



République Algérienne Démocratique ET
Populaire



Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique

Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued
Faculté de Technologie

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

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologie
Filière : Électrotechnique
Spécialité : Commande électrique

Thème

Amélioration de la Qualité de l'Énergie Électrique par un Filtre Actif

Réalisé par :

- ✓ Embarek Hamaiti
- ✓ Abdelwahed Ghrib
- ✓ Aref Soufiane

Encadré :

Dr. Zellouma Laid
Dr. Bekakra Youcef

Comité de soutenance

Nom et Prénom	Grade	Université	Titre
Pr. Youcef BEKAKRA		Université Echahid Hamma Lakhdar El Oued	
Dr. Kechida Ridha		Université Echahid Hamma Lakhdar El Oued	
Dr. Mahni Tidjani		Université Echahid Hamma Lakhdar El Oued	

Mémoire préparé au sein du Laboratoire d'Exploitation et de Valorisation des

Ressources Énergétiques Sahariennes

Année Universitaire : 2023/2024



Remerciements

On peut être incapable de rendre la pareille aux gens de crédit, et les méthodes d'expression peuvent ne pas suffire

Exprimons notre gratitude et notre reconnaissance

Grâce et louange à Dieu et ce qui devrait être pour la gloire de ton visage et la grandeur de ta puissance

Et d'après les paroles du Messager de Dieu, que les prières et la paix de

Dieu soit sur lui

" Celui qui ne remercie pas les gens ne remercie pas Dieu"

Nous adressons nos plus vifs remerciements et notre reconnaissance à tous ceux qui nous ont aidés, de près ou de loin, à accomplir ce travail, notamment :

Le professeur superviseur qui a suivi l'encadrement de cette recherche bloc après bloc et lui a apporté des soins et des soins que la langue ne puisse répondre à l'effort qu'il a fait avec nous et au temps précieux qu'il a

Consacré à la réalisation de ce travail.

Nous adressons également nos sincères remerciements à tous ceux qui nous ont aidés par leurs conseils et leurs orientations et nous ont informés alors qu'il était présent en son absence en sa présence dans l'achèvement de ce travail.



Dédicace

À mes chers parents,
Merci pour votre soutien inébranlable, vos encouragements constants et votre amour infini. Sans vous, ce travail n'aurait jamais été possible.

À mes professeurs et mentors,
Votre sagesse, votre patience et votre guidance m'ont inspiré et m'ont aidé à surmonter les défis académiques. Je suis profondément reconnaissant pour tout ce que vous m'avez appris.

À mes amis,
Merci pour votre camaraderie et votre soutien moral tout au long de ce voyage. Vos encouragements ont été une source inestimable de motivation.

À tous ceux qui ont contribué, directement ou indirectement, à la réalisation de ce travail, Votre aide et votre soutien sont profondément appréciés.

Avec toute ma gratitude.

[Embarek Hamaiti]



Dédicace

À ma famille,
À vous qui avez été mes piliers tout au long de ce parcours, je dédie cette mémorable étape de ma vie. Votre amour, votre soutien et votre compréhension ont été mes plus grandes motivations.

À mes professeurs et encadrants,
Votre dévouement et vos conseils éclairés ont illuminé mon chemin vers le succès académique. Je vous suis reconnaissant pour votre patience et votre expertise.

À mes amis précieux,
Merci d'avoir partagé avec moi cette aventure, ponctuée de rires, de défis et de souvenirs inoubliables. Votre amitié a rendu cette expérience encore plus précieuse.
À toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce projet.

Votre collaboration et votre appui ont été d'une importance capitale. Je vous adresse mes plus sincères remerciements.

Avec toute ma reconnaissance,

[Abdelwahed Ghrib]



Dédicace

À mes parents adorés,
Vous qui avez toujours cru en moi et m'avez encouragé à
poursuivre mes rêves, je vous offre ce modeste
accomplissement en signe de gratitude pour tout ce que
vous avez sacrifié pour moi.

À mes chers amis,
Vos rires, vos encouragements et votre présence ont
illuminé les jours sombres et ont rendu les moments de
joie encore plus joyeux. Ce travail est également le vôtre,
car vous avez été une partie intégrante de ce voyage.

À mes enseignants et mentors,
Votre passion pour l'enseignement, votre engagement et
votre dévouement ont nourri ma soif de connaissance et
ont façonné ma compréhension du monde. Je vous suis
profondément reconnaissant pour votre guidance.

À toutes les âmes qui ont croisé ma route,
Qu'elles aient été des guides, des compagnons de route
ou des inspirations silencieuses, je vous adresse mes
remerciements les plus sincères.

Avec tout mon amour et ma gratitude infinie.

[Aref Soufiane]

Sommaire

Sommaire

REMERCIEMENTS

DEDICACE

SOMMAIRE

LISTES DE SYMBOLES

LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES

RESUME

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE : 1

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES PERTURBATIONS DES RESEAUX ELECTRIQUES

I.1. INTRODUCTION : 2

I.2 PERTURBATION ELECTRIQUE : 2

I.2.1 Creux et Coupures de Tension : 2

I.2.2 Fluctuations des Tensions : 3

I.2.3 Déséquilibre du Système Triphasé de Tension : 3

I.2.4 Variation de Fréquence : 4

I.2.5 Harmonique et inter Harmonique : 5

I.2.5.1 Source d'Harmonique : 5

I.2.5.2 Conséquence Néfastes des Harmoniques..... 6

I.3 CONCLUSION : 7

CHAPITRE II : SOLUTIONS PROPOSEES POUR L'ELIMINATION DES HARMONIQUES

II.1 INTRODUCTION : 9

II.2 GRANDEURS CARACTERISTIQUES : 9

II .2.1 Grandeur Harmonique : 9

II.2.2 Rang de l'Harmonique : 9

II.2.3 Série de Fourier : 10

II.2.4 Valeur Efficace d'une Grandeur Alternative : 10

II.2.5 Taux de Distorsion : 10

II.2.6 Facteur de Puissance :	12
II.2.7 Spectre d'Harmonique (de fréquence) :	12
II.2.8 Charges Linéaires et non Linéaires :	12
<i>II.3 INFLUENCE DES HARMONIQUES SUR LE FACTEUR DE PUISSANCE FP :</i>	<i>13</i>
<i>II.4 NORMES ET REGLEMENTATION DE PERTURBATION :</i>	<i>14</i>
<i>II.5 LES SOLUTIONS TRADITIONNELLES :</i>	<i>16</i>
II.5.1 Compensation des Courants Harmoniques :	16
II.5.1.1 Surdimensionnement ou Déclassement de l'Installation Electrique :	16
II.5.1.2 Transformateurs à Couplage Spécial :	16
II.5.1.3 Inductances (Selfs) Série.....	17
II.5.1.4 Filtre Passif :	17
II.5.2 Compensation de la Puissance Réactive :	17
II.5.3 Rééquilibrage des Courants du Réseau Electrique :	17
II.5.4 Agir sur la Structure de l'Installation :	17
II.5.5 Pont Dodécaphasé :	18
<i>II.6 SOLUTIONS MODERNES DE DEPOLLUTION :</i>	<i>18</i>
II.6.1 Filtrage Actif :	19
II.6.1.1 Filtre Actif Parallèle :	19
II.6.1.2 Filtre Actif Série :	19
II.6.1.3 Combinaison Parallèle Série Actif :	20
II.6.2 Filtrage Hybride :	20
II.6.2.1 Association Série d'un Filtre Actif Parallèle et d'un Filtre Passif :	21
II.6.2.2 Association Parallèle d'un Filtre Actif Parallèle et d'un Filtre Passif :	21
II.6.2.3 Association d'un Filtre Actif Série et d'un Filtre Passif :	22
II.6.3 Les Redresseurs MLI :	22
II.6.3.1 Redresseur de Tension :	23
II.6.3.2 Redresseur de Courant :	23

<i>II.7 CONCLUSION :</i>	24
CHAPITRE III : TECHNIQUES D'EXTRACTION DES COURANTS HARMONIQUES	
<i>III.1 INTRODUCTION :</i>	26
<i>III.2 METHODE DES PUISSANCES ACTIVE ET REACTIVE INSTANTANEEES :</i>	26
<i>III.3 METHODE DU REFERENTIEL SYNCHRONE (SRF) :</i>	29
<i>III.4 METHODE DU FILTRE NOTCH :</i>	31
<i>III.5 METHODE BASEE SUR LE FILTRE MULTI VARIABLE (FMV) :</i>	32
<i>III.6 COMPARAISON ENTRE LES METHODES D'IDENTIFICATION DES COURANTS :</i>	34
<i>III.7. LA REGULATION :</i>	34
III.7.1. Régulation de la Tension Continue :	34
<i>III.8 CONCLUSION :</i>	35
CHAPITRE IV : MODELISATION ET SIMULATION NUMERIQUE	
<i>IV -1 INTRODUCTION :</i>	37
<i>IV-2 SCHEMA SYNOPTIQUE DE L'ASSOCIATION FILTRE ACTIF- RESEAU-CHARGE POLLUANTE :</i>	37
<i>IV-3 MODELISATION DE L'ASSOCIATION RESEAU –FILTRE ACTIF – CHARGE POLLUANTE :</i>	39
IV -3-1 Modélisation du Réseau :	39
IV-3-2 Modélisation de la Charge Polluante (Redresseur Triphasé) :	39
IV-3-3 Modélisation du Filtre Actif :	40
IV -3-3-1 Fonction de Connections :	40
IV.3.3.c Fonctions de Connexions Composées :	41
IV.3.3.d Les Fonctions de Conversions Simples:	41
<i>IV-4 DESCRIPTION GLOBALE DE LA SIMULATION :</i>	42
<i>IV.5 RESULTATS DE SIMULATION :</i>	42
IV.5.1.2 Compensation des courants harmoniques et de la puissance réactive :	45
IV.5.1 Comportement du FAP en Régime Dynamique :	45
IV.5.2 Interprétations des Résultats :	46
IV.5.2.1En Régime Permanent :	46
IV.5.2.2 En Régime Dynamique :	47
<i>IV. 6CONCLUSION :</i>	47

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE :48

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE.....49

Listes de Symboles

Listes de Symboles

Acronymes	Le sens
THD	Taux de Distorsion Harmonique
S	La puissance apparente
P	La puissance active
Q	La puissance réactive
D	La puissance déformante
FP	Le facteur de puissance
V_{dc}	Tension aux bornes du condensateur de l'onduleur
FPB	Filtre passe bas
FPH	Filtre passe haut
FAP	Filtre actif parallèle.
FAS	Filtre actif série.
MLI	Modulation en largeur d'impulsions
IGBT	Le transistor bipolaire à grille isolée, en anglais Insulated Gate Bipolar Transistor.
V_s	Tensions de source
I_s	Courants de source
I_{inj}	Courants harmoniques injectés par FAP
C	Capacité
L	Inductance
R	Résistance

Liste des Tableaux et Figures

Liste des figures

FIGURE I.1 : CREUX DE TENSION.....	3
FIGURE I.2 : DESEQUILIBRES DU SYSTEME TRIPHASE DE TENSION	4
FIGURE I.3 : VARIATION DE LA FREQUENCE.....	5
FIGURE I.4 : FONDAMENTAL ET INTER-HARMONIQUES.....	5
FIGURE I.5 : HARMONIQUES.....	6
FIGURE II.1 : DECOMPOSITION D'UN SIGNAL PERIODIQUE.....	9
FIGURE II.2 : LE SPECTRE HARMONIQUE DU COURANT DE CHARGE POLLUANTE.	12
FIGURE II.3 : DIAGRAMME DE FRESNEL DES PUISSANCES.....	13
FIGURE II .4 : FILTRE ACTIF PARALLELE.....	19
FIGURE II .5 : FILTRE ACTIF SERIE.....	20
FIGURE II.6 : FILTRE ACTIF MIXTE SERIE-PARALLELE (UPQC).	20
FIGURE II.7 : FILTRE ACTIF SERIE CONNECTE EN SERIE AVEC DES FILTRES PASSIF PARALLELES.	21
FIGURE II.8 : FILTRE ACTIF PARALLELE AVEC UN FILTRE PASSIF PARALLELE.....	22
FIGURE II.9 : FILTRE ACTIF SERIE AVEC FILTRE PASSIF PARALLELE.....	22
FIGURE II.10 : LE SCHEMA DE PRINCIPE D'UN REDRESSEUR A MLI DE TENSION.....	23
FIGURE II.11 : TOPOLOGIE D'UN REDRESSEUR MLI TRIPHASE DE COURANT..	23
FIGURE III.1 : SCHEMA DE PRINCIPE DU FILTRE UTILISE POUR L'EXTRACTION DES COMPOSANTES ALTERNATIVES DE P ET Q LES COURANT HARMONIQUE TRIPHASES i^* (K=A , B, C) SONT OBTENUES A PARTIR DES COURANT DIPHASES.....	28
Figure III.2 : Algorithme d'extraction des courants de références par PIRL.....	29
FIGURE III.3 : SCHEMA DE PRINCIPE DE SEPARATION DES COMPOSANTES CONTINUES ET PULSATOIRES (HARMONIQUES).....	30
FIGURE III.4 : PRINCIPE D'IDENTIFICATION DES HARMONIQUES PAR LA METHODE SRF.	31
FIGURE III.5 : METHODE DU FILTRE COUPE-BANDE.....	32
FIGURE III.6 : SCHEMA BLOC DU FMV.....	33
FIGURE III.7 : BOUCLE DE REGULATION DE LA TENSION CONTINUE.....	35
FIGURE (IV-2) : SCHEMA SYNOPTIQUE D'UN RESEAU TRIPHASE.	39

FIGURE (IV -3) : SCHEMA SYNOPTIQUE D'UN PONT REDRESSEUR.	40
FIGURE (IV-4) : PRESENTATION SCHEMATIQUE D'UN ONDULEUR TRIPHASE..	40
FIGURE (IV.5) : COURANT DE SOURCE AVANT FILTRAGE	43
FIGURE (IV.6) : SPECTRE D'HARMONIQUE DU COURANT DE SOURCE AVANT FILTRAGE LE TAUX DE DISTORSION D'HARMONIQUE A ETE MESURE, THD= 22.31%	43
FIGURE(IV.7) : COURANT INJECTE PAR FILTRE.	43
FIGURE (IV.8) : COURANT DE SOURCE APRES FILTRAGE.	44
FIGURE(IV.9) : SPECTRE D'HARMONIQUE DU COURANT DE SOURCE APRES FILTRAGE	44
LE TAUX DE DISTORSION D'HARMONIQUE A ETE MESURE THD= 1.48%.....	44
FIGURE(IV.10) : LA TENSION CONTINUE V_{dc} APRES INSTALLATION FAP.	45
FIGURE (IV.11) : COURANT DE SOURCE i_s, COURANT INJECTE DANS FILTRE i_i , ET TENSION DE BUS CONTINU V_{dc}AVANT/APRES INSTALLATION DU FAP.....	45
FIGURE (IV.12) : COURANT DE SOURCE i_sAVANT/APRES INSTALLATION DU FAP .COURANT INJECTE PAR FILTRE i_i.....	46

Liste des Tableaux

TABLEAU (II .1) : CARACTERISTIQUES DE QUELQUES GENERATEURS D'HARMONIQUES.....	11
TABLEAU (II.2) : NIVEAU DE COMPATIBILITE POUR LES TENSIONS HARMONIQUES INDIVIDUELLES SUR LES RESEAUX ELECTRIQUES	16
TABLEAU (IV.2): LES RESULTATS DES SIMULATIONS.....	47

Résumé

Résumé :

Les développements récents dans divers domaines d'utilisation de l'énergie électrique, notamment dans l'électronique de puissance, ont entraîné une détérioration de la qualité de l'onde de courant fournie en raison de l'apparition d'harmoniques dans le transport et la distribution de l'énergie électrique sur le réseau. Cela a des effets néfastes sur les charges sensibles alimentées par le même réseau. Comme la présence de ces harmoniques est due à l'utilisation croissante de ces dispositifs polluants, leur traitement consiste à demander aux consommateurs pollueurs de réduire les niveaux d'harmoniques qu'ils injectent dans le réseau à des valeurs acceptables. De nombreuses solutions ont été adoptées pour éliminer ces harmoniques : le filtrage passif et le filtrage actif. L'utilisation du filtre actif est la plus efficace et la plus appropriée. Dans ce travail, nous nous sommes approchés du principe de fonctionnement du filtre actif. Nous avons examiné les différents types de ce filtre. Les algorithmes de filtrage actif ont été implémentés sur Matlab, notamment la méthode de la puissance active et réactive instantanée. Les résultats de la simulation des différents algorithmes utilisés sous l'environnement Matlab sont illustrés.

ملخص:

تسببت التطورات الأخيرة التي ظهرت في العديد من مجالات استخدام الطاقة الكهربائية، وخاصة في مجال إلكترونيات القوى في تدهور جودة الموجة الحالية المزودة بسبب ظهور التوافقيات في نقل وتوزيع الطاقة الكهربائية الشبكة، وبالتالي لها آثار ضارة على الأحمال الحساسة التي توفرها نفس الشبكة. نظرًا لأن وجود هذه التوافقيات يرجع إلى الاستخدام المتزايد لهذه الأجهزة الملوثة، فإن معالجتها ترقى إلى مطالبة المستهلكين الملوثين بتقليل مستويات التوافقيات التي يضحونها في الشبكة إلى قيم مقبولة تم اعتماد العديد من الحلول للتخلص من هذه التوافقيات: التصفية السلبية والتصفية النشطة. استخدام المرشح النشط هو الأكثر كفاءة وملاءمة. في هذا العمل اقتربنا من مبدأ تشغيل المرشح النشط. لقد نظرنا إلى أنواعهم المختلفة من هذا الفلتر. تم تنفيذ خوارزميات التصفية النشطة على MATLAB ، طريقة القدرة النشطة والمتفاعلة اللحظية. كما تم توضيح نتائج المحاكاة في ظل بيئة MATLAB للخوارزميات المختلفة المستخدمة.

