V_{f1} \\ V_{f2} \\ V_{f3} \end{bmatrix}, [V_f]_M = \begin{bmatrix} V_{f1M} \\ V_{f2M} \\ V_{f3M} \end{bmatrix}, [C] = \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$[V_f]_M = [C] * V_C \quad (3.4)$$

Les tensions V_{f1M} , V_{f2M} et V_{f3M} , mesurées aux points 1,2 et 3, ne peuvent prendre que les valeurs V_C , $-V_C$ ou 0. En tenant compte de l'absence de tension homopolaire, les tensions simples délivrées par l'onduleur sont données par :

$$\begin{bmatrix} V_{f1} \\ V_{f2} \\ V_{f3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2/3 & -1/3 & -1/3 \\ -1/3 & 2/3 & -1/3 \\ -1/3 & -1/3 & 2/3 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V_{f1M} \\ V_{f2M} \\ V_{f3M} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$\begin{bmatrix} V_{f1} \\ V_{f2} \\ V_{f3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2/3 & -1/3 & -1/3 \\ -1/3 & 2/3 & -1/3 \\ -1/3 & -1/3 & 2/3 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{bmatrix} * V_C \quad (3.6)$$

En introduisons la transformation de Concordia, on peut calculer les composantes des vecteurs tensions

($V_{f\alpha}$, $V_{f\beta}$) dans le plan (α - β) ($V_{f\alpha}$ et $V_{f\beta}$) comme montre la relation (3.7).

$$\begin{bmatrix} V_{f\alpha} \\ V_{f\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{2/3} * \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V_{f1} \\ V_{f2} \\ V_{f3} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

En remplaçons la relation (3.6) dans (3.7), on obtient :

$$\begin{bmatrix} V_{f\alpha} \\ V_{f\beta} \\ V_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{bmatrix} \cdot V_C \quad (3,8)$$

Le tableau (3.1) donne les valeurs de tension fournit à la sortie de l'onduleur de puissance ainsi que, celles des composantes en quadratures $V_{f\alpha}$ et $V_{f\beta}$.

Tableau (3.1) : Tensions fournies par un onduleur de tension à deux niveaux :

N°	C_1	C_2	C_3	V_{aM}	V_{bM}	V_{cM}	V_{f1}	V_{f2}	V_{f3}	$V_{f\alpha}/V_{dc}$	$V_{f\beta}/V_{dc}$
0	0	0	0	$-V_{dc}/2$	$-V_{dc}/2$	$-V_{dc}/2$	0	0	0	0	0
1	1	0	0	$+V_{dc}/2$	$-V_{dc}/2$	$-V_{dc}/2$	$2V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	$\sqrt{2}/3$	0
2	1	1	0	$+V_{dc}/2$	$+V_{dc}/2$	$-V_{dc}/2$	$+V_{dc}/3$	$+V_{dc}/3$	$-2V_{dc}/3$	$\sqrt{2}/2\sqrt{3}$	$\sqrt{2}/2$
3	0	1	0	$-V_{dc}/2$	$+V_{dc}/2$	$-V_{dc}/2$	$-V_{dc}/3$	$2V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	$-\sqrt{2}/2\sqrt{3}$	$\sqrt{2}/2$
4	0	1	1	$-V_{dc}/2$	$+V_{dc}/2$	$+V_{dc}/2$	$-2V_{dc}/3$	$+V_{dc}/3$	$+V_{dc}/3$	$-\sqrt{2}/3$	0
5	0	0	1	$-V_{dc}/2$	$-V_{dc}/2$	$+V_{dc}/2$	$-V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	$2V_{dc}/3$	$-\sqrt{2}/2\sqrt{3}$	$-\sqrt{2}/2$
6	1	0	1	$+V_{dc}/2$	$-V_{dc}/2$	$+V_{dc}/2$	$+V_{dc}/3$	$-2V_{dc}/3$	$+V_{dc}/3$	$\sqrt{2}/2\sqrt{3}$	$-\sqrt{2}/2$
7	1	1	1	$+V_{dc}/2$	$+V_{dc}/2$	$+V_{dc}/2$	0	0	0	0	0

3.4. Techniques de commande du filtre actif de puissance parallèle :

3.4.1. Commande en plein onde :

C'est la stratégie de commande la plus simple à mettre en œuvre. Par contre la tension de sortie est très riche en harmoniques de rang faible et donc de fréquence basse. Le filtrage est difficile dans ce mode de commande. Les interrupteurs travaillent à la fréquence des grandeurs électriques de sortie. Pour un convertisseur à deux états, un seul point de fonctionnement est possible en pleine onde, la durée de conduction est égale à une demi période.

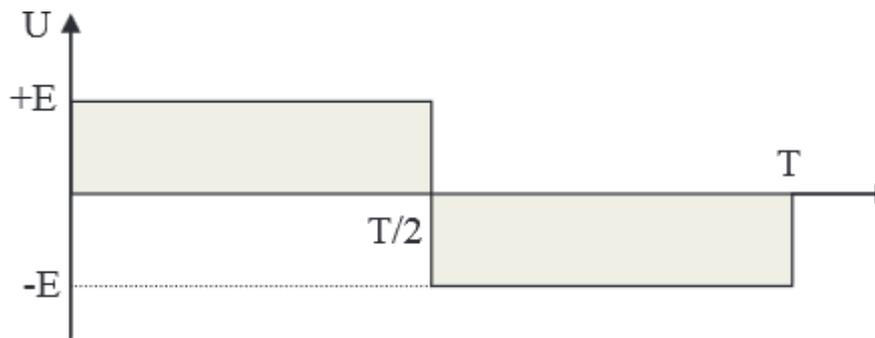


Figure 3.6 : Allure des potentiels de phase lors d'un fonctionnement en pleine onde

- ❖ $T1$ Est commandé entre 0 et π , non commandé entre π et 2π .
- ❖ Les commandes de $T2$ et $T3$ sont respectivement décalés de $2\pi/3$ et $4\pi/3$ en arrière.
- ❖ Les commandes de $T4$, $T5$ et $T6$ sont respectivement complémentaires de celles de $T1$, $T2$ et $T3$.

3.4.2. Commande par hystérésis :

Dans cette partie, on présente la commande par hystérésis ou bang-bang des onduleurs multi-niveaux. Le principe général de cette stratégie est de comparer le courant de référence I_{ref} au courant réel I_{reel} et à partir de l'écart entre les deux courants, on déduit la commande des interrupteurs du convertisseur.

Ce type de commande permet de fixer un courant de référence I_{ref} dans le récepteur. On montre que les performances de cette stratégie sont fortement liées à la largeur, h , de la bande d'hystérésis, du point de vue poursuite de la référence. L'ondulation du courant est imposée par une bande d'hystérésis. D'une manière générale, cette stratégie permet une réaction rapide à des variations de la consigne ou des paramètres de la partie puissance.

Un comparateur à hystérésis mesure la différence entre le courant réel et sa référence figure (3.6).

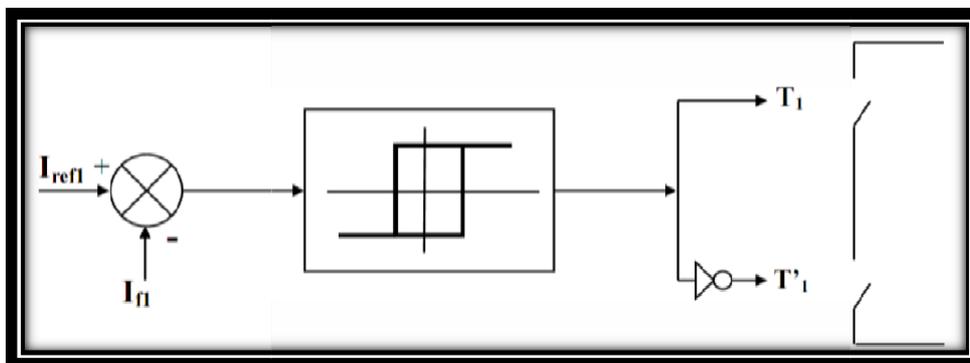


Figure 3.7 : Schéma de principe d'une commande par hystérésis

Malgré sa simplicité de mise en œuvre, sa robustesse et sa bonne commande présente certains inconvénients à savoir :

- ✓ La fréquence de commutation n'est pas fixe, elle dépend de la bande d'hystérésis et de la dérivée du courant.
- ✓ La somme des trois courants n'est pas forcément nulle, ce qui crée un déséquilibre des courants qui dépend de la bande d'hystérésis.
- ✓ Des composantes harmoniques basses fréquences, voire une composante continue, peuvent apparaître sur le signal de sortie. La composante continue est due au fait que la forme de l'alternance positive peut différer de celle de l'alternance négative, au signe près.

