

République Algérienne Démocratique et Populaire

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique**

CENTRE UNIVERSITAIRE D'EL-OUED

INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIE

Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Génie électrique et Electronique

Spécialité : Réseaux Electriques

Presenté par : TAMMA Moussa

AROUA Abdelmadjid

Thème

**Etude par simulation d'un filtre
actif parallèle dans un réseau électrique**

Soutenu le 01 Juillet 2012

Devant le jury composé de :

Mr.	LABBI Yacine	MC	Président
Dr.	BEN ATTOUSS Djilani	MC	Rapporteur
Mr.	MIDA Dris	MA	Examineur

2011-2012

REMERCIEMENTS

Nous remercions en premier lieu dieu tout puissant pour nous avoir donné la force et la volonté d'accomplir ce modeste travail.

*Ainsi, nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements à notre encadreur Monsieur **BEN ATTOUS Djilani** pour avoir d'abord proposé ce thème, pour son suivi et ses conseils et remarques.*

Encore nos sincères remerciements à toutes les personnes qui nous avons aidé élaborer Ce mémoire.

*Nos remerciements vont aussi à tous les enseignants qu'ont contribués à nos formations surtout messieurs : **BEKAKRA Youcef, MEHNI Tidjani, HADA Hicham, BOUGHAZZELA Salah.***

*Enfin nous tenons à exprimer ma reconnaissance à tous nos amis et collègues pour le soutien moral et matériel particulièrement, **AZEB CHEIK Boubaker, HAMIDATOU Salem, HAGA Oualid, CHEKIMA Lazhari, ABNA Othman, CHERIF Belgacem.***

Notations

V_{eff} : valeur efficace de tension.

I_{eff} : valeur efficace de courant.

α_h : Phase initiale de la tension harmonique d'ordre h .

B_h : Phase initiale du courant harmonique d'ordre h .

ϕ_h : Déphasage de la tension harmonique d'ordre h sur le courant harmonique d'ordre h .

S : la puissance apparente.

P : la puissance active.

Q : la puissance réactive.

F_p : le facteur de puissance.

THD : taux de distorsion harmonique.

THD_{vh} : taux d'individuel d'harmonique en tension.

THD_{ih} : taux d'individuel harmonique en courant.

THD_v : taux de distorsion harmonique en tension.

THD_i : taux de distorsion harmonique en courant.

THD_f : distorsion harmonique totale par rapport au fondamentale.

THD_r : distorsion harmonique totale par rapport à la valeur efficace vraie de signal.

V_h : tension d'harmonique de rang h .

I_h : courant d'harmonique de rang h .

ϕ : Déphasage entre le courant et la tension

FAP : filtre actif parallèle.

FAS : filtre actif série.

UPQC: Unified Power Quality Conditioner.

$e_{1,2,3}$: système de f.e.m.s triphasé du réseau.

Z_c : Impédance de la charge.

R_s : résistance de la charge.

L_s : inductance de la charge.

ω : Pulsation du réseau.

f : fréquence.

GTO: Gate turn off.

IGBT: Insolated gate bipolar transistor.

R_f : résistance du filtre actif.

L_f : inductance du filtre actif.

V_f : tension de filtre actif.

FBH : Filtre passe haut.

FPB : Filtre passe bas.

V_{dc} : la tension continue aux bornes du condensateur de stockage.

C_{dc} : condensateur de l'entrée.

VSI : Voltage source inverter.

PCC : Commun connection point.

I_{hL} : courant harmonique de la charge.

I_{inj} : courant injecté par le filtre.

V_{sa}, V_{sb}, V_{sc} : Tensions simple triphasés de réseau.

I_{sa}, I_{sb}, I_{sc} : courants triphasés de la charge.

I_α, I_β : courant dans le repère biphasé.

V_α, V_β : tension dans le repère biphasé.

\bar{P} : Puissance liée au composant fondamental actif de courant et de tension.

\tilde{p} : Puissance active alternative liée a la somme de composants harmoniques de courant et de tension.

\bar{q} : Puissance liée au composant fondamental réactive de courant et de tension.

\tilde{q} : Puissance réactive alternative liée a la somme des composants harmoniques de courant et de tension.

MLI : Modulation de largeur impulsion.

I_{ref} : courant de référence.

R : coefficient de réglage.

m : L'indice de modulation.

f_p : Fréquence de porteuse.

$f_{\text{réf}}$: Fréquence de la référence.

PI : Régulateur proportionnel intégrateur.

P_s : Puissance active de la source.

P_c : Puissance active de la charge.

K_c : Gain de régulateur.

τ_c : Constante de temps.

Liste des Tableaux

Tableau I.1 : principales charges polluantes.	04
Tableau I.2 : comparaison entre le filtre actif parallèle et le filtre actif série. ...	18
Tableau I.3 : comparaison entre le filtre actif et le filtre passif.	21
Tableau II.1 : Tensions en sortie de l'onduleur.	28

Liste des figures

Figure. I.1 :Diagramme de Fresnel des puissances	07
Figure I.2 : Courant d'une alimentation à découpage d'un écran de micro-ordinateur	09
Figure. I.3 :La propagation des harmoniques sur les réseaux.	11
Figure. I.4 : Branchement d'un filtre résonant.	13
Figure. I.5 : Branchement d'un filtre amorti.	13
Figure. I.6 : Schéma de Principe d'un filtre actif	15
Figure. I.7 : Filtre actif parallèle(FAP)	16
Figure I.8 : Filtre actif série(FAS)	16
Figure. I.9 :Combinaison parallèle-série actif (UPQC).....	17
Figure I.10 : Filtre actif série et filtre passif parallèle	19
Figure I.11 : Filtre actif série connecté en série avec un filtre passif parallèle.....	20
Figure I.12 : Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle	20
Figure II.1 : Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle	24
Figure II.2 : Schéma synoptique d'un réseau triphasé.	25
Figure II.3 : Schéma synoptique d'un pont redresseur	25
Figure II.4 : Structure générale du filtre actif parallèle.....	26
Figure II.5 : Onduleur de tension triphasé	27
Figure II.6 : Représentation vectorielle des tensions générées par l'onduleur.	28
Figure II.7 : Détermination des courants de référence du filtre actif par la méthode classique des puissances active et réactive instantanées.....	33
Figure II.8 : Deux types classiques de filtres d'extraction du composant harmonique.	33
Figure II.9 : Boucle de régulation de la tension continue.	35
Figure II.10 : Schéma de la régulation des courants du filtre actif parallèle harmonique.	36
Figure II.11 : Schéma simplifié de la régulation du courant d'un F.A.P.....	36
Figure II.12 : Principe de la commande par hystérésis	37
Figure II.13 : Principe de la commande par MLI.....	38
Figure III.2 : Schéma bloc de la méthode d'identification de courant perturbé	41
Figure III.3 : Schéma bloc de la commande par hystérésis	42

Figure III.4 :Schéma bloc de l'onduleur de tension à deux niveaux.	42
Figure III.5 :Schéma global d'un filtre actif parallèle commandé par MLI.	43
Figure III.6 : Schéma bloc de la méthode d'identification de courant perturbé	43
Figure III.7 : Schéma bloc de la commande MLI.	44
Figure III.8 :Schéma bloc de l'onduleur de tension à deux niveaux.	44
Figure III.9 : (a) Courant de charge, (b) Courant de source, (c) Courant de référence.....	46
Figure III.10 : Spectre du courant source : (a) avant, (b) après filtrage.	46
Figure III.11 : (a) Courant de charge, (b) Courant de source, (c) Courant de référence.....	47
Figure III.12 :Spectre du courant source : (a) avant, (b) après filtrage.	48

SOMMAIRE

<i>Introduction générale</i>	01
<i>CHAPITRE I : Généralités sur les harmoniques</i>	
I.1 Introduction	03
I.2 Définition de la pollution harmonique	03
I.3 Caractérisation des perturbations harmoniques.....	04
I.3.1 Valeurs efficaces.....	04
I.3.2 La puissance apparente	05
I.3.3 Les puissances actives, réactives et déformantes	05
I.3.4 Facteur de puissance.....	06
I.3.5 Taux individuel d'harmonique	07
I.3.6 Taux de distorsion harmonique globale (THD).....	07
I.3.7 Taux de distorsion harmonique	08
I.3.8 Relation entre le facteur de puissance et THD	08
I.4 Origines des harmoniques	08
I.5 Conséquences des harmoniques	09
I.5.1 Effets instantanés	10
I.5.2 Effets à terme.....	10
I.6 Propagation des harmoniques sur les réseaux.....	11
I.7 Réglementation des perturbations	11
I.8 Solutions de dépollution des réseaux électriques.....	12
I.8.1 Solutions de dépollution traditionnelles	12
I.8.1.1 Filtrage passif.....	12
I.8.1.1.1 Filtre résonant.....	13
I.8.1.1.2 Filtre amorti.....	13
I.8.1.1.3 Avantages et inconvénients.....	14
I.8.1.1.3.1 Avantages	14
I.8.1.1.3.2 Inconvénients.....	14
I.8.1.1.4 Applications typiques	14
I.8.2 Solutions de dépollution modernes.....	15
I.8.2.1 Filtrage actif.....	15

I.8.2.1.1	Filtre actif parallèle (F.A.P)	15
I.8.2.1.2	Filtre actif série (F.A.S).....	16
I.8.2.1.3	Combinaison parallèle-série actifs (UPQC).....	17
I.8.2.1.4	Avantages et inconvénients	18
I.8.2.1.4.1	Avantages	18
I.8.2.1.4.2	Inconvénients.....	18
I.8.2.1.5	Applications typiques	18
I.8.2.1.6	Comparaison entre le filtre actif parallèle et le filtre actif série.....	18
I.8.2.1	Combinaison hybride active et passive	18
I.8.2.1.1	Filtre actif série avec des filtres passifs parallèles	19
I.8.2.1.2	Filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles.....	19
I.8.2.1.3	Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle	20
I.8.2.1.4	Comparaison entre le filtre actif et le filtre passif	21
I.10	Conclusion.....	21

CHAPITRE II : Principe de filtre actif parallèle et identification des courants harmoniques

II.1	Introduction.....	23
II.2	Filtres actifs.....	23
II.2.1	Objectif.....	23
II.2.2	Filtre actif parallèle	23
II-3	Modélisation de l'association réseau- Filtre actif- Charge polluante	24
II-3-1	Modélisation du réseau	24
II-3-2	Modélisation de la charge polluante (Redresseur triphasé).....	25
II.3.3	Modélisation du filtre actif (ou de l'onduleur).....	25
II.3.3.1	Structure d'un filtre actif parallèle.....	25
II.3.4	Partie de puissance	26
II.3.4.1	Onduleur de tension.....	26
II.3.4.1.1	Structure générale	26
II.3.4.1.2	Tension fournie par l'onduleur	27
II.3.4.1.3	Représentation vectorielle des tensions fournies par l'onduleur	28
II.3.4.2	Système de stockage d'énergie.....	29
II.3.4.3	Filtre de sortie (Filtre de découplage).....	29

II.3.5 Partie contrôle commande	30
II.3.5.1 Stratégie de l'identification	30
II.3.5.2 Méthode d'identification des courants perturbés.....	30
II.3.5.2.1 Généralités sur les méthodes d'identification	30
II.3.5.2.2 Principe du fonctionnement de la méthode des puissances instantanées..	31
II.3.5.2.2.1 Généralités sur les puissances instantanées.....	31
II.3.5.2.2.3 Calcul des courants perturbateurs	32
II.3.5.2.2.4 Algorithme d'identification de courant de référence	33
II.3.5.3 Techniques de Régulation des filtres actifs	33
II.3.5.3.1 Régulation de la tension continue	33
II.3.5.3.2 Régulation des courants du filtre actif parallèle	35
II.3.5.4 Stratégies de commande d'onduleur.....	37
II.3.5.4.1 Commande par hystérésis	37
II.3.5.4.2 Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI)	37
II.4 Conclusion	39

CHAPITRE III : Résultats de simulation d'un filtre actif parallèle

III.1 Introduction	40
III.2 Simulation.....	40
III.2.1 Commande par Hystérésis	41
III.2.2 Commande par MLI.....	43
III.3 Paramètres de simulation.....	44
III.3.1 Paramètres du réseau.....	44
III.3.2 Paramètres de la charge polluante.....	45
III.3.3 Paramètres du filtre actif.....	45
III.4 Résultats de la simulation	45
III.4.1 Commande par hystérésis	45
III.4.2 Commande MLI.....	47
III.5 Conclusion	48
<i>Conclusion générale</i>	50
<i>Resumé</i>	51
<i>Références bibliographiques</i>	53

Introduction générale

Ces dernières décennies, l'utilisation croissante dans l'industrie des équipements d'électronique de puissance et d'informatique contribuent à la dégradation de la qualité de l'énergie dans le réseau électrique. En effet, les convertisseurs statiques (les redresseurs, les gradateurs, les cycloconvertisseurs) prolifèrent tant dans les équipements industriels que domestiques. Principalement l'utilisation de ces convertisseurs dans les installations de conversion d'énergie électrique a considérablement contribué à améliorer les performances et l'efficacité de ces systèmes. En revanche, ils ont participé à détériorer la "qualité" du courant et de la tension des réseaux de distribution. Ces systèmes consomment des courants non sinusoïdaux, même s'ils sont alimentés par une tension sinusoïdale, ils se comportent comme des générateurs de courants harmoniques. Par l'intermédiaire de l'impédance de court-circuit du réseau, la circulation de ces mêmes courants perturbés va également provoquer des harmoniques et des déséquilibres de tension, lesquels vont se superposer à la tension nominale du réseau électrique. Des incidents du type « coups de foudre » ou un brusque démarrage d'une machine tournante à forte puissance peuvent causer une chute soudaine et importante de tension. On nommera ce type d'incident : creux de tension.

Plusieurs solutions ont été présentées dans la littérature pour dépolluer les réseaux électriques de tout type de perturbation de courant et de tension à savoir :

- Les harmoniques
- Les déséquilibres
- Les composantes réactives
- Les creux de tension

Devant cette situation gênante des perturbations dans les réseaux électriques, surtout les réseaux basse tension, des normes de qualité de plus en plus contraignantes doivent être imposées aux fournisseurs et aux consommateurs. Actuellement la solution de compensation de toutes ces perturbations, la plus adaptée, est le filtrage actif, offrant une grande flexibilité de compensation, tout en restant dans les limites technico-économiques.

Le travail présenté dans ce mémoire concerne particulièrement l'étude par simulation d'un filtre actif parallèle à structure tension destiné à compenser les courants harmoniques générés par une charge non-linéaire dans un premier temps sur un réseau

triphase trois fils en utilisant les deux techniques de commande ,commande par hystérésis et commande par MLI.

Cette thèse comporte trois chapitres, structurés comme suit :

Dans le premier chapitre, nous présentons la description des différentes perturbations en courant et en tension dans les réseaux électriques connectés à des charges dites polluantes, leurs origines, leurs conséquences et les réglementations. Nous présenterons également les solutions traditionnelles et modernes de compensation et, plus en détail, les différentes structures de filtrage actif.

Au second chapitre, nous étudions théoriquement la topologie de filtre actif parallèle à structure et méthodes d'identification des courants harmoniques, celle choisit pour notre étude étant la méthode des puissances actives et réactives instantanées et présentons les deux stratégies de commande de l'onduleur de tension (commande par hystérésis et commande MLI).

Dans le dernier chapitre, nous présentons la modélisation de l'ensemble réseaux, charge polluante et filtre actif parallèle dans le cas de la commande par hystérésis et MLI avec des résultats de simulation et analyse ces résultats.



Chapitre I

Généralités sur les harmoniques

I.1 Introduction

Généralement, le distributeur d'énergie délivre l'énergie électrique sous forme d'un système triphasé de tensions sinusoïdales. Les paramètres caractéristiques de ce système sont la fréquence, l'amplitude, la forme d'onde, qui doit être sinusoïdale et la symétrie du système triphasé. Mais depuis quelques années, avec l'évolution technologique des composants d'électronique de puissance les distributeurs d'énergie rencontrent plusieurs problèmes liés à l'accroissement du nombre de convertisseurs statiques raccordés aux réseaux de distribution d'énergie. En effet, ces convertisseurs sont des sources polluantes qui absorbent des courants non sinusoïdaux et consomment pour la plupart de la puissance réactive.

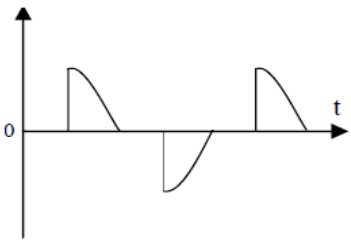
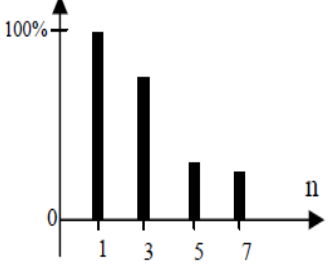
Dans ce chapitre, nous allons présenter la source des harmoniques, l'influence du raccordement des convertisseurs statiques sur les réseaux électriques et leurs environnements et enfin les normes. Ensuite, nous présentons les solutions classiques et modernes mises en œuvre pour dépolluer les réseaux électriques. [1]

I.2 Définition de la pollution harmonique :

C'est l'altération de la forme d'onde sinusoïdale du courant et/ou de la tension engendrée par certaines charges électriques dites charges non-linéaires présentées dans le tableau (I.1), Ce genre de signal, à supposer que la périodicité du signal ne soit pas atteinte, peut être décomposée en une somme de sinusoïde de fréquence ($n.f$) tel que $n \in \mathbb{N}$ et f est la fréquence du signal.

Pour $n = 1$ la sinusoïde est dite fondamentale.

Pour $n > 1$ les sinusoïdes sont dites harmoniques d'ordre supérieur.

Type de charge	Appareils concernés	Courant absorbé	Spectre harmonique Correspondant
- Gradateurs monophasé (commande par angle de phase).	-Régulation de puissance de fours à résistances, - Modulation de puissance des lampes halogènes.		

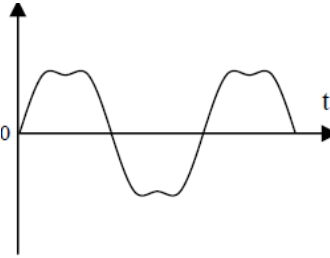
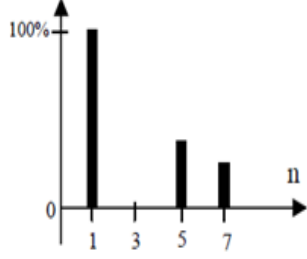
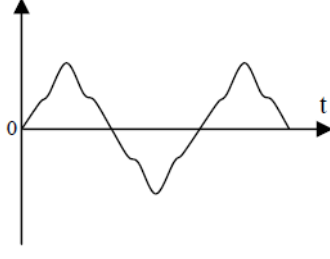
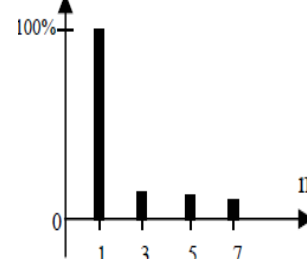
- Redresseur triphasé à thyristors.	- Variateur de vitesse des moteurs à courant continu et des moteurs synchrones		
- Moteur asynchrone.	- Machines-outils, - Appareils électroménagers, - Ascenseurs		

Tableau I.1 principales charges polluantes.

