

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Electrotechnique
Option : Commande Electrique

Réf:.....

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

MASTER

Thème

Commande d'un filtre actif parallèle à
quatre fils

Présenté par :
Boughezala Mohamed Rafik
Soutenu le : 03 Juin 2014

Devant le jury composé de :

Mr. Serairi kamel	Professeur	Président
Mr. Ben Chouia mohamed toufik	M.C.A	Encadreur
Mr. Golea Ammar	Professeur	Examineur

Année universitaire : 2013 / 2014

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Electrotechnique
Option : Commande Electrique

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme:

MASTER

Thème

Commande d'un filtre actif parallèle à quatre fils

Présenté par :

Mohamed Rafik Boughezala

Avis favorable de l'encadreur :

Ben Chouia Mohamed Toufik signature

Avis favorable du Président du Jury

Serairi kamel

Signature

Cachet et signature



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Electrotechnique
Option : Commande Electrique

Thème :

Commande d'un filtre actif parallèle à quatre fils

Proposé par : Mohamed Rafik Boughezala

Dirigé par : Ben Chouia Mohamed Toufik

RESUMES (Français et Arabe)

لقد لاحظنا في السنوات الأخيرة زيادة ملحوظة جدا في استخدام الحمولات الغير خطية والملوثة والتي هي السبب الرئيسي في رداءة التيار الكهربائي في شبكات الجهد المنخفض المتناوب .
قمنا في هذا العمل بتحسين نوعية التيار الكهربائي في مثل هذه الشبكات. ندرس المصفي الفعال المتوازي ذو أربعة خيوط ونستعمل عدة أشكال لهذا المصفي كما نستعمل حمولات غير متوازنة. يتم الكشف عن التيار الملوث باستعمال طريقة الاستطاعة اللحظية .

تحصلنا في هذا العمل المنجز على نتائج ممتازة, تدل على أهمية هذا العمل في الترشيح التوافقي للتيار الكهربائي.
الكلمات المفتاحية: المصفي الفعال المتوازي ذو أربعة خيوط, التوافقات, الاستطاعة اللحظية, تيار محمل بالتوافقات.

Nous avons remarqué dans ces dernières années à une augmentation remarquée de l'utilisation des charges non-linéaires et polluantes, celle-ci fait causer des courants perturbés au niveau des réseaux alternatifs basse tension.

Nous avons travaillé à améliorer la qualité de courant électrique dans tells réseau, nous étudions le filtre actif parallèle à quatre fils, nous utilisons plusieurs formes de ce filtre,

Ainsi des charges déséquilibré, nous découvrons le courant perturbés en utilisant la méthode de puissances instantanées.

Nous avons obtenu de ce travail à des excellents résultats.

Les résultats obtenues de ce travail s'étaient excellentes et signifient l'importance de ce travail au filtrage des harmoniques.

Les mots clés : Filtre actif parallèle à quatre fils, les harmoniques, la puissance instantanée, Taux de distorsion harmonique.

Dédicace

Parce qu'il y a des choses plus faciles à écrire qu'à dire, je dédie ce

Modeste travail de fin d'étude :

À mes symboles d'affection et de tendresse

Ma chère maman et mon cher père

À mes frères et mes chères sœurs chacun de son nom pour leur soutien moral

et leurs sacrifices au long de ma formation.

À ma grande famille

À tous qui m'ont encouragé et aidé dans la réalisation de ce projet

À tous mes amis chacun de son nom

À tous mes collègues de promotion 2014

À tous les enseignants de ma période d'étude

À tous ceux que j'aime et m'aiment.

Rafik

Remerciements



• Je remercie et louons Dieu qui nous a donné la force, La patience et la volonté tout au long des années de nos études, et nous ont honoré de sa science pour la réalisation de ce travail de recherche.

• J'etiens au terme de ce travail à exprimer notre plus grand remerciement à Monsieur: Ben Chouia Mohamed Toufik qui a suivi et dirigé notre travail avec patience et beaucoup d'intérêt, nous lui exprimons vivement notre grand respect.

• Monremerciement s'adresse également aux membres de jury pour avoir accepté de critiquer notre travail, sans oublier les enseignants du département de Génie Electrique pour leurs efforts et leurs sincérités.



Rafik



Liste des tableaux

Tableau	Titre	La page
Tab 2.1	-Tensions générées par l'onduleur de tension à trois bras avec condensateurs à point milieu.	22
Tab 2.2	Tensions générées par l'onduleur de tension à quatre bras	24
Tab 3.1	Paramètres du système étudié	34
Tab 3.2	THDs des courants de source.	42

Liste des figures

Figure	Titre	Page
Fig 1.1	Diagramme de Fresnel des puissances.	8
Fig 1.2	Creux de tension.	9
Fig 1.3	Filtres passifs.	12
Fig 1.4	Filtre actif série.	13
Fig 1.5	Filtre actif parallèle.	13
Fig 1.6	Déférentes configurations d'un filtre actif monophasé	14
Fig 1.7	Configuration d'un FAP à trois fils	14
Fig 1.8	Déférentes topologies utilisées dans un FAP d'un réseau triphasé à quatre fils	15
Fig 1.9	Combinaison parallèle-série de filtres actifs	16
Fig 1.10	Classification des filtres hybrides	17
Fig 1.11	Association série d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif	18
Fig 1.12	Association parallèle d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif	19
Fig 2.1	Principe du filtrage actif parallèle d'un réseau triphasé à quatre fils	21
Fig 2.2	Filtre actif parallèle à trois bras avec condensateurs à point milieu	22
Fig 2.3	Filtre actif parallèle à quatre bras pour un réseau triphasé à quatre fils	23
Fig 2.4	Filtres d'extraction	28
Fig 2.5	Identification par la méthode des puissances instantanées	29
Fig 2.6	Boucle de régulation de la tension continue	31
Fig 2.7	Principe de la commande par hystérésis	32
Fig 3.1	Filtrage AP d'un réseau triphasé à quatre fils alimentant trois charges non-linéaire	34
Fig 3.2	Courant de la source (phase 1 avant filtrage).	35
Fig 3.3	Spectre d'harmonique (phase 1 avant filtrage)	35
Fig 3.4	Courant de la source (phase 2 avant filtrage)	36
Fig 3.5	Spectre d'harmonique (phase 2 avant filtrage)	36
Fig 3.6	Courant de la source (phase 3 avant filtrage)	37

Fig 3.7	Spectre d'harmonique (phase 3 avant filtrage)	37
Fig 3.8	Courant du neutre (avant filtrage)	37
Fig 3.9	Courant de la source (phase 1 après filtrage).	38
Fig 3.10	Spectre d'harmonique (phase 1 après filtrage)	38
Fig 3.11	Courant injecté par le filtre (phase 1)	38
Fig 3.12	Courant de la source (phase 2 après filtrage).	39
Fig 3.13	Spectre d'harmonique (phase 2 après filtrage)	39
Fig 3.14	Courant injecté par le filtre (phase 2).	39
Fig 3.15	Courant de la source (phase 3 après filtrage)	40
Fig 3.16	Spectre d'harmonique (phase 3 après filtrage)	40
Fig 3.17	Courant injecté par le filtre (phase 3).	40
Fig 3.18	Courant du neutre (après filtrage)	41
Fig 3.19	La tensions entre deux capacités C_{dc1} et C_{dc2} .	41

Liste des Symboles et Acronymes

BT : Basse tension

C_{dc} : Condensateur du bus continue

D : Puissance Déformante

FAP : Filtre Actif Parallèle

F.P : Facteur de puissance

FPB : Filtre Passe Bas

FPH : Filtre Passe Haut

I_c : Valeur efficace du courant de la charge

I_f : Valeur efficace du courant injecté par le FAP

I_h : Valeur efficace du Courant harmonique du rang h

IGBT : Insolated Gate Bipolar Transistor

i_n : Courant instantané du neutre

i_o : Courant instantané homopolaire

I_s : Valeur efficace du courant de la source

i_α : Courants instantanés suivant l'axe α

i_β : Courants instantanés suivant l'axe β

L_c : Inductance du réseau couté charge

L_f : Inductance de couplage

L_s : Inductance du réseau couté source

MOSFET: Metal oxide Semiconductor Field Effect

P_{dc} : Puissance absorbée par le condensateur

PI : Proportionnel-Intégral

p : Valeur instantanée de la puissance réelle

q : Valeur instantanée de la puissance Imaginaire

R_c : Résistance du réseau coté charge

R_s : Résistance du réseau coté source

THD : Taux de Distorsion Harmonique

T_i : Etat de l'interrupteur i (ouvert ou fermé)

V_{dc} : Tension aux bornes du condensateur

V_s : Tension simple efficace de la source

V_α : Tensions instantanés suivant l'axe α

V_β : Tensions instantanés suivant l'axe β

α - β : Axes α et β du repaire de Concordia

Sommaire

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I : perturbation et dépollution des réseaux électrique

Introduction	3
1.1. Dégradation de la qualité d'énergie dans les réseaux électriques.....	3
1.1.1. Qualité de l'énergie électrique.....	3
1.1.2. Problématique des harmoniques	4
1.1.3. Sources des harmoniques et leurs effets.....	5
1.1.4. Puissances	6
1.1.5. Facteur de puissance.....	7
1.1.6. Déséquilibre du courant et de la tension.....	8
1.1.7. Creux de tension.....	9
1.2. Caractéristique de la pollution harmonique.....	10
1.3. Solutions de dépollution des réseaux électriques.....	11
1.3.1. Solutions traditionnelles	11
1.3.2. Solutions modernes.....	12
1.4. Configuration des filtres hybrides.....	17
Conclusion.....	20

Chapitre II : commande d'un filtre actif parallèle à quatre fils

Introduction.....	21
2.1. Constituants d'un filtre actif parallèle à quatre fils.....	21
2.2. Étude de la partie puissance.....	21
2.2.1. Description d'un onduleur triphasé à trois bras avec condensateurs à point milieu.....	22
2.2.2. Description d'un onduleur triphasé à quatre bras.....	23
2.2.3. Filtre de sortie.....	24

2.2.4. Système de stockage d'énergie.....	26
2.3. Étude de la partie commande-contrôle.....	26
2.3.1. Détermination des courants harmoniques de référence	26
2.3.1.1. Présentation de la méthode de puissances instantanées.....	26
2.3.1.2. Filtres d'extraction.....	28
2.3.1.3. Schémas d'identification par la méthode de puissances instantanées.....	29
2.3.2. Régulation de la tension continue.....	30
2.3.3. Contrôle de l'onduleur par hystérésis.....	31
Conclusion.....	32

Chapitre III : Simulation l'ensemble réseau, charge polluante et FAP 3N

Introduction.....	33
3.1. Schéma de simulation.....	34
3.2. Résultat de simulation sous Matlab-Simulink.....	34
3.2.1. Paramètres de la simulation.....	34
3.2.2. Courbes de simulation.....	35
3.2.2.1. Les courbes avant filtrage.....	35
3.2.2.2. Les courbes après filtrage.....	38
Conclusion.....	42
Conclusion générale.....	43

INTRODUCTION GENERALE

La pollution harmonique est l'une des préoccupations principales des spécialistes dans le domaine du génie électrique ces trente dernières années.

Si au début de leur apparition, les harmoniques étaient essentiellement causés par la saturation des circuits magnétiques (dans les transformateurs notamment), aujourd'hui c'est plutôt les charges non linéaires à base d'électronique de puissance qui en sont la cause principale. En effet, de nos jours, on trouve les systèmes à base d'électronique de puissance dans la production d'énergie, comme l'excitation des alternateurs, le couplage au réseau des sources de productions décentralisées à travers une interface d'électronique de puissance. Dans la distribution d'énergie, on trouve des systèmes de compensation et d'optimisation de puissance. Finalement, chez le récepteur final, les charges sont alimentées à travers des redresseurs, gradateurs, . . . etc. Il ne faut surtout pas cerner le problème de la pollution harmonique autour des charges industrielles, car quelques charges domestiques monophasées comme le matériel informatique, téléviseur, climatisation ou l'éclairage fluorescent sont plus polluantes. Ces charges non linéaires absorbent des courants non sinusoïdaux, et par conséquent engendrent des harmoniques dont la circulation dans le réseau cause une dégradation de l'onde de tension et augmente les pertes de puissance, sans oublier la perturbation au fonctionnement normal de certains équipements, voir même le risque de destruction.

Pour garantir les normes de qualité, le filtrage actif d'harmoniques, et en particulier le filtrage shunt a prouvé son efficacité comme une alternative aux solutions traditionnelles basées sur les filtres passifs, en raison notamment de la bande passante et la flexibilité. Au cours des dernières années, plusieurs travaux ont été réalisés et sanctionnés par des réalisations pratiques de tels systèmes, mais la majorité des cas pour des systèmes triphasés à trois fils (sans distribution du fil neutre), or, il se trouve que dans les réseaux basse tension, le fil neutre est souvent distribué, ce qui fait apparaître des composantes homopolaires (harmonique 3 et ses multiples impaires), notamment à cause des charge non linéaires monophasées. A cet effet, le filtre actif à quatre fils est plus adéquat, du fait de la distribution du quatrième fil, qui permet de compenser le courant du neutre[8].

Deux solutions peuvent être envisagées pour la création du quatrième fils.

La première consiste à utiliser un onduleur à quatre bras, et la seconde utilise un onduleur à trois bras conventionnel mais avec un bus continu dont le point milieu sert de point neutre connecté au neutre du réseau. Si la première structure est la plus utilisée dans la littérature parce qu'elle offre la meilleure optimisation du bus continu, la seconde structure est plus préférable de point de vue économique car elle réduit le nombre de semi-conducteurs.

Le présent travail traite avec la dépollution harmonique par un filtre actif à quatre fils, et plus spécialement, le filtre à quatre fils à base d'un onduleur à trois bras. Ce travail a pour objectif, la mise en œuvre et la contribution au contrôle de ce type de structure appliquée au filtrage actif dans les réseaux de distribution à quatre fils. Le contrôle-commande du filtre actif est souvent déterminant pour l'objectif de compensation de tous les harmoniques indésirables. Ce contrôle comporte trois parties essentielles, à savoir, l'identification des perturbations harmoniques qui consiste en la séparation des harmoniques dans les courants absorbés par la charge non linéaire, la régulation de la tension continue aux bornes du bus continu de l'onduleur, et le contrôle des courants injectés dans le réseau. La qualité de filtrage sera déterminée ainsi par la qualité de contrôle de ces trois paramètres qui fera l'objet de notre préoccupation principale dans cette thèse.

