



Mémoire de Fin d'Étude

Présenté à

**L'Université Echahid Hamma Lakhdar
d'El-Oued**

Faculté de Technologie

Département de Génie Electrique En vue de l'obtention

du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Spécialité: Machines électriques

En Réseaux électriques

Thème

**Filtrage actif et filtrage passif
des courants harmoniques**

Présenté par :

BEN DAOUD LAKHDAR

MEHDA SMAIL

Dr.Mammeri Oussama

Dr.Hicham Sarhoud

Mr. Mahani Tidjani

MAA

MCA

Encadreur :

Mr. MAHNI Tidjani

Président

Rapporteur

Examineur

Année Universitaire 2019/2020

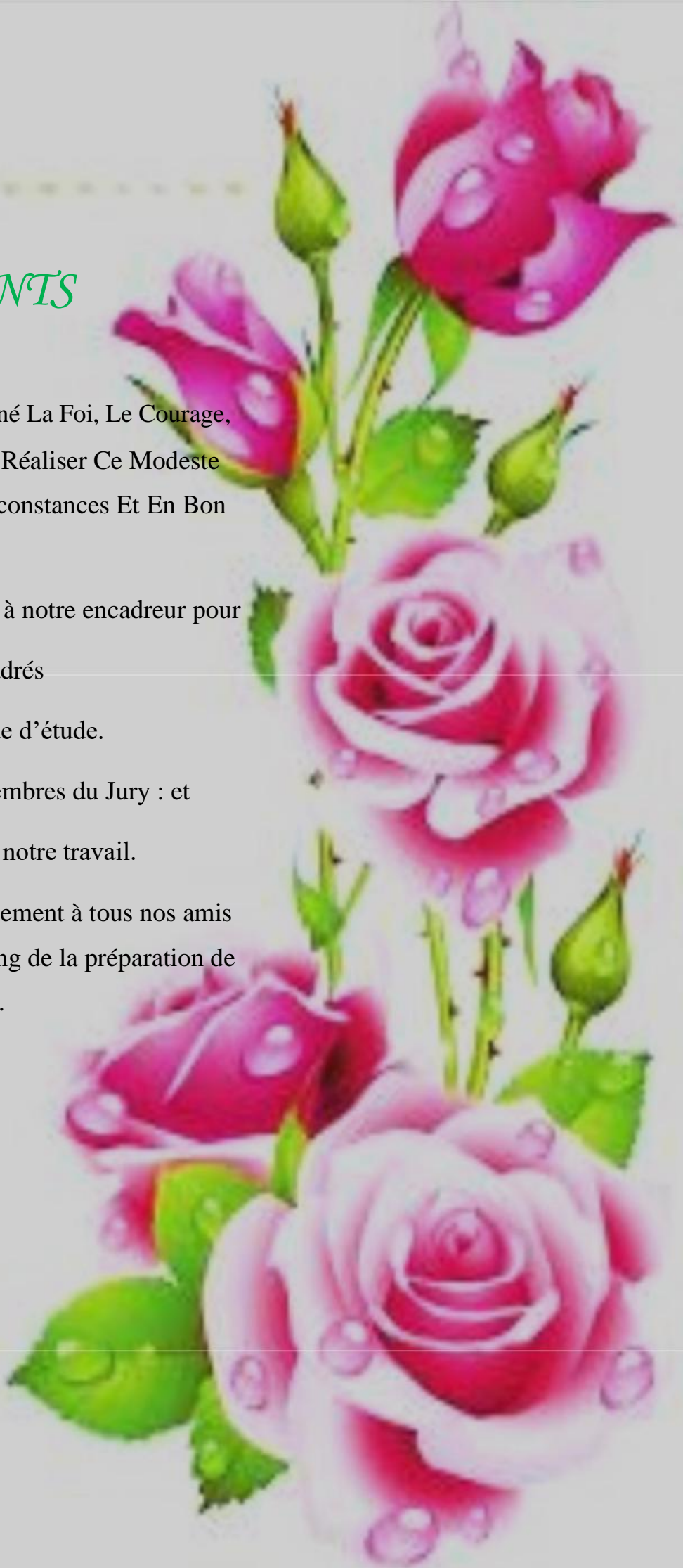
REMERCIEMENTS

Louange A Dieu Qui Nous A Donné La Foi, Le Courage,
La Patience Et La Volonté Pour Réaliser Ce Modeste
Travail Dans Des Meilleures Circonstances Et En Bon
Etat

Nos premiers remerciements iront à notre encadreur pour
nous avoir encadrés
durant toute la période d'étude.

Nous remercions aussi les membres du Jury : et
d'avoir accepté de juger notre travail.

Nos vifs remerciements vont également à tous nos amis
pour leur soutien moral tout au long de la préparation de
ce mémoire.



Dédicace

je dédie ce fruit de travail :

A ma très chère maman, pour sa tendresse, sa bienveillance, son
Encouragement, pour ce qu'elle a fait depuis mon enfance jusqu'à ce
jour.

A mon cher père pour sa générosité, sa bonté, je
te remercie.

A mes frères et A mes chères sœurs

Et à tous les membres de ma grande famille.



Résumé :

Les convertisseurs statiques sont de plus en plus utilisés grâce aux avantages énormes qu'ils offrent. Cependant ces convertisseurs polluent les réseaux électriques en introduisant des courants et des tensions harmoniques et en consommant parfois l'énergie réactive. Les harmoniques circulent dans les réseaux électriques et peuvent perturber le fonctionnement normal de certains équipements électriques voir même engendrer leur destruction.

Afin d'éliminer les courants harmoniques engendrés par les convertisseurs statiques plusieurs solutions existent.

Dans ce travail, la solution classique, qui consiste à éliminer les harmoniques par des filtres passifs est présentée. Ensuite, la solution moderne à l'aide d'un filtre actif parallèle est traitée. Les différents éléments constituant le réseau électrique-charge non linéaire-filtre sont présentés.

Dans les simulations, ces deux types de filtres sont utilisés pour éliminer les courants harmoniques générés par un pont redresseur. Les résultats des simulations sont présentés et interprétés.

Mots clés : Charge non linéaire, Filtre actif, Filtre passif, Taux de distorsion harmonique, Identification des courants harmoniques.

Summary:

Stationary transformers are being used more and more often thanks to the tremendous advantages they provide. However, these transformers pollute electrical networks by introducing harmonic currents and voltages and occasionally consuming reactive power. Harmonics are widespread in electrical networks and can disrupt or even destroy the normal operation of some electrical equipment. In order to eliminate harmonic currents induced by static transformers, several solutions exist. In this work, the classic solution is presented, which is to eliminate the harmonics. By negative filters. Then the modern solution is treated with a parallel active filter. The various elements that make up an electrical network are shown - the non-linear load filter. In simulations, these two types of filters are used to eliminate harmonic currents resulting from the rectifier bridge. Simulation results are displayed and interpreted.

Key words: nonlinear load, active filter, passive filter, harmonic distortion rate, harmonic currents determination.

ملخص:

يتم استخدام المحولات الثابتة أكثر فأكثر بفضل المزايا الهائلة التي تقدمها. ومع ذلك، فإن هذه المحولات تلوث الشبكات الكهربائية عن طريق إدخال تيارات وفولتية توافقية واستهلاك الطاقة التفاعلية أحياناً. تنتشر التوافقيات في الشبكات الكهربائية ويمكن أن تعطل التشغيل العادي لبعض المعدات الكهربائية أو حتى تؤدي إلى تدميرها. من أجل القضاء على التيارات التوافقية الناتجة عن المحولات الثابتة، توجد عدة حلول في هذا العمل، يتم تقديم الحل الكلاسيكي، والذي يتمثل في القضاء على التوافقيات بواسطة المرشحات السلبية. ثم تتم معالجة الحل الحديث باستخدام مرشح نشط متوازي. يتم عرض العناصر المختلفة التي تشكل شبكة كهربائية - مرشح الحمل غير الخطي. في عمليات المحاكاة، يتم استخدام هذين النوعين من المرشحات للتخلص من التيارات التوافقية الناتجة عن جسر المعدل. يتم عرض نتائج المحاكاة وتفسيرها.

الكلمات المفتاحية: الحمل غير الخطي، الفلتر النشط، الفلتر السلبي، معدل التشويه التوافقي، تحديد التيارات التوافقية.

LISTE DES SYMBOLES

f	Fréquence
f_h	Fréquence de la composante harmonique de rang h
f₁	Fréquence de la composante fondamentale
THD	Taux de Distorsion Harmonique
D	Puissance Déformante
P	Puissance active
Q	Puissance reactive
S	Puissance apparente
FP	Facteur de puissance
I_f	Valeur efficace du courant injecté par le FAP
I_{1h}	Valeur efficace du Courant harmonique du rang h
V₁	Valeur efficace de la tension de l'harmonique de rang h
V_h	Valeur efficace de la tension du fondamental
p	indice de pulsation
L	Inductance
C	Capacité
R	Résistance
IGBT	Insulated Gate Bipolaire Transistor
MLI	modulation de largeurs d'impulsions
FAP	Filtre actif parallèle
Fp	Filtre passif
R_s	Résistance du réseau côté source (Ω).
L_c	Inductance côté source (H).

R_c	Résistance côté de charge (Ω).
L_c	Inductance côté source (H).
L_f	Inductance de filtre
C_{dc}	Condensateur du bus continue
I_c	Courant du source
I_f	Courant du filtre
I_h	Courant harmonique de la charge
i_{α} , i_j , i_c	le courant d'identifie
i_{ca} , i_{cb} , i_{cc}	le courant de ligne
e[~] , q[~]	Composantes Alternatives de la puissance réelle et imaginaire respectivement
α-β	Axes du repaire de Concordia
ΔT	La période de variation du courant du filtre
wh	la pulsation du rang h
T_i	Etat de l'interrupteur i (ouvert ou fermé)
V_m, V_p	Paramètre intégrateur
I_m, I_p	Le courant injecté par le filtre
I_{cI}	Les composantes orthogonales du repère (α - β)
I_{c1}	Les composantes orthogonales du repère (α - β)
I_{ci}	Constant dans l'hypothèse d'une tension sinusoïdale équilibrée
I_{sref}	L'écart entre le courant réel et sa référence

Ic1	la valeur efficace du courant fondamental
Ici	Les valeurs efficaces des différentes harmoniques du courant. Le domaine
i_{sref}	Le courant de référence de la source
i_h	Le courant harmonique
Ic	la valeur efficace du courant de la charge
L_{ch}	L'inductance de charge
L_f	L'inductance de filter
R_{ch}	Résistance de charge
R_f	La résistance de filter
f_r	La fréquence de résonance du filtre
f_{max}	La fréquence maximale de commutation
f_p	La fréquence de la porteuse
V_s	La tension de réseau
VDC	La tension continue
V_{ref}	La tension de reference
W	Pulsation
E	Tension instantanée de phase du réseau
S_{a,b,c}	États de commutation des interrupteurs du convertisseur de tension
V_{ab}	les tensions d'entrée du redresseur
V_{ref}	La tension de reference
V_{tria}	la tension de la porteuse triangulaire
E_m	Tension de phase maximale du réseau
M	L'indice de modulation
r	Le coefficient de réglage ou le taux de modulation
V_m	L'amplitude de la tension de référence
U_{pm}	L'amplitude de la porteuse
sk	la valeur efficace du courant fondamental
Δi	Les valeurs efficaces des différentes harmoniques du courant. Le domaine

LISTE DES FIGURES

Figure -I.1 : La représentation de la forme de l'onde d'un courant déformé avec les différents courants harmonique le constituent.	6
Figure-I.2 : Représentation spectrale des harmoniques.	6
Figure -I.3 : Différents types de résonances rencontrées sur le réseau.	9
Figure -I.4 : diagramme de Fresnel des puissances	11
Figure-I.5 : Représentation des inters et infra harmoniques	13
Figure -I.6 : a- Filtre résonnant b Filtre passif amorti	16
Figure -I.7 : Structure du pont dodécaphasé	17
Figure -I.8 : Forme des courants et rang des harmoniques	18
Figure -I.9 : une distribution en étoile permet le découplage par les impédances naturelles et/ou additionnelles	19
Figure -I.10 : Montage d'un filtrage actif parallèle	21
Figure -I.11 : Montage d'un filtrage actif en série	22
Figure -I.12 : combinaison parallèle –série actif(UPQC).	23
Figure -II.1 :Raccordement d'une inductance anti-harmonique.	27
Figure -II.2 : Filtre passif résonant.	28
Figure -II.3 :Filtre passif amorti de 2 ^e Ne ordre .	29
Figure -II.4 : Autres types des Filtre passif amorti	30
Figure -II.5 : Schéma bloc avant le filtrage.	32
Figure-II.6 : Les allures des courants de la source avant le filtrage	33
Figure-II.7 : Le spectre d'harmonique et Le THD de courant avant le filtrage.	33
Figure -II.8 : Schéma du pont a diodes avec filtre résonnant accordé sur le rang 5.	34
Figure -II.9 : Allures des courants de la source après le filtrage de l'harmonique 5.	34
Figure -II.10 : le spectre d'harmonique après le filtrage de l'harmonique et le THD de	35

Figure -II.13 : Schéma du pont a diodes avec filtre résonnant accordé sur le rangs 5 et 7.	36
Figure -II.14 : Allures des courants de la source après le filtrage de l'harmoniques 5 et 7	37
Figure -II.15 : Le spectre d'harmonique après le filtrage des harmoniques 5 et 7	37
Figure -III.1 : Schéma de principe du filtrage actif.	41
Figure. -III.2 : Structure générale du filtre actif parallèle	43
Figure -III-3 : Structure d'un onduleur de tension triphasé.	44
Figure -III.4 : Schéma de principe d'identification des courants harmoniques	47
Figure -III. 5 : schéma représentant le pricipie de séparation ($Y= p$ ou q)	49
Figure -III. 6 : Algorithme d'identification des harmoniques	50
Figure -III.7 : commande par hystérésis sous Matlab- Similink.	51
Figure -III.8 :Schéma de la Régulation de la tension du bus continu du filtre actif parallèle.	52
Figure -III. 9 : schéma bloc du filtre actif parallèle commandé par hystérésis.	53
Figure -III.10 : Allure du courant du côté de la charge.	54
Figure -III.11 : Allures des courants de la source après compensation.	54
Figure -III.12 : Allure du courant injecté par le filtre actif.	54
Figure -III.13 : Allures du courant et de la tension de la source.	55
Figure -III.14 : le THD de courant de la source avant compensation.	55
Figure -III.15 : le THD de courant de la source après compensation.	55
Figure -III.16 : Allures des courants de la source durant la variation de charge	56
Figure -III.17 : Allure du courant de la charge durant la variation de charge	56
Figure -III.18 : Allures du courant harmonique de référence I_{ah-ref} et I_{ainj} le courant injecté par le filtre actif durant la variation de charge.	56

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Charges non linières par apport a forme d'onde de courant et spectre.	6
Tableau I.2 : CEI 61000-2-2 : Niveaux de compatibilité pour les tensions harmoniques individuelles sur les réseaux publics basse tension.	14
Tableau I.3 -Limite des composantes harmoniques en courant	15
Tableau -II.1 : Les paramètres de simulation.	22
Tableau -III.1 : Les paramètres de simulation.	42

Liste des abréviations

THD : Taux de distorsion harmonique

FP : Le facteur de puissance.

Fdis : Le facteur de distorsion.

CEM : Les normes définissent les règles relatives à la compatibilité électromagnétique.

- CEI** : au niveau international.
- CENELEC** : au niveau européen.
- l'UTE et le CEF** : au niveau français.

FAP : filtre actif parallèle.

FP : filtres passifs.

MLI : Modulation en largeur d'impulsions.

GTO : Le thyristor à extinction par la gâchette, en anglais *Gâte Turne-Off Thyristor*.

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

SOMMAIRE

Introduction générale	1
Chapitre I : Perturbations des réseaux électriques	
1- Introduction	3
I-2- définition de l'harmonique.....	4
I-2.1- Sources des harmoniques.....	4
I-2.2- Harmonique de courant et de tension	5
I-2.3- Le taux individuel distorsion	6
I-2.4- taux global de distorsion	6
I-2.5- Les résonances :.....	8
I.2.6. Les inter harmoniques	11
I.2.7.Comparaison entre Harmoniques et inter harmonique.....	11
I.2.8.Les infra harmoniques	11
I.3.Effet des harmoniques.....	12
I.4.Limites tolérables	13
I.5.2.Les méthodes ou solutionsexistantes.....	14
I.5.2.1 Les méthodes traditionnelles : (Le filtrage passif)	15
I.5.2.2.1 Transformateur à couplage spécial	15
I.5.2.2.2. Pont dodécaphasé	16
I.5.2.2.3 Surdimensionnement des installations électriques.....	18
I.5.2.2.4 Agir sur la structure de l'installation	18
I.5.2.2.5. Utilisation une inductance (selfs) série	18
I.5.2.2.6. Le principe Filtres passifs d'harmoniques	18
I.6.Les méthodes modernes (Le filtrage actif).....	19
I.6.1. Filtrage actif	19
I.6.2. Filtre actif parallèle FAP	20
I.6.3. Filtre actif série FAS.....	21
I.6.4. Combinaison parallèle série actif.....	21
I.6.5. Filtrage hybride actifs et passifs	22
I.7. Avantage des filtres harmoniques.....	23
I.8.Conclusion.....	23

Chapitre II : Filtrage passif

II.1 Introduction.....	25
II.2 Principe de Filtrage passif.....	25
II.3 Types des filtres passifs.....	25
II.4 Avantages et inconvénients des filtres passifs	29
II.5 Simulation du filtre passif.....	31
II.6 Interprétation des résultats.....	37
II.7 Conclusion.....	38

Chapitre III : filtre actif parallèle

III.1. Introduction.....	40
III.2. Principe de filtrage actif parallèle.....	40
III.3. Différents types du filtrage actif parallèle.....	41
III.4. Structure du filtre actif parallèle	41
III.5. Commande du filtre actif parallèle.....	44
III.6. Résultats des simulations	52
III.7. Interprétation des résultats.....	56
III.8. Conclusion.....	56

Conclusion Générale

Bibliographie

Introduction générale

Introduction générale :

L'utilisation croissante dans l'industrie de systèmes commandés à base d'électronique de puissance entraîne de plus en plus de problèmes de perturbation au niveau des réseaux électriques. Ainsi, on assiste à une augmentation régulière, de la part des utilisateurs, des taux d'harmonique des courants, ainsi qu'à une importante consommation de la puissance réactive. La circulation de ces grandeurs perturbées va également provoquer des harmoniques de tension, lesquels vont se superposer à la tension nominale du réseau électrique.

Plusieurs solutions de dépollution harmonique dans les réseaux électriques ont été déjà proposées dans la littérature. Celles qui répondent le mieux aux contraintes industrielles sont les filtres actifs.

Dans le premier chapitre de ce mémoire nous allons présenter d'une manière générale les perturbations électriques et leur influence sur le réseau. Nous focalisons sur les perturbations harmoniques, leurs causes, leurs conséquences et les normes imposées.

Pour faire face aux perturbations harmoniques générées par les charges non-linéaires, la solution classique qui est connue depuis bien longtemps consiste en l'utilisation de filtre passif. Ce type de solution va être abordé au deuxième chapitre. Le principe de fonctionnement ainsi que les différents types du filtre passifs seront présentés. Une partie de ce chapitre sera réservée à la simulation du filtre passif résonant.

