

Année : 2019

Faculté: Sciences de l'ingénierat
Département: Electronique

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de : MASTER

Intitulé

**Filtrage Actif des harmoniques dans un
réseau de transport de l'énergie électrique**

Domaine : Sciences et Technologie
Filière : Electronique
Spécialité: Instrumentation

Par :Frickh Abdelaziz

DEVANT Le JURY

PRESIDENT	M.BEKAIK	Docteur	BADJI MOKHTAR -ANNABA-
EXAMINATEURS	F.Arbaoui	MCA	BADJI MOKHTAR -ANNABA-
EXAMINATEURS	N.Guersi	MCA	BADJI MOKHTAR -ANNABA-
DIRECTEUR DE ME- MOIRE	H.KHERFANE	MCA	BADJI MOKHTAR --ANNABA-

REMERCIEMENTS

*On remercie **dieu** le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.*

*Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu voir le jour sans l'aide et l'encadrement de **MS KHERFANE**, on le remercie pour la qualité de son encadrement.*

*Nos profonds remerciement vont également à toutes les personnes qui nous ont aidé et soutenu de près ou de loin principalement a à tous l'effectif de l'Université **BADJI Mokhtar***

Annaba

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

*Mes très cher parents, ma mère qui m'a encouragé
et priée durant tout Sa vie pour que je puisse réussir,
et à mon père qui est toujours prêt à tout donner
afin de me voir devenir ce que je suis, merci mes
parents.*

A mes soeurs

*A Tous mes ami(e)s et toute la promotion 2018/2019
Électronique.*

FRIEKH ABDELAZIZ

Résumé:

La qualité des réseaux électriques est fortement tributaire des techniques de compensation au niveau des différentes charges non linéaires présentes dans le réseau. C'est ce qui explique que la qualité de l'onde électrique est loin d'être parfaite, à cause de l'utilisation des charges non linéaires qui génèrent des harmoniques de courant et consomment de la puissance réactive.

A cet effet, notre mémoire traite de l'étude théorique avec une simulation numérique du fonctionnement d'un filtre actif parallèle à quatre bras que ce soit en mode équilibré ou déséquilibré permettant de compenser les harmoniques, les puissances réactives.

On a proposé quatre méthodes d'extraction des courants de référence à savoir: la méthode des puissances instantanées modifiée p-q-o, cross vector, p-q-r, d-q (SFR). Par l'intermédiaire de simulations sous environnement PSIM une série de simulation ont été présentés pour mesurer les performances des quatre techniques suivie d'une étude comparative.

Abstract

The quality of electrical networks and heavily dependent on compensation techniques in the various non-linear loads present in the network. This is why the quality of the electric wave is far from perfect, because of the use of non-linear loads that generate current harmonics and consume reactive power.

To this end, our brief deals with the theoretical study with a numerical simulation of the operation of a crossover parallel four-link either in balanced or unbalanced fashion to compensate harmonics, reactive power.

We proposed four methods of extracting reference currents namely: modified method of instantaneous power pqo, cross vector, pqr, dq (LICO). Through simulations in PSIM a series of simulations were presented for measuring the performance of four techniques followed by a comparative study.

ملخص

جودة شبكات الكهرباء وتعتمد بشكل كبير على التقنيات التعويض في مختلف الأحمال غير الخطية الموجودة في الشبكة. هذا هو السبب في أن نوعية الموجة الكهربائية بعيدة عن الكمال، وذلك بسبب استخدام الأحمال غير الخطية التي تولد التوافقيات الحالية وتستهلك قوة رد الفعل.

تحقيقاً لهذه الغاية، ووصفات قصيرة بيننا وبين الدراسة النظرية والمحاكاة العددية للتشغيل كروس موازية أربعة الارتباط إما بطريقة متوازنة أو غير متوازنة لتعويض التوافقيات، قوة رد الفعل.

اقترحنا أربعة أساليب استخراج التيارات المرجعية وهي: طريقة معدلة من حظية pqo السلطة، ناقلات الصليب،

(PQR، DQ) من خلال المحاكاة في PSIM. تم تقديم سلسلة من

عمليات المحاكاة لقياس أداء أربع تقنيات تليها دراسة مقارنة.

Liste des figures

Figure (1- 1) : Décomposition d'un signal périodique

Figure (1 -2) : filtre passif connecté au réseau

Figure (1-3) :Filtre passif résonant

Figure (1-4) :Filtre passif amorti

Figure (1-5) : filtres actif parallèle FAP

Figure (1-6) : Filtre actif série FAS

Figure (1-7) : Filtre actif combiné parallèle-série (UPQC)

Figure (1-8) : Filtre actif série avec un filtre passif parallèle

Figure (1-9) : filtre actif parallèle et un filtre passif parallèle

Figure (1-10) ; Filtre actif hybride

Figure (2-1): Schéma de principe du filtre actif parallèle.

Figure (2-2): Schéma de principe de l'ensemble réseau électrique, charge polluante et filtre actif et formes d'ondes des courants respectifs.

Figure (2-3) : Structure générale du filtre actif parallèle.

Figure (2-4) : Filtre actif parallèle à structure de tension

Fig (2-5) : Semi –conducteurs servant d'interrupteur au filtre actif en tension

Figure (2-6) : Filtre actif parallèle à structure de courant

Figure (2-7): Semi – conducteurs servant d'interrupteur au filtre actif en courant

Figure (2-8): Structure d'un onduleur de tension triphasé.

Figure (2-9) : Onduleur de tension à trois bras employé comme FAP

Figure (2-10): Schéma de principe de la méthode séparation des puissances

Figure (2-11) : Filtre actif commandé par la méthode des puissances instantanées

Figure (2-12) : Filtre actif commandé par la méthode du référentiel synchrone

Figure (2-13): Principe de la commande des courants par hystérésis.

Figure (2-14) : Principe de la MLI

Figure (3.1) :Structure générale du filtre actif parallèle.

Figure (3.2) :Schéma de simulation du circuit étudié

Figure (3.3) :Forme d'ondes du courant de source

Figure (3.4) : Analyse spectrale du courant avant le filtrage

Figure (3.5) : Allure du courant I_a et la tension V_{sa} de la source

Figure (3.6) : Schéma bloc du filtre actif parallèle commandé par MLI sinus triangulaire

Figure (3.7) :Allure de la tension de référence et de la porteuse. (V_{pet} V_{ref})

Figure (3.8) :Allure du courant I_a de la source

Figure (3.9) :Tension d'entrée du pont convertisseur Van

Figure(3.10) : Allures des courants de la source après compensation.

Figure (3.11) :Allures des courants de la charge.

Figure (3.12) :Allure du courant injecté par le filtre actif

Figure (3.13) :Allures du courant harmonique de référence et le courant injecté par le filtre.

Figure (3.14) :Allures du courant et de la tension de la source.

Figure (3.15) ;Le THD de courant de la source après compensation.

Figure (3.16) : Analyse spectrale du courant après compensation

Liste des tableaux

Tableau (2-1) : Tension générées par l'onduleur à structure de tension

Tableau (2-2) : Courants générés par l'onduleur à structure de courant

Tableau(2-1) : Tensions générées par l'onduleur de tension

Acronymes

THD: Taux de Distorsion Harmonique

n: Rang de l'harmonique

S: la puissance apparente

Q: la puissance réactive

P: la puissance active

D: la puissance déformante

F.P: le facteur de puissance

V_{dc}: tension aux bornes du condensateur de l'onduleur

i_s: courant de la source

FPB: filtre passe bas

FAP: filtre actif parallèle.

FAS: filtre actif série.

MLI: Modulation en largeur d'im-pulsions.

GTO: Lethyristor à extinction par la gâchette, en anglais *Gate Turn-Off Thyristor*.

IGBT: Le transistor bipolaire à grille isolée, en anglais *Insulated Gate Bipolar Transistor*.

v_{s1}, v_{s2}, v_{s3}: Tensions de source

i_{s1}, i_{s2}, i_{s3}: Courants de source

i_{c1}, i_{c2}, i_{c3}: Courants de charge

i_{inj1}, i_{inj2}, i_{inj3}: Courants harmoniques injectés

C_{dc}: Condensateur du bus continu

L: Inductance

C: Capacité

R: Résistance

M: L'indice de modulation

V: l'amplitude de la porteuse

SOMMAIRE

Introduction générale	
Résumé	
Liste des Figure	
Liste des tableau	
Acronyme	

Chapitre 1 : Introduction à la pollution harmonique et les solutions de dépollution

Introduction	01
1. 1. définition sur les harmoniques	02
1.2.effet des harmoniques.....	02
1.2 .1.effet instantanées.....	02
1.2.2.effet à long terme.	02
1.3.décomposition d'un signal périodique	03
1.4. courant harmonique.....	04
1.5.tension harmonique	05
1. 6.caractérisation d'un contenu harmonique pour un signal	04
1.7 expression de la valeur efficace.....	06
1.8 le taux de distorsion harmonique THD.....	06
1.9.le facteur de puissance lié à la consommation de l'énergie réactive	07
1.10. réduction de la pollution harmonique	08
1.10.A. les méthode classic(le filtrage passif1.....	09
11. les méthode modernes.....	11
1.11..1.filtre actifs parallèle FAP.....	12
1.11..2. filtre actif série FAS	13
1.11..3.filtre actif combiné parallèle_série (UPQC)	13
1.11.4. filtre hybride actif_série.....	14
1.11.5.filtre actif série avec un filtre passif parallèle.....	15
1.11.6.filtre actif parallèle et un filtre passif parallèle.....	15
Conclusion.....	17

Chapitre 2 : Etude d'un filtre actif parallèle

Introduction	
2.1.principe de filtre actif parallèle	19
2.2.la structure d'un filtre actif	21
2.2.1.filtre actif parallèle à structure de tension.....	25
2.2.2. filtre actif parallèle à structure de courant.....	29
2.2.3comparaison des deux structure.....	32
2.3.Onduleur de tension	37
2.4.Modélisation de tension triphasé.....	39
2.5.commande des filtres actifs	40
2.5.1.génération des signaux de référence.....	40
2.5.1.1.identification dans le domaine fréquentiel.....	40
2.5.1.2 transformée de fourrier rapide FFT.....	40
2.5.1.3transformée de fourrier discrète DFT.....	41
2.5.1.4.transforméedefourrier discrète récursive DFTR.....	42
2.5.1.2.identification dans le domaine temporel.....	42
2.5.1.2.1.théorie de la puissance instantanée PQ.....	43
2.5.1.2.2.théorie du référence synchroneDQ.....	48

2.5.2.Génération des signaux de contrôl.....	50
2.5.2.1.la commande de l'onduleur.....	50
2.5.2.1.1.Commande par hystérisis.....	50
2.5.2.1.2Commande par..MLI.....	52
2.6 Méthode de régulation par PI.....	54
Conclusion.....	55

Chapitre3 : Simulation et interprétation des résultats

Introduction	56
3 .1 .Structure générale du filtre parallèle	56
3.2 .Modélisation et simulation du filtre actif parallèle	57
3.3.Résultats de simulation et analyse.....	58
3.3.1. Résultats de simulation sans compensation.....	58
3.4.Résultats de simulation	59
3.5 Interprétation des résultats.....	66
conclusion	67

conclusion général

BIBLIOGRAPHIE

CHAPITRE 1

Introduction générale

Ces dernières années on constate que la consommation de l'énergie électrique progresse de plus en plus avec l'utilisation des appareillages intégrant des technologies à base d'électronique et d'électronique de puissance.

Cette augmentation donne naissance à des perturbations diverses au niveau du réseau électrique qui par la suite nuisent à la qualité de l'énergie et par conséquent engendrent des effets néfastes pour les utilisateurs.

De plus, on remarque que les perturbations les plus importantes dans les réseaux électriques sont les harmoniques de courant engendré par des charges non linéaire qui se traduisent par un mauvais fonctionnement dans les appareils domestiques comme les ordinateurs et les machines tournantes, et dans le réseau distribution par des pertes dans les lignes de transport et une diminution du facteur de puissance.

De ce fait, les fournisseurs de l'énergie électrique se voient donc obligées de développer des solutions et de se protéger contre ces perturbations.

Plusieurs solutions de dépollution des réseaux électriques ont été proposées dans la littérature.

Parmi ces solutions, on trouve la méthode des filtres passifs, cette méthode appelée aussi méthode classique a été souvent appliquée pour éliminer les harmoniques de courant mais n'a pas abouti au succès attendu surtout avec l'évolution des charges non linéaire.

Celles qui répondent le mieux aux exigences industrielles sont les compensateurs actifs (parallèles, série et la combinaison parallèle-série).

Les filtres actifs compensent en temps réel les différents types de perturbations qu'elles soient courants ou tensions. Cependant, il est à noter que le contrôle des filtres actifs est délicat.

Parmi les filtres actifs le plus utilisés, nous citerons le filtre actif parallèle, connecté en parallèle avec le réseau où il devra injecter des courants harmo-

niques en opposition de phase par rapport au réseau qui viendront s'ajouter aux courants de charges non linéaires ce qui nous donnera côté source un courant sinusoïdal.

Introduction :

L'utilisation croissante dans les appareils industriels ou domestiques de systèmes commandés à base d'électronique de puissance entraîne de plus en plus de problèmes de perturbation au niveau des réseaux électriques.

Ces convertisseurs statiques apportent une souplesse d'utilisation, des fonctionnalités supplémentaires, une augmentation de la fiabilité, le tout avec un rendement élevé. De plus, avec la généralisation de leur utilisation les coûts de ces modules d'électronique de puissance ne cessent de baisser.

L'inconvénient de ces dispositifs c'est qu'ils se comportent comme des charges non linéaires et absorbent des courants avec des formes d'ondes différentes des tensions d'alimentation. Dans ce cas, l'évolution des courants n'est pas liée directement aux variations sinusoïdales des tensions.

Ces courants périodiques mais non sinusoïdaux circulent au travers des impédances des réseaux et donnent naissance à des tensions non sinusoïdales et des déséquilibres qui viennent se superposer à la tension initiale au point de raccordement. Ils peuvent générer aussi une consommation de puissance réactive. Ces perturbations périodiques régulières sont désignées comme des perturbations harmoniques .

Ces perturbations ont des conséquences préjudiciables sur le bon fonctionnement des appareils électriques et ont des effets à la fois instantanés et à long terme. Il est donc important pour une installation donnée de savoir définir, analyser et quantifier les harmoniques. Dans ce premier chapitre, des notions élémentaires d'analyse harmonique, les origines et les conséquences de la pollution harmonique sont exposés.

1-1 Définition sur les harmoniques :

Les harmoniques sont une superposition sur l'onde fondamentale à 50 Hz, d'ondes également sinusoïdales mais de fréquences multiples entières de celle du fondamental.

Les déformations harmoniques sont des grandeurs aléatoires qui sont souvent la résultante des perturbations issues d'appareils distincts et transmis par le réseau. Cette transmission peut s'effectuer avec atténuation s'il n'y a pas de résonance ou avec amplification dans le cas contraire.

La fréquence de résonance dépend de l'impédance, l'acuité de cette résonance est fonction du coefficient de surtension de cette impédance qui est directement liée aux charges de la clientèle.

1-2 Effets des harmoniques :

Les effets des harmoniques les plus connus et le plus spectaculaire sont la destruction des condensateurs ou des disjoncteurs sous l'effet des forts courants harmoniques amplifiés par des résonances.

Un autre phénomène, de plus en plus rencontré, est l'échauffement des transformateurs et des conducteurs de neutre sous l'effet des courants harmoniques de rang 3.

1-2-1 : Effets instantanés :

- ❖ Déclenchement intempestifs des protections.
- ❖ Perturbations induites des systèmes à courant faibles
- ❖ Vibrations et bruits acoustiques anormaux (tableaux BT, moteurs, transformateurs).
- ❖ Destruction par surcharge thermique de condensateurs.
- ❖ Pertes de précision des appareils de mesure.

1-2-2: Effets à long terme :

- ⚡ Une surcharge en courant provoque des échauffements supplémentaires donc un vieillissement prématuré des équipements.
- ⚡ Echauffement des transformateurs et des alternateurs (par augmentation des pertes Joule, des pertes fer...).
- ⚡ Fatigue mécanique (couples pulsatoires dans les machines asynchrones
- ⚡ Echauffement des récepteurs : des conducteurs de phase et du neutre par augmentation des pertes Joule et diélectriques.
- ⚡ Destruction de matériels (condensateurs, disjoncteurs...).
- ⚡ Rayonnement électromagnétique perturbant les écrans (micro-ordinateurs, appareils de laboratoire...)

1-3 Décomposition d'un signal périodique :

Fourier a démontré que toute fonction périodique $y(t)$ non sinusoïdale de fréquence F peut être représenté selon la décomposition harmonique sous la forme d'une somme composée :

- ✱ D'un terme sinusoïdal à la fréquence F de valeur efficace y_1 . Ce

terme est appelé le fondamental;

- ✳ De termes sinusoïdaux dont les fréquences sont égales à n fois la fréquence **F** du Fondamental et de valeurs efficaces **yn** . Ces autres fréquences multiples du fondamental sont appelées harmoniques;
- ✳ D'une éventuelle composante continue d'amplitude **y0**.

L'expression de ces grandeurs est donnée par le développement de Fourier de

$$y(t) = y_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} Y_n \sin(n\omega t - \varphi)$$

la fonction tension ou courant $y(t)$:

(1.1)

◆ Exemple :

Si on a un signal de fréquence industrielle 50Hz à la présence des harmoniques de rang 5

(de fréquence 250Hz) et de rang 9 (de fréquence 450Hz) alors le signal résultant sera perturbé par ces harmoniques (périodique mais pas sinusoïdal).