La présentation de ce manuscrit est étalée sur trois chapitres : le premier chapitre sera consacré au recensement des perturbations qui peuvent apparaître dans un réseau électrique basse tension, leurs causes, leurs conséquences et leurs caractéristiques. Nous rappelons aussi les solutions de dépollution existantes, tant traditionnelles que modernes.

Dans le deuxième chapitre nous avons présenté la définition et la structure de filtre actif parallèle à quatre fils, cette structure partagée en deux parties qui sont la partie de puissance et la partie de commande-contrôle, la partie de puissance est représentée par l'onduleur de tension, le système de stockage d'énergie et le filtre de sortie, et la deuxième partie qui est la commande-contrôle représentée par la commande d'onduleur et l'identification des courants perturbés.

Dans le troisième chapitre on présente la simulation de l'ensemble du réseau, et trois charges monophasées non identiques alimentées par un gradateur monophasé, et deux redresseurs monophasés, le filtre actif parallèle à quatre fils sous l'environnement Matlab - Simulink. On donne ensuite les résultats de simulations obtenus, avec l'interprétation de ces résultats et une conclusion générale avec quelques perspectives.

Chapitre n° I

**Perturbation et dépollution des
réseaux électrique**

INTRODUCTION

Généralement, le distributeur d'énergie délivre l'énergie électrique sous forme d'un système triphasé de tensions sinusoïdales. Les paramètres caractéristiques de ce système sont la fréquence, l'amplitude, la forme d'onde, qui doit être sinusoïdale et la symétrie du système triphasé. Mais depuis quelques années, avec l'évolution technologique des composants d'électronique de puissance les distributeurs d'énergie rencontrent plusieurs problèmes liés à l'accroissement du nombre de convertisseurs statiques raccordés aux réseaux de distribution d'énergie. En effet, ces convertisseurs sont des sources polluantes qui absorbent des courants non sinusoïdaux et consomment pour la plupart de la puissance réactive. Les harmoniques générés sont des perturbations permanentes affectant la forme d'onde de la tension du réseau. Ces perturbations se superposent à l'onde fondamentale.

Elles ont donc pour conséquence de modifier l'onde de tension ou de courant ce qui se traduit par une dégradation du facteur de puissance et/ou par la génération de courants et de tensions alternatives de fréquence différente de celle du fondamental.

Dans ce chapitre, nous allons présenter la source des harmoniques, l'influence du raccordement des convertisseurs statiques sur les réseaux électriques et leurs environnements. Ensuite, nous présentons les solutions classiques et les solutions modernes mises en œuvre pour dépolluer les réseaux électriques.

1.1. Dégradation de la qualité d'énergie dans les réseaux électriques

1.1.1. Qualité de l'énergie électrique

La qualité de l'énergie est une notion assez large qui recouvre à la fois la qualité de la fourniture électrique, la qualité de l'onde de tension et la qualité des courants. Lorsque la tension est présente, les principaux phénomènes pouvant l'affecter sont d'une part les variations lentes : creux de tension, surtensions, coupures, déséquilibres et d'autre part des variations rapides : surtensions transitoires, flicker ainsi que les harmoniques. La qualité des courants reflète par contre la possibilité des charges à fonctionner sans perturber ni réduire l'efficacité du système de puissance. C'est pourquoi certains considèrent que la qualité de l'électricité se réduit à la qualité de la tension.

La qualité de l'alimentation électrique ou qualité de l'onde fait référence à la mesure du degré de conformité d'une source d'alimentation électrique par rapport à un certain nombre de critères ou de normes à caractère quantitatif et absolu. L'énergie électrique est délivrée sous

forme d'un système triphasé de tensions sinusoïdales. Les paramètres caractéristiques de ce système sont les suivants :

- la fréquence,
- l'amplitude,
- la forme d'onde qui doit être sinusoïdale,
- la symétrie du système triphasé, caractérisée par l'égalité des modules des trois tensions et de leurs déphasages relatifs.

Tout phénomène physique affectant une ou plusieurs de ces caractéristiques peut être considéré comme perturbation. En pratique, ces perturbations sont classées selon la durée du phénomène. Ainsi, il est possible de distinguer :

- les altérations de l'onde de tension (harmoniques, déséquilibre, flicker). Ces phénomènes sont permanents ou durent au minimum plusieurs minutes,
- les creux de tension et coupures brèves d'une durée de l'ordre d'une à quelques secondes,
- les surtensions transitoires, de durée inférieure à une période .

Dans ce qui suit nous nous restreindrons à la présentation des perturbations provoquées par les harmoniques ainsi que leurs conséquences néfastes sur le réseau électrique [2].

1.1.2. Problématique des harmoniques

La problématique des harmoniques dans le réseau électrique, également appelée pollution harmonique, n'est pas un phénomène nouveau. Néanmoins, du fait que de plus en plus de charges non linéaires se connectent au réseau, la problématique des harmoniques est devenue très répandue. Les charges non linéaires provoquent une distorsion des courants et donc des tensions, ce qui peut entraîner un mauvais fonctionnement des dispositifs raccordés au réseau. D'où, l'intérêt d'éliminer ou de minimiser ces harmoniques.

Un récepteur d'énergie est considéré par le réseau électrique comme une charge perturbatrice s'il absorbe des courants non sinusoïdaux ou des courants déséquilibrés ou s'il consomme de la puissance réactive. Les deux premiers types de perturbations peuvent déformer ou déséquilibrer les tensions du réseau lorsque l'impédance de celui-ci n'est pas négligeable. Le troisième réduit la capacité de production ou de transmission de la puissance active des générateurs, des transformateurs et des lignes électriques.

Les harmoniques de courant, une fois injectés par des charges non linéaires, se propagent à travers le réseau électrique en affectant la forme d'onde des tensions aux différents points du réseau. Cette propagation n'est limitée que par les bifurcations (points de division des courants) et les impédances du réseau qui dépendent généralement de la fréquence des

courants harmoniques. La présence des harmoniques de courant se révèle essentiellement à travers leurs effets sur la tension du réseau [2].

1.1.3. Sources des harmoniques et leurs effets

L'utilisation des équipements électriques comportant des convertisseurs statiques dans les installations de conversion d'énergie électrique a entraîné ces dernières années une augmentation sensible du niveau de pollution harmonique. Ils ont contribué à la détérioration de la qualité du courant et de la tension des réseaux de distribution.

Les principales sources à l'origine des harmoniques sont les appareils d'éclairage fluorescent, les appareillages informatiques, les appareils domestiques (téléviseurs, appareils électroménagers en grand nombre), les arcs électriques et tous les convertisseurs statiques raccordés aux réseaux tels que les redresseurs et les onduleurs. Tous ces systèmes contribuent à la pollution harmonique du réseau auquel ils sont connectés.

En effet, ces systèmes absorbent des courants non sinusoïdaux, même s'ils sont alimentés par une tension sinusoïdale. Ces équipements électriques sont considérés comme des charges non linéaires émettant des courants harmoniques dont les fréquences sont des multiples entiers ou non entiers de la fréquence fondamentale.

La présence d'harmoniques de courant ou de tension conduit à des effets néfastes sur le réseau de distribution, comme par exemple:

- L'échauffement des conducteurs, des câbles, des condensateurs et des machines dû aux pertes cuivre et fer supplémentaires.
- L'interférence avec les réseaux de télécommunication, causée par le couplage électromagnétique entre les réseaux électriques et les réseaux de télécommunication qui peut induire dans ces derniers des bruits importants.
- Le dysfonctionnement de certains équipements électriques comme les dispositifs de commande et de régulation. En présence d'harmoniques, le courant et la tension peuvent changer plusieurs fois de signe au cours d'une demi-période. Par conséquent, les équipements sensibles au passage par zéro de ces grandeurs électriques sont perturbés.
- Des phénomènes de résonance. Les fréquences de résonance des circuits formés par les inductances du transformateur et les capacités des câbles sont normalement assez élevées, mais celles peuvent coïncider avec la fréquence d'un harmonique. Dans ce cas, il y aura une amplification importante qui peut détruire les équipements raccordés au réseau.
- La dégradation de la précision des appareils de mesure.
- Des perturbations induites sur les lignes de communication, rayonnement électromagnétique notamment.

Différents critères sont définis pour caractériser ces perturbations. Le THD et le facteur de puissance sont les plus employés pour quantifier respectivement les perturbations harmoniques et la consommation de puissance non-active. Le THD représente le rapport de la valeur efficace des harmoniques à la valeur efficace du fondamental. Il est défini par la relation :

$$THD = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \frac{X_h^2}{X_1^2}} \quad (1.1)$$

Avec X soit un courant, soit une tension[2]

1.1.4. Puissances

1.1.4.1. Puissance active

La puissance active P d'un signal comportant des harmoniques est la somme des puissances actives dues aux tensions et courants de même rang. La décomposition de la tension et du courant en leurs composantes harmoniques nous donne :

$$P = \sum_{h=0}^{\infty} U_h I_h \cos \varphi_h \quad (1.2)$$

Étant le déphasage entre la tension et le courant de l'harmonique de rang h.

En l'absence d'harmoniques, on retrouve bien l'expression : [6]

$$P = U_1 I_1 \cos \varphi_1 \quad (1.3)$$

1.1.4.2. Puissance réactive

La puissance réactive n'est définie que pour le fondamental, soit [6]:

$$Q = U_1 I_1 \sin \varphi_1 \quad (1.4)$$

1.1.4.3. Puissance déformante

Considérons la puissance apparente S :

$$S = U_{eff} I_{eff} \quad (1.5)$$

En présence d'harmoniques, on peut écrire :

$$S^2 = \left(\sum_{h=0}^{\infty} U_h^2 \right) \left(\sum_{h=0}^{\infty} I_h^2 \right) \quad (1.6)$$

Par conséquent, en présence d'harmoniques, la relation $S^2 = P^2 + Q^2$ n'est pas valide. On définit la puissance de distorsion D telle que : $S^2 = P^2 + Q^2 + D^2$ soit : [6]

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} \quad (1.7)$$

1.1.5. Facteur de puissance

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

$$PF = \frac{P}{S} \quad (1.8)$$

Quand la tension (le courant) est sinusoïdale ou pratiquement sinusoïdale, le facteur de puissance PF est défini par la formule :

$$PF = \cos \varphi_1 \quad (1.9)$$

Dans le cas où il y a des harmoniques la puissance déformante (D), apparait comme le montre le diagramme de Fresnel de la figure 1.2.

Le facteur de puissance (F.P) devient :

$$PF = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} = \cos \varphi_1 \cdot \cos \gamma \quad (1.10)$$

Les générateurs, les transformateurs, les lignes de transport et les appareils de contrôle et de mesure sont dimensionnés pour la tension et le courant nominaux. Une faible valeur de facteur de puissance se traduit par une mauvaise utilisation de ces équipements.

On voit bien que les harmoniques affectent aussi le facteur de puissance [6].

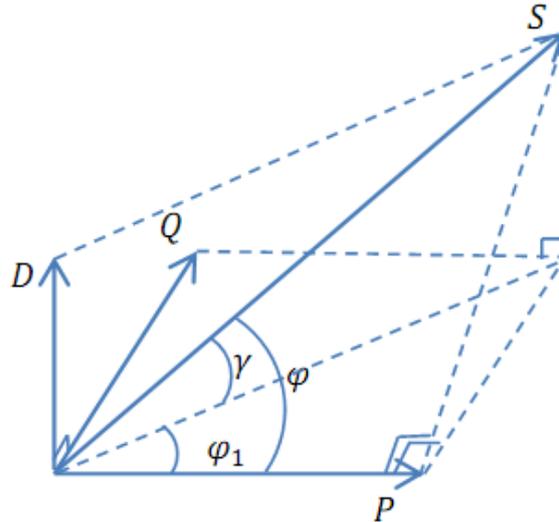


Fig 1.1- Diagramme de Fresnel des puissances.

1.1.6. Déséquilibre du courant et de la tension

Un récepteur triphasé électrique qui n'est pas équilibré et que l'on alimente par un réseau triphasé équilibré conduit à des déséquilibres de tension dus à la circulation de courants non équilibrés dans les impédances du réseau. Ceci est fréquent pour les récepteurs monophasés à basse tension. Mais cela peut également être engendré, à des tensions plus élevées, par des machines à souder, des fours à arc ou par la traction ferroviaire.

Il est plus intéressant d'aborder le problème du déséquilibre par type d'équipement. Le déséquilibre d'une installation triphasée peut entraîner un dysfonctionnement des appareils basses tensions connectés [1] :

- Mauvais fonctionnement d'un appareil monophasé alimenté par une tension très faible (Lampe à incandescence qui fournit un mauvais éclairage),
- Destruction d'un appareil monophasé alimenté par une tension trop élevée, il peut être détruit (claquage d'un filament de lampe par surtension).
- Concernant les dispositifs triphasés d'électronique de puissance, principalement les ponts redresseurs, le fonctionnement en présence de déséquilibre entraîne l'apparition de composantes harmoniques non caractéristiques, notamment des harmoniques de rang multiple de 3.

L'apparition de ces courants harmoniques peut poser des problèmes, comme la génération d'une anti-résonance lors du filtrage de l'harmonique de rang 5. Outre les effets classiques des harmoniques, ces fréquences non caractéristiques peuvent conduire, dans certains cas, au blocage de la commande.

La conséquence des composantes inverses sur les machines tournantes est la création d'un champ tournant en sens inverse du sens de rotation normal, d'où un couple de freinage parasite et des pertes supplémentaires qui provoquent l'échauffement de la machine.

- Concernant l'effet du déséquilibre homopolaire, il faut signaler le risque d'échauffement du conducteur neutre dans un réseau BT qui, lorsque le conducteur est d'un diamètre trop faible, peut provoquer une rupture du conducteur ou un incendie [6].

1.1.7. Creux de tension

On appelle creux de tension (figure 1.2) toute diminution de la tension à une valeur située entre 1 et 90 %, de la tension nominale et ce, pendant une durée allant de 10 ms jusqu'à 1 min. Il est caractérisé par sa profondeur ΔU et sa durée ΔT . Par ailleurs, on peut noter qu'une coupure brève n'est qu'un cas particulier du creux de tension, sa profondeur est supérieur à 99 %.

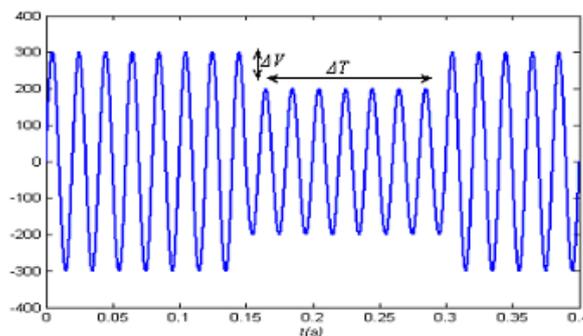


Fig 1.2 Creux de tension.