Abstract:

Recent developments in various fields of electrical energy use, particularly in power electronics, have led to a deterioration in the quality of the current waveform supplied due to the appearance of harmonics in the transmission and distribution of electrical energy across the grid. This has harmful effects on the sensitive loads provided by the same network. Since the presence of these harmonics is due to the increasing use of these polluting devices, addressing them involves requiring polluting consumers to reduce the levels of harmonics they inject into the network to acceptable values. Several solutions have been adopted to eliminate these harmonics: passive filtering and active filtering. The use of active filters is the most efficient and appropriate. In this work, we approached the principle of operation of the active filter. We examined the different types of this filter. Active filtering algorithms were implemented on Matlab. The simulation results under the Matlab environment for the different algorithms used are illustrated.

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].

Les harmoniques générées par les charges non linéaires circulent dans les réseaux électriques. 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 à des effets néfastes peuvent apparaître instantanément ou se produire en différé, 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 peuvent perturber le fonctionnement normal de certains équipements électriques ou bien encore à l'arrêt soudain de machines tournantes. Les limites proposées ont été établies par les normes de la commission internationale d'électrotechnique IEC61000, et par les recommandations IEEE Std 519-1992 [2].

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 traditionnelle basées sur les filtres passifs, en raison notamment de la bande passante et la flexibilité [3].

- ✓ Dans le premier chapitre, nous présentons les perturbations, en courant et en tension, dans les réseaux électriques. Les origines et les conséquences de cette pollution harmonique avec les effets des charges polluantes connectées avec le réseau.
- ✓ Le deuxième chapitre, est une présentation de différentes méthodes d'identification du courant polluant, et la régulation des systèmes continus.
- ✓ Dans le troisième chapitre, nous avons proposé des solutions traditionnelles et modernes d'élimination des harmoniques, et nous détaillons notre étude sur le filtrage des courants harmoniques.
- ✓ Dans le quatrième chapitre, une étude et une analyse des résultats de

simulation et les résultats expérimentaux.

**Chapitre I :
Généralités sur
les perturbations
des réseaux
électriques**

I.1. 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.

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 [4].

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

I.2 Perturbation Electrique :

I.2.1 Creux et Coupures de Tension :

Un creux de tension est une diminution brusque de la tension de fourniture U_f . Cette diminution, située entre 90% et 10% de la tension nominale U_n , est suivie du rétablissement de la tension après un court laps de temps. Un creux de tension peut durer de 10 ms à 3 mn.

La plupart des appareils électriques admettent une coupure totale d'alimentation d'une durée inférieure à 10 ms. Il y a deux types de phénomène à l'origine des creux de tension :

- Ceux provenant du fonctionnement d'appareils à charge fluctuante ou de la mise en service d'appareils appelant un courant élevé au démarrage (moteurs ...etc.),
- Ceux liés aux phénomènes aléatoires, comme la foudre ou tous les court-circuits accidentels sur les réseaux de distribution, ou les réseaux internes des clients (défaut d'isolation, blessure de câble, projection de branches sur les lignes aériennes).
- Les creux de tension sont caractérisés par leur amplitude et par leur durée. Ils sont monophasés, biphasés ou triphasés suivant le nombre de phases concernées [4].

- Les creux de tension sont susceptibles de perturber le fonctionnement de certaines installations industrielles et tertiaires. En effet, ce type de perturbation peut causer des dégradations de fonctionnement des équipements électriques qui peuvent aller jusqu'à la destruction totale de ces équipements [5].

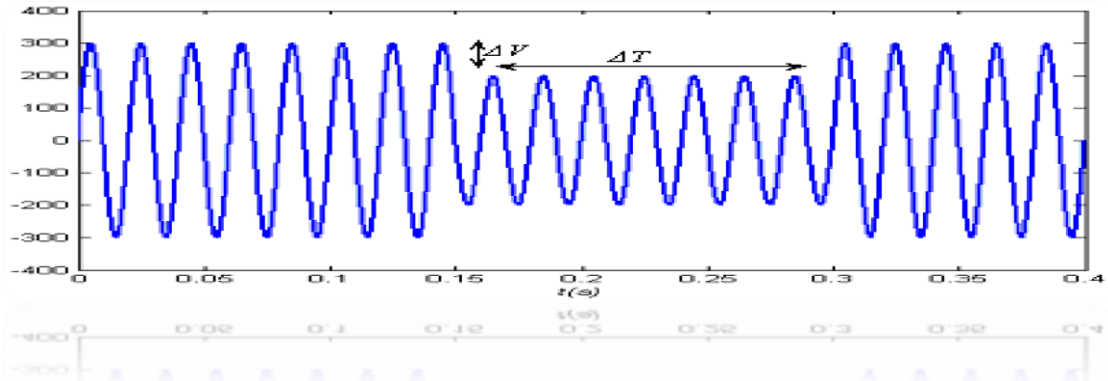


Figure I.1 : Creux de tension.

I.2.2 Fluctuations des Tensions :

Elles sont définies par des amplitudes inférieures à 10% de la tension nominale et par la durée séparant deux variations successives inférieures à une heure et peuvent être aléatoires ou périodiques [6].

Ces perturbations sont générées par deux types d'équipement :

- Les fours à arcs qui produisent des variations erratiques permanentes de tension, dont le contenu spectral est situé dans la bande 0.5 à 25 Hz
- Les machines à souder qui provoquent des variations souvent plus périodiques, à des intervalles de temps de quelques secondes.

Du fait de leur faible amplitude, ces fluctuations n'ont pas d'effet sur le fonctionnement des équipements électriques. Leurs conséquences sont plutôt d'ordres physiologiques : il s'agit de la perception par l'œil des fluctuations de luminosité des appareils d'éclairage, liées aux fluctuations de tension.

I.2.3 Déséquilibre du Système Triphasé de Tension :

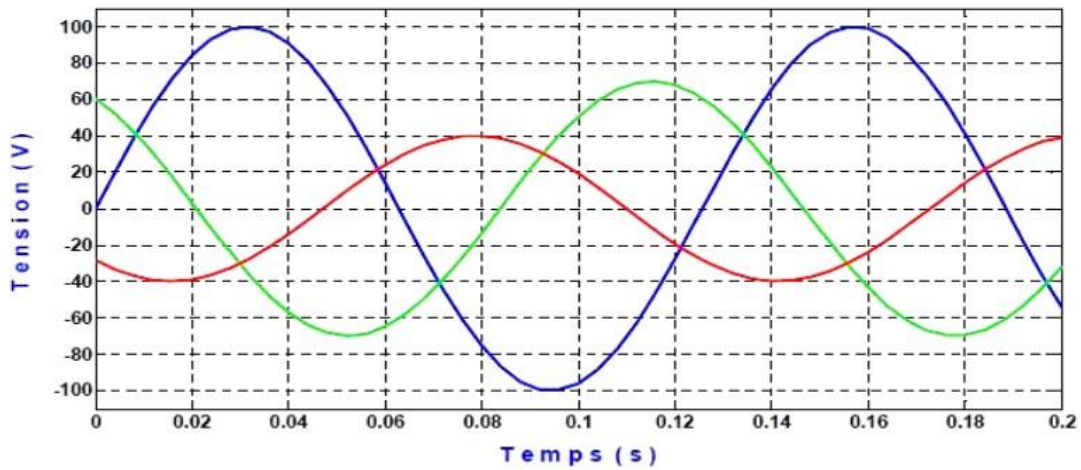


Figure I.2 : déséquilibres du système triphasé de tension

Lorsque les trois tensions ne sont pas identiques en amplitude et/ou ne sont pas décalés d'Angle 120° ($\frac{2\pi}{3}$ rad) les unes par rapport aux autres, on dit qu'on a un déséquilibre du Triphasé un réseau électrique triphasé équilibré alimentant un récepteur électrique triphasé non équilibré conduit à des déséquilibres de tension dus à la circulation de courants non équilibrés dans les impédances du réseau [7].

I.2.4 Variation de Fréquence :

Sur les réseaux d'utilisateurs qui ne sont pas mis en réseau ou alimentés par une source de chaleur indépendante, une fluctuation substantielle de la fréquence du réseau peut survenir (voir figure I.3). Ce changement de fréquence est extrêmement inhabituel au niveau du réseau de distribution ou de transport et ne se produit que dans des conditions extraordinaires, par exemple lorsque le réseau présente certaines failles majeures [8].

Dans des conditions normales d'exploitation, la valeur moyenne de la Fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle $50\text{Hz} \pm 1\%$.

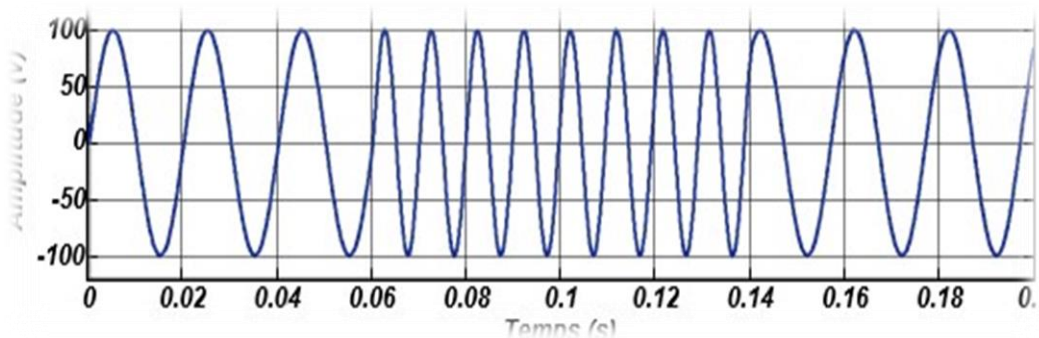


Figure I.3 : Variation de la fréquence.

I.2.5 Harmonique et inter Harmonique :

Les harmoniques sont une superposition sur l'onde fondamentale à 50 Hz, d'ondes également sinusoïdales mais de fréquences multiples entier de celle du fondamental. La figure 1.1(e) montre la superposition de d'harmonique d'ordre 3 sur un courant fondamental de fréquence 50 Hz. La principale source de la présence des harmoniques dans les réseaux électriques Est L'utilisation de plus en plus croissante d'équipements de l'électronique de puissance à base de thyristors [9].

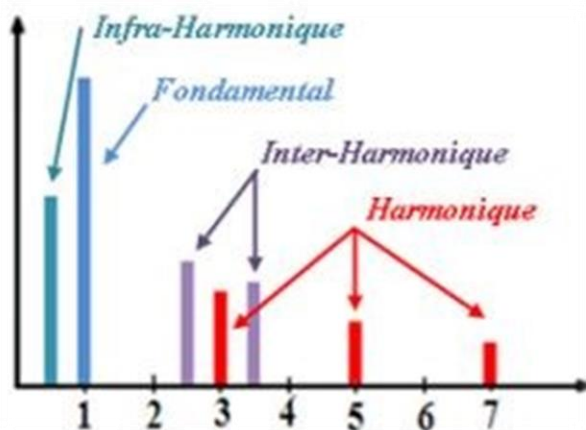


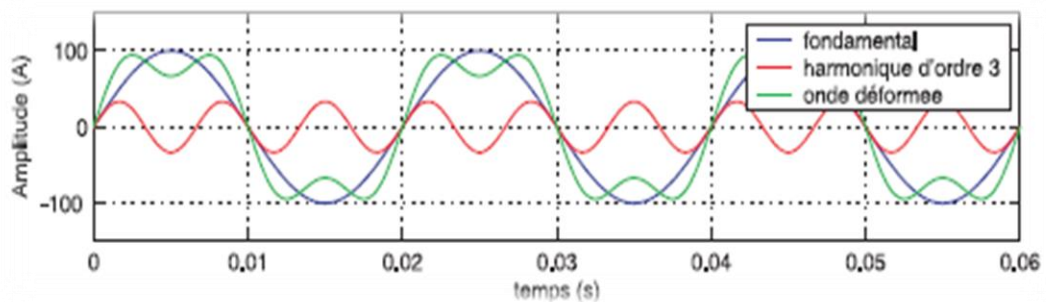
Figure I.4 : Fondamental et inter-harmoniques.

I.2.5.1 Source d'Harmonique :

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, es 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 [10].

L'amplitude du rang 1 est appelée la composante fondamentale du signal électrique périodique ; dans notre cas il correspond à la fréquence 50Hz. L'harmonique d'ordre zéro correspond à la composante directe du signal, l'amplitude de chaque harmonique est inversement proportionnelle à son ordre [11].



FigureI.5 : Harmoniques.

I.2.5.2 Conséquence Néfastes des Harmoniques

Les courants et les tensions harmoniques ont des effets néfastes sur le fonctionnement, la rentabilité et la durée de vie des équipements électriques. Bien que les susceptibilités des différents équipements et appareils électriques, raccordés à un réseau pollué, soient très diversifiés [12].

- ✓ Lignes : pertes ohmiques supplémentaires.
- ✓ Transformateurs : pertes supplémentaires dans les enroulements par effet joule et dans le noyau par courant de Foucault.
- ✓ Moteur à courant alternatif : pertes supplémentaires dans le fer et les enroulements principalement liées aux harmoniques de tension.
- ✓ Condensateur de puissance : pertes diélectrique supplémentaires conduisant aux vieillissements rapides du condensateur.
- ✓ Equipement de l'électronique de puissance : dysfonctionnement lié à la déformation de la tension.

- ✓ Ordinateurs : trouble fonctionnels liés à la distorsion de la tension. Lignes téléphoniques : génération des bruits importants liés au couplage électromagnétique entre les lignes de puissance et les circuits de communication [13].

I.3 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté trois exemples le plus commun des perturbations affectant l'onde de tension du réseau électrique. Comme nous avons expliquées tel que, les harmoniques et les déséquilibres de courant et de tension, la puissance réactive et les creux de tension ont des effets néfastes sur les équipements électriques. Ces effets peuvent aller des échauffements et de la dégradation du fonctionnement jusqu'à la destruction totale de ces équipements. Les perturbations des harmoniques et leurs effets sont impératifs que nous les découvrons.

Chapitre II :
Solutions
Proposées pour
l'Élimination des
Harmoniques

II.1 Introduction :

Fournir une énergie de haute qualité aux utilisateurs et résoudre divers problèmes. C'est la principale responsabilité des services de distribution d'électricité. Donc pour garantir cela, des technologies innovantes sont utilisées pour améliorer les installations du système de distribution.

Requis. L'un des problèmes les plus importants concerne les harmoniques et la manière de les filtrer. **Comment filtrer ces perturbations ?**

Dans ce chapitre nous étudierons les techniques proposer comme des solutions traditionnelles et modernes de l'élimination et de filtrage des harmoniques, et nous allons approfondir l'étude d'un type moderne de filtre c'est un filtre actif parallèle [15].

II.2 Grandeurs Caractéristiques :

II .2.1 Grandeur Harmonique :

C'est l'une des composantes sinusoïdales de la variation de la grandeur physique possédant une fréquence multiple de celle de la composante fondamentale. L'amplitude de l'harmonique est généralement de quelques pour cent de celle du fondamental [17].

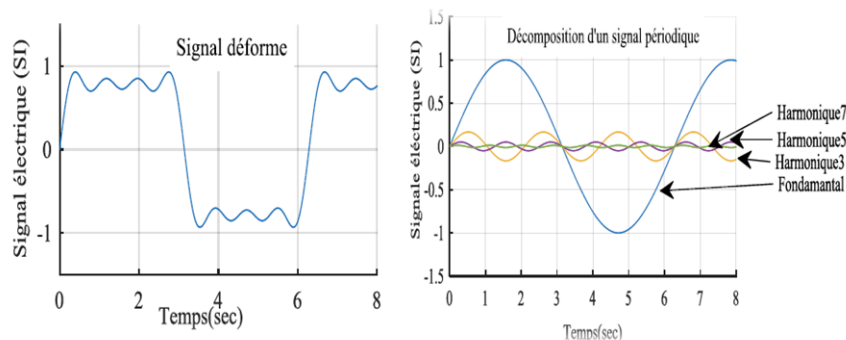


Figure II.1 : Décomposition d'un signal périodique.

II.2.2 Rang de l'Harmonique :

Le terme "rang de l'harmonique" désigne l'ordre séquentiel d'une harmonique en relation avec le fondamental. Pour illustrer, si le fondamental a une fréquence de 50 Hz et que la troisième harmonique a une fréquence de 150 Hz, alors on peut dire que le rang de cette harmonique est de 3.

II.2.3 Série de Fourier :

Ceci revient à dire que : « tout signal, périodique de période $T=1/f$, peut se décomposer en une somme infinie de termes sinus et cosinus de fréquences multiples de f [15].

Mathématiquement, cela s'écrit :

$$s(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \quad (\text{II.1})$$

La valeur a_0 représente la valeur moyenne de $s(t)$. On calcule les coefficients a_n et b_n avec les formules suivantes. De plus, il existe quelques propriétés qui permettent de ne pas faire de calculs inutiles :

- ✓ Si la fonction est paire, les coefficients b_n sont nuls.
- ✓ Si la fonction est impaire, les coefficients a_n sont nuls.
- ✓ Si la fonction possède une symétrie sur ses deux demi-périodes, les termes d'indice pairs sont nuls [18].

II.2.4 Valeur Efficace d'une Grandeur Alternative :

La valeur RMS, également connue sous le nom de valeur Root Mean Square (RMS), est une mesure statistique utilisée pour déterminer la valeur moyenne de quantités alternatives qui varient dans le temps.

La valeur RMS est calculée en prenant la racine carrée de la moyenne des carrés des valeurs des grandeurs alternatives sur une période de temps. Ce compteur est généralement utilisé pour mesurer la force d'un signal AC.

La valeur efficace est largement utilisée dans le domaine électrique pour évaluer la puissance moyenne d'un signal alternatif. Il peut également être utilisé pour comparer des signaux de formes et d'amplitudes différentes, en supposant qu'ils ont la même puissance.

II.2.5 Taux de Distorsion :

Notre étude se limite au cas où la source est sinusoïdale et/ou le courant absorbé par la charge est entaché de composants harmoniques. Dans ces conditions, le taux global de distorsion harmonique (THD) est bien adapté pour quantifier le degré de pollution harmonique sur les réseaux électriques [10].