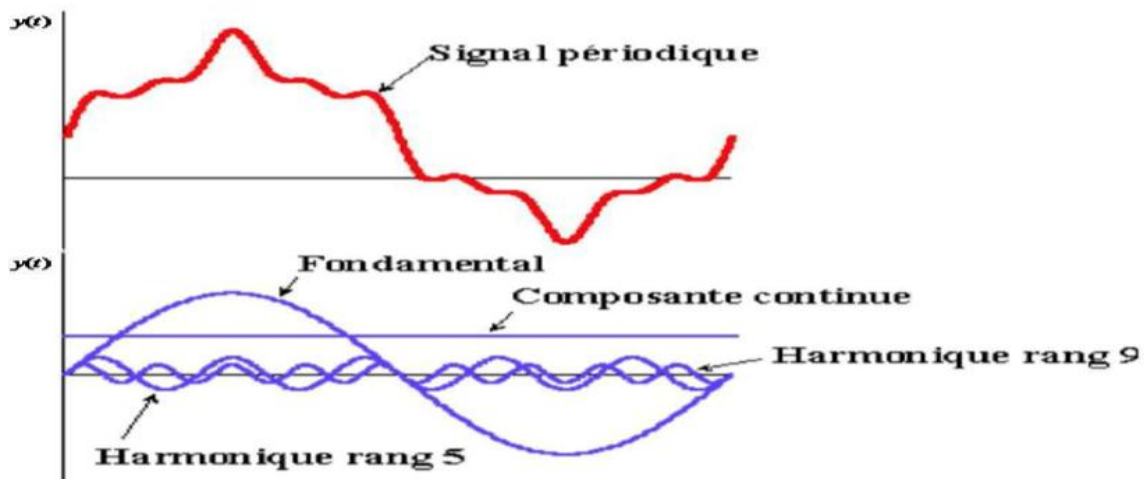


Figure (1- 1) : Décomposition d'un signal périodique

1-4 Courants harmoniques :

Dans la plupart des cas, les harmoniques présents sur les réseaux électriques

proviennent de l'utilisation de charges non linéaires.

On appelle « charge » un équipement ou une installation connectés au réseau électrique et consommant de l'énergie à 50 Hz. On dit qu'une charge est non linéaire quand, soumise à une tension sinusoïdale à 50 Hz, elle n'absorbe pas un courant sinusoïdal à 50 Hz.

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

1-5 Tensions harmoniques :

On peut également parler de source de tension pour décrire l'état d'un réseau perturbé par une forte charge non linéaire. En effet, dans ce cas, si l'on s'intéresse à l'étude du raccordement d'un récepteur de faible puissance, sa connexion au réseau ne modifie pas sensiblement le niveau précédent.

1-6 Caractérisation d'un contenu harmonique pour un signal :

Tout signal $y(t)$ déformé (riche en harmoniques) et périodique de période 'T' peut se décomposer, selon le théorème de Fourier, en une somme d'ondes

$$y(t) = Y_0 + \sqrt{2}(Y_1 \sin(\omega t - \varphi_1) + Y_2 \sin(2\omega t - \varphi_2) + \dots + Y_h \sin(h\omega t - \varphi_h))$$

sinusoïdales et d'une

(1.2)

Que l'on mette sous la forme compacte suivante :

$$y(t) = Y_0 + \sum_{h=1}^{\infty} Y_h \sqrt{2} \sin(h\omega t - \varphi_h)$$

(1.3)

Avec :

☛ Y_0 : valeur moyenne ou composante continue du signal().

- ☛ h : rang de l'harmonique.
- ☛ Y_h : valeur efficace de l'harmonique au rang h .
- ☛ ω : pulsation fondamentale ($2\pi f_1 = 2\pi/T$).
- ☛ ϕ_h : phase de l'harmonique au rang h .

Dans l'équation (1.1), le terme y_0 correspond au terme fondamental (sinusoïdal) de fréquence généralement 50 Hz ou 60 Hz. Ce terme est noyé dans les composantes harmoniques sinusoïdales de rang h , de fréquences multiples de celle du fondamental. Le rang harmonique est donc le rapport entre la fréquence du signal harmonique et du fondamental.

1- 7 Expression de la valeur efficace :

La valeur efficace vraie (**TRMS** values: True Root Mean Square values) conditionne les chauffements. Pour une grandeur périodique non sinusoïdale, son expression est :

$$Y_{\text{trms}} = \sqrt{Y_0^2 + \sum_{h=1}^m (Y_h)^2} = \sqrt{Y_0^2 + Y_1^2 + Y_2^2 + \dots + Y_h^2} \quad (1.4)$$

Cette définition est valable aussi bien pour les tensions que pour les courants. Il est à noter que pour une grandeur purement sinusoïdale, la valeur efficace correspond à sa valeur maximale divisée par la racine carrée de deux.

1-8 Le taux de distorsion harmoniques THD :

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 :

$$\text{THD (I)} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N |I_h|^2}}{|I_1|} \quad (1.5)$$

Avec I_1 la valeur efficace du courant fondamental et 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 signalé aussi que l'amplitude des harmoniques décroît généralement avec la fréquence.

1- 9 Le facteur de puissance lié à la consommation de l'énergie réactive :

En présence des harmoniques, la puissance apparente S est composée de trois parties : active P , réactive Q et déformante D .

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (1.6)$$

Son expression est donnée par l'équation suivante :

La puissance réactive Q est associée au courant fondamental. La puissance déformante D

$$D = 3v \sqrt{I_c^2 + I_{c1}^2} \quad (1.7)$$

est due aux harmoniques de courant avec :

Où I_c est la valeur efficace du courant de la charge. Pour un signal sinusoïdal le facteur de puissance F_p est égal au quotient de la puissance active P par la puissance apparente S :

$$F_p = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad (1.8)$$

Le facteur de puissance sera toujours inférieur à 1, en posant:

$$P = 3v I_{c1} \cos \Phi \quad (1.9)$$

On aura :

$$F_p = \frac{I_{c1}}{I_c} \cos \Phi = F_{dis} \cos \Phi$$

(1.10)

Où **F_p** représente le facteur de distorsion. Il vaut 1 lorsque le courant est parfaitement sinusoïdal et il décroît lorsque la déformation de l'onde s'accroît. **Φ** 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.

1-10 Réduction de la pollution harmonique :

Le prélèvement sinusoïdal est une technique qui permet aux convertisseurs statiques d'absorber un courant très proche d'une sinusoïde avec un facteur de puissance unitaire. Dans ce cas, ces structures se positionnent dans une stratégie préventive et non curative. Ces techniques de prélèvement sinusoïdal s'appliquent aux structures monophasées et triphasées. Ces convertisseurs propres utilisent la technique **MLI** (Modulation de Largeur d'Impulsions) également appelée **PWM** (Pulse Width Modulation) comme principe de pilotage des interrupteurs commandés

Ajout d'une inductance de lissage du courant :

L'ajout d'inductances de lissage en amont des dispositifs polluants est une solution communément utilisée afin d'atténuer les harmoniques de rangs élevées puisque leurs impédances augmentent avec la fréquence. Ces inductances réduisent donc la distorsion de la tension au point de raccordement mais induisent un coût supplémentaire

Confinement des harmoniques :

Il s'agit de limiter la circulation des courants harmoniques à une partie de l'installation la plus limitée possible. Si le montage est un montage équilibré, les harmoniques de rang 3w sont en phase et en l'absence de conducteur neutre connecté, ces courants ne peuvent pas circuler. Pour éviter la circulation de ces courants de rang 3 sur l'ensemble du réseau, il est possible d'effectuer un découplage par transformateur. Par exemple l'utilisation d'un transformateur dont le primaire est couplé en étoile et le secondaire en zigzag (couplage %) permet d'éliminer au primaire les courants de pulsation 3

1-10- A Les méthodes classiques (Le filtrage passif) :

Ce sont des techniques qui doivent être connues par tous les électriciens. Elles apportent une solution facile et rapide pour certains cas de perturbations bien

localisées et utilisent des composants passifs (inductances, condensateurs, résistance) et/ou des branchements qui modifient le schéma de l'installation.

Le filtrage consiste à placer en parallèle sur le réseau d'alimentation une impédance de valeur très faible autour de la fréquence à filtrer et suffisamment importante à la fréquence fondamentale du réseau. Un filtre passif est constitué d'éléments passifs tels que des inductances, des condensateurs et des résistances, qui forment une impédance dont la valeur varie en fonction de la fréquence. On connecte alors le filtre passif en parallèle avec le réseau de manière à absorber un harmonique de courant donné . Si on veut par exemple éliminer le courant harmonique de rang 5, on dimensionne alors les éléments passifs de manière à ce que l'impédance équivalente du filtre soit la plus petite possible à la fréquence $5 \times$ fondamental , le courant circulera alors dans l'impédance la plus faible, c'est à dire dans le filtre passif et donc plus dans l'impédance de court-circuit du réseau comme l'illustre la **figure**

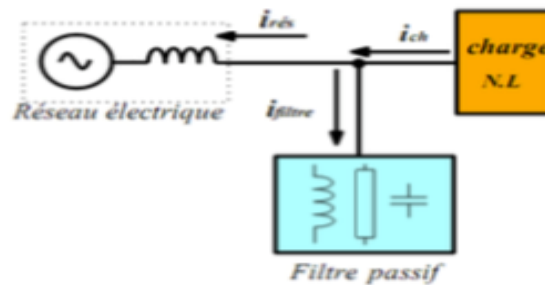


Figure (1 -2) : filtre passif connecté au réseau

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

A-1 FILTRE PASSIF RÉSONANT:

C'est un filtre sélectif constitué d'une résistance, d'un condensateur et d'une

$$Z_{eq}(\omega) = \frac{1 - LC\omega^2 + jRC\omega}{jC\omega}$$

(1.11)

bobine en série, comme décrit sur **la figure(1-3)** , son impédance équivalente est :

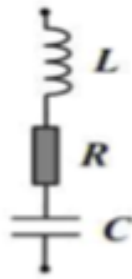


Figure (1-3) : Filtre passif résonant

A-2 FILTRE PASSIF AMORTI

C'est un filtre passe haut constitué d'une inductance en parallèle avec une résistance, le tout en série avec un condensateur comme décrit sur la **figure**. Son impédance

équivalente est :

$$Z_{eq}(\omega) = \frac{1 - LC\omega^2 + j\frac{L}{R}\omega}{-\frac{L}{R}C\omega^2 + jC\omega}$$

(1.12)

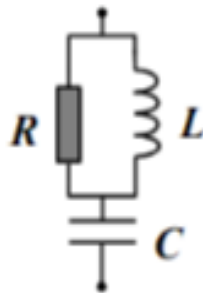


Figure (1-4) : Filtre passif amorti

1-10--B Les méthodes modernes (Le filtrage actif):

Les solutions traditionnelles de dépollution ne répondant plus à l'évolution des réseaux électriques et des charges à protéger. Pour fournir aux consommateurs une bonne qualité de l'énergie électrique, même dans les conditions de fonctionnement les plus perturbées

Les inconvénients inévitables aux filtres passifs et l'apparition de nouveaux composants semi-conducteurs, comme les thyristors et les Transistors Kâé", ont conduit à concevoir une nouvelle structure de filtres appelée filtres actifs de puissance W.R. Le but de ces filtres est de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à ce que le courant et la tension du réseau soient rendus sinusoïdaux et parfois avec un facteur de puissance

unitaire. Le filtre actif est connecté en série, en parallèle, en combinant ces deux dernières structures ensemble ou associé avec des filtres passifs en fonction des grandeurs électriques harmoniques (courants ou tensions) à compenser

Les avantages de ces filtres actifs par rapport aux filtres passifs sont les suivants [5 Ama] :

- ❖ le volume physique du filtre est plus réduit.
- ❖ la capacité de filtrage est supérieure.
- ❖ la flexibilité et adaptabilité sont très supérieures.

Pourtant, ils présentent quelques inconvénients :

- ❖ Leur coût élevé a limité leur implantation dans l'industrie.
- ❖ Les pertes sont plus élevées.

Deux types de convertisseurs connus dans la littérature constituent l'APF: convertisseur à source de courant (**CSI**) ou à source de tension (**VSI**).

B-1 LES FILTRES ACTIFS PARALLÈLES FAP:

Le filtre actif connecté en parallèle sur le réseau est le plus souvent contrôlé comme un générateur de courant. Il injecte dans le réseau des courants harmoniques égaux à ceux absorbés par la charge polluante, mais en opposition de phase avec ceux-ci. Le courant coté réseaux sera ainsi sinusoïdal, cependant la tension au point de raccordement ne le sera que si la tension ne contient pas d'harmoniques. Ainsi l'objectif d'un filtre parallèle générateur de courant consiste à empêcher les courants harmoniques absorbés par la charge non linéaire de circuler à travers l'impédance du réseau située en amont du point de connexion du filtre. Le dimensionnement du filtre actif est lié au courant harmonique à générer. La majorité des filtres actifs parallèles actuellement installés sur les réseaux électriques fonctionne selon ce principe.

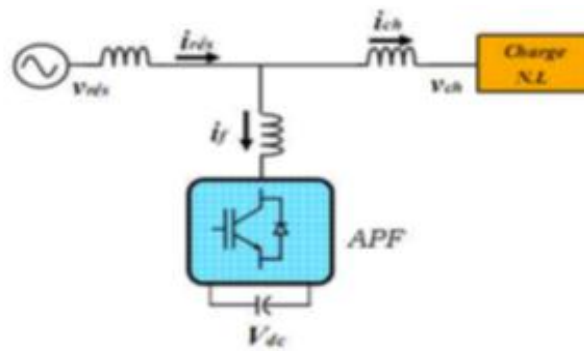


Figure (1-5) : filtres actif parallèle FAP

B-2 FILTRE ACTIF SÉRIE FAS :

Le but du filtre actif série est de créer une impédance en série avec le réseau qui sera nulle pour le fondamental et de valeur élevée pour les harmoniques. Il est destiné à protéger les installations sensibles aux perturbations provenant du réseau telles que les harmoniques en tension, les surtensions, déséquilibres et creux de tension. En revanche, le filtrage série ne permet pas de compenser les courants harmoniques consommés par la charge. En plus, ce filtre nécessite une protection complexe contre les courts-circuits des réseaux. En effet, lors d'un court-circuit côté réseau, ce dernier peut être amené à supporter tout le courant de court-circuit.

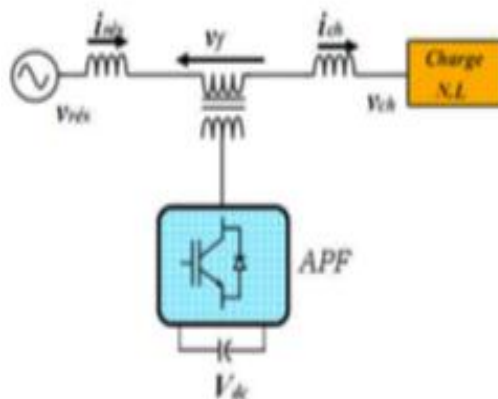


Figure (1-6) : Filtre actif série FAS

B-3 FILTRE ACTIF COMBINÉ PARALLÈLE-SÉRIE (UPQC)

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

l'équipement médical.

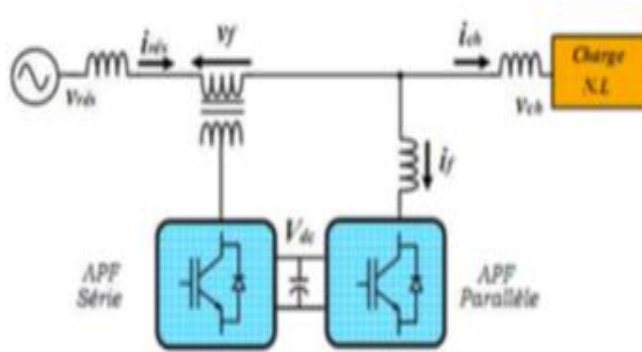


Figure (1-7) : Filtre actif combiné parallèle-série (UPQC)

1- 10-C FILTRES HYBRIDES ACTIFS ET PASSIFS :

C-1 Filtre actif série avec un filtre passif parallèle

Une version moins chère de la structure précédente est illustrée par la **figure 1.8** où un filtre actif série et un filtre parallèle passif sont exploités. Principalement, le filtre série régule la tension au point PCC tandis que le filtre parallèle est réglé sur quelques harmoniques de courant (rangs inférieurs) qui doivent être supprimés. Cette topologie a la possibilité de réduire les harmoniques de tension et de courant à un prix raisonnable

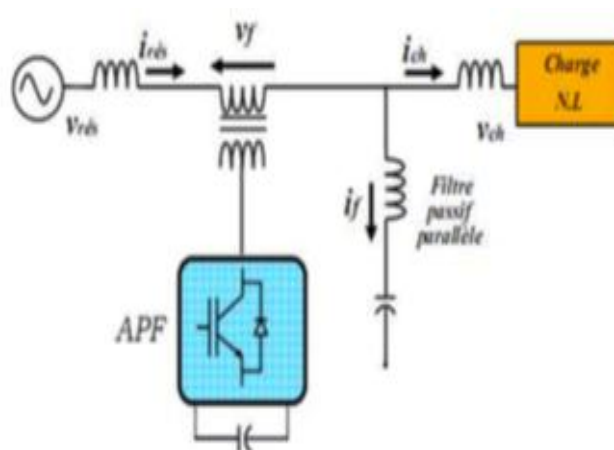


Figure (1-8) : Filtre actif série avec un filtre passif parallèle

C-2 filtre actif parallèle et un filtre passif parallèle :

Dans cette topologie, le filtre actif est connecté en parallèle avec le filtre passif. Tous deux sont également en parallèle avec la charge. Le filtre actif parallèle sert à compenser les courants harmoniques basses fréquences émis par la charge polluante alors que le filtre passif, accordé sur une fréquence harmonique élevée, permet de compenser les harmoniques hautes fréquences.

