

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 Electrique

Presenté par : ✓ LAYES Bilal

✓ ABANNA Othman

Thème

**Stratégies de commande d'un filtre actif
parallèle triphasé**

Soutenu le Juin 2012

Devant le jury composé de :

Mr.			Président
Mr.	ZELLOUMA Laid	MC	Rapporteur
Mr.			Examineur
Mr.	MAHNI Tidjani	MA	C- Encadreur

2011-2012

Liste des symboles

n	Rang de l'harmonique
THD	Taux de distorsion harmonique
PF	Facteur de puissance
P	Puissance active
S	Puissance apparente
q	Puissance réactive
d	puissance déformante
F_{dis}	Facteur de distorsion
K	Gain du régulateur
φ_1	Déphasage entre le courant et la tension fondamentale
I_{ca}, I_{cb}, I_{cc}	Courants triphasés de la charge
C_a	Coût d'un filtre
C_c	Coût d'un filtre
V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}	Tensions simples triphasées du réseau
I_{sa}, I_{sb}, I_{sc}	Courants triphasés du réseau
R_s	Résistance de réseau
Z_s	Impédance de réseau
ω	Pulsation du réseau
R_d, L_d	Impédance de la charge du redresseur
GTO	Gate turn off
$IGBT$	Insolated gate bipolar transistor
MLI	Modulation de largeur d'impulsion
C_{dc}	Condensateur d'entré de l'onduleur
V_{dc}	La tension continue de l'onduleur
ω_n	Pulsation de courant harmonique n
R_d, L_d	Impédance du redresseur
FAP	Filtre Actif Parallèle
I_{inj}	Courant injecté par le filtre actif
L_s	Inductance de réseau
I_d	Courant continu du redresseur
I_α, I_β	Courants dans le repère biphasé en coordonnées α - β
V_α, V_β	Tensions dans le repère biphasé
I_0	Courant homopolaire
V_0	Tension homopolaire
$P(t)$	Puissance réelle instantanée
$P_0(t)$	Puissance homopolaire instantanée
$\overline{P}$	Partie continue de la puissance réelle instantanée
$\tilde{P}$	Partie alternative de la puissance réelle instantanée
$\overline{q}$	Partie continue de la puissance imaginaire instantanée
$\tilde{q}$	Partie alternative de la puissance imaginaire instantanée
I_{ref}	Courant de référence
V_{fref}	Tension de référence
R_f, L_f	Filtre de sortie de l'onduleur
L_c	Inductance de lissage
R	Coefficient de réglage
$V_{p\max}$	Amplitude de la porteuse
$V_{\max}$	Amplitude de la référence
m	Indice de modulation
f_p	Fréquence de la porteuse
I_{eff}	Valeur efficace de courant
$V_{fa,b,c}$	Tensions de sortie du filtre actif
τ	Constante de temps du filtre du premier ordre

Liste des Figures

Figure	Titre	Page
Figure I.1	Les perturbations électriques.....	6
Figure I.2	Décomposition d'un signal périodique pollué.	7
Figure I.3	L'amplitude est souvent donnée, relative à celle du fondamental.	12
Figure I.4	Schéma de principe d'un filtre résonnant.	16
Figure I.5	Schéma de principe d'un filtre amorti.	17
Figure I.6	Schéma de principe d'un filtre actif.....	19
Figure I.7	Schéma d'un compensateur actif parallèle.	20
Figure I.8	Schéma d'un compensateur actif série.....	20
Figure I. 9	Combinaison parallèle-série actifs (UPQC).....	21
Figure I.10	Filtre actif série et filtre passif parallèle.....	22
Figure I.11	Filtre actif parallèle assisté par un filtre passe haut.	22
Figure II.1	Principe du filtrage actif parallèle.....	26
Figure II.2	Schéma symbolique d'un réseau électrique triphasé.	27
Figure II.3	Redresseur à diode triphasé.	28
Figure II.4	Structure générale de la filtre active parallèle.....	29
Figure II.5	Structure de l' onduleur de tension triphasé.	30
Figure III.1	Méthode du filtre coupe-bande.....	37
Figure III.2	Filtres d'extraction.	40
Figure III.3	Schéma de principe de la méthode d'identification des puissances instantanées.	42
Figure III.4	Schéma de principe du contrôle par hystérésis d'un bras de l'onduleur. ...	43
Figure III.5	Commande par Hystérésis.....	44
Figure III.6	Principe de commande par MLI.	45
Figure III.7	Schéma de principe du contrôle par MLI sinus – triangle d'un bras de l'onduleur.....	45
Figure III.8	Schéma de la régulation des courants du filtre actif parallèle.	47
Figure III.9	Schéma simplifié de la régulation des courant par MLI.....	48
Figure IV.1	Schéma synoptique de l'association filtre actif-réseau-charge polluante.	50
Figure IV.2	Schéma bloc de réseau électrique triphasé.....	51
Figure IV.3	Schéma bloc de redresseur triphasé.....	51
Figure IV.4	Schéma bloc de l'onduleur de tension à deux niveaux.	52
Figure IV.5	Schéma bloc de la commande Hystérésis.....	52
Figure IV.6	Schéma bloc de la commande MLI.....	52
Figure IV.7	Ic: Courant de charge, If: Courant de filtre actif, Is: Courant de source....	53
Figure IV.8	Spectre du courant source avant filtre.	53
Figure IV.9	Spectre du cou rant source après filtre.	53
Figure IV.10	Ic: Courant de charge, If: Courant de filtre actif, Is: Courant de source....	54
Figure IV.11	Spectre du courant source avant filtre.	54
Figure IV.12	Spectre du courant source après filtre.	54
Figure IV.13	Ic: Courant de charge, If : Courant de filtre actif, Is : Courant de source,.	55
Figure IV.14	Ic: Courant de charge, If : Courant de filtre actif, Is : Courant de source,.	56
Figure IV.15	Ic: Courant de charge, If : Courant de filtre actif, Is : Courant de source,.	56
Figure IV.16	Ic: Courant de charge, If: Courant de filtre actif, Is: Courant de source....	57
Figure IV.17	Spectre du courant source avant filtre.	57
Figure IV.18	Spectre du	

courant source après filtre.	57	Figure IV.19 Ic: Courant de charge, If: Courant de filtre actif, Is: Courant de source....	58
Spectre du courant source avant filtre.	58	Figure IV.20 Spectre du courant source après filtre.	59
Figure IV.22 Ic: Courant de charge, If : Courant de filtre actif, Is : Courant de source,.	59	Figure IV.23 Ic: Courant de charge, If : Courant de filtre actif, Is : Courant de source,.	60
Figure IV.24 Ic: Courant de charge, If : Courant de filtre actif, Is : Courant de source,.	60		

Liste des Tableaux

Tableau Titre Page	Tableau I.1 Les charges polluantes principales.	08
.....	Tableau I.2 Niveaux de compatibilité des harmoniques en tension.....	14
.....	Tableau I.3 Limite des composantes harmoniques en courant	14
.....	Tableau IV.1 Les résultats des simulations.	61

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I : Perturbation des Réseaux Electriques et Principes de Compensation 1-	
Introduction	4 2-
Les perturbations électriques et leurs origines.....	4
2.1- Creux et coupures de tension	4
2.2- Fluctuations de tension	5
2.3- Déséquilibre du système triphasé de tension	5
2.4-Variation de fréquence	6
2.5- Harmoniques.....	7
2.5.1- Définition des harmoniques	7
2.5.2- Origine des harmoniques	8
2.5.3- Conséquences des harmoniques	9
2.5.3.1- Effets instantanés	9
2.5.3.2- Effets à terme	9 3-
Caractérisation des perturbations harmoniques	10
3.1- Grandeur harmonique	10
3.2- Rang de l'harmonique	10
3.3- Série de Fourier	11
3.4- Valeur efficace d'une grandeur alternative	11
3.5- Spectre (de fréquence)	12
3.6- Le taux de distorsion harmoniques	12
3.7- Le facteur de puissance	13 4-
Solutions aux problèmes engendrés par les perturbations	15
4.1- Solutions traditionnelles	15
4.1.1- Réduction de la pollution harmonique	15
4.1.1.1- Agir sur la structure de l'installation	15
4.1.1.2- Transformateur à couplage spécial	15
4.1.1.3- Filtre passif	15 A-
Définition des filtres passifs	15 B- Modèles
des filtres passifs	16 B.1- Filtre résonnant
.....	16 B.2- Filtre amorti
.....	16 C- Coût du filtre passif
.....	17 D- Avantages et Inconvénients
.....	17 D.1- Avantages
.....	17 D.2- Inconvénients
.....	17 E- Applications typiques
.....	18 4.1.2- Compensation de la
puissance réactive	18 4.2- Solutions nouvelles
.....	18 4.2.1- Filtrage actif
.....	18 4.2.2- Modèles des
filtres actifs	19 4.2.2.1- Filtres actifs
parallèles	19 4.2.2.2- Filtres actifs série
.....	20 4.2.2.3-filtrage hybride
.....	20 A- La combinaison parallèle-

série actif (UPQC)	12
B- Le filtre actif série avec des filtres passifs parallèles	11
C- Filtre actif parallèle assisté par un filtre passif	11
4.2.3- Coût du filtre actif	11
4.2.4- Les avantages et les inconvénients des filtres actifs	12
4.2.4.1- Les avantages du filtre actif	12
4.2.4.2- Inconvénients	12
4.2.5- Applications typiques	12
5- Conclusion	12
Chapitre II :	
Étude de la Partie Puissance du FAP	
1- Introduction	12
2-Principe du filtre actif parallèle	12
3- Modélisation du réseau électrique	12
4- Etude de la charge polluante (Redresseur à diode triphasé)	12
5- Structure générale du filtre actif parallèle	12
6- Présentation de la partie puissance	23
6.1- Onduleur de tension	23
6.1.1- Structure générale	23
6.1.2- Modélisation de commande de l'onduleur de tension	23
6.2- Système de stockage d'énergie	21
6.3 - Filtre de sortie	33
7- Conclusion	33
Chapitre III : Étude de la Partie Contrôle-Commande du FAP	
1- Introduction	35
2- Les méthodes d'identification des courants perturbés	35
2.1- Méthode tri-monophasée	36
2.2- Méthode du filtre coupe-bande (notch filtre)	37
2.3- Méthode du référentiel synchrone	37
2.4- Méthode de la puissance instantanée réelle et imaginaire (PIRI)	38
2.4.1- principe de la méthode des puissances instantanées	23
2.4.1.1- Séparation des puissances perturbatrices.....	23
2.4.1.2- Calcul des courants perturbateurs	22
2.4.2- Algorithme d'identification	21
3- La commande de l'onduleur	21
3.1- Commande par hystérésis	22
3.2- Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI)	22
4- Régulation des courants du filtre actif parallèle	22
5- Conclusion	23
Chapitre IV :	
Simulation du Filtre Actif Parallèle	
1- Introduction	50
2- Description globale de la simulation	50
3- Résultats des simulations	52
3.1- Commande Hystérésis	52
3.1.1- Charge R-L	52
3.1.2- Charge R-C	53
3.1.3- Changement de la charge (RL1 => RL2)	55
3.1.4- Changement de la charge (RC1 => RC2)	55
3.1.5- Changement de la charge (RL1 => RC2)	56
3.2- Commande MLI	56
3.2.1- Charge R-L	56
3.2.2- Charge R-C	58
3.2.3-	

Changement de la charge (RL1 => RL2)	59	3.2.4-
Changement de la charge (RC1 => RC2)	60	3.2.5-
Changement de la charge (RL1 => RC2)	60	4-
Conclusion	60	
Conclusion générale.....	62	
Annexe Bibliographie		

INTRODUCTION GENERALE

Ces dernières années, l'expansion de l'emploi dans l'industrie des charges non-linéaires à base de l'électronique de puissance a entraîné de plus en plus de problèmes liés aux perturbations ou distorsions harmoniques des réseaux électriques. Ce phénomène touche l'ensemble des secteurs industriels (utilisation de gradateurs, de redresseurs, de variateurs de vitesse,...), tertiaire (informatique ou éclairage des bureaux, commerce,...) et domestique (téléviseurs, appareils électroménagers grand public,...)

La distorsion harmonique est générée par les charges non linéaires connectées au réseau et qui absorbent des courants non sinusoïdaux. Ces harmoniques de courant vont à leur tour générer des tensions harmoniques aux différents points de connexion au réseau. Pour les autres équipements électriques connectés en ces points, cette pollution harmonique a des effets nocifs. Parmi ces effets, on peut notamment citer la déformation de la tension réseau au point de raccordement alors que le distributeur d'énergie est tenu de fournir une tension propre. Cette pollution peut également conduire à l'échauffement des câbles et des équipements électriques ou bien encore à l'arrêt soudain de machines tournantes, voire la destruction totale de tous ces équipements.

De ce fait, les distributeurs de l'énergie électrique se voient donc obligés d'imposer des normes et de se protéger contre ces perturbations. Des normes sur les harmoniques ont été proposées par la commission internationale d'électrotechnique IEC61000, et par les recommandations IEEE Std. 519-1992[6][32].

Pour faire face au phénomène des perturbations harmoniques, plusieurs solutions ont été proposées. Ce mémoire traite le filtre actif parallèle. L'objectif est l'amélioration de la qualité du courant électrique pour avoir un taux de distorsion harmonique acceptable (inférieur à 5%).c à d pour obtenir un courant de ligne quasi sinusoïdale.

A cet effet le premier chapitre sera consacré à la présentation de différentes perturbations, en courant et en tension, des réseaux électriques connectés à des charges polluantes. Ces perturbations sont les harmoniques, le déséquilibre, les creux de tension et le mauvais facteur de puissance. Leurs conséquences et les normes inhérentes, pour le

courant, seront détaillées. Puis une récapitulation des solutions de filtrages des courants sera faite.

Le filtre actif parallèle est composé de deux grande partie : partie puissance et partie commande-contrôle. Dans le deuxième chapitre la partie puissance sera détaillée, la partie commande-contrôle sera détaillée dans le troisième chapitre. Différentes simulations avec différentes types de charges seront exposées dans le chapitre quatre, l'identification des courants de référence se fera par la méthode des puissances instantanées. Pour la commande les deux techniques MLI et hystérésis seront utilisées.

CHAPITRE I

Perturbation des Réseaux Electriques et Principes de Compensation

1- Introduction :

Aujourd'hui, la situation au niveau des réseaux alternatifs basses tensions est devenue très préoccupante. La qualité du courant électrique dans les installations commerciales et électriques se dégrade incontestablement[1].

L'utilisation croissante dans l'industrie des systèmes commandés à base d'électronique de puissance entraîne de plus en plus des problèmes de perturbations au niveau des réseaux électriques. Ainsi, on assiste à une augmentation régulière, de la part des utilisateurs, des taux d'harmoniques et de déséquilibres des courants, ainsi qu'à une importante consommation de la puissance réactive. 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. Ces perturbations ont des conséquences néfastes sur tout le matériel électrique, lesquelles peuvent aller d'un fort échauffement ou d'un dysfonctionnement soudain jusqu'à la destruction totale de ces équipements[2].

La qualité du courant électrique devient donc une préoccupation importante pour les distributeurs d'énergie et pour leurs clients.

Dans ce chapitre nous traiterons les paramètres et leurs principales « anomalies » qui permettent de caractériser une alimentation électrique.

2- Les perturbations électriques et leurs origines :

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

2.1- Creux et coupures de tension :

Le creux de tension est une diminution brutale de la tension à une valeur située entre 10 % et 90 % de la tension nominale pendant une durée allant de 10 ms jusqu'à quelques secondes.

Les creux de tension sont dus à des phénomènes naturels comme la foudre, ou à des défauts sur l'installation ou dans les réseaux tant publics que ceux des utilisateurs.

Ils apparaissent également lors de manœuvres d'enclenchement mettant en jeu des courants de fortes intensités (moteurs, transformateurs, etc.).

Une coupure de tension quand à elle est une diminution brutale de la tension une valeur supérieure à 90 % de la tension nominale ou disparition totale pendant une durée généralement comprise entre 10 ms et une minute pour les coupures brèves et supérieure à une minute pour les coupures longues. La plupart des appareils électriques admettent une coupure totale d'alimentation d'une durée inférieure à 10 ms. La figure I.1(a) montre un exemple de creux et de coupure de tension.

2.2- Fluctuations de tension :

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

Elles sont en particulier dues à la propagation sur les lignes du réseau de courants d'appel importants. L'origine principale de ces courants est le fonctionnement d'appareil dont la puissance absorbée varie de manière rapide, comme les fours à arc et des machines à souder. Ces fluctuations se traduisent par des variations d'intensité, visible au niveau de l'éclairage causant une gêne visuelle perceptible pour une variation de 1 % de la tension. Ce phénomène de papillotement est appelé flicker.

Un exemple de fluctuation de tension est montré dans la figure I.1(b).

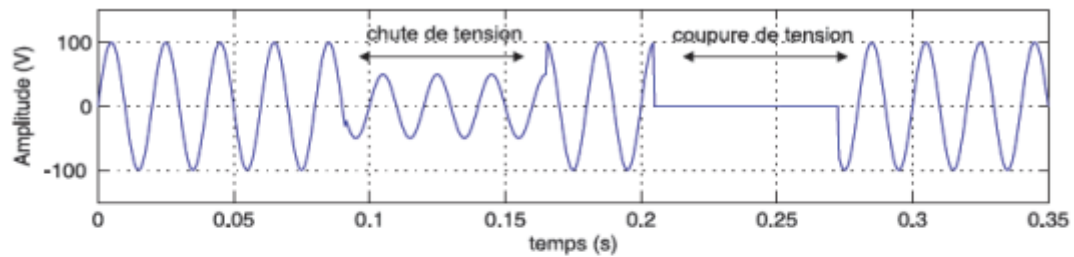
2.3- Déséquilibre du système triphasé de tension :

Lorsque les trois tensions ne sont pas identiques en amplitude et/ou ne sont pas décalées d'un angle de 120° les unes par rapport aux autres, on parlera de déséquilibre du système triphasé (voir la figure I.1(c)).

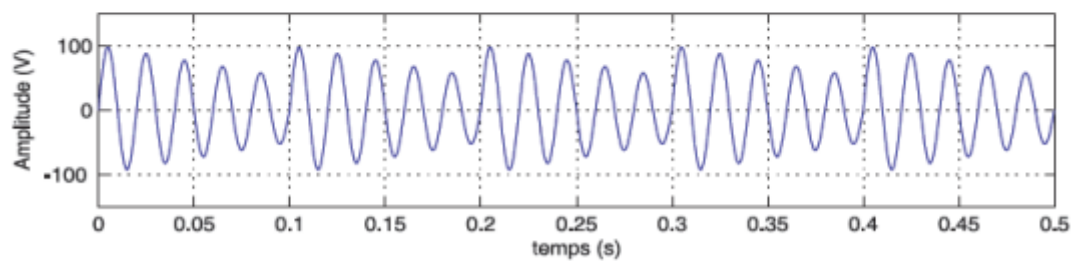
Un réseau électrique triphasé équilibré alimentant un récepteur électrique triphasé non équilibré conduit à des déséquilibres de tension dus à la circulation de courants non équilibrés dans les impédances du réseau.

2.4-Variation de fréquence :

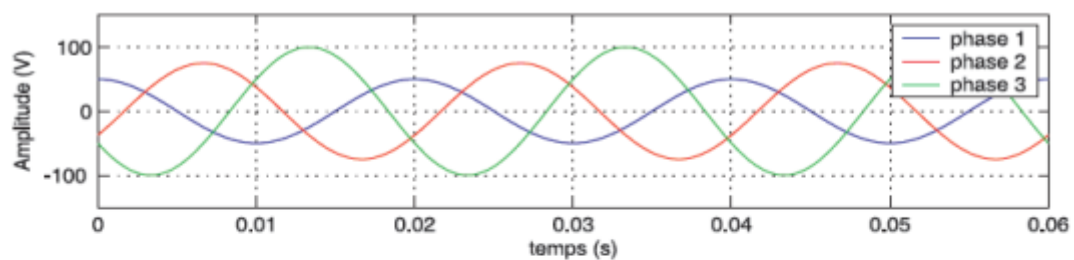
Une variation sensible de la fréquence du réseau peut apparaître sur les réseaux des utilisateurs non interconnectés ou alimentés par une source thermique autonome (voir la figure I.1(d)). Au niveau des réseaux de distribution ou de transport, cette variation de la fréquence est très rare et n'est présente que lors de circonstances exceptionnelles, comme dans le cas de certains défauts graves sur le réseau[3].