Deux taux de distorsion harmonique sont distingués :

- ✓ Le taux de distorsion harmonique en courant, noté **THD-I**
- ✓ Le taux de distorsion harmonique en tension, noté **THD-U**

Le premier s'exprime sous la forme :

$$THD1 = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^n I_n^2}{I_1^2}} \tag{II.2}$$

Où : I_1 est la valeur efficace du courant primaire et la valeur efficace du système harmonique Le chiffre actuel THD-I dépend uniquement des valeurs réelles du courant de charge. D'autre part, le THD-U est fonction des courants harmoniques caractérisant la charge et de la résistance à courte portée du circuit réseau imposé :

$$THDu = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^n U_n^2}{U_1^2}} \tag{II.3}$$

Avec : U_1 la valeur efficace de tension fondamental et U_n la valeur efficace de rang harmoniques de la tension n [19].

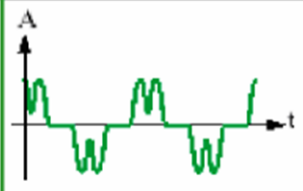
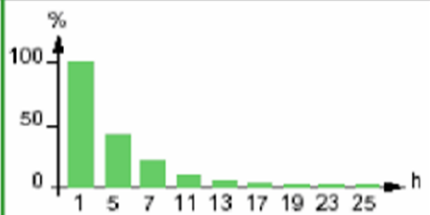
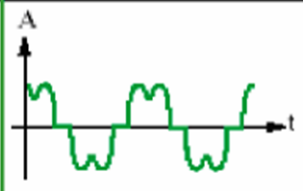
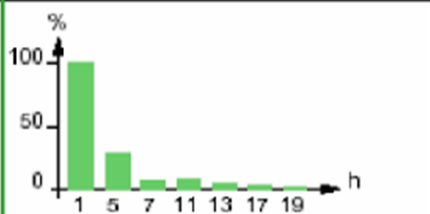

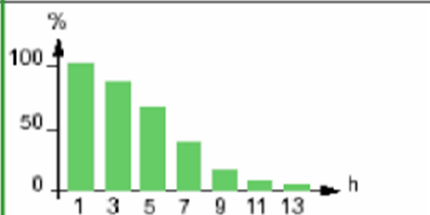

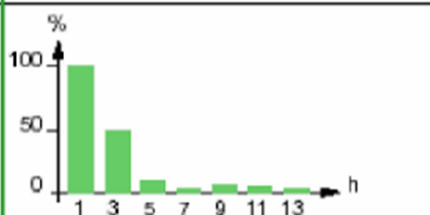
Charges non linéaires	Forme d'onde de courant	Spectre	THD
Variateur de vitesse			44 %
Redresseur / chargeur			28 %
Charge informatique Ordinateur			115 %
Eclairage fluorescent			53 %

Tableau II .1 : Caractéristiques de quelques générateurs d'harmoniques.

II.2.6 Facteur de Puissance :

Le facteur de puissance est défini dans le cas général par le rapport de la puissance active sur la puissance apparente [20].

$$\mathbf{FP} = \frac{\mathbf{P}}{\mathbf{S}} = \frac{\sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \cos(\phi_h)}{\sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_h^2} \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2}} \quad (\text{II.4})$$

En présence des harmoniques, on définit la notion de puissance déformante D permettant de rendre compte des harmoniques. Son expression est donnée par l'équation suivante :

$$\mathbf{S} = \sqrt{\mathbf{P}^2 + \mathbf{Q}^2 + \mathbf{D}^2} \quad (\text{II.5})$$

L'expression du facteur de puissance peut alors se mettre sous la forme suivante :

$$\mathbf{FP} = \frac{\mathbf{P}}{\sqrt{\mathbf{P}^2 + \mathbf{Q}^2 + \mathbf{D}^2}} \quad (\text{II.6})$$

II.2.7 Spectre d'Harmonique (de fréquence) :

Un spectre de fréquences est une représentation visuelle de la distribution des fréquences présentes dans un signal donné. Cette représentation est fréquemment utilisée dans l'analyse du signal pour examiner les différentes composantes de fréquence d'un signal et déterminer la fréquence dominante, l'amplitude, la bande passante et d'autres caractéristiques clés.

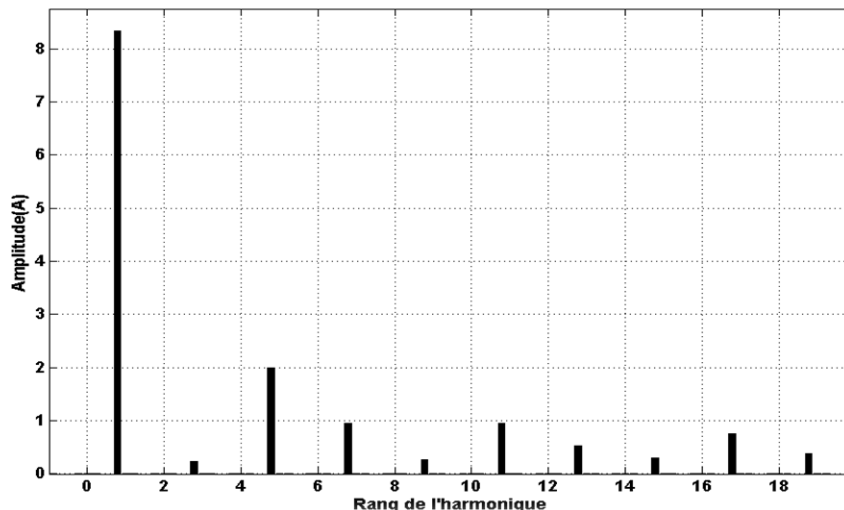


Figure II.2 : Le spectre harmonique du courant de charge polluante.

II.2.8 Charges Linéaires et non Linéaires :

Les récepteurs peuvent être classés en deux familles principales :

- Les récepteurs linéaires (ou charges linéaires).
- Les récepteurs non-linéaires (ou charges non-linéaires).

Une charge est dite linéaire si, alimentée par une tension sinusoïdale, elle consomme un courant sinusoïdal. Cependant, le courant et la tension peuvent être déphasés. Les charges linéaires couramment utilisées sont constituées de résistances, de capacités et d'inductances [21].

Une charge non linéaire est considérée comme des générateurs de courants harmoniques (pour les rangs $p \geq 2$). Ces courants sont modélisés par des sources de courant injectées dans le réseau. Un tel récepteur alimenté par une tension sinusoïdale, consomme un courant non-sinusoïdal. Typiquement, les charges utilisant l'électronique de puissance sont non-linéaires. Or elles sont de plus en plus nombreuses et leur part dans la consommation d'électricité ne cesse de croître [22].

II.3 Influence des Harmoniques sur le Facteur de Puissance FP :

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

En présence des harmoniques, la puissance apparente S est composée de trois parties : active P , réactive Q et déformante D , cette dernière est la puissance provoquée par les courants harmoniques, tel que $\mathbf{I}=\mathbf{I}_f+\mathbf{I}_h$.

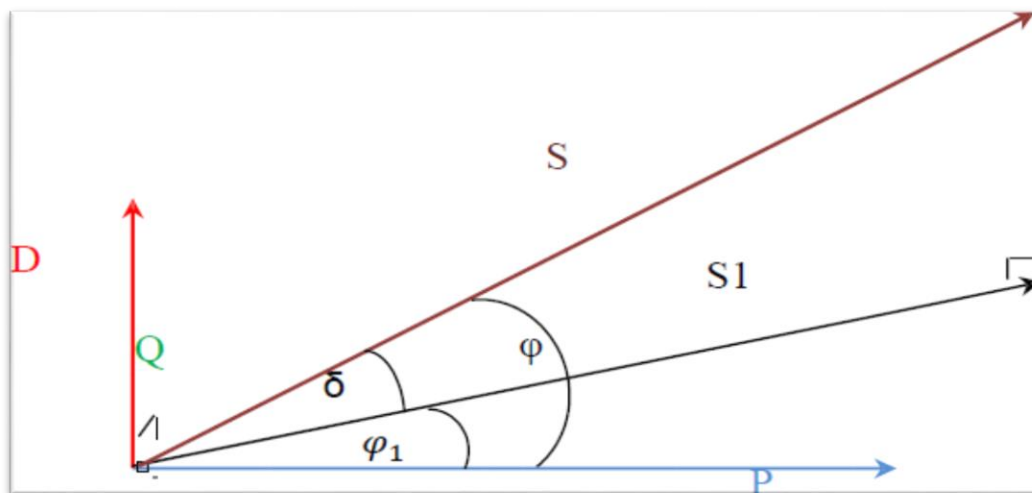


Figure II.3 : Diagramme de Fresnel des puissances.

En présence des harmoniques, la puissance apparente S est composée de trois parties comme le montre l'équation suivante :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (\text{II.7})$$

Où :

Q : la puissance réactive associée au courant fondamental.

D : la puissance déformante due aux harmoniques du courant

Où :

$$P = 3 * U * I_1 * \cos(\varphi_1) = 3 * U * I_1 * F_{dis} * \cos(\varphi_1) \quad (\text{II.8})$$

Où F_{dis} représente le facteur de distorsion. Il vaut 1 lorsque le courant est parfaitement sinusoïdal et il décroît lorsque la déformation de l'onde s'accroît [13].

Φ_1 : représente le déphasage entre le courant fondamental et la tension

$$Q = 3 * U * \sin(\varphi_1) \quad (\text{II.9})$$

Et,

$$D = 3 * U * \sqrt{\sum_{h=2}^n I_h^2} \quad (\text{II.10})$$

Finalement le facteur de puissance F_p est donné par l'expression :

$$F_p = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad (\text{II.11})$$

II.4 Normes et Réglementation de Perturbation :

Afin que le distributeur puisse assurer un niveau de qualité approprié pour tous les utilisateurs, le distributeur doit limiter ou limiter les interruptions de certains utilisateurs. Cela nécessite une définition:

- D'une part, le taux de distorsion maximum (niveau de compatibilité) qui permet un fonctionnement correct de la plupart des applications.
- D'autre part, un taux d'interférence maximum doit être déterminé Pour chaque utilisateur, afin que l'effet cumulé des différentes interférences générées permette un fonctionnement

compatible entre tous les matériels connectés à un même réseau. Ils devraient tous fonctionner correctement.

Ainsi, si cette compatibilité est nécessaire entre abonnés, elle est également nécessaire au sein même des équipements (tertiaires ou industriels) de l'abonné. Les utilisateurs finaux sont soumis au niveau d'interférence causé par l'équipement qu'ils installent. Il est donc important que les fabricants indiquent clairement le niveau d'interférence provoqué par leurs produits.

Par conséquent, les normes devraient spécifier des niveaux acceptables de déséquilibres harmoniques pour les réseaux et les contaminants afin de réduire au minimum les défauts induits par les harmoniques. Ces normes sont appliquées selon quatre (4) règles :

- Limites d'émission : déterminées par l'installation ou l'équipement. Ces limites garantissent que les niveaux de conformité sont maintenus à tous les points.
- Niveaux d'immunité : Cela garantit à l'utilisateur que l'appareil fonctionnera sur un réseau perturbé dans une certaine plage.
- Niveaux de compatibilité : Il s'agit généralement de niveaux de tension harmonique qui ne doivent être dépassés en aucun point du réseau. Le maintien de ces niveaux garantit le bon fonctionnement de tous les équipements.
- Niveaux de planification : Indique les limites d'interférence définies par l'administrateur réseau, telles que les niveaux de conformité à ne pas dépasser, Par exemple, la norme (**CEI 1000-2-2**) pour les équipements raccordés à un réseau basse tension permet de garantir à l'utilisateur un fonctionnement de l'équipement sur un réseau perturbé dans certaines limites. Un extrait de la norme (**CEI 1000-2-2**) est donné au **tableau II.2**.

Harmoniques impairs non Multiples de 3		Harmoniques impairs multiples de 3		Harmoniques pairs	
Rang harmonique %	Tension harmonique %	Rang harmonique %	Tension harmonique %	Rang harmonique %	Tension harmonique %
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.3	6	0.5
13	3	21	0.2	8	0.5
17	2	>21	0.2	10	0.5
19	1.5			12	0.2
23	1.5			>12	0.2
25	1.5				
>25	12.7/h				

Tableau II.2 : Niveau de compatibilité pour les tensions harmoniques individuelles sur les réseaux électriques

II.5 Les 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 [15].

II.5.1 Compensation des Courants Harmoniques :

La compensation des courants harmoniques basses fréquences émis par la charge polluante. Le filtre passif accordé sur une fréquence élevée, élimine les harmoniques hautes fréquences y compris ceux créés par le filtre actif parallèle. Ce type de filtrage a déjà été appliqué à la compensation des courants harmoniques émis par un cyclo-convertisseur de forte puissance [23].

II.5.1.1 Surdimensionnement ou Déclassement de l'Installation Electrique :

On procède généralement au surdimensionnement des équipements afin d'assurer leur tenue aux surcharges harmoniques. Cette solution n'agit pas sur les harmoniques qui ne subissent aucune action curative de la part de l'utilisateur. Par cette approche, les problèmes liés à la pollution harmoniques sont résolus pendant une durée limitée. Le déclassement des équipements de distribution électrique soumis aux harmoniques est utilisé dans le cas des installations existantes. Cette méthode cause un surcoût de production et ne tire pas profit du potentiel réel de l'installation [8].

II.5.1.2 Transformateurs à Couplage Spécial :

Le choix de couplages appropriés des transformateurs permet de limiter la circulation des courants harmoniques. L'utilisation d'un transformateur d'isolement, de rapport 1/1 à couplage triangle-étoile ou triangle-zigzag, empêche la propagation des courants harmoniques de rang 3 et leurs multiples circulant dans le neutre. Ce procédé n'a aucun effet sur les autres rangs harmoniques. Cette solution limite, au contraire, la puissance disponible de la source, et augmente l'impédance de ligne. Il en résulte une augmentation de la distorsion en tension du aux autres rangs harmoniques [24].

II.5.1.3 Inductances (Selfs) Série

Cette solution, utilisée pour les entraînements à vitesse réglable (variateurs de vitesse), et les redresseurs triphasés, consiste à introduire une inductance série en amont d'une charge non linéaire. Peu onéreuse, la self a cependant efficacité limitée. La distorsion en courant est divisée approximativement par deux [15].

II.5.1.4 Filtre Passif :

Le principe des filtres passifs est basé notamment sur des configurations d'éléments résistives (R), capacitifs (C) et inductifs (L) et reliés dans différentes combinaisons pour avoir la suppression désirée des harmoniques. Ils sont utilisés pour manœuvrer les courants harmoniques outre de la ligne ou pour bloquer leur écoulement entre les différentes parties du système en accordant ces éléments pour créer une résonance à une fréquence choisie. Ils fournissent également une puissance réactive au système électrique et par conséquent améliorent la qualité de puissance [26].

Cependant, il présente l'inconvénient d'une interaction négative avec le système électrique. Les performances des filtres passifs dépendent principalement de la résistance du système. D'un autre côté, ils peuvent également être utilisés pour supprimer des fréquences harmoniques spécifiques. Le nombre de filtres négatifs augmente donc avec le nombre d'harmonique sauf.

II.5.2 Compensation de la Puissance Réactive :

La compensation de puissance réactive est utilisée pour réduire ce transfert de puissance, ce qui entraîne des chutes de tension et des pertes plus faibles le long de la ligne. Diverses méthodes de compensation sont utilisées pour augmenter le facteur de puissance, la plus simple consistant à placer une batterie de condensateurs en parallèle avec le réseau ou la charge (par exemple, moteurs asynchrones).

II.5.3 Rééquilibrage des Courants du Réseau Electrique :

Répartition égale des charges sur trois phases dans les charges monophasées. Mauvaise répartition de deux phases due à des courants déséquilibrés dans le réseau électrique. Basse tension. Compensateur passif, ex : Montage de Steinmetz qui provoque un fort déséquilibre pour les fréquences différentes de **50 HZ** avec des résonances qu'il faut éviter d'exciter à proximité d'un générateur d'harmonique [10].

II.5.4 Agir sur la Structure de l'Installation :

Il est souhaitable d'alimenter un grand pollueur par un transformateur à part, afin de le séparer d'un récepteur sensible. Face à un pollueur moyen il est préférable d'effectuer l'alimentation par des câbles distincts au lieu de les connecter en parallèle. Une distribution en étoile permet le découplage par les impédances naturelles et/ou additionnelles [29].

II.5.5 Pont Dodécphasé :

La structure biphasée présente des caractéristiques intéressantes par rapport à la structure à phases hexagonales. Il s'agit d'une structure en six phases. Cependant, le nombre de semi-conducteurs utilisés et le transformateur à deux enroulements côté secondaire rendent cette solution coûteuse.

- Le transformateur côté secondaire en fait une solution coûteuse.
- Le transformateur est constitué d'un transformateur primaire triphasé avec (mC).
- Les transformateurs sont construits avec un indice d'impulsion de n tel que $n = mCp$ dont le transformateur primaire La tension est fournie avec un déphasage vers une série isométrique de
- Déphasage en série isométrique de $2\pi/mCp$.
- Convertisseur à indice de pulsation égale à 12. Ce convertisseur appelé dodécphasé, est le plus utilisé (cas des puissances importantes) dans la mesure où le déphasage de $\pi/6$ est facilement obtenu par un couplage étoile-triangle et étoile-étoile d'un
- Transformateur à double enroulement au secondaire [27].

II.6 Solutions Modernes de Dépollution :

Les progrès remarquables réalisés d'une part dans le domaine des composants semi-conducteurs, comme les IGBT, IGCT, GTO et MOSFET, ainsi que la maîtrise de leur mise en œuvre et d'autre part l'existence de nouvelles méthodes de traitement analogique et numérique du signal ont permis l'émergence de moyens modernes et efficaces pour faire face aux différents perturbations (harmoniques, puissance réactive, fluctuations, creux de tension) affectant les systèmes électriques [28].

