

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

Mémoire de Fin d'Etudes de MASTER ACADIMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie Electrique

Spécialité : RESEAUX ELECTRIQUES

Présenté par

MOKRANI Younes

STITI Rachid

Thème

Etude et simulation d'un filtre actif série

Mémoire soutenu publiquement le ...juillet 2017 devant le jury composé de :

M Salah HADDAD

Professeur, UMMTO, **Président**

M^{elle} Rahma KACHENOURA

MCB, UMMTO, **Rapporteur**

M Ahmed NAHI

MA/A, UMMTO, **Examineur**

M Said AISSOU

MA/B, UMMTO, **Examineur**

REMERCEMENTS

Je tiens profondément à remercier tout d'abord DIEU l'unique qui a permis à ce travail de voir la lumière.

Je tiens à remercier vivement ma promotrice mademoiselle R.KACHENOURA, maitre de conférences à l'université Mouloud MAMMARI de Tizi-Ouzou pour ses orientations éclairées, ses conseils constructifs et son aide précieuse.

Je remercie Mr : S.HADDAD, professeur à l'université Mouloud MAMMARI de Tizi-Ouzou pour sa disponibilité, ses conseils et sa tolérance.

Je remercie Mme MEGHERBI, professeur à l'université Mouloud MAMMARI de Tizi-Ouzou pour sa disponibilité.

Nous tenons aussi à remercier Mr : A.NAHI, Mr : S.AISSOU et Mr : A.CHALLAL pour leur précieux conseils.

Nos profondes reconnaissances et considération aux membres du jury qui ont aimablement accepté de juger notre travail et de lui accorder l'attention nécessaire.

Je tiens à remercier toutes les personnes ayant participé de près de loin à la réalisation de ce mémoire.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

*A mes très chers parents pour leur sacrifice, leur
patience et leur soutien durant mon cycle d'étude*

A mes chères frères : Fassine, Abd elhadi

A mes chères sœurs,

A mon binôme Rachid,

Et à tous mes amis,

A tous ceux qui me sont chers

Founes

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

*A mes très chers parents pour leur sacrifice, leur patience
et leur soutien durant mon cycle d'étude*

A mon chère frère Hourdine,

A mes chères sœurs,

A Lynda,

A mon binôme Founes,

Et à tous mes amis,

A tous ceux qui me sont chers.

Rachid.

Sommaire

Introduction générale..... 1

Chapitre I : Les problèmes des perturbations électriques

I.1 Introduction 4

I.2 La qualité de l'énergie électrique..... 4

 I.2.1 Qualité de la tension 4

 I.2.2 Qualité du courant..... 4

 I.2.3 les normes de la qualité d'énergie électrique..... 5

I.3 Les perturbations électriques et leurs origines..... 5

 I.3.1 Creux et coupure de tension 5

 I.3.2 Fluctuations de la tension 6

 I.3.3 Court-circuit..... 7

 I.3.4 Déséquilibre de système triphasé de tension 7

 I.3.5 Variation de fréquence..... 7

I.4 Les perturbations harmoniques 8

 I.4.1 Sources harmoniques 9

 I.4.2 Décomposition d'un courant distordu périodique en série de
 Fourier 9

 I.4.3 conséquence des harmoniques..... 10

 I.4.3.1 Effets instantanés..... 10

 I.4.3.2 Effets à terme..... 11

 I.4.4 Caractéristique des perturbations harmoniques..... 11

 I.4.4.1 Le taux de distorsion harmoniques (TDH) 11

 I.4.4.2 Le facteur de puissance..... 12

 I.4.4.3 Facteur de crête 13

I.5 Solutions de dépollution des réseaux électriques 13

 I.5.1 Solutions traditionnelles 13

 I.5.2 Solutions modernes (le filtrage actif) 14

 I.5.2.1 Principe de fonctionnement du filtre actif..... 15

 I.5.2.2 Filtre actif série (FAS) 15

 I.5.2.2.1 Principe de fonctionnement..... 16

Sommaire

| | |
|--|----|
| I.5.2.2.2 Mise en œuvre | 16 |
| I.5.2.3 Filtre actif parallèle (FAP) | 17 |
| I.5.2.3.1 Principe de fonctionnement..... | 17 |
| I.5.2.3.2 Mise en œuvre | 18 |
| I.5.2.4 Combinaison de filtres actifs parallèles et séries..... | 18 |
| I.5.2.5 La structure hybride..... | 19 |
| I.5.2.5.1 Combinaison de filtres actifs séries et de filtres passifs parallèles | 19 |
| I.5.2.5.2 Combinaison de filtres parallèles actifs et passifs..... | 20 |
| I.5.2.5.3 Combinaison d'un filtre actif en série avec des filtres passifs parallèles..... | 20 |
| I.6 Comparaison des différents filtrages | 21 |
| I.7 Choix de la structure | 21 |
| I.8 Domaines d'application des filtres actifs..... | 22 |
| I.9 Conclusion | 22 |

Chapitre II : Modélisation de la charge polluante

| | |
|---|----|
| II.1 Introduction..... | 24 |
| II.2 Modélisation du réseau électrique perturbé..... | 24 |
| II.3 Modélisation de la charge polluante..... | 25 |
| II.3.1 Modélisation du redresseur à thyristor | 25 |
| II.3.1.1 Fonctionnement | 26 |
| II.3.1.2 Etude du fonctionnement..... | 27 |
| II.3.1.3 Etude en tenant compte du phénomène d'empiètement..... | 30 |
| II.3.2 Simulation..... | 32 |
| II.3.3 Interprétation des résultats de simulation..... | 44 |
| II.4 Conclusion | 45 |

Chapitre III : Méthode d'identification des tensions de référence

| | |
|--|----|
| III.1. Introduction | 47 |
| III.2 Les méthodes d'identification des tensions de références | 47 |
| III.2.1 Choix de la méthode..... | 47 |
| III.2.2. Méthode de la décomposition en composante symétrique | 47 |

Sommaire

| | |
|---|----|
| III.2.3.Méthode des puissances instantanées | 51 |
| III.2.3.1 Séparation des puissances perturbatrices | 53 |
| III.2.3.2 Identification des tensions de références | 54 |
| III.2.3.3 Algorithme d'identification | 55 |
| III.3 Conclusion..... | 56 |

Chapitre IV : Modélisation de filtre actif série

| | |
|---|----|
| IV.1 Introduction | 58 |
| IV.2 Principe de la compensation actif série..... | 58 |
| IV.3 Topologie générale d'un compensateur actif série | 59 |
| IV.4. Etude de la partie puissance | 60 |
| IV.4.1.Onduleur de tension | 60 |
| IV.4.2. Tension fournie par l'Onduleur | 60 |
| IV.4.3. Représentation vectorielle..... | 62 |
| IV.4.4. Alimentation de l'onduleur | 63 |
| IV.4.5 .Filtre de sortie | 63 |
| IV.5.La Commande de l'Onduleur..... | 63 |
| IV.5.1.Commande par hystérésis | 63 |
| IV.6.Conclusion..... | 65 |

Chapitre V : Résultats de simulations

| | |
|--|----|
| V.1 Introduction..... | 67 |
| V.2 Conditions de simulation | 67 |
| V.3 Résultats de simulation..... | 67 |
| V.3.1 Analyse du cas d'une sous tension réseau..... | 71 |
| V.3.2 Analyse du cas d'une surtension réseau | 76 |
| V.3.3 analyse d'un cas d'un réseau déséquilibré | 80 |
| V.3.4 Réseau équilibré avec présence d'harmoniques | 85 |
| V.4 Conclusion | 86 |
| Conclusion général | 87 |

Introduction générale :

Depuis de nombreuses années, les fournisseurs d'énergie électrique s'efforcent de répondre à la demande tout en garantissant la qualité de l'énergie, tel qu'imposé par les normes. Les premiers efforts se sont portés sur la continuité de service afin de rendre toujours disponible l'accès à l'énergie chez l'utilisateur. Aujourd'hui, les critères de qualité ont évolué avec le développement des équipements où l'électronique prend une place prépondérante dans les systèmes de commande et de contrôle, ces systèmes ont recours toujours à des convertisseurs, de l'électronique de puissance qui entraînent des problèmes de perturbations au niveau des réseaux électriques. Ces systèmes non linéaires fonctionnent avec d'excellents rendements mais malheureusement ce sont de gros consommateurs d'énergie réactive, cela entraîne une augmentation du courant appelé du réseau, par conséquent une incapacité du réseau à répondre à la demande. De plus on assiste à une augmentation régulière, de la part des utilisateurs, des taux d'harmonique et de déséquilibre des courants. La circulation de ces mêmes courants perturbés va également provoquer des harmoniques et des déséquilibres de tension, lesquels vont se superposer à la tension nominale du réseau électrique.

En dehors des harmoniques de courant dus aux charges non linéaires traités par les compensateurs actifs parallèles, de nombreuses perturbations subsistent : creux de tension et coupures, surtensions temporaires ou transitoires, fluctuations lentes de la tension (flicker), variations de la fréquence, déséquilibres du système triphasé, harmoniques et inter harmoniques de la tension. Ces perturbations ont des incidences économiques à ne pas négliger, exemple l'utilisation d'alimentation de secours qui sont très onéreuses.

Dans le cadre de cette problématique de recherche une solution pour maîtriser la qualité de l'énergie consiste à insérer dans les réseaux électriques des compensateurs série qui sont capables d'absorber tous ces types de défauts.

Plusieurs solutions de dépollution des réseaux électriques ont été déjà proposées dans la littérature. Celles qui répondent le mieux aux contraintes industrielles d'aujourd'hui sont les compensateurs actifs, série, parallèles et combinaison parallèle-série actifs dit souvent les UPFC.

Le compensateur actif série peut compenser à la fois les tensions harmoniques, les creux de tension, les surtensions, en fonction de leur topologie il peut également compenser les déséquilibres. Le compensateur actif parallèle peut être utilisé pour compenser les courants harmoniques et déséquilibrés de même que la puissance réactive. La combinaison parallèle-

Introduction générale

série actifs correspond à une solution universelle de compensation pour un, plusieurs ou tous les types de perturbation de courant et de tension que l'on observe sur le réseau.

Le travail présenté dans ce mémoire concerne particulièrement à étudier et à simuler un compensateur actif série à base d'un onduleur à deux niveaux destinés au filtrage des tensions harmoniques, creux de tension et surtension. Dans ce but nous avons reparti notre mémoire comme suit :

Le premier chapitre présente la description des problèmes des perturbations électriques dans un réseau basse tension, leurs origine, leurs conséquences.

Nous présenterons également les solutions traditionnelles et modernes de compensation, et plus en détail, les différentes structures de filtrage actif.

Dans le deuxième chapitre nous présenterons la modélisation du réseau électrique perturbé, et la modélisation d'un redresseur triphasé à base de thyristors qui se présente la charge polluante.

Dans le troisième chapitre nous présenterons les différentes puissances instantanées sous un régime non sinusoïdal en courant et en tension, ensuite une représentation détaillée de la stratégie d'identification des tensions de références.

Dans le quatrième chapitre de ce mémoire, nous allons présenter le filtre actif série pour la compensation des perturbations de tension. Nous traitons le principe de la compensation actif série, par la suite nous allons étudier l'onduleur de tension triphasé à deux niveaux.

Dans le dernier chapitre nous présentons les résultats de simulation pour les différentes perturbations de réseau

Nous terminerons avec une conclusion générale où seront donnés nos principaux résultats ainsi que les perspectives ouvertes par ce travail.

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. Mais depuis quelques années, avec l'évolution technologique des composants d'électronique de puissance, les distributeurs d'énergie rencontrent plusieurs problèmes liés à l'accroissement du nombre de convertisseurs statiques raccordés aux réseaux de distribution d'énergie. En effet, ces convertisseurs sont des sources polluantes qui absorbent des courants non sinusoïdaux et consomment pour la plupart de la puissance réactive.

Nous commencerons ce chapitre par un exposé des principaux défauts affectant la tension et le courant du réseau électrique. Nous parlerons également de leurs origines, des conséquences matérielles. Nous discuterons ensuite des solutions traditionnelles et modernes utilisés pour pallier aux problèmes liés aux perturbations harmoniques.

I.2 La qualité de l'énergie électrique :

La qualité de l'énergie électrique est considérée comme une combinaison de la qualité de la tension et de la qualité du courant. Nous allons donc définir ces deux notions dans la suite de ce paragraphe.

I.2.1 Qualité de la tension :

Dans la pratique, l'énergie électrique distribuée se présente sous la forme d'un ensemble de tensions constituant un système alternatif triphasé, qui possède quatre caractéristiques principales : amplitude, fréquence, forme d'onde et symétrie.

I.2.2 Qualité du courant :

La qualité du courant est relative à une dérive des courants de leur forme idéale, et se caractérise de la même manière que pour les tensions par quatre paramètres : amplitude, fréquence, forme d'onde et symétrie. Dans le cas idéal, les trois courants sont d'amplitude et de fréquence constante déphasés de $\frac{2\pi}{3}$ radians entre eux, et de forme purement sinusoïdale. Le terme « qualité du courant » est rarement utilisé, car la qualité du courant est étroitement liée à la qualité de la tension et la nature des charges. Pour cette raison, « la qualité de l'énergie électrique » est souvent réduite à « la qualité de la tension ». C'est l'hypothèse que nous ferons dans la suite de ce document, où le terme de « qualité de l'énergie » s'applique uniquement à celle de la tension [1].

I.2.3 les normes de la qualité d'énergie électrique :

Afin de limiter les effets des perturbations électromagnétiques sur les réseaux électriques, des normes ont été mises en place. Les deux principaux organismes qui ont établi de telles normes sont la Commission Électrotechnique Internationale (CEI) et IEEE. Les normes qu'ils ont établies sont, de façon respective, la série CEI 61000 et l'IEEE Standard 519. [2]

De façon générale ces normes identifient les principales sources de perturbations électromagnétiques décrivent les effets de ces perturbations sur les réseaux, décrivent des méthodes d'analyse et de mesure pour les harmoniques et fournissent diverses recommandations en vue de réduire la présence des phénomènes perturbatrices sur les réseaux électriques.

I.3 Les perturbations électriques et leurs origines :

Les réseaux électriques sont très pollués et soumis à de multiples agressions a cause des perturbations électriques, qu' on peut définir en cinq catégories :

- ✓ Creux de tension
- ✓ Variation de la tension
- ✓ Court-circuit
- ✓ Déséquilibre de système triphasé
- ✓ Variation de fréquence

I.3.1 Creux 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 [3].

Il existe 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 (moteur, transformateur...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].

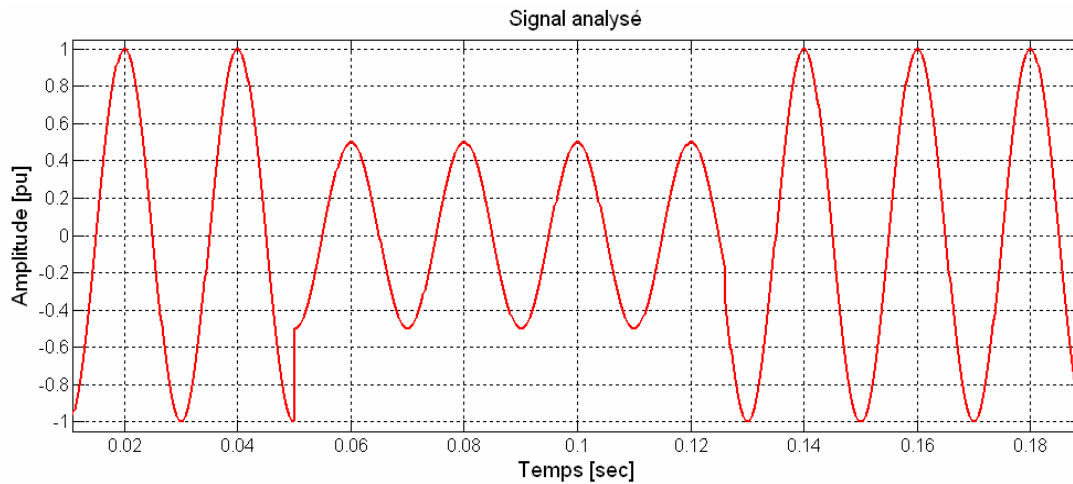


Figure I.1.Creux de tension

I.3.2 Fluctuations de la tension :

La mise en service ou hors service des appareils électriques et le fonctionnement de certaines charges à puissance variable entraînent des variations de tension qui se manifestent sous deux formes principales :

- Des variations lentes de tension se produisant à des intervalles de temps supérieurs à quelques secondes. Ces variations sont dues principalement au branchement et débranchement des charges et en général ne dépassent pas les $\pm 10\%$ de la tension nominale. Ils ne causent pas de préjudice pour la plupart des équipements électriques.
- Des variations rapides de tension conduisant à une composition spectrale de fréquence dans la bande 0,5 et 25Hz. Ces variations sont dues aux charges dont la puissance absorbée fluctue de manière rapide, tels que les fours à arc, les machines à souder, les moteurs à couples pulsatoires ou à démarrages fréquents. Ces fluctuations rapides sont particulièrement ressenties sur le flux lumineux des lampes car elles provoquent un papillotement de la lumière, connu aussi comme flicker et qui est fort désagréable pour les consommateurs. [5].

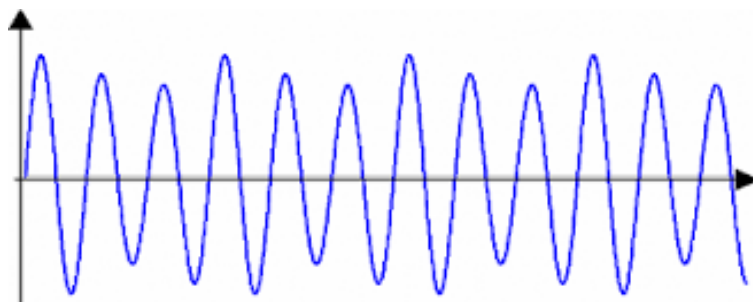


Figure I.2.Fluctuation de tension

I.3.3 Court-circuits :

Les court-circuits se traduisent par une augmentation excessive du courant dans les lignes pouvant atteindre jusqu'à 50 fois le courant nominal I_n , et une chute de tension jusqu'à la valeur zéro.

I.3.4 Déséquilibre de système triphasé de tension :

Trois grandeurs de même nature et de même pulsation forment un système triphasé équilibré lorsqu'elles ont la même amplitude et lorsqu'elles sont déphasées de $\pm 120^\circ$. Lorsque les grandeurs ne vérifient pas ces conditions de phase et d'amplitude, on parle d'un système triphasé déséquilibré figure(I.3).

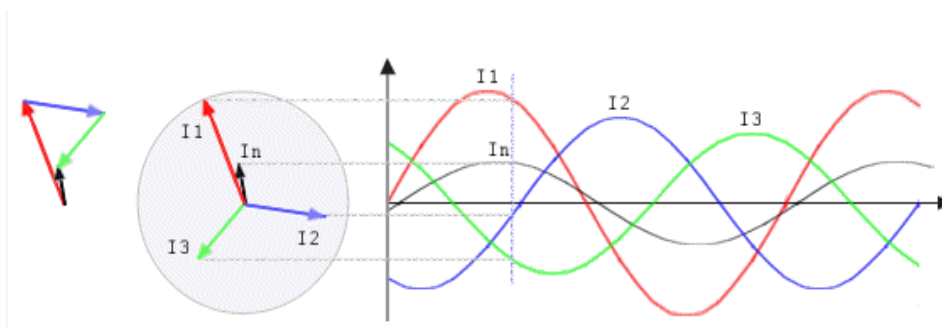


Figure I.3.Exemple de régime triphasé déséquilibré

On parle d'un déséquilibre d'amplitude lorsque les trois tensions n'ont pas la même valeur efficace, et d'un déséquilibre de phase lorsque le déphasage entre les trois phases successives n'est pas de 120° .

I.3.5 Variation de fréquence :

Une variation sensible de la fréquence du réseau peut apparaître sur les réseaux des utilisateurs non interconnectés ou alimentés par une source thermique autonome. Au niveau des réseaux de distribution ou de transport, cette variation de la fréquence est très rare et n'est présente que lors de circonstance exceptionnelles, comme dans le cas de certains défauts graves sur le réseau [6]. Dans des conditions d'exploitation, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle $50\text{Hz} \pm 1\%$.

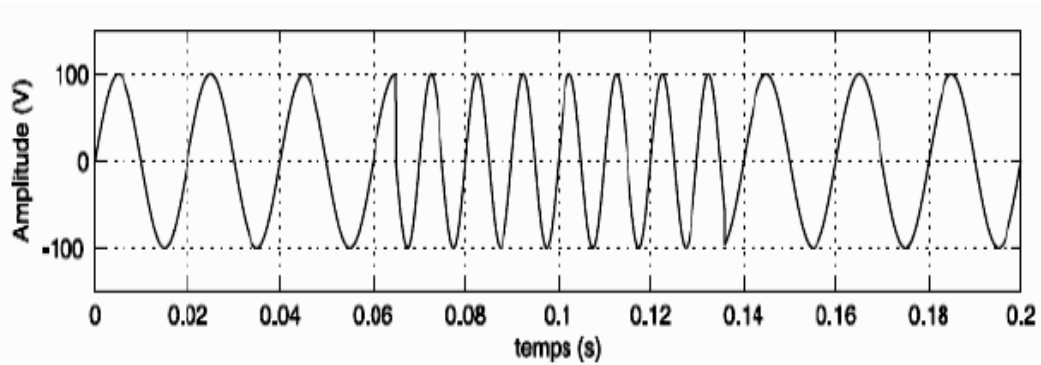


Figure I.4. Variation de fréquence

I.4 Les perturbations harmoniques :

Les harmoniques sont des perturbations permanentes affectant la forme d'onde de la tension du réseau. Ces perturbations résultent de la superposition, sur l'onde fondamentale à 50Hz ou 60Hz selon le pays, d'ondes également sinusoïdales mais de fréquences multiples de celle du fondamental. La figure (I.5) illustre un exemple de forme d'onde d'une tension distordue contenant, en plus du terme fondamental de fréquence 50Hz, deux harmoniques de rang impair 5 et 7.

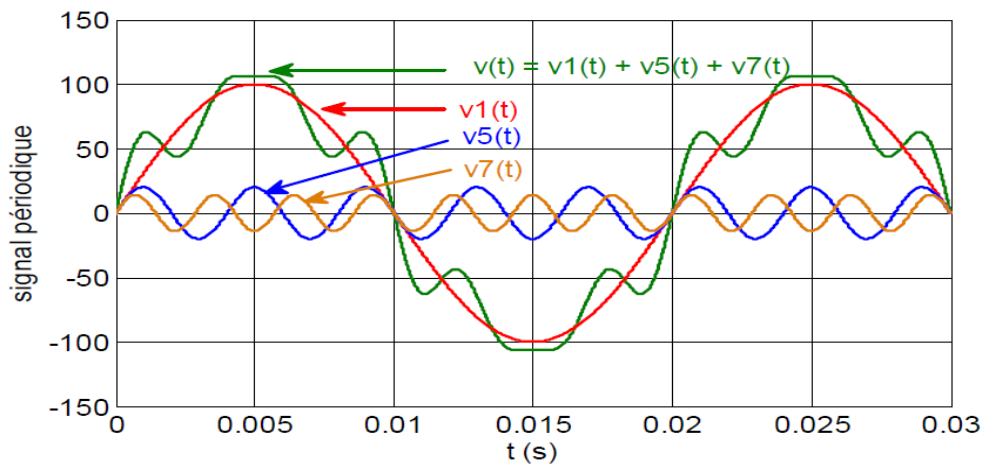


Figure I .5. Synthèse d'un signal à partir des harmoniques

Dans la plupart des cas, les harmoniques présents sur les réseaux électriques proviennent de l'utilisation de charges non linéaires. Une charge non linéaire absorbe un courant non sinusoïdal, même si elle est alimentée par une tension sinusoïdale. Ces charges se comportent approximativement comme des sources de courant harmonique dont les fréquences sont des multiples entiers de la fréquence fondamentale, c'est-à-dire que le courant harmonique est quasiment fixé par la charge non linéaire et non pas par l'impédance de court-circuit du réseau auquel elles est raccordée [7].

I.4.1 Sources harmoniques :

Les charges industrielles qui se composent des équipements d'électronique de puissance (variateurs de vitesse, redresseurs à diodes ou à thyristors, alimentations à découpage) et les charges utilisant l'arc électrique (fours à arc, machines à souder, ainsi que l'éclairage, lampes à décharge, tubes fluorescents) constituent les principales sources d'harmoniques.

Les démarrages de moteurs par démarreurs électroniques et les déclenchements de transformateurs de puissance sont aussi générateurs d'harmoniques (temporaires).

Il est noté que du fait de leurs multiples avantages (souplesse de fonctionnement, excellent rendement énergétique, performances élevées...) l'utilisation d'équipements à base d'électronique de puissance se généralise. Les charges domestiques munies de convertisseurs ou d'alimentation à découpage: téléviseurs, fours à micro-ondes, plaques à induction, ordinateurs, imprimantes, photocopieuses, gradateurs de lumières, équipements électromagnétiques, lampes fluorescentes.

I.4.2 Décomposition d'un courant distordu périodique en série de Fourier:

Avec les charges non-linéaires, les courants ne sont pas sinusoïdaux et peuvent être considérés comme la somme d'un courant sinusoïdal de 50/60Hz appelé fondamental et d'une série de courants sinusoïdaux de fréquences multiples de la fréquence fondamentale appelés harmoniques.

La décomposition en série de Fourier du signal périodique $S(t)$ est donnée par la façon suivante :

$$S(t) = S_0 + \sum_{n=1}^{\infty} S_n \sqrt{2} \sin[n\omega t + \alpha_n] \quad (I.1)$$

S_0 : la composante continue généralement nulle

ω : pulsation de la fréquence fondamentale

n : le rang de l'harmonique

S_n : valeur efficace de l'harmonique de rang n

α_n : phase de l'harmonique de rang n

- L'expression instantanée du courant $I(t)$ peut se mettre sous la forme :

$$I(t) = \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sqrt{2} \sin[n\omega t + \alpha_n] \quad (I.2)$$

- La valeur efficace de $I(t)$ est I_{eff} . L'application de la formule générale:

$$S_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T S^2(t) dt} \quad (I.3)$$

Nous donne :

$$I_{eff} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2} \quad (I.4)$$

I.4.3 Conséquence des harmoniques : [8]

Les courants harmoniques se propagent dans le réseau électrique, déformant l'allure du courant de la source et polluent les consommateurs alimentés par ce même réseau. Ils peuvent occasionner des incidents au niveau de l'appareillage du client et donnent lieu à des surcoûts de production d'énergie importants. On peut classer les effets engendrés par les harmoniques en deux types : les effets instantanés et les effets à terme.

I.4.3.1 Effets instantanés :

Les effets instantanés apparaissent immédiatement dans certains appareillages.

➤ Défauts de fonctionnement de certains équipements électriques

En présence d'harmoniques, la tension et le courant peuvent changer plusieurs fois de signe dans une demi-période. Les appareils dont le fonctionnement est basé sur le passage à zéro des grandeurs électriques peuvent être affectés.

➤ Troubles fonctionnels des micro-ordinateurs

Les effets sur ces équipements peuvent se manifester par la dégradation de la qualité de l'image et par des couples pulsatoires des moteurs d'entraînement de disque.

➤ Erreurs dans les appareils de mesure

Certains appareils de mesure et les compteurs d'énergie à induction présentent des dégradations de mesure et des erreurs de lecture supplémentaires en présence d'harmoniques.

➤ Vibrations et bruits

Les courants harmoniques génèrent également des vibrations et des bruits acoustiques, principalement dans les appareils électromagnétiques (transformateurs, inductances et machines tournantes).

I.4.3.2 Effets à terme :

Ils se manifestent après une exposition plus ou moins longue à la perturbation harmonique. L'effet à terme le plus important est de nature thermique, il se traduit par l'échauffement. Il conduit à une fatigue prématurée du matériel et des lignes.

- **Echauffement des câbles et des équipements :**

Ces effets peuvent être à moyen terme (de quelques secondes à quelques heures) ou à long terme (de quelques heures à quelques années) et concernent les câbles qui peuvent être le siège du sur-échauffement du neutre et les matériels bobines comme les transformateurs ou les moteurs.

- **Echauffement des condensateurs :**

L'échauffement est causé par les pertes dues au cycle d'hystérésis dans le diélectrique. Les condensateurs sont aussi sensibles aux surcharges, qu'elles soient dues à une tension fondamentale trop élevée ou à la présence d'harmoniques. Ces échauffements peuvent conduire au claquage.

- **Echauffement dû aux pertes supplémentaires des machines et des transformateurs :**

Un échauffement est causé par les pertes dans le stator des machines et principalement dans leurs circuits rotoriques (cages, Circuits magnétiques) à cause des différences importantes de vitesse entre les champs tournants inducteurs harmoniques et le rotor. Les harmoniques génèrent aussi des pertes supplémentaires dans les transformateurs, par effet joule dans les enroulements, accentué par l'effet de peau et des pertes par hystérésis et courants de Foucault dans les circuits magnétiques.

I.4.4 Caractéristique des perturbations harmoniques :

Différentes grandeurs sont définies pour caractériser la distorsion en régime déformé. Le taux global de distorsion harmonique (TDH) et le facteur de puissance sont les plus employés pour quantifier respectivement les perturbations harmoniques et la consommation de puissance réactive.

I.4.4.1 Le taux de distorsion harmoniques (TDH) :

L'étude se limite au cas où la source de tension est sinusoïdale et le courant absorbé par la charge est entaché de composantes harmoniques. Dans ces conditions, le taux global de distorsion harmonique est bien adapté pour quantifier le degré de pollution harmonique sur les réseaux électriques. Le THD s'exprime par rapport à la fréquence fondamentale et caractérise

l'influence des harmoniques sur l'onde de courant déformé. Il est donné par l'expression suivante :

$$\text{THD (\%)} = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n i_{ci}^2}}{i_{c1}} \quad (\text{I.5})$$

Avec i_{c1} la valeur efficace du courant fondamental et i_{ci} les valeurs efficaces des différents harmoniques du courant. Le domaine des fréquences qui correspond à l'étude des harmoniques est généralement compris entre 100 et 2000 Hz. Soit de l'harmonique de rang 2 jusqu'à l'harmonique de rang 40. Il est à signaler aussi que l'amplitude des harmoniques décroît généralement avec la fréquence.

I .4.4.2 Le facteur de puissance :

Dans le cas d'un réseau équilibré, on peut définir les grandeurs de puissance suivantes : la puissance instantanée (P), la puissance active (P) et la puissance apparente (S)

$$p(t) = v(t) \cdot i(t) \quad (\text{I.6})$$

$$S = I_{\text{eff}} \cdot V_{\text{eff}} \quad (\text{I.7})$$

$$P = \sum_{n=1}^{\infty} I_n \cdot V_n \cos(n\varphi_n) \text{ où } \varphi_n = \beta_n - \alpha_n \quad (\text{I.8})$$

Le facteur de puissance F, défini par le rapport entre la puissance active et la puissance apparente s'exprime par :

$$F = \frac{P}{S} = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} I_n \cdot V_n \cos(n\varphi_n)}{I_{\text{eff}} \cdot V_{\text{eff}}} \quad (\text{I.9})$$

Afin d'estimer la participation des harmoniques dans la puissance apparente, une puissance supplémentaire appelée la puissance déformante (D) est introduite, donnée par la relation :

$$D = V_1 \cdot \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2} \quad (\text{I.10})$$

La puissance apparente peut donc se mettre sous la forme :

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

Le facteur de puissance s'écrit alors :

$$F = \frac{P}{\sqrt{P^2+Q^2+D^2}} \quad (\text{I.12})$$

Cette dernière expression fait clairement apparaitre l'impact de la puissance déformante sur la dégradation du facteur de puissance

I.4.4.3 Facteur de crête :

Le facteur de crête est le rapport de la valeur maximale par la valeur efficace.

$$F_c = \frac{\text{valeur maximale}}{\text{valeur efficace}}$$

I.5 Solutions de dépollution des réseaux électriques :

Deux types de solutions sont envisageables. La première consiste à utiliser des convertisseurs statiques moins ou peu polluants, tandis que la seconde consiste en la mise en œuvre d'un filtrage des composantes harmoniques [9]. Deux groupes de solutions de dépollution pour compenser toutes les perturbations peuvent être distingués : les solutions traditionnelles et les solutions modernes.

I.5.1 Solutions traditionnelles :

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

1. Compensateur statique :

Il s'agit d'une méthode de compensation utilisée pour relever le facteur de puissance

2. Filtrage passif : [10]

Les filtres passifs constitués d'une inductance L et d'un condensateur C ont traditionnellement été utilisés pour absorber les harmoniques générés par les charges industrielles non linéaires, ceci étant dû à leur faible coût et à leur grande efficacité.

