

**République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur
et de la Recherche scientifique**



**Université Echahid Hamma Lakhder d'El-Oued
Faculté des Sciences et de la Technologie**



**Mémoire de Fin d'Étude
En vue de l'obtention du diplôme de**

MASTER ACADEMIQUE

**Domaine : Sciences et Technologie
Filière: Génie Électrique
Spécialité: Commande Électrique**

Thème

**Compensation des harmoniques et de la
puissance réactive à l'aide du filtre actif parallèle**

Réalisé par:
ZIDANE Abdallah
ZELLOUMA Said

Encadré par:
ZELLOUMA Laid

Soutenu en Juin 2015

Dédicace

Ama Mère etmon Père

Ama Famille

Ames Sœurs mes Frères etmes Proches

A tous ceux qui m'ont nourri de leur savoir

Et à ceux qui partage de bons souvenirs

Remerciements

Nous exprimons notre profonde gratitude à monsieur **ZELLOUMA LAID**, Maître de conférences de l'Université d' El-Oued, pour avoir assumé la responsabilité de nous encadrer, nous orienter et de nous conseiller tout au long de la réalisation de ce travail ainsi pour la confiance qu'il nous a accordé.

Nous remercions vivement les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant d'être examinateur de notre mémoire.

Des remerciements vont également à tous ceux qui nous ont apporté, de près ou de loin, orientation, soutien et aide dans la réalisation et la concrétisation de ce travail

Nos vifs remerciements à tous nos enseignants du primaire à l'université, ainsi qu'aux électrotechniciens de la promotion 2015.

Nous tenons à remercier toutes personnes qui nous ont aidés dans notre cursus.

RESUME

Les convertisseurs statiques absorbent des courants non sinusoïdaux et consomment généralement de la puissance réactive. Ces deux phénomènes nouveaux sur le réseau électrique ont engendrés un certain nombre de problèmes allant du dysfonctionnement d'un équipement jusqu'à sa destruction.

Dans ce travail, on a traité l'élimination par un filtre actif parallèle des harmoniques générées par un pont redresseur triphasé non commandé, dans deux cas de charge RL et RC .

Une simulation par MATLAB SIMULINK de l'ensemble réseau, filtre actif, et charge, pour les stratégies de commande "hystérésis" est effectuée. La méthode de puissances instantanées réelles et imaginaires est utilisée pour calculer et identifier les courants harmoniques. Une analyse spectrale avant et après filtrage est obtenue pour comparer les résultats et déterminer l'efficacité du filtre actif parallèle.

Le THD du courant de charge avant filtrage est de 76,17% à été réduite après filtrage à 0,81% côté réseau pour une charge RC . Pour une charge RL , le THD avant filtrage est de 24.30% et à été réduite à 0.81%.

Ces résultats montrent aussi l'efficacité et les bonnes performances du filtre actif parallèle de puissance, qui a réduit le THD à une valeur inférieur à 5% correspondant aux recommandations et normes internationales.

ملخص

إن تفاقم استعمال الحملات غير الخطية والتي تمتص تيارات غير جيبيه و قدرة غير فعال ة أدت إلى ظهور تيارات غير مرغوب فيها في الشبكة مما أنتج مشاكل في نقل الطاقة الكهربائية قد تصل إلى حد تعطيل الأجهزة الكهربائية.

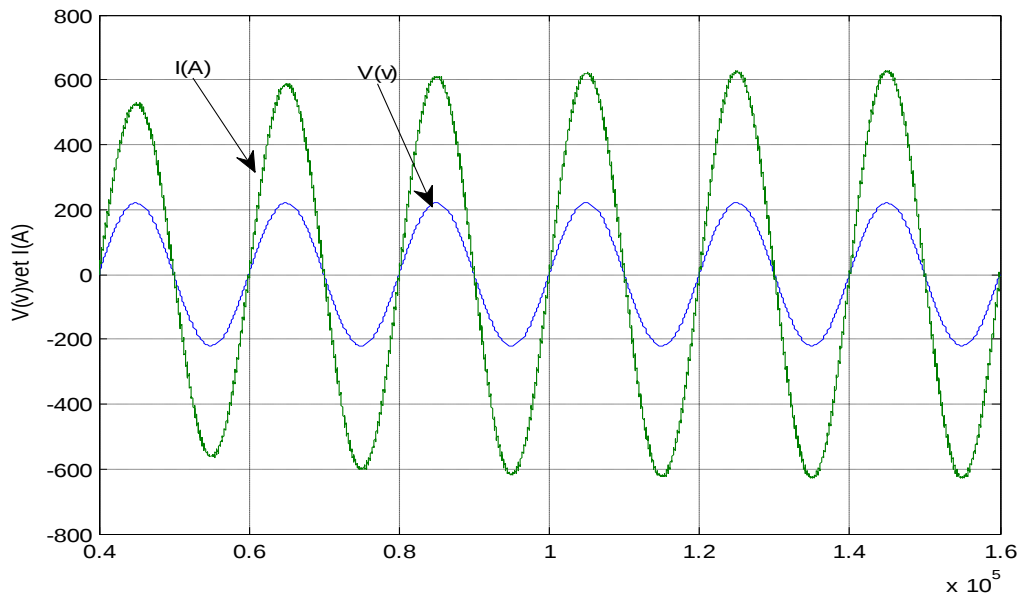
يهدف هذا العمل أساسا إلى المساهمة في معالجة التوافقيات الناتجة عن جسر مقوم ثلاثي الطور غير متحكم فيه بحمولة (م ذ و م س) بواسطة موج ثلاثي الطور متحكم فيه بطريقة الهستيريسيس .

إن جهد تغذية المموجيتطلب دراسة جيدة للحصول على أفضل ترشيح التوافقيات.

كذلك فإن حساب مكونات المرشح الفعال (R_f, L_f) يتطلب دقة كبيرة من أجل الحصول على نتائج مطابقة للواقع.

إن الكشف الجيد على تيارات التوافقيات بطريقة الاستطاعة الفعالة و الاستطاعة الارتكاسية يمكننا من المساهمة في القضاء على تيارات التوافقيات .

النتائج المتحصل عليها تبين لنا مدى نجاعة المرشح الفعال حيث وصل معامل تشوه التيار إلى 0.81% في كلا الحملتين هذه القيمة تتوافق مع التوصيات و الضوابط العالمية و التي تحدد قيمة هذا المعامل بـ 5%.



Liste des symboles

Symbole	Désignation
THD	Taux de distorsion harmonique
P	Puissance active
S	Puissance apparente
Q	Puissance réactive
D	Puissance déformante
I_h	Courant harmonique
F_p	Facteur de puissance
F_d	Facteur de distorsion
I_{ch}	Le courant de charge
FD	facteur de déplacement
R_d, L_d	L'impédance du redresseur
I_{s1eff}	courant fondamentale d'entrée
f	Fréquence de réseau
f_p	Fréquence de la porteuse
r	Le coefficient de réglage
U_r	la tension référence.
U_p	la tension porteuse
r	Le taux de la modulation
$S(t)$	signal MLI résultant.
m	L'indice de modulation
I_f	Le courant du filtre
I_{ref}	Le courant de référence a la sortie de bloc d'identification
V_{dc}	Tension de la source
$V_{s1, 2, 3}$	Les tensions aux points de raccordement
$I_{r1, 2, 3}$	Courants de référence
L_{cc}	Inductance de court circuit
R_{cc}	Résistance de court circuit
Z_{cc}	Impédance de court circuit
I_a, I_b, I_c	Courants des phases a,b,c

Sommaire

Introduction générale.....	01
Chapitre I:Généralités sur les harmoniques et leur méthode de dépollution	
I-1 Introduction	04
I-2 Définition des harmoniques	04
I-3Type des harmoniques	05
I-4 Décomposition d'un signal périodique.....	05
I-5 Les générateurs des harmoniques	07
I-5-1 Alimentation à découpage de type informatique	07
I-5-2 Pont redresseur triphasé	07
I-5-3 Charges d'éclairage.....	08
I-5-4 Les appareils à arc électrique.....	08
I-5-5 Alternateurs	08
I-5-6 Alimentations sans interruption (ASI).....	08
I-5-7 Saturation du circuit magnétique des machines	08
I-5-8 Distributeur d'énergie.....	08
Grandeur caractéristiques.....	08
1 Les différents types des charges	08
I-6-1-1 Charge non linéaire.....	08
I-6-1-2 Charge linéaire	08
I-6-2 la représentation graphique de l'amplitude des harmoniques en fonction de leur rang.....	09
I-6-3 Série de Fourier.....	09
I-7 Les effets des harmoniques.....	09
I-7-1 Les effets instantanés.....	10
I-7-2 Les effets différés	10
I-7-3 Influence des harmoniques sur le facteur de puissance.....	11
I-8 Méthodes des minimisations les harmoniques.....	12
I-8 -1 Méthodes traditionnelle.....	12
I-8 -1-1 Utilisation d'inductances anti-harmoniques.....	12
I-8 -1-2 Agir sur la structure de l'installation.....	12
I-8 -1-3 Surdimensionnement des installations électriques.....	12
I-8 -1-4 Pont dodécaphasé.....	12
I-8 -1-5-Filtres passifs d'harmoniques.....	13
A- Filtre résonant	13
B - Filtre amorti	14
I-8-2 Méthodes modernes.....	14
I-8-2 -1 Les redresseurs à MLI	14
I-8-2-2 Les filtres actifs	14
A- Le filtre actif parallèle.....	14
B- Filtrage actif série.....	15
C- Filtrage actif série-parallèle.....	15
I-8-2- 3 Filtre hybride	16
A- le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle.....	16
B- le filtre actif série connecté en série avec des filtres passifsparallèles	
C- le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle.....	17
I -9 Comparaison entre les remèdes de dépollution.....	17
I-10 Conclusion.....	17
	18

Chapitre II: Structure et commandé d'un filtre actif parallèle

II-1 Introduction.....	20
II-2 Principe du filtre actif parallèle.....	20
II-3 Structure d'un filtre actif parallèle.....	20
A- La partie puissance est constituée.....	21
B- La partie contrôle-commande est constituée.....	21
II-3-1 Structure tension.....	21
II-3-2 Structure courant.....	22
II-4 Notion de base sur les onduleurs.....	23
II-4-1 Onduleur de tension triphasé.....	23
II-4-2 Stratégies de commande d'un onduleur triphasé.....	24
II-4-2-1 La commande par hystérésis.....	24
II-4-2-2 La commande MLI sinus-triangle.....	24
II-5 Filtre de raccordement.....	25
II-6 Conclusion	27
Chapitre III : Identification des courants harmoniques	28
III-1 Introduction	30
III-2 La méthode d'identification des courants harmoniques.....	30
III-2-1 Généralités sur les différentes méthodes d'identification	30
III-2-2 Principe du fonctionnement de la méthode des puissances instantanées.....	30
III-2-2-1 Généralités sur les puissances instantanées.....	31
III-2-2-2 Séparation des puissances.....	31
III-3 Stratégie de l'identification.....	33
III-3-1 Calcul des courants perturbateurs.....	34
III-3-2 Algorithme d'identification.....	34
III-4 Conclusion	35
Chapitre IV: Modélisation et simulation du réseau perturbé	36
IV-1 Introduction.....	38
IV-2 schéma globale du système à simuler.....	38
IV-3 Calcul des paramètres de simulation.....	38
IV-4 Modélisation et simulation numérique.....	39
IV-4 -1 Modélisation et simulation du réseau électrique.....	41
IV-4 -2 Modélisation et simulation de la charge polluante.....	41
IV-4 -2-1 Développement en série de FOURRIER des courants de source (harmoniques du courant)	42
IV-4 -3 Modélisation et simulation du filtre actif parallèle.....	43
IV-5 Les critères de choix des interrupteurs de puissance de l'onduleur (FAP).....	44
IV-6 Simulation de l'ensemble réseau, filtre actif parallèle et charge polluante.....	44
IV-6-1 Commande Hystérésis.....	45
IV-6-1-1 Charge R-L.....	46
IV-6-1-2 Charge R-C.....	46
IV-7 Conclusion	49
Conclusion générale.....	54

Introduction générale

Ces dernières années, la progression spectaculaire et l'utilisation croissante des composants semi-conducteurs dans les systèmes électriques à entraîna conduit à la manifestation des problèmes liés aux perturbations harmoniques. Ces problèmes peuvent toucher les secteurs industriels (variateurs de vitesse, démarreurs électroniques....etc.) tertiaires (informatique, éclairage des bureaux, commerce) ou bien domestique (appareils électroménagers tel que les téléviseurs).

Les courants harmoniques sont générés principalement par les charges non-linéaires connectées au réseau électrique, ce type de charges absorbent des courants non-sinusoïdaux lorsque la tension est sinusoïdale. 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 indésirables. Parmi ces effets, on peut distinguer la déformation de la tension du réseau au point de raccordement, Cette pollution peut également provoquer l'échauffement des câbles et des équipements électriques ou bien encore l'arrêt soudain des machines tournantes, voire la destruction totale de tous ces équipements.

Afin de minimiser ces perturbations et améliorer la qualité de l'énergie électrique fournie par le distributeur, Plusieurs solutions existent, parmi celles-ci on distingue :

- ✓ modification du convertisseur statique polluant en termes de la topologie et/ou de la commande afin d'intervenir directement à la source des perturbations harmoniques.
- ✓ Surdimensionnement du matériel électrique.
- ✓ Action sur la structure de l'installation.
- ✓ Utilisation des dispositifs de filtrage (série, parallèle.....etc).

L'utilisation de dispositifs de filtrage tels que les filtres passifs résonnants et amortis peut ainsi empêcher les courants harmoniques de se propager dans les réseaux électriques. Ils peuvent également être utilisés comme compensateur de l'énergie réactive.

Cependant, le filtrage passif pose certains problèmes : manque d'adaptabilité lors de variations de l'impédance du réseau. Pour éviter ces inconvénients une autre solution consiste à mettre en œuvre un filtrage actif. La première solution consiste à connecter le filtre actif en parallèle avec le système polluant, la deuxième consiste à connecter un filtre actif en série avec le réseau dans ce cas le filtre se comporte comme une source de tension, malgré leur efficacité et leur robustesse les filtres actifs restent des solutions chères et volumineuses.

Les inconvénients des filtres passifs et des filtres actifs peuvent être simultanément limités en utilisant de nouvelles topologies de filtres actifs, appelées filtres hybrides. L'utilisation de filtres actifs hybrides est aujourd'hui considérée comme une solution qui permet de réduire le dimensionnement et par conséquent le coût des filtres actifs.

Le travail présenté dans ce mémoire concerne particulièrement l'étude par simulation d'un filtre actif parallèle alimenté par une source de tension continue. Le mémoire est organisé en quatre chapitres répartis comme suit :

- Premier chapitre: Dans ce chapitre nous présentons des généralités sur les perturbations harmoniques basse fréquence et leurs effets indésirables sur les équipements électriques puis les différentes méthodes traditionnelles et modernes qui permettent de réaliser la dépollution des réseaux électriques.
- Second chapitre: Dans ce chapitre nous étudions théoriquement la topologie du filtre actif parallèle à structure tension commandée par les deux stratégies MLI et hystérésis.
- Troisième chapitre : présente la méthode d'identification des courants de référence. Dans notre cas on a utilisé la méthode des puissances instantanées.
- Quant au quatrième chapitre, il est entièrement consacré à la modélisation et la simulation numérique de l'ensemble réseau d'alimentation, filtre actif parallèle et la charge polluante caractérisée par un pont redresseur triphasé tout diodes.

Les résultats de simulation obtenus sont présentés et commentés.

Chapitre I

Généralité sur les harmoniques

Chapitre I

Généralité sur les harmoniques

I.1. Introduction

L'objectif d'un réseau de distribution de l'énergie électrique est de fournir aux consommateurs une énergie propre avec des meilleures conditions techniques, dans le cas idéal cette énergie est distribuée sous forme de trois tensions constituant un système sinusoïdal triphasé. Les paramètres caractéristiques des systèmes triphasés sont les suivants :

- ✓ La fréquence.
- ✓ L'amplitude des tensions.
- ✓ La forme d'onde, qui doit être la plus proche possible d'une sinusoïde
- ✓ Le déséquilibre, la symétrie du système triphasé, caractérisée par l'égalité des modules des trois tensions et de leur déphasage relatif

Néanmoins, la forme d'onde du courant ou de tension relevée dans un réseau électrique industriel ou bien domestique peut être déformée et s'éloigne de la forme sinusoïdale, ce qui provoque l'apparition et la circulation des courants perturbateurs (les harmoniques) sur le réseau.

Dans ce premier chapitre on va essayer de donner des notions sur les harmoniques basses fréquences, les sources de ces perturbations et leurs effets sur les équipements électriques, puis les différentes solutions de dépollution des réseaux électriques.

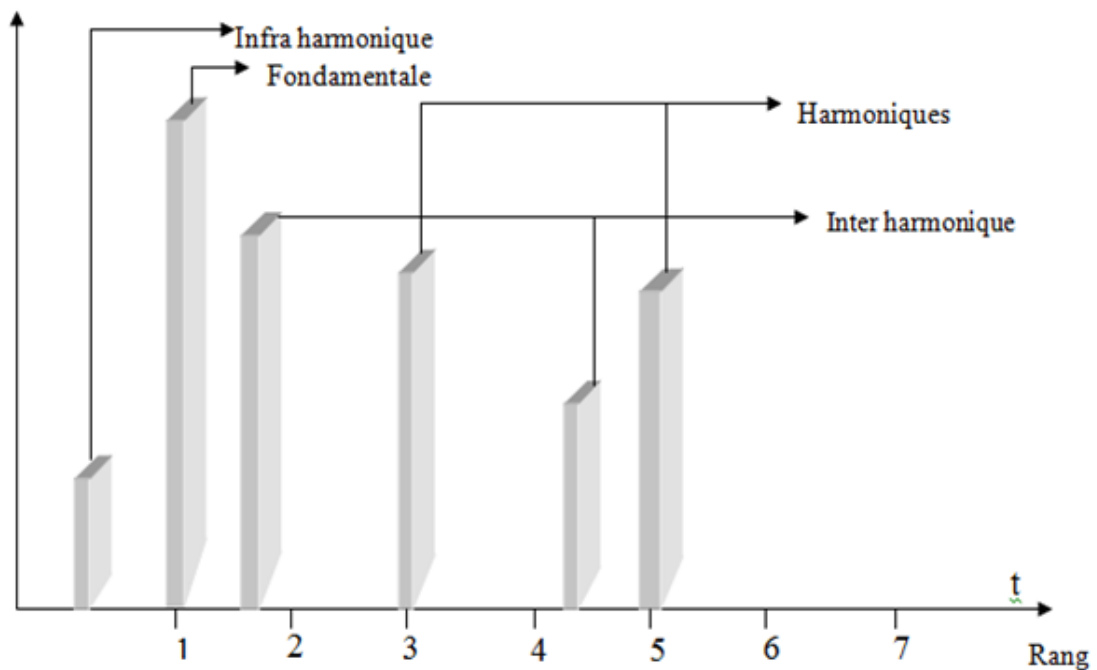
I.2. Définition des harmoniques

Les harmoniques sont des perturbations permanentes affectant la forme d'onde de la tension du réseau. Ces perturbations résultent de la superposition, sur l'onde fondamentale à 50Hz, d'ondes également sinusoïdales mais de fréquences multiples de celle de la fondamentale, due à la présence des harmoniques. Les récepteurs absorbent des courants non sinusoïdaux qui traversent les impédances du réseau et provoquent ainsi une déformation de la sinusoïde de tension d'alimentation. La déformation de la forme d'onde est caractérisée par l'apparition de fréquences harmoniques de tension. Le domaine de fréquence qui correspond à l'étude des harmoniques est généralement compris entre l'harmonique 2 et celui du rang 40[1].

I.3.Types desharmoniques

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

- ✓ **Inter harmoniques:** Ce sont des composantes sinusoïdales d'une grandeur qui n'est pas une fréquence multiple entière de celle du fondamental.
- ✓ **Infra harmoniques:** Ce sont des composantes de fréquences inférieures à celle du fondamental [1].



Figure(I-1): Représentation spectrale d'un signal périodique

I.4. Décomposition d'un signal périodique

L'analyse de Fourier permet de quantifier la distorsion harmonique d'un signal. Un signal périodique (tension ou courant) de forme quelconque et de fréquence f_0 se décompose en une somme de signaux sinusoïdaux dont chacun a une fréquence, dite harmonique, qui est un multiple entier de la fréquence fondamentale f_0 .