Les principales causes des creux de tension sont les perturbations dues à l'exploitation des réseaux comme la mise sous tension de gros transformateurs, les courts circuits, enclenchement des condensateurs, simple démarrage de gros moteurs...etc. et il a comme effets des perturbations sur les couples pour les machines tournantes, étant donné que celui-ci dépend du carré de la tension, perturbation d'appareillage électronique, pannes intempestives. . .etc [4].

1.2 Caractéristique de la pollution harmonique

Différentes grandeurs sont définies pour chiffrer ces perturbations. Parmi celles-ci les plus utilisées sont :

1.2.1. Le taux harmonique de rang h

$$S_h = C_h / C_1 \quad (1.11)$$

ou C_h représente la composante harmonique de rang h, C_1 représente la composante fondamentale,

1.2.2. Le taux global de distorsion harmonique

$$THD = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} C_h^2 / C_1^2} \quad (1.12)$$

Le terme THD correspond au (Total Harmonique Distorsion). Le THD représente le rapport entre la valeur efficace des harmoniques et la valeur efficace du fondamental. Le taux de distorsion harmonique est une notion très utilisée pour définir l'importance du contenu harmonique d'un signal alternatif [6].

1.2.3. THD en courant ou en tension

Il existe deux sortes de THD : en tension (apparaît à la source) ou en courant (dû aux charges non linéaires) [6].

Lorsqu'il s'agit des harmoniques de courant, l'expression devient :

$$THD_i = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2 / I_1^2} \quad (1.13)$$

Lorsqu'il s'agit des harmoniques de tension, l'expression devient :

$$THD_v = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2 / V_1^2} \quad (1.14)$$

1.2.4. Relation entre facteur de puissance et THD

En présence des harmoniques, l'expression de PF devient :

$$PF = \frac{\cos \varphi}{\sqrt{1 + THD^2}} \quad (1.15)$$

1.3. Solutions de dépollution des réseaux électriques

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

1.3.1 Solutions traditionnelles

Ce sont des techniques qui doivent être connues par tous les électriciens. Elles apportent une solution facile et rapide pour certains cas de perturbations bien localisées et utilisent des composants passifs (inductances, condensateurs, transformateurs) et/ou des branchements qui modifient le schéma de l'installation. Plusieurs solutions existent pour limiter la propagation et l'effet des harmoniques dans les réseaux électriques :

- L'augmentation de la puissance de court-circuit du réseau et l'utilisation de convertisseurs peu polluants qui ont pour effet de diminuer la distorsion harmonique,
- L'utilisation de dispositifs de filtrage pour réduire la propagation des harmoniques produits par des charges non linéaires.

Le filtrage consiste à placer en parallèle sur le réseau d'alimentation une impédance de valeur très faible autour de la fréquence à filtrer et suffisamment importante à la fréquence fondamentale du réseau. Parmi les dispositifs de filtrage les plus répandus, on distingue le filtre passif résonnant et le filtre passif amorti ou passe-haut

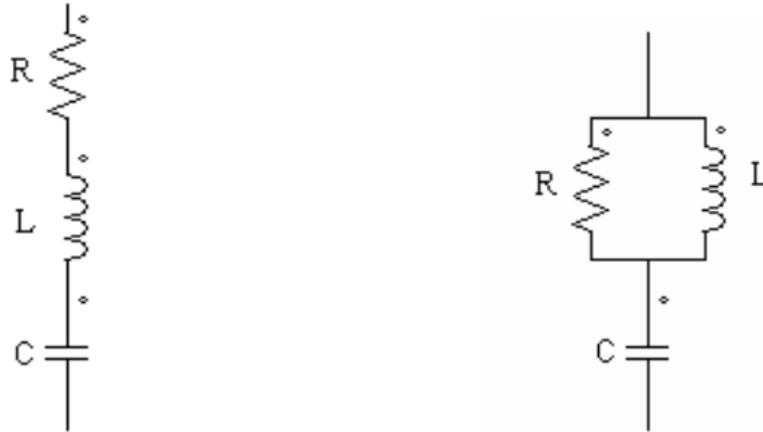


Fig 1.3- a) Filtre passif résonnant b) Filtre passif amorti

Ces dispositifs sont utilisés pour empêcher les courants harmoniques de se propager dans les réseaux électriques. Ils peuvent aussi être utilisés pour compenser la puissance réactive. Malgré leur large utilisation dans l'industrie, ces dispositifs peuvent présenter beaucoup d'inconvénients [3] :

- manque de souplesse à s'adapter aux variations du réseau et de la charge,
- équipements volumineux,
- problèmes de résonance avec l'impédance du réseau.

1.3.2 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 deux types de structures classiquement utilisées :

- Le filtre actif (série, parallèle ou bien encore associant les deux)
- Le filtre actif hybride (série, 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, les filtres actifs sont proposés comme des solutions de dépollution des réseaux électriques [5]. Dans la suite, différentes topologies de filtres actifs usuels sont présentées.

1.3.2.1 Filtre actif série (FAS)

Le rôle d'un FAS est de modifier localement l'impédance du réseau. Il se comporte comme une source de tension harmonique qui annule les tensions perturbatrices (creux, déséquilibre, harmonique) venant de la source et celles générées par la circulation de courants perturbateurs à travers l'impédance du réseau. Ainsi, la tension aux bornes de la charge peut être rendue sinusoïdale. Cependant, le FAS ne permet pas de compenser les courants harmoniques consommés par la charge[5].



Fig. 1.4 - Filtre actif série.

1.3.2.2 Filtre actif parallèle (FAP)

Le FAP se connecte en parallèle avec le réseau et injecte en temps réel les composantes harmoniques des courants absorbés par les charges non linéaires connectées au réseau. Ainsi, le courant fourni par la source d'énergie devient sinusoïdal[5].

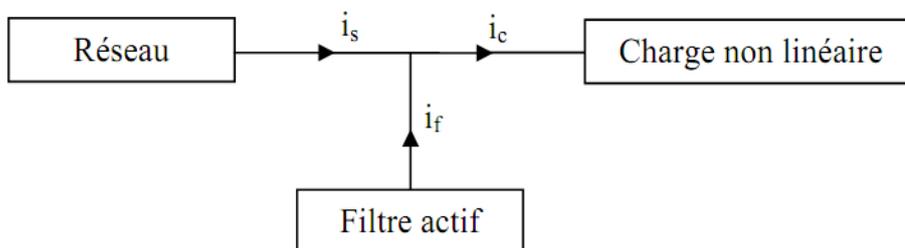
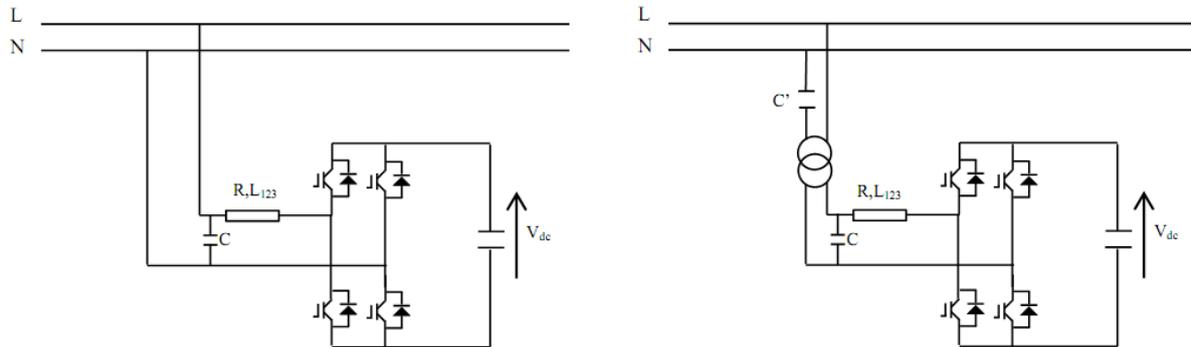


Fig. 1.5 - Filtre actif parallèle.

a. Filtre monophasé

Deux différentes configurations du filtre actif parallèle monophasé sont présentées par la figure 1.6 ci-dessous [6].



-a- FA parallèle monophasé

-b- FA hybride monophasé

Fig.1.6 - Différentes configurations d'un filtre actif monophasé.

b. Filtre actif parallèle à trois fils

Il se connecte en parallèle avec le réseau triphasé et injecte en temps réel les composantes harmoniques des courants absorbés par les charges non linéaires connectées au réseau. Ainsi, le courant fourni par la source d'énergie devient sinusoïdal [6].

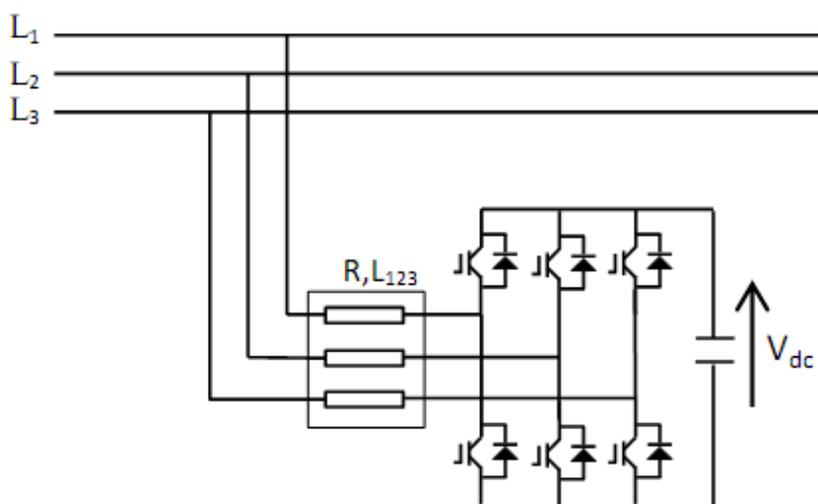


Fig.1.7 - Configuration d'un FAP à trois fils.

c. Filtre actif parallèle à quatre fils

Un grand nombre de charges monophasées peuvent être alimentées à partir d'un système triphasé avec le neutre. Elles peuvent causer un courant harmonique excessif dans le neutre, une surcharge de la puissance réactive et un déséquilibre. Pour réduire ces problèmes, des compensateurs à quatre fils ont été développés dans les références [6].

- Filtre actif de type source de tension à quatre fils avec un condensateur à point milieu

Cette topologie est employée pour des puissances réduites car le courant du neutre traverse les condensateurs.

- Filtre actif de type source de tension à quatre fils avec quatre bras

Dans ce type le quatrième bras est utilisé pour stabiliser et contrôler le courant du neutre du filtre actif [6].

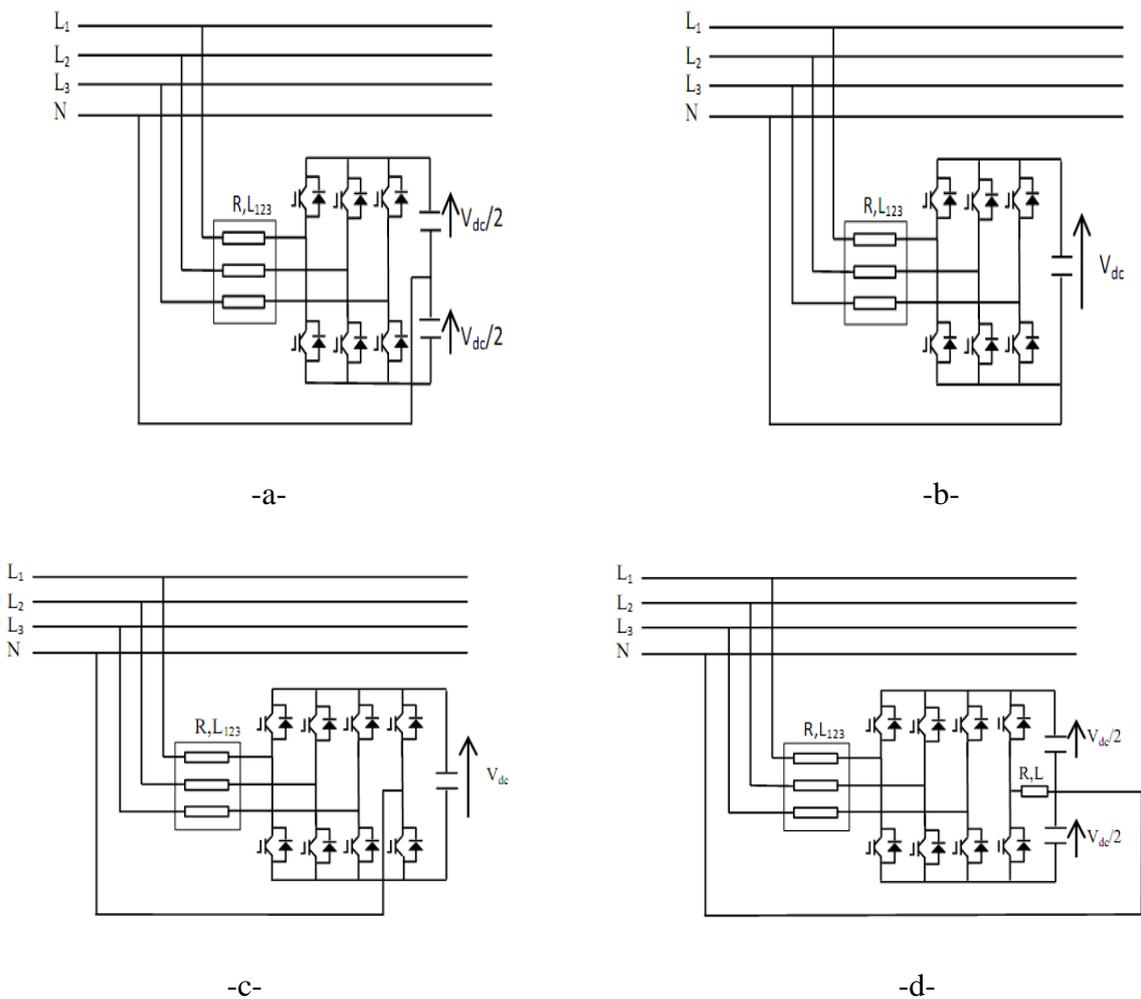


Fig.1.8 - Différentes topologies utilisées dans un FAP d'un réseau triphasé à quatre fils.