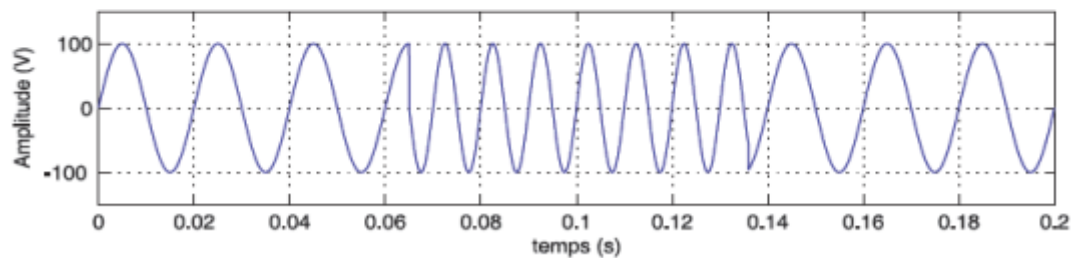
(a) Creux et coupures de tension.



(b) Fluctuations de tension.



(c) Cas particulier de déséquilibre du système triphasé de tension.



(d) Variation de fréquence.

Figure I.1 -Les perturbations électriques[3].

2.5- Harmoniques :

L'expansion de l'emploi des charges électroniques non linéaires durant les 30 dernières années a significativement contribué à la propagation des harmoniques dans les systèmes électriques de puissance. Comme ces charges sont indispensables pour différents besoins domestiques et industriels.

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. Cependant, les nouvelles réglementations internationales imposent aux consommateurs des limites aux harmoniques, engendrées par leurs systèmes, tant en courant qu'en tension. Ainsi, le filtrage des composantes harmoniques est au centre des préoccupations des distributeurs d'une part et des utilisateurs d'énergie électrique d'autre part[4].

2.5.1- Définition des harmoniques :

La variation en fonction du temps, des grandeurs électriques courants et tensions des réseaux industriels alternatifs, s'éloigne significativement de la sinusoïde pure (figure I.2).

La variation est en fait composée d'un certain nombre de sinusoïdes de fréquences différentes, comprenant entre autres, une sinusoïde à fréquence industrielle dite sinusoïde fondamentale ou plus simplement le fondamental[5].

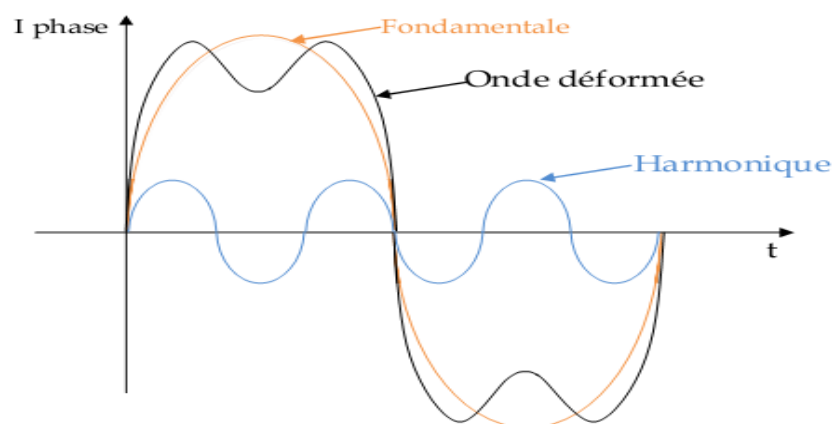


Figure I.2 -Décomposition d'un signal périodique pollué[1].

2.5.2- Origine des harmoniques :

La prolifération des équipements électriques utilisant des convertisseurs statiques (comme les redresseurs (à diodes, à thyristors) et les gradateurs) a entraînée ces dernières années une augmentation sensible du niveau de pollution harmonique des réseaux électriques. Ces équipements électriques sont considérés comme des charges non linéaires émettant des courants harmoniques. Le passage de ces courants harmoniques dans les impédances du réseau électrique peut entraîner des tensions harmoniques aux points de raccordement et alors polluer les consommateurs alimentés par le même réseau électrique[6].

Les différents secteurs industriels concernés sont aussi bien du type secondaire (utilisation des gradateurs, des redresseurs, des variateurs de vitesse....), que du type tertiaire (informatique ou éclairage dans les bureaux, commerces,...) ou domestique (téléviseurs, appareils électroménagers en grand nombre) [6]. Le tableau I.1 montre quelques sources des harmoniques et la forme d'onde de courant absorbé par chaque charge polluante[9].

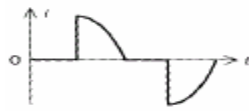
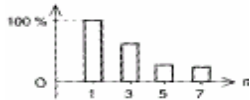
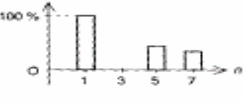
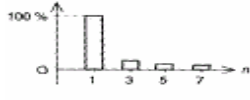
Type de charge	Appareils concernés	Courant absorbé	Spectre harmonique correspondant
Gradateur monophasé (commande par angle de phase)	Régulation de puissance de fours à résistances. Modulation de puissance des lampes halogènes.		
Redresseur triphasé à thyristor	Variateur de vitesse des moteurs à courant continu et des moteurs synchrones		
Moteur asynchrone.	Appareils électroménagers Ascenseurs.		

Tableau I.1 – Certaines des charges polluantes.

2.5.3- Conséquences des harmoniques :

Les courants harmoniques se propagent dans le réseau électrique, déforment 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 donner 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[3].

2.5.3.1- Effets instantanés :

Les effets instantanés apparaissent immédiatement dans certains appareillages.

A- 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.

B- 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.

C- 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.

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

2.5.3.2- 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.

A- 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 phénomène d'hystérésis dans le diélectrique. Les condensateurs sont donc 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.

B- Echauffement dû aux pertes supplémentaires des machines et des transformateurs : Echauffement 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[3].

3- Caractérisation des perturbations harmoniques :

Différentes grandeurs sont définies pour caractériser la distorsion en régime déformé. Le taux global de distorsion harmonique (THD) et le facteur de puissance sont les plus employés pour quantifier respectivement les perturbations harmoniques et la consommation de puissance réactive[3].

3.1- Grandeur harmonique :

C'est l'une des composantes sinusoïdales de la variation de la grandeur physique possédant une fréquence multiple de celle de la composante fondamentale.

L'amplitude de l'harmonique est généralement de quelques pour cent de celle du fondamental[5].

3.2- Rang de l'harmonique :

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

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

Par principe, le fondamental f_1 a le rang un[5].

3.3- Série de Fourier :

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

Mathématiquement, cela s'écrit:

$$S(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_1^{\infty} (a_n \cdot \cos(n\omega t) + b_n \cdot \sin(n\omega t)) \quad \text{Eq(I.2)}$$

On calcule les coefficients a_n et b_n avec les formules suivantes :

$$a_n = \frac{2}{T} \int_T f(t) \cdot \cos(n\omega t) dt \quad \text{Et} \quad b_n = \frac{2}{T} \int_T f(t) \cdot \sin(n\omega t) dt \quad \text{Eq(I.3)}$$

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

 si la fonction est paire, les coefficients b_n sont nuls.

 si la fonction est impaire, les coefficients a_n sont nuls.

 si la fonction possède une symétrie sur ses deux demi-périodes, les termes d'indice pairs sont nuls[1].

3.4- Valeur efficace d'une grandeur alternative :

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

$$I_{\text{ceff}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_c^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{n=1}^{n=\infty} I_{cn}^2} \quad \text{Eq(I.4)}$$

Notons qu'en présence d'harmoniques, les appareils de mesure doivent avoir une bande passante élevée (> 1 kHz).

3.5- Spectre (de fréquence) :

C'est la représentation de l'amplitude des harmoniques en fonction de leur rang, la valeur des harmoniques étant généralement exprimée en pourcentage du fondamental par un histogramme (figure I.3) [11].

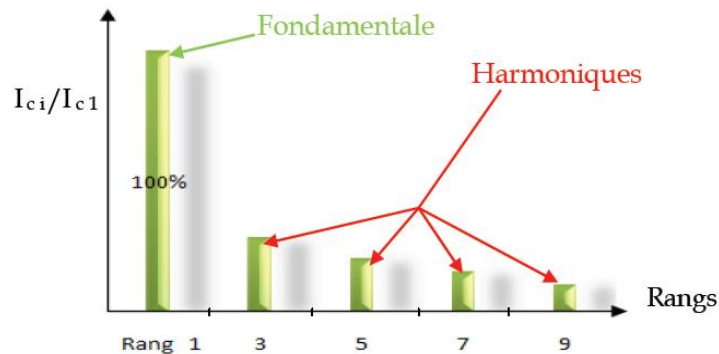


Figure I.3 - L'amplitude est souvent donnée, relative à celle du fondamental.

3.6- Le taux de distorsion harmoniques :

Notre étude se limite au cas où la source de tension est sinusoïdale et où le courant absorbé par la charge est entaché de composantes harmoniques. Dans ces conditions, le taux global de distorsion harmonique est bien adapté pour quantifier le degré de pollution harmonique sur les réseaux électriques. Le THD s'exprime par rapport à la fréquence fondamentale et caractérise l'influence des harmoniques sur l'onde de courant déformée. Il est donné par l'expression suivante :

$$THD (\%) = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_{cn}^2}}{I_{c1}} \quad Eq(I.5)$$

avec I_{c1} la valeur efficace du courant fondamental et I_{cn} les valeurs efficaces des différentes harmoniques du courant. Le domaine des fréquences qui correspond à l'étude des harmoniques est généralement compris entre 100 et 2000 Hz. Soit de

l'harmonique de rang 2 jusqu'à l'harmonique de rang 40. Il est à signaler aussi que l'amplitude des harmoniques décroît généralement avec la fréquence[3].

3.7- Le facteur de puissance :

En présence des harmoniques, la puissance apparente S est composée de trois parties : active P , réactive q et déformante d . Son expression est donnée par l'équation suivante :

$$S = \sqrt{P^2 + q^2 + d^2} \quad \text{Eq(I.6)}$$

La puissance réactive q est associée au courant fondamental. La puissance déformante D est due aux harmoniques de courant (avec $d = 3V\sqrt{I_c^2 - I_{c1}^2}$, où I_c est la valeur efficace du courant de la charge).

Pour un signal sinusoïdal le facteur de puissance FP est égal au quotient de la puissance active P par la puissance apparente S :

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + q^2 + d^2}} \quad \text{Eq(I.7)}$$

Le facteur de puissance sera toujours inférieur à 1. En posant :

$$P = 3V \cdot I_{c1} \cdot \cos \phi_1 \quad \text{Eq(I.8)}$$

On aura

$$FP = \frac{I_{c1}}{I_c} \cdot \cos \phi_1 = F_{dis} \cdot \cos \phi_1 \quad \text{Eq(I.9)}$$

Où F_{dis} représente le facteur de distorsion. Il vaut 1 lorsque le courant est parfaitement sinusoïdale et il décroît lorsque la déformation de l'onde s'accroît. ϕ_1 représente le déphasage entre le courant fondamental et la tension.

Afin d'éviter les désagréments causés par la présence de courants et de tensions harmoniques dans le réseau, des normes sont imposées aux utilisateurs[3].

Harmoniques impairs non multiple de 3		Harmoniques impairs multiple de 3		Harmoniques pairs	
Rangs	Taux(%)	Rangs	Taux(%)	Rangs	Taux(%)
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.3	6	0.5
13	3	21	0.2	8	0.5
17	2	>21	0.2	10	0.5
19	1.5			12	0.2
23	1.5			>12	0.2
25	1.5				
>25	$0.2+1.3*25/n$				

Tableau I.2 -Niveaux de compatibilité des harmoniques en tension[4].

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

Tableau I.3 -Limite des composantes harmoniques en courant[4].

4- Solutions aux problèmes engendrés par les perturbations :

Afin de compenser les différents types de perturbations, en courant et en tension, deux groupes de solutions sont brièvement décrits :

4.1- Solutions traditionnelles :

4.1.1- Réduction de la pollution harmonique :

Plusieurs solutions traditionnelles ont été adoptées pour réduire les perturbations harmoniques[14] :

4.1.1.1- Agir sur la structure de l'installation :

Il faut éviter de connecter un récepteur sensible en parallèle avec un pollueur tel que les redresseurs par exemple. Si le pollueur est de forte puissance, il est souhaitable de l'alimenter par un autre transformateur[14].

4.1.1.2- Transformateur à couplage spécial :

Il s'agit de limiter la circulation des courants harmoniques à une partie aussi petite que possible de l'installation à l'aide de transformateurs à couplage approprié. L'utilisation d'un transformateur d'isolement, de rapport 1/1 à couplage triangle-étoile ou triangle zigzag, empêche la propagation des courants harmoniques de rang 3 et leurs multiples circulant dans le neutre, ce procédé n'a aucun effet sur les autres rangs harmoniques[14].

4.1.1.3- Filtre passif :

A- Définition des filtres passifs :

Le filtrage passif est une solution utilisée jusqu'à présent. Un filtre passif est généralement constitué d'une résistance, d'une inductance et d'un condensateur. L'inductance absorbe de l'énergie réactive tandis que le condensateur crée ce type d'énergie. Un choix judicieux du condensateur permet un renvoi d'énergie réactive sur le réseau de manière à compenser celle absorbée par d'autres équipements[17].

B- Modèles des filtres passifs :

Deux types de filtres passifs sont généralement utilisés, le filtre résonnant et le filtre amorti.

B.1- Filtre résonnant :

Il est constitué par la mise en série d'une inductance, d'une résistance, et d'un condensateur accordé sur la fréquence de la composante à éliminer. Cet ensemble placé en dérivation sur l'installation présente une impédance très faible pour sa fréquence d'accord, et se comporte comme un court-circuit pour l'harmonique considéré.

Il est possible d'utiliser simultanément plusieurs ensembles accordés sur des fréquences différentes afin d'éliminer plusieurs rangs d'harmoniques.

Ce principe demande toutefois une étude soignée de l'installation car si le filtre se comporte bien comme un court-circuit pour la fréquence désirée, il peut présenter des risques de résonnance avec les autres inductances du réseau sur d'autres fréquences et ainsi faire augmenter des niveaux d'harmoniques non gênants avant sa mise en place. La Figure I.4 montre clairement le montage de ce dernier[17].

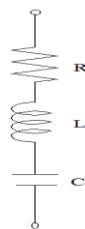


Figure I.4 -Schéma de principe d'un filtre résonnant.

B.2- Filtre amorti :

Des filtres passifs dit amortis peuvent aussi être utilisés. Ils sont conçus pour filtrer une plage de fréquence, ils sont généralement utilisés avec un faible facteur de qualité car pour ce genre des filtres, ce facteur de qualité est défini comme étant le rapport de la résistance sur la réactance. Ce type de filtre n'est efficace que si le rang d'harmonique à éliminer est suffisamment élevé (à partir l'harmonique de rang $n=13$) [9] [17].

Le filtre amorti de 2^{ème} ordre possède les propriétés suivantes:

- ✓ Il amortit l'antirésonance,

- ✓ Il réduit les tensions harmoniques de fréquences égales ou supérieures à son accord, d'où l'appellation de "filtre amorti passe-haut,
- ✓ Il amortit le régime transitoire à la mise sous tension du filtre.
- ✓ La Figure I.5 montre le montage de ce dernier[17].

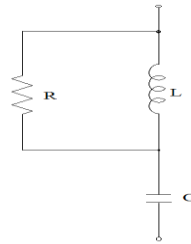


Figure I.5 -Schéma de principe d'un filtre amorti.

C- Coût du filtre passif :

Le coût d'un filtre C_a est de l'ordre de 5 à 15 % du coût de tout l'équipement de la station de conversion (C_a/C_c). Il est réparti entre la puissance réactive que doit générer le filtre et le filtrage des harmoniques, mais sans base logique de la division. Le but est donc de concevoir un filtre à coût minimum qui filtre adéquatement et qui fournit une partie de la puissance réactive. Fait important à noter, la capacité représente environ 60 % du coût total du filtre. Avec ces données, une conception précise du filtre est bien justifiée[18].

D- Avantages et Inconvénients :

D.1- Avantages :

Un filtre passif a pour objet, dans le cas des harmoniques, de diminuer l'impédance du réseau à une fréquence donnée. Les courants harmoniques à cette fréquence sont alors dérivés dans le filtre. Donc ce type de filtre est utilisé comme un piège des harmoniques c à d il est utilisé pour diminuer le taux de distorsion en courant au niveau d'un point de raccordement de plusieurs charges. Les filtres passifs contribuent à la compensation d'énergie réactive de l'installation[17].

D.2- Inconvénients :

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

- Son utilisation n'est pas simple et ses performances dépendent des caractéristiques du réseau sur lequel il est connecté c à d les filtres passifs sont définis en fonction de la nature de chaque charge, donc l'étude préalable est impérative.
- De plus, il peut occasionner une résonance parallèle importante qui représente une augmentation de l'impédance du réseau à certaines fréquences, conduit à des surtensions importantes pouvant aller jusqu'à la destruction des équipements.
- Equipements volumineux[9] [17].

E- Applications typiques :

Les applications des filtres passifs sont citées comme suit :

- Installations industrielles avec un ensemble de générateurs d'harmoniques de puissance totale supérieure à 200KVA (variateurs de vitesse, alimentations sans interruption et redresseurs).
- Installation présentant un besoin de compensation d'énergie réactive.
- Nécessité de réduction du taux de distorsion en tension pour éviter la perturbation de récepteurs sensibles.
- Nécessité de réduction du taux de distorsion en courant pour éviter les surcharges[19] .

4.1.2- Compensation de la puissance réactive :

La puissance réactive est majoritairement consommée par les moteurs asynchrones et plus récemment par des dispositifs à base d'électronique de puissance. Différentes méthodes de compensation sont utilisées pour relever le facteur de puissance. La plus simple consiste à placer des batteries de condensateurs en parallèle avec le réseau. L'inconvénient de cette méthode réside dans le fait que la puissance réactive fournie par les condensateurs est constante et qu'elle ne s'adapte pas à l'évolution du besoin[6].

4.2- Solutions nouvelles :

4.2.1- Filtrage actif :

Les filtres actifs sont composés d'un onduleur connecté au réseau par l'intermédiaire d'un filtre passif pour minimiser au point de raccordement les harmoniques du courant (ou de la tension), par injection d'un courant (ou d'une tension) [21].

Le principe de la compensation harmonique consiste à ce que le filtre actif génère des courants ayant les mêmes amplitudes que celles des courants du réseau, qui seront injectés aux points de raccordement avec le réseau comme le montre la Figure I.6. Dans ce travail les courants harmoniques sont identifiés par la méthode des puissances instantanée active et réactive[23].