Ce multiple est appelé rang harmonique. Un exemple de cette décomposition est donné sur la figure (I-2). L'amplitude d'une composante harmonique est généralement exprimée en pourcentage de la grandeur fondamentale correspondante, c'est le taux de distorsion harmonique THD [2].

$$\text{THD} = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \left(\frac{I_h}{I_1} \right)^2} \quad (\text{I-1})$$

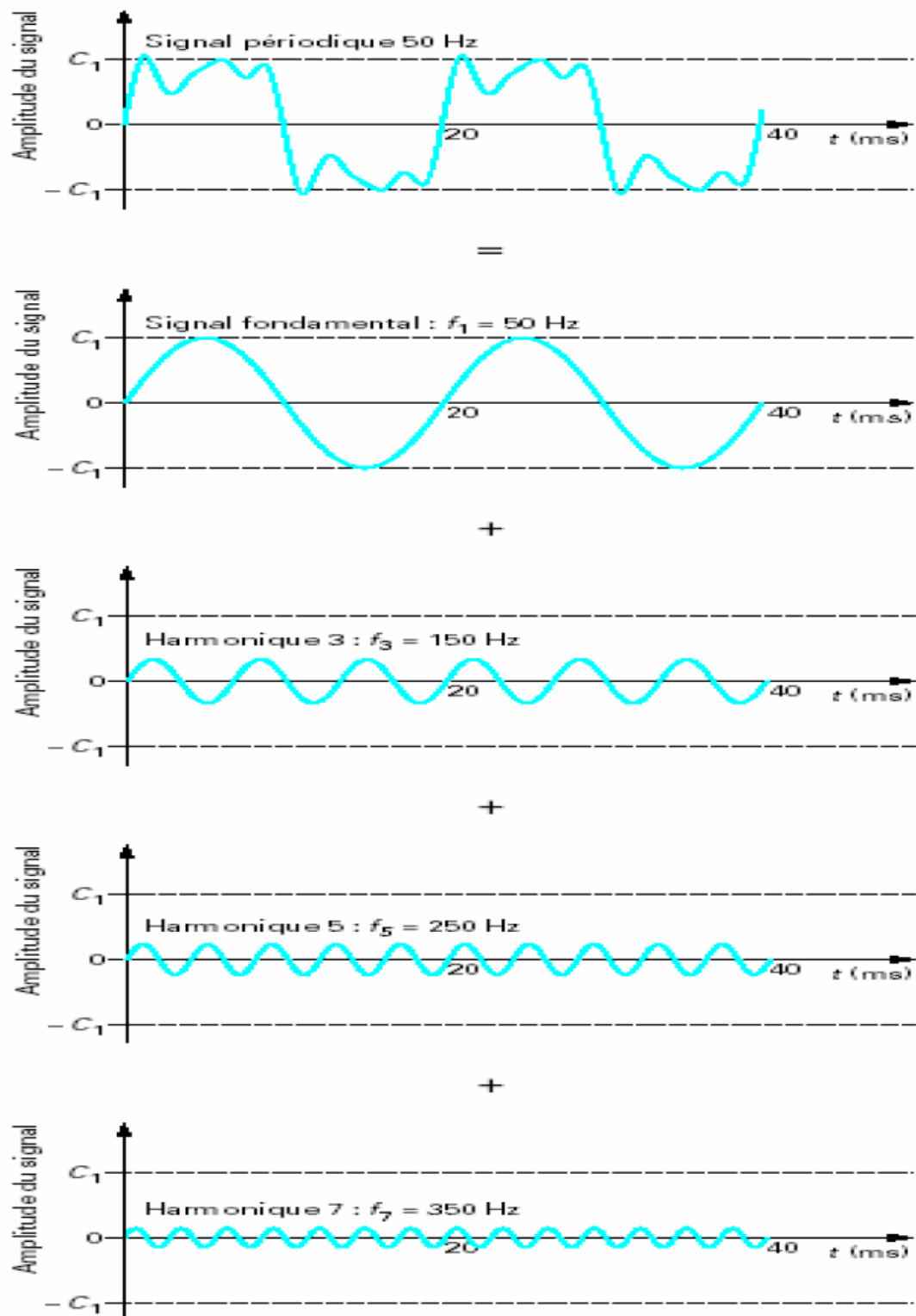


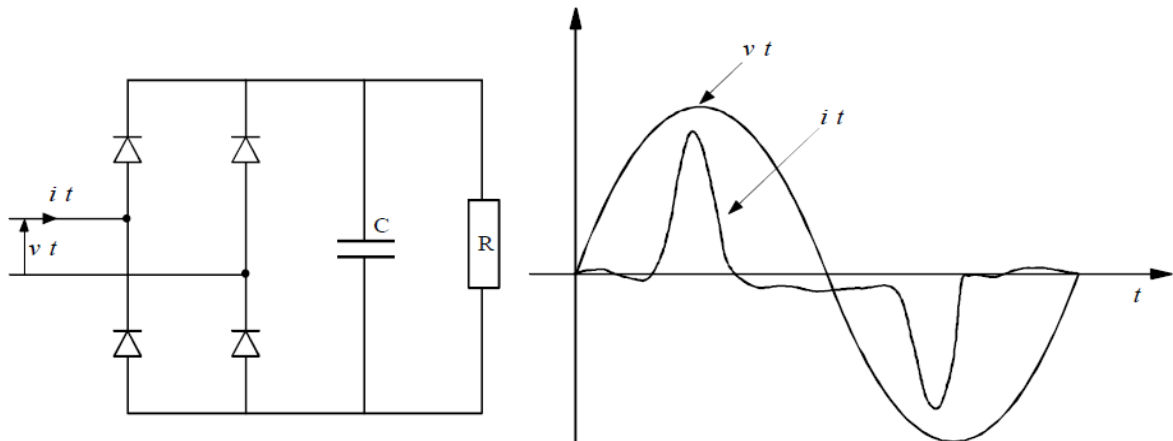
Figure (I-2): Décomposition d'un signal périodique 50 Hz en série de Fourier
 C_1 : la valeur maximal, $-C_1$: la valeur minimale

I.5. Les générateurs d'harmoniques

Les dispositifs générateurs d'harmoniques sont présents dans tous les secteurs industriels, tertiaires et domestiques. Les harmoniques sont le fait d'une charge non-linéaire (le courant qu'elle absorbe n'a pas la même forme que la tension qu'il'alimente)[3].

I.5.1. Alimentation à découpage de type informatique

Les courants harmoniques fournis par une alimentation à découpage figure (I-3) sont plus ou moins importants en fonction de la charge et de l'impédance du réseau amont [4].



Figure(I-3) Alimentation à découpage de type informatique, allure du courant

I.5.2. Pont redresseur triphasé

Les courants de phase i_a , i_b , i_c ont théoriquement une forme rectangulaire. Le développement en série de Fourier de ce signal rectangulaire nous donne les courants harmoniques de rang (5, 7, 11, ...) selon la figure (I-4).

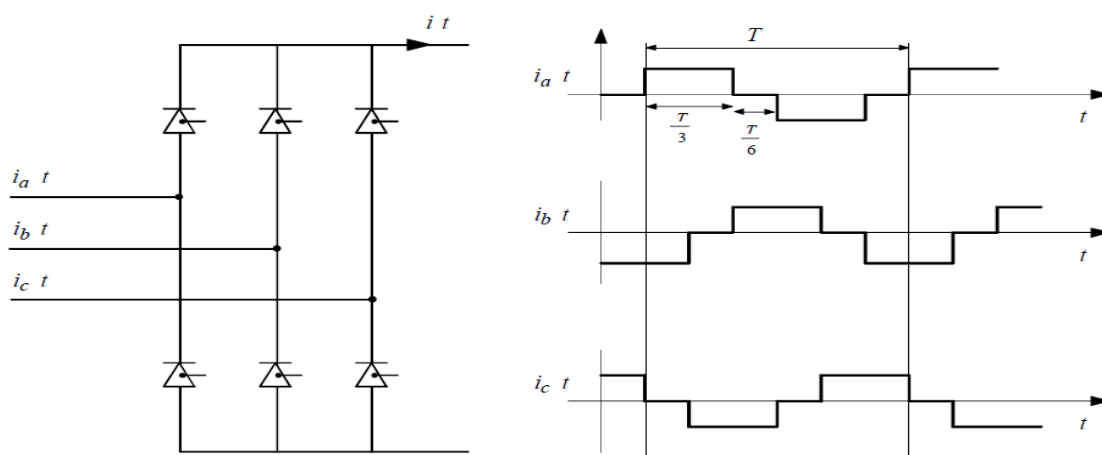


Figure (I-4) Pont redresseur triphasé, forme des courants

I.5.3.Charges d'éclairage

Les lampes à décharge avec ballast électronique fournissent des courants harmoniques de valeur comparable à celle d'une alimentation à découpage de type informatique [3;4].

I.5.4.Les appareils à arc électrique

Les appareils à arc électrique regroupent les fours à arc à courant alternatif, dont la puissance peut atteindre plusieurs dizaines de MW, et les machines de soudure à l'arc, à courant alternatif ou continu [4;5].

I.5.5.Alternateurs

La sinusoïde de tension fournie par l'alternateur ne peut pas être parfaite, même lorsque les charges sont linéaires [4].

I.5.6.Alimentations sans interruption (ASI)

La sinusoïde de tension fournie par l'onduleur ne peut pas être parfaite, même lorsque les charges sont linéaires [2].

I.5.7. Saturation du circuit magnétique des machines

Les machines (transformateurs, moteurs, ...) sont dimensionnées pour fonctionner proches de la limite de la saturation magnétique pour la tension nominale d'alimentation. Lorsque celle-ci est anormalement élevée (supérieure à 1,1 fois la tension nominale), les circuits magnétiques saturent et les courants sont déformés. La machine génère alors des courants harmoniques de rang impair [4].

I.5.8.Distributeur d'énergie

Il possède des harmoniques de tension préexistants dues aux autres consommateurs (industriels et domestiques) qui créent des harmoniques de tension sur le réseau de distribution et de transport [4].

I.6.Grandeur caractéristiques

I.6.1.Les différents types de charges

I.6.1.1.Charge non linéaires

Les charges non linéaires consomment un courant qui n'est pas sinusoïdal lorsque la tension est sinusoïdale. Elles représentent les principales sources d'émission en courants harmoniques sur les réseaux [2;4].

I.6.1.2.Charge linéaires

Une charge est dite linéaire, si alimentée par une tension sinusoïdale, elle consomme un courant sinusoïdal. Cependant, le courant et la tension peuvent être déphasés. Les

charges linéaires couramment utilisées sont constituées de résistances, de capacités et d'inductances [2;4].

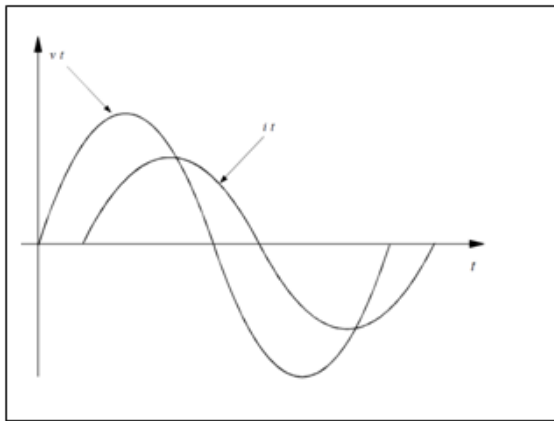


Figure (I-5) : Charge linéaires

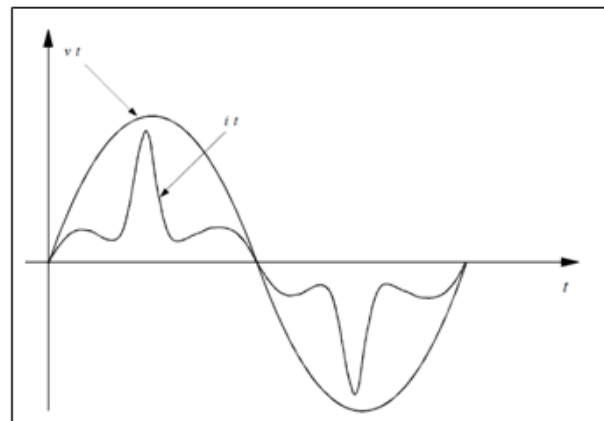
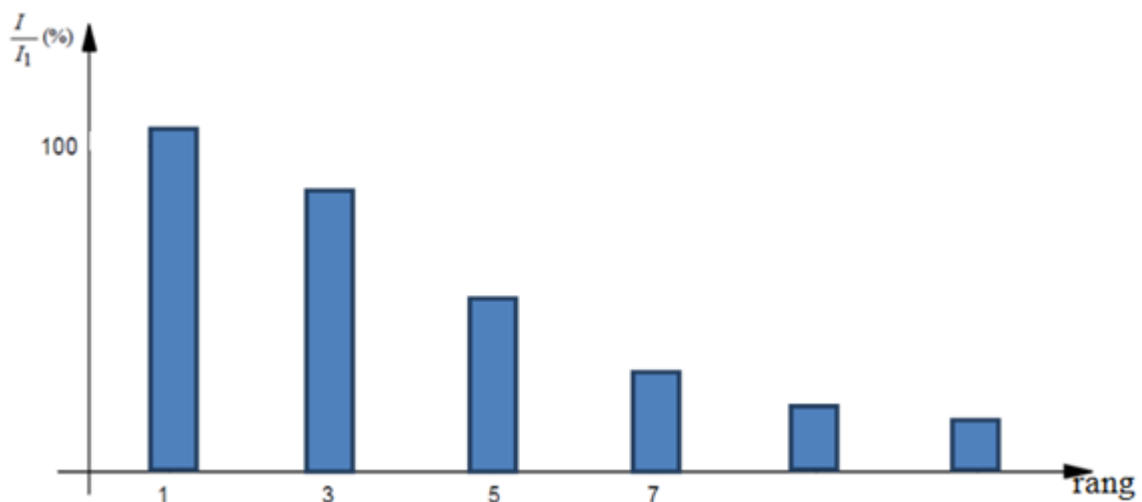


Figure (I-6) : Charge non linéaires

I.6.2. la représentation graphique de l'amplitude des harmoniques



Figure(I-7):Spectre de fréquences d'un courant non sinusoïdal

I.6.3. Série de Fourier

Ceci revient à dire que : tout signal, périodique de période $T=1/f$, peut se décomposer en une somme infinie de termes sinus et cosinus de fréquences multiples mathématiquement, cela s'écrit [6]:

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cdot \cos(n\omega t) + b_n \cdot \sin(n\omega t) \quad (I-2)$$

I.7. Les effets des harmoniques

Les tensions et courants harmoniques superposés à l'onde fondamentale conjuguent leurs effets sur les appareils et équipements utilisés. Ces grandeurs harmoniques ont des effets différents selon les récepteurs rencontrés [5].

On a deux types d'effets:

- ✓ effets instantanés
- ✓ effets différés

I.7.1.Les effets instantanés

Les effets instantanés concernent les appareils produisant une image électronique (écrans d'ordinateurs, télévisions), les appareils produisant un son censé être de bonne qualité (chaîne HI-FI, téléphonie) ou la précision des appareils de mesure [2;5].

I.7.2.Les effets différés

Les effets différés sont souvent liés à un sur échauffement plus ou moins important. Ces effets sont dus essentiellement à deux phénomènes [2;5]. :

- ✓ L'échauffement des conducteurs ou des composants traversés par les courants harmoniques.
- ✓ Le vieillissement des isolants.

Nature du matériel électrique	Effet de la pollution harmonique
- Machines tournantes. - Moteurs triphasés. - Alternateurs.	- Echauffement supplémentaire (effet Joule) dans les enroulements statoriques, couples oscillatoires. - augmentation du bruit
- Transformateurs	- Pertes supplémentaires dans le fer (par courants de Foucault) et dans les enroulements (par effet Joule). - Risque de saturation en présence d'harmoniques paires.
- Câbles	- Augmentation des pertes surtout dans le neutre où s'ajoutent les harmoniques de rang 3 et multiple de 6 - Pertes diélectriques supplémentaires
- Electronique de puissance (ponts redresseurs à thyristors, transistor, ... etc.)	- Troubles fonctionnels liés à la forme d'onde (commutation synchronisation)
- Condensateurs de puissance	- Pertes diélectriques supplémentaires aboutissant à un vieillissement prématuré des condensateurs
- Ordinateurs.	- Dysfonctionnement lié aux couples pulsatoires des moteurs d'entraînement des supports magnétiques.

- Dispositifs de protection (fusibles, disjoncteurs magnétothermiques.)	- Fonctionnement intempestif.
- Compteur d'énergie.	- Erreur de mesure.
- Téléviseurs.	- Déformation d'image.
- Lampes à décharge.	- Risque de vacillement sous l'effet de l'harmonique de rang 2.

Tableau (I-1): Ensemble des matériels électriques perturbés par la pollution harmonique.

I.7.3. Influence des harmoniques sur le facteur de puissance

Normalement, pour un signal sinusoïdal le facteur de puissance est donné par le rapport entre la puissance active (P) et la puissance apparente (S). Les générateurs, les transformateurs, les lignes de transport et les appareils de contrôle et de mesure sont dimensionnés pour la tension et le courant nominaux. Une faible valeur du facteur de puissance se traduit par une mauvaise utilisation de ces équipements. Dans le cas où il y a des harmoniques, on définit une puissance supplémentaire appelée la puissance déformante (D), donnée par la relation suivante : [6;7]

$$D = 3V_1 \sqrt{\sum_{h=2}^{50} I_h^2} \quad (\text{I-3})$$

Le facteur de puissance (FP) devient :

$$F.P = FD \times Fd = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} = \cos \varphi \cdot \cos \gamma \quad (\text{I-4})$$

Si le courant de la source est purement sinusoïdal

$$F.P = \cos \varphi \quad (\text{I-5})$$

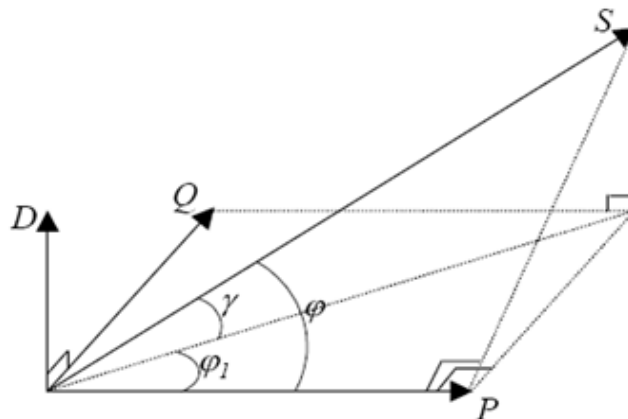


Figure (I-8): Diagramme de Fresnel des puissances

I.8. Méthode de minimisation d'harmoniques

On utilise deux méthodes: Méthode traditionnelle et Méthode modernes

I.8.1. Méthode traditionnelle

I.8.1.1. Utilisation d'inductances anti-harmoniques

Cette disposition consiste à protéger les condensateurs, destinés à améliorer le facteur de puissance, en plaçant une inductance en série avec les condensateurs [2;5] Fig. (I-8).

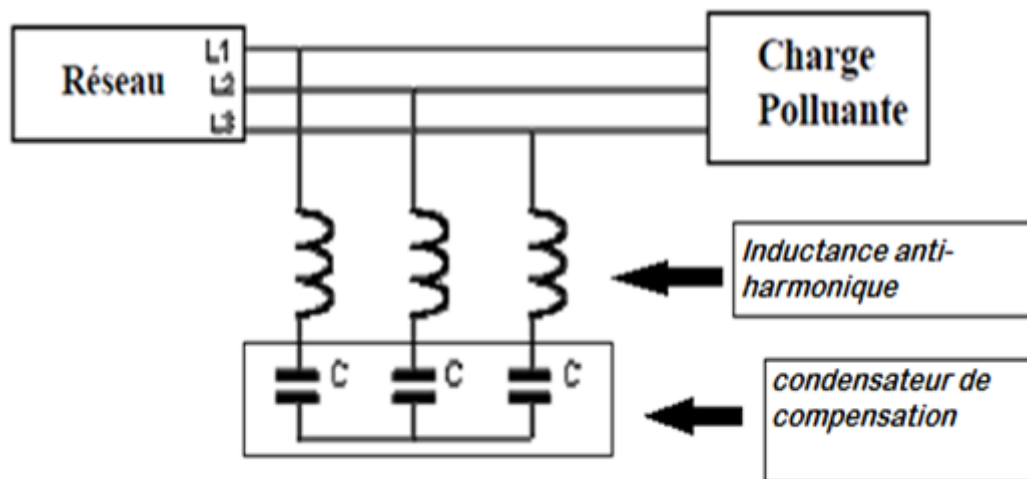


Figure (I-9): Raccordement d'une inductance anti-harmonique

I.8.1.2. Agir sur la structure de l'installation

Il faut éviter de connecter un récepteur sensible en parallèle avec un pollueur. Une alimentation par câble distinct est préférable [4].

I.8.1.3. Surdimensionnement des installations électriques

Cette stratégie consiste à surdimensionner les équipements du réseau de telle sorte à supporter les surtensions produites par les harmoniques [4].

I.8.1.4. Pont dodécaphasé

Le principe consiste à utiliser un transformateur à deux secondaires délivrant des tensions décalées de 30° entre elles, chacun de ces secondaires alimentant un redresseur en pont de Graëtz qui réalise un redressement hexaphasé.

Les redresseurs doivent fournir des courants continus identiques afin que les courants alternatifs qu'ils prélèvent sur les secondaires des transformateurs aient les mêmes valeurs.