- a- Onduleur à trois bras avec condensateurs à point milieu ;
- b- Onduleur à trois bras avec connexion asymétrique du neutre ;
- c- Onduleur à quatre bras ;
- d- Onduleur à quatre bras amélioré.

1.3.2.3 Combinaison parallèle-série de filtres actifs

La figure 1.9 illustre l'association de deux filtres actifs parallèle et série, également appelée «Unified Power Quality Conditioner » (UPQC). Cette structure bénéficie des avantages des deux types de filtres actifs série et parallèle. Ainsi, elle permet d'assurer simultanément un courant sinusoïdal et une tension du réseau électrique également sinusoïdale [5].

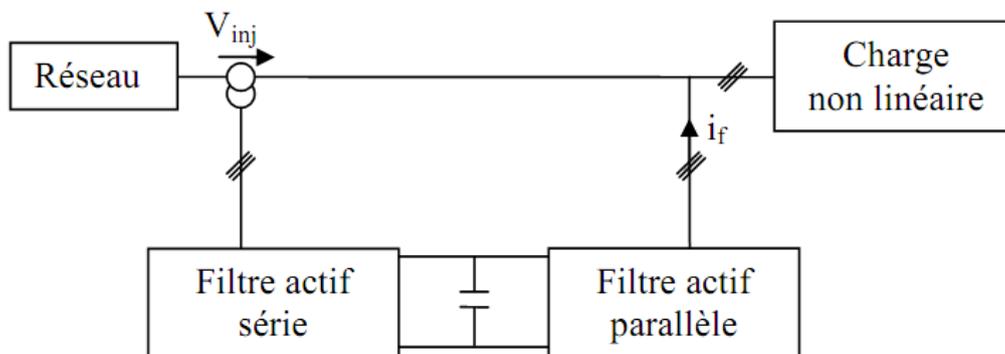


Fig 1.9 - Combinaison parallèle-série de filtres actifs.

Les inconvénients des filtres passifs (résonances série ou parallèle avec la source et/ou la charge, détérioration des performances du filtre lors de variations de l'impédance du réseau,...) et des filtres actifs (coût élevé en raison du dimensionnement des composants de puissance) ont conduit à l'élaboration d'une nouvelle topologie de filtre actif. Il s'agit du filtre hybride qui est en réalité l'association de filtres actifs de faibles puissances à des filtres passifs.

1.3.2.4 Filtre hybride

Le filtre hybride est une topologie de filtre qui combine les avantages des filtres passifs et des filtres actifs. Pour cette raison, il est considéré comme l'une des meilleures solutions pour filtrer les harmoniques de courant des réseaux de distribution.

Une des principales raisons de l'utilisation du filtre actif hybride est liée au développement des semi-conducteurs de puissance tels que les transistors de puissance de types MOSFET ou IGBT.

De plus, du point de vue économique, le filtre hybride présente un atout majeur : il permet de réduire le coût du filtre actif, actuellement l'obstacle majeur à l'utilisation de filtres actifs [5].

1.4 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 1.10. présente quelques configurations de filtres hybrides selon le type de système étudié et les éléments associés [5].

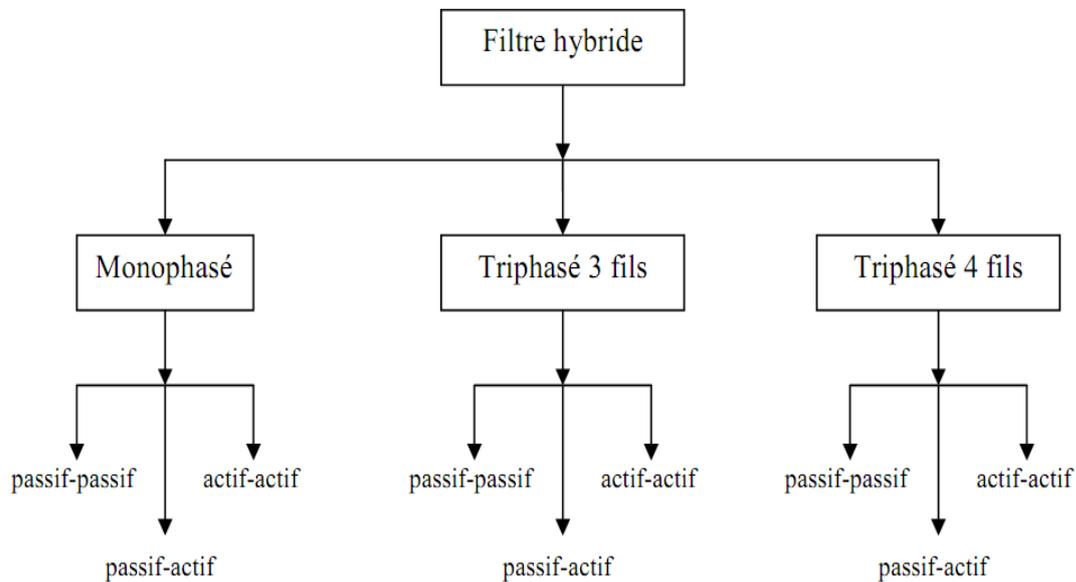


Fig 1.10 - Classification des filtres hybrides

1.4.1 Filtre hybride combinant filtres actif et passif

1.4.1.1 Association série d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif

Dans cette configuration, les deux filtres actif et passif sont directement connectés en série, sans l'intermédiaire d'un transformateur. L'ensemble est connecté en parallèle sur le réseau comme le décrit la figure 1.11.

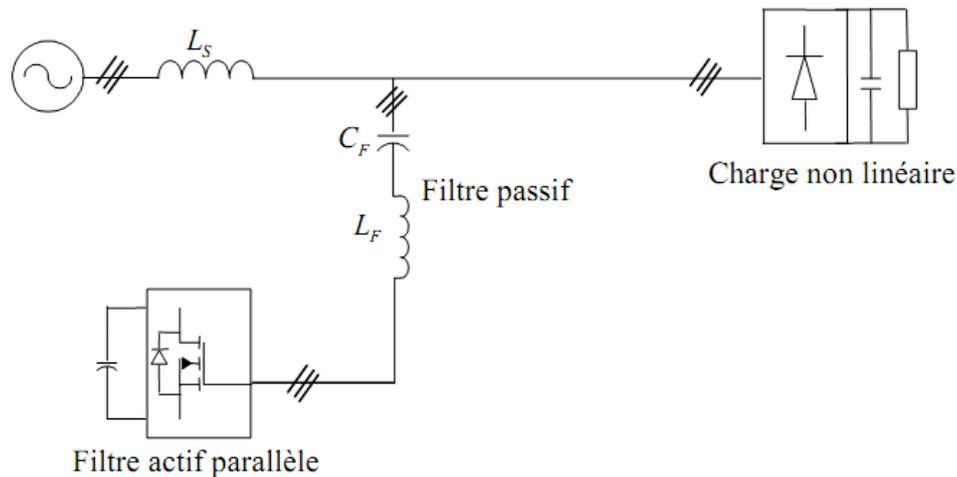


Fig 1.11 - Association série d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif.

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 [5].

1.4.1.2 Association parallèle d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif

Dans cette topologie, le filtre actif est connecté en parallèle avec le filtre passif. Tous deux sont également en parallèle avec la charge. Le filtre actif parallèle sert à compenser les courants harmoniques basses fréquences émis par la charge polluante alors que le filtre passif, accordé sur une fréquence harmonique élevée, permet de compenser les harmoniques hautes fréquences [5].

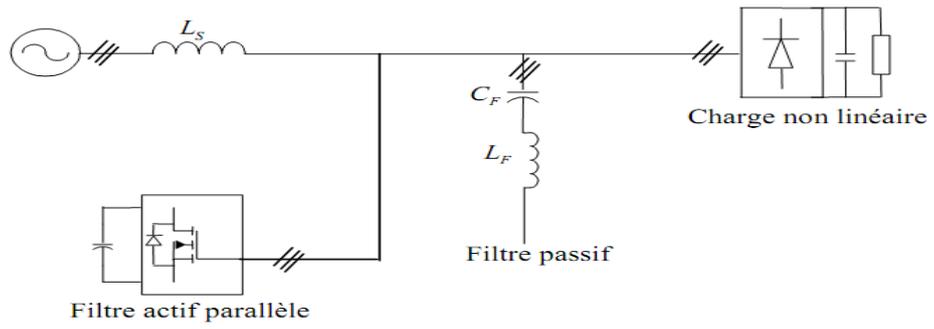


Fig 1.12 Association parallèle d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif.

CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté la distorsion harmonique et les différentes sources de perturbation affectant la forme d'onde des tensions et courants 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.

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 perturbations de courant telles que les harmoniques, les déséquilibres ainsi que pour compenser de la puissance réactive.

-Le chapitre suivant sera consacré au filtrage actif parallèle à quatre fils.

Chapitre n°II

**COMMANDE D'UN FILTRE ACTIF
PARALLÈLE À QUATRE FILS**

Introduction

Pour réduire les harmoniques au niveau de la source nous proposons dans ce travail le filtrage actif parallèle à quatre fils, vu ses avantages, tel que l'adaptation aux variations de la charge.

Dans ce chapitre nous serons présentés en principalement la définition et la structure de filtre actif parallèle à quatre fils.

2.1. Constituants d'un filtre actif parallèle à quatre fils

Un filtre actif parallèle à quatre fils est essentiellement constitué de deux parties (Voir la figure 2.1) :

- Partie commande – contrôle.
- Partie puissance.

Ces deux parties vont être détaillées dans les deux sections qui suivent.

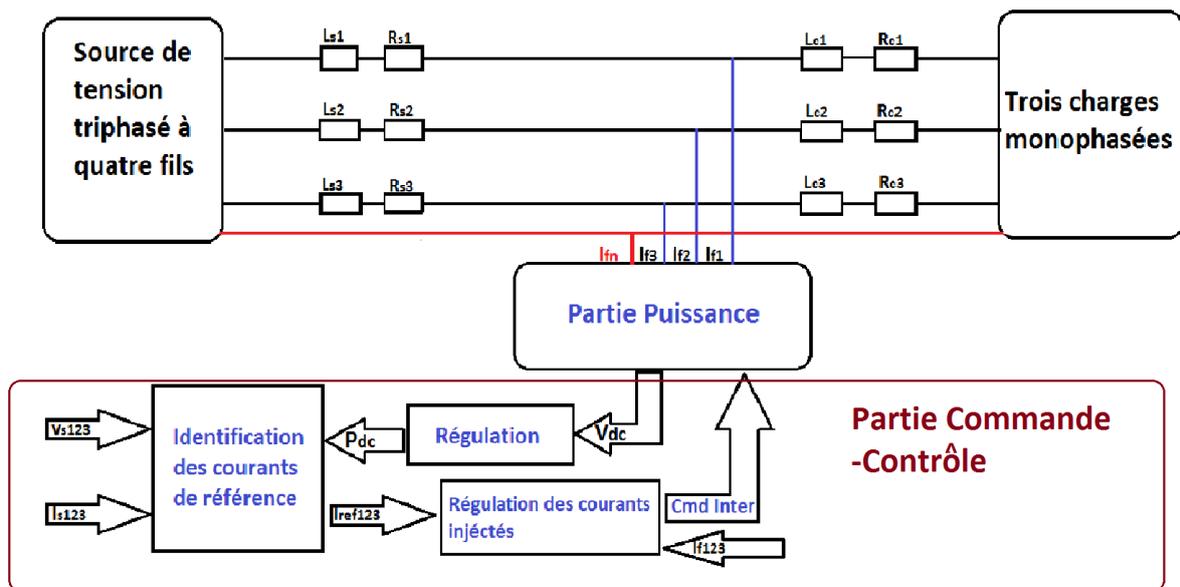


Fig.2.1 Principe du filtrage actif parallèle d'un réseau triphasé à quatre fils.

2.2.Étude de la partie puissance

Dans cette section nous sommes intéressés à la partie puissance du FAP dont les composants sont les suivants :

- L'onduleur à quatre fils,
- Le filtre de couplage,
- Le système de stockage de l'énergie.

2.2.1. Description d'un onduleur triphasé à trois bras avec condensateurs à point milieu

La première topologie de filtre actif est constituée de six interrupteurs réversibles en courant commandés à la fermeture et à l'ouverture (transistors bipolaires, IGBT, thyristors ou GTO) en antiparallèle avec une diode. Ils forment les trois bras d'un onduleur triphasé. Un quatrième bras est constitué de deux condensateurs dont le point milieu est relié au neutre du réseau électrique, comme l'illustre la figure 2.2.

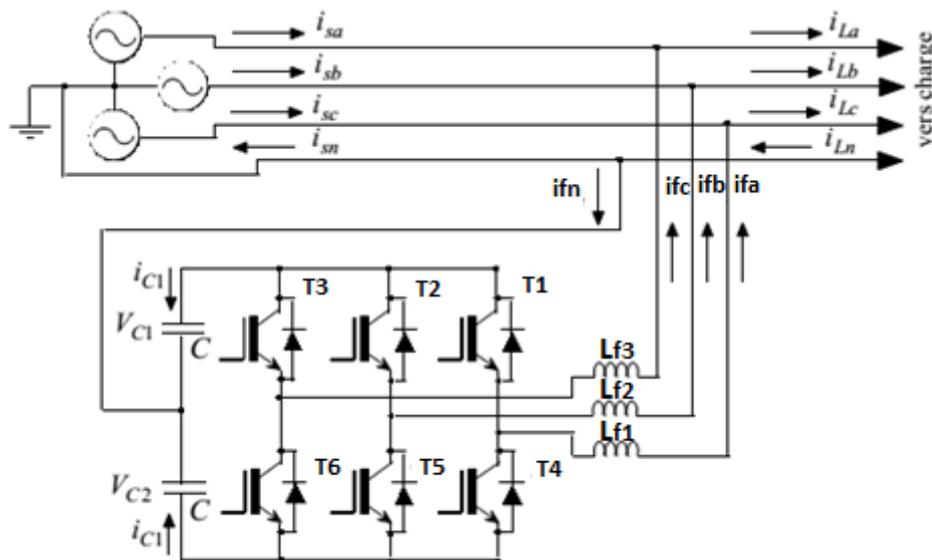


Fig 2.2 Filtre actif parallèle à trois bras avec condensateurs à point milieu pour un réseau triphasé à quatre fils.[8]

Les états de commutation pour ce type d'onduleur sont présentés dans le tableau 2.1.

k	T₃	T₂	T₁	V_{f3}	V_{f2}	V_{f1}
0	0	0	0	$-V_{dc}/2$	$-V_{dc}/2$	$-V_{dc}/2$
1	0	0	1	$-V_{dc}/2$	$-V_{dc}/2$	$V_{dc}/2$
2	0	1	0	$-V_{dc}/2$	$V_{dc}/2$	$-V_{dc}/2$
3	0	1	1	$-V_{dc}/2$	$V_{dc}/2$	$V_{dc}/2$
4	1	0	0	$V_{dc}/2$	$-V_{dc}/2$	$-V_{dc}/2$
5	1	0	1	$V_{dc}/2$	$-V_{dc}/2$	$V_{dc}/2$
6	1	1	0	$V_{dc}/2$	$V_{dc}/2$	$-V_{dc}/2$
7	1	1	1	$V_{dc}/2$	$V_{dc}/2$	$V_{dc}/2$

Tab 2.1 Tensions générées par l'onduleur de tension à trois bras avec condensateurs à point milieu.