Parmi ces moyens modernes, nous pouvons citer [12].

- Les filtres actifs : parallèles, séries, hybrides et combinaisons des structures.
- Les alimentations sans interruption.

- Les dispositifs FACTS.
- Les convertisseurs à prélèvement sinusoïdal.

II.6.1 Filtrage Actif :

Les inconvénients inhérents aux filtres passifs (non adaptatif aux variations de la charge et du réseau, phénomène de résonance) et l'apparition de nouveaux composants semi-conducteurs, comme les thyristors GTO et les transistors IGBT, ont conduit à concevoir une nouvelle structure de filtres appelée filtres actifs de puissance (FAP). Le but de ces filtres est de générer soit des courants soit des tensions harmoniques de manière à ce que le courant et la tension du réseau soient rendus sinusoïdaux et parfois avec un facteur de puissance unitaire. Le filtre actif est connecté en série, en parallèle, en combinant ces deux dernières structures ensemble ou associé avec des filtres passifs en fonction des grandeurs électriques harmoniques (courants ou tensions) à compenser [14].

II.6.1.1 Filtre Actif Parallèle :

Le filtre actif connecté en parallèle sur le réseau, est considéré comme générateur de courant. Il injecte dans le réseau des courants perturbateurs égaux à ceux absorbés par la charge polluante, mais en opposition de phase avec ceux-ci [29].

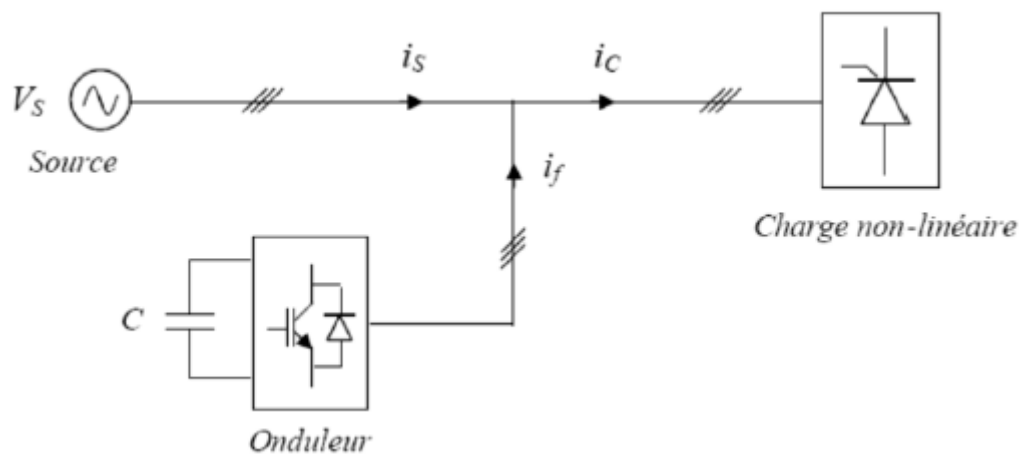


Figure II .4 : Filtre actif parallèle.

II.6.1.2 Filtre Actif Série :

Le rôle filtre actif série est de modifier localement l'impédance du réseau, sa structure est montré sur la Figure (II.5). Le FAS 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 des courants perturbateurs à travers l'impédance du réseau. Ainsi, la tension au point de raccordement peut être rendue sinusoïdale [30].

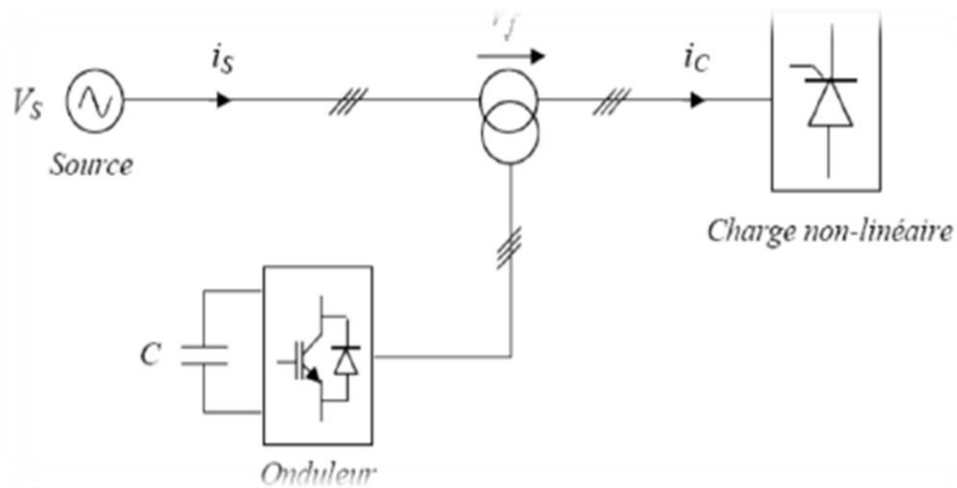


Figure II .5 : Filtre actif série.

II.6.1.3 Combinaison Parallèle Série Actif :

La Figure II.6 illustre l'association de deux filtres actifs parallèle et série, 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 [31].

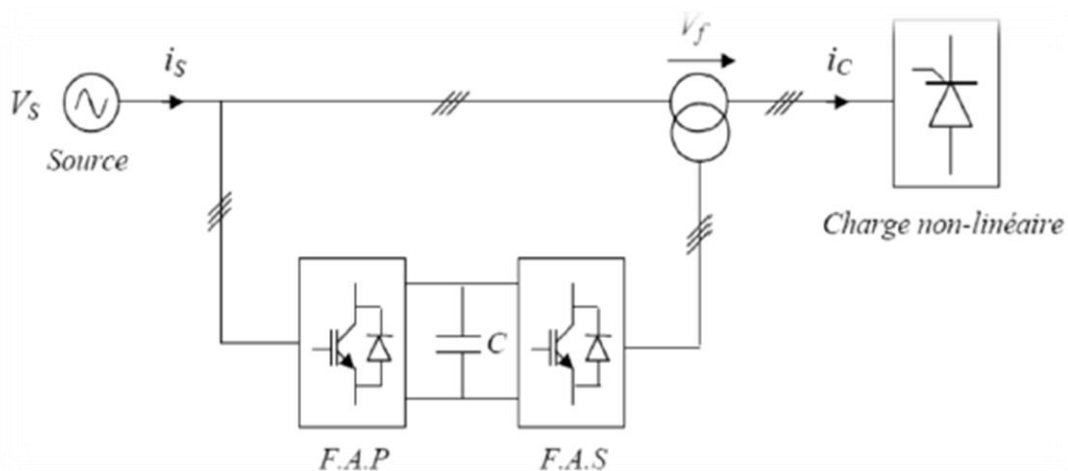


Figure II.6 : Filtre actif mixte série-parallèle (UPQC).

II.6.2 Filtrage Hybride :

Le filtre actif 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, Ainsi, l'objectif visé est la non pollution d'un réseau par une charge perturbatrice et simultanément le bon fonctionnement d'une charge ou d'un réseau sensible dans un environnement pollué. Le traitement s'effectue donc à deux niveaux par rapport à un point considéré ; dépollution par un filtre actif parallèle en aval et par un

filtre actif série en amont. La deuxième famille combine la mise en œuvre simultanée de filtres passifs accordés et actifs, d'autre part. Le filtre actif parallèle compense les courants harmoniques et la puissance réactive de la charge en même temps qu'il contrôle la tension continue du condensateur commun des deux filtres actifs [29, 12,28].

On peut distinguer trois configurations du filtre actif hybride [29].

- Combinaison du filtre actif parallèle et du filtre passif parallèle.
- Combinaison du filtre actif série et du filtre passif parallèle.
- Filtre actif parallèle connecté en série avec un filtre passif.

II.6.2.1 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 II.7** [31].

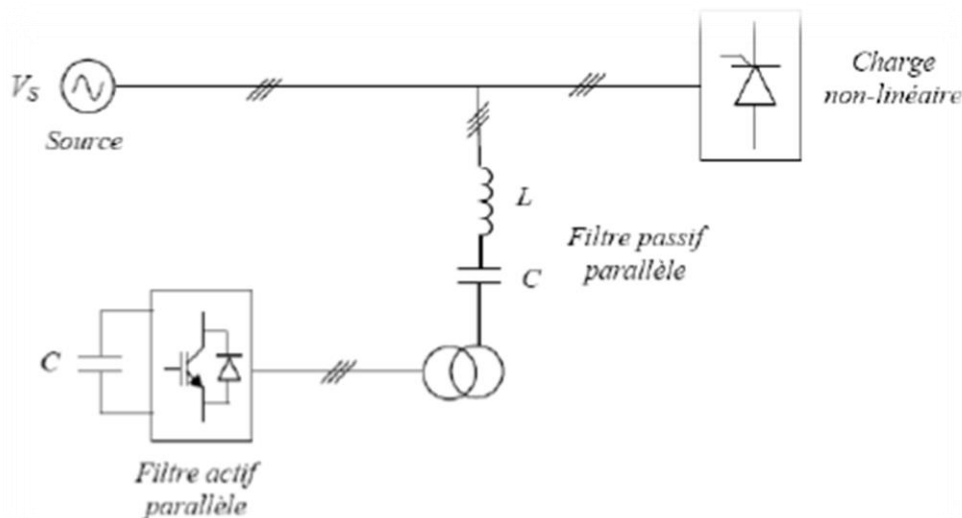


Figure II.7 : Filtre actif série connecté en série avec des filtres passif parallèles.

II.6.2.2 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, **Figure II.8** [32].

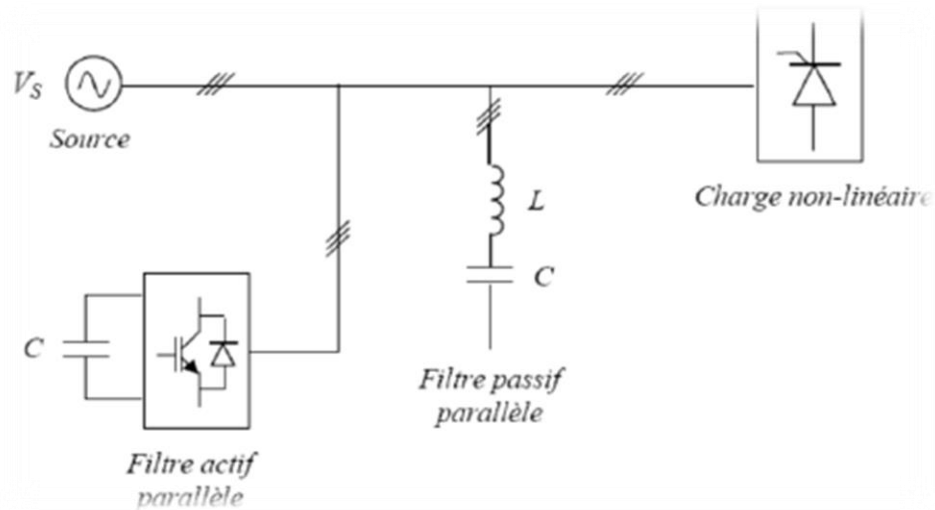


Figure II.8 : Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle.

II.6.2.3 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 II.9 illustre cette topologie [33].

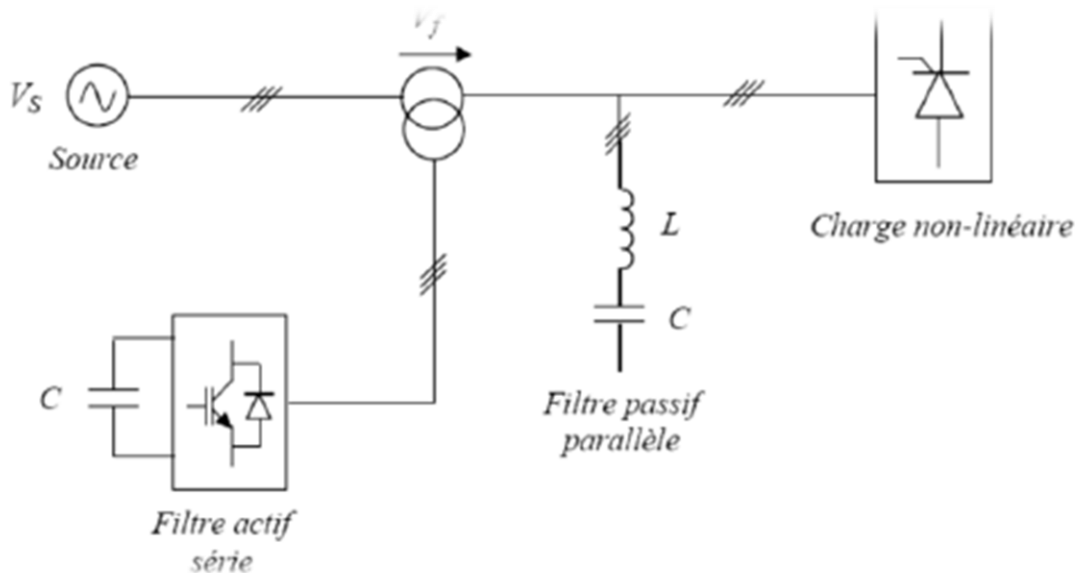


Figure II.9 : Filtre actif série avec filtre passif parallèle.

II.6.3 Les Redresseurs MLI :

Contrairement aux redresseurs classiques, les redresseurs MLI sont réalisés à l'aide de semi-conducteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture grâce à la boucle de contrôle. La

possibilité de commande à l'ouverture permet un contrôle total du convertisseur, parce que, les interrupteurs peuvent être commutés, selon les besoins, aussi bien à la fermeture qu'à l'ouverture avec une fréquence assez élevée. Il y a deux manières de mettre en application des redresseurs MLI : comme redresseur à source de tension, et redresseur à source de courant [34].

II.6.3.1 Redresseur de Tension :

Un redresseur à MLI de tension est alimenté par une source de tension sinusoïdale, et débite sur un récepteur de courant continu. Il a donc la structure d'un onduleur de courant. Le redresseur à MLI de tension fonctionne en abaisseur de tension. Il peut donc être directement utilisé pour alimenter à tension variable une charge à courant continu [35].

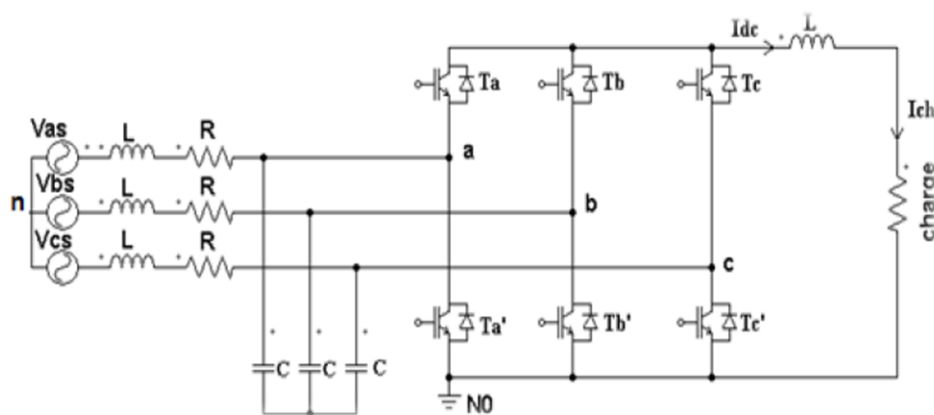


Figure II.10 : Le schéma de principe d'un redresseur à MLI de tension.

II.6.3.2 Redresseur de Courant :

La Figure II.11 illustre la topologie du redresseur MLI de courant. Il assure la conversion d'énergie entre une source de tension alternative et un récepteur de courant continu. Les interrupteurs sont unidirectionnels en courant mais bidirectionnels en tension. L'utilisation des techniques MLI conduit à un courant côté alternatif ayant une pollution harmonique contrôlée. Cette structure est souvent dotée d'un filtre de second ordre LC du côté alternatif [36].

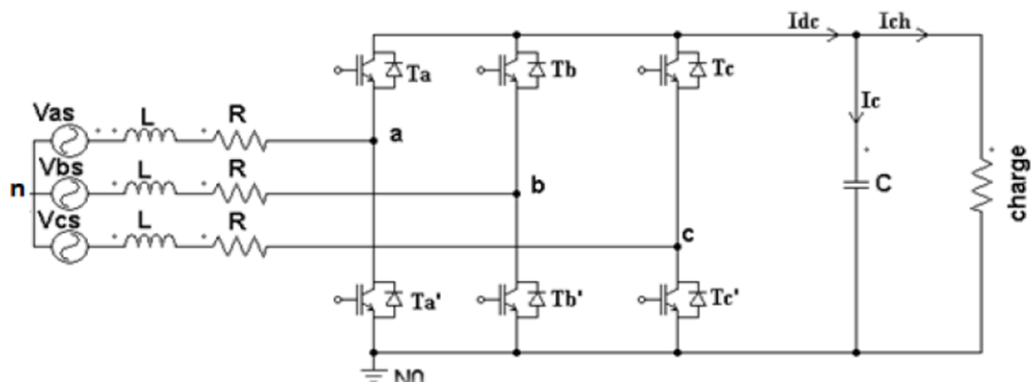


Figure II.11 : Topologie d'un redresseur MLI triphasé de courant

II.7 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes solutions traditionnelles modernes de dépollution. Les solutions classiques ne sont pas très efficaces pour traiter ce problème. Les filtres passifs sont souvent pénalisés en termes d'encombrement et de résonance. Nous avons aussi présenté les différentes topologies des filtres actifs série et parallèle. Le filtre actif parallèle pour compenser toutes les perturbations de courant comme les harmoniques, les déséquilibres et la puissance réactive. Le filtre actif série pour compenser toutes les perturbations de tension comme les harmoniques, les déséquilibres et les creux de tension. La combinaison parallèle-série actifs est la solution universelle pour compenser toutes les perturbations en courant et en tension [15].