Le signal peut éventuellement contenir une composante continue qui présente la valeur moyenne du signal. Cette décomposition est connue sous le nom de la décomposition en série de Fourier [2].

Dans le cas où la tension et le courant seraient non-sinusoidaux, ils peuvent être mis sous la forme donnée respectivement par les équations (I.1) et (I.2) :

$$v(t) = \sum_{n=1}^{\infty} v_n \sqrt{2} \sin(n\omega t - \alpha_n) + V_0 \quad (\text{I.1})$$

$$i(t) = \sum_{n=1}^{\infty} i_n \sqrt{2} \sin(n\omega t - \beta_n) + I_0 \quad (\text{I.2})$$

I.3 Caractérisation des perturbations harmoniques

I.3.1 Valeurs efficaces

Les valeurs efficaces de la tension et du courant sont données respectivement par les équations (I.3) et (I.4) :

$$V_{eff} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_h^2} \quad (\text{I.3})$$

$$I_{eff} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2} \quad (\text{I.4})$$

I.3.2 La puissance apparente

La puissance apparente est la puissance disponible, son expression est donnée par l'équation (I.5) :

$$S = VI = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_h^2} \cdot \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2} \quad (\text{I.5})$$

I.3.3 Les puissances actives, réactives et déformantes :

- La puissance active est la puissance qui se transforme en travail, elle est mesurée en Watt, son expression est donnée par l'équation (I.6) :

$$P = \frac{1}{T} \int v(t) \cdot i(t) dt = \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \cos \varphi_h \quad (\text{I.6})$$

$$\varphi_h = \alpha_h - \beta_h \quad (\text{I.7})$$

α_h : Phase initiale de la tension harmonique d'ordre h,

β_h : Phase initiale du courant harmonique d'ordre h,

φ_h : Déphase de la tension harmonique d'ordre h sur le courant harmonique d'ordre h.

- La puissance réactive est une puissance qui est absorbée du réseau et qui ne se transforme pas en travail. Elle est mesurée en VAR et son expression est donnée par l'équation (I.8) :

$$Q = \sum_{h=1}^{\infty} V_h \cdot I_h \sin \varphi_h \quad (\text{I.8})$$

- La puissance déformante est donnée par l'équation (I.9) :

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} V_n^2 \cdot \sum_{\substack{h=1 \\ n \neq h}}^{\infty} I_h^2} \quad (\text{I.9})$$

Cette puissance est véhiculée par les tensions et les courants harmoniques de rang différents, elle est dite puissance déformante et notée D. elle est mesurée en VAD.

I.3.4 Facteur de puissance

Le facteur de puissance est donné par l'équation (I.10) :

$$F_p = \frac{P}{S} = \frac{\sum_{h=1}^{\infty} V_h \cdot I_h \cos \varphi_h}{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} V_n} \cdot \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h}} \quad (\text{I.10})$$

Pour une meilleure compréhension, nous allons mettre en évidence quelques effets des harmoniques dans le cas où la tension est sinusoïdale :

➤ Valeur efficace de la tension et du courant donnés par les équations suivantes :

$$v(t) = V_1 \sqrt{2} \sin(\omega t - \alpha_1) \quad (\text{I.11})$$

$$i(t) = \sum_{h=1}^{\infty} I_h \sqrt{2} \sin(h \omega t - \beta_h) \quad (\text{I.12})$$

Avec : $\varphi_1 = \alpha_1 - \beta_1$

➤ Puissance active et réactive sont :

$$P = V_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1 \quad (\text{I.13})$$

$$Q = V_1 \cdot I_1 \cdot \sin \varphi_1 \quad (\text{I.14})$$

➤ Facteur de puissance est égal :

$$F_p = \frac{P}{S} = \frac{V_1 I_1 \cos \varphi_1}{V_1 \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2}} = \cos \varphi_1 \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{D^2}{P^2 + Q^2}}} \quad (\text{I.15})$$

De l'équation (I.12), nous pouvons conclure que les courants harmoniques accroissent la valeur efficace, donc il aura une augmentation des pertes par effets Joules.

Les composantes harmoniques véhiculent une puissance harmonique dite déformante, parce qu'elle est créée par les harmoniques et que ces derniers déforment l'onde sinusoïdale, cette puissance est de nature réactive car les composantes harmoniques ne contribuent pas à la production de la puissance active.

De (I.15), nous pouvons aisément voir que F_p est inférieur à 1, les harmoniques réduisent le facteur de puissance donc réduisent la puissance disponible.

Ainsi donc, les harmoniques affectent aussi le facteur de puissance, ceci peut se traduire par le diagramme de Fresnel des puissances de la figure (I.1).

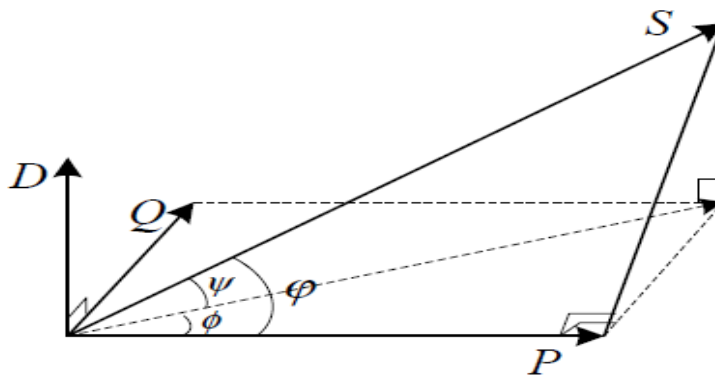


Figure I.1 Diagramme de Fresnel des puissances

I.3.5 Taux individuel d'harmonique

Le taux individuel d'harmonique est définie comme le pourcentage d'harmonique de rang h ramené au fondamentale [4]. Les deux équations suivantes donnent les relations de cette grandeur pour un signal de courant puis pour un signal de tension :

$$THD_{i_h} (\%) = \frac{I_h}{I_1} \cdot 100 \quad (I.16)$$

$$THD_{v_h} (\%) = \frac{U_h}{U_1} \cdot 100 \quad (I.17)$$

I.3.6 Taux de distorsion harmonique globale (THD)

Le THD représente le rapport entre la valeur efficace des harmoniques et le valeur efficace fondamentale [5] [6].

Pour connaître la déformation globale d'un signale, il est nécessaire de tenir en compte tous les harmoniques présentes. Il existe deux méthodes de mesure de cette grandeur :

- Le THD_f (distorsion harmonique totale par rapport au fondamentale)
- Le THD_r (distorsion harmonique totale par rapport à la valeur efficace vraie de signal). [6]

Pour un signal X, les expressions suivantes permettent de définir ces deux valeurs

du *THD* :

$$THD_f = \frac{\sqrt{X_2^2 + X_3^2 + \dots + X_{50}^2}}{X_1} \quad (I.18)$$

$$THD_r = \frac{\sqrt{X_0^2 + X_2^2 + \dots + X_{50}^2}}{\sqrt{X_0^2 + X_1^2 + \dots + X_{50}^2}} \quad (I.19)$$

I.3.7 Taux de distorsion harmonique

Il existe deux sortes de *THD* : en tension (apparaît à la source) ou en courant (du aux charges non linéaires). [6]

Lorsqu'il s'agit des harmoniques de courant, l'expression devient :

$$THD_i = \sqrt{\frac{\sum_{h=2}^{50} I_h^2}{I_1^2}} \quad (I.20)$$

Lorsqu'il s'agit des harmoniques de tension, l'expression devient :

$$THD_v = \sqrt{\frac{\sum_{h=2}^{50} u_h^2}{U_1^2}} \quad (I.21)$$

I.3.8 Relation entre le facteur de puissance et *THD*

Quand la tension est sinusoïdale ou pratiquement sinusoïdale, le facteur de puissance *PF* est défini par la formule :

$$Fp = \cos \varphi \quad (I.22)$$

En présence des harmoniques, l'expression de *PF* devient :

$$Fp = \frac{\cos \varphi}{\sqrt{1 + THD^2}} \quad (I.23)$$

I.4 Origines des harmoniques

Depuis plusieurs années, les convertisseurs statiques (redresseurs, gradateurs ...) prolifèrent tant dans les équipements industriels que domestiques. Par exemple, ces dispositifs sont fréquemment employés dans la régulation de vitesse de moteurs à courant continu et alternatif, ainsi que dans les alimentations des ordinateurs (figure I.2).

Ils sont également utilisés dans les variateurs de lumière, les régulations de systèmes de chauffage électrique et les variateurs de vitesse des moteurs universels ... [2]

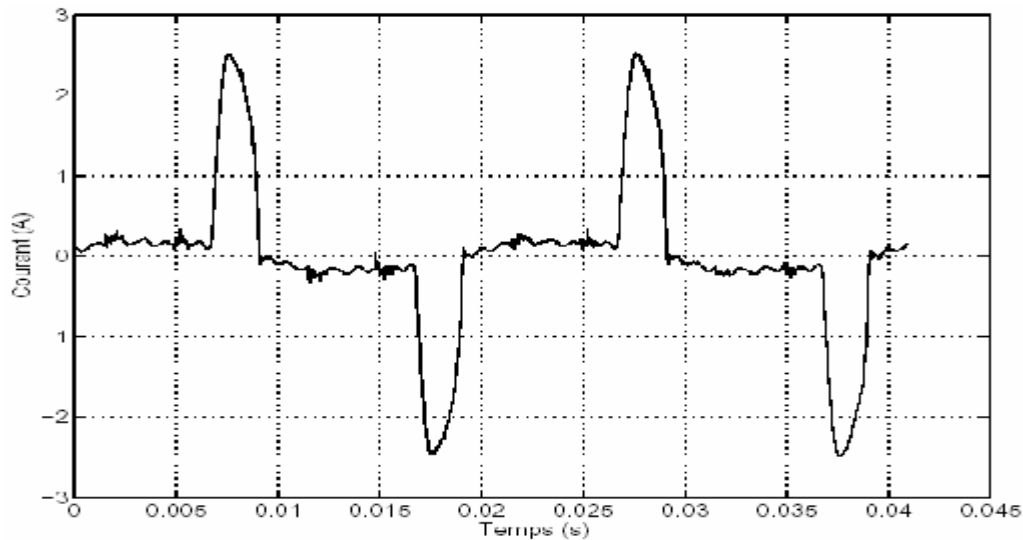


Figure I.2 Courant d'une alimentation à découpage d'un écran de micro-ordinateur

L'utilisation de ces convertisseurs statiques dans les installations de conversion d'énergie électrique a considérablement contribué à améliorer les performances et l'efficacité de ces systèmes. En revanche, ils ont participé à détériorer la "qualité" du courant et de la tension des réseaux de distribution. En effet, ces systèmes consomment des courants non-sinusoïdaux, même s'ils sont alimentés par une tension sinusoïdale, ils sont considérés comme des charges non-linéaires émettant des courants harmoniques dont les fréquences sont des multiples entiers de la fréquence fondamentale, ou parfois à des fréquences quelconques : ils se comportent comme des générateurs de courants harmoniques. Par l'intermédiaire de l'impédance de court-circuit du réseau, les courants harmoniques déforment la tension de celui-ci.

Les déformations du courant et de la tension peuvent perturber le fonctionnement normal d'autres équipements électriques. C'est pourquoi, les distributeurs d'énergie ayant la contrainte de fournir une tension sinusoïdale, prennent en charge l'atténuation des perturbations harmoniques au moyen d'installations de forte puissance. Les nouvelles réglementations internationales imposent aux consommateurs des limites aux harmoniques, engendrées par leurs systèmes, tant en courant qu'en tension.

I.5 Conséquences des harmoniques

Les courants harmoniques se propagent dans le réseau électrique, de déforme l'allure du courant de la source et polluent les consommateurs alimentés par ce même réseau. Ils peuvent occasionner des incidents au niveau de l'appareillage du client et donnent lieu à

des surcoûts de production d'énergie importants. On peut classer les effets engendrés par les harmoniques en deux type : les effets instantanés et les effets à terme.

I.5.1 Effets instantanés

Les effets instantanés apparaissent immédiatement dans certains appareillages.

➤ ***Défauts de fonctionnement de certains équipements électriques :***

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

➤ ***Troubles fonctionnels des micro-ordinateurs :***

Les effets sur ces équipements peuvent se manifester par la dégradation de la qualité de l'image et par des couples pulsatoires des moteurs d'entraînement de disque.

➤ ***Erreurs dans les appareils de mesure :***

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

➤ ***Vibrations et bruits :***

Les courants harmoniques génèrent également des vibrations et des bruits acoustiques, principalement dans les appareils électro-magnétiques (transformateurs, inductances et machines tournantes).

I.5.2 Effets à terme

Ils se manifestent après une exposition plus ou moins longue à la perturbation harmonique. L'effet à terme le plus important est de nature thermique, il se traduit par l'échauffement. Il conduit à une fatigue prématurée du matériel, des lignes et amènent un déclassement des équipements.

➤ ***Echauffement des câbles et des équipements :***

Ces effets peuvent être à moyen terme (de quelques secondes à quelques heures) ou à long terme (de quelques heures à quelques années) et concernent les câbles qui peuvent être le siège du suréchauffement du neutre et les matériels bobinés comme les transformateurs ou les moteurs.

➤ ***Echauffement des condensateurs :***

L'échauffement est causé par les pertes dues au cycle d'hystérésis dans le diélectrique. Les condensateurs sont aussi sensibles aux surcharges, qu'elles soient dues à une tension fondamentale trop élevée ou à la présence d'harmoniques. Ces échauffements peuvent conduire au claquage.

➤ **Echauffement dû aux pertes supplémentaires des machines et de transformateurs**

Un échauffement est causé par les pertes dans le stator des machines et principalement dans leurs circuits rotoriques (cages, amortisseurs, Circuits magnétiques) à cause des différences importantes de vitesse entre les champs tournants inducteurs harmoniques et le rotor. Les harmoniques génèrent aussi des pertes supplémentaires dans les transformateurs, par effet Joule dans les enroulements, accentuées par l'effet de peau et des pertes par hystérésis et courants de Foucault dans les circuits magnétiques. [7]

I.6 Propagation des harmoniques sur les réseaux

Soit un transformateur HTB/HTA alimentant deux départs moyenne tension. L'un de ces départs comporte une source harmonique. Le réseau de distribution est composé par des lignes et des transformateurs. Comme l'impédance des charge est nettement grande que celle des lignes, une part importante du courant harmonique tend à circuler en direction des postes sources (les courants harmoniques remontent à la source car ils suivent le parcours le moins impédant). Aussi, le problème de propagation des harmoniques de courant se ramène à l'étude d'un simple diviseur de tension étant donné que le jeu de barre HTA vu de départ propre apparaît comme une source de tension.

La propagation des harmoniques sur le réseau est schématisée dans la figure(I.3) :

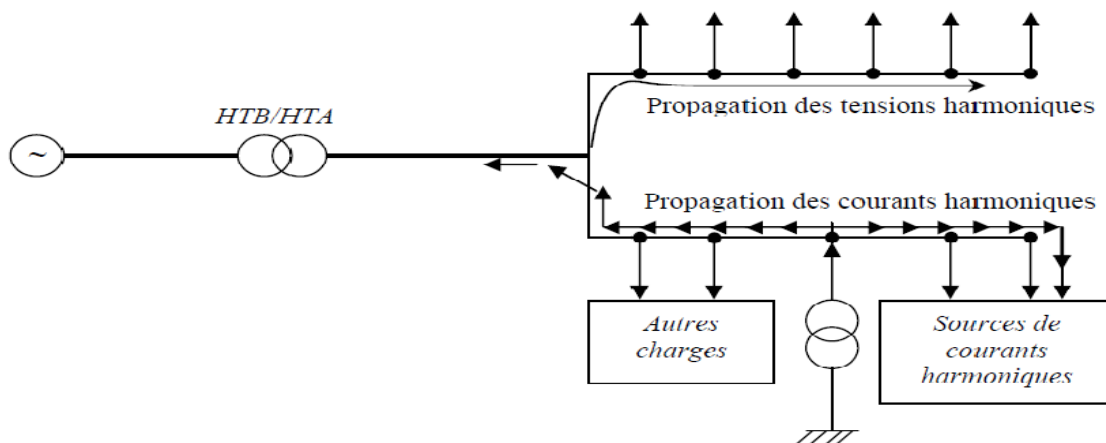


Figure I.3 La propagation des harmoniques sur les réseaux. [2]

I.7 Réglementation des perturbations

Les générateurs de courants harmoniques sont responsables de l'apparition d'harmonique de tension aux bornes de réseau. Ces harmoniques provoquent des pertes supplémentaires dans les lignes, les machines et les transformateurs, de plus ils perturbent

fortement l'appareillage électronique (problèmes de synchronisation) et créent principalement des interférences avec les équipements de télécommunication.

Une onde de tension trop déformée entraîne un certain nombre d'inconvénients, on particulier pour les convertisseurs eux même dont l'angle d'allumage serait alors décalé.

Les distributeurs d'énergie fixent un taux admissible au point de raccordement de leurs réseaux. En particulier, en France, EDF impose les limites suivantes :

$$\frac{V_h}{V_1} \leq 1\% \quad \text{Si } h \text{ est impair} \quad (\text{I.24})$$

$$\frac{V_h}{V_1} \leq 0.6\% \quad \text{Si } h \text{ est pair} \quad (\text{I.25})$$

$$THD \leq 1.6\% \quad (\text{I.26})$$

Au-delà de ces valeurs, il est nécessaire d'installer des dispositifs de filtrage ou dans la mesure du possible de augmentera puissance de court-circuit du réseau.

En se qui concerne le facteur de puissance, EDF par exemple impose une valeur minimale de 0.928 ($\text{tg}\varphi < 0,4$), tout dépassement est facturé. [8]

I.8 Solutions de dépollution des réseaux électriques

Afin de compenser toutes les perturbations, séparées en deux types : courant et tension, deux groupes de solution de dépollution, traditionnelle et moderne, vont être étudiées. L'approche de la dépollution la mieux adaptée à notre objectif de recherche sera détaillée par la suite.[9]

I.8.1 Solutions de dépollution traditionnelles

I.8.1.1 Filtrage passif

Le principe d'un filtre passif est de modifier localement l'impédance du réseau, de façon à dériver les courants harmoniques et à diminuer les tensions harmoniques là où c'est nécessaire. On associe des éléments capacitifs et inductifs de manière à obtenir une résonance série accordée à une fréquence choisie. Il existe deux classes de filtres passifs (résonant, amorti) permettant de réduire les harmoniques [10].