Dans ces conditions, il y a une recombinaison des courants harmoniques, générés par chacun des redresseurs au primaire du transformateur et le calcul montre que les harmoniques de rang $6k \pm 1$ avec k impair sont éliminés. C'est le cas en particulier pour les harmoniques 5 et 7.

dont les amplitudes théoriques sont les plus importantes. Les harmoniques 11 et 13 sont conservés tandis que les harmoniques 17 et 19 sont éliminés. Les harmoniques restants sont donc de rang $12k \pm 1$ avec k entier naturel [8].

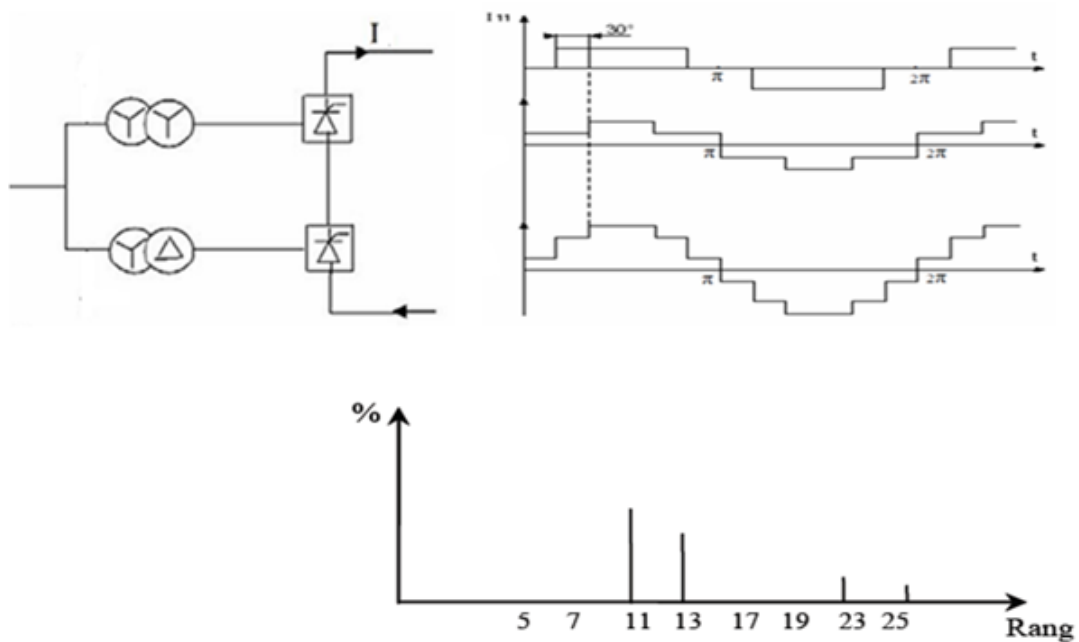


Figure (I-10) Forme de courant et rang d'harmonique du pont dodécaphasé

I.8.1.5. Filtres passifs d'harmoniques

A. Filtre résonant

Il est constitué par la mise en série d'une inductance, d'une résistance, et d'un condensateur. La figure (I.11) montre clairement le montage de ce dernier ainsi que leurs impédances en fonction de la fréquence. Ce type de filtre est caractérisé par l'emplacement de trois filtres, deux pour les harmoniques d'ordre inférieurs et un filtre pour les harmoniques d'ordre supérieurs, c'est-à-dire pour un pont triphasé nous avons besoin d'un filtre passe bas pour le cinquième et l'autre pour le septième harmonique et d'un filtre passe haut pour tous les harmoniques au-delà de 11^{ème} [5;9].

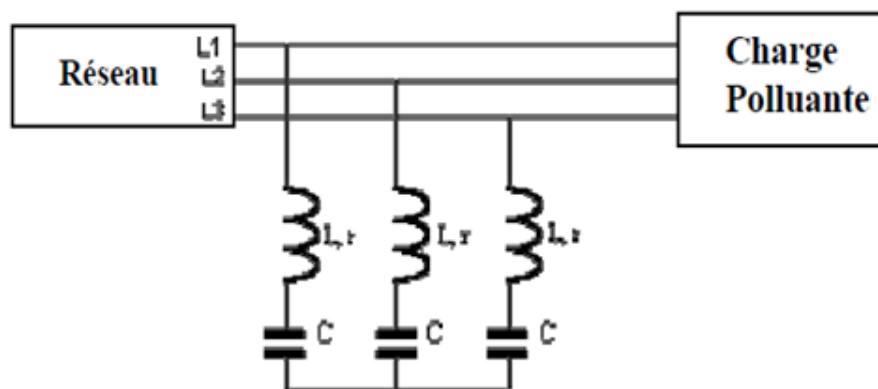
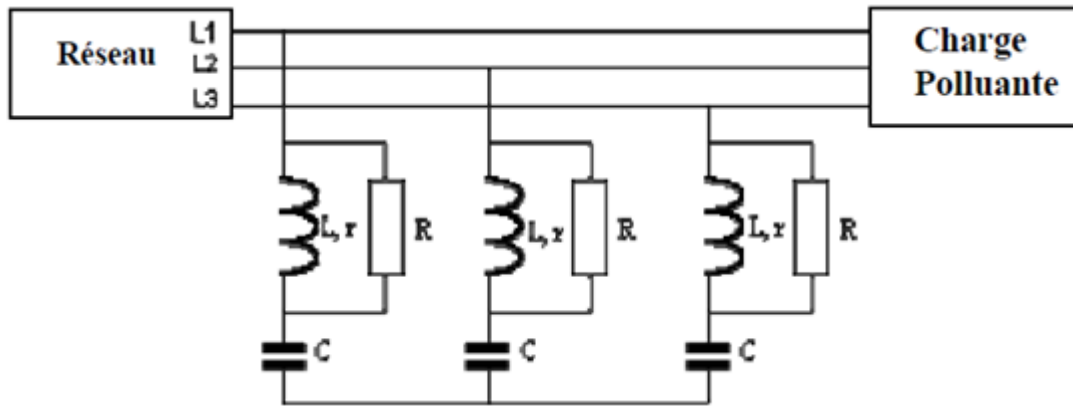


Figure (I-11) Branchement d'un filtre résonant.**B. Filtre amorti**

La figure (I-12) montre le montage de ce type de filtre, ainsi que son impédance en fonction de la fréquence. En plus de difficulté de dimensionnement des filtres et à coût global élevé, ce type n'est efficace que si le rang d'harmonique à éliminer est suffisamment élevé [5;10].

**Figure (I-12) Branchement d'un filtre amorti.****I.8.2. Méthode modernes****I.8.2.1. Les redresseurs à MLI**

Ce sont des convertisseurs à modulation de largeurs d'impulsions, utilisant des composants à commutation forcée tels que les IGBT ou les thyristors GTO. L'emploi de cette technique permet non seulement une réduction de la perturbation harmonique en prélevant des courants d'allure sinusoïdale mais aussi un contrôle des puissances actives et réactives [6].

I-8-2- 2 Les filtres actifs

Le filtrage actif comprend des convertisseurs de puissance. Ce sont des sources de courant ou de tension qui éliminent les harmoniques en injectant en série ou en parallèle sur le réseau des courants ou des tensions ou les deux à la fois [11].

A. Le filtre actif parallèle

Le filtre actif connecté en parallèle sur le réseau, comme le montre la figure (I-13), est le plus souvent commandé comme un générateur de courant. Il injecte dans le réseau des courants perturbateurs égaux à ceux absorbés par la charge polluante [3;11].

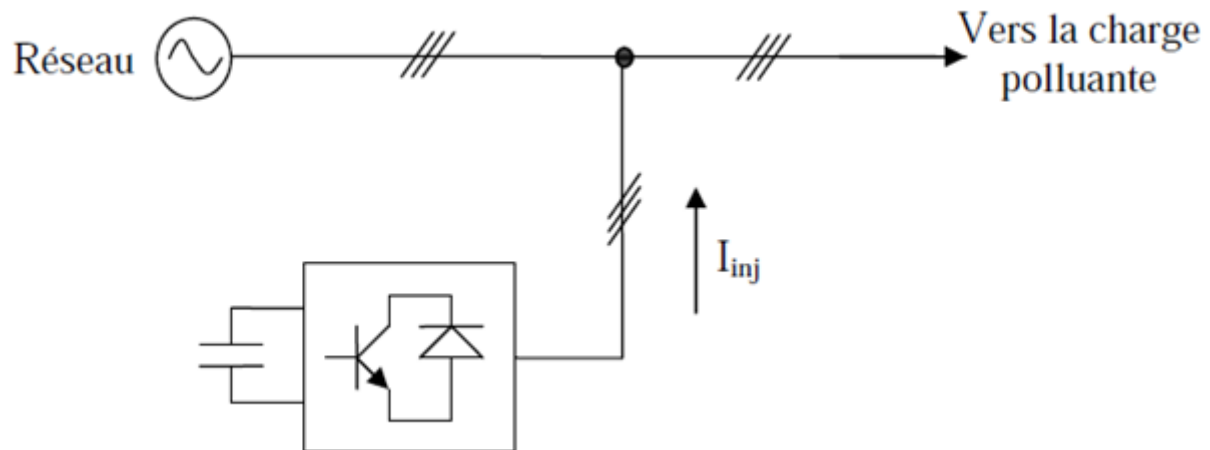


Figure (I-13) Principe de filtrage actif parallèle

B. Filtrage actif série

Le filtre actif série engendre des tensions harmoniques V_h dont la somme avec la tension du réseau V_s est une onde sinusoïdale figure (I-14). Il est destiné à protéger les installations sensibles aux perturbations provenant du réseau telles que les harmoniques en tension, les surtensions.

En revanche, le filtrage série ne permet pas de compenser les courants harmoniques consommés par la charge [2]

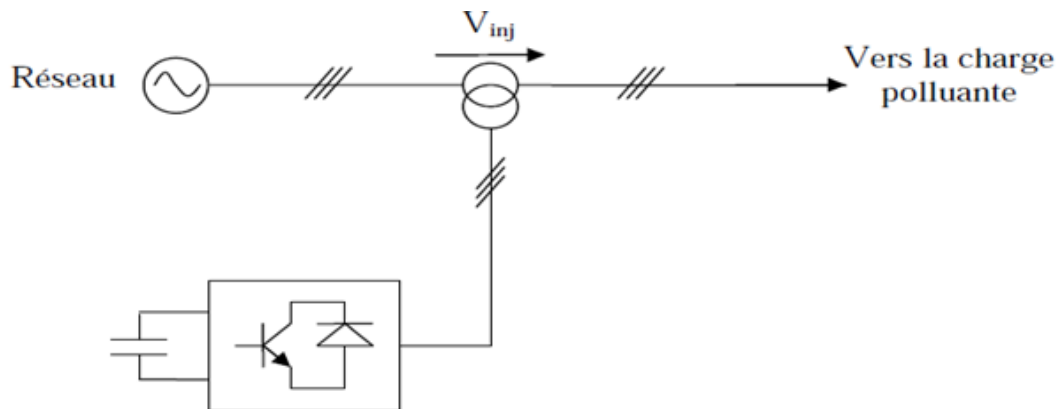


Figure (I-14) Principe de filtrage actif série

C. Filtrage actif série-parallèle

C'est une solution de compensation universelle basée sur le fonctionnement simultané des filtres actifs parallèle et série figure (I-15). Cette nouvelle topologie est appelée combinaison parallèle série actifs ou (United Power Quality Conditioner). Il possède les avantages cumulés des filtres actifs parallèles et série.

Le filtre actif série, lorsqu'il est placé en amont du filtre actif parallèle permet de dépolluer la source des tensions perturbatrices. Lorsqu'il est placé en aval, il permet d'isoler la charge de la source perturbée [9].

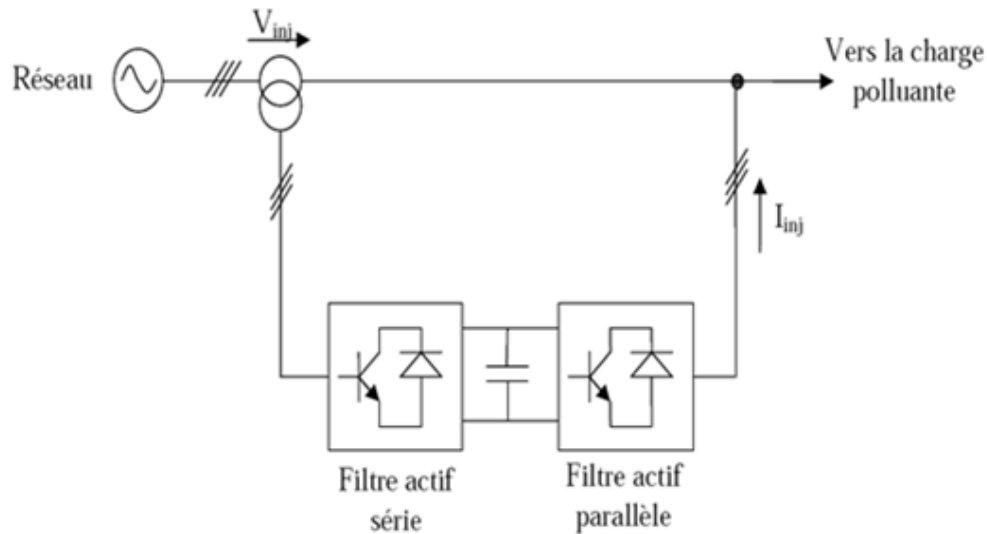


Figure (I-15): Combinaison parallèle série

I.8.2.3. Filtre hybride

Le filtrage mixte ou hybride résulte de l'association d'un filtre passif et d'un filtre actif. L'intérêt des filtres mixtes est que le filtre passif prend en charge la compensation d'une grande partie des harmoniques; le filtre actif maintient les performances de filtrage en fonction de l'évolution de la charge et du réseau. Ainsi la puissance du convertisseur qui constitue le filtre actif est fortement diminuée grâce aux éléments passifs. Ces structures permettent donc, d'optimiser le rapport performance/coût et d'avoir une meilleure tenue en tension.

On a plusieurs structures des filtres mixtes, parmi lesquelles: le filtre actif série avec des filtres passifs parallèles, le filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles et le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle [6].

A. le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle

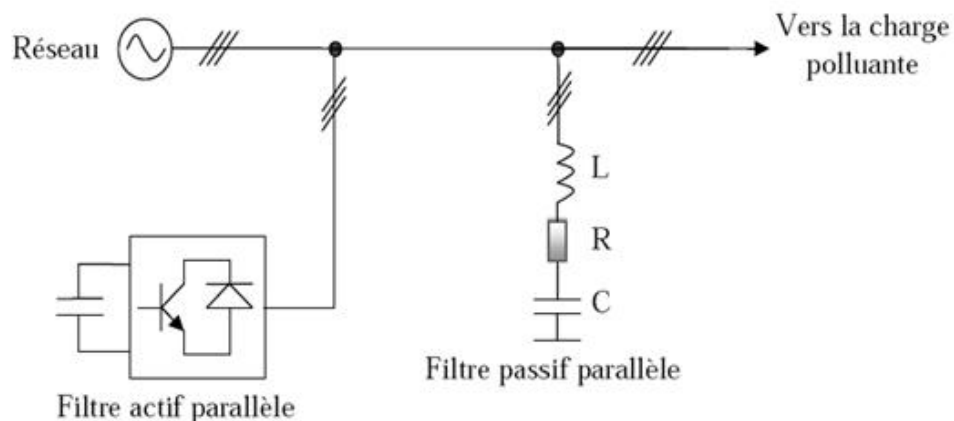


Figure (I-16): Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle

B. le filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles

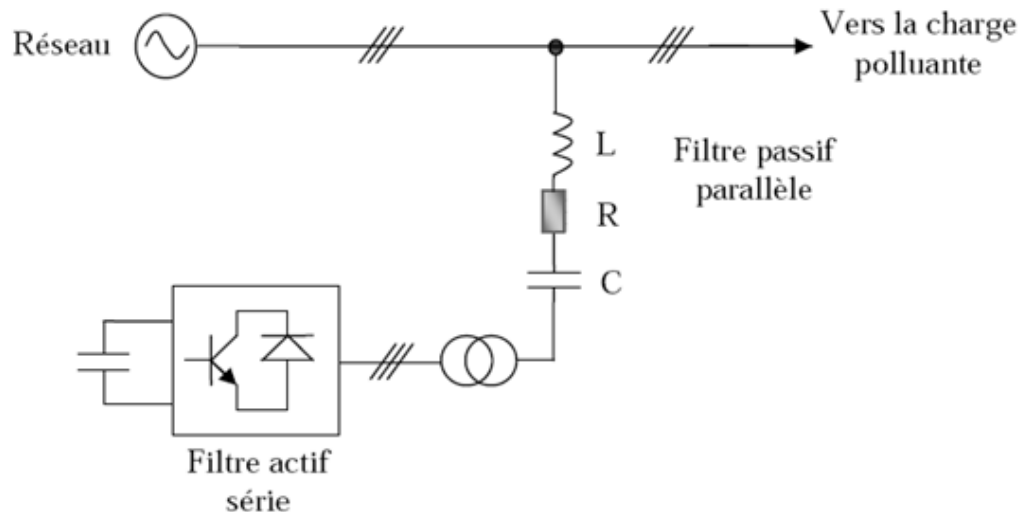


Figure (I-17) Filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles

C. le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle

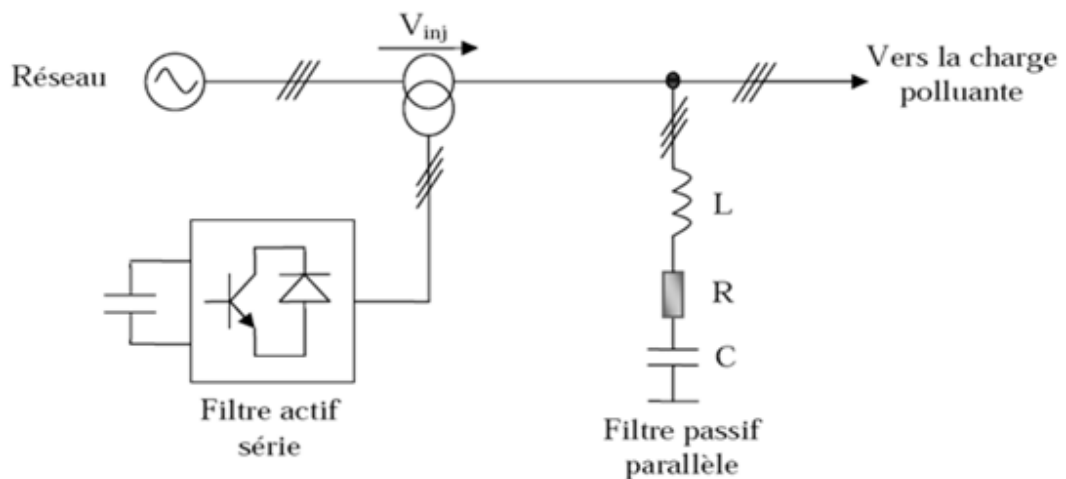


Figure (I-18): Filtre actif série avec des filtres passifs parallèles

I.9. Comparaison entre les remèdes de dépollution

Le tableau ci-dessous regroupe quelques avantages et inconvénients de dépollution harmonique [12]

Principes	Avantages	Inconvénient
Filtrage passif	- amélioration de la forme du courant	- risque de résonance, pas d'adaptabilité
Filtrage actif série	- amélioration de la forme de la tension, adaptabilité aux variations de charge et du Réseau	- pas d'amélioration de la forme du courant

Filtrage parallèle	- amélioration de la forme du courant, adaptabilité aux variations de charge et du réseau	- amélioration de la forme de la tension pas toujours évidente
Filtrage parallèle-série	- amélioration de la forme du courant, amélioration de la forme de la tension, adaptabilité aux variations de charge et du réseau	- réalisation difficile

Tableau (I-2) Récapitulatif des solutions de dépollution

I.10. Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons présenté des généralités sur les perturbations harmoniques basse fréquence et principalement leurs effets indésirables sur les installations et les équipements électriques.

L'utilisation des charges non-linéaires responsable de la propagation des courants harmoniques dans l'ensemble des systèmes électriques est irremplaçable, donc il faut chercher des solutions qui permettent d'empêcher la circulation de ces perturbations.

On a présenté dans ce chapitre des solutions de dépollution, mais chaque remède proposé présente des avantages et des inconvénients. Parmi ces solutions, on distingue, la plus connue le filtre actif parallèle qui fera l'objet du prochain chapitre.

Chapitre II

Filtre active parallèle

Chapitre II

Filtre actif parallèle

II.1. Introduction

La prolifération spectaculaire de fabrication des composants semi-conducteurs de puissance entièrement commandables comme (les thyristors, IGBT, MOSFET, GTO), a contribué à l'amélioration des différents systèmes de compensation des perturbations harmoniques due à la présence des charges non-linéaires affectant la forme d'onde du courant ou tension. Parmi ces solutions modernes on peut distinguer le filtre actif parallèle, celui-ci n'est qu'un onduleur soit de tension ou bien de courant. Dans notre cas le filtre étudié est un onduleur à structure tension.