Cette topologie contient huit combinaisons de commande possibles. Ces états de commutations sont obtenus en utilisant les expressions suivantes [6] :

$$V_{f1} = T_1 \frac{V_{dc}}{2} - (1-T_1) \frac{V_{dc}}{2} \tag{2.1}$$

$$V_{f2} = T_2 \frac{V_{dc}}{2} - (1-T_2) \frac{V_{dc}}{2} \tag{2.2}$$

$$V_{f3} = T_3 \frac{V_{dc}}{2} - (1-T_3) \frac{V_{dc}}{2} \tag{2.3}$$

Avec : $T_i = 1$ si T_i est fermé

$T_i = 0$ si T_{i+3} est fermé

$i = 1$ à 3.

2.2.2. Description d'un onduleur triphasé à quatre bras

Dans cette topologie, nous utilisons un onduleur comprenant quatre bras constitués de huit interrupteurs réversibles en courant comme l'illustre la figure 2.3. Cette configuration a été proposée afin d'éviter le recours à un élément de stockage à point milieu comme celle de la configuration précédente.

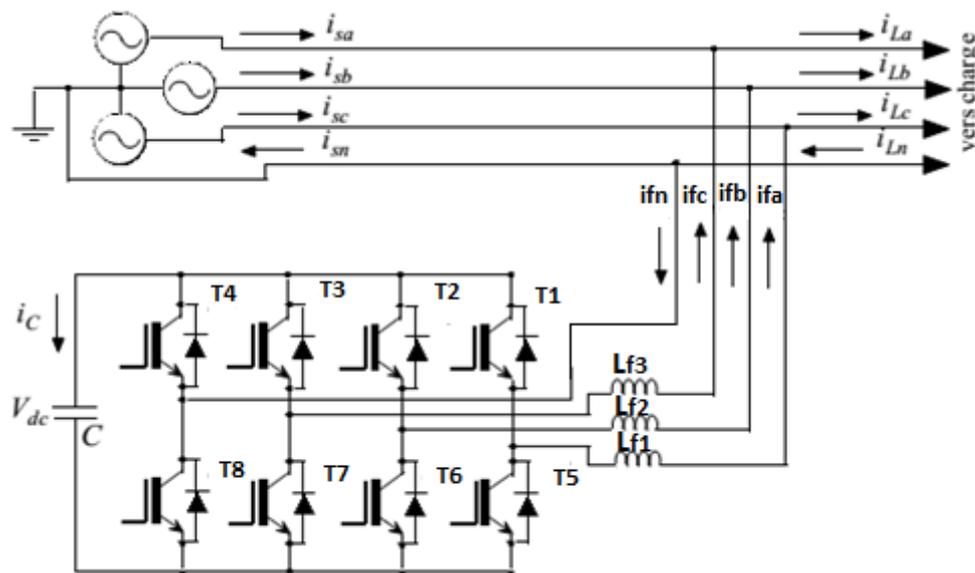


Fig. 2.3 Filtre actif parallèle à quatre bras pour un réseau triphasé à quatre fils. [8]

Les états de commutation pour ce type d'onduleur sont présentés dans le tableau 2.2. Ils sont obtenus grâce aux expressions suivantes [6] :

$$V_{f1} = (T_1 - T_4)V_{dc} \tag{2.4}$$

$$V_{f2} = (T_2 - T_4)V_{dc} \tag{2.5}$$

$$V_{f3} = (T_3 - T_4)V_{dc} \tag{2.6}$$

Et

$$i_{dc} = T_1 i_1 + T_2 i_2 + T_3 i_3 - T_4 i_n \tag{2.7}$$

k	T₄	T₃	T₂	T₁	V_{f3}	V_{f2}	V_{f1}
0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	1	0	0	V_{dc}
2	0	0	1	0	0	V_{dc}	0
3	0	0	1	1	0	V_{dc}	V_{dc}
4	0	1	0	0	V_{dc}	0	0
5	0	1	0	1	V_{dc}	0	V_{dc}
6	0	1	1	0	V_{dc}	V_{dc}	0
7	0	1	1	1	V_{dc}	V_{dc}	V_{dc}
8	1	0	0	0	-V_{dc}	-V_{dc}	-V_{dc}
9	1	0	0	1	-V_{dc}	-V_{dc}	0
10	1	0	1	0	-V_{dc}	0	-V_{dc}
11	1	0	1	1	-V_{dc}	0	0
12	1	1	0	0	0	-V_{dc}	-V_{dc}
13	1	1	0	1	0	-V_{dc}	0
14	1	1	1	0	0	0	-V_{dc}
15	1	1	1	1	0	0	0

Tab 2.2 Tensions générées par l'onduleur de tension à quatre bras

2.2.3. Filtre de sortie

Le filtre de sortie est un filtre passif utilisé pour connecter l'onduleur de tension au réseau.

Il est dimensionné pour satisfaire les deux critères suivants :

- Assurer la dynamique du courant du filtre défini par :

$$\frac{d_{if}}{dt} = \frac{d_{ih}}{dt} \quad (2.8)$$

Où

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 [6].

Pour satisfaire ces deux conditions, on utilise un filtre de premier ordre, composé d'une inductance L_f avec une résistance interne R_f , une petite valeur de cette inductance 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. En négligeant la résistance de ce filtre de couplage on obtient :

$$\left(\frac{d_{if}}{dt}\right)_{max} = \frac{V_{fmax} - V_{smax}}{L_f} \quad (2.9)$$

Avec

V_{fmax} : La valeur maximale de la tension à l'entrée de l'onduleur

V_{smax} : La valeur maximale de la tension simple au point de raccordement du filtre

Pour des petites variations du courant du filtre, on obtient :

$$\left(\frac{\Delta_{if}}{\Delta T}\right)_{max} = \frac{V_{fmax} - V_{smax}}{L_f} \quad (2.10)$$

Avec $\Delta T = \frac{1}{f_{ond}}$: La période de variation du courant du filtre.

En supposant la variation maximale du courant du filtre égale à 25 % de la valeur maximale du courant du réseau, la valeur de l'inductance de couplage est donnée par [6]:

$$L_f = \frac{V_{fmax} - V_{smax}}{0.25 i_{smax} f_{ond}} \quad (2.11)$$

2.2.4. Système de stockage d'énergie

Le stockage de l'énergie du côté continu se fait souvent par un système de stockage capacitif représenté par les deux condensateurs qui jouent le rôle de deux sources de tension continue. Dans les applications de compensation d'harmoniques, une tension V_{dc} élevée améliore la dynamique du filtre actif, par ailleurs, le critère commun pour le choix de la capacité C_{dc} est en générale la limitation des ondulations de la tension continue. Ces ondulations sont d'autant plus élevées que les harmoniques à compenser sont de basses fréquences et d'amplitudes importante sou la capacité est faible. Un dimensionnement adéquat de la capacité peut-être établi à partir d'un courant type que doit générer le filtre actif, ceci n'est pas toujours facile à réaliser car on ne connaît pas souvent tous les harmoniques qu'on doit compenser, ainsi une méthode plus simple pour le dimensionnement consiste à calculer la capacité à partir du courant harmonique du rang le plus faible I_h [4].

$$C_{dc} = \frac{I_h}{\epsilon V_{dc} \omega_h} \quad (2.12)$$

Avec ϵ le taux d'ondulation admissible généralement 5% de V_{dc} et ω_h la pulsation du rang h .

2.3. Étude de la partie commande-contrôle

2.3.1. Détermination des courants harmoniques de référence

La charge polluante absorbe un courant constitué d'une composante fondamentale et de composantes harmoniques. Le but du filtrage actif est la génération de courants harmoniques de même amplitude mais en opposition de phase avec ceux absorbés par la charge. Ainsi, le courant absorbé au réseau sera sinusoïdal. Il est donc nécessaire d'identifier avec précision les courants harmoniques de la charge polluante.

Le choix de la méthode utilisée pour isoler la composante harmonique du courant de charge est un facteur déterminant quant aux performances obtenues par le filtre actif (précision, dynamique, ...) [5]. Parmi toutes les méthodes présentées dans la littérature, Dans sous mémoire nous avons étudié la méthode de puissances instantanées.

2.3.1.1. Présentation de la méthode de puissances instantanées

Cette méthode introduite par, exploite la transformation de Concordia de tensions simples et courants de ligne, afin de calculer les puissances réelle, imaginaire et homopolaire instantanées. Elle permet de transformer la composante fondamentale en une composante continue et les composantes harmoniques en composantes alternatives. Cette transformation

est nécessaire si nous voulons éliminer facilement la composante continue. Le principe de la méthode de puissances réelle, imaginaire et homopolaire instantanées est énoncé ci-dessous :

Soient respectivement les tensions simples et les courants de ligne d'un système triphasé avec homopolaire, $V_{an}(t)$, $V_{bn}(t)$, $V_{cn}(t)$ et $i_{ca}(t)$, $i_{cb}(t)$, $i_{cc}(t)$. La transformation de Concordia permet de ramener ce système triphasé des axes 1-2-3 aux axes α - β -0, comme le montre les deux relations suivantes [6] :

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \\ V_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & \frac{-1}{2} & \frac{-1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & \frac{-1}{2} & \frac{-1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \\ i_{cc} \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

La composante homopolaire de la tension source n'est pas nécessaire, nous pouvons écrire alors :

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & \frac{-1}{2} & \frac{-1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

Remarque : Il est à noter que le courant du neutre i_n et le courant homopolaire i_0 sont liés par la relation ci-dessous :

$$i_n = i_{ca} + i_{cb} + i_{cc} \quad (2.16)$$

$$i_0 = \frac{1}{\sqrt{3}} (i_{ca} + i_{cb} + i_{cc}) = \frac{1}{\sqrt{3}} i_n \quad (2.17)$$

Dans le repaire de Concordia, la puissance réelle et la puissance imaginaire sont données par la matrice suivante :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_\alpha & V_\beta \\ -V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

Donc :

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

Pour compenser les harmoniques de courants on applique le mode suivant :

$$p = \tilde{p} \text{ et } q = \tilde{q}$$

\tilde{p} et \tilde{q} : Composantes Alternatives de la puissance réelle et imaginaire respectivement.

$$\text{donc : } \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

Nous remarquons de ces équations que dans les expressions de i_α et de i_β la puissance homopolaire est absente.

Nous prenons :

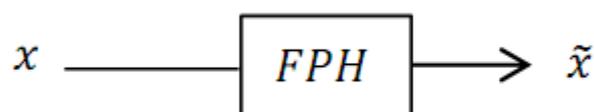
$$i_\alpha^* = i_\alpha, \quad i_\beta^* = i_\beta, \quad \text{et pour l'homopolaire : } i_0^* = i_0$$

Maintenant, il est aisé de remonter aux courants de référence par la transformation inverse de Concordia:

$$\begin{bmatrix} i_a^* \\ i_b^* \\ i_c^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha^* \\ i_\beta^* \\ i_0^* \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

2.3.1.2. Filtres d'extraction

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



-a- Filtre Passe Haut.



-b- Filtre Passe Bas.

Fig 2.4 Filtres d'extraction.

Comme cela est exposé dans la littérature, ces filtres d'extraction permettent d'obtenir une élimination plus ou moins satisfaisante de la composante continue, car leurs caractéristiques concernant le résidu harmonique sont différentes. Ils n'ont pas donné entière satisfaction car :

-Pour obtenir une extraction satisfaisante, le régime dynamique est lent. En générale, la fréquence de coupure est choisie assez basse, entre 5 Hz et 35 Hz, ce qui engendre alors une instabilité du filtre actif lors de variations rapides de la charge.

- Dans le cas contraire, si l'on choisit une fréquence de coupure plus élevée, la précision de la détermination de la composante alternative est altérée et peut s'avérer insuffisante [6].

2.3.1.3. Schémas d'identification par la méthode de puissances instantanées

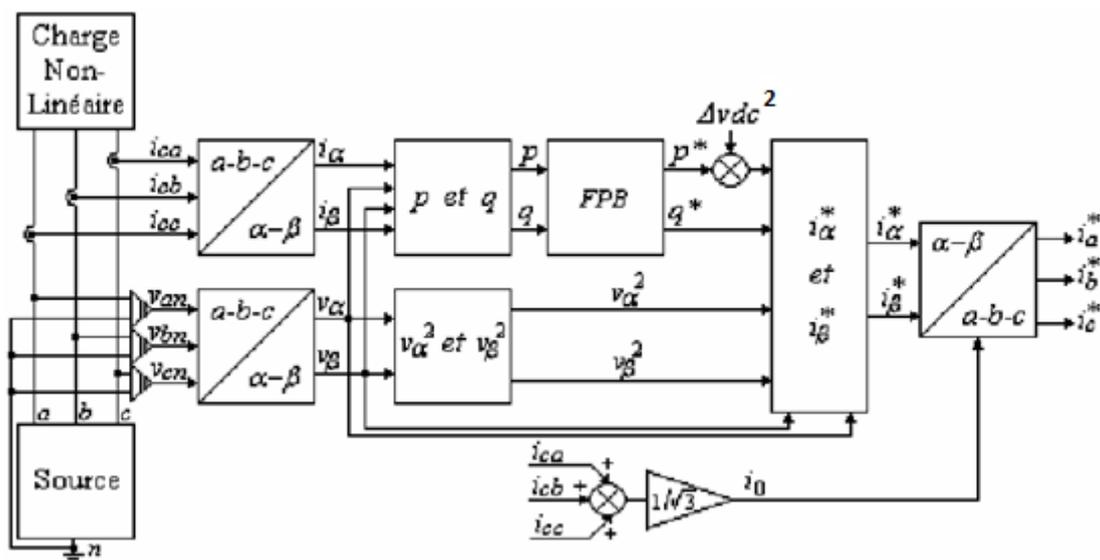


Fig 2.5 Identification par la méthode des puissances instantanées [8]

2.3.2. Régulation de la tension continue

La source d'alimentation du filtre n'est pas une source de tension autonome mais une capacité qui se charge et se décharge. La tension aux bornes de cette dernière n'est pas constante, à cause de sa sensibilité aux échanges de puissance active entre la charge polluante et le réseau.