3.4.3. Commande par modulation de largeur de l'impulsion (MLI) :

Pour résoudre le problème de la maîtrise de la fréquence de commutation, une nouvelle stratégie de commande est introduite dite : la technique de commande par MLI.

Ce type de commande peut être réalisé selon différentes techniques, à savoir :

MLI à porteuse, regroupe les techniques suivantes :

- MLI à échantillonnage naturelle (intersective),
- MLI régulier symétrique ou la référence est échantillonné à chaque période de la porteuse,
- MLI régulier asymétrique ou la référence est échantillonné à chaque demi-période de la porteuse.
 - MLI à élimination (ou minimisation) d'harmoniques,
 - MLI vectorielle.

La MLI naturelle est la méthode la plus simple et la plus fréquemment utilisée. Cette technique de commande met en œuvre d'abord un régulateur qui détermine la tension de référence de l'onduleur (l'onde modulatrice) à partir de l'écart entre le courant mesuré et sa référence. Cette dernière est ensuite comparée avec un signal triangulaire dit porteuse à fréquence élevée fixant la fréquence de commutation.

La sortie du comparateur fournit l'ordre de commande des interrupteurs. La figure (3 .8) donne le schéma de principe de cette technique. [01]

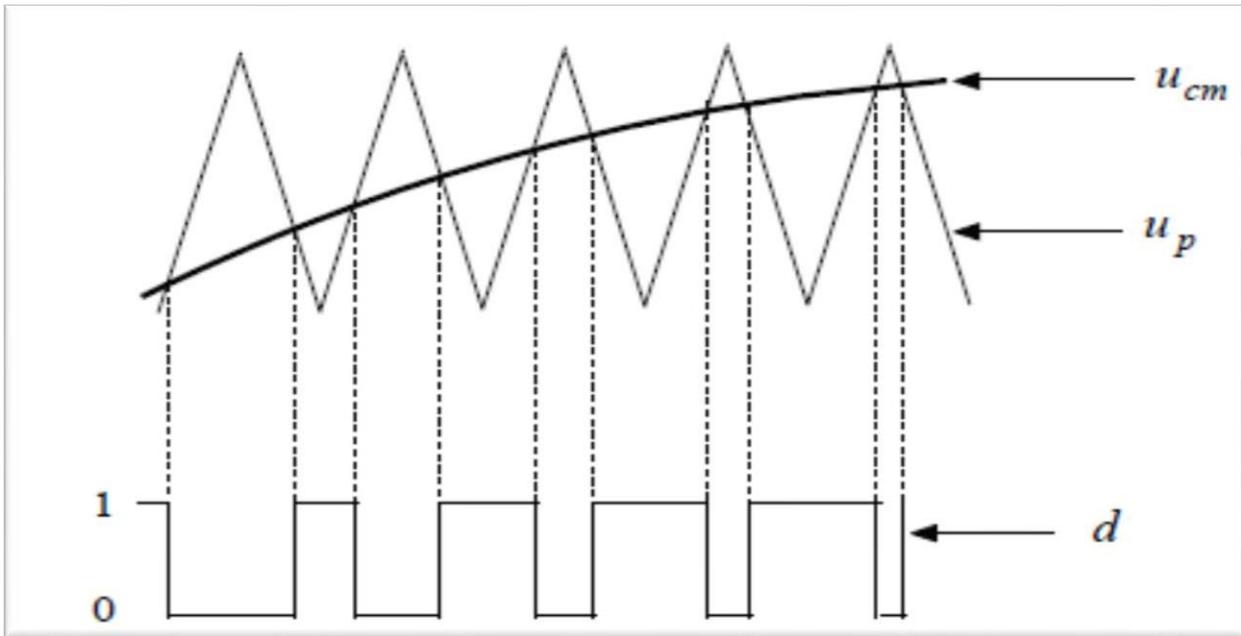


Figure (3.8) : Principe de la commande par MLI

U_{cm} Signal sinusoïdal (référence)

U_p Signal triangulaire (porteuse)

3.4.3.1. MLI sinus triangle :

V_{ref} Le signal de la tension de référence sinusoïdal d'amplitude V^* et de fréquence $f_r = \frac{1}{T_{ref}}$

V_p Le signal de la porteuse en dent de sie triangulaire d'amplitude V^* et de fréquence $f_p = \frac{1}{T_p}$

La comparaison des deux signaux précédents fournit le signal de commande des interrupteurs comme montre la figure (3.9).

Les paramètres de réglage de la MLI sont :

- Le coefficient de réglage : $r = \frac{V_r^*}{V_p^*}, 0 < r < 1$ (II.59)

- l'indice de modulation : $m = \frac{f}{f_r}, m > 1$ (II.60)

Les signaux de commande sont envoyés suivant l'algorithme ci-dessous:

$$\left[\begin{array}{l} \text{si } V_{ref} > V_p \\ C_1 = 1 \text{ et} \\ V_{io} = U_{dc} \\ \text{sinon } V_{ref} < V_p \\ C_1 = 0 \text{ et} \\ V_{io} = -U_{dc} \end{array} \right. \quad \text{(II.61)}$$

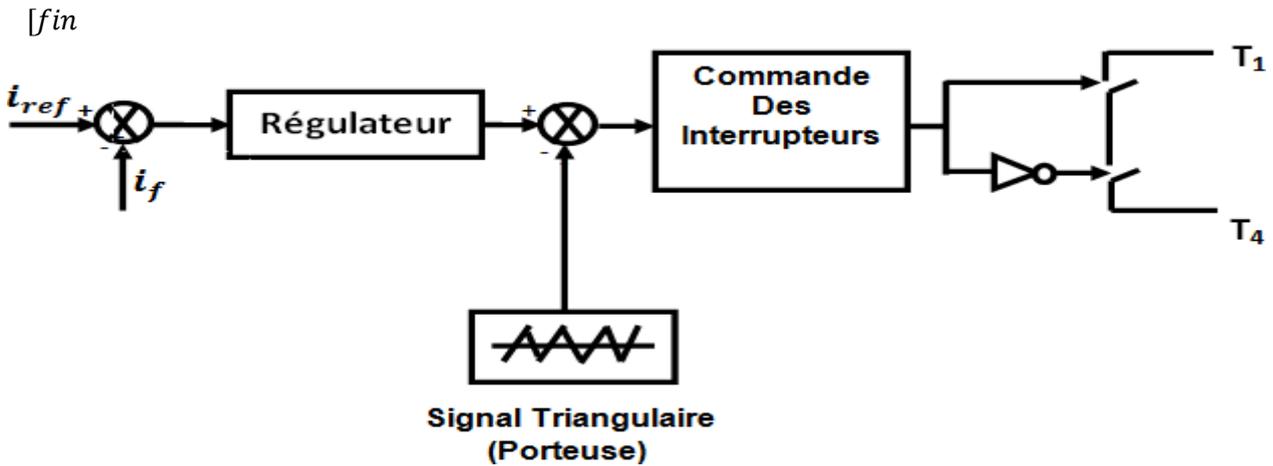


Figure (3.9) : Commande des interrupteurs par MLI

3.5. Etude de la partie commande [12][15] :

3.5.1. Identification des courants de référence :

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

Nous avons choisi de mettre en œuvre une variante de la méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées.

3.5.1.1. Principe de fonctionnement de la méthode des puissances instantanées :

Dans la méthode classique des puissances instantanées, on utilise généralement, soit un filtre passe-haut (FPH), soit un filtre passe-bas (FPB), afin de ne garder que la composante harmonique du signal. La figure 5.6 ci dessous représente le principe de fonctionnement de cette méthode.