Le filtrage passif est la solution la plus répandue et pratiquement la plus simple et la moins chère mais elle présente deux inconvénients majeurs. Le premier est lié au phénomène de résonance avec le réseau qui est à l'origine de l'amplification de tout harmonique à fréquence voisine de celle du réseau. Le deuxième inconvénient est la dépendance des performances du filtre passif aux caractéristiques du réseau sur lequel il est connecté. Les progrès remarquables réalisés dans le domaine des semi-conducteurs de puissance entièrement commandable, les thyristors et les transistors en particulier, ont permis de concevoir des dispositifs d'élimination des harmoniques auto-adaptable appelés compensateurs actifs d'harmoniques, ou encore filtres actifs, dont l'objectif est l'élimination des problèmes intrinsèques des filtres passifs.

Dans le troisième chapitre, nous allons étudier le filtre actif parallèle avec une structure d'un onduleur de tension en vue d'éliminer les courants harmoniques.

Nous présentons son principe de fonctionnement, ces différents types et ces différents constituants. Les résultats de simulations d'un filtre actif parallèle à trois fils seront présentés

CHAPITRE I:

Généralités sur l'harmonique

I-1 Introduction :

L'énergie électrique, principalement produite et distribuée sous forme de tensions triphasées sinusoïdales, permet de fournir la puissance électrique nécessaire aux différentes charges sur le réseau électrique. Lorsque la forme d'onde de la tension n'est plus sinusoïdale, on rencontre des perturbations qui peuvent affecter le bon fonctionnement de nombreux équipements et de charges raccordés sur le réseau. Dans ces conditions, des problèmes de compatibilité électromagnétique peuvent survenir entre ces éléments connectés au réseau. [2]

I.2.définition de l'harmonique :

Les harmoniques sont de tension ou des courants sinusoïdaux dont la fréquence est un multiple entier de la fréquence fondamentale du réseau ; les harmoniques impaires existent mais les harmoniques paires en général n'existent pas.

Et on peut observer des sous harmoniques ou des inters harmoniques à des fréquences non multiples entières de la fréquence fondamentale.

Toute fonction périodique peut être représenté e par une série de fourrier de la forme :

$$S(t) = a_0 + \sum_{h=1}^{\infty} C_h \cdot \text{Sin}(h\omega t + \theta_h) \quad (\text{I-1})$$

C_h : l'amplitude de l'harmonique de rang h

a_0 : Composante continue de la fonction S (t) périodique.

I.2.1. Sources des harmoniques :

La prolifération des équipements électriques utilisant des convertisseurs statiques a entraîné ces dernières années une augmentation sensible du niveau de pollution harmonique des réseaux électriques. Ces équipements électriques sont considérés comme des charges non linéaires émettant des courants harmoniques dont les fréquences sont des multiples entiers de la fréquence fondamentale, ou parfois à des fréquences quelconques. Le passage de ces courants harmoniques dans les impédances du réseau électrique peut entraîner des tensions harmoniques aux points de raccordement et alors polluer les consommateurs alimentés par le même réseau électrique.

Les différents secteurs industriels concernés sont aussi bien du type secondaire (utilisation des gradateurs, des redresseurs, des variateurs de vitesse....), que du type tertiaire (informatique ou éclairage dans les bureaux, commerces,...) ou domestique (téléviseurs, appareils électroménagers en grand nombre)

I.2.2. Harmonique de courant et de tension :

Les harmoniques présentes sur les réseaux électriques proviennent de l'utilisation de charges non linéaires. Quand elles sont connectées au réseau d'une certaine fréquence. Elles absorbent un courant pas sinusoïdal mais de même fréquence.

Ces charges se comportent comme des sources de courant harmonique, c'est-à-dire que le courant est fixé par la charge et non par tension du réseau. Ces courants provoquent, dans le réseau, des chutes de tension harmoniques selon la loi d'Ohm :[3]

$$\mathbf{V}_h = \mathbf{z}_h \cdot \mathbf{I}_h \quad (\text{I-2})$$

\mathbf{V}_h : tension harmonique de rang h ;

\mathbf{Z}_h : impédances harmoniques de rang h ;

\mathbf{I}_h : courant harmonique de rang h ;

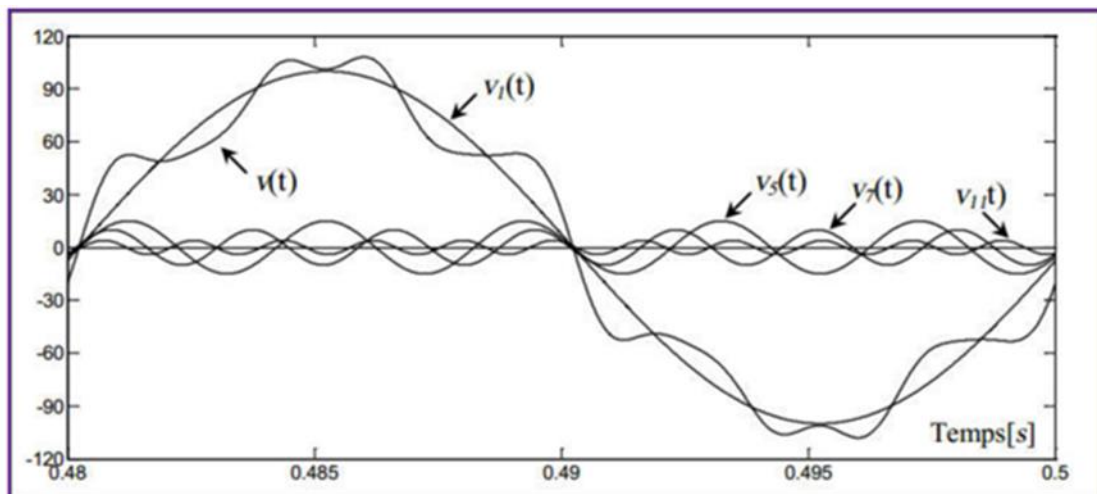


Fig.I.1 La représentation de la forme de l'onde d'un courant déformé avec les différents courants harmonique le constituant

I.2.3. Le taux individuel distorsion :

Certaines formes de distorsion peuvent être plus indésirables que d'autres. Dans une définition ancienne, on calcule le taux d'harmonique par rapport au fondamental (harmonique 1). [5]

Le taux de distorsion harmonique se mesure normalement harmonique par harmonique dans les phases de conception et d'essai des matériels. L'indication de la répartition des harmoniques permet, en effet, de diagnostiquer l'origine des non-linéarités.

Mesure l'importance de chaque rang par rapport au fondamental.

Où h est le rang de l'harmonique, y_h la valeur efficace de l'harmonique de rang h , y_1 étant celle de l'harmonique 1, le fondamental.

$$D(\%) = y_h / y_1 * 100 \quad (I-4)$$

I.2.4. taux global de distorsion :

Le taux global de distorsion en courant ou (total harmonique distorsion pour courant, mesure l'importance des harmonique de tous le rang par rapport au fondamental.

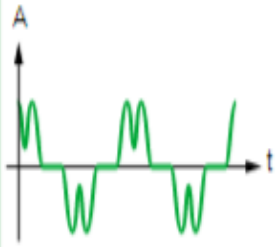
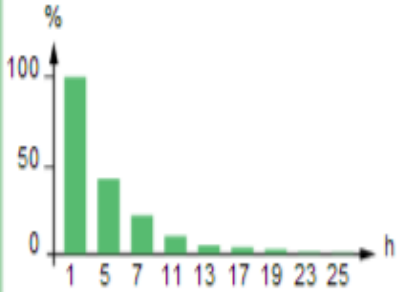
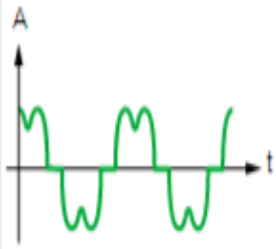
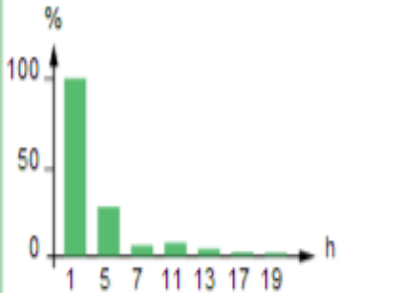
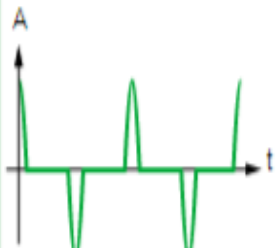
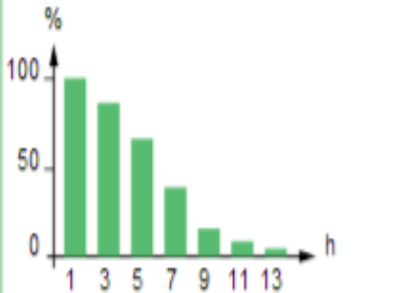
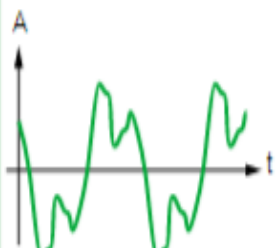
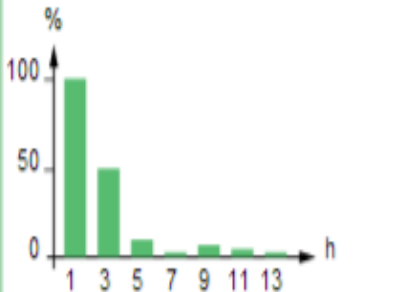
$$THD = \sqrt{\sum_{h=2}^{h=H} \left(\frac{Y_h}{Y_1}\right)^2} = \frac{\sqrt{Y_2^2 + Y_3^2 + \dots + Y_H^2}}{Y_1} \quad (I-5)$$

Y_1 : La valeur efficace de la composante fondamentale (du courant ou de la tension)

Y_n : Les valeurs efficaces exactes des différentes composantes harmoniques (du courant ou de la tension).

Il faut préciser s'il s'agit d'un **THD** de courant : **THDI** ou de tension : **THDV** Contrairement au niveau de courant, le niveau de tension est une valeur fixe et prédéfinie pour un réseau.

On définit donc les contraintes en terme de **THDV**.

Charges non linéaires	Forme d'onde de courant	Spectre	THD
Variateur de vitesse			44 %
Redresseur / chargeur			28 %
Charge informatique			115 %
Eclairage fluorescent			53 %

TAB (I-5) Charges non linéaires par rapport à forme d'onde de courant et spectre [4]

I.2.5. Les résonances :

Sur les réseaux, on rencontre deux types de résonance (résonance parallèle et résonance série). La présence de résonances entraîne des contraintes supplémentaires sur certains matériels, et notamment sur les condensateurs qui peuvent alors se détériorer rapidement. Certaines précautions doivent donc être prises lors de l'installation de ces matériels, de manière à ne pas amplifier les courants et les tensions harmoniques présents sur les réseaux. [6]

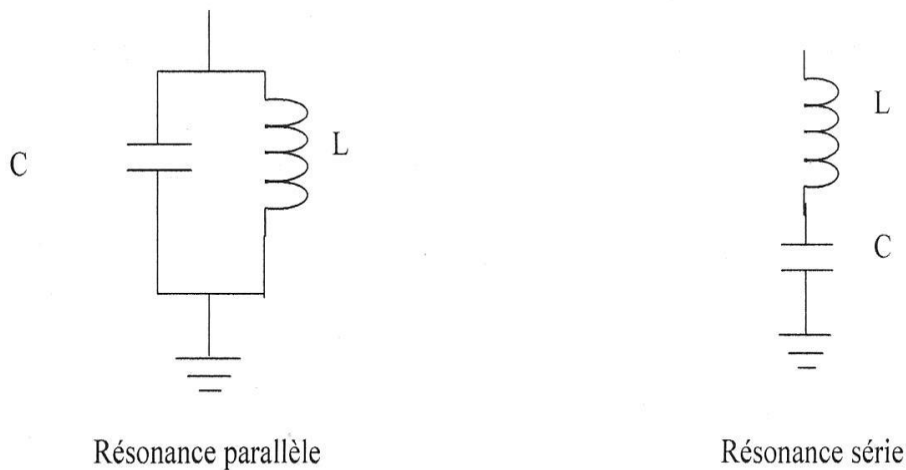


Fig. I.3. Différents types de résonances rencontrées sur le réseau.



le facteur de puissance :

Pour un signal sinusoïdal le facteur de puissance est donné par le rapport entre la puissance active P et la puissance apparente S .

Une faible valeur du facteur de puissance se traduit par une mauvaise utilisation de ces équipements.

Donc le facteur de puissance(**FP**) devient :

$$FP = p(KW)/S(KVA) \quad (I-5)$$

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

Son expression est donnée par l'équation suivante :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (I-6)$$

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

D est due aux harmoniques de courant avec :

$$D = 3V \sqrt{I_c^2 + I_{c1}^2} \quad (I-7)$$

I_c : est la valeur efficace du courant de la charge.

V : Valeur efficace de la tension de l'harmonique

Pour un signal sinusoïdal le facteur de puissance FP est égal au quotient de

la Puissance active P par la puissance apparente

$$F_P = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad (I-8)$$

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

$$P = 3v \cdot I_{c1} \cdot \cos\phi \quad (I-9)$$

On aura

$$FP = I_{c1} / I_c \cdot \cos\Phi = F_{dis} \cdot \cos\Phi \quad (I-10)$$

Où F_{dis} 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.[7]

Observation:

Par définition le facteur de puissance -autrement dit le **cos ϕ** d'un appareil électrique- est égal au rapport de la puissance active P (kw) sur la puissance apparente S (kVA) et peut varier de 0 à 1.

Il permet ainsi d'identifier facilement les appareils plus ou moins consommateurs d'énergie réactive.

- Un facteur de puissance égal à 1 ne conduira à aucune consommation d'énergie réactive (résistance).
- Un facteur de puissance inférieur à 1 conduira à une consommation d'énergie réactive d'autant plus importante qu'il se rapproche de 0 (inductance).

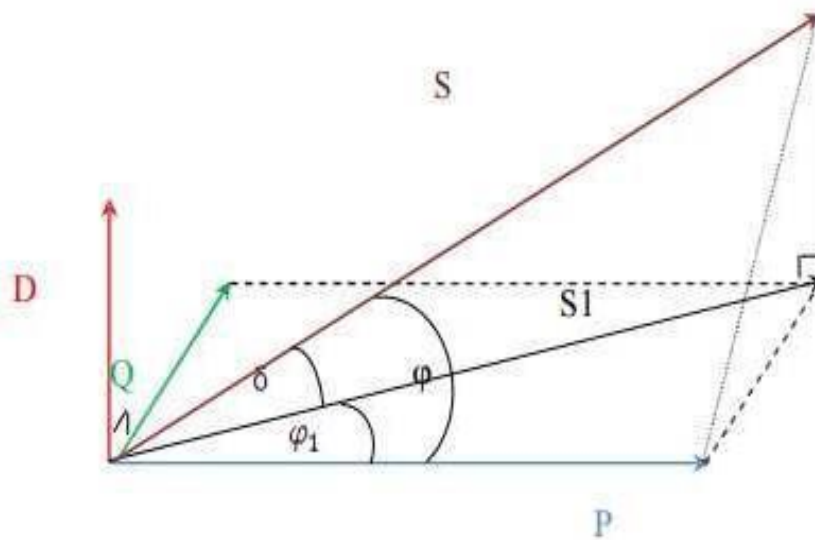


Fig.I.4 diagramme de Fresnel des puissances [10]

I.2.6. Les inter harmoniques :

Les inters harmoniques sont des signaux de fréquence non multiple entiers de la fréquence fondamentale (130Hz, 170Hz, 220Hz.....) c'est-à-dire situées entre les harmoniques.

Certains sont émis par les charges non linéaires, d'autres sont injectés intentionnellement par les distributeurs sur leurs réseaux pour télécommander des relais et ainsi piloter les changements de tarification des compteurs domestiques et professionnels. [8]

I.2.7. Comparaison entre Harmoniques et inter harmonique :

Les harmoniques sont une superposition à l'onde fondamentale (50Hz) des ondes sinusoïdales mais de fréquences multiples entière du fondamental. La principale source de la présence des harmoniques dans les réseaux électriques est l'utilisation intensive des convertisseurs statiques.

Les inters harmoniques sont superposés à l'onde fondamentale mais ne sont pas des multiples entiers de la fréquence du réseau.

I.2.8. Les infra harmoniqu

Ce sont composantes sinusoïdales qui sont des fréquences inférieurs à celles du fondamentale 10Hz, 20Hz,.....

La présence d'inters harmoniques ou d'infra harmoniques est due à variations périodiques ou aléatoires de la puissance absorbée par certains récepteurs. Dans ce cas, le signal n'est pas périodique à une période fondamentale T,

Ce qui explique l'application de composantes supplémentaires à celles du développement en série de Fourier ces variations sont provoquées par des machines telles que :

- * fours à arc.
- * Cyclocon vertisseur.
- * Variateurs de vitesse.

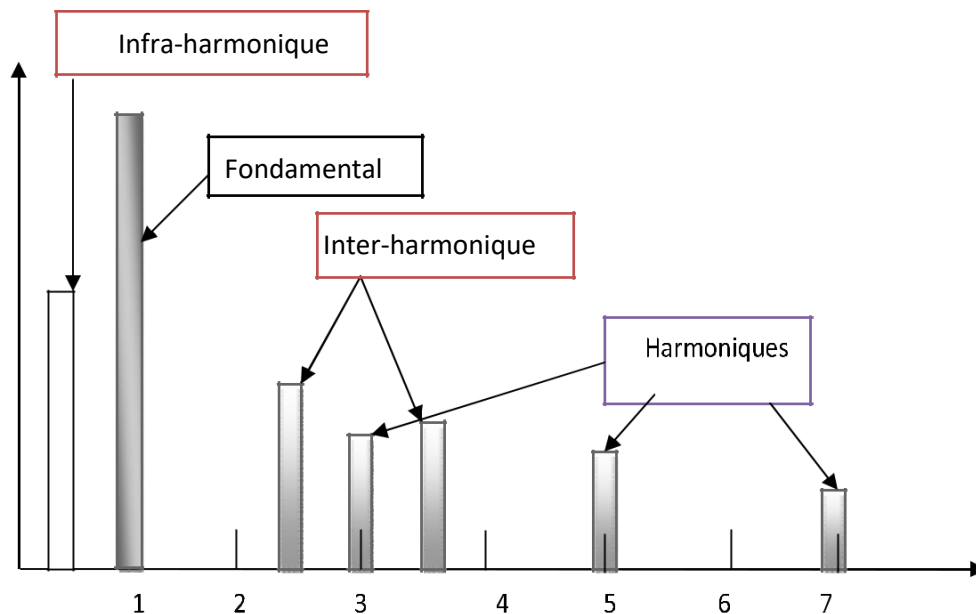


Fig I.5 Représentation des inters et infra harmoniques. [4]

I.3.Effet des harmoniques :

Les tensions et courants harmoniques superposés à l'onde fondamentale conjuguent leurs effets sur les appareils et équipements utilisés.

Les effets les connus des harmoniques sont la destruction de condensateurs et de disjoncteurs suite à de fortes intensités dans les réseaux internes.

En présence des harmoniques, la valeur efficace résultante est la somme des valeurs efficaces de toutes harmoniques et la fondamentale qui traversent le circuit.

Les appareils dimensionnés pour un courant fondamental donné peuvent être soumis à de sévères contraintes supplémentaires.

Donc les courants et les tensions harmoniques ont des effets néfastes sur le fonctionnement, la rentabilité et la durée de vie de certains équipements électriques.