Les pertes dans les composantes de puissance font aussi varier la tension aux bornes de la capacité, d'où la nécessité de réguler cette tension de la maintenir à un niveau constant.

Les principales causes susceptibles de modifier cette tension sont [6] :

- Les pertes dans le filtre actif,
- L'injection des courants fondamentaux pendant les régimes transitoires de la charge polluante,
- Les pertes de commutation et par conduction des interrupteurs de puissance,
- Les pertes par effet Joule dans les composantes passifs L et C.

Afin d'assurer le rôle de source de tension continue, une régulation de cette tension est nécessaire [6]. Pour cela, nous pouvons utiliser un régulateur PI. Si nous négligeons les pertes au niveau de l'onduleur et dans le filtre de sortie, la relation entre la puissance absorbée par le condensateur et la tension à ses bornes peut s'écrire sous la forme suivante :

$$P_{dc} = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} C_{dc} V_{dc}^2 \right) \quad (2.22)$$

Appliquons la transformation de Laplace sur cette relation, nous obtenons :

$$P_{dc}(s) = \frac{1}{2} s C_{dc} V_{dc}^2(s) \quad (2.23)$$

La tension aux bornes du condensateur est donnée par :

$$V_{dc}^2(s) = \frac{2P_{dc}(s)}{C_{dc}(s)} \quad (2.24)$$

A partir de la relation (2.24), et en tenant compte du régulateur PI, la boucle de régulation de tension continue peut être représentée par la figure 2.6. Le choix des paramètres K_{pdc} et K_{idc} aura pour objectif d'obtenir un temps de réponse minimal afin de ne pas nuire la dynamique du filtre actif.

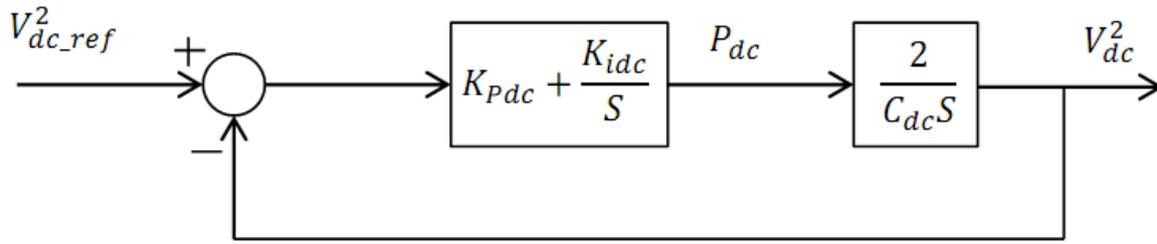


Fig 2.6 Boucle de régulation de la tension continue.

A partir de la figure 2.6, la fonction de transfert représentant la régulation en boucle fermée de la tension continue est donnée par :

$$G_{BF} = \frac{(1 + \frac{k_{pdc}}{k_{idc}}s)}{s^2 + 2\frac{k_{pdc}}{C_{dc}}s + 2\frac{k_{idc}}{C_{dc}}} \quad (2.25)$$

Comparant cette équation avec la forme générale d'une fonction de transfert de deuxième ordre, on trouve:

$$k_{idc} = \frac{1}{2} C_{dc} \omega_c^2 \quad \text{tel que : } \omega_c = 2\pi f_c \quad \text{et} \quad k_{pdc} = \xi \sqrt{2C_{dc} K_{idc}} \quad (2.26)$$

2.3.3. Contrôle de l'onduleur par hystérésis

La commande conventionnelle par hystérésis est très couramment utilisée de par sa simplicité d'utilisation et sa robustesse. En fait, cette stratégie assure un contrôle satisfaisant du courant sans exiger une connaissance poussée du modèle du système à contrôler ou de ses paramètres. La figure 2.7 expose son principe qui consiste à établir dans un premier temps le signal d'erreur, différence entre le courant de référence i_a^* et le courant produit par l'onduleur i_a .

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 [7].

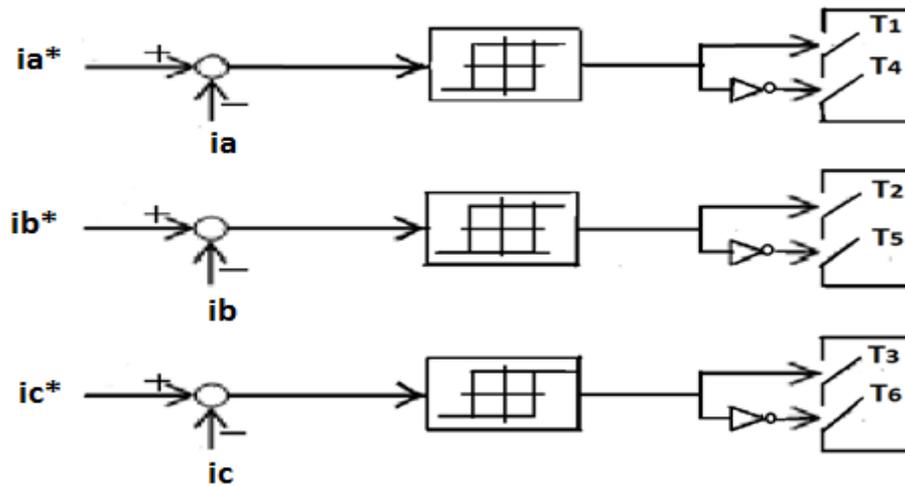


Fig 2.7 Principe de la commande par hystérésis.

Conclusion

Nous avons présentes dans ce chapitre la définition et la structure de filtre actif parallèle à quatre fils, cette structure partagée à deux parties qui sont la partie de puissance et la partie de commande-contrôle, la partie de puissance est représentée par l'onduleur de tension, le système de stockage d'énergie et le filtre de sortie, et la deuxième partie qui est la commande-contrôle représentée par la commande d'onduleur, la régulation de la tension continue et l'identification des courants perturbés, plusieurs méthodes commandent sur l'onduleur, dans ce chapitre nous choisissons la commande par hystérésis.

Chapitre n°III

**SIMULATION L ENSEMBLE RESEAU,
CHARGE POLLUANTE ET FAP 3N**

Introduction :

Un système d'électronique de puissance est un ensemble de conversion d'énergie qui contient les organes suivants :

- Source d'énergie.
- Convertisseur statique.
- Charge réceptrice.
- Dispositif de commande du convertisseur.

Il est caractérisé par la non linéarité des semi-conducteurs constituant le convertisseur et par la présence de sous-ensembles à la fois hétérogènes et fortement interdépendants.

L'étude analytique de ce système est difficile et ne peut être menée, pour un point de fonctionnement donné, qu'avec des hypothèses simplificatrices importantes. C'est pour cette raison que la simulation numérique est devenue l'outil indispensable de l'étude de ces systèmes.

Dans ce chapitre on propose d'étudier la simulation de l'ensemble réseau, et trois charges monophasées non identiques alimentée par un gradateur monophasé, et deux redresseurs monophasés, et avec le filtre actif parallèle à quatre fils sous l'environnement Matlab-Simulink. On donne ensuite les résultats de simulations obtenus. Dans Cette étude on va utiliser la méthode de puissances instantanées et nous utilise onduleur triphasé à trois bras avec condensateurs à point milieu et pour la commande de l'onduleur nous choisissons la commande par hystérésis.

3.1. Schéma de simulation

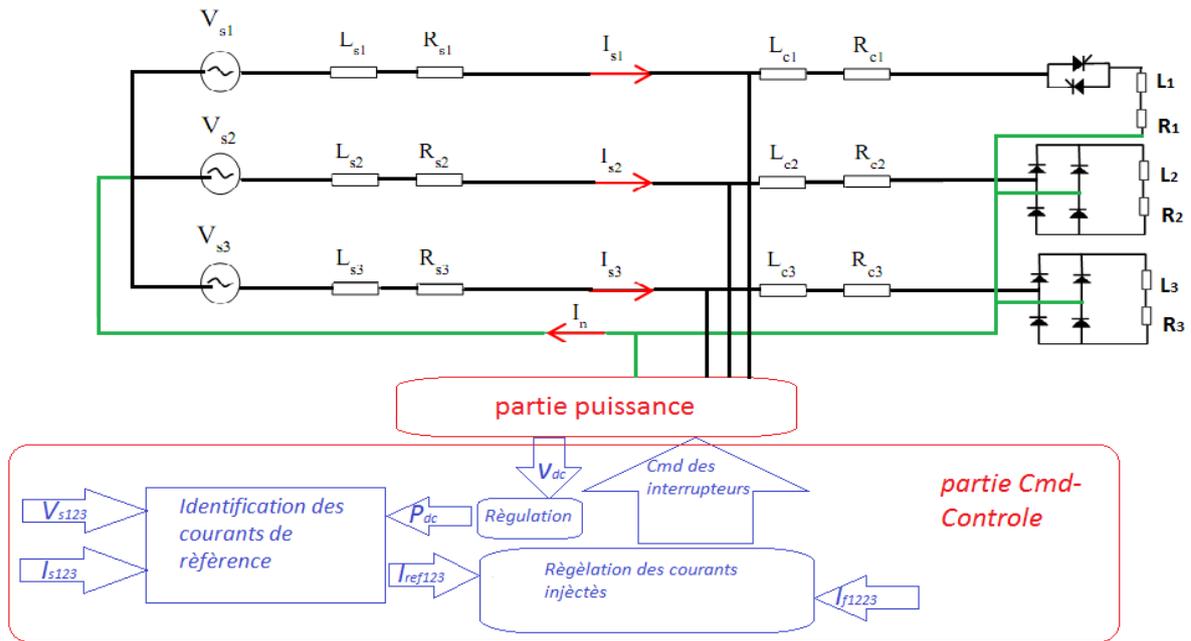


Fig.3.1 Filtrage AP d'un réseau triphasé à quatre fils alimentant trois charges non-linéaires.

3.2. Résultat de simulation sous Matlab-Simulink

3.2.1. Paramètres de la simulation

Pour simulation la modèle de l'association filtre actif-réseau-charge polluante du la figure(3.1) sous Matlab-Simulink, on a utilisé les paramètres suivant :

Les valeurs par phase de ces paramètres sont présentées au tableau ci-dessous.

$V_s[V]$	$f[Hz]$	$L_s[mH]$	$R_s[\Omega]$	$R_c = [m\Omega]$	$L_c = [mH]$
220	50	2.3	0.42	1	1

Tab.3.1 Paramètres du système étudié.

Les paramètres des charges déséquilibrées sont:

- Une charge inductive ($R_{d1} = 18 \Omega$ et $L_{d1} = 0.044$) alimentée par un gradateur monophasé, connectée entre la phase une et le neutre. L'angle d'amorçage est 60° .
- Une charge inductive ($R_{d2} = 28 \Omega$ et $L_{d2} = 0.09$) alimentée par un pont redresseur à diode monophasé, connectée entre la phase deux et le neutre.

- Une charge inductive ($R_{d3}= 30 \Omega$ et $L_{d3} = 0.09$) alimentée par un pont redresseur à diode monophasé, connectée entre la phase trois et le neutre.

Pour les paramètres du FAP nous prenons : $L_f = 3mH$, $C_{dc1} = C_{dc2} = 11mF$,

$$V_{dc1} = V_{dc2} = 400V$$

Pour le régulateur PI de tension : $k_{pdc} = 0.09$, $k_{idc}=0.7$

Et pour la largeur de la bande d'hystérésis : $\Delta I= \pm 20 mA$

3.2.2. Courbes de simulation

3.2.2.1. Les courbes avant filtrage

-Phase 1

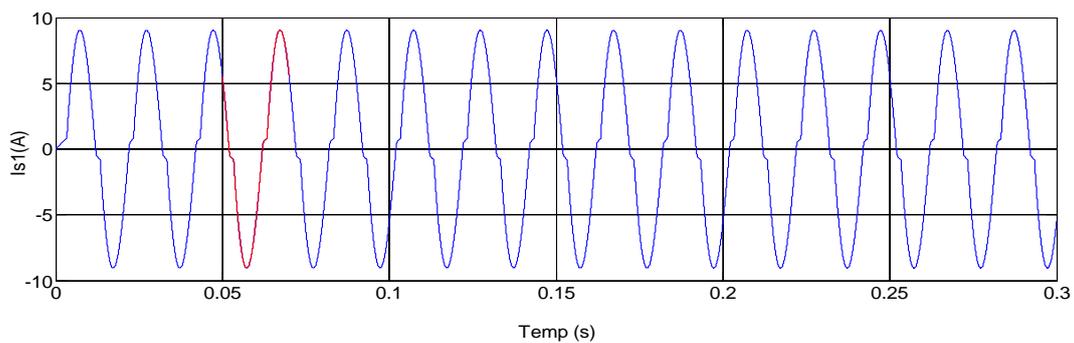


Fig.3.2 Courant de la source (phase 1 avant filtrage).

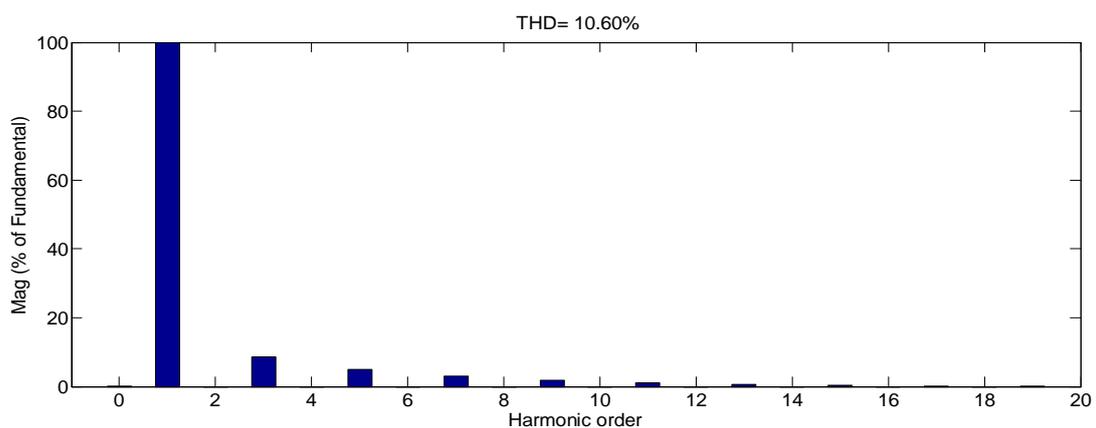


Fig.3.3 Spectre d'harmonique (phase 1 avant filtrage).