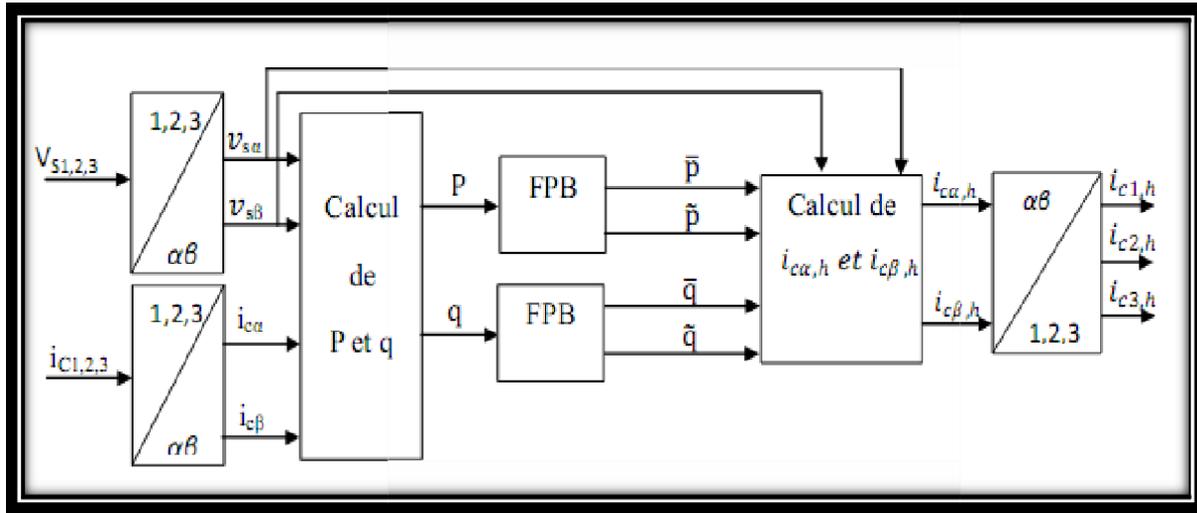


Figure 3.10 : Détermination des courants de référence du filtre actif par la méthode classique des puissances active et réactive instantanées

La méthode d'identification des courants harmoniques, est plus simple. Elle consiste à éliminer la composante continue des puissances active et réactive instantanées, ce qui est relativement facile à réaliser. On note respectivement les vecteurs des tensions simples au point de raccordement $[V_s]$ et des courants de charge $[I_{ch}]$ d'un système triphasé et équilibré par :

$$[V_s] = \begin{bmatrix} V_{s1} \\ V_{s2} \\ V_{s3} \end{bmatrix} \quad [I_{ch}] = \begin{bmatrix} I_{ch1} \\ I_{ch2} \\ I_{ch3} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Soient respectivement (V_{s1}, V_{s2}, V_{s3}) et $(I_{ch1}, I_{ch2}, I_{ch3})$ les tensions simples et les courants de ligne d'un système triphasé équilibré. On suppose que les tensions sont sinusoïdales. La transformation de ces grandeurs triphasées en composantes $\alpha\beta$ par l'application de la transformation de Concordia donne les expressions suivantes :

$$\begin{bmatrix} V_{s\alpha} \\ V_{s\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{s1} \\ V_{s2} \\ V_{s3} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

$$\begin{bmatrix} I_{ch\alpha} \\ I_{ch\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ch1} \\ I_{ch2} \\ I_{ch3} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

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

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & V_{s\beta} \\ -V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ch\alpha} \\ i_{ch\beta} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

En remplaçant les tensions et les courants diphasés par leur homologue triphasé on obtient :

$$P = V_{s\alpha} * I_{ch\alpha} + V_{s\beta} * I_{ch\beta} \quad (3.13)$$

$$P = V_{s1} * I_{ch1} + V_{s2} * I_{ch2} + V_{s3} * I_{ch3} \quad (3.14)$$

De la même manière, la puissance imaginaire instantanée peut s'écrire sous la forme suivante :

$$q = V_{s\alpha} * I_{ch\beta} - V_{s\beta} * I_{ch\alpha} \quad (3.15)$$

$$q = \frac{-1}{\sqrt{3}} [(V_{s1}-V_{s2})*i_{ch3}+(V_{s2}-V_{s3})*I_{ch1}+(V_{s3}-V_{s1})* i_{ch2}] \quad (3.16)$$

À partir de la relation (3.12), on obtient :

$$\begin{bmatrix} i_{ch\alpha} \\ i_{ch\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & V_{s\beta} \\ -V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \frac{1}{V_{s\alpha}^2+V_{s\beta}^2} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

Ou pose : $\nabla = V_{s\alpha}^2 + V_{s\beta}^2$

$$\begin{bmatrix} i_{ch\alpha} \\ i_{ch\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\nabla} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & - \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{p} \\ \bar{q} \end{bmatrix} + \frac{1}{\nabla} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

Ou :

$$\begin{bmatrix} i_{ch\alpha} \\ i_{ch\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\nabla} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & - \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{p} \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{1}{\nabla} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{q} \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

Les puissances instantanées selon les axes α et β peuvent s'écrire :

$$\begin{bmatrix} p_\alpha \\ q_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{s\alpha} * i_{ch\alpha} \\ V_{s\beta} * i_{ch\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{s\alpha} * i_{ch\alpha p} \\ V_{s\beta} * i_{ch\beta p} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{s\alpha} * i_{ch\alpha q} \\ V_{s\beta} * i_{ch\beta q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \\ q_{\beta q} \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

$$\begin{cases} P_{\alpha p} = \frac{V_{s\alpha}}{\Delta} * P \\ P_{\beta p} = \frac{V_{s\beta}}{\Delta} * P \end{cases} \quad \begin{cases} P_{\alpha q} = \frac{V_{s\alpha}}{\Delta} * q \\ P_{\beta q} = \frac{V_{s\beta}}{\Delta} * q \end{cases} \quad (3.21)$$

$P_{\alpha p}$ Puissance instantanée active selon l'axe α .

$P_{\beta p}$ Puissance instantanée active selon l'axe β .

$P_{\alpha q}$ Puissance instantanée réactive selon l'axe α . $P_{\beta q}$

Puissance instantanée réactive selon l'axe β .

D'après les expressions (3-21), on peut écrire :

$$P = P_{Ip} + P_{\beta p} + P_{Iq} + P_{\beta q} \quad (3.22)$$

L'analyse de l'équation (5.14) nous ramène aux conclusions suivantes :

- La somme des puissances instantanées $P_{\alpha p}$ et $P_{\beta q}$ coïncide avec la puissance instantanée dans un circuit triphasé.

- La puissance réactive correspond à la partie de la puissance instantanée qui dépend de q .
- Ces puissances $P_{\alpha q}$ et $P_{\beta q}$ s'annulent entre elles et elles n'apportent aucune contribution au transfert de puissance instantanée entre la source et la charge.

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

$$\begin{cases} p = \bar{p} + \tilde{p} \\ q = \bar{q} + \tilde{q} \end{cases} \quad (3.23)$$

\bar{p} puissance continue liée à la composante fondamentale active du courant.

\bar{q} puissance continue liée à la composante fondamentale réactive du courant.

\tilde{p} et \tilde{q} sont des puissances alternatives liées à la somme des composantes harmoniques du courant.

3.5.1.2. Séparation des puissances perturbatrices :

Après avoir identifié les pulsations des puissances instantanées, le filtre de puissance chargé d'isoler les puissances active et réactive conventionnelles peut être dimensionné. Deux circuits constitués, l'un d'un filtre passe bas avec un soustracteur, et l'autre d'un filtre passe haut peuvent être employés. Les deux types de filtres d'extraction sont représentés dans la figure (3.12) suivante :

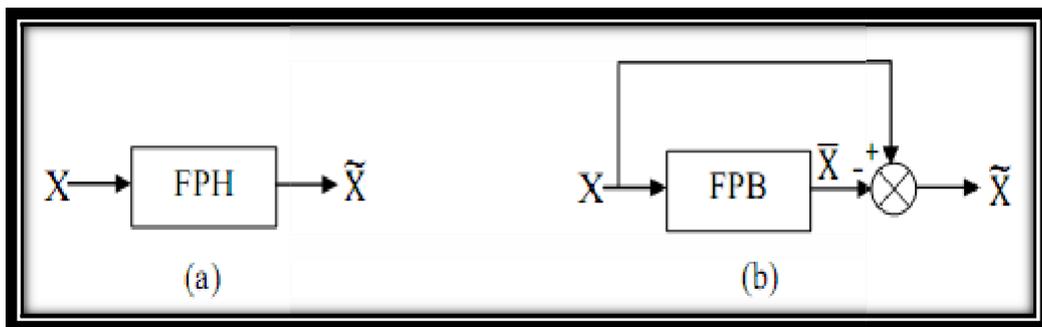


Figure 3.11 : Deux types classiques de filtres d'extraction de la composante harmonique

3.5.1.3. Calcul des courants perturbateurs :

En considérant les équations (3-19) et (3-23) nous pouvons séparer le courant dans le repère $(\alpha - \beta)$ en trois composantes active et réactive à la fréquence fondamentale et la somme des harmoniques:

$$\begin{bmatrix} i_{ch\alpha} \\ i_{ch\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{p} \\ \bar{q} \end{bmatrix} + \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

Les courants harmoniques triphasés sont obtenus à partir des courants diphasés $i_{ch\alpha,h}$ et $i_{ch\beta,h}$ par la transformation inverse de Concordia comme suit :

$$\begin{bmatrix} i_{ch1-h} \\ i_{ch2-h} \\ i_{ch3-h} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ch\alpha-h} \\ i_{ch\beta-h} \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

Si V et $I_{ch1,1}$ représentent respectivement les valeurs efficaces de la tension et du courant fondamental et φ_1 , le déphasage entre eux, alors on peut écrire :

$$\begin{cases} \tilde{p} = 3 V I_{ch1-1} \cos \varphi_1 \\ \tilde{q} = 3 V I_{ch1-1} \sin \varphi_1 \end{cases} \quad (3.26)$$

Les termes \bar{p} et \tilde{q} sont respectivement équivalents à la puissance active et réactive conventionnelles. De cette manière l'élimination des courants harmoniques revient à compenser les composantes alternatives \tilde{q} et \tilde{p} . La suppression des courants réactifs revient à compenser la composante continue \bar{q} .