I.8.1.1.1 Filtre résonant

Le filtre résonant est constitué d'un condensateur monté en série avec une inductance. Ces éléments sont placés en dérivation sur l'installation et accordés sur un rang d'harmonique à éliminer. L'impédance de cet ensemble est très faible pour sa fréquence d'accord, et se comporte ainsi comme un court circuit pour l'harmonique considéré [10].

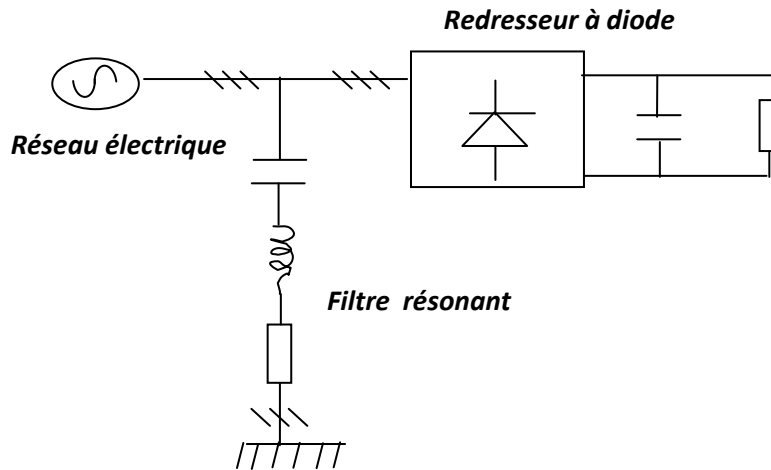


Figure I.4 Branchement d'un filtre résonant.

I.8.1.1.2 Filtre amorti

Un filtre amorti se compose d'une capacité en série avec un ensemble constitué de la mise en parallèle d'une inductance et d'une résistance appelée résistance d'amortissement. Il est utilisé lorsque les performances demandées ne sont pas trop élevées. On l'utilise souvent pour filtrer simultanément les plus hautes fréquences du spectre et non une fréquence particulière, c'est un filtre passe haut [10].

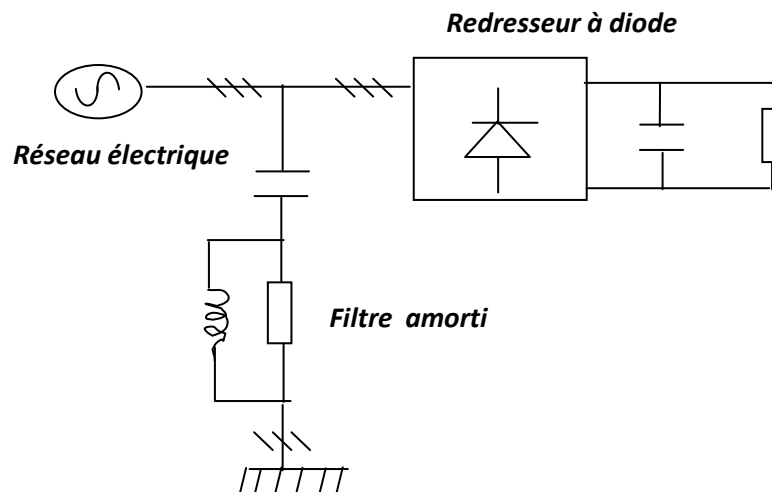


Figure I.5 Branchement d'un filtre amorti.

I.8.1.1.3 Avantages et inconvénients

I.8.1.1.3.1 Avantages

Un filtre passif a pour objet, dans le cas des harmoniques, de diminuer l'impédance de réseaux à une fréquence donnée. Les courants harmoniques à cette fréquence sont alors dérivés dans le filtre. Ce type de filtre est utilisé comme un piège des harmoniques c.-à-d. il est utilisé pour diminuer le taux de distorsion en tension au niveau d'un point de raccordement de plusieurs charges. Les filtres passifs contribuent aussi à la compensation d'énergie réactive de l'installation. [4]

I.8.1.1.3.2 Inconvénients

Le filtrage passif est intéressant par le principe mais a des importants inconvénients dont les suivants:

- La variation de l'impédance de la source influe considérablement sur les caractéristiques de filtrages.
- La résonance parallèle entre le filtre passif et la source produit des amplifications de courants harmoniques du côté de la source à des fréquences spécifiques.
- Le fonctionnement en parallèle de plusieurs filtres passifs accordés sur un rang théoriquement égal, entraîne la circulation de courants harmoniques très importants qui provoquent rapidement leur destruction.
- La présence d'un filtre harmonique raccordé à un réseau d'un niveau de tension donné nécessite de déconnecter tous les condensateurs raccordés au même réseau sous peine de destruction.

Pour pallier à cela l'idée est de faire du filtrage actif. [11][12][13]

I.8.1.1.4 Applications typiques des filtres passifs

Les applications des filtres passifs sont citées comme suit :

- Installations industrielles avec un ensemble de générateurs d'harmonique de puissance totale supérieure à 200KVA (variateurs de vitesse, alimentations sans interruption et redresseurs).
- Installation présentant un besoin de compensation d'énergie réactive.
- Nécessite de réduction du taux de distorsion en tension pour éviter la perturbation de récepteur sensibles.
- Nécessite de réduction du taux de distorsion en courant pour éviter les surcharges [14], [15].

I.8.2 Solutions de dépollution modernes

I.8.2.1 Filtrage actif

Le filtrage actif constitue aujourd'hui une solution plus sophistiquée que le filtrage passif, bénéficiant des technologies les plus performantes et constamment améliorée par les constructeurs.

Le principe de fonctionnement du filtre actif réside dans le fait que celui-ci produit des courants qui s'opposent aux courants harmoniques créés par les charges non linéaires, tendant ainsi à rétablir un courant appelé du réseau quasi sinusoïdal.

Ces filtres actifs sont encore appelés compensateurs actifs. Ils sont utilisés en parallèle ou en série d'une installation nécessitant un traitement harmonique [2].

Dans ce qui suit, nous donnons les structures les plus utilisés dans la littérature, à savoir les filtres parallèle série, combiné parallèle-série et les structures hybrides actifs passifs.

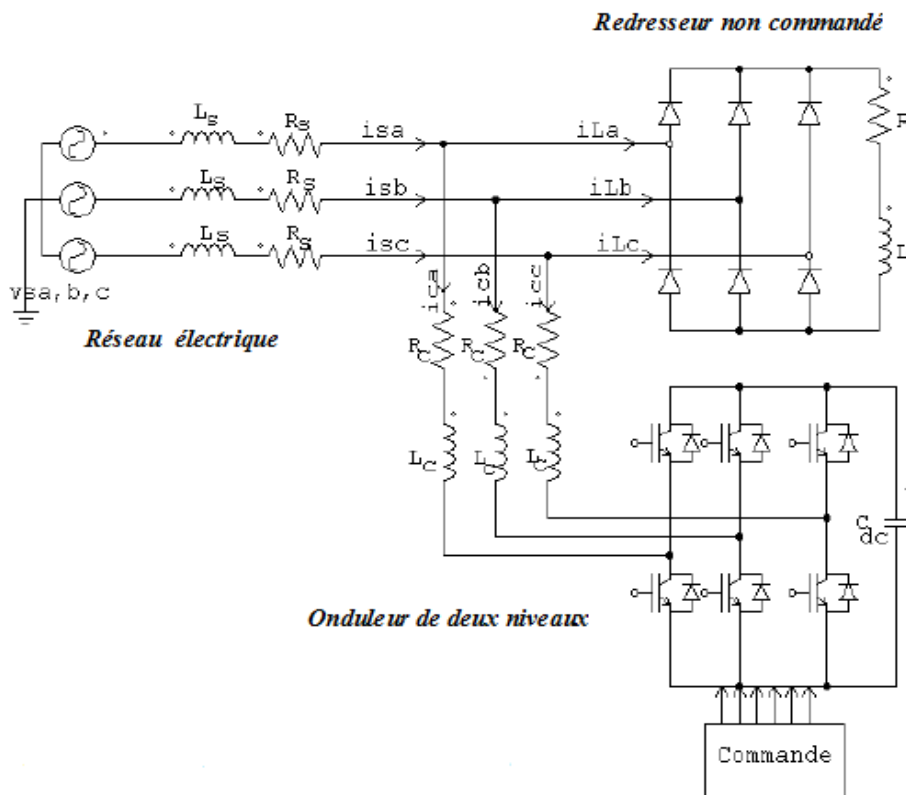


Figure I.6 Schéma de Principe d'un filtre actif

I.8.2.1.1 Filtre actif parallèle (F.A.P)

Le filtre actif connecté en parallèle sur le réseau, comme le montre la figure (I.7) est le plus souvent commandé comme un générateur de courant .Il injecte dans le réseau des

courants perturbateurs égaux à ceux absorbés par la charge polluante, mais en opposition de phase avec ceux-ci. Le courant côté réseau est alors sinusoïdal. Ainsi l'objectif du *filtre actif parallèle* (F.A.P) consiste à empêcher les courants perturbateurs (harmoniques, réactifs et déséquilibrés), produits par des charges polluantes, de circuler à travers l'impédance du réseau, située en amont du point de connexion du filtre actif. [9]

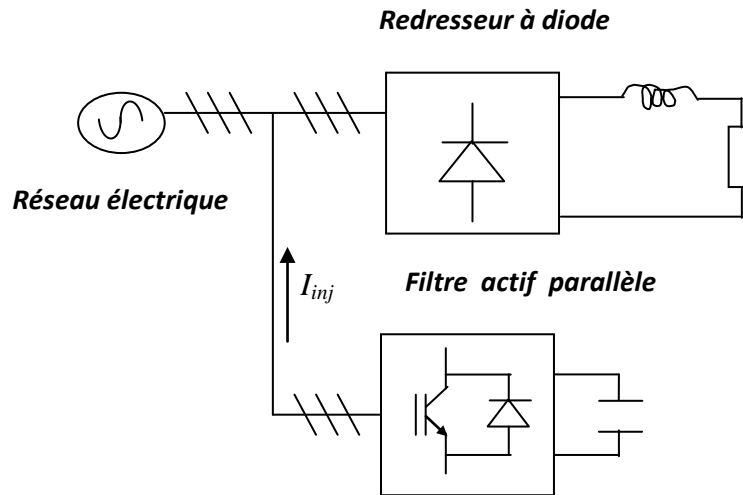


Figure I.7 Filtre actif parallèle

I.8.2.1.2 Filtre actif série (F.A.S)

Le filtre actif série se comporte dans ce cas, comme le montre la figure (I.8), comme une source de tension qui s'oppose aux tensions perturbatrices (creux, déséquilibre, harmonique) venant de la source et également à celles provoquées par la circulation des courants perturbateurs à travers l'impédance du réseau. Ainsi la tension aux bornes de la charge est protégée et purement sinusoïdale. [9]

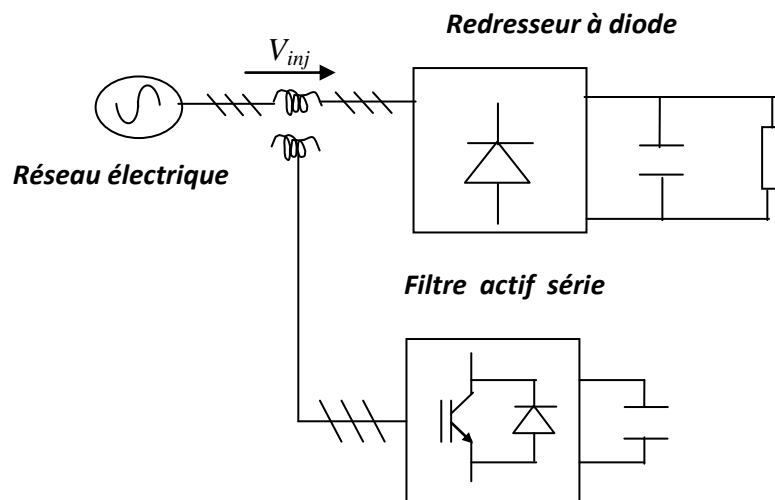


Figure I.8 Filtre actif série

I.8.2.1.3 Combinaison parallèle-série actifs (UPQC)

Cette combinaison parallèle-série actifs, aussi appelée *Unified Power Quality Conditioner (UPQC)*, résulte de l'association des deux filtres actifs parallèle et série, comme le montre la Figure (I.9). Profitant des avantages des deux filtres actifs, l'UPQC assure un courant et une tension sinusoïdaux du réseau électrique à partir d'un courant et d'une tension perturbés de celui-ci. [2].

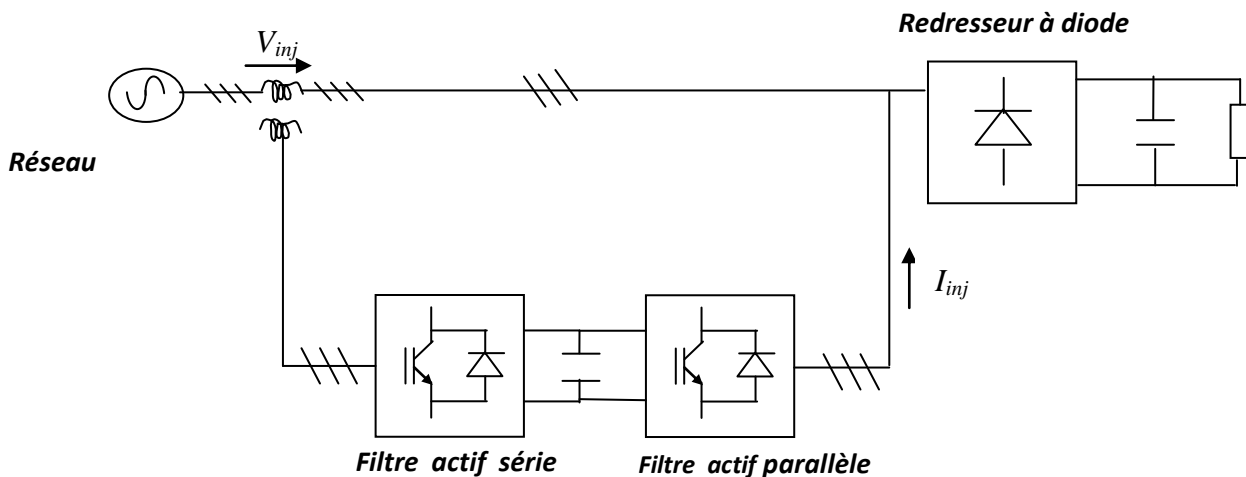


Figure I.9 Combinaison parallèle-série actif (UPQC)

I.8.2.1.4 Avantages et inconvénients des filtres actifs

I.8.2.1.4.1 Avantages

Le filtre actif offre de nombreux avantages, parmi lesquelles on cite :

- Il s'adapte automatiquement à l'évolution des charges et du réseau :
- Il peut compenser plusieurs rangs harmoniques (dans la limite de sa bande passante).
- Il ne passe pas en surcharge lorsque le courant harmonique à compenser dépasse le dimensionnement du filtre actif. Il limite son émission de compensation harmonique aux maximums de ses capacités, mais il n'y a aucun risque de destruction.
- Le risque de résonance entre filtre et impédance du réseau qui existe avec le filtre passif est supprimé.

Un compensateur actif peut protéger des condensateurs de compensation par élimination des courants harmoniques générés par une charge. De même, un compensateur actif de tension de type série peut protéger des condensateurs ou des filtres passifs contre une distorsion de tension provenant du réseau amont.

La compensation de l'énergie réactive à 50HZ est possible mais elle est coûteuse par rapport à une solution passive [4].

I.8.2.1.4.2 Inconvénients

Ces dispositifs peuvent présenter quelques inconvénients :

- Leur cout élève limite leur implantation dans l'industrie.
- Les pertes sont plus élevées. [16][17]

I.8.2.1.5 Applications typiques des filtres actifs

Les filtres actifs sont utilisées :

- Dans installations industrielles avec générateurs d'harmoniques de puissance totale inférieure à 200KVA (variateurs de vitesse, alimentations sans interruption, bureautique...).
- Nécessite de réduction du taux de distorsion en courant pour éviter les surcharges.[14][15]

I.8.2.1.6 Comparaison entre le filtre actif parallèle et le filtre actif série

Le tableau suivant donne une comparaison entre le filtre actif parallèle et le filtre actif série selon plusieurs critères.

	Filtre actif parallèle	Filtre actif série
Circuit de puissance du filtre actif	Onduleur de tension à MLI avec boucle de courant	Onduleur de tension à MLI sans boucle de courant
Filtre actif fonctionnant comme	Source de courant I_{af}	Source de tension V_{af}
Type de charge non linéaire	Redresseurs à diodes ou à thyristors à charge inductive et cycloconvertisseurs	Redresseurs à diodes à charge capacitive au coté continu
Fonction additionnelle	Compensation de la puissance réactive	Régulation de la tension alternative

Tableau I.2 comparaison entre le filtre actif parallèle et le filtre actif série. [10]

I.8.2.2 Combinaison hybride «active et passive»

Afin de réduire le dimensionnement et par conséquent le prix des filtres actifs, l'association de filtres actifs de faible puissance à des filtres passifs peut être une solution. Dans ce cas, les filtres passifs ont pour rôle d'éliminer les harmoniques prépondérantes

permettant de réduire le dimensionnement des filtres actifs qui ne compensent que le reste des perturbations.