Parmi les effets instantanés, on peut citer : [9]

Effets immédiats :

- Dégradations des facteurs de puissance ;
- Réducteur de la puissance des moteurs ;
- Surcharges des câbles, transformateurs et moteurs ;
- Augmentation du bruit dans les moteurs ;
- Erreur d'enregistrement dans les compteurs ;
- Sur dimensionnement des câbles ;
- Réduction de la capacité du réseau ;
- Mauvais fonctionnement des contacteurs ;
- Perturbation des systèmes électronique ;
- perturbations des électroniques des dispositifs de mesure et de protection ;
- perturbations des lignes de téléphones proches de lignes de puissance ;
- résonance ;
- vibrations et bruits ;

En ce qui concerne les effets à long terme

- Effets à moyen et long terme :
- Réduction de la durée de vie des moteurs ;
- Détérioration des batteries de condensateurs ;
- Réduction de la durée de vie des transformateurs ;
- Vieillesse accélérée des isolants et des diélectriques ;
- Pertes fer ;
- usure mécanique des matériaux due aux vibrations
- Échauffement qui réduit la durée de vie des matériels (condensateurs, transformateur, machines tournantes).

I.4.Limites tolérables : [3]

- **Limite en tension :**

À cause de ses effets néfastes, les harmoniques doivent être évitées. Les fournisseurs d'énergie électrique s'engagent sur la qualité de l'alimentation électrique fournie à ses. Ils garantissent un taux de distorsion harmonique de la tension maximum,

- **Limite en courant :**

Dans certains cas le fournisseur d'énergie électrique peut imposer des niveaux maximaux de courants

I.5.filtrage:

I.5.1.Introduction :

Avec l'augmentation ces dernières années du nombre et de la puissance unitaire des charges non linéaires telles que les sources d'alimentations statiques et les entraînements électriques à vitesse variable dans les réseaux électriques, les harmoniques qu'ils génèrent deviennent de plus en plus préoccupantes, tant pour les distributeurs d'énergie que pour les consommateurs vu les effets nocifs et les coûts qu'ils engendrent.

En conséquence, il est important que des solutions de dépollution harmoniques soient mises en œuvre.

Parmi les solutions existantes : filtrage passif, filtrage actif.

II.5.2. Les méthodes ou solutions existantes :

I.5.2.1 Les méthodes traditionnelles : (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 composants passifs (inductances, condensateurs, résistance) et/ou des branchements qui modifient le schéma de l'installation.

Ce 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. Parmi les dispositifs de filtrage les plus répandus, on distingue le filtre passif résonnant et le filtre passif amorti.

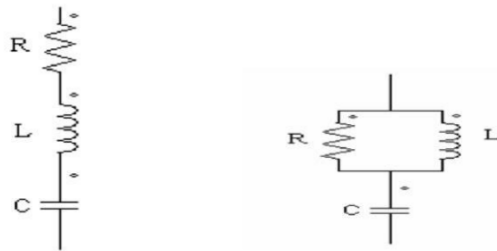


Figure (I.6) a) Filtre résonnant b) Filtre passif amorti

I.5.2.2.1 Transformateur à couplage spécial :

Il s'agit de limiter la circulation des courants harmoniques à une partie aussi petite que possible de l'installation à l'aide de transformateurs à couplage approprié.

L'utilisation d'un Transformateur d'isolement, de rapport 1/1 à couplage triangle-étoile ou triangle zigzag, empêche la propagation des courants harmoniques de rang 3 et leurs multiples circulant dans le neutre, ce procédé n'a aucun effet sur les autres rangs harmoniques.

I.5.2.2.2. Pont dodécaphasé :

La structure dodécaphasé présente des caractéristiques très intéressantes par rapport à celle hexaphasée.

Cependant, le nombre de semi-conducteurs utilisés et le transformateur à deux enroulements au secondaire rendent cette solution onéreuse.

Un convertisseur composé de (mC) convertisseur triphasé élémentaire à indice de pulsation p , sera à indice de pulsation n tel que $n = mC \cdot p$,

La figure (I.7) illustre un exemple pour $p = 6$ (pont de graëtz) et $mC = 2$, soit un convertisseur indice de pulsation égale à 12. Ce convertisseur appelé dodécaphasé, est le plus utilisé (cas des puissances importantes) dans la mesure où le déphasage de $/6$ est facilement obtenu par un couplage étoile-triangle et étoile-étoile d'un transformateur à double enroulement au secondaire.

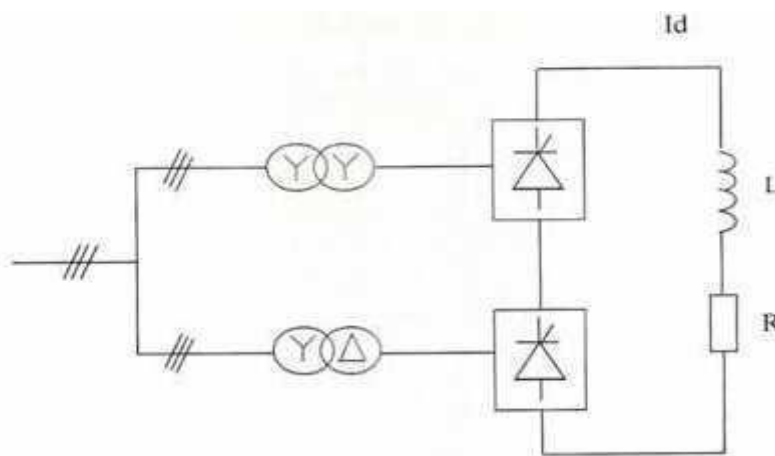


Fig. (I.7) : Structure du pont dodécaphasé

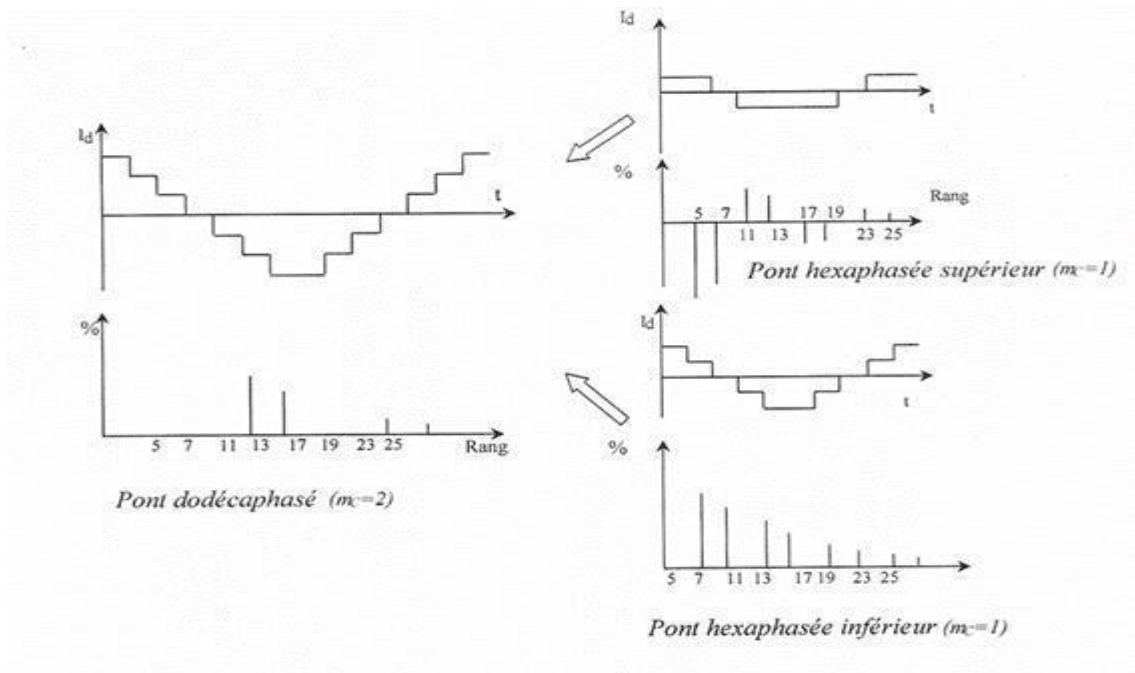


Fig (II.8) : Forme des courants et rang des harmoniques

Cette solution provoque un encombrement lors de la commande ce qui limite son utilisation.

I.5.2.2.3 Surdimensionnement des installations électriques :

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

I.5.2.2.4 Agir sur la structure de l'installation :

Il faut éviter de connecter un récepteur sensible en parallèle avec un pollueur (figure(II.9)). Une alimentation par câble distinct est préférable.

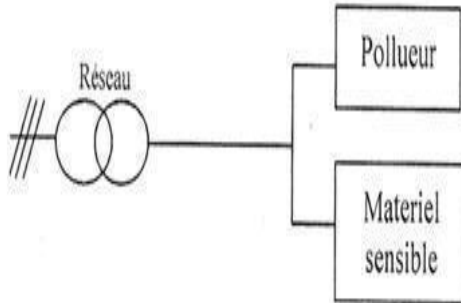
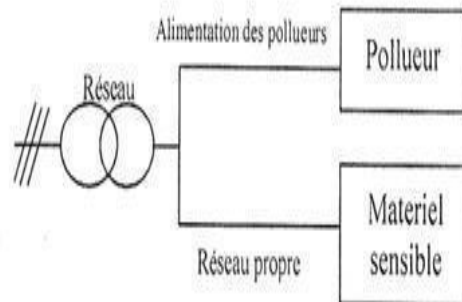
a) *Solution à éviter*b) *Solution à préconiser*

Fig (I.9) : une distribution en étoile permet le découplage par les impédances naturelles et/ou additionnelles

I .5.2.2.5. Utilisation une inductance (selfs) série :

Cette solution, utilisée pour les entraînements à vitesse réglable (variateurs de vitesse) et les redresseurs triphasés, consiste à introduire une inductance série en amont d'une charge non linéaire. La self a cependant efficacité limitée.

Il faut en installer une par charge non linéaire. La distorsion en courant est divisée approximativement par deux.

I.5.2.2.6. Le principe Filtrés passifs d'harmoniques :

Le principe est de « piéger » les courants harmoniques dans des circuits **LC**, accordés sur les rangs d'harmoniques à filtrer, donc il se comporte comme un court-circuit pour l'harmonique considéré. Un filtre comprend donc une série de « gradins » qui correspondent tous à un rang d'harmonique. Les rangs 5 et 7 sont les plus couramment filtrés. On peut installer un filtre pour une charge ou pour un ensemble de charges.

I.6. 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

filtres actifs de puissance (Active Power Filters) sont proposés comme des solutions avancées de dépollution des réseaux électriques.

En effet, ces solutions peuvent s'adapter aux évolutions de la charge et du réseau

Électrique et ceci sans toucher aux installations du fournisseur d'énergie et du consommateur

I.6.1. Filtrage actif :

Deux raisons principales ont conduit à une moderne et efficace appelée filtre actif. La première raison est due aux inconvénients inhérents des solutions traditionnelles de dépollution qui ne répondent pas plus à l'évolution des charges et des réseaux électriques. En effet, les méthodes dites "classiques" de filtrage ou de dépollution des réseaux électriques présentent un certain nombre d'inconvénient.

Le plus important d'entre eux est sans doute le fait d'être sensible aux évolutions de

l'environnement. Ils voient leur efficacité baisser avec les variations des perturbations (variation des fréquences et des amplitudes des harmoniques).

La seconde raison fait suite à l'apparition de nouveaux composants à commutation forcée, comme les transistors bipolaires, les thyristors GTO et les transistors IGBT qui ont permis de réaliser de nouvelles structures qui permettent le contrôle de la forme d'onde de la phase du courant d'entrée. Le but de ces filtres est de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à

compenser les perturbations responsables de la dégradation des équipements et installations électriques.

Ainsi le filtrage actif tend à annuler les courants harmoniques en injectant dans la source perturbatrice des courants harmoniques d'amplitudes identiques, mais en opposition de phase à l'aide d'un pont onduleur. A cet effet, une mesure du courant de la charge non linéaire permet de connaître le courant à fournir.

Nous citerons configurations possibles des filtres actifs

Le filtre actif parallèle (FAP) : conçu pour compenser toutes les perturbations de courant comme les harmoniques, les déséquilibres et la puissance réactive;

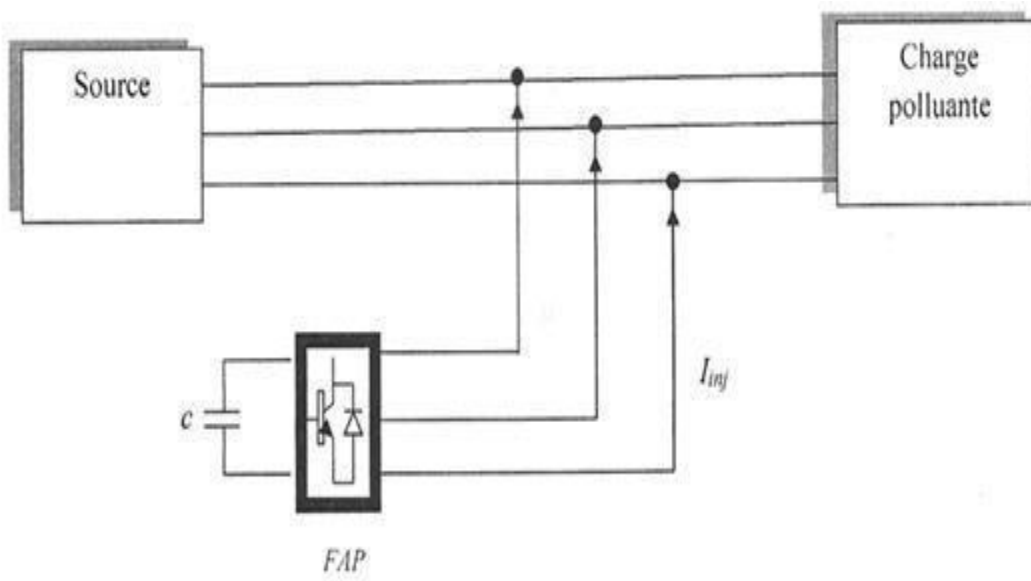
Le filtre actif série (FAS): conçu pour compenser toutes les perturbations de tension comme les harmoniques, les déséquilibres et les creux de tension;

La combinaison parallèle série actif : solution universelle pour compenser toutes les perturbations en courant et en tension.

I.6.2. Filtre actif parallèle FAP:

Il est appelé aussi compensateur shunt, il est connecté en parallèle sur le réseau de distribution figure (II.11). Il est habituellement commandé comme un générateur de courant.

Son principe est d'injecter dans le réseau électrique des courants harmoniques I_{inj} égaux à ceux absorbés par la charge non linéaire mais en opposition de phase, de telle sorte que le courant fourni par le réseau I_s soit sinusoïdale et en phase avec la tension simple correspondante. Ainsi, il empêche les courants harmoniques, réactifs et déséquilibrés de circuler à travers l'impédance du réseau. Par conséquent, il améliore le taux de distorsion en courant et en tension.



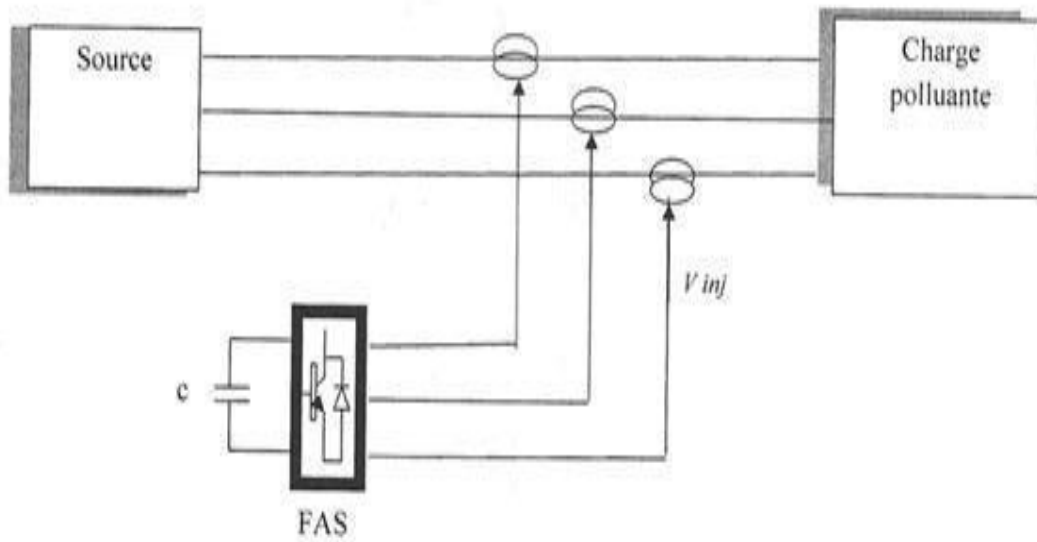
Fig(I.10) : Montage d'un filtrage actif parallèle

I.6.3. Filtre actif série FAS :

Le filtre actif série est connecté en série sur le réseau le montré la figure (II.7). Il se comporte comme une source de tension qui engendre des tensions harmoniques dont la somme avec la tension réseau est une onde sinusoïdale.

Il est destiné à protéger les installations qui sont sensibles aux tensions perturbatrices (harmoniques, creux, déséquilibrés) provenant de la source et également celles provoquées par la circulation des courants perturbateurs à travers l'impédance du réseau. Cette structure est proche, dans le principe, des conditionneurs de réseau. Toutefois, cette

topologie présente quelques difficultés et inconvénients lors de sa mise en œuvre, elle ne permet pas de compenser les courants harmoniques consommés par la charge.



Fig(I.11) : Montage d'un filtrage actif en série

I.6.4. Combinaison parallèle série actif :

C'est une solution de compensation universelle basée sur le fonctionnement simultané des filtres actifs parallèle et série figure (II.10). Donc, elle possède les avantages cumulés des filtres actifs parallèles et série. Cette nouvelle topologie est appelée combinaison parallèle série actif ou en anglais *Unified Power Quality Conditioner (UPQC)*.

Un filtre actif série placé en amont du filtre actif parallèle, comme il est montré ci-dessous, permet de dépolluer la source des tensions perturbatrices; or s'il est placé en aval, il permet d'isoler la charge de la source perturbé.

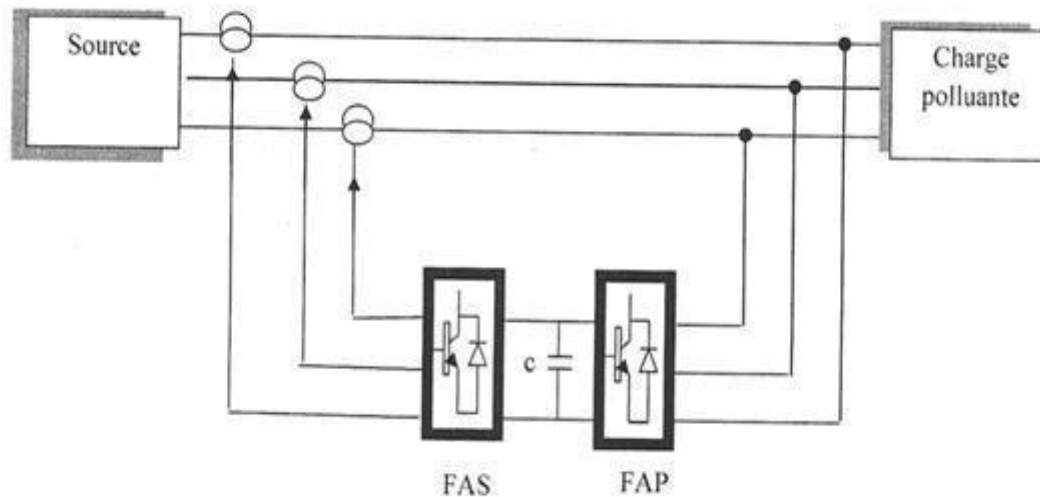


Fig.(I.12) combinaison parallèle –série actif(UPQC).