3.5.1.4. Algorithme d'identification :

La figure (3.13) résume l'algorithme d'identification des courants de références basé sur la méthode des puissances active et réactive instantanées.

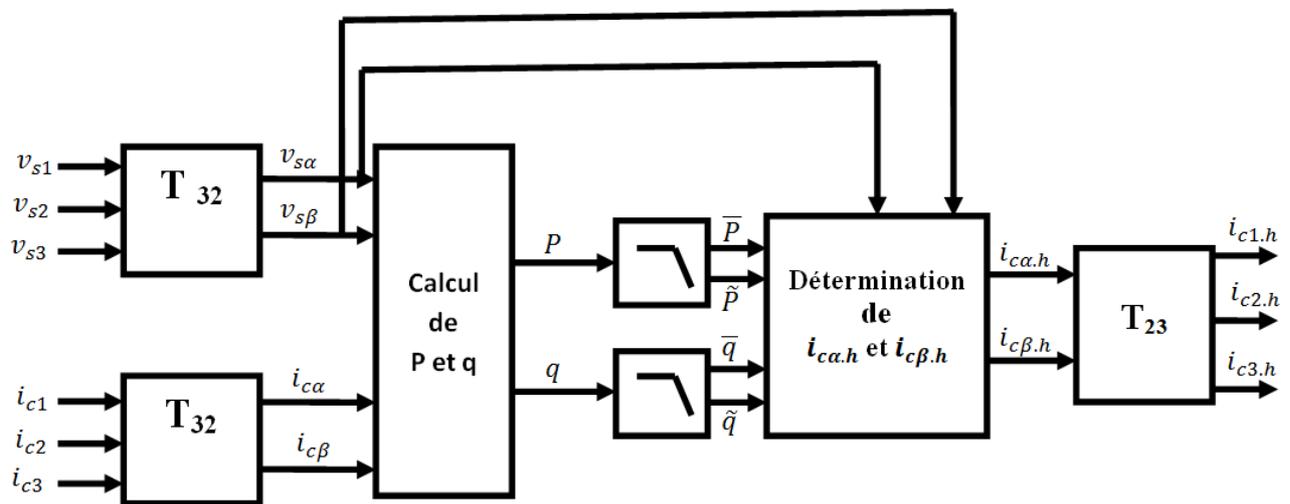


Figure (3.12) : Algorithme d'identification de la méthode Des puissances actives et réactives instantanées

3.6. Régulation de la tension continue :

La détermination des courants de référence sinusoïdaux du réseau nécessite une régulation de la tension du bus continu du FAP, non seulement pour générer l'amplitude des courants de référence mais aussi pour :

- Maintenir cette tension à un niveau fixe tout en assurant une compensation des pertes dans le filtre actif ;
- Limiter ses variations en régime dynamique afin de ne pas détériorer les performances du filtre actif.

La tension moyenne V_{dc} aux bornes du condensateur doit être maintenue à une valeur fixe. Les pertes dans le filtre actif (interrupteurs et filtre de sortie) sont la principale cause susceptible de modifier cette tension. La régulation de la tension continue aux bornes du condensateur de stockage d'énergie doit se faire par l'adjonction des courants fondamentaux actifs dans les courants de référence.

La sortie du régulateur P_c s'ajoute, à un signe près, à la puissance active perturbatrice et donne lieu à un courant fondamental actif corrigeant ainsi V_{dc} . La puissance représente la puissance active nécessaire pour maintenir la tension V_{dc} égale à la valeur de la tension de référence souhaitée (V_{dc-ref}).

En négligeant les pertes de commutations dans l'onduleur ainsi que l'énergie stockée dans l'inductance du filtre de sortie, la relation entre la puissance absorbée par le filtre actif et la tension aux bornes du condensateur peut s'écrire sous la forme suivante :

$$P_c = C \cdot V_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} \quad (3.27)$$

dt

Notons que la relation est non linéaire. Pour des faibles variations de la tension V_{dc} autour de sa référence V_{dc-ref} , elle peut être linéarisée à travers les relations suivantes:

$$P_c = C \cdot V_{dc-ref} \frac{d(V_{dc})}{dt} \quad (3.28)$$

$$\Rightarrow V_{dc}(s) = \frac{P_c(s)}{V_{dc-ref} \cdot C_{dc} \cdot s} \quad (3.29)$$

A partir de la relation (3.20), et en prenant en compte le régulateur proportionnel (K_c), la boucle de régulation de la tension continue peut être représentée par le schéma de la figure (3.14). Le choix du paramètre K_c aura pour objectif d'obtenir un temps de réponse minimal afin de ne pas nuire à la dynamique du filtre actif [1, 10].

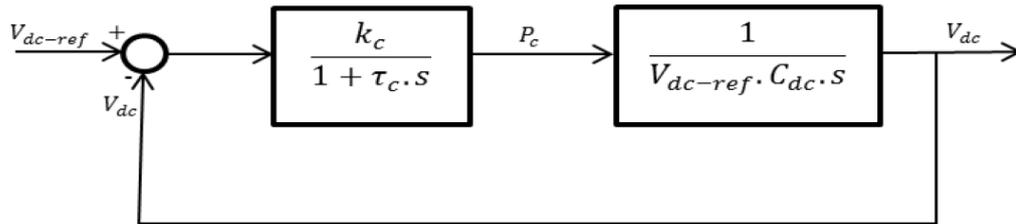


Figure 3.13 : Boucle de régulation de la tension continue

3.7. Régulation du courant du filtre actif parallèle

Nous pouvons écrire la relation suivante caractérisant le courant du filtre actif i_f :

$$L_f \cdot \frac{d}{dt} i_f = V_f - V_s \tag{3.30}$$

Notons par Δi_f la différence entre le courant de référence et le courant mesuré à partir de la relation suivant :

$$\Delta i_f = i_{ref} - i_f \tag{3.31}$$

A partir des équations (III.24) et (III.25), nous obtenons l'expression ci-dessous :

$$L_f \cdot \frac{d}{dt} \Delta i_f = \left(V_s + L_f \frac{d}{dt} i_{ref} \right) - V_f \tag{3.32}$$

Le premier terme de la partie droite de la relation (III.5) peut être défini comme tension de référence (V_{f-ref}), ce qui nous donne l'expression suivante :

$$V_{f-ref} = V_s + L_f \frac{d}{dt} i_{ref} \tag{3.33}$$

L'écart entre V_{f-ref} et V_f produit alors une erreur sur le courant. Selon la relation (3.27), la tension de référence est composée de deux termes à fréquences différentes.

Le premier représente la tension du réseau V_s directement mesurable. Le second est égal à la chute de tension aux bornes de l'inductance L_f , lorsque celle-ci est traversée par un courant égal à celui de référence. Ce terme doit être élaboré par un régulateur de courant, comme le montre la figure 3.15.

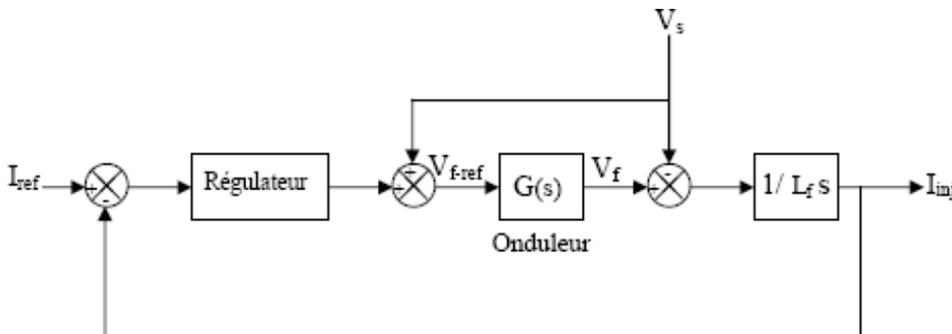


Figure 3.14 : Schéma de régulation des courants du filtre actif parallèle

Dans ce schéma, $G(s)$ représente l'onduleur qui peut être modélisé par la relation suivante :

$$\begin{cases} G(s) = \frac{K}{1+s} \\ K = \frac{V_{dc}}{2V_p} \end{cases} \quad (3.34)$$

Avec :

V_{dc} la tension du côté continu de l'onduleur,

V_p l'amplitude de la porteuse triangulaire et (τ) représentant le retard causé par le calcul des courants perturbateurs.