**Chapitre III :
Techniques
d'Extraction des
Courants
Harmoniques**

III.1 Introduction :

Le but des filtres de puissance actifs est d'agir directement et dynamiquement pour compenser les harmoniques ou atténuer leurs effets sur le réseau d'alimentation. Pour atteindre cet objectif, une méthode est nécessaire pour déterminer les grandeurs harmoniques de référence.

Les grandeurs harmoniques de référence doivent répondre avec précision en temps réel afin de rendre compte d'une bonne qualité de filtration. Les algorithmes d'identification des références harmoniques de courants ou de tensions sont regroupés dans la littérature en deux domaines, le domaine fréquentiel ou le domaine temporel [37].

III.2 Méthode des Puissances Active et Réactive Instantanées :

La méthode de puissance instantanée a été introduite par H. Akagi, Cette méthode plus simple de détermination des courants harmoniques consiste à supprimer la composante continue de la puissance active et réactive instantanée et constitue une méthode relativement simple. Les transformées Concordia sont utilisées pour obtenir les exigences de puissance active et réactive et de tension sinusoïdale de la fréquence fondamentale. Le vecteur simple de la tension et du courant de charge au point de connexion V_s pour un système triphasé équilibré est donné par :

$$[V_s] = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} \text{ Et } [i_c] = \begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \\ i_{cc} \end{bmatrix} \quad (\text{III.1})$$

La transformation des valeurs triphasées instantanées de la tension et du courant dans le repère des coordonnées $\alpha - \beta$ est donnée par les expressions suivantes :

$$\begin{bmatrix} V_{s\alpha} \\ V_{s\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & \frac{-1}{2} & \frac{-1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{III.2})$$

Et pour les courants :

$$\begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & \frac{-1}{2} & \frac{-1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{III.3})$$

Les puissances réelle et imaginaire instantanées. Notées respectivement p et q , sont définis par la relation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_\alpha & V_\beta \\ -V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{III.4})$$

En remplaçant les tensions et les courants diphasés par leurs homologues triphasés. On obtient :

$$P = V_{s\alpha} * i_{c\alpha} + V_{s\beta} * i_{c\beta} = V_{s\alpha} * i_{c\alpha} + V_{s\beta} * i_{c\beta} + V_{sc} * i_{cc} \quad (\text{III.5})$$

De même. Pour la puissance imaginaire on a :

$$Q = V_{s\alpha} * i_{c\alpha} + V_{s\beta} * i_{c\beta} = -\frac{1}{\sqrt{3}} [(V_{s\alpha} - V_{s\beta}) * i_{cc} + (V_{s\beta} - V_{sc}) * i_{c\alpha} + (V_{sc} - V_{s\alpha}) * i_{c\beta}] \quad (\text{III.6})$$

A partir de l'expression (4). En posant :

$$\Delta = V_{s\alpha}^2 + V_{s\beta}^2 \text{ on a : } \begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (\text{III.7})$$

Ou alors :

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{c\alpha p} \\ i_{c\beta p} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{c\alpha q} \\ i_{c\beta q} \end{bmatrix} \quad (\text{III.8})$$

Avec :

$$i_{c\alpha p} = \frac{V_{s\alpha}}{\Delta} * p \quad i_{c\beta q} = -\frac{V_{s\beta}}{\Delta} * q \quad i_{c\beta p} = \frac{V_{s\beta}}{\Delta} * p \quad i_{c\alpha q} = -\frac{V_{s\alpha}}{\Delta} * q \quad (\text{III.9})$$

Les puissances instantanées selon les axes α et β peuvent s'écrire :

$$\begin{bmatrix} p_{\alpha} \\ p_{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & * & i_{c\alpha} \\ V_{s\beta} & * & i_{c\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & * & i_{c\alpha p} \\ V_{s\beta} & * & i_{c\beta p} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & * & i_{c\alpha q} \\ V_{s\beta} & * & i_{c\beta q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{\alpha p} \\ p_{\beta p} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} p_{\alpha q} \\ p_{\beta q} \end{bmatrix} \quad (\text{III.10})$$

$$p_{\alpha p} = \frac{V_{s\alpha}^2}{\Delta} p \quad p_{\alpha q} = -\frac{V_{s\alpha} V_{s\beta}}{\Delta} p \quad (\text{III.11})$$

$$p_{\beta p} = \frac{V_{s\beta}^2}{\Delta} p \quad p_{\beta q} = -\frac{V_{s\alpha} V_{s\beta}}{\Delta} p$$

D'après les expressions (8), on peut écrire :

$$P = P_{\alpha p} + P_{\beta p} + P_{\alpha q} + P_{\beta q} = P_{\alpha p} + P_{\beta p} \quad (\text{III.12})$$

L'analyse de l'équation (09) nous ramené aux conclusions suivantes : La somme des puissances instantanées $P_{\alpha p}$ et $P_{\beta p}$ coincide avec la puissance instantanée dans un circuit triphasé. La puissance réactive correspond à la partie de la puissance instantanée qui dépend de q . Ces puissances $P_{\alpha q}$ et $P_{\beta q}$ s'annulent entre elles et elles n'apportent aucune contribution au transfert de puissance instantanée entre la source et la charge. Dans le cas où les tensions sont sinusoïdales et alimentent une charge non linéaire. Les puissances instantanées p et q ont pour expression :

$$P = \bar{p} + \tilde{q} \quad (\text{III.13})$$

$$q = \bar{q} + \tilde{q}$$

En considérant les équations (5) et (8), nous pouvons séparer le courant dans le repère $(\alpha - \beta)$ en trois composantes active et réactive à la fréquence fondamentale et la somme des harmoniques. Ceci conduit à :

$$\begin{bmatrix} ic\alpha \\ ic\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{v} \begin{bmatrix} Vs\alpha & - & Vs\beta \\ Vs\beta & * & Vs\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{p} \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} Vs\alpha & - & Vs\beta \\ Vs\beta & * & Vs\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{q} \end{bmatrix} + \frac{1}{v} \begin{bmatrix} Vs\alpha & - & Vs\beta \\ Vs\beta & * & Vs\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (\text{III. 14})$$

Il est évident, d'après la relation (11), que pour identifier une des trois composantes. Par exemple les courants harmoniques. Les parties alternatives des puissances réelle et imaginaire doivent être séparées des parties continues. Cette séparation peut être réalisée en utilisant l'un des deux méthodes de filtrage illustre sur **la Figure III.1**.

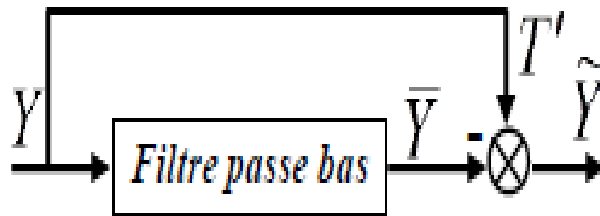


Figure III.1 : Schéma de principe du filtre utilise pour l'extraction des composantes alternatives de P et Q les courant harmonique triphasési* (K=a , b, c) sont obtenues à partir des courant diphasés.

Par la transformation inverse de Concordia soit :

$$\begin{bmatrix} i_{ha}^* \\ i_{hb}^* \\ i_{hc}^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{2} & \sqrt{\frac{3}{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\sqrt{\frac{3}{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ha}^* \\ i_{hb}^* \end{bmatrix} \quad (\text{III. 15})$$

Si V et I_{a1} représente respectivement les valeurs efficaces de la tension et du courant fondamental et θ_a le déphasage entre eux, alors on peut écrire :

$$a\theta_{nisacIV3-} = \bar{q} \quad \text{et} \quad \bar{p} = 3VI_{ca} \cos \theta_a$$

Les termes \bar{p} et \bar{q} sont respectivement équivalents à la puissance active conventionnelle et à la puissance réactive conventionnelle. De cette manière. Éliminer les courants harmoniques revient à compenser les composantes alternatives \tilde{p} et \tilde{p} . La suppression des courants réactifs revient à compenser la composante continue q [39].

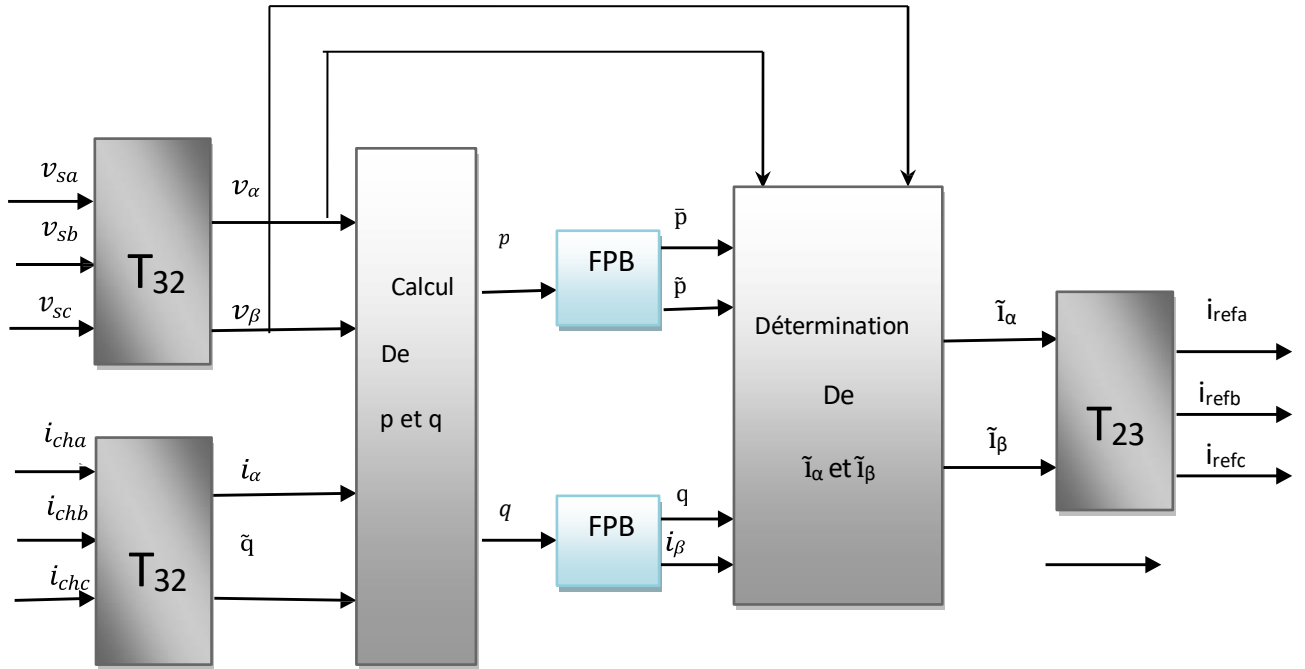


Figure III.2 : Algorithme d'extraction des courants de références par PIRI

III.3 Méthode du référentiel synchrone (SRF) :

La méthode de référentiel synchrone (synchronous reference frame) introduite par Bhattacharya, exploite également la transformation de Concordia mais appliquée uniquement aux courants de ligne (I_{11}, I_{12}, I_{13}). Ensuite, une seconde transformation est opérée pour passer des courants de ligne en $d-q$, ceci permet de transformer la composante fondamentale du courant en une composante continue et les composantes harmoniques du courant en des composantes alternatives. Cela nous permet d'éliminer à l'aide d'un simple filtre passe bas, la composante continue du courant. Son principe est [8] : Soit la transformation des courants de ligne triphasé équilibrés (I_{1a}, I_{1b}, I_{1c}) en système biphasé :

$$\begin{bmatrix} I_{1d} \\ I_{1q} \\ I_{10} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{1a} \\ I_{1b} \\ I_{1c} \end{bmatrix} \quad \text{(III. 16)}$$

En exploitant les signaux $\cos(\theta)$ et $\sin(\theta)$ tirés de la tension " fondamentale " du réseau, nous obtenons l'expression des courants dans le système d-q tournant à la pulsation de la composante fondamentale de la tension du réseau :

$$\begin{bmatrix} I_{ld} \\ I_{lq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\hat{\theta}) & -\cos(\hat{\theta}) \\ \cos(\hat{\theta}) & \sin(\hat{\theta}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{\alpha} \\ I_{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{dc} \\ I_{qc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_{dh} \\ I_{qh} \end{bmatrix} \quad (\text{III. 17})$$

Soit,

$$\begin{bmatrix} I_{ld} \\ I_{lq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\hat{\theta}) & -\cos(\hat{\theta}) \\ \cos(\hat{\theta}) & \sin(\hat{\theta}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{dc} \\ I_{qc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sin(\hat{\theta}) & -\cos(\hat{\theta}) \\ \cos(\hat{\theta}) & \sin(\hat{\theta}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{dh} \\ I_{qh} \end{bmatrix} \quad (\text{III. 18})$$

Où, I_{dc} et I_{qc} sont des composantes continues, I_{dh} et I_{qh} sont des composantes pulsatoires, (harmonique). La séparation de I_{dc} et I_{qc} des composantes I_{dh} et I_{qh} se fait par moyen d'un filtre passe-bas.

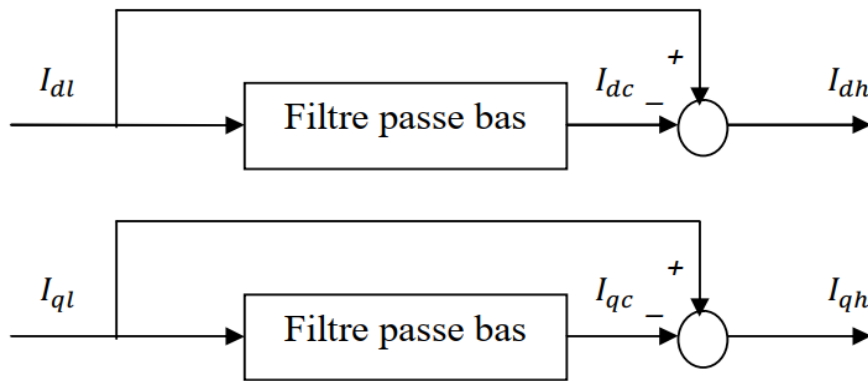


Figure III.3 : Schéma de principe de séparation des composantes continues et pulsatoires (harmoniques).

Les composantes harmoniques dans le repère α - β se calculent par l'expression suivante

$$\begin{bmatrix} I_{\alpha h} \\ I_{\beta h} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\hat{\theta}) & -\cos(\hat{\theta}) \\ \cos(\hat{\theta}) & \sin(\hat{\theta}) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} I_{dh} \\ I_{qh} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\hat{\theta}) & -\cos(\hat{\theta}) \\ \cos(\hat{\theta}) & \sin(\hat{\theta}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{dh} \\ I_{qh} \end{bmatrix} \quad (\text{III. 19})$$

La transformation inverse de Concordia permet de remonter aux courants harmoniques (équilibrés ou déséquilibrés).

$$\begin{bmatrix} I_{lah} \\ I_{lbh} \\ I_{lch} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{2} & \sqrt{\frac{3}{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\sqrt{\frac{3}{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{\alpha h} \\ I_{\beta h} \end{bmatrix} \quad (\text{III. 20})$$

L'algorithme de d'identification des courants harmoniques par la méthode de référentiel synchrone est schématisé par la **figure II.3**.

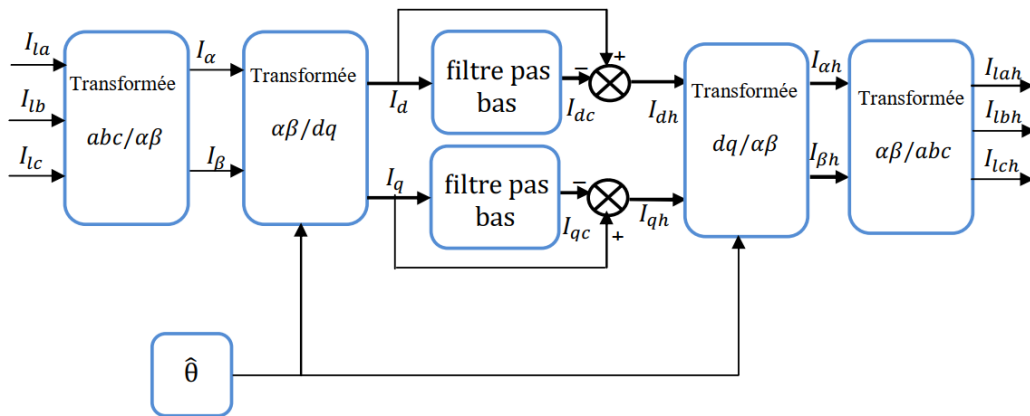


Figure III.4 : Principe d'identification des harmoniques par la méthode SRF.

III.4 Méthode du Filtre Notch :

Il s'agit de l'algorithme le plus simple pour calculer le courant de référence, comme indiqué ci-dessous. Le chiffre indiqué dans la **figure. II.1** [18].

Dans ce type de commande le courant de charge est filtré par un filtre coupe-bande qui parfois est appelé filtre « Notch ». Ces filtres coupe-bande éliminent la composante fondamentale tout en laissant passer les composantes harmoniques. Ils ont, par conséquent, la même fréquence de coupure. Le courant de référence ainsi créé permet la génération des signaux de commande des semi-conducteurs de l'onduleur. Le filtre coupe-Bande s'applique sans problème aux systèmes (équilibré ou non) monophasé, biphasé ou triphasé avec que Le nombre d'harmoniques compensé dépend de la bande passante des semi-conducteur composant l'onduleur du filtre actif. Cette méthode est caractérisée par un bon temps de réponse lors de régime transitoire et de calcul simple.

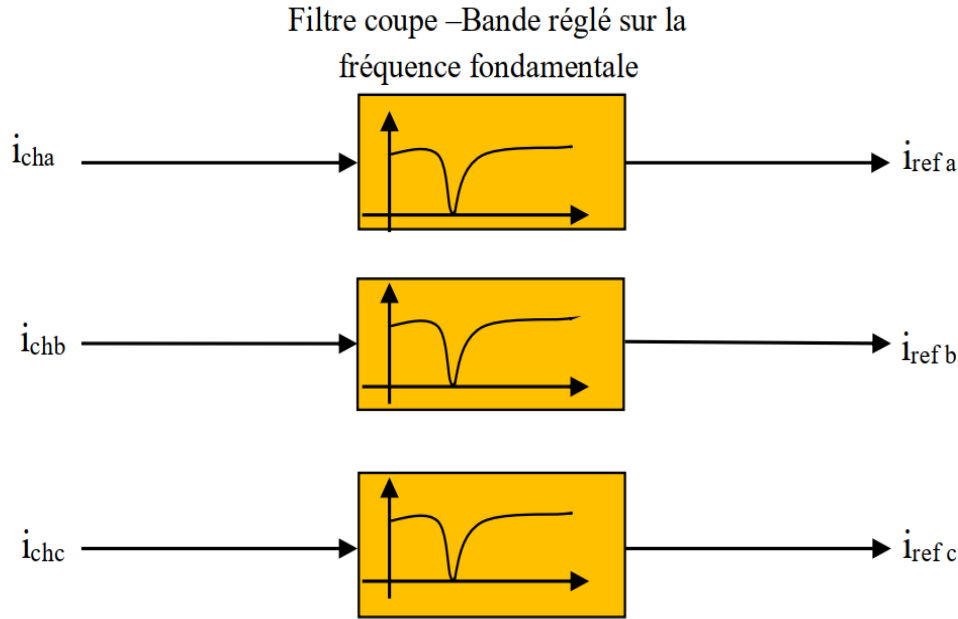


Figure III.5 : Méthode du filtre coupe-bande

La fonction de transfert associée à ces filtres est de la forme suivante :

$$H(p) = \frac{p^2 + \omega_c^2}{p^2 + p \frac{\omega_c}{\xi} + \omega_c^2} \quad (\text{III. 21})$$

III.5 Méthode Basée sur le Filtre Multi Variable (FMV) :

Son principe de base s'appuie sur les travaux de Song Hong-Scok. Il est basé directement sur l'extraction de la composante fondamentale des signaux d'entrée (tension ou courant), suivant les axes (α , β). La fonction de transfert de ce filtre est alors la suivante :

$$H(s) = \frac{\hat{X}_{\alpha\beta}(s)}{X_{\alpha\beta}(s)} = k \frac{(S + K) + j\omega_c}{(S + K)^2 + j\omega_c^2} \quad (\text{III. 22})$$

Où ω_c est défini par :

$$\omega_c = \varepsilon \cdot n \cdot \omega_f \quad (\text{III. 23})$$

Avec :

ω_c : La pulsation de coupure du filtre.

ω_f : La pulsation de la composante fondamentale du signal d'entrée.

N : Le rang de la composante du signal à filtrer.

ε : une constante égale à ± 1 (composante directe ($\varepsilon = 1$) ou inverse ($\varepsilon = -1$)).

K : une constante positive.

$x_{\alpha\beta}$: les signaux d'entrée du FMV (tension ou courant).

$\widehat{X}_{\alpha\beta}$: Les signaux de sortie du FMV

A partir de l'équation (III.3) et après un court développement, nous pouvons établir les deux expressions suivantes :

$$\widehat{X}_{\alpha}(S) = \frac{K(S + K)}{K(S + K)^2 + \omega c^2} X_{\alpha}(S) - \frac{K\omega c}{(S + K)^2 + \omega c^2} X_{\beta}(S) \quad (III. 24)$$

$$\widehat{X}_{\beta}(S) = -\frac{K(S + K)}{K(S + K)^2 + \omega c^2} X_{\alpha}(S) - \frac{K\omega c}{(S + K)^2 + \omega c^2} X_{\beta}(S) \quad (III. 25)$$

Les équations (III.24) et (III.25) peuvent également être exprimées sous la forme :

$$\widehat{X}_{\alpha}(S) = \frac{K}{S} [X_{\alpha}(S) - \widehat{X}_{\alpha}(S)] - \frac{\omega c}{S} \widehat{X}_{\beta}(S) \quad (III. 26)$$

$$\widehat{X}_{\beta}(S) = \frac{K}{S} [X_{\beta}(S) - \widehat{X}_{\beta}(S)] + \frac{\omega c}{S} \widehat{X}_{\alpha}(S) \quad (III. 27)$$

La Figure III.5 [présente le schéma bloc du filtre multi-variable [38].

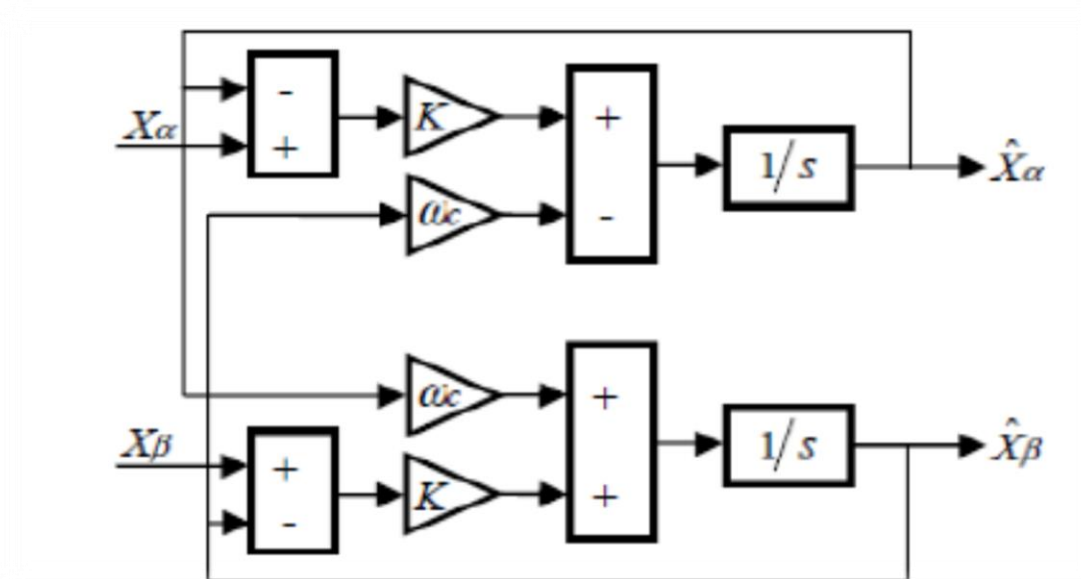


Figure III.6 : Schéma bloc du FMV.

III.6 Comparaison entre les Méthodes d'Identification des Courants :

La méthode (p-q) a l'avantage d'être assez simple pour la mettre en application sous forme analogique puisqu'elle a besoin seulement des opérations de multiplication et de filtrage simple. L'inconvénient le plus évident de la méthode (p-q) est qu'elle s'exécute mal dans des conditions non équilibrées de tension d'alimentation, parce que l'algorithme suppose que les tensions d'alimentation sont sinusoïdales et équilibrées. Un avantage de la méthode SRF est qu'elle s'exécute bien avec n'importe quelle forme d'onde du courant. Un inconvénient est que l'algorithme est assez complexe et exige un circuit PLL pour fonctionner correctement. Dans la méthode (p-q), l'exécution est bonne pour les conditions de la tension d'alimentation en cas de déséquilibre. Un inconvénient de cette méthode est qu'elle suppose que les courants dans chaque phase sont égaux, ou la charge est équilibrée.

III.7. La Régulation :

Une fois les courants de références obtenus, l'étape suivante consiste à étudier les méthodes de contrôle de ce dispositif. Celles-ci permettent de contrôler le filtre actif afin qu'il génère des courants qui suivent au mieux leurs références. Il existe deux grandes familles de stratégie de contrôle du courant, la commande par modulation de largeur d'impulsion et la commande par hystérésis.

Dans notre étude, nous avons retenu la commande à MLI afin de contourner les problèmes de la commande par hystérésis. La régulation du filtre actif met en œuvre tout d'abord un régulateur qui, à partir de l'écart entre le courant réel et le courant de référence, détermine la tension de référence de l'onduleur. Cette dernière est ensuite comparée avec un signal en dent de scie (porteuse). La sortie du comparateur fournit l'ordre de commande des interrupteurs. Afin de maintenir la tension aux bornes de l'élément de stockage à une valeur fixe, une boucle de régulation de la tension continue est prévue.

III.7.1. Régulation de la Tension Continue :

La tension moyenne V_{dc} aux bornes du condensateur doit être maintenue à une valeur fixe. Les pertes dans le filtre actif (interrupteurs et filtre de sortie) sont la principale cause susceptible de modifier cette tension. La régulation de la tension continue aux bornes du condensateur de stockage d'énergie doit se faire par l'adjonction des courants fondamentaux actifs dans les courants de référence. La sortie du régulateur P_c s'ajoute, à un signe près, à la puissance active perturbatrice \check{p} et donne lieu à un courant fondamental actif corrigeant ainsi V_{dc} . La puissance représente la puissance active nécessaire pour maintenir la tension V_{dc} égale à la valeur de la

tension de référence souhaitée (V_{dc-ref}). Le régulateur employé ici est un régulateur proportionnel simple (K_c). En négligeant les pertes de commutations dans l'onduleur ainsi que l'énergie stockée dans l'inductance du filtre de sortie, la relation entre la puissance absorbée par le filtre actif et la tension aux bornes du condensateur peut s'écrire sous la forme suivante :

$$P_c = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} C_{dc} * V_{dc}^2 \right) \quad (\text{III. 28})$$

Notons que la relation (III.24) est non linéaire. Pour des faibles variations de la tension V_{dc} autour de sa référence V_{dc-ref} , elle peut être linéarisée à travers les relations suivantes :

$$p_c = C_{dc} * V_{dc-ref} \frac{d}{dt} (V_{dc}) \quad (\text{III. 29})$$

$$V_{dc} = \frac{P_c(s)}{C_{dc} * V_{dc-ref} * S} \quad (\text{III. 30})$$

A partir de la relation (III.25), et en prenant en compte le régulateur proportionnel (K_c), la boucle de régulation de la tension continue peut-être représentée par le schéma de la figure 4.2. Le choix du paramètre K_c aura pour objectif d'obtenir un temps de réponse minimal [38].

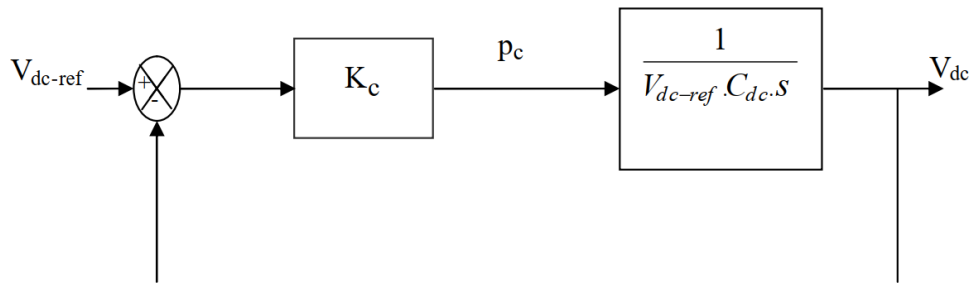


Figure III.7 : Boucle de régulation de la tension continue.

III.8 Conclusion :

Ce chapitre présente les différentes méthodes de détermination des courants harmoniques de référence largement utilisées. Déterminez les courants harmoniques de référence. Nous avons présenté la méthode analytique. Cela nous permet de voir comment chaque méthode fonctionne dans des conditions différentes.

CHAPITRE IV :
Modélisation et
Simulation
Numérique

IV -1 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 le 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 se propose d'étudier la simulation de l'ensemble réseau, redresseur, filtre actif sous l'environnement **Matlab-Simulink** avec lequel on met au point deux programmes de simulation. On donne ensuite les résultats de simulations obtenus. Finalement, pour compléter cette simulation, un cas particulier de charge polluante sera également traité.

IV-2 Schéma Synoptique de l'Association Filtre Actif- Réseau-Charge Polluante :

Le filtre actif parallèle n'est rien d'autre qu'un onduleur de tension commandé en courant, qui, possède une source continue et qui est connecté au réseau perturbé par un filtre inductif.

La figure (IV-1) donne le schéma synoptique de l'association filtre actif -réseau- charge polluante.

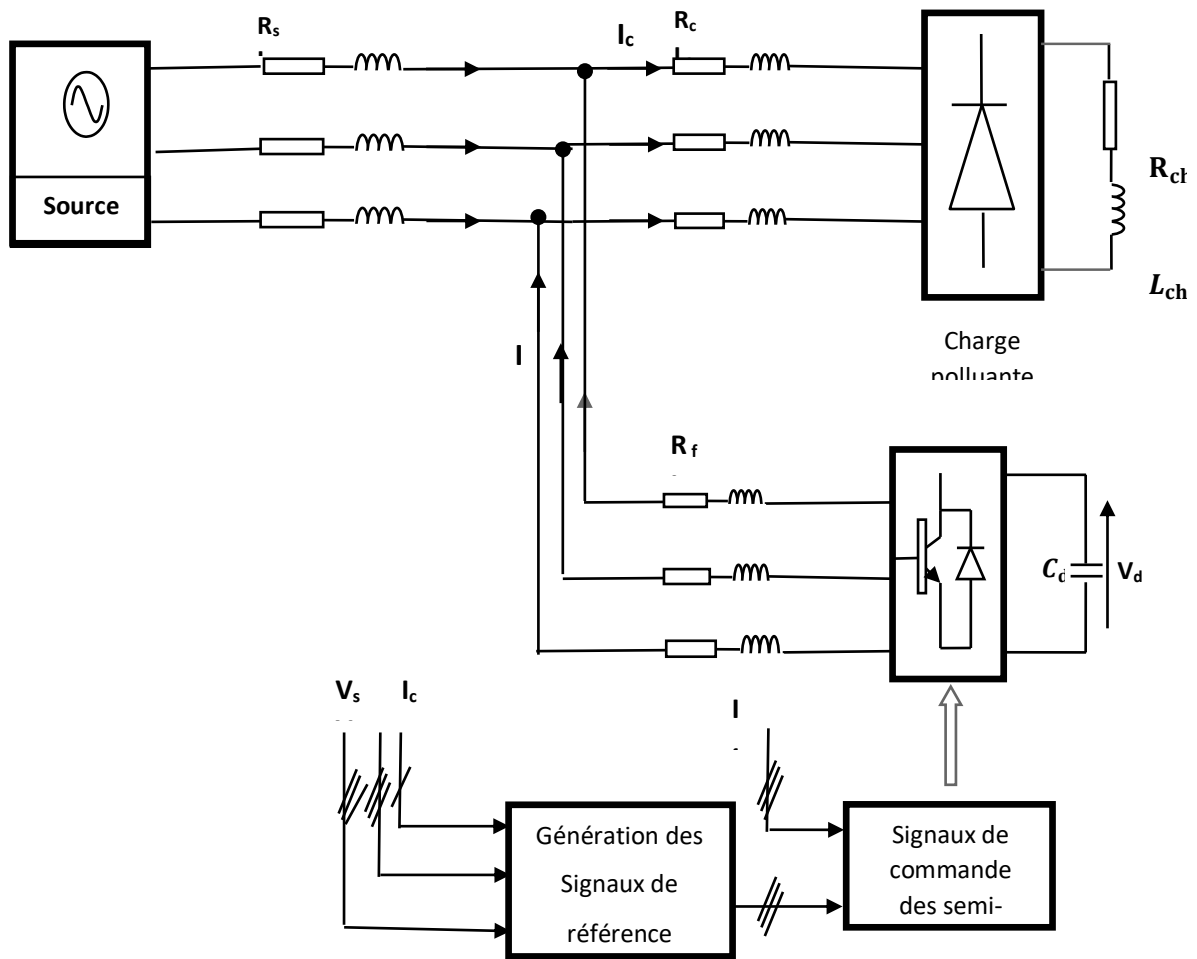


Figure (IV-1) : schéma synoptique de l'association filtre actif -réseau- charge polluante

IV-3 Modélisation de l'Association Réseau –Filtre Actif – Charge Polluante :

La modélisation d'un système revient à trouver les équations mathématiques qui décrivent son fonctionnement.

IV -3-1 Modélisation du Réseau :

Le réseau est assimilable à une source de tension sinusoïdale en série avec une impédance, dite de court-circuit, d'où la représentation du réseau par un système de F.E.M triphasées équilibrées en série avec une impédance (figure (IV-2)).

$$\begin{bmatrix} e_{s1} \\ e_{s2} \\ e_{s3} \end{bmatrix} = \sqrt{2} * E \begin{bmatrix} \sin(\omega_s t) \\ \sin(\omega_s t - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\omega_s t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (\text{IV-1})$$

$$Z_s = R_s + jL_s\omega$$

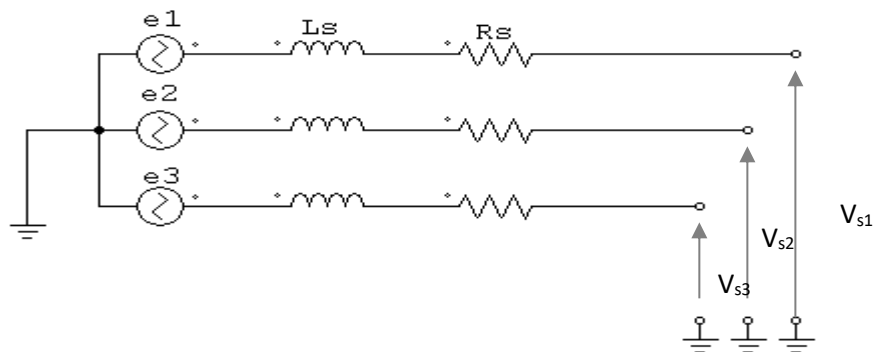


Figure (IV-2) : schéma synoptique d'un réseau triphasé.

IV-3-2 Modélisation de la Charge Polluante (Redresseur Triphasé) :

Pour tester le filtre actif on a opté pour une charge polluante qui est un pont redresseur triphasé, représenté sur la figure (IV -3), ce dernier génère des harmoniques de courants de l'ordre $6k \pm 1$. Cette charge est modélisée comme étant des sources de courants parfaites (les semi-conducteurs sont considérés parfaits).

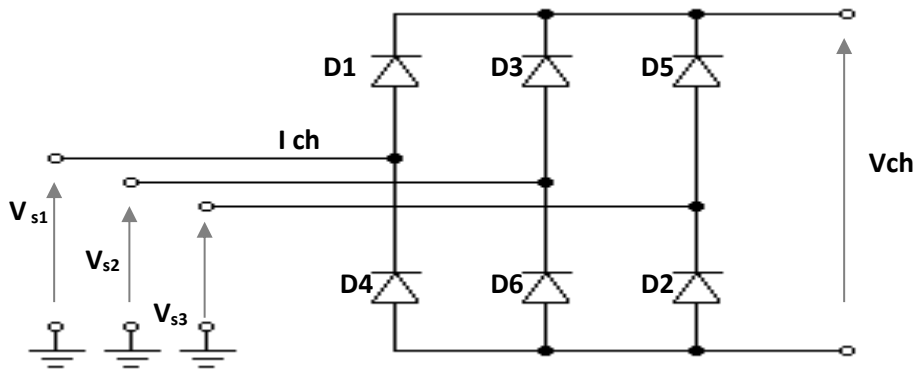


Figure (IV -3) : Schéma synoptique d'un pont redresseur.

IV-3-3 Modélisation du Filtre Actif :

Dans notre étude, on choisit un onduleur de tension commandé en courant. Ce dernier est constitué de trois bras dont chacun est constitué de deux cellules, contenant chacune un interrupteur bicommandable (IGBT), aux bornes duquel est montée une diode en antiparallèle, la cellule ainsi définie forme un interrupteur bidirectionnel (figure (IV-4)).

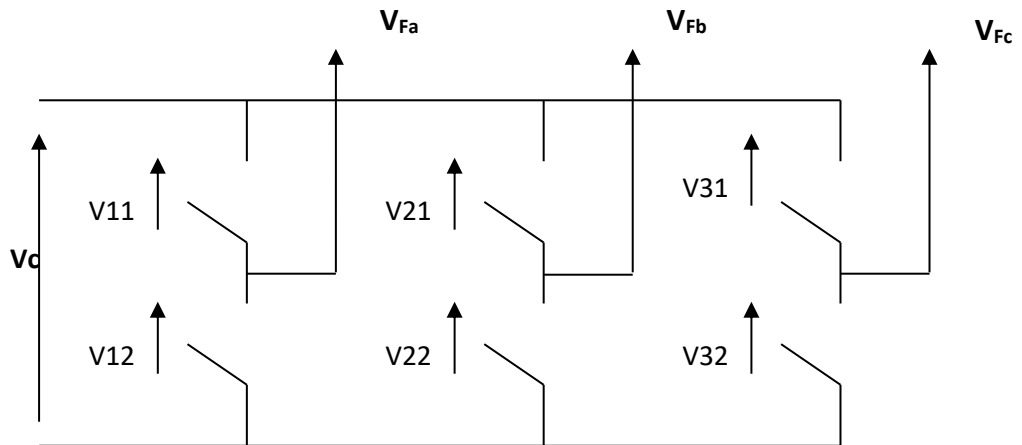


Figure (IV-4) : Présentation schématique d'un onduleur triphasé.

IV -3-3-1 Fonction de Connexions :

Soit $i=1, 2, 3$

$j=1,2$

On associe à chaque interrupteur une fonction $F_{\alpha\beta}$ dite de connexion, tel que :

$$F_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{Si l'interrupteur est fermé} \\ 0 & \text{Si l'interrupteur est ouvert} \end{cases} \quad \text{(IV.2)}$$

D'où :

$$\begin{cases} i_{ij} = F_{ij} i_{dc} \\ v_{ij} = (1 - F_{ij}) \cdot v_{dc} \end{cases} \quad (\text{IV.3})$$

Tel que $i_{\alpha\beta}$ représente le courant qui traverse l'interrupteur S_{ij} et v_{ij} la tension aux bornes de ce dernier.

IV.3.3.c Fonctions de Connexions Composées :

Soit v_{fab} , v_{fbc} , v_{fca} les tensions composées délivrées par l'onduleur

$$\begin{cases} v_{fab} = v_{21} - v_{11} \\ v_{fbc} = v_{31} - v_{21} \\ v_{fca} = v_{11} - v_{31} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} v_{fab} = (F_{11} - F_{21}) \cdot v_{dc} \\ v_{fbc} = (F_{21} - F_{31}) \cdot v_{dc} \\ v_{fca} = (F_{31} - F_{11}) \cdot v_{dc} \end{cases} \quad (\text{IV.4})$$

D'où :

$$\begin{pmatrix} v_{fab} \\ v_{fbc} \\ v_{fca} \end{pmatrix} = v_{dc} \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} F_{11} \\ F_{21} \\ F_{31} \end{pmatrix} = v_{dc} \begin{pmatrix} F_{ab} \\ F_{bc} \\ F_{ca} \end{pmatrix} \quad (\text{IV.5})$$

Les fonctions de conversions composées sont :

$$\begin{cases} F_{ab} = F_{11} - F_{21} \\ F_{bc} = F_{21} - F_{31} \\ F_{ca} = F_{31} - F_{11} \end{cases} \quad (\text{IV.6})$$

IV.3.3.d Les Fonctions de Conversions Simples :

Dans l'hypothèse que les tensions simples v_{f1} , v_{f2} , v_{f3} forment un système triphasé équilibré nous avons :

$$\begin{pmatrix} v_{fa} \\ v_{fb} \\ v_{fc} \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} v_{ab} \\ v_{bc} \\ v_{ca} \end{pmatrix} \quad (\text{IV.7})$$

$$\begin{pmatrix} v_{fa} \\ v_{fb} \\ v_{fc} \end{pmatrix} = \frac{1}{3} v_{dc} \begin{pmatrix} 2 & 1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} F_{11} \\ F_{21} \\ F_{31} \end{pmatrix} = v_{dc} \begin{pmatrix} F_a \\ F_b \\ F_c \end{pmatrix} \quad (\text{IV.8})$$

Les fonctions de conversion simples s'écrivent alors :

$$\begin{cases} F_a = \frac{1}{3} (2F_{11} - F_{21} - F_{31}) \\ F_b = \frac{1}{3} (-F_{11} + 2F_{21} - F_{31}) \\ F_c = \frac{1}{3} (-F_{11} - F_{21} + 2F_{31}) \end{cases} \quad (\text{IV.9})$$

IV-4 Description Globale de la Simulation :

Les programmes de simulation développés, permettent de visualiser sur un intervalle de temps donné l'évolution des courants et des tensions dans les différentes branches du circuit de la figure (IV-1).

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

Réseau électrique
$v \frac{100}{\sqrt{3}} s_{\max} \text{ V}, f_s=50\text{Hz}, R_s=0.42\Omega, L_s=2.5\text{e-}3\text{H}$
Charge polluante
Résistance et inductance de l'entrée du redresseur : $R_c=0.2 \Omega, L_c=1\text{e-}3(\text{H}).$
Pont de Gréât alimentant une charge R-L série $R_{ch}=8.5\Omega, L_{ch}=3\text{e-}3\text{H}.$
Filtre parallèle
$\hat{v}_{dc_{rms}}=120\text{V}, v_{dc_{réf}}=120\text{V}, C_{dc}=1.1\text{e-}3\text{F}, R_f=0.4\Omega, L_f=5\text{e-}3\text{H}, f_c=55\text{Hz}$

La figure (IV-5): montre les résultats obtenus par la commande MLI dans le cas où le pont à thyristors alimente une charge de type RL. La fréquence de commutation a été fixée à une valeur de $f = 10 \text{ kHz}$.

IV.5 Résultats de Simulation :

En utilisant les paramètres précédents sur notre bloc Simulink pour l'extraction des courbes (avant et après le filtrage), donc les résultats de simulation sont présentés sur les figures suivantes :

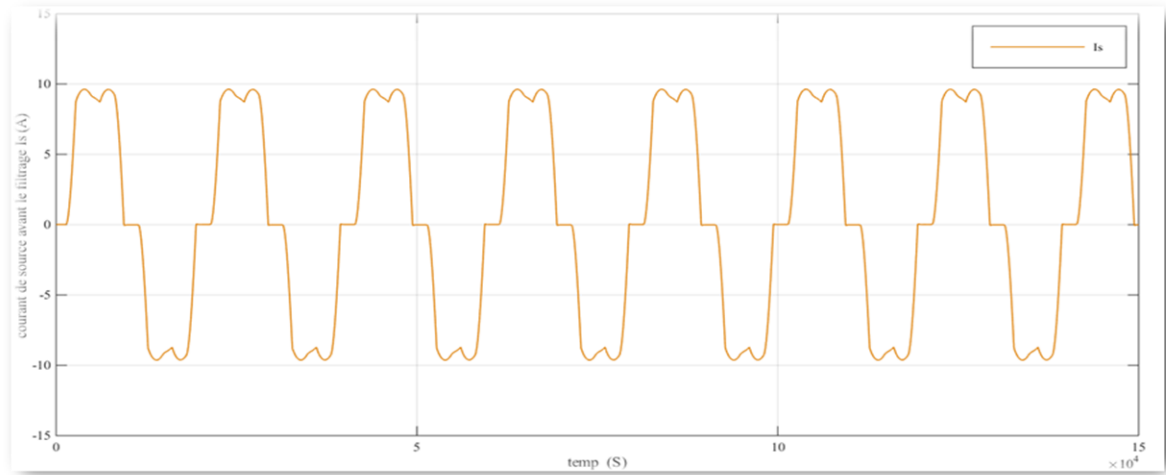


Figure (IV.5) : courant de source avant filtrage

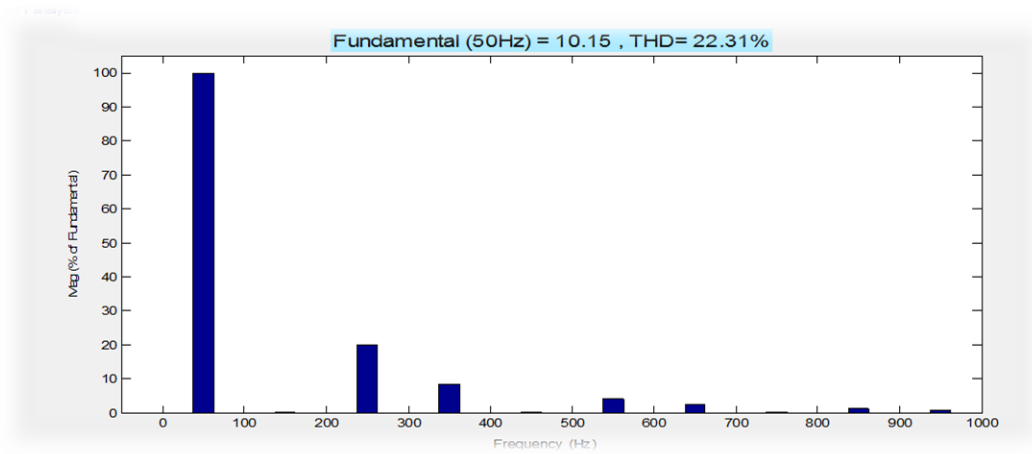
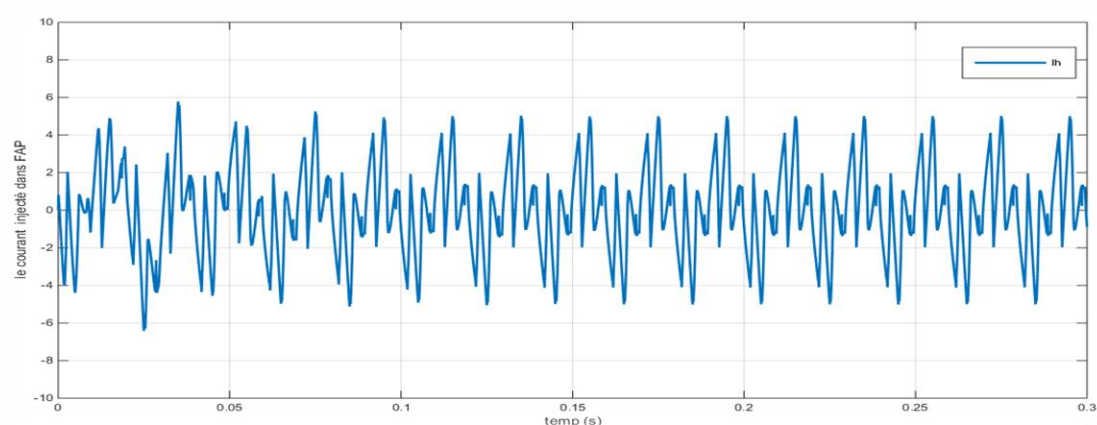


Figure (IV.6) : spectre d'harmonique du courant de source avant filtrage Le taux de distorsion d'harmonique a été mesuré, THD= 22.31%



Figure(IV.7) : courant injecté par filtre.

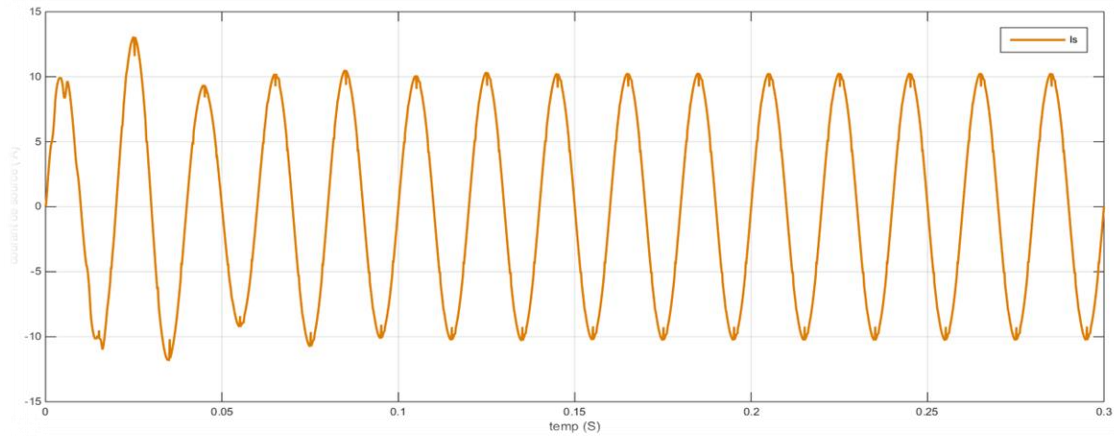
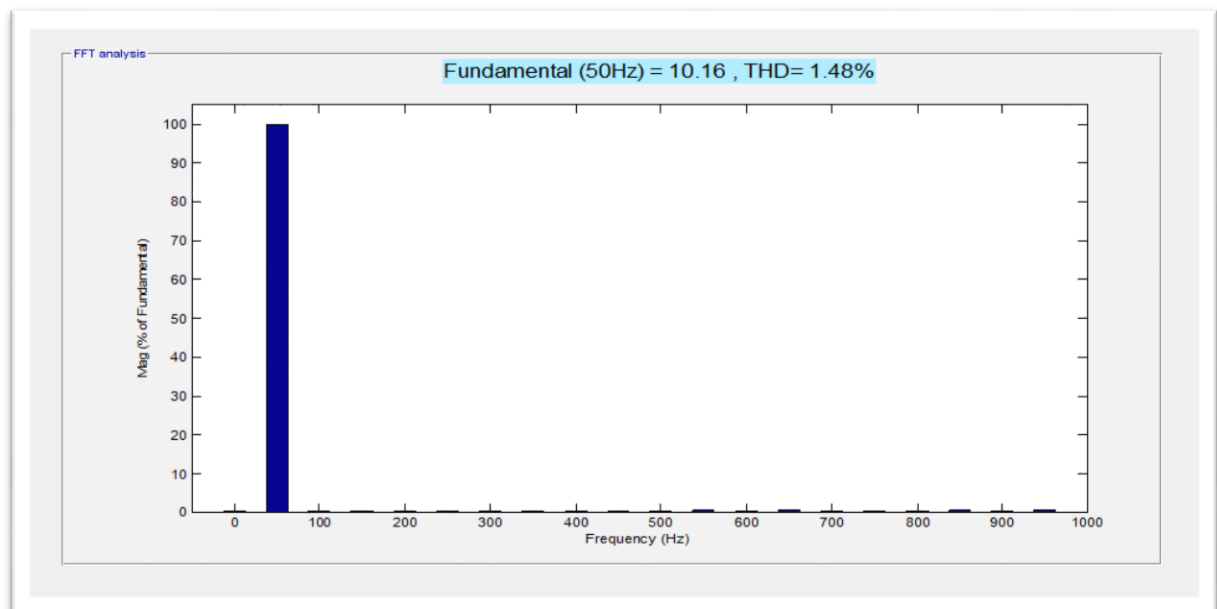


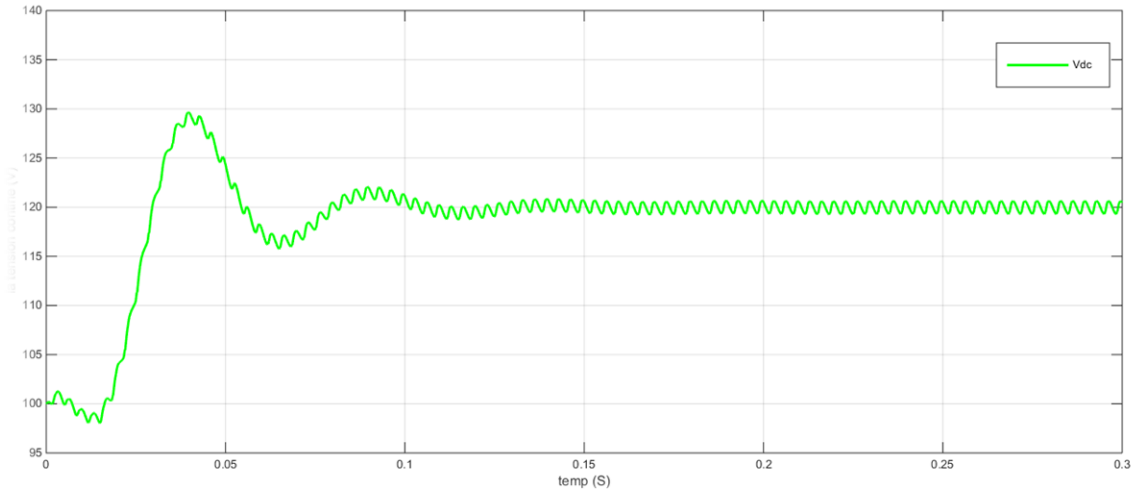
Figure (IV.8) : courant de source après filtrage.

Après filtrage on remarque que le courant de source est devenu sinusoïdale.



Figure(IV.9) : spectre d'harmonique du courant de source après filtrage

Le taux de distorsion d'harmonique a été mesuré THD= 1.48%.



Figure(IV.10) : la tension continue V_{dc} après installation FAP.

IV.5.1.2 Compensation des courants harmoniques et de la puissance réactive :

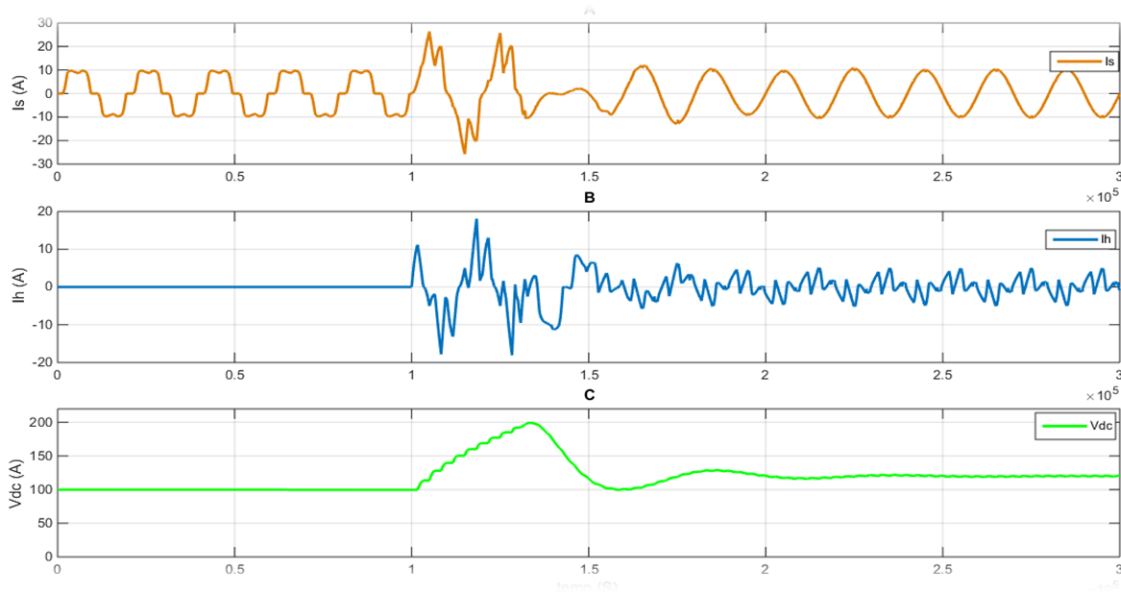


Figure (IV.11) : Courant de source I_s , Courant injecté dans filtre I_i , et tension de bus continu V_{dc} avant/après installation du FAP.

IV.5.1 Comportement du FAP en Régime Dynamique :

Pour étudier l'adaptation et le comportement du FAP en régime dynamique, nous avons procédé à une variation de la charge non linéaire et Le passage de la charge (1) à la charge (2), se fait à l'instant $t=0.1\text{sec}$. Comme la montre les figures suivantes :

Charge RL1 : $R_{ch1} = 8 \Omega$, $L_{ch1} = 3\text{mH}$ et Charge RL2 : $R_{ch2} = 11 \Omega$, $L_{ch2} = 3\text{mH}$

Changement de la charge ($R_1L_1 \rightarrow R_2L_2$)

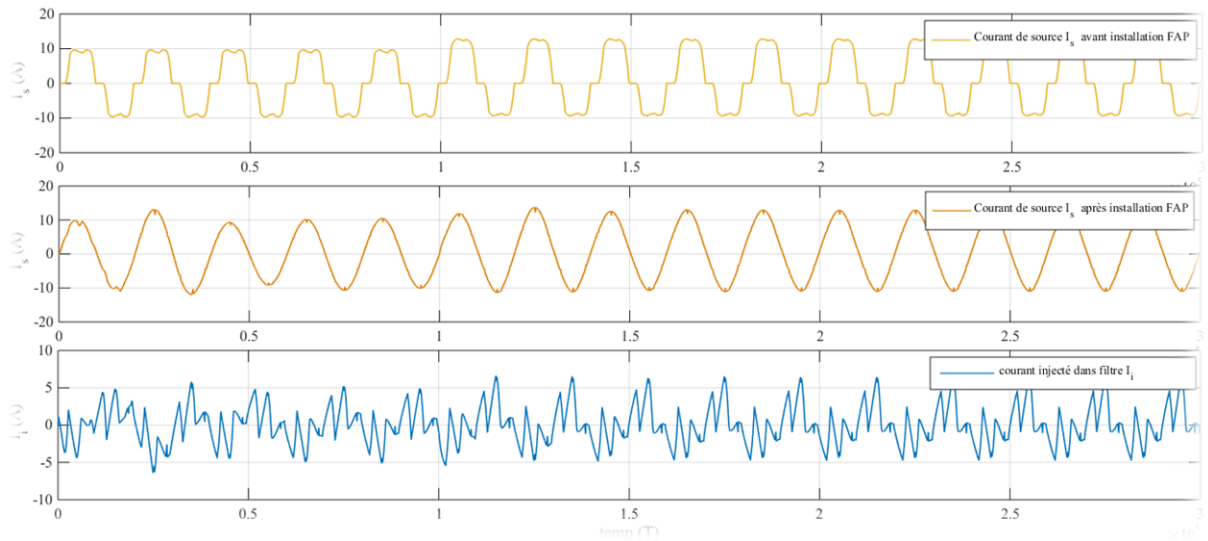


Figure (IV.12) : Courant de source I_s avant/après installation du FAP .courant injecté par filtre I_f

IV.5.2 Interprétations des Résultats :

D'après les résultats de simulation obtenus sur les figures ci-dessus montrant la compensation des courants harmoniques, avec une commande d'un filtre actif parallèle commandé par la technique contrôle et régulateur proportionnel ; on remarque que :

IV.5.2.1 En Régime Permanent :

- La figure (IV.6) représente le spectre d'harmonique du courant de source avant filtrage.
- la figure (IV.9) représente la spectre d'harmonique du courant de source après filtrage , on remarque que le courant de source avant filtrage est très riche en harmoniques de rang $(2k+1, k = 2, \dots, 9)$, ainsi que son taux de distorsion harmonique est mesurée sur 3 périodes entre les instants 0.22 et 0.26 sec et un $THD_i = 22.31\%$ (avant le filtrage) et $THD_i = 1.48\%$ (après le filtrage) ,ce qui signifie la conformité à la norme IEEE 519-1992.

Commande	Charge	THD _i % avant filtre	THD _i % après filtre
	charge R-L	22.31 %	1.48%

Tableau (IV.2) : Les résultats des simulations.

IV.5.2.2 En Régime Dynamique :

La figure (IV.12) montrent des résultats très satisfaisants du point de vue dépassement et temps de réponse, aussi, ils montrent que le courant de source est toujours quasi-sinusoïdal malgré la variation de la charge.

IV. 6 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté et interprété les résultats de simulation de l'ensemble réseau, filtre actif parallèle, et charge polluante.

Avec ce filtre actif, le *THDi* du courant de source est réduit de **22,31 %** à **1,48 %** (pour une charge R-L). D'autre côté, nous avons constaté que les performances du filtre actif parallèles sont excellentes lors de la variation de la charge. Le régulateur PI a permis de réguler la tension du bus continu pour les différents régimes de fonctionnement. Le filtre permet aussi d'améliorer le facteur de puissance .

Conclusion Générale

Conclusion Générale :

Dans ce travail, le filtre actif a été étudié dans le but d'améliorer la qualité de l'énergie dans les réseaux basse tension en réduisant les courants harmoniques générés par les charges non linéaires. Différents cas de charge (équilibré, déséquilibré et transfert de charge) ont été étudiés. La méthode de puissance instantanée est utilisée dans l'étape de sélection, et le contrôle efficace bien connu de l'hystérésis.

Dans le premier chapitre, une étude théorique a été menée sur la problématique des perturbations électriques, en se concentrant sur les harmoniques générées par les charges non linéaires associées aux réseaux électriques. Puis, dans le douzième chapitre, nous avons présenté de manière générale les solutions traditionnelles et modernes utilisées en filtration, et dans le deuxième chapitre, nous avons présenté en détail les différents éléments qui composent le filtre actif parallèle à quatre serpentins, dont les deux plus grandes parties. Nous les appelons : partie puissance et partie contrôle. Le chapitre trois présente les différentes méthodes largement utilisées pour déterminer les courants harmoniques de référence. Déterminez les courants harmoniques de référence. Nous avons introduit la méthode analytique, qui nous permet de voir comment chaque méthode fonctionne dans des conditions différentes. Enfin, la structure complète du filtre actif parallèle est simulée à l'aide de MATLAB/Simulink au chapitre (4).

Nous pouvons conclure de ce travail que le filtrage actif permet une réduction significative des harmoniques de courant quelle que soit la charge (variation de charge en eau équilibrée et déséquilibrée). Le courant délivré par la source après filtrage est presque toujours sinusoïdal, sans harmoniques dans tous les cas de simulation, avec une distorsion harmonique totale (THD) maximale de 5 % maximum ; La valeur maximale requise par la norme IEEE.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] S. BEN ALI et S. BOUHANAK « Etude et Simulation d'un Filtre Active Parallèle à Quatre Fils ». Mémoire de master, Université Echahid Hama Lakhdar d'el-oued, 2015.
- [2] F. FORNANI, R. PROCOPIO and H. J. BOLLEN. « SSC Compensation Capability of Unbalanced Voltage Sags ». IEEE Transaction on Power Delivery, V. 20, N° 03, p 2030 2005, 2037-.
- [3] L. BILAL et O. ABANA « Stratégies de Commande d'un Filtre Active Parallèle Triphasé. » Mémoire de master, Université Echahid Hama Lakhdar d'el-oued, 2012.
- [4]: CHAOUI, Abdelmadjid. « Filtrage actif triphasé pour charges non linéaires ». Thèse de doctorat. Univ Sétif 2010.
- [5] : CHENNAI Salim « Etude, Modélisation & Commande des Filtres Actifs Apport des Techniques de l'Intelligence Artificielle » Mémoire Doctorat Université Mohamed Khider Biskra, 2013.
- [6] : D. OULD ABDESLAM, « Techniques neuro mimétiques pour la commande dans les systèmes électriques : application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basses tension », Thèse de doctorat, université de Haute Alsace, décembre 2005.
- [7] : DJAFFAR OULD ABDESLAM, "Techniques neuro mimétiques pour la commande dans les systèmes électriques : Application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basse tension", Thèse de doctorat de l'université de Haute-Alsace 08 décembre 2005.
- [8] : REGUIG Nadja. HERIZI Brahim « Etude Et Simulation D'un Filtre Actif De Puissance » Mémoire Master Université Mohamed Boudiaf- M'sila 2018
- [9] : BERKOUK.E.M, "Contribution à la conduite des machines asynchrones monophasées et triphasées par des convertisseurs directs et indirects. Application aux gradateur et onduleurs multiniveaux", Thèse de doctorat, CNAM Paris, 1995
- [10] : LABBI Imad, ZOBEIDI Smail, DJABALLAH Mounir, « filtrage actif parallèle des réseaux électriques », Thèse D'ingénieur d'état en génie électrotechnique, Université de m'sila ,2012.
- [11] ZELLOUMA LAID, "Filtrage actif parallèle des harmoniques du courant génères par un Pont redresseur triphasé non commande, Thèse de Magister, Université BADJI Mokhtar Annaba, Algérie, 2006.
- [12] : AMROUNE Mourad, « Commande et diagnostic d'un filtre actif parallèle », Thèse Master, Université Mohamed Boudiaf de M'SILA, 2016.
- [13] : Bédier Zouheir, Rhaskali Walid, Benlembarak Bilal, « Compensation du courant harmonique génère par une charge non linéaire », Thèse D'ingénieur d'état en génie électrotechnique, Université de M'sila ,2011.

-
- [14] : Dédies à l'amélioration de la qualité de l'énergie : de la basse tension a la montée en tension", Thèse Doctorat, l'institut national polytechnique de Grenoble avec le « label européen » le 14 novembre 2006.
- [15] : BEN ALI Sofiane, BOUHANAK Saddam, " ETUDE ETSIMULATION D'UNFILTRE ACTIF PARALLEL A QUATRE FILS", Mémoire Master De Université Echahid Hama Lakhdar d'El-Oued, 2015.
- [16] : BACHAR Rahima, « Commande Prédictive Appliquée au Filtre Actif », Thèse Doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra, 2019.
- [17] : Chaoui, A. (2018). Filtrage actif triphasé pour charges non linéaires (Doctoral dissertation).
- [18] : ZELLOUMA, M. (2019) Étude et réalisation d'un filtre actif parallèle de puissance commandé par DSPACE1104 (Mémoire Master, Université BADJI MOKHTAR ANNABA).
- [19] Sahli Abdeslem, « Filtrage actif et contrôle de puissances : Application aux systèmes Photo voltaïques interconnectés au réseau », Thèse Magister, Université Ferhat Abbas – Sétif ,2012.
- [20] : Mr. Galou Elhacéne, Melle. Hamani Rachida, « Contribution à La Commande d'un filtre actif parallèle », Thèse Master, Université Abderrahmane MIRA- BEJAIA ,2017.
- [21] : L'Enne, M., Zeglaoui, I., & Sououdi, C. H. A. B. A. N. I. (2021). Contribution à La Commande d'un filtre hybride multiniveaux (Doctorat dissertation, UNIVERSITE AHMEDDRAIA-ADRAR).
- [22] : BELHAOUCHET, N. (2014). Fonctionnement a fréquence de commutation constante des convertisseurs de puissance en utilisant des techniques de commande avancées application : amélioration de la qualité de l'énergie (Doctoral dissertation, UNIVECITE FARHAT ABBAS SETIF).
- [23] T. BENSLIMANE, "Commande numérique d'un filtre actif parallèle autonome", Mémoire de magister, Ecole Militaire polytechnique, 2004.
- [24] CHELLI Zoubir, "Amélioration De La Qualité De L'énergie Electrique Par Un Filtre Actif D'harmonique", Thèse Doctorat, UNIVERCITE BADJI MOKHTAR – ANNABA, 2015.
- [25] Mohamed Muftah ABDUSALAM, « Structures et stratégies de commande des filtres actifs parallèle et Hybride avec validations expérimentales », Thèse Doctorat, l'Université Henri Poincaré, Nancy-I ,2008.
- [26] : Abdelkader, Yousfi. Amélioration de la qualité de l'énergie électrique en utilisant un onduleur de tension a cinq niveaux. Clef : Université de Hassiba Ben Bouali Chlef, 2008.
- [27] : Thierry GOURAUD. « Identification et rejet de perturbations harmoniques dans des réseaux de distribution électrique ». Thèse de doctorat, à l'Ecole Centrale de Nantes le 7 Janvier 1997.

-
- [28] : Mohamed Muftah ABDUSALAM, « Structures et stratégies de commande des filtres actifs parallèle et hybride avec validations expérimentales », Thèse Doctorat, l'Université Henri Poincaré, Nancy-I ,2008.
- [29] : Yahiaoui Merzoug, « Contrôle optimal des puissances réactives et des tensions dans un réseau d'énergie électrique par dispositifs FACTS », Thèse Doctorat, Université Des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 2014.
- [30] : SEMAOUI Hammou, « compensation de l'énergie réactive d'une installation industrielle MT/BT (HTA/BTB) », Thèse Master, Université Mohamed Boudiaf de M'SILA, 2016.
- [31] : HAMOUDA Noureddine, « Amélioration de la Qualité du Réseau Electrique à l'Aide de Compensateurs Actifs », Thèse Doctorat, université frères mentouri Constantine 1 ,2018.
- [32] : Kamel DJAZIA, « Etude des filtres actifs pour réseaux déséquilibrés et distordus », Thèse Doctorat, Université Ferhat Abbas – Sétif 1, 2015.
- [33] : Ben Salah Wassila, Boutaleb Nour el Houda, « Etude de la commande des redresseurs MLI », Thèse Master, Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent, 2016.
- [34] : Melle DJEBBAR Nassima, Mr BENMOUNA Adel, « Commande par mode glissant d'un redresseur à MLI triphasé », Thèse Master, Université A. MIRA BEJAIA ,2015.
- [35] : Yousfi Abdelkader, « Amélioration De La Qualité D'énergie Electrique En Utilisant U Onduleur De Tension A Cinq Niveaux », Thèse Magister, Université hassiba ben bouali de Chlef 2008.
- [36] : Mohamed Muftah ABDUSALAM, « Structures et stratégies de commande des filtres actifs parallèle et hybride avec validations expérimentales », Thèse Doctorat, l'Université Henri Poincaré, Nancy-I ,2008.
- [37]: L. ASIMINOAEI, F. BLAABJERG et S. HANSEN, « Evaluation of Harmonique détection méthodes for active power filtre applications », in Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2005. APEC 2005.TwentiethAnnual IEEE, vol. 1, p. 635–641 Vol. 1, March 2005.
- [38] : A. morsli, A. tlemcani, M.S. boucherit et N. ould cherchali « Dépollution des Réseaux Electriques Basse Tension utilisant un Filtre Actif Parallèle à deux niveaux contrôle par I 'Algorithme.
- [39] : Mohamad Alaa Eddine Alali, « Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension », Thèse de Doctorat de l'Université de Louis Pasteur, Strasbourg, 12 Septembre 2002.