Dans phase 1 le taux de distorsion d'harmonique a été mesurée pour une période (colorés en rouge) , nous remarquons le THD 10.60 %.

-Phase 2 :

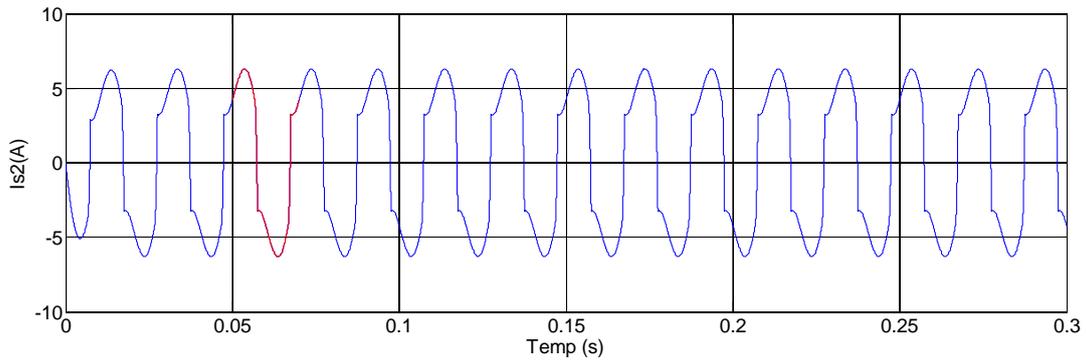


Fig.3.4 Courant de la source (phase 2 avant filtrage).

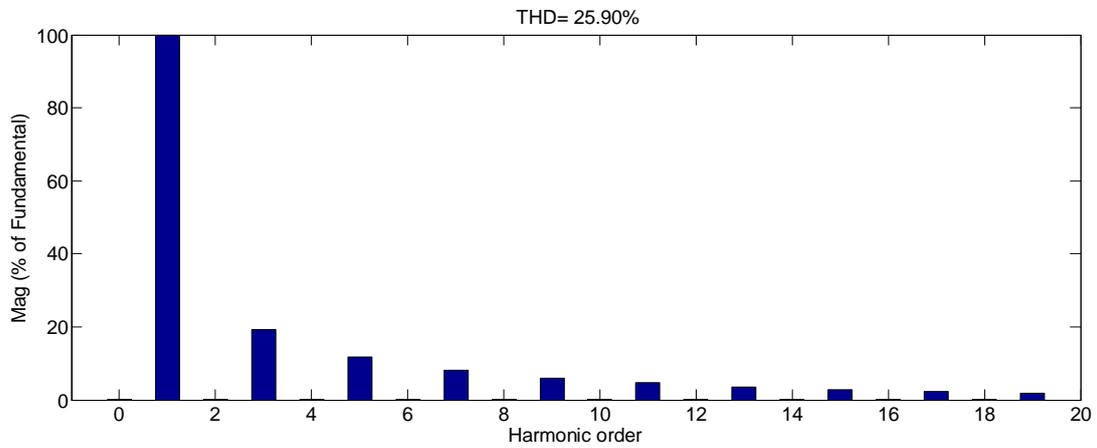


Fig.3.5 Spectre d'harmonique (phase 2 avant filtrage).

Dans phase 2 le taux de distorsion d'harmonique a été mesurée pour une période (colorés en rouge) , nous remarquons le THD 25.90 %.

-Phase 3 :

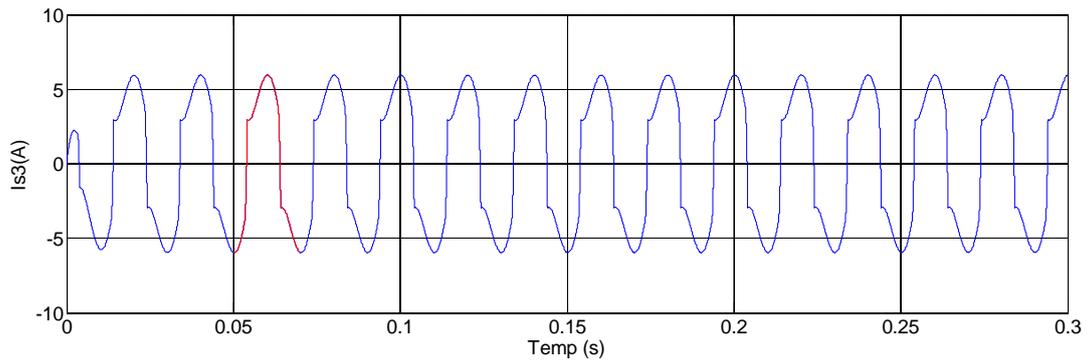


Fig.3.6 Courant de la source (phase 3 avant filtrage).

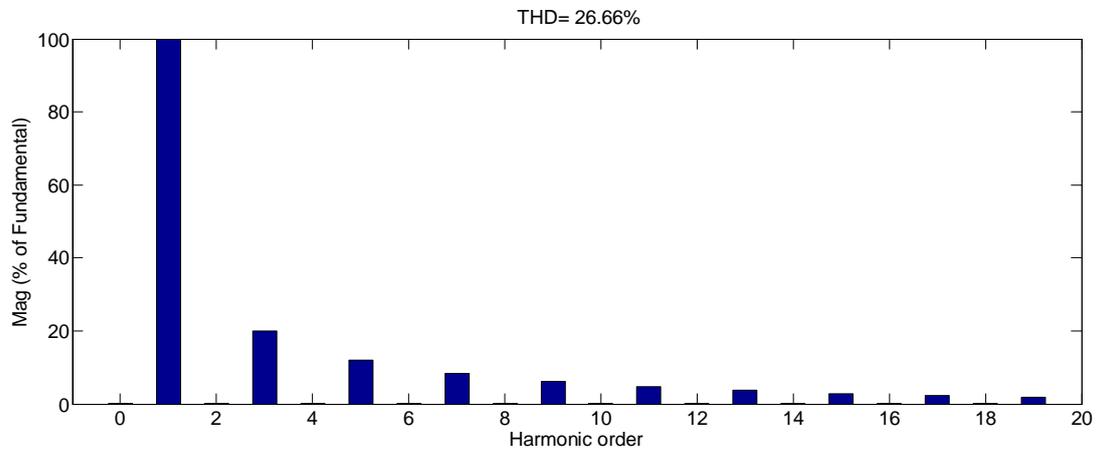


Fig.3.7 Spectre d'harmonique (phase 3 avant filtrage).

Dans phase 3 le taux de distorsion d'harmonique a été mesurée pour une période (colorés en rouge) , nous remarquons le THD 26.66 %.

-Phase de neutre :

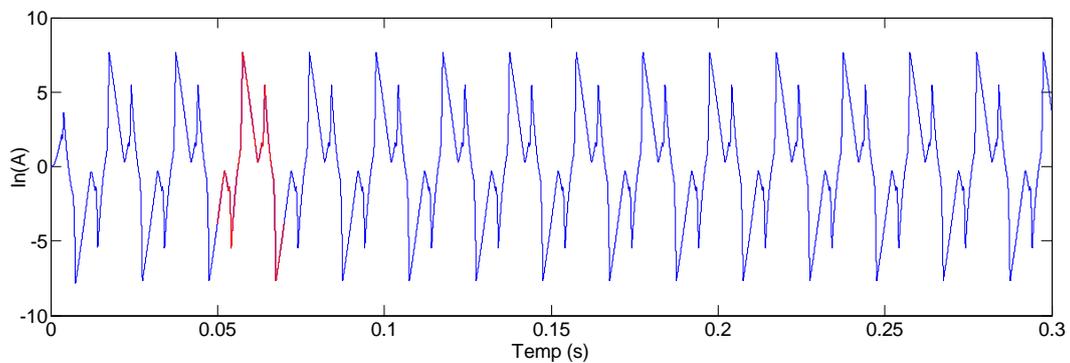


Fig.3.8 Courant du neutre (avant filtrage)

3.2.2.2. Les courbes après filtrage

- Dans le temps ($t=0.1$ s) on injecte le courant de FAP.

-Phase 1 :

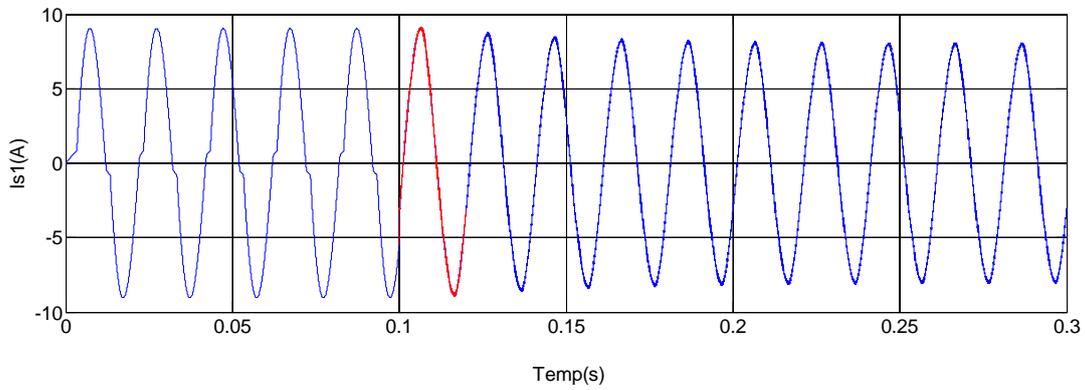


Fig.3.9 Courant de la source (phase 1 après filtrage)

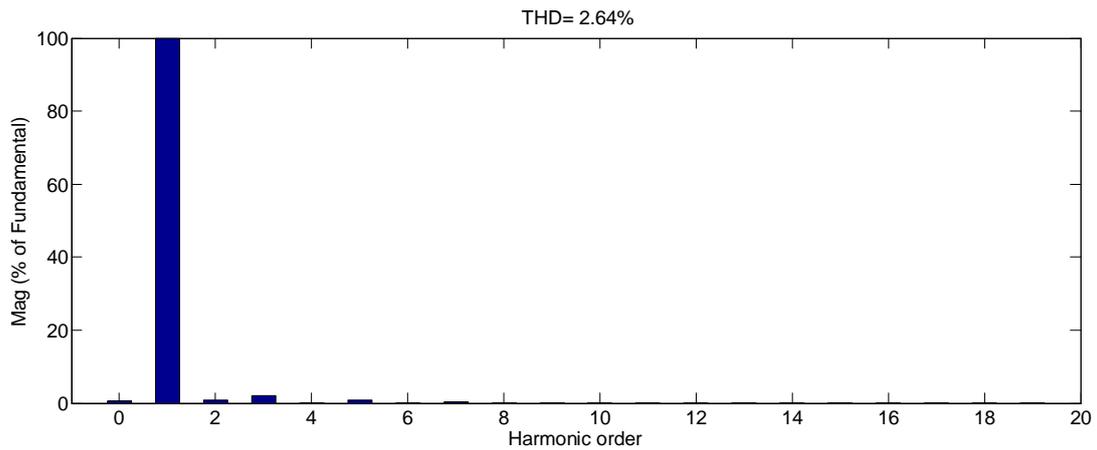


Fig.3.10 Spectre d'harmonique (phase 1 après filtrage).

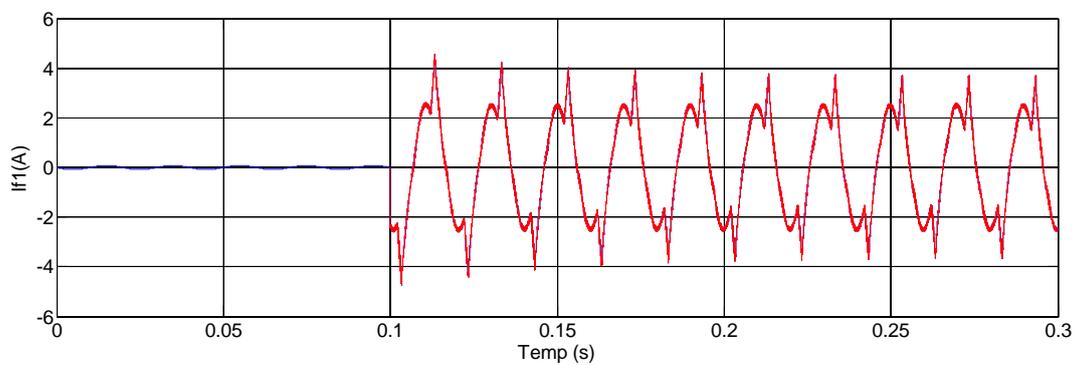


Fig.3.11 Courant injecté par le filtre (phase 1).

Dans phase 1 le taux de distorsion d'harmonique a été mesurée pour une période (colorés en rouge) , nous remarquons le THD 2.64 %.

-Phase 2 :

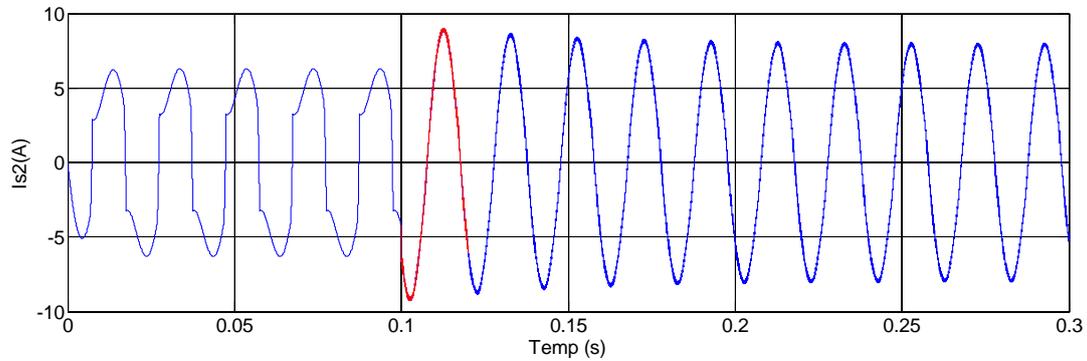


Fig.3.12 Courant de la source (phase 2 après filtrage).