Le régulateur doit satisfaire les objectifs généraux de la régulation ainsi les contraintes liées au rejet des perturbations [1, 3].

Conclusion :

La modélisation de l'association entre un réseau électrique pollué par des charges non linéaires et un filtre actif parallèle (FAP) constitue une étape cruciale pour évaluer l'efficacité du filtre dans l'atténuation des harmoniques de courant. À travers cette modélisation, nous avons pu représenter de manière rigoureuse le comportement dynamique du système électrique en présence de perturbations harmoniques, tout en intégrant la structure de commande et de génération de signaux du FAP.

Les équations différentielles et les schémas blocs obtenus permettent de simuler précisément l'interaction entre la charge polluante, le réseau et le filtre. Cette approche offre une base solide pour la mise en œuvre de stratégies de commande avancées, visant à améliorer la qualité de l'énergie en réduisant la distorsion harmonique et en assurant une compensation rapide et efficace des courants perturbateurs. Ainsi, cette modélisation constitue un fondement essentiel pour la validation des performances du filtre actif dans les chapitres suivants, à travers des simulations numériques et des analyses spectrales des signaux électriques.

Chapitre 4

Simulation numérique de l'association réseau électrique pollué-filtre actif parallèle (FAP)

4.1. Simulation numérique :

Afin d'évaluer l'efficacité des différentes stratégies de commande abordées dans le chapitre précédent, nous présentons dans cette section plusieurs modèles de simulation numérique développés sous l'environnement Matlab/Simulink. Ces modèles sont basés sur la topologie d'un filtre actif parallèle à deux niveaux, utilisant trois techniques de modulation de largeur d'impulsion (MLI) : l'hystérésis, la MLI intersective.

Pour cette étude, deux types de charges sont considérés : une charge purement résistive R_{ch} et une charge résistive-inductive $R_{ch}L_{ch}$. Les paramètres utilisés dans les simulations sont résumés dans le tableau (4.1).

Tableau (4.1) : Paramètres de simulation numérique concernées les modèles étudiés :

paramètres	Valeurs numériques
Réseau d'alimentation	
Tension efficace E_s	230 V
Fréquence f	50 Hz
Résistance R_s	0.25 m Ω
Inductance L_s	19.4 μ H
Charge non linéaire	
L_c (Coté réseau)	0.5 mH
$R_{ch, ch}$ (Coté continu)	6 Ω , 50 mH
Filtre actif	
Tension continue de référence V_{dc}	$460\sqrt{2}$
Inductance du filtre de sortie L_f	1 mH
Fréquence de commutation f_s	10 Khz
Paramètres de commande	
Largeur de la bande d'hystérésis	2A
Amplitude de la porteuse	10 pu
T_s (Période d'échantillonnage)	2 e-4

4.1.1 : Etude du système avant insertion du filtre actif parallèle :

Le comportement du système avant l'insertion du filtre actif parallèle est illustré par les figures (4.1) à (4.3). Celles-ci présentent respectivement la forme d'onde du courant de la source, son spectre harmonique, ainsi que la superposition de ce courant avec la tension de la source pour la phase A.

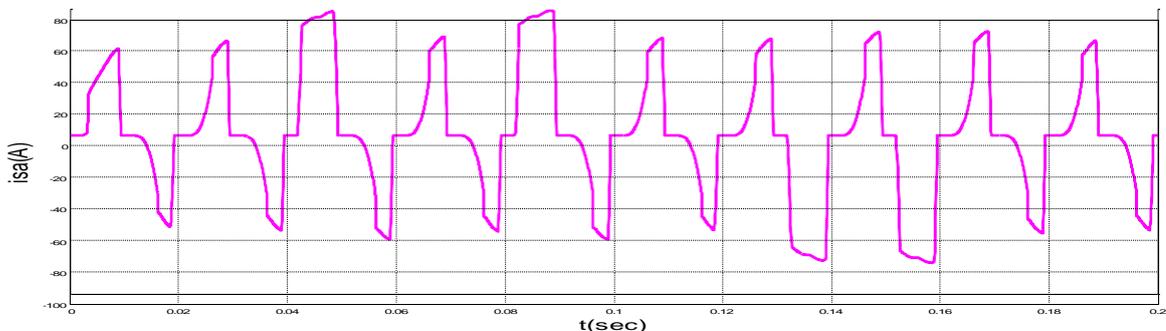


Figure (4.1) : Formes d'ondes du courant isa avant filtrage actif

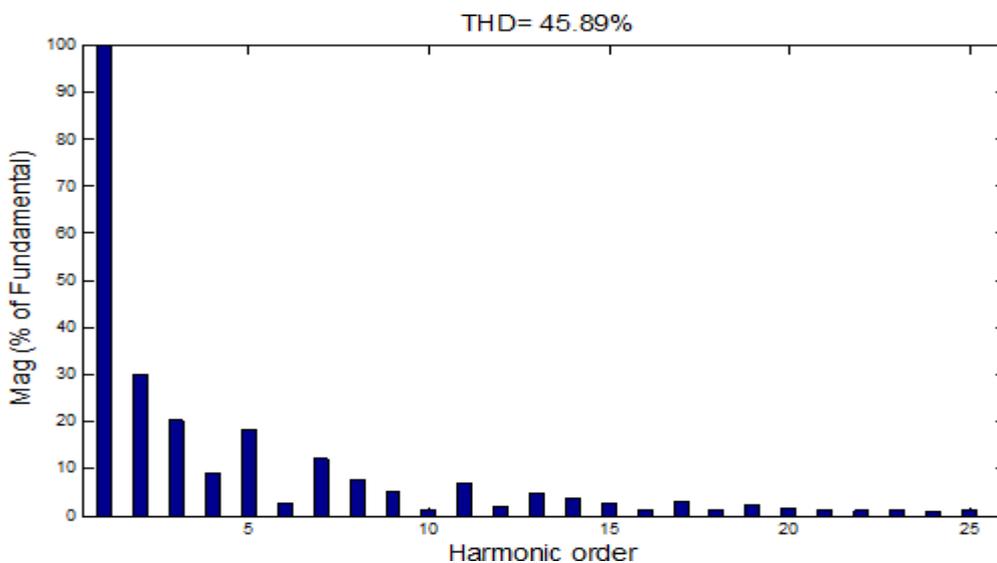
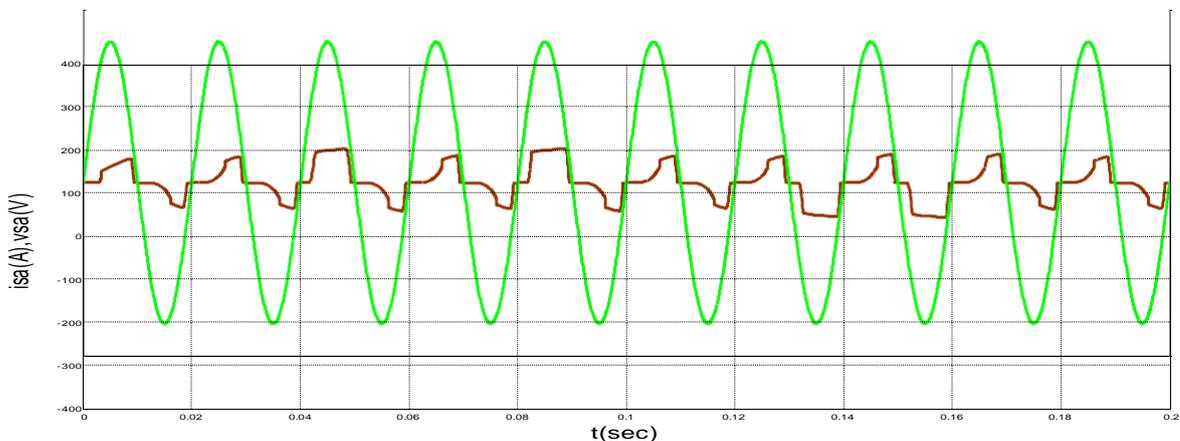