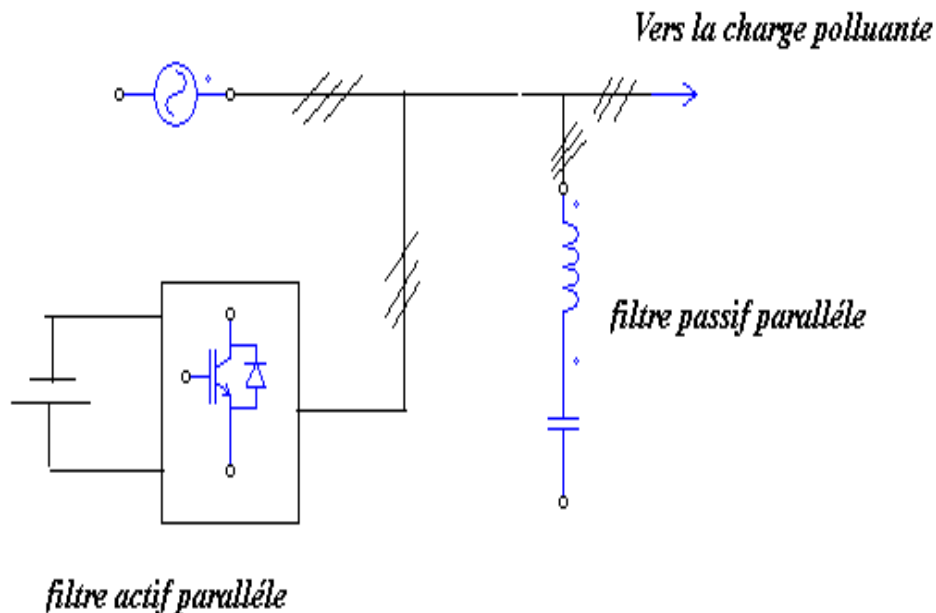


Figure (1-9) : filtre actif parallèle et un filtre passif parallèle

C- 3 Filtre actif hybride

Connecté avec ou sans transformateurs au réseau, le filtre actif hybride (**Fig. 1.10**) est constitué d'un filtre passif connecté directement en série avec le filtre actif, ce qui entraîne une diminution de la tension du bus continu comparativement à celle d'un filtre actif pur et une réduction du dimensionnement du filtre hybride. En plus, le filtre passif évite les oscillations dues à la commutation (**HF**) car il présente une haute impédance à cette fréquence .

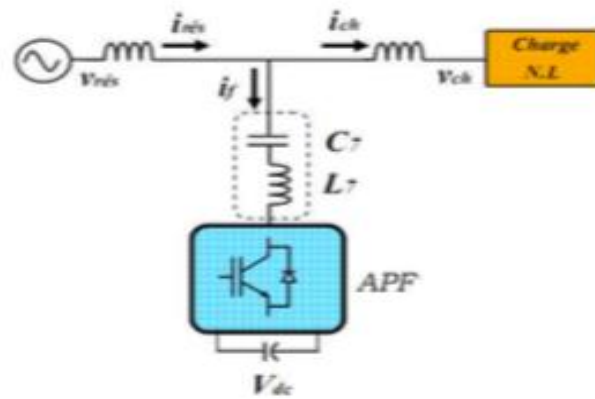


Figure (1-10) ; Filtre actif hybride

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté différents types de perturbations affectant l'onde de

tension et du courant du réseau électrique. Comme nous avons pu le constater, les harmoniques et les déséquilibres de courant et de tension, la puissance réactive et les creux de tension ont des effets néfastes sur les équipements électriques. Ces effets peuvent aller des échauffements et de la dégradation du fonctionnement jusqu'à la destruction totale de ces équipements.

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

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

Le filtre actif parallèle peut être installé pour compenser toutes les perturbations de courant comme les harmoniques, les déséquilibres et la puissance réactive.

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

La combinaison parallèle-série actifs est la solution universelle pour

compenser toutes les perturbations en courant et en tension.

D'autres solutions de dépollution consistent à associer des filtres actifs et passifs pour trouver un compromis entre l'efficacité de compensation et le coût. Ces solutions peuvent être des solutions futures très prometteuses.

C'est ainsi que dans l'objectif d'améliorer la qualité de l'énergie électrique qui doit être conforme aux nouvelles contraintes normatives, nous étudierons, dans le chapitre suivant, des méthodes de régulation avancées que nous appliquerons dans le cas de la structure du filtre actif parallèle.

CHAPITRE 2

Introduction :

Afin de réduire les harmoniques au niveau du réseau électrique, nous proposons dans ce travail le filtrage actif parallèle, par les avantages qu'il représente, tel que l'adaptation aux variations de la charge polluante.

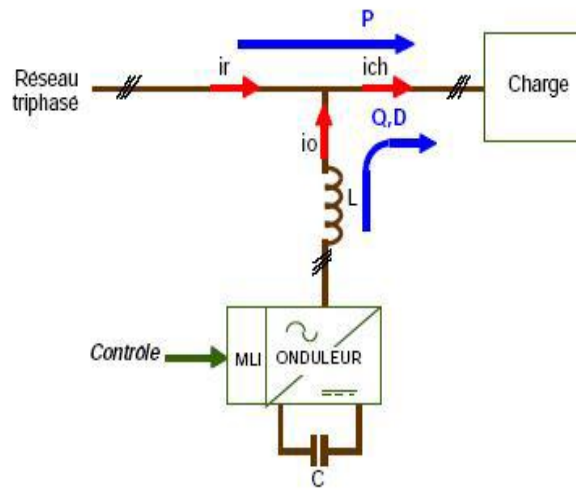
Le filtre actif parallèle est un onduleur de tension à modulation de largeur d'impulsions, il injecte dans le réseau des courants harmoniques égaux et en opposition de phase à ceux absorbés par la charge polluante. Cette structure a pour vocation d'éliminer de façon active tout ou une partie des harmoniques de courant.

C'est pour cela dans ce chapitre on va étudier la structure du filtre actif parallèle ainsi que son fonctionnement général, les différentes algorithmes de commande du filtre actif utilisés pour le présent projet ainsi que de la méthode utilisée pour générer les signaux de contrôle des semi-conducteurs de l'onduleur.

2-1 Principe de filtre actif parallèle

Leur principe est d'injecter dans le réseau des courants harmoniques égaux à ceux absorbés par la charge polluante, mais en opposition de phase et ainsi on obtient un courant de source sinusoïdal.

Ceci peut être schématisé sur la **figure (2-1)**



Figure(2-1): Schéma de principe du filtre actif parallèle.

Pour cela, le circuit de contrôle, en agissant sur la commande MLI, doit imposer la valeur instantanée du courant débité par l'onduleur de telle sorte que le courant fourni par le réseau soit sinusoïdal et en phase avec la tension simple correspondante.

Dans le cas général, le courant absorbé par la charge comporte une composante active (i_{cha}), une composante réactive (i_{chr}) et une composante harmo-

nique ($\sum_{n=1}^{\infty} i_{chn}$).

$$i_{ch} = i_{cha} + i_{chr} + \sum_{n=1}^{\infty} i_{chn} \quad (2.1)$$

Le compensateur actif ne peut absorber ou fournir de la puissance active puisqu'il ne comporte pas de source active.

D'après la première loi de Kirchhoff, le courant fourni par la source est égale à :

$$i_s = i_{ch} - i_f \quad (2.2)$$

La source fournit la puissance active absorbée par la charge :

$$i_s = i_{cha} \quad (2.3)$$

Le filtre actif parallèle fournit la puissance réactive et déformante :

$$i_f = i_{chr} + \sum_{n=1}^{\infty} i_{chn} \quad (2.4)$$

Pour illustrer le principe de filtrage actif, considérons l'ensemble réseau électrique, charge polluante et filtre actif (**figure 2-2**). La charge polluante est constituée d'un pont triphasé à diodes débitant sur un circuit RL.

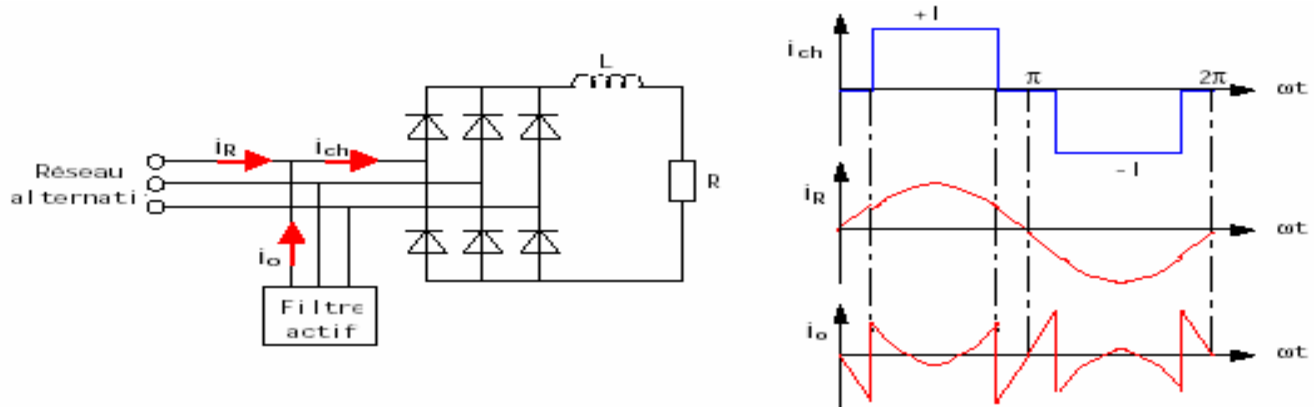


Figure (2-2): Schéma de principe de l'ensemble réseau électrique, charge polluante et filtre actif et formes d'ondes des courants respectifs.

2-2 la structure d'un filtre actif parallèle

La structure d'un filtre actif parallèle se décompose en deux parties, soit d'une partie puissance et d'une partie commande.

La première se compose d'un onduleur, d'un filtre de couplage au réseau et d'une source d'énergie.

Ces deux derniers déterminent la nature du filtre actif. Il peut être à structure tension ou courant suivant qu'il est réalisé à l'aide d'un onduleur de tension ou de courant.

En pratique, suivant le type de correction à apporter au réseau, une structure sera préférée à l'autre si elle rend plus aisée et moins onéreuse la réalisation de l'ensemble convertisseur commande.

La source d'énergie composant le filtre peut être une source de tension ou de courant.

Comme l'onduleur n'a pas à fournir de puissance active, cette source peut être un élément réactif, condensateur ou inductance, dans lequel on maintient constante la valeur moyenne de l'énergie stockée. Cet élément de stockage d'énergie n'a pas besoin d'être lui-même alimenté par une source continue.

La raison est que le filtre actif du courant fondamental généré par la source du réseau auquel il est connecté

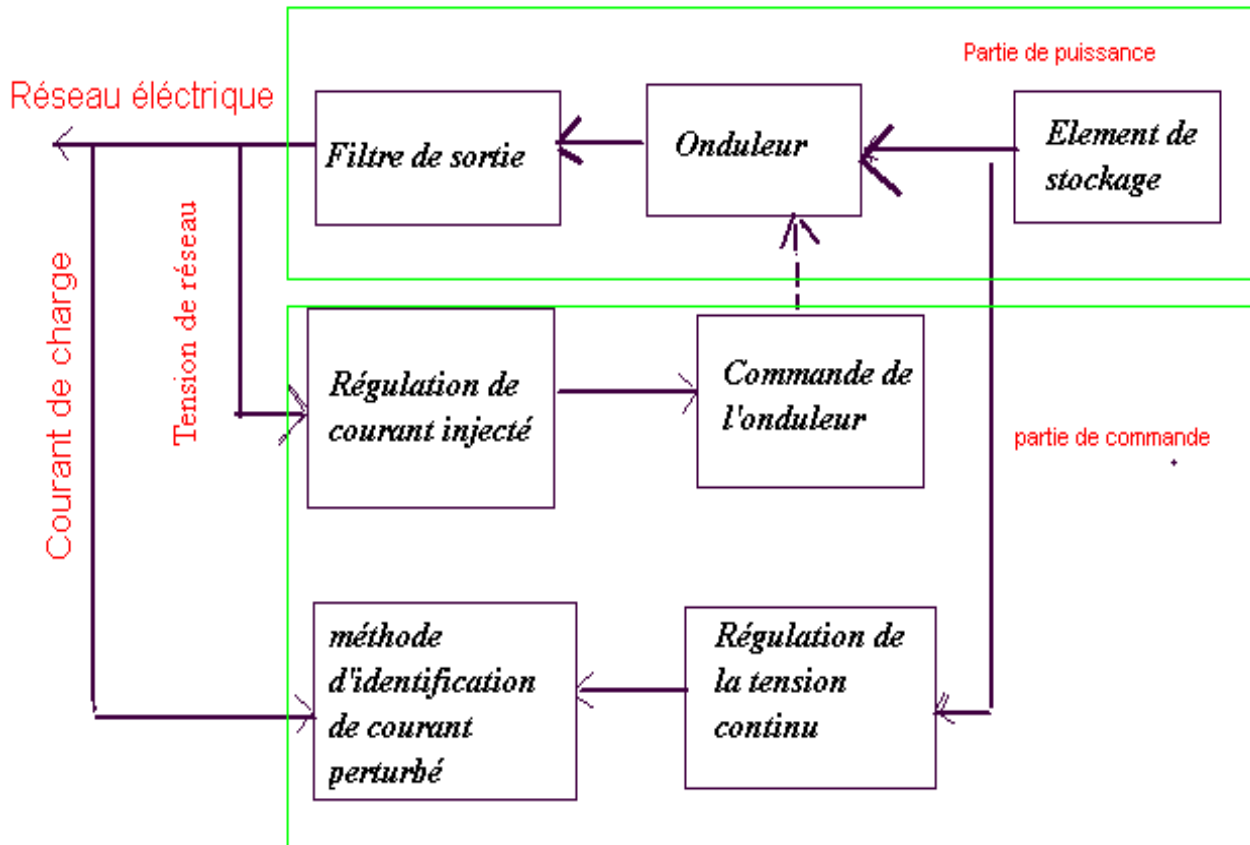


Figure (2-3) : Structure générale du filtre actif parallèle.

Concernant la partie puissance nous trouvons :

A) UN ONDULEUR :

L'onduleur de tension connecté en parallèle au réseau . Le Condensateur C_{dc} joue le rôle d'une source de tension continue. La tension à ses bornes V_{dc} doit être positive et maintenue quasiment constante.

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

L'onduleur de tension est relié au réseau par l'intermédiaire d'un filtre. Deux rôles sont dévolus à ce filtre:

- transformer les variations de tension V_f en variations de courant
- filtrer les fréquences de commutation des bras d'onduleur.

Les interrupteurs de l'onduleur sont réversibles en courant.

Ils sont constitués de semi-conducteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture en antiparallèle avec une diode [28;29].

B) UN CIRCUIT DE STOCKAGE D'ENERGIE :

Le stockage de l'énergie peut être par une source de tension continue V_{dc} , ou par un condensateur C_{dc} qui joue le rôle d'une source de tension continue V_{dc}

Le choix des paramètres (V_{dc} et C_{dc}) s'effectue sur la dynamique et sur la qualité de compensation du filtre actif parallèle.

C) UN FILTRE DE SORTIE :

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

- ✓ assurer une bonne dynamique du courant
- ✓ empêcher les composantes dues aux commutations de se propager sur le réseau électrique.

Concernant la partie commande nous trouvons :

- **LA METHODE D'IDENTIFICATION DES COURANTS PERTURBES**
- **LA REGULATION DE LA TENSION**

▪ LA COMMANDE DE L'ONDULEUR DE TENSION

2.2.1 Filtre actif parallèle à structure de tension

La **figure (2-4)** illustre le filtre actif parallèle à structure de tension. La capacité et l'inductance de couplage caractérisent cette structure. L'élément servant de source d'énergie est la capacité C qui doit délivrer une tension à valeur quasi constante. La Fluctuation de cette tension doit être faible.

Elle ne doit pas dépasser la limite de tension supportable par les semi-conducteurs.

De plus, pour une inductance L_f donnée, cette tension ne doit pas être inférieure à une certaine limite, car cela affecterait les performances de compensation du filtre actif [29,30]. L'inductance par laquelle l'onduleur est relié au réseau sert à filtrer les courants harmoniques hautes fréquences.

Ces courants harmoniques sont causés par les impulsions de tension générées par l'onduleur.

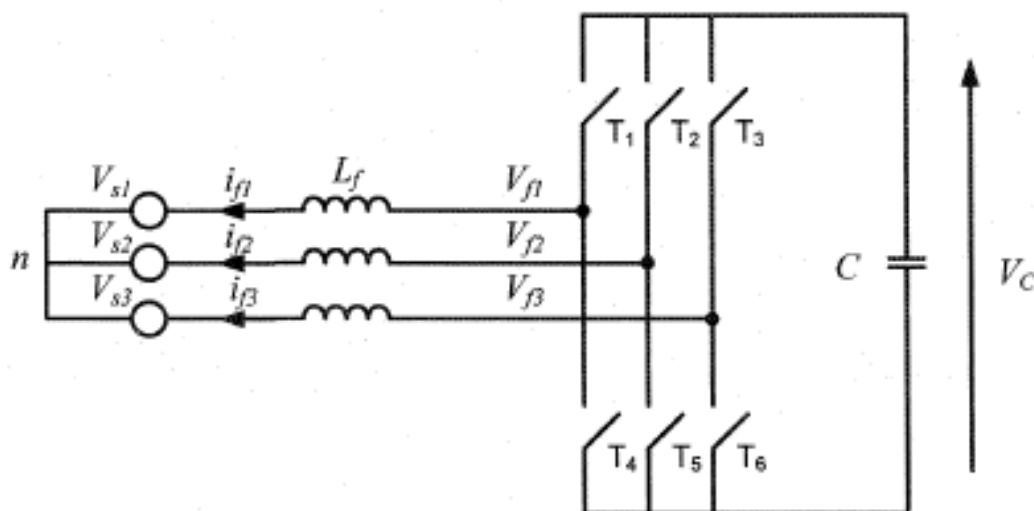


Figure (2-4) : Filtre actif parallèle à structure de tension

Pour la structure de tension, les interrupteurs sont unidirectionnels en tension et doivent être réversibles en courant.

Pour y parvenir, les éléments semi-conducteurs composant l'onduleur doivent être associés en parallèle avec des diodes.

Ces semi-conducteurs sont commandés à la fermeture et à l'ouverture.

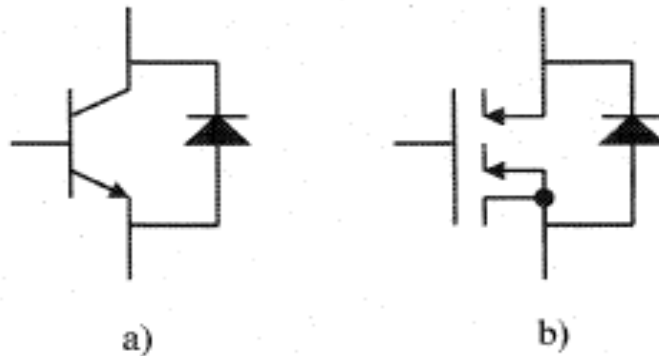


Fig (2-5) : Semi –conducteurs servant d'interrupteur au filtre actif en tension

a) transistor bipolaire, b) transistor IGBT

Cette structure ne permet pas la fermeture simultanée des semi-conducteurs d'un même bras sous peine de court-circuiter le condensateur.