Dans ce deuxième chapitre on va entamer les différents éléments constitutifs du filtre actif (le système de stockage d'énergie, le filtre de sortie...etc.) ensuite, la partie commande du filtre actif avec les techniques de commande par hystérésis puis par la modulation de la largeur d'impulsion (MLI).

II.2. Principe du filtre actif parallèle

Le principe du filtre actif parallèle consiste à générer des harmoniques en opposition de phase à ceux existant sur le réseau. Ceci peut être schématisé sur la figure (II-1)

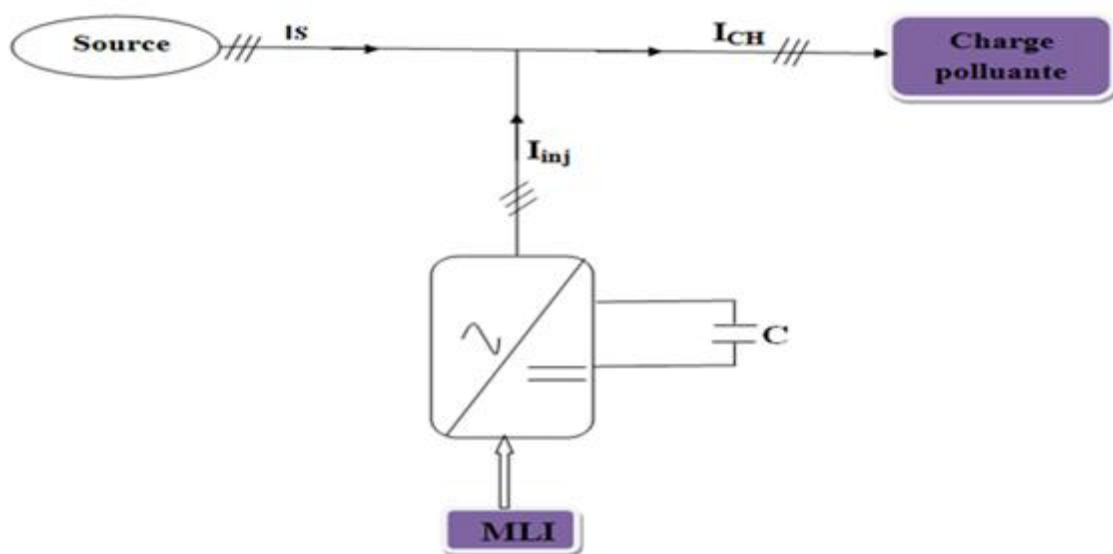


Figure (II-1): Schéma de principe d'un filtre actif parallèle

✓ Exemple de formes d'ondes

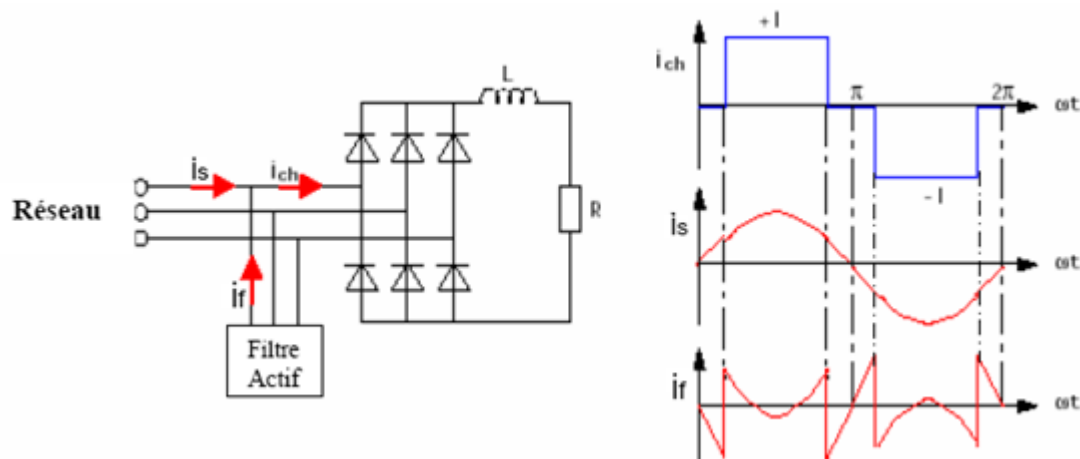


Figure (II-2): Exemple de formes d'ondes

La charge constituée d'un pont de diodes débitant sur un circuit RL, alors que le courant absorbé par la charge polluante est non sinusoïdal, le courant fourni par le filtre actif est tel que le courant absorbé du réseau soit sinusoïdal [2].

II.3. Structure d'un filtre actif parallèle

La structure générale du filtre actif parallèle est présentée dans la figure (II-3) sous la forme de deux blocs: la partie puissance et la partie contrôle-commande [2;3].

La partie puissance est constituée de:

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

La partie contrôle-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,
- ✓ La commande de l'onduleur de tension.

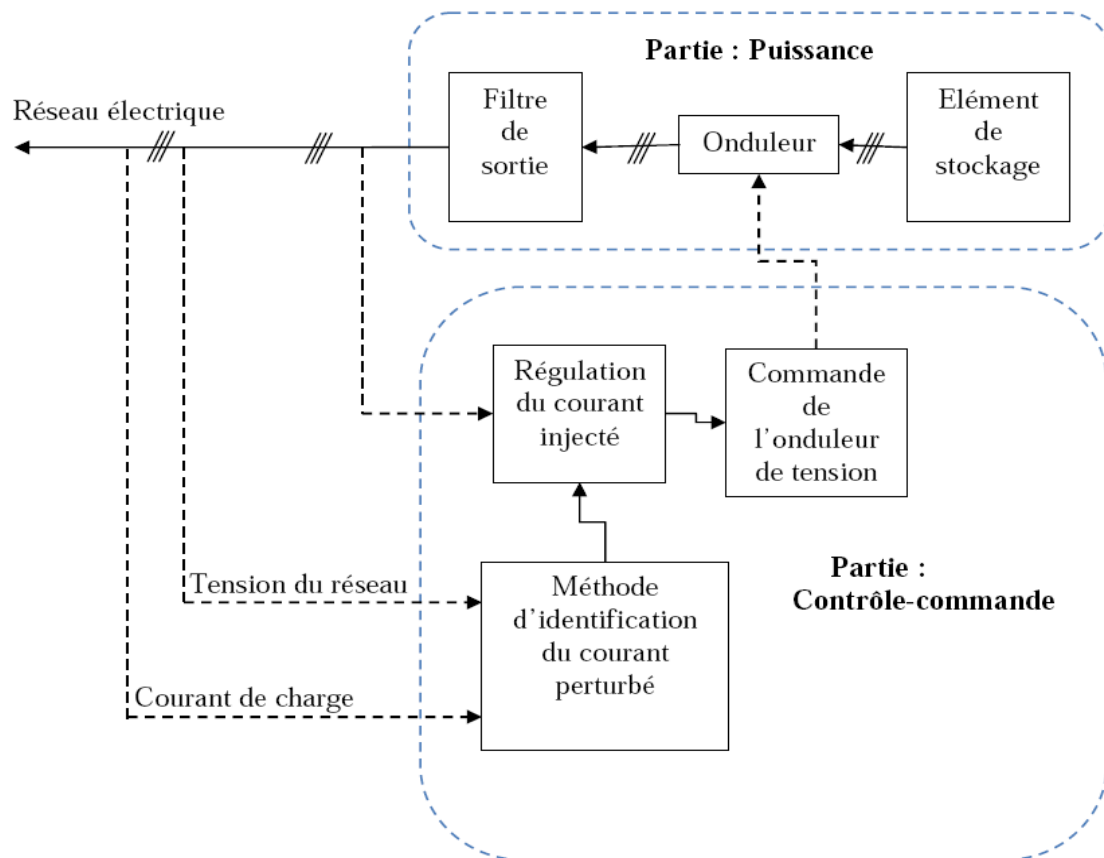


Figure (II-3): Structure générale du filtre actif parallèle

II.3.1. Structure tension

L'onduleur de tension connecté en parallèle au réseau est illustré par la figure (II-4). 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: d'une part transformer les variations de tension V_f en variations de courant, d'autre part 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 [3;11]

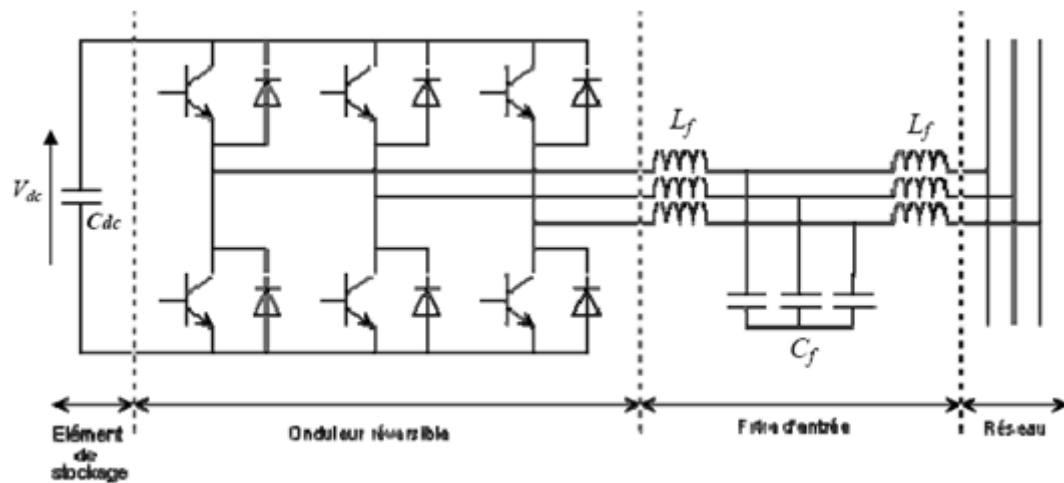


Figure (II-4): Structure tension

II.3.2. Structure courant

La figure (III-5) représente le schéma de principe d'un onduleur de courant. L'inductance joue le rôle d'une source de courant continu. Le courant i_L traversant cette inductance est maintenu quasiment constant pour ne pas dégrader les performances du filtre actif [2;3].

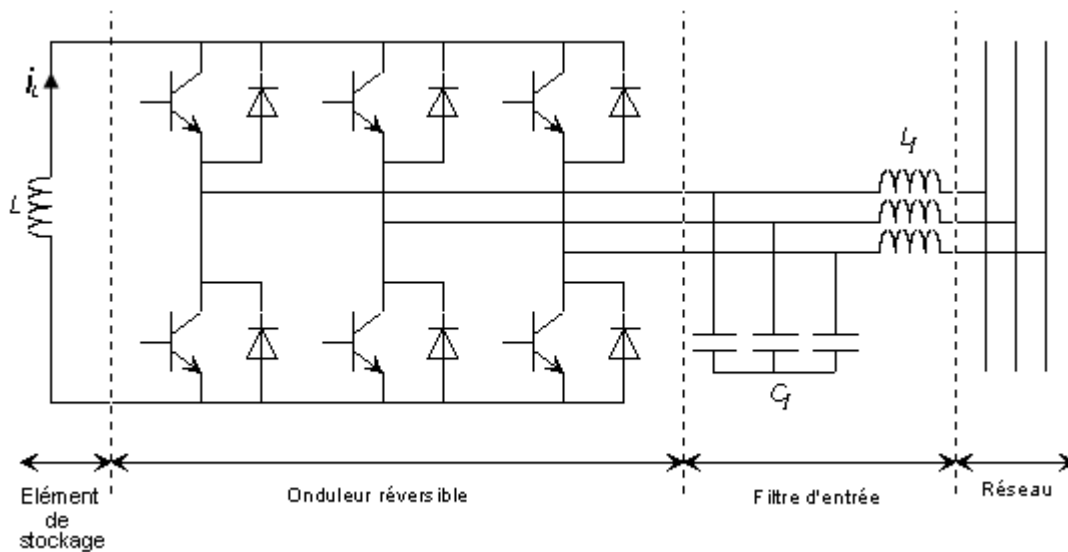


Figure (II-5): Structure courant

II.4. Notion de base sur les onduleurs

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion continue –alternative, alimenté en continu, et permet d'obtenir l'alternatif à la sortie. Un onduleur dépend essentiellement de la nature du générateur et du récepteur entre lesquels il est monté. Cela conduit à distinguer en respectant la règle de connexion des sources:

- ✓ Les onduleurs de courant alimentés par une source de courant continu.

- ✓ Les onduleurs de tension alimentés par une source de tension continue et alimentant un récepteur de courant alternatif.

La plupart des applications des onduleurs triphasés de tension à MLI se résument aux: commande des moteurs alternatifs, filtre actif, systèmes d'alimentations sans interruption utilisés [7].

II.4.1. 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. Les trois bras de l'onduleur sont formés par six interrupteurs bidirectionnels en courant, qui sont des composants semi-conducteurs commandés à la fermeture et à l'ouverture (transistors bipolaires, IGBT ou IGCT) comportant une diode en antiparallèle. Cet onduleur est connecté au réseau électrique par un filtre dit de découplage [2].

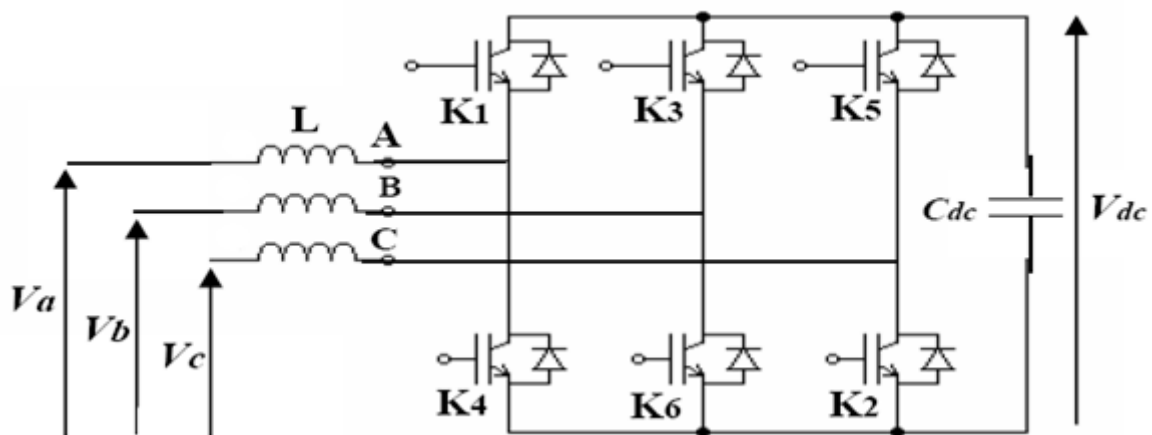


Figure (II-6): Structure d'un onduleur de tension triphasé

II.4.2. Stratégies de commande d'un onduleur triphasé

II.4.2.1. La commande par hystérésis

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

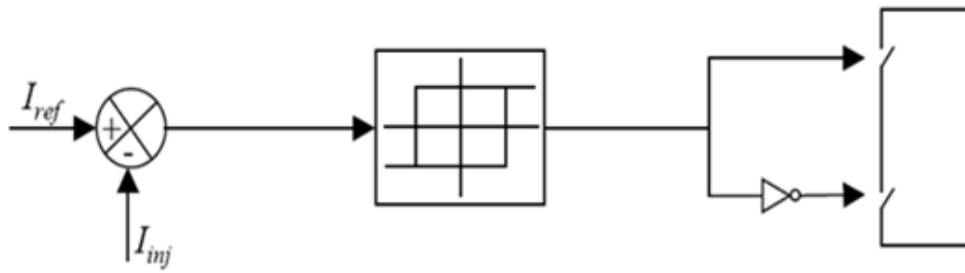


Figure (II-7): Comparateur à hystérésis.

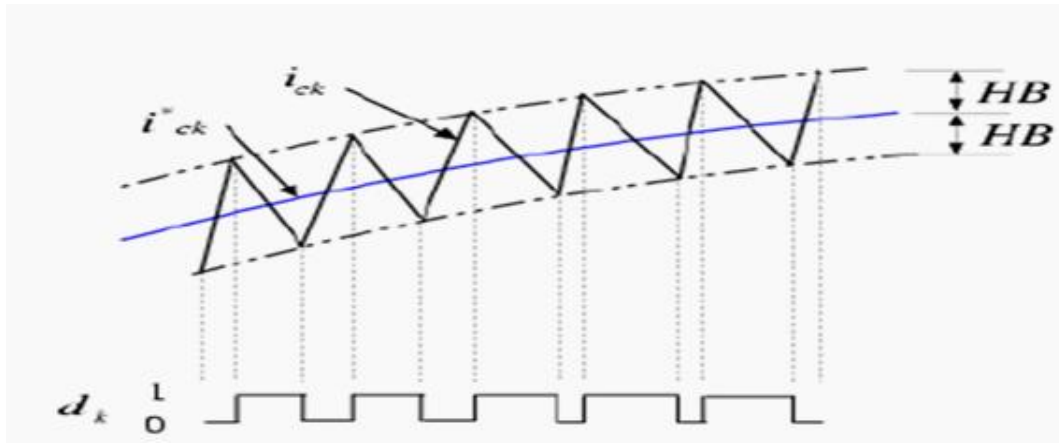


Figure (II-8): Principe de commande par hystérésis

Dès que l'erreur atteint la bande inférieure ou supérieure, un ordre de commande est envoyé de manière à rester à l'intérieur de la bande. La simplicité, comme le montre la figure (II-8), est le principal avantage de cette technique. En revanche, les commutations évoluant librement à bande d'hystérésis l'intérieur de la, on ne peut pas maîtriser correctement le spectre haute 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 de l'hystérésis [13;14].

-loi de commutation suivante :

$$d_k = 1 \rightarrow d_{0k} = 0 \text{ si } i_{ck} > (i_{ref} + HB) .$$

$$d_k = 0 \rightarrow d_{0k} = 1 \text{ si } i_{ck} < (i_{ref} - HB) .$$

II.4.2.2. La commande MLI sinus-triangle

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

d'intersection entre la porteuse et la modulante, la fréquence de commutation des interrupteurs est fixée par la porteuse.

En triphasé, trois références sinusoïdale déphasées de $2\pi/3$ à la même fréquence f_s . Comme la sortie de l'onduleur de tension n'est pas purement sinusoïdale, l'intensité de courant ne l'est pas aussi, donc elle comporte des harmoniques, seuls responsables des parasites (pulsation de couple électromagnétique) ce qui engendre des pertes supplémentaires.

Cette -MLI- sert à remédier ces problèmes et elle a comme avantages :

- ✓ Variation de la fréquence de la tension de sortie.
- ✓ Elle repousse les harmoniques vers des fréquences plus élevées.

Conséquences :

- ✓ Minimisation de la distorsion du courant.
- ✓ Faible coût du filtre de sortie.

Le principe de cette stratégie peut être résumé par l'algorithme suivant :

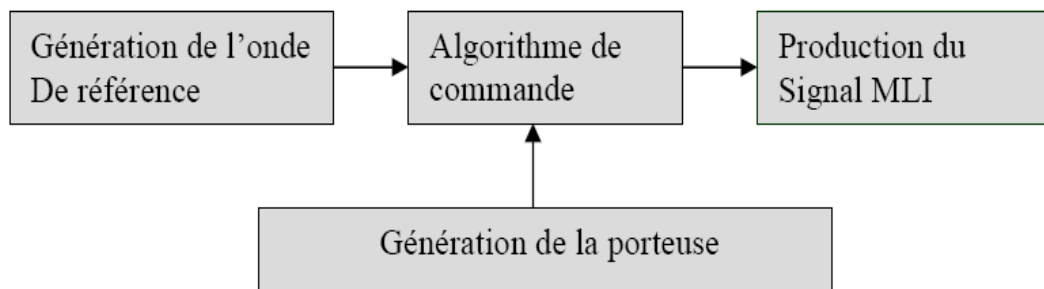


Figure (II-9): Algorithme de la commande MLI

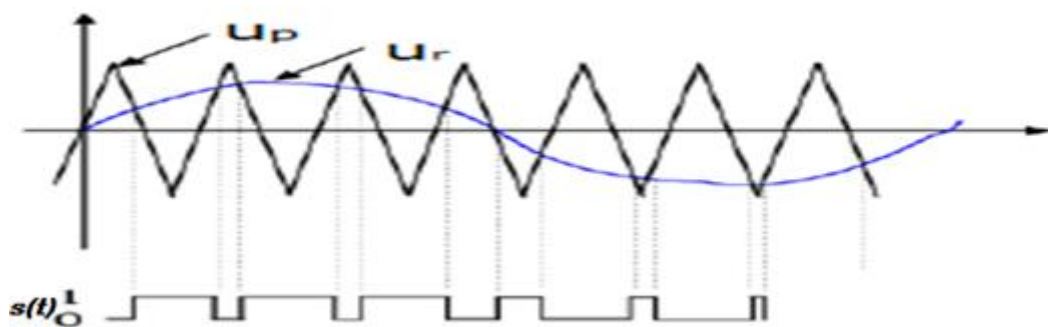


Figure (II-10): Principe de la commande MLI

$$U_r \geq U_p \rightarrow s(t)=1 \text{ si non } s(t)=0$$

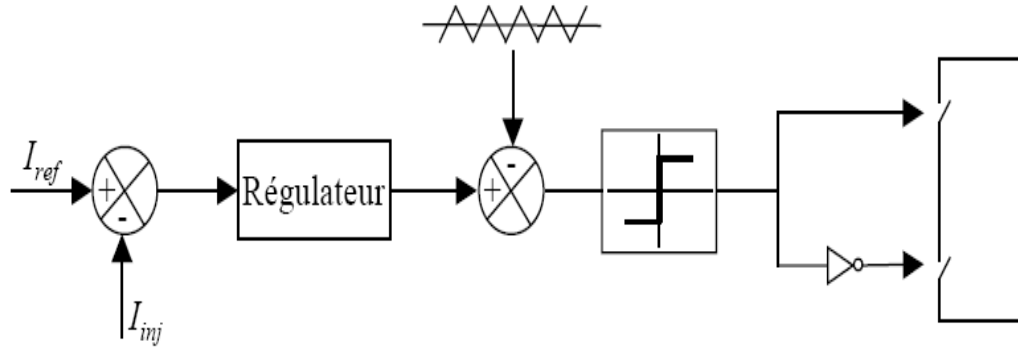


Figure (II-11):Commande par MLI

Pour optimiser la MLI en utilise deux paramètres caractérisant cette commande :

m : L'indice de modulation c'est le rapport de la fréquence de la porteuse f_p sur celle du référence f_{ref}

$$m = \frac{f_{ref}}{f_p} \quad (II-1)$$

r : Le taux de la modulation (le coefficient de réglage en tension). C'est le rapport des amplitudes de tension de la référence V_{Rmax} sur celle de la porteuse V_{pmax} , Généralement r est compris entre 0 et 1[7;13].

$$r = \frac{V_{Rmax}}{V_{pmax}} \quad (II-2)$$

II.5.Filtre de raccordement

En général, deux types de filtres sont utilisés ; Le filtre de type L qui permet de diminuer les harmoniques autour de la fréquence de commutation, Un filtre de type LCL qui est plus avantageux dans le filtrage car en outre du filtrage des harmoniques du courant il nous permet l'obtention d'une tension de sortie très proche de la sinusoïde par filtrage des harmoniques de la tension de sortie [12].