Figure (4.2) : Spectre harmonique du courant isa avant filtrage



4.1.2. Application du filtre actif parallèle :

4.1.2.1. Cas d'une charge de type R :

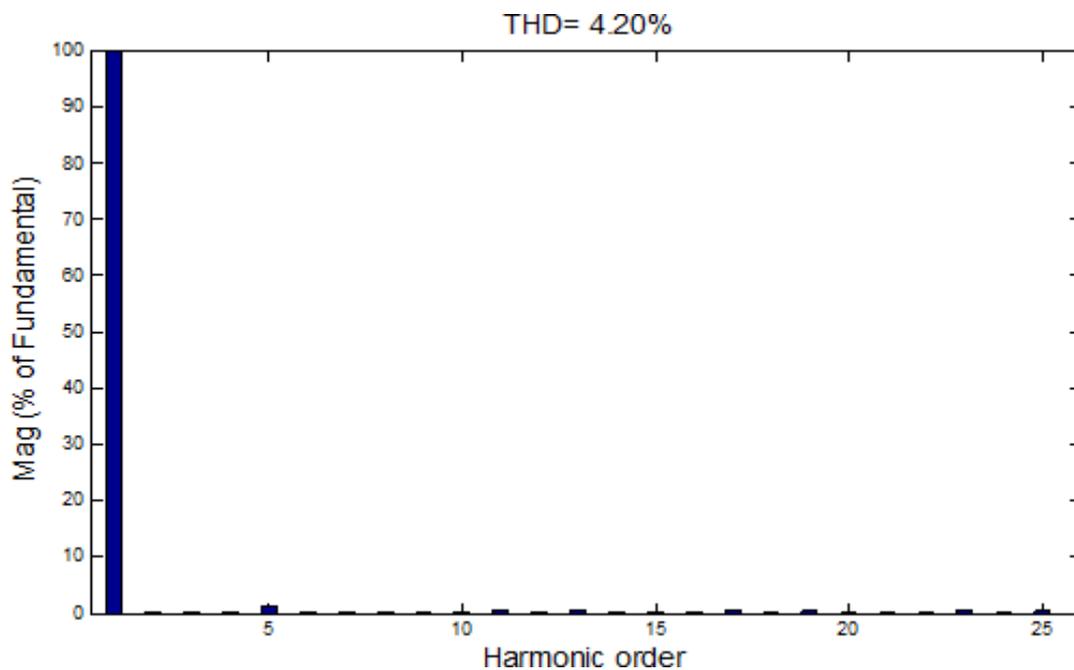


Figure (4.4) : Spectre harmonique du courant i_{sa} après filtrage (hystérésis)

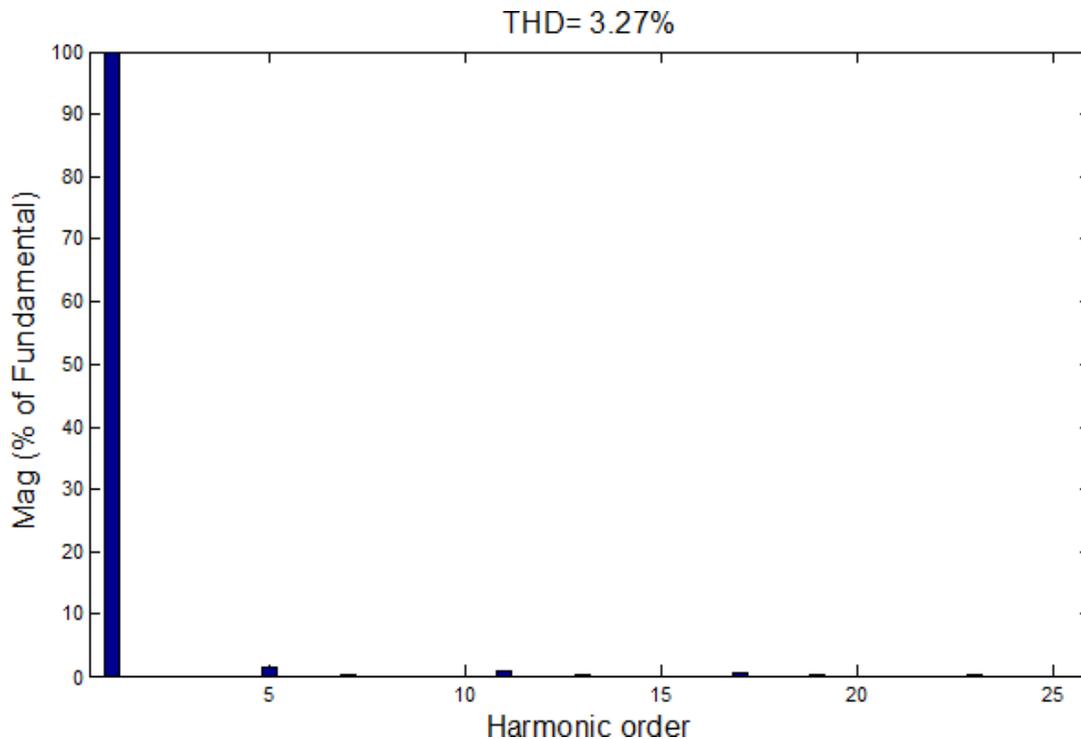


Figure (4.5) : Spectre harmonique du courant i_{sa} après filtrage (MLI)

Commande hystérésis :

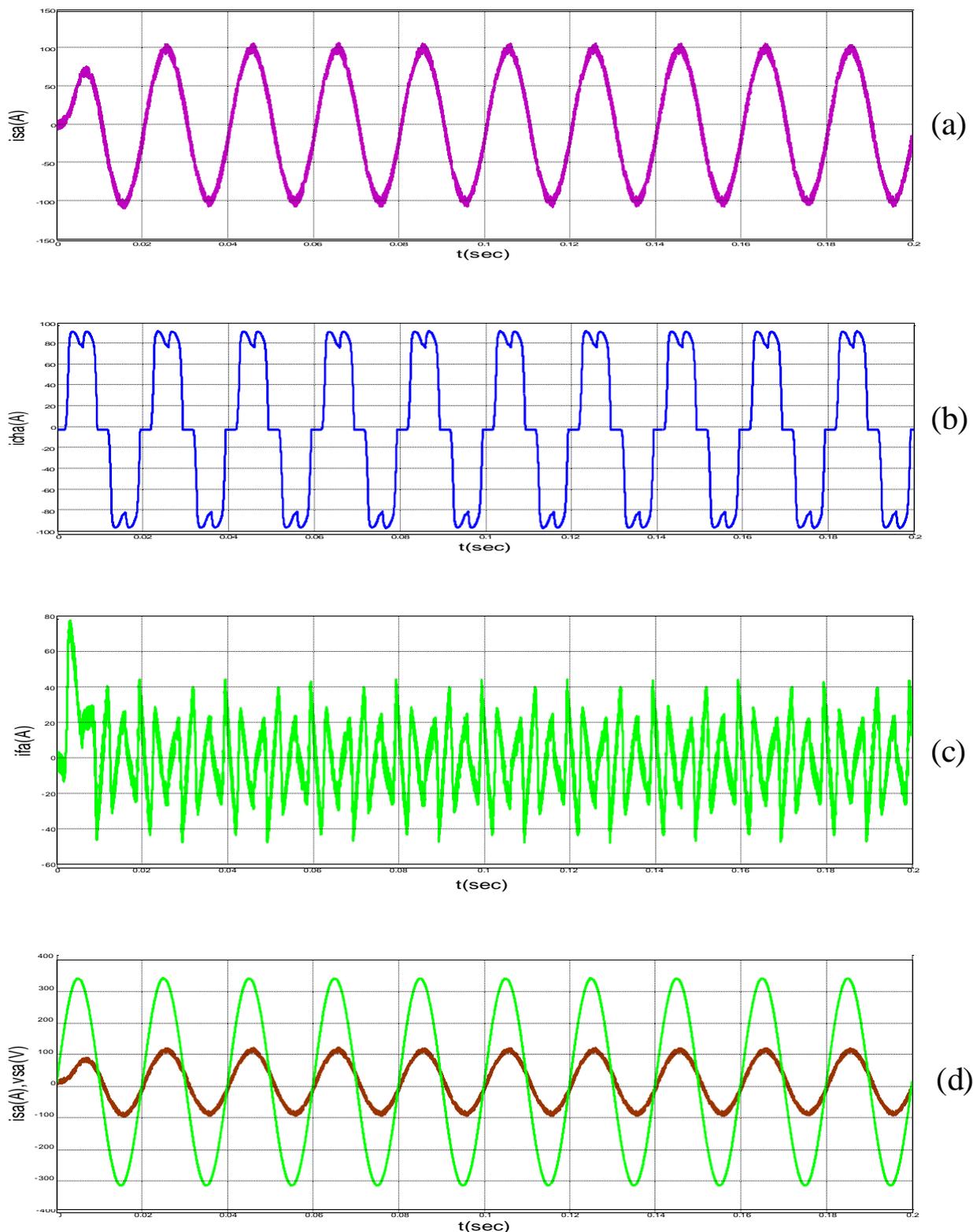


Figure (4.6) : Allure du courant i_{sa} (a), i_{cta} (b), i_{fa} (c),
déphasage entre i_{sa} et v_{sa} (d)