Le principe consiste à insérer en amont de la charge un ou plusieurs circuits de composants passifs accordés sur les harmoniques à rejeter. Ainsi, pour filtrer un courant à une fréquence particulière, un filtre résonant série est placé en parallèle sur le réseau.

Cependant qu'il possède un certain nombre de défauts qui sont cités ci-dessous :

- L'impédance de la source influence fortement les caractéristiques de compensation du filtre passif. L'impédance de la source dépend de l'impédance du réseau électrique et est habituellement non connue. De plus, les filtres passifs sont aussi sensibles aux tolérances de l'inductance L et du condensateur C .
- La conception d'un filtre passif nécessite d'effectuer des études poussées du système à filtrer et de considérables efforts d'ingénierie. Développer un filtre passif n'est pas quelque chose qui peut se généraliser à tout système. Pour chaque système à filtrer, il faut développer son propre filtre.
- Le filtre passif peut provoquer une résonance parallèle avec la source causant l'amplification d'harmoniques de courants du côté de la source à des fréquences spécifiques.
- Le filtre passif possède un ensemble de résonances avec la source soulevant la possibilité d'exciter cette résonance sous certaines conditions.
- Les filtres passifs accordés sur une fréquence dominante de la charge ont tendance à attirer les harmoniques de courants des charges d'environnement.
- Les filtres passifs se chargent et lissent les transitoires de découpage.

Les défauts mentionnés ci-dessus peuvent aussi causer une surcharge des filtres passifs. Par conséquent, les filtres passifs sont toujours accordés sur une fréquence juste en dessous de la fréquence de l'harmonique dominant de la charge (par exemple, les filtres actifs sont accordés sur l'harmonique 4.7 au lieu d'être accordés sur l'harmonique d'ordre 5).

Les filtres passifs ne constituent pas un moyen fiable et efficace pour la compensation d'harmoniques de charges industrielles. En revanche, ils sont parfaitement adaptés pour les systèmes de transmission de hautes tensions pour lesquelles les études de systèmes détaillés sont faites une fois pour toutes et dont l'effort d'ingénierie est seulement une petite fraction du coût total du système.

I.5.2 Solutions modernes (le filtrage actif) :

Les filtres actifs de puissance ont été étudiés pour la compensation d'harmoniques dans les réseaux de puissance industriels depuis le principe de compensation proposé par H. Sasaki et T. Machida en 1971[11]. Dans ces années, le filtrage actif ne connaissait que des progrès au stade théorique en laboratoire. La technologie des semi-conducteurs n'était pas encore assez développée pour l'implantation pratique du principe de compensation. Quelques années plus tard, le développement des semi-conducteurs de puissance, commandables à la fermeture et à l'ouverture, connaissait une éclosion remarquable. Ce phénomène a stimulé l'intérêt dans la recherche du filtrage actif pour la compensation d'harmoniques et de la puissance réactive.

De plus l'apparition de microcontrôleurs facilitant l'implantation des algorithmes de contrôle et de commande des convertisseurs, a rendu possible leur matérialisation au niveau pratique. Au début des années 1990, le filtre actif a connu un regain d'intérêts. Il a été démontré que ses performances de compensation d'harmoniques sont supérieures à celles d'un filtre passif *LC* classique [12].

De nos jours, les filtres actifs ont atteint une maturité technologique sans précédent. Ils peuvent faire la compensation d'harmoniques, de puissance réactive et/ou de courant de neutre. Ils ont évolué dans le dernier quart du siècle au niveau de la variété de leur configuration, de leur stratégie de commande et de leurs technologies, couvrant ainsi de larges gammes de puissance.

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

I.5.2.1 Principe de fonctionnement du filtre actif : [13]

Les filtres actifs sont des convertisseurs de puissance, agissant comme source de courants ou de tensions harmoniques, qui injectent en série ou en parallèle sur les réseaux des courants ou des tensions harmoniques en opposition par rapport aux perturbations existantes.

Les convertisseurs de puissance totalement commandable à base de GTO, d'IGBT ou de MOFSET, sont utilisés comme organe de réglage en vue d'asservir certaines grandeurs relatives au générateur ou au récepteur. Ces interrupteurs sont à amorçage et blocage commandés.

La principale raison de l'utilisation de dispositif de commutation rapide est de pouvoir commander l'onduleur par modulation de largeur d'impulsions, pouvant ainsi suivre n'importe quelle forme de référence.

I.5.2.2 Filtre actif série (FAS) : [14]

Le filtre actif série se comporte comme une source de tension qui s'oppose aux tensions perturbatrices (creux, déséquilibre, harmoniques) venant de la source et également à celles provoquées par la circulation des courants perturbateurs à travers l'impédance du réseau. En conséquence, la tension aux bornes de la charge à protéger est purement sinusoïdale.

On note :

V_{ch} : la tension du réseau avant la compensation.

V_s : la tension du réseau après la compensation.

V_{fa} : la tension insérée par l'onduleur.

I_s : le courant de ligne.

On a donc : $V_s = V_{ch} + V_{fa}$.

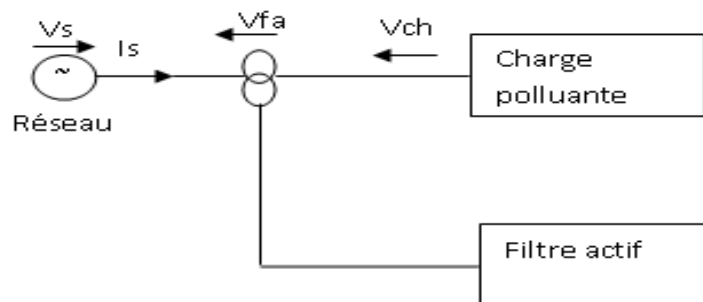


Figure I.6 Filtre actif série

I.5.2.2.1 Principe de fonctionnement :

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

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

Le filtre actif série se comporte dans ce cas, comme une source de tension qui s'oppose aux tensions perturbatrices (creux, déséquilibre, harmonique) venant de la source et également à celles provoquées par la circulation des courants perturbateurs à travers l'impédance du réseau. Ainsi la tension aux bornes de la charge à protéger est purement sinusoïdale.

Dans le principe du compensateur série, il est tout à fait possible de conjuguer ces deux types de compensation (harmonique et énergie réactive).

Par filtre actif série, on retiendra le compensateur série dont le rôle est d'insérer sur la ligne une tension anti harmonique V_{fa} de façon à ce que la tension résultante V_s soit sinusoïdale. Ainsi le filtre actif série à deux fonctions :

- D'une part il sert d'isolateur harmonique entre la source et la charge.
- D'autre part il régule la tension de la source qui est susceptible d'être déformée par un déséquilibre du réseau.

I.5.2.2.2 Mise en œuvre : [4]

Le filtre actif Série (F.A.S) est une solution adaptée à la compensation des tensions perturbatrices, harmoniques, déséquilibrées et des creux de tension. Ces perturbations trouvent généralement leurs origines dans le réseau lui-même mais peuvent parfois être provoquées par les charges elles-mêmes.

En 1976, une famille de filtres actifs séries avec des onduleurs à transistors contrôlés en MLI a été présentée. Un compensateur statique pour le rééquilibrage de la tension du réseau électrique a été proposé en 1985. La génération, par l'onduleur à thyristors, des composantes non désirées, ayant une faible fréquence de commutation, a découragé l'avancement pratique de cette solution.

En 1990, un compensateur de tension à base d'onduleur de tension triphasé a été proposé pour compenser le déséquilibre de tension de réseau électrique. Depuis, beaucoup de travaux ont été consacrés à l'amélioration de la qualité de compensation du déséquilibre de la tension du réseau. D'autres articles ont introduit le problème des creux de tension et la solution de compensation par le compensateur actif série.

I.5.2.3 Filtre actif parallèle (FAP) :

Un filtre actif peut être placé en parallèle avec les charges et son rôle est de compenser les courants harmoniques. Ce filtre injecte des courants qui s'opposent aux courants harmoniques (il élimine les courants harmoniques qui circulent dans les impédances du réseau).

En général, le filtre actif parallèle est utilisé pour la dépollution des réseaux BT et MT. son impédance totale, vis-à-vis de la source et de la charge, lui confère une bonne auto adaptabilité avec des performances appréciables. Sa structure est donnée sur la figure (I.7).

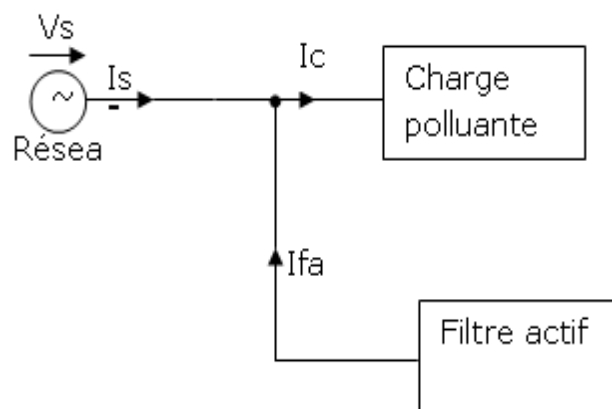


Figure I.7 Filtre actif parallèle

I.5.2.3.1 Principe de fonctionnement :

Le filtrage actif parallèle est aussi appelé filtrage shunt. Son principe de fonctionnement consiste à injecter par une voie parallèle un courant de même amplitude et de signe opposé au contenu harmonique du courant à filtrer. Ce courant est appelé courant de compensation.

En faisant fonctionner un filtre actif shunt, les courants non linéaires de la charge sont toujours présents, aussi bien du point de vue de la puissance réactive que du point de vue

harmonique. Par contre ils ne circulent plus dans le réseau où des pertes inutiles et des perturbations de tension seraient générées, mais ils sont échangés entre le filtrage actif lui-même et cette charge. Ainsi le filtre prend le relais du réseau là où aucun apport de puissance active n'est nécessaire.

I.5.2.3.2 Mise en œuvre :

Les premiers principes de fonctionnement des filtres actifs parallèle ont été présentés dans la littérature dès le début des années 1970 [11]. En 1976, une première famille de filtre actif parallèle a été conçue à partir d'onduleurs à transistors de puissance commandés en MLI. Ces premiers dispositifs de puissance étaient alors proposés pour la seule compensation des courants harmoniques. Cependant, à cette époque, il était encore difficile de concevoir ce type de système pour des applications industrielles. En effet, dans ces années-là, il était presque impossible de trouver, sur le marché, des interrupteurs de puissance capables de fonctionner aux fréquences de commutation et aux niveaux de puissance exigés par la réalité industrielle. Cette barrière technologique sera franchie, dès 1977, lors de la conception d'un premier prototype de filtre actif parallèle à base de thyristors à commutations naturelles pour la compensation des courants harmoniques [15]. Cependant, l'application des onduleurs à base de thyristor a tout de suite posé le problème de la génération non désirée de composantes injectées sur le réseau à la fréquence de commutation. La même raison a également empêché l'utilisation de compensateurs statiques parallèles à thyristors, lesquels avaient été conçus pour la compensation conjointe de la puissance réactive et des courants déséquilibrés.

I.5.2.4 Combinaison de filtres actifs parallèles et séries :

La combinaison parallèle-série actifs résulte de l'association des deux filtres actifs parallèle et série, comme le montre la figure 1.8. Ce type de dispositif est capable à la fois de régler la tension de réseau et d'éliminer les harmoniques. Il est considéré comme le plus puissant dispositif et il est capable d'effectuer efficacement toutes les tâches de conditionnement de puissance.

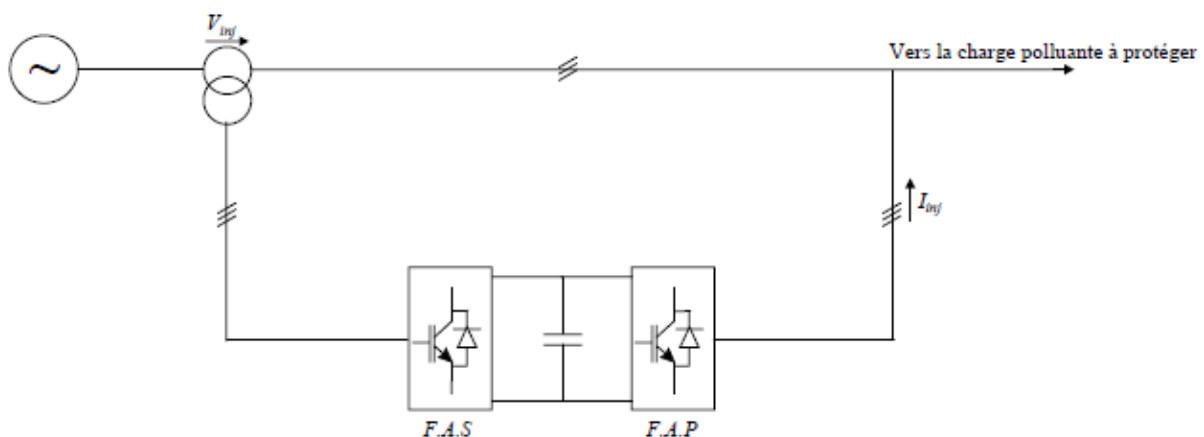


Figure 1.8 Combinaison parallèle-série actifs

I.5.2.5 La structure hybride : [10, 16]

Le filtre actif hybride est une combinaison de filtres actifs (connectés avec ou sans transformateur triphasé ou trois transformateurs monophasés) et de filtres passifs. Ainsi, les filtres passifs éliminent les harmoniques en basses fréquences, ce qui permet de réduire le dimensionnement du filtre actif qui ne compense que le reste de perturbations. En conséquence, le filtre actif est plus petit (au niveau du dimensionnement) que pour un filtre actif conventionnel et la réponse est bien meilleure qu'avec des filtres passifs seuls. Souvent le filtre passif est formé par deux filtres réglés aux fréquences des harmoniques 5 et 7 et un filtre passe haut réglé autour de la fréquence de l'harmonique 11. Ainsi dans ce cas, le filtre actif permet d'éviter des résonances entre les éléments passifs et le réseau.

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

- Le filtre actif série avec des filtres passifs parallèles
- Le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle
- Le filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles

I.5.2.5.1 Combinaison de filtres actifs séries et de filtres passifs parallèles :

Pour réduire la complexité de la combinaison de filtres présentée précédemment, le filtre actif série, qui constitue une haute impédance pour les harmoniques de hautes fréquences, est accompagné par un filtre passif parallèle. Cette combinaison, représentée par la Figure I.9 permet une amélioration sur les caractéristiques d'un ensemble de filtres actifs et l'extension de leurs capacités à inclure la réduction des harmoniques de courant et l'élimination des harmoniques de tension. Cette configuration n'a cependant pas encore été étudiée profondément du fait d'un manque d'intérêt pour les filtres actifs séries.

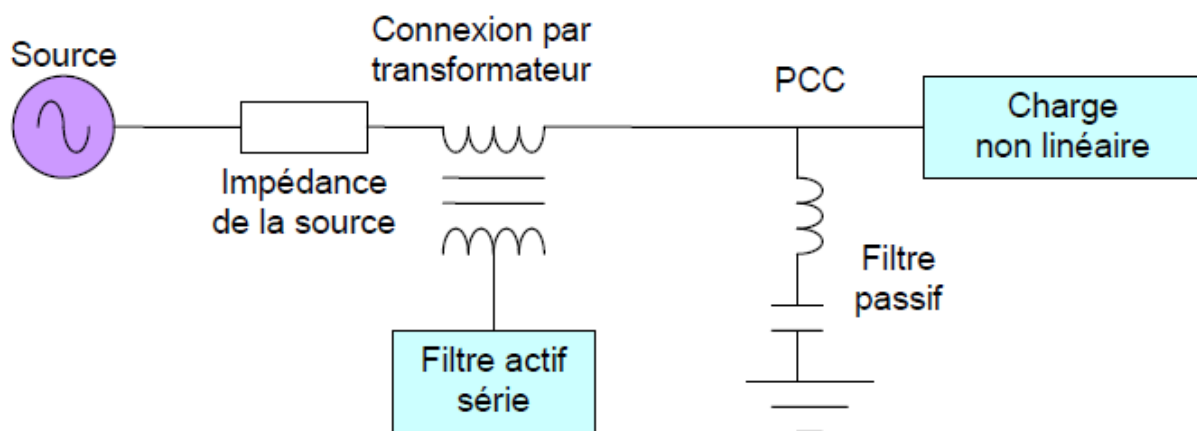


Figure I.9 Combinaison d'un filtre actif série et d'un filtre passif parallèle

I.5.2.5.2 Combinaison de filtres parallèles actifs et passifs :

Cette combinaison, montrée en Figure I.10 est constituée d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif parallèle. Le filtre actif est conçu pour éliminer seulement les harmoniques de courants d'ordres faibles pendant que le filtre passif est conçu pour éliminer l'ensemble des harmoniques du courant de charge. Avec de telles combinaisons, le système peut être conçu pour de hautes puissances sans excès de coûts pour le découpage à hautes puissances. Le principal défaut de cette technique est qu'elle contient trop de composants de puissance, en particulier pour le filtre passif. Puisque les filtres passifs sont connectés ont permanence au système, cette approche est seulement adaptée pour une charge unique avec une source d'harmonique prédéfinie.

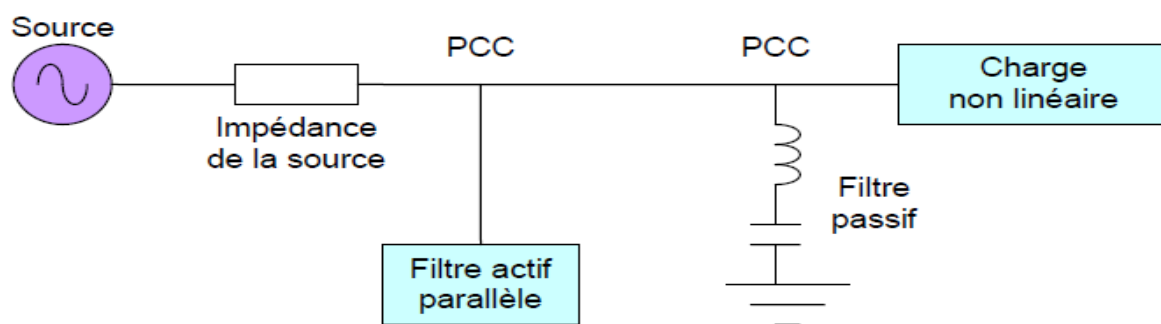


Figure I.10 Combinaison de filtre actif parallèle et de filtre passif parallèle

I.5.2.5.3 Combinaison d'un filtre actif en série avec des filtres passifs parallèles :

Cette configuration, montrée en Figure(I.11),est importante pour les applications avec des tensions moyennes ou élevées où le filtre passif réduit la tension accentuée par le découpage dans le filtre actif. Pour cette raison, ce concept est très prometteur pour les applications avec de hautes tensions. Cependant, d'autres recherches sont nécessaires pour confirmer l'efficacité de la configuration.

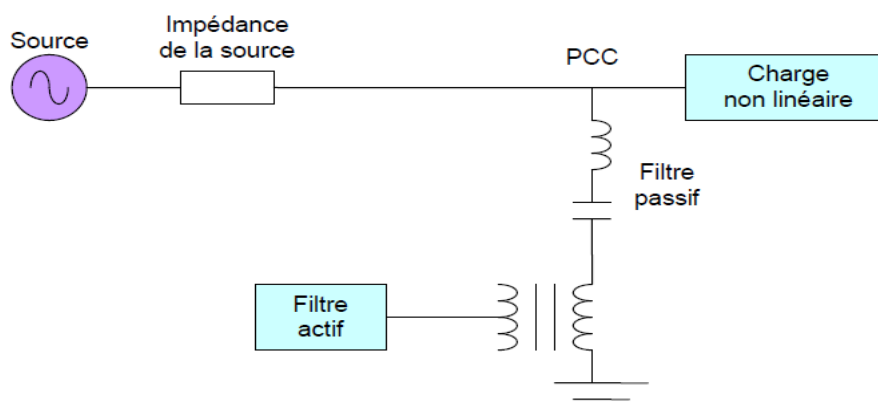


Figure I.11 Combinaison d'un filtre actif en série avec un filtre passif parallèle

I.6 Comparaison des différents filtrages :

Le tableau I.1 montre un récapitulatif des avantages et inconvénients du filtrage passif, filtrage actif série, filtrage parallèle et du filtrage actif parallèle-série [18].

| Principe | Avantages | Inconvénients |
|--|--|--|
| Filtrage passif | Amélioration de la forme du courant | Risque de résonance, pas d'adaptabilité, encombrant. |
| Filtrage actif parallèle | Amélioration de la forme du courant, adaptabilité aux variations de la charge et du réseau. | Amélioration de la forme de la tension pas toujours évidant. |
| Filtrage actif série | Amélioration de la forme de la tension, adaptabilité aux variations de la charge et du réseau. | Pas d'amélioration de la forme d'onde. |
| La combinaison parallèle-série actifs | Amélioration de la forme du courant, amélioration de la forme de la tension adaptabilité aux variations de charge et du réseau | Réalisation difficile. |

I.7 Choix de la structure :

Afin de choisir une structure de filtre actif adaptée à nos besoins, il est nécessaire d'étudier le filtre actif dans son environnement : réseau et charge.

Ainsi une étude conjointe du filtre actif et de la charge non linéaire permet d'optimiser le dimensionnement du filtre actif et donc d'améliorer la dynamique. Si on souhaite dépolluer le réseau pour alimenter une charge sensible, on choisira de mettre un filtre actif en série. Si en revanche on s'intéresse à l'atténuation des perturbations générées par la charge non linéaire, on optera pour un filtre actif en parallèle. Les objectifs peuvent alors être différents selon le type de la charge connectée :

- Compensation des courants harmoniques seule. Cette compensation peut être globale ou sélective.
- Compensation de l'énergie réactive seule.
- Compensation de tout ou d'une partie de la puissance réactive et des courants harmoniques.

I.8 Domaines d'application des filtres actifs :

L'utilisation du filtrage actif est particulièrement bien adaptée à la dépollution des réseaux basse tension, c'est-à-dire pour compenser l'ensemble ou une partie des harmoniques générés par les différentes charges polluantes, soumis à des fluctuations de fréquence significatives où les fréquences de certains harmoniques sont fonction de la vitesse donc variables. Le filtrage actif est également utilisé dans le transport par ligne continue haute tension. Il peut également assister d'autres dispositifs comme par exemple les systèmes de compensation d'énergie réactive shunt ou encore les systèmes contenant des redresseurs de courant de puissance.

I.9 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté différentes origines des perturbations affectant les réseaux électriques et les solutions de dépollution existantes (solutions traditionnelles, solutions modernes).

Nous avons vu que la solution traditionnelle à base de filtres passifs a des inconvénients en terme d'encombrements.

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

II.1 Introduction :

Avec la pose récente des équipements informatiques et des convertisseurs électroniques de puissance de plus en plus nombreux sur les réseaux, on observe une dégradation notoire de la qualité des tensions d'alimentation des réseaux sur lesquels ces charges sont raccordées.

L'augmentation de ces charges dites non linéaires nuit considérablement au bon fonctionnement de l'ensemble des équipements électriques connectés sur le réseau.

Dans ce chapitre on va étudier l'impact d'un redresseur à thyristors en pont triphasé alimentant une charge RLE sur les tensions du réseau.

II.2 Modélisation du réseau électrique perturbé :[18]

L'énergie électrique est distribuée sous forme de trois tensions sinusoïdales constituant le réseau triphasé perturbé comportant des harmoniques de tension d'ordre $(6k \pm 1)$.

Dans le cas des redresseurs triphasés les harmoniques les plus gênants sont ceux de l'ordre (5) et d'ordre (7).

- L'impédance de réseaux et du transformateur d'isolement ramène au secondaire est écrite :

$$Z = R + jL\omega \quad (\text{II.1})$$

$$\text{Avec : } \omega = 2\pi f$$

- On donne :

$$V_{s1} = 220\sqrt{2} \sin \omega t - \frac{220\sqrt{2}}{5} \sin(5\omega t) + \frac{220\sqrt{2}}{7} \sin(7\omega t) \quad (\text{II.2})$$

$$V_{s2} = 220\sqrt{2} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) - \frac{220\sqrt{2}}{5} \sin(5\omega t - \frac{2\pi}{3}) + \frac{220\sqrt{2}}{7} \sin(7\omega t - \frac{2\pi}{3}) \quad (\text{II.3})$$

$$V_{s3} = 220\sqrt{2} \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) - \frac{220\sqrt{2}}{5} \sin(5\omega t + \frac{2\pi}{3}) + \frac{220\sqrt{2}}{7} \sin(7\omega t + \frac{2\pi}{3}) \quad (\text{II.4})$$

$$I_{s1} = 10\sqrt{2} \sin \omega t - \frac{220\sqrt{2}}{5} \sin(5\omega t) + \frac{220\sqrt{2}}{7} \sin(7\omega t) \quad (\text{II.5})$$

$$I_{s2} = 10\sqrt{2} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) - \frac{220\sqrt{2}}{5} \sin(5\omega t - \frac{2\pi}{3}) + \frac{220\sqrt{2}}{7} \sin(7\omega t - \frac{2\pi}{3}) \quad (\text{II.6})$$

$$I_{s3} = 10\sqrt{2} \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) - \frac{220\sqrt{2}}{5} \sin(5\omega t + \frac{2\pi}{3}) + \frac{220\sqrt{2}}{7} \sin(7\omega t + \frac{2\pi}{3}) \quad (\text{II.7})$$

III.1 Introduction :

Le bon fonctionnement de la plupart des appareils électriques raccordés au réseau nécessite une alimentation sinusoïdale. Mais certains appareils, utilisent pour la plupart l'électronique de puissance et absorbent un courant qui n'est pas sinusoïdal. Ce courant a toujours une fréquence de 50 Hz, mais il est déformé. Lorsqu'il traverse l'impédance du réseau, ce courant produit une déformation de la tension.

Dans ce chapitre on va présenter l'identification des tensions de référence à partir de la méthode des composantes symétriques et la méthode des puissances instantanées.

III.2 Les méthodes d'identification des tensions de références :

III.2.1 Choix de la méthode :

Plusieurs méthodes ont été utilisées pour l'extraction des grandeurs de référence pour un filtre actif, parmi elles, la méthode basée sur le principe de la grandeur active, la méthode tri-monophasé, la méthode basée sur la régulation de la tension continue et la méthode des puissances instantanées.

Cette dernière est basée sur le calcul des puissances instantanées dans le domaine temporel. Elle permet de calculer les puissances harmoniques de la charge non linéaire. Comme on peut l'utiliser pour compenser à la fois les grandeurs harmoniques et les grandeurs réactives, en se basant sur la soustraction de la partie fondamentale active de la grandeur totale.

C'est la méthode d'identification la plus utilisée et aussi appelée méthode des puissances réelles et imaginaires instantanées. Elle offre l'avantage de choisir les perturbations à compenser avec précision, rapidité et de facilité d'implantation [24]. Pour toutes ces raisons on a retenu cette méthode d'identification pour le reste de ce travail. Mais cette méthode n'est pas valable pour un système déséquilibré, donc on va utiliser la méthode de la décomposition en composante symétrique pour régler ce problème.

III.2.2 Méthode de la décomposition en composante symétrique: [22, 23, 24]

Le principe de la décomposition en composantes symétriques est d'exprimer un système des signaux sinusoïdaux triphasé quelconque, mais à la même fréquence (courant ou tension) comme la somme des trois systèmes triphasés particuliers, qui sont le système « direct », « Inverse » et « homopolaire ».

Par définition un système direct est un système sinusoïdal triphasé équilibré dans lequel on passe respectivement de la phase 1 aux phases 2 et 3 par un déphasage de -120° et -240° .

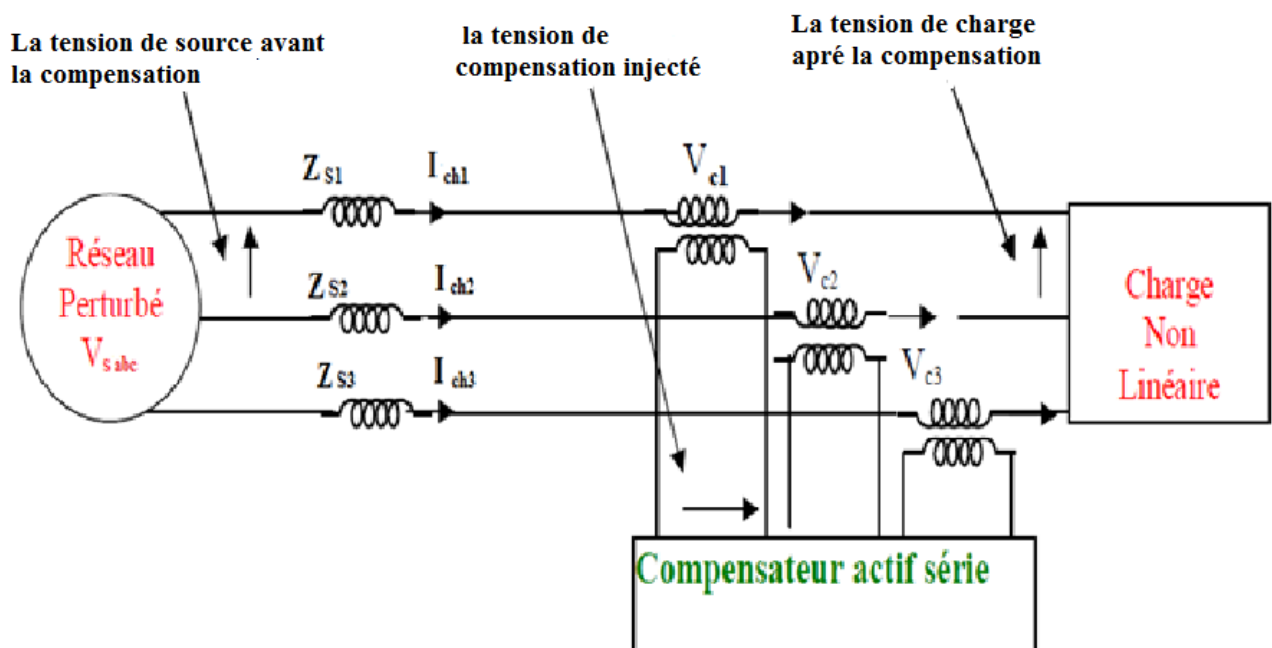
IV.1 Introduction :

L'objectif de ce chapitre est de modéliser l'onduleur qui assure la fonction du filtre actif série. Ce convertisseur doit pouvoir suivre la référence des tensions obtenues précédemment afin de compenser les perturbations en tension existants dans la source d'énergie électrique ou dans le réseau d'alimentation de tel sorte que le redresseur reçoit toujours un système de tension purement sinusoïdal à quel que soit les déformations provenant du réseau et les valeurs des inductances du filtre en courant se trouvant à son entrée.

IV.2 Principe de la compensation actif série :

Le compensateur actif série, est une solution pour protéger des charges sensibles contre les perturbations de tension du réseau électrique et vis-versa. Il s'insère entre le réseau perturbé et la charge à protéger. Ce compensateur est dit série car il doit être inséré en série par l'intermédiaire d'un transformateur, pour l'injection d'une tension tel que la somme de sa tension est celle des réseaux forment un système triphasé équilibré, purement sinusoïdal, stable tel que sa fréquence et sa valeur efficace soient toujours constante avec des valeurs souhaités. Il se comporte donc comme une source de tension variable, de telle sorte à s'opposer aux tensions perturbatrices (creux de tension, déséquilibre, harmonique,...) venant de la source ou de la charge.[18, 22]

La figure (IV.1) explique le principe de fonctionnement du compensateur actif série pour une tension de source perturbé (V_a, V_b, V_c). Les valeurs des tensions harmoniques (V_{h1}, V_{h2}, V_{h3}) que doit fournir le compensateur doivent être égales aux harmoniques identifiés à partir de la tension du réseau perturbé.



FigureIV.1 : Principe du filtrage actif

V.1 Introduction :

La simulation numérique est le meilleur moyen pour étudier les systèmes complexes. Cette partie sera consacrée à la présentation des résultats de simulation de l'ensemble des tensions de réseau - filtre actif série (tension injectée) - tension de charge - tension d'onduleur dans les différents cas de perturbation de réseau. Après une description des éléments caractéristiques, nous représentons les résultats obtenus grâce à des programmes de simulation que nous avons développés sur MATLAB / SIMULINK.

V.2 Conditions de simulation :

Les éléments caractérisant le réseau électrique sont les suivants :

Source :

Tension efficace : $V_s = 220V$

La fréquence : $f = 50 \text{ Hz}$

L'impédance de réseau : $L_s = 15 \text{ mH}$, $R_s = 0.4 \Omega$

La charge polluante :

$L_c = 20 \text{ mH}$, $R_c = 1 \Omega$, $E = 120V$

Filtre de sortie :

$C = 100 \mu\text{F}$, $R = 1 \Omega$

Côté continue de l'onduleur :

$R = 0.1 \Omega$, $V = 700 \text{ V}$

V.3 Résultats de simulation :

Une fois que nous avons arrêté les perturbations à faire subir aux réseaux, afin de tester la réponse de notre filtre actif série, des simulations sous MATLAB/SIMULINK ont été réalisées. Ces perturbations évoluent comme sur la figure (V.1) :

- De 0.5 s à 0.7 s : Une chute de tension de 50%
- Ensuite de 0.7 s à 1.2 s : nous reprenons des valeurs normalisées du réseau
- Après une surtension de 50 % est appliquée
- Pour finir nous revenons aux valeurs normalisées

Ensuite la tension aux bornes du redresseur, qui représente la charge nécessitant une alimentation stable triphasé est équilibré, et le profil des tensions de références à insérer pour compensé les fluctuations du réseau sont représentées respectivement sur les figures (V.3) et (V.2)

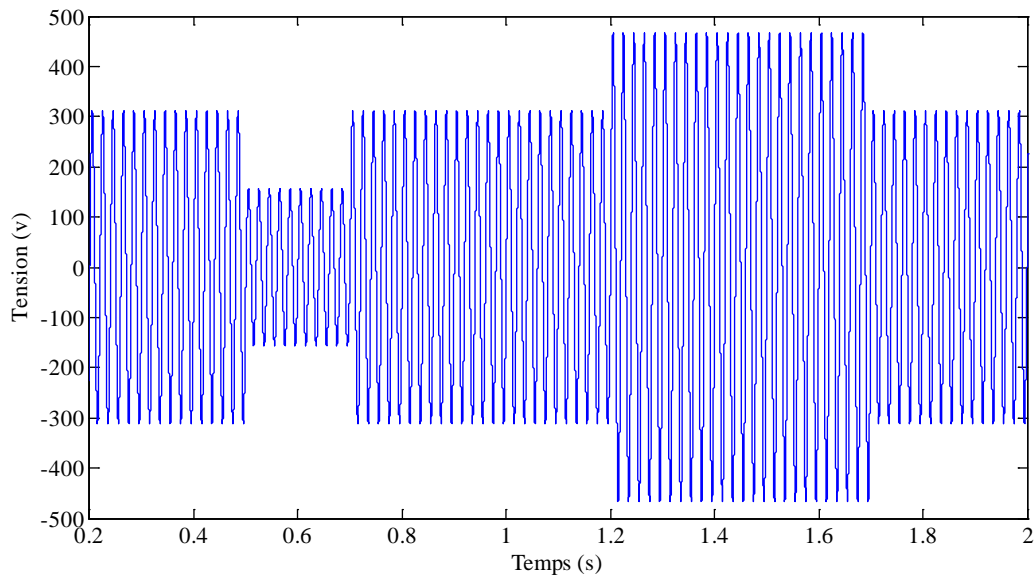


Figure V.1 : tension du réseau

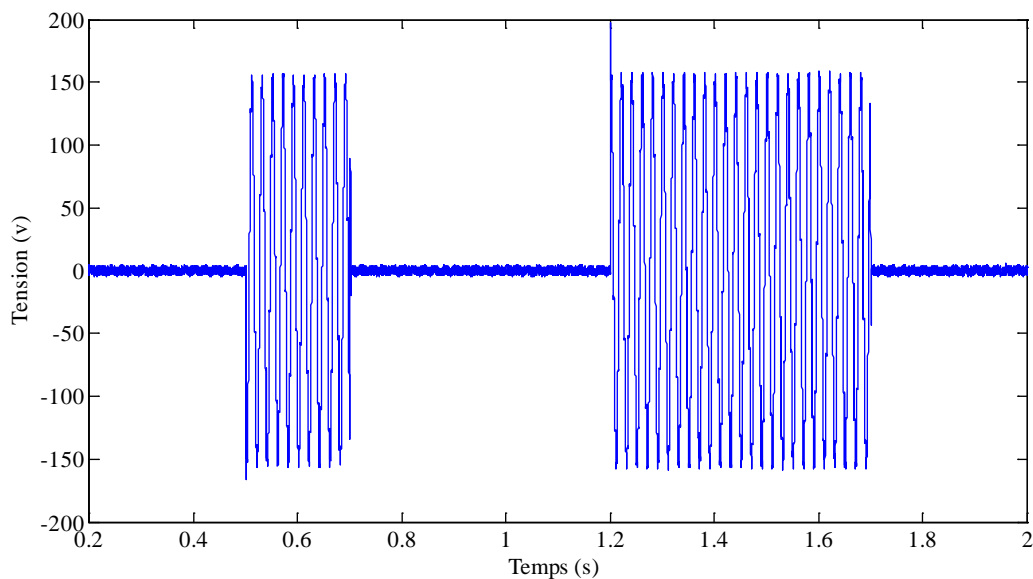


Figure V.2 : tension aux bornes du filtre actif série.

Après simulation une analyse spectrale de la tension de charge est effectuée, ces résultats sont représentés sur la figure (V.4). Cette tension a une valeur maximale de 309,61V et un THD de 0.126 %. Ce qui représente un très bon résultat de compensation. Ces valeurs sont dans le respect des normes d'un système parfaitement sinusoïdal. Toutefois aux instants de variation brusque de la tension nous observons des pics de tension.

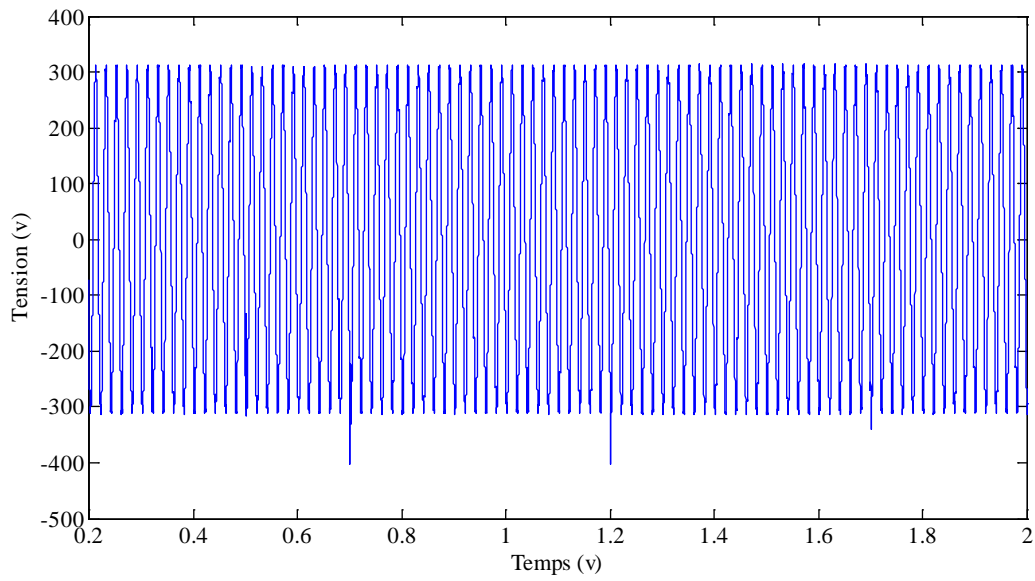


Figure V.3 : Tension de charge

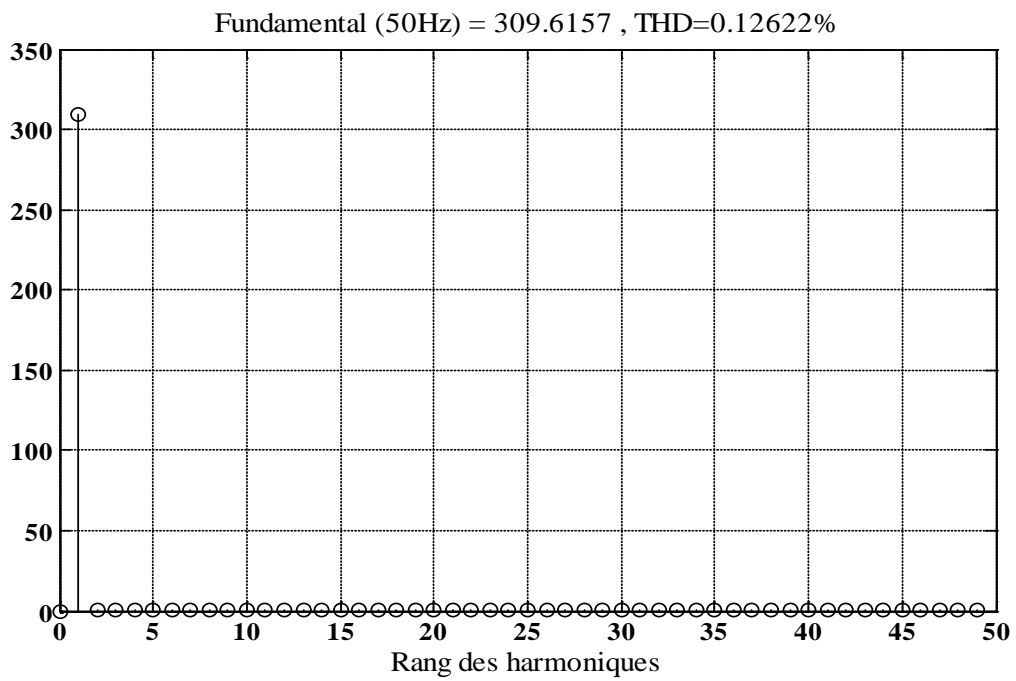


Figure V.4: Spectre harmonique de la tension de charge

La figure (V.5) représente la forme d'onde de la tension fournie par l'onduleur. Pour une bonne compensation, un filtrage de cette tension est nécessaire, ainsi après filtrage la tension délivrée par l'onduleur prend l'allure de celle représentée par la figure V.6. Cette dernière a un profil sinusoïdal.

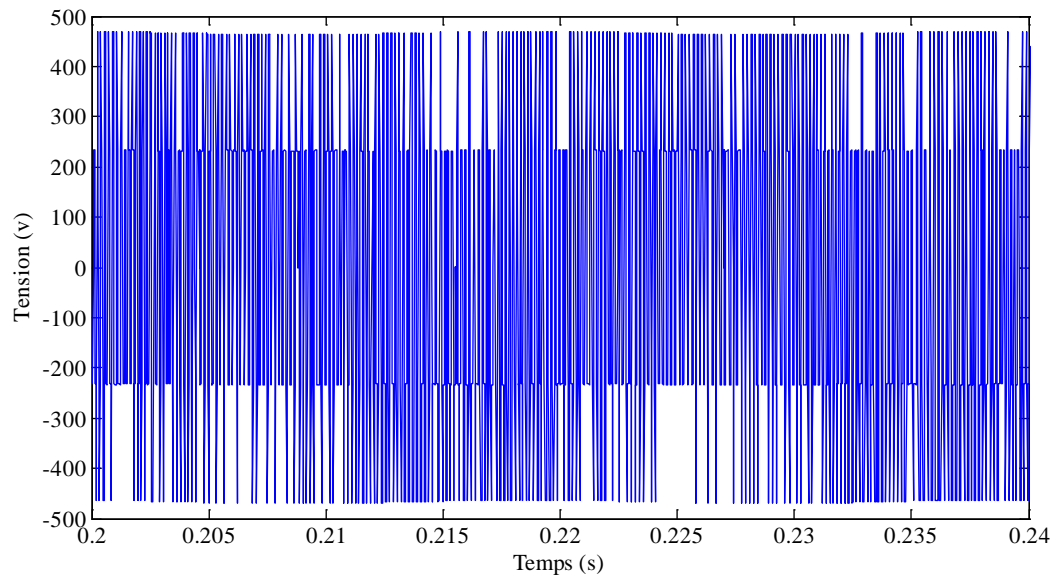


Figure V.5 : La tension d'onduleur

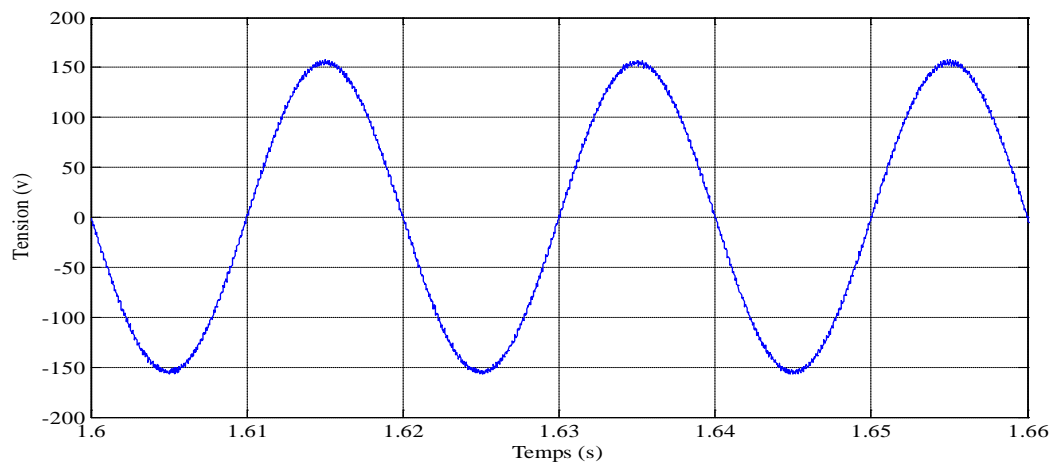


Figure V.6: Forme de la tension de l'onduleur après filtrage

V.3.1 Analyse du cas d'une sous tension réseau :

Les figures (V.7) et (V.8) représentent un zoom de la forme d'onde et le spectre de la tension du réseau durant la phase de la chute de tension. Cette tension a une valeur efficace de 109.68Vce qui confirme la proportion de 50% de chute, et un THD de 0.022 %.

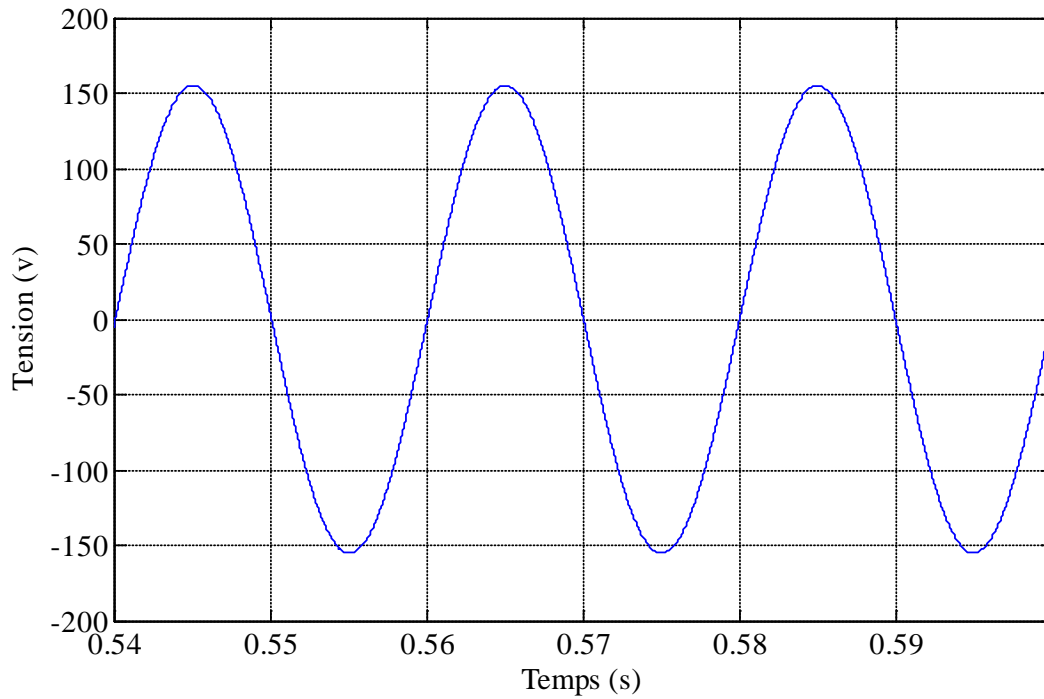


Figure (V.7) : Tension du réseau

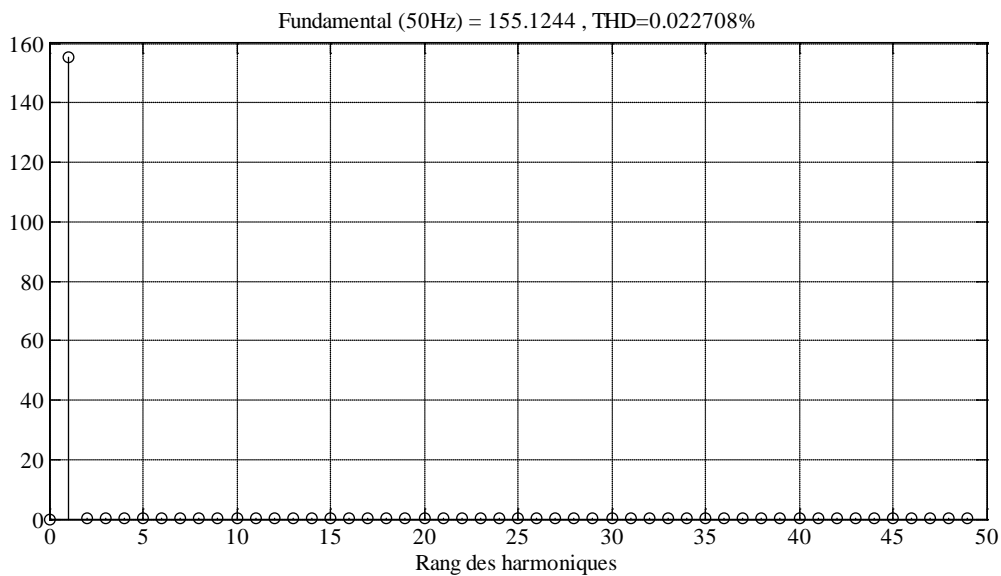


Figure V.8 : Spectre harmonique de tension de réseau

Ainsi, Les figures (V.9) et (V.10) représentent la forme d'onde et le spectre de la tension que fournit le filtre actif série. Cette tension a une valeur efficace de 108.84V et un THD de 0.63%, la somme des grandeurs représentées sur les figure V.9 et figure V.7 nous restitue la tension du réseau triphasé équilibré constante de 220V de fréquence 50Hz.

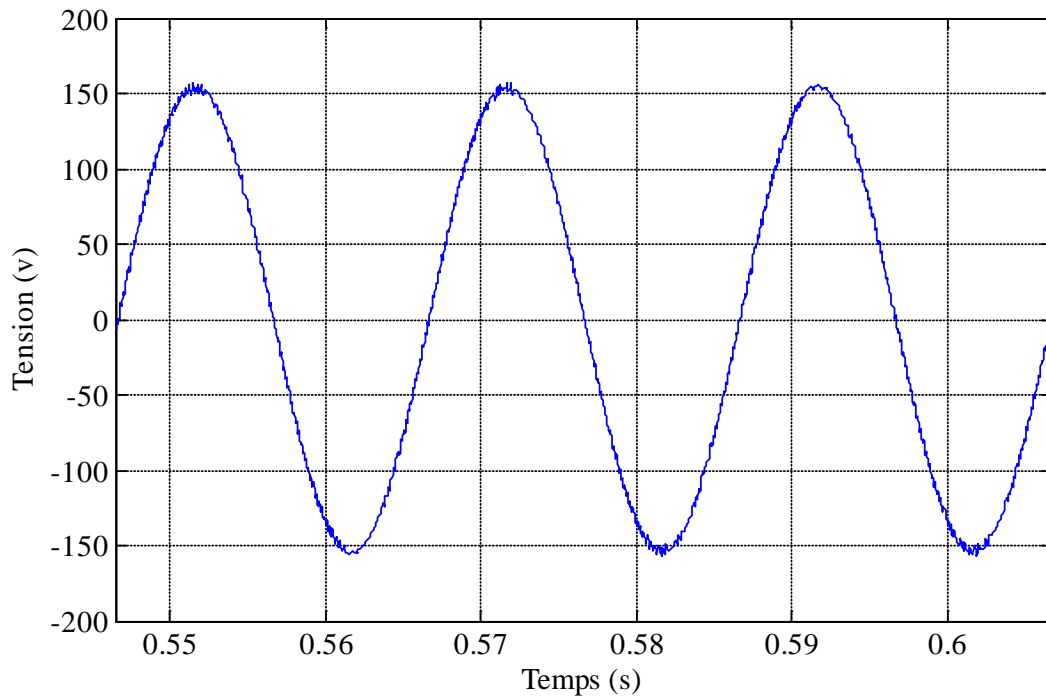


Figure V.9 : Tension fournie par l'onduleur après filtrage

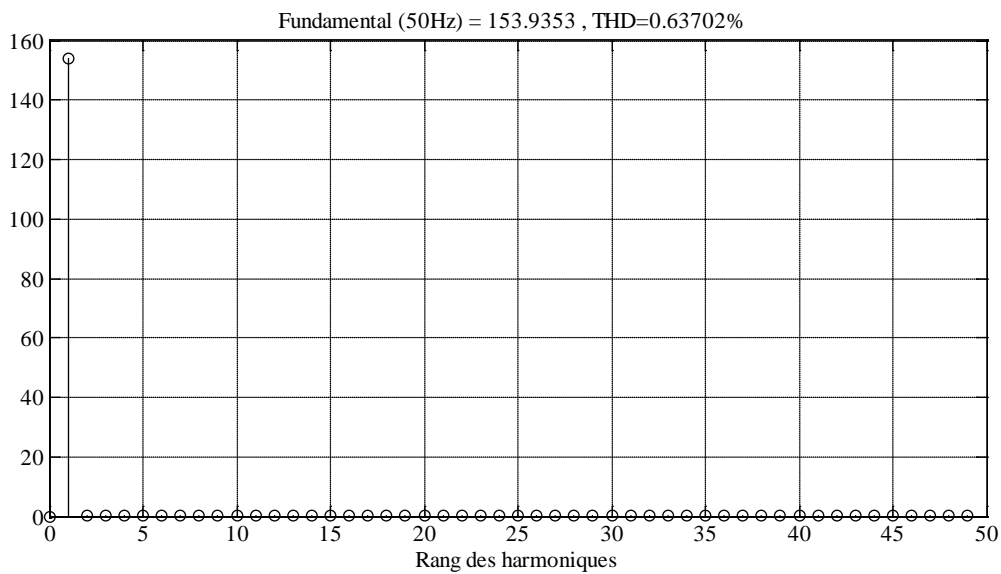


Figure V.10 : Spectre harmonique de la tension injectée

Les figures (V.11) et (V.12) représentent la forme d'onde et le spectre de la tension de charge après la compensation. Cette tension a une valeur efficace de 218.54V et un THD de 0.318%.

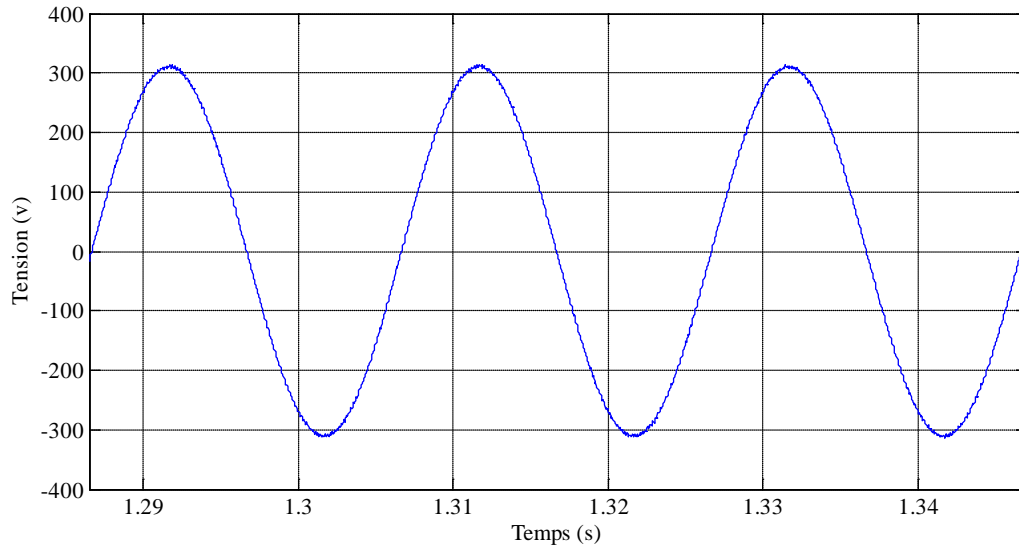


Figure V.11 : Tension de charge

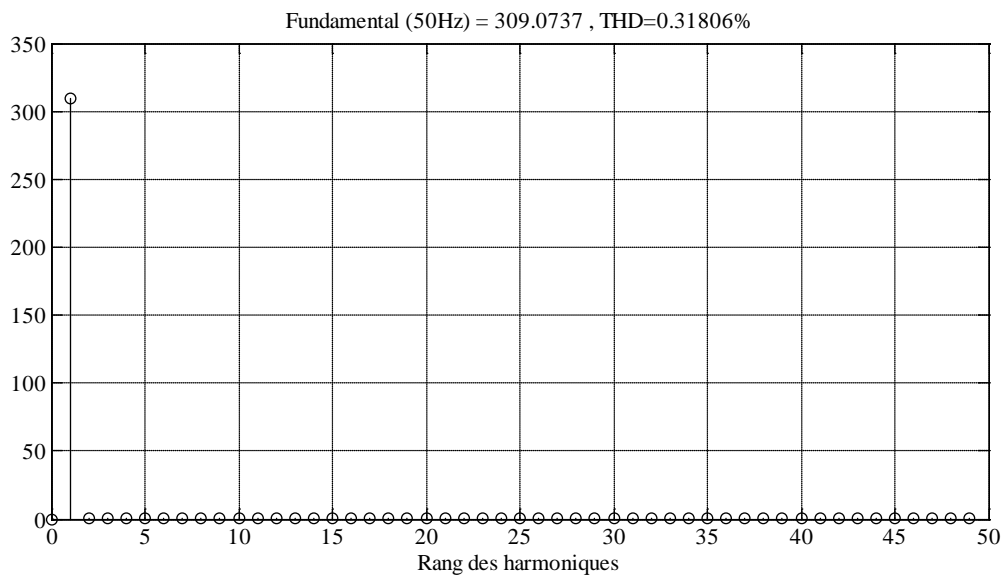


Figure V.12 : Spectre harmonique de la tension de charge

Les figures (V.13) et (V.14) représentent la forme d'onde et le spectre de la tension aux bornes de l'onduleur. Cette tension a une valeur efficace de 181.80 V et un THD de 13.41%.

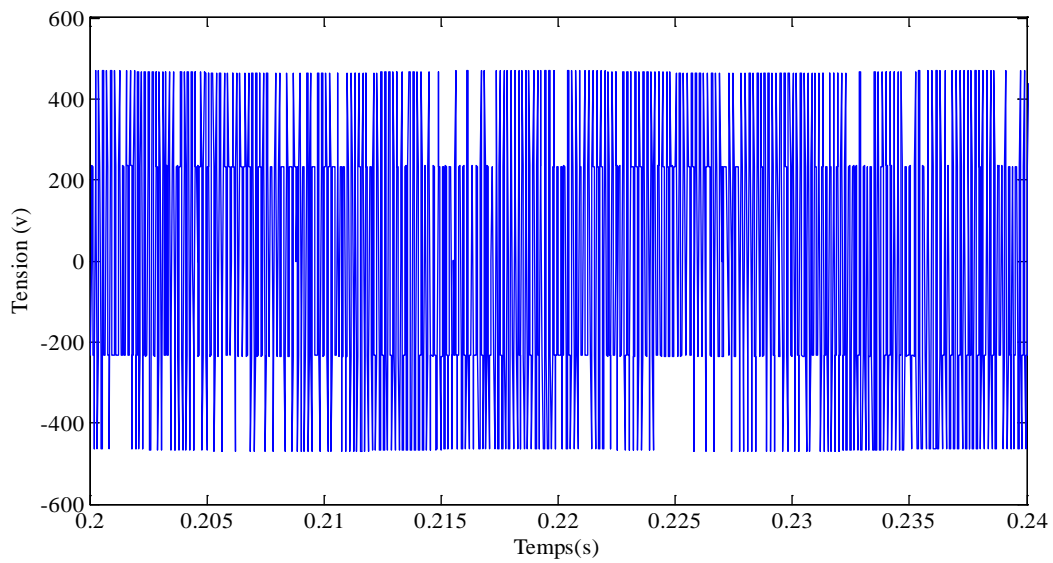


Figure V.13 : La tension d'onduleur

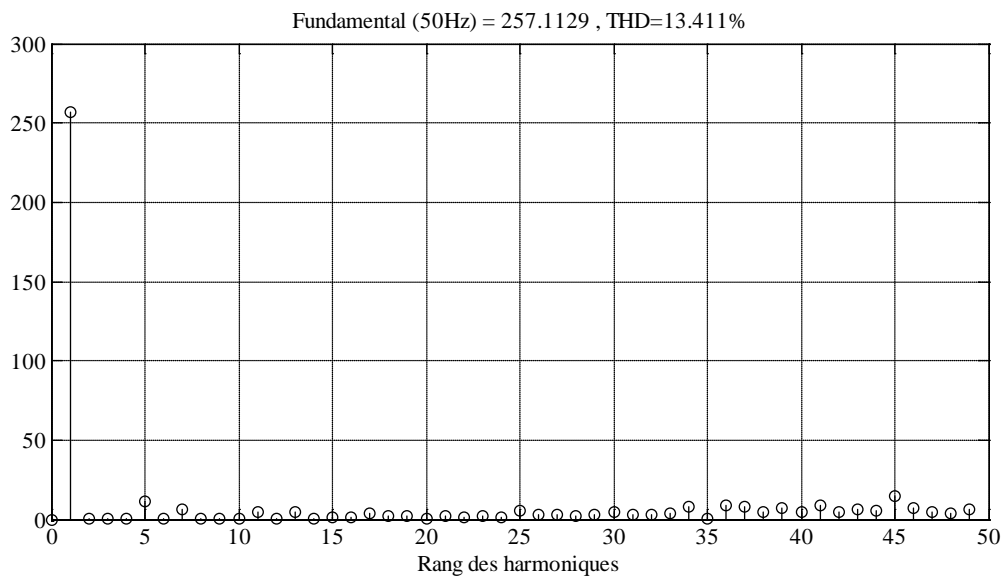


Figure V.14 : Spectre harmonique de la tension d'onduleur

La figure (V.15) représente la forme d'onde de la tension du réseau sous tension et la tension injectée par l'onduleur.

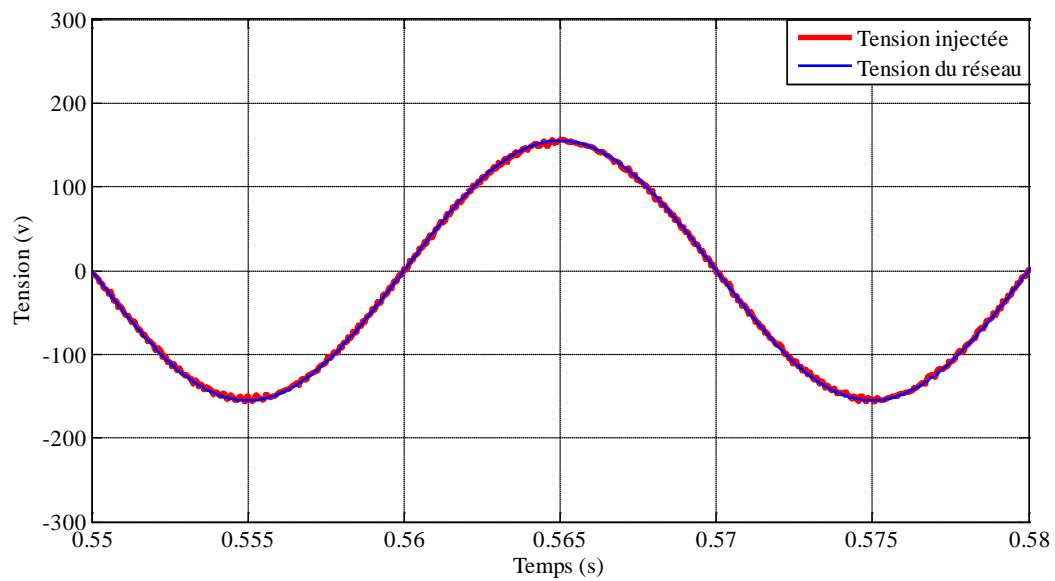


Figure V.15 : La tension de réseau et la tension injectée

En conclusion nous constatons que les deux tensions réseau et filtrée sont de même forme, avec la même amplitude et en phase ce qui nous fournit les 220V, 50Hz au bornes de la charge.

V.3.2 Analyse du cas d'une surtension réseau :

Les figures (V.16) et (V.17) représentent respectivement un zoom de la forme d'onde de la tension du réseau et son spectre harmonique durant la phase de la surtension. Cette tension a une valeur efficace de 329.06Vce qui confirme la proportion de 50% de surtension, avec un THD de 0.022 %.

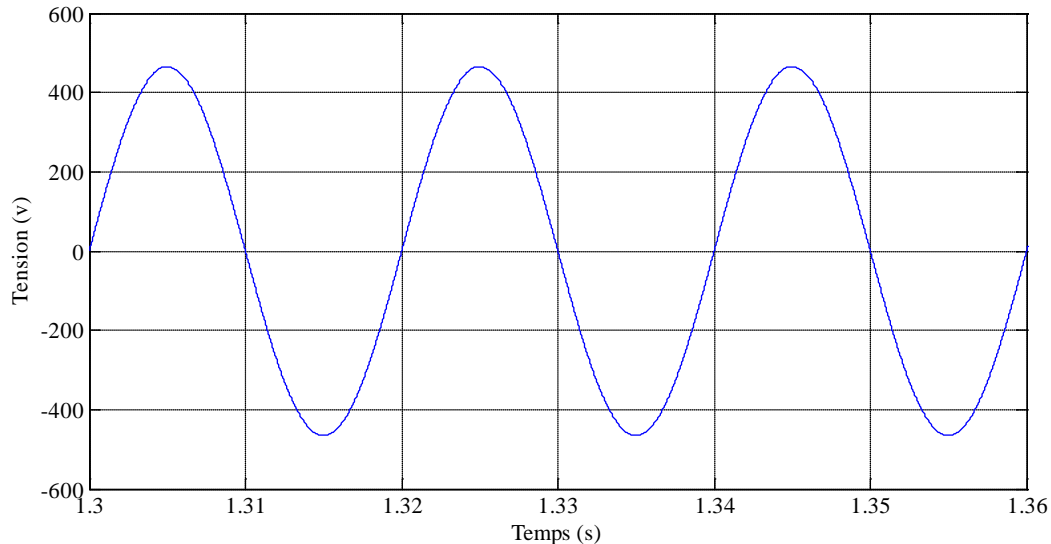


Figure V.16 : La tension du réseau

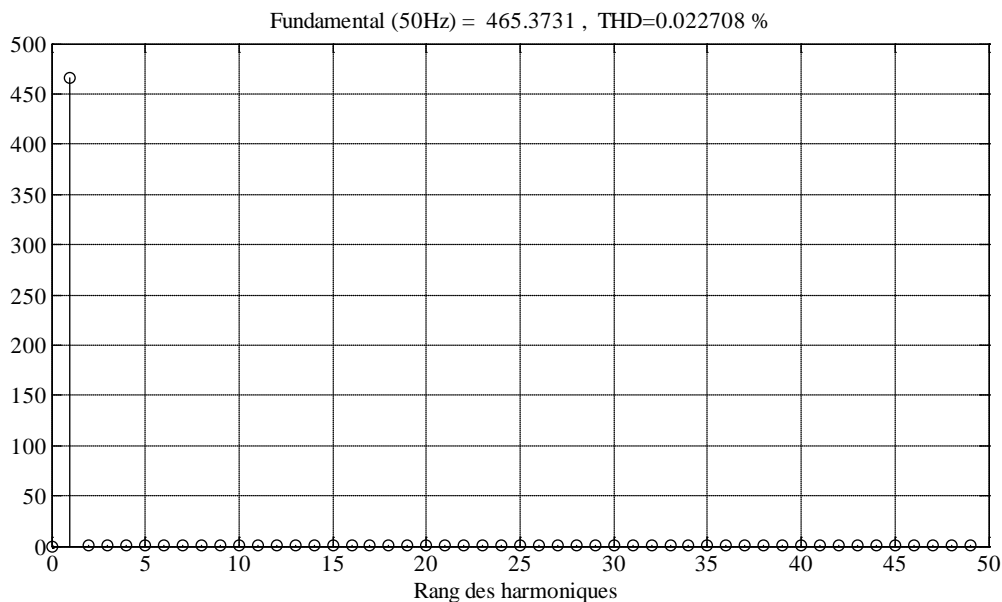


Figure V.17 : Spectre harmonique de la tension de réseau

Ainsi, Les figures (V.18) et (V.19) représentent la forme d'onde et le spectre de la tension que fournit le filtre actif série. Cette tension a une valeur efficace de 109.52V et un THD de 0.266 %, la somme des grandeurs représentée sur les figure (V.18) et figure (V.19) nous restitue la tension du réseau triphasé équilibré est constante de 220V de fréquence 50Hz.

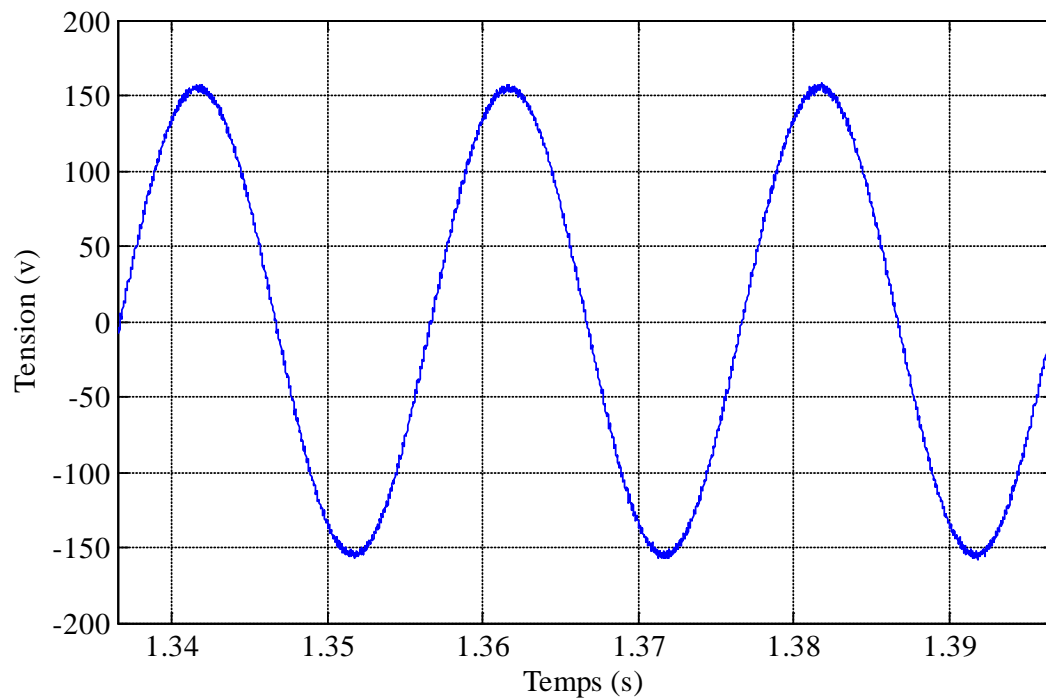


Figure V.18 : La tension injectée

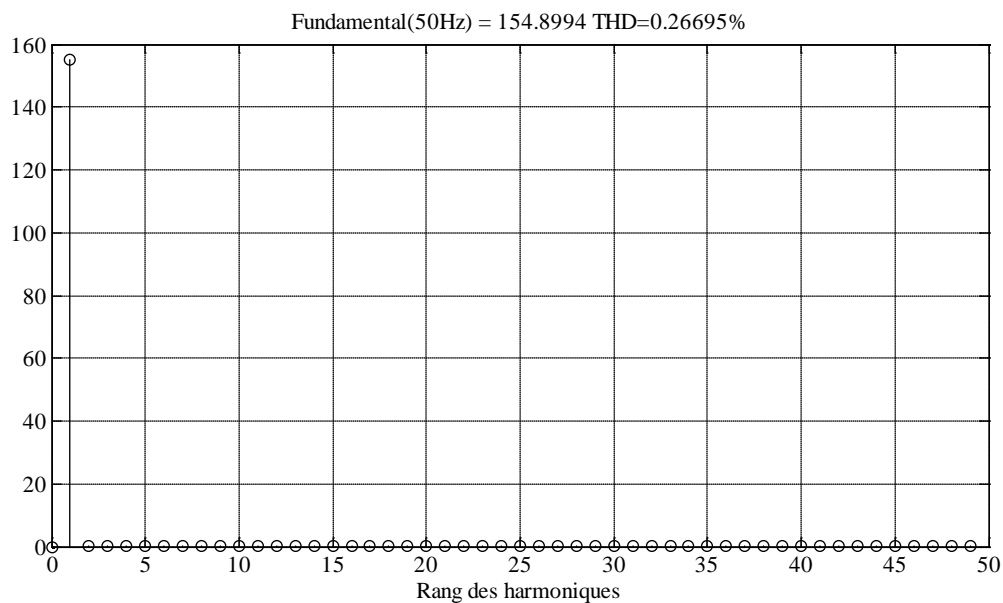


Figure V.19 : Spectre harmonique de la tension injectée

Les figures (V.20) et (V.21) représentent la forme d'onde et le spectre de la tension de charge après la compensation. Cette tension a une valeur efficace de 219.56 V et un THD de 0.132%.

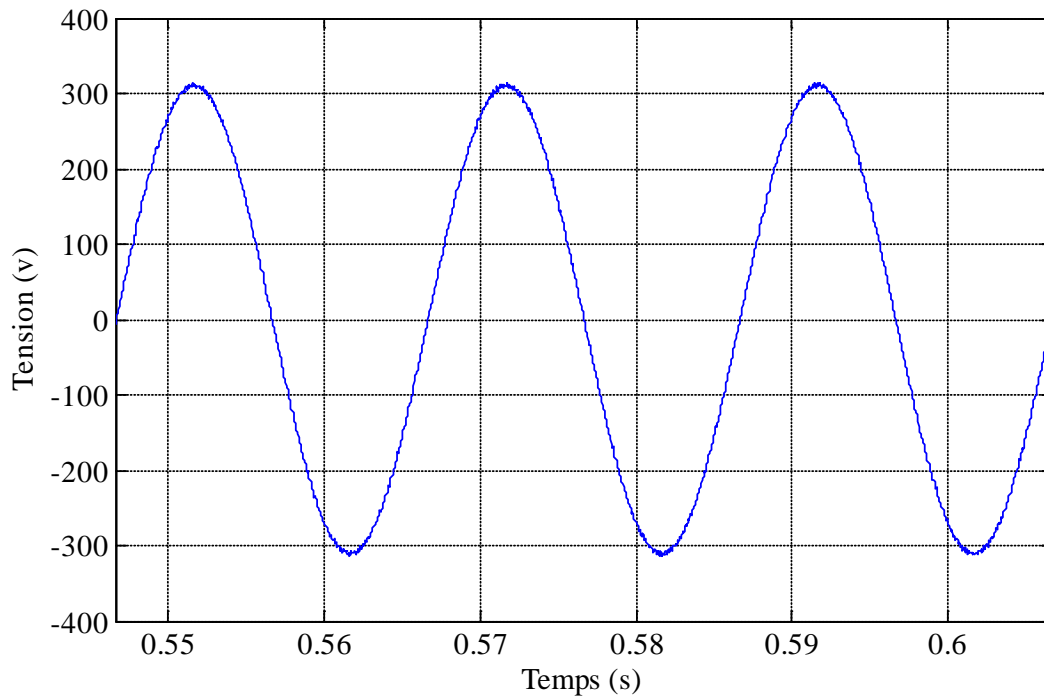


Figure V.20 : La tension de charge

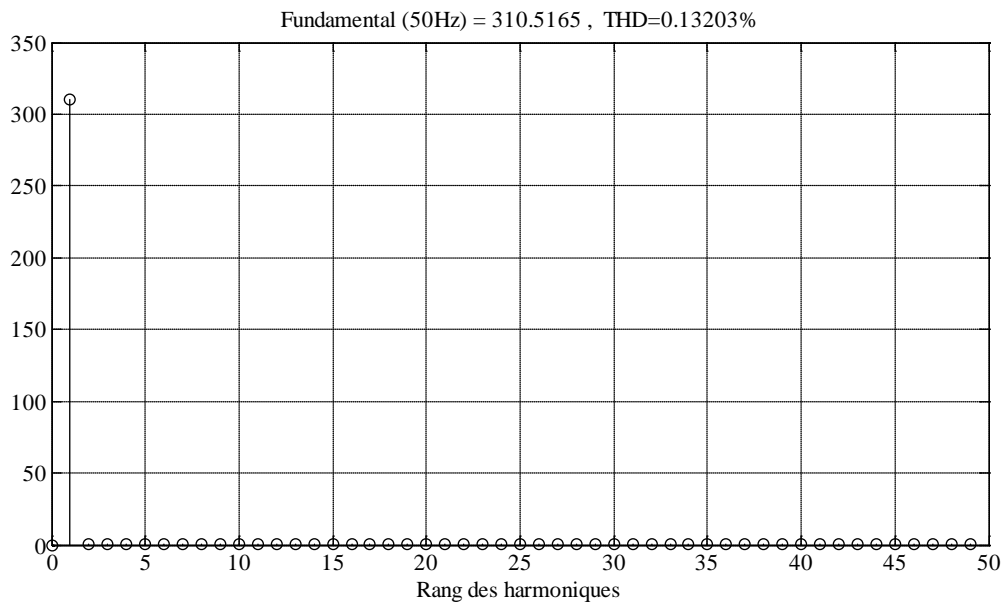


Figure V.21 : Spectre harmonique de la tension de charge

Les figures (V.22) et (V.23) représentent la forme d'onde et le spectre de la tension d'onduleur. Cette tension a une valeur efficace de 41.88 V et un THD de 38.035%.

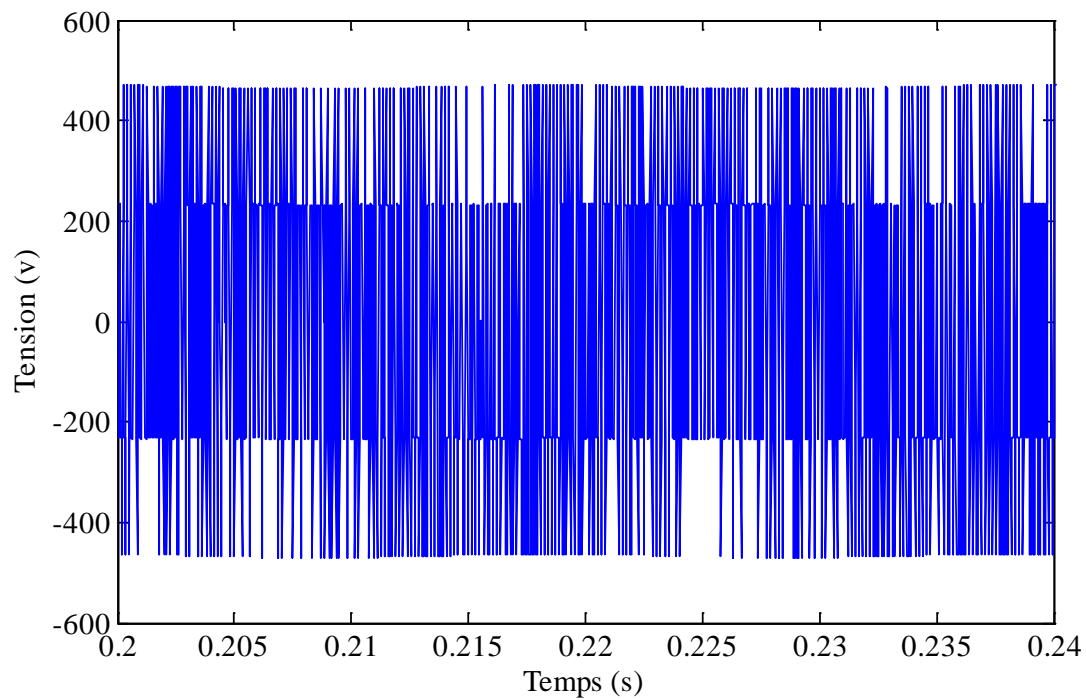


Figure V.22 : La tension d'onduleur

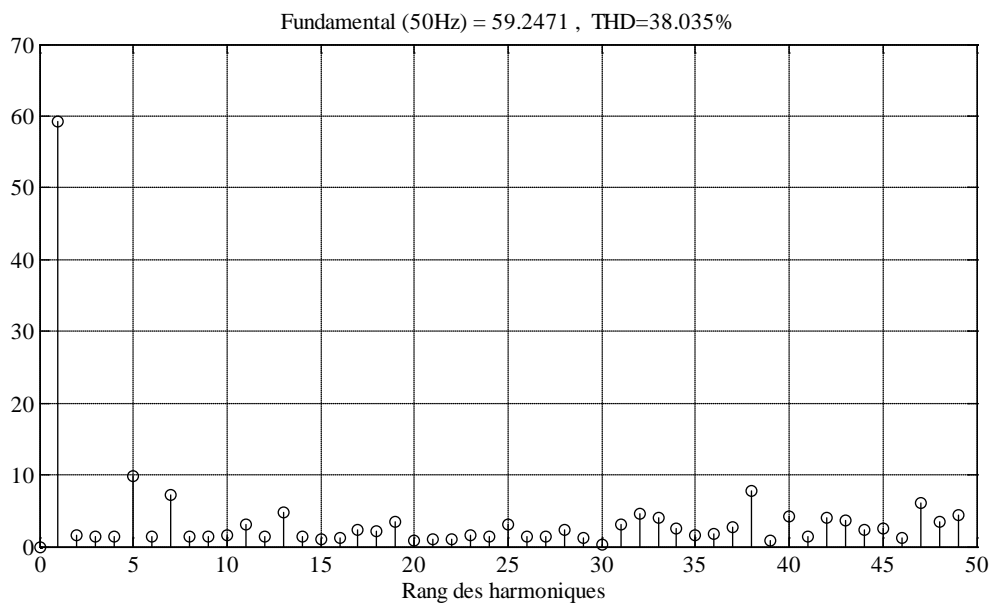


Figure V.23 : Spectre harmonique de la tension d'onduleur

La figure (V.24) et (V.6) représente la forme d'onde de la tension du réseau et la tension injectée par le filtre actif série.

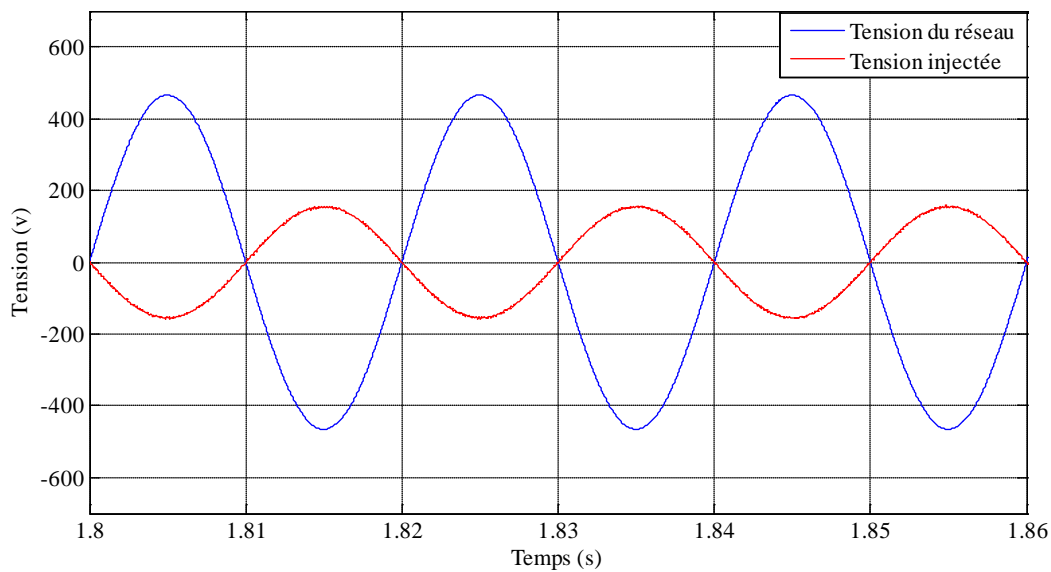


Figure V.24 : La tension de réseau et la tension injectée

En conclusion nous constatons que la tension du réseau et celle du filtre sont en opposition de phase, avec des amplitudes différentes, leur résultante fournit une tension de 220V voir figure V.20 avec une fréquence de 50Hz pour la charge, donc une bonne compensation.

V.3.3 Analyse d'un cas d'un réseau déséquilibré :

Dans cette partie une superposition d'une composante homopolaire formé par deux harmoniques de rang 3 et 6 avec la tension purement sinusoïdale de valeur efficace égale a 220V avec une fréquence de 50Hz est réalisé. La nouvelle forme de la tension fournie par le réseau est représentée sur la figure (V.25), et son spectre est donné sur la figure (V.26). Après analyse de cette tension, son fondamental a une valeur efficace de 219.38 V avec un THD de 53.83 %. Cette perturbation est uniquement dû aux deux harmoniques que nous avons superposés.

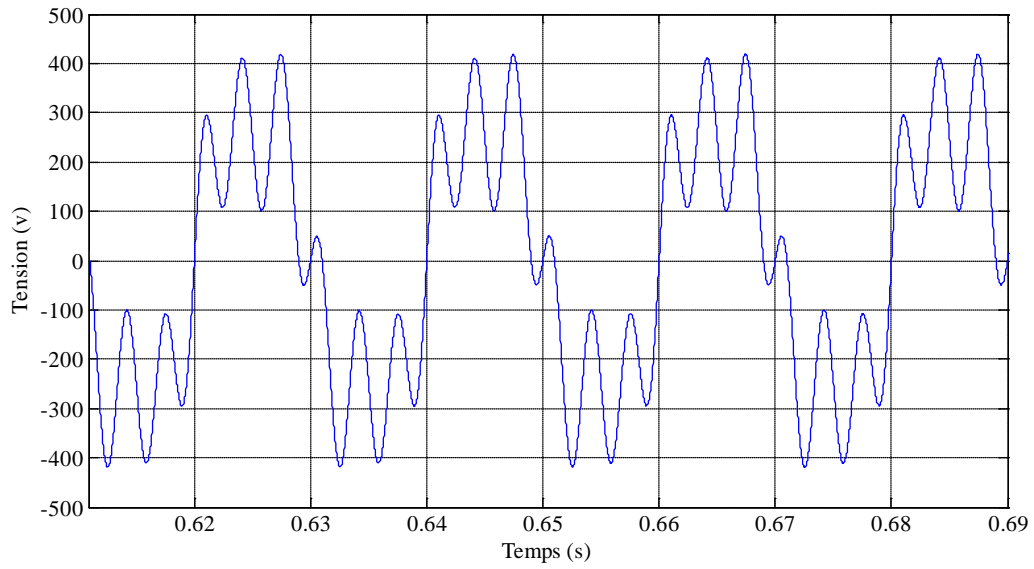


Figure V.25 : La tension du réseau

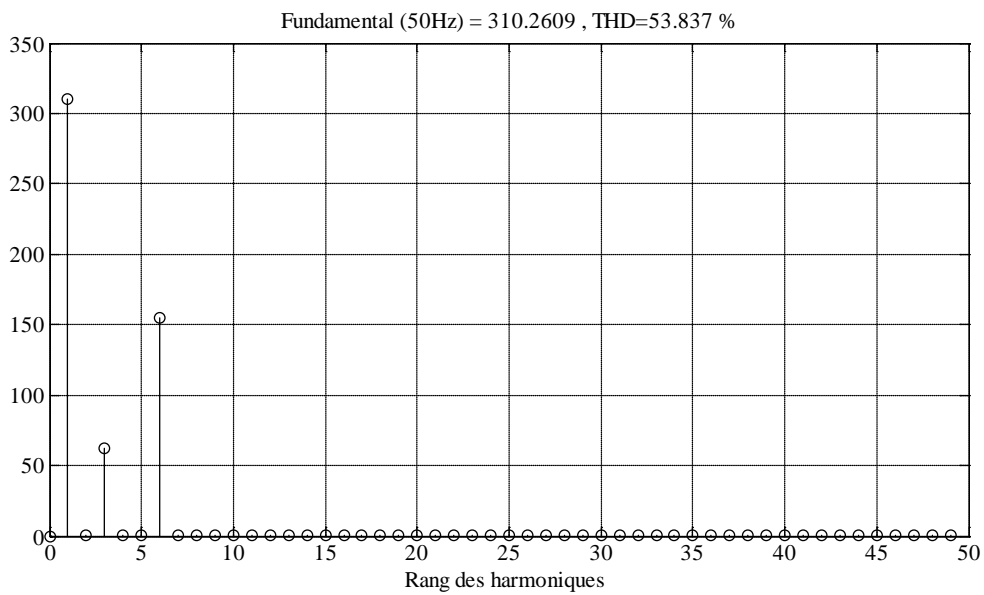


Figure V.26 : Spectre harmonique de la tension de réseau

Les figures (V.27) et (V.28) représentent la forme d'onde et le spectre de la tension fourni par l'onduleur après filtrage. Cette tension a un fondamental avec une amplitude de 18.28 V et un THD de 297.04%.

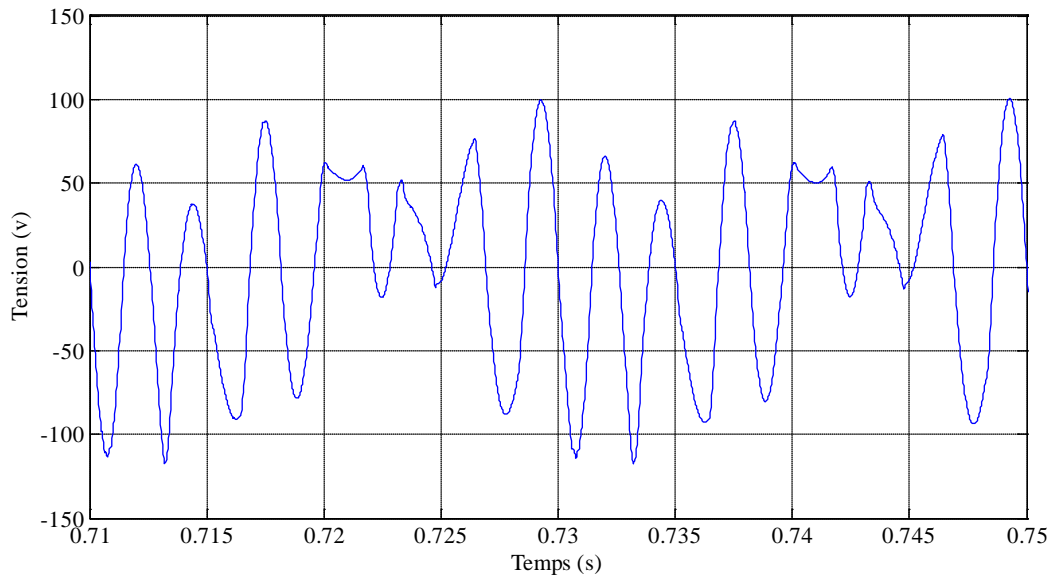


Figure V.27 : La tension fournie par l'onduleur après filtrage

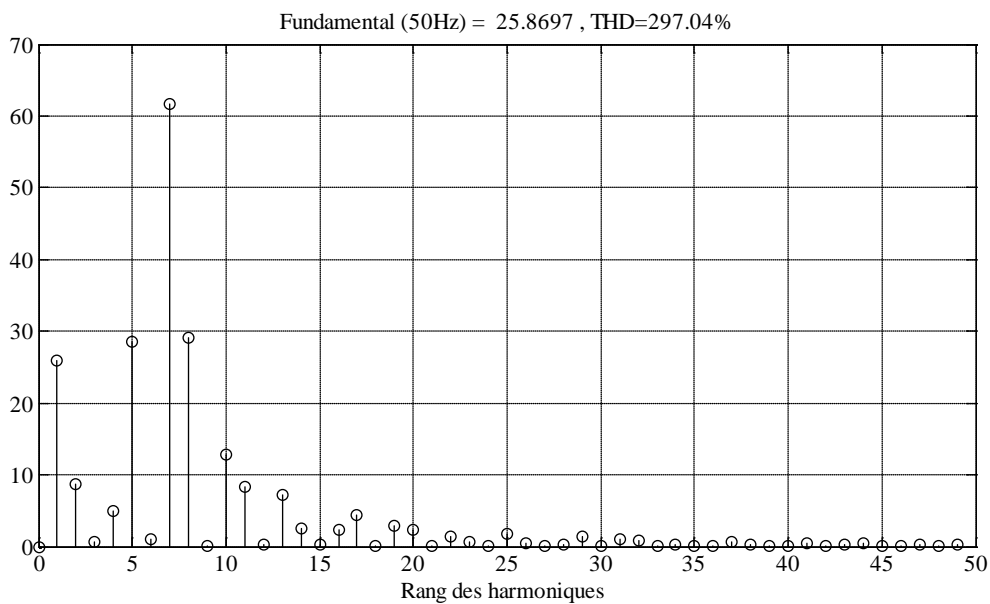


Figure V.28 : Spectre harmonique de la tension injectée

Les figures (V.29) et (V.30) représentent la forme d'onde et le spectre de la tension de charge. Cette tension a une valeur efficace de 202.99V et un THD de 64.32%.

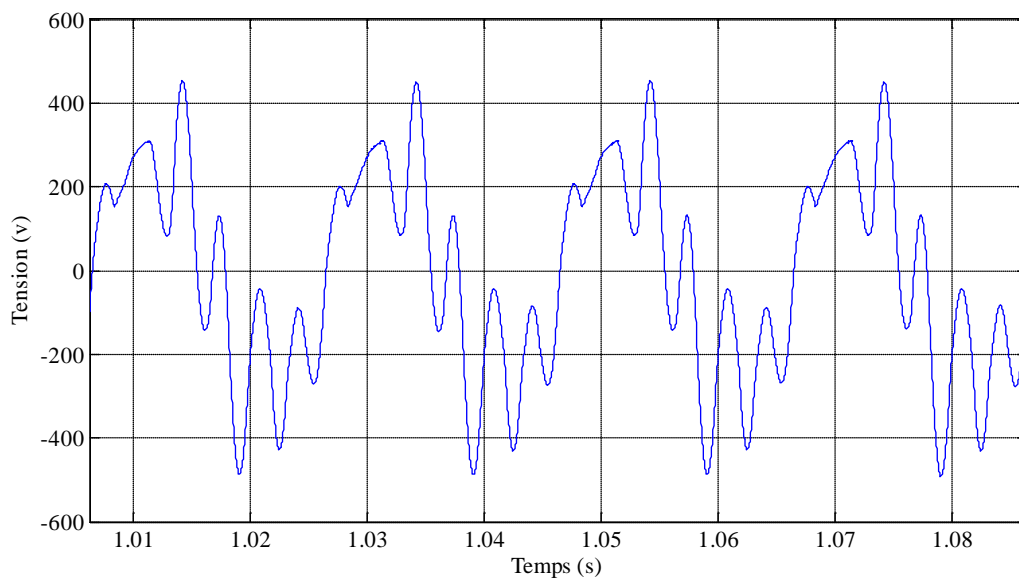


Figure V.29 : Tension de charge

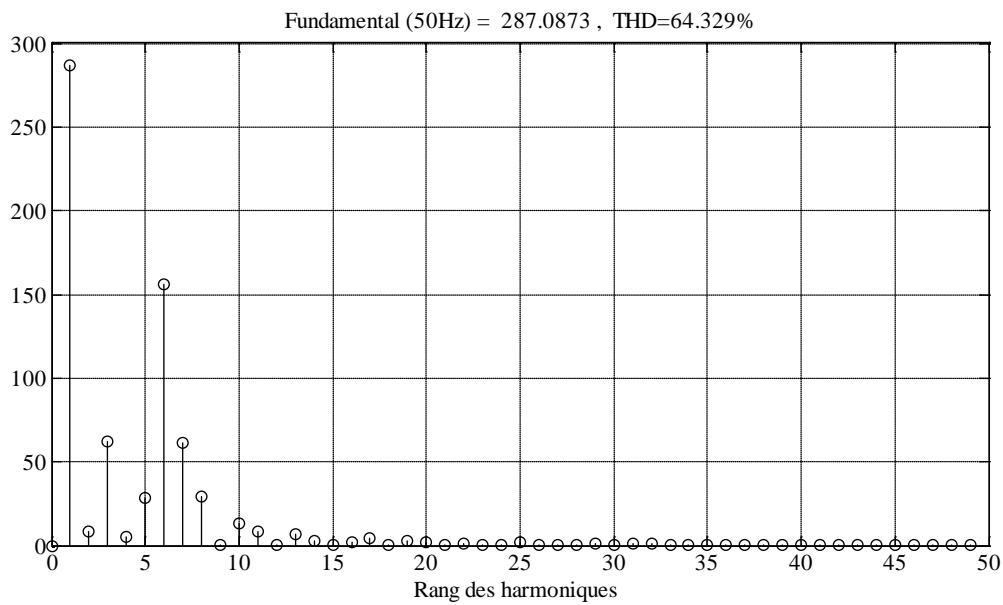


Figure V.30 : Spectre harmonique de la tension de charge

Les figures (V.31) et (V.32) représentent la forme d'onde et le spectre de la tension d'onduleur. Cette tension a une valeur efficace de 47.18V et un THD de 243.71 %.

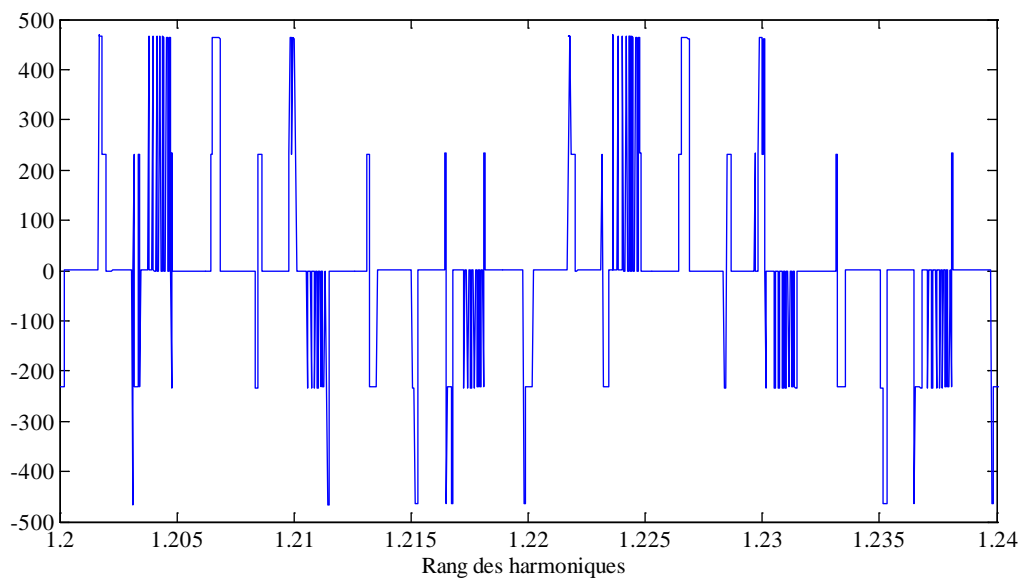


Figure V.31 : La tension d'onduleur

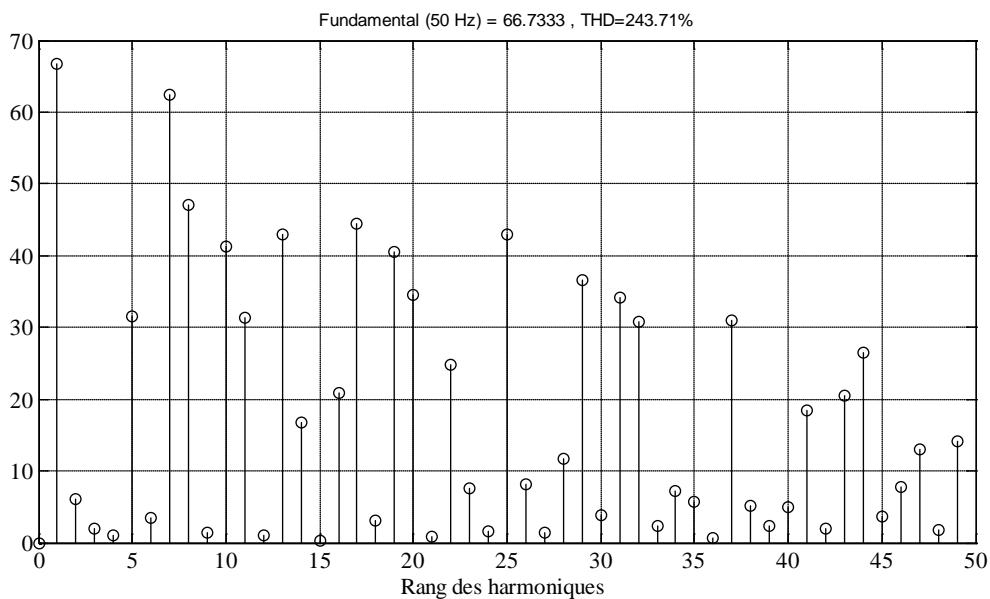


Figure V.32 : Spectre harmonique de la tension d'onduleur

Le modèle de l'onduleur a été fait sous l'hypothèse d'un système équilibré, en analysant rapidement les spectres de la figure V.26 et celui de la figure V.28. Nous pouvons constater que la composition d'un système déséquilibré n'est pas possible avec une telle configuration d'onduleur, ce qui est confirmé par les figures V.27 et la figure V.28.

On constate que le filtre actif série ne compense pas la tension quand le réseau électrique présent une perturbation déséquilibrée

V.3.4 Réseau équilibré avec présence d’harmoniques :

Dans ce qui suit le test sera fait pour une injection d’harmoniques tout en gardant un système équilibré, donc un harmonique dans le repère direct et un autre du système inverse. Contrairement au cas précédent, la composition est très satisfaisante et elle est mise en évidence grâce au figures suivantes.

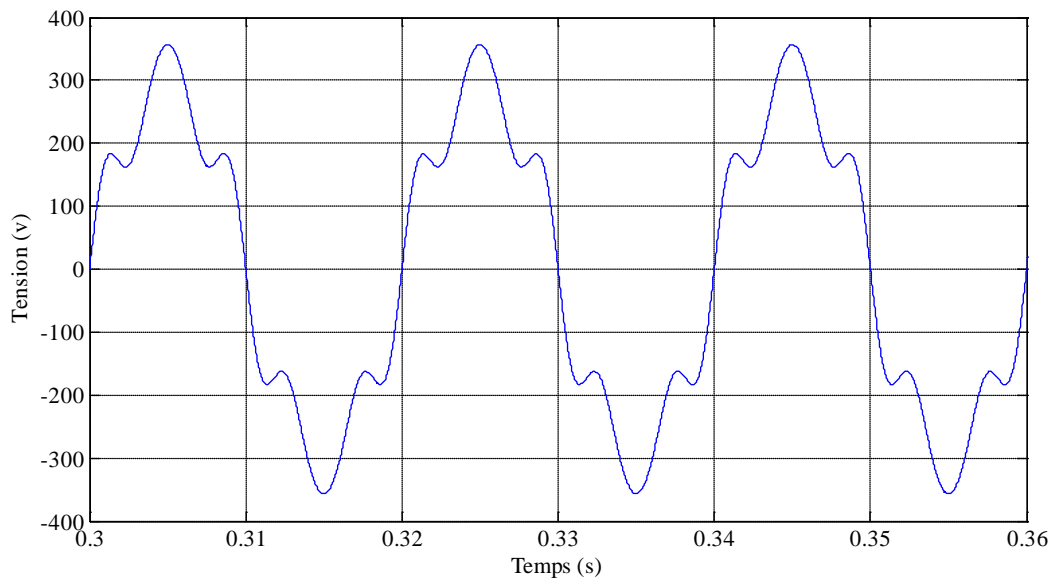


Figure V.33 : la tension du réseau

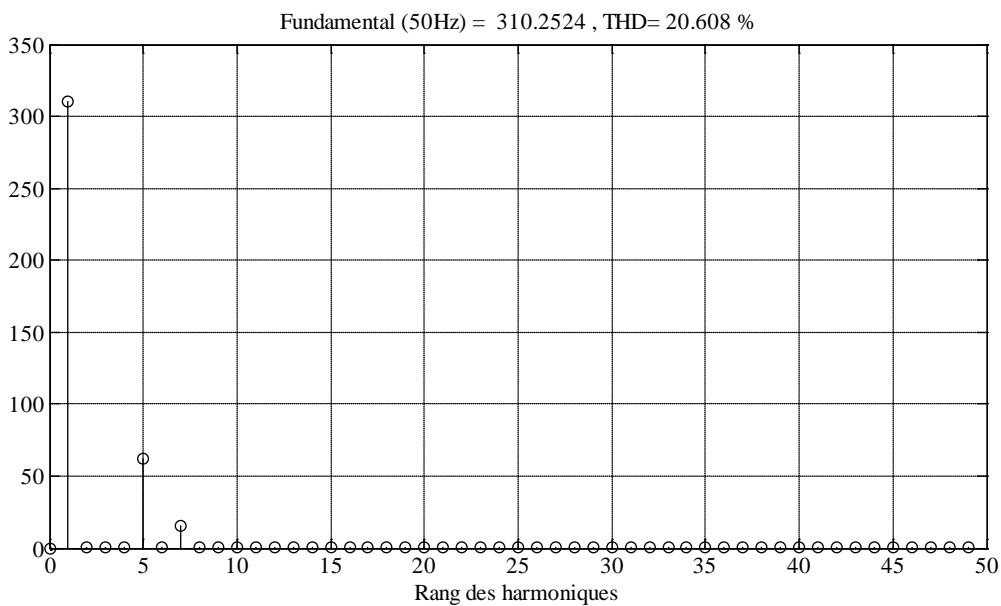


Figure V.34 : Spectre harmonique de la tension de réseau

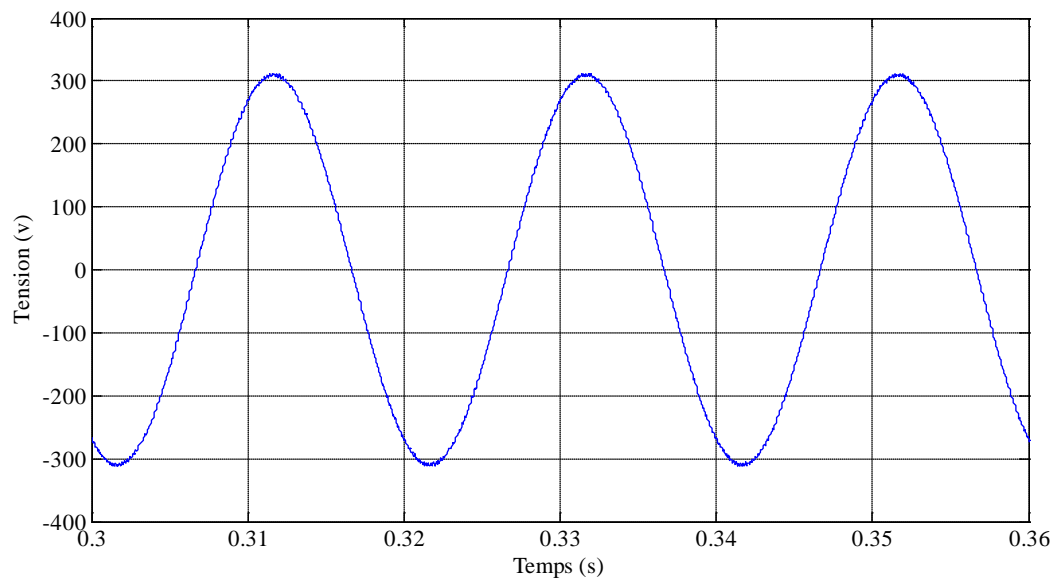


Figure V.35 : La tension de charge

V.4 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté les résultats de la simulation de l'ensemble réseau-charge polluante et filtre actif série commandé par hystérésis. Le programme de simulation de l'ensemble formé par le système de puissance et le système de commande du filtre actif série est réalisé grâce au logiciel Matlab/Simulink. Après analyse des résultats nous arrivons à la conclusion suivante : tant que le système reste équilibré la compensation est bonne, quelque soit l'origine de la perturbation. Toutefois dès qu'un déséquilibre est observé le filtre ne suit plus.

IV.3 Topologie générale d'un compensateur actif série :

Comme tous les compensateurs actifs le filtre actif série se compose essentiellement de deux parties, d'une partie puissance et d'une partie commande, comme le montre la figure (IV.2).

- La partie puissance se compose d'un onduleur, d'un filtre de couplage pour éliminer les harmoniques de haute fréquence provoqués par la commande en modulation de largeur d'impulsion de l'onduleur, et d'un élément générateur lui fournissant l'énergie nécessaire.

L'onduleur est de type tension à base d'interrupteurs de puissance, commandable à l'amorçage et au blocage (GTO, IGBT, ...etc.) avec des diodes en antiparallèle pour assurer la réversibilité en courant.

- La partie commande, sert au contrôle de la commutation des éléments semi-conducteurs formant l'onduleur de la partie puissance, au moyen de stratégies de contrôle appropriées [2].

L'idée c'est de générer des signaux harmoniques à la sortie de l'onduleur servant à compenser ceux présents sur le réseau électrique.

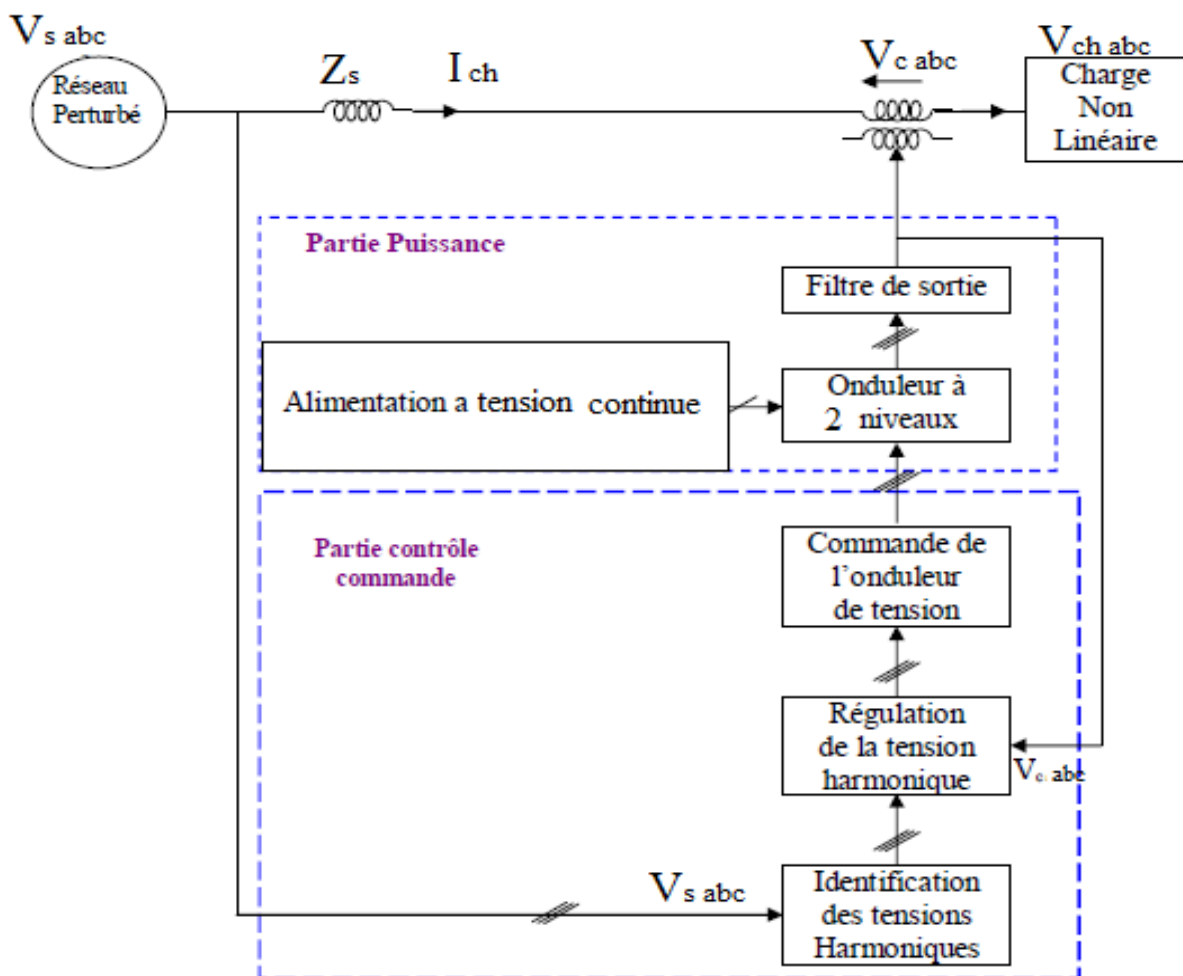


Figure IV.2 : Structure générale d'un filtre actif série

IV.4 Etude de la partie puissance : [27]

La partie puissance est constituée d'un onduleur de tension triphasé à deux niveaux commandé par hystérésis, d'un élément source d'énergie de nature tension continue, d'un filtre de sortie de premier ordre, et d'un transformateur triphasé permettant d'insérer le filtre en série afin de pouvoir mettre en série les tensions avec le générateur pour avoir les tensions souhaitées aux bornes du récepteur.

IV.4.1 Onduleur de tension :

La Figure(IV.3) présente un onduleur triphasé à structure tension. Il est composé de trois bras avec des interrupteurs réversibles en courant, commandés à la fermeture et à l'ouverture.

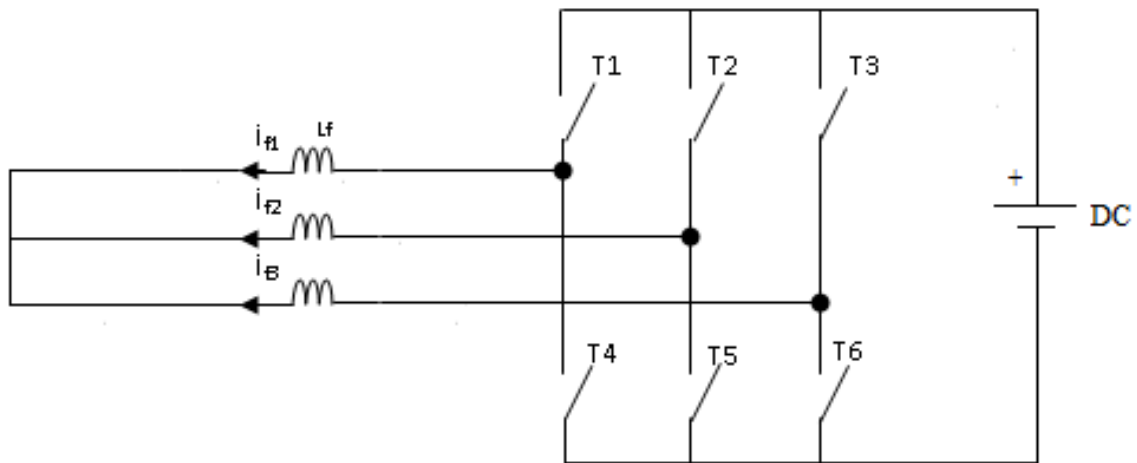


Figure IV.3 : Filtre active à structure tension

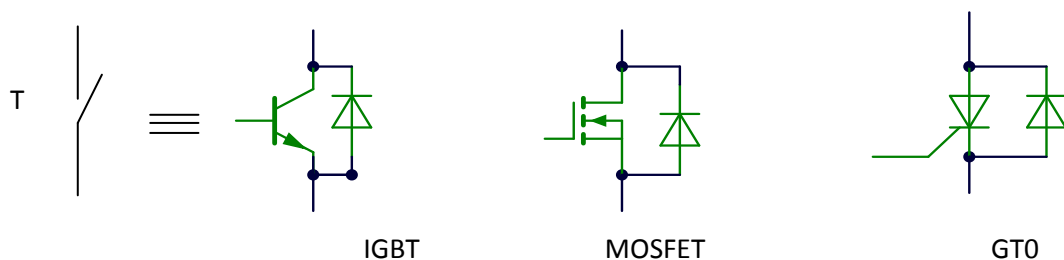


Figure IV.4 : Interrupteurs de puissance

IV.4.2 Tension fournie par l'onduleur :

- L'ouverture et la fermeture des interrupteurs de l'onduleur de la Figure(IV.3) dépendent de l'état des signaux de commande (u_1, u_2, u_3), définis ci-dessous :

$$u_1 = \begin{cases} 1 & T_1 \text{ fermé et } T_4 \text{ ouvert} \\ 0 & T_1 \text{ ouvert et } T_4 \text{ fermé} \end{cases} \quad (\text{IV.1})$$

$$u_2 = \begin{cases} 1 & T_2 \text{ fermé et } T_5 \text{ ouvert} \\ 0 & T_2 \text{ ouvert et } T_5 \text{ fermé} \end{cases} \quad (\text{IV.2})$$

$$u_3 = \begin{cases} 1 & T_3 \text{ fermé et } T_6 \text{ ouvert} \\ 0 & T_3 \text{ ouvert et } T_6 \text{ fermé} \end{cases} \quad (\text{IV.3})$$

- Les tensions délivrées par le réseau sont supposées quelconques avec une fréquence de (50Hz). Elles s'expriment par :

$$V_{S_i} = V_m \sin(\omega t - (i - 1)\frac{2\pi}{3}), (i = 1, 2, 3) \quad (\text{IV.4})$$

- Les tensions entre phases imposées par l'onduleur sont alors :

$$\begin{bmatrix} v_{f1} - v_{f2} \\ v_{f2} - v_{f3} \\ v_{f3} - v_{f1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 - u_2 \\ u_2 - u_3 \\ u_3 - u_1 \end{bmatrix} V_c \quad (\text{IV.5})$$

- Les tensions simples v_{f1}, v_{f2} et v_{f3} sont référées au neutre de la source et vérifient l'équation :

$$\begin{bmatrix} v_{f1} \\ v_{f2} \\ v_{f3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{s1} \\ v_{s2} \\ v_{s3} \end{bmatrix} + L_f \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{f1} \\ i_{f2} \\ i_{f3} \end{bmatrix} \quad (\text{IV.6})$$

Sachant que le couplage du transformateur est en étoile sans neutre, cela nous induit une somme des courants du filtre actif nulle, si avec l'hypothèse précédente nous avons les impédances des trois phases sont égales, alors la somme des tensions sera aussi nulle.

$$i_{f1} + i_{f2} + i_{f3} = 0 \Rightarrow v_{s1} + v_{s2} + v_{s3} = 0 \quad (\text{IV.7})$$

On déduira à partir des équations (IV.6) et (IV.7) :

$$v_{f1} + v_{f2} + v_{f3} = 0 \quad (\text{IV.8})$$

Les équations (IV.5) et (IV.8) donnent :

$$\begin{bmatrix} v_{f1} \\ v_{f2} \\ v_{f3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} \frac{V_c}{3} \quad (\text{IV.9})$$

Les variables u_1 , u_2 et u_3 prennent chacune, deux valeurs possibles. Il en résulte huit états possibles pour les tensions v_{f1} , v_{f2} , v_{f3} résumés dans le tableau (IV.1).

Tableau IV.1 : Tensions délivrées par l'onduleur

| Etat | f_{11} | f_{21} | f_{31} | v_{f1} | v_{f2} | v_{f3} |
|------|----------|----------|----------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 0 | 0 | 1 | $-\frac{1}{3}V_c$ | $-\frac{1}{3}V_c$ | $\frac{2}{3}V_c$ |
| 3 | 0 | 1 | 0 | $-\frac{1}{3}V_c$ | $\frac{2}{3}V_c$ | $-\frac{1}{3}V_c$ |
| 4 | 0 | 1 | 1 | $-\frac{2}{3}V_c$ | $\frac{1}{3}V_c$ | $\frac{1}{3}V_c$ |
| 5 | 1 | 0 | 0 | $\frac{2}{3}V_c$ | $-\frac{1}{3}V_c$ | $-\frac{1}{3}V_c$ |
| 6 | 1 | 0 | 1 | $\frac{1}{3}V_c$ | $-\frac{2}{3}V_c$ | $\frac{1}{3}V_c$ |
| 7 | 1 | 1 | 0 | $\frac{1}{3}V_c$ | $\frac{1}{3}V_c$ | $-\frac{2}{3}V_c$ |
| 8 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |

IV.4.3 Représentation vectorielle :

Dans le plan biphasé (α , β) et en considérant $\underline{\overset{\perp}{V}}_f$ le vecteur correspondant aux tensions de l'onduleur, les huit cas possibles du vecteur $\underline{\overset{\perp}{V}}_f$ sont donnés par la Figure(IV.5).

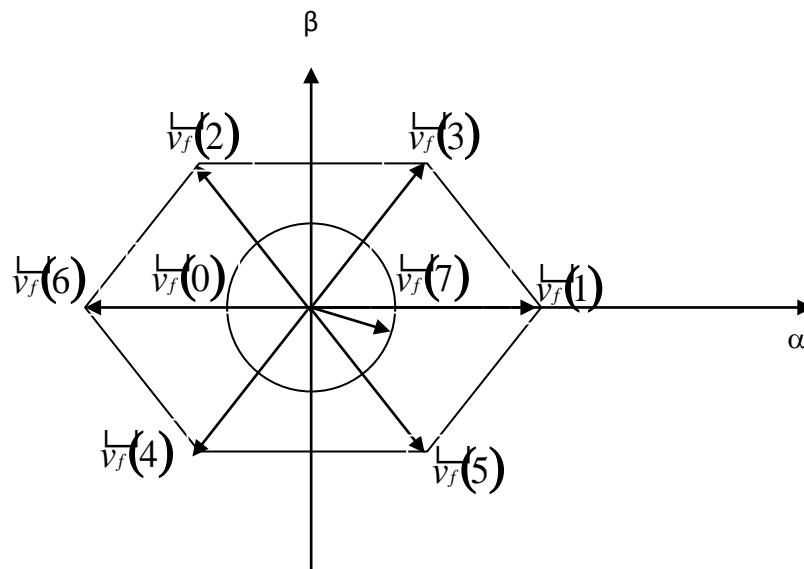


Figure IV.5 : Représentation vectorielle des tensions générées par l'onduleur

Où \underline{V}_f représente la tension de référence que doit produire l'onduleur pour pouvoir créer les tensions perturbatrices identifiées. Ceci signifie que l'onduleur est capable de fournir des tensions égales en valeur moyenne sur une période d'échantillonnage aux tensions de références que si le vecteur formé par ces derniers reste à l'intérieur de l'hexagone montré sur la Figure (IV.5).

IV.4.4 Alimentation de l'onduleur :

Pour l'alimentation de l'onduleur, une source de tension parfaitement lissée de 700V a été utilisée. Cette source peut être, un hacheur à cumulation inductive connecté aux bornes d'un redresseur pour fixer la tension continue à 700 V.

IV.4.5 Filtre de sortie :

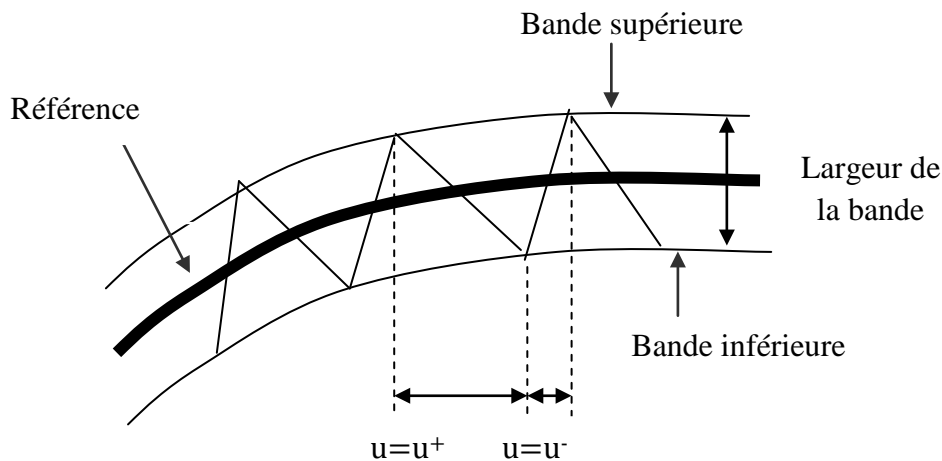
Le filtre de sortie est un filtre passif du premier ordre qui est en réalité une capacité C en série avec une résistance R, employé pour connecter l'onduleur de tension au réseau électrique, son rôle est l'élimination des composantes harmoniques de haute fréquence injectées par le filtre dans le primaire de transformateur d'injection.

IV.5 La Commande de l'Onduleur [27] :

Le but de la commande de l'onduleur est de permettre la meilleure reproduction des tensions de référence souhaité, à travers les ordres de commande appliqués aux divers interrupteurs de puissance. Dans ce cas on utilise la commande par hystérésis.

IV.5.1 Commande par hystérésis :

La commande par hystérésis, appelée aussi commande en tout ou rien, est une commande non Linéaire qui utilise l'erreur existant entre la tension de référence et la tension produite par l'onduleur. L'erreur est comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis. Dès que l'erreur atteint la bande inférieure ou supérieure, un ordre de commande est envoyé de manière à rester à l'intérieur de la bande.



La simplicité de la mise en œuvre, comme le montre la Figure (IV.6), est le principal atout de cette technique. En revanche, les commutations évoluent librement à l'intérieur de la bande d'hystérésis, on ne peut maîtriser correctement le spectre haut fréquence dû aux fréquences de commutations. Afin de résoudre ce problème de la maîtrise des fréquences de commutation et de sa répercussion sur les interrupteurs, une autre stratégie de commande peut être proposée à savoir la commande par hystérésis modulée. Mais dans cette stratégie de commande, il est difficile de définir la largeur de la bande de l'hystérésis. De plus, le fonctionnement avec une fréquence de commutation quasi fixe nous empêche de conserver l'avantage d'une rapidité illimitée obtenue par la commande par hystérésis.

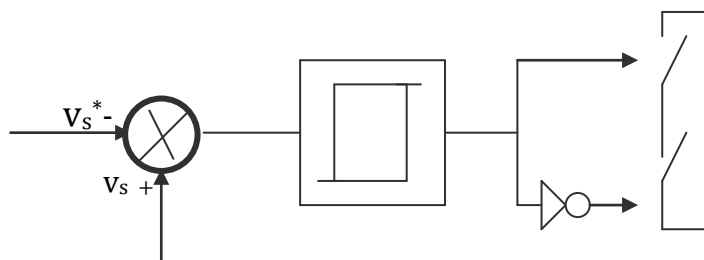


Figure IV.7: Principe de la commande par hystérésis

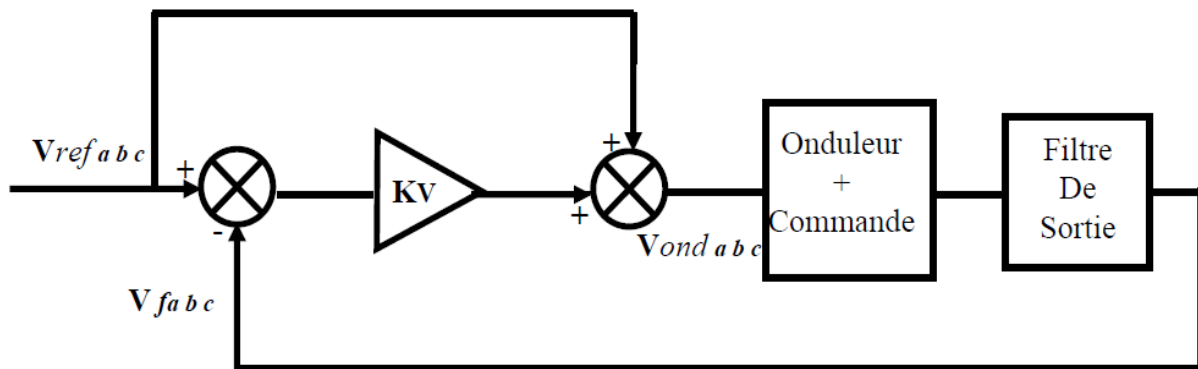


Figure IV.8 : Boucle de régulation de la tension injectée

IV.6 Conclusion :

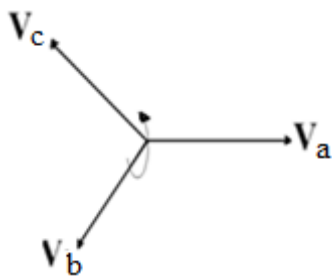
Dans ce chapitre, nous avons présenté et modélisé l'onduleur de tension, servant de filtre actif série, ce convertisseur est très efficace pour réaliser plusieurs fonctions. Il peut fonctionner en onduleur, redresseur, et il est aussi utilisé pour la dépollution des réseaux électriques. Les éléments constituant la structure générale du filtre actif série sont présentés. Elle est faite d'une partie puissance et de la partie commande permettant à l'onduleur de fonctionner en filtre actif. Dans la suite de ce travail, les résultats de simulation du modèle présenté sous l'environnement Matlab/Simulink seront présentés.

Chapitre III Méthodes d'identifications des tensions de référence

Pour un système inverse on passe de la phase 1 aux phases 2 et 3 par un déphasage de $+120^\circ$ et $+240^\circ$. Un système homopolaire est un système sinusoïdal triphasé dans lequel les trois phases sont identiques. Chacun de ces systèmes peut être associé à une représentation vectorielle ou encore à un système de nombres complexes et dans la représentation complexe « a » désigne un nombre complexe particulier, associé à la rotation d'angle 120° .

Avec : $a = e^{j\frac{2\pi}{3}}$

- **Système direct**

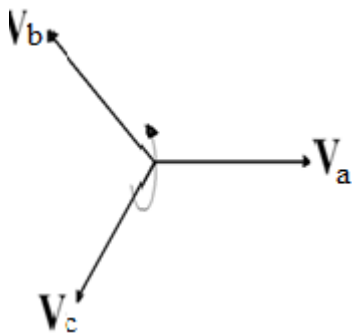


$$\begin{cases} V_a = V_d \\ V_b = a^2 V_d \\ V_c = a V_d \end{cases}$$

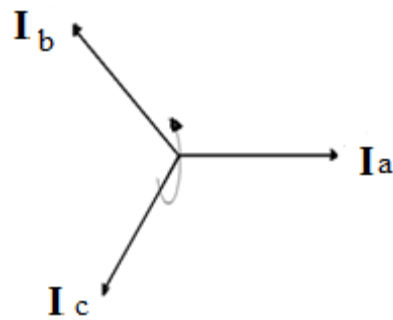


$$\begin{cases} I_a = I_d \\ I_b = a^2 I_d \\ I_c = a I_d \end{cases}$$

- **Système inverse**



$$\begin{cases} V_a = V_i \\ V_b = a V_i \\ V_c = a^2 V_i \end{cases}$$



$$\begin{cases} I_a = I_i \\ I_b = a I_i \\ I_c = a^2 I_i \end{cases}$$

- **Système homopolaire**

Chapitre III Méthodes d'identifications des tensions de référence

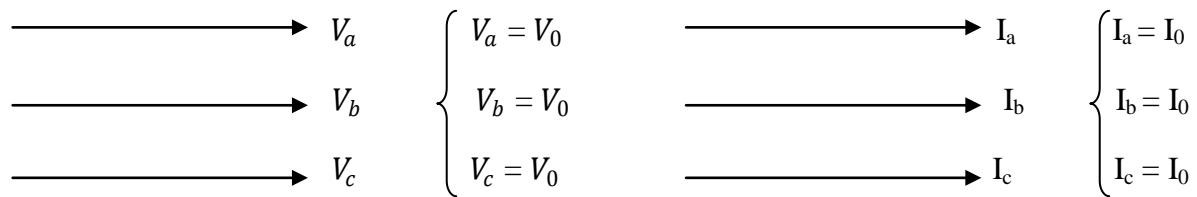


Figure III.1 : Décomposition en composantes symétriques

Étant donnée un système de signaux triphasés sinusoïdaux quelconque représenté par trois nombres complexes (V_a , V_b , V_c et I_a , I_b , I_c), la décomposition en composantes symétriques consiste à trouver un jeu de systèmes direct, inverse et homopolaire (V_d , V_i , V_o , I_d , I_i , I_o), tel que les trois phases (a, b et c) soient les sommes respectives des premières deuxième et troisième sinusoïdes des systèmes direct, inverse et homopolaire ; ce qui peut encore s'exprimer dans le domaine complexe par la relation suivante en notation complexe.

- Pour la tension :

$$V_a = V_d + V_i + V_o \quad (\text{III.1})$$

$$V_b = V_d + a^2 V_i + V_o \quad (\text{III.2})$$

$$V_c = V_d + a V_i + a^2 V_o \quad (\text{III.3})$$

- Pour le courant :

$$I_a = I_d + I_i + I_o \quad (\text{III.4})$$

$$I_b = I_d + a^2 I_i + I_o \quad (\text{III.5})$$

$$I_c = I_d + a I_i + a^2 I_o \quad (\text{III.6})$$

- Ces relations peuvent encore s'exprimer en matrices :

$$\begin{vmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{vmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{pmatrix} \begin{vmatrix} V_o \\ V_d \\ V_i \end{vmatrix} \quad (\text{III.7})$$

- Et :

$$\begin{vmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{vmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{pmatrix} \begin{vmatrix} I_o \\ I_d \\ I_i \end{vmatrix} \quad (\text{III.8})$$

Chapitre III Méthodes d'identifications des tensions de référence

- Et aussi on peut définir (V_d, V_i, V_o et I_d, I_i, I_o) sous cette forme :

$$\begin{vmatrix} V_o \\ V_d \\ V_i \end{vmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{pmatrix} \begin{vmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{vmatrix} \quad (\text{III.9})$$

- Et :

$$\begin{vmatrix} I_o \\ I_d \\ I_i \end{vmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{pmatrix} \begin{vmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{vmatrix} \quad (\text{III.10})$$

- On définit ainsi la matrice de Fortescue F_3 :

$$F_3 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{pmatrix} \quad (\text{III.11})$$

- Et son inverse F_3^{-1} :

$$F_3^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{pmatrix} \quad (\text{III.12})$$

Donc pour obtenir les composantes symétriques on multiplie les composantes réelles du système triphasé par F_3^{-1} et de multiplier les composantes symétriques par F_3 pour obtenir les composantes réelles.

- On résume que :

$$V_{a,b,c} = F_3 \cdot V_{o,d,i} \quad (\text{III.13})$$

$$V_{o,d,i} = F_3^{-1} \cdot V_{a,b,c} \quad (\text{III.14})$$

- Et :

$$I_{a,b,c} = F_3 \cdot I_{o,d,i} \quad (\text{III.15})$$

$$I_{o,d,i} = F_3^{-1} \cdot I_{a,b,c} \quad (\text{III.16})$$

Après la décomposition en composantes symétriques des tensions et des courants, on calcule les tensions de références à partir de la méthode des puissances instantanées.

III.2.3 Méthode des puissances instantanées : [18, 21, 24, 25]

La méthode des puissances instantanées est une méthode temporelle. Elle a été utilisée afin d'éviter les difficultés dues au nombre élevé de calcul lors de la mise en œuvre des méthodes fréquentielles telle que la méthode de Fourier (Transformées de Fourier rapide ou discrète).

Cette méthode a été introduite par H. Akagi. Son principe est basé sur le passage de systèmes triphasés constitués par les tensions simples et les courants de ligne, à un système diphasé (Repère $d - q$) en utilisant la transformation de Park, afin de calculer les puissances réelles et imaginaires instantanées.

La méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées basée essentiellement sur le principe de la puissance active $p(t)$ et réactive $q(t)$ instantanées pour la détermination de la tension fondamentale v_f et la tension harmonique v_h d'une tension de réseau perturbé, elle utilise la transformation de d-q

- En présence des harmoniques, la puissance apparente est composée de trois parties : active (P), réactive (Q) et déformante (D), comme le montre la relation suivante :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (\text{III.17})$$

- Dans le repère (a, b, c) les puissances active et réactive instantanées $p(t)$ et $q(t)$ sont données par :

$$p(t) = V_a * I_a + V_b * I_b + V_c * I_c \quad (\text{III.18})$$

$$q(t) = \frac{1}{\sqrt{3}} [(V_a - V_b) * I_c + (V_b - V_c) * I_a + (V_c - V_a) * I_b] \quad (\text{III.19})$$

- Pour définir les puissances instantanées active et réactive $p(t)$ et $q(t)$ on note respectivement :

$$(V) = \begin{pmatrix} V_d \\ V_i \\ V_o \end{pmatrix} \quad (\text{III.20})$$

$$(I) = \begin{pmatrix} I_d \\ I_i \\ I_o \end{pmatrix} \quad (\text{III.21})$$

Avec :

Chapitre III Méthodes d'identifications des tensions de référence

(V_d, V_i, V_o) , (I_d, I_i, I_o) : Les tensions et les courants symétriques.

Si on note (V_d, V_q, V_o) et (I_d, I_q, I_o) les composantes orthogonales du repère dq associées respectivement aux tensions (V_d, V_i, V_o) et aux courants (I_d, I_i, I_o) , les valeurs de (V_d, V_q, V_o) Et (I_d, I_q, I_o) seront données par les expressions suivantes :

- La relation des tensions

$$\begin{pmatrix} V_d \\ V_q \\ V_o \end{pmatrix} = P(\theta) \begin{pmatrix} V_d \\ V_i \\ V_o \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \sin\theta & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_d \\ V_i \\ V_o \end{pmatrix} \quad (\text{III.22})$$

- La relation des courants :

$$\begin{pmatrix} I_d \\ I_q \\ I_o \end{pmatrix} = P(\theta) \begin{pmatrix} I_d \\ I_i \\ I_o \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \sin\theta & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_d \\ I_i \\ I_o \end{pmatrix} \quad (\text{III.23})$$

On peut décomposer les tensions (V_d, V_q) et les courants (I_d, I_q) en deux termes, les composantes fondamentales et harmoniques. Les harmoniques se comportent comme une composante alternative et les termes fondamentaux se comportent comme une composante continue, donc on peut écrire :

$$\begin{pmatrix} V_d \\ V_q \\ V_o \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{V}_d + \tilde{V}_d \\ \bar{V}_q + \tilde{V}_q \\ V_o \end{pmatrix} \quad (\text{III.24})$$

Et :

$$\begin{pmatrix} I_d \\ I_q \\ I_o \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{I}_d + \tilde{I}_d \\ \bar{I}_q + \tilde{I}_q \\ I_o \end{pmatrix} \quad (\text{III.25})$$

Avec :

\bar{V}_d Et \bar{V}_q : composante fondamentale (continue) de la tension dans le repère dq.

Chapitre III Méthodes d'identifications des tensions de référence

\tilde{V}_d Et \tilde{V}_q : composante harmonique (alternative) de la tension dans le repère dq.

\bar{I}_d Et \bar{I}_q : composante fondamentale (continue) de courant dans le repère dq.

\tilde{I}_d Et \tilde{I}_q : composante harmonique (alternative) de courant dans le repère dq.

Les composantes ayant l'indice (o) représentent les composantes homopolaires du système triphasé du courant et de la tension.

A partir des équations (III.22) et (III.23), on calcule les puissances actives p , réactives q et la puissance homolaire p_o elles sont données par la relation suivante :

$$\begin{pmatrix} p \\ q \\ p_o \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_d & V_q & 0 \\ -V_q & V_d & 0 \\ 0 & 0 & V_o \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_d \\ I_q \\ I_o \end{pmatrix} \quad (\text{III.26})$$

Dans le repère (d q) on peut écrire les puissances réelles et imaginaires sous la forme suivante :

$$P = V_d * I_d + V_q * I_q + V_o * I_o \quad (\text{III.27})$$

$$P = P_a + P_o \quad (\text{III.28})$$

$$P_a = V_d * I_d + V_q * I_q \quad (\text{III.29})$$

$$P_o = V_o * I_o \quad (\text{III.29})$$

$$Q = V_d * I_q - V_q * I_d \quad (\text{III.30})$$

III.2.3.1 Séparation des puissances perturbatrices :

Après avoir identifié les pulsations des puissances instantanées, le filtre de puissance chargé d'isoler les puissances active et réactive conventionnelles peut être dimensionné. Un circuit constitué d'un filtre passe haut avec un soustracteur peut être employé, comme le présente la Figure (III.2)

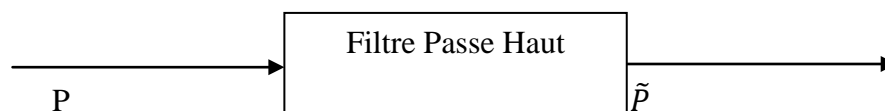


Figure III.2: Schéma de principe du filtre utilisé pour l'extraction des composantes harmoniques

Chapitre III Méthodes d'identifications des tensions de référence

L'ordre de ce filtre passe-haut définit la dynamique et l'efficacité de la méthode d'identification. Des filtres de puissance du quatrième ou cinquième ordre ont été proposés. Dans notre étude, nous avons choisi un filtre passe-haut du deuxième ordre en vue de simplifier l'approche d'implantation numérique de ce dernier. En effet, un ordre plus élevé entraînerait des temps de calcul plus longs, ce qui peut être préjudiciable dans notre étude.

La fréquence de coupure, $f_0=2f$ est choisie pour que le filtre de puissance puisse bloquer toute composante perturbatrice des puissances instantanées. Elle doit permettre aussi le passage des composantes harmoniques représentant les puissances actives et réactives à la fréquence harmonique.

Donc on peut décomposer les puissances instantanées p et q en deux composantes, les composantes continues liées au fondamental (\bar{p} et \bar{q}) et les composantes alternatives liées aux harmoniques (\tilde{p} et \tilde{q}), comme suit :

$$P = \bar{p} + \tilde{p} \quad (\text{III.31})$$

$$q = \bar{q} + \tilde{q} \quad (\text{III.32})$$

$$P_0 = \bar{P}_0 \quad (\text{III.33})$$

\bar{p} : est une puissance continue liée à la composante fondamentale active de la tension de source

\bar{q} : est une puissance continue liée à la composante fondamentale réactive de la tension de source

\tilde{p} Et \tilde{q} sont des puissances alternatives liées à la somme des composantes harmonique de la tension de source.

\bar{P}_0 : est une puissance continue homopolaire.

III.2.3.2 Identification des tensions de références :

Après le filtrage des puissances instantanées active et réactive, on peut écrire (V_{hd} , V_{hq}) en fonction de \tilde{p} et de \tilde{q} :

$$\begin{pmatrix} V_{hd} \\ V_{hq} \end{pmatrix} = \frac{1}{I_d^2 + I_q^2} \begin{pmatrix} I_d & I_q \\ I_q & -I_d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{p} - \bar{p}_0 \\ \tilde{q} \end{pmatrix} \quad (\text{III.34})$$

Avec :

V_{hd} , V_{hq} : Les tensions harmonique dans le repaire dq.

La transformation inverse de Park permet le calcul des tensions de références

Chapitre III Méthodes d'identifications des tensions de référence

$$\begin{pmatrix} V_{ref_a} \\ V_{ref_b} \\ V_{ref_c} \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{hd} \\ V_{hq} \\ V_0 \end{pmatrix} \quad (III.35)$$

$$V_{ref_a} = \sqrt{\frac{2}{3}} (\cos\theta V_d + \sin\theta V_q) \quad (III.36)$$

$$V_{ref_b} = \sqrt{\frac{2}{3}} (\cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) V_d + \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) V_q) \quad (III.37)$$

$$V_{ref_c} = \sqrt{\frac{2}{3}} (\cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) V_d + \sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) V_q) \quad (III.38)$$

$(V_{ref_a}, V_{ref_b}, V_{ref_c})$: Les tensions harmoniques références.

III.2.3.3 Algorithme d'identification :

La méthode que nous avons expliquée si dessus, peut être résumée par la figure (III.3) et la figure (III.4) qu'ils illustrent les différentes étapes qui nous permettent d'obtenir les valeurs des tensions de références.

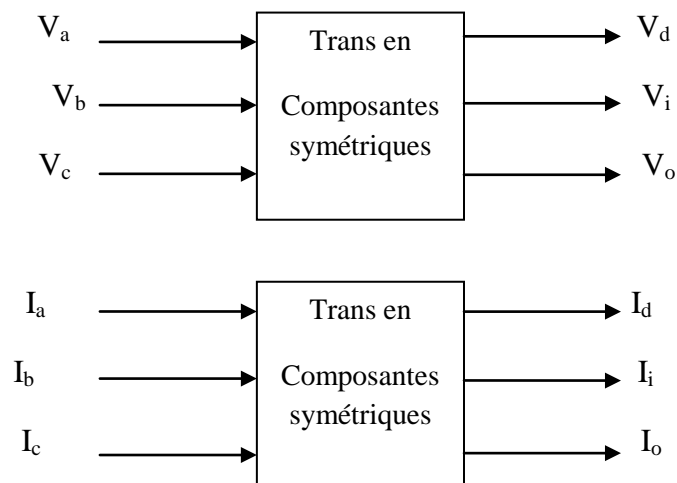


Figure III.3 : Méthode d'extraction des composantes symétriques

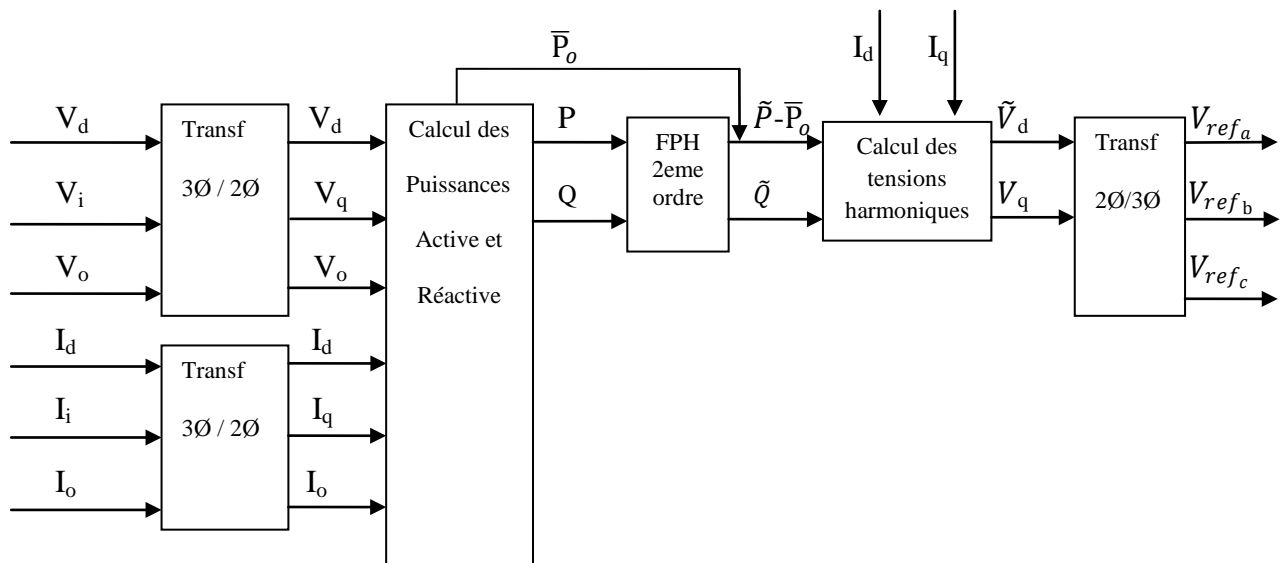


Figure III.4: Méthode pq d'extraction des tensions de référence

III.3 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons vu, en premier la méthode des composantes symétriques, ensuite nous avons présenté la méthode d'identification la plus utilisée est celle appelée méthode des puissances réelles, imaginaires instantanées et les puissances homopolaires. Cette méthode offre l'avantage de choisir la perturbation à compenser avec précision, rapidité et facilité d'implantation. Pour toutes ces raisons nous avons retenu cette méthode d'identification pour le reste de notre étude.

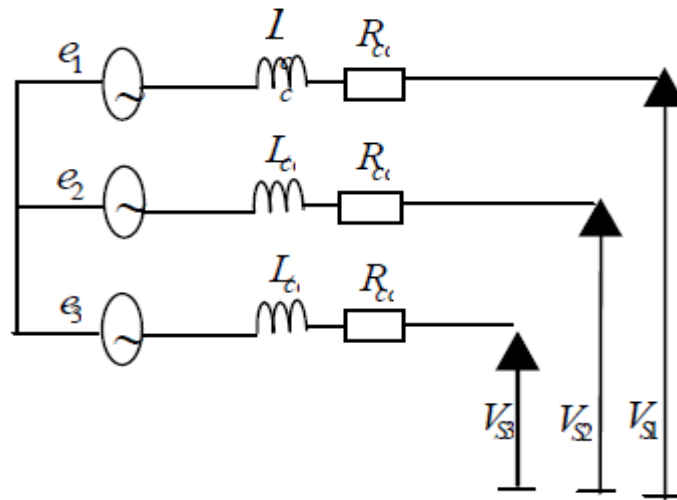


Figure II.1 : Schéma simplifié d'un réseau électrique

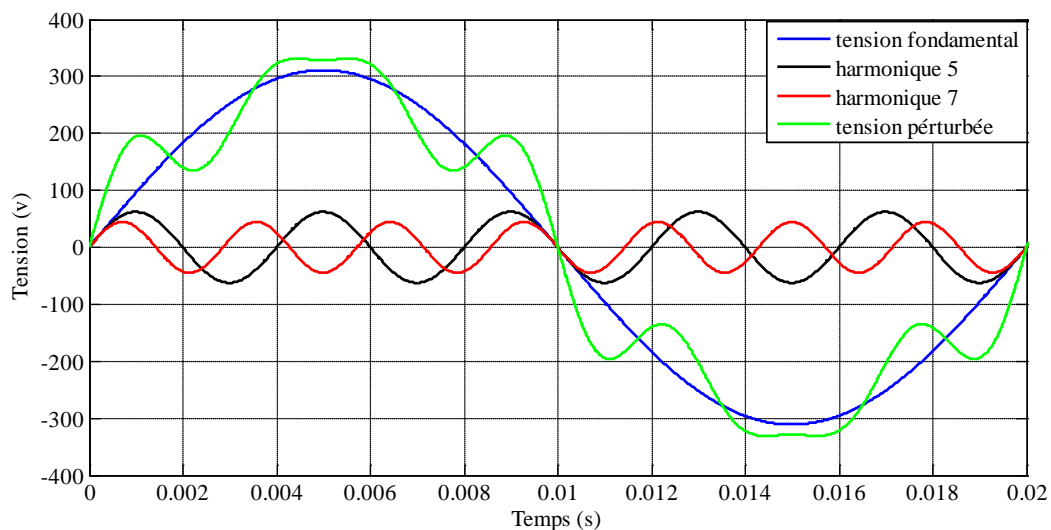


Figure II.2 : la déformation d'une tension de réseau électrique.

II.3 Modélisation de la charge polluante :[18,19,20]

Nous avons pris comme charge polluante un redresseur triphasé à base de thyristors avec une structure en pont de Graëtz. Ce dernier alimente une charge RLE.

II.3.1 Modélisation du redresseur à thyristors :

Les montages redresseurs, sont les convertisseurs de l'électronique les plus nombreux à être en contact avec le réseau. Ils assurent directement la conversion alternatif-continu, alimentés par une source de tension alternative, ils permettent d'alimenter en courant continu le récepteur branché à leur sortie. On utilise un redresseur chaque fois que l'on a besoin de

tensions continues, car l'énergie électrique est disponible en alternatif. Les redresseurs ont un très vaste domaine d'application. Les redresseurs à diode non contrôlés, ne permettent pas de faire varier la tension moyenne qu'ils délivrent. Cette tension est toujours imposée par la valeur efficace de ses tensions d'alimentation, c'est-à-dire du réseau, de plus ils sont irréversibles. Les redresseurs à thyristors, ou redresseur contrôlés permettent pour une tension alternative d'entrée fixée, de faire varier la tension continue de sortie, grâce au retard à l'amorçage des thyristors.

Le montage est constitué essentiellement d'un pont triphasé appelé « pont Graëtz ». Le pont de Graëtz est constitué de l'association en série, de deux montages redresseurs simple alternance triphasés, l'un à cathode commune, l'autre à anode commune, alimentés par les mêmes enroulements secondaires d'un transformateur.

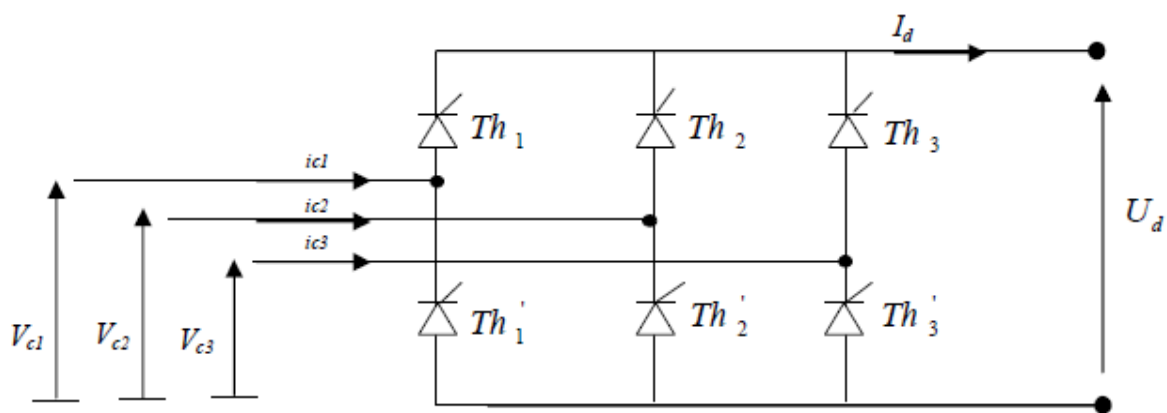


Figure II.3 : Schéma d'un redresseur triphasé à thyristor

II.3.1.1 Fonctionnement :

Le redresseur en pont de Graëtz II comprend trois branches, qui possèdent chacune deux thyristors en série. Entre ces deux thyristors on connecte une phase d'alimentation. La cathode des thyristors supérieurs T_1 , T_2 , T_3 sont reliées en formant la borne positive de la tension continue « le point Cathodes commune ». La borne négative à la connexion des anodes des thyristors inférieurs T'_1 , T'_2 , T'_3 « le point anodes commune ».

Le redresseur en pont présente un problème de démarrage, les impulsions d'amorçage sur les gâchettes sont fournies dans la bonne séquence aux thyristors du redresseur en pont, raccordé au réseau, mais si une seule impulsion d'amorçage est utilisée, aucun courant ne circule parce que l'autre thyristor sur le chemin du courant est bloqué. Donc pour démarrer un redresseur en pont, c'est-à-dire faire apparaître un courant de charge, il faut amorcer deux thyristors simultanément.

Lorsque la tension V_{S1} passe par sa valeur crête l'impulsion d'amorçage suivante ira au thyristor T'_3 . Mais le thyristor T'_3 conduira pas à moins que le thyristor T_1 ne soit amorcé en même temps, puisque selon les formes d'ondes, ces deux thyristors conduisent à cet instant.

II.3.1.2 Etude du fonctionnement ($\alpha = \frac{\pi}{3}$) :

Tableau: II.1 Ce tableau donne les intervalles de conductions des thyristors :

| Intervalles de conductions | T_1 | T_2 | T_3 | T'_1 | T'_2 | T'_3 | V_A | V_K | V_C |
|--|-------|-------|-------|--------|--------|--------|----------|----------|----------------------------|
| $[0, \alpha_0]$ | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | V_{S3} | V_{S1} | $V_{S3} - V_{S1} = U_{31}$ |
| $[\alpha_0, \alpha_0 + \alpha]$ | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | V_{S3} | V_{S2} | $V_{S3} - V_{S2} = U_{32}$ |
| $[\alpha_0 + \alpha, \alpha_0 + \alpha + \frac{\pi}{3}]$ | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | V_{S1} | V_{S2} | $V_{S1} - V_{S2} = U_{12}$ |
| $[\alpha_0 + \alpha + \frac{\pi}{3}, \alpha_0 + \alpha + \frac{2\pi}{3}]$ | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | V_{S1} | V_{S3} | $V_{S1} - V_{S3} = U_{13}$ |
| $[\alpha_0 + \alpha + \frac{2\pi}{3}, \alpha_0 + \alpha + \pi]$ | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | V_{S2} | V_{S3} | $V_{S2} - V_{S3} = U_{23}$ |
| $[\alpha_0 + \alpha + \pi, \alpha_0 + \alpha + \frac{4\pi}{3}]$ | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | V_{S2} | V_{S1} | $V_{S2} - V_{S1} = U_{21}$ |
| $[\alpha_0 + \alpha + \frac{4\pi}{3}, \alpha_0 + \alpha + \frac{5\pi}{3}]$ | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | V_{S3} | V_{S1} | $V_{S3} - V_{S1} = U_{31}$ |
| $[\alpha_0 + \alpha + \frac{5\pi}{3}, \alpha_0 + \alpha + 2\pi]$ | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | V_{S3} | V_{S2} | $V_{S3} - V_{S2} = U_{32}$ |

➤ **Etude des tensions et des courants**

Dans cette partie on considère que le réseau à une impédance quelconque, ce qui nous conduit à négliger les impédances ramenées au secondaire du transformateur, de plus les chutes de tension au bornes des thyristors est nulle, c'est-à-dire des interrupteurs parfaits.

Etude des tensions :

- **Tension redressée :** La tension redressée est périodique, de période $(\frac{T}{6} = \frac{\pi}{3})$.
- La valeur moyenne redressée est :

$$V_{c_{moy}} = \frac{1}{T} \int_0^T v_c(t) dt \tag{II.8}$$

Avec le changement de variable $\theta = \omega t$

On aura :

$$V_{C_{moy}} = \frac{3}{\pi} \int_{\alpha_0+\alpha}^{\alpha_0+\alpha+\frac{\pi}{3}} V_{eff} \sqrt{2}\sqrt{3} \sin(\theta + \alpha_0) d\theta \quad (II.9)$$

$$V_{C_{moy}} = \frac{3V_{eff} \sqrt{2}\sqrt{3}}{\pi} \cos \alpha \quad (II.10)$$

• **Facteur d'ondulation :**

$$K = \frac{\Delta V_C}{V_{C_{moy}}} = \frac{V_{C_{max}} - V_{C_{min}}}{V_{C_{moy}}} = \frac{V_{C_{max}} - V_{C_{min}}}{\frac{3V_{eff} \sqrt{2}\sqrt{3}}{\pi} \cos \alpha} \quad (II.13)$$

Il quantifie la variation de la tension redressée autour de sa valeur moyenne. Il est inversement proportionnel au $|\cos \alpha|$. C'est un coefficient qui nous informe sur la qualité de la tension continue, par conséquent sur les filtres à ajouter pour avoir des tensions continues qui respectent les normes.

• **Facteur de forme :**

$$F = \frac{V_{C_{eff}}}{V_{C_{moy}}} = \frac{V_{eff} \sqrt{2}\sqrt{3} \left[\frac{3}{\pi} \int_{\alpha_0+\alpha}^{\alpha_0+\alpha+\frac{\pi}{3}} \sin(\theta + \alpha_0)^2 d\theta \right]^{\frac{1}{2}}}{\frac{3V_{eff} \sqrt{2}\sqrt{3}}{\pi} \cos \alpha} \quad (II.14)$$

Etude des courants :

La charge est de type courant continu, donc il doit être le moins ondulé possible, ce qui nous ramène à considérer un courant parfaitement lissé.

• **Courant moyenne dans la charge :**

$$I_{C_{moy}} = \frac{1}{T} \int_0^T i_c(t) dt = I_c \quad (II.15)$$

- Bilan des puissances :

- Puissance active :

$$P(\theta) = \frac{3}{\pi} \int_{\frac{\pi}{6} + \alpha}^{\frac{\pi}{2} + \alpha} v_c(\theta) I_C d\theta = \frac{3I_C}{\pi} \int_{\frac{\pi}{6} + \alpha}^{\frac{\pi}{2} + \alpha} v_c(\theta) d\theta = I_C V_{C_{moy}} \quad (\text{II.16})$$

$$P(\theta) = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} I_C \cos \alpha \quad (\text{II.17})$$

- Puissance réactive :

$$Q = P \tan \varphi = \frac{3V_{eff} \sqrt{2} \sqrt{3} I_C}{\pi} \cos \alpha \tan \alpha \quad (\text{II.18})$$

- Puissance apparente :

$$S = 3V_{S_{eff}} I_{S_{eff}} = \frac{3V_m \sqrt{2}}{\sqrt{2}} I_C = V_m \sqrt{3} I_C \quad (\text{II.19})$$

- Puissance déformante :

$$D = [S^2 - P^2 - Q^2]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{II.20})$$

- Facteur de puissance :

$$F_S = \frac{P_a}{S} = \frac{\frac{3V_{eff} \sqrt{2} \sqrt{3} I_C}{\pi} \cos \alpha}{V_{eff} I_C \sqrt{2}} = \frac{3}{\pi} \cos \alpha \quad (\text{II.21})$$

II.3.1.3 Etude en tenant compte du phénomène d'empiètement :

Généralement l'inductance des connexions entre les éléments redresseurs peut être négligée, c'est seulement pour les installations à tension élevée, où les longueurs de connexions sont importantes qu'il faut tenir compte de cette inductance additive. Toutefois pour réduire les

harmoniques de courant dans les réseaux, on est amené à rajouter des filtres de nature inductive en série avec les enroulements du transformateur d'isolement. Ces inductances retardent la commutation du courant d'un élément redresseur (thyristor) à un autre, en empêchant les commutations des courants d'être instantanées. Le fait que la commutation du courant ne soit pas instantanée entraîne un effet que l'on représente par une chute de tension, c'est le phénomène d'empiètement. En plus ce phénomène entraîne une déformation de la tension du réseau via les impédances de ce dernier.

Nous allons raisonner dans le cas particulier d'un redresseur triphasé simple alternance à thyristors dans lequel on tient compte des inductances de la source, il faut respecter deux hypothèses :

- Un courant de charge parfaitement lissé ;
- Un système de tension équilibré.

Lors de la commutation du thyristor T_1 au thyristor T_2 , si on considère que le courant ne commute pas instantanément, il y aura un intervalle de temps pendant lequel deux thyristors seront en conduction. La durée de cet intervalle de temps sera notée μ appelée angle d'empiètement.

On a :

$$\triangleright V_a = V\sqrt{2} \sin(\theta) \quad (\text{II.22})$$

$$\triangleright V_b = V\sqrt{2} \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (\text{II.23})$$

$$\triangleright V_c = V\sqrt{2} \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (\text{II.24})$$

On calcul :

- **Chute de la tension due à l'empiètement :**

Etape initiale : T_1 conduit seul :

$$\alpha + \frac{\pi}{6} < \theta < \alpha + \frac{\pi}{6} + \frac{2\pi}{3}$$

$$i_{s1} = I_c \quad (\text{II.25})$$

$$L_s \omega \frac{di_{s1}}{d\theta} = 0 \implies V_c = V_{s1} \quad (\text{II.26})$$

Etape finale: T_2 conduit seul :

$$\alpha + \frac{\pi}{6} + \frac{2\pi}{3} < \theta < \alpha + \frac{\pi}{6} + \frac{4\pi}{3}$$

$$i_{s2} = I_c \quad (II.27)$$

$$L_s \omega \frac{di_{s2}}{d\theta} = 0 \Rightarrow V_c = V_{s2} \quad (II.28)$$

Etape intermédiaire : T₁ et T₂ conduisent simultanément :

$$\alpha + \frac{\pi}{6} + \frac{2\pi}{3} < \theta < \alpha + \frac{\pi}{6} + \frac{4\pi}{3} + \mu$$

$$i_{s1} + i_{s2} = I_c \quad (II.29)$$

On a :

$$V_{s1} - L_s \omega \frac{di_{s1}}{d\theta} = V_c \quad (II.30)$$

$$V_{s2} - L_s \omega \frac{di_{s2}}{d\theta} = V_c \quad (II.31)$$

$$i_1 + i_{s2} = I_c \Rightarrow \frac{d(i_{s1} + i_{s2})}{d\theta} = 0 \quad (II.32)$$

• **Chute de tension instantanée due à l'empiétement :**

$$\Delta_3 V_{emp} = L_s \omega \frac{di_{s2}}{d\theta} \quad (II.33)$$

$$\text{On a: } 2L_s \omega \frac{di_{s2}}{d\theta} = V_{s2} - V_{s1} \text{ et } L_s \omega \frac{di_{s2}}{d\theta} = \Delta_3 V_{emp} \quad (II.34)$$

$$\text{Donc : } \Delta_3 V_{emp} = \frac{V_{s2} - V_{s1}}{2} \quad (II.35)$$

Le résultat donné par l'équation (II.35) représente la chute de tension instantanée durant l'intervalle de commutation où d'empiétement.

• **Chute de tension moyenne due à l'empiétement :**

$$U_{c_{moy}} = \frac{1}{T} \int_{\alpha}^{\alpha+T} (V_{s1} - V_{s3}) dt - \frac{1}{T} \int_{\alpha}^{\alpha+T} L \left(\frac{di_{s1}}{dt} - \frac{di_{s3}}{dt} \right) dt - \frac{1}{T} \int_0^T R (i_{s1} - i_{s3}) dt - \frac{1}{T} \int_0^T 2V_{T1} dt = \frac{1}{T} \int_{\alpha}^{\alpha+T} L \omega \frac{di_s}{dt} dt = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+\frac{\pi}{3}} L \omega di_s \quad (II.36)$$

$$U_{c_{moy}} = \frac{3L\omega I_c}{\pi} \quad (II.37)$$

- **Forme du courant i_{s1} et i_{s2} :**

$$(II.30)-(II.31): V_{s1} - V_{s2} - L_s \omega \frac{di_{s1}}{d\theta} + L_s \omega \frac{di_{s2}}{d\theta} = 0 \tag{II.38}$$

$$(II.32) \leftrightarrow \frac{di_{s1}}{d\theta} + \frac{di_{s2}}{d\theta} = 0$$

$$(I_c \text{ Parfaitement lissé}), \frac{di_{s1}}{d\theta} = -\frac{di_{s2}}{d\theta} \tag{II.39}$$

$$-V_{s1} + V_{s2} - 2L_s \omega \frac{di_{s2}}{d\theta} = 0 \rightarrow \frac{di_{s2}}{d\theta} = \frac{V_{s2} - V_{s1}}{2L_s \omega} \tag{II.40}$$

L'équation (II.40) représente la dérivée du courant de la phase (1) durant la commutation du thyristor T_1 et T_2

II.3.2 Simulation :

Afin de généraliser l'étude d'un redresseur triphasé en pont de Graëtz, et observer l'évolution de toutes les grandeurs électriques, ainsi que leur qualité spectrales, un programme de simulation sous Matlab/simulation a été réalisé. Ce programme nous permet aussi d'observer et d'analyser l'impact des paramètres du réseau sur la qualité du redressement et du redresseur sur le réseau.

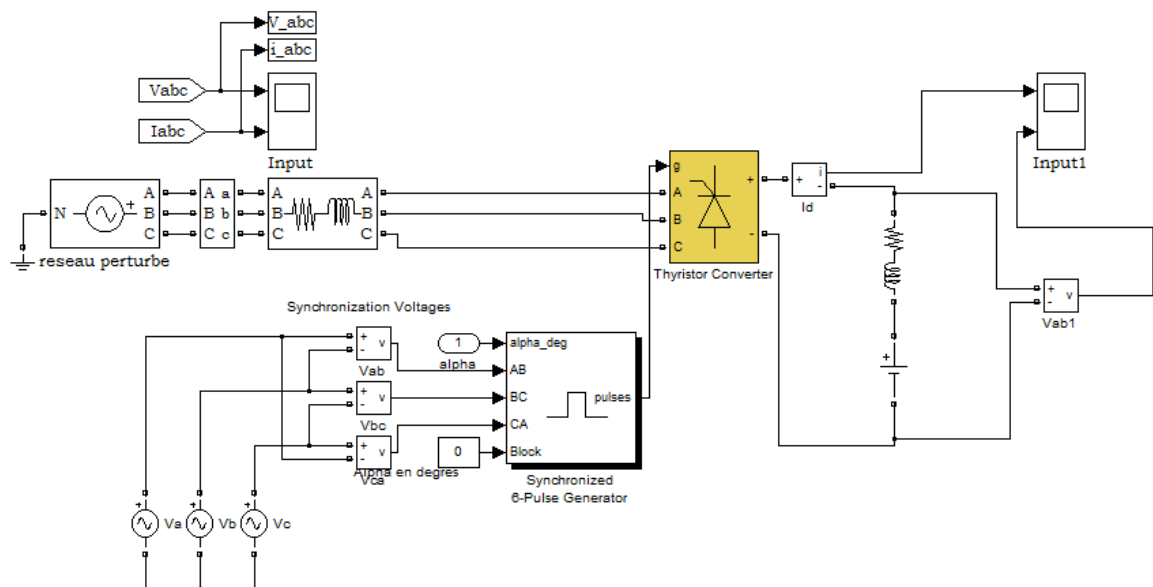


Figure II.4 : Schéma de simulation du redresseur sous Simulink

Après simulation de se redresseur, et en considérant le phénomène d’empiétement, nous avons obtenu les résultats suivant :

- **Test 1 :** Ce test est réalisé avec un réseau triphasé équilibré, toute fois un filtre inductif a été rajouté à l’entrée du redresseur, pour améliorer la qualité des courants que le réseau doit fournir. Les tensions étant de nature alternative sinusoïdale, idéalement les courants doivent avoir les mêmes formes.

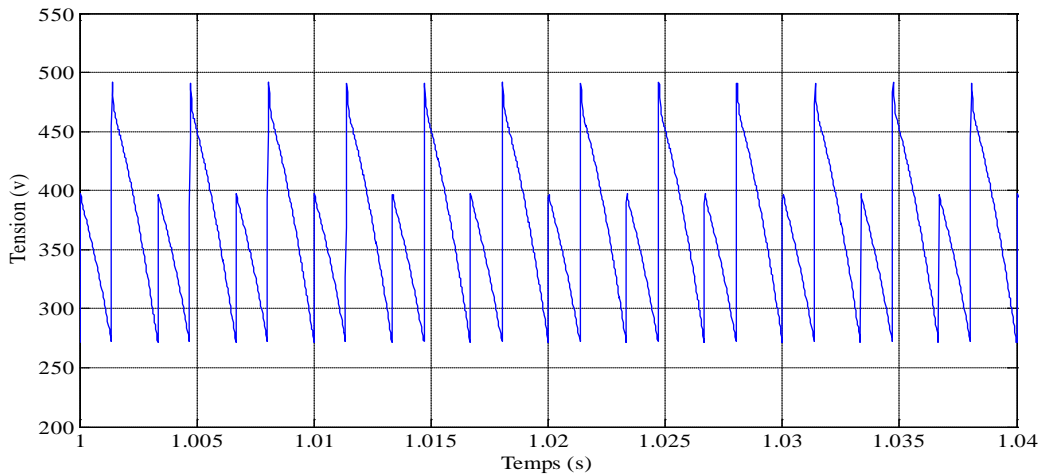


Figure II.5 : Allure de la tension redressée

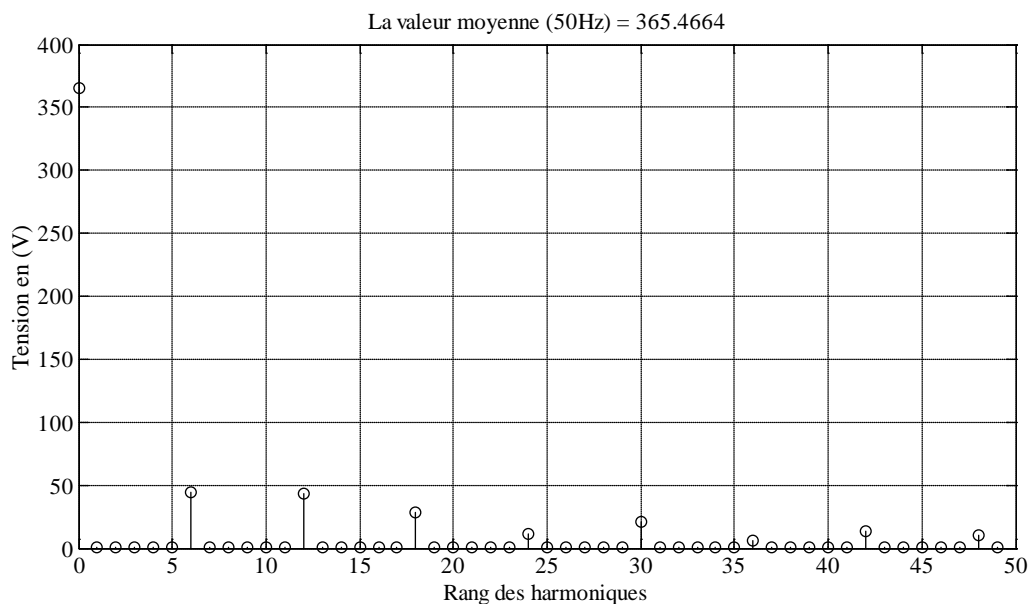


Figure II.6 : Analyse spectrale de la tension redressée

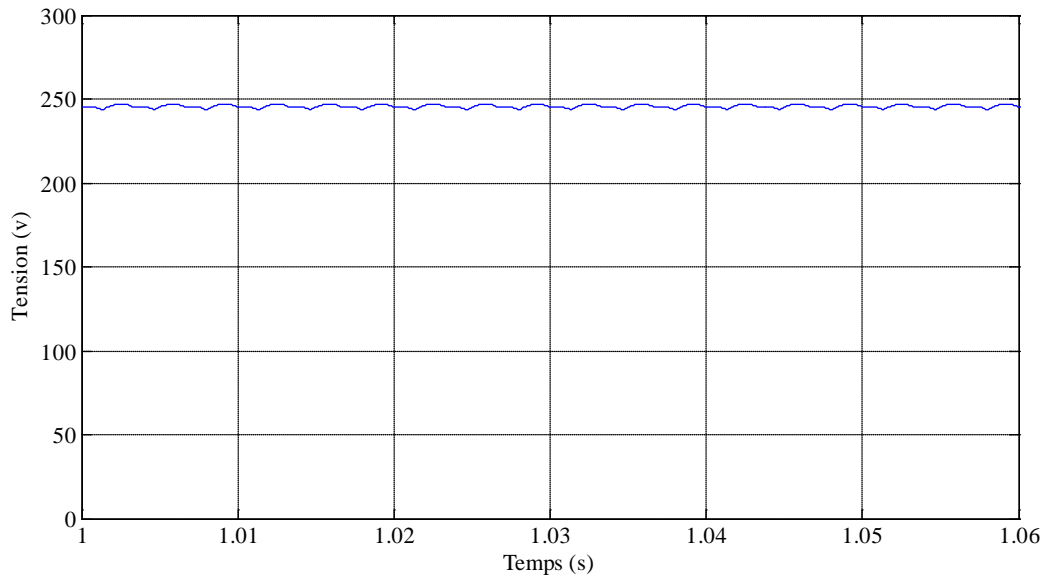


Figure II.7 : Allure du courant de charge redressé

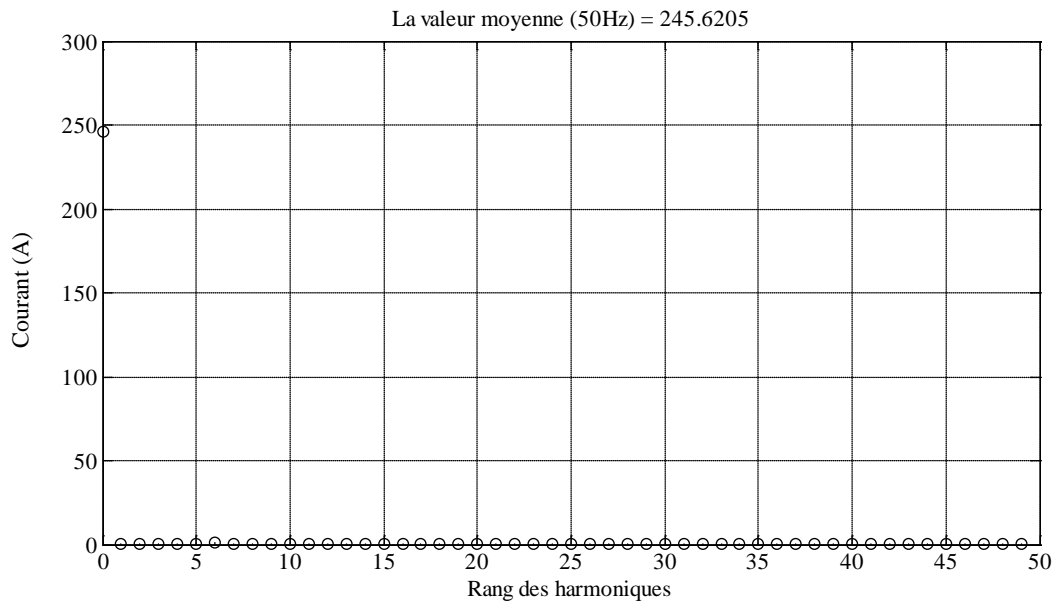


Figure II.8 : Analyse spectrale du courant redressé

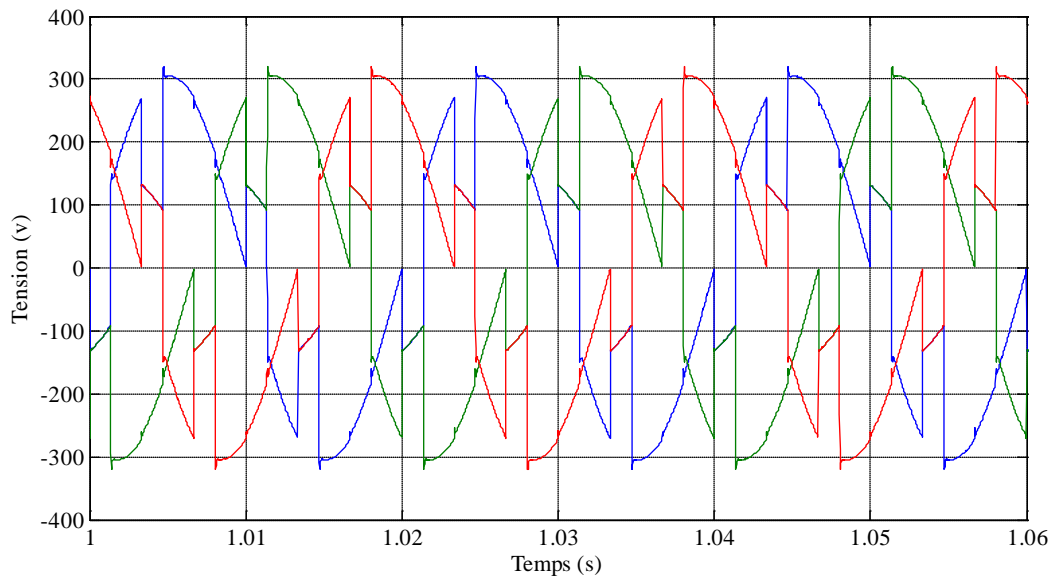


Figure II.9 : Allure des tensions à l'entrée du redresseur

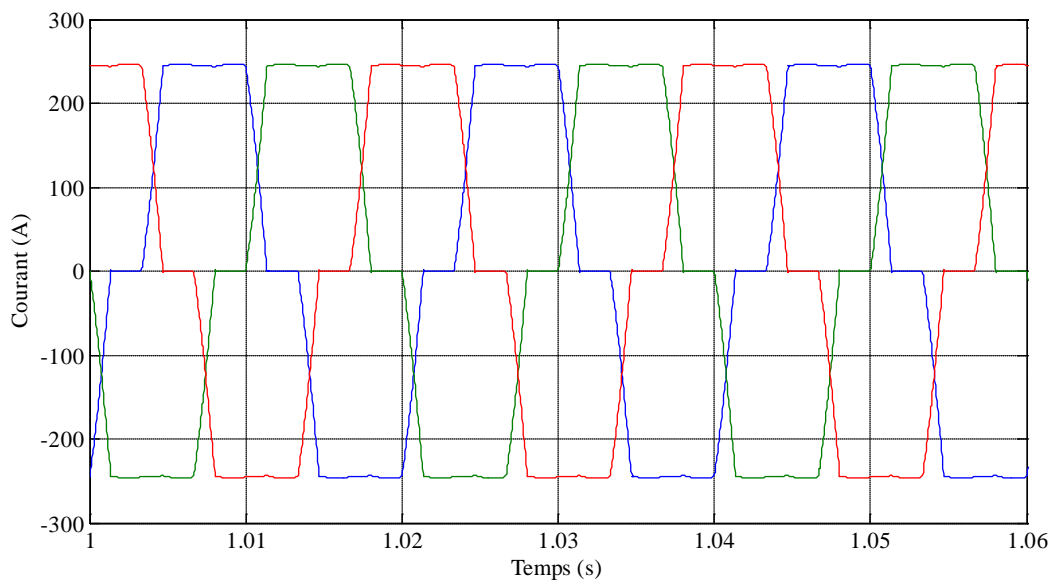


Figure II.10 : Allure des courants à l'entrée du redresseur

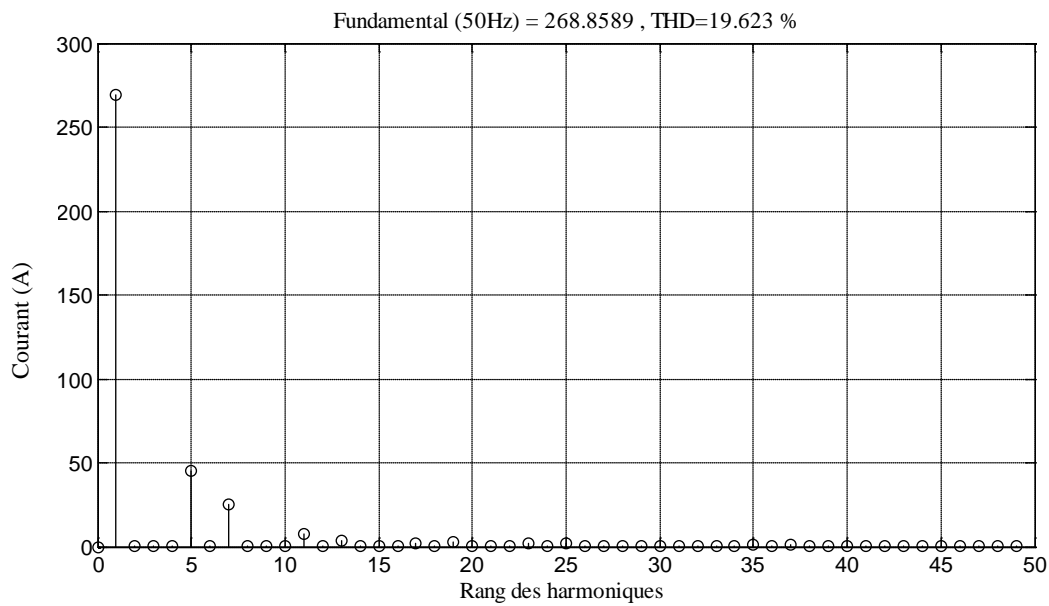


Figure II.11 : Analyse spectral des courants à l'entrée du redresseur

- **Test 2 :** Ce test est réalisé avec un réseau, tel que sur l'une des phases une chute de tension de 50% est survenue, le but est de constater les conséquences sur le comportement et les performances du redresseur.

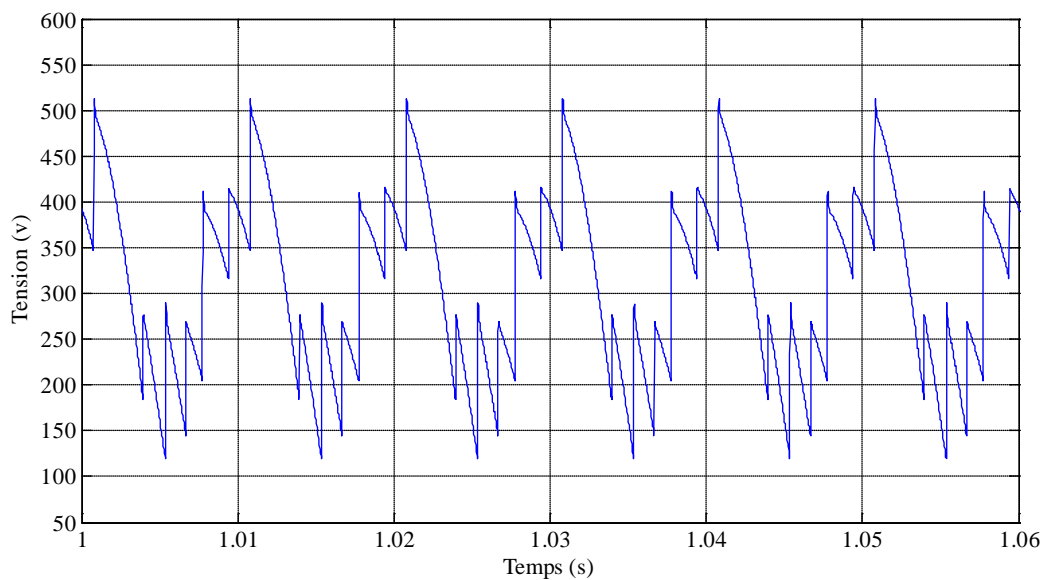


Figure II.12 : Allure de la tension redressée

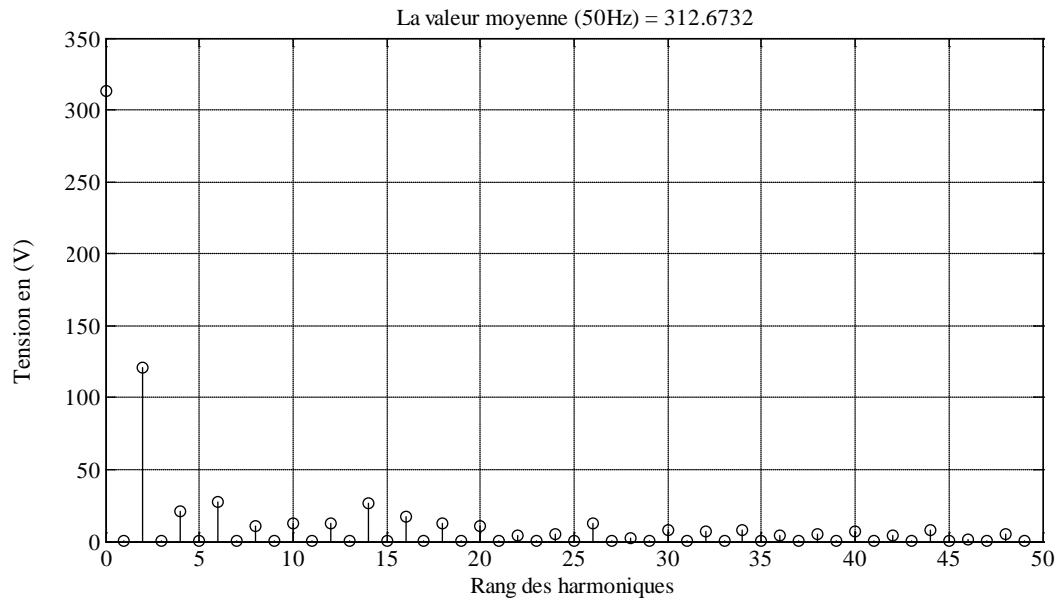


Figure II.13 : Analyse spectral de la tension redressée

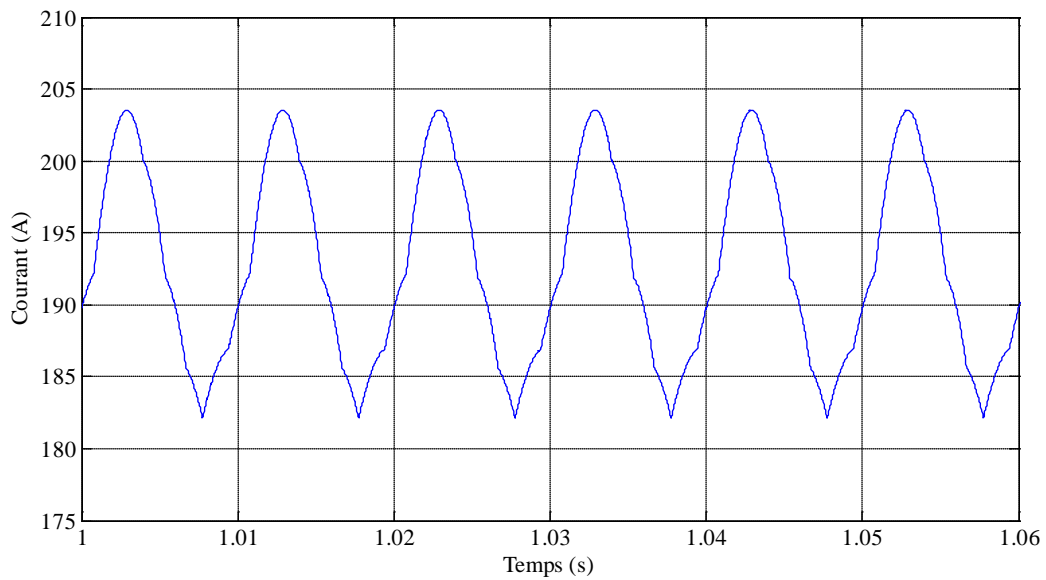


Figure II.14: Allure du courant redressé

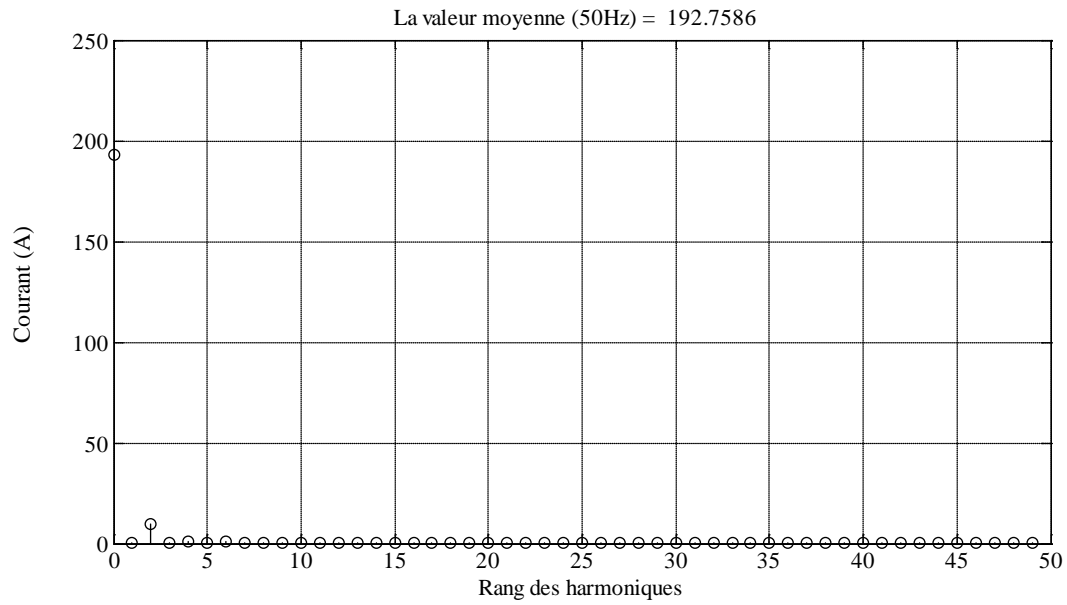


Figure II.15 : Analyse spectrale du courant redressé

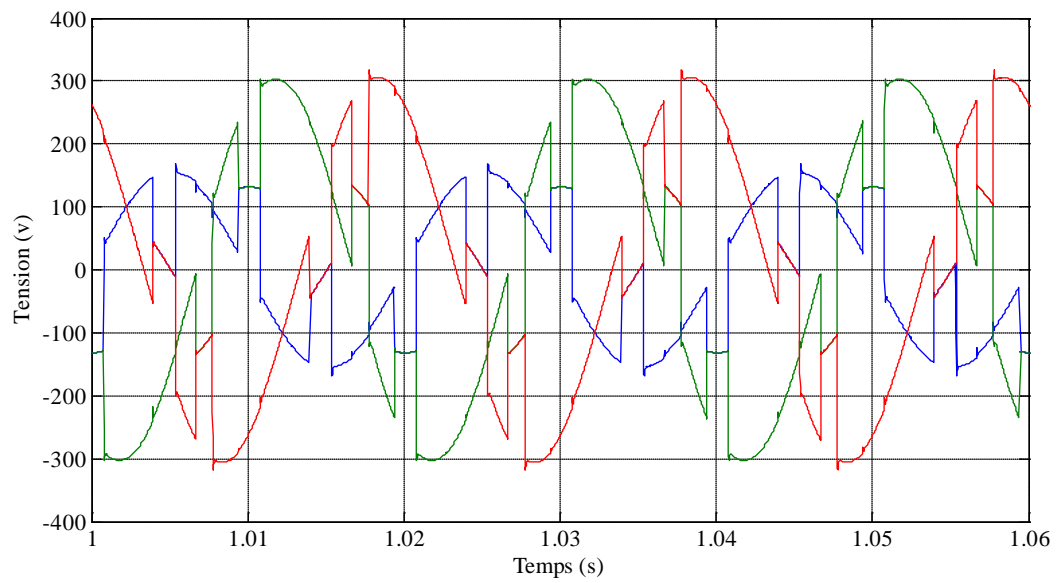


Figure II.16 : Allure des tensions à l'entrée du redresseur

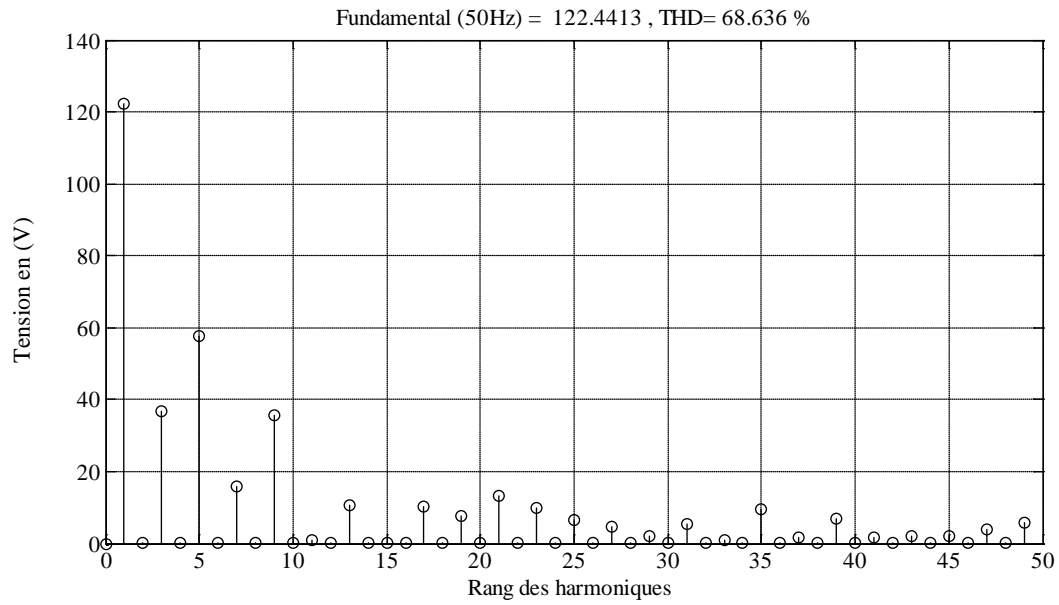


Figure II.17 : Analyse spectrale de la tension aux bornes de la phase perturbée

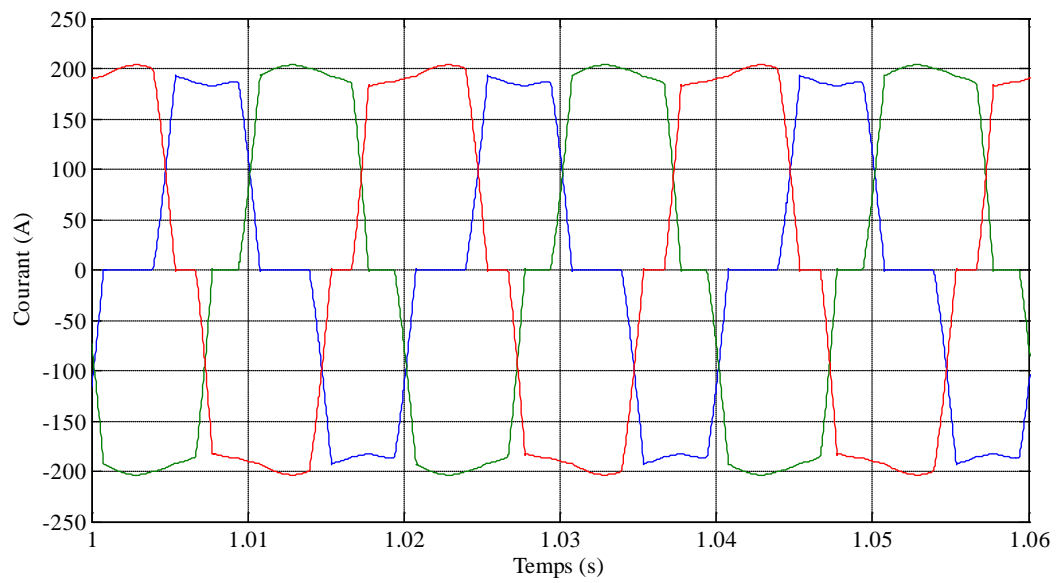


Figure II.18 : Allure des courants à l'entrée du redresseur

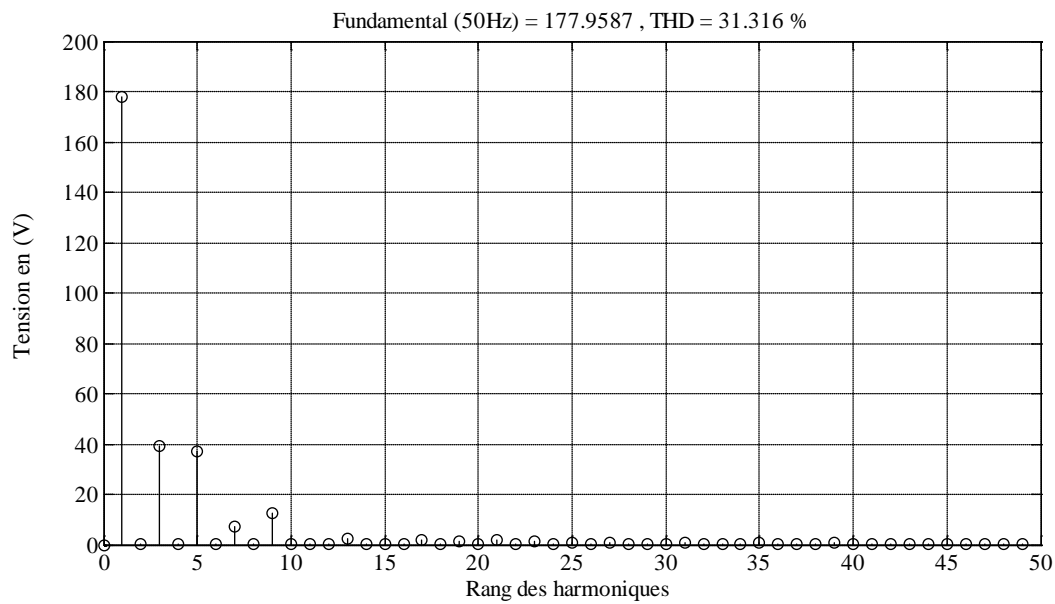


Figure II.19 : Analyse spectrale des tensions à l'entrée du redresseur

- **Test 3 :** Ce test est réalisé avec un réseau triphasé équilibré, tout comme pour le premier. Toutefois les paramètres du filtre inductif ont été changés de telle sorte à ce que les courants de ligne deviennent purement sinusoïdaux. Les valeurs de ce filtre sont $R=0.4 \Omega$, $L= 15e-3 H$.

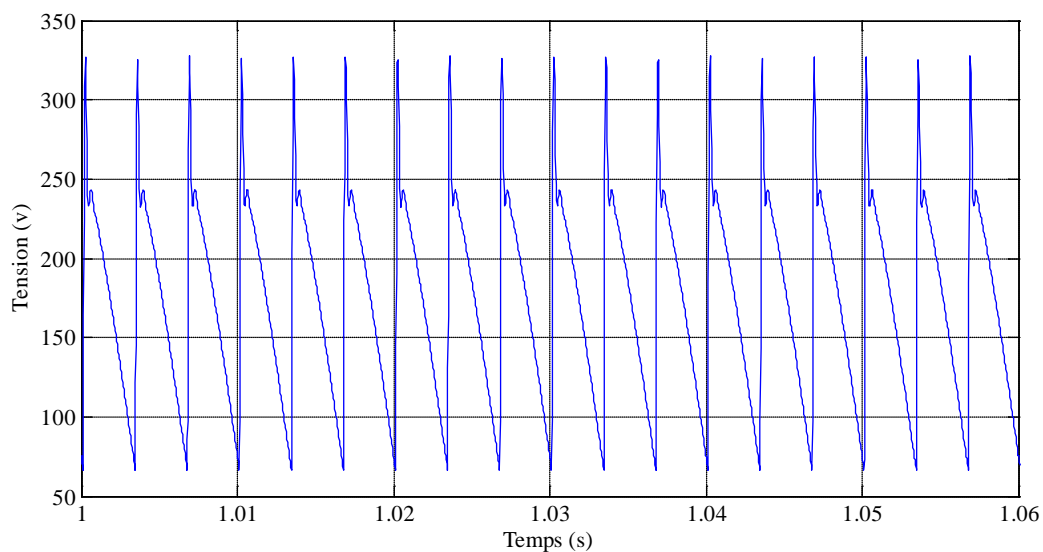


Figure II.21 : Analyse spectrale des tensions à la sortie du redresseur

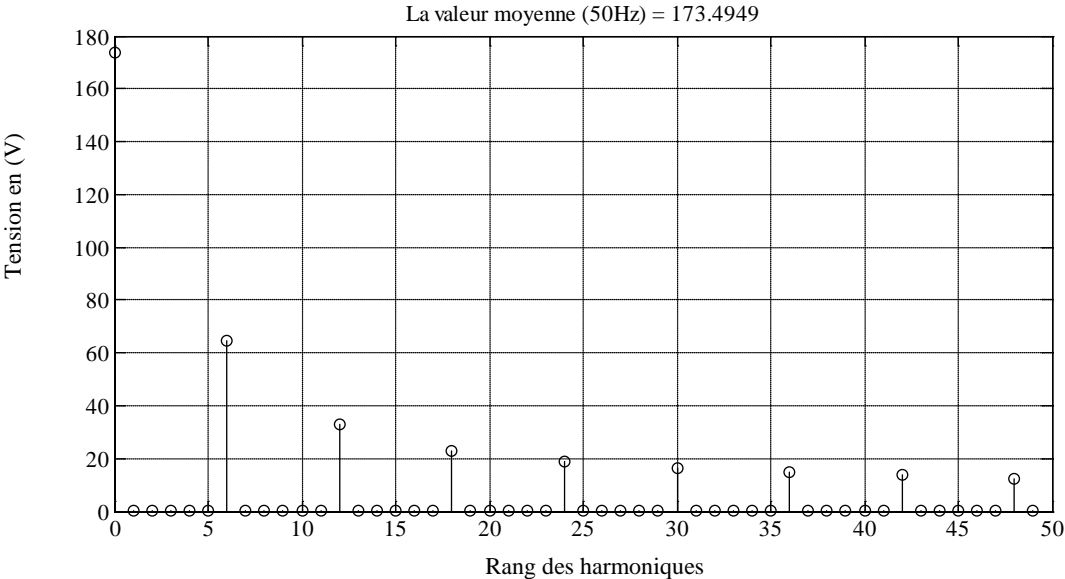


Figure II. 20 : Allure des tensions à la sortie du redresseur

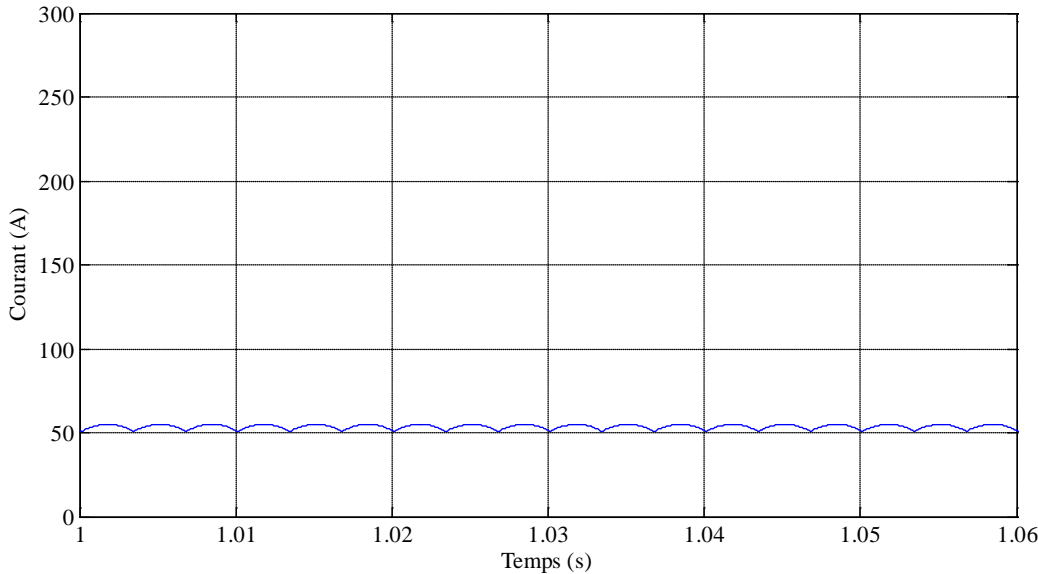


Figure II.22: Allure du courant redressé

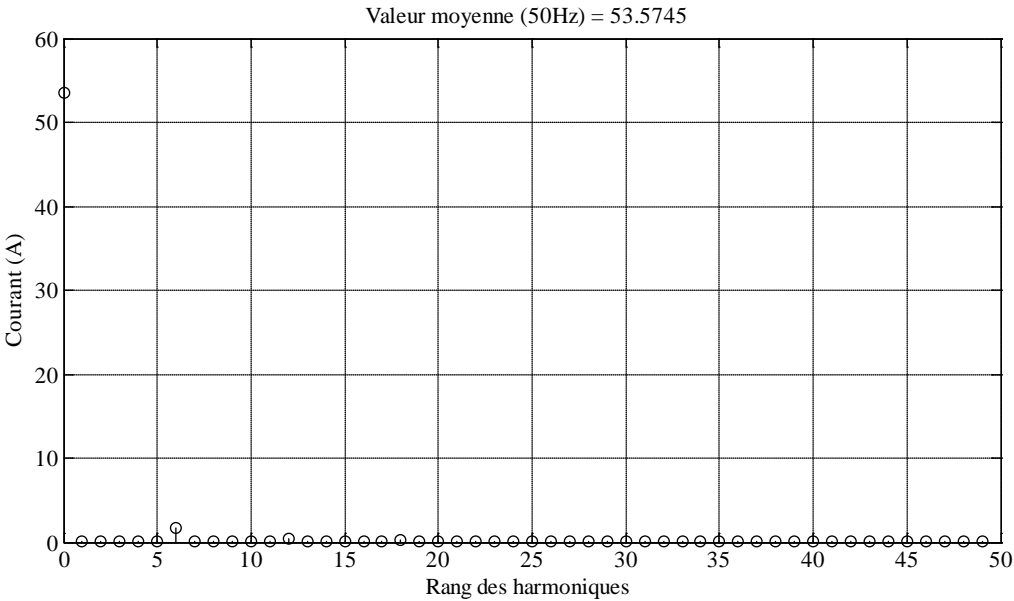


Figure II.23 : Analyse spectral du courant redressé

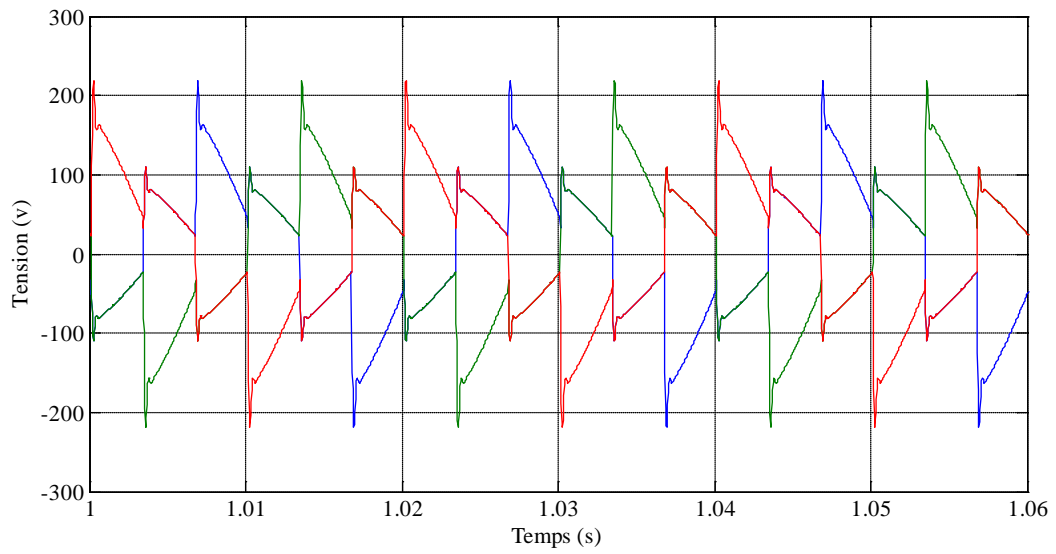


Figure II.24 : Allure des tensions à l'entrée du redresseur

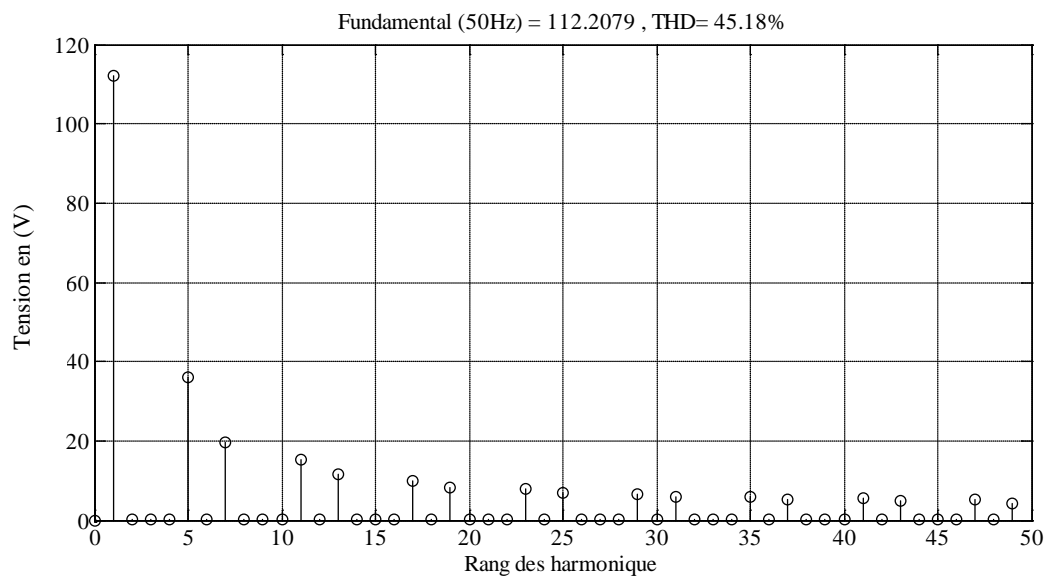


Figure II.25 : Analyse spectral des tensions à l'entrée du redresseur

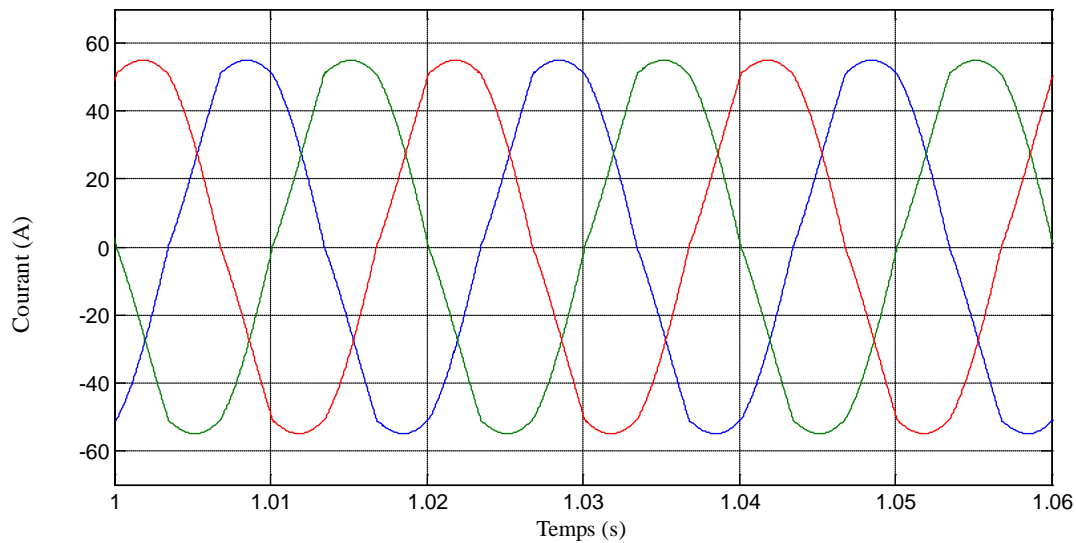


Figure II.26 : Allure des courants à l'entrée du redresseur

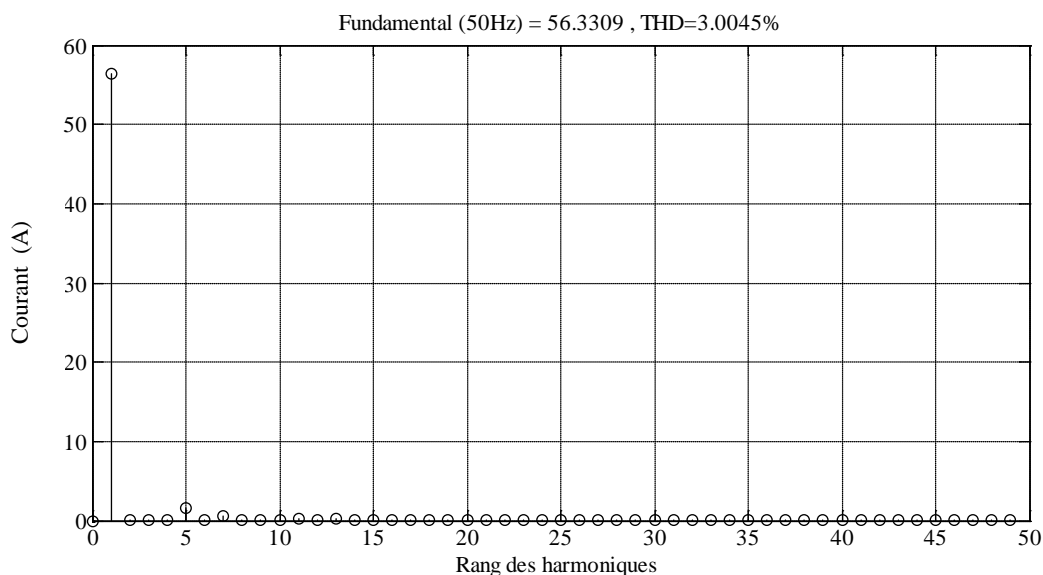


Figure II.27 : Analyse spectral des courants à l'entrée du redresseur

II.3.3 Interprétation des résultats de simulation :

Trois tests pour la même valeur de α en l'occurrence une valeur de 30 degrés, ont été réalisés, le premier consiste en une simulation classique avec des impédances ramenées au secondaire du transformateur, dans un cas purement théorique 446V, toutefois à cause des impédances ramenées au secondaire du transformateur et des chutes de tension aux bornes des composants, la valeur moyenne est ramenée à la valeur de 366V. Cet essai nous permet également de constater la présence des harmoniques de rang $6k \pm 1$ dans les grandeurs d'entrées, alors qu'elles suivent les rangs multiples de 6 sur les grandeurs de charge. Le but

assigné au second test est de quantifier l'impact d'une chute de tension de l'ordre de 50% sur une phase. Cette perturbation nous a ramené la nouvelle valeur de la tension redressée à 122V, cette valeur est difficilement prévisible théoriquement. Ce qui engendre des problèmes si nous avons un système nécessitant un contrôle de tension.

Idéalement un système de tension triphasé sinusoïdal doit fournir des courants de même forme, pour cela un filtre a été inséré avec le redresseur, ce test est consacré aux chutes de tensions qu'un tel filtre peut provoquer, du côté de la charge la valeur moyenne redressée est ramenée à 112V. La même chose que dans le cas précédent, cela pose un problème de contrôle.

II.4 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons constaté qu'un réseau électrique, s'il est parcouru par des courants harmoniques, les tensions qu'il fournit aux utilisateurs seront déformées. Pour mettre en évidence ces interactions, nous avons simulé sous Matlab/Simulink un redresseur triphasé tout thyristors en série avec un filtre inductif. Nous avons constaté une interaction réversible.

Objectivement un redresseur doit fournir une tension à ses bornes parfaitement commandable, toutefois la qualité des grandeurs fournies par le redresseur sont fortement dépendantes de l'évolution des grandeurs instantanées fournies à son entrée, comme nous venons de le voir.

Pour le réseau, les utilisateurs sont sensés récupérer un système de tension purement sinusoïdal et équilibré. Seulement si une charge non linéaire de type redresseur par exemple est connectée sur ce dernier, ces tensions se verront déformées à cause des courants harmoniques absorbés par ces charges dites non linéaires.

Donc pour satisfaire l'ensemble des utilisateurs des réseaux électriques, des filtres sont indispensables. A titre d'exemple des filtres inductifs pour régler le problème des harmoniques de courants, seulement cela s'accompagne de chute de tensions pas toujours facilement quantifiables, par conséquent difficilement ajustables, donc une nécessité d'insérer en série une source de tension active pour une meilleure compensation.

Ainsi le but du chapitre suivant sera l'étude de cette source de tension série qui est aussi appelée filtre actif série.

Conclusion général :

Aujourd'hui la consommation d'énergie, avec une efficacité de plus en plus contraignante, oblige les concepteurs des systèmes électriques à introduire des alimentations à base d'électronique de puissance. Ces alimentations règlent le problème de rendement et la souplesse d'utilisation des organes utilisant l'énergie électrique, mais elles sont devenues une source de soucis pour les fournisseurs d'énergie. De plus la libéralisation du marché de l'électricité nécessite une garantie de la qualité d'énergie. Ce qui oblige tous les acteurs du système électrique (production, transport et distribution) de garantir la qualité du produit fourni.

Les phénomènes observés sont nombreux : creux de tension et coupures, fluctuations rapides et lentes de l'amplitude du fondamentale de la tension, variation de la fréquence fondamentale, déséquilibre, harmonique etc...

Dans ce projet, nous avons étudié une stratégie de dépollution des tensions des réseaux électriques, appelée compensation active série, celui-ci doit son développement à l'évolution des organes de l'électronique de puissance. Ces derniers nous permettent de concevoir des dispositifs appelés convertisseurs de puissance (onduleurs), permettant la création des tensions de forme souhaitées à insérer en série avec le réseau. Par conséquent, la source fournira des tensions purement sinusoïdales d'amplitude et de fréquence fixes.

Avant d'aller au cœur de notre projet, au premier chapitre nous avons présenté les différentes sources de pollution des réseaux électriques, leurs conséquences sur l'ensemble du matériel électrique ainsi que les différentes méthodes de dépollution proposées dans la littérature.

Nous avons consacré le deuxième chapitre à l'étude d'une charge polluante, pour ce faire nous avons commencé par modéliser le réseau électrique perturbé, ensuite nous avons modélisé comme charge polluante un redresseur triphasé à base de thyristors, avec une structure en pont de Graëtz. Nous avons présenté les différents résultats de simulation de cette charge polluante effectués sous MATLAB / SIMULINK.

Dans le troisième chapitre nous avons déterminé les tensions de référence du compensateur actif série. La détection des tensions de référence est basée sur la méthode des puissances instantanées, celle-ci offre un meilleur compromis entre l'efficacité, la souplesse et la simplicité d'implantation, néanmoins elle a été associée à la méthode des composantes symétriques.

Bibliographies

[1] Mr. HADDAD SALIM

«Gestion de la qualité d'énergie électrique dans un réseau de transmission ». Thèse Doctorat Université BADJI MOKHTAE- ANNABA, 2010.

[2] S. BEAULIEU

« Etude et mise au point d'un filtre actif d'harmoniques en vue d'améliorer la qualité de l'alimentation électrique" Thèse de doctorat de l'université de Batna, Algérie Soutenue mai 2007.

[3] G. Desquilbet, C. Foucher, P. Fauquembergue

« Statistical analysis of voltage dips » Notes EDF, 96NR00102, 1995.

[4] M Mohamad Alaa Eddin Alali

«Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension» Thèse Doctorat. UNIVERSITE LUIS PASTEUR STRASBOURG Soutenue publiquement le 12 Septembre 2002.

[5] Vanya Ignatova

«Méthodes d'analyse de la qualité de l'énergie électrique. Application aux creux de tension et à la pollution harmonique. », Thèse de doctorat de Ingénieur Université Technique de Sofia le 20 Octobre 2006.

[6] DJAFFAR OULD ABDESLAM

«Techniques neuromimétiques 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 2005.

[7] Kamel DJAZIA

«Gestion de la qualité d'énergie électrique dans un réseau de» Thèse Doctorat 2010.

[8] Abdelmalek BOULAHIA

« Etude des Convertisseurs Statiques destinés à la Qualité de l'Energie Electrique » mémoire magister en électrotechnique Université de Constantine, 2009.

Bibliographies

[9] T. GOURAUD

« Identification et rejet de perturbations harmoniques dans des réseaux de distribution électrique ». Thèse, Nantes, France, (1997).

[10] Damien Flieller

«Etude de stratégies de commande d'un filtre actif de type parallèle en vue d'assurer la compensation des harmoniques et du déséquilibre » Mémoire du Projet de Fin d'Études Université Catholique de Louvain, 3 place du levant, 1348 Louvain-La-Neuve, Belgique, 2006.

[11] H.Sasaki and T.Machida

« A New Method to Eliminate AC Harmonic Currents by Magnetic Ccompensation-consideration on Basic Desig », IEEE Trans. PAS, vol.90, pp. 2009, no. 5, 1971.

[12] H. Akagi, Tsukamoto, and A.nabae

« Analysis and design of an active power filter using quad-series voltage source PWM converters », IEE Transactions on industry applications, vol. 26, No. 1, February 1990.

[13] S.Rechka

« Etude de méthode de filtrage des harmoniques dans les réseaux électriques de distribution », Mémoire présenté à l, université du Québec à Trois-Rivières Avril 2002.

[14] A.Karim

«Analyse harmonique et évolution de l'impédance harmonique d'un réseau de distribution industriel équilibré », Mémoire présenté à l'U.M.M.TO en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en électrotechniques 2009/2010.

[15] N.Mohan. and al

« Active filters for ac harmonic suppression », IEEE/PES winter meeting, A77 02668, 1977.

[16] H: Akagi

« Active harmonic filters », proceedings IEEE, Vol. 93, n° 12, p.2141, 12, 2005.

[17]S.KEBIRI

Bibliographies

« Modélisation et simulation d'un filtre actif multi niveaux. »

Mémoire de magistère, Université Mouloud MAMMARI de Tizi-Ouzou, 2009.

[18] **Kheira HEMICI**

« Commande d'un compensateur actif série à base d'un onduleur à cinq niveaux »
MEMOIRE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MAGISTER EN
ELECTROTECHNIQUE ECOLE DOCTORALE, 05 Avril 2011.

[19] **Guy seguier, Francis labrique, ohilippe de la rue**

Electronique de puissance. Structure, application-dunod.

[20] **F.labrique, G.seguir, R. BAUSIERE ,**

Les convertisseurs de l'électronique de puissance : la conversion alternatif-continu. Volume, 2ème édition. Technique et documentation LAVOISIER ? 1995.

[21] **Kifouche rezki**

« Identification des harmoniques et génération du courant de référence (application au convertisseur statique) ». MEMOIRE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MAGISTER EN GENIE ELECTRIQUE, Boumerdes 2005.

[22] **kouzou abdellah,**

« Compensation active des perturbations dans un réseau basse tension, en vus de l'obtention de titre de magistère en génie électrique ». Université M'HAMED BOUGARA. Boumerdes 2004.

[23] **Mr. DAAOU Yassine**

« Classification et localisation des défauts dans les de transport à THT en temps réel ». MEMOIRE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MAGISTER, 2011.

[24] **Hirofumi Akagi**

Hirofumi Akagi, Edson Hirokazu Watanabe, Mauricio Aredes,
« Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning-Wiley-IEEE Press (2007) ».

Bibliographies

[25]R. Tounsi,

“Développement d’un contrôle commande pour un compensateur série de creux de tension. Validation par simulation du fonctionnement avec des charges industrielles,” Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 1999.

[26] H. Akagi, A. Nabae , S. Atoh,

Control strategy of active power filters using multiple voltage-source PWM converters, IEEE Trans. on Industry applications, vol. IA-22, pp. 460-465, 1986.

[27] M.AOUES,

Filtrage actif des harmoniques générés par un redresseur triphasé.
Mémoire de magistère, Université Mouloud MAMMERI DE Tizi-Ouzou. 2004.

Conclusion générale

Dans le quatrième et le cinquième chapitre, la modélisation de l'ensemble a été effectuée, et différents résultats de simulation sont présents.

Après cette étude nous avons constaté que la méthode proposée ne répond pas dans le cas du déséquilibre de tension.

Comme perspective à ce travail, nous pouvons citer dans un premier cas, l'utilisation d'autre boucle de régulation associée à des algorithmes de modulation de largeur d'impulsions de type vectorielle, qui remplaceront la méthode par hystérésis, pour plus de robustesse et un meilleur contrôle de la fréquence de commutation. Tout cela peut être associé à des structures multi niveaux du convertisseur servant de filtre.

Cette étude peut être reprise avec une compensation en tri-monophasé, nous pensons que cela peut répondre quelque soit la perturbation.