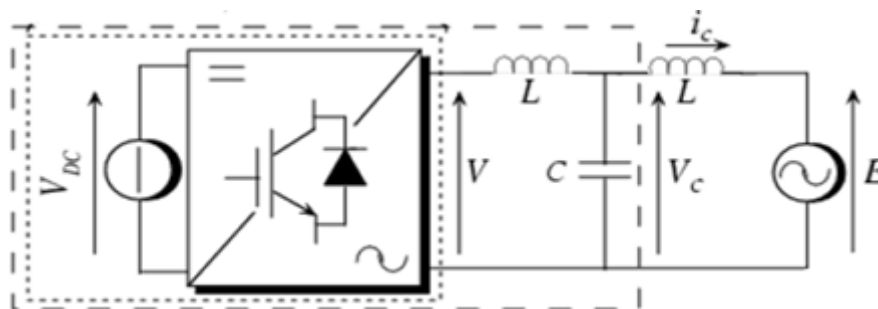


Figure (II-12):Onduleur de tension avec filtre L et LCL

II.6.Conclusion

Nous avons présenté et défini dans ce chapitre, la plupart des éléments constituant la structure du filtre actif parallèle. Cette structure a été partagée en deux parties à savoir la partie puissance et la partie contrôle-commande. Nous avons présenté les deux principales techniques de commande de l'onduleur de tension servant de filtre actif, hystérésis et MLI, couramment utilisées dans les applications des filtres actifs. La commande par hystérésis est très simple et très rapide tandis que sa fréquence instantanée des commutations n'est pas contrôlable.

Le filtre actif parallèle doit injecter les courants harmoniques en opposition de phase avec celles envoyées par la charge polluante. La méthode d'identification de ces courants harmoniques fera l'objet du prochain chapitre.

Chapitre III

Identification des courants harmoniques

Chapitre III

Identification des courants harmoniques

III.1.Introduction

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

III.2.la méthode d'identification des courants harmoniques

III.2.1.Généralités sur les différentes méthodes d'identification

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

La première utilise la transformée de Fourier rapide dans le domaine fréquentiel, pour extraire les harmoniques du courant. Cette méthode est bien adaptée aux charges où le contenu harmonique varie lentement. Elle donne aussi l'avantage de sélectionner les harmoniques individuellement et de ne choisir de compenser que les plus prépondérants. Il est à noter que cette méthode nécessite une grande puissance de calcul afin de réaliser, en temps réel, toutes les transformations nécessaires pour extraire les harmoniques.

La deuxième famille est basée sur le calcul des puissances instantanées dans le domaine temporel. Certaines 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 total [2].

III.2.2.Principe du fonctionnement de la méthode des puissances instantanées:

III.2.2.1. Généralités sur les 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:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad \text{(III-1)}$$

Cette méthode exploite la transformation (α - β) pour obtenir les puissances réelles et imaginaires. Notons par (V_α, V_β) et (I_α, I_β) les composantes orthogonales du repère (α - β) associées respectivement aux tensions de raccordement du *filtre actif parallèle* (V_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

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

Et la relation des courants ci-dessous :

$$\begin{bmatrix} I_o \\ I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{s1} \\ I_{s2} \\ I_{s3} \end{bmatrix} \quad \text{(III-3)}$$

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

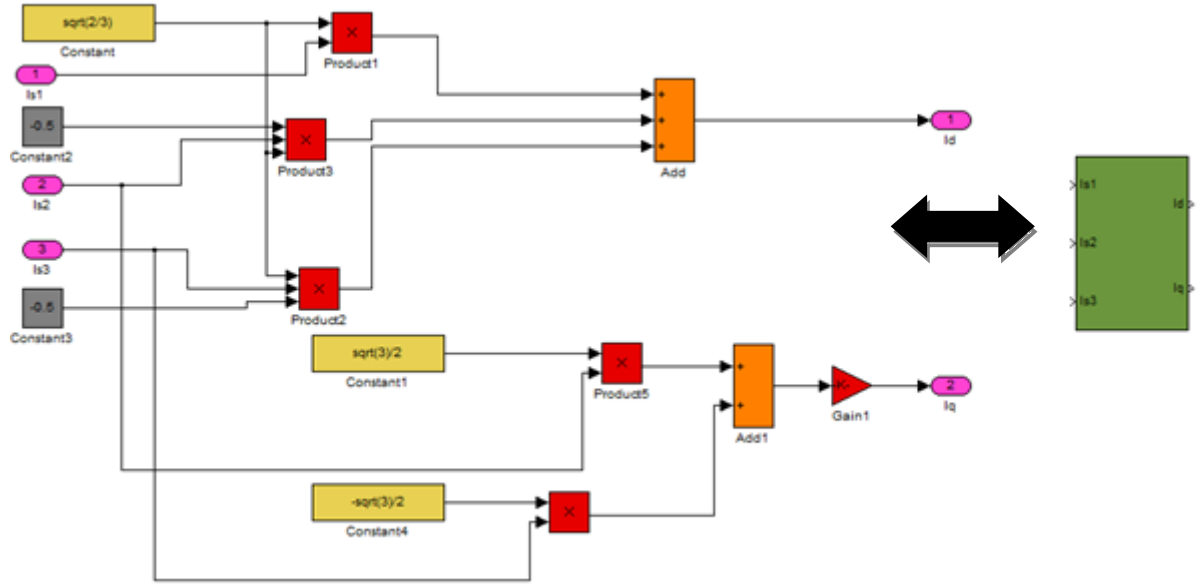


Figure (III-1):Schéma bloc de la transformation du système triphasé en biphasé

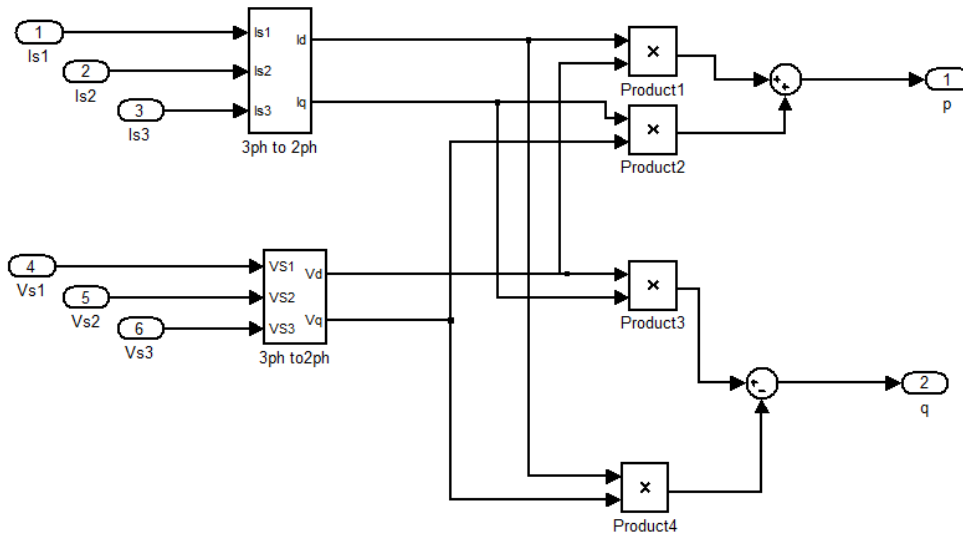


Figure (III-2): Calcul de la puissance active et réactive

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

$$P(t) = Vs1 Is1 + Vs2 Is2 + Vs3 Is3 = p(t) + p_0(t)$$

$$p(t) = V_\alpha I_\alpha + V_\beta I_\beta \quad (\text{III-4})$$

$$p_0(t) = V_0 I_0$$

Avec $p(t)$ la puissance réelle instantanée, $p_0(t)$ la puissance homopolaire 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 :

$$q(t) = -\frac{1}{\sqrt{3}} [(V_{s1} - V_{s2}) I_{s3} + (V_{s2} - V_{s3}) I_{s1} + (V_{s3} - V_{s1}) I_{s2}] = V_{\alpha} I_{\beta} - V_{\beta} I_{\alpha} \quad (\text{III-5})$$

A partir des relations (IV-4) et (IV-5), nous pouvons établir la relation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & V_{s\beta} \\ -V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{\alpha} \\ I_{\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{III-6})$$

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 :

$$\begin{cases} p = \bar{p} + \tilde{p} \\ q = \bar{q} + \tilde{q} \end{cases} \quad (\text{III-7})$$

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.

III.2.2.2. Séparation des puissances

Les puissances définies précédemment contiennent un terme constant relatif au fondamental ainsi qu'un terme alternatif correspondant aux harmoniques ; afin de ne garder que la partie relative aux harmoniques, la composante continue de la puissance doit être filtrée. Cette séparation peut être réalisée en utilisant l'un des deux artifices de filtrage, un filtre passe-haut ou un filtre passe-bas comme l'indique la figure ci-dessous [10].

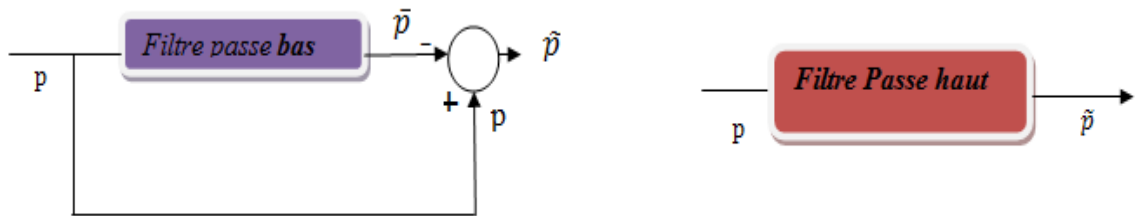


Figure (III-3): Séparation des puissances

III.3. Stratégie de l'identification

La stratégie de commande se base sur la détection des courants perturbateurs dans le domaine temporel. Il existe trois possibilités d'identification des courants perturbateurs :

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

La première méthode est la plus utilisée pour le filtre actif parallèle pour compenser les courants perturbateurs causés par les charges polluantes, Cette méthode de détection sera employée dans cette étude [14].

III.3.1. Calcul des courants perturbateurs

En inversant la relation (III-6), nous pouvons recalculer les courants dans le repère α - β comme le montre l'équation (III-8) :

$$A^{-1} = \frac{1}{\det(A)} (\text{com}A)^t \quad (\text{III-8})$$

$$\text{com}(A) = (-1)^{i+j} \det A_{ij} \quad (\text{III-9})$$

$$\text{com}(A) = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix} \quad (\text{III-10})$$

$$\text{Avec } C_{ij} = (-1)^{i+j} \det A_{ij}$$

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

En considérant les équations (III-7) et (III-8), 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:

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ 0 \end{bmatrix}}_{\text{Courant actif}} + \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ -\tilde{q} \end{bmatrix}}_{\text{Courant réactif}} + \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{\tilde{p}} \\ \tilde{\tilde{q}} \end{bmatrix}}_{\text{Courants harmoniques}} \quad (\text{III-12})$$

Courant actif Courant réactif Courants harmoniques

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. Les courants perturbateurs triphasés qui représentent les courants identifiés, *dit* courants de référence (I_{ref}), sont calculés à partir de la transformation α - β inverse donnée par

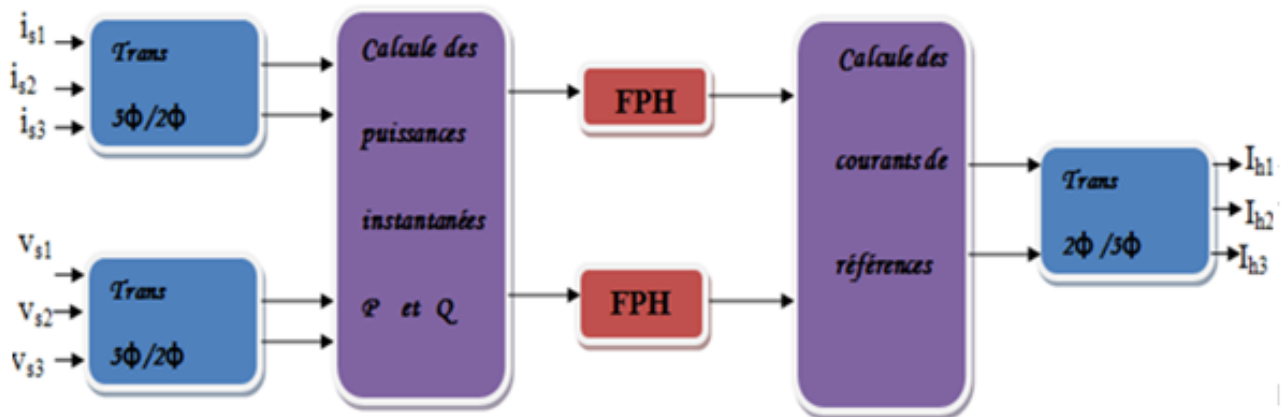
La relation (III-10):

$$\begin{bmatrix} I_{ref1} \\ I_{ref2} \\ I_{ref3} \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{\alpha} \\ I_{\beta} \end{bmatrix} \quad (III-13)$$

avec I_{α}, I_{β} courants perturbateurs calculés dans le repère α - β à partir des courants réactifs et harmoniques de la relation (III-9) [2;13].

III.3.2. Algorithme d'identification

Le schéma ci-dessous représente les différentes étapes qui permettent d'obtenir les courants perturbateurs due aux présences des charges non-linéaires [10].



Figure(III-4):Méthode P.Q d'extraction des courants de références

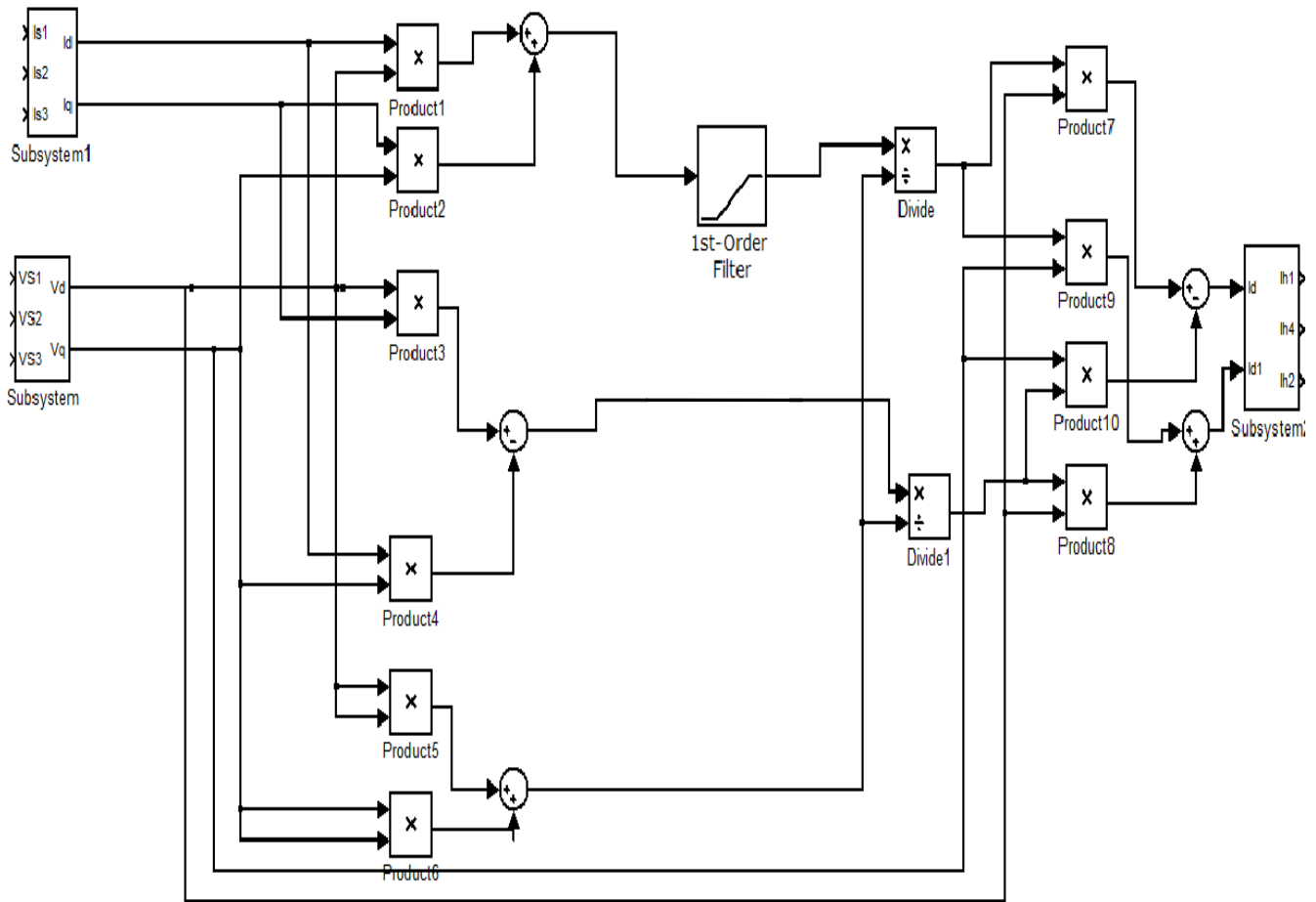


Figure (III-5):Schéma synoptique de la méthode d'identification des courants harmoniques

l'algorithme de l'identification des courants de références constitué principalement des blocs de la matrice de transformation du système triphasé du courant ou de tension au système biphasé (α - β), des filtres passe bas afin d'assurer l'annulation de la composante continue de la puissance active et réactive, et aussi des blocs de calcul des courants perturbateurs[15].

III.4.Conclusion

La méthode d'identification des courants harmoniques par l'intermédiaire des calculs des puissances réelles et imaginaires instantanées est la plus performante, facile à réaliser et surtout la plus adaptée à identifier d'autres types de perturbations (déséquilibre du courant, puissance réactive). Le comportement du filtre actif parallèle peut être contrôlé en utilisant logiciel MATLAB /SIMULINK. Cette partie fera l'objet du quatrième chapitre.

Chapitre IV

Modélisation et simulation du réseau perturbé

Chapitre IV

Modélisation et simulation du réseau perturbé

IV.1.Introduction

Ce chapitre est consacré à la modélisation et la simulation d'un réseau perturbé dont la structure est constituée d'un réseau d'alimentation triphasé caractérisé par une force électromotrice FEM et une résistance en série avec une inductance, une charge polluante caractérisée par un pont redresseur triphasé non commandé et un filtre actif parallèle à structure tension commandé par la technique de l'hystérésis. Ensuite nous montrons les résultats de simulation de l'ensemble en régime statique en vue de vérifier l'efficacité d'un filtre actif parallèle. Enfin, on présente des interprétations sur les résultats obtenues par simulation.