Commande à MLI intersective :

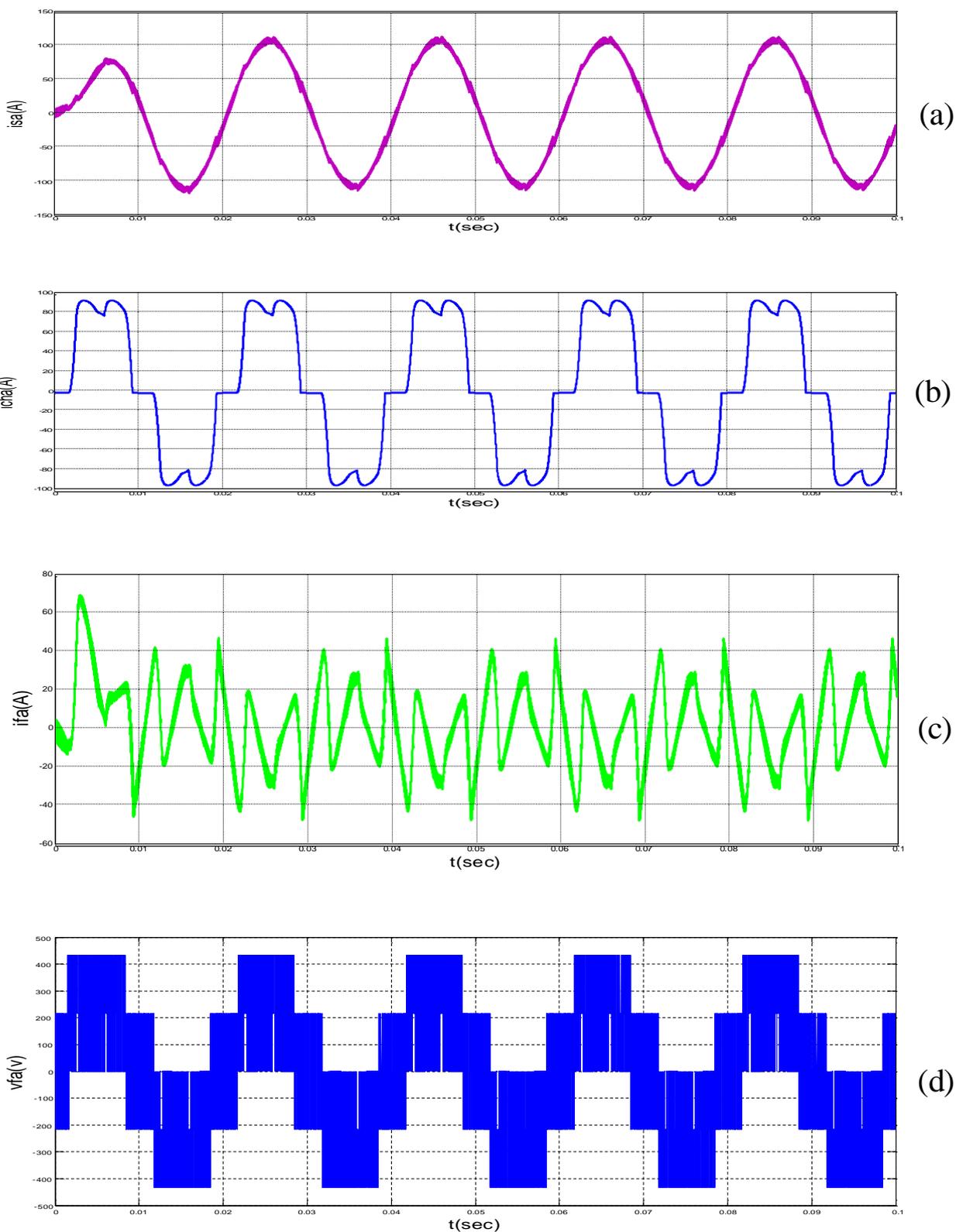


Figure (4.7) : Allure du courant i_{sa} (a), i_{cha} (b), i_{fa} (c), tension de sortie de l'onduleur (d)

4.1.2.2. Cas d'une charge de type RL :

Commande à MLI intersective :

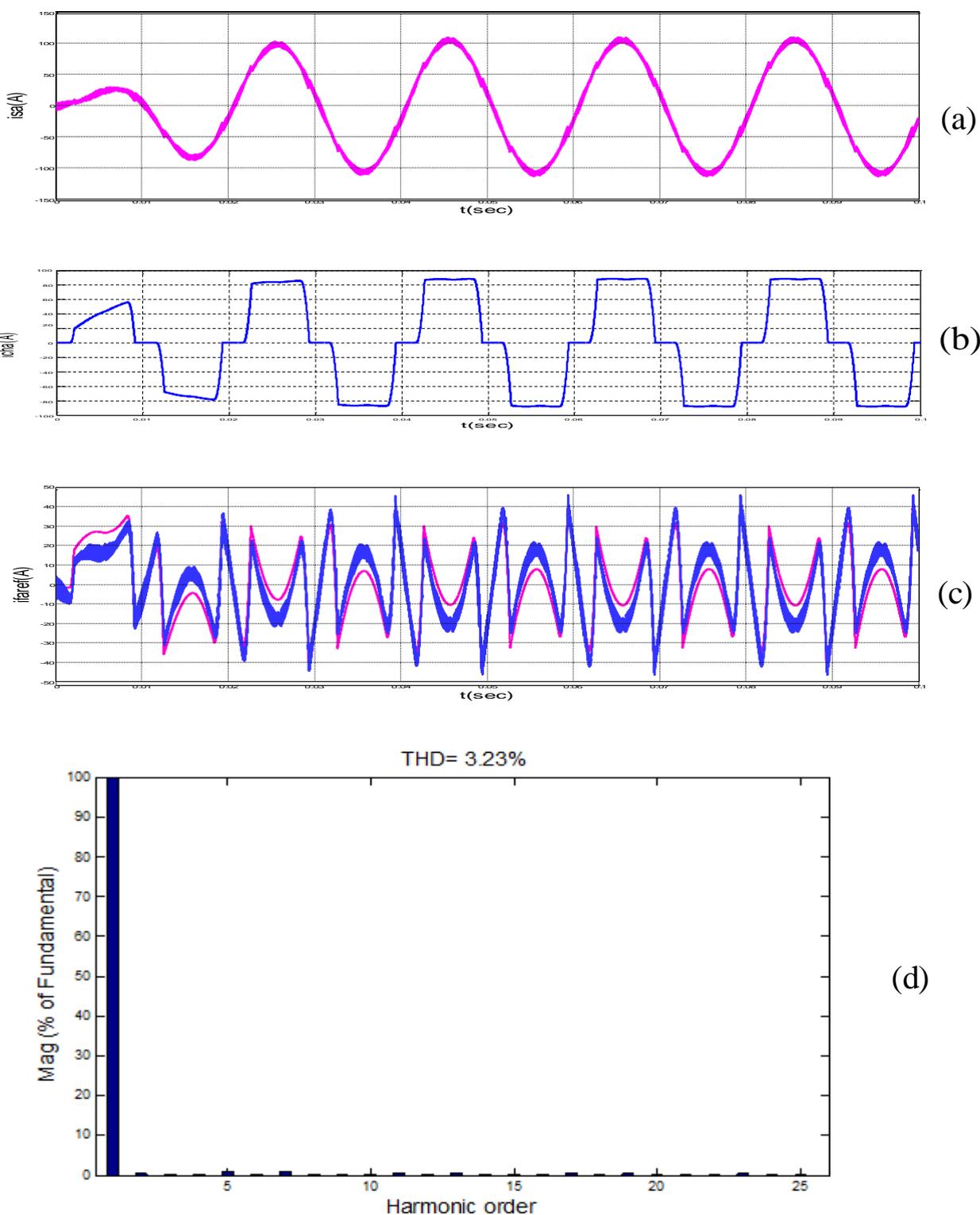


Figure (4.8) : Allure du courant i_{sa} (a), i_{ca} (b), i_{fa} et sa référence i_{ref} (c),

Spectre harmonique du courant i_{sa} (d).