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

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

I.8.2.2.1 Filtre actif série avec des filtres passifs parallèles

Le rôle du *filtre actif série* dans ce cas est d'empêcher les courants harmoniques de circuler vers le réseau et de les obliger à passer par les filtres passifs raccordés à leurs fréquences comme le montre la figure(I.10). [9]

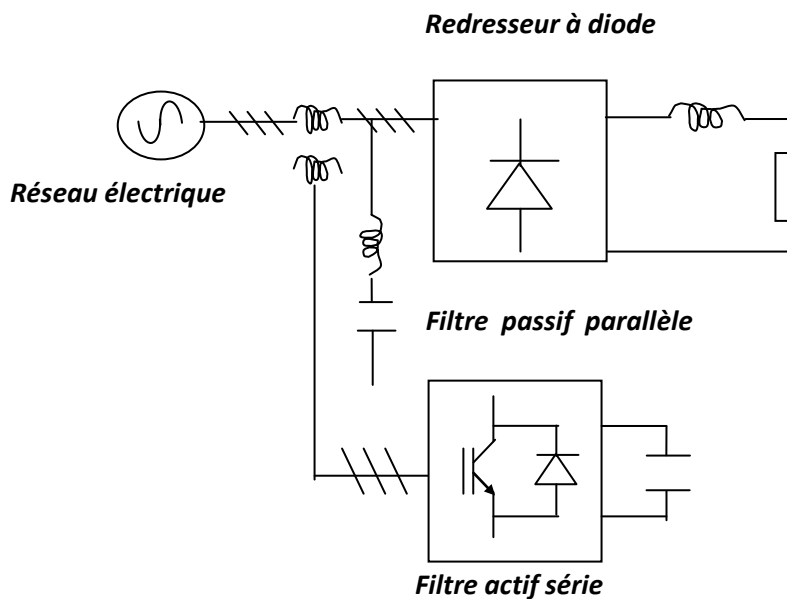


Figure I.10 Filtre actif série et filtre passif parallèle

I.8.2.2.2 Filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles

Le principe de fonctionnement de cette configuration, présentée en Figure(I.11), est la même que la précédente avec l'avantage de réduire encore le dimensionnement du *filtre actif série* car le courant qui le traverse est plus faible. De plus, le *filtre actif série* est à l'abri d'un éventuel court circuit de la charge. [9]

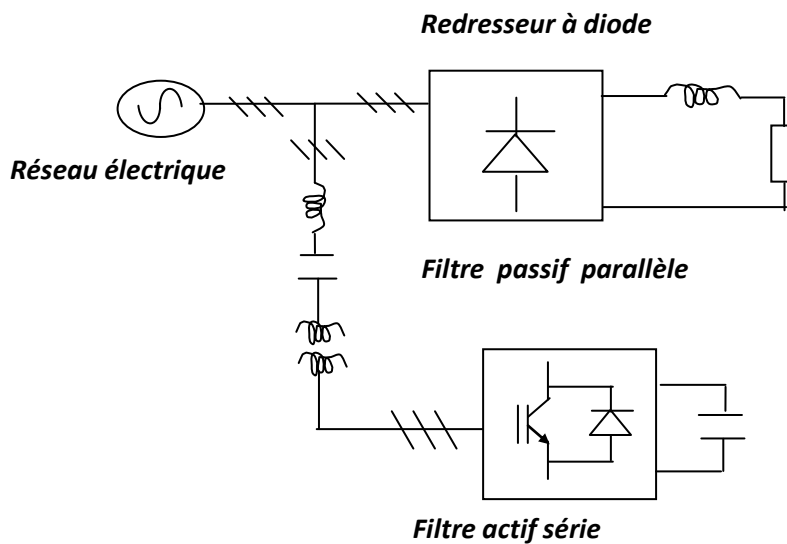


Figure I.11 Filtre actif série connecté en série avec un filtre passif parallèle

I.8.2.2.3 Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle

Le rôle du *filtre actif parallèle* dans cette configuration, montrée en Figure(I.12), 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*. Ce type de filtrage a déjà été appliqué à la compensation des courants harmoniques émis par un cycloconvertisseur de forte puissance. [9]

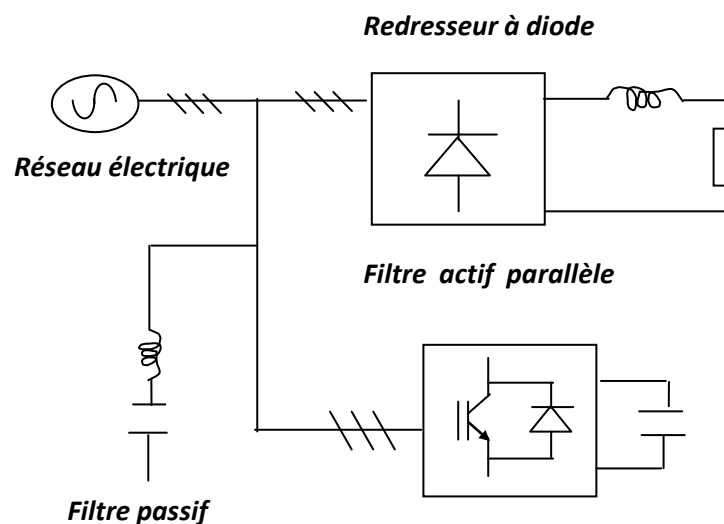


Figure I.12 Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle

I.8.2.1.4 Comparaison entre le filtre actif et le filtre passif

Le tableau suivant donne une comparaison entre le filtre actif et le filtre passif selon plusieurs critères.

	Filtre passif	Filtre actif
Action sur les courants Harmoniques	Nécessite un filtre pour chaque fréquence (encombrant)	Agit simultanément sur plusieurs fréquences
Influence d'une variation de Fréquence	Efficacité réduit	Aucune conséquence
Influence d'une modification de l'impédance	Risque de résonance	Aucune conséquence
Influence d'une augmentation de courant	Risque de surcharge et de détérioration	Aucun risque de surcharge, mais efficacité diminuée
Ajout de matériel (augmentation de charge)	Nécessite des modifications sur le filtre, dans certains cas	Aucun problème
Action sur les harmoniques suivant leur ordre	Très difficile	Possible, grâce au paramétrage
Modification de la fréquence fondamentale	Modification impossible	Possible, grâce à la reconfiguration
Encombrement	Important	Faible
Poids	Important	Faible

Tableau I.3 comparaison entre le filtre actif et le filtre passif. [10]

I.10 Conclusion

Nous avons mis en évidence l'influence des harmoniques dans les réseaux de distribution d'énergie. Nous nous sommes intéressés aux convertisseurs statiques plus particulièrement, aux redresseurs, qui forment la base de nombreuses conversions. Ces derniers sont en partie à l'origine de la pollution harmonique et des détériorations du facteur de puissance des réseaux.

Après avoir montré les incidences que ces perturbations ont sur les réseaux de distribution, nous avons présenté les moyens actuels et à venir pour les réduire.

Les solutions existantes, notamment les techniques de filtrage et compensation à base d'éléments passifs présentent nombreuses contraintes.

Pour répondre au besoin d'apporter une solution plus performante et plus souple, de nouvelles structures ont été étudiées et dans certains cas réalisés, comme les compensateurs actifs utilisant des techniques de commande MLI et Hystérésis.

Ces derniers seront étudiés dans la suite de ce mémoire, offrent de nombreuses perspectives sur le plan du contrôle harmonique.



Chapitre II

Principe de filtre actif parallèle et identification des courants harmoniques

II.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons étudier le principe de filtrage actif parallèle et la méthode d'identification. Tout d'abord, préciser l'objet de filtre actif puis modélisation de l'association réseau, filtre actif et charge polluante, Afin de compenser les harmoniques générés par cette charge, un filtre actif parallèle est implanté dans ce réseau. Cette structure contient deux parties: la partie de puissance et la partie de contrôle-commande, La première partie se compose de trois blocs principaux, à savoir l'onduleur de tension, circuit de stockage d'énergie et le filtre de sortie. La deuxième partie, est constitué de quatre blocs principaux, soit stratégie de l'identification, méthode d'identification de courant perturbé, la régulation de la tension continue et du courant du filtre actif parallèle et la commande de l'onduleur par hystérésis et MLI.

II.2 Filtres actifs

L'utilisation des filtres actifs contribue à la minimisation des harmoniques survenant dans les réseaux de distribution de l'énergie électrique, causés par la connexion des charges non linéaires.

II.2.1 Objectif

Un filtre actif est un dispositif qui exploite au moins un convertisseur statique pour satisfaire la fonction de 'dépollution harmonique'. Les besoins en termes de dépollution harmonique sont divers, parce qu'on espère toujours garantir :

- Le non pollution d'un réseau propre alimentant une charge sensible.
- Le bon fonctionnement d'une charge sensible dans un environnement pollué.
- Réaliser, simultanément, les deux opérations. [18]

II.2.2 Filtre actif parallèle

Ce filtre est le plus souvent commandé comme un générateur de courant, il génère des courants harmoniques, en opposition de phase avec le réseau, afin que la somme avec ceux-ci soit nulle. On obtient alors des courants alternatifs au niveau du réseau. Il permet donc de supprimer au point de raccordement tous les harmoniques de courants de charge non linéaire.

En général, le filtre actif parallèle est utilisé pour la dépollution des réseaux BT et MT. Son impédance totale vis à vis de la source et de la charge lui confère une bonne auto-adaptabilité avec les performances appréciables [19]. Sa structure est la suivante :

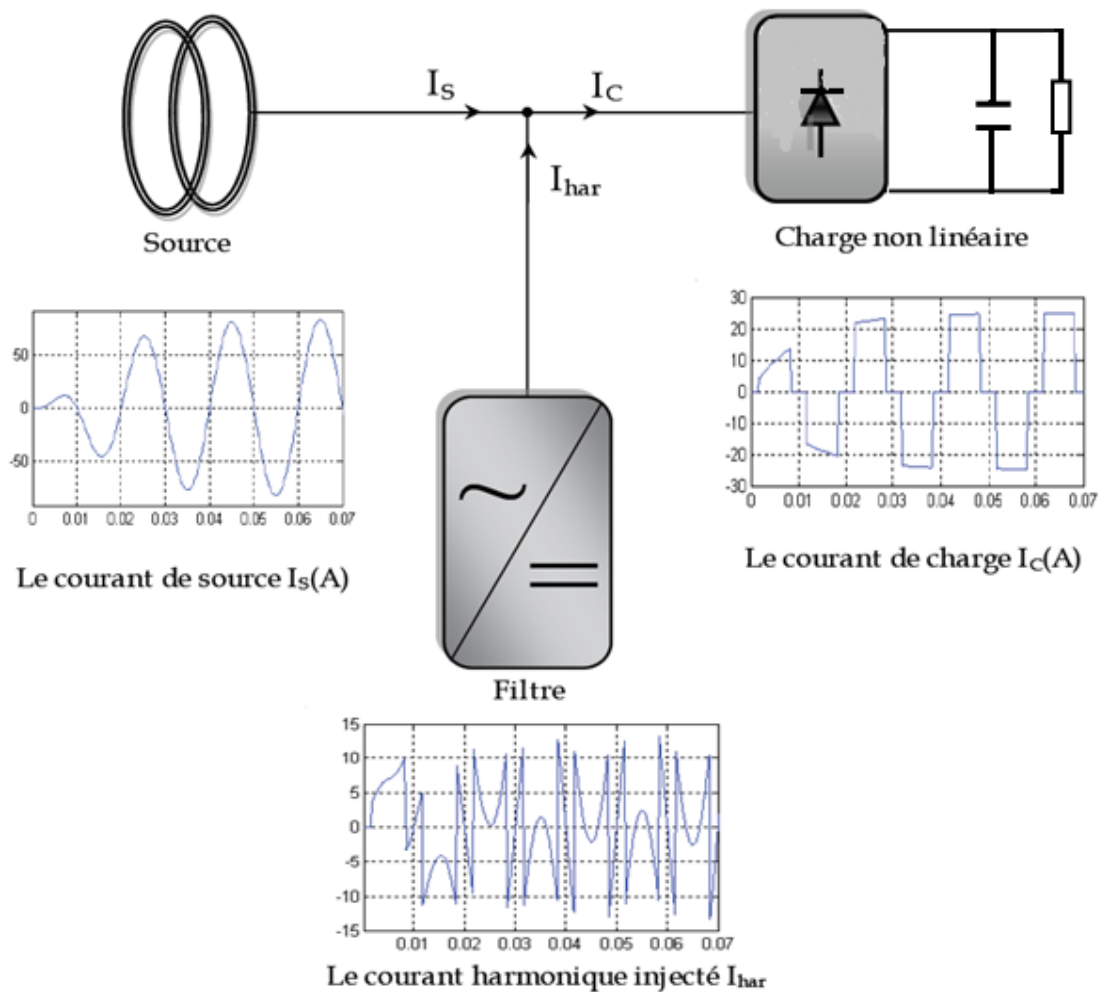


Figure. II.1 Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle

II-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.

II-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(II.2)).

$$\begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} = \sqrt{2} \cdot E \cdot \begin{bmatrix} \sin(\omega t) \\ \sin(\omega t - 2\pi/3) \\ \sin(\omega t - 4\pi/3) \end{bmatrix} \quad (\text{II-1})$$

$$Z_c = R_s + jL_s\omega \quad (\text{II.2})$$

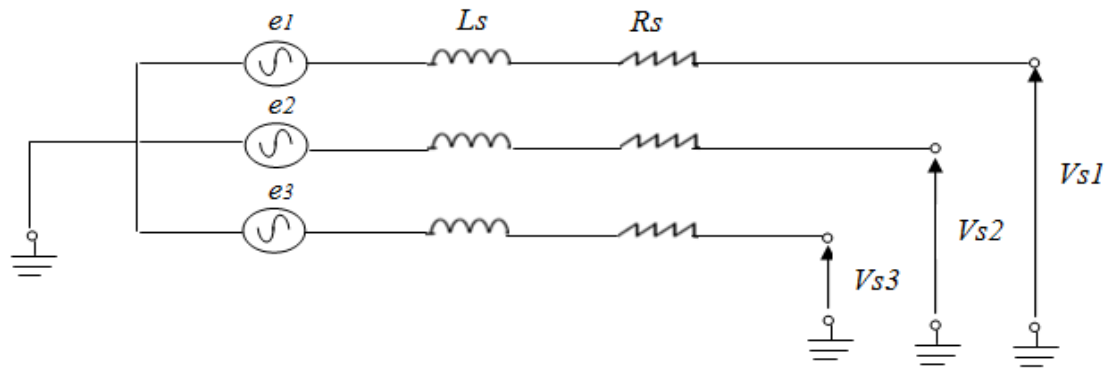


Figure. II.2 Schéma synoptique d'un réseau triphasé.

II-3-2 Modélisation de la charge polluante (Redresseur triphasé)

Pour tester le filtre actif on a opté pour une charge polluante qui est un pont redresseur triphasé, représenté sur la figure(II.3), ce dernier génère des harmoniques de courants de l'ordre $6k \pm 1$. Cette charge est modélisée comme étant des sources de courants parfaites (les semi-conducteurs sont considérés parfaits).

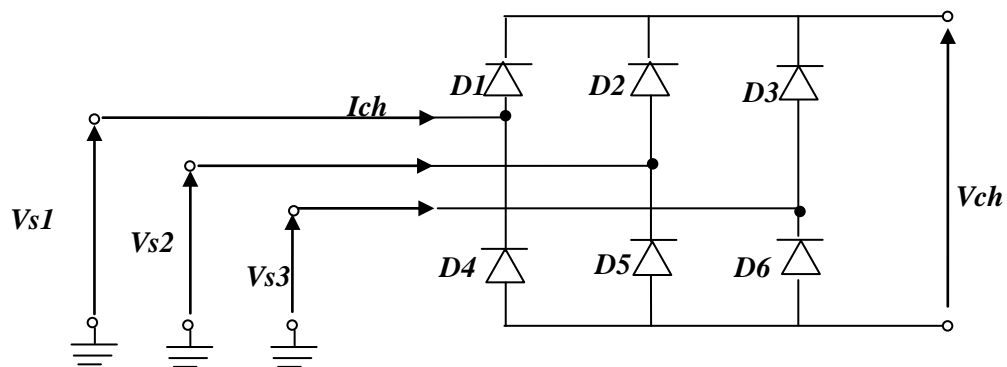


Figure. II.3 Schéma synoptique d'un pont redresseur [10]

II.3.3 Modélisation du filtre actif (ou de l'onduleur)

II.3.3.1 Structure d'un filtre actif parallèle

La structure générale du filtre actif parallèle, est présentée dans la figure (II-4) sous la forme de deux blocs: la partie puissance et la partie contrôle-commande.

➤ **La partie puissance est constituée**

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

➤ **La partie contrôle-commande est constituée**

- La méthode d'identification des courants perturbés.
- La régulation de la tension continue appliquée aux éléments de stockage d'énergie.
- La régulation du courant injecté sur le réseau à partir de l'onduleur de tension.
- La commande de l'onduleur de tension [09].

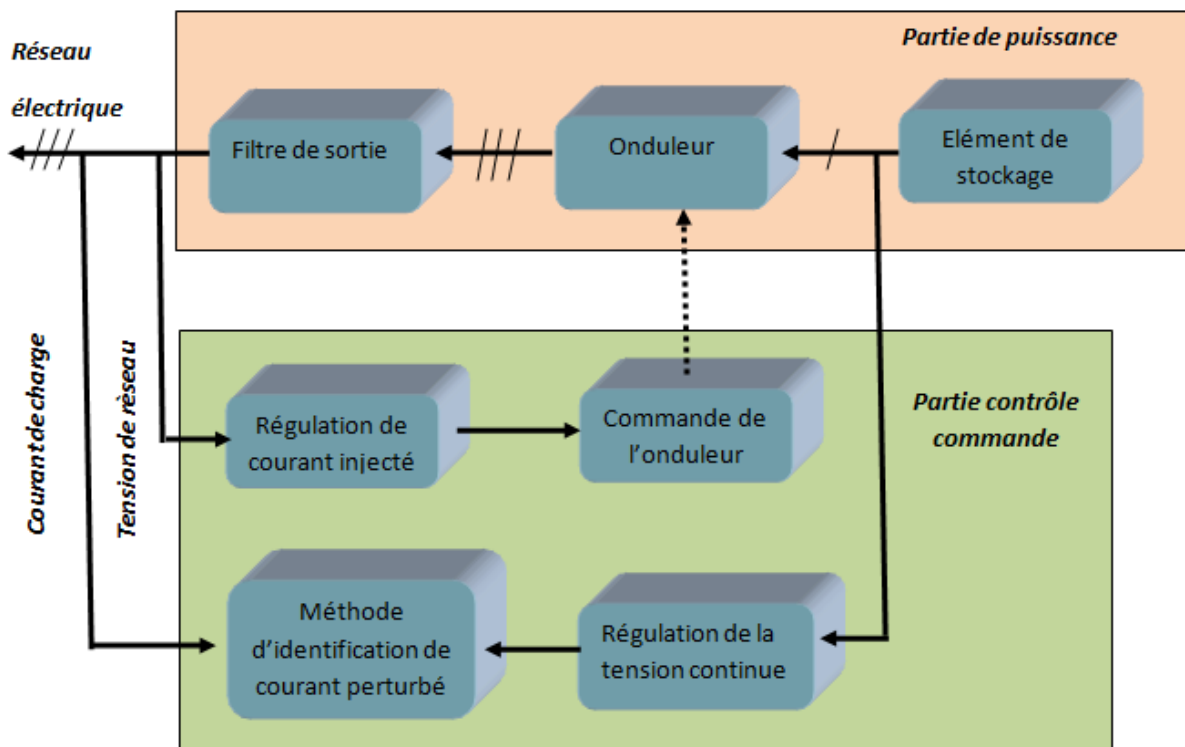


Figure. II.4 Structure générale du filtre actif parallèle

II.3.4 Partie de puissance

II.3.4.1 Onduleur de tension

II.3.4.1.1 Structure générale

La Figure (II.5) présente un onduleur triphasé à structure de tension. Il se compose de trois bras à interrupteurs réversibles en courant, commandés à la fermeture et à l'ouverture, réalisés à partir d'un transistor (GTO ou IGBT) et d'une diode en antiparallèle. Le stockage de l'énergie du côté continu se fait par l'intermédiaire d'un condensateur C_{dc} de tension V_{dc} . Le filtre de sortie est un filtre passif habituellement du premier ordre (L_f, R_f) employé pour connecter l'onduleur de tension au réseau électrique.