IV.2.schéma globale du système à simuler

Le schéma globale du système à étudier est représenté sur la figure (IV-1). Il est composé de quatre parties à savoir:

- ✓ Le réseau d'alimentation triphasé
- ✓ La charge non linéaire symbolisée par un redresseur non commandé
- ✓ Le filtre actif à structure tension (onduleur)
- ✓ Le système de commande des interrupteurs de puissance

Le raccordement de la charge polluante au réseau est du compensateur s'effectue par l'intermédiaire de l'impédance du réseau L_s et R_s . Le pont redresseur débite sur une charge L_{ch} et R_{ch} . Le couplage du filtre actif avec le réseau s'effectue par l'intermédiaire de L_f et R_f . [15]

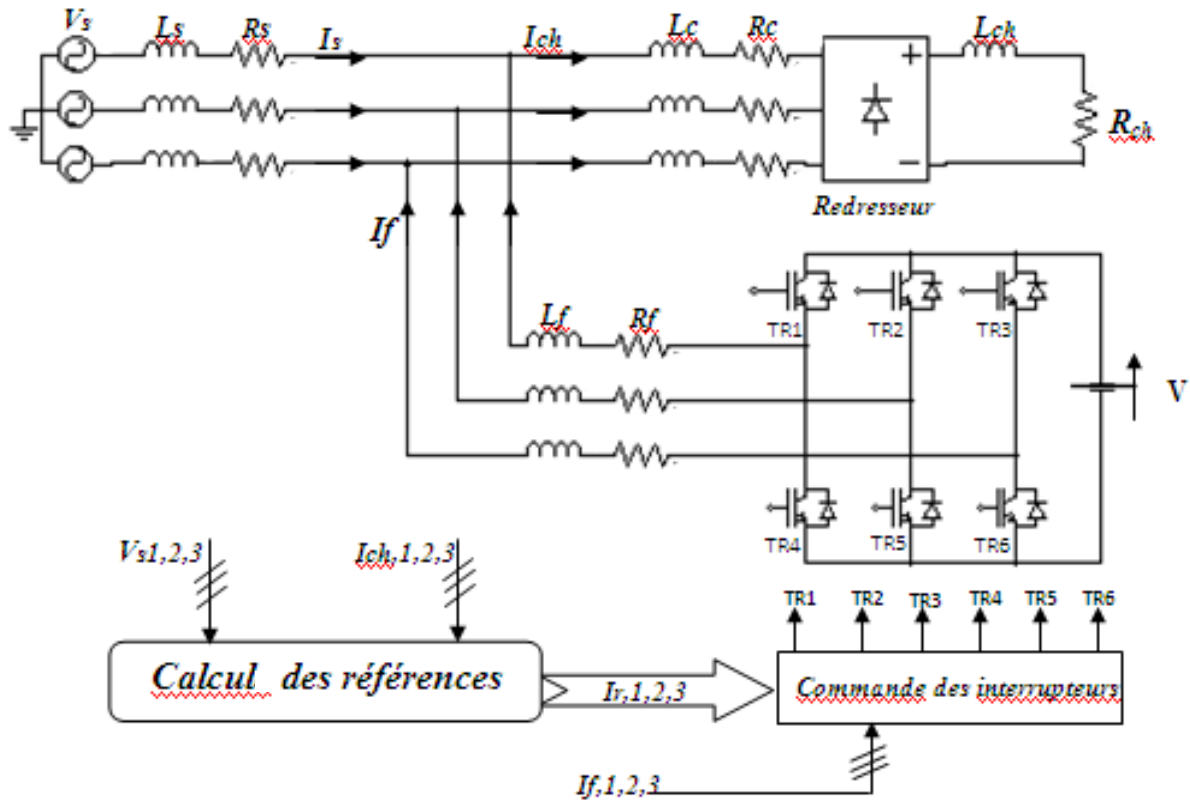


Figure (IV-1): Schéma synoptique du système à simuler

IV-3 Calcul des paramètres de simulation

Le réseau a pour puissance apparente nominale S_n et tension efficace simple V_n la tension efficace composé [2] . $U_n = \sqrt{3} V_n$ (IV-1)

L'impédance nominale du réseau est donné par :

$$Z_n = \frac{U_n^2}{S_n} \quad (\text{IV-2})$$

L'impédance Z_{cc} de court-circuit du réseau est généralement égale à 2% de Z_n , cette impédance exprimé en complexe nous donné :

$$Z_{cc} = R_{cc} + jL_{cc}\omega \quad (\text{IV-3})$$

La résistance de court-circuit R_{cc} a pour valeur 10 % de la réactance de court-circuit $L_{cc}\omega$.

$$Z_{cc} = R_{cc} + jL_{cc}\omega = R_{cc} + j 10 R_{cc} = R_{cc}(1 + j 10) \quad (\text{IV-4})$$

En module

$$\|Z_{cc}\| = \sqrt{101} R_{cc} \Rightarrow R_{cc} = \frac{1}{\sqrt{101}} \|Z_{cc}\| \quad (\text{IV-5})$$

et par la suite

$$L_{cc} = 10 \frac{1}{\omega \sqrt{101}} \|Z_{cc}\| \quad (\text{IV-6})$$

$$\text{Avec } \omega = 2\pi f \quad (\text{IV-7})$$

$$f = 50 \text{ Hz}$$

Les simulations montrent que pour obtenir une bonne **THD** et un meilleur dynamique Z_f doit varier entre 4 et 8 fois de Z_{cc}

$$Z_f = 4 \times Z_{cc} = R_f + j L_f \omega \quad (\text{IV-8})$$

(IV-3) (IV-5) (IV-6) (IV-7) on déduit les valeurs de R_f et L_f

$$R_f = 4R_{cc} = 4 \frac{1}{\sqrt{101}} \|Z_{cc}\| \quad (\text{IV-9})$$

$$L_f = 4L_{cc} = 4 \times 10 \frac{1}{\omega \sqrt{101}} \|Z_{cc}\| \quad (\text{IV-10})$$

Les valeurs des éléments caractérisant l'ensemble réseau-filtre actif et charge polluante sont regroupées dans le tableau (IV-1).

Réseau électrique
$V_s = 220 \text{ V}, f = 50 \text{ Hz}, (R_s = 0.5 \text{ m}\Omega, L_s = 15 \text{ }\mu\text{H})$
Charge polluante
Puissance 400 KVA, ($R_{d1} = 0.6 \text{ }\Omega, L_d = 2 \text{ mh}$), ($R_{d2} = 1 \text{ }\Omega, C_d = 3,3 \text{ mF}$), ($R_c = 1.2 \text{ m}\Omega, L_c = 50 \text{ }\mu\text{H}$)
Filtre parallèle
$V_{dc} = 740 \text{ V}, (R_f = 5 \text{ m}\Omega, L_f = 150 \text{ }\mu\text{H})$
Commande hystérésis
$\Delta I = \pm 20 \text{ A}$

Tableau (IV-1): Valeurs des éléments construisant la structure étudiée.

IV.4. Modélisation et simulation numérique

La modélisation d'un système électrique consiste à trouver les équations mathématiques qui décrivent son fonctionnement. [3]

IV-4 -1 Modélisation et simulation du réseau électrique

Le réseau électrique caractérisé par une source de tension sinusoïdale en série avec une impédance dite de court-circuit R_s et L_s , d'où la représentation du réseau par un système FEM triphasé équilibré en série avec une impédance figure[2;3]. (IV-2)

$$\begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} = \sqrt{2} \cdot e. \begin{bmatrix} \sin(\omega t) \\ \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (\text{IV -11})$$

$$Z_s = R_s + jL_s\omega \quad (\text{IV -12})$$

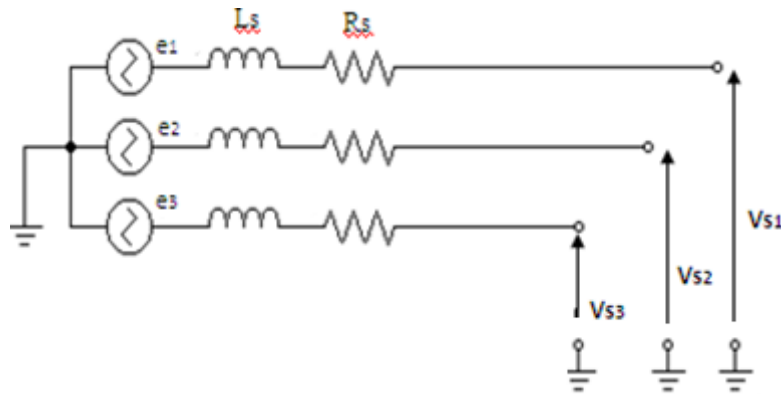
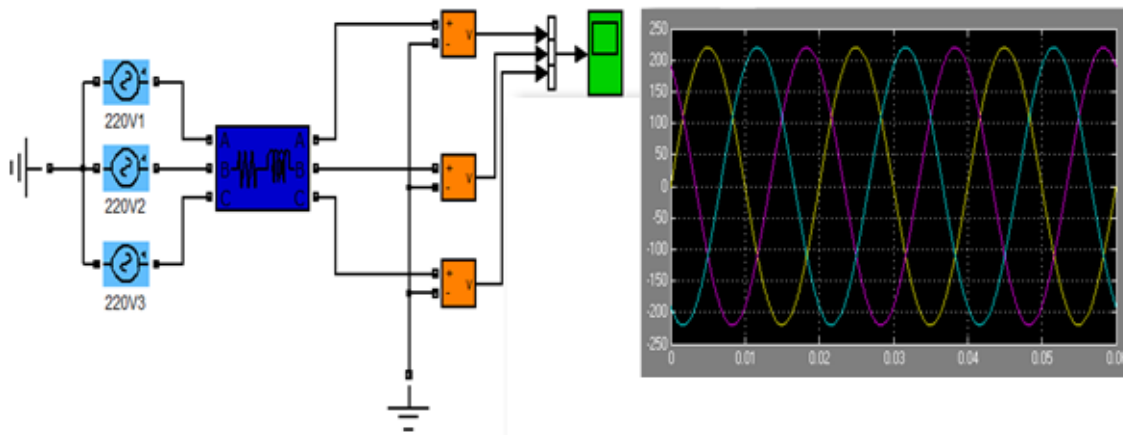
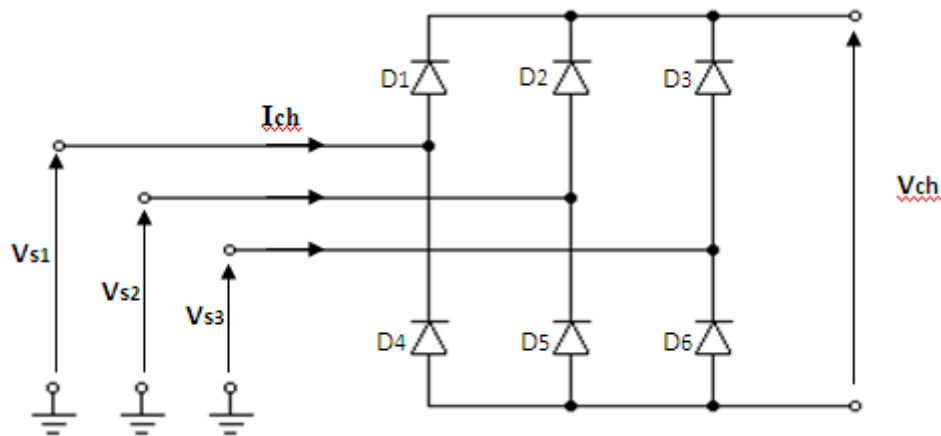


Figure (IV-2): Schéma synoptique d'un réseau triphasé.



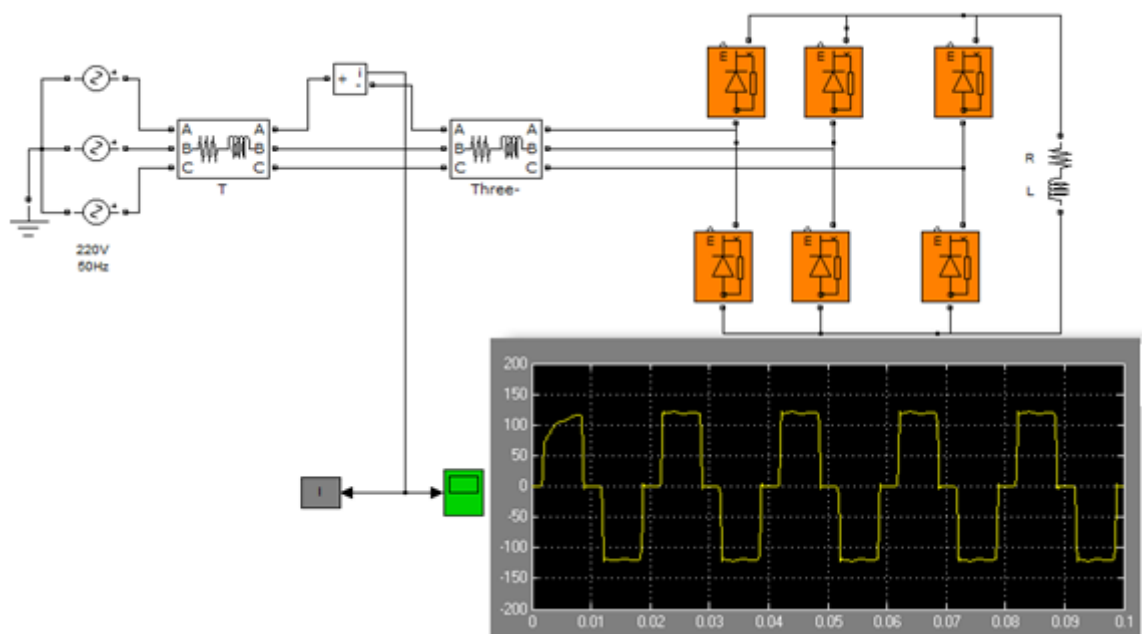
Figure(IV-3): Schéma de simulation du réseau triphasé

IV-4 -2Modélisation et simulation de la charge polluante



Figure(IV-4): Schéma synoptique d'un pont redresseur.

Pour tester le filtre actif à opté pour une charge polluante qui est un pont redresseur triphasé tout diode , représenté sur la figure (IV-4),celui-ci générer des harmoniques de courant de l'ordre $6K+1$.cette charge est modélisé comme étant un source de courant parfait [16]



Figure(IV-5): Schéma de simulation d'un pont redresseur tout diode.

IV-4 -2-1 Développement en série de fourrier des courants de source

(harmoniques du courant)

Un réseau alimentant un montage redresseur fournit à celui-ci courant presque rectangulaire. Figure(IV-6).

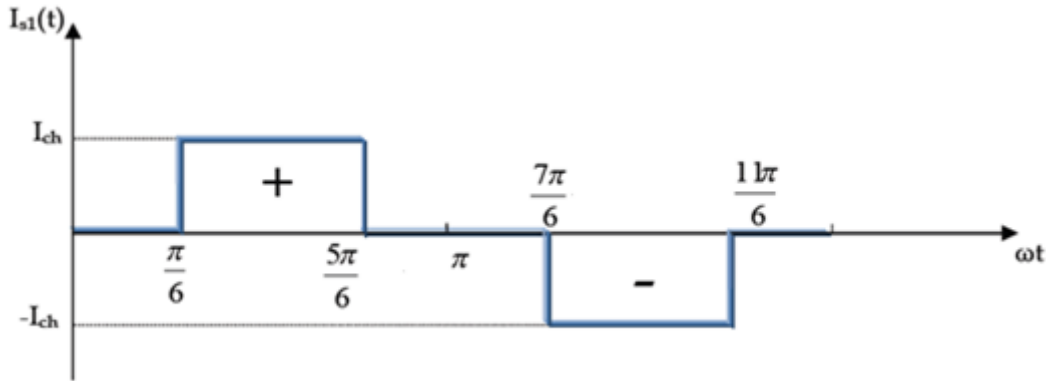


Figure (IV-6): Forme rectangulaire de courant d'entrée d'un pont redresseur

Is2 et Is3 sont décalés respectivement de 120° et 240° par rapport à Is1. En réalité la forme des ondes de courant ne sont pas rectangulaire (créneau), mais ont une forme ondulée due à la présence d'une inductance en aval avec le redresseur [14].

Pour décomposer ces courants on appliquera le théorème de Fourier :

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t) \quad (\text{IV-13})$$

Is1(t) est impaire (symétrie par rapport à l'origine) donc $a_0 = a_n = 0$

$$(\text{IV-14}) \quad b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} I_{s1}(t) \sin(n\omega t) d\omega t$$

$$(\text{IV-15}) \quad b_n = \frac{1}{\pi} \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{5\pi}{6}} I_{ch} \sin(n\omega t) d\omega t + \frac{1}{\pi} \int_{\frac{7\pi}{6}}^{\frac{11\pi}{6}} (-I_{ch}) \sin(n\omega t) d\omega t$$

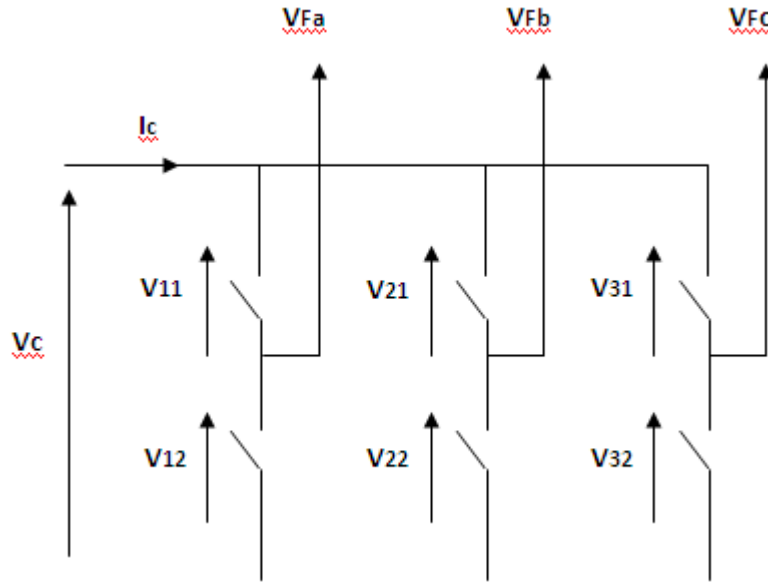
$$(\text{IV-16}) \quad b_n = \begin{cases} 0 & \text{si } n \text{ pair} \\ \frac{4I_{ch}}{n\pi} \cos\left(\frac{n\pi}{6}\right) & \text{si } n \text{ impair} \\ 0 & \text{si } n \text{ multiple de 3} \end{cases}$$

Donc:

$$n=1, [5,7], [11,13], [17,19], [23,25], \dots, [6k-1, 6k+1], \text{ et } k=1,2,3 \quad (\text{IV-17})$$

IV.4.3. Modélisation et simulation du filtre actif parallèle

Dans notre étude on a choisi un onduleur de tension commandé en courant, celui-ci est constitué de trois bras dans chacun est constitué de deux cellule, chaque cellule contient un interrupteur bicommandable (IGBT), au borne desquelles monté une diode en antiparallèle, la cellule ainsi défini forme un interrupteur bidirectionnel[3]



Figure(IV-7): Présentation schématique d'un onduleur triphasé.

IV.5. Critères de choix des interrupteurs de puissance de l'onduleur (FAP)

les filtres actifs se basant sur leur conception sur des onduleurs constitués essentiellement de composants entièrement commandables :

- ✓ **MOSFET** pour les basses tensions et faible puissance (≤ 30 KVA)
- ✓ **IGBT** pour les moyennes tensions et puissance (≤ 1000 KVA)
- ✓ **GTO** pour les hautes tensions et forte puissance (≤ 30000 KVA) [10].

Dans notre projet on va essayer d'utiliser la commande du filtre actif par la méthode de l'hystérésis car cette méthode est très simple et rapide et moins encombrante .