I.6.5. Filtrage hybride actifs et passifs :

Malgré la grande attention portée sur les filtres actifs, leur application industrielle reste limitée à certains pays où les solutions traditionnelles sont inefficaces face à la prolifération des équipements polluants de fortes puissances sur un réseau qui n'est pas assez puissant partout.

L'application industrielle de ces nouveaux dispositifs de filtrage est freinée par leur coût.

Afin de réduire le dimensionnement et par conséquent le prix des filtres actifs, et ainsi augmenter leur potentialité d'application, l'association de filtres actifs de faible puissance à des filtres passifs peut être une solution

Dans ce cas, les filtres passifs ont pour rôle d'éliminer les harmoniques prépondérants permettant de réduire le dimensionnement des filtres actifs qui ne compensent que le reste des perturbations.

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

Le filtre actif série avec des filtres passifs parallèles.

Le filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles.

Le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle.

I.7. Avantage des filtres harmoniques:

les transformateurs et augmenter leur capacité du réseau en KVA.-Réduire les pertes par effets Joules, économie d'énergie en KWH .

S'aligner aux normes internationales pour la distorsion du courant (THD-I < 10%) et la distorsion de la tension (THD-V < 5%).

Réduire la puissance réactive en KVAR.

Améliorer le facteur de puissance PF en le portant à des valeurs proches de 1.

Protéger complètement les charges traitées.

Supprimer les transitoires causée par les batteries de condensateurs automatiques et par le changement de la charge.

Améliorer les capacités du variateur de vitesse à supporter les hausses et les chutes de tension.

99% d'Efficacité (Consommation négligeable)

I.8. Conclusion

Dans ce chapitre, les principales sources de perturbations harmoniques sont les convertisseurs statiques de puissance, afin d'éviter d'éventuels dysfonctionnements ou dégradations des équipements, il est nécessaire de les dimensionner en conséquence.

Si le niveau des harmoniques est trop élevé, La mise en place de filtrages harmoniques est toujours envisageable.

Dans tous les cas, le choix des matériels, (lignes, transformateurs, filtres.....) d'une nouvelle installation passe obligatoirement par la connaissance a priori du niveau des harmoniques produites par les convertisseurs, dans ce chapitre, nous avons présenté différents types de perturbations affectant l'onde de tension 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.

Chapitre II :

Filtrage passif des courants harmoniques

II.1 Introduction :

L'installation des filtres passifs vise à réduire les tensions et les courants harmoniques dans les réseaux à des niveaux acceptables, d'autre part, elle vise à fournir tout ou une partie de la puissance réactive consommée. Il faut donc concevoir un filtre minimum; autrement dit un filtre qui supprime adéquatement les harmoniques à un coût minimal et qui fournit de la puissance réactive (pas nécessairement toute la puissance requise).

Dans ce chapitre nous allons aborder le filtrage passif des courants harmoniques. En effet, nous allons présenter, le principe de filtrage passif, les types des filtres passifs, les avantages et les inconvénients des filtres passifs et nous terminons par présenter les résultats des simulations d'un filtre résonant.

II.2 Principe de filtrage passif :

Le filtrage passif est basé sur l'utilisation de circuits électriques RLC (résistance, inductance, capacité) dit filtre passif, dont le principe est de modifier localement l'impédance du réseau, de façon à dévier les courants et à éliminer les tensions harmoniques. On associe des éléments capacitifs et inductifs de manière à obtenir une résonance série accordée à une fréquence choisie. Donc avant le choix des éléments constituant le filtre passif et leur dimensionnement, une connaissance précise des rangs harmoniques qui devront être filtrés et des atténuations requises est nécessaire car plusieurs types de filtres passifs sont utilisés pour différentes dépollutions à réaliser [14].

II.3 Types des filtres passifs :

a- Inductance anti-harmoniq

Cette première solution consiste à installer une inductance en série avec les condensateurs de compensation sur chaque branche monophasée.

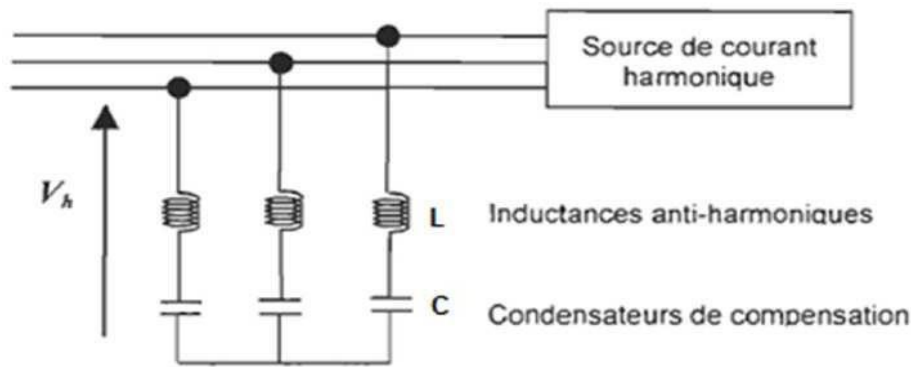


Figure (II.1) Raccordement d'inductances anti-harmonique.

Ce type de filtre a pour objectif essentiel de protéger les batteries de condensateurs d'une surintensité due aux harmoniques. Il a en outre pour effet de réduire les tensions harmoniques aux bornes de ces condensateurs. Il permet souvent de réduire les valeurs d'impédance harmonique du réseau, vues du point d'injection au voisinage de la fréquence d'accord et donc les tensions harmoniques sur le réseau.

La fréquence de résonance du filtre est donnée par :

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (\text{II. 1})$$

La fréquence d'anti-résonance f_{ar} est obtenue lorsque l'impédance équivalente à L_c en parallèle à L , C tend vers l'infini :

$$f_{ar} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L + L_{cc})C}} \quad (\text{II. 2})$$

Pour éviter que ce filtre présente une résonance parallèle (anti-résonance) avec l'inductance du réseau sur lequel ils sont raccordés, on les accorde sur une fréquence inférieure à celle de la première injection de courant harmonique. A noter aussi que l'installation d'inductances anti-harmoniques accroît la tension permanente à la fréquence fondamentale aux bornes des condensateurs qui doivent donc être dimensionnés en conséquence [15].

b- Filtre passif résonant :

Un filtre passif résonant est un circuit RLC en série, accordé à la fréquence d'une harmonique généralement d'un rang inférieur. Le principe des filtres résonnants est de présenter une impédance très faible au passage d'un courant harmonique d'un rang déterminé. On installe très souvent plusieurs filtres résonnants en parallèle, correspondant aux différents rangs harmoniques à filtrer.

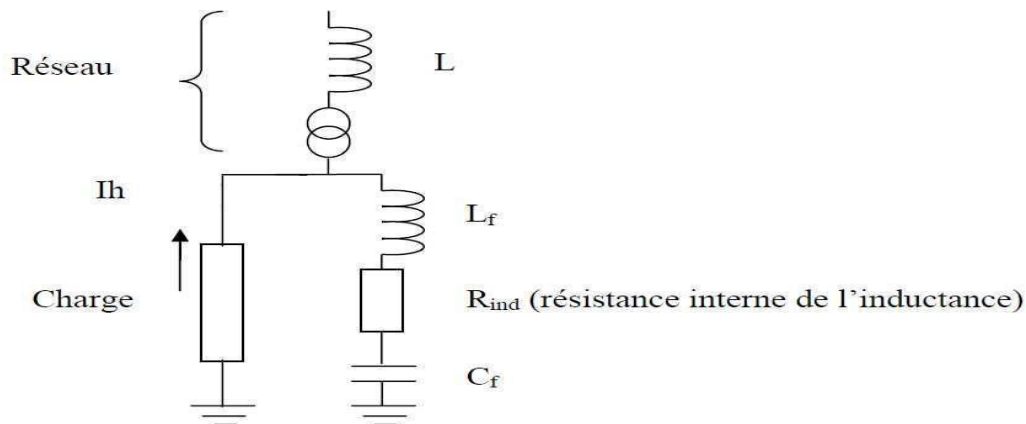


Figure (II.2) Filtre passif résonant.

L'impédance du filtre passif résonant est donnée par l'expression suivante : (II. 3)

$$Z = R + \frac{LC\omega^2 - 1}{C\omega}$$

La fréquence de résonance du filtre est donnée par :

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad \text{(II. 4)}$$

A la fréquence de résonance l'impédance du filtre est réduite à $Z = R$ [16].

La fréquence d'anti-résonance f_{ar} est obtenue lorsque l'impédance équivalente à L_{cc} en parallèle à L , C tend vers l'infini :

$$f_{ar} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L+L_{cc})C}} \quad \text{(II. 5)}$$

L'inductance du shunt possède par nature une résistance R (résistance de la bobine). On définit alors le facteur de qualité

$$Q = \frac{L\omega_0}{R} = \frac{1}{RC\omega_0} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \tag{II.6}$$

c- Filtre passif amorti :

Le filtre passif amorti est un circuit RLC constitué par la mise en série d'une capacité avec un ensemble constitué de la mise en parallèle d'une résistance dite résistance d'amortissement et d'une inductance.

On utilise les filtres amortis pour filtrer simultanément des harmoniques du rang supérieur, et non une harmonique d'un rang particulier. Il est recommandé lorsque les performances demandées ne sont trop élevées. On l'appelle aussi un filtre passe haut.

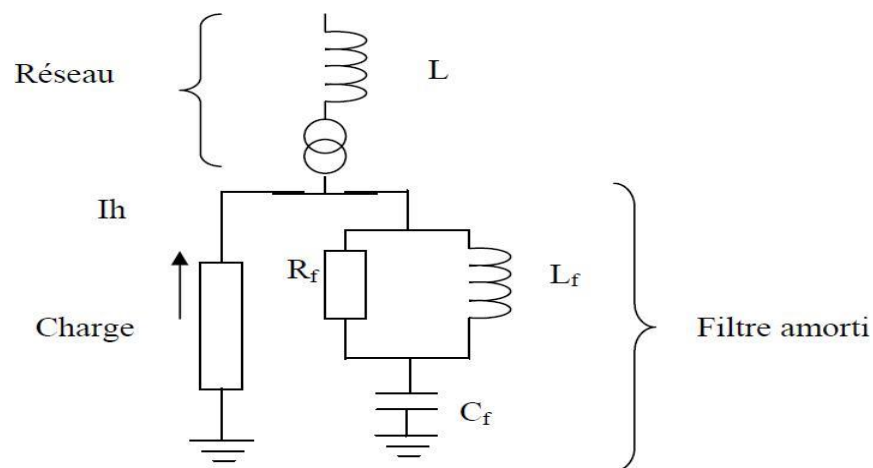


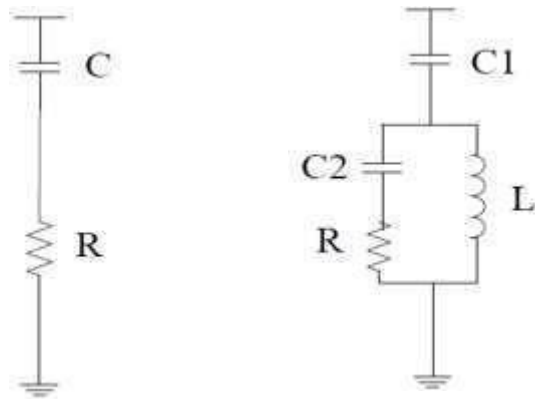
Figure (II.3) Filtre passif amorti de 2^{ème} ordre.

Après quelques calculs, on montre que la fréquence de résonance de ce filtre est :

$$f_r = \frac{1 + qQf}{2\pi q\sqrt{L C f(Q^2 - 1)}} \tag{II.7}$$

Q_f : est le facteur de qualité du filtre.

$$Q_f = \frac{1}{r_f} \sqrt{\frac{L_f}{C_f}} \quad (\text{II. 9})$$



- (A) filtre amorti de 1er ordre

- (B) filtre amorti de 3ème ordre

Figure (II.4) Autres types de filtre passif amorti.

Le filtre amorti est moins sensible aux variations de ses éléments qu'un filtre résonant. L'utilisation des filtres amortis rend nécessaire le filtrage des rangs harmoniques inférieurs à f_r . D'ailleurs lors du choix des filtres, très souvent plusieurs filtres résonants pour les rangs harmoniques inférieurs et un filtre amorti sont utilisés, tous montés en parallèle avec la charge polluante [16].

II.4 Avantages et inconvénients des filtres passifs :

a- Avantages des filtres passifs :

Le filtrage passif a déjà largement fait ses preuves dans le milieu industriel grâce à son coût faible, son efficacité et son adaptation pour des réseaux de forte puissance.

Les filtres amortis offrent plusieurs avantages :

- Leurs performances sont moins sensibles aux variations de température, aux déviations de fréquence, aux tolérances des composantes, etc.
- Ils présentent une faible valeur d'impédance pour une large gamme de fréquences harmoniques.
- L'usage de multiples filtres résonants peut provoquer des résonances parallèles entre les filtres et l'admittance du réseau. Dans ce cas, l'usage d'un ou de plusieurs filtres amortis est préférable [17].

b- Inconvénients des filtres passifs :

- La présence sur un même réseau de deux filtres passifs accordés sur un rang théoriquement égal, mais en pratique légèrement différent, provoque entre eux la circulation de courants harmoniques très importants qui provoque rapidement leur destruction. Ce cas se rencontre facilement en raison du fait que la fréquence d'accord varie lentement avec le vieillissement des éléments du filtre. Il faut absolument éviter de raccorder des filtres harmoniques de même rang sur un même réseau.
- La mise en parallèle d'un filtre anti-harmonique et d'une batterie de condensateurs provoque une contrainte pouvant amener la destruction des condensateurs.
- Lorsqu'il y a plusieurs rangs harmoniques à filtrer, il est nécessaire de mettre autant de filtres accordés sur les rangs correspondants.
- L'implantation de filtres passifs sur un réseau nécessite une étude poussée et précise. En outre, il n'est pas toujours possible de connaître tous les paramètres du réseau, nécessaire à l'étude, lorsqu'il est de grande dimension.
- L'amortissement de la résonance dans les systèmes de puissance par les filtres passifs peut introduire des résonances additionnelles indésirables pouvant conduire à la destruction de ces filtres.
- Les variations de l'impédance du réseau peuvent détériorer les performances du filtre,
- Les filtres résonants présentent l'inconvénient d'être sensibles aux variations de l'inductance ou de la capacité ce qui entraîne un désaccord de l'ensemble [16].
- Les pertes dans la résistance sont généralement élevées.
- Le filtre de premier ordre n'est pas très utilisé, car il exige une grande capacité et présente une perte de puissance excessive à la fréquence fondamentale. Le filtre de

second ordre fournit de meilleures performances de filtrage, mais avec des pertes plus élevées à la fréquence fondamentale que le filtre de troisième ordre [17].

II.5 Simulation du filtre passif :

Les paramètres de simulation sont résumés au tableau suivant :

Tension de réseau	380 V
Fréquence de tension de réseau	50 Hz
Résistance de la ligne de réseau	0.42 Ω
Inductance de la ligne de réseau	2.3 mH
Résistance côté continu de charge	23.5 Ω
Inductance côté continu de charge	21.1 mH
Résistance côté alternative de charge	1 m Ω
Inductance côté alternative de charge	1 mH
Résistance de filtre (filtrage de l'harmonique 5, 7)	0.1 Ω
Inductance de filtre (filtrage de l'harmonique 5)	0.004 H
Inductance de filtre (filtrage de l'harmonique 7)	0.001 H
Condensateur de filtre (filtrage de l'harmonique 5)	101.32 μ F
Condensateur de filtre (filtrage de l'harmonique 7)	206.78 μ F

Tableau -II.1 : Les paramètres de simulation.

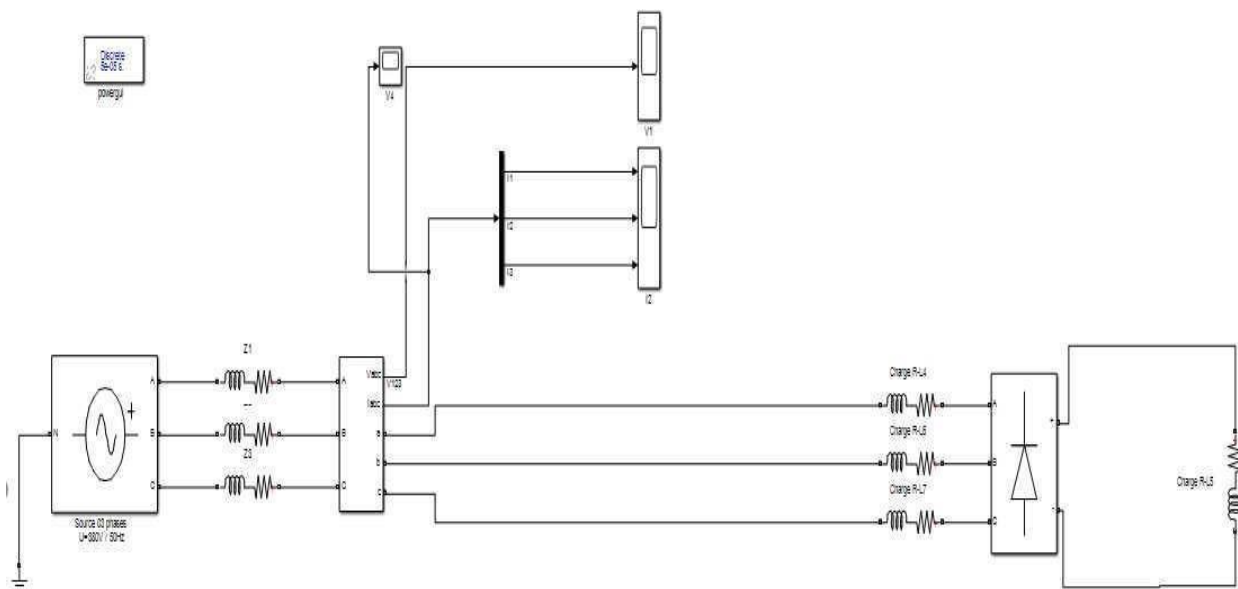


Figure -II.5 : Schéma bloc avant le filtrage.

La figure II.6 montre les courants du réseau avant filtrage, et la figure II.7 montre leur THD. Ces courants sont déformés. Cette déformation est traduite par le THD (phase 1) qui est égale à 22.70 %.

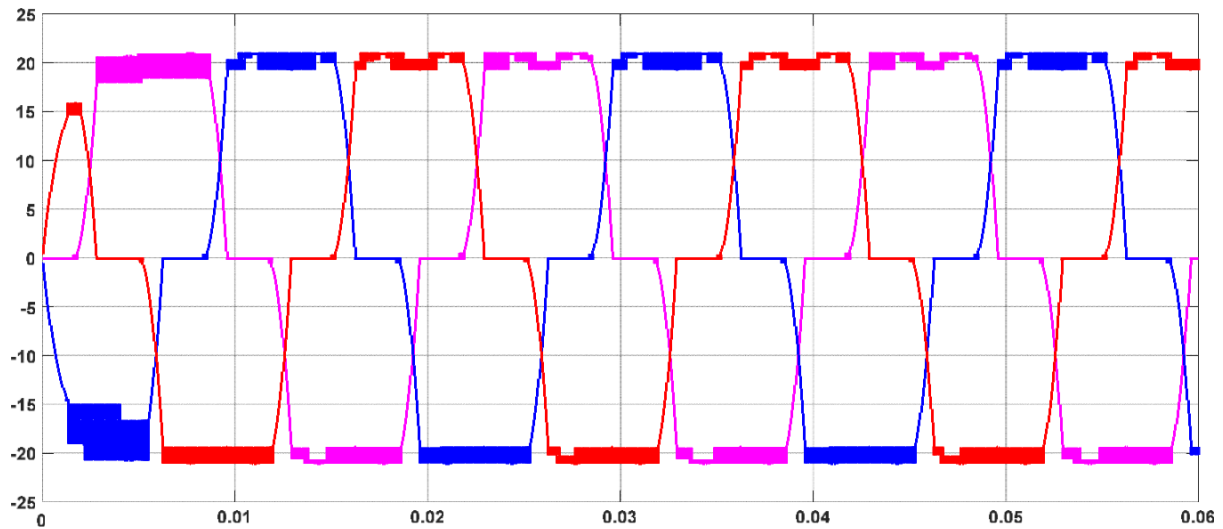


Figure-II.6 : Les allures des courants de la source avant le filtrage.