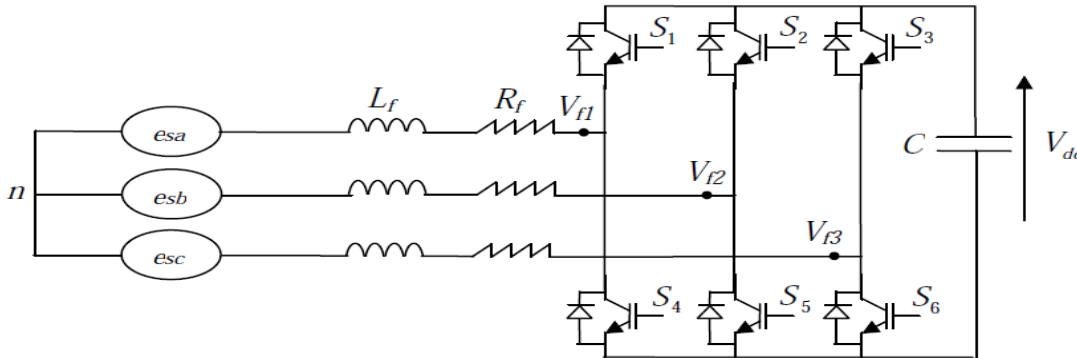


Figure. II.5 Onduleur de tension triphasé

Pour cette structure, les contraintes suivantes doivent être respectées:

- A un instant donné, un seul interrupteur d'un même bras doit conduire afin d'éviter le court-circuit de la source de tension c à d la conduction de l'un entraîne le blocage de l'autre,
- Le courant de ligne doit toujours trouver un chemin possible d'où la mise en antiparallèle de diodes au niveau des interrupteurs. [10]

II.3.4.1.2 Tension fournie par l'onduleur

L'ouverture et la fermeture des interrupteurs de l'onduleur de la Figure(II.5) dépendent de l'état des signaux de commande (T_1, T_2, T_3), comme défini ci-dessous :

$$\begin{aligned}
 T_1 &= \begin{cases} 1 & S_1 \text{ fermè et } S_4 \text{ ouvert} \\ 0 & S_1 \text{ ouvert et } S_4 \text{ fermè} \end{cases} \\
 T_2 &= \begin{cases} 1 & S_2 \text{ fermè et } S_5 \text{ ouvert} \\ 0 & S_2 \text{ ouvert et } S_5 \text{ fermè} \end{cases} \\
 T_3 &= \begin{cases} 1 & S_3 \text{ fermè et } S_6 \text{ ouvert} \\ 0 & S_3 \text{ ouvert et } S_6 \text{ fermè} \end{cases}
 \end{aligned} \tag{II.2}$$

Ainsi, on pourra exprimer huit cas possibles de tension de sortie du filtre actif V_f (référéés au neutre n de la source), comme le montre le Tableau(II.1). [05]

II.3.4.1.3 Représentation vectorielle des tensions fournies par l'onduleur

Dans le plan biphasé (α, β) , en considérant \vec{V}_f le vecteur correspondant aux tensions de l'onduleur, les huit cas possibles du vecteur \vec{V}_f sont donnés par la Figure(II.6).

N° du cas	T_3	T_2	T_1	V_{f3}	V_{f2}	V_{f1}
0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	1	$-V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	$2V_{dc}/3$
2	0	1	0	$-V_{dc}/3$	$2V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$
3	1	1	1	$-2V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$
4	1	0	0	$2V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$
5	1	0	1	$V_{dc}/3$	$-2V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$
6	1	1	0	$V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$	$-2V_{dc}/3$
7	1	1	1	0	0	0

Tableau. II.1 Tensions en sortie de l'onduleur. [05]

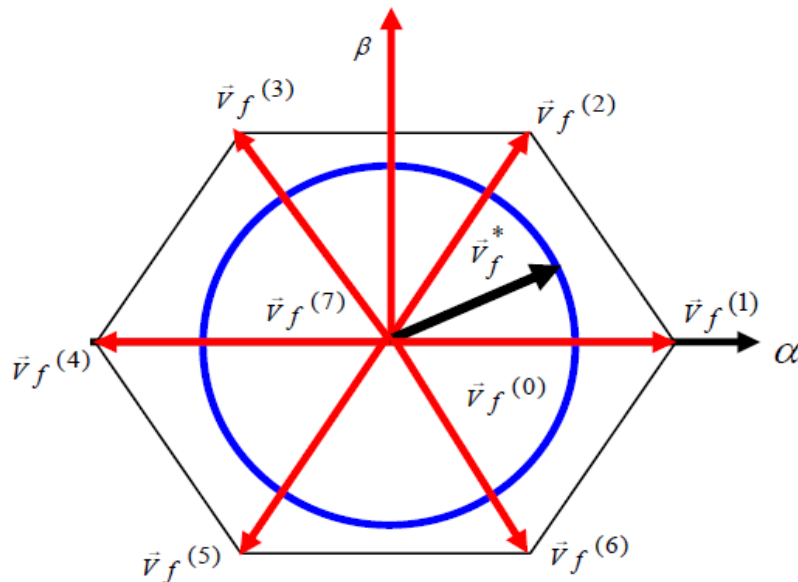


Figure. II.6 Représentation vectorielle des tensions générées par l'onduleur. [01]

Où \vec{V}_f^* représente la tension de référence que doit produire l'onduleur pour pouvoir créer les courants perturbateurs identifiés. Ceci signifie que l'onduleur n'est capable de fournir des tensions égales aux tensions de référence que si le vecteur formé par ces derniers reste à l'intérieur de l'hexagone montré dans la Figure(II.6). [09]

II.3.4.2 Système de stockage d'énergie

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

La méthode de choix la plus simple, se base sur la mesure du courant harmonique I_h du rang le plus faible. La capacité C_{dc} se calcule de la façon suivante [09]:

$$C_{dc} = \frac{I_h}{\varepsilon \cdot V_{dc} \cdot \omega_h} \quad (\text{II. 3})$$

Le taux d'ondulation ε généralement est de l'ordre de 5% de V_{dc}

Le condensateur du coté continu a deux fonctionnalités principales :

- maintenir la tension avec un faible taux d'ondulation en régime permanent.
- être un réservoir qui sert à fournir la différence d'énergie de la charge et la source durant le régime transitoire. [20]

II.3.4.3 Filtre de sortie (Filtre de découplage)

Le filtre de sortie du F.A.P, qui rend le VSI (Voltage source inverter) comme étant une source de courant dont la forme d'onde est liée rigidement à la tension fournie par l'onduleur, est un filtre passif passe-bas utilisé pour connecter le VSI au point de connexion PCC (Commun connection point) entre le réseau et la charge, il existe principalement deux types de ce filtre. Ce filtre doit dimensionner d'une façon optimale pour satisfaire les deux critères suivants :

- Assurer la dynamique du courant :

$$\frac{d}{dt}I_{hL} = \frac{d}{dt}I_{inj} \quad (\text{II. 4})$$

I_{hL} le courant harmonique de la charge, I_{inj} le courant injecté par le F.A.P à travers le filtre de sortie.

- Empêcher les composantes dues aux commutations de se propager sur le réseau électrique. (Elimination des composantes de haute fréquence).

Ils existent trois types du filtre de sortie :

- ✓ Filtre du premier ordre dit filtre L.
- ✓ Filtre du deuxième ordre dit filtre LC.
- ✓ Filtre du troisième ordre dit filtre LCL.

Le rôle du filtre de sortie du filtre actif est de réduire le contenu en harmonique à haute fréquence du courant, provoquée par l'opération de commutation dans le VSC (voltage source continu), par conséquent on peut obtenir un courant injecté par le filtre actif shunt très proche de la référence. [01]

II.3.5 Partie contrôle commande

II.3.5.1 Stratégie de l'identification

La stratégie de commande se base sur la détection des courants perturbateurs dans le domaine temporel. Trois possibilités d'identification des courants perturbateurs ont déjà été proposées [09].

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

La première méthode est la plus appropriée au filtre actif parallèle installé par le consommateur pour compenser les courants perturbateurs causés par ses charges polluantes. C'est pourquoi cette méthode de détection sera employée dans ce travail.

II.3.5.2 Méthode d'identification des courants perturbés

II.3.5.2.1 Généralités sur les méthodes d'identification

Le filtre actif sert à générer des courants harmoniques de même amplitude mais en opposition de phase avec ceux existant dans la charge. Pour cela, il faut identifier les courants harmoniques de la charge. Plusieurs méthodes d'identification existent :

- La première est basée sur l'analyse spectrale de courant polluant.
- La seconde utilise un filtre passe-bande pour filtrer le fondamental.

- La troisième utilise les notions des puissances réelle et imaginaire instantanées. Cette dernière est la plus utilisée dans la plupart des filtres actifs car elle réalise le meilleur accord entre les performances statiques et dynamiques. [04]

II.3.5.2.2 Principe du fonctionnement de la méthode des puissances instantanées

II.3.5.2.2.1 Généralités sur les puissances instantanées

Soient respectivement (V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}) et (I_{sa}, I_{sb}, I_{sc}) les tensions simples (sinusoïdales) et les courants coté charge d'un système triphasé équilibré.

La transformation abc - $\alpha\beta$ de ces grandeurs permet d'écrire, la relation des tensions suivante [21]:

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 5})$$

Et la relation des courants ci-dessous :

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 6})$$

La puissance active instantanée, notée $P(t)$, est définie par la relation suivante :

$$\begin{cases} P(t) = V_{sa}I_{sa} + V_{sb}I_{sb} + V_{sc}I_{sc} = P(t) + P_0(t) \\ P(t) = V_\alpha I_\alpha + V_\beta I_\beta \\ P_0(t) = V_0 I_0 \end{cases} \quad (\text{II. 7})$$

La puissance imaginaire instantanée est donnée sous la forme suivante :

$$Q(t) = -\frac{1}{\sqrt{3}} [(V_{sa} - V_{sb})I_{sc} + (V_{sb} - V_{sc})I_{sa} + (V_{sc} - V_{sa})I_{sb}] = V_\alpha I_\beta - V_\beta I_\alpha \quad (\text{II. 8})$$

Les deux expressions précédentes impliquent la forme matricielle de la puissance réelle et imaginaire instantanée suivante :

$$\begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_\alpha & V_\beta \\ -V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{II. 9})$$

Dans le cas général, chacune des puissances P et Q comporte une partie continue et une partie alternative, comme le montre l'expression ci-dessous [22][04]:

$$\begin{cases} P = \bar{p} + \tilde{p} \\ Q = \bar{q} + \tilde{q} \end{cases} \quad (\text{II. 10})$$

II.2.5.2.2.3 Calcul des courants perturbateurs

L'inverse de l'équation (II.9) des puissances réelles et imaginaires instantanée permet d'établir les relations (II.11) et (II.12) des courants I_α, I_β

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (\text{II. 11})$$

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{p} \\ 0 \end{bmatrix}}_{\text{courant actif}} + \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{q} \end{bmatrix}}_{\text{courant r\u00e9actif}} + \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix}}_{\text{courant harmonique}} \quad (\text{II. 12})$$

Avec $\Delta = V_\alpha^2 + V_\beta^2$ suppos\u00e9 constant dans l'hypoth\u00e8se d'une tension sinuso\u00efdale \u00e9quilibr\u00e9e du r\u00e9seau \u00e9lectrique.

Les courants perturbateurs dans le rep\u00e8re biphas\u00e9 (α - β) sont donn\u00e9s par la forme suivante:

$$\begin{bmatrix} \tilde{I}_\alpha \\ \tilde{I}_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 13})$$

La transformation inverse (biphas\u00e9-triphas\u00e9) donne l'expression suivante :

$$\begin{bmatrix} I_{r\grave{e}fa} \\ I_{r\grave{e}fb} \\ I_{r\grave{e}fc} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{r\grave{e}f\alpha} \\ I_{r\grave{e}f\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 14})$$

II.2.5.2.2.4 Algorithme d'identification de courant de référence

Le schéma indiqué ci-dessous explique la méthode classique des puissances active et réactive instantanées avec les équations finales utilisées.

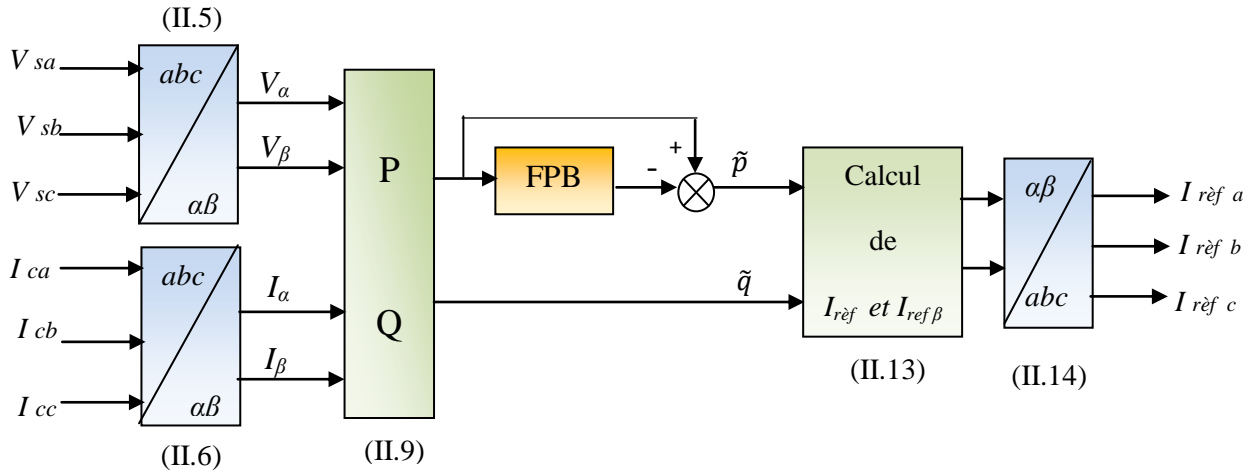


Figure. II.7 Détermination des courants de référence du filtre actif par la méthode classique des puissances active et réactive instantanées

Les deux types de filtre d'extraction sont présentés à la figure suivante, la figure(a) présente un filtre passe-haut et le figure (b) présente un filtre passe-bas [05] :

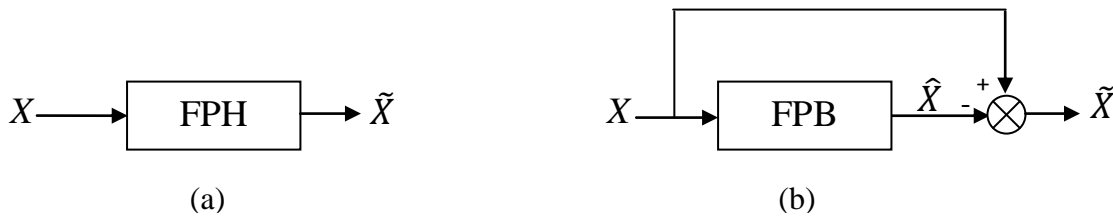


Figure. II.8 Deux types classiques de filtres d'extraction du composant harmonique.

II.3.5.3 Techniques de Régulation des filtres actifs

II.3.5.3.1 Régulation de la tension continue

La régulation de la tension du bus continu du filtre actif peut être améliorée en ajustant le petit taux de puissance active s'écoulant dans le condensateur, compensant ainsi les pertes par conduction et par commutation. La boucle de régulation de la tension est désignée pour être 10 fois plus petite que la boucle du courant. De là, les deux boucles se trouveront désormais découplées. Le circuit de régulation de la tension continue doit être

rapide dans la mesure où il répond seulement aux conditions du régime permanent. Les changements transitoires dans la tension continue ne sont pas permis et sont pris en considération lors de la sélection de la valeur appropriée du condensateur.

Afin d'obtenir la quantité P_{dc} représentant la puissance active nécessaire pour maintenir V_{dc} proche de sa référence $V_{dc\text{ref}}$, on peut utiliser un simple régulateur type proportionnel.

En effet, d'une part les courants de référence ne contiennent pas de composantes fondamentales lors du régime permanent, et d'autre part, la puissance nécessaire pour la compensation des pertes est faible. Le régulateur peut être un filtre passe-bas du 1^{er} ordre, dont la fonction de transfert est donnée par :

$$G(s) = \frac{K_c}{1 + \tau_c s} \quad (\text{II. 15})$$

En négligeant les pertes par commutation dans le filtre actif ainsi que l'énergie stockée dans l'inductance de sortie L_f , la relation entre la puissance absorbée par le filtre actif et la tension continue V_{dc} s'exprime par:

$$P_{dc} = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} C V_{dc}^2 \right) \quad (\text{II. 16})$$

Pour des faibles variations de V_{dc} autour de $V_{dc\text{ref}}$, l'équation (II.16) peut s'écrire :

$$P_{dc} = C V_{dc\text{ref}} \frac{d}{dt} (V_{dc}) \quad (\text{II. 17})$$

Des équations (II.15) et (II.17), la boucle de régulation de la tension continue V_{dc} sera présentée par le schéma bloc de la Figure(II.9), et aura pour fonction de transfert la formule suivante:

$$H(s) = \frac{\omega_c^2}{s^2 + 2\xi\omega_c s + \omega_c^2} \quad (\text{II. 18})$$

Avec :

$$\omega_c = \sqrt{\frac{K_c}{C \cdot V_{dc \text{ ref}} \cdot \tau_c}} \quad (\text{II. 19})$$

$$\xi_c = \sqrt{\frac{C \cdot V_{dc}}{K_c \cdot \tau_c}} \quad (\text{II. 20})$$

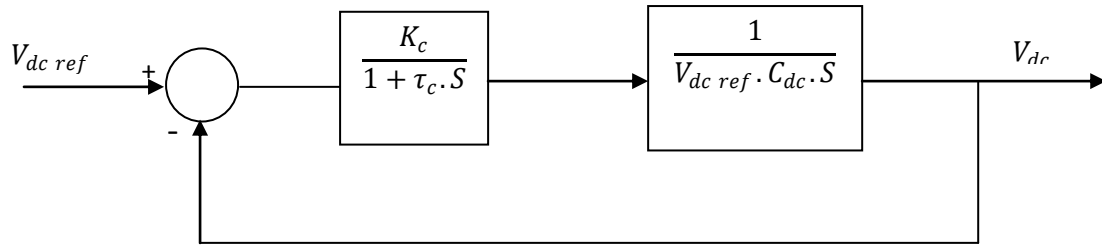


Figure. II.9 Boucle de régulation de la tension continue.