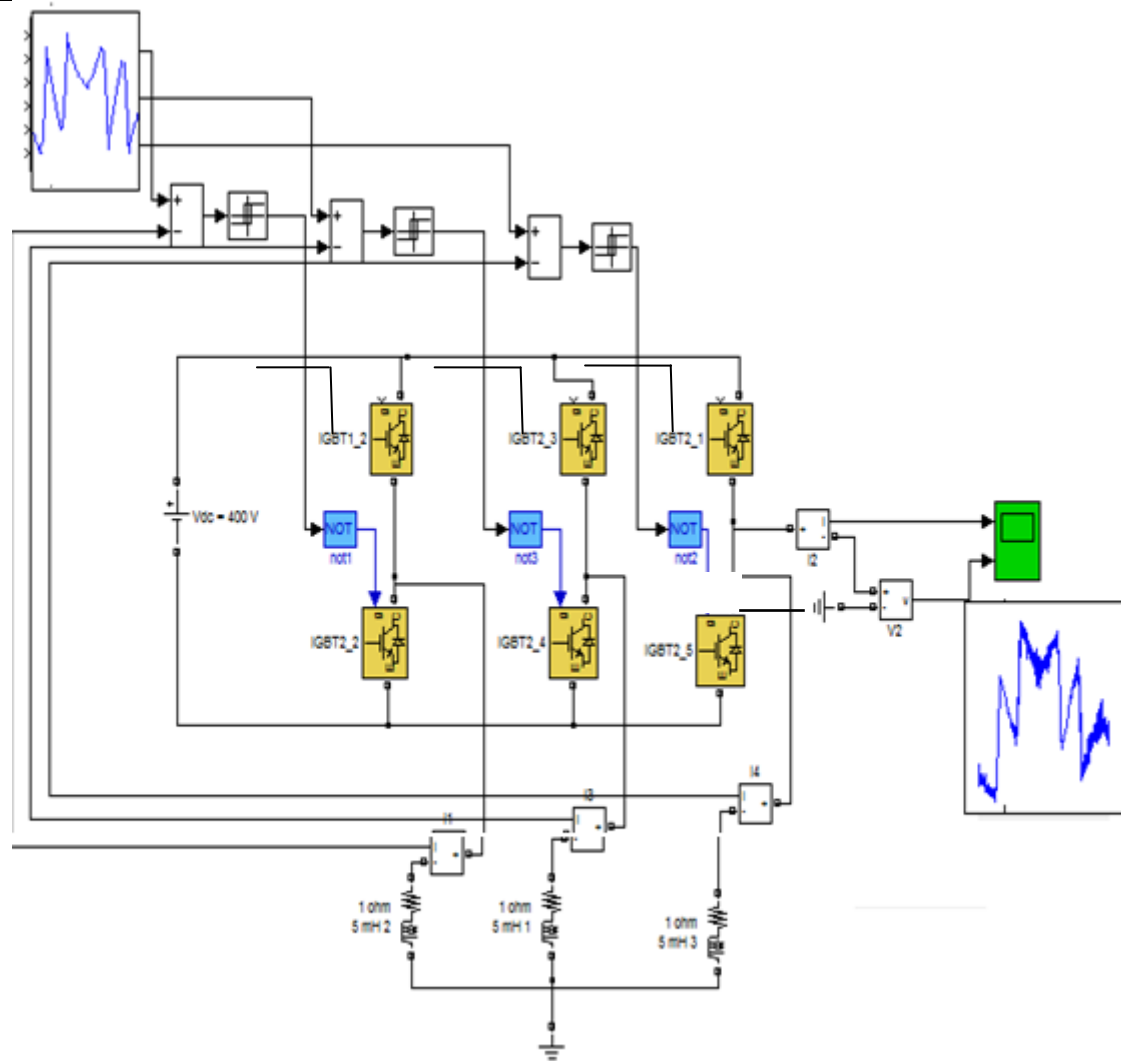


Figure (IV-8):Schéma de simulation du filtre actif parallèle

IV-6 Simulation de l'ensemble réseau, filtre actif parallèle et charge polluante

Les programmes de simulation développés ont été effectués en utilisant le logiciel Matlab-simulink qui permet de visualiser sur un intervalle de temps donné l'évolution des courants dans les différentes branches du circuit. La modélisation globale de l'ensemble réseau, filtre actif parallèle est représenté sur la figure (IV-9).

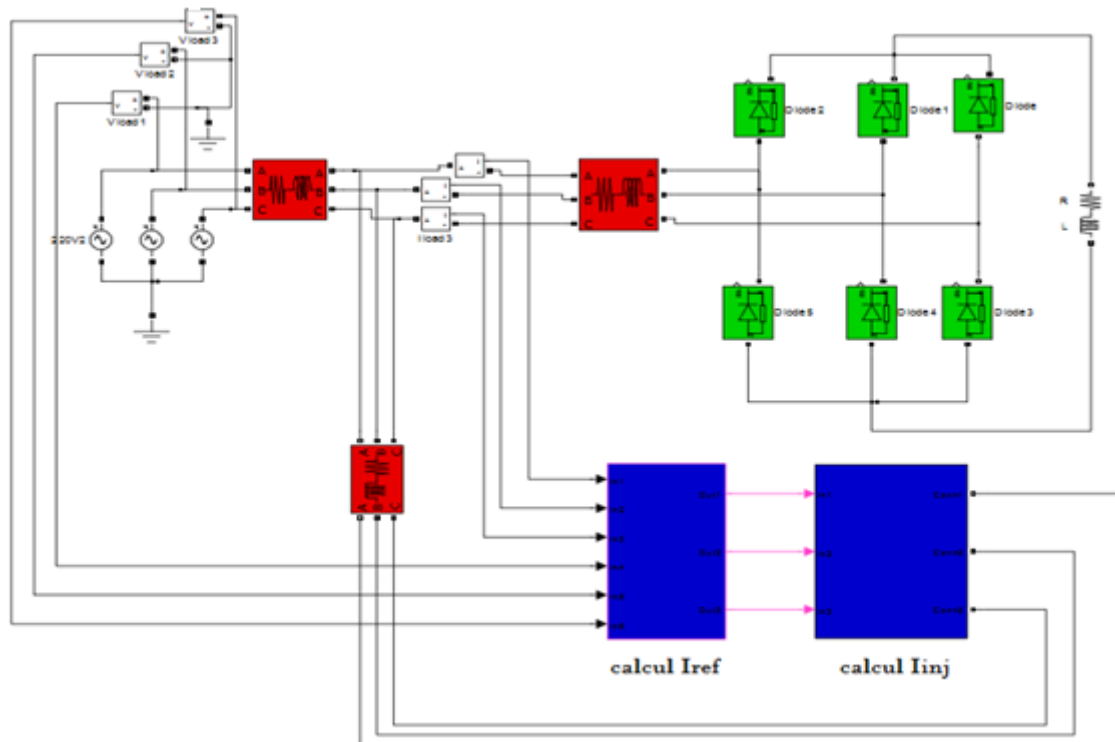


Figure (IV-9):Schéma global d'un filtre actif parallèle

IV.6.1. Commande par Hystérésis

IV.6.1.1. Charge R-L

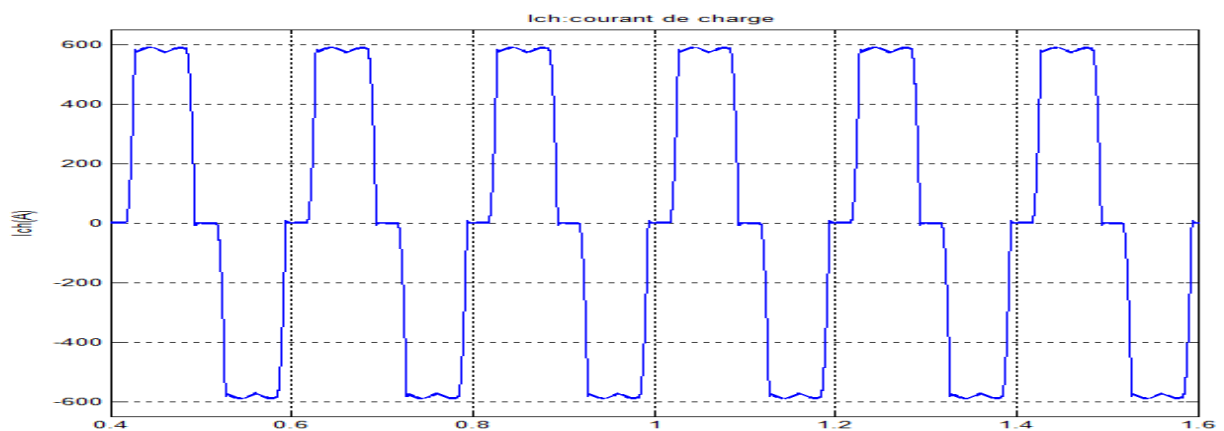


Figure (IV-10): Courant de la charge

Les figures(IV-10-11-12-13)montrent les résultats obtenus avec la commande parhystérésis dans le cas où le pont à diodes alimente une charge de type RL. Les performances du filtre actif en commandeHystérésis dépendent de l'inductance de découplage L_f , de la tension V_{cet} de la largeur de la bonde d'hystérésis ($\Delta I = \pm 20$).

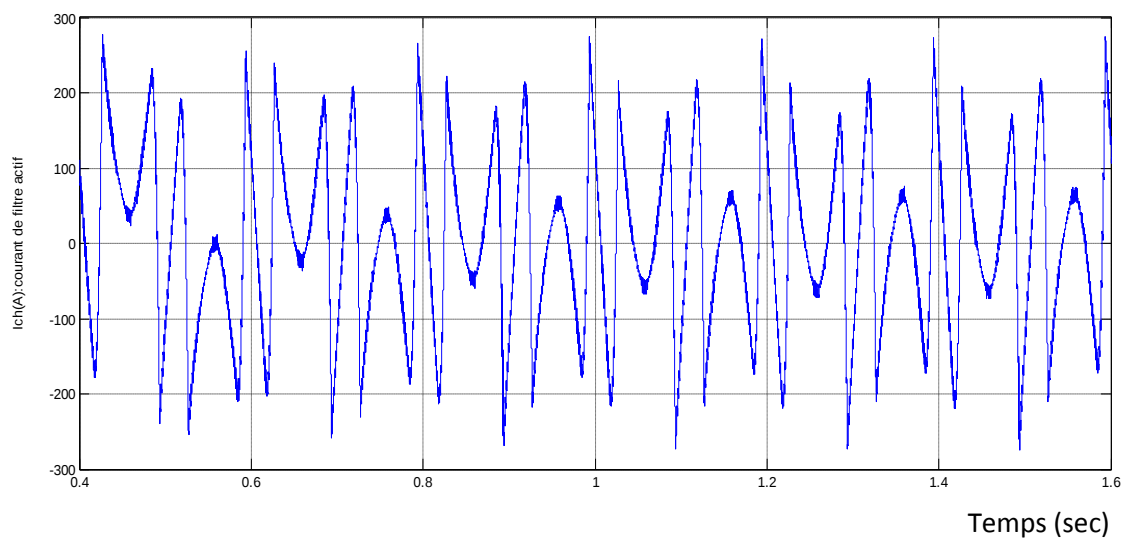


Figure (IV-11): Courant injecté par le filtre

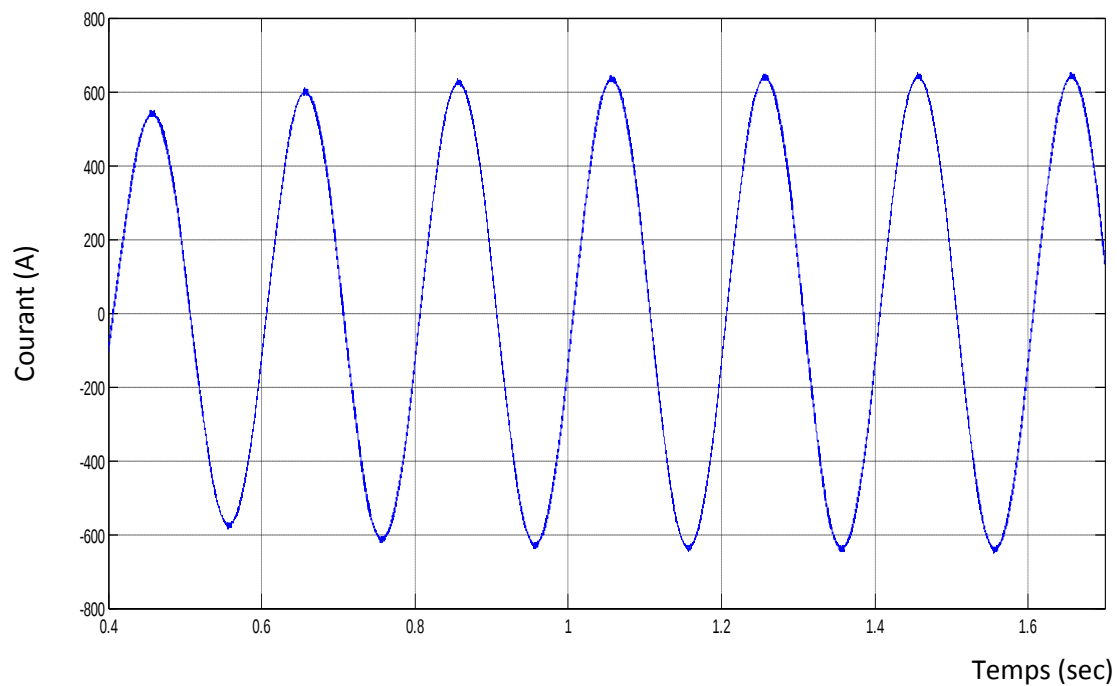


Figure (IV-12): Courant de la source

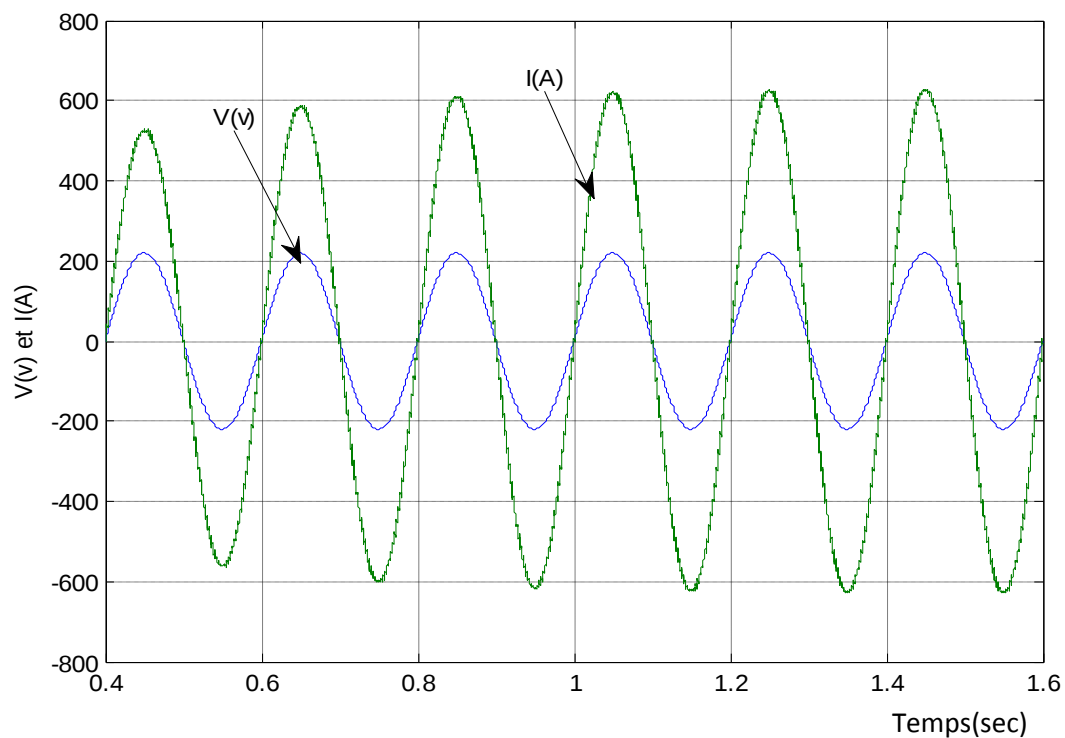


Figure (IV-13): Courant et la tension de la source après filtrage

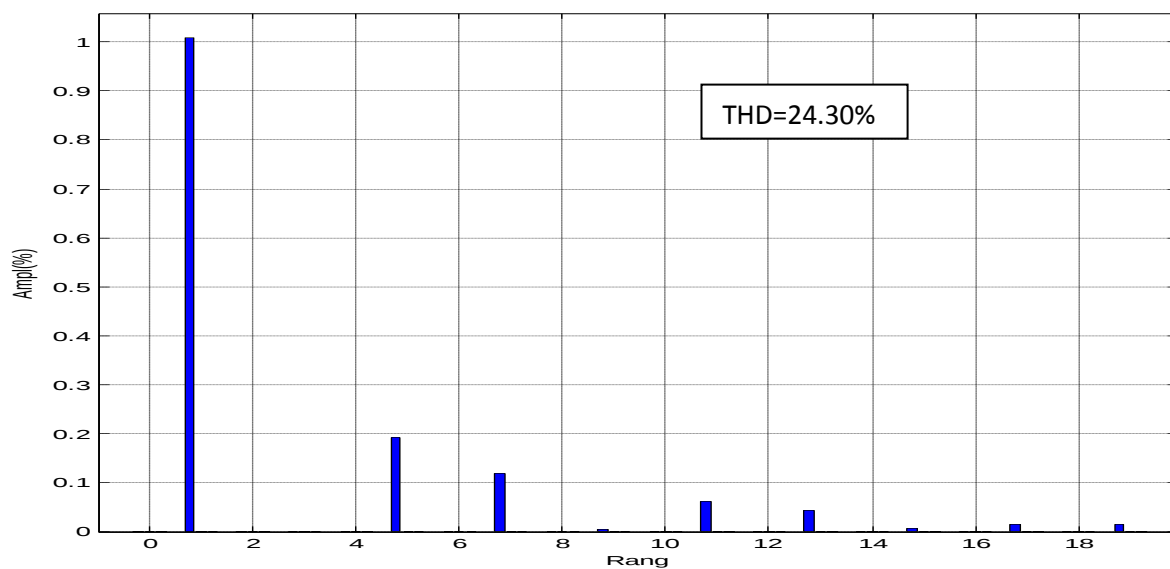


Figure (IV-14) : Spectre du courante de la source avant filtrage

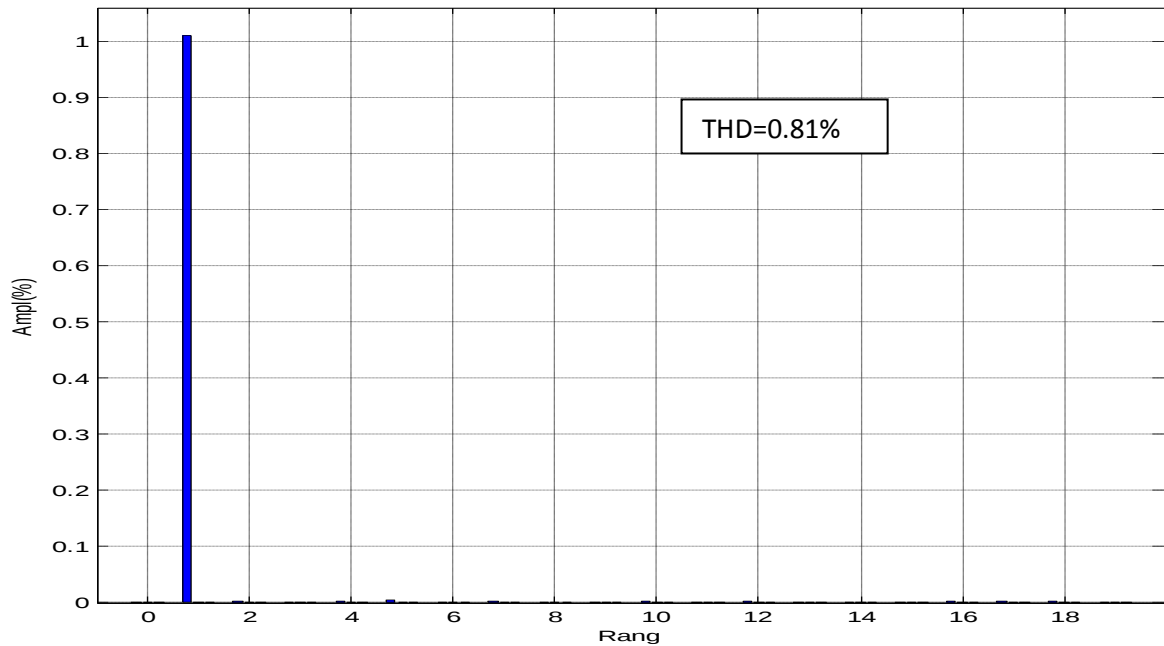


Figure (IV-15) : Spectre de la courante après filtrage

on voit d'après la figure (IV-13) que l'allure du courant de source après filtrage est presque sinusoïdale et en phase avec la tension de source, ce qui prouve la bonne qualité de filtrage du filtre actif parallèle.