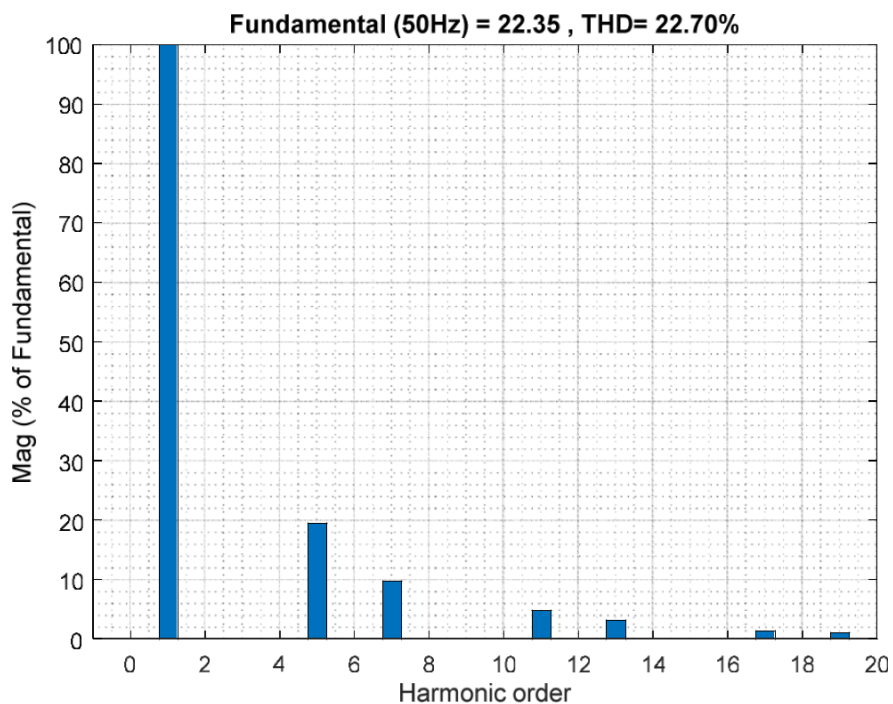


Figure-II.7 : Le spectre d'harmonique et Le THD de courant avant le filtrage.

a- Filtre résonant accordé sur le rang 5 :

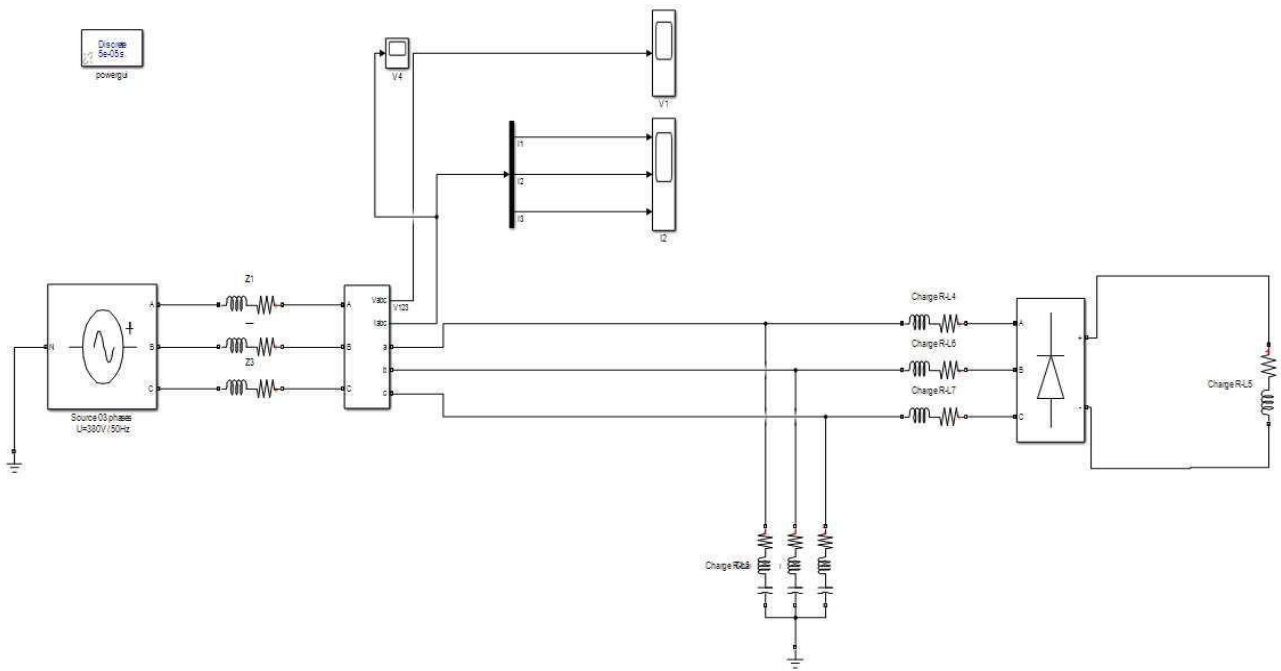


Figure -II.8 : Schéma du pont à diodes avec filtre résonant accordé sur le rang 5.

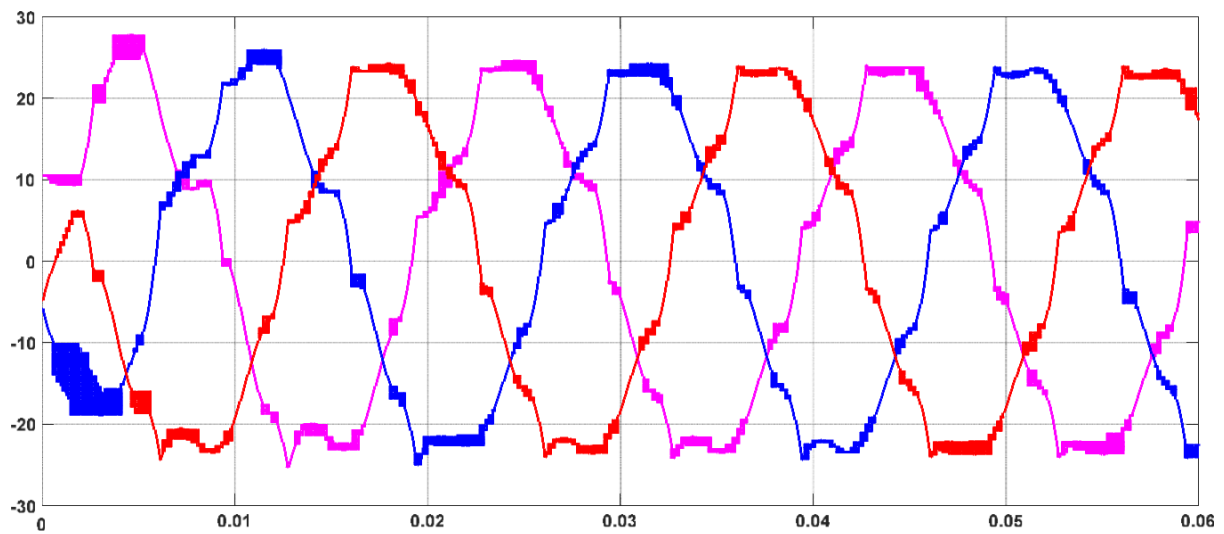


Figure -II.9 : Allures des courants de la source après le filtrage de l'harmonique 5.

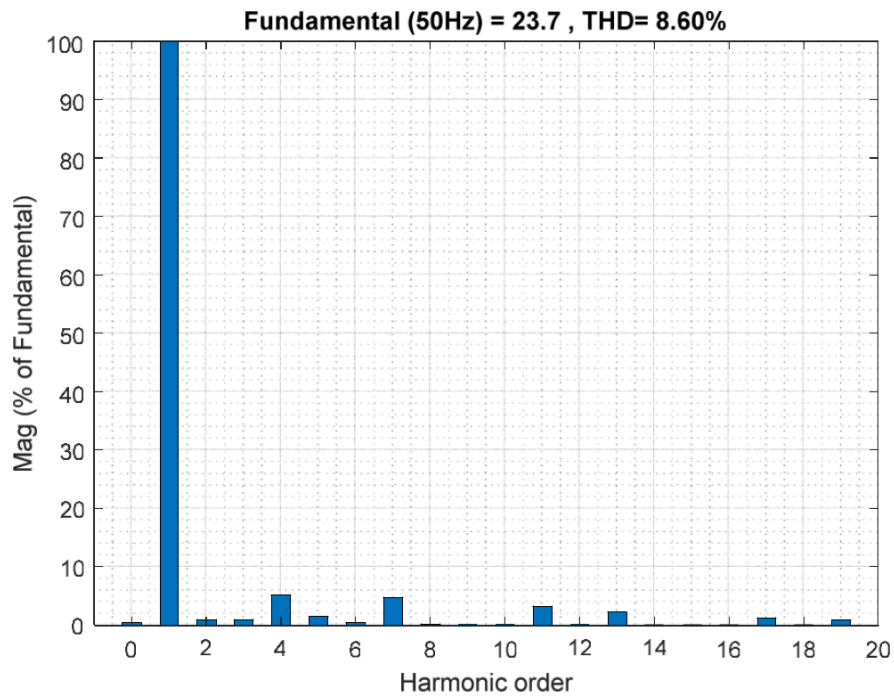


Figure -II.10 : le spectre d’harmonique après le filtrage de l’harmonique 5 et le THD de courant

b- Filtre résonant accordé sur le rang 7

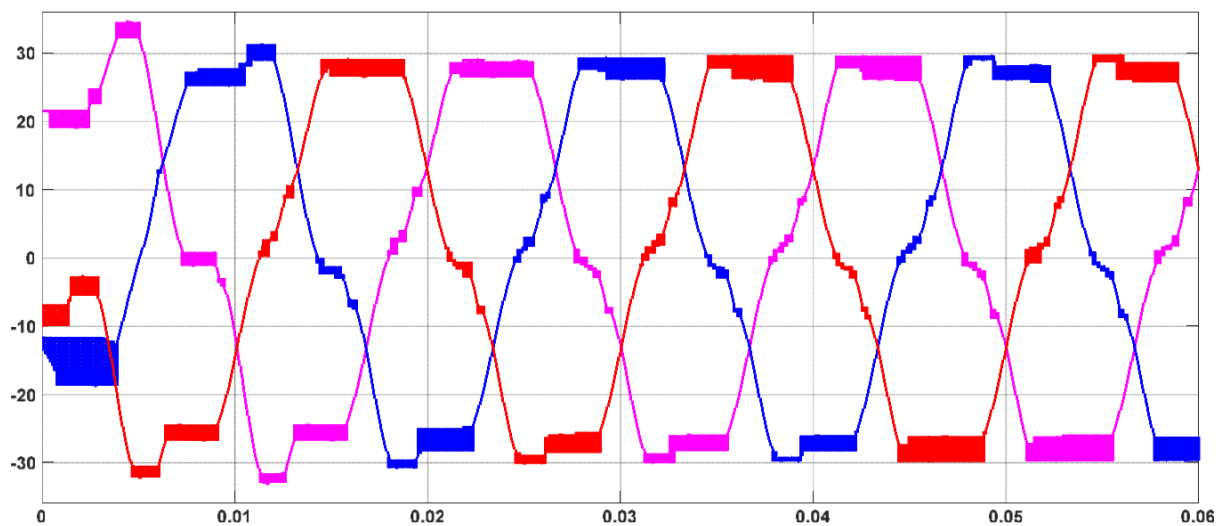


Figure -II.11 : Allures des courants de la source après le filtrage de l’harmonique 7

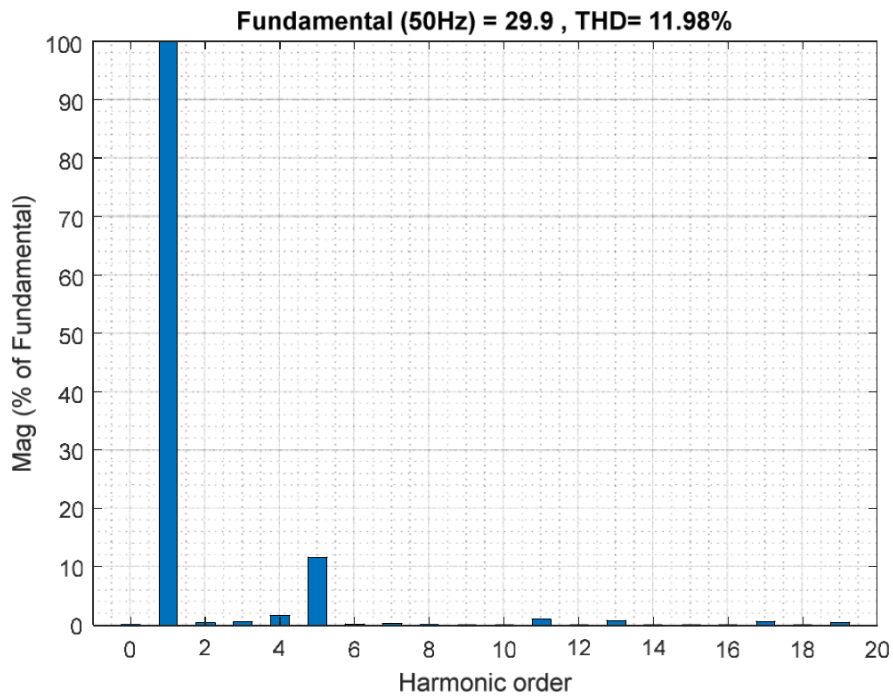


Figure -II.12 : Le spectre d’harmonique après le filtrage de l’harmonique 7 et le THD de courant

c- Filtre résonant accordé sur les rangs 5 et 7 :

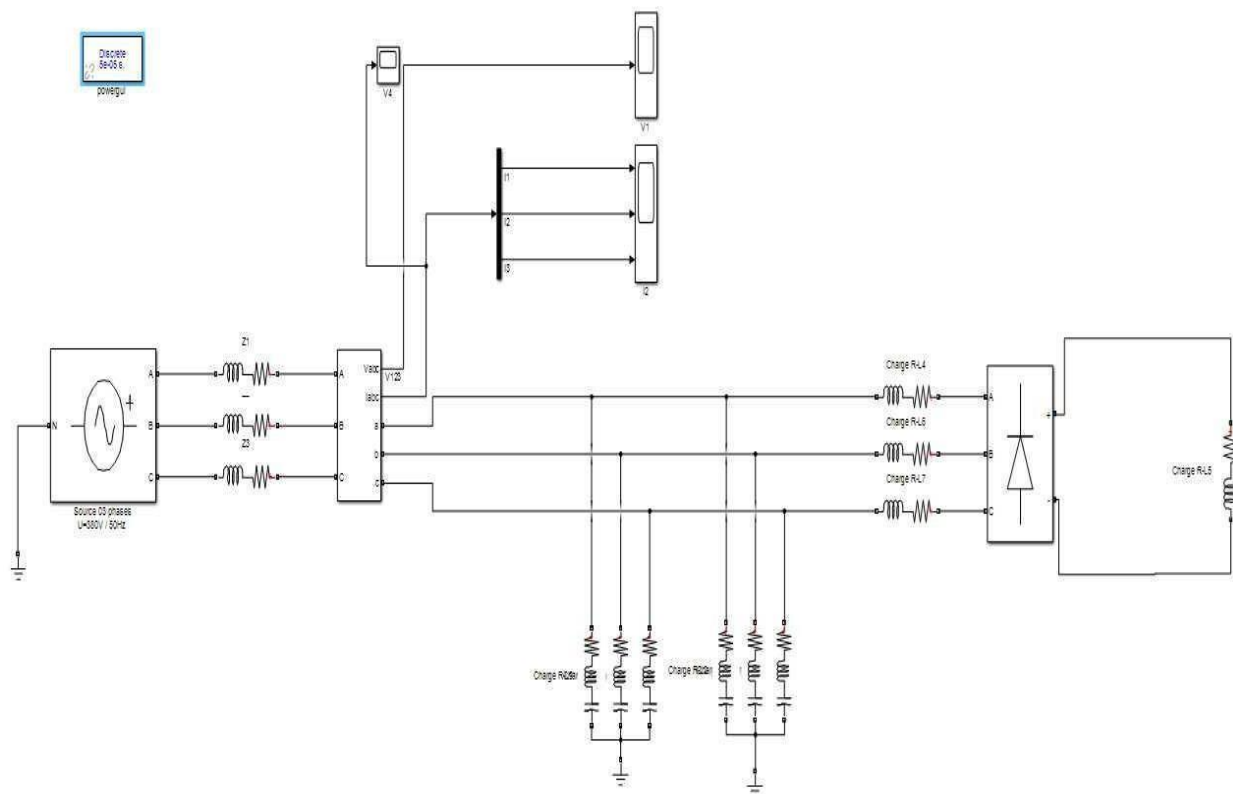


Figure -II.13 : Schéma du pont à diodes avec filtre résonant accordé sur les rangs 5 et 7.

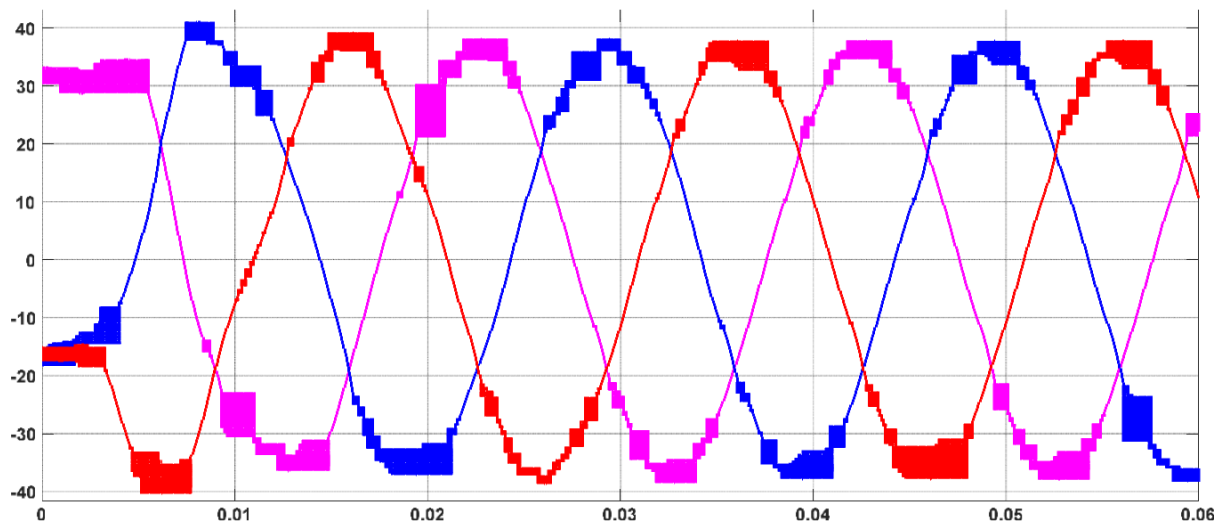


Figure -II.14 : Allures des courants de la source après le filtrage des harmoniques 5 et 7

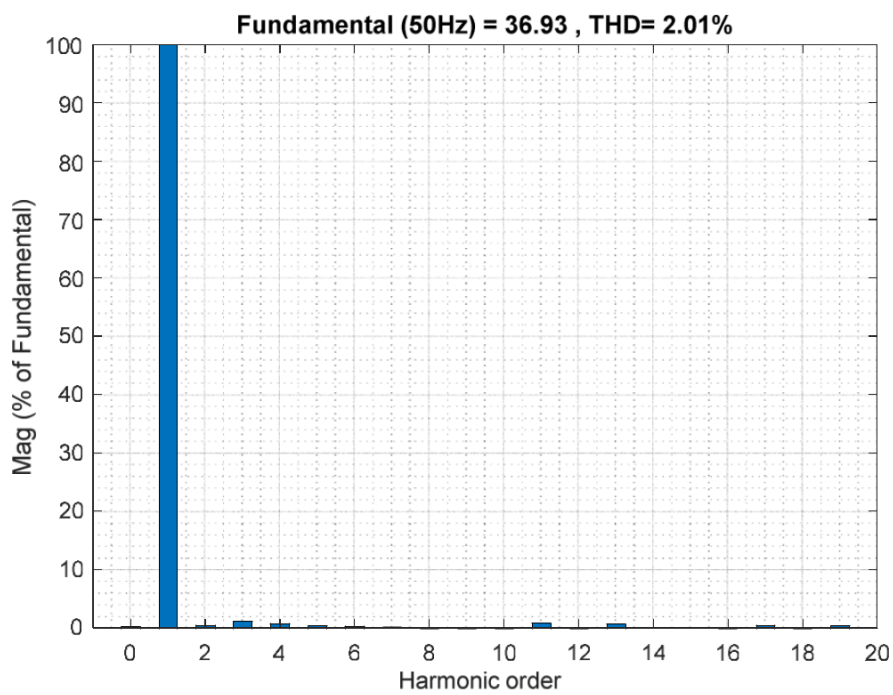


Figure -II.15 : Le spectre d'harmonique après le filtrage des harmoniques 5 et 7

II.6 Interprétation des résultats :

a- Avant le filtrage :

La figure (II.6) représente la forme d'onde des courants d'alimentation. On remarque une distorsion des courants ce qui rend la présence des harmoniques dans le réseau.

La figure (II.7) représente le spectre d'harmonique de courant avant le filtrage, on remarque la présence des harmoniques 5, 7 et 11. Le redresseur absorbe donc un courant non sinusoïdal et se comporte comme une charge non linéaire. Le THD de courant du réseau avant le filtrage est 22.70 %.

b- Après le filtrage :

- 1^{er} cas : Filtre résonant accordé sur le rang 5 :

La figure (II.9) représente la forme d'onde des courants d'alimentation après le filtrage de l'harmonique 5, on remarque que les distorsions des courants sont plus atténuées que dans le cas des courants présentés dans la figure (II.6).

La figure (II.10) représente le spectre d'harmonique du courant après le filtrage de l'harmonique 5, on remarque la présence des harmoniques 7, et la minimisation de l'harmonique 5. Le THD de courant du réseau après le filtrage de l'harmonique 5 est THD= 8.60%. Malgré l'amélioration du THD, sa valeur reste supérieure à la limite de 5 % fixée par la norme IEEE-519.

2^{ème} cas : Filtre résonant accordé sur le rang 7 :

La figure (II.11) représente la forme d'onde des courants d'alimentation après le filtrage de l'harmonique 7, on remarque que les distorsions des courants sont moins atténuées que dans le cas des courants présentés dans la figure (II.9).

La figure (II.12) représente le spectre d'harmonique de courant après le filtrage de l'harmonique 7, on remarque la présence des harmoniques 5, 11 et la minimisation de l'harmonique 7. Le THD de courant du réseau est égale à 11.98%.

3^{ème} cas : Filtre résonant accordé sur les rangs 5 et 7 :

La figure (II.14) représente la forme d'onde des courants d'alimentation après le filtrage de l'harmonique 7 et 5, on remarque que les distorsions des courants sont plus atténuées que dans le cas des courants présentés dans les figures (II.6) et (II.9) et (11).

La figure (II.15) représente le spectre d'harmonique de courant après le filtrage des harmoniques 5 et 7, on remarque la minimisation des harmoniques 5 et 7. Le THD de courant du réseau après le filtrage des harmoniques 5 et 7, THD= 2.01%. Cette amélioration a permis d'avoir un THD inférieur à la limite de 5 % fixée par la norme IEEE-519.

II.7 Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre le filtrage passif et son principe de fonctionnement comme solution traditionnelle de dépollution des courants harmoniques. Les résultats de simulation montrent que le filtre résonant permet d'atténuer certains courants harmoniques mais pas tous les courants harmoniques. Les filtres passifs présentent un inconvénient majeur, celui des résonances qui est la principale cause de plusieurs désagréments.

Le chapitre suivant aborde la solution moderne de dépollution harmonique qui est le filtrage

Chapitre III: Filtrage actif des courants harmoniques

III.1. Introduction :

Ce chapitre est réservé au filtrage actif parallèle. La structure d'un filtre actif parallèle est divisée en deux parties, la partie puissance et la partie contrôle-commande. La partie puissance comprend les trois principaux blocs de cette structure. L'onduleur de tension est un élément fondamental de ce filtre, l'élément de stockage d'énergie et le filtre de sortie. Dans la partie contrôle commande, on a l'identification des courants perturbateurs et la régulation de la tension de l'élément de stockage d'énergie.

Dans ce chapitre nous allons présenter les solutions de dépollution modernes, le principe de filtrage actif parallèle, les différents éléments d'un filtre actif parallèle. Enfin les résultats des simulations de ce filtre vont être présentés et interprétés.

III.2. Principe de filtrage actif parallèle :

Le filtre actif parallèle (FAP) est un onduleur de tension (ou de courant) qui se connecte en parallèle avec le réseau et injecte en temps réel les composantes harmoniques des courants if absorbés par les charges non linéaires connectées au réseau. Ainsi, le courant fourni par la source d'énergie devient sinusoïdal. Le principe de base du FAP est montré sur la figure III.1.

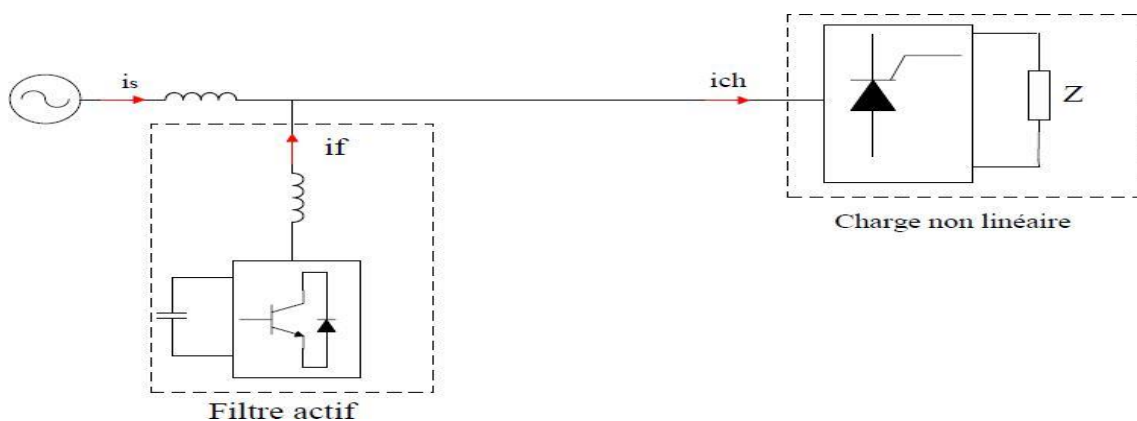


Figure III.1. Schéma de principe du filtrage actif.

III.3. Différents types du filtre actif parallèle :

Ces filtres sont proposés comme des solutions modernes et efficaces de dépollution des réseaux électriques afin de traiter les inconvénients inhérents aux solutions traditionnelles comme les filtres passifs. Parmi toutes les solutions modernes. Les filtres actifs peuvent être monophasés, triphasés à trois fils ou triphasé à quatre fils. Ils peuvent aussi être hybrides (passif + actif). On trouve aussi les configurations associant les filtres parallèles avec des filtres série.

Deux raisons principales ont conduit à concevoir les nouvelles structures de filtrage moderne. La première raison est due aux inconvénients inhérents des solutions traditionnelles de dépollution qui ne répondent plus à l'évolution des charges et des réseaux électriques.

En effet, les méthodes dites "*classiques*" de filtrage ou de dépollution des réseaux électriques présentent un certain nombre d'inconvénients. Le plus important d'entre eux est sans doute le fait d'être sensible aux évolutions de l'environnement. Ils voient leur efficacité baisser avec les variations des perturbations (variation des fréquences et des amplitudes des harmoniques).

La seconde raison fait suite à l'apparition de nouveaux composants à commutation forcée, comme les transistors bipolaires, les thyristors GTO et les transistors IGBT qui ont permis de réaliser de nouvelles structures qui permettent le contrôle de la forme d'onde de la phase du courant d'entrée.

III.4. Structure du filtre actif parallèle :

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

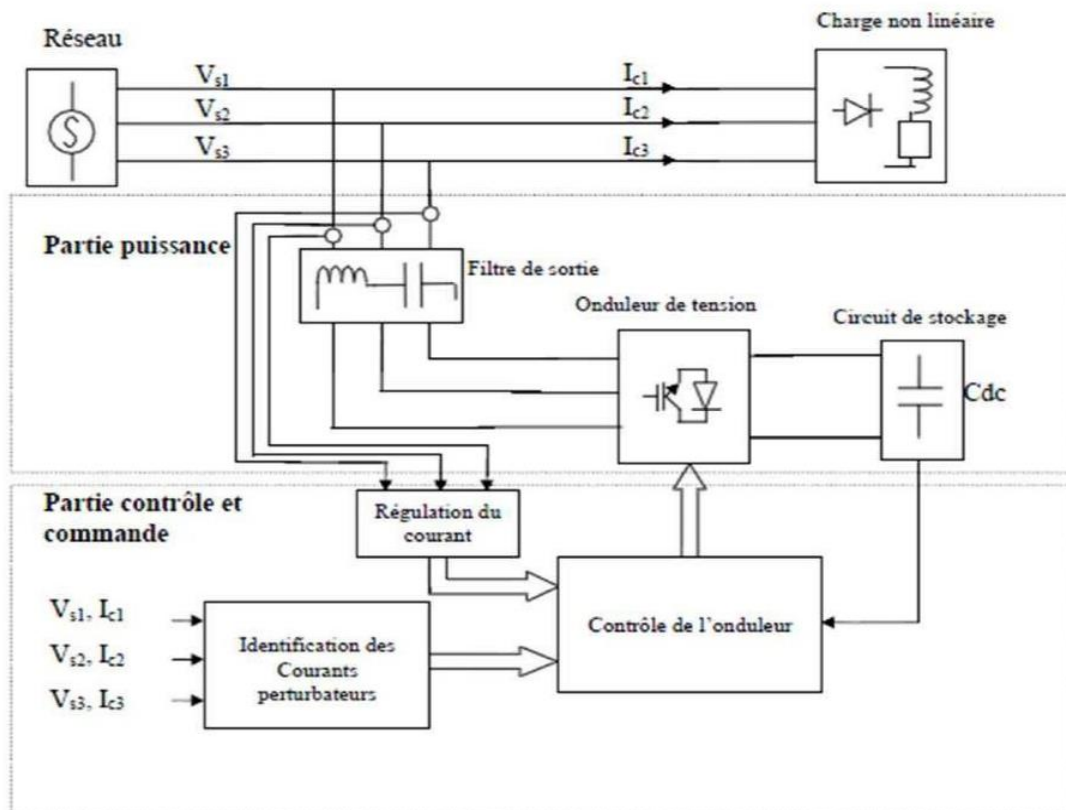


Figure. III.2. Structure générale du filtre actif parallèle. [18]

La partie puissance est constituée :

- * D'un onduleur à base d'interrupteurs de puissance, commandable à l'amorçage et au blocage (GTO, IGBT, etc ...) avec des diodes antiparallèles.
- * D'un circuit de stockage d'énergie : 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.
- * D'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.

a- Onduleur de tension :

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 V_{dc} 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 (III-3) 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 [18;19].

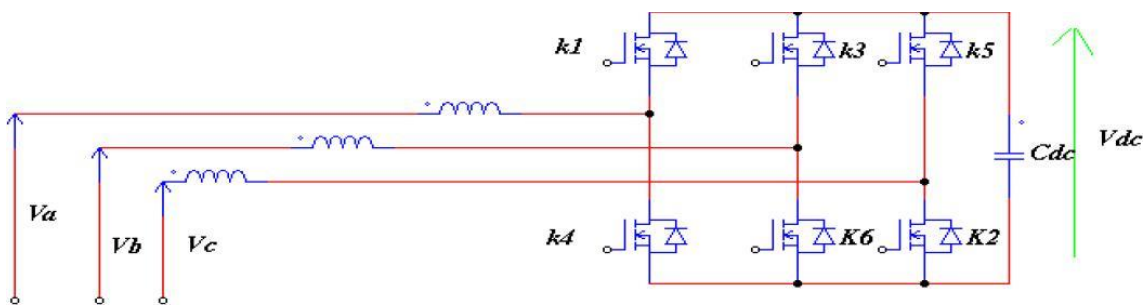


Figure III-3 : Structure d'un onduleur de tension triphasé. [20]

b- Filtre de couplage:

Le filtre entre l'onduleur et le réseau est appelé filtre de couplage, c'est un filtre passif de premier ordre qui est en réalité une simple inductance avec une résistance interne mais avec des spécificités au niveau de son circuit magnétique (introduction de noyaux en ferrites) [4]

Il a deux objectifs, le premier est de générer des courants harmoniques à partir de la différence des tensions entre la sortie du pont onduleur et le réseau créneaux de tension générés. Ce filtre passif est dimensionné pour satisfaire les deux critères suivants :

- Assurer la dynamique du courant du filtre défini par :

$$- \frac{dif}{dt} = \frac{dih}{dt} \quad (III.1)$$

i_f : Courant du filtre

i_h : Courant harmonique de la charge

Empêcher les composantes dues aux commutations de se propager sur le réseau électrique [4].

Une petite valeur de l'inductance du filtre passif assure la dynamique du courant.

Contrairement, une valeur relativement grande de celle-là empêche les composantes dues aux commutations de se propager sur le réseau. Une étude comparative entre 5 approches qui permettent de trouver la valeur de L_f est faite dans [4].

c- Source de tension continue :

Une tension continue est une tension qui ne varie pas au cours du temps. Par exemple, un générateur de tension continue qui délivre une tension continue $U = 1,5 \text{ V}$ signifie que la tension U ne change pas au cours du temps.

La régulation de la tension continue aux bornes du condensateur est nécessaire, car elle permet de maintenir cette tension à un niveau relativement constant tout en assurant une compensation des pertes dans le filtre actif et limiter ses variations en régime dynamique afin de ne pas détériorer les performances du filtre actif [21].

III.5. Commande du filtre actif parallèle :

La partie contrôle-commande est constituée de :

- Bloc d'identification des courants perturbateurs. La méthode d'identification utilisée dans ce travail est celle des puissances instantanées.
- Bloc de régulation de la tension du bus continu de l'onduleur. Dans ce travail un régulateur proportionnel intégrale PI est utilisé.
- Commande de l'onduleur de tension : le but de la commande de l'onduleur est le
- contrôle des courants à la sortie du filtre afin qu'ils suivent leurs références. Le
- principe est basé sur la comparaison entre les courants de sortie du filtre et leurs
- références identifiées à partir des différentes méthodes d'identification. La méthode utilisée dans ce travail est la commande par hystérésis.

a- identification des courants harmonique :

Plusieurs méthodes d'identification des courants perturbés, ont été développées afin d'améliorer les performances des systèmes de dépollution classique des installations électriques. En général l'identification des composantes harmoniques se fait soit dans l'espace des courants, soit dans l'espace des puissances. [18, 23, 22]

La transformation de fourrier directe est l'une des méthodes les plus anciennes, mais qui nécessite une grande puissance de calcul, afin de réaliser toutes les transformations en temps réel. Pour cela, cette méthode est adaptée aux récepteurs ou les composantes harmoniques évoluent d'une manière lente, elle a pour avantage la capacité de cibler un par un les courants harmoniques qui parcourent le système, par conséquent la possibilité de compenser les composantes les plus prépondérantes.

Deux autres méthodes sont utilisées en temps réel, et qui se basent sur le filtrage des signaux. La première est la méthode des puissances instantanées. L'autre est celle de détection synchrone.

Les deux méthodes sont fondées sur le principe de la séparation du fondamental des harmoniques par filtrage.

- **Méthode des courants :**

Le principe de cette méthode est d'identifier les courants harmoniques à partir du courant total et forcer l'onduleur à injecter des courants harmoniques inverses dans le réseau, ce qui permet d'éliminer ces harmoniques.

On capte le courant de charge polluante, ce courant est filtré par un filtre passe bande du deuxième ordre, ce qui permet d'éliminer la composante harmonique et ne laisse passer que la composante fondamentale. Le courant total moins la composante fondamentale donne le courant harmonique. L'Algorithme de la méthode des courants est le suivant détaillé dans ce qui suit.

Le courant absorbé par la charge est composé de la composante fondamentale et des composantes harmoniques à fréquence multiple de la fréquence fondamentale. [24]

$$i_{ch} = i_{ch1} + \sum_{i=2}^{\infty} i_h \quad (\text{III. 2})$$

Avec :

i_{ch} : le courant total de la charge.

i_{ch1} : le courant fondamental absorbé par la charge.

i_h : le courant harmonique absorbé par la charge.

Le filtre passe bande du deuxième ordre a pour but d'extraire la composante fondamentale du courant. La fréquence centrale est choisie égale à la fréquence fondamentale ($f_c=50\text{Hz}$). Cette méthode est caractérisée par la simplicité.



Figure III.4 : Schéma de principe d'identification des courants harmoniques. [25]

- **Méthodes des puissances instantanées :**

La méthode des puissances instantanées n'est applicable que si la tension du réseau est parfaitement sinusoïdale et équilibrée.

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 [27].

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \\ V_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a1} \\ V_{b2} \\ V_{c3} \end{bmatrix} \quad (\text{III. 3})$$

Et la relation des courants ci-dessous

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{a1} \\ i_{b2} \\ i_{c3} \end{bmatrix} \quad (\text{III. 4})$$

Les composantes avec l'indice (0) représentent les séquences homopolaires du système triphasé du courant et de tension. La puissance active instantanée, notée $P(t)$, est définie par la relation suivante :

$$\begin{cases} P(t) = V_{a1} I_{a1} + V_{b2} I_{b2} + V_{c3} I_{c3} = P(t) + P_0(t) \\ P(t) = V_\alpha I_\alpha + V_\beta I_\beta \\ P_0(t) = v_0 i_0 \end{cases} \quad (\text{III. 5})$$

$P(t)$: 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 suivant :

$$q(t) = 1/\sqrt{3} [(V_{a1} - V_{b2}) I_{c3} + (V_{b2} - V_{c3}) I_{a1} + (V_{c3} - V_{a1}) I_{b2}] = V_\alpha I_\beta - V_\beta I_\alpha \quad (\text{III. 6})$$

La puissance q a une signification plus large que la puissance réactive habituelle. En effet, contrairement à la puissance réactive, qui ne considère que la fréquence fondamentale, puissance imaginaire prend en compte toutes les composantes harmoniques de courant et de tension. C'est pourquoi on lui donne une autre dénomination (puissance imaginaire) avec comme unité le voltampère imaginaire (VAI).

Nous avons la relation matricielle suivante:

$$\begin{bmatrix} P \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_\alpha & V_\beta \\ -V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{III. 7})$$

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 [26] :

$$\begin{aligned}
 P &= \bar{e} + e \\
 q &= \bar{q} + \tilde{q}
 \end{aligned}
 \tag{III. 8}$$

- \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. [26]

- Séparation des puissances perturbatrices :

Après avoir identifié les pulsations des puissances instantanées, le filtre de puissance chargé d'isoler les puissances active et réactive conventionnelles peut être dimensionné. Pour avoir la composante alternative, on utilise un filtre passe haut [26].

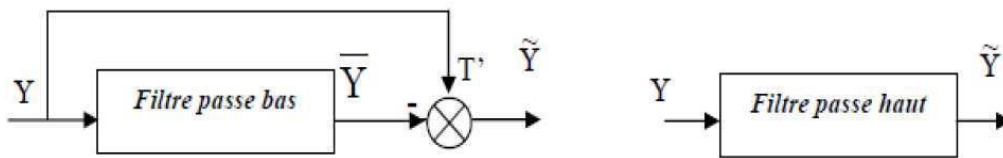


Figure III. 5 schéma représentant le principe de séparation ($Y= p$ ou q)

- Calcul des courants perturbateurs :

En inversant la relation (III.9), nous pouvons recalculer les courants dans le repère $(\alpha-\beta)$ comme le montre l'équation (III.7) [27].

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{V_{S\alpha}^2 + V_{S\beta}^2} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ q \end{bmatrix}
 \tag{III. 9}$$

En considérant les équations (III.9) 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 [26]

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ q \end{bmatrix} + \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (III.10)$$

courant actif courant réactif courants harmoniques

Avec $\Delta = V_\alpha^2 + V_\beta^2$, 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. On appliquant la transformation inverse de Concordia on trouve les courants produits par charge non linéaire comme suit [27] :

$$\begin{bmatrix} i_{1h} \\ i_{2h} \\ i_{3h} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} i_{\alpha h} \\ i_{\beta h} \end{bmatrix} \quad (III.11)$$

On trouve la relation globale des courants harmoniques

$$\begin{bmatrix} i_{1h} \\ i_{2h} \\ i_{3h} \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{1}{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (III.12)$$

Le schéma de la figure (III.6) illustre les différentes étapes permettant l'obtention des composantes harmoniques du courant d'une charge non linéaire.

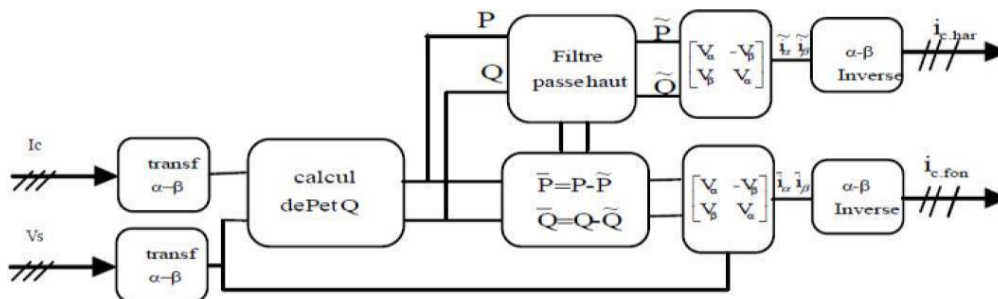


Figure III. 6 Algorithme d'identification des harmoniques

b- Contrôle de l'onduleur par hystérésis :

Ils existent plusieurs méthodes de commande, les deux principales familles de commande sont :

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

La commande conventionnelle par hystérésis, qui sera utilisée dans ce travail, 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 (III.7) expose son principe qui consiste à établir dans un premier temps le signal d'erreur, différence entre le courant de référence i^* et le courant produit par l'onduleur i_f .

Cette erreur est ensuite comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis afin de fixer les ordres de commande des interrupteurs. Cette commande présente cependant un inconvénient majeur : elle ne permet pas de contrôler la fréquence de commutation des semi-conducteurs, d'où la présence d'un nombre important d'harmoniques dans les courants générés [28].

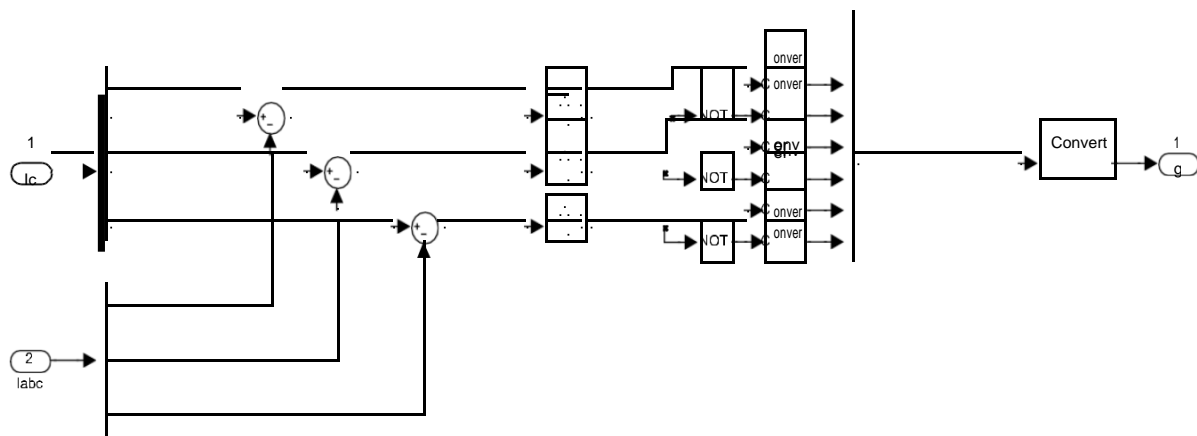


Figure III.7 – Commande par hystérésis sous Matlab- Simulink.

d- Régulation de la tension du bus continu :

La tension aux bornes du condensateur doit être maintenue à une valeur fixe. Les éléments à l'origine de la variation de la tension moyenne V_{dc} aux bornes du condensateur sont les suivants [29] :

- * Les pertes statiques et dynamiques dans les semi-conducteurs de puissance de l'onduleur.
- * Les pertes dans les inductances de couplage L_f et R_f
- * L'injection des courants fondamentaux pendant les régimes transitoires de la charge polluante.

Pour maintenir la tension V_{dc} constante, nous ajoutons à la puissance réelle instantanée une consigne de puissance active. Pour cela, un régulateur PI est choisi pour garder la tension aux bornes du condensateur C_{dc} constante avec une faible fluctuation

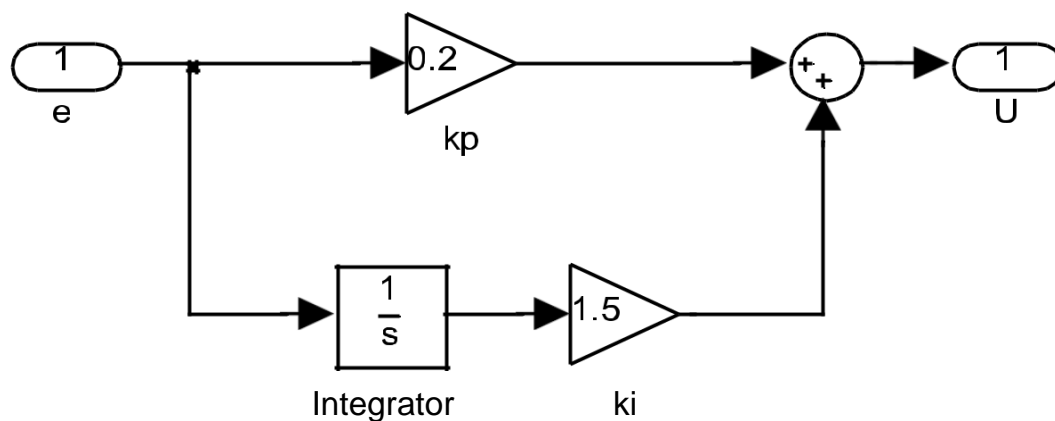


Figure III.8 -Schéma de la Régulation de la tension du bus continu du filtre actif parallèle.

III.6. Résultats de simulation :

Tension de réseau	380V
Fréquence de tension de réseau	50Hz
Résistance de la ligne de réseau	0.42 Ω
Inductance de la ligne de réseau	2.3 mH
Résistance côté continu de charge	23.5 Ω
Inductance côté continu de charge	21.1 mH
Résistance côté alternative de charge	1 mΩ
Inductance côté alternative de charge	1 mH
Inductance de filtre	3 mH
La Tension Vdc	600V

Tableau -III.1 : Les paramètres de simulation.

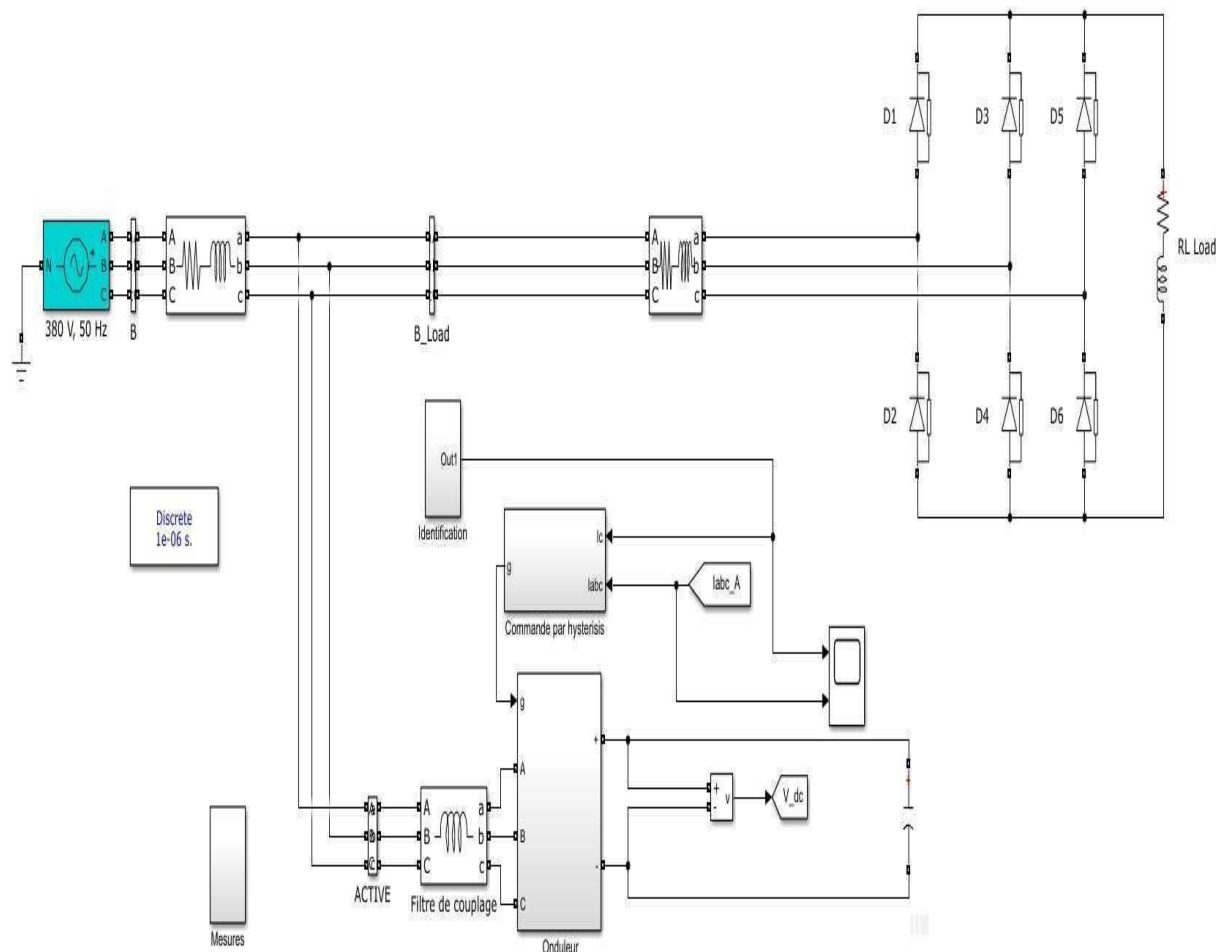


Figure (III. 9) schéma bloc du filtre actif parallèle commandé par hystérésis.

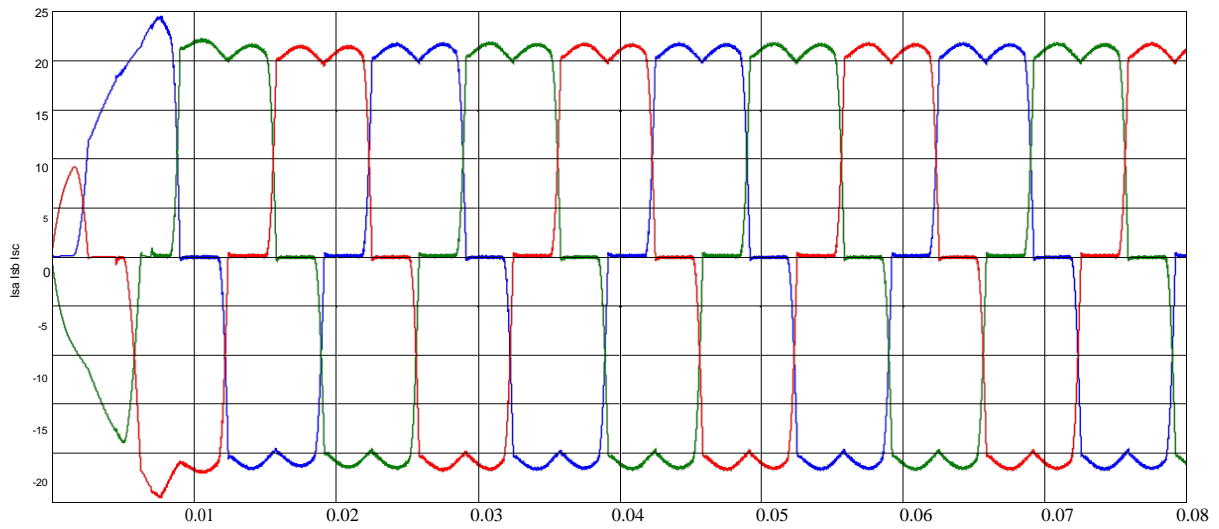


Figure (III.10) Allure du courant du côté de la charge.

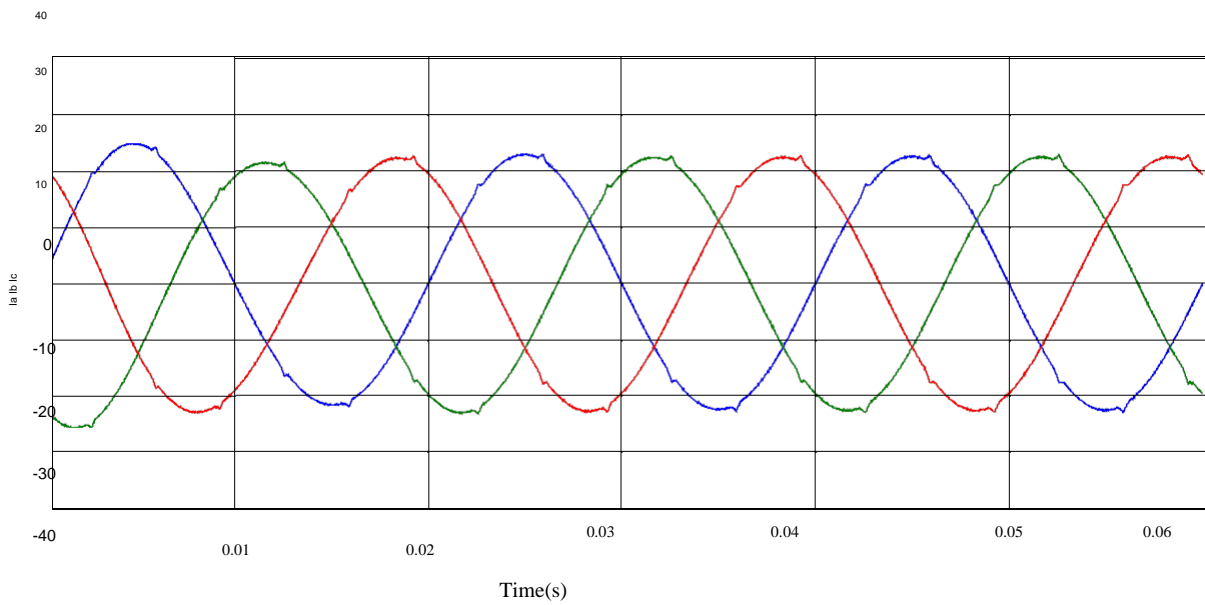


Figure (III.11) Allures des courants de la source après compensation.

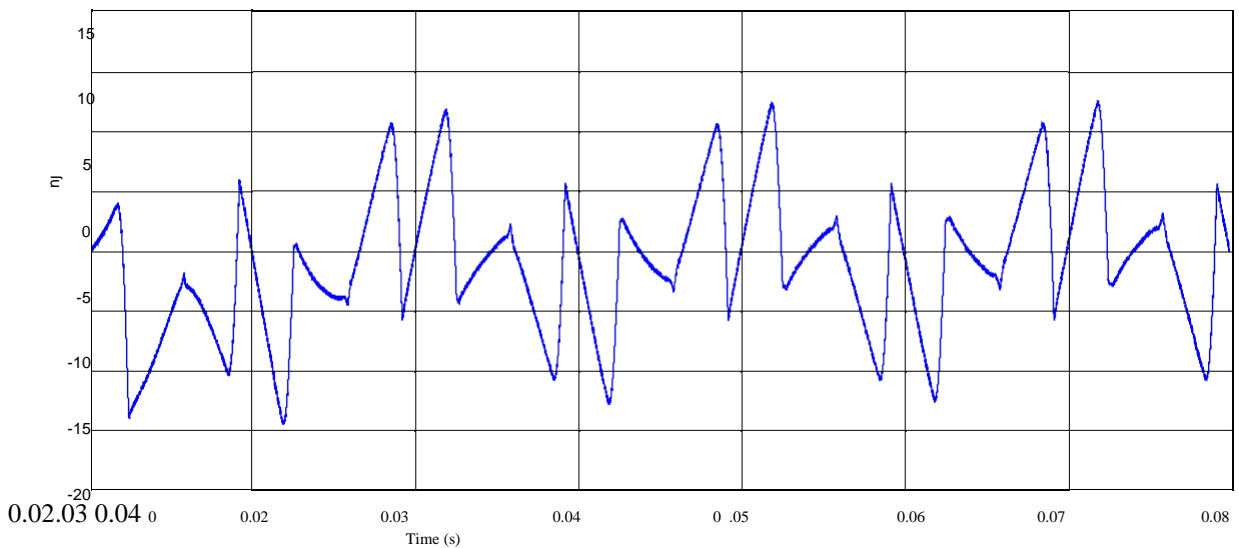


Figure (III.12) Allure du courant injecté par le filtre actif.

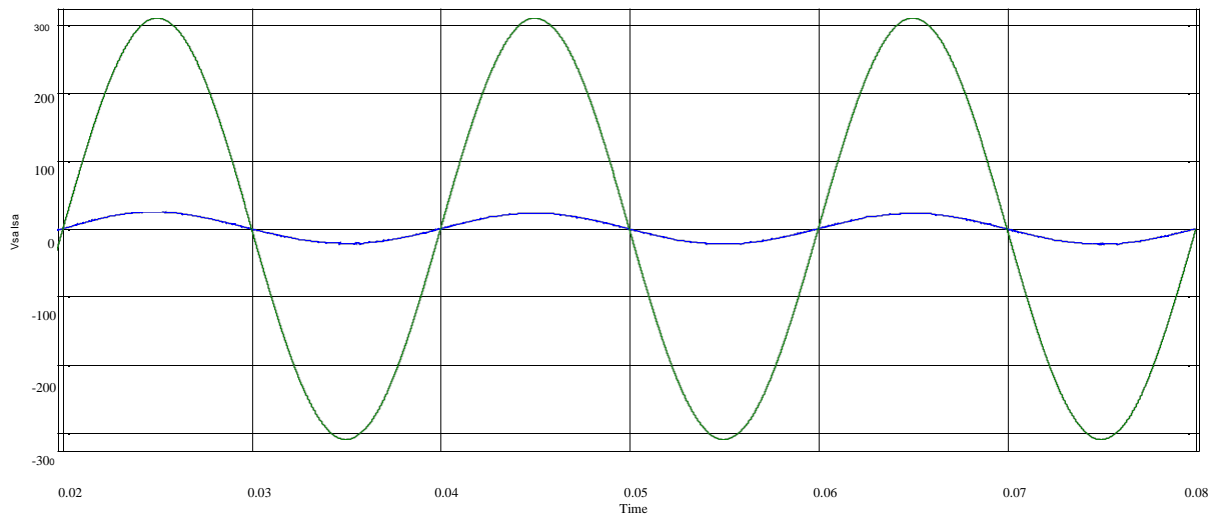


Figure (III.13) Allures du courant et de la tension de la source.

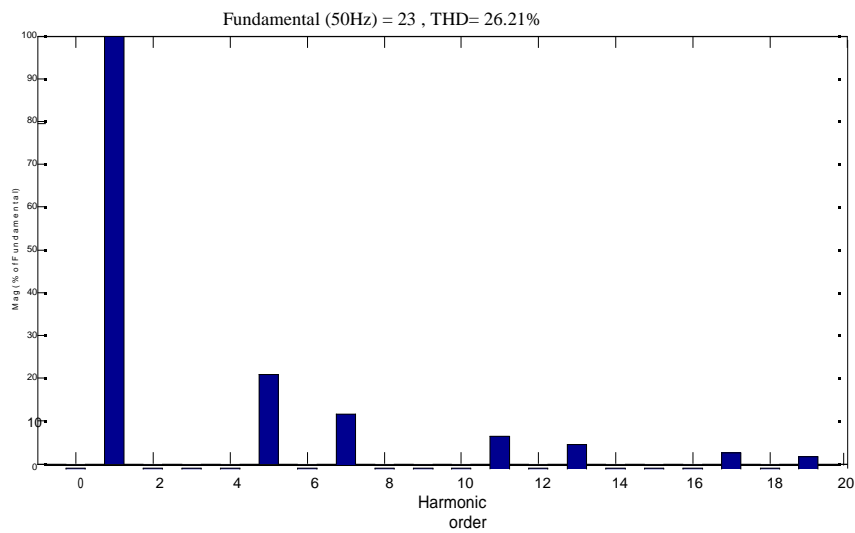


Figure -III.14 : le THD de courant de la source avant compensation.

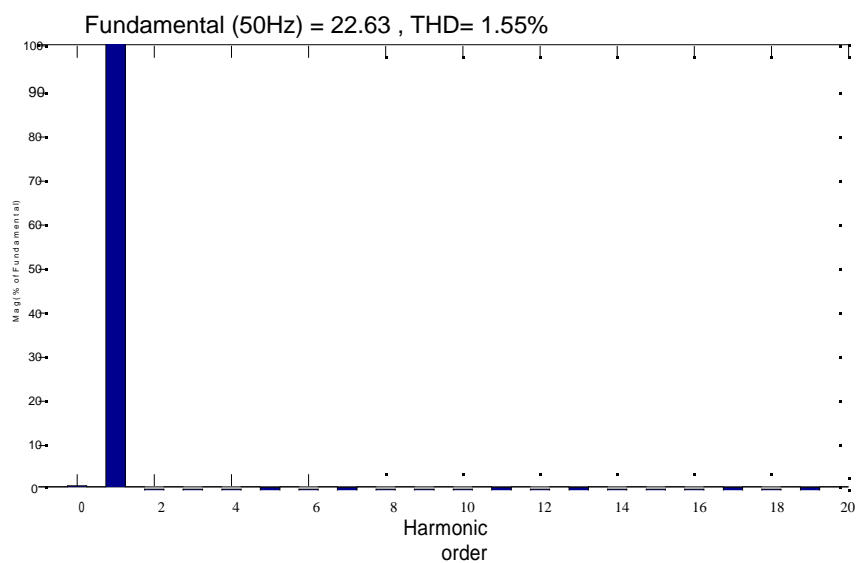


Figure -III.15 : le THD de courant de la source après compensation.

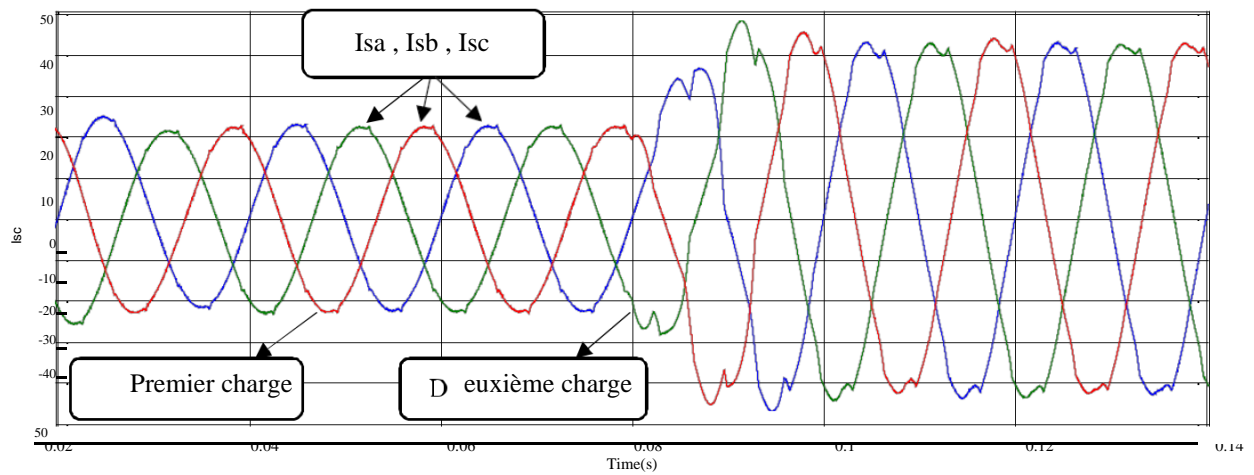


Figure -III.16 : Allures des courants de la source avec la variation de charge.

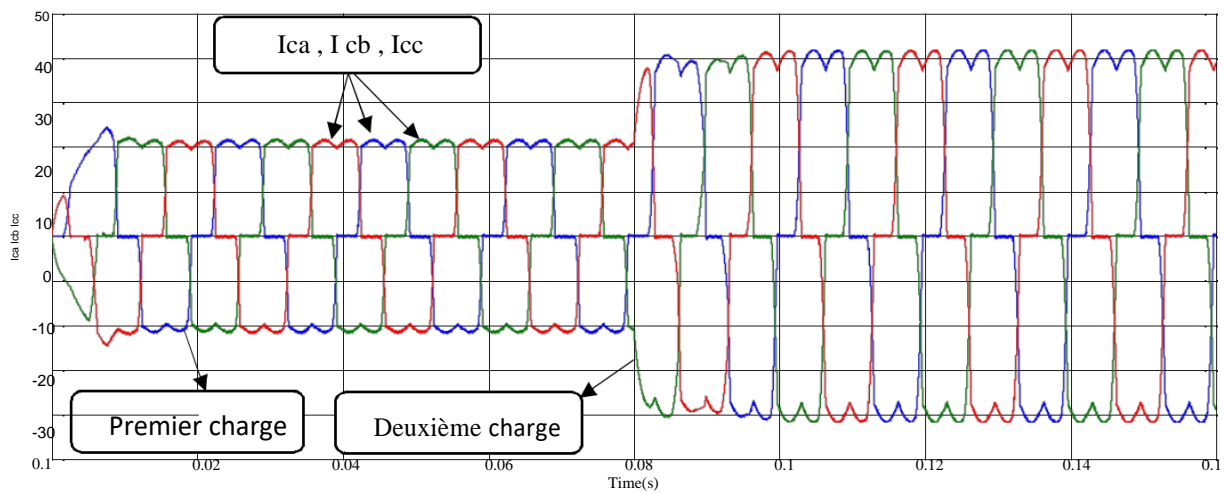


Figure -III.17 : Allure du courant de la charge avec la variation de charge.

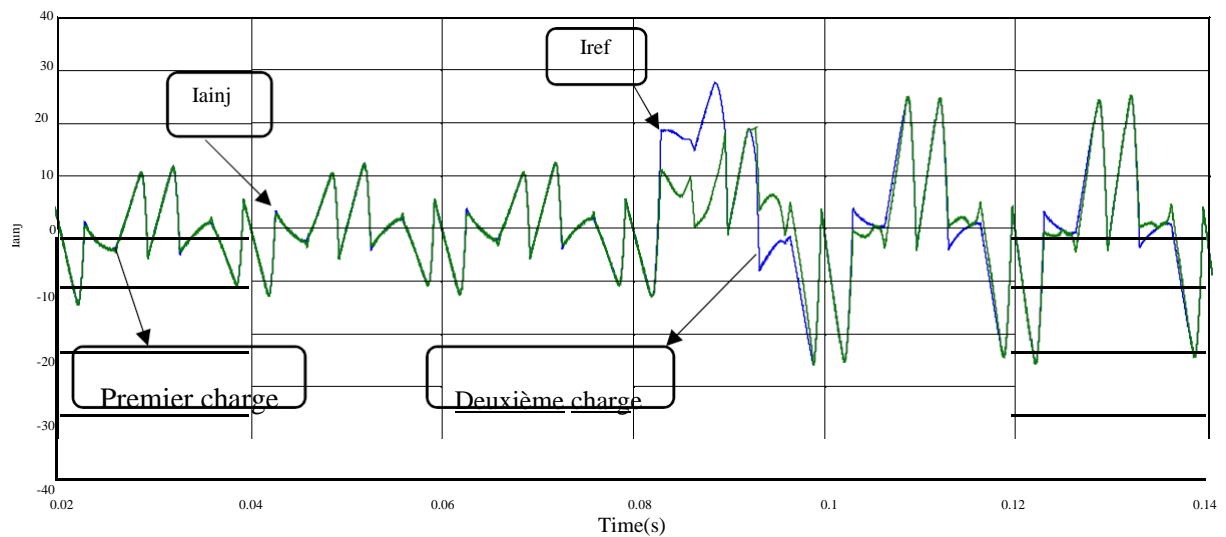


Figure -III.18 Allures du courant harmonique de référence I_{ah-ref} et I_{inj} le courant injecté par le filtre actif avec la variation de charge.

III-7- Interprétation des résultats :

La figure (III.10) représente la forme Allure du courant du côté de la charge. On remarque une distorsion des courants ce qui rend la présence des harmoniques dans le réseau.

La figure (III.11) représente les allures des courants de la source. Dans ce cas, on remarque que le courant est de forme sinusoïdale avec des harmoniques à haute fréquence dus au contrôle du courant par hystérésis.

La figure (III.12) représente allure du courant harmonique I_{ainj} injecté par le filtre actif. La figure (III.13) représente l'allure du courant et de la tension de la source dans le cas où l'onduleur est commandé par hystérésis. On constate aussi que le courant est pratiquement en phase avec la tension, Ce qui minimise la consommation de l'énergie réactive.

La figure (III.14) représente le spectre d'harmonique de courant avant le filtrage, Le THD de courant du réseau avant le filtrage est 26.21 %.

La figure (III.15) le THD de courant de la source après compensation où l'onduleur est commandé par hystérésis THD= 1.62 %. Ce qui est inférieur à 5 %.

Afin de tester les performances dynamiques de ce filtre, une autre charge a été ajoutée à $t = 0.08s$. La figure (III.16) montre le courant de source après avoir ajouté cette deuxième charge non linéaire. Ce courant reste sinusoïdal. La figure (III.17) montre le courant de la charge qui n'est pas sinusoïdale. La figure (III.18) montre le courant de référence et le courant injecté par le filtre.

III.8. Conclusion :

Dans ce chapitre on a étudié le filtre actif shunt utilisé pour minimiser les harmoniques dans le réseau causé par une charge non-linéaire. La méthode utilisée pour identifier les courants perturbateurs est la méthode des puissances instantanées. La commande faite par hystérésis.

Les résultats des simulations ont donné des THD par le filtre actif inférieurs à ceux obtenu par le filtre passif résonant. La réponse dynamique du filtre actif parallèle lors de la variation de charge été satisfaisant. Les résultats obtenus ont confirmé la supériorité du filtre actif par rapport aux filtres passifs.

Conclusion générale

Conclusion générale :

L'utilisation croissante dans l'industrie de systèmes commandés à base d'électronique de puissance entraîne de plus en plus de problèmes de perturbation au niveau des réseaux électriques. Ainsi, on assiste à une augmentation régulière, de la part des utilisateurs, des taux d'harmonique des courants, ainsi qu'à une importante consommation de la puissance réactive. La circulation de ces grandeurs perturbées va également provoquer des harmoniques de tension, lesquels vont se superposer à la tension nominale du réseau électrique.

Plusieurs solutions de dépollution harmonique dans les réseaux électriques ont été déjà proposées dans la littérature. Celles qui répondent le mieux aux contraintes industrielles sont les filtres actifs.

Dans le premier chapitre de ce mémoire nous allons présenter d'une manière générale les perturbations électriques et leur influence sur le réseau. Nous focalisons sur les perturbations harmoniques, leurs causes, leurs conséquences et les normes imposées.

Pour faire face aux perturbations harmoniques générées par les charges non-linéaires, la solution classique qui est connue depuis bien longtemps consiste en l'utilisation de filtre passif. Ce type de solution va être abordé au deuxième chapitre. Le principe de fonctionnement ainsi que les différents types du filtre passifs seront présentés. Une partie de ce chapitre sera réservée à la simulation du filtre passif résonant.

Le filtrage passif est la solution la plus répandue et pratiquement la plus simple et la moins chère mais elle présente deux inconvénients majeurs. Le premier est lié au phénomène de résonance avec le réseau qui est à l'origine de l'amplification de tout harmonique à fréquence voisine de celle du réseau. Le deuxième inconvénient est la dépendance des performances du filtre passif aux caractéristiques du réseau sur lequel il est connecté.

Les progrès remarquables réalisés dans le domaine des semi-conducteurs de puissance entièrement commandable, les thyristors et les transistors en particulier, ont permis de concevoir des dispositifs d'élimination des harmoniques auto-adaptable appelés compensateurs actifs d'harmoniques, ou encore filtres actifs, dont l'objectif est l'élimination des problèmes intrinsèques des filtres passifs.

Dans le troisième chapitre, nous allons étudier le filtre actif parallèle avec une structure d'un onduleur de tension en vue d'éliminer les courants harmoniques. Nous présentons son principe de fonctionnement, ces différents types et ces différents constituants. Les résultats de simulations d'un filtre actif parallèle à trois fils seront présentés et commentés. Finalement, une conclusion générale est présentée, résumant les résultats obtenus.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] : **douar. A** Mémoire de Magister « les Harmoniques sur les réseaux électriques ». Mémoire de Magister Université de Batna 2012
- [2] : **KIFOUCHE REZKI** Identification des harmoniques et génération du courant de référence « application au convertisseur statique ». mémoire de magister kiffouche .R 2005
- [3] : boucif .a mémoire master 2014 « filtrage actif d'un réseau électrique ». magister Université Mohamed Khider Biskra , 2012
- [4]: **KIFOUCHE REZKI** << Identification des courants harmoniques et génération du courant référence "application au convertisseur statique">> mémoire magister en génie **électrique** Université M'hamed Bouguarra Boumerdes , 2005
- [5] : **SANAE RECHKA** << étude de méthode de filtrage des harmoniques dans les réseaux électrique de distribution>>, diplôme de maitre et sciences appliquées en génie électrique, Université du Québec à Trois-Rivières, 2002.
- [6] : **T.Deflandre et P.Mauras** les Harmoniques sur les réseaux électriques Edition EYROLLES 1998
- [7] : **J. Arrillaga & N.R. Watson**, POWER SYSTEM HARMONICS, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, John Wiley & Sons, 2003
- [8] : **Alali Mohamad Alaa Eddin** <<Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension >> THÈSE, École Doctorale Sciences Pour l'Ingénieur ULP – ENSAIS – ENGEES – URS, 2002
- [9] : **Z. Laid, B.-S. Salem**, « Etude et réalisation d'un onduleur monophasé utilisant la technique PWM à base " MOSFET" », Mémoire d'ingénieur de l'Université de Biskra, 2004.
- [10] : **BOUKADOUM Aziz** << Contribution à l'étude des stratégies d'identification Harmoniques et de commande basées sur les techniques avancées pour les compensateurs actifs des réseaux électriques >> thèse de doctorat, université badji mokhtar annaba ,2015
- [11] : **Hanane Kouara** « l'application d'un filtre actif série au contrôle de la tension d'un réseau base tension » mémoire de magister en électrotechnique, université de Batna 2006.
- [12] : **OMEIRI AMAR** «Simulation d'un filtre actif parallèle de puissance pour la compensation des harmoniques de courant », Thèse de doctorat, Université badjimokhtar annaba, 2007

- [14] **KEBIRI SAMIA** << modélisation et simulation d un filtre actif multi niveaux >>
thèse magistrale, université mouloud Mammeri, tizi_ ouzou, 2009
- [15] **Boucif Abdelmalek** «Filtrage actif d'un réseau Électrique», Mémoire de Fin d'Etudes
Université Mohamed Khider Biskra, 2013 / 2014
- [16] « Étude comparative de différentes méthodes de compensation active d'énergie
électrique », mémoire de Master. Université de M'sila, 2013.
- [17] **Mohamed Alaa Eddin Alali.** « Contribution à l'étude des compensateurs actifs des
réseaux électriques basse tension (Automatisation des systèmes de puissance électrique) »,
Thèse de Doctorat de l'université Louis Pasteur-Strasbourg, 2002.
- [18] **S. BEN ALI et S. BOUHANAK** «Etude et Simulation d'un Filtre Active Parallèle à
Quatre Fils». Mémoire de magister, Université echahid hama lakhder d'el-oued , 2015.
- [19] **Y. PAL et A. SWARUP.** « A Review of Compensating Type Custom Power Devices for
Power Quality Improvement », Conférence on Power System Technology and IEEE Power
India Conférence (POWERCON), p. 1-8, 2008.
- [20] **N. Bruyant,** “Etude et commande généralisées de filtres actifs parallèles, compensation
global ou sélective des harmoniques, régime équilibré ou déséquilibré ”. Thèse de doctorat
de l'université de Nantes, France, 1999.