En général, la régulation est stable, mais pour l'obtention d'un amortissement suffisant, le produit $K_c \tau_c$ doit être limité, et ξ compris entre 0.4 et 0.8. [23]

II.3.5.3.2 Régulation des courants du filtre actif parallèle

En négligeant les effets de la capacité C_{dc} et des résistances du filtre de sortie sur le courant de référence I_{inj} (pour les harmoniques basses fréquences qui sont loin de la fréquence de commutation), nous pouvons écrire la relation suivante caractérisant le courant du filtre actif I_{inj}

$$L_f \frac{d}{dt} I_{inj} = V_f - V_s \quad (\text{II. 21})$$

Notons par ΔI_f la différence entre le courant de référence et le courant mesuré à partir de la relation suivante :

$$\Delta I_f = I_{ref} - I_{inj} \quad (\text{II. 22})$$

A partir des équations (II.21) et (II.22), nous obtenons l'expression ci-dessous :

$$L_f \frac{d}{dt} \Delta I_f = \left(V_s + L_f \frac{d}{dt} I_{ref} \right) - V_f \quad (\text{II. 23})$$

Le premier terme de la partie droite de la relation (II.23) peut être défini comme tension de référence (V_{fref}) ce qui nous donne l'expression suivant :

$$V_{fref} = V_s + L_f \frac{d}{dt} I_{ref} \quad (\text{II.24})$$

L'écart entre V_{fref} et V_f produit alors l'erreur sur le courant selon la relation (II.24) la tension de référence est composée des deux termes à des fréquences différentes le premier représente la tension du réseau V_s directement mesurable et 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 ce lui de la référence. Ce terme doit être élaboré par du régulateur de courant, comme montre la figure ci-dessous. [09]

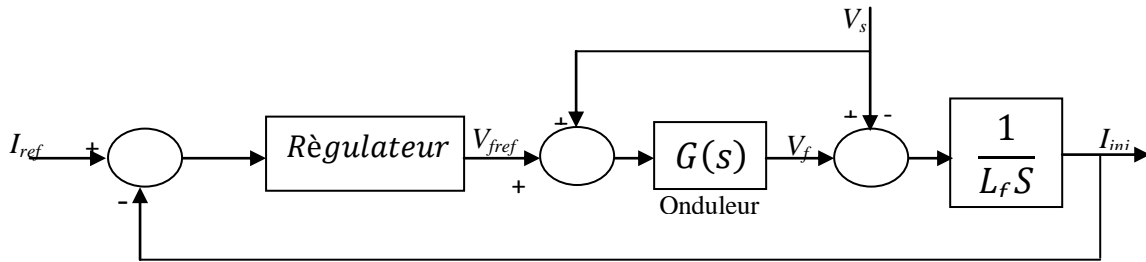


Figure. II.10 Schéma de la régulation des courants du filtre actif parallèle

$$\begin{cases} G(s) = k \frac{1}{1 + \tau s} \\ k = \frac{V_{dc}}{2V_p} \end{cases} \quad (\text{II.25})$$

Avec V_{dc} la tension 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.

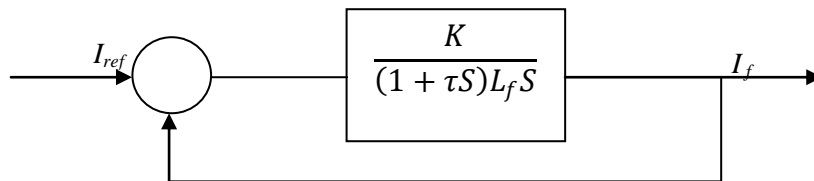


Figure II.11 Schéma simplifié de la régulation du courant d'un F.A.P

II.3.5.4 Stratégies de commande d'onduleur

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

- La commande par hystérésis,
- La commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI)

II.3.5.4.1 Commande par hystérésis

La commande par hystérésis, appelée aussi commande en tout ou rien, est une commande non linéaire qui utilise l'erreur existant entre le courant de référence et le courant produit par l'onduleur]. L'erreur est comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis. Dès que l'erreur atteinte la bande inférieure ou supérieure, un ordre de commande est envoyé de manière à rester à l'intérieur de la bande.[05]

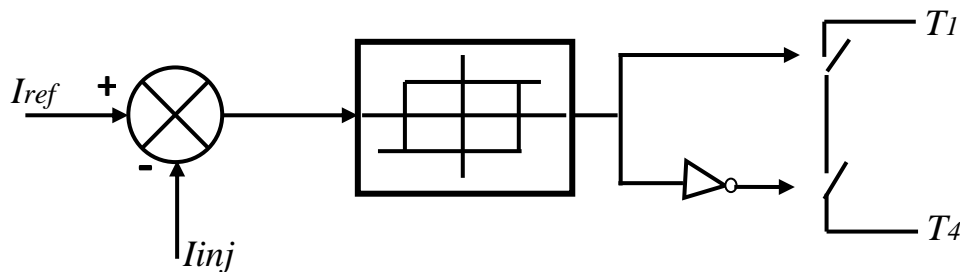


Figure II.12 Principe de la commande par hystérésis

$$\begin{cases} Si |I_{ref} - I_{inj}| < \Delta_I \Rightarrow S = 1 \\ Si |I_{ref} - I_{inj}| > \Delta_I \Rightarrow S = 0 \end{cases} \quad (II. 26)$$

La simplicité de la mise en œuvre est le principal atout de cette technique. En revanche, les commutations évoluant librement à l'intérieur de la bande d'hystérésis, les fréquences situées dans le haut de cette bande se maîtrisent difficilement à cause des fréquences de commutation. [25][26]

II.3.5.4.2 Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI)

La modulation de largeur d'impulsion est réalisée par la comparaison d'une onde modulée basse fréquence (tension de référence) avec une onde porteuse haute fréquence de forme triangulaire. Les instants de commutation sont déterminés par les points

d'intersections entre la porteuse et la modulante, la fréquence de commutation des interrupteurs est fixée par la porteuse. [24]

En triphasé, trois références sinusoïdales déphasés de $2.\pi/3$ à la même fréquence f . Comme à la sortie de l'onduleur, la tension n'est pas purement sinusoïdale, donc elle comporte des harmoniques, seules responsables des parasites ce qui engendre des pertes supplémentaires. Cette **MLI** sert à remédier ces problèmes et elle a les avantages suivantes:

- ✓ Variation de la fréquence de la tension de sortie.
- ✓ Elimination de certaines harmoniques de tension

Si la référence est sinusoïdale, on utilise deux paramètres caractérisant la MLI :

- L'indice de modulation « m » qui est l'image du rapport de fréquence de la porteuse f_p sur la fréquence de référence $f_{réf}$.

$$m = \frac{f_p}{f_{réf}} \quad (II.27)$$

- Le taux de modulation (le coefficient de réglage) « r » qui est l'image du rapport des amplitudes de tension de la référence $V_{mréf}$ sur la tension de la porteuse V_{mp} .

$$r = \frac{V_{mréf}}{V_{mp}} \quad (II.28)$$

La figure ci dessus présente le principe de la commande par MLI

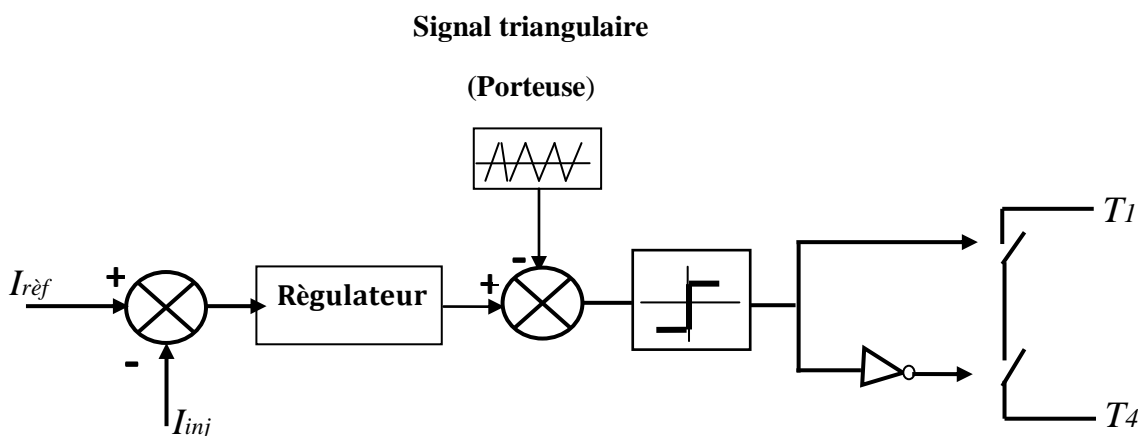


Figure II.13 Principe de la commande par MLI

La commande par MLI est d'une complexité réduite; il garantit un fonctionnement à fréquence fixe et conduit à un contenu harmonique parfaitement identifié. Cependant, cette technique a des propriétés dynamiques qui peuvent être limitatives et la réponse du système lors d'un changement brutal des courants de référence est plus lente que celle d'une commande par hystérésis. [05]

II.4 Conclusion

Dans ce chapitre, on a cité la plupart des éléments constituant la structure du filtre actif parallèle. Cette structure a été partagée en deux parties à savoir la partie puissance et la partie contrôle-commande. La partie qui contient trois blocs internes, à savoir l'onduleur de tension, circuit de stockage d'énergie et le filtre de sortie ou filtre de découplage. Le choix des éléments de la partie contrôle commande, tels que la méthode d'identification des courants perturbés, la commande de l'onduleur par hystérésis et MLI et la régulation de la tension continue et le courant de filtre.

Le chapitre suivant sera consacré aux résultats de simulation d'un filtre actif parallèle ou l'onduleur de tension est commandé par la technique d'hystérésis et par celle MLI.

Chapitre III

Résultats de simulation d'un filtre actif parallèle

III.1 Introduction

SIMULINK est un outil additionnel à MATLAB, il est conçu pour résoudre numériquement les équations différentielles, linéaires ou non, qui régissent le comportement des systèmes physiques dynamiques représentés par leurs modèles mathématiques, ces systèmes peuvent être analogique, discrets ou hybrides.

Les principaux intérêts résident dans la possibilité de travailler directement sur le schéma bloc au lieu et à la place des équations mathématiques des systèmes.

SIMULINK permet de paramétrer tous les blocs et de les organiser sous forme hiérarchisée. L'expérimentateur peut, de ce fait passer de la description de son système par grandes fonctions, à l'étude de plus en plus détaillée de chacune d'entre elles. En cela SIMULINK respecte les principes de la programmation descendante/ ascendante.

Le logiciel fournit des sources variées pour exciter les systèmes mis en place ainsi que les instructions d'observations pour visualiser les signaux présents dans le système.

Dans ce chapitre on se propose d'étudier la simulation de l'ensemble réseau, redresseur (charge polluante), filtre actif sous l'environnement MATLAB/ SIMULINK avec lequel on met au point deux programmes de simulation, commande par hystérésis et commande par MLI. On donne enfin les résultats de simulation obtenus (Le courant de la charge avec son spectre harmonique avant et après le filtrage et le courant de référence) avec l'analyse de ces résultats.

III.2 Simulation

Dans notre travail nous avons utilisé le SIMULINK comme outil de simulation, les schémas bloc de simulation représentés dans les schémas des Figure (III.1) et figure(III.5) se compose :

- ✓ D'un réseau électrique triphasé représenté par les grandeurs (e_s, R_s, L_s) ,
- ✓ D'un pont redresseur à diodes triphasé alimentant une charge (R_d, L_d) .
- ✓ D'un transformateur de régulation (R_c, L_c) connecté à l'entrée de la charge polluante.
- ✓ Deux filtres actifs parallèles : le premier filtre actif commandé par hystérésis qui est présenté dans la figure (III.1) avec un filtre de sortie représenté par (R_f, L_f) , et le

deuxième filtre actif commandé par MLI avec un filtre de sortie représenté par les grandeurs (R_f, L_f).

III.2.1 Commande par Hystérésis

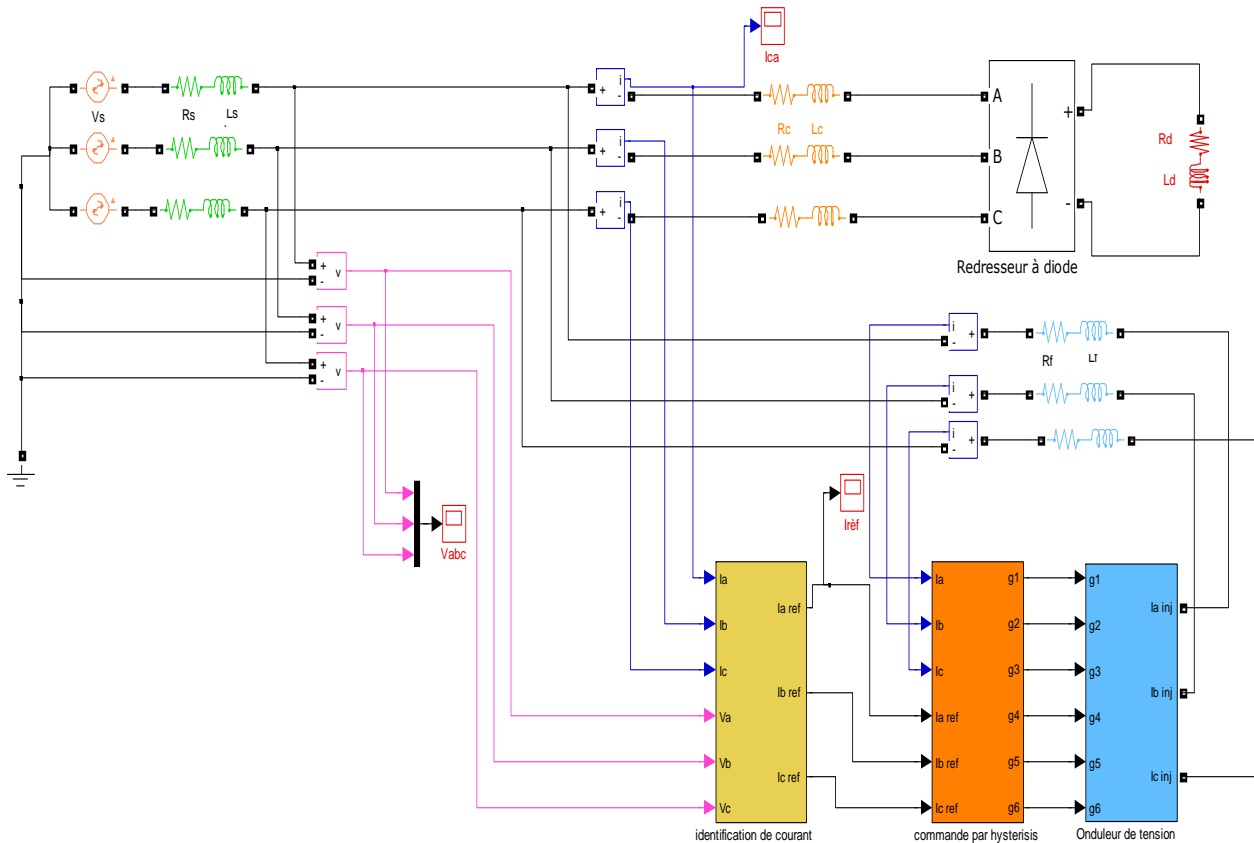


Figure III.1 Schéma global d'un filtre actif parallèle commandé par hystérésis.

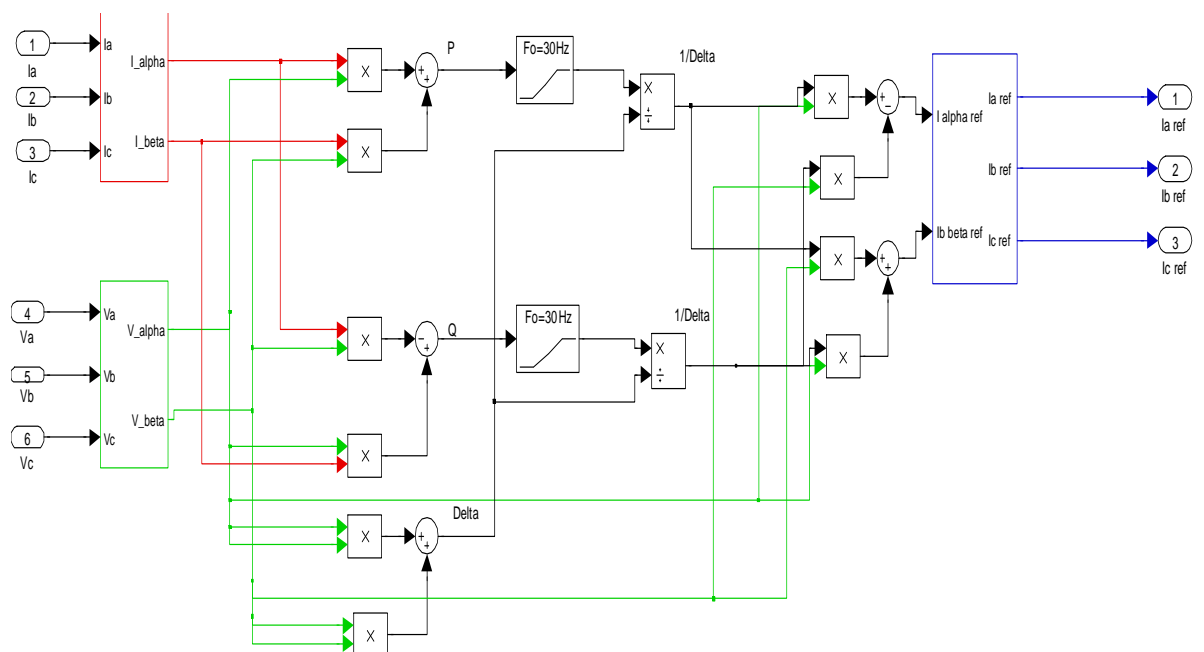


Figure III.2 Schéma bloc de la méthode d'identification de courant perturbé

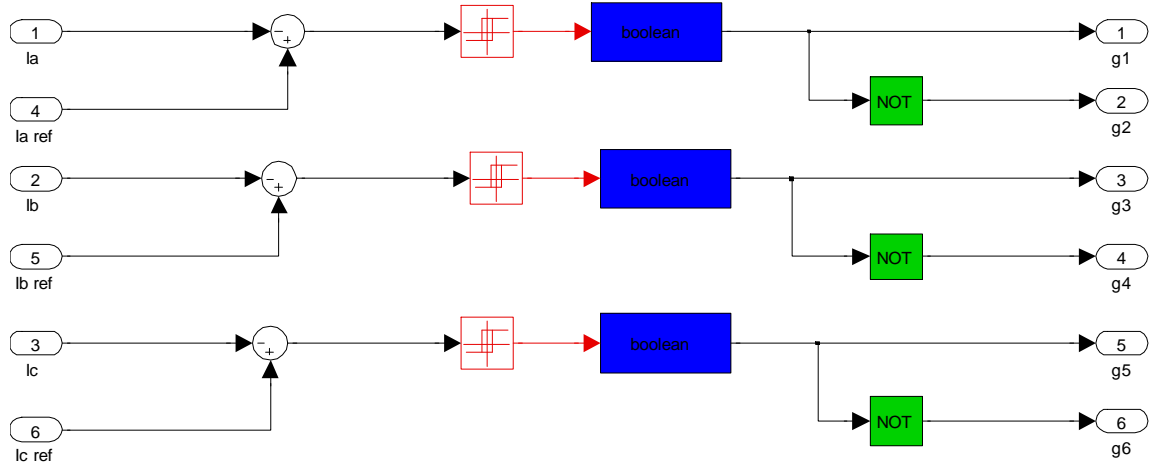


Figure III.3 Schéma bloc de la commande par hystérésis

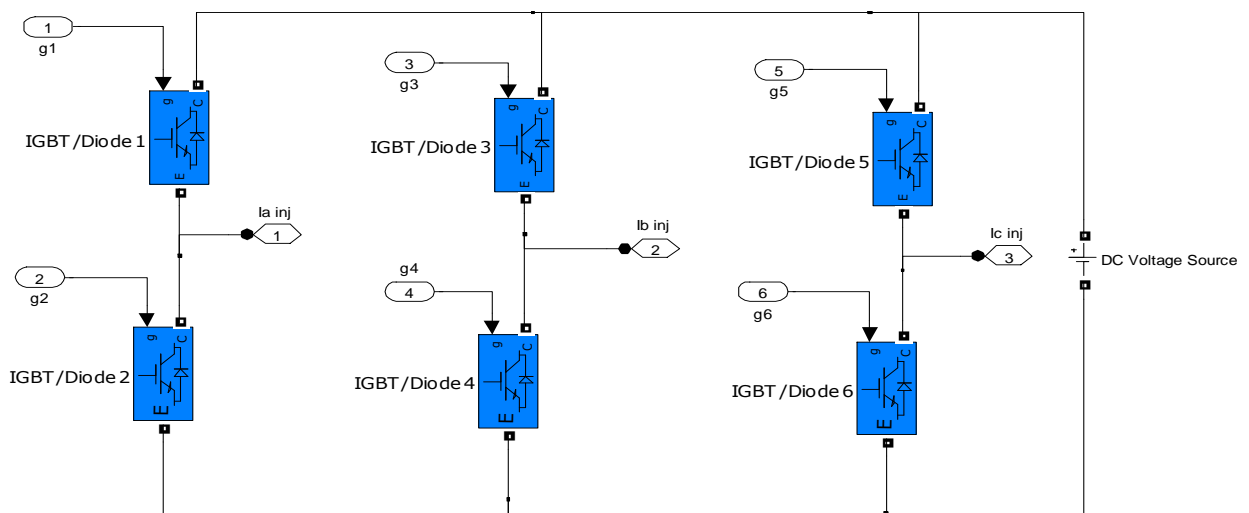


Figure III.4 Schéma bloc de l'onduleur de tension à deux niveaux.