4.2. Interprétation des résultats :

Avant filtrage actif :

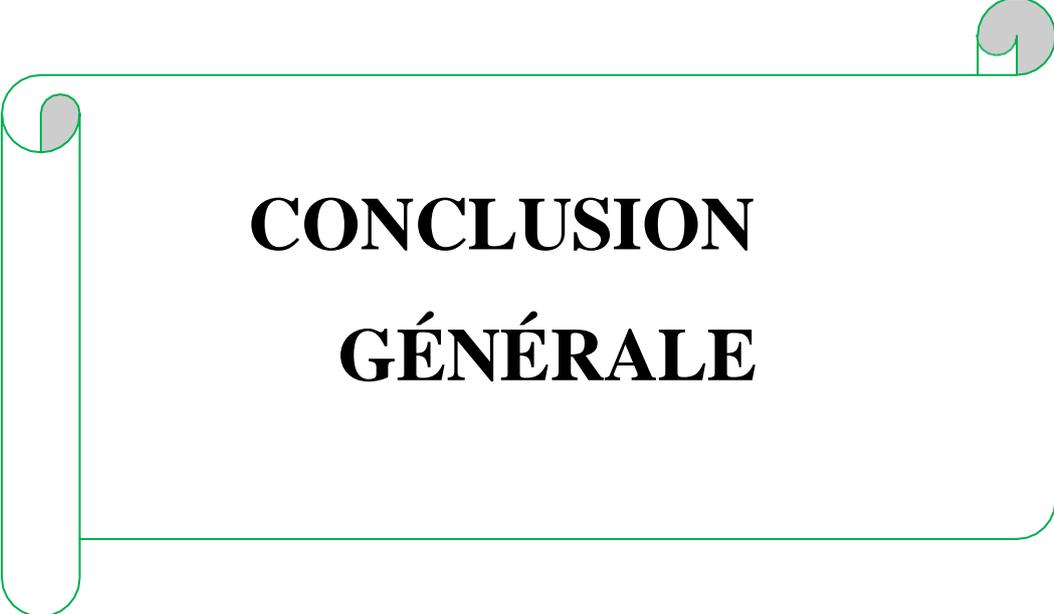
Avant l'intégration du filtre actif, la figure (4.1) met en évidence la distorsion de la forme d'onde du courant de source i_{sa} . Cette déformation est corroborée par le spectre harmonique présenté dans la figure (4.2), révélant un taux de distorsion harmonique total (THDi) de 45,89 %. Par ailleurs, la figure (4.3) illustre un déphasage significatif entre la tension de la source v_{sa} et le courant i_{sa} , ce qui indique une mauvaise synchronisation entre ces deux grandeurs. Cette désynchronisation entraîne une diminution notable du facteur de puissance, qui s'écarte alors de sa valeur optimale.

Après filtrage actif :

Dans le cas d'une charge purement résistive (R), le courant de source i_{sa} présente une forme d'onde quasi sinusoïdale, comme l'illustre la figure (4.6-a), et reste en phase avec la tension de la source (figure 4.6-d). Cette synchronisation témoigne de la bonne performance du filtre actif parallèle en matière de compensation harmonique, ainsi que d'un facteur de puissance satisfaisant. L'analyse fréquentielle du courant de la source confirme l'efficacité du filtre dans la réduction des harmoniques induits par la charge non linéaire. En effet, le THDi chute à 4,20 % sous la commande à hystérésis (figure 4.4), et atteint 3,27 % avec la stratégie de commande MLI (figure 4.5). La figure (4.7-d) illustre la forme d'onde de la tension de sortie de l'onduleur, mettant en évidence les deux niveaux caractéristiques $V_{dc/3}$ et $2V_{dc/3}$, correspondant respectivement à 217 V et 434 V.

Conclusion :

Ce chapitre a porté sur la simulation du comportement du système étudié, incluant le réseau d'alimentation, la charge non linéaire, ainsi que le filtre actif parallèle à deux niveaux, piloté par les stratégies de commande à hystérésis et par la modulation de largeur d'impulsion sinus-triangle (STMLI). Les résultats issus des simulations réalisées sous Matlab/Simulink confirment l'efficacité du filtre actif parallèle dans la compensation des harmoniques de courant générés par les charges perturbatrices. Une amélioration notable de la forme d'onde du courant de source ainsi qu'une réduction significative du THDi ont été observées.



**CONCLUSION
GÉNÉRALE**

Dans un contexte où la qualité de l'énergie électrique devient une exigence incontournable, la présence des harmoniques constitue un véritable défi pour les réseaux électriques modernes. Cette pollution, principalement causée par l'utilisation croissante des charges non linéaires, engendre de nombreuses perturbations qui peuvent affecter gravement les équipements électriques et électroniques.

Tout au long de ce travail, nous avons mis en évidence les effets néfastes des harmoniques sur les installations électriques, ainsi que les limites des solutions classiques comme les filtres passifs. Nous avons ensuite exploré les techniques de filtrage actif, qui se présentent aujourd'hui comme une solution performante, flexible et évolutive face à ce problème.

Grâce à leur capacité à s'adapter aux variations de la charge et à compenser de manière ciblée les harmoniques indésirables, les filtres actifs permettent d'améliorer significativement la qualité de l'énergie dans le réseau, tout en prolongeant la durée de vie des équipements et en réduisant les pertes.

En conclusion, l'intégration des filtres actifs dans les réseaux électriques représente une avancée technologique importante qui contribue non seulement à la stabilité et à la fiabilité des systèmes, mais aussi à une meilleure efficacité énergétique.

Bibliographie

- [01] Akagi, H., Watanabe, E. H., & Aredes, M. (2007). *Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning*. Wiley-IEEE Press.
- [02] Dubois, C., & Lefevre, M. (2019). *L'UPQC et les filtres actifs pour la correction de la qualité de l'énergie électrique*. Presses Techniques de l'Énergie.
- [03] Lefevre, J., & Martin, A. (2019). "Optimisation des filtres actifs dans les systèmes de traitement de signal", *Revue des systèmes électriques modernes*, vol. 34, no. 2, pp. 45-52, avril.
- [04] Dubois, L. (2017). *Impact des valeurs crêtes et de l'étalement spectral sur les composants électriques*. Presses Électro-Industrielles.
- [05] Dupont, P., & Lefevre, J. (2018). "Comportement des condensateurs sous surtension", *Revue des systèmes de puissance*, vol. 18, no. 3, pp. 205-212, juin.
- [06] Lefevre, A., & Martin, B. (2019). *Les effets des perturbations harmoniques sur la durée de vie des équipements*. Éditions Techniques de l'Énergie.
- [07] Dupont, J., & Martin, P. (2020). *Les harmoniques dans les réseaux électriques*. Presses Universitaires de France.
- [08] Dubois, A. (2018). *Les sources des harmoniques dans les réseaux électriques*. Éditions Techniques de l'Énergie.
- [09] Lefevre, J., & Boucher, P. (2017). *L'impact des charges non linéaires sur la qualité de l'énergie électrique*. Éditions Électro-Distribution.
- [10] Bernard, P. (2020). *Techniques de réduction des harmoniques dans les convertisseurs de puissance*. Presses Universitaires de l'Énergie.
- [11] Lefèvre, M. (2019). *Les impacts des harmoniques sur les équipements électriques*. Éditions Électro-Techniques.
- [12] Dupuis, R., & Lefevre, J. (2018). *Réduction des harmoniques dans les circuits de redressement triphasés*. Éditions Techniques de l'Énergie.
- [13] Morin, S., & Joly, D. (2021). *Réduction des harmoniques par l'utilisation de transformateurs spéciaux dans les circuits à diodes*. Éditions Énergie et Systèmes.
- [14] Lefèvre, P., & Dufresne, M. (2019). *Les filtres actifs pour la gestion des harmoniques dans les réseaux électriques*. Éditions Électro-Techniques.

- [15] Lefevre, M., & Dubois, P. (2020). *Filtres actifs parallèles pour la dépollution des réseaux électriques*. Éditions Techniques de l'Énergie.
- [16] Martin, J., & Lefevre, T. (2020). *Conditionneurs actifs de puissance pour la correction de la qualité de l'énergie*. Presses Universitaires de l'Énergie.
- [17] Morin, F., & Lefevre, J. (2018). *Compensateurs série pour la gestion des harmoniques dans les réseaux électriques*. Presses Électro-Industrie.
- [18] Robert, J., & Martin, L. (2020). *Protection et compensation des perturbations dans les réseaux électriques avec des filtres série*. Presses Universitaires de l'Énergie.
- [19] Lefevre, J., & Bernard, P. (2020). *Technologies modernes de compensation de la qualité de l'énergie électrique*. Éditions Scientifiques de l'Énergie.
- [20] Martin, F., & Dupont, P. (2019). "Réduction des risques d'antirésonance dans les filtres hybrides", *Revue des systèmes électriques avancés*, vol. 10, no. 4, pp. 45-52, avril.
- [21] Dupont, P., & Martin, F. (2020). "Les avantages des filtres actifs série dans les systèmes électriques hybrides", *Journal des systèmes électriques*, vol. 15, no. 3, pp. 123-130, mars.
- [22] Robert, C. (2021). *Les effets des courants harmoniques sur la qualité de l'énergie dans les réseaux électriques*. Éditions Sciences et Énergies.