

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

UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU



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

**MÉMOIRE DE MASTER ACADÉMIQUE
EN ÉLECTROTECHNIQUE**

Spécialité : Électrotechnique Industrielle

Thème

Étude et simulation d'un filtre actif série

Présenté par

SADI Merzouk
SLAMANI Mourad

Devant le jury

Salah HADDAD	Professeur	U.M.M.T.O.	Président
F-MEGHERBI-BITAM	Professeur	U.M.M.T.O.	Examinatrice
Ahmed Nahi	MA/A	U.M.M.T.O.	Examineur
Rahma Kachenoura	MCB	U.M.M.T.O.	Rapporteur

Promotion 2017/2018

Remerciements

En premier lieu, nous remercions Dieu le tout puissant de nous avoir donné le privilège et la chance d'étudier et de suivre le chemin de la science et de la connaissance.

En second lieu, nos remerciements les plus sincères vont droit à nos parents qui n'ont pas cessé de nous encourager et nous soutenir tout au long du long parcours que furent nos études.

Nous exprimons notre profonde gratitude à notre encadreur Madame *KACHENOURA Rahma*, pour avoir bien voulu nous encadrer et pour ses précieux conseils et orientations.

On remercie également les enseignants de qualité qui nous ont montré la voie du savoir et du sérieux ;

Aux enseignants qui sont aussi monsieur le président du jury et les membres examinateurs de ce modeste travail ;

On ne saurait énumérer tous ceux qui ont aidés de près ou de loin nous à la réalisation de ce travail.

Sachez tous retrouver dans ces lignes l'expression de nos remerciements les plus sincères.

Merzouk & Mourad

Dédicaces

Je teins à dédier ce modeste travail :

À mes chers parents, qui ne cessent de me soutenir et d'implorer en moi la force de continuer malgré les entraves. