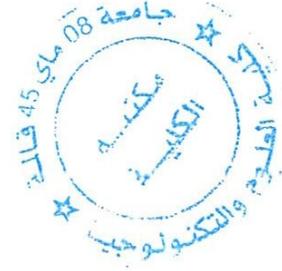


M/621.736

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 8Mai 1945 – Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrotechnique et Automatique



Domaine : Sciences et Technologie
Filière : Electrotechnique
Spécialité : Réseaux électriques

**Mémoire de fin d'études
pour l'obtention du diplôme de Master Académique**

**Filtrage hybride (passif-parallèle, actif-série) dans le
réseau électrique triphasé**

Présenté par :
Slimani Meryem
Beghour Rahma

Sous la direction de :
Mr. Bouzit Ali

JUIN 2012





Merri infiniment !



Remerciement

*Au ce terme de cette mémoire nous tiendrons nos remerciement A **allah** qui nous a donné la patience, le courage et la forme pour achever ce travail malgré toutes les difficultés et pour mener a bien cette mémoire.*

Nous tenons à remercier :

- *Notre encadreur **Bouzit Ali** qui nous a guidés tout le long de ce travail.*
- *Tous les enseignants qui ont contribuent à notre formation.*

- *Sans oublié de remerciez de façon particulière notre ainé*

- *Nous adressont nos vifs remerciements à monsieur le chef de département de Genie électrotechnique et automatique Mr : boullouh. Messaoud ainsi l'adjoin Mr : remadnia. Mokdad que nos autres professeurs et enseignants .*
- *Nous exprimons également notre gratitude aux membres du jury, qui nous ont honorés en acceptant de juger notre travail.*
- *A Mr Le Directeur de la centrale d'énergie électrique d'annba et ses assistants qui nous ont aidé à maitriser des différents logiciels et contribuer à élargir nos connaissances sur site.*
- *Nous Remercions tous ceux qui ont participé de près ou de loin, et aidé à réaliser ce modeste travail.*

SOMMAIRE

Introduction générale1

Chapitre 1Présentation de la pollution harmonique

1. Introduction.....5

1.2 Charges industrielles génératrices d'harmonique.....6

1.3 Les appareils à arc électrique6

1.4 Les effets de la pollution harmonique6

1. Les effets instantanés.....6

2. les effets différés.....6

1.5 Phénomènes de résonance7

1. Résonance parallèle.....7

1.6 Échauffement dans les conducteurs et les équipements

Électrique7

1.8 Les normes imposées sur le THD.....8

1.9 Conclusion..... 11

Chapitre 2 :Solution de dépollution harmonique

2. Solution de dépollution Réseau électrique13

2.1 Solutions traditionnelles.....13

2.2 Solutions modernes.....13

2.3	Filtrage actif	14
2.4	Principe de fonctionnement du Filtre actif	15
2.5	Classification des filtres actifs.....	16
a)	filtre actif série.....	17
b)	filtre actif parallèle.....	18
2.6	Filtrage passif.....	19
2.7	Principe de fonctionnement.....	19
2.8	Classification des filtres passifs.....	19
2.9	Filtre passif parallèle.....	20
2.10	Types des filtres parallèles.....	21
a)	filtre résonant.....	21
b)	filtre amorti.....	22
2.11	Configuration des filtres hybrides.....	24
2.12	Association d'un filtre actif série et d'un filtre Parallèle.....	26
2.13	Avantage des filtres harmoniques	27
2.14	Conclusion.....	28

Chapitre 3 :.....Méthode de filtrage

3.	Méthode de filtrage passif parallèle.....	29
3.1	Inductance anti-harmonique (filtre de barrage).....	29
3.2	Filtrage passif.....	29
3.3	Filtres résonants.....	31

3.4	Filtre amorti (passe haut).....	32
4.	Conception du filtre passif.....	34
4.1	Calculs du filtre passif	35
4.2	Minimisation de la tension harmonique.....	36

Chapitre 4 :.....Simulation du filtrage harmonique

4.	Simulation.....	37
4.1	Simulation du 5 ^{ème} , 7 ^{ème} et 11 ^{ème} harmonique.....	37
4.1.1	Simulation du 5 ^{ème} harmonique.....	37
4.1.2	Simulation du 7 ^{ème} harmonique.....	39
4.1.3	Simulation de la 5 ^{ème} et la 7 ^{ème} harmonique.....	40
4.1.4	Simulation du 11 ^{ème} harmonique.....	41
4.2	Simulation du 5 ^{ème} , 7 ^{ème} et 11 ^{ème} harmonique.....	42
4.3	Simulation du filtre passif parallèle complet.....	43
4.4	Simulation du filtre actif.....	45
4.5	Simulation filtrage hybride (passif parallèle, actif série)	47
4.6	Les différentes grandeurs harmoniques.....	49
4.6.1	Le courant électrique de source.....	49
4.6.2	La tension harmonique aux bornes du filtre passif.....	52
4.6.3	La tension de commande de filtre actif.....	53
4.7	Simulation de filtre passif parallèle (logiciel Matlab)....	55

4.8	Simulation du filtre actif série (logiciel Matlab).....	57
4.9	Interprétation des courbes de simulation.....	58
	<u>Conclusion générale</u>	59
	<u>Bibliographe</u>	61

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Ces dernières années, l'utilisation croissante des dispositifs d'électronique de Puissance dans les systèmes électriques a entraîné de plus en plus de problèmes liés aux Perturbations ou distorsions harmoniques des réseaux électriques.

Ce phénomène touche L'ensemble des secteurs industriels (utilisation de gradateurs, de redresseurs, de variateurs de vitesse,...), tertiaire (informatique ou éclairage des bureaux, commerce,...) et domestique (Téléviseurs, appareils électroménagers grand public,...) [1].

La distorsion harmonique est générée par les charges non linéaires connectées au réseau et qui absorbent des courants non sinusoïdaux.

Ces harmoniques de courant vont à leur tour générer des tensions harmoniques aux différents points de connexion au réseau.

Pour les autres équipements électriques connectés en ces points, cette pollution harmonique a des effets nocifs.

Parmi ces effets, on peut notamment citer la déformation de la tension réseau au point de raccordement alors que le distributeur d'énergie est tenu de fournir une tension propre.

Cette pollution peut également conduire à l'échauffement des câbles et des équipements électriques ou bien encore à l'arrêt soudain de machines tournantes, voire la destruction totale de tous ces équipements.

Pour diminuer ou supprimer ces perturbations et ainsi améliorer la qualité de l'énergie distribuée, plusieurs solutions existent :

»La réduction de l'impédance de court-circuit,

»la 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,

»les dispositifs de filtrage.

L'utilisation de dispositifs de filtrage tels que les filtres passifs dits résonnants et/ou amortis peut ainsi empêcher les courants harmoniques de se propager dans les réseaux électriques. Ils peuvent également être utilisés pour compenser la puissance réactive.

Cependant, le filtrage passif pose certains problèmes : manque d'adaptabilité lors de variations de l'impédance du réseau, de la charge et résonance possible avec l'impédance du réseau et dans certains cas défavorables où cette résonance

Est excitée, celle-ci peut entraîner une tension harmonique élevée et un courant harmonique important dans la capacité du filtre et dans le réseau.

Ainsi, cette solution présente un inconvénient majeur qui peut être intolérable dans ces circonstances particulières.

Une autre solution consiste à mettre en œuvre un filtrage actif afin d'éviter les inconvénients des filtres passifs.

Une première solution consiste à connecter le filtre actif en parallèle avec le système polluant : ainsi, il injecte au réseau un courant de même amplitude que celle du courant harmonique à éliminer mais en opposition de phase.

Une seconde approche consiste en la connexion du filtre actif en série avec le réseau : il se comporte alors comme un générateur de tension qui impose une tension harmonique telle que, additionnée à celle du réseau, la tension au point de connexion soit rendue sinusoïdale.

Cependant le filtrage actif présente également ses inconvénients spécifiques, notamment son coût élevé pour des applications industrielles ; le dimensionnement du convertisseur de puissance du filtre actif peut alors être relativement élevé.

Pour cette raison majeure, les applications des filtres actifs de puissance dans les systèmes électriques sont aujourd'hui encore limitées bien que des normes fixent les caractéristiques exigées pour la qualité de l'énergie.

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 filtre hybride consiste en l'association de filtres passifs, destinés à absorber les harmoniques de courant provenant de la charge polluante, et d'un filtre actif de faible puissance.

D'autre part, il est important de noter que les performances d'un filtre actif sont étroitement liées à l'algorithme utilisé pour déterminer les références

Harmoniques de courant ainsi qu'à la méthode utilisée pour la poursuite de ces références.

De plus, le mode d'implantation, analogique ou numérique, peut également avoir une influence directe sur les performances du filtre actif, selon la technologie utilisée (système de prototypage DSPACE, FPGA, microcontrôleur, carte analogique, ...).

Chapitre 1:

présentation de la pollution harmonique

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.

L'utilisation croissante des équipements de l'électronique de puissance sur les réseaux électriques contribue à la détérioration de la tension d'alimentation.

En effet, ces charges dites déformantes sont non linéaires et appellent du réseau électrique un courant non sinusoïdal possédant un contenu harmonique.

Ces courants harmoniques circulant à travers les impédances du réseau peuvent, lorsqu'ils sont importants en amplitude, créer des tensions harmoniques et ainsi perturber le fonctionnement des autres équipements branchés au point commun de raccordement [2,3].

1.2 Charges industrielles génératrices d'harmoniques

L'avènement de l'électronique de puissance a eu un impact majeur sur le monde industriel au cours des dernières décennies.

Cet avènement s'est produit par l'arrivée sur le marché des composants d'électronique de puissance tels les thyristors, les triacs, les GTO, les IGBT ou les transistors de forte puissance.

Ces composants ont permis le développement de convertisseurs statiques de grande puissance qui permettent la conversion de la puissance électrique d'une forme quelconque à une autre forme. Ces convertisseurs apportent un progrès considérable au niveau des procédés industriels.

Comme mentionné précédemment, ces convertisseurs sont vus comme étant des charges non linéaires qui injectent des courants harmoniques sur le réseau électrique.

Nous présentons dans cette section quelques-unes des charges les plus importantes.

1.3 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. Les fours à arc sont majoritairement présents dans la transformation de l'acier et la métallurgie, ainsi que dans les secteurs de la mécanique et de l'électricité [4].

1.4 Les effets de la pollution harmonique

Les courants harmoniques associés aux différentes impédances du réseau vont donner naissance à des tensions harmoniques qui vont se superposer à la tension fondamentale du réseau.

La tension qui en résulte n'est plus sinusoïdale. La pollution alors présente sur le réseau de distribution pourrait être préjudiciable au bon fonctionnement de tous les récepteurs (ou charge) raccordés sur ce même réseau. On distingue deux types d'effet des harmoniques sur les équipements électriques :

1) *Les effets instantanés*

Ce sont les effets immédiats sur le bon fonctionnement d'un équipement. Par exemple, dans le cas des appareils électroniques, il peut s'agir d'une altération de l'image pour les écrans de télévision ou une altération du son s'il s'agit d'une chaîne HI-FI ou d'un téléphone.

La précision des appareils de mesure est également affectée par la présence d'harmoniques.

2) Les effets différés

Nature du matériel électrique	Effet de la « pollution harmonique »
-Machines tournantes -Moteurs triphasés, alternateurs	-Echauffements supplémentaires (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 pairs.
- Câbles	-Augmentation des pertes surtout dans le câble de neutre où s'ajoutent les harmoniques de rang 3 et multiples de 3. -Pertes diélectriques supplémentaires.
-_Electronique de puissance (ponts redresseurs à thyristor, transistors, etc).	-Troubles fonctionnels liés à la forme d'onde (commutation, synchronisation).
-Condensateurs de puissance	-Pertes diélectriques supplémentaires aboutissant à un vieillissement prématuré des condensateurs
-Ordinateur	Dysfonctionnement lié aux couples pulsatoires des moteurs d'entraînement des supports magnétiques
-Dispositifs de protection (Fusibles. Disjoncteurs magnétothermiques...)	-Fonctionnement intempestif
-Compteur d'énergie	-Erreurs de mesure
-Téléviseurs	-Déformation d'image
-Lampes à décharge	-Risque de vacillement sous l'effet de l'harmonique de rang 2

Ils se manifestent après une longue exposition au phénomène et se traduisent par une perte partielle des fonctionnalités ou une destruction complète de l'appareil.

L'échauffement des câbles et des diverses enroulements d'une machine en est un exemple.

1.5 Phénomènes de résonance

L'apparition de phénomènes de résonance est due à la présence sur les réseaux d'éléments capacitifs et inductifs. Le danger de ce phénomène est qu'il peut engendrer de grandes valeurs d'impédance Z_n , de tension V_n et de courant harmonique I_n aux bornes des différents éléments composant le réseau. Lorsque ces valeurs de tension et de courant harmoniques sont trop élevées, ils peuvent endommager et même détruire les équipements qui y sont soumis.

On distingue deux types de résonance selon la configuration des éléments capacitifs et inductifs

1) Résonance parallèle

Il y a résonance lorsque $X_L = X_C$, dans ce cas, l'impédance est infinie. La fréquence de résonance est donnée par :

$$f \square = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \dots\dots\dots$$

(1)

1.6 Échauffement dans les conducteurs et les équipements électriques

Les courants harmoniques circulant dans les conducteurs provoquent les réchauffements de ceux-ci par effet Joule).

Cependant, les harmoniques ne contribuent pas au transfert de puissance active, ils créent uniquement des pertes électriques et participent à la dégradation du facteur de puissance.

La circulation des courants harmoniques dans les transformateurs et dans les enroulements du moteur asynchrone crée également des échauffements supplémentaires.

En plus des pertes Joule, le transformateur subit des échauffements supplémentaires en présence d'harmoniques qui sont causés par les pertes fer dans le noyau magnétique.

Ces dernières résultent des pertes par hystérésis et par courants de Foucault.

De plus, les condensateurs sont très sensibles à la circulation de courants harmoniques de par leur impédance qui décroît en fonction de l'augmentation de la fréquence.

Ces courants harmoniques circulent alors plus aisément dans le condensateur de faible impédance ce qui crée des échauffements qui risquent de le détruire.

1.7 Effets sur le conducteur neutre

Dans un système équilibré, les composantes homopolaires dans le neutre sont nulles. Ceci n'est pas le cas des systèmes comportant une charge non linéaire [5].

En effet, les courants homopolaires des harmoniques de rang multiple de 3 vont s'additionner dans le conducteur neutre. L'intensité de ces courants superposés peut endommager sérieusement le câble neutre.

1.8 Les normes imposées sur le THD

Afin de garantir un niveau de qualité de l'énergie satisfaisant en limitant les effets des perturbations harmoniques, les distributeurs d'énergie et les utilisateurs sont amenés à respecter des normes et des recommandations qui définissent les règles relatives à la compatibilité électromagnétique (CEM) définies [6] :

- au niveau international par la CEI,
- au niveau européen par le CENELEC,
- au niveau français, par l'UTE et le CEF,

En effet, ces normes ont été établies par des groupes d'experts internationaux, qui représentent les constructeurs, les utilisateurs de matériels, ainsi que par des représentants de laboratoires d'essais, des consultants et des universitaires spécialistes du domaine considéré.

Afin de faciliter la connaissance des normes pour chaque domaine, les normes CEI qui couvrent tous les domaines de l'électrotechnique sont Numérotées et référencés comme par exemple CEI 61000 sur la compatibilité électromagnétique et CEI 60063 qui définit les séries de valeurs normalisées pour les résistances et condensateurs, ... etc.

Les normes internationales publiées par la CEI dans les domaines de l'électricité et de l'électronique ont pour objectifs de :

- faciliter les échanges dans le monde en supprimant les barrières techniques,
- assurer la qualité des produits,
- garantir l'interopérabilité des produits et des systèmes,
- contribuer à la sécurité lors de l'utilisation des produits,
- contribuer à la protection de l'environnement et à la qualité de vie.

Au niveau international (CEI), les normes CEI 61000 publiées dans le domaine de la compatibilité électromagnétique (CEM) sont divisées en plusieurs parties, conformément à la structure suivante:

- 1- Généralités,
- 2- Environnement,
- 3- Limites,
- 4- Techniques d'essais et de mesures,
- 5- Guide d'installation et d'atténuation,
- 6- Normes génériques.

Chaque partie est divisée en plusieurs sous-parties dont certaines ont été rendues obligatoires par la directive 89/336/CEE dans l'Union Européenne et retranscrites dans les droits nationaux sous l'appellation NF EN 61000 (en France).

L'application de ces directives est obligatoire pour bénéficier du marquage CE (Communauté Européenne).

L'apposition de marquage indique donc la conformité du produit aux exigences essentielles de ces directives afin d'avoir le droit de commercialiser les produits concernés dans l'Union Européenne.

Pour les réseaux électriques, les recommandations d'EDF pour les tensions sont :

- Pour un harmonique pair : $V_h/V_i \leq 0,6\%$
- Pour un harmonique impair : $V_s/V_i \leq 1\%$
- Pour le taux de distorsion global de tension : $THD < 1,6\%$

Il s'agit de limitations qui sont maintenant très anciennes (plus de 20ans). Ci-dessous, nous allons détailler les normes internationales les plus récentes concernant les courants et les tensions.

Au niveau international (CEI), les normes CEI-1000 définissent les niveaux des courants et des tensions harmoniques à respecter.

Compte tenu de toutes ces normes imposées par la réglementation CEM, nous avons besoin de mettre en œuvre des moyens efficaces afin de limiter la propagation de la pollution harmonique des réseaux de distribution d'énergie.

De plus, les normes actuelles ne sont pas tout à fait satisfaisantes car elles ne tiennent pas compte de l'influence du réseau et de la déformation initiale de la tension.

Par ailleurs, elles paraissent un peu laxistes pour les appareils de faibles puissances [7].

Il faudrait donc s'attendre, dans l'avenir proche, à des normes plus strictes et surtout à des restrictions financières plus contraignantes qui justifient d'avantage des travaux comme le notre dans le domaine de la qualité de l'énergie.

1.9 Conclusion

Dans le présent chapitre, nous avons vu l'origine, les effets ainsi que les normes qui s'appliquent au phénomène des harmoniques sur les réseaux électriques.

Lorsque l'onde de la tension d'alimentation n'est plus sinusoïdale, il y a présence d'harmoniques.

Cette pollution est principalement causée par la présence croissante des convertisseurs statiques qui sont vus par le réseau comme des charges non linéaires.

Les dommages causés par la présence des harmoniques peuvent être plus ou moins importants selon la configuration du réseau et les équipements présents.

Différentes normes existent afin d'établir les limites permises d'harmoniques sur les réseaux.

Dans le prochain chapitre, nous examinerons les principaux moyens de mitigation anti-harmoniques.

Chapitre 2:

Solution de dépollution harmonique

2. SOLUTIONS DE DEPOLLUTION DES RESEAUX ELECTRIQUES

Deux types de solutions sont envisageables. La première consiste à utiliser des convertisseurs statiques moins ou peu polluants, tandis que la seconde consiste en la mise en œuvre d'un filtrage des composantes harmoniques.

La première classe de solutions s'intéresse à la conception tandis que la seconde consiste à compenser les courants ou les tensions harmoniques [3].

Deux groupes de solutions de dépollution pour compenser toutes les perturbations peuvent être distingués : les solutions traditionnelles et les solutions modernes.

2.1 Solutions traditionnelles

Il s'agit notamment de mettre en œuvre les moyens suivants :

- 1-compensateur stat : il s'agit d'une méthode de compensation utilisée pour relever le facteur de puissance,
- 2- Filtre passif : le plus ancien pour le traitement des harmoniques de courant. Il consiste à piéger les courants harmoniques pour empêcher qu'ils ne se propagent dans le reste du réseau.

2.2 Solutions modernes

Ces solutions sont proposées comme des solutions efficaces de dépollution des réseaux électriques afin de traiter les inconvénients inhérents aux solutions traditionnelles comme les filtres passifs (non adaptatifs aux variations de la charge et du réseau, phénomènes de résonance).

Parmi toutes les solutions modernes, on trouve trois types de structures classiquement utilisées :

- *Le filtre actif
- *Le filtre passif
- *Le filtre actif hybride (actif série, passif parallèle).

Le but de ces filtres actifs est de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à ce que le courant ou la tension redevienne sinusoïdal.

Le filtre actif est connecté au réseau soit en série (FAS), soit en parallèle (FAP) suivant qu'il est conçu respectivement pour compenser les tensions ou les courants harmoniques, soit associé à des filtres passifs. Pour fournir aux consommateurs une énergie électrique de qualité, même dans les conditions de fonctionnement les plus perturbées, le filtrage est proposé comme des solutions de dépollution des réseaux électriques [9]-[10].

2.3 Filtrage actif

Les filtres actifs de puissance ont été étudiés pour la compensation d'harmoniques dans les réseaux de puissance industriels depuis le principe de compensation proposé par *H. Sasaki* et *T. Machida* en 1971 [11].

Dans ces années, le filtrage actif ne connaissait que des progrès au stade théorique en laboratoire.

La technologie des semi-conducteurs n'était pas encore assez développée pour l'implantation pratique du principe de compensation. Quelques années plus tard, la technologie des semi-conducteurs de puissance connaissait une éclosion remarquable.

Ce phénomène a stimulé l'intérêt dans la recherche du filtrage actif pour la compensation d'harmoniques.

En plus de la technologie de commande de modulation en largeur d'impulsion (MLI), le développement de l'étude théorique a rendu possible leur matérialisation au niveau pratique.

Au début des années 1990, le filtre actif a connu un regain d'intérêts. Il a été démontré que ses performances de compensation d'harmoniques sont supérieures à celles d'un filtre passif *LC* classique [12].

De nos jours, les filtres actifs ont atteint une maturité technologique sans précédent.

Ils peuvent faire la compensation d'harmoniques, de puissance réactive et/ou de courant de neutre.

Ils ont évolué dans le dernier quart de siècle au niveau de la variété de leur configuration, de leur stratégie de commande et de leurs semi-conducteurs de puissance.

Les filtres actifs sont maintenant utilisés dans d'autres domaines que la compensation d'harmoniques. On les utilise maintenant dans la régulation de tension, pour supprimer le papillotement de la tension et pour améliorer l'équilibre des phases $a-b-c$ des systèmes de distribution triphasés [14, 15].

2.4 Principe de fonctionnement du filtre actif

Les filtres actifs sont composés d'onduleurs qui sont des convertisseurs statiques de puissance.

Alimenté par une source de courant ou de tension continue, l'onduleur peut délivrer un courant ou une tension dont le contenu harmonique dépend uniquement de la loi de commande de commutation des interrupteurs [16].

Les filtres actifs agissent donc comme des sources de tension ou de courant harmoniques en opposition de phase avec ceux du réseau afin de rétablir un courant de source quasi sinusoïdal.

Le filtre actif peut être connecté au réseau en série ou en parallèle, suivant qu'il est conçu pour compenser les tensions ou les courants harmoniques

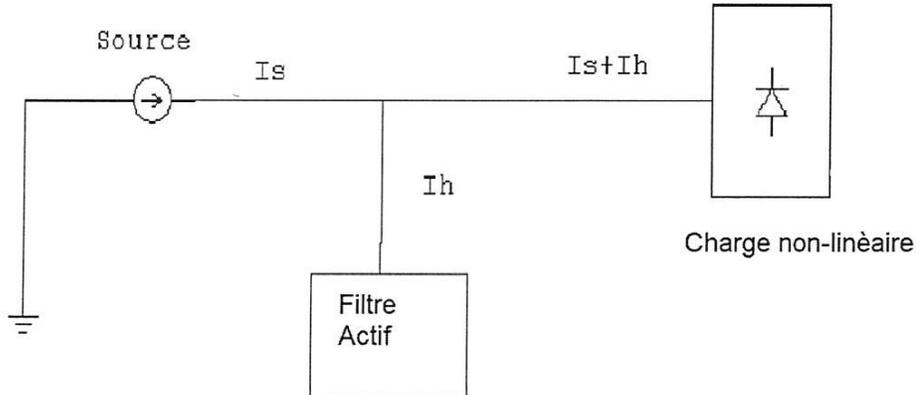


Fig1- Principe de fonctionnement du filtre actif parallèle

Ou :

I_s : Courant de source sinusoïdale (fondamental).

I_h : Courants harmoniques.

2.5 Classification des filtres actifs

Les filtres actifs peuvent être classifiés à partir du type de convertisseur qu'ils utilisent, de leur topologie ou encore de leur nombre de phases. Nous nous limiterons ici à la classification selon leurs différentes topologies.

Suivant leurs topologies, les FA peuvent être en série, en parallèle ou mixtes [12].

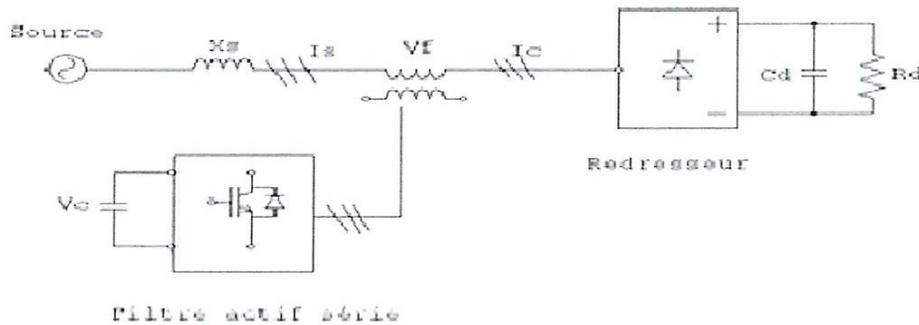
a) *Filtre actif série*

Fig. 2- Filtre actif série

Le filtre actif série (FAS) est placé en série entre la source et la charge non linéaire pour forcer le courant de la source à être sinusoïdal. Cette approche est basée sur le principe d'isoler les harmoniques par le contrôle de la tension de sortie du FAS.

En d'autres mots, le FAS présente une impédance élevée au courant harmonique, ce qui isole ces courants les empêchant ainsi d'aller vers la source ou vers la charge.

Il se comporte donc, comme une source de tension contrôlable. Le FAS est surtout utilisé pour filtrer les harmoniques générés par les charges de tensions harmoniques [18,19,20].

b) Filtre actif parallèle

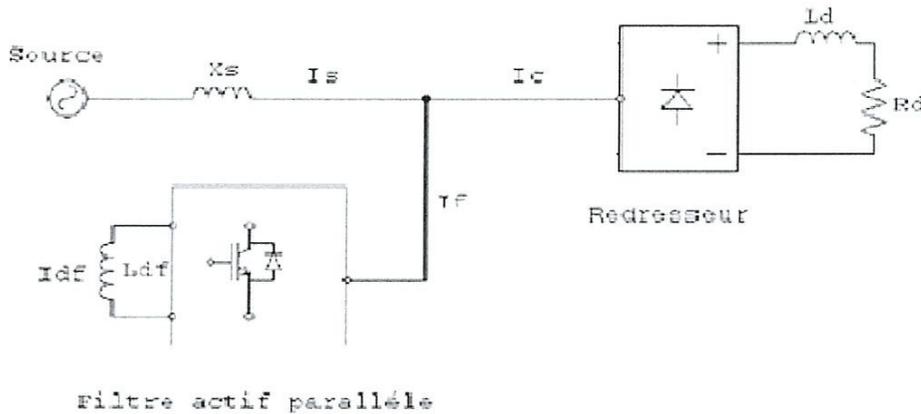


Fig.3 Filtre actif parallèle

Contrairement au FAS, le filtre actif parallèle (FAP) est surtout utilisé pour éliminer les courants harmoniques engendrés par les charges génératrices de courants harmoniques.

Il peut cependant, dans certaines conditions, être utilisé pour compenser la puissance réactive (STATCOM), pour amortir les résonances parallèle ou série dues à l'interaction entre la ligne et le filtre passif et pour balancer des courants déséquilibrés.

Le FAP est un onduleur modulé en largeur d'impulsion (MLI) qui est placé en parallèle avec la charge dans le but d'injecter un courant harmonique de même amplitude et de phase opposée que celui de la charge.

Le FAP agit comme une source de courant harmonique réglable [12, 16, 17, 20].

2.6 Filtrage passif

2.7 Principe de fonctionnement

Le principe du filtrage passif est de modifier localement l'impédance du réseau afin de faire dévier les courants harmoniques et, du même coup, éliminer les tensions harmoniques résultantes.

Ces filtres sont composés d'éléments capacitifs et inductifs qui sont disposés de manière à obtenir une résonance série sur une fréquence déterminée.

Afin de concevoir ce type de filtre, une connaissance précise des caractéristiques et du comportement du réseau sous l'effet des harmoniques est nécessaire.

Une telle exigence de conception est généralement satisfaite à l'aide d'un logiciel de simulation.

Les types de filtre passif utilisés sont choisis en fonction de l'atténuation harmonique recherchée [84].

2.8 Classification des filtres passifs

Il est possible de classer les filtres passifs selon leur emplacement sur le réseau, leur mode de connexion, leur degré d'amortissement de même que leur fréquence de résonance.

Les filtres passifs peuvent se diviser en deux familles, soit les filtres parallèles et les filtres séries.

Selon le type choisi, les harmoniques peuvent être (a) littéralement bloqués par une impédance série élevée entre le convertisseur et le réseau, (b) déviés par une faible impédance en parallèle ou (c) une combinaison des deux.

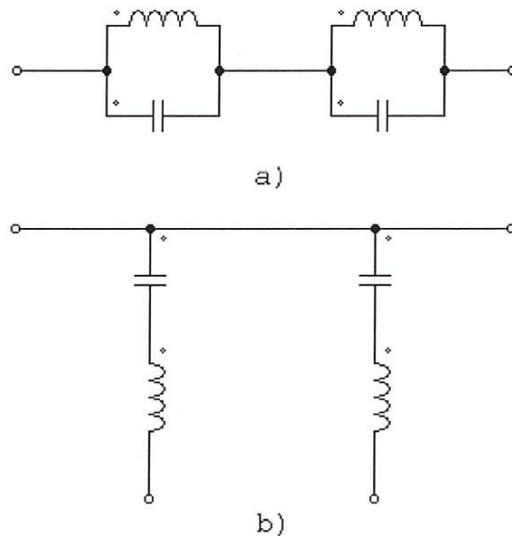


Fig. 4 - a) Filtré série et b) Filtré parallèle

2.9 Filtré passif parallèle

Le filtré parallèle est utilisé exclusivement du côté alternatif pour deux raisons :

- 1) Il porte uniquement le courant harmonique et est lié à la terre.
- 2) À la fréquence fondamentale, il possède l'avantage de fournir de la puissance réactive.

Pour une efficacité équivalente au filtré série, le filtré parallèle est beaucoup moins cher.

Le filtré parallèle est surtout utilisé dans le cas des charges génératrices de courants harmoniques alors que le filtré série l'est pour les charges génératrices de tensions harmoniques [29].

2.10 Types de filtres parallèles

a) *Filtre résonant*

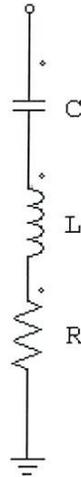


Fig. 5 - Filtre résonant

Le filtre résonant a pour caractéristique une impédance très faible à un courant harmonique de rang déterminé.

Le facteur de qualité (Q) détermine la précision du réglage de l'harmonique correspondant ainsi que son efficacité à l'éliminer.

Ce qui implique un facteur de qualité élevé pour ce type de filtre. Pour chaque rang d'harmoniques à filtrer, nous devons compter trois branches shunt (un filtre shunt pour chaque phase).

Le filtre résonant fournit une partie de la puissance réactive au convertisseur par ses capacités.

L'inconvénient de ce type de filtre shunt est la variation des éléments L et C due à leur vieillissement et à leur qualité.

Ces facteurs ont pour effet de créer un désaccord de l'ensemble. Afin d'éliminer un rang harmonique particulier, un filtre résonant ajusté pour cette fréquence doit être installé sur chacune des trois phases.

De plus, l'ajout de ce type de filtre peut causer des résonances parallèles avec l'impédance du réseau.

Il y a également risque de résonance si deux filtres résonants ajustés à la même fréquence sont présents sur un même réseau.

Il est donc particulièrement important d'avoir une bonne connaissance du comportement du réseau sous l'effet d'harmoniques avant l'installation de ce type de filtre.

b) *Filtre amorti*

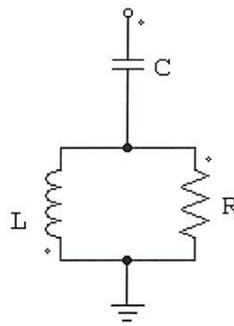


Fig.6 - Filtre amorti

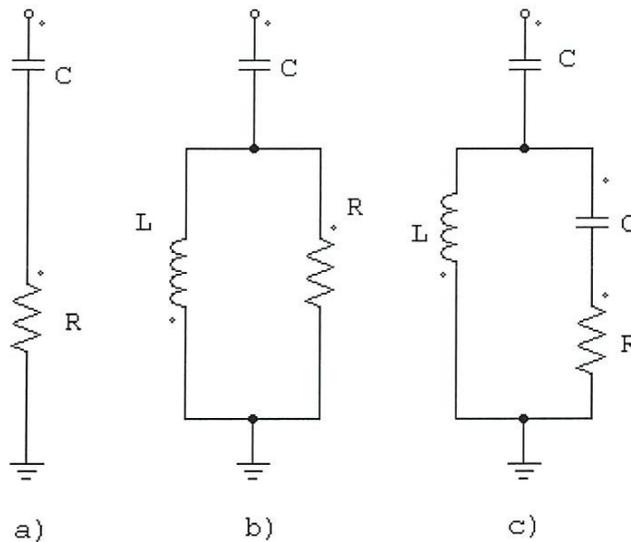


Fig. 7 - Types de filtre amorti

On distingue trois types de filtre amorti, les filtres amortis de premier ordre a), les filtres amortis de second ordre b) et les filtres de troisième ordre c).

Les filtres amortis offrent plusieurs avantages :

- 1) Leurs performances sont moins sensibles aux variations de température, aux déviations de fréquence, aux tolérances des composantes, etc.
- 2) Ils présentent une faible valeur d'impédance pour une large gamme de fréquences harmoniques.
- 3) 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.

Les principaux désavantages du filtre amorti sont les suivants :

- 1) Pour atteindre des performances similaires au filtre résonant, le filtre amorti doit être conçu pour un taux de puissance apparente (S) élevé, bien que dans la plupart des cas de bonnes performances peuvent être obtenues avec la limite requise pour la compensation du facteur de puissance.
- 2) 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.

Ces deux derniers sont en général conçus avec un faible facteur de qualité Q compris entre 0,7 et 1,4. Le principal avantage du filtre amorti de troisième ordre sur le deuxième ordre est une réduction substantielle des pertes à la fréquence fondamentale en raison de l'impédance accrue à cette fréquence provoquée par la présence du condensateur Q . De plus, la taille de C_2 est petite comparativement à C_1 .

En pratique, il est courant de mettre en œuvre :

- Des filtres résonants accordés sur les premiers rangs harmoniques (rangs 5 et 7) où les injections de courant sont importantes.
- Un filtre amorti pour limiter l'impédance harmonique sur le reste du spectre (rangs > 11).

2.11 Configuration des filtres hybrides

Ces dernières années, de nombreuses topologies de filtres hybrides associées à différentes stratégies de commandes ont été présentées dans la littérature scientifique afin d'améliorer la qualité de l'énergie mais surtout, pour réduire le dimensionnement du filtre actif de puissance et par conséquent son coût.

Les filtres hybrides peuvent être classés selon le nombre d'éléments mis en œuvre dans la topologie étudiée (filtres actifs et filtres passifs), le système traité (monophasé, triphasé trois fils et triphasé quatre fils) et le type d'onduleur utilisé (structure tension ou courant).

La figure ci dessous présente quelques configurations de filtres hybrides selon le type de système étudié et les éléments associés [6].

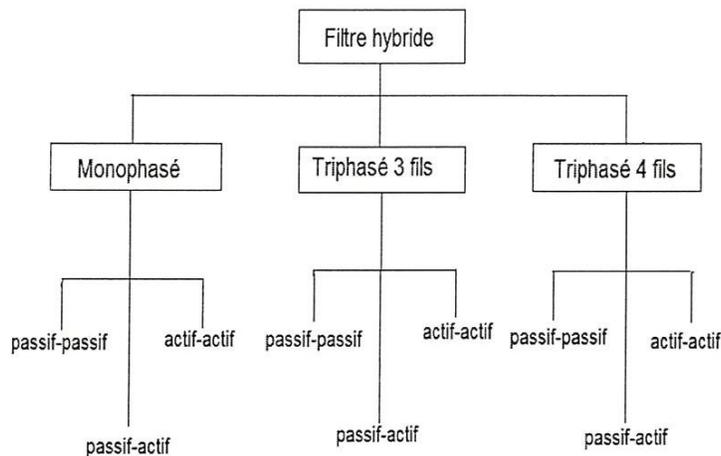


Fig.8 configuration des filtres hybrides

La configuration traditionnelle du filtre hybride comprend un filtre actif et un filtre passif.

Le filtre passif doit avoir une impédance aussi faible que possible pour les harmoniques de rangs 5, 7, 11 et 13 afin d'atteindre de bonnes caractéristiques de filtrage [13], [14].

Pour cette raison le filtre passif se compose classiquement d'un premier filtre passif accordé sur l'harmonique cinq, d'un second filtre passif accordé sur l'harmonique sept et d'un troisième filtre passe haut.

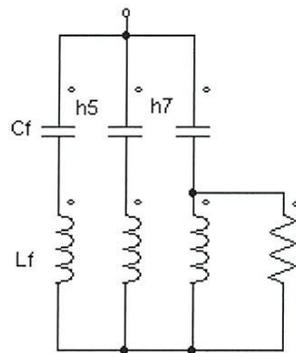


Fig.9 Configuration du filtre passif avec filtre passe haut.

La figure 9 présente une autre configuration de filtre passif où l'on utilise des filtres passifs accordés sur l'harmonique 11 et sur l'harmonique 13 au lieu du filtre passe haut.

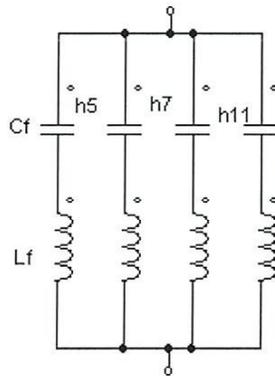


Fig. 10 Configuration du filtre passif sans filtre passe haut.

En effet, dans les deux configurations du filtre passif présentées ci-dessus, le coût et la complexité sont des inconvénients majeurs [25].

Une topologie de filtre hybride triphasé combinant filtrages actif et passif et permettant de pallier à ces inconvénients sera présentée ; elle comporte plusieurs boucles de contrôle accordées sur des harmoniques particuliers dans cette topologie.

Le filtre passif a pour rôle d'éliminer les harmoniques générés par la charge alors que le filtre actif est destiné à améliorer les performances de filtrage du filtre passif.

Selon le mode d'association des filtres passifs aux filtres actifs, le filtre hybride se décline en plusieurs configurations décrites ci-après.

2.12 Association d'un filtre actif série et d'un filtre passif :

Cette structure permet de réduire les risques d'antirésonance entre les éléments des filtres passifs et l'impédance du réseau.

Dans ce cas, le filtre actif série agit comme une résistance vis-à-vis des courants harmoniques et les oblige à circuler dans le filtre passif, tout en restant transparent à la fréquence fondamentale. La figure 11

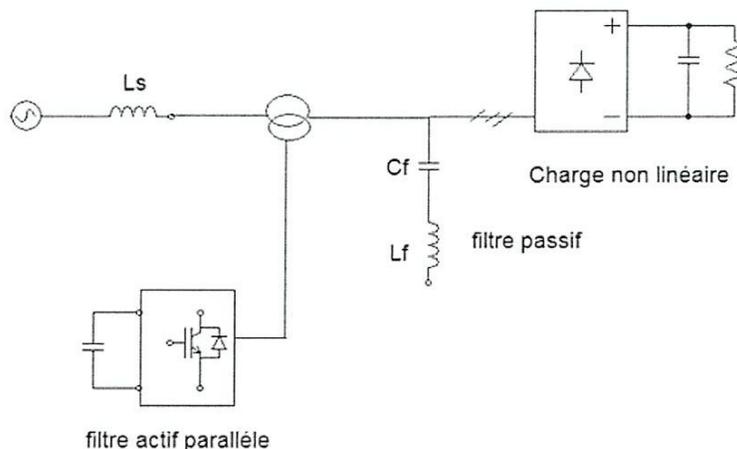


Fig.11 Association série d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif.

Dans ce cas, le filtre passif se comporte comme une impédance faible à la fréquence d'accord et comme une grande impédance à la fréquence fondamentale.

Ce système présente deux avantages : le dimensionnement en puissance du filtre actif est encore plus réduit du fait que le courant qui le Traverse est plus faible et le filtre actif est à l'abri d'un éventuel court-circuit de la charge [2], [9].

2.13 Avantage des filtres harmoniques

- Soulager 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)

2.14 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons introduit deux technique FPGA disputé et les différentes sources de perturbation affectant la forme d'onde des tensions du réseau électrique ainsi que leurs effets néfastes sur les équipements électriques qui y sont connectés. Ces effets sont à l'origine d'échauffements et de dégradations du fonctionnement de ces équipements.

Les normes imposées ont été également présentées. Elles fixent les limites de la génération d'harmoniques. Ensuite, pour diminuer les effets de ces perturbations harmoniques, différentes solutions traditionnelles et modernes de dépollution ont été présentées.

Les solutions classiques ne sont pas très efficaces pour traiter ce problème ; les technologies mises en œuvre, telles que les filtres passifs, sont souvent pénalisantes en termes d'encombrement et de résonance. De plus, les filtres passifs ne peuvent pas s'adapter à l'évolution du réseau et des charges polluantes.

En ce qui concerne les solutions modernes, nous avons présenté les deux topologies utilisées, le filtre actif et le filtre hybride. Ces topologies ont pour but de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à ce que le courant et la tension du réseau redeviennent sinusoïdaux. En effet, grâce aux progrès réalisés dans le domaine de l'électronique de puissance, ces solutions peu encombrantes n'occasionnent aucune résonance avec les éléments passifs du réseau et font preuve d'une grande flexibilité face à l'évolution du réseau électrique et de la charge polluante.

Ces solutions modernes peuvent être installées pour compenser toutes les courants tels que les harmoniques, les déséquilibres ainsi que pour compenser de la puissance réactive.

Chapitre 3: **Méthode de filtrage**

3. METHODES DE FILTRAGE HARMONIQUE

3.1 Inductance anti-harmonique (filtre de barrage)

Cette solution consiste à installer une inductance en série sur chaque phase du réseau électrique voir figure .2ci-dessous. [26]

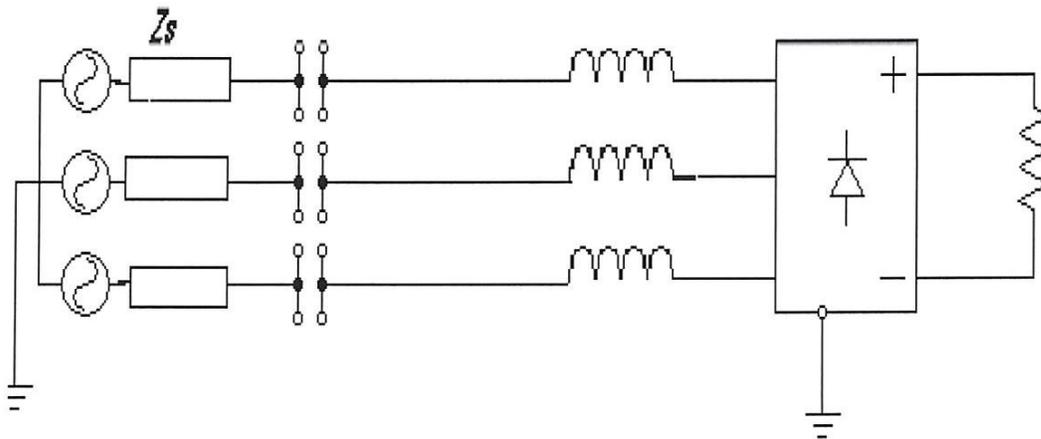


Fig.1 raccordement d'une inductance anti-harmonique

$$X_{L(\Omega)} = \omega L = 2\pi fL \dots\dots\dots 2$$

X_L : La réactance inductive, elle augmente avec l'augmentation de la fréquence autrement dit elle bloque les harmoniques d'ordre supérieures.

3.2 Filtrage passif

L'une des solutions qui ont été développées pour désensibiliser les réseaux électriques de la pollution harmonique, est le filtrage passif.

Il s'agit de modifier localement l'impédance du réseau électrique, de façon à dévier les courants harmoniques à la masse. Le filtrage passif parallèle n'est qu'une impédance constituée d'une inductance en série avec une capacité.

A l'inverse d'une inductance anti-harmonique, un filtre résonant a pour objet de présenter une impédance très faible au passage d'un courant harmonique sur lequel le filtre est accordé.

Le filtre LC résonant n'est qu'une inductance en série avec un condensateur accordé sur la fréquence harmonique à éliminer.

On installe souvent plusieurs filtres résonants en parallèle, correspondant aux différents rangs harmoniques à filtrer.

Les filtres résonants présentent l'inconvénient d'être sensibles aux variations de l'inductance, ou la capacité ; dues au vieillissement, température, ou autres facteurs, ce qui entraînant un désaccord de l'ensemble

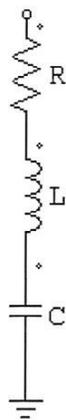


Fig.2 circuit (RLC) série

L'impédance du circuit ci- dessus est donnée par :

$$\dot{Z} = R + J(X_L - X_C) \dots\dots\dots 3$$

Tel que :

$\dot{Z}(\Omega)$: Impédance complexe du filtre LC.

$R(\Omega)$: résistance.

$X_L(\Omega)$: La réactance inductive.

$X_C(\Omega)$: La réactance capacitive.

En cas de résonance, l'impédance se réduit à la résistance; et on peut écrire :

$$X_{L(\Omega)} = X_{C(\Omega)} \dots\dots\dots 4$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \text{ hz} \dots\dots\dots 5$$

f_r :Fréquence de résonance

L'impédance correspondante sera égale à $R(\Omega)$ (très faible)

C'est pour ça il faut raccorder un filtre passif parallèle avec le réseau électrique

Pour éliminer les courants harmoniques correspondants.

Tel que :

5^{eme} h, 7^{eme}h, 11^{eme}h.

L'impédance qui correspond à un courant harmonique bien déterminé est très faible, ce qui rejette ce courant harmonique à la masse.

Remarque

L'amplitude des 5^{eme} et 7^{eme} harmoniques est plus élevée dans le spectre des fréquences harmoniques

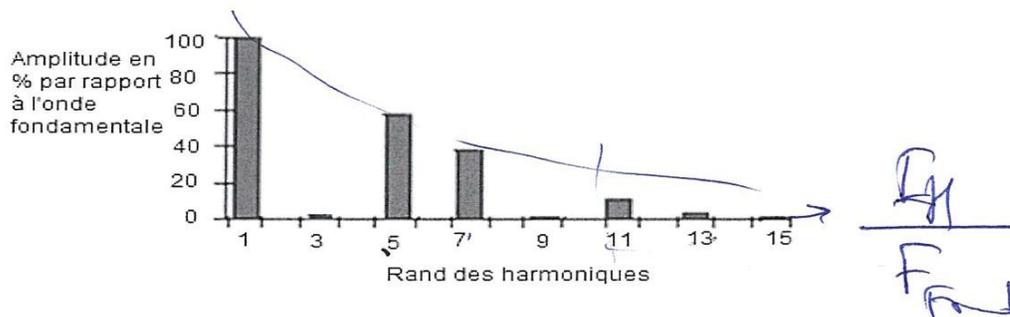


Fig.3 Spectre des harmoniques pour un pont triphasé

Lorsqu'on utilise des filtres accordés sur des rangs harmoniques différents, par exemple 5, 7, 11, leur mise en service doit se faire par ordre croissant aux rangs harmoniques filtrés et inversement lors de la mise hors service.

3. 4 filtres amortis (passe haut)

Une capacité en série avec un ensemble constitué de la mise en Parallèle d'une inductance et d'une résistance appelée résistance d'amortissement, Il est utilisé lorsque les performances demandées ne sont pas trop élevées, on l'utilise souvent pour filtrer simultanément la plus haute fréquence du spectre. Et non une Fréquence particulière, c'est un filtre passe haut.

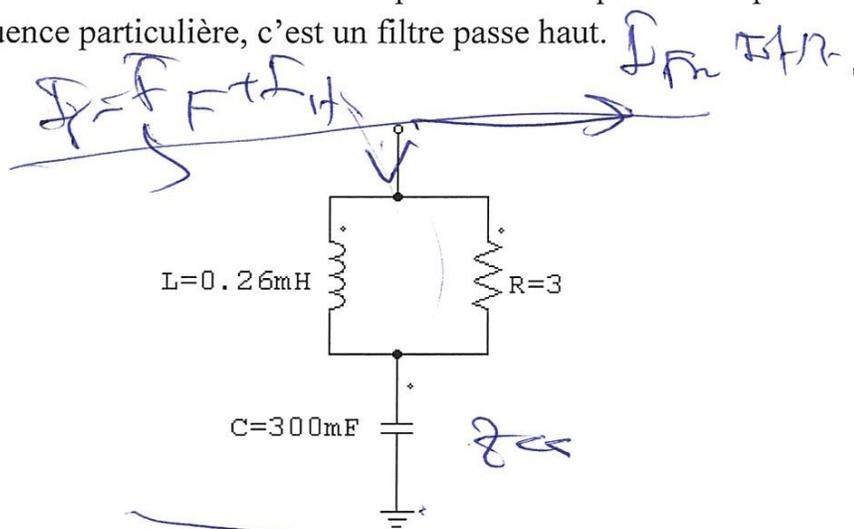


Fig. 4 filtre amorti (11^{ème} harmonique)

Souvent on associe aux filtres résonants (5^{ème} et 7^{ème} harmoniques) un filtre harmonique amorti pour couvrir le spectre.

Commet-il est montré figure.5 ci-dessous.

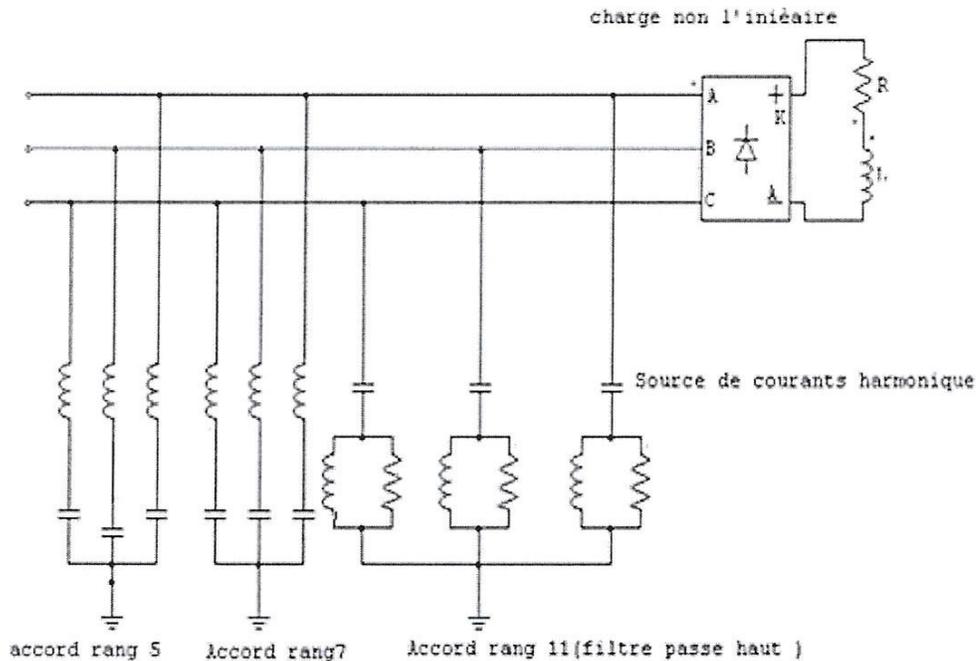


Fig.5 circuits accordés sur les rangs harmoniques (5, 7,11)

4. conception du filtre harmonique passif

Un filtre harmonique passif est utilisé pour :

- Rejeter les courants harmoniques accordés sur des fréquences Bien déterminées à la masse.
- Concevoir un filtre harmonique passif, revient a :
- Choisir des branches LC, avec calculs des inductances, et capacités

Nécessaires Accordés sur des fréquences de résonances préréglées.

4.1 Calculs du filtre passif

Un circuit accordé (RLC) a une impédance :

$$\mathbf{Z} = \mathbf{R} + \mathbf{J}(X_L - X_C) \dots\dots\dots 6$$

À la fréquence de résonance, l'impédance se réduit à la résistance :

La réactance inductive devient égale à la réactance capacitive, et on peut écrire :

$$\mathbf{L}\omega = \frac{1}{\mathbf{C}\omega} \dots\dots\dots 7$$

Tel que :

ω : est la pulsation de résonance

$$\omega = 2\pi f_r \dots\dots\dots 8$$

f_r : Fréquence de résonance, elle est égale à :

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \dots\dots\dots 9$$

Dans le cas d'un filtre résonant, le facteur de qualité est défini comme étant le rapport

$$Q = \frac{X_r}{R} \dots\dots\dots 10$$

Q : Facteur de qualité

Par conséquent, l'inductance et la capacité respectivement du filtre en fonction du facteur de qualité seront.

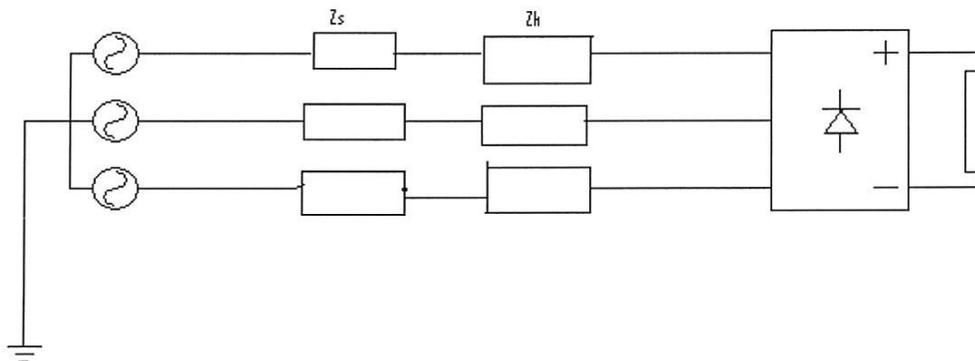
$$L = \frac{X_0}{\omega_r} = \frac{RQ}{\omega_r} \dots\dots\dots 11$$

$$C = \frac{1}{\omega_r X_0} = \frac{1}{\omega_r RQ} \dots\dots\dots 12$$

$$\omega = \omega_r(1 \pm \delta) \dots\dots\dots 13$$

δ : Coefficient de déviation de fréquence

4.2. Minimisation de la tension harmonique (v_h)



La tension harmonique est donnée par :

$$V_h = Z_{eq} \cdot I_h \dots\dots\dots 14$$

Z_{eq} : Impédance équivalente du filtre et de la source.

I_h : Le courant harmonique.

Cela veut dire que pour diminuer la tension harmonique, il ne suffit pas de diminuer seulement l'impédance du filtre ; mais il faut diminuer aussi l'impédance équivalente du filtre et de la source.

Chapitre 4:

Simulation du filtrage harmonique

4. Simulation

Le filtre passif parallèle est simulé pour les grandeurs électriques dans le tableau ci-dessous

5 ^{ème} harmoniques	L=1.2mH	C=340µF	Q=14
7 ^{ème} harmoniques	L=1.2mH	C=170µF	Q=14
11 ^{ème} harmoniques	L=0.26mH	C=300µF	R=3Ω

4.1 Simulation du 5^{ème}, 7^{ème} et 11^{ème} harmonique

4.1.1 Simulation du 5^{ème} harmonique

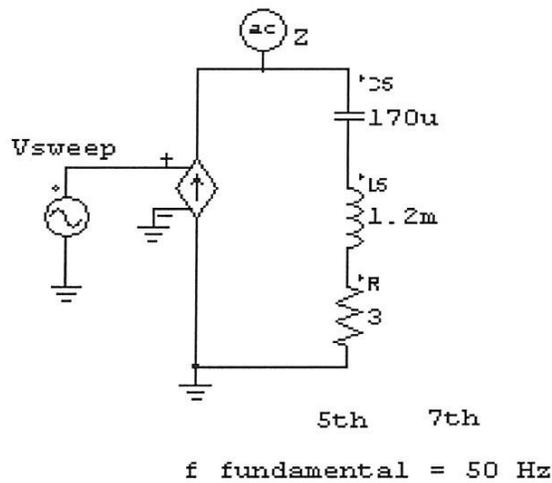


Fig.1 schéma du filtre accordé sur le 5^{ème} harmonique

La fonction de transfert du filtre est donnée par :

$$Z(s) = \frac{V(s)}{I(s)} = \frac{LCS^2 + RCS + 1}{CS}$$

L'impédance de l'harmonique 5 en fonction de la fréquence

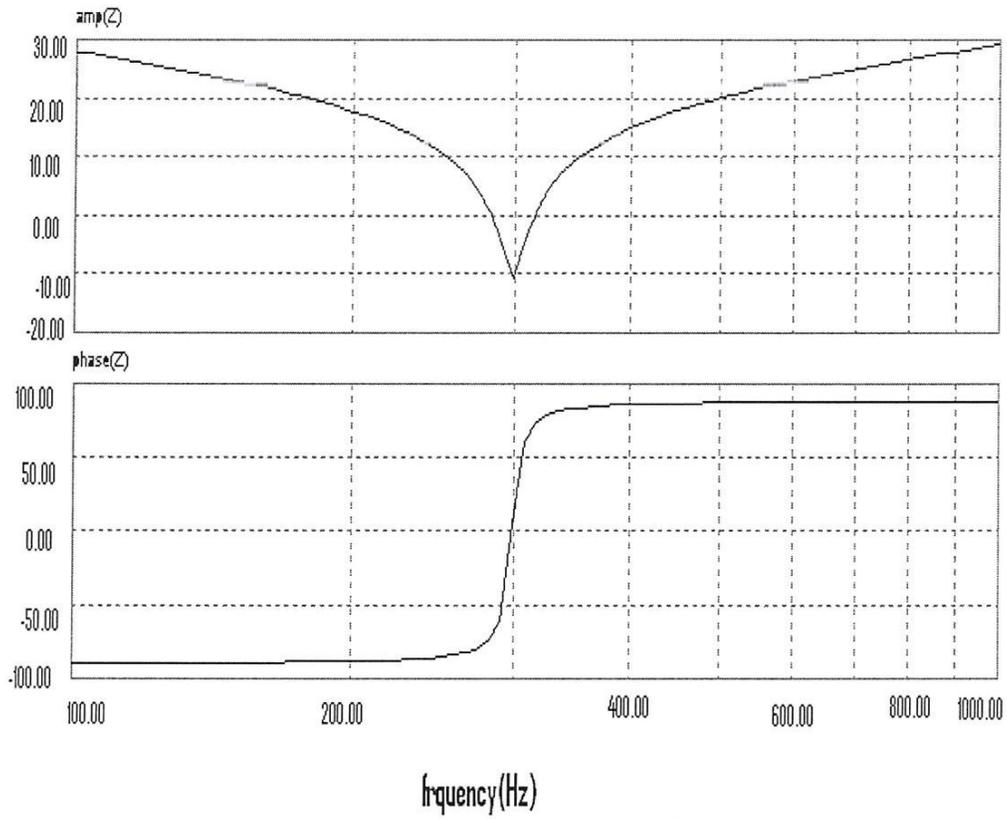


Fig .2

4.1.2 Simulation de le 7^{ème} harmonique

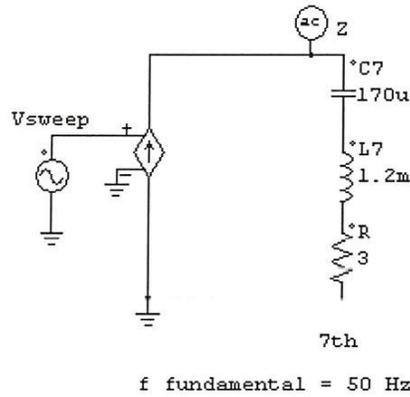


Fig.3 schéma de filtre accordé sue le 7^{ème} harmonique

La fonction de transfert du filtre est donne par :

$$Z(s) = \frac{V(s)}{I(s)} = \frac{LCS^2 + RCS + 1}{CS}$$

L'impédance de l'harmonique 7 en fonction de la fréquence

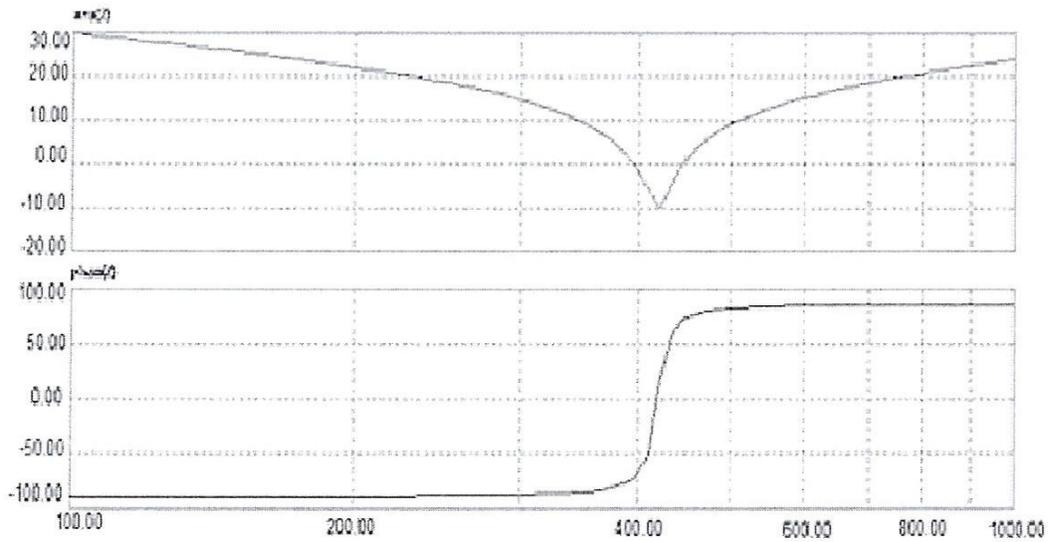


Fig.4

4.1.3 Simulation de le 7^{ème} et le 5^{ème} harmonique

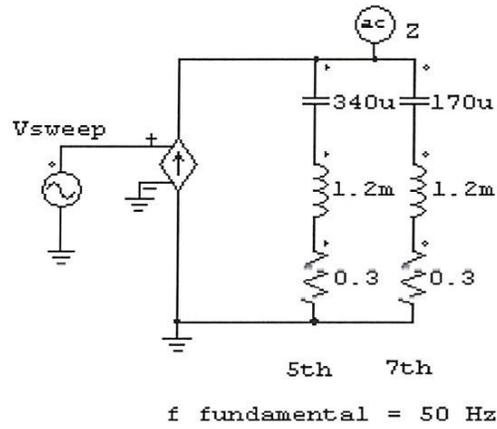


Fig.5 : schéma du filtre passif constitué accordé du le 5^{ème} et 7^{ème} harmonique

L'impédance de l'harmonique 5et7en fonction de la fréquence

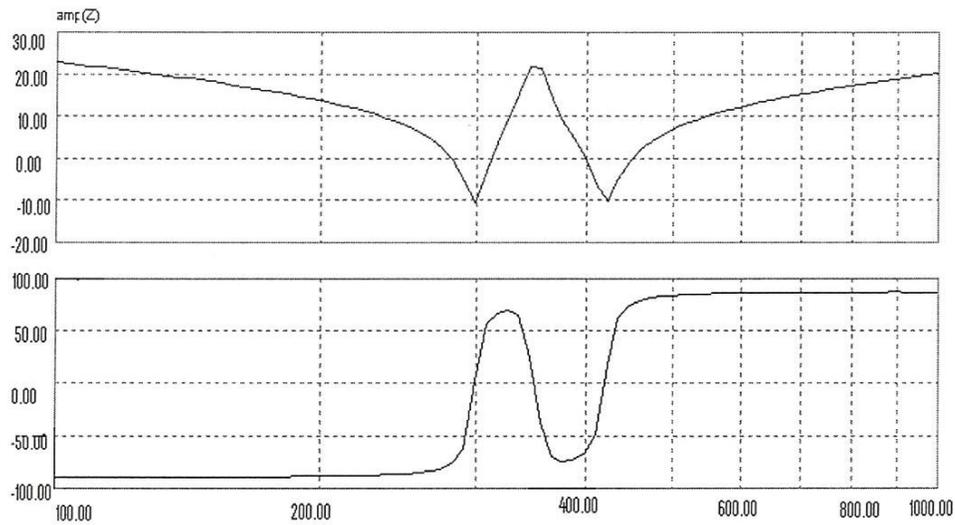


Fig.6

4.1.4 Simulation du 11^{ème} harmonique

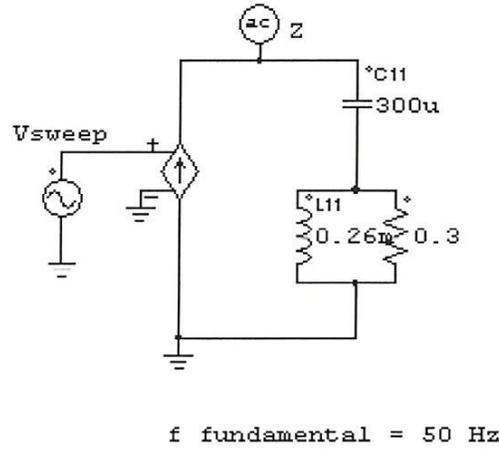


Fig.7

La fonction de transfert du filtre est donne par :

$$Z(s) = \frac{V(s)}{I(s)} = \frac{RLCS^2 + LS + R}{LCS^2 + RCS}$$

L'impédance du filtre passe haut

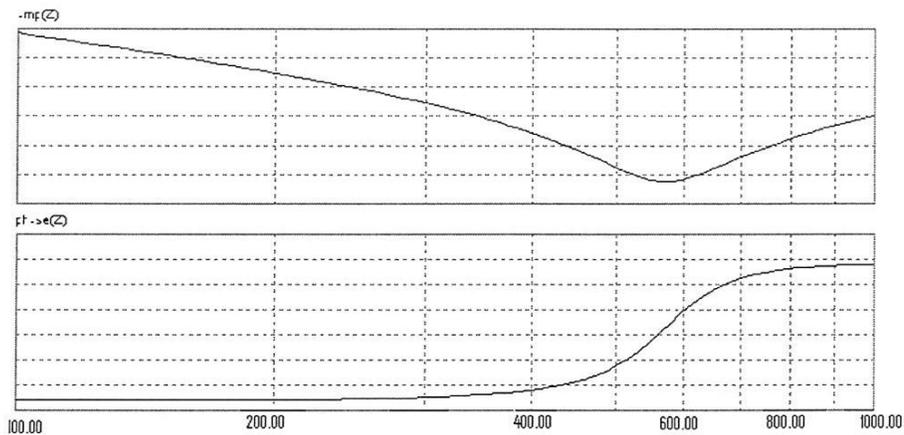


Fig.8

4.2 Simulation du 5^{ème} et 7^{ème} et 11^{ème} harmonique

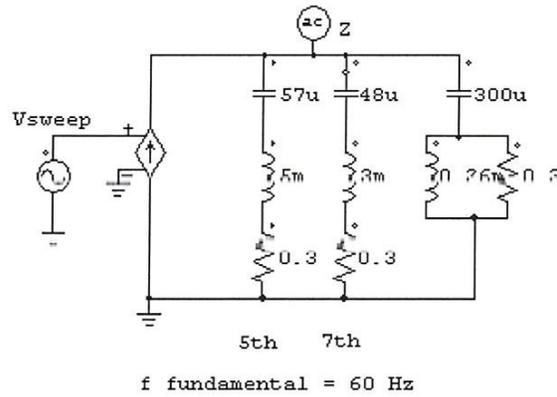


Fig.9

L'impédance de l'harmonique 5 et 7 et 11 en fonction de la fréquence

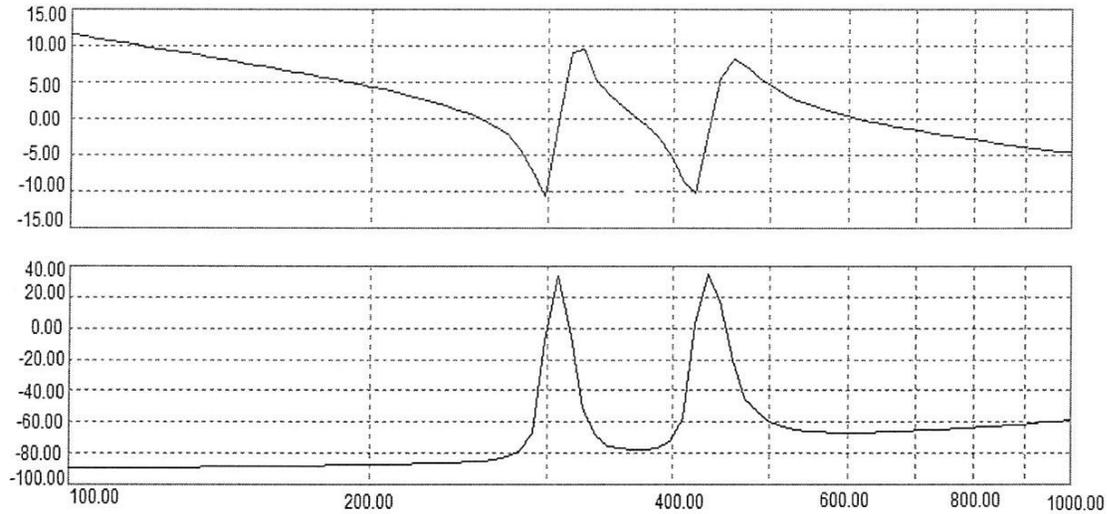


Fig.10

4.3 Simulation du filtre passif parallèle complet

Charge non linéaire avec filtre passif

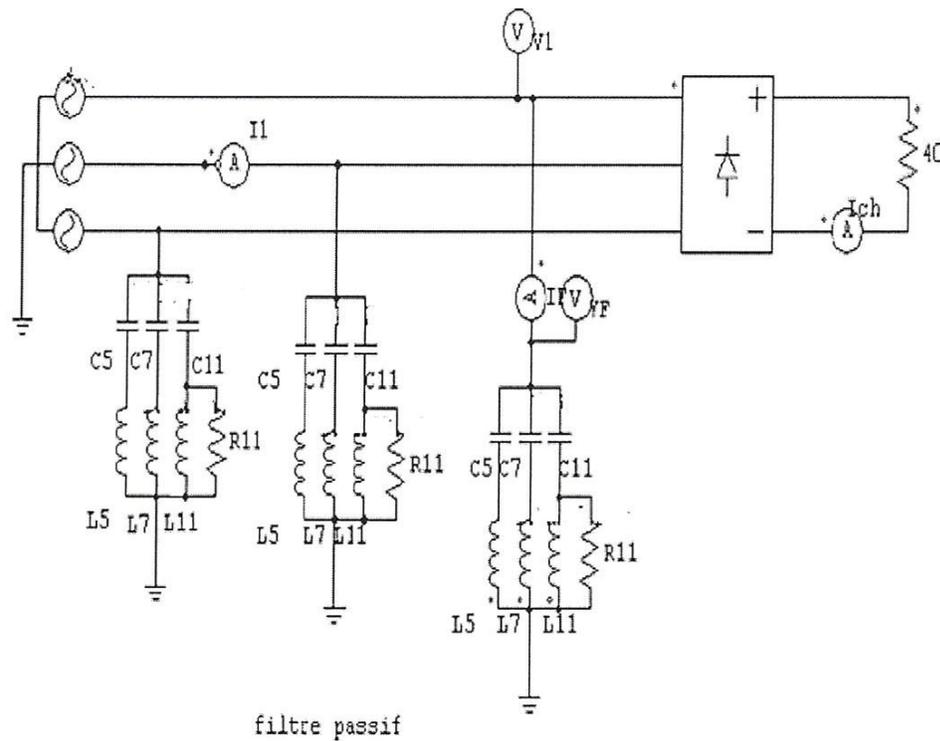


Fig.11 : Schéma de simulation du filtre passif parallèle

Courant à travers la charge

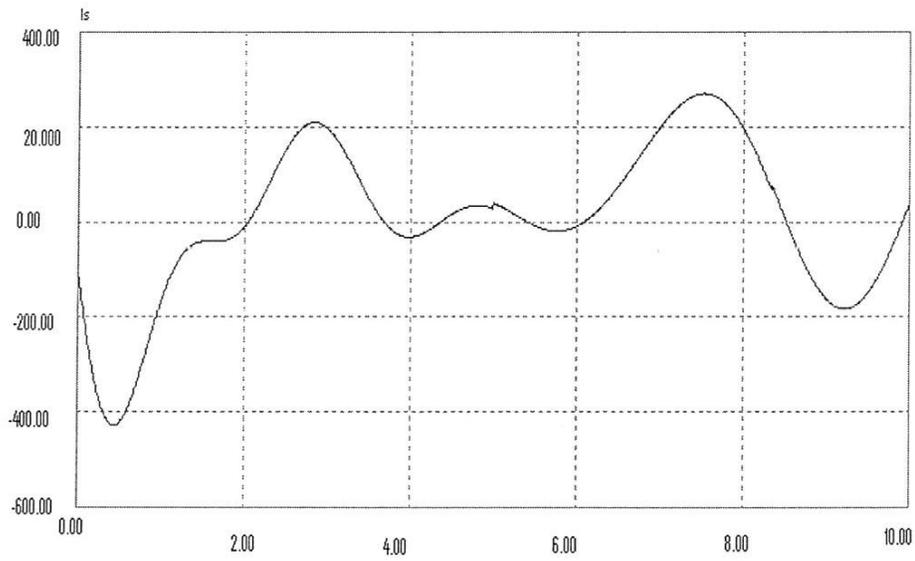


Fig.12 Courant de source harmonique

4.4 Simulation filtre actif

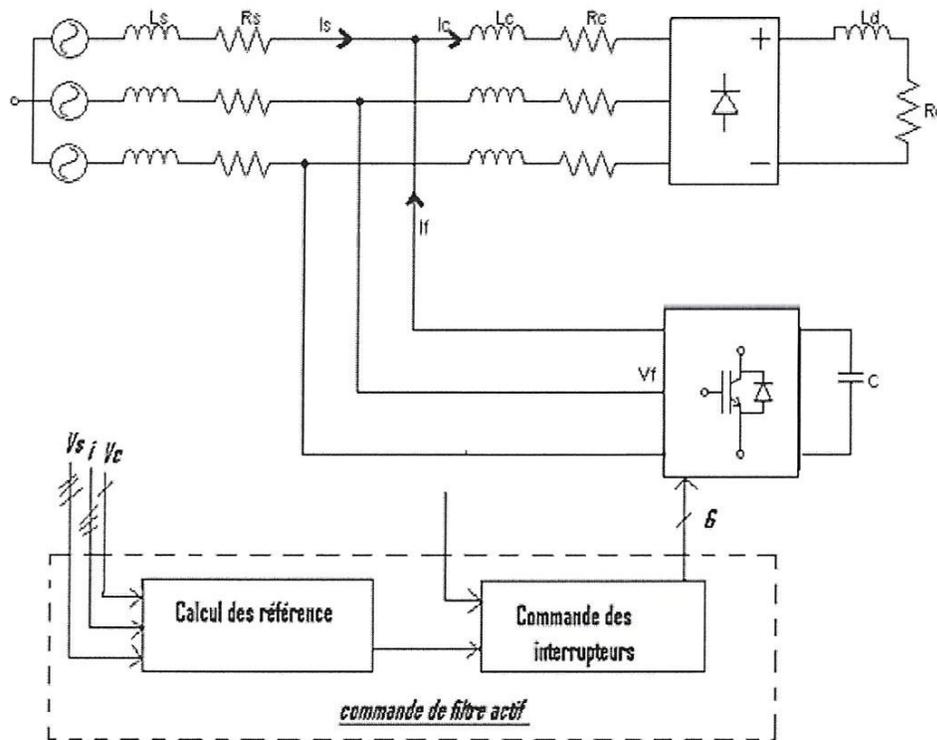
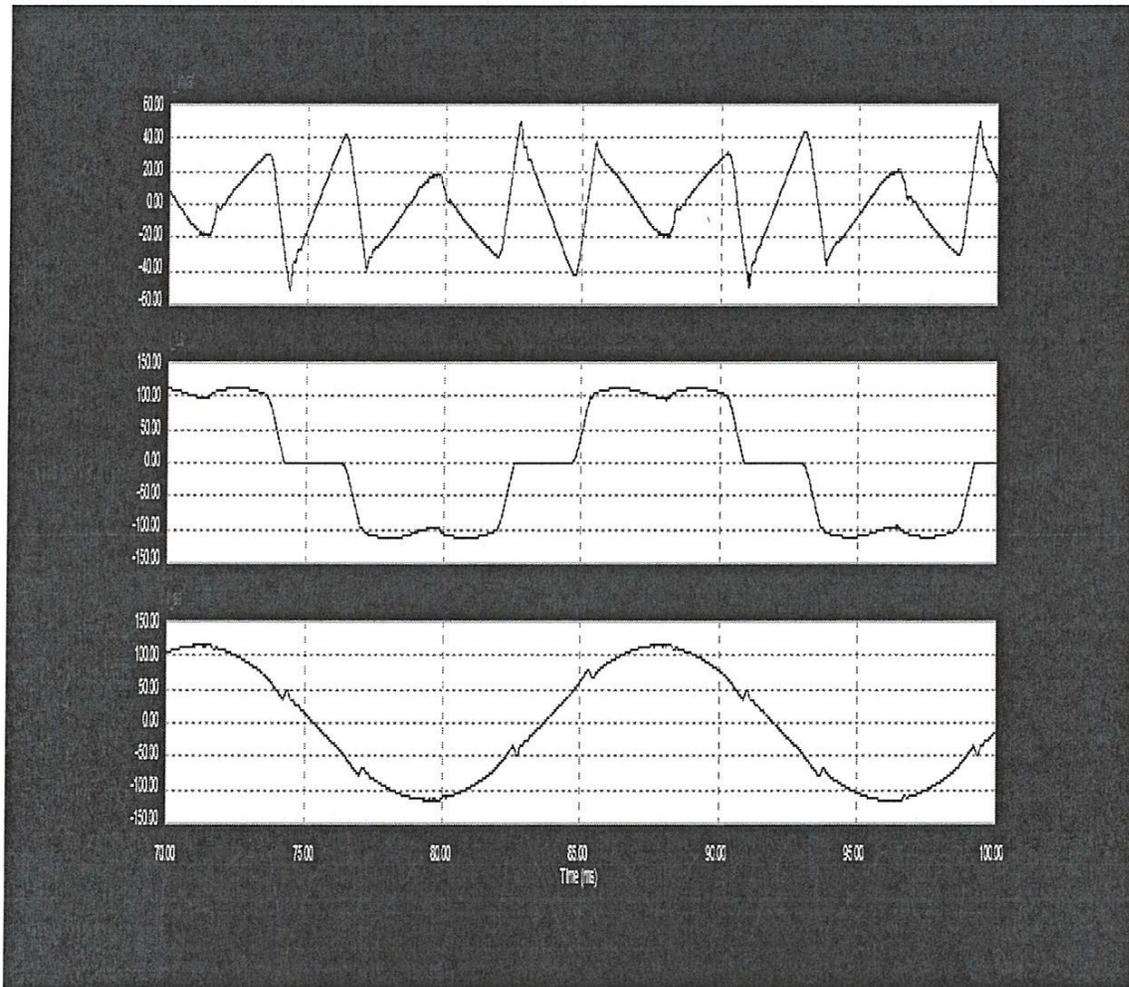


Fig.13 Schéma global du système à simuler le filtre actif

La fonction de transfert du filtre est donne par :

$$V_C = K \cdot I_S$$

Courant à travers la charge



4.5 Simulation Filtrage hybride (passif parallèle, actif série)

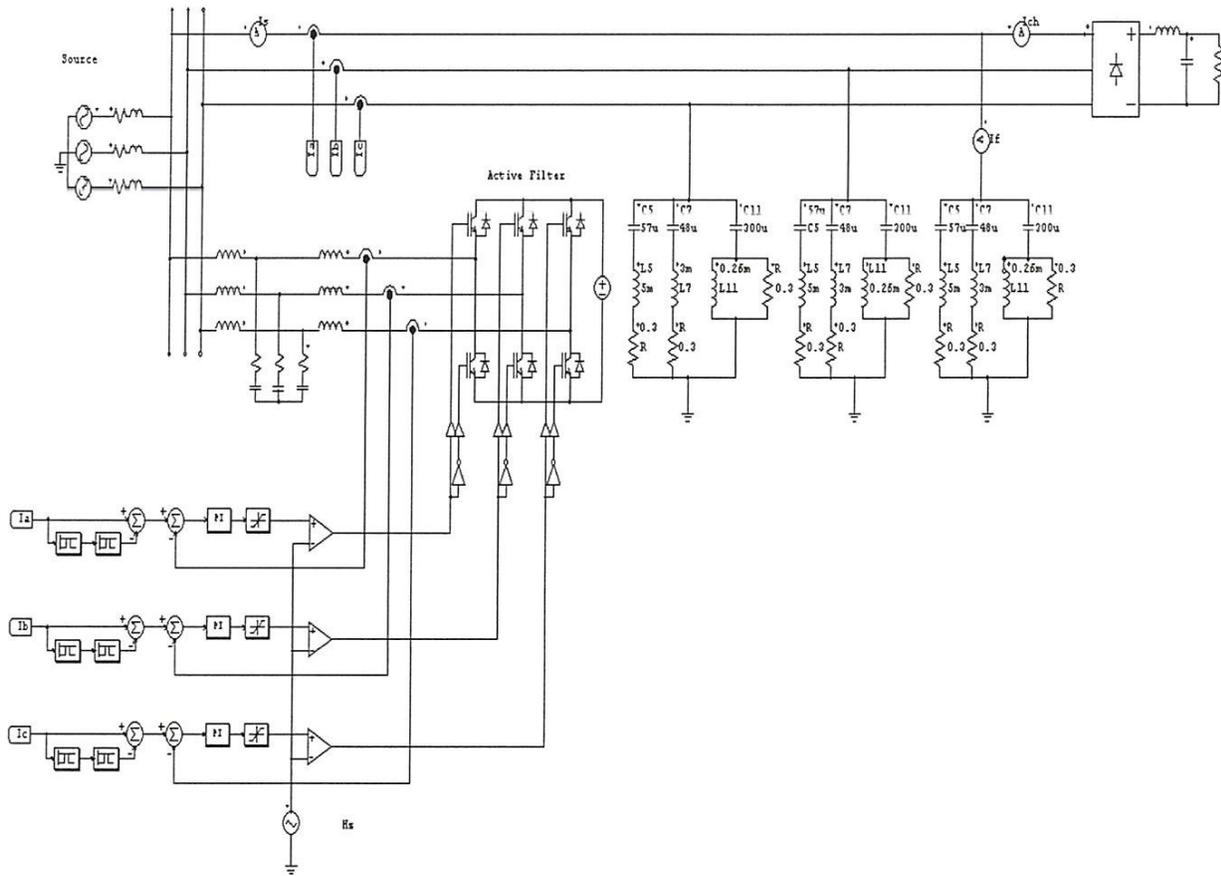
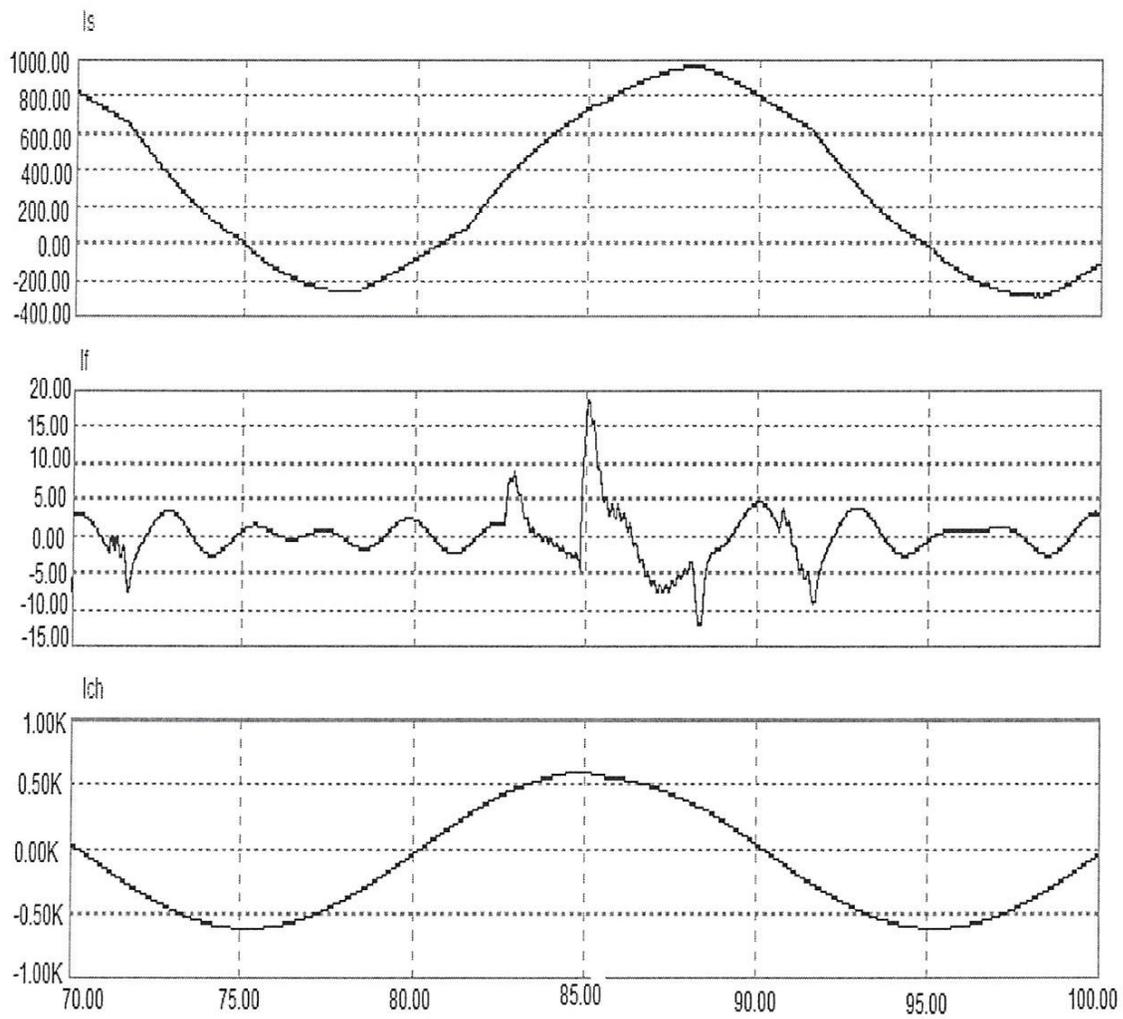


Fig.14 Schéma global du système à simuler le filtre hybride

Courant à travers la charge



4.6 Les différentes grandeurs harmoniques

Les grandeurs harmoniques sont :

- le courant électrique de source
- la tension de commande du filtre actif série
- la tension harmonique aux bornes du filtre passif

4.6.1 Le courant électrique de source

En appliquant le principe de superposition au schéma équivalent monophasé, on démontre que le courant de source est la somme de deux termes :

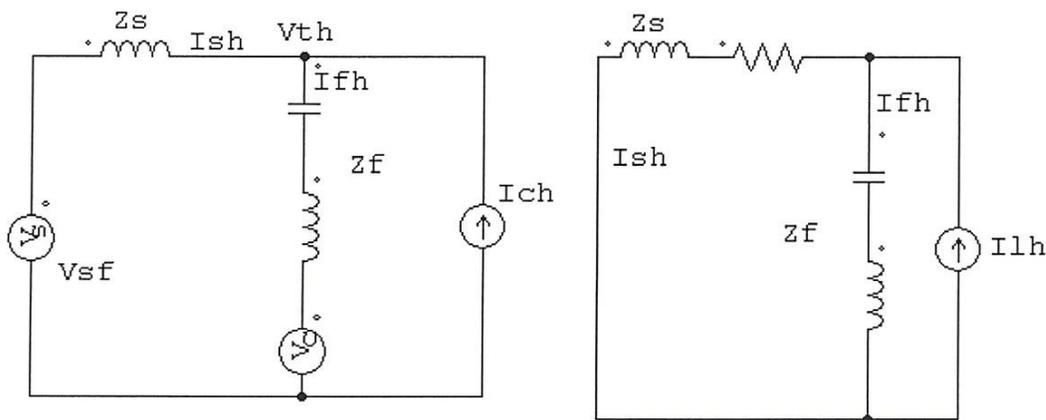


Fig. 15 schéma équivalent monophasé

Le premier dépend du courant de charge harmonique, le second dépend de la tension de source harmonique, d'ici la tension de source harmonique est égale à la somme des tensions harmoniques.

$$V_{sh} = Z_s I_{sh} + K I_{sh} + Z_f I_{fh} \dots \dots \dots 1$$

V_{sh} : Tension de source harmonique

$Z_s I_s$: chute de tension due au passage du courant de source harmonique
à travers l'impédance Z_s .

$K I_{sh}$: tension de commande du filtre actif série

$Z_s I_{fh}$: Tension harmonique aux bornes du filtre passif

$$V_{sh} = (Z_s + K) I_{sh} + Z_f I_{fh} \dots \dots \dots 2$$

$$I_{fh} = I_{sh} - I_{ch} \dots \dots \dots 3$$

Remplaçons I_{fh} par sa valeur, après simplification, on aura :

$$I_{sh} = \frac{Z_s I_{ch}}{Z_f + Z_s + K} + \frac{V_{sh}}{Z_f + Z_s + K} \dots \dots \dots 4$$

On voit que le courant de source est crée :

- par les courants de source harmoniques, d'après le premier terme de l'équation 4.

$$I_{sh} = \frac{Z_f I_{ch}}{Z_f + Z_s + K} \dots \dots \dots 5$$

- et les tensions harmoniques de source, comme le montre le deuxième terme.

$$V_{sh} = \frac{I_{sh}}{Z_f + Z_s + K} \dots \dots \dots 6$$

Le premier terme de l'équation 4 montre ; la chute de tension aux bornes de l'impédance de la source qui est $Z_s I_{sh}$.

Le seconde terme, montre que le filtre actif série joue le rôle d'une tension formée par une résistance (K) parcourue par les courants harmoniques.

Ce qui bloque les harmoniques de tension, En même temps le filtre actif série empêche l'anti résonance, (la résonance parallèle).

Si la valeur de (k) est suffisamment grande devant l'impédance de la source, cela réduit le courant de source harmonique ; d'ici un autre avantage s'ajoute au filtre actif série, une faible puissance du circuit de commande d'où une augmentation du rendement globale de tous le système

$$K \gg Z_s \text{ et } Z_f$$

Z_s : Impédance de la source

Z_f : Impédance équivalente du filtre passif

L'impédance du filtre passif est formée par trois impédances en parallèle

$$Z_f = Z_5 // Z_7 // Z_{11}$$

L'impédance nominale de la source peut être calculée d'après la formule :

$$Z_n = \frac{U_n^2}{S_n} \dots\dots\dots 7$$

Z_n : Impédance nominale de la source

S_n : Puissance apparente nominale

U_n : Tension nominale d'alimentation

Le courant de source harmonique sera presque nul si :

$$K \gg Z_s \text{ et } Z_f \dots\dots\dots 8$$

4.6.2 La tension harmonique aux bornes du filtre passif

La tension harmonique qui apparait aux bornes du filtre passif parallèle est donnée

$$V_{fh} = Z_f I_{fh} \dots\dots\dots 9$$

Etant donné que

$$I_{fh} = I_{sh} - I_{ch} \dots\dots\dots 10$$

Remplaçants I_{fh} encore par sa valeur on peut écrire :

$$V_{fh} = Z_f (I_{sh} - I_{ch}) \dots\dots\dots 11$$

Remplaçants I_{sh} encore par sa valeur :

$$V_{fh} = Z_f \left[\frac{Z_f I_{ch}}{Z_f + Z_s + K} + \frac{V_{sh}}{Z_f + Z_s + K} - I_{ch} \right] \dots\dots\dots 12$$

Réduisant au même dénomination et additionnant on peut écrire :

$$V_{fh} = Z_f \left[\frac{Z_f I_{ch}}{Z_f + Z_s + K} I_{ch-h} + \frac{V_{sh}}{Z_f + Z_s + K} \right] \dots\dots\dots 13$$

Si on néglige Z_f ET Z_s devant K la tension harmonique du filtre peut être écrire sous la forme :

$$V_{fh} = -Z_f I_{ch} \dots\dots\dots 14$$

Cette équation montre les tensions harmoniques de source n'ont aucune influence sur le filtre passif parallèle, cela vent dire qu'elles n'apparaissent pas du cote de la charge, parce qu'elles restent appliquées au filtre actif série.

4.6.3 La tension de commande du filtre actif

Le filtrage actif est contrôlé pour présenter une impédance nulle au circuit extérieur correspondant à :

La fréquence fondamentale d'une part, et d'autre part pour présenter une grande résistance K (Ω), pour la source ou la charge harmonique.

La tension de commande de résistance générée par le filtre actif série est donnée par formule.

$$V_c = KI_{sh} \dots \dots \dots 15$$

Remplaçant le courant de source harmonique par sa valeur on aura :

$$V_c = K_f \left[\frac{Z_f I_{ch} + V_{sh}}{Z_f + Z_s + K} \right] \dots \dots \dots 16$$

On encore

$$V_c \cong -Z_f I_{ch} + V_{sh} \dots \dots \dots 16$$

Cette équation montre que la tension de commande est la somme d'un terme inversement proportionnel au facteur de qualité du filtre passif, et des tensions harmoniques de sources. Le filtre actif série est adaptable au variation de la charge.

4.7 Simulation du filtre passif parallèle (logiciel matlab)

Les figures ci- dessous; 16,17, 18, montrent respectivement les impédances électriques en fonction rangs harmoniques 5; 7; 11.

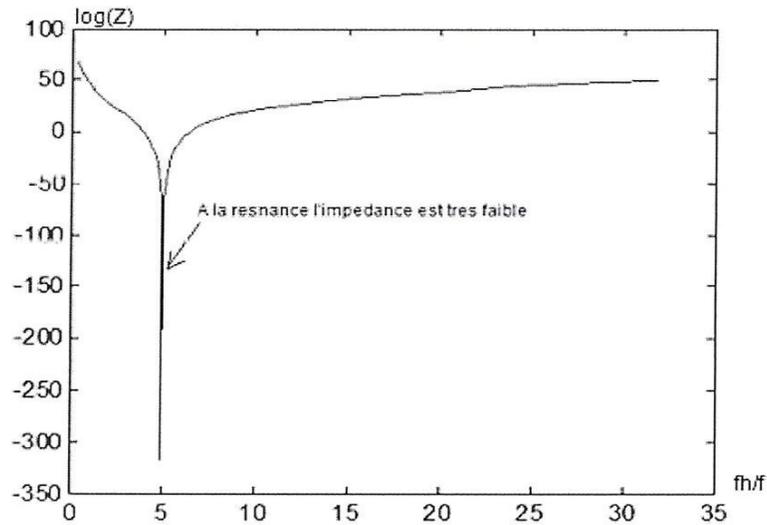


Fig.16 Impédance du circuit accordé sur l'harmonique de rang5

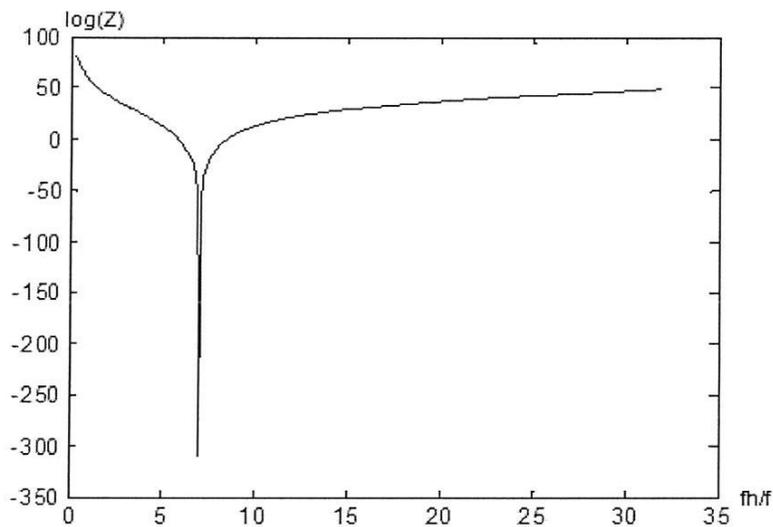


Fig.17 Impédance du circuit accordé sur l'harmonique de rang7

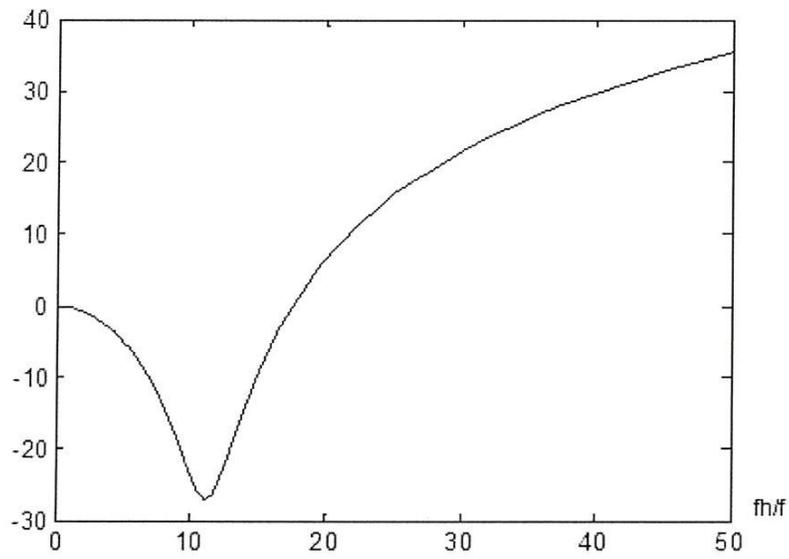


Fig.18 Impédance du circuit accordé sur l'harmonique de rang 11

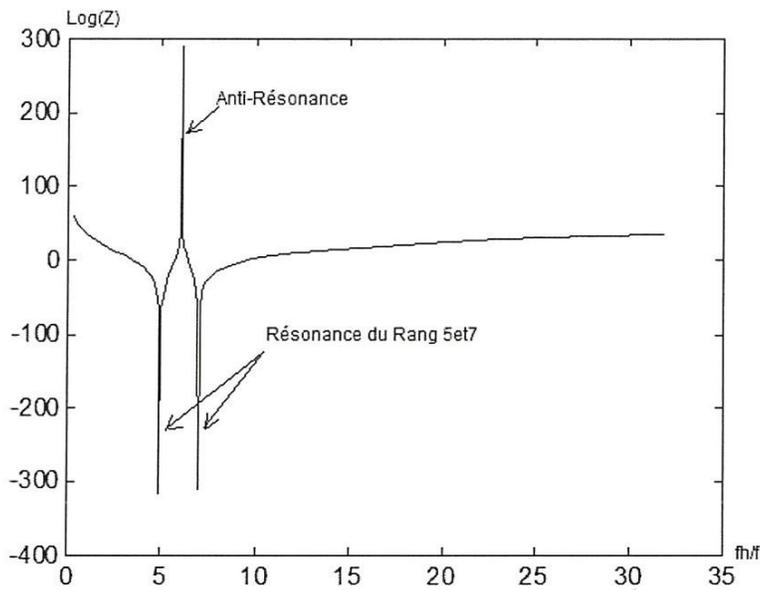


Fig.19 Impédance du circuit accordé sur l'harmonique de rangs 5 et 7

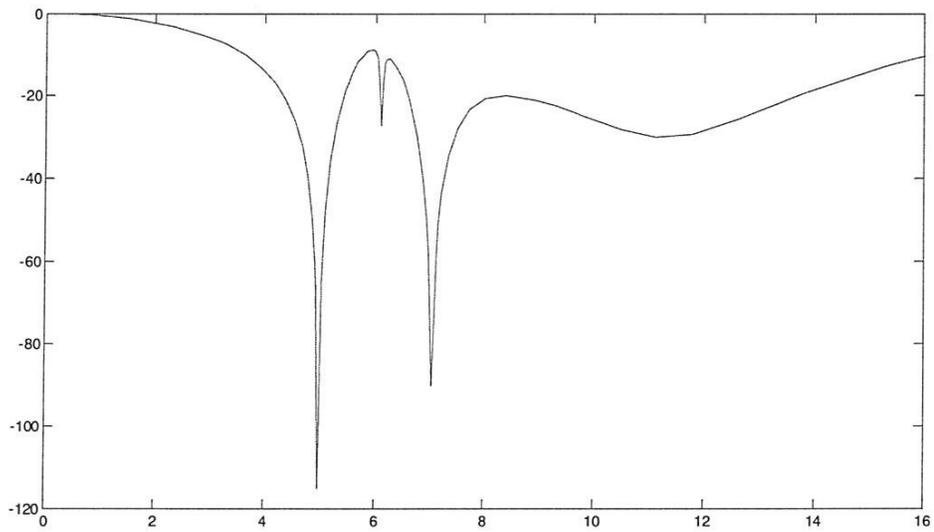


Fig.20 Impédance du circuit accordé sur l'harmonique de rangs 5 et 7 et 11(filtre passif complet)

4.8 Simulation du filtre actif série (logiciel matlab)

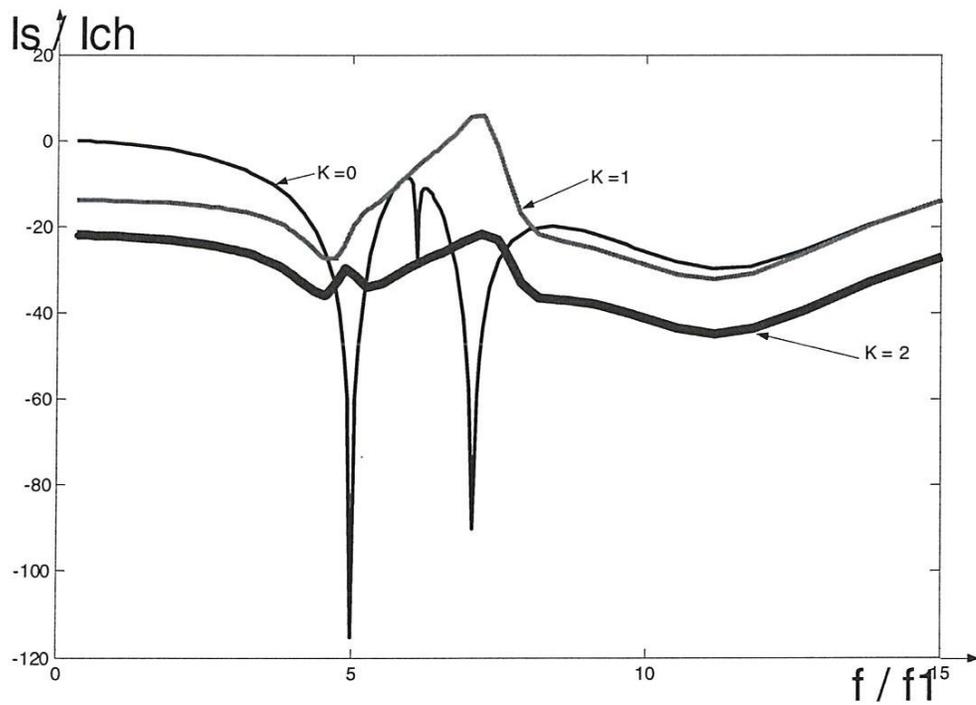


Fig. 20

4.9 Interprétation des courbes de simulation

D'après les courbes de simulations du filtre passif parallèle en remarque :

Les figures, 16, 17 et 18 correspondantes au rang harmoniques 5, 7 et 11 représentent l'impédance électrique très faible, ce qui augmente le courant harmonique correspondant en le rejetant à la masse.

La figure, 19 représente la caractéristique de compensation des harmoniques de rang 5 et 7. En remarque que les impédances du rang 5, 7 diminuent alors qu'une anti-résonance apparaît entre eux, ce qui est un phénomène indésirable, qui nécessite d'être que évité.

La figure 20 montre la caractéristique de compensation du filtre passif (h5, h7, h11), mais deux anti-résonances apparaissent. Pour élimine les anti-résonances on utilise une outre solution le filtrage actif des harmoniques.

L'introduction du filtre actif représentée par l'action de la tension de command $V_c = KI_s$ amélioré du filtrage la caractéristique de compensation des harmoniques en diminuant les harmoniques comme il est montre la figure 21

Conclusion Générale

De nos jours, la qualité de l'énergie est un domaine de la plus haute importance. À l'heure où l'économie des pays industrialisés repose sur leurs capacités à produire ou à acheter l'énergie, l'utilisation adéquate et sans perte inutile est capitale.

Ce projet, bien que ne touchant qu'un de ces domaines de la qualité de l'énergie pourtant si vaste, a permis de faire un bref survol de la problématique liée à la pollution harmonique sur les réseaux de distribution électrique ainsi que des différents moyens de mitigation utilisés.

Une bonne compréhension de la problématique des harmoniques, de leurs influences sur le réseau électrique, ainsi que des moyens de mitigation existant pour les minimiser est maintenant devenue essentielle pour tout ingénieur travaillant dans le domaine de l'électrotechnique.

Ce travail de recherche a été consacré à l'étude théorique et à la validation expérimentale de nouvelles stratégies destinées à la commande de filtres hybride (passif parallèle, active série).

Ces nouvelles stratégies s'appuient notamment sur la mise en œuvre, au niveau de l'isolation des harmoniques de courant et harmonique de tension, Ces structures et leurs commandes ont pour objectifs de compenser les harmoniques des charges non linéaires connectées aux réseaux et d'améliorer les performances du filtrage tout en ayant recours à des stratégies de commande de complexités réduites.

Le premier chapitre a été consacré à la problématique des perturbations ou distorsions harmoniques générées par les charges non linéaires connectées aux réseaux électriques.

L'augmentation régulière du nombre de dispositifs d'électronique de puissance utilisés dans les systèmes électriques ne fait qu'accentuer ces perturbations. Les effets néfastes de ces perturbations ont été abordés et les normes en vigueur ont été présentées.

Ces normes, notamment imposées aux distributeurs d'énergie, autorisent cependant la génération d'harmoniques dans certaines limites. En outre, le respect de ces normes motive l'étude et le développement de méthodes efficaces pour dépolluer les réseaux électriques.

Nous avons alors présenté, de manière générale, les solutions traditionnelles et modernes utilisées en filtrage : filtres passifs, filtres actifs ou bien encore la combinaison des deux.

Ce travail présente l'étude et la mise au point par simulation du logiciel (MATLAB, SIMULINK) d'un filtrage hybride (passif parallèle, actif série), pour la suppression des harmonique de courants générés par un pont redresseur triphasé non commandé.

Une étude détaillée a montré les origines et les différentes sources d'harmonique ; ainsi que leurs effets instantanés, surtout dans les équipements électriques.

Une analyse des différentes méthodes de filtrage décrit :

- filtrage hybride (passif parallèle, actif série)
- son principe de fonctionnement
- sa conception
- ces caractéristiques de filtrage
- ces inconvénients et ses avantages
- les différents types de filtrations

Le filtre passif parallèle l'élimine les harmonique (5,7) et les harmoniques des rangs élevée.

Malheureusement le filtre passif parallèle avec l'impédance Z_s provoque une anti-résonance.

Réseaux pour la qu'elle introduit un filtre actif série pour améliorer les caractéristique des filtres passif.

L'équation de filtre actif série à virement amélioré les caractéristiques du filtre passif parallèle.

Bibliographie

- [1] 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).
- [2] E. Félice, « Perturbations harmoniques », Paris : Dunod, 2000.
- [3] J. Arrillaga & N.R. Watson, POWER SYSTEM HARMONICS, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, John Wiley & Sons, 2003.
- [4] Thierry Deflandre, Philippe Mauras, « Les harmoniques sur les réseaux Électriques », Paris - Eyrolles, France 1998.
- [5] W.M. Grady, S. Santoso, « Understanding Power System Harmonies », IEEE Power Engineering Review, November 2001.
- [6] IEEE Std 519-1992, « IEEE recommended practices and requirements for harmonic Control in electrical power systems », IEEE Industry Applications Society/Power Engineering Society, New York - IEEE, United States, 1993.
- [7] J.S. Subjak Jr. and J.S. Mcquilkin, "Harmonic-causes, effects, measurements, analysis: An update", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 26, pp. 1034-1042, Nov./Dec. 1990.
- [8] J. Arrillaga & N.R. Watson, POWER SYSTEM HARMONICS, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, John Wiley & Sons, 2003.
- [9] M. A. E. Alali, « Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension ». Thèse de doctorat de l'université Louis Pasteur Strasbourg I, France, (2002).
- [10] T. GOURAUD, « Identification et rejet de perturbations harmoniques dans des réseaux de distribution électrique ». Thèse, Nantes, France, (1997).

- [11] S. Georges, H. Y. Kanaan, K. Al-Haddad, « Modelling, simulation and control design of a PWM Three-Phase Four-Wire shunt active power filter for a 60 kW industrial load ». IREE, International Review of Electrical Engineering, August, (2006).
- [12] P. Jintakosonwit, H. Fujita and H. Akagi, « Control and performance of a fully-digitalcontrolled shunt active filter for installation on a power distribution system ». IEEE, Transactions on Power Electronics, Vol. 17, no.1, pp. 323-334, (2002).
- [13] B. Singh, V. Verma, A. Chandra and K. Al-Haddad, « Hybrid filters for power improvement ». IEE, Proc-Gener. Transm. Distrib, Vol. 152, no. 3, (2005).
- [14] S. Srianthumrong and H. Akagi, « A Medium-voltage transformer less ac/dc power conversion system consisting of a diode rectifier and a shunt hybrid filter ». IEEE, Transactions on Industry Applications, Vol. 39, no. 3, pp. 874-882, (2003).
- [15] J. C. Das, « Passive filters- Potentialities and limitations ». IEEE, Transactions on Industry Applications, Vol. 40, pp. 345-362, (2004).
- [16] L. BENCHAITA, « Etude, par simulation numérique et expérimentation, d'un filtre actif parallèle à structure courant avec une nouvelle méthode de contrôle-commande ». Thèse de doctorat de l'université Henri Poincaré, Nancy-France, (1998).
- [17] F.Z. Peng, GJ. Su, and G. Farquaharson, « A series LC filter for harmonic compensation of ac drives », Power Electronics Specialists Conference, PESC 99. 30th annual IEEE, Vol. 1, pp. 213-218,1999.
- [18] H. Sasaki and T. Machida, « A New Method to Eliminate AC Harmonic Currents by Magnetic Compensation-Consideration on Basic Design », IEEE Trans. PAS, vol. 90, pp. 2009, no. 5, 1971.
- [19] B. Singh, K. Al-Haddad and A.C. Chandra, « A Review of Active Filters for Power Quality Improvement », IEEE Trans. Industrial Electronics., Vol. 46, pp. 960-971, October 1999.

- [20] D. Chen, S. Xie, « Review of the control strategies applied to active power filters », IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies., pp. 666-670, April 2004.
- [21] H. Akagi, «New Trends in active Filters for Power Conditioning », IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 32, pp. 1312-1322, Nov/Déc 1996.
- [12] F. Labrique, G. Segulier et R. Bausiere, « Les Convertisseurs de l'Électronique de puissance », Paris : Technique et Documentation-Lavoisier, 1995.
- [22] F.Z. Peng and D.J. Adams, "Harmonie sources and filtering approachesseries/ parallel, active/passive, and their combined power filters", Conference Record of the thirty-Fourth IAS IEEE Annual Meeting., Vol. 1, pp. 448-455. 1999.
- [23] F.Z. Peng, « Application issues of active power filter », IEEE Industry Applications Magazine., Vol. 4, pp. 21-30, Sept.-Oct. 1998.
- [24] S. Mouttou, « Nouvelles approches de commande d'un filtre actif parallèle à source de courant », Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Trois-Rivières, Octobre 2002.
- [25] H. Akagi, Y. Tsukamoto, and A. Nabae, « Analysis and design of an active power filter using quad-series voltage source PWM converters », IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 26, No. 1, January/February 1990.
- [26] Mémoire d'ingénieur filtrage hybride (passif parallèle, actif série) dans le réseau électrique sous la direction de : Mr Bouzit Ali
Auteurs :Etudiants Chabani Atheman juin2007.