III.2.2 Commande par MLI

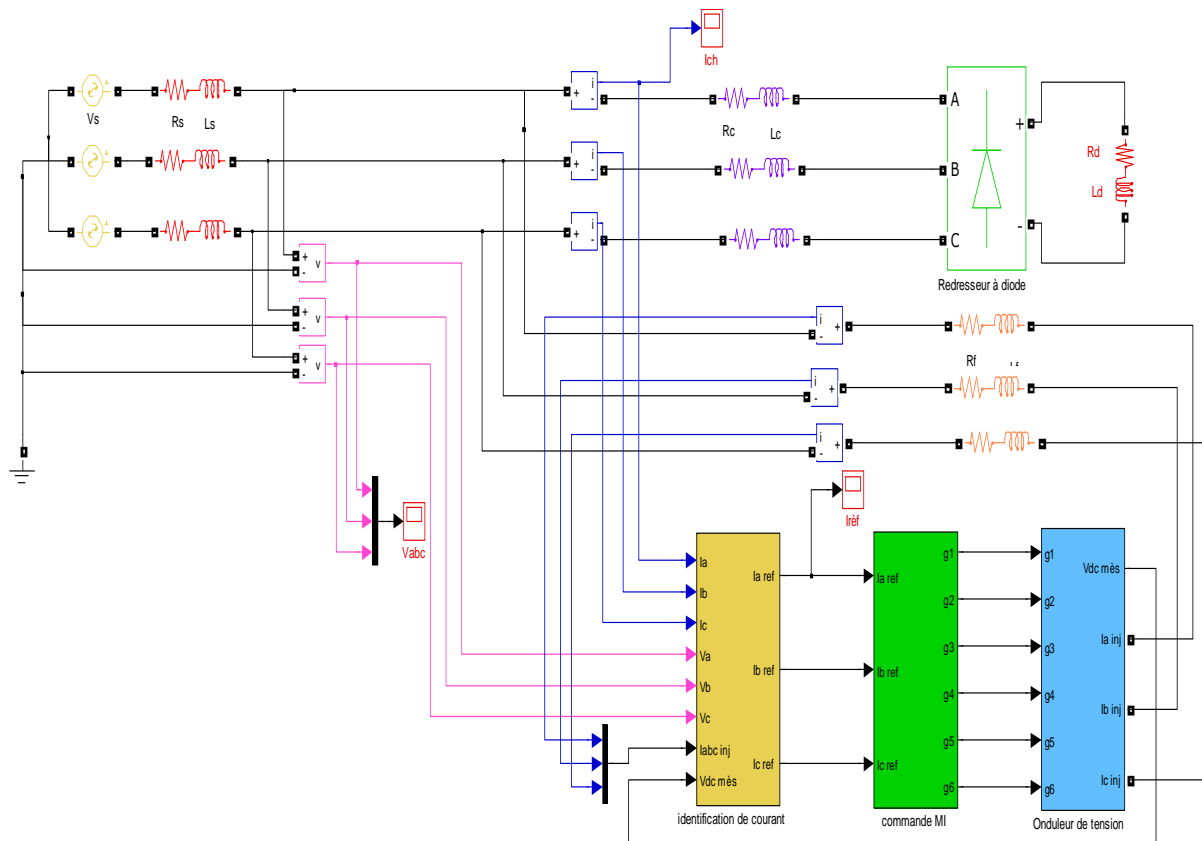


Figure III.5 Schéma global d'un filtre actif parallèle commandé par MLI.

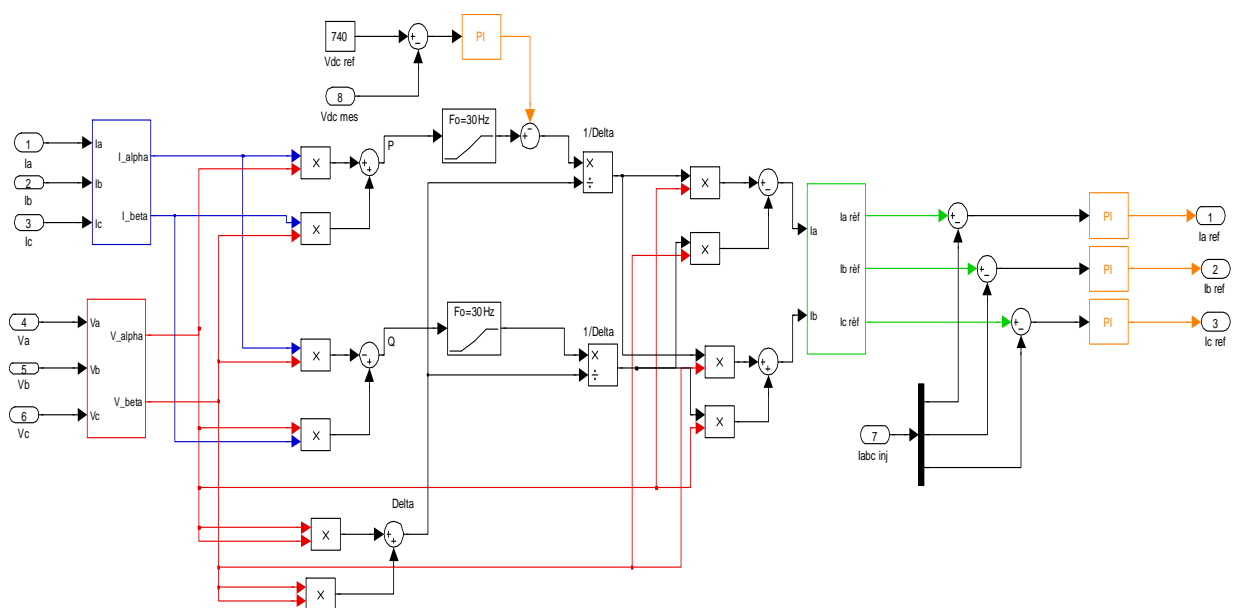


Figure III.6 Schéma bloc de la méthode d'identification de courant perturbé

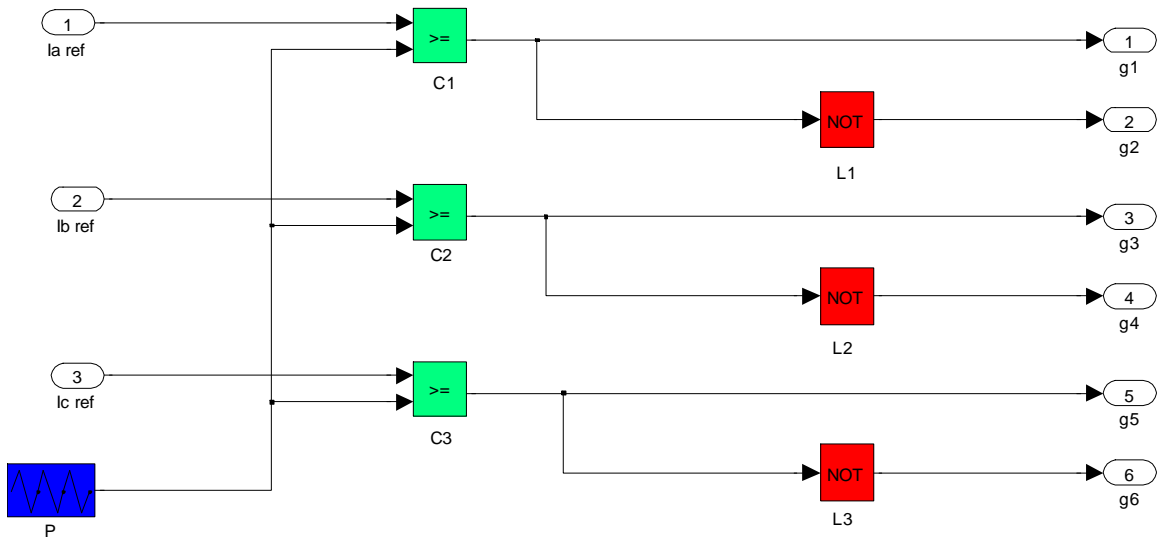


Figure III.7 Schéma bloc de la commande MLI.

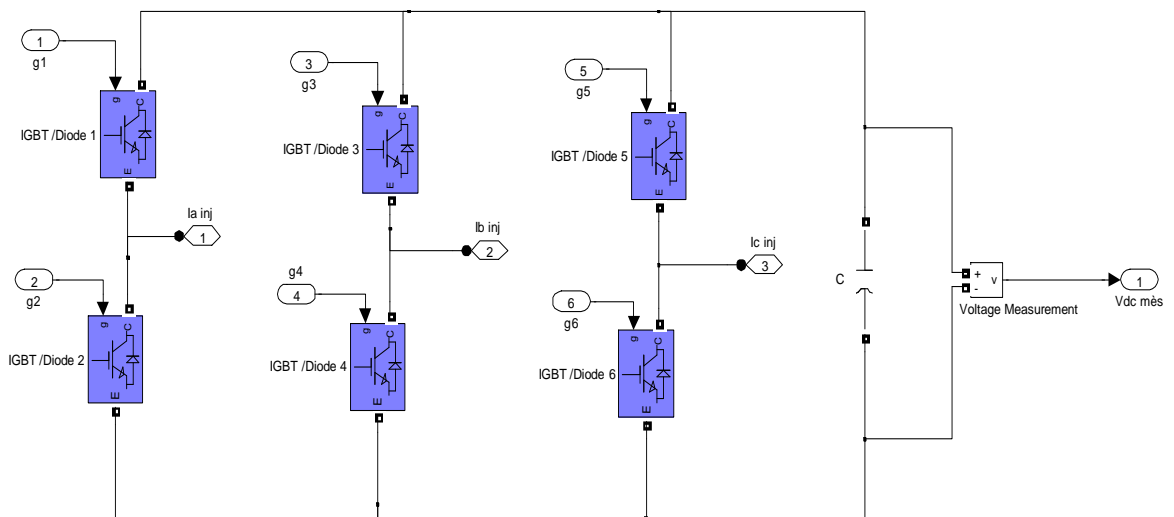


Figure III.8 Schéma bloc de l'onduleur de tension à deux niveaux.

III.3 Paramètres de simulation

III.3.1 Paramètres du réseau

Le réseau est un système de tension triphasé parfaitement sinusoïdal, tel que: la tension simple : $V_m=220V$ et la fréquence : $f=50 Hz$ donc :

$$V_{sa} = V_m \sin(\omega.t) \tag{III. 1}$$

$$V_{sb} = V_m \sin(\omega.t - 120) \tag{III. 2}$$

$$V_{sb} = V_m \sin(\omega \cdot t - 240) \quad (\text{III. 3})$$

Résistance du réseau : $R_s = 0.5 \text{ m}\Omega$

Inductance du réseau : $L_s = 15 \text{ }\mu\text{H}$

III.3.2 Paramètres de la charge polluante

La charge polluante c'est un redresseur triphasé non commandé qui alimente une charge résistive inductif (R_d, L_d). Cette charge a les paramètres suivants:

$R_d = 0.6 \text{ }\Omega$, $L_d = 2 \text{ mH}$.

Pour l'amélioration de la qualité de courant de la charge, une charge résistive inductive est connectée à l'entrée du redresseur à diodes ($R_c = 1.2 \text{ m}\Omega$, $L_c = 50 \text{ }\mu\text{H}$).

III.3.3 Paramètres du filtre actif

Le filtre actif est l'ensemble, onduleur de tension à deux niveaux, filtre de sortie (L_f, R_f), avec: ($R_f = 5 \text{ m}\Omega$, $L_f = 150 \text{ }\mu\text{H}$)

Source de tension continue avec: $V_{dc} = 740 \text{ V}$,

Élément de stockage (condensateur) avec : $C_{dc} = 8.8 \text{ mF}$.

Pour la commande par hystérésis la bande d'hystérésis avec : $\Delta I = \pm 10 \text{ A}$.

Pour la commande par MLI la fréquence de découpage avec : $f_p = 10 \text{ KHZ}$.

III.4 Résultats de la simulation

Les programmes de simulation développés, permettent de visualiser sur un intervalle de temps donné l'évolution des courants dans les différentes branches du circuit de figure (III.1) et de figure (III.6). Ils simulent également la commande du filtre actif selon les deux principes, hystérésis et MLI.

III.4.1 Commande par hystérésis

La commande par hystérésis à bande fixe consiste à maintenir le courant I_{ref} à l'intérieur d'une bande fixe. Le résultat de simulation obtenue avec ce type de commande est représenté dans la figure (III.9). Les figures (III.10) montrent le spectre de courant avant et après filtrage.

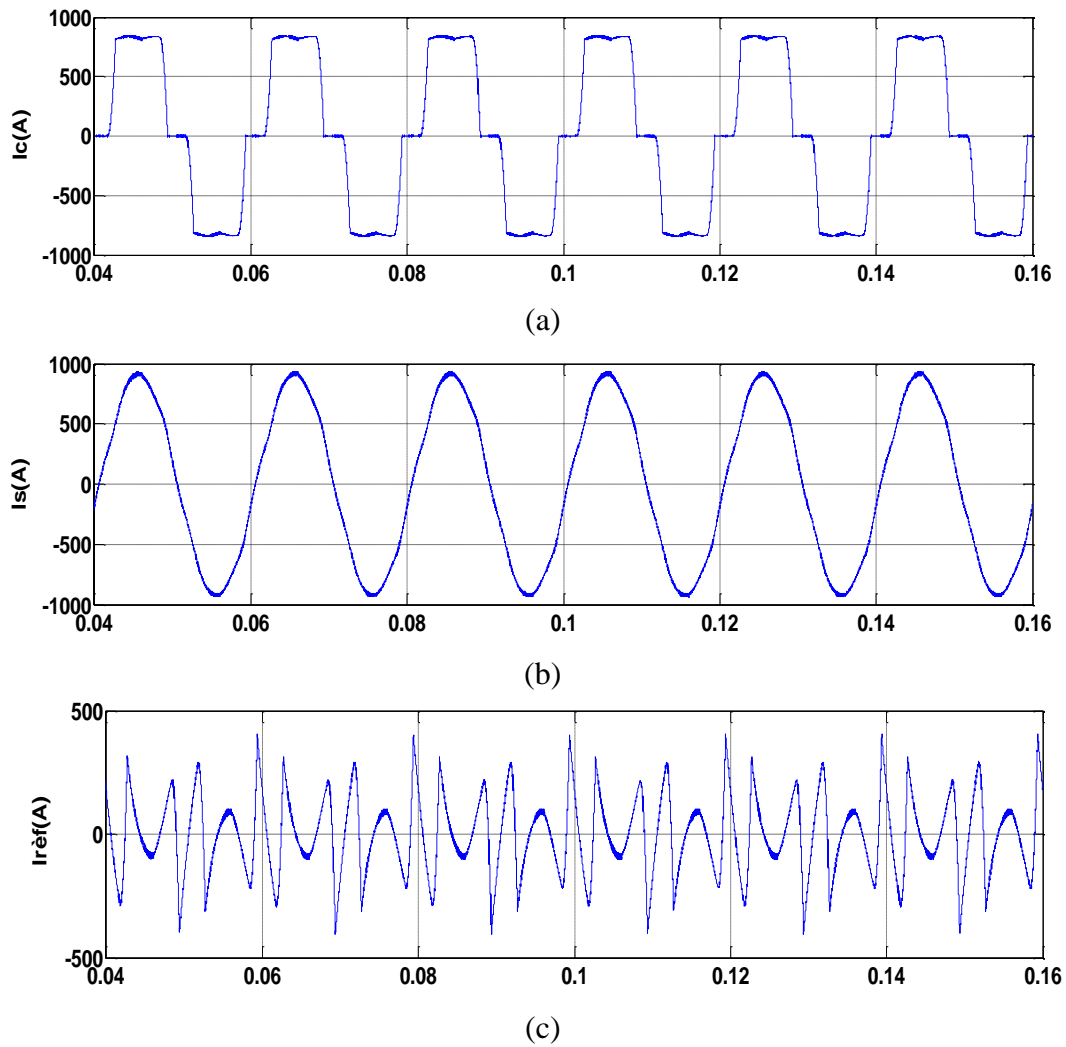


Figure III.9 (a) Courant de charge, (b) Courant de source, (c) Courant de référence.

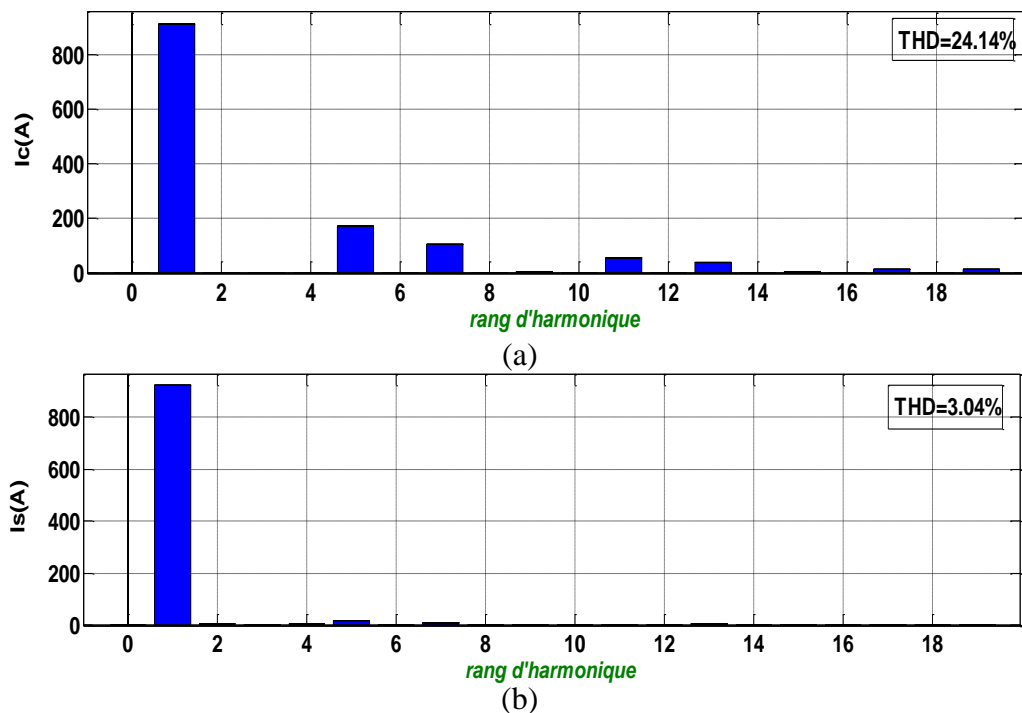


Figure III.10 Spectre du courant source : (a) avant, (b) après filtrage.

Le courant avant le filtrage est présenté dans la Figure (III.9), a une forme quasi rectangulaire à cause de l'existence des harmoniques 5 .7 . 11 .13 .17 .19 ..., comme le montre le spectre de figure (III.10.a), avec un taux de distorsion harmonique THD=24.14%. Tandis que, nous constatons que le courant après filtrage qui est représenté dans la figure (III.9), a une forme sinusoïdale grâce à l'injection du courant par le filtre actif parallèle dans le réseau, comme le montre le spectre de figure (III.10.b), avec un taux de distorsion harmonique THD=3.04 %.

III.4.2 Commande MLI

La figure (III.11), montre les résultats obtenus par la commande MLI dans le cas où le pont à thyristors alimente une charge de type RL. La fréquence de commutation a été fixée à une valeur de $f_p = 10\text{KHz}$.

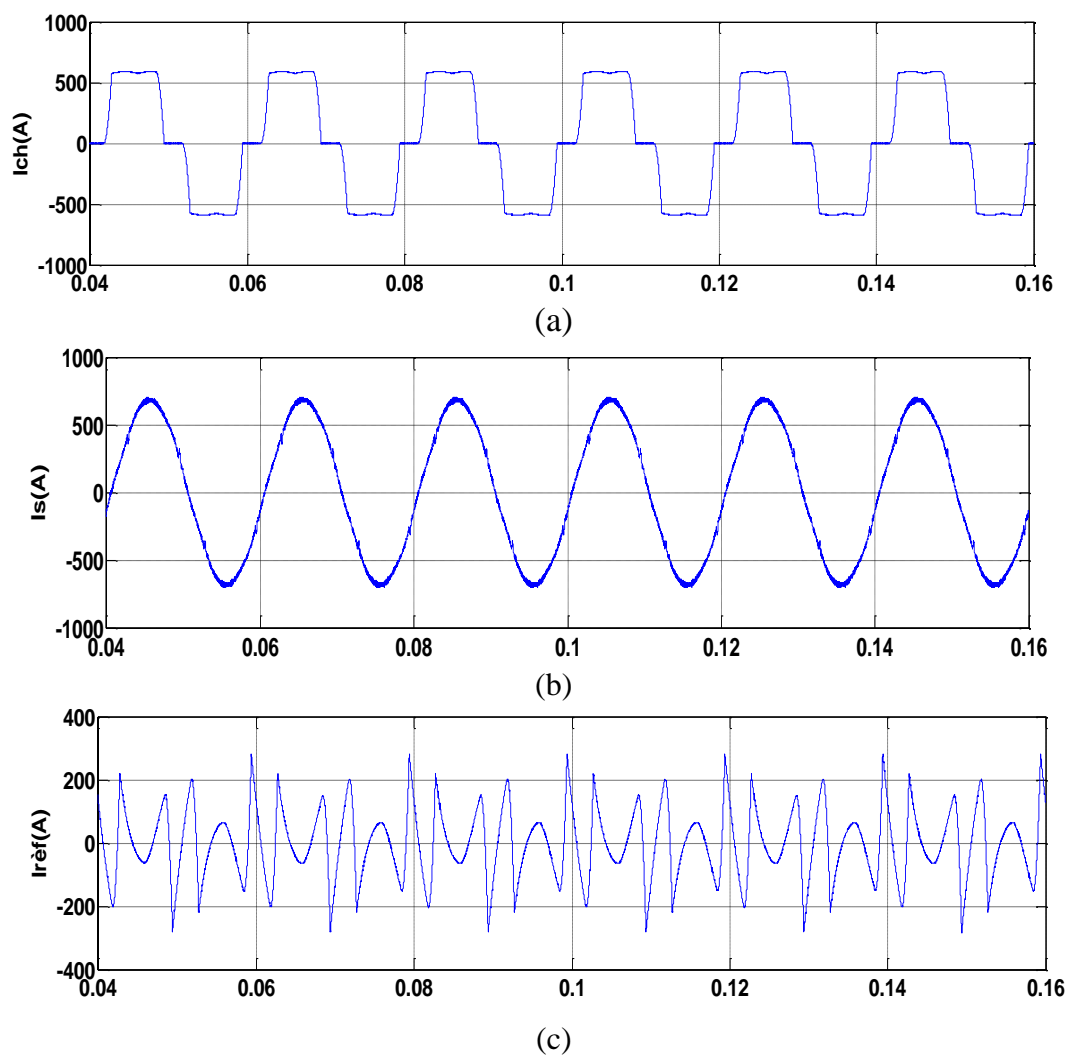
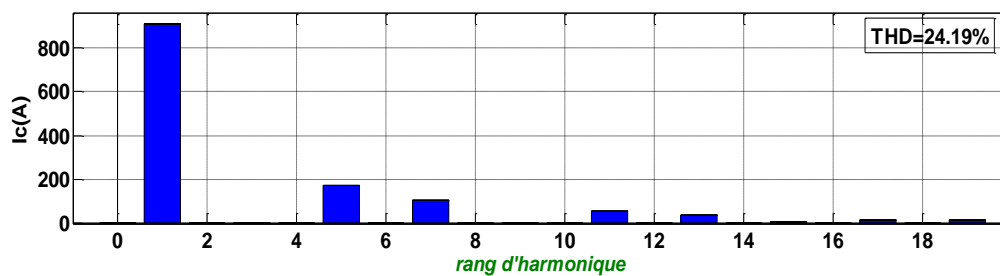
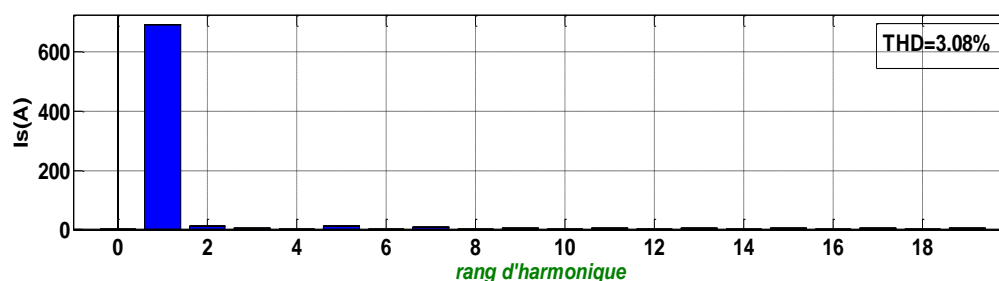


Figure III.11, (a) Courant de charge, (b) Courant de source, (c) Courant de référence.



(a)



(b)

Figure III.12 Spectre du courant source : (a) avant, (b) après filtrage.

Le courant avant le filtrage est présenté dans le figure (III.11), a une forme quasi rectangulaire à cause de l'existence des harmoniques, comme le montre le spectre de figure (III.12.a), avec un taux de distorsion harmonique $THD=24.19\%$. En revanche, nous constatons le courant après filtrage qui est représenté dans la figure(III.11) à une forme sinusoïdale grâce l'injection courant de filtre actif parallèle dans ce réseau, comme le montre le spectre de figure (III.12.b), et le taux de distorsion harmonique est amélioré devient $THD=3.08\%$.

Les résultats obtenus montrent l'efficacité et les bonnes performances du filtre actif parallèle de puissance, qui a réduit la THD à une valeur inférieure à 5% correspondant aux recommandations et normes internationales.

III.5 Conclusion

Dans ce chapitre, on a exécuté la simulation par deux stratégies de commande pour contrôler les courants du filtre actif, la commande hystérésis et la commande MLI, est. La commande hystérésis à bande fixe est robuste et simple à mettre en œuvre, cependant sa fréquence de commutation est variable et incontrôlable. Par contre, en commande MLI, la fréquence de commutation peut être imposée.

Le courant I_s est quasi sinusoïdal. Néanmoins des pics apparaissent pendant les commutations dans le redresseur. Les déformations de la forme d'onde du courant injecté

dans le réseau sont plus importantes dans le cas de la commande MLI. Elles sont l'effet du déphasage entre le courant réel généré par le filtre actif et sa référence.

Les spectres du courant injecté sur le réseau avant et après l'installation du filtre actif de deux méthodes, hystérésis et MLI, sont représentés sur les figures (III.10) et (III.12) respectivement.

Avec l'une ou l'autre commande, le filtre actif permet une réduction importante des harmoniques du courant source. Toutefois, l'efficacité du filtre actif est meilleure avec la commande hystérésis.

Conclusion générale

Dans ce mémoire on s'est intéressé à l'étude des différentes possibilités de filtrage actif des harmoniques des réseaux électriques, et on a basé sur deux stratégies des commandes, commande par hystérésis et commande MLI.

Dans un premier temps, après l'analyse des perturbations harmoniques et leurs effets sur le réseau électrique, on a présenté les solutions traditionnelles pour les réduire, notamment le filtrage passif. Le filtrage actif est une nouvelle solution pour la dépollution harmonique.

On a ensuite étudié le contrôle de ce filtre actif. Pour identifier les courants harmoniques, on a choisi la méthode des puissances réelles et imaginaires instantanées qui donnent de bons résultats en statique et en dynamique. Les deux principes de commande pour contrôler le courant du filtre, MLI et hystérésis, sont étudiés. La commande hystérésis est très simple à mettre en œuvre mais dans ce type de commande la fréquence instantanée de commutations n'est pas contrôlable. Par contre, en commande MLI, la fréquence des commutations peut être imposée.

Enfin, en exploitant ces deux programmes de simulation, on a optimisé les paramètres d'un filtre actif associé à une charge polluante. Avec ce filtre, le THD des courants dans la source réduit, pour un point de fonctionnement considéré comme étant typique, pour la commande par hystérésis avant filtrage est 24.14% et après filtrage est 3.04% et pour la commande MLI avant filtrage est 24.19% et après filtrage améliorée devient à 3.08%.

Résumé

L'utilisation des convertisseurs statiques dans les installations de conversion d'énergie électrique a considérablement contribué à améliorer les performances et l'efficacité de ces systèmes. En revanche, ils ont participé à détériorer la qualité du courant et de la tension des réseaux de distribution. En effet, ces systèmes consomment des courants non-sinusoïdaux, même s'ils sont alimentés par une tension sinusoïdale : ils se comportent comme des générateurs de courants harmoniques.

Ce travail montre une méthode d'identification (méthode de puissance instantanée) du courant harmonique généré par redresseur triphasé non commandé (charge non linéaire).

L'application de la méthode proposée qui s'adapte bien au filtrage actif parallèle (onduleur de tension de deux niveaux) pour la réduction des harmoniques est développée avec une analyse complète des performances avec deux techniques de commande (commande par hystérésis et commande MLI), commençant par le courant harmonique, courant identifié, courant à injecter, finalement l'analyse spectrale du courant fourni par l'onduleur, en utilisant un moyen de simulation réservé aux systèmes de puissance appelé "MATLAB/SIMILINK".

Mots clefs

Filtre Actif Parallèle, Réduction des Harmoniques, Onduleur de tension, Régulation de Tension, Commande à Hystérésis, Commande à MLI, Méthode d'identification de Puissance Active et Réactive Instantanée.

Abstract

The use of static converters in the conversion facilities Electric Power has greatly helped improve the performance and efficiency of these systems. However, they have contributed to the deterioration of the quality of current and voltage distribution networks. In fact, those systems consume current non-sinusoidal, even if they are powered by a sinusoidal voltage: they behave as current generators harmonics.

This work shows a method of identifying (method of instantaneous power) the harmonic current generated by non-controlled three-phase rectifier (pollution load). The application of the proposed method is well suited to parallel active filter (voltage inverter

with two levels) for reducing harmonics is developed with a comprehensive analysis of performance with two technical control (control by hysteresis and PWM control), starting with the harmonic current, identified current, current to be injected, finally the spectral analysis of the current supplied by the inverter, using a simulation tool reserved for power systems called "MATLAB / SIMILINK".

Keys words

Shunt Actif Filter, Reduced Harmonics, Voltage Inverter, Voltage Regulation, Hysteresis Control, Control PWM, Method Identification of Active Power and Reactive Instant.

Références bibliographique :

[01] A. E. Kouzou, "Compensation active des perturbations dans un réseau basse tension ", Mémoire de Magister, Université M'Hamed Bougara de Boumerdès. 2004

[02] TADJER SID-AHMED, "Etude d'un système de compensation d'harmonique en utilisant un générateur photovoltaïque "GPV" ", Mémoire de Magister, Université M'Hamed Bougara de Boumerdes, 2004.

[03] Raoul DZONDE NAOUSSI, "Implantation de réseaux neuroleptiques sur cible FPGA-application à l'intégration d'un système de filtrage actif ", Thèse de doctorat, Université de Strasbourg, 11Novembre2011.

[04] S. ZELACI, "Filtrage actif de courant de réseau électrique basse tension", Thèse de Master, Université de El oued, Juin2011.

[05] Mohamed Muftah ABDUSALAM, " Structures et stratégies de commande des filtres actifs parallèle et hybride avec validations expérimentales", Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, 29 mai 2008.

[06] Chauvin Arnoux, Les harmoniques, Fiche d'application "Harmoniques"-ed1-service Communication, France, Mai 2008.

[07] Abdelmalek BOULAHIA, " Etude des Convertisseurs Statiques destinés à la Qualité de l'Energie Electrique", Mémoire de Magister, Université de Constantine, 28/04/ 2009.

[08] G.tarek, " Etude et réalisation d'un Compensateur actif de puissance commandé par DSP ", Thèse de Magister, Ecole militaire polytechnique, 2004.

[09] M.A.E. Allali, " Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électrique basse tension ", Thèse de Doctorat, ULP Strasbourg I. 12 sept 2002.

[10] Laid ZELLOUMA, " Filtrage actif parallèle des harmoniques du courant générés par un pont redresseur triphasé non commandé ", Mémoire de Magister, Université Badji Mokhtar Annaba, 2006

[11] Thierry Deflandre et Philippe Maurs, " Les harmoniques sur les réseaux électriques ", Direction des Etude et Recherche en France -Edition EYROLLES

[12] Bouzit Ali, " Filtrage hybride des harmoniques générés par un pont redresseur non commandé", Thèse de Magister de l'Université de Annaba, 2001.

[13] Chouaf Fathi, " L'adaptation du filtre actif parallèle aux variations de la charge ", Thèse de Magister de l'Université de Annaba, 2004.

- [14] Institut Schneider Formation, MERLIN Gerin, " harmoniques et transformateurs", 20Fevrier2004.
- [15] Institut Schneider Formation, " Détection et Atténuation des harmoniques", 22 Janvier 2010.
- [16] Fabrice POULET, " Empêchez vos Variateurs de vitesse de Polluer de Réseau ", Juin2001.
- [17] Amaia LOPEZ DE HEREDIA BERMEO, " commandes avancées des systèmes dédiés à l'amélioration de la qualité de l'énergie : de la basse tension à la montée en tension ", Thèse de doctorat, Mondragon, Espagne ,14Novembre2006.
- [18] Hanane KOUARA, " Application d'un filtre actif série au contrôle de la tension d'un réseau basse tension". Mémoire de magister en électrotechnique, Université de Batna, 08/02/2006
- [19] C. COLLOMBET, J. LUPIN et J. SCHONEK, " Perturbations harmoniques dans les réseaux pollués, et leur traitement ".Cahier Technique Schneider Electric n° 152, septembre 1999.
- [20] Mohamed MAGRAOUI, " Validation de techniques de commande d'un filtre actif parallèle " Mémoire de magister en électrotechnique, Université Montréal, le 17 septembre 2007
- [21] Kamel ALIOUANE,"Contribution à l'étude du filtrage d'harmoniques des réseaux de distribution à l'aide de l'association de filtres actif et passif parallèle ", Thèse de Doctorat de l'I.N.P.L, 1995.
- [22] Gaboussa Seddik," Etude de commande d'un filtre actif des harmoniques en vue d'amélioration de la qualité de l'alimentation d'énergie ", Thèse de magister, Université Mohamed Kheider, Biskra 2007.
- [23] Hind DJEGHLOUD, " filtrage actif de puissance ", Thèse de doctorat, Université Mentouri Constantine, Decembre2007.
- [24] Ould-Ouali samy Hassani, " Filtrage actif parallèle des harmoniques du courant générés par un pont redresseur triphasé non commandé ", Thèse de Magister de Ecole Militaire Polytechnique, 2002.
- [25] ABOUBOU A, ZOUZOU S.E, " Contribution à la compensation de la pollution harmonique en utilisant un filtre actif parallèle commande par logique flou ", Courier de savoir-N°03, Université Mohamed Kheider, Biskra, Janvier 2003.
- [26] Madjid BOODJEDAIMI ,Patrice WIRA, Djaafar OULED ABDSULAM, Said DJENNOUNE, Jean Philippe URBAN, "Commande d'un onduleur avec des approches neurominètoque pour la compensation des courants harmonique dans les réseaux ", Université Mouloud Mammeri, Tizi Ouzou, Algerie, et Université Haute Alsace, France, Mai2008.