Les harmonique au niveau de la source sont atténués ,comme le montre le spectre

de figure (IV-15),avec unTHD=0.81%

IV.6.1.2. Charge R-C

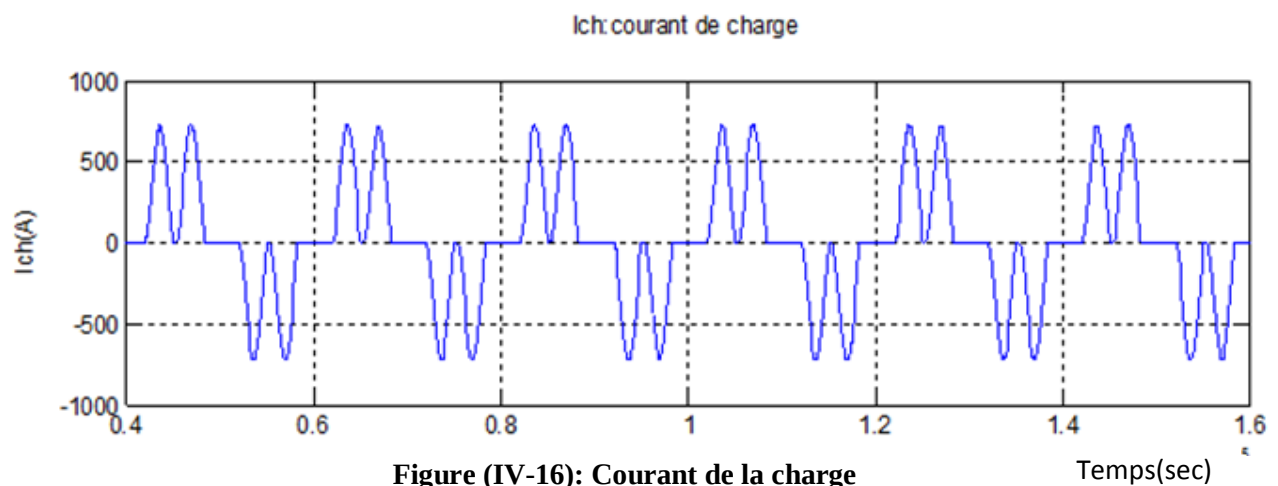


Figure (IV-16): Courant de la charge

Les figures(IV-16-17-18), montre les résultats obtenus avec la commande Hystérésis dans le cas où le pont à diodes alimente une charge de type RC

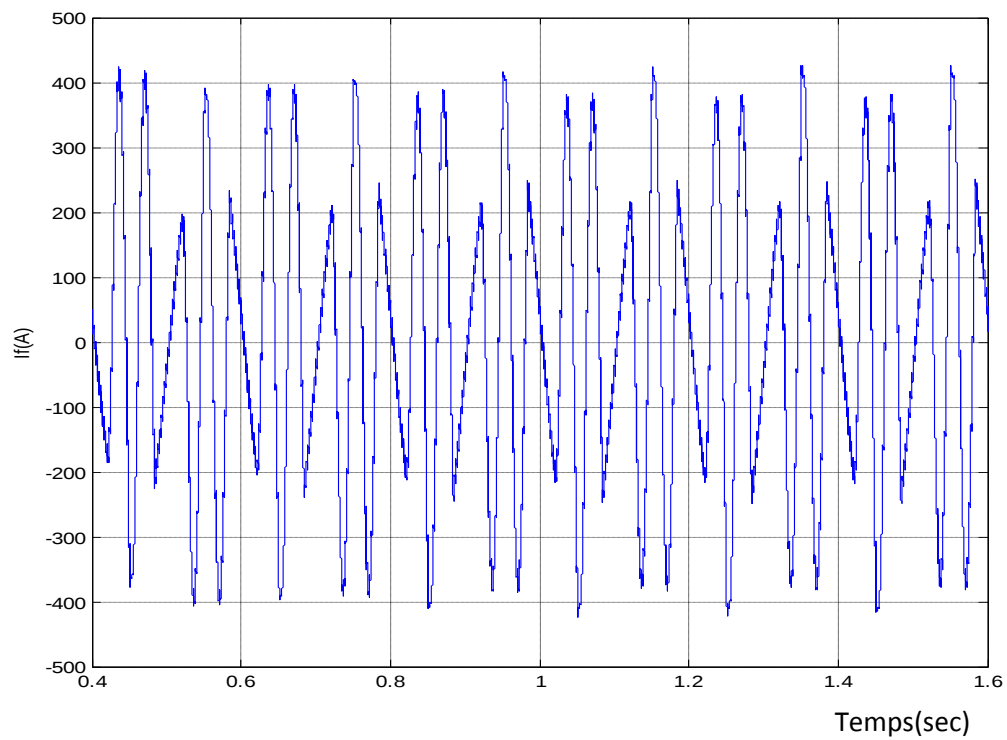


Figure (IV-17): Courant injecté par le filtre

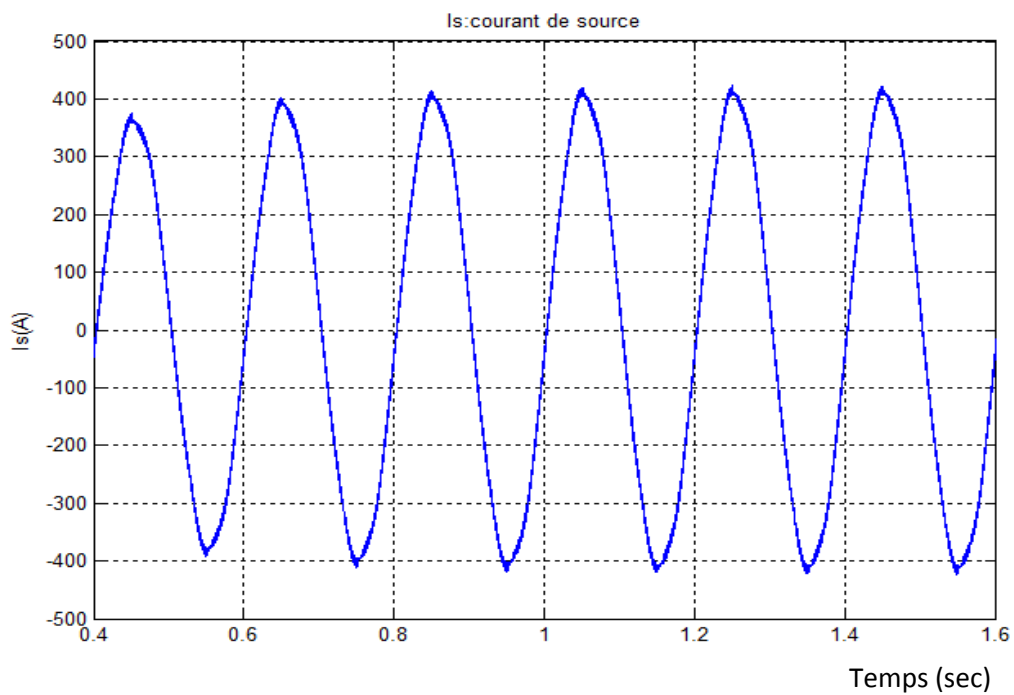


Figure (IV-18): Courant de la source

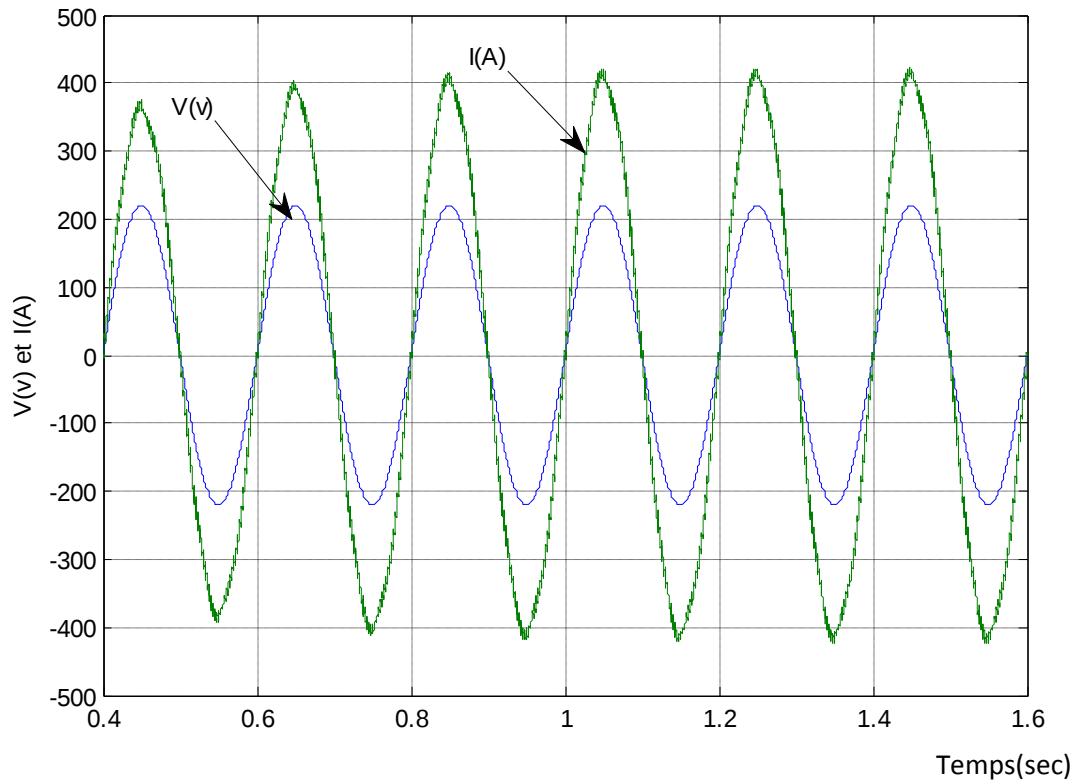


Figure (IV-19): Courant et tension de la source après filtrage

Le courant de source après filtrage est presque sinusoïdal et en phase avec la tension de source. Ceci induit un facteur de puissance proche de l'unité ,donc une bonne compensation de la puissance réactive de la source.

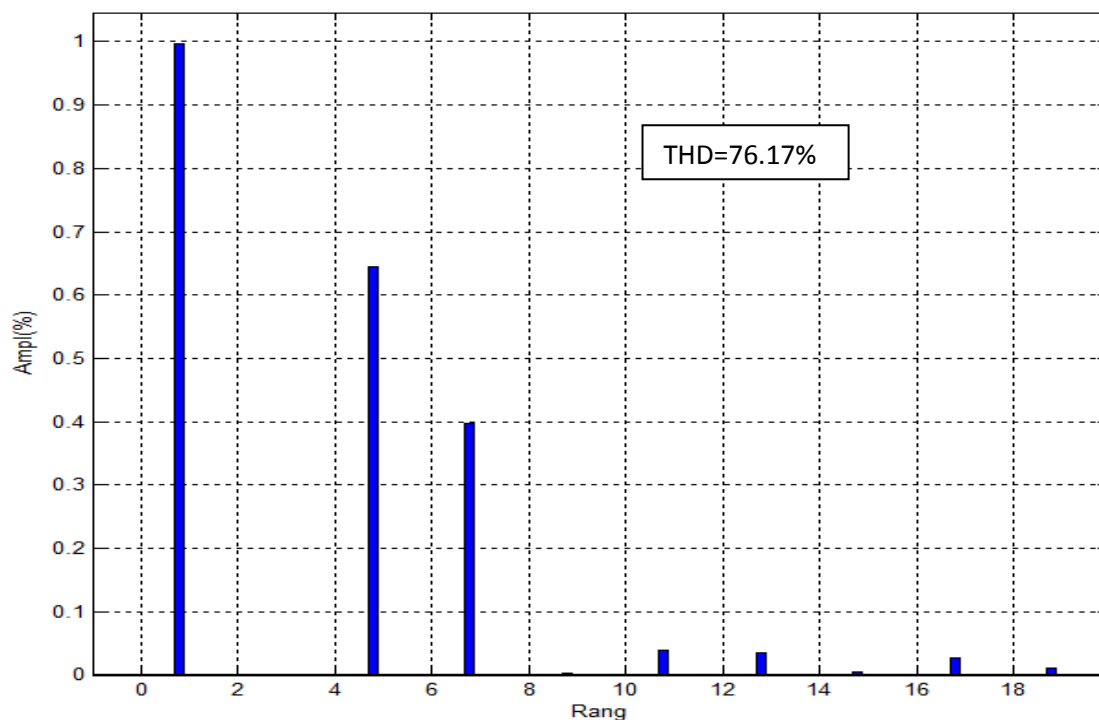


Figure (IV-20) : Spectre du courant coté source avant filtrage

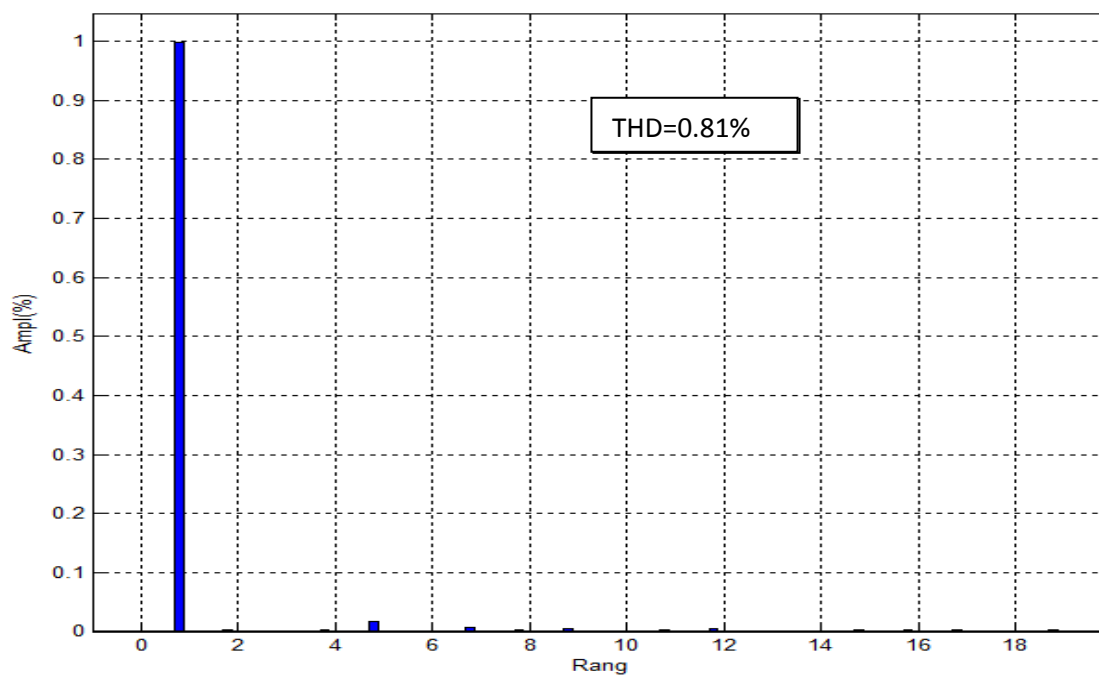


Figure (IV-21) : Spectre du courant après filtrage

Les figure (IV-20-21) présentent l'analyse spectrale des courant de charge non linéaire. Le THD du courant de la charge non linéaire est de 76.17% ,l'augmentation du THD par rapport au cas précédent est due à la forte ondulation du courant de la charge non linéaire le THD du courant de source est égale à 0.81%, ce qui donne une bonne qualité de filtrage.

Commande	Charge	THD% avant filtrage	THD% après filtrage
Commande hystérésis	(R-L)	24.30%	0.81%
	(R-C)	76.17%	0.81%

Tableau(IV-2): Les résultat des simulations

Les résultats obtenus montrent l'efficacité et les bonnes performances du filtre actif parallèle de puissance, qui a réduit la THD à une valeur inférieure à 5% correspondant aux recommandations et aux normes internationales [17].

IV.7.Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté la modélisation et la simulation de l'ensemble réseau, filtre actif parallèle et charge polluante. La méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées a été utilisée pour générer les courants de référence. La méthode d'identification utilisée s'adapte bien aux changements de la charge non linéaire.

CONCLUSION GENERALE

La consommation de l'énergie électrique est très répandue en courant continu, pour cela les redresseurs sont les plus utilisés. Mais le besoin croissant induit automatiquement une multiplication de ces équipements qui à son tour provoquent des perturbations, de plus en plus présentes sur le réseau électrique. Cependant, la pollution des réseaux est d'autant plus importante que le nombre de ces convertisseurs élevés. Ces convertisseurs provoquent une dégradation du facteur de puissance du réseau due à la présence de la puissance déformante et génèrent des courants très riches en harmoniques.

Après l'analyse des perturbations harmoniques et leurs effets nuisibles sur le réseau électrique, on a présenté les solutions traditionnelles pour les réduire, notamment le filtrage passif tel que le filtre amorti et résonant. Le filtrage actif est une nouvelle solution pour la dépollution harmonique.

Un filtre actif peut être connecté sur le réseau en série ou en parallèle et avoir deux structures différentes (tension ou courant). En raison de la simplicité de sa commande, presque la totalité des filtres dans le monde sont de structure tension. C'est la raison principale pour laquelle on a retenu cette structure.

On a ensuite étudié le contrôle de ce filtre actif. Pour identifier les courants harmoniques, on a choisi la méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées qui donne de bons résultats en régime statique ou dynamique. La commande utilisée afin de contrôler le courant du filtre, c'est l'hystérésis. Cette commande est très simple à mettre en œuvre mais dans ce type de commande la fréquence instantanée de commutation n'est pas contrôlable.

Les résultats de simulation obtenus par MATLAB/SIMULINK montrent bien le rôle du filtre actif parallèle pour assurer à la fois la compensation des courants harmoniques et l'énergie réactive. L'avantage majeur du FAP c'est son adaptation avec le changement de la charge (R-L ou R-C). D'après ces résultats on constate que le THD du courant de charge avant filtrage (76,17%) a été réduit après filtrage à 0,81% côté réseau pour une charge RC. Pour une charge RL, le THD avant filtrage (24,30%) a été réduit à 0,81%.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] **BOUDACHE ABDELKRIM ET GALOUL FAYÇAL,**
«Etude par simulation d'un filtre actif parallèle», mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en génie électrotechnique université de M'sila 2005 2006
- [2] **ZELLOUMA.L,**
« Filtrage actif parallèles des harmoniques de courant génère par un pont redresseur triphasé non commande », thèse de magistère de l'université de Annaba, 2006
- [3] **A. OMER,**
« Simulation d'un filtre actif parallèle de puissance pour la compensation des harmoniques du courant » Thèse de Doctorat d'état de l'Université de Annaba, 2007.
- [4] **CAHIER TECHNIQUES SCHNEIDER-ELECTRIC N 6883 427 /A,**
«Guide de conception des réseaux électriques sur les harmoniques»,
- [5] **THIERRY DEFLANDRE ET PHILIPPE MAURS,**
« Les harmoniques sur les réseaux électriques », direction des études et recherche en France - édition enrôles -1998.
- [6] **BOUGUERRA SAMIR ET BOURENNANE IBRAHIM,**
« Filtrage actif parallèle des réseaux électriques avec compensation de l'énergie réactive» mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en génie électrotechnique université de M'sila 2006/2007
- [7] **GHASSOULI NABIL ET RAOUACHE NOUI,**
« Application du filtrage actif parallèle sur une charge dynamique non linéaire », mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en génie électrotechnique université de M'sila 2006 2007
- [8] **J. N. FIORINA,**
« Harmoniques en amont des redresseurs des ASI », Cahier Technique n° 159 et 160.
- [9] **ZELLOUMA.L,**
«Contribution à l'étude du filtrage des harmoniques des réseaux de distribution à l'aide du filtre actif », thèse de doctorat de l'université d'Annaba, 2010.
- [10] **F. MEKRI,**
« Etude et commande d'un filtre actif parallèle à structure tension », thèse de magistère université de Mohammed Boudiaf M'sila 2001.
- [11] **A, CAGHI,**
« Contribution au contrôle du courant sur un réseau de distribution électrique application d'un compensateur actif », Thèse de Doctorat d'état de l'Université de Banta 2003

[12] MELLE HÏND DJEGHLOUD,

« Filtrage actif parallèle », thèse de doctorat de l'université de mentouri constantine 2007

[13] MOHAMAD ALAA EDDIN ALALI,

« Contribution à l'Etude des Compensateur Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension », Thèse de Doctorat de l'Université de louis pasteur Strasbourg ,2002

[14] BADACHE ZOHIR ET SACI ABDESLAM,

«Étude et simulation d'un filtre actif parallèles en utilisant un onduleur a trois niveaux a structure npc pour la compensation des courants harmoniques», mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en génie électrotechnique.

UNIVERSITE DE Msila 2005 2006

[15] NICOLAS BRUYANT,

«Étude et commande généralisé de filtre actif parallèle, compensation globale ou sélective des harmoniques régimes équilibré ou déséquilibré », Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes 1999.

[16] OULD-OUALI SAMY HASSANI,

« Etude et réalisation d'un filtre actif parallèle commandé par Logique Floue », Thèse de Magister de l'Ecole Militaire Polytechnique, 9 Janvier 2002.

[17] H. AKAGI,

« New trends in active filters for power conditioning », IEEE Tran. on Industry applications, vol.32, No. 6, pp. 1312-1322, November/December 1996.

[18] THIERRY GOURAUD,

« Identification et rejet de perturbations harmoniques dans des réseaux de distribution électrique », Thèse de Doctorat de l'Ecole Centrale de Nantes, 7 Janvier 1997.

[19] FARID HAMOUDI,

«Commande Robuste d'un Filtre Actif Shunt a Quatre Fils», THESE DE MAGISTER DE L'Université de Batna, 2008.

[20] DJAFAR OULD ABDESLAM,

«Techniques neuromimetiques pour la commande dans les Systems electriques : application au filtrage actif parallèl dans les Réseaux Electriques basse tension », Presentee pour obtenir le grade de Docteur de l'université de Haute-Alsace 2005

[21] FATIHA MEKRI, MOHAMED MACHMOUM, NADIA AÏT-AHMED, BENYOUNESS MAZARI,

«A comparative study of voltage controllors for series active power filters», electric power Systems Research EPSR-2976; No. of Pages12