Par contre, dans certains cas, ils peuvent être tous les deux ouverts (temps mort).La continuité des courants est alors assurée par la mise en conduction d'une des diodes d'un même bras.

En pratique, on commande les deux semi-conducteurs d'un même bras de façon complémentaire : la conduction de l'un entraîne le blocage de l'autre.

Les états des interrupteurs équivalents ne dépendent pas du sens des courants.

Ils sont uniquement contrôlés par la commande. Le mode où les semi-conducteurs d'un même bras sont ouverts tous les deux n'existe

que durant les commutations afin d'éviter les court-circuits.

Le tableau (2-1) montre les combinaisons possibles des tensions V_{f1} , V_{f2} , et V_{f3}

Tableau (2-1) : Tension générées par l'onduleur à structure de tension :

Numéro de l'état	Interrupteurs fermés	V_{f1}	V_{f2}	V_{f3}
1	T ₄ , T ₅ , T ₆	0	0	0
2	T ₁ , T ₅ , T ₆	2V * 3	-V * 3	-V * 3
3	T ₂ , T ₄ , T ₆	-V * 3	2V * 3	-V * 3
4	T ₁ , T ₂ , T ₆	V * 3	V * 3	-2 V * 3
5	T ₃ , T ₄ , T ₅	-V * 3	-V * 3	2V * 3
6	T ₁ , T ₃ , T ₅	V * 3	-2 V * 3	V * 3
7	T ₂ , T ₃ , T ₄	-2 V * 3	V * 3	V * 3
8	T ₁ , T ₂ , T ₃	0	0	0

Tableau (2-1) : Tension générées par l'onduleur à structure de tension

2.2.2 Filtre actif parallèle à structure de courant

Sur la figure suivante est illustré le filtre actif parallèle à structure de courant. L'inductance et le filtre passe – bas de deuxième ordre de sortie caractérisent cette structure. L'élément servant de source d'énergie est l'inductance (L_{df}) qui doit délivrer un courant continu de valeur quasi constante.

Tout comme le filtre à structure de tension, la présence du filtre de couplage sert à filtrer les tensions harmoniques générées par les courants de l'onduleur.

Les harmoniques près de la fréquence de résonance du filtre passe – bas **LFCF** sont amplifiés et peuvent causer de graves dommages au montage .

Dans le but de prévenir ce phénomène indésirable, des résistances peuvent être insérées dans le filtre passe-bas ou un contrôle approprié du courant, qui tient en compte la dérivée du courant instantané du filtre actif, peut être adopté [29].

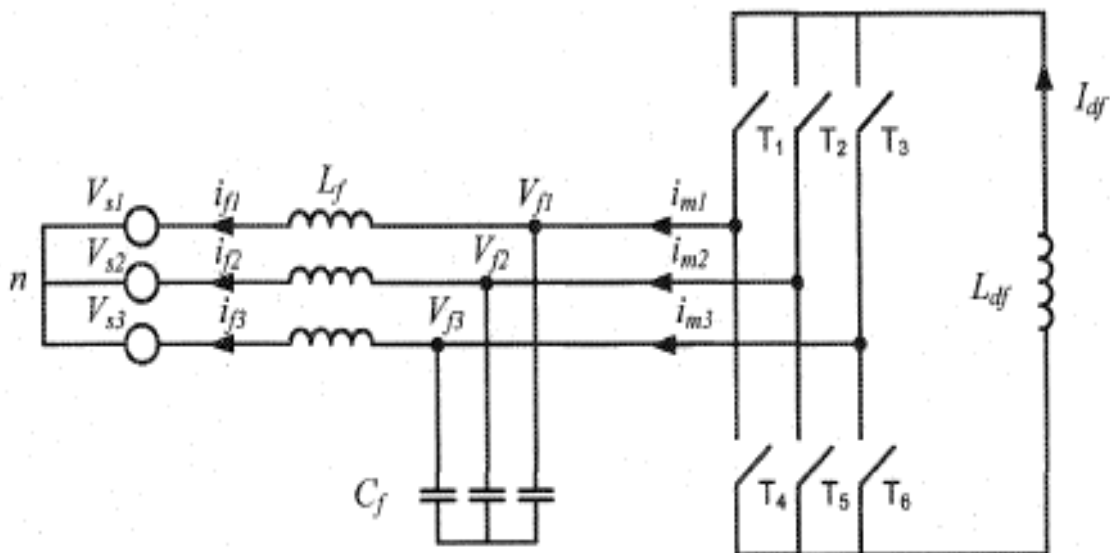


Figure (2-6) : Filtre actif parallèle à structure de courant

Les semi-conducteurs servant d'interrupteur à l'onduleur sont unidirectionnels en courant, mais bidirectionnels en tension.

Ces semi-conducteurs se commandent en fermeture en ouverture.

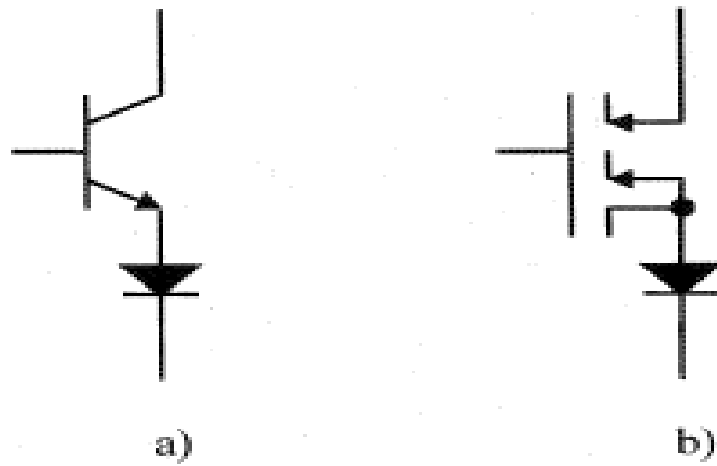


Figure (2-7): Semi – conducteurs servant d'interrupteur au filtre actif en courant

a) transistor bipolaire, b) transistor IGBT

Pour que les états des interrupteurs ne dépendent que des signaux de contrôle, il faut commander un seul composant par demi- pont .

Le mode où il y a deux composants d'un demi- pont simultanément conducteurs existe uniquement lors des passages de courant d'une phase à l'autre.

Des trois interrupteurs reliés à la même borne de la source de courant continu, il faut qu'il y en ait toujours un fermé pour que cette source de courant ne soit jamais en circuit ouvert [27] .

Le **tableau (2-2)** montre les combinaisons possibles des courants **i_{m1}, i_{m2}, i_{m3}**

Tableau (2-2) : Courants générés par l'onduleur à structure de courant :

Numéro de l'état	Interruppteurs fermés	i_{m1}	i_{m2}	i_{m3}
1	T_1, T_5	I_{df}	$-I_{df}$	$-I_{df}$
2	T_1, T_6	I_{df}	0	$-I_{df}$
3	T_2, T_6	0	0	0
4	T_2, T_4	$-I_{df}$	0	I_{df}
5	T_3, T_5	0	$-I_{df}$	I_{df}
6	T_1, T_4	0	0	0
7	T_2, T_5	0	0	0
8	T_3, T_6	0	0	0

Tableau (2-2) : Courants générés par l'onduleur à structure de courant

2.2.3 Comparaison des deux structure(tension et courant)

ELEMENT DE STOCKAGE :

La sélection de l'élément de stockage (**C ou Ldf**) servant de source d'alimentation de l'onduleur en tension ou en courant est faite en fonction que le filtre actif soit capable de suivre sa référence.

La source d'énergie doit être dimensionnée de manière à ce que la tension ou le courant qu'elle génère contient une fluctuation acceptable.

Dans le cas du filtre actif à structure de tension, pour assurer la continuité de courant à tout instant, la tension **Vcmoy** doit être au moins égale à 3/2 de la valeur maximale de la tension fondamentale du côté alternatif du réseau. Pour assurer la contrôlabilité du filtre durant les commutations du redresseur, **Vcmoy** doit respecter la condition (2.5) pour un réseau triphasé avec un redresseur commandé six pulsations comme charge polluante [17,18]:

$$V_{Cmoy} \geq \sqrt{\sqrt{3}\pi V_{eff} \sqrt{\cos(\alpha)^2 + [(k+1)\sin(\alpha) - \delta k]^2}} \quad (2.5)$$

$$k = \frac{L_f}{L_s + L_c} \quad (2.6)$$

$$\delta = \sqrt{6} \frac{(L_s - L_c)}{\pi V_{eff}} \omega I_a \quad (2.7)$$

où :

V_{eff} : Tension efficace du réseau.

ω : Fréquence angulaire du réseau.

α : Angle d'amorçage des thyristors du redresseur.

I_a : Courant moyen de charge redressé aux bornes du redresseur.

Une fois la tension V_{Cmoy} fixée, la dimension de la capacité peut être calculée en considérant une ondulation de tension ΔV_c acceptable :

$$C = \frac{\tilde{p}}{\omega V_{Cmoy} \Delta V_c} \quad (2.8)$$

où :

p : Puissance harmonique générée par le filtre actif.

La puissance harmonique (p) du filtre actif est à l'origine de la fluctuation de

l'énergie stockée dans le condensateur et par conséquent, de celle de la tension continue. Cette fluctuation est d'autant plus importante lorsque l'amplitude de la pulsation de puissance est plus grande et que sa fréquence est plus faible.

Pour cette raison, on peut l'estimer en ne tenant compte que des courants harmoniques des premiers rangs [18].

Tout comme le filtre actif à source de tension, les échanges d'énergie entre le réseau et le filtre actif à source de courant font varier la valeur du courant I_{df} de la source d'énergie.

Pour assurer la continuité de courant à tout instant, le courant U_{fmoy} doit être supérieur aux courants harmoniques générés par le filtre actif.

Comme pour le cas précédent, la valeur de l'inductance L_{df} est déterminée par une ondulation de courant ΔI_{df} acceptable pour chaque cycle d'opération :

$$L_{df} = \frac{\tilde{P}}{\omega I_{dfmoy} \Delta I_{df}}$$

(2.9)

Les équations (2.8) et (2.9) nous montrent que pour avoir une faible oscillation de la tension ou du courant et également pour améliorer les performances du filtre actif, de larges capacités ou inductances doivent être utilisées. Ceci a pour conséquence d'augmenter le coût du filtre actif.

Cependant, dans 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.

FILTRAGE DES HARMONIQUES GENEREES PAR LE DECOU-PAGE DE L'ONDULEUR :

Le filtre actif doit être connecté au réseau de distribution à travers un filtre passif de découplage.

Le dimensionnement de ce filtre doit tenir compte de deux points importants :

- Il doit fournir une atténuation suffisante des rebondissements causés par la commutation des semi-conducteurs de l'onduleur du filtre actif.
- Il doit préserver les performances du filtre actif.

Le filtre actif à structure de tension est couplé au réseau d'alimentation généralement par le biais d'un filtre passe-bas de premier ordre. Ce filtre est réalisé par une simple inductance de grande valeur.

Cependant, une trop grande valeur d'inductance peut détériorer l'efficacité du filtrage si la tension du côté continu de l'onduleur n'est pas assez élevée.

Afin de pallier à ce problème, un filtre passe-haut de troisième ordre servant à éliminer les harmoniques en haute fréquence peut être installé si nécessaire [17].

Il est à noter cependant qu'avec cette solution, le filtre produit deux fréquences de résonance, ce qui complique le contrôle du filtre actif.

Le filtre actif à structure de courant est couplé au réseau d'alimentation par le biais d'un filtre passe-bas du second ordre réalisé au moyen d'une inductance (L) et d'une capacité (C).

Par la sélection d'une fréquence de coupure appropriée, ce montage permet un compromis raisonnable entre la bande passante du filtre actif et l'atténuation des courants harmoniques générés par l'onduleur.

TYPE DE SEMI-CONDUCTEURS UTILISES :

Les semi-conducteurs utilisés par l'onduleur sont caractérisés par leur aptitude à supporter une tension et un courant maximal. Le dimensionnement de ces grandeurs dépend des circuits des deux côtés de l'onduleur (continu et alternatif), car ces derniers imposent les tensions et les courants des interrupteurs [15,17,18].

L'onduleur de tension utilise des semi-conducteurs réversibles en courant et unipolaires en tension.

La tension que doivent supporter les semi-conducteurs composant l'onduleur de tension est limitée par la valeur V_c de la tension V_c . L'intensité du courant qu'ils doivent supporter est imposée par le courant maximal généré par le filtre actif.

Ils doivent être capables de supporter la valeur maximale du courant harmonique à compenser tout en tenant compte des courants harmoniques dus aux découpages.

Le semi-conducteur le plus approprié dans la conception de l'onduleur est le transistor **IGBT** avec une diode antiparallèle.

Il est à noter que les thyristors classiques avec le circuit auxiliaire d'extinction ne sont plus très utilisés, on leur préfère ceux que l'on peut commander en ouverture et en fermeture comme les **MOSFET**, les **IGBT** et les **GTO**. Dépendamment de l'utilisation requise, le **MOSFET** est utilisé pour les faibles puissances, le transistor bipolaire ou **IGBT**, pour les courants moyens et le thyristor **GTO** pour les grandes puissances.

De façon antagoniste, l'onduleur de courant utilise des semi-conducteurs réversibles en tension et unipolaires en courant.

L'intensité du courant qu'ils doivent supporter est limitée par la valeur I_c du courant I_c tandis que la tension qu'ils doivent supporter doit être au moins égale à celle de la ligne d'alimentation. Suivant ce mode de fonctionnement, le semi-conducteur de prédilection sera le thyristor **GTO** ou le transistor **IGBT** avec une diode connectée en série à la cathode servant de protection contre les surtensions.

COMMANDE ET PROTECTION :

Pour la structure en tension, le contrôle du courant de compensation généré par l'onduleur est réalisé par les tensions de ce même onduleur. La commande est par conséquent plus lente.

Par mesure de protection, il convient d'insérer un temps mort lors du passage du courant entre deux interrupteurs d'un même bras.

Pour le filtre à structure de courant, la commande est rapide et précise.

Cette structure ne nécessite pas, de façon générale, de protection contre l'ouverture simultanée des interrupteurs d'un demi-pont [15,17-19].

2.3 Onduleur de tension triphasé :

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 U 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 (2-8)** représente un onduleur triphasé de tension. Il se compose de trois bras à interrupteurs réversibles en courant, commandés à la fermeture et à l'ouverture, réalisés à partir d'un transistor et d'une diode en antiparallèle [13;30].

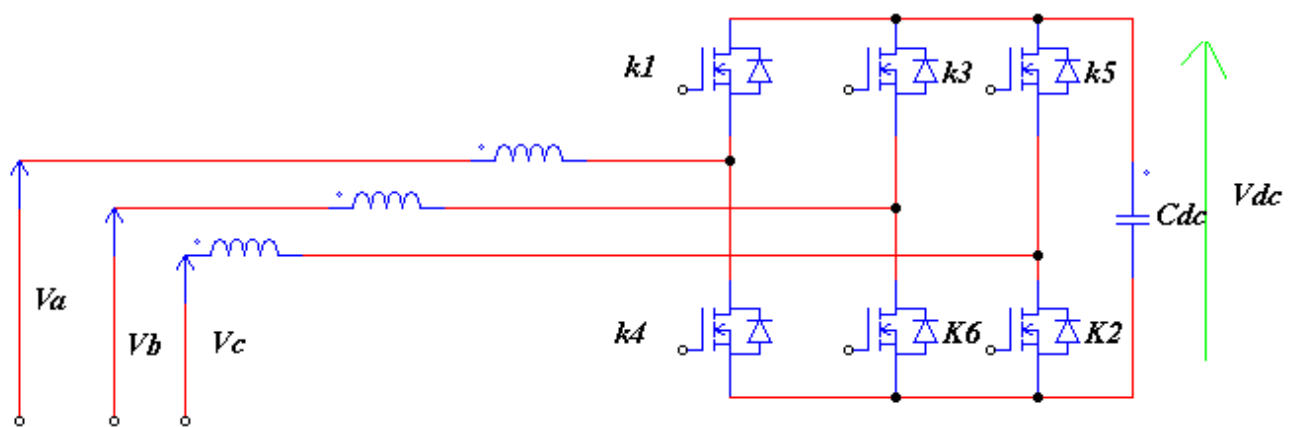


Figure (2-8): Structure d'un onduleur de tension triphasé.

N^r	S_1	S_2	S_3	v_{fa}	v_{fb}	v_{fc}	$\overline{v_f}$	
0	0	0	0	0	0	0	$\overline{v_{f(0)}}$	0
1	1	0	0	$\frac{2v_{dc}}{3}$	$\frac{-v_{dc}}{3}$	$\frac{-v_{dc}}{3}$	$\overline{v_{f(1)}}$	$\sqrt{\frac{2}{3}}v_{dc}$
2	1	1	0	$\frac{v_{dc}}{3}$	$\frac{v_{dc}}{3}$	$\frac{-2v_{dc}}{3}$	$\overline{v_{f(2)}}$	$\sqrt{\frac{2}{3}}v_{dc}e^{j\frac{\pi}{3}}$
3	0	1	0	$\frac{-v_{dc}}{3}$	$\frac{2v_{dc}}{3}$	$\frac{-v_{dc}}{3}$	$\overline{v_{f(3)}}$	$\sqrt{\frac{2}{3}}v_{dc}e^{j\frac{2\pi}{3}}$
4	0	1	1	$\frac{-2v_{dc}}{3}$	$\frac{v_{dc}}{3}$	$\frac{v_{dc}}{3}$	$\overline{v_{f(4)}}$	$\sqrt{\frac{2}{3}}v_{dc}e^{-j\pi}$
5	0	0	1	$\frac{-v_{dc}}{3}$	$\frac{-v_{dc}}{3}$	$\frac{2v_{dc}}{3}$	$\overline{v_{f(5)}}$	$\sqrt{\frac{2}{3}}v_{dc}e^{j\frac{-2\pi}{3}}$
6	1	0	1	$\frac{v_{dc}}{3}$	$\frac{-2v_{dc}}{3}$	$\frac{v_{dc}}{3}$	$\overline{v_{f(6)}}$	$\sqrt{\frac{2}{3}}v_{dc}e^{j\frac{-\pi}{3}}$
7	1	1	1	0	0	0	$\overline{v_{f(7)}}$	0

Tableau(2-3) Tensions générées par l'onduleur de tension

2.4 Commande des filtres actifs

La partie commande se divise généralement en deux parties :

La première, qui est d'une grande importance pour les performances du filtre, est la génération des signaux harmoniques de référence.