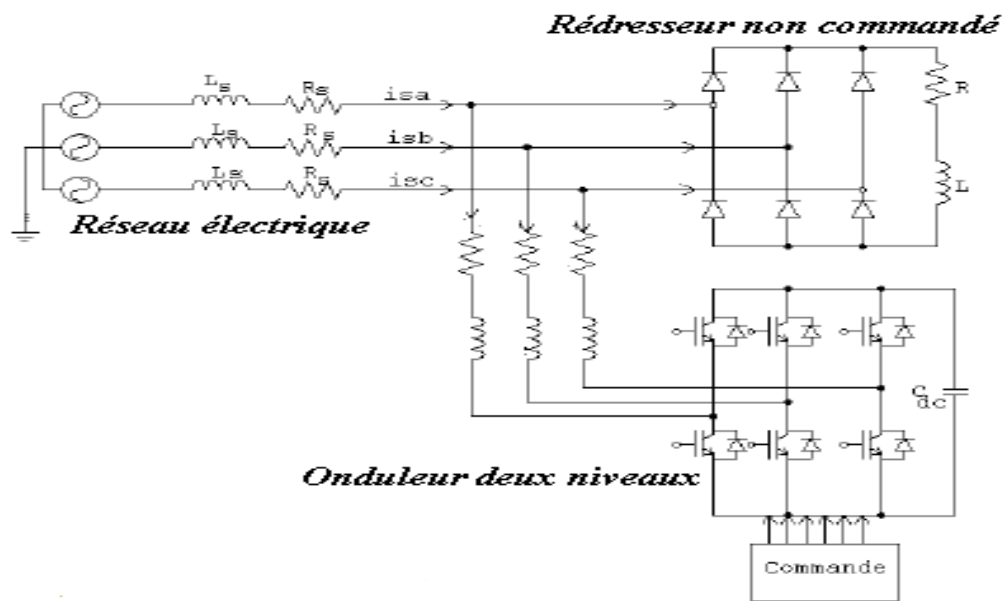


Figure I.6 -Schéma de principe d'un filtre actif.

4.2.2- Modèles des filtres actifs :

Il existe trois modèles principales : filtre actif parallèle, filtre actif série et le filtre actif hybride. Ces modèles sont étudiés comme suit.

4.2.2.1- Filtres actifs parallèles :

Sous réserve que le dispositif soit apte à injecter à tout instant un courant dont chaque composante harmonique est de même amplitude que celle du courant dans la charge, et de phase opposée, alors la loi de sommation des courants au point de raccordement garantit que le courant fourni par la source est purement sinusoïdal[21].

Le filtre actif parallèle -comme indique son nom- est connecté en parallèle avec la charge polluante comme le montre la Figure I.7.

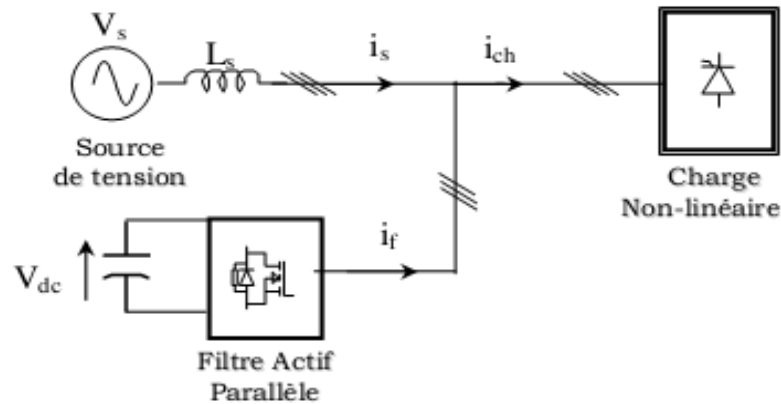


Figure I.7 -Schéma d'un compensateur actif parallèle[14].

4.2.2.2- Filtres actifs série :

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 à protéger est purement sinusoïdale[6].

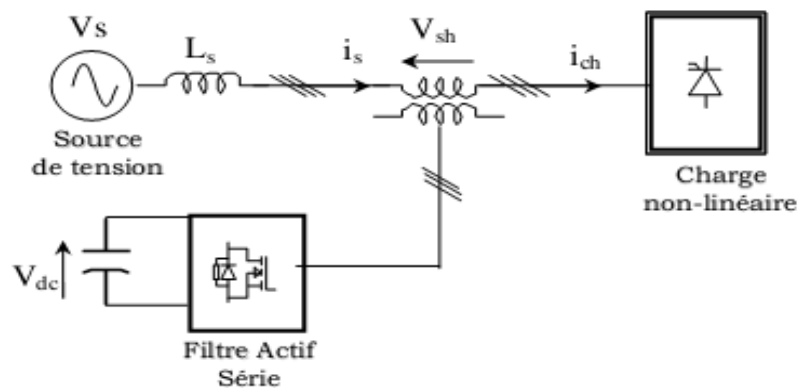


Figure I.8 -Schéma d'un compensateur actif série[14].

4.2.2.3-filtrage hybride :

Le filtrage mixte ou hybride résulte de l'association d'un filtre passif et d'un filtre actif. L'intérêt de filtre passif prend en charge la composition d'un grand parti des harmoniques

Le filtre active maintient performances de filtrage de l'évolution de la charge de réseau ainsi la puissance de convertisseur qui constitue le filtre active est fortement diminuée grâce aux éléments passifs. Ces structures permettent donc d'optimiser le rapporte performance coût et d'avoir une meilleure tenue en tension.

De nombreuses variantes sont possibles, mais peu ont été réalisées industriellement, des performances élevées sont possibles, même avec un filtre active de puissance réduite.

Il y'a plusieurs type de filtre hybride :

- La combinaison parallèle-série actifs
- Le filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles
- Le filtre actif parallèle assisté par un filtre passe haut[25].

A- La combinaison parallèle-série actif (UPQC) :

Cette combinaison parallèle-série actifs, aussi appelée Unified Power Quality Conditionner (UPQC), résulte de l'association des deux filtres actifs parallèle et série, comme le montre la Figure I.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[29].

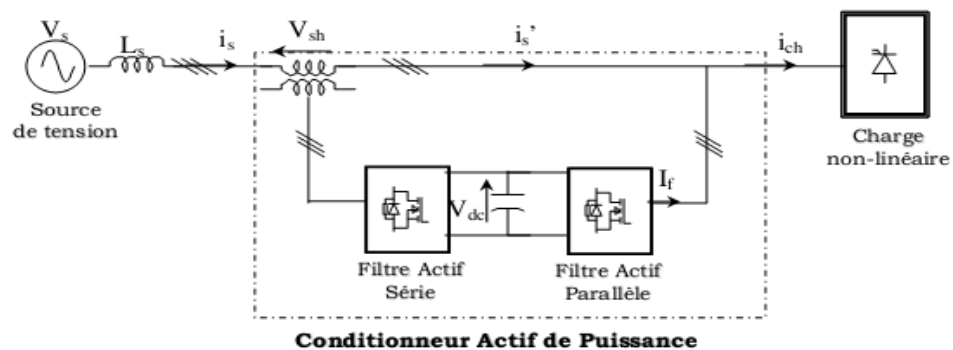


Figure I. 9 -Combinaison parallèle-série actifs (UPQC) [14].

B- Le filtre actif série avec des filtres passifs parallèles :

Le rôle du filtre actif série dans ce cas est d'empêcher les courants harmoniques de circuler vers le réseau et de les obliger à passer par les filtres passifs raccordés à leurs fréquences comme le montre la Figure I-10[26].

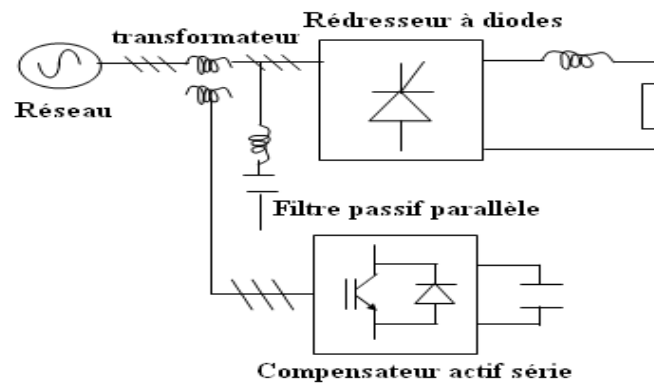


Figure I.10 -Filtre actif série et filtre passif parallèle.

C- Filtre actif parallèle assisté par un filtre passif :

Ce système est composé d'un filtre actif fonctionnant en générateur de courant en parallèle avec une fréquence de commutation faible (par exemple moins de 1.5 KHz) pour éliminer les harmoniques de rang faible (5-11), et d'un filtre passe haut de fréquence d'accord élevée et de dimensionnement faible pour éliminer le reste d'harmoniques, y compris ceux dus au filtre actif. L'ensemble est connecté en parallèle avec le réseau comme le montre la Figure I.11[14].

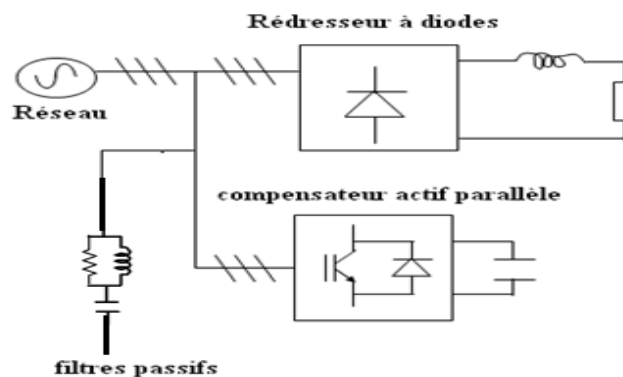


Figure I.11 -Filtre actif parallèle assisté par un filtre passe haut.

4.2.3- Coût du filtre actif :

Le coût du filtre actif varie principalement en fonction de la taille de son élément de stockage d'énergie, du nombre de semi-conducteurs qu'il contient ainsi que de sa topologie.

Pour les applications de faibles et moyennes puissances, l'élément de stockage d'énergie capacitif s'avère plus efficace et moins coûteux que l'élément de stockage

d'énergie inductif. De façon complémentaire, l'élément de stockage d'énergie inductif, composé d'une bobine supraconductrice, est plus fiable dans les applications de haute puissance. Pour ce qui est du dernier point, il est à noter que des améliorations doivent encore être faites, car les bobines supraconductrices sont encore au stade de recherche.

Comme nous venons juste de le voir, la topologie du filtre actif joue un grand rôle dans le coût en amenant des économies potentielles du montage. La topologie hybride, de son côté, permet de réduire les coûts du filtre actif (réduction de la taille de l'élément de stockage d'énergie) puisque la majorité de la compensation harmonique est effectuée par le filtre passif[18].

4.2.4- Les avantages et les inconvénients des filtres actifs :

4.2.4.1- Les avantages du filtre actif :

Le filtre actif offre de nombreux avantages :

- Il s'adapte automatiquement à l'évolution des charges et du réseau.
- Peut compenser plusieurs rangs harmoniques (dans la limite de sa bande passante).
- Ne passe pas en surcharge lorsque le courant harmonique à compenser dépasse le dimensionnement du filtre actif, il limite son émission de compensation harmonique au maximum 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 50 Hz est possible mais elle est coûteuse par rapport à une solution passive. Le filtrage actif est donc plus intéressant sur des charges ne nécessitant pas de compensation. Il existe aussi les filtres actifs hybrides[28].

4.2.4.2- Inconvénients :

Ces dispositifs peuvent présenter quelques inconvénients:

- Leur coût élevé limite leur implantation dans l'industrie,
- Les pertes sont plus élevées[17].
- La puissance maximale 120 KVA

4.2.5- Applications typiques :

Parmi les applications des filtres actifs:

- Les installations industrielles avec générateurs d'harmoniques de puissance totale inférieure à 200KVA (variateurs de vitesse, alimentations sans interruption, bureautique,...),
- Nécessité de réduction du taux de distorsion en courant pour éviter les surcharges[19].

5- Conclusion :

Nous avons vu qu'actuellement Les charges non linéaires sont de plus en plus présentes comme récepteurs consommateurs dans les réseaux de distribution industrielle, Elles produisent une pollution électrique harmonique qui nécessite généralement un dispositif d'élimination de ces perturbations et compensation de l'énergie réactive qu'ils consomment. Puis on a abordé les principales perturbations harmoniques et les moyens techniques permettant de les limiter dont il existe plusieurs, les solutions classiques présentent de nombreuses contraintes pour répondre à un besoin actif de dépollution, elles sont souvent pénalisées en termes d'encombrement, de résonance et d'une mauvaise adaptation face à l'évolution du réseau et aux charges polluantes. De plus nous avons s'intéressé dans la suite aux solutions modernes tel que le filtre actif parallèle qui sera l'objet de ce mémoire.

CHAPITRE II

Étude de la Partie Puissance du FAP

1- Introduction :

Ce chapitre sera consacré à la modélisation d'un réseau électrique qui alimente un redresseur non commandé comme un exemple d'une charge polluante. Afin de compenser les harmoniques générés par cette charge, un filtre actif parallèle est implanté dans ce réseau.

La structure générale du FAP contient deux parties: la partie de puissance et la partie de contrôle-commande. La partie puissance se compose de trois blocs principaux à savoir l'onduleur de tension, l'élément de stockage d'énergie et le filtre de sortie. Les éléments de cette partie seront détaillés dans Ce chapitre.

2-Principe du filtre actif parallèle :

Ce filter 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 générale, 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 [5]. Sa structure est la suivante :

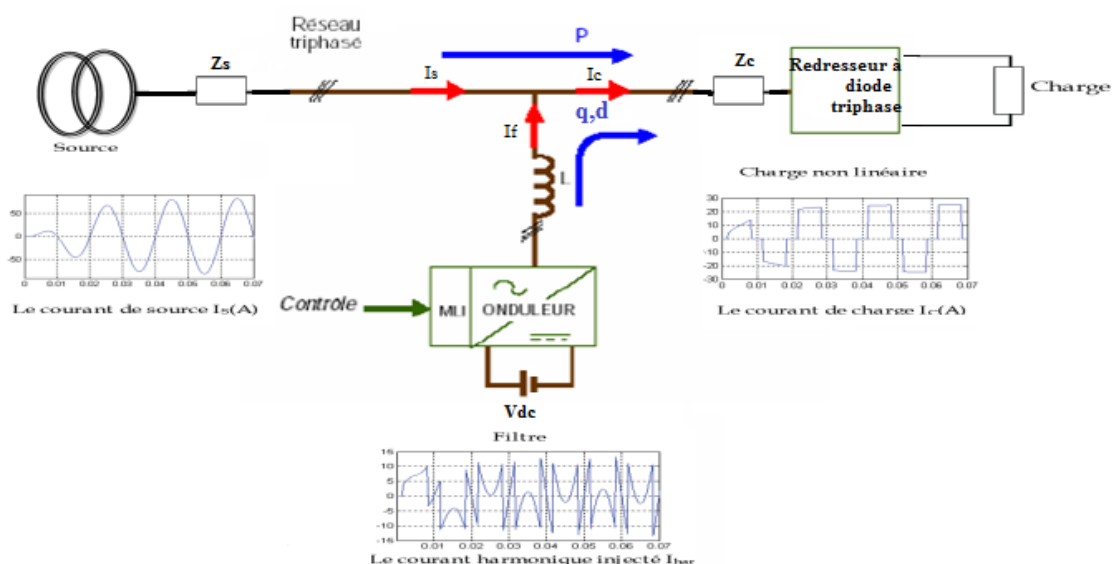


Figure II.1 -Principe du filtrage actif parallèle.

3- Modélisation du réseau électrique :

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 triphasé équilibré en série avec une impédance (figure II.2) [26].

Les caractéristiques de la source, détaillées ci-dessous.

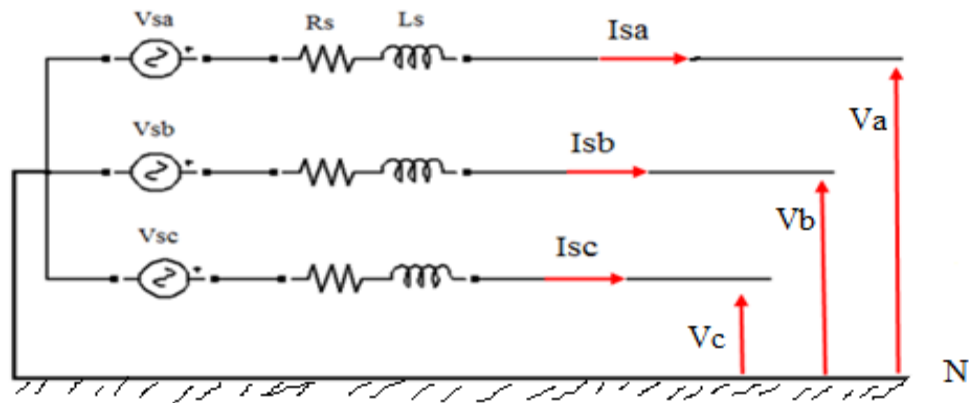


Figure II.2 -Schéma symbolique d'un réseau électrique triphasé.

$$\begin{pmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{pmatrix} = V_{max} \cdot \begin{pmatrix} \sin(\theta) \\ \sin\left(\theta - 2 \cdot \frac{\pi}{3}\right) \\ \sin\left(\theta - 4 \cdot \frac{\pi}{3}\right) \end{pmatrix} \quad \text{Eq(II.1)}$$

$$\begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{pmatrix} - R_s \cdot \begin{pmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{pmatrix} - L_s \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{pmatrix} \quad \text{Eq(II.2)}$$

Où $\theta = \omega \cdot t$ et l'impédance de la source par phase est $Z_s = R_s + j \cdot \omega \cdot L_s$

4- Etude de la charge polluante (Redresseur à diode triphasé) :

La charge polluante se compose d'une inductance et d'un redresseur non commandé (pont triphasé). Le redresseur alimente une charge composée d'une résistance R_d et une inductance L_d comme le montre la Figure II.3.

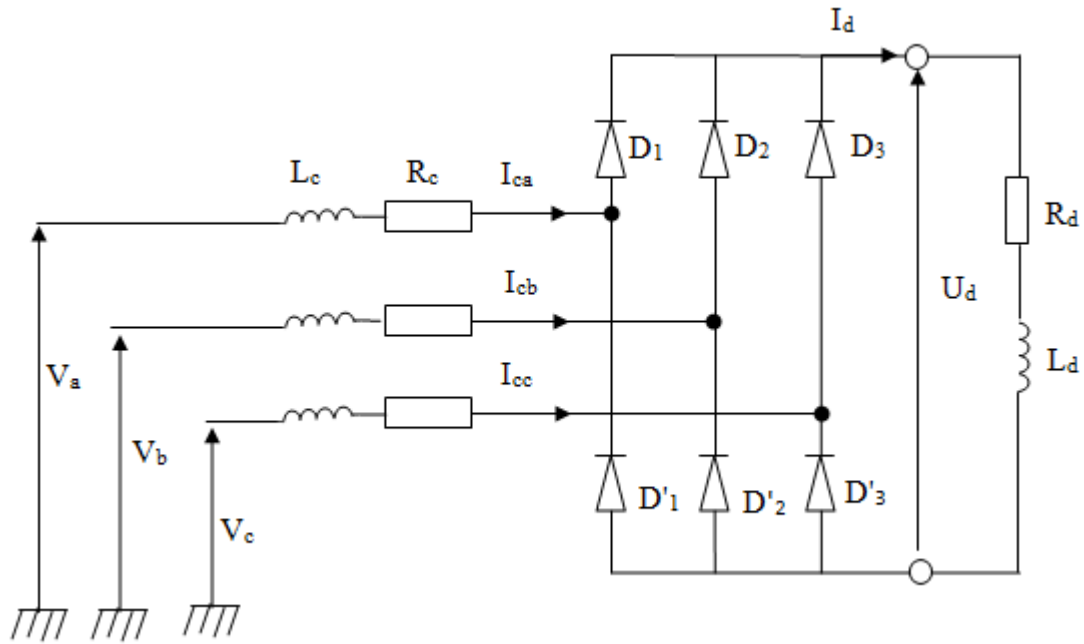


Figure II.3 -redresseur à diode triphasé.

Cette de la synthèse, génère les harmoniques de courants d'ordre $6n \pm 1$ ou n est le rang de harmonique ($n=1,2,3,\dots,n$), et par conséquent absorbe du réseau une énergie réactive. Cependant, le courant de la charge (phase a) I_c consommé par ce pont redresseur, peut être décomposé en série de Fourier, il est exprimé par :

$$I_c = I_1 \sqrt{2} \left[\sin(\omega t) - \frac{1}{5} \sin(5\omega t) - \frac{1}{7} \sin(7\omega t) + \frac{1}{11} \sin(11\omega t) + \frac{1}{13} \sin(13\omega t) - \frac{1}{17} \sin(17\omega t) - \frac{1}{19} \sin(19\omega t) + \dots \right]$$

Eq(II.3)

Chaque phase est connecté à deux diodes. Il est parcouru par I_d pendant l'intervalle $(T/6)$ ou la diode de premier groupe débite, et par $(-I_d)$ pendant l'intervalle de durée $(T/6)$ ou c'est celle du second groupe qui conduit[30].

Donc les courant de ligne I_{ca} , I_{cb} , I_{cc} sont donnés par la loi de Kirchhoff:

$$I_{ca} = i_{D1} - i_{D'1} \quad \text{et} \quad I_{cb} = i_{D2} - i_{D'2} \quad \text{et} \quad I_{cc} = i_{D3} - i_{D'3}$$

Ainsi

$$I_{cj} = +I_d, \text{ quand } D_i \text{ conduit; } j=a,b,c \text{ et } i=1, 2,3$$

$$I_{cj} = -I_d, \text{ quand } D'_i \text{ conduit; } j=a,b,c \text{ et } i=1, 2,3$$

5- Structure générale du filtre actif parallèle :

La structure générale du filtre actif parallèle, est présenté dans la Figure II.4, sous la forme de deux blocs : la partie puissance et la partie control-commande.

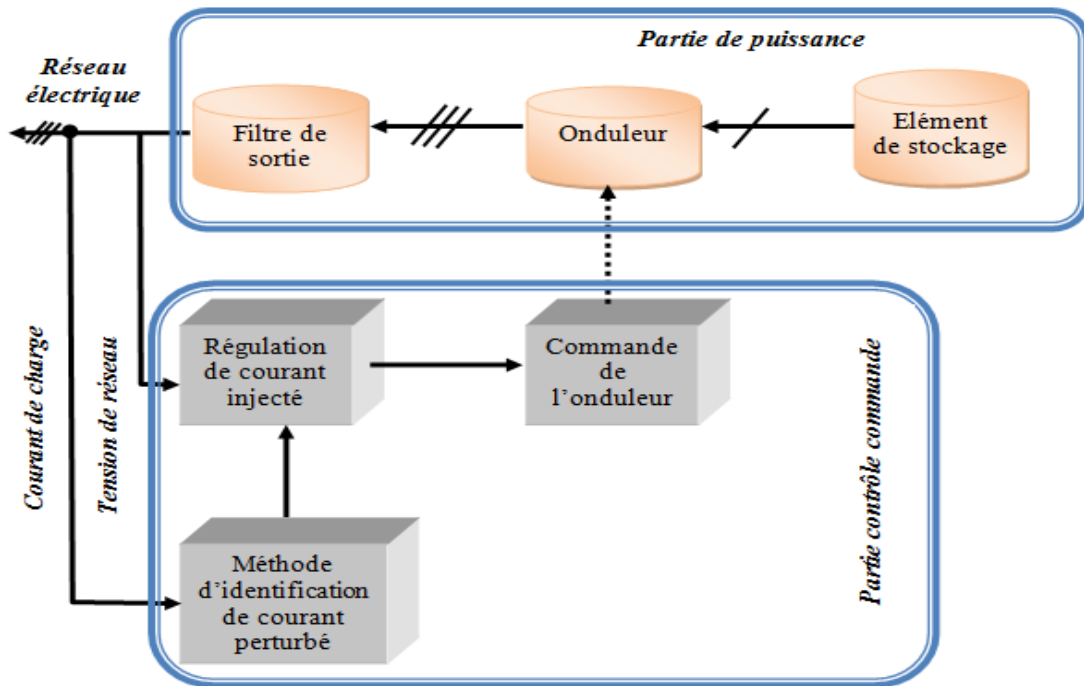


Figure II.4 -structure générale de la filtre active parallèle.

✓ La partie puissance est constituée de :

- Un onduleur à base d'interrupteur de puissance, commandable à l'amorçage et au blocage (GTO, IGBT/Diode,...etc.).avec des diodes en antiparallèle.
- Un circuit de stockage d'énergie.
- Un filtre de sortie.

✓ La partie control_commande est constituée de :

- La méthode d'identification des courants perturbés.
- La régulation du courant injecté sur le réseau à partir de l'onduleur de tension.
- Le commande de l'onduleur de tension .[6]

6-Présentation de la partie puissance :

6.1- Onduleur de tension :

6.1.1- Structure générale :

On appelle onduleur de tension, un onduleur alimenté par une source de tension continue, c'est à dire par une source d'impédance interne négligeable; sa tension n'est pas affectée par la variation du courant I qui la traverse. La source continue impose la tension à l'entrée de l'onduleur et donc à sa sortie.

On peut obtenir la tension triphasée en groupant trois demis ponts monophasés, la Figure II-5 représente un onduleur triphasé de tension. Il se compose de trois bras à interrupteurs réversible en courant, commandés à la fermeture et à l'ouverture, réalisés à partir d'un (GTO, IGBT, ...etc.) et d'une diode en antiparallèle [4] [26].

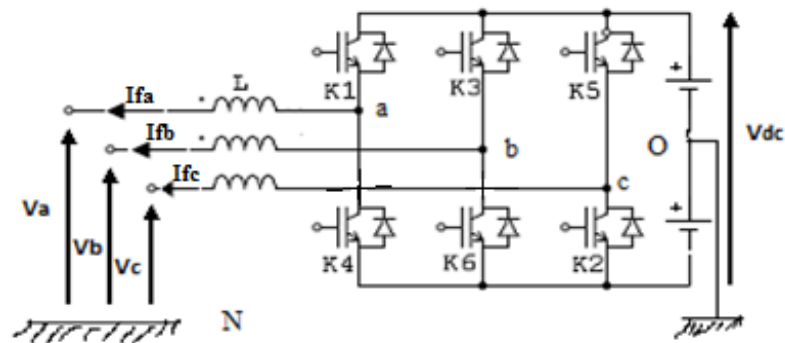


Figure II.5 -Structure de l'onduleur de tension triphasé.

6.1.2- Modélisation de commande de l'onduleur de tension :

Les interrupteurs K_1 et K_4 , K_3 et K_6 , K_5 et K_2 doivent être complémentaires deux à deux, quelque soit la loi de commande à adopter, il est possible d'établir des relations générales que nous utiliserons la commande MLI quels que soient les courants, les interrupteurs imposent les tensions entre les bornes de sortie a, b, c et le point milieu (fictif) 'o' de la source de tension.[31]

$$\begin{aligned} V_a - V_o &= \frac{V_{dc}}{2} \Rightarrow K_1 \text{ fermé, } -\frac{V_{dc}}{2} \Rightarrow K_4 \text{ ouvert} \\ V_b - V_o &= \frac{V_{dc}}{2} \Rightarrow K_3 \text{ fermé, } -\frac{V_{dc}}{2} \Rightarrow K_6 \text{ ouvert} \\ V_c - V_o &= \frac{V_{dc}}{2} \Rightarrow K_5 \text{ fermé, } -\frac{V_{dc}}{2} \Rightarrow K_2 \text{ ouvert} \end{aligned} \quad \text{Eq(II.4)}$$

Les interrupteurs imposent donc les tensions composées à la sortie de l'onduleur ainsi pour la première de ces tensions.

$$\begin{aligned}
 V_a - V_b &= (V_a - V_o) - (V_b - V_o) = V_{dc} \quad \text{Si } K_1 \text{ fermé et } K_3 \text{ ouvert} \\
 V_a - V_b &= (V_a - V_o) - (V_b - V_o) = 0 \quad \text{Si } K_1 \text{ et } K_3 \text{ fermés} \\
 V_a - V_b &= (V_a - V_o) - (V_b - V_o) = -V_{dc} \quad \text{Si } K_1 \text{ ouvert et } K_3 \text{ fermé.} \\
 V_a - V_b &= (V_a - V_o) - (V_b - V_o) = 0 \quad \text{Si } K_1 \text{ et } K_3 \text{ ouverts}
 \end{aligned}
 \tag{II.5}$$

Son point neutre étant isolé, si le récepteur est équilibré on peut passer des tensions composées aux tensions simples V_a , V_b , V_c à la sortie de l'onduleur.

Pour que, quelle que soit leurs formes d'ondes, les trois courants I_{fa} , I_{fb} , I_{fc} aient une somme nulle, il faut que leurs trois fondamentaux aient une somme nulle et qu'il en soit de même pour les divers harmoniques.

Si le récepteur est équilibré, ces trois phases présentent la même impédance pour le fondamental ainsi que pour les divers harmoniques, les produit impédances 'Z' courant, c'est-à-dire les tensions ont une somme nulle pour les fondamentaux ainsi que les systèmes harmoniques successifs, en ajoutant toutes ces sommes on obtient la somme nulle des trois tensions.

$$V_c = \frac{1}{3} \cdot (V_c - V_a) - \frac{1}{3} \cdot (V_b - V_c)$$

A cause de l'équilibre du récepteur :

$$I_{fa} + I_{fb} + I_{fc} = 0 \quad \text{entraîne} \quad V_a + V_b + V_c = 0$$

On peut donc écrire :

$$\begin{aligned}
 \frac{1}{3} \cdot (V_a - V_b) - \frac{1}{3} \cdot (V_c - V_a) &= \frac{2}{3} \cdot V_a - \frac{1}{3} \cdot V_b - \frac{1}{3} \cdot V_c \\
 &= V_a - \frac{1}{3} \cdot (V_a + V_b + V_c) = V_a
 \end{aligned}$$

$$\text{Et} \quad V_a = \frac{1}{3} \cdot (V_a - V_b) - \frac{1}{3} \cdot (V_c - V_a)$$

Et de même

$$V_b = \frac{1}{3} \cdot (V_b - V_c) - \frac{1}{3} \cdot (V_a - V_b)$$

On obtient finalement :

$$\begin{aligned} V_a &= \frac{1}{3} \cdot [2 \cdot (V_a - V_o) - (V_b - V_o) - (V_c - V_o)] \\ V_b &= \frac{1}{3} \cdot [-(V_a - V_o) + 2 \cdot (V_b - V_o) - (V_c - V_o)] \\ V_c &= \frac{1}{3} \cdot [-(V_a - V_o) - (V_b - V_o) + 2 \cdot (V_c - V_o)] \end{aligned} \quad \text{Eq(II.6)}$$

Si V_{ao} , V_{bo} et V_{co} sont les tensions d'entrée de l'onduleur (valeur continues), alors V_a , V_b et V_c sont les tensions de sorties de cet onduleur (valeur alternatives), par conséquent, L'onduleur de tension peut être modélisé par une matrice **[T]** assurant le passage continu - alternatif **(DC-AC)**.

On aura alors :

$$[V_{AC}] = [T][V_{DC}]$$

Avec : $[V_{AC}] = [V_a \ V_b \ V_c]^T$: Tensions alternatifs équilibrées.

$[V_{DC}] = [V_{ao} \ V_{bo} \ V_{co}]^T$: Tension continues.

$$S_i = \begin{cases} 1 \\ \text{ou(exclusif)} \quad i=1, 2, 3 \text{ (commutation supposée idéales).} \\ 0 \end{cases}$$

$$[T] = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \quad \text{Eq(II.7)}$$

Ainsi l'onduleur est modélisé par, cette matrice de transfert [T].

6.2- 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} , comme le montre la figure II.4. 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 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 [6]:

$$C_{dc} = \frac{I_n}{\varepsilon \cdot V_{dc} \cdot \omega_n} \quad \text{Eq(II.8)}$$

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

6.3 - Filtre de sortie :

Le filtre de sortie (ou filtre de découplage) est un filtre passif utilisé pour connecter l'onduleur de tension au réseau électrique qui très souvent considéré comme une source de courant qui génère des courants harmoniques à partir de la différence des tensions entre la sortie de l'onduleur et le réseau.

Le filtre de sortie est dimensionné pour satisfaire les deux critères suivants :

- ✓ Assurer la dynamique du courant :

$$\frac{d\vec{I}_{n_c}}{dt} = \frac{d\vec{I}_{inj}}{dt} \quad \text{Eq(II.9)}$$

- ✓ Empêcher les composantes dues aux commutations de se propager sur le réseau électrique. [6][32]

7- Conclusion :

Ce chapitre donne les informations utiles pour comprendre le contenu de chapitre suivant. En effet, il donne une explication suffisante pour chacune des composantes du système étudié qui contient exactement trois composantes : un réseau électrique, un redresseur non commandé avec son charge (R_d , L_d) et un filtre actif parallèle. Ce dernier contient deux parties essentielles : la partie puissance qui contient trois blocs internes: à savoir l'onduleur de tension, l'élément de stockage d'énergie et le filtre de sortie.

Le chapitre suivant sera consacré à la présentation de la deuxième partie du FAP qui présente le partie contrôle-commande.

CHAPITRE III

Étude de la Partie Contrôle-Commande du FAP

1- Introduction :

Précédemment, la partie puissance a été présentée. Pour servir la création des courants du filtre qui vont être injectés dans le réseau électrique. Le fonctionnement de l'onduleur a besoin d'une commande basée sur des courants harmoniques engendrés par la charge, donc il faut qu'il y ait une identification des harmoniques créés par la charge.

Plusieurs algorithmes d'identification des grandeurs harmoniques de référence et nombreuses techniques de commande et de régulation ont été développés dans ce chapitre.

Cette partie est nommée partie contrôle-commande du F.A.P (voir la figure II.4) dont laquelle l'identification des harmoniques et la commande de l'onduleur se feront par différentes approches.

2- Les méthodes d'identification des courants perturbés :

L'identification des harmoniques est une étape très importante dans le processus de compensation active. En effet, le système de commande, même très efficace, ne pourra pas à lui seul effectuer des corrections suffisantes si les harmoniques parasites sont mal identifiés. Pour cette raison, de nombreuses méthodes d'identification ont été développées dans la littérature [3].

Les différentes méthodes d'identification du courant perturbateur, peuvent être regroupées en deux familles.

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

- La deuxième famille est basée sur le calcul des puissances instantanées dans le domaine temporel. Certaines de ces méthodes se basent sur le calcul des puissances harmoniques de la charge non linéaire. D'autres peuvent être utilisées pour compenser à la fois les courants harmoniques et la

puissance réactive, en se basant sur la soustraction de la partie fondamentale active du courant totale[6][12].

Parmi les méthodes de la deuxième famille, on trouve celle qui seront détaillées ci-dessous .

2.1- Méthode tri-monophasée :

La méthode tri monophasée, permet de traiter les trois phases de manière indépendante. Le principe est basé sur l'estimation de l'amplitude de la composante fondamentale active I_{cfa} de la composante fondamentale réactive I_{cfr} et du courant I_{ca} absorbé par la charge [13]. Elle est applicable aux systèmes monophasés et triphasés.

Considérons le courant I_{ca} absorbé par la charge non-linéaire sur la première phase, il est exprimé par :

$$\begin{aligned} I_{ca}(\theta) &= \sum_{n=1}^{\infty} (I_{cn} \sin(n.\theta - \varphi_n)) \\ &= I_{c1} \cdot \sin(\theta - \varphi_1) + \sum_{n=2}^{\infty} I_{cn} \sin(n.\theta - \varphi_n) \end{aligned} \quad \text{Eq(III.1)}$$

Avec : $\theta = \omega t$

On rappelle que la composante fondamentale de la tension au point de raccordement du filtre actif sur la première phase, est définie par :

$$V_{sa}(t) = \sqrt{2} \cdot V_s \sin(\theta) \quad \text{Eq(III.2)}$$

En multipliant l'équation (III.1) respectivement par $\sin(\theta)$ et $\cos(\theta)$ nous obtenons:

$$\begin{aligned} I_{ca}(\theta) \sin(\theta) &= \\ \frac{I_{ca}}{2} \cdot \cos(\varphi) - \frac{I_{ca}}{2} \cdot \cos(2\theta - \varphi_1) + \sin(\theta) \sum_{n=2}^{\infty} I_{cn} \sin(n.\theta - \varphi_n) \end{aligned} \quad \text{Eq(III.3)}$$

$$\begin{aligned} I_{ca}(\theta) \cos(\theta) &= \\ -\frac{I_{ca}}{2} \cdot \sin(\varphi) + \frac{I_{ca}}{2} \cdot \sin(2\theta - \varphi_1) \cos(\theta) \sum_{n=2}^{\infty} I_{cn} \sin(n.\theta - \varphi_n) \end{aligned} \quad \text{Eq(III.4)}$$

D'après les relations (III.3) et (III.4) nous constatons que seules les composantes continues sont proportionnelles respectivement à l'amplitude du courant fondamentale actif et à l'amplitude du courant réactif. Les premières composantes alternatives ont une

fréquence égale à deux fois la fréquence du réseau. Ces dernières seront donc filtrées à l'aide d'un filtre passe-bas.

Après le filtrage, on obtient :

$$[I_{ca} \sin(\theta)]_{\text{filtre}} = \frac{I_{ca}}{2} \cos(\theta) \quad \text{Eq(III.5)}$$

$$[I_{ca} \cos(\theta)]_{\text{filtre}} = -\frac{I_{ca}}{2} \sin(\theta) \quad \text{Eq(III.6)}$$

On peut alors reconstituer le courant fondamental en multipliant respectivement les deux expressions précédentes par $2\sin(\theta)$ et $2\cos(\theta)$:

$$\begin{aligned} I_{caf} &= I_{ca} \cos(\varphi_1) \sin(\theta) - I_{ca} \sin(\varphi_1) \cos(\theta) \\ &= I_{cafa} + I_{cafr} = I_{ca} \sin(\theta - \varphi_1) \end{aligned} \quad \text{Eq (III.7)}$$

2.2- Méthode du filtre coupe-bande (notch filtre) :

C'est le plus simple des algorithmes du calcul des courants de référence, comme l'illustre le diagramme représenté sur la figure. III.1 [8].

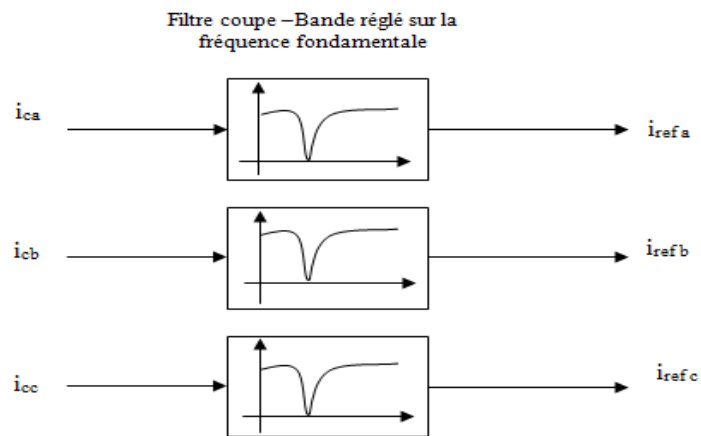


Figure III.1 -Méthode du filtre coupe-bande.

2.3- Méthode du référentiel synchrone :

Cette méthode introduite par Bhattacharya, exploite également la transformation de Concordia mais appliquée uniquement aux courants de ligne $i_{ca}(t)$, $i_{cb}(t)$, $i_{cc}(t)$. Ensuite, une seconde transformation est opérée pour passer des courants de ligne en d-q, ce qui permet de transformer la composante fondamentale du courant en une composante

continue et les composantes harmoniques du courant à des composantes alternatives [7]. Son principe est énoncé ci-après.

La transformation des coordonnées a - b - c du courant en coordonnées d - q et ce, à l'aide de la transformée de Park, en fixant la fréquence de celle-ci au synchronisme avec celle du réseau donne :

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \sin\theta & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{ca} \\ I_{cb} \\ I_{cc} \end{bmatrix} \quad \text{Eq (III.8)}$$

$\theta = \omega t$ où ω pulsation de synchrone.

L'élimination de la composante continue est réalisée par l'ajout d'un filtre passe-haut (FPH). L'obtention du courant de référence se fait en effectuant la transformée inverse de Park toujours en synchronisme avec la fréquence du réseau [18].

$$\begin{bmatrix} I_{refa} \\ I_{refb} \\ I_{refc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin\theta & \cos\theta \\ \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} \quad \text{Eq(III.9)}$$

2.4- Méthode de la puissance instantanée réelle et imaginaire (PIRI) :

Cette méthode est la plus utilisée. elle offre l'avantage de choisir la perturbation à compenser avec précision, rapidité et facilité d'implantation. Pour ces raisons nous avons retenu cette méthode d'identification pour le reste de notre travail.

2.4.1- principe de la méthode des puissances instantanées :

En présence des harmoniques, la puissance apparente est composée de trois parties : active (P), réactive (q) et déformante (d) comme le montre la relation (III.10).

$$S = \sqrt{P^2 + q^2 + d^2} \quad \text{Eq(III.10)}$$

Cette méthode exploite la transformation α - β pour obtenir les puissances réelles et imaginaires[26].

Notons par (V_α, V_β) et (I_α, I_β) les composantes orthogonales du repère α - β associées respectivement aux tensions de raccordement du filtre actif parallèle (V_s) et aux courants

absorbés par les charges polluantes (I_s). La transformation α - β -0 triphasée permet d'écrire, la relation des tensions suivante[16] :

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} \quad \text{Eq(III.11)}$$

Et la relation des courants ci-dessous :

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} \quad \text{Eq(III.12)}$$

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

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

$$\begin{cases} P(t) = V_{sa}I_{sa} + V_{sb}I_{sb} + V_{sc}I_{sc} = p(t) + p_0(t) \\ P(t) = V_\alpha I_\alpha + V_\beta I_\beta \\ P_0(t) = V_0 I_0 \end{cases} \quad \text{Eq(II.13)}$$

Avec $P(t)$ la puissance réelle instantanée, $P_0(t)$ la puissance homolaire instantanée.

L'avantage de la transformation α - β -0 est la séparation des séquences homopolaires du système triphasé de courant ou de tension. De la même manière, la puissance imaginaire instantanée peut s'écrire sous la forme suivante :

$$q(t) = -\frac{1}{\sqrt{3}} [(V_{sa} - V_{sb})I_{sc} + (V_{sb} - V_{sc})I_{sa} + (V_{sc} - V_{sa})I_{sb}] = V_\alpha I_\beta - V_\beta I_\alpha \quad \text{Eq(II.14)}$$

La puissance q a une signification plus large que la puissance réactive habituelle. En effet, contrairement à la puissance réactive, qui ne considère que la fréquence fondamentale, la puissance imaginaire prend en compte toutes les composantes harmoniques de courant et de tension. C'est pourquoi on lui donne une autre dénomination (puissance imaginaire) avec comme unité le Volt-ampère imaginaire (VAI). A partir des relations (III.13) et (III.14), nous pouvons établir la relation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} P \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & V_{s\beta} \\ -V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{\alpha} \\ I_{\beta} \end{bmatrix} \quad \text{Eq(III.15)}$$

Dans le cas général, chacune des puissances P et q comporte une partie continue et une partie alternative, ce qui nous permet d'écrire l'expression ci-dessous[22] :

$$\begin{cases} p = \bar{p} + \tilde{p} \\ q = \bar{q} + \tilde{q} \end{cases} \quad \text{Eq(III.16)}$$

Avec :

- $\bar{p}$ une puissance continue liée à la composante fondamentale active du courant et de la tension.
- $\bar{q}$ une puissance continue liée à la composante fondamentale réactive du courant et de la tension.
- $\tilde{p}$ et $\tilde{q}$ des puissances alternatives liées à la somme des composantes perturbatrices du courant et de la tension[06].

2.4.1.1- Séparation des puissances perturbatrices :

Afin de garder les puissances correspondant aux courants harmoniques, il faut filtrer la composante continue correspondant à la composante fondamentale. Pour ce faire, un filtre passe-haut ou passe-bas est utilisé. Ce dernier est le plus utilisé car il ne présente pas une amplification aux fréquences voisines de la fréquence de résonance et son résidu harmonique est moins important. Le schéma présenté dans la figure III.2 donne le principe de séparation des puissances perturbatrices[24]. Où X peut être P ou q .

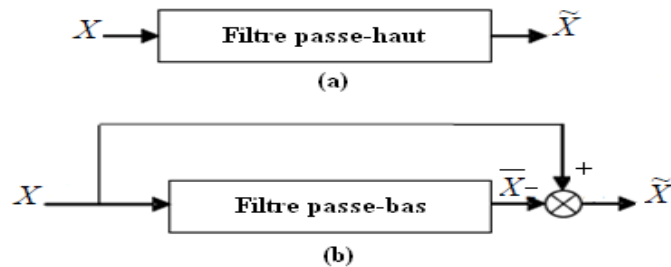


Figure III.2 –Filtres d'extraction[16].

Un filtre passe-bas dans l'espace des puissances permet de séparer la composante fondamentale (autrement dit la partie continue), des composantes perturbatrices (la partie alternative). Deux filtres sont nécessaires, le premier pour isoler la partie continue

de la puissance active instantanée et le second pour isoler la partie continue de la puissance réactive instantanée[17].

2.4.1.2- Calcul des courants perturbateurs :

En inversant la relation (III.15), nous pouvons recalculer les courants dans le repère α - β comme le montre l'équation (III.17):

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{V_{s\alpha}^2 + V_{s\beta}^2} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad \text{Eq(II.17)}$$

En considérant les équations (III.16) et (III.17), nous pouvons séparer le courant dans le repère (α - β) en trois composantes, active et réactive à la fréquence fondamentale et les harmoniques. Ceci conduit à:

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{p} \\ 0 \end{bmatrix}}_{\text{courant actif}} + \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{q} \end{bmatrix}}_{\text{courant réactif}} + \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix}}_{\text{courant harmonique}} \quad \text{Eq(III.18)}$$

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

Cette expression montre donc que l'identification des différentes composantes du courant dans le repère (α - β) revient à séparer des termes continus des puissances réelle et imaginaire instantanées[26].

Les courants perturbateurs dans le repère biphasé (α - β) sont donnés par la forme suivante[17]:

$$\begin{bmatrix} \tilde{I}_\alpha \\ \tilde{I}_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \quad \text{Eq(III.19)}$$

Les courants perturbateurs triphasés qui représentent les courants identifiés, dits courants de référence (I_{ref}), sont calculés à partir de la transformation α - β inverse (transformation C2-3) donnée par la relation (II.20) :

$$\begin{bmatrix} I_{refa} \\ I_{refb} \\ I_{refc} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{I}_\alpha \\ \tilde{I}_\beta \end{bmatrix} \quad \text{Eq(III.20)}$$

Avec $\tilde{I}_\alpha$, $\tilde{I}_\beta$ courants perturbateurs calculés dans le repère (α - β) à partir des courants réactifs et harmoniques de la relation (III.18)[26].

2.4.2- Algorithme d'identification :

Finalement, l'algorithme d'identification que nous avons défini peut être représenté par le synopsis de la figure III.3. Par souci de simplification, nous décrirons les matrices des relations (III.11) et (III.12), après avoir enlevé les composantes homopolaires.

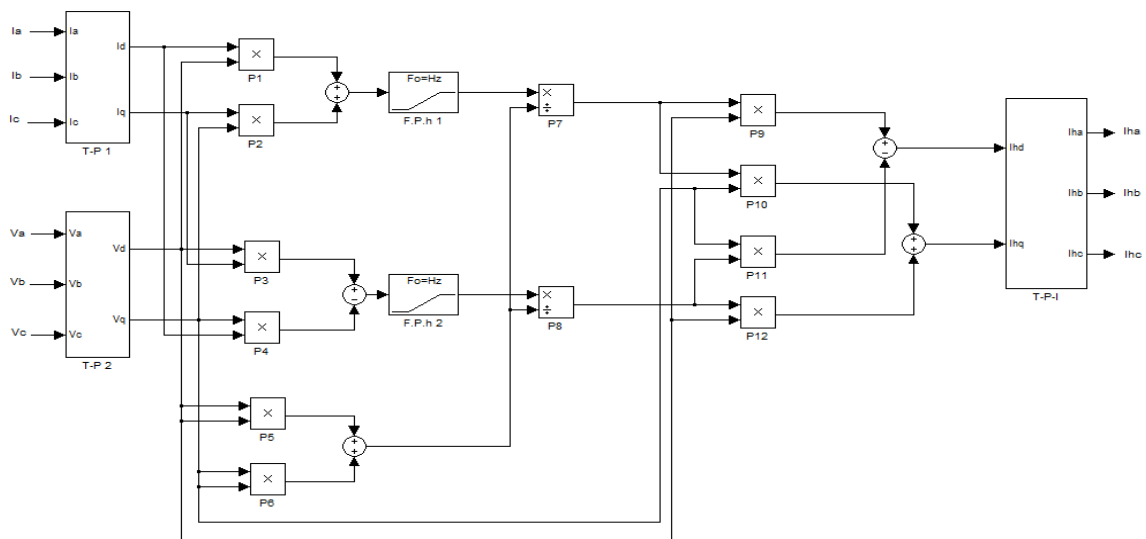


Figure III.3 -Schéma de principe de la méthode d'identification des puissances instantanées.

Dans cette figure, nous avons présenté le schéma de l'algorithme d'identification des courants harmoniques, qui est constitués essentiellement, par des blocs de la matrice de transformation (α - β), des filtres passe haut afin d'enlever les composantes continue des puissances, et les différents blocs de calcul du courant harmonique [27].

3- La commande de l'onduleur :

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

- la commande par hystérésis.
- la commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI).

3.1- Commande par hystérésis :

La commande par hystérésis, appelée aussi commande en tout ou rien, est une commande non linéaire qui utilise l'erreur existante entre le courant de référence et le courant produit par l'onduleur, cette erreur est comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis.[20]

L'approche la plus simple utilisée pour cette fin, est la stratégie de contrôle qui réalise la comparaison entre le courant de phase mesuré et le courant de référence, à l'aide d'un comparateur à hystérésis. Celui-ci, produit des impulsions d'amorçage et de blocage des interrupteurs de l'onduleur, de façon à limiter le courant de phase dans une bande d'hystérésis autour du courant de référence (Figure III.4).[15]

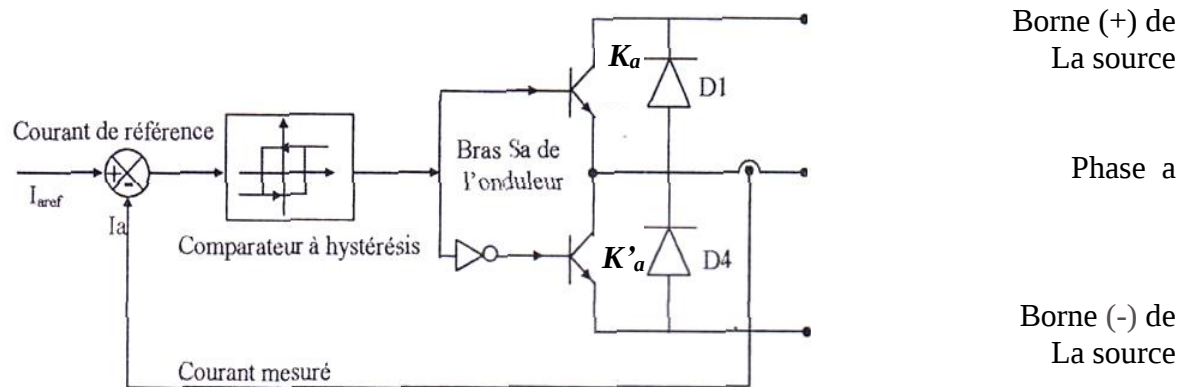


Figure III.4 -Schéma de principe du contrôle par hystérésis d'un bras de l'onduleur.

De ce fait, les conditions de commutation des trois Interrupteurs statiques K_i ($i=a, b, c$) de l'onduleur sont définies en terme des états logiques correspondants à la façon suivante :

$$K_i = +1 \quad \text{si} \quad I_i^* - I_i > \Delta i.$$

$$K_i = -1 \quad \text{si} \quad I_i^* - I_i < -\Delta i.$$

$$K_i = -K_{i-1} \quad \text{si} \quad I_i^* = I_i.$$

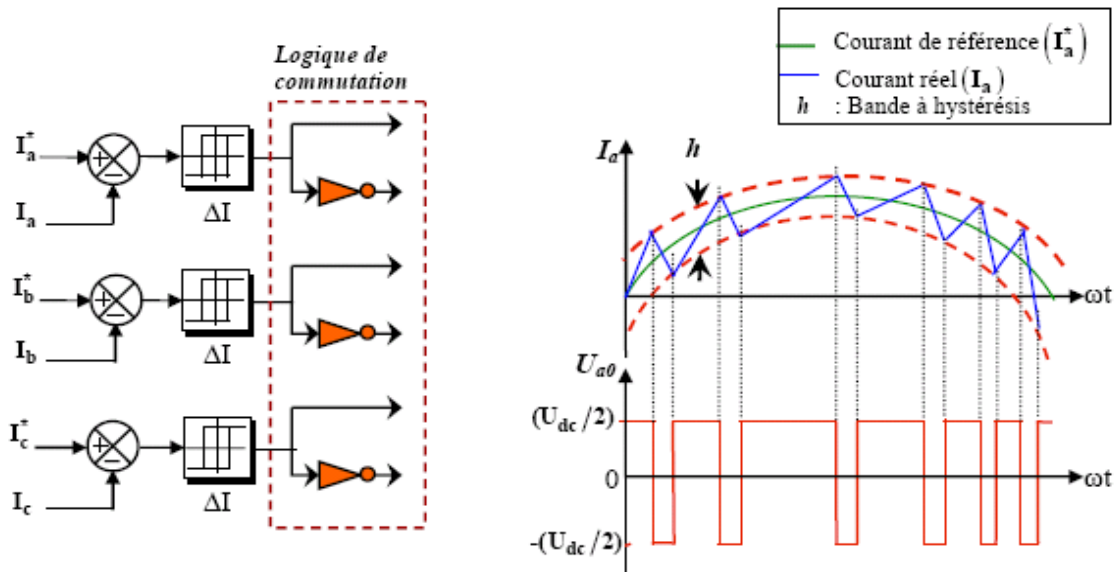


Figure III.5 -Commande par Hystérésis.

I_i ($i = a, b, c$) sont les courants des phases statoriques (I_a, I_b, I_c).

I_i^* ($i = a, b, c$) sont les courants de références issus des circuits de commande des trois bras.

h : est la bande d'hystérésis, elle est choisie de façon à ne pas dépasser la fréquence de commutation admissible des semi-conducteurs contrôlés et à minimiser suffisamment les harmoniques de courant.[15]

3.2- Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI) :

Pour résoudre le problème précédent nous introduirons une deuxième famille de commande de l'onduleur : la technique de commande par MLI résout le problème de maîtrise de fréquence de commutation. [6]

La plus simple et la plus connue des modulations de largeur d'impulsions est sans doute la MLI à échantillonnage naturel. Cette technique de commande met en œuvre d'abord un régulateur qui détermine la tension de référence de l'onduleur (modulatrice) à partir de l'écart entre le courant mesuré et sa référence. Cette dernière est ensuite comparée avec un signal triangulaire (porteuse à fréquence élevée fixant la fréquence de commutation). La sortie du comparateur fournit l'ordre de commande des interrupteurs. Le schéma de principe est donné par la figure III.6.

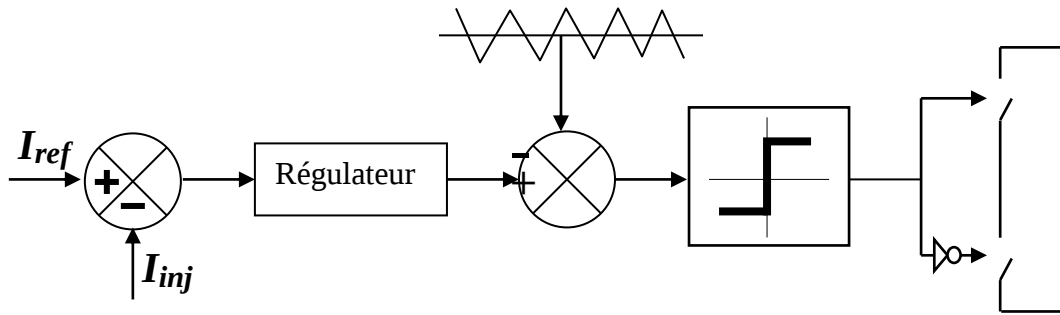


Figure III.6 -Principe de commande par MLI.

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

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

Plus récemment, nous avons vu apparaître une technique de commande, dite commande a modulation vectorielle. Cette dernière diffère des techniques présentées précédemment par le fait qu'elle ne s'appuie pas sur des modulations appliquer à chacun des interrupteurs. [10]

▪ Principe de MLI sins-triangle :

Le signal de commande des interrupteurs est généré à partir de la comparaison du signal de référence sinusoïdal, (de fréquence $f=1/T$) et du signal de modulation triangulaire ou porteuse (de fréquence $f_p=1/T_p$)[26].

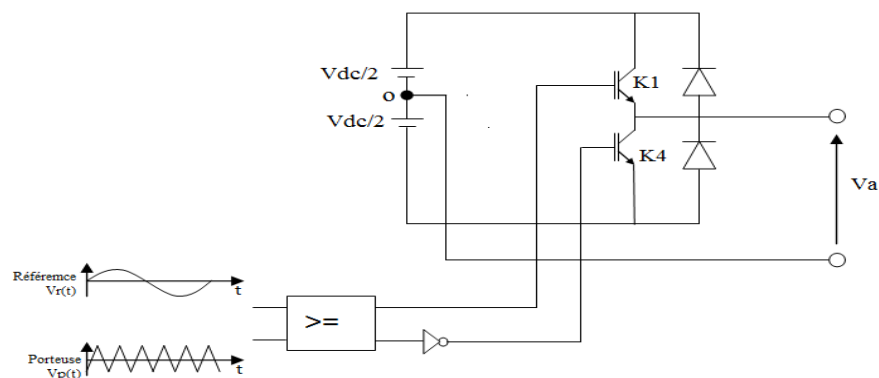


Figure III.7 - Schéma de principe du contrôle par MLI sinus – triangle d'un bras de l'onduleur.

Deux paramètres caractérisent la commande :

✓ L'indice de modulation :

$$m = \frac{f_p}{f} \quad \text{Eq(III.21)}$$

Où :

f_p est la fréquence de modulation

f est la fréquence du fondamentale des grandeurs de sortie de l'onduleur

✓ Le coefficient de réglage :

$$r = \frac{V_{\max}}{V_{p\max}} \quad \text{Eq(III.22)}$$

Où:

$V_{\max}$: la valeur crête de la tension de référence

$V_{p\max}$: la valeur crête de la tension de commande

r : Rapport des amplitudes de la référence et de la porteuse. Généralement, r est compris entre 0 et 1 (l'amplitude de la référence reste inférieur à celle de la porteuse).

La technique MLI est basée sur la variation soit de l'indice de modulation « m », soit le coefficient de réglage de tension « r ».

L'augmentation de l'indice de modulation permet de repousser les harmoniques vers les fréquences élevées (droit).

La variation de l'amplitude de l'harmonique fondamentale ne dépend pas de la variation de « m », par contre la variation de « r » agit directement sur l'amplitude des harmoniques.

4- 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} .

$$L_f \frac{d}{dt} I_{inj} = V_f - V_s \quad \text{Eq(III.23)}$$

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

$$\Delta I_f = I_{ref} - I_{inj} \quad \text{Eq(III.24)}$$

A partir des équations (III.23) et (III.24), nous obtenons l'expression ci-dessous :

$$L_f \frac{d}{dt} \Delta I_f = (V_s + L_f \frac{d}{dt} I_{ref}) - V_f \quad \text{Eq(III.25)}$$

Le premier terme de la partie droite de la relation (II-20) peut être défini comme tension de référence (V_{fref}) ce qui nous donne l'expression suivant :

$$V_{fref} = V_s + L_f \frac{d}{dt} I_{ref} \quad \text{Eq(III.26)}$$

L'écart entre V_{fref} et V_f produit alors l'erreur sur le courant selon la relation (II-21) la tension de référence est composée de deux termes à des fréquences différentes le premier représente la tension du réseau V_s directement mesurable et le second est égal au 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 , figure III.8 [06].

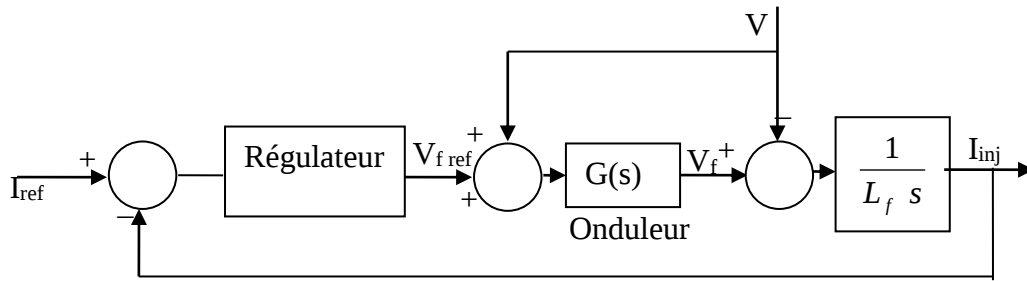


Figure III.8 -Schéma de la régulation des courants du filtre actif parallèle.

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

$$\begin{cases} G(s) = k \frac{1}{1 + \tau s} \\ k = \frac{V_{dc}}{2V_p} \end{cases} \quad \text{Eq(III.24)}$$

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.

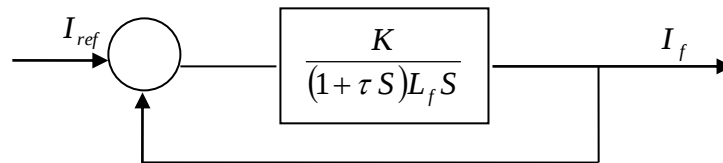


Figure III.9 -Schéma simplifié de la régulation des courant par MLI.

5- Conclusion :

Les méthodes d'identification qui étaient évoquées dans ce chapitre sont les méthodes les plus connues, robustes et relativement facile à implanter. mais il y a des différences entre eux .

Dans ce contexte, les simulations sur le logiciel MATLAB vont être faites au chapitre qui suit.

CHAPITRE IV

Simulation du Filtre Actif Parallèle

1- Introduction :

Dans les deux chapitres précédents, la modélisation des éléments du réseau électrique perturbé ainsi que ceux du filtre actif parallèle ont été bien détaillé. Cette modélisation avait comme objectif, comprendre le mode de fonctionnement de ce type de réseau et de son filtrage, et par la suite être capable de faire des simulations sur Simulink. Simulink est un outil puissant de MatLab permettant de modéliser, simuler et analyser les systèmes électriques réels.

Dans ce chapitre on étudie le schéma de l'association filtre actif-réseau-charge polluante, qui seront implanté sur Simulink. Différentes simulations basées sur la commande MLI à échantillonnage naturel et sur la commande par hystérésis seront présentées. Différents types de charges vont être examinés. Ainsi les résultats des simulations seront discutés.

2- Description globale 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 la figure IV.1. Ils simulent également la commande du filtre actif selon les deux principes, MLI et hystérésis.

Le schéma bloc de simulation du système étudié est présenté par la figure IV.1.

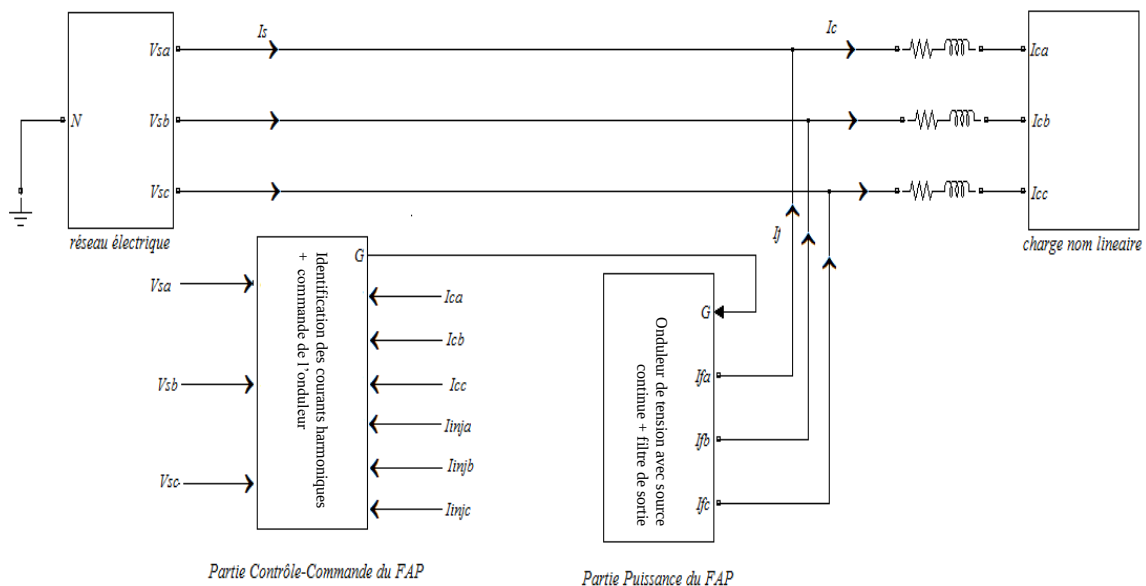


Figure IV.1 -Schéma synoptique de l'association filtre actif-réseau-charge polluante.

Ce schéma bloc se compose des éléments suivants :

- D'un réseau électrique triphasé représenté par les grandeurs e_s , R_s , L_s (Voir la figure IV. 2),
- D'un pont redresseur à diodes (pont triphasé) alimentant une charge (R_d , L_d ou R_d, C_d) pour la représentation d'une charge non linéaire qui génère des courants harmoniques, (voir la figure IV.3),
- D'un transformateur de réglage (R_c , L_c) connecté à l'entrée de la charge non linéaire, (voir la figure IV.3),
- D'un bloc d'identification des courants harmoniques (la puissance instantanée), (voir la figure III.3),
- D'un filtre actif parallèle, lequel est composé d'un onduleur de tension de trois bras à interrupteurs réversibles en courant et bi-commandés (IGBT/Diode), d'une source de tension continue V_{dc} et d'un filtre de sortie représenté par (R_f , L_f), (voir la figure IV.4),
- D'une commande de l'onduleur de tension avec hystérésis ou MLI (voir la figure IV.5 et IV.6).

Les schémas de simulations sont représentés dans les figures suivantes :

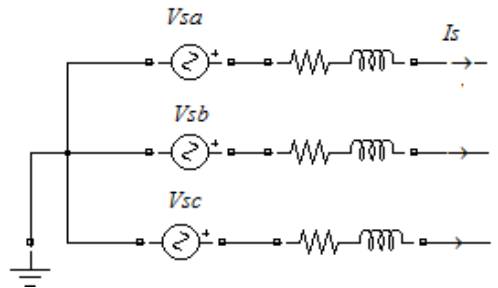


Figure IV.2 -Schéma bloc de réseau électrique triphasé.

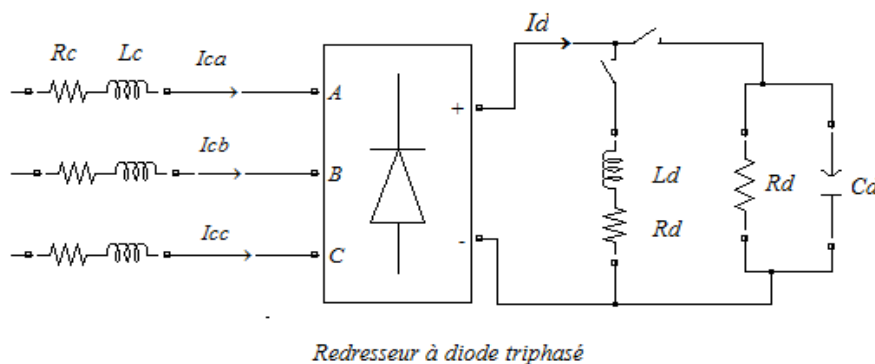


Figure IV.3 -Schéma bloc de redresseur triphasé.

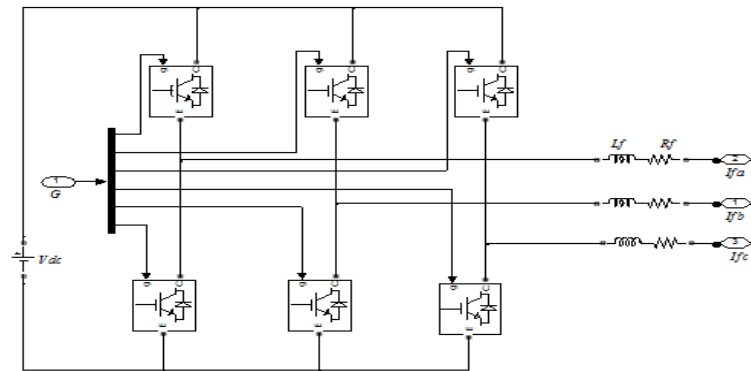


Figure IV.4 -Schéma bloc de l'onduleur de tension à deux niveaux.

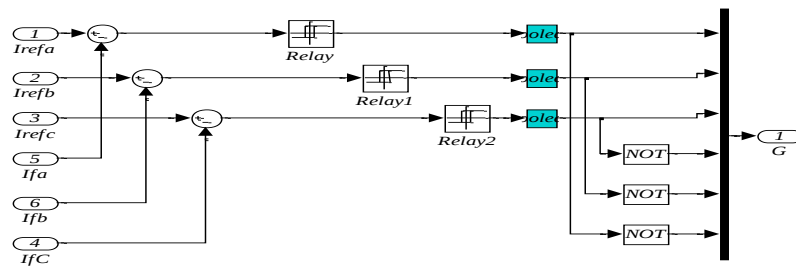


Figure IV.5 -Schéma bloc de la commande Hystérésis.

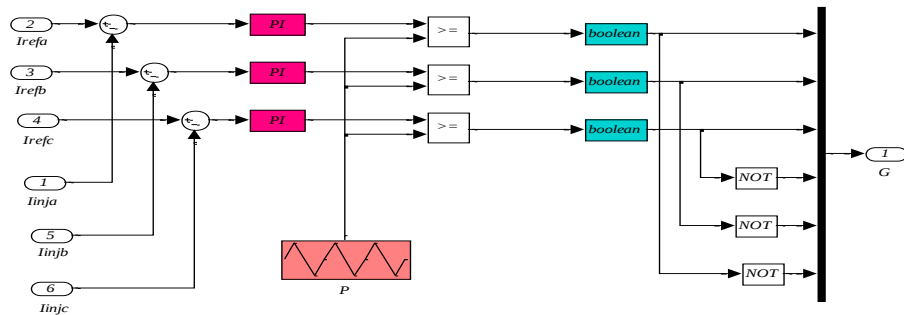


Figure IV.6 -Schéma bloc de la commande MLI.

3- Résultats des simulations :

3.1- Commande par Hystérésis :

3.1.1- Charge RL :

Les figures ci-dessous montrent les résultats obtenus avec la commande Hystérésis dans le cas où le pont à diodes alimente une charge de type RL. Le courant de la charge I_c (phase une) est déformé ; il est plein d'harmoniques. Le courant I_f est le courant injecté par le filtre (toujours pour la phase une). Le courant de la source I_s est

filtré, il est devenu presque sinusoïdale après le filtrage. Le THD avant filtrage est de 24.25 %, par contre après filtrage il devient 2.57 %.

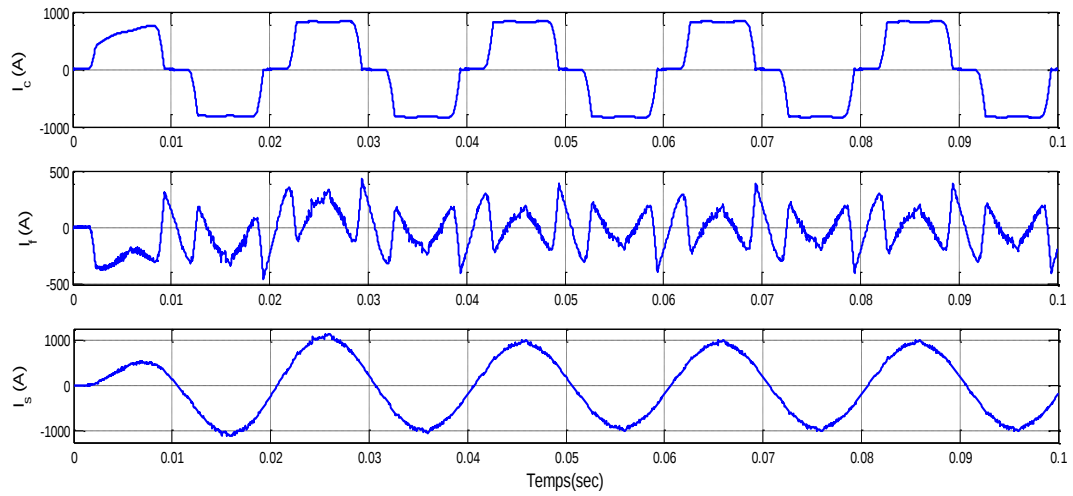


Figure IV.7 - I_c : Courant de charge, I_f : Courant de filtre actif, I_s : Courant de source.

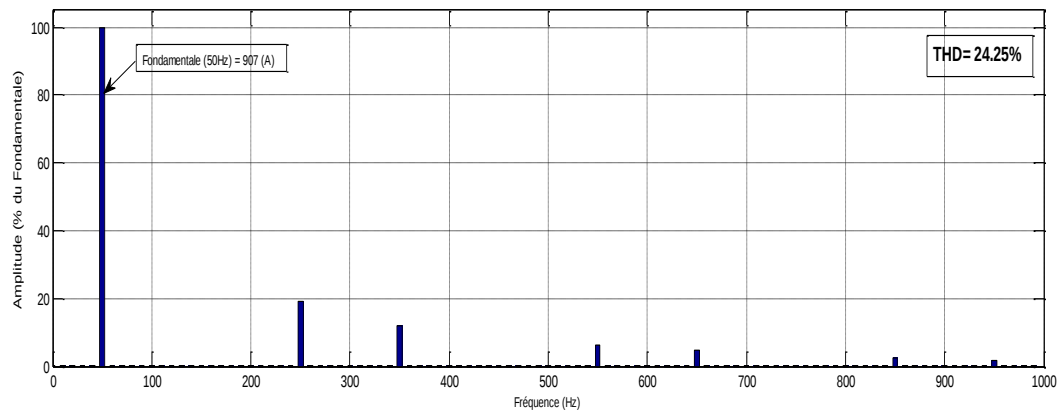


Figure IV.8 -Spectre du courant de la source avant filtre.

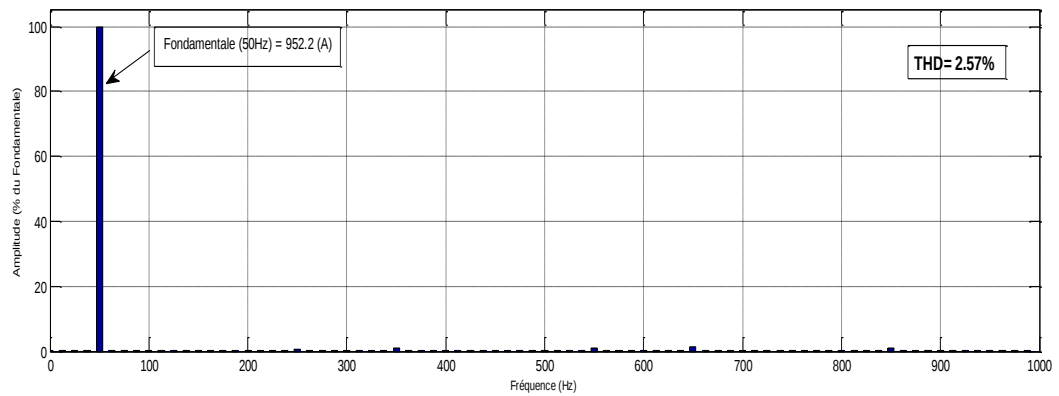


Figure IV.9 -Spectre du courant de la source après filtre.

3.1.2- Charge RC :

Les figures ci-dessous montrent les résultats obtenus avec la commande hystérésis dans le cas où le pont à diodes alimente une charge de type RC. Le courant de la charge I_c (phase une) est déformé ; il est plein d'harmoniques. Le courant I_f est le courant injecté par le filtre (toujours pour la phase une). Le courant de la source I_s est filtré, il est devenu presque sinusoïdale après le filtrage. Le THD avant filtrage est de 58.37 %, par contre après filtrage il devient 3.07 %.

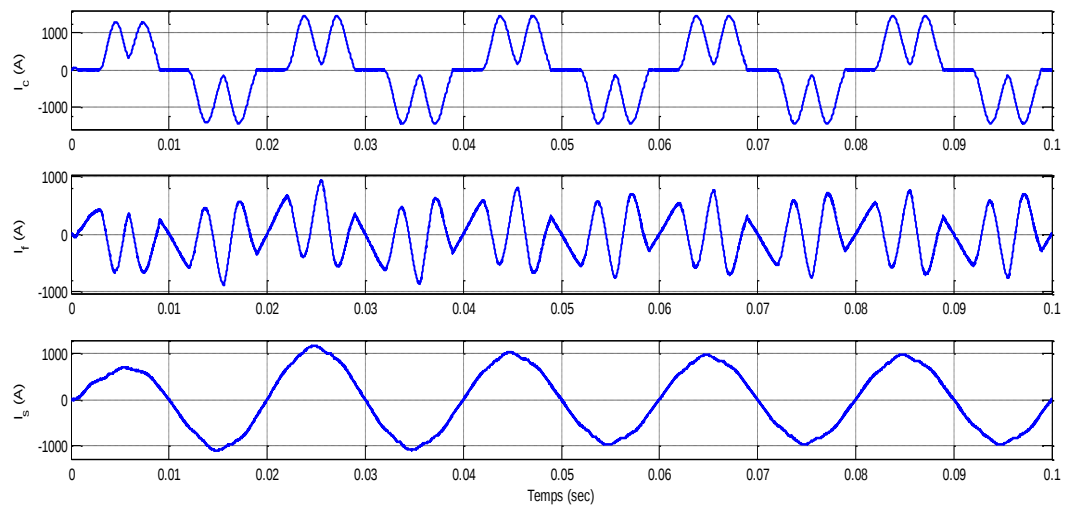


Figure IV.10 - I_c : Courant de charge, I_f : Courant de filtre actif, I_s : Courant de source.

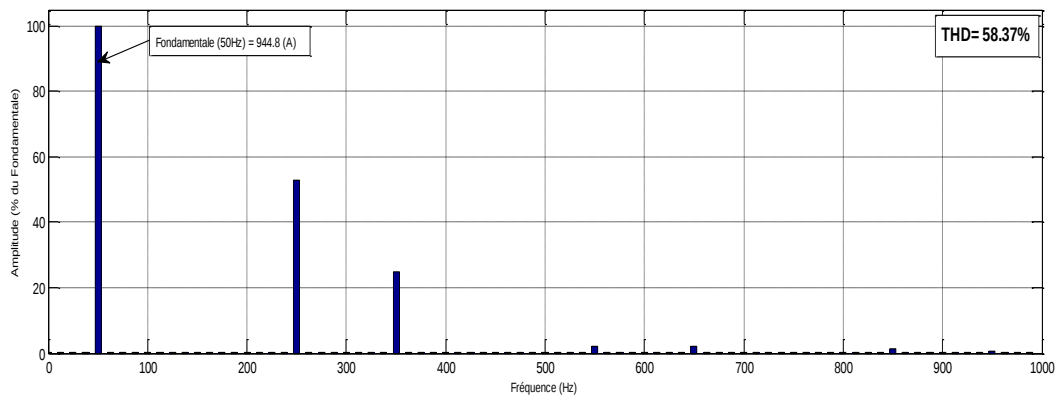


Figure IV.11 -Spectre du courant de la source avant filtre.

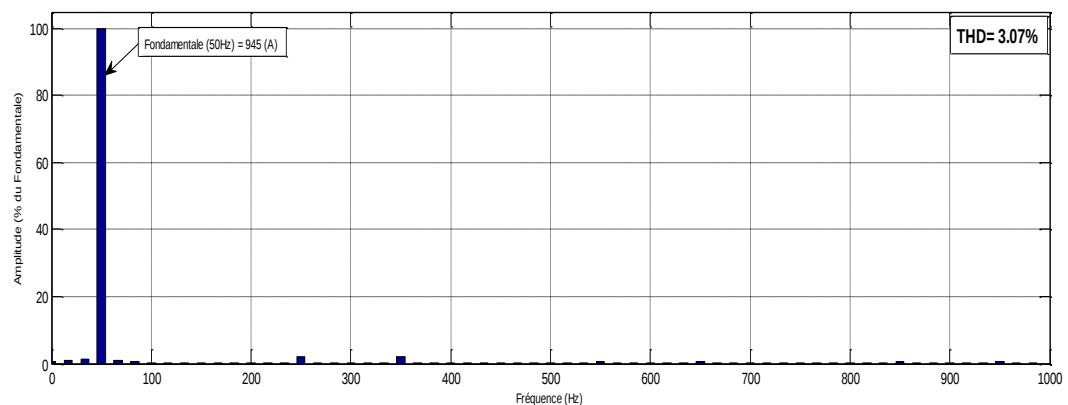


Figure IV.12 -Spectre du courant de la source après filtre.

3.1.3- Changement de la charge (RL1 => RL2) :

Pour cette simulation on prend comme charge RL1 entre 0s et 0.1s, à partir de 0.1s on prend une nouvelle charge RL2, ce qui permet de visualiser l'effet du changement de la charge sur les performances du F.A.P.

La figure IV.13 présente l'analyse temporelle pour la phase 1 du courant de la charge (I_c), des courants identifié (I_{ref}) et injecté (I_{inj}) superposés, du courant du réseau après filtrage (I_s).

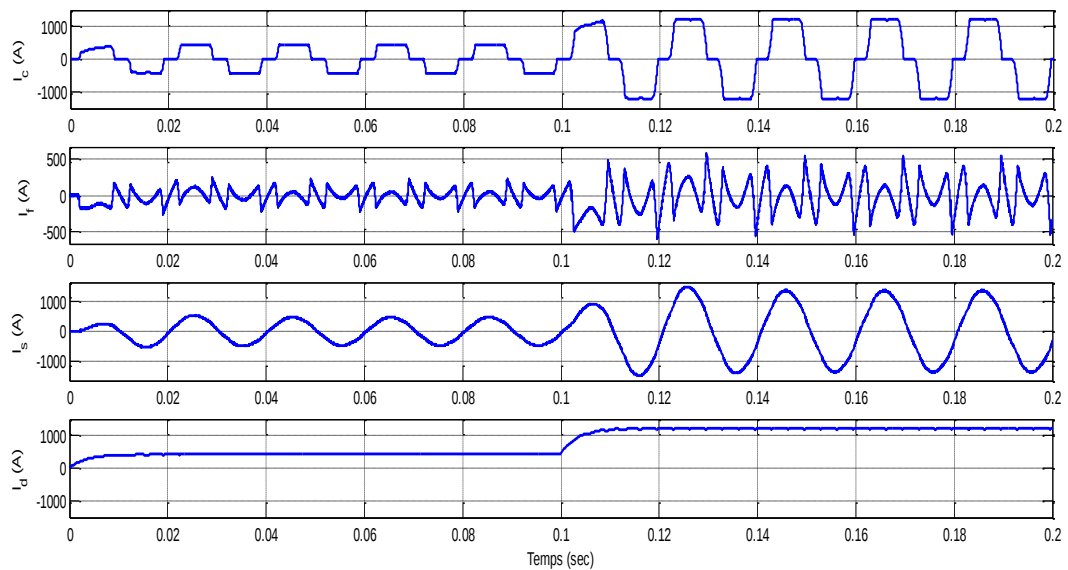


Figure IV.13 - I_c : Courant de charge, I_f : Courant de filtre actif, I_s : Courant de source, I_d : Courant redressé.

3.1.4- Changement de la charge (RC1 => RC2) :

La figure IV.14 présente l'analyse temporelle pour la phase 1 du courant de la charge (I_c), des courants identifié (I_{ref}) et injecté (I_{inj}) superposés, du courant du réseau après filtrage (I_s).

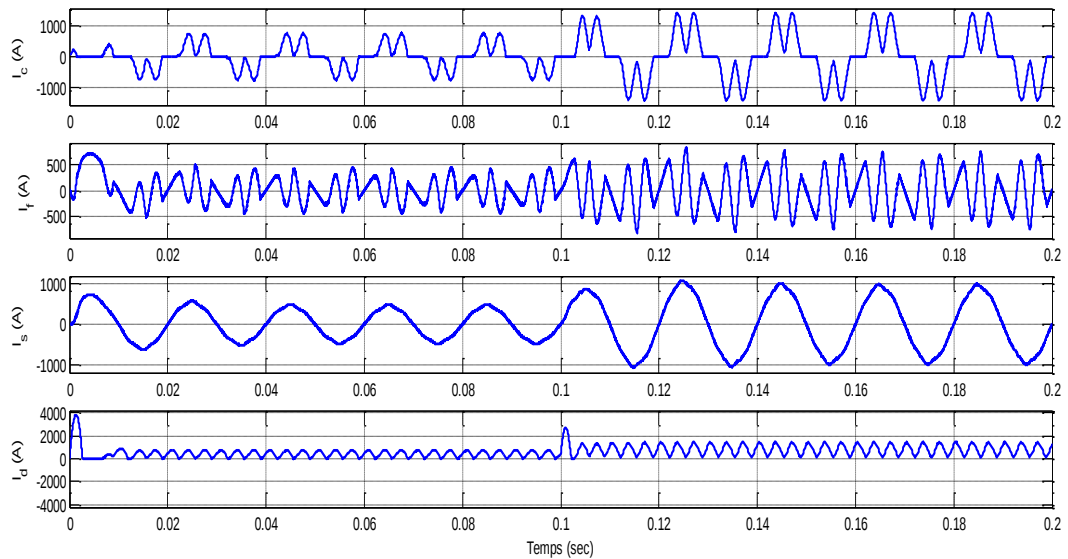


Figure IV.14 - I_c : Courant de charge, I_f : Courant de filtre actif, I_s : Courant de source, I_d : Courant redressé.

3.1.5- Changement de la charge (RL1 => RC2) :

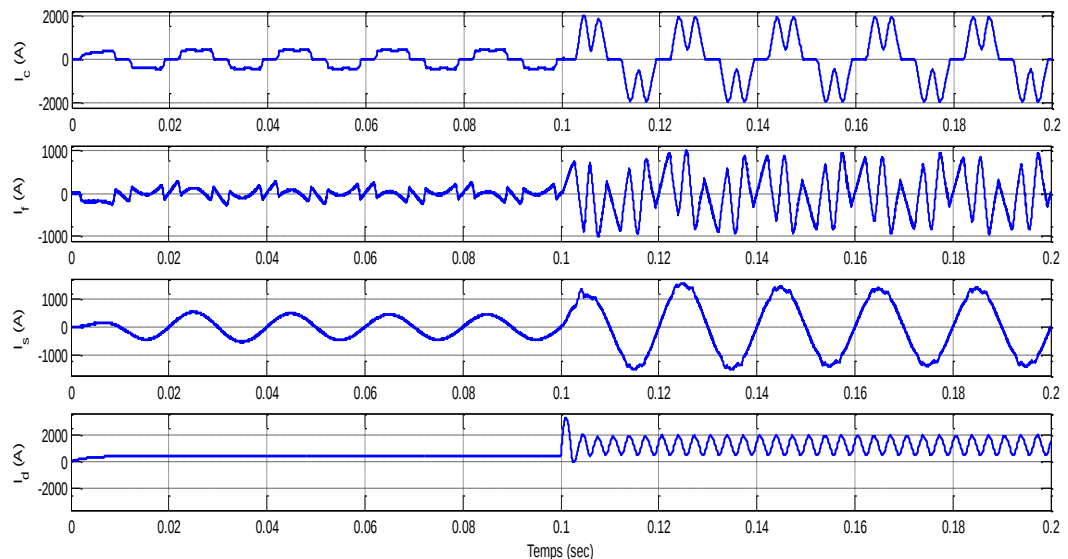


Figure IV.15 - I_c : Courant de charge, I_f : Courant de filtre actif, I_s : Courant de source, I_d : Courant redressé.

3.2- Commande MLI :

3.2.1- Charge RL :

Les figures ci-dessous montrent les résultats obtenus avec la commande MLI dans le cas où le pont à diodes alimente une charge de type RL. Le courant de la charge I_c (phase une) est déformé ; il est plein d'harmoniques. Le courant I_f est le courant injecté par le filtre (toujours pour la phase une). Le courant de la source I_s est filtré, il

est devenu presque sinusoïdale après le filtrage. Le THD avant filtrage est de 24.25 %, par contre après filtrage il devient 2.66 %.

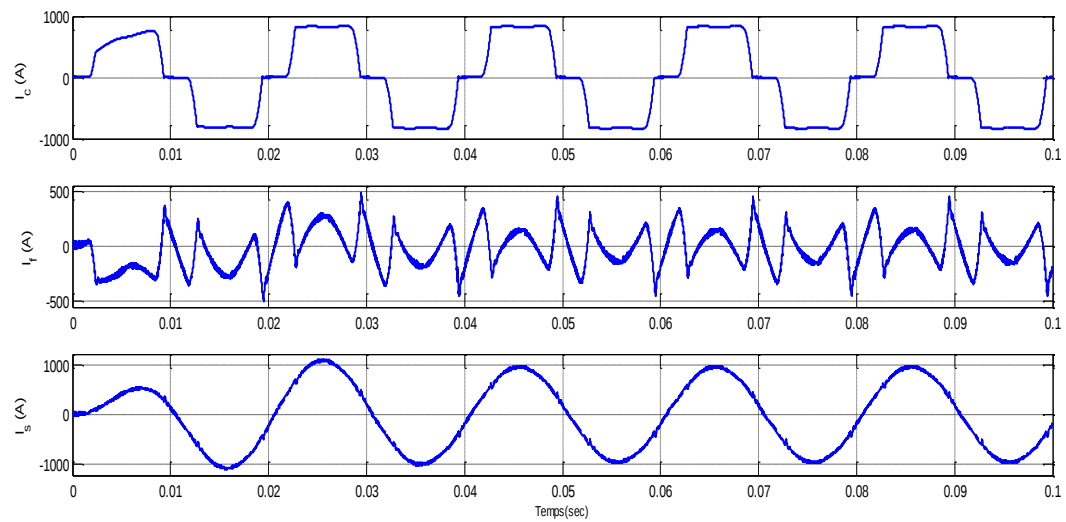


Figure IV.16 - I_c : Courant de charge, I_f : Courant de filtre actif, I_s : Courant de source.

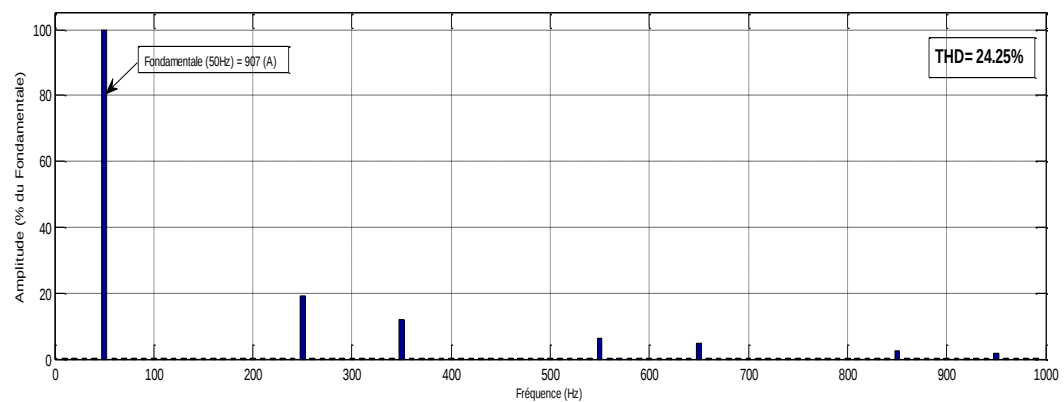


Figure IV.17 -Spectre du courant de la source avant filtre.

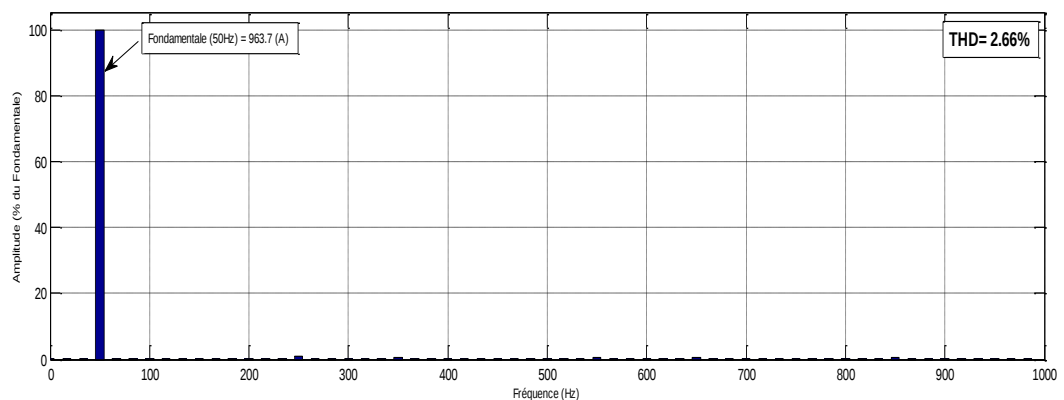


Figure IV.18 -Spectre du courant de la source après filtre.

3.2.2- Charge RC :

Les figures ci-dessous montrent les résultats obtenus avec la commande MLI dans le cas où le pont à diodes alimente une charge de type RC. Le courant de la charge I_c (phase une) est déformé ; il est plein d'harmoniques. Le courant I_f est le courant injecté par le filtre (toujours pour la phase une). Le courant de la source I_s est filtré, il est devenu presque sinusoïdale après le filtrage. Le THD avant filtrage est de 58.37 %, par contre après filtrage il devient 3.45 %.

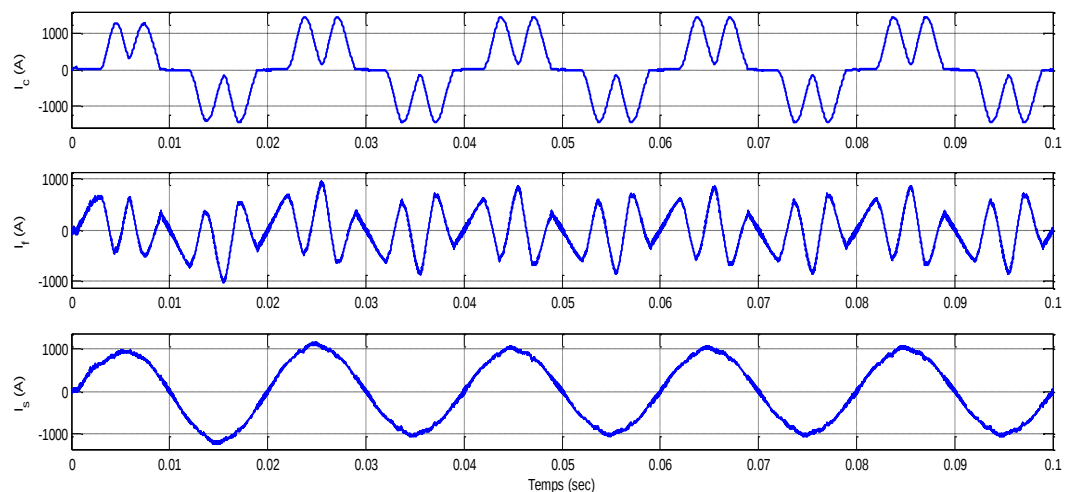


Figure IV.19 - I_c : Courant de charge, I_f : Courant de filtre actif, I_s : Courant de source.

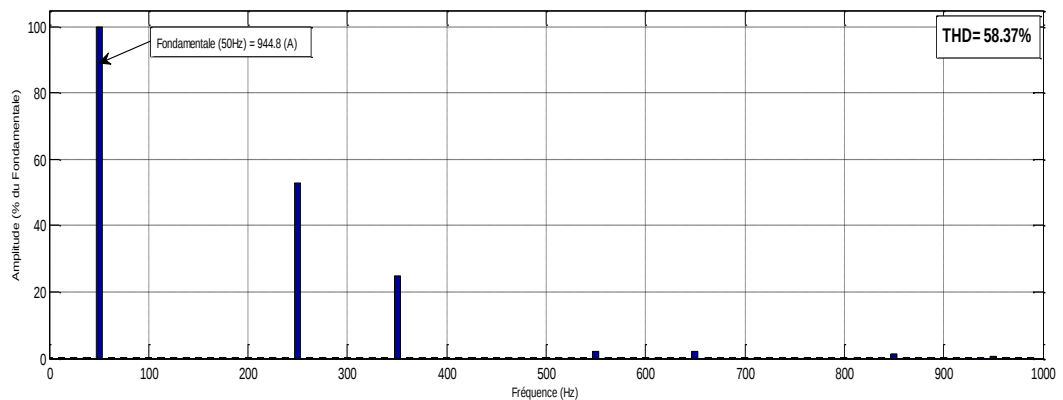


Figure IV.20 -Spectre du courant de la source avant filtre.

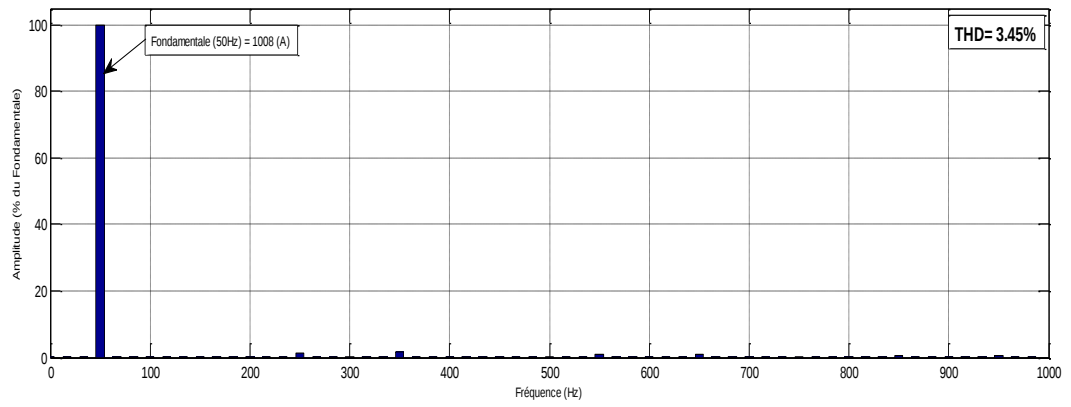


Figure IV.21 -Spectre du courant de la source après filtre.

3.2.3- Changement de la charge ($RL1 \Rightarrow RL2$) :

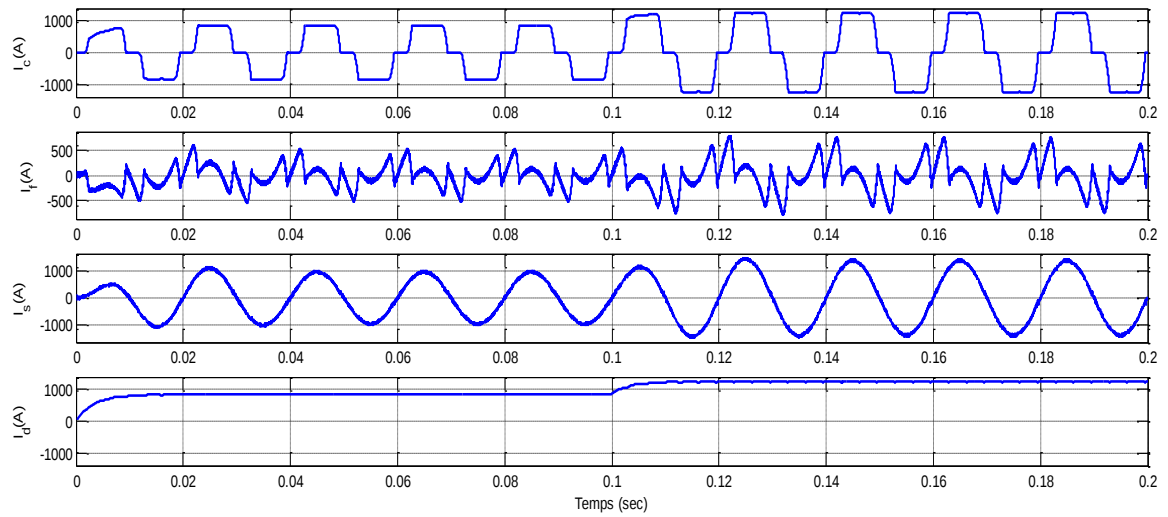


Figure IV.22 - I_c : Courant de charge, I_f : Courant de filtre actif, I_s : Courant de source, I_d : Courant redressé.

3.2.4- Changement de la charge (RC1 => RC2) :

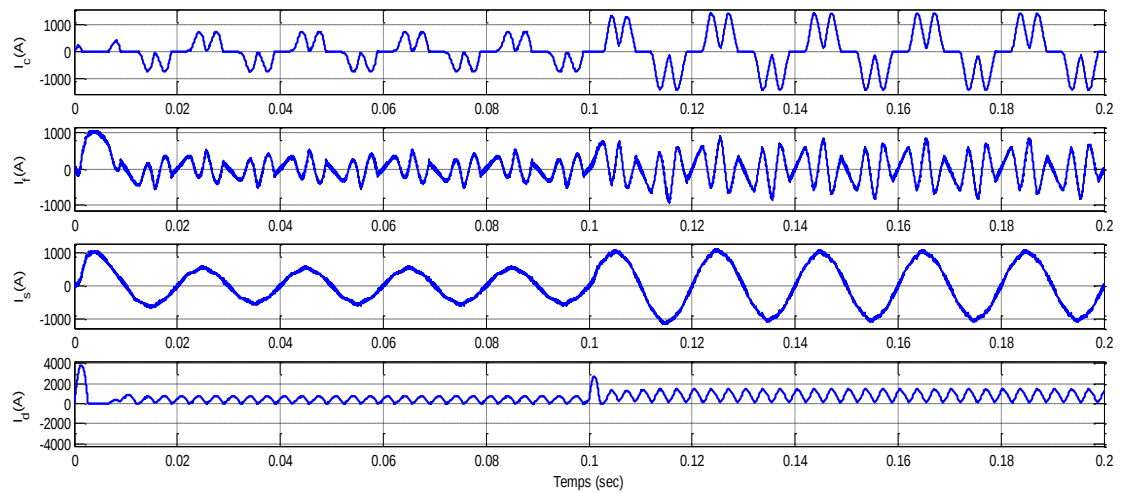


Figure IV.23 - I_c : Courant de charge, I_f : Courant de filtre actif, I_s : Courant de source, I_d : Courant redressé.

3.2.5- Changement de la charge (RL1 => RC2) :

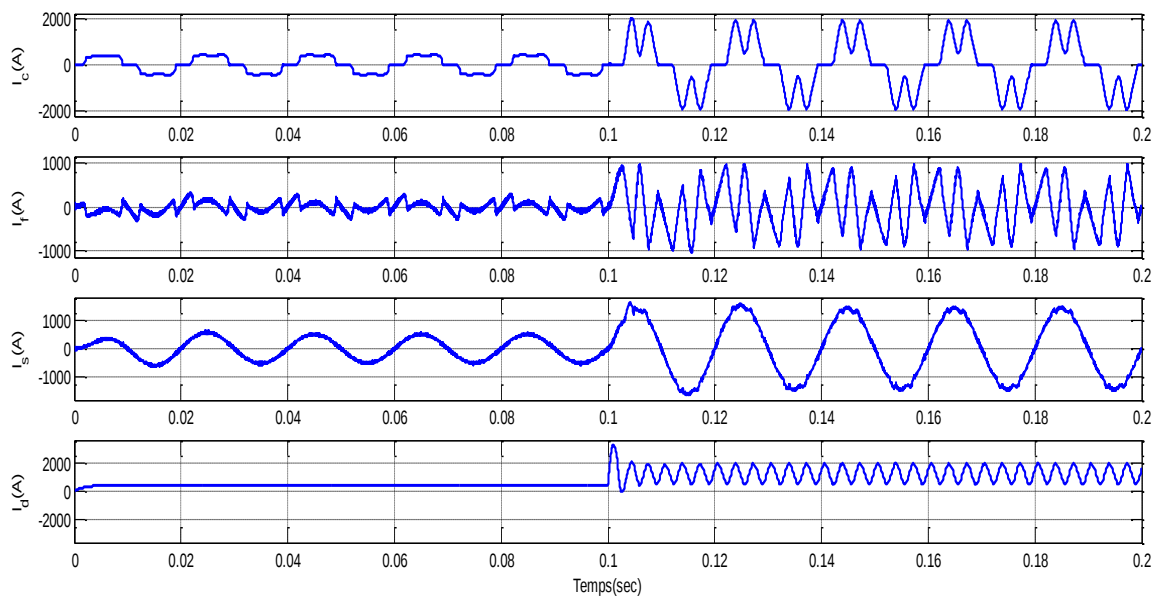


Figure IV.24 - I_c : Courant de charge, I_f : Courant de filtre actif, I_s : Courant de source, I_d : Courant redressé.

4- Conclusion :

Les résultats obtenus montrent l'efficacité et les bonnes performances du filtre actif parallèle traité dans ce travail. Il a réduit le THD à une valeur inférieure à 5 % correspondant aux recommandations et normes internationales. Le courant I_s est quasi sinusoïdal dans tous les cas des simulations.

Sur le tableau IV.1 sont comparés les THDs du courant de la source avant et après l'installation du filtre actif. Avec l'une ou l'autre commande, le filtre actif permet une réduction importante des harmoniques du courant. Toutefois, l'efficacité du filtre actif est meilleure avec la commande hystérésis.

Commande	Charge	THD [%] avant filtrage	THD [%] après filtrage
Commande hystérésis	RL	24.25	2.57
Commande MLI	RL	24.25	2.66
Commande hystérésis	RC	58.37	3.07
Commande MLI	RC	58.37	3.45

Tableau IV.1 -Les résultats des simulations.

Conclusion générale

Dans ce travail, le filtre actif parallèle a été étudié. Différentes possibilités de filtrage actif des harmoniques des réseaux électriques ont été discutées.

Le premier chapitre de ce travail est très important pour comprendre la problématique des perturbations ou distorsions harmoniques générées par les charges non linéaires connectées aux réseaux électriques. L'augmentation régulière du nombre de dispositifs d'électronique de puissance utilisés dans les systèmes électriques ne fait qu'accentuer ces perturbations. En outre, les origines et les effets néfastes de ces perturbations ont été abordés. En suite, l'étude et le développement de méthodes efficaces pour dépolluer les réseaux électriques, comme par exemple les dispositifs de filtrage actif, objets de ce manuscrit. Les solutions traditionnelles et modernes utilisées en filtrage sont alors présentées d'une manière générale (filtres passifs, filtres actifs ou bien encore la combinaison de ces deux solutions).

Dans le deuxième chapitre, nous avons modélisé les éléments du réseau électrique alimentant une charge non-linéaire, ainsi que les éléments constituant la partie puissance du FAP.

Dans le troisième chapitre, nous avons étudié la partie commande contrôle du FAP; plusieurs méthodes d'identification ont été évoquées, les techniques de commande, MLI et hystérésis ont été expliquées, et le principe de régulation du courant dans le cas de la commande par MLI est présenté.

Le quatrième chapitre a été consacré aux résultats des simulations du FAP avec la méthode des puissances instantanées pour l'identification, et la MLI et l'hystérésis pour la commande, nous avons examiné différents types de charge (inductive ou capacitive), et nous avons aussi examiné les performances du FAP lors de la variation de la charge (différents cas de variation de la charge).

La stratégie de commande basée sur la théorie du calcul des puissances instantanées réelle et imaginaire a été adoptée. Cette stratégie est largement utilisée; car elle offre l'avantage de choisir la perturbation à compenser avec précision, rapidité et facilité.

d'implantation. Nous avons constaté qu'elle donne de bonnes performances. Pour la commande, nous avons utilisé les techniques MLI et hystérésis. La fréquence de commutation des interrupteurs est constante lors de l'utilisation de la MLI. En pratique le choix de la fréquence de la porteuse est important pour la détermination des performances du FAP, cette fréquence ne doit pas dépasser la fréquence max des interrupteurs, pour ne pas les dégrader, mais aussi, elle doit être suffisamment élevée de telle manière à donner un bon THD. Dans le cas de la commande par hystérésis, la fréquence de commutation est variable; ce qui risque, en régime transitoire de la charge, de dépasser la fréquence max des interrupteurs.

Nous pouvons conclure de ce travail qu'avec l'une ou l'autre de ces deux commandes, le filtre actif permet une réduction importante des harmoniques du courant. Le courant fourni par la source après filtrage est toujours sinusoïdale presque dépourvue des harmoniques dans tous les cas des simulations, avec un THD max qui ne dépasse pas 5% (Valeur maximale limite ordonnée par la Commission Electrotechnique Internationale). Toutefois, l'efficacité du filtre actif est meilleure avec la commande hystérésis.

Enfin et pour continuer ce travail, nous proposons de faire les simulations avec d'autres méthodes d'identification (exemple voir chapitre trois) et d'examiner les autres techniques de commande par MLI, ou bien, de faire le filtrage hybride.

Annexe

Paramètres de simulation[26]

1- Paramètres du réseau :

Le réseau est un système de tension triphasé parfaitement sinusoïdal, tel que: la tension simple : $V_m = 220 \cdot \sqrt{2} \text{ V}$ et la fréquence : $f_r = 50 \text{ Hz}$ donc :

$$V_{sa} = V_m \sin(\omega t)$$

$$V_{sb} = V_m \sin(\omega t - 120)$$

$$V_{sc} = V_m \sin(\omega t - 240)$$

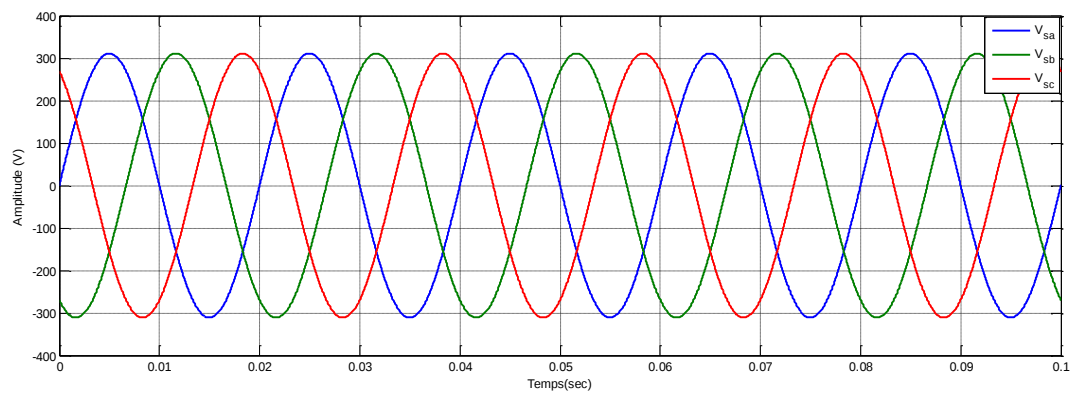


Figure AN.1 -Tension d'alimentation.

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

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

2- Paramètres de la charge polluante :

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

$(R_d, L_d) = (R_{d1}, L_{d1}) = 0.6 \Omega, 2 \text{ mH}$ et $(R_{d2}, L_{d2}) = 2 \cdot (R_{d1}, L_{d1})$

$(R_d, C_d) = (R_{d1}, C_{d1}) = 0.6 \Omega, 3.3 \text{ mF}$ et $(R_{d2}, C_{d2}) = 2 \cdot (R_{d1}, C_{d1})$

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

3- Paramètres du filtre actif :

Le filtre actif est l'ensemble, onduleur de tension à deux niveaux avec source continue (V_{dc}), filtre de sortie (L_f, R_f), avec:

$$V_{dc} = 740 \text{ V}$$

$$(L_f, R_f) = (150 \mu\text{H}, 5 \text{ m}\Omega)$$

4- Paramètres de la commande du filtre actif :

4.1 Commande Hystérésis :

Cette commande est caractérisée par la bande d'hystérésis (h), elle est choisie de façon à ne pas dépasser la fréquence de commutation admissible des semi-conducteurs contrôlés et à minimiser suffisamment les harmoniques de courant.

$$h = \pm 5 \text{ A}$$

4.2- Commande MLI :

La technique MLI est basée sur la variation soit de l'indice de modulation « m », soit du coefficient de réglage de tension « r ».

On prend :

$$m = 200 \quad \text{et} \quad f_p = 10\text{KHZ},$$

$$r = 0.8 \quad \text{et} \quad V_{pmax} = 420 \text{ V}.$$

BIBLIOGRAPHIE

- [1] **S. BOUGUERRA , I. BOURENNANE,**
« Filtrage actif parallèle des réseaux électriques avec compensation de l'énergie réactive »
Mémoire d'ingéniorat, université de M'sila, 2007.
- [2] **A.E. ZERGUIN, K. BATECH,**
« Conception d'un système de commande pour la compensation automatique des harmoniques : Application aux moteurs asynchrones ».
Mémoire d'ingéniorat, université Farhet Abbas de Sétif, juin 2004.
- [3] **D. OULD ABDESLAM,**
«Techniques neuromimétiques pour la commande dans les systèmes électriques : application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basse tension ».
Thèse de Doctorat de l'Université de Haute-Alsace , 08 décembre 2005.
- [4] **J.L. JAVERZAC , R. OTT,**
«La normalisation de l'électricité. Revue Générale d'Électricité».
Avril 1995, pp. 16–21.
- [5] **C. COLLOMBET, J. LUPIN et J. SCHONEK,**
«Perturbations harmoniques dans les réseaux pollués, et leur traitement».
Cahier Technique Schneider Electric n° 152, septembre 1999.
- [6] **M.A.E. ALALI,**
« Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension ».
Thèse de doctorat de l'université de Louis Pasteur ,Strasbourg I- France,12 Septembre 2002.
- [7] **M.C. BENHABIB,**
«Contribution à l'étude des différentes topologies et commandes des filtres actifs parallèles à structure tension : modélisation, simulation et validation expérimentale de la commande ».
Thèse de doctorat, Université Nancy-I, 2004.
- [8] **H. DJEGHLOUD,**
«Filtrage actif de puissance ».
Thèse de doctorat, Université Constantine, 2007.
- [9] **T. GHENNAM,**
«Etude et Réalisation d'un Compensateur Actif de Puissance Commandé par DSP».
Thèse de Magister, Ecole Militaire Polytechnique, Algérie, 05 Janvier 2005.

- [10] **F. LABRIQUE , H. BUYSE , G. SEGUIER , R. BAUSIERE,**
«Commande et comportement dynamique».
Londers new york. paris 1998
- [11] **E. BETTEGA , J. N. FIORINA,**
« Harmoniques : convertisseurs propres et compensateurs actifs».
Cahier Technique Schneider Electric n° 183, janvier2000.
- [12] **P. LADOUX, G. OLLE,**
« Compensateur d’harmoniques et de puissance réactive ».
Publication RESELEC 200.
- [13] **N. BRUYANT,**
«Etude et commande généralisées de filtres actifs parallèles, compensation global ou sélective des harmoniques, régime équilibré ou déséquilibré ».
Thèse de doctorat, l'université de Nantes, 1999.
- [14] **F. MEKRI ,**
«Commande robuste des conditionneurs Actifs de puissances».
Thèse de doctorat de l’Université des sciences et de la technologie d' ORAN,ALGERIE,3 novembre 2007.
- [15] **R. BOUCETTA,**
« Commande par mode de glissement à hystérésis et MLI de la machine asynchrone à cage ».
Mémoire d’ingénieur, BISKRA 2004-2005.
- [16] **K. ALIOUANE,**
«Contribution à l’Etude du Filtrage d’Harmoniques des Réseaux de Distribution à l’Aide de l’Association de Filtres Actif et Passif Parallèle».
Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, Algérie, 31Janvier 1995.
- [17] **S. ZELACI,**
«Filtrage actif de courant d’un réseau électrique basse tension».
Thèse de Master, Centre Universitaire d’El-Oued, Juin 2011.
- [18] **B. STEEVE ,**
«Étude et mise au point d'un filtre actif d'harmoniques en vue d'améliorer la qualité de l'alimentation électrique ».
Mémoire de la Maitrise en ingénierie,Université de Québec a Chicoutimi ,Mai 2007.
- [19] **G. MERLIN,**
«Harmoniques et transformateurs».
Institut Schneider Formation, 20 Février 2004.

- [20] **S. BEN DAIKHA , A. DJERMANE,**
« Etude sur la commande des onduleurs en pont triphasés ».
Mémoire d'ingénieur, OUM ELBOUAGHI 2005.Electrique (RS-RIGE), vol. 9,
no. 1, pp 35-64, 2006.
- [21] **A. Ch. RUFER,**
« Performances et Perspectives des Composants de l'Electronique de Puissance».
Développement, Laboratoire d'électronique industrielle LEI EPFL CH 1015,
Lausanne.
- [22] **S. GABOUSSA,**
«Etude et Commande d'un Filtre Actif d'Harmonique En Vue d'Amélioration de
la Qualité de l'Alimentation d'Energie ».
Thèse de Magister, Université Mohammed Kheider, Biskra, Algérie, 2010.
- [23] **A. BOUKADUM, T. BAHI, S. OUDINA,**
«Compensation Harmoniques à Base d'une Régulation Adaptative d'un Filtre
Actif Parallèle».
Tiaret, Novembre 2009.
- [24] **A. ABOUBOU, S.E. ZOZOU,**
«Contribution à la Compensation de la Pollution Harmonique en Utilisant un
Filtre Actif Parallèle Commandé Par Logique Floue».
Courrier du Savoir – N°03, Université Mohammed Kheider, Biskra, Algérie,
Janvier 2003.
- [25] **A. BOUDACHE , F. GALOUL,**
« étude par simulation d'un filtre actif parallèle ».
Mémoire d'ingénieur, université de M'sila, 2006
- [26] **L. ZELLOUMA,**
« Filtrage actif parallèle des harmoniques du courant générés par un pont
redresseur triphasé non commandé ».
Thèse de Magister de l'Université Badji Mokhtar Annaba 2006 .
- [27] **L. BOUTRAA,**
« Filtrage actif des harmoniques des réseau électriques » .
Thèse de Magister de l'Université de Batna, 2005.
- [28] **B. NOURDINE,**
« IdentificatLion d'un courant harmonique généré par une charge non linéaire ».
Mémoire d'ingénieur, université de M'sila 2005.
- [29] **S.A. TADJER,**
«Etude d'un système de compensation d' harmonique en utilisant un
générateur photovoltaïque "GPV"».

- Thèse de Magister de l'Université M'hamed Bougara, Boumerdes, 2008
- [30] **M. A SEGHIRI , M. GUEMRA,**
«Etude comparative de la compensation des harmoniques par des filtres actifs et passifs».
Mémoire d'ingéniorat, université de M'sila, 2007.
- [31] **Z. AMEUR , Z. NOURDINE,**
« Etude par simulation d'un moteur asynchrone alimenté par un onduleur de tension (Multi niveaux)».
Mémoire d'ingéniorat, université de M'sila, 2004
- [32] **M.M. ABDUSALAM,**
«Structures et Stratégies de Commande des Filtres Actifs Parallèle et Hybride avec Validations Expérimentales».
Thèse de doctorat de l'université d'Henri Poincaré, Nancy-France, 29 Mai 2008.