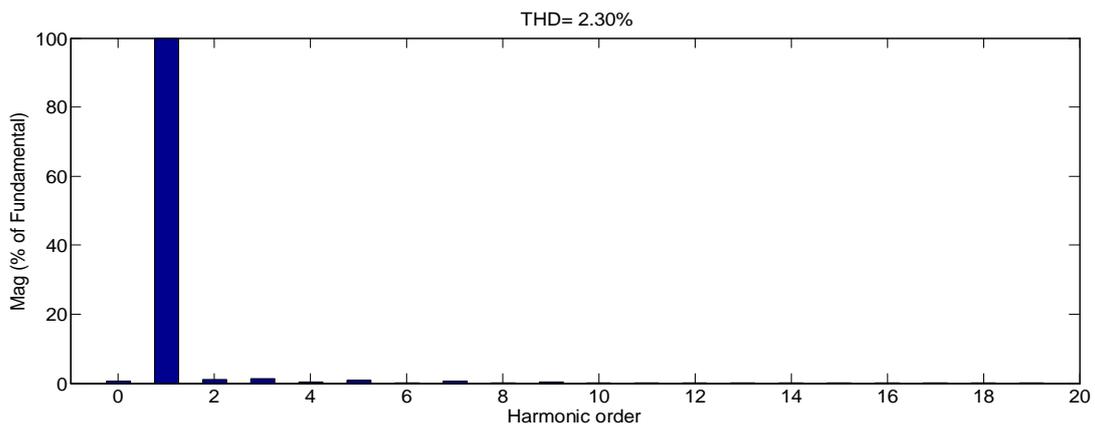


Fig.3.13 Spectre d'harmonique (phase 2 après filtrage).

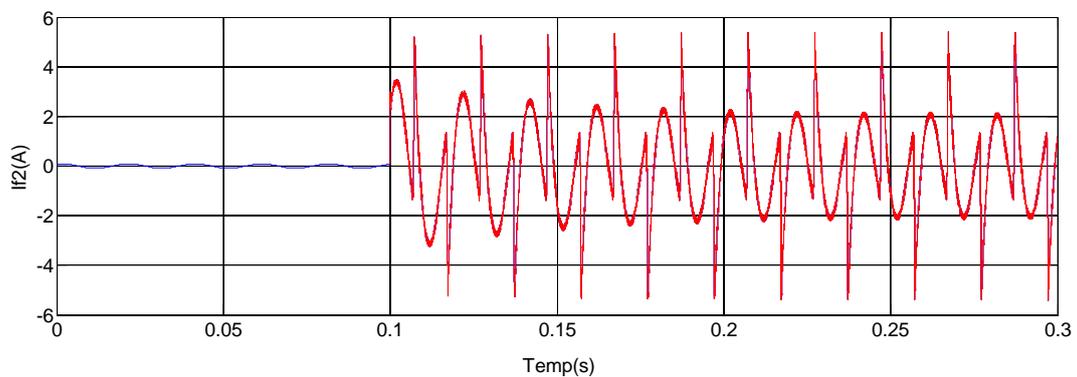


Fig.3.14 Courant injecté par le filtre (phase 2).

Dans phase 2 le taux de distorsion d'harmonique a été mesurée pour une période (colorés en rouge) , nous remarquons le THD 2.30 %.

-Phase 3 :

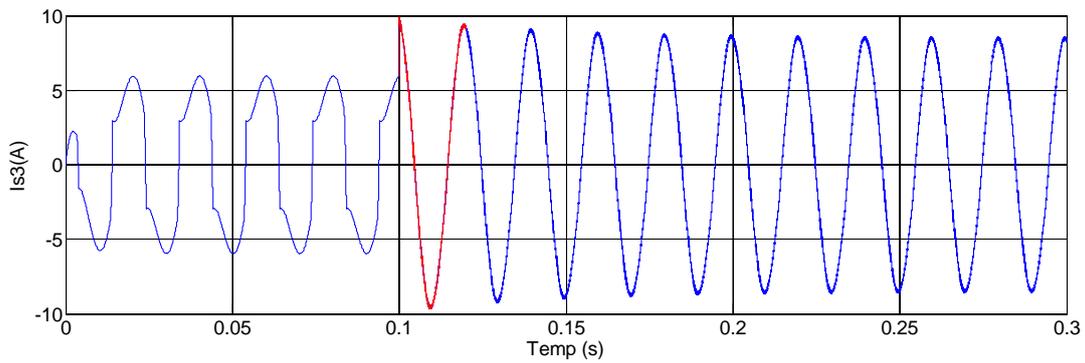


Fig.3.15 Courant de la source (phase 3 après filtrage).

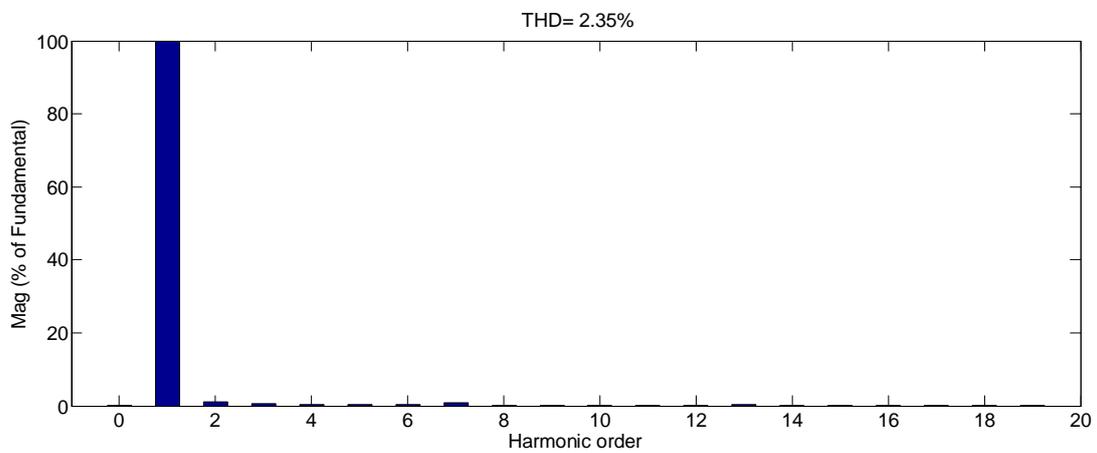


Fig.3.16 Spectre d'harmonique (phase 3 après filtrage).

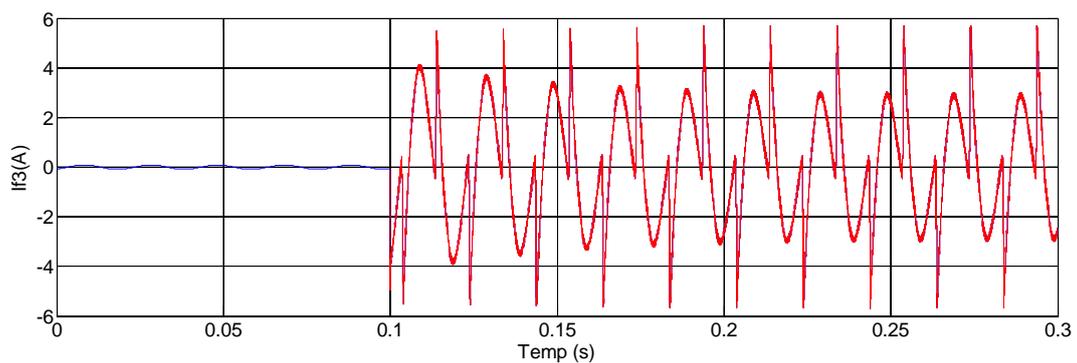


Fig.3.17 Courant injecté par le filtre(phase 3).

Dans phase 3 le taux de distorsion d'harmonique a été mesurée pour une période (colorés en rouge) , nous remarquons le THD 2.35 %.

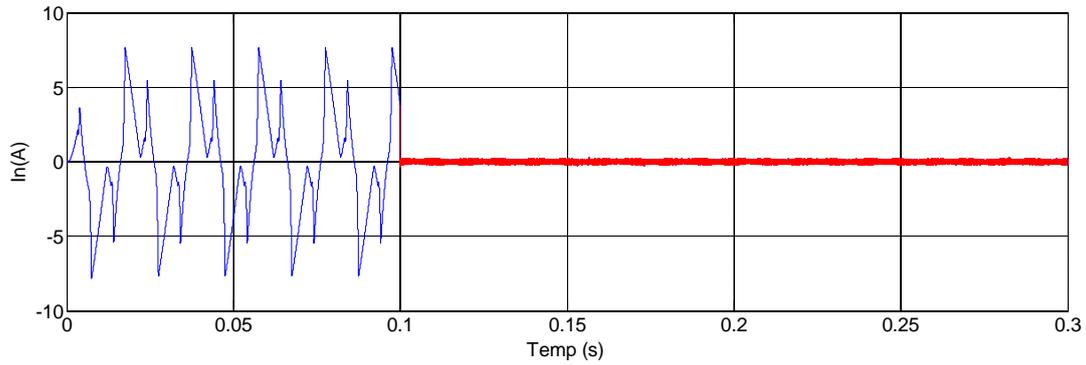
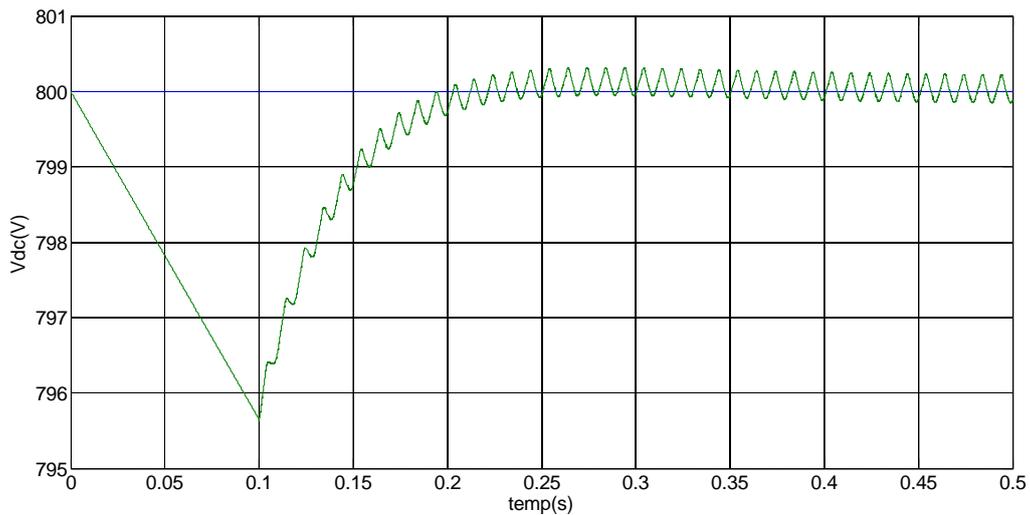
-Phase de neutre :

Fig.3.18 Courant du neutre (après filtrage)

- Dans la figure (3.18) Nous remarquons le courant du neutre devient nul après le filtrage.

-Tension aux bornes du condensateur :Fig.3.19 La tensions entre deux capacités C_{dc1} et C_{dc2} .

- Dans la figure (3.19) Nous remarquons la tension aux bornes du condensateur est régulée autour de sa référence.

Conclusion

D'après les résultats de simulation nous remarquons que :

- les courants du côté source sont sinusoïdaux presque dépourvus d'harmonique, et leurs THDs sont présentés dans le tableau suivant :

THD [%]	Phase1	phase2	phase3
THD [%] Avant filtrage	10.60	25.90	26.66
THD [%] Après filtrage	2.64	2.30	2.35

Tab.3.2- THDs des courants de source.

- le courant du neutre côté source devient nul après le filtrage.
- la tension aux bornes du condensateur est régulée autour de sa référence.

CONCLUSION GENERALE

Ce travail a été consacré à l'application et l'amélioration des performances d'un filtre actif shunt à quatre fils pour la l'amélioration de la Qualité de l'énergie.dans un réseau électrique basse tension avec distribution du fil neutre, avec comme objectif de maintenir un système de courants triphasé du côté de source sinusoïdal et équilibré ou en d'autres termes, découpler les perturbations causées par les charges non linéaire du réseau amont.

Dans le premier chapitre , après l'analyse théorique des perturbations harmoniques et leurs effets sur le réseau électrique, on a présenté les solutions traditionnelles pour les réduire, notamment le filtrage passif. Le filtrage actif est une nouvelle solution pour la dépollution harmonique.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présentes la définition et la structure de filtre actif parallèle à quatre fils, deux partie dans la structure du ce filtre, partie de puissance et la partie de commande-contrôle

Dans le troisième chapitre on propose d'étudier la simulation de l'ensemble réseau, et trois charges monophasées non identiques alimentée par un gradateur monophasé, et deux redresseurs monophasés, avec filtre actif parallèle à quatre fils sous l'environnement Matlab Simulink. D'après les résultats de simulation nous remarquons que les courants du coté source sont sinusoïdaux presque dépourvus d'harmonique et le courant du neutre coûté source est devenu nul, il est devenu pratiquement nul et la tension aux bornes du condensateur est régulée autour de sa référence.

Comme perspectives, et pour minimiser les oscillations à la sortie du bus continue, en remplace le régulateur PI par d'autres types de régulateurs, tel que les régulateurs adaptatifs et les régulateurs intelligents (neurones - floue - algorithmes génétiques - ANFIS).

BIBLIOGRAPHIE

- [1] N.bruyant, « Etude et commande généralisé de filtres actifs parallèle, compensation global on sélective des harmoniques, régime équilibré ».Thèse de doctorat de l'université de Nante,France,(1999).
- [2] KESSAL ABDELHALIM, Correction du Facteur de Puissance a L'entrée d'un Convertisseur AC/DC, Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbes Sétif, soutenance le 26/04/2012.
- [3] Abdelmalek BOULAHIA« Etude des Convertisseurs Statiques destinés à la Qualité de l'Energie Electrique». Mémoire de Magistère de l'Université de Constantine
- [4] Farid Hamoudi «Commande Robuste d'un FiltreActif Shunt `a Quatre Fils», Mémoire de Magistère de l'Université EL Hadj Lakhder Batna.
- [5] Mohamed Muftah ABDUSALAM, « Structures et stratégies de commande des filtres actifs parallèle et hybride avec validations expérimentales». Thèse de doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy-I
- [6] MAHNI Tidjani Stratégies de Commande d'un Filtre Actif Parallèle à Quatre Fils, Thèse de magistère, CENTRE UNIVERSITAIRE D'EL-OUED
- [7] M. M. ABDUSALAM, « Structures et Stratégies de Commande des Filtres Actifs Parallèle et Hybride avec Validations Expérimentales », Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré Nancy-I-France, 2008.
- [8] FARID HAMOUDI, «contribution aux stratégies de commande avancée d'un filtre actif shunt à quatre fils», Thèse de doctorat de l'Université EL Hadj Lakhder Batna