La seconde est la génération des signaux de contrôle servant à l'ouverture et à la fermeture des semi-conducteurs.

Ces deux parties sont cruciales au niveau de la performance du filtre actif.

Il est à noter que la partie commande peut être réalisée à l'aide de composants analogiques et numériques

2.4.1 Génération des signaux de référence

La génération de signaux de référence servant au contrôle de l'ouverture et de la fermeture des semi-conducteurs de l'onduleur est réalisée à l'aide d'algorithmes de contrôle que l'on peut classer dans les domaines **temporels** et **fréquentiels**

2.4.1.1 Identification dans le Domaine Fréquentiel

Les stratégies de contrôle dans le domaine fréquentiel sont basées sur l'analyse fréquentielle de la tension ou du courant non sinusoïdaux, pour en extraire les harmoniques de compensation [31].

L'utilisation de la transformation de Fourier, nous permet de séparer les composantes harmoniques des signaux pollués et combinées pour générer les commandes de compensation [75].

Les méthodes du domaine fréquentiel nécessitent une grande capacité de mémoire de calcul et les résultats prévus au cours de l'état transitoire peuvent être imprécises

2.4.1.1.1 TRANSFORMÉE DE FOURIER RAPIDE (FFT)

Dans son principe, la transformée de Fourier est appliquée au signal capté de tension ou de courant.

Les composantes harmoniques du signal sont d'abord séparées en éliminant la composante fondamentale après on applique la transformée de Fourier inverse pour estimer le signal de référence de compensation dans le domaine temporel.

Le principal inconvénient de cette technique est le calcul difficile des coefficients de Fourier.

Ceci fait qu'il est impossible pour une application en temps réel avec différentes charges dynamiques [82-83].

2.4.1.1.2 TRANSFORMÉE DE FOURIER DISCRÈTE (DFT)

Est une transformation mathématique des signaux discrets qui donne à la fois l'amplitude et la phase de l'harmonique souhaité :

$$X_h = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot \cos\left(\frac{2\pi \cdot h \cdot n}{N}\right) - j \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot \sin\left(\frac{2\pi \cdot h \cdot n}{N}\right) \quad (2.12)$$

$$\overline{X_h} = X_{hr} + j \cdot X_{hi} \quad (2.13)$$

$$|X_h| = \sqrt{X_{hr}^2 + X_{hi}^2} \quad (2.14)$$

Où:

N est le nombre d'échantillons fondamentale par période; x(n) est le signal d'entrée (tension ou courant) au point N.

X_h est le vecteur de Fourier complexe de la h^{em} harmonique du signal d'entrée

X_{hr} est la partie réelle de X_h; X_{hi} est la partie imaginaire de X_h.

|X_h| est l'amplitude du vecteur; φ_h est la phase du vecteur [81].

2.4.1.1.3 TRANSFORMEE DE FOURIER DISCRETE RECURSIVE (DFTR)

La transformée de Fourier discrète récursive (**DFTR**) utilise le même principe que la **DFT**, mais la (**DFTR**) est calculée sur une fenêtre glissante.

La fenêtre décale chaque temps d'échantillonnage avec un nombre fixe d'échantillons.

Ainsi, l'analyse **DFT** peut effectivement être effectuée sur les échantillons nouvellement obtenus. La seule différence entre le réel et les fenêtres précédentes sont les premiers et derniers échantillons.

Tous les autres échantillons sont les mêmes par conséquent, il n'est pas nécessaire d'échantillonner à nouveau [84].

2.4.1.2 Identification dans le Domaine Temporel

Le principe de la stratégie d'identification dans le domaine temporel est d'extraire par filtrage les harmonique de tension ou de courant en temps réel, en séparant le fondamental des harmoniques.

Cette technique utilise des formules algébriques faciles à implanter et réduit considérablement l'effort de calcul; s'ajoute a cela le fait qu'elle permet d'identifier tous les harmoniques [31]; d'autre part elles sont largement utilisées pour le calcul de courant de référence [85].

La plus connue de ces stratégies qui a fait ses preuves, est sans doute la méthode des puissances instantanées, [23- 26], le référentiel synchrone $d-q$ [27].

2.4.1.2.1 THEORIE DE LA PUISSANCE INSTANTANEE (PQ)

Cette méthode est basée sur la mesure des variables instantanées triphasées présentes sur le réseau électrique avec ou sans composantes homopolaires.

Cette méthode est valide aussi bien en régime permanent qu'en régime transitoire.

Dans cet algorithme de contrôle **figure (2-11)**, les mesures des tensions et des courants exprimés sous forme triphasée ($a-b-c$) sont converties en système biphasé ($a-0$) équivalent à l'aide de la transformée de Concordia qui laisse la puissance invariante :

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{2/3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{2/3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

La puissance réelle instantanée p et la puissance réactive instantanée q peuvent être exprimées de façon équivalente en système biphasé par :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}$$

(2.17)

$$p = v_\alpha \cdot i_\alpha + v_\beta \cdot i_\beta \quad \text{Puissance réelle instantanée}$$

$$q = v_\alpha \cdot i_\beta - v_\beta \cdot i_\alpha \quad \text{Puissance imaginaire instantanée}$$

(2.18)

La puissance réelle instantanée ainsi que la puissance imaginaire instantanée peuvent être exprimées de la façon suivante :

(2.19)

$$\begin{aligned} p &= \bar{p} + \tilde{p} \\ q &= \bar{q} + \tilde{q} \end{aligned}$$

(2.20)

Où p et q sont, de façon respective, les composantes des puissances moyennes actives et réactives correspondant au courant de charge fondamentale (**50 Hz**), alors que \tilde{p} et \tilde{q} correspondent aux composantes alternatives liées au courant harmonique.

La compensation d'harmoniques par le filtre actif se fait par la génération de ces dernières :

$$p^* = \tilde{p}, \quad q^* = \tilde{q}$$

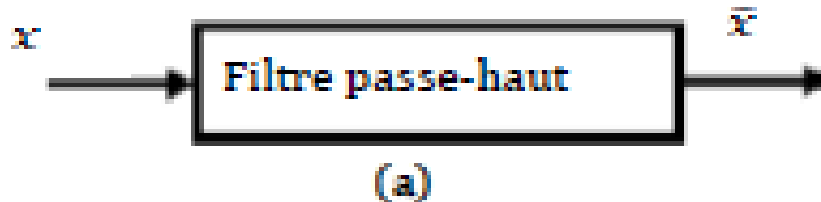
(2.21)

Séparation des puissances perturbatrices

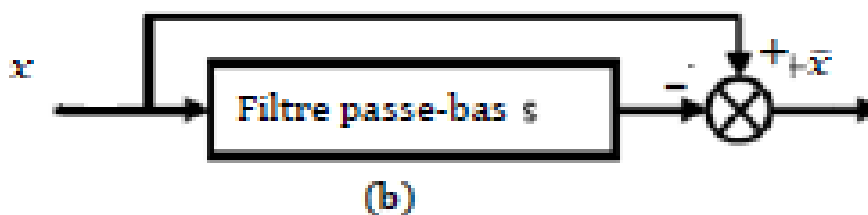
Pour l'élimination de la composante fondamentale dans les équations (2.19) et (2.20) s'effectue à l'aide de deux filtre :

- ✓ Un filtre passe- haut est un filtre qui laisse passer des composantes perturbatrices (la partie alternative) et qui atténue la composante fondamentale (la partie continue).
- ✓ Un filtre passe- bas est un filtre qui laisse passer la composante fondamentale (la partie continue) et qui atténue des composantes perturbatrices (la partie alternative).

Les deux types de filtre d'extraction sont présentés à la figure suivante



a) Filtre Passe haut



b) Filtre Passe bas

Figure (2-10): Schéma de principe de la méthode séparation des puissances

Calcul des courants harmoniques

En inversant la relation (2.17), Nous pouvons recalculer les courants dans le repère α - β comme le montre l'équation (2.22)

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha}^* \\ i_{\beta}^* \end{bmatrix} = \frac{1}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} \begin{bmatrix} v_{\alpha} & -v_{\beta} \\ v_{\beta} & v_{\alpha} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p^* \\ q^* \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

En considérant les équations (2.20) et (2.22), nous pouvons séparer le courant dans le repère $(\alpha$ - $\beta)$ en trois composantes, active, réactive à la fréquence fondamentale et les harmoniques.

Ceci conduit à :

$$\begin{bmatrix} I_{\alpha} \\ I_{\beta} \end{bmatrix} = \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_{\alpha} & -V_{\beta} \\ V_{\beta} & V_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{p} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}}_{\text{Courant actif}} + \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_{\alpha} & -V_{\beta} \\ V_{\beta} & V_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \bar{q} \end{bmatrix}}_{\text{courant réactif}} + \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_{\alpha} & -V_{\beta} \\ V_{\beta} & V_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{p} \\ \bar{q} \end{bmatrix}}_{\text{courants harmoniques}}$$

Les courants de compensation de référence se calculent par la formule suivante :

$$\begin{bmatrix} I_{\text{ref1}} \\ I_{\text{ref2}} \\ I_{\text{ref3}} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ 1 & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{\text{ref}\alpha} \\ I_{\text{ref}\beta} \end{bmatrix}$$

(2.23)

Schéma de l'identification par la méthode de puissances instantanées :

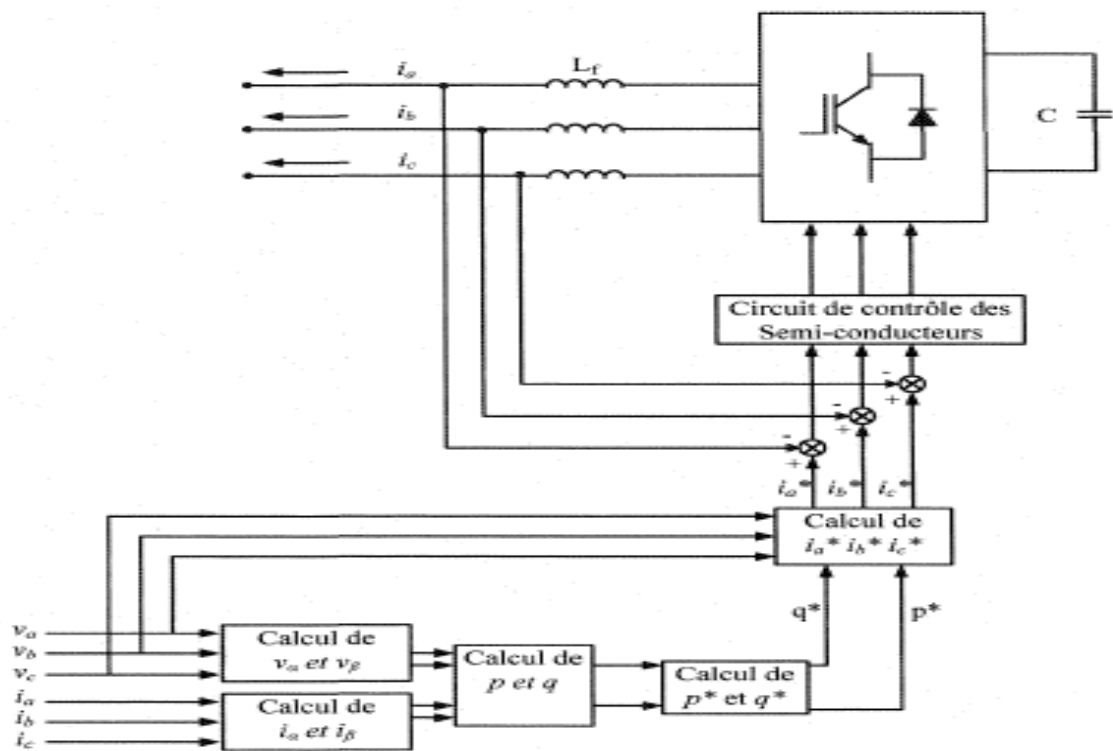


Figure (2-11) : Filtre actif commandé par la méthode des puissances instantanées

2.4.1.2.2 THEORIE DU REFERENTIEL SYNCHRONE (DQ)

Le terme fondamental de la théorie (**dq**) est le résultat de la transformation vectorielle des signaux d'entrée (les courants de charge pour notre cas) qui sont initialement réalisés dans les coordonnées abc (repère de référence fixe) vers les coordonnées (**dq**) (repère tournant avec la fréquence fondamentale) par la transformation de Park **figure (2-12)**

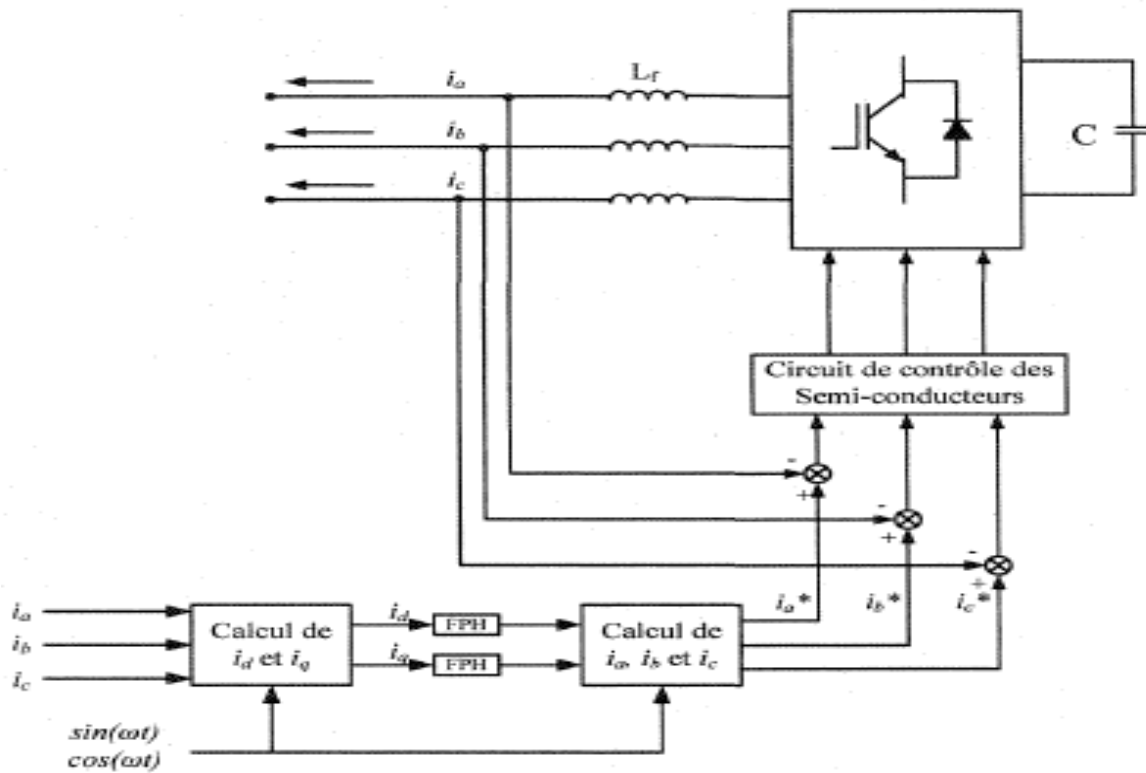


Figure (2-12) : Filtre actif commandé par la méthode du référentiel synchrone

ceci permet de transformer la composante fondamentale du courant en une composante continue et les composantes harmoniques du courant en des composantes alternatives. Cela nous permet d'éliminer à l'aide d'un simple filtre passe bas

La transformation est définie comme suit :

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \sin(\omega t) & \sin(\omega t - 2\pi/3) & \sin(\omega t + 2\pi/3) \\ \cos(\omega t) & \cos(\omega t - 2\pi/3) & \cos(\omega t + 2\pi/3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ia} \\ i_{ib} \\ i_{ic} \end{bmatrix}$$

(2.24)

Où : θ qui représente la position angulaire du repère tournant est une fonction linéaire de la pulsation angulaire. Ce repère de référence tourne à une vitesse constante en synchronisme avec les tensions triphasées . La référence harmonique sera extraite des courants dans le repère stationnaire à l'aide d'un FMV.

En l'absence du neutre, seule les composantes alternatives seront présentées à la sortie du système filtre-soustracteur. En plus, en insérant ce système-là uniquement sur l'axe d , tout le courant sur l'axe q sera disponible comme référence. Par conséquent, la puissance réactive de la charge sera compensée en plus des harmoniques

Utilisons la transformation inverse de *Park*, les références dans le repère triphasé seront :

$$\begin{bmatrix} i_{pa} \\ i_{pb} \\ i_{pc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\omega t) & \cos(\omega t) \\ \sin(\omega t - 2\pi/3) & \cos(\omega t - 2\pi/3) \\ \sin(\omega t + 2\pi/3) & \cos(\omega t + 2\pi/3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_w \\ i_v \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

Après la transformation des courants de la charge polluante dans le repère stationnaire, ces derniers sont définis dans le repère synchrone par :

$$\begin{bmatrix} i_w \\ i_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_w \\ i_v \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

2.4.2 Génération des signaux de contrôle

Une autre étape importante est celle de la génération des signaux de contrôle des semi-conducteurs de l'onduleur du filtre actif.

2.4.2.1 La commande de l'onduleur

L'objectif de la commande de l'onduleur est de déterminer les instants d'ouverture et de fermeture des interrupteurs qui le composent de façon à obtenir une tension de sortie, côté alternatif, qui suit le plus fidèlement possible la consigne ou tension de référence (pas forcément sinusoïdale) en minimisant ses harmoniques non désirées (harmoniques de commutation) et en optimisant l'amplitude pour une tension du bus continue donnée[49][50].

Le choix du type de commande dépend essentiellement de deux paramètres : d'une part des caractéristiques souhaitées de la tension de sortie (distorsion admissible, spectre basse fréquence souhaité, etc.) et d'autre part de la

fréquence de découpage des semi-conducteurs utilisables à la puissance de l'application.

Toutefois, deux méthodes de commande peuvent être utilisées :

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

2.4.2.1.1 COMMANDE PAR HYSTERESIS

La commande par hystérésis est très couramment utilisée de par sa simplicité d'utilisation et sa robustesse. En fait, cette stratégie assure un contrôle satisfaisant du courant sans exiger une connaissance poussée du modèle du système à contrôler ou de ses paramètres.

La **figure (2-13)** expose son principe qui utilise l'erreur existant entre le courant de référence et le courant produit par l'onduleur, cette erreur est comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis.[13]

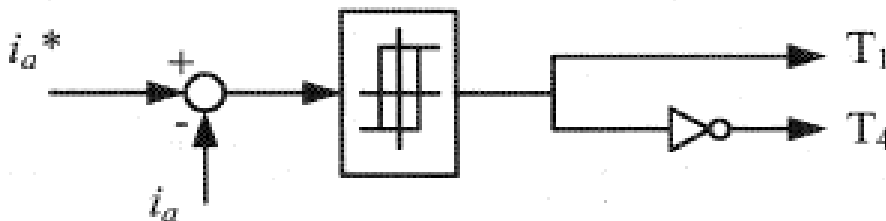


Figure (2-13): Principe de la commande des courants par hystérésis.

Dès que l'erreur atteint la bande inférieure ou supérieure, un ordre de commande de manière à rester à l'intérieur de la bande.

La simplicité, comme le montre la **figure (2-13)**, est le principal avantage de cette technique. En revanche, les commutations évoluant librement à l'intérieur de la bande d'hystérésis, on ne peut pas maîtriser correctement le spectre haut fréquence dû aux fréquences de commutations.

Ce problème peut être résolu par une autre stratégie de commande qui peut être proposée à savoir la commande par hystérésis modulée. Mais dans cette stratégie de commande, il est difficile de définir la largeur de la bande d'hystérésis [13;32].

2.4.2.1.2 COMMANDE PAR MLI

La Modulation de Largeur d'Impulsion, consiste à adopter une fréquence de commutation supérieure à la fréquence des grandeurs de sortie [LAB95], et à reproduire la valeur moyenne du signal de sortie à chaque période de commutation en agissant sur la durée d'application des tensions positives et négatives par rapport au point milieu du bus continu.

Le principe de cette MLI est représenté par la **figure (2-14)**.

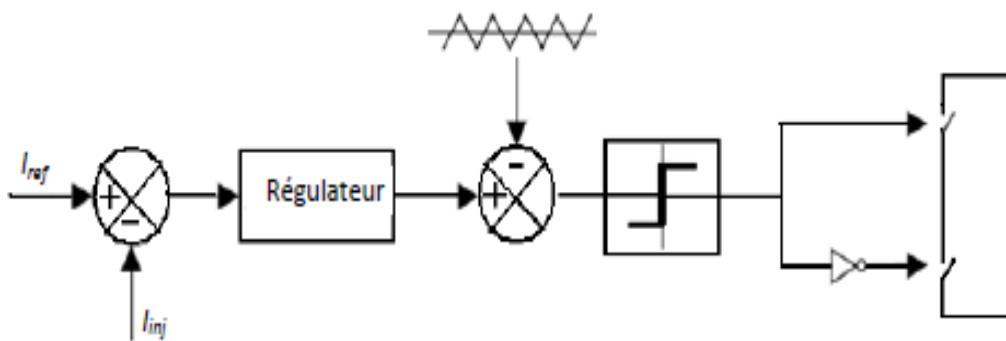


Figure (2-14) : Principe de la MLI

La méthode classique pour déterminer les instants de commutation des interrupteurs consiste à utiliser les intersections d'une onde de référence ou modulateur qui représente la tension de sortie souhaitée, généralement sinusoïdale, avec une onde de modulation ou porteuse de fréquence élevée f_m chargée d'imposer les périodes de modulation, généralement triangulaire, d'où son appellation « modulation sinus - triangle ».

Cette méthode est appelée la MLI à échantillonnage régulier où on peut distinguer deux méthodes :

- ✦ *la MLI à échantillonnage régulier symétrique où la référence est échantillonnée à chaque période de la porteuse.*
- ✦ *la MLI à échantillonnage régulier asymétrique où la référence est échantillonnée à la demipériode de la porteuse.*

En raison de sa simplicité elle reste la technique la plus utilisée [NON94]. Le signal de commande β_i ($i = 1,2,3$ avec $-1 < \beta < 1$) est comparé au signal triangulaire P_r , si le signal β est supérieur au signal P_r , on commande le transistor supérieur du bras et inversement les trois bras ont chacun un fonctionnement indépendant et les transistors du même bras sont commandés de façon complémentaire.

Les tensions en sortie de l'onduleur référencées par rapport au point milieu fictif ne prennent que deux valeurs ($V_o / 2$) et ($-V_o / 2$) selon le signal de ($\beta_i - P_r$).

Deux paramètres caractérisent cette commande et qui sont :

l'indice de modulation m ($m = f_d / f_o$, avec $m \gg 1$) et le taux de modulation r ($r = V_{Rmax} / V_{Pmax}$, avec $r \gg 1$) [SAH02] appelé aussi coefficient de réglage en tension.

La modulation est dite synchrone lorsque f_m est un multiple entier de f . En triphasé, pour avoir les formes d'ondes des tensions des trois phases identiques, on choisit un indice de modulation m multiple de 3.

2-5 Méthode de régulation par PI

Un régulateur doit satisfaire aux objectifs généraux de la régulation ainsi qu'aux contraintes liées au rejet des perturbations. Dans le cas d'un régulateur aussi simple que le régulateur *PI*, et à cause du manque de degré de liberté que nous impose ce dernier, seule la poursuite des références pour un point de fonctionnement fixe pourra être envisagée. A cela s'ajoute le problème du compromis à trouver dans le cas d'une structure de *filtre actif parallèle* avec un filtre de sortie du premier ordre (choix de l'inductance). En effet, un régulateur

PI ne

peut pas assurer, avec les seuls paramètres de correction *KP* et *KI*, les objectifs de régulation en boucle fermée pour un système d'origine d'ordre supérieur à un.

Par conséquent, pour résoudre des problèmes plus complexes de contrôle-commande de *filtre actif parallèle*, il est souhaitable d'aborder des régulateurs plus avancés, dont le nombre de paramètres se détermine en fonction de l'ordre du système d'origine. Le choix d'une méthode de régulation basée sur un régulateur *RST* peut répondre à ces critères de régulation plus sévère.

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté le principe du filtre actif parallèle comme une solution de dépollution des courants harmonique et énergies réactif produite par des charges non-linéaires.

La partie puissance et la partie commande ont été présenté d'une manière détaillé.

Nous avons présenté successivement l'onduleur de tension deux niveaux ainsi que l'element de stockage et le filtre de sortie pour la partie puissance et les techniques de commandes de l'onduleur pour la partie commande(hystéresis et MLI).

CHAPITRE 3

Introduction

Après avoir étudié dans le chapitre précédent l'algorithme l'identification des courants harmoniques de références, ainsi que les stratégies de commande du filtre actif dans le chapitre précédent, nous allons présenter dans ce chapitre, la simulation sous PSIM de notre model d'étude, dans le but d'assurer la compensation les courants harmoniques.

3.1 .Structure générale du filtre parallèle

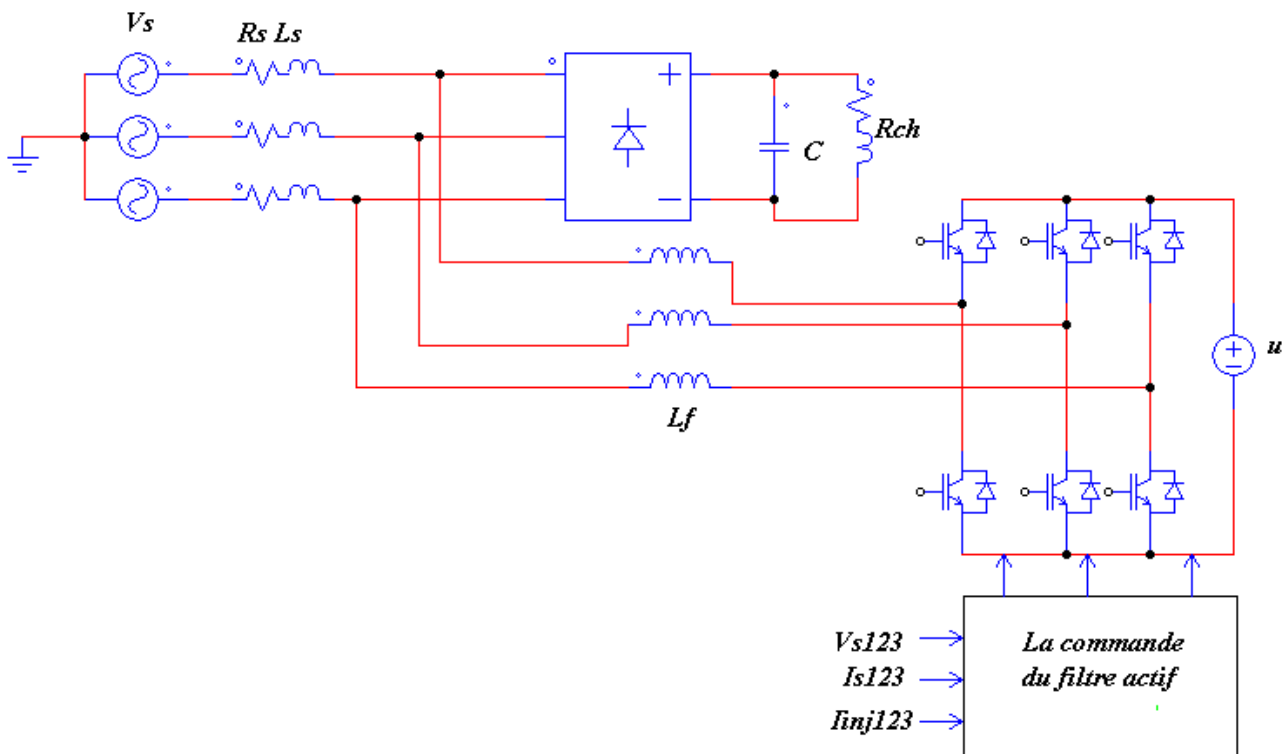


Figure (3.1) :Structure générale du filtre actif parallèle.

3.2 .Modélisation et simulation du filtre actif parallèle

Le système simulé comporte un réseau électrique triphasé à trois fils, une charge non linéaire triphasé (pont à diodes) alimentant une charge de type RL et un filtre actif parallèle triphasé à structure tension. Les paramètres de la source, de la charge polluante et celles du filtre actif parallèle sont donnés comme suit :

➤ **Modèle de la source :**

- ❖ Source de tension alternative $V_s=380\text{v}$
- ❖ Fréquence $f = 50 \text{ H}$
- ❖ Résistance de ligne $R_s=0.5\Omega$
- ❖ Inductance de ligne $L_s=0.01\text{H}$.

➤ **Modèle de la charge :**

La charge polluante consiste en un redresseur (pont à diodes) alimentant une charge composée d'une résistance $R_{ch}= 20 \Omega$ en série avec une inductance $L_{ch}= 0.02 \text{ H}$, une capacité $C= 0.0002 \text{ F}$

➤ **Modèle du filtre actif parallèle**

En sortie du filtre, on trouve un filtre passif, qui est représenté par une inductance L_f Ce filtre sert d'une part, à connecter l'onduleur de tension au réseau électrique, d'autre part à empêcher les composantes dues aux commutations de se propager sur le réseau électrique.

Les valeurs des éléments caractérisant le filtre actif parallèle sont données comme suit :

- $L_f= 0.001 \text{ H}$,
- $V_{dc}= 600 \text{ V}$,
- $C= 0.004 \text{ f}$
- la fréquence de la porteuse $F_p=5000 \text{ Hz}$
- la fréquence de la bande passante 20 Hz
- la bande d'hystérésis $\Delta i=0.5 \text{ A}$.

3.3. Résultats de simulation et analyse

3.3.1. Résultats de simulation sans compensation

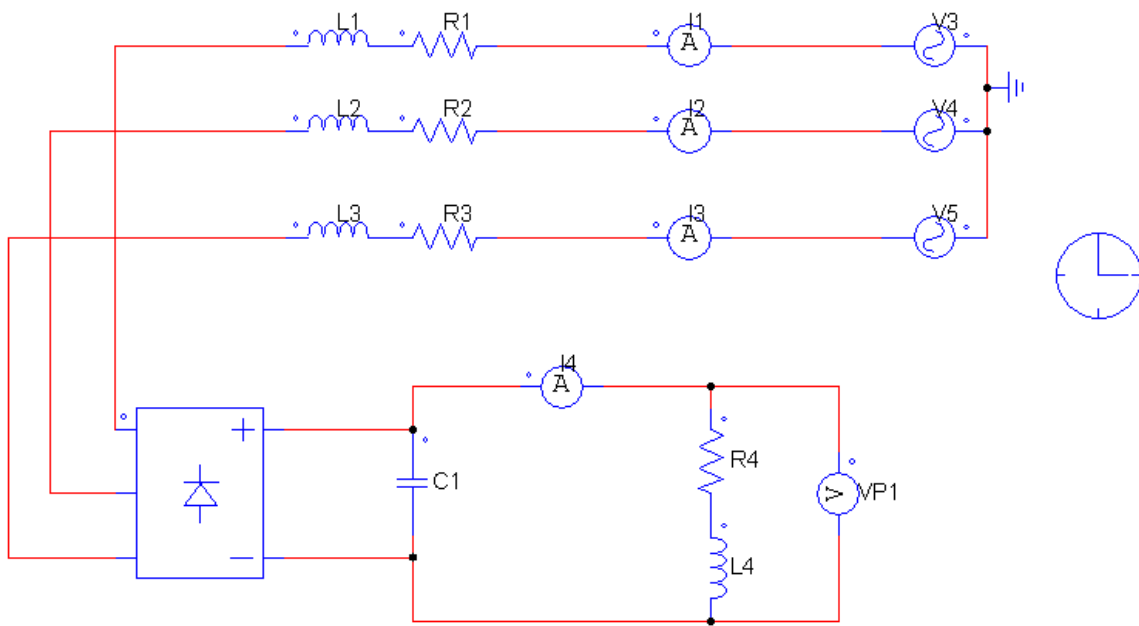


Figure (3.2) :Schéma de simulation du circuit étudié

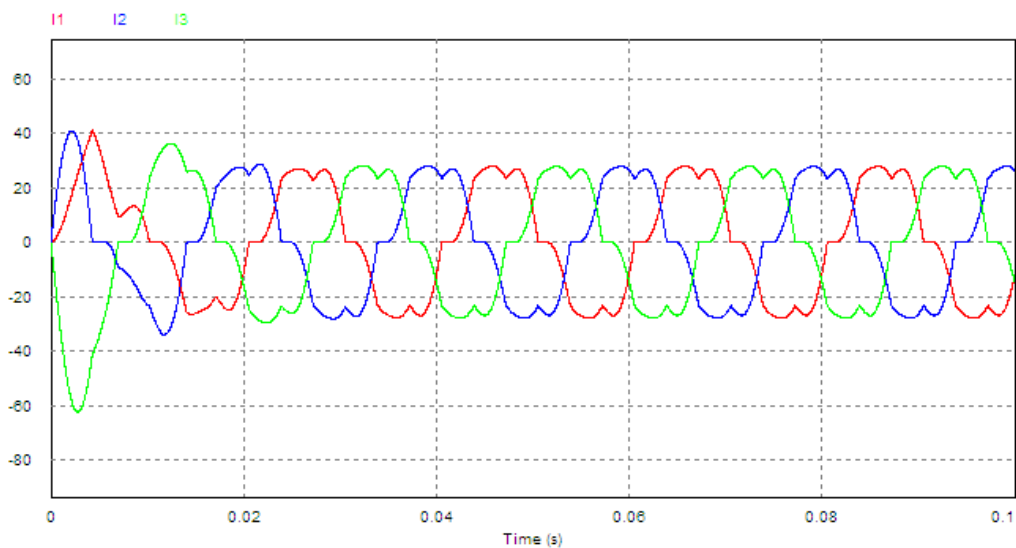


Figure (3.3) :Forme d'ondes du courant de source

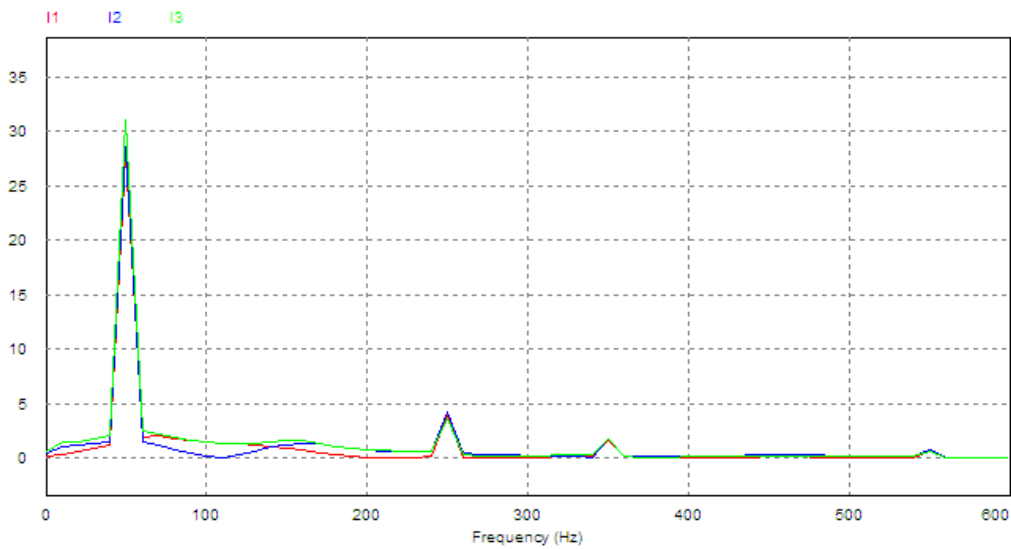


Figure (3.4) : Analyse spectrale du courant avant le filtrage

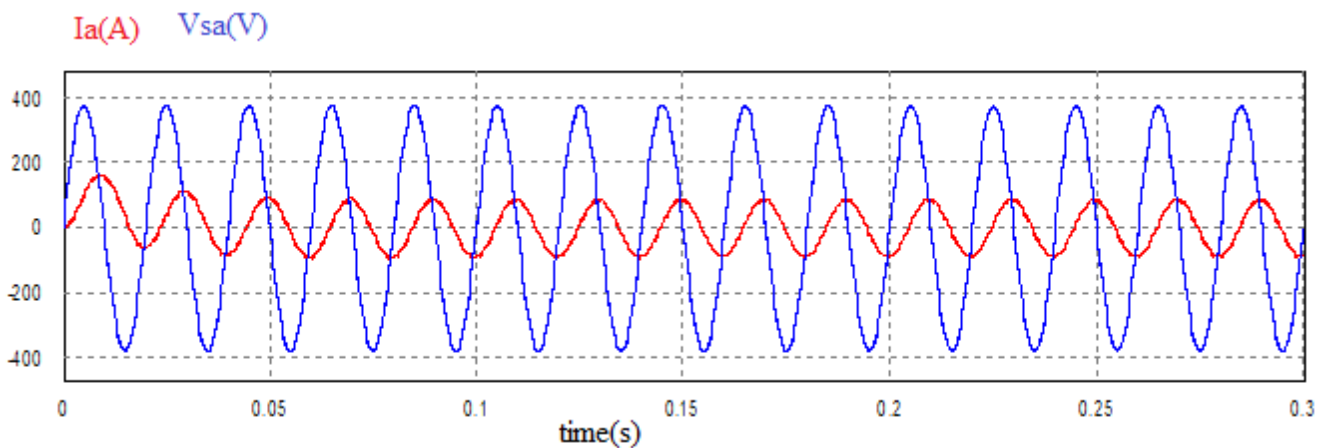


Figure (3.5) : Allure du courant I_a et la tension V_{sa} de la source

Les figures 3.3 et 3.4 représentent la forme du courant de source et son spectre harmonique respectivement .

On remarque que le courant de sources est très riche en harmonique de rang $(2K+1, K=2, \dots, 50)$ ainsi on obtient un THD de l'ordre de 15.44 %. Les harmoniques de rang 5 et 7 ont des valeurs non négligeables, par conséquent nous devons améliorer le THD de ce signal, Ou raccorde le filtre actif au réseau.

La figure 3.5 représente le courant et la tension de la source. On remarque que la tension n'est pas en phase avec le courant ce qui entraîne une consommation de l'énergie réactive et une dégradation du facteur de puissance.

3.4.Résultats de simulation :

✚ régulation de courant par MLI sinus –triangulaire .

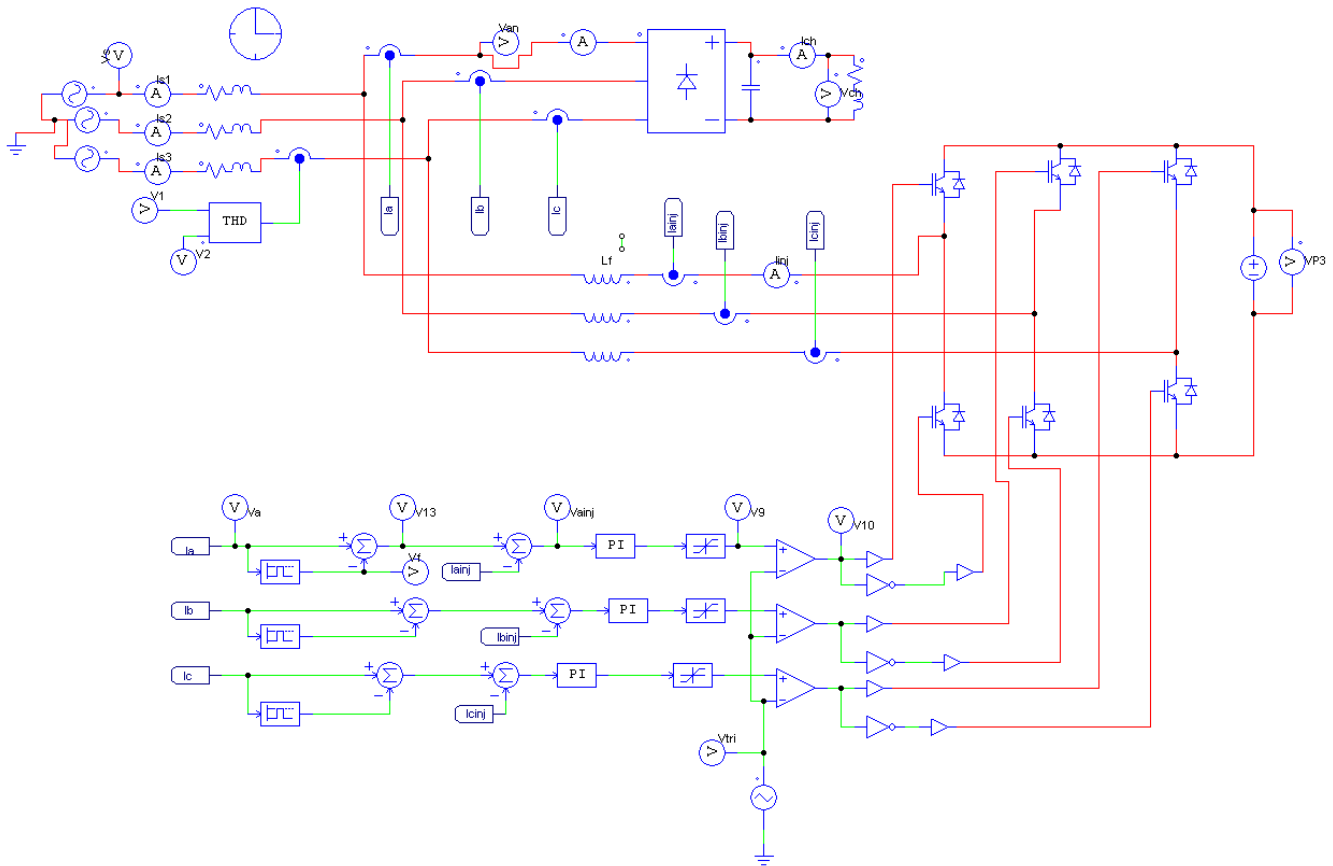


Figure (3.6) : Schéma bloc du filtre actif parallèle commandé par MLI sinus triangulaire

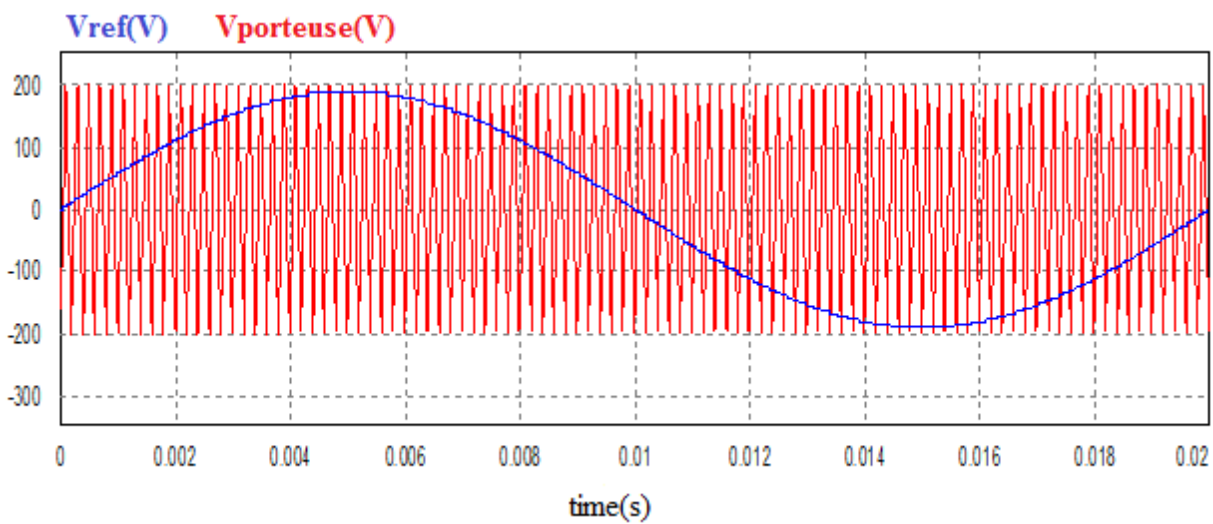


Figure (3.7) :Allure de la tension de référence et de la porteuse. ($V_{pet}V_{ref}$)

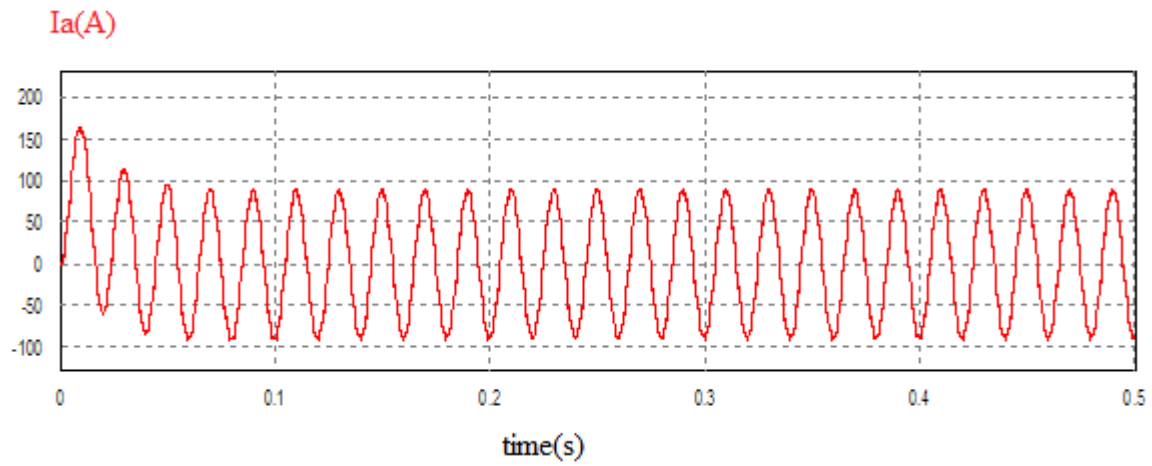


Figure (3.8) :Allure du courant I_a de la source

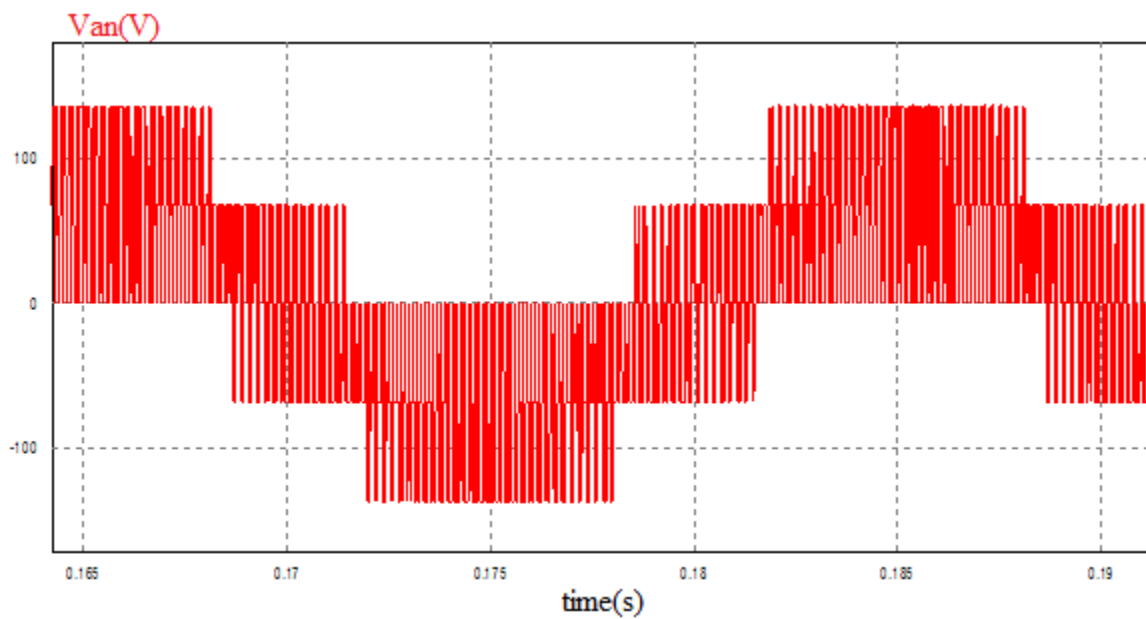
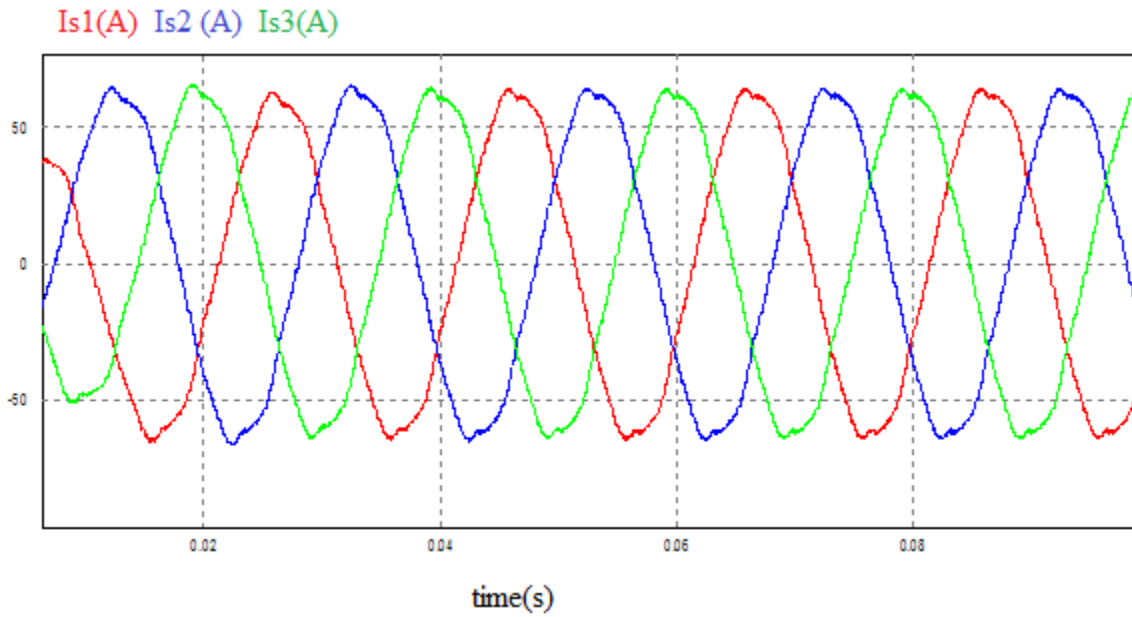


Figure (3.9) :Tension d'entrée du pont convertisseur V_{an}

3.4.1 Interprétation des résultats :

La figure IV.6 montre la comparaison entre la référence et la porteuse triangulaire V_{ref} de fréquence 5000 Hz. L'intersection entre les deux signaux représente les instants de commutation.



Figure(3.10) : Allures des courants de la source après compensation.

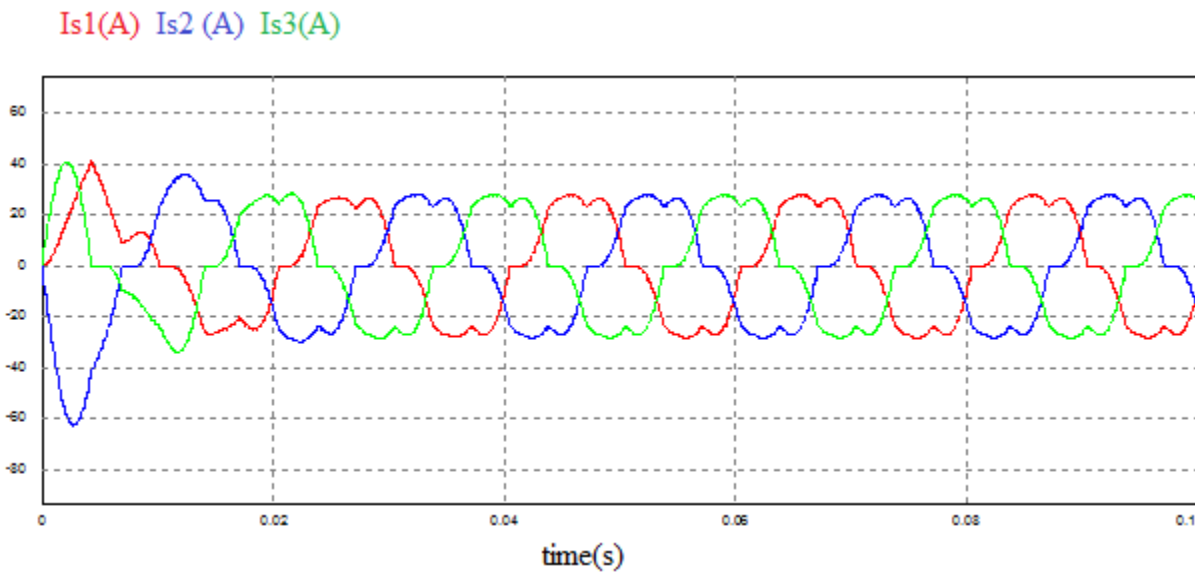


Figure (3.11) :Allures des courants de la charge.

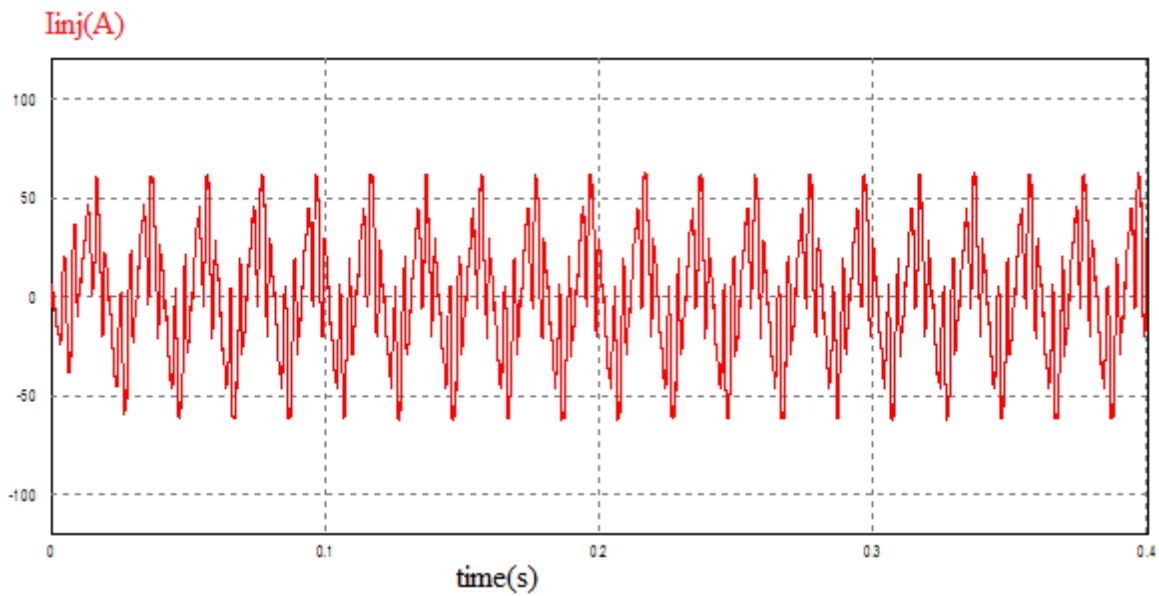


Figure (3.12) :Allure du courant injecté par le filtre actif.

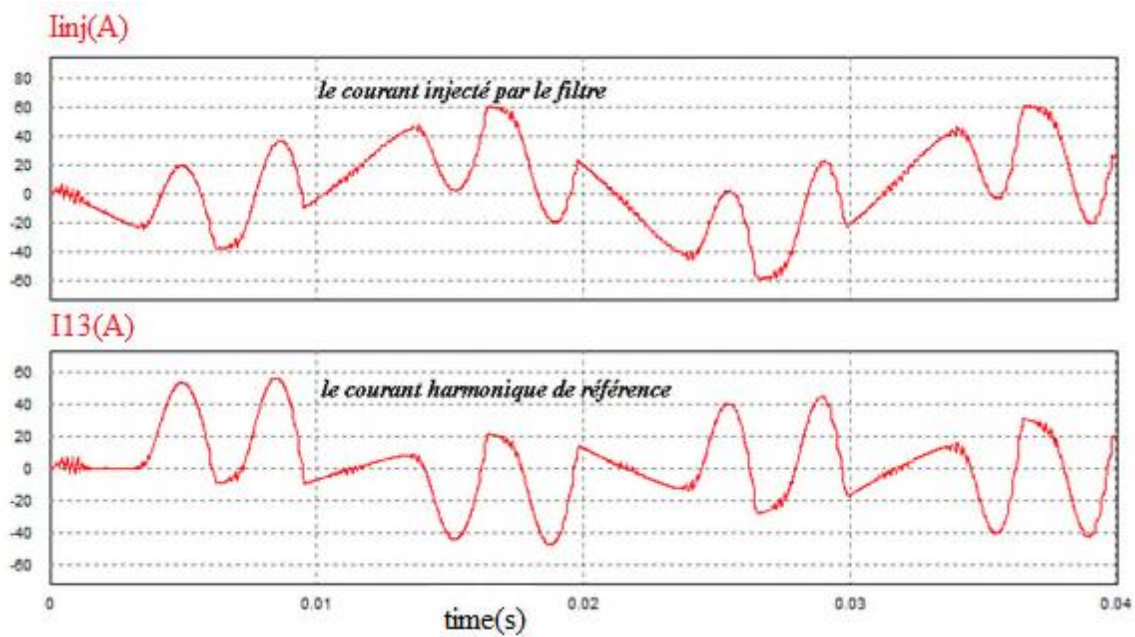


Figure (3.13) :Allures du courant harmonique de référence et le courant injecté par le filtre.

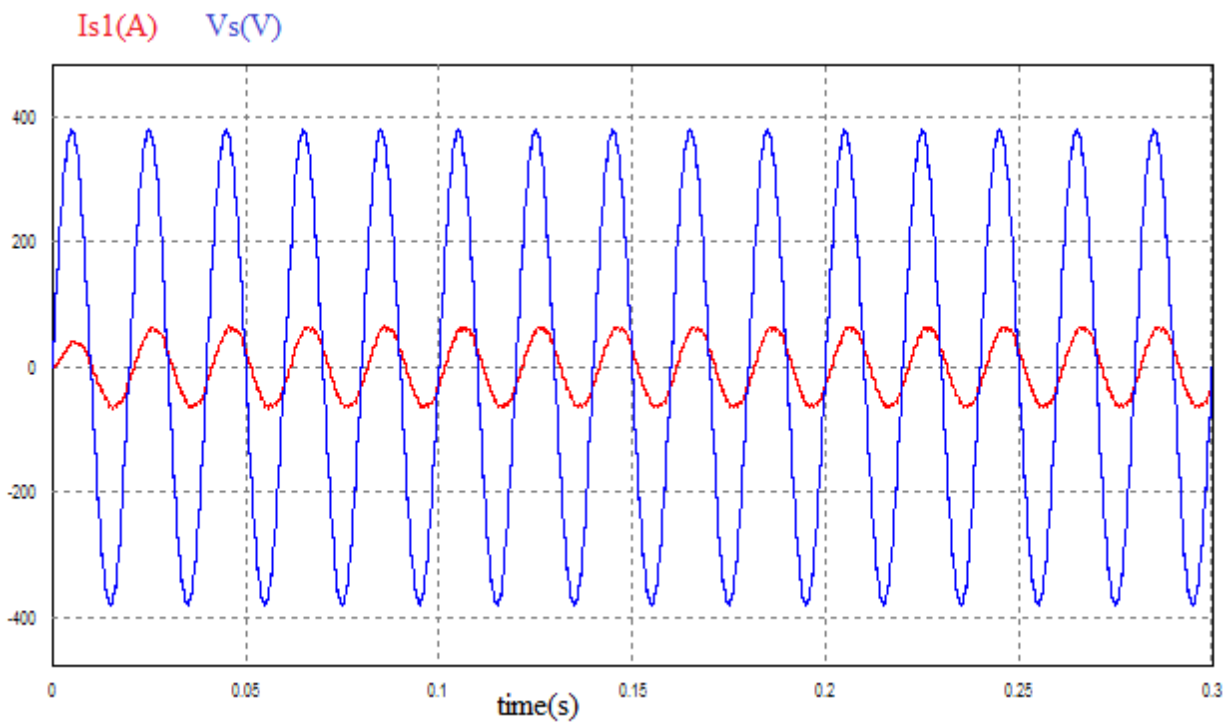


Figure (3.14) :Allures du courant et de la tension de la source.

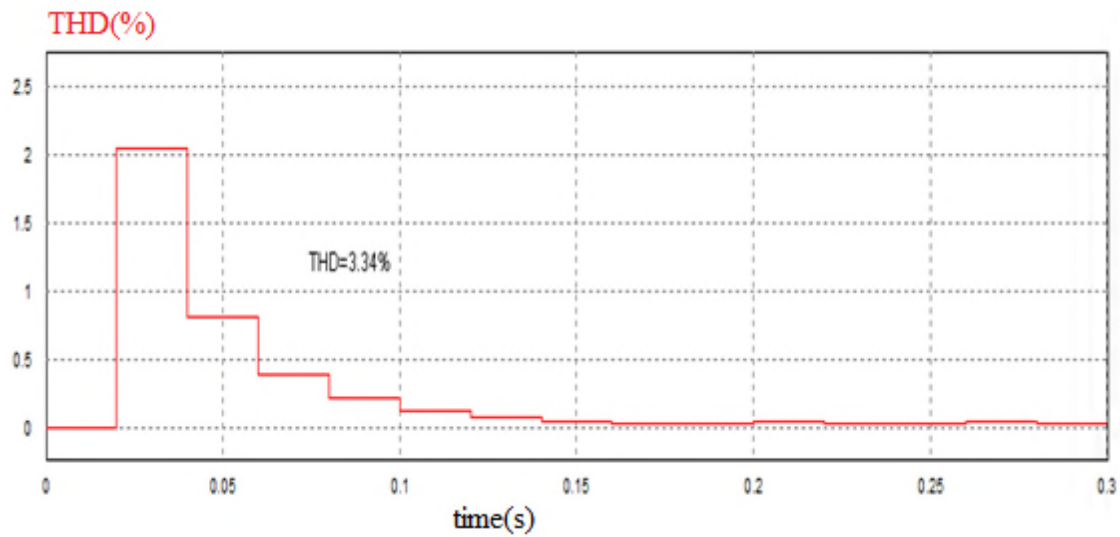


Figure (3.15) ;Le THD de courant de la source après compensation.

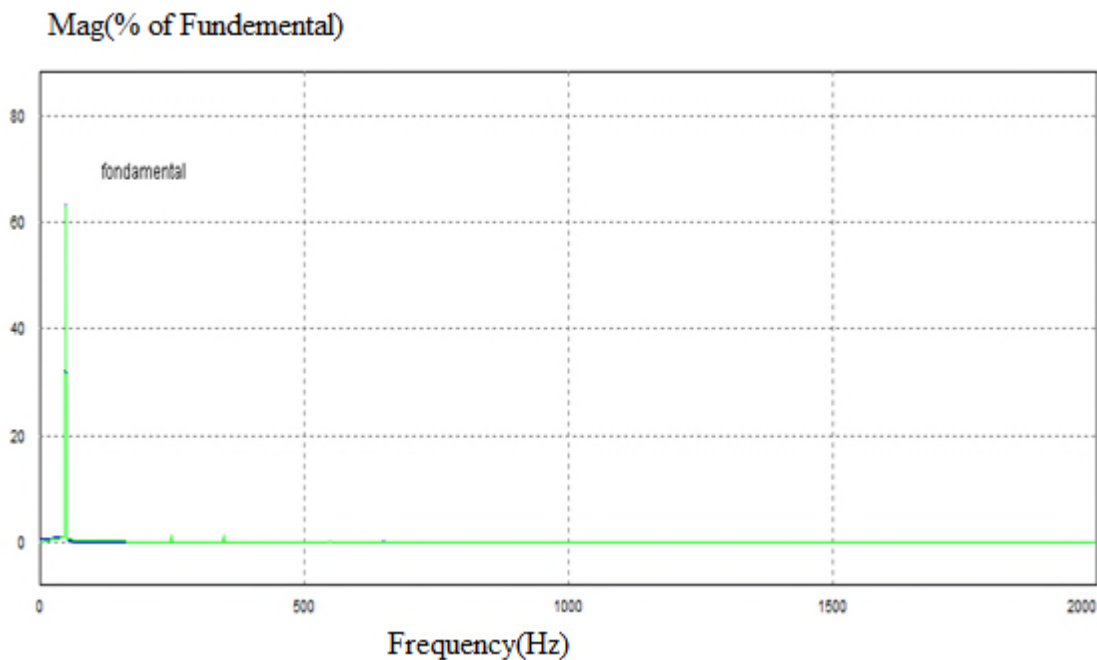


Figure (3.16) : Analyse spectrale du courant après compensation

3.5 Interprétation des résultats

La figure IV.10 représente les allures des courants de la source dans le cas où l'onduleur est commandé par MLI sinus-triangulaire. On constate que la forme est sinusoïdale, ce qui minimise les harmoniques.

La figure IV.13, représente les allures des courants harmoniques de référence I_{13} et le courant injecté par le filtre actif I_{inj} . On constate que le courant injecté suit bien sa référence.

La figure IV.14 représente l'allure du courant et de la tension de la source. On remarque que le courant est pratiquement en phase avec la tension, d'où un facteur de puissance unitaire.

La figure IV.15 représente le THD de courant de la source après compensation
 $THD = 3.34 \%$

La figure IV.16 représente l'analyse harmonique du courant de source après avoir fait la compensation. On remarque l'élimination des harmoniques de rang 5 et 7.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié le filtre shunt comme une solution de dépollution pour minimiser les harmoniques dans le réseau causés par une charge non-linéaire .

A cet effet, la méthode des courants a été utilisée pour identifier les courants harmoniques.

Les résultats de simulation ont montré les performances assez acceptables de cette méthode, ceci en plus de sa simplicité.

Conclusion Générale

L'objet de ce mémoire porte sur le filtrage actif, en l'occurrence la compensation des courants harmonique par le biais d'un filtre actif parallèle. Pour ce faire, nous avons structuré le contenu de notre travail en quatre chapitres.

Dans les deux au premiers chapitres, nous vous présenté les différentes sources de pollution des réseaux électriques, leurs conséquences sur le réseau et l'ensemble du matériel électrique ainsi que les différentes méthodes de dépollution proposées dans littérature (les méthodes traditionnelles et d'autres modernes).

Nous avons consacré le troisième chapitre à l'étude du filtre actif parallèle à deux niveaux. Pour se faire nous l'avons considéré en deux parties : la partie puissance dans laquelle nous avons présenté les différents organes qui constituent le filtre actif parallèle et leurs rôles, et la partie commande qui consiste d'abord en l'identification des courants harmoniques génèrent par la charge non linéaire. Et deux techniques de modulation, MLI et par hystérésis pour la commande l'onduleur,

Au quatrième chapitre nous avons étudié le filtre actif shunt ou la méthode des courants sont utilisées pour identifier les courants perturbateurs. En fin, nous avons présenté les résultats de simulation obtenus via PSIM, et qui montrent l'aptitude de notre filtre à améliorer le THD qui fut dégradé à cause des courants harmoniques engendrés par la charge non linéaire. En perspective, il serait intéressant de reprendre le travail en vue de son amélioration par l'emploi d'autres techniques d'identification et de commande du filtre et de comparer les différentes méthodes.



BIBLIOGRAPHIE

[SAH02] Y. SAHALI, M.K. FELLAH

Principe de la compensation harmonique des ondes multiniveaux. Conference on electrical engineering CEE'02, université de Batna, 2002.

[36] S. Karim « Continuité de service des convertisseurs triphasés de puissance et prototypage "FPGA in the loop application au filtre actif parallèle », Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, Janvier 2009

[37] OMEIRI AMAR «Simulation d'un filtre actif parallèle de puissance pour la compensation des harmoniques de courant », Thèse de doctorat, Université badjimokhtar annaba, 2007.

[38] Boucif Abdelmalek «Filtrage actif d'un réseau Électrique», Mémoire de Fin d'Etudes Université Mohamed Khider Biskra, 2013 / 2014

[39] H. Akagi « New trends in active filters for power conditioning », IEEE Trans. On Industry applications, vol. 32, No. 6, pp. 1312-1322, November/December 1996.

[40] H. Akagi « Control strategy and site selection of a shunt active filter for damping of harmonic propagation in power distribution systems », IEEE Trans. on power delivery, vol. 12, No. 1, pp. 354-363, January 1997.

[41] Sahli Abdeslem « *Filtrage actif et contrôle de puissances : application aux systèmes photovoltaïques interconnectés au réseau.* », Mémoire de Magister en génie électrique. universite ferhat abbas – setif UFAS (algerie)

- [42] **BENNAIDJA Tarek** « *Filtrage actif pour les réseaux déséquilibrés et distordus.* », Mémoire de Magister en génie électrique, université ferhat abbas – setif-1- ufas (algerie)
- [NON94] **P. NONNON**
Contribution à l'étude d'un redresseur à MLI à perturbations minimales du réseau.
Thèse de Doctorat, Institut national polytechnique de Lorraine, 1991.
- [LAB95] **F. LABRIQUE, G. SEGUIER, R. BAUSIERE**
Les convertisseurs de l'électronique de puissance : La conversion continu – alternatif. Volume 4, 2ème édition.
Technique et documentation LAVOISIER, 1995.
- [LAD02] **P. LADOUX, G. OLLÉ**
Système didactique, Compensateur d'harmoniques et de puissance réactive.
Publication RESELEC 2002
- [BEN 04] **Benhabib Mohamed Choukri**, « Contribution a l'étude des différentes topologies et commandes des filtres actifs parallèles a structure tension : Modelisation, simulation et validation experimentale de la commande », These de doctorat, Université Henri Poincare, Nancy 1/14/2004.
- [BEN 01] **Benhabib Mohamed Choukri, Shahrokh Saadat**, « A New Robuste Experimentally Validated Phase Locked Loop for Power Electronic Control », GREEN, Nancy, France.
- [10] **Hanane KHOUARA**, « application d'un filtre actif série au control de la tension à réseau à basse tension », Mémoire d'ingénieur d'Etat, Université de BATNA, 2006
- [11] **Abdelmadjid CHAOUI** « Filtrage Actif Triphasé Pour Charges Non Linéaires », Mémoire de magister, université de Sétif, 2010.
- [12] **Djamel NEKKAR**, « Contribution à l'étude des Stratégies de Commande des Filtres Actifs Triphasés », Mémoire de magister, université de souk-Ahras, 2014
- [13] **M.C. BENHABIB** « *Contribution à l'étude des différentes topologies et commande des filtre actif parallèle à structure tension : modélisation, simulation et validation expérimentale de la commande* », Thèse de doctorat, Université de Nancy, 2004

[14] M. ELBAR, B. NAAS1, « Application d'un Filtre Actif Quatre Bras à Trois Niveau à La Compensation des Harmoniques d'un Réseau à Quatre Fils »,

[15] PENG ,F.Z. LAI, J.S , «Genreralized instantaneous reactive power theory for three-phase power systems », IEEE Trans. On IM, vol.45, n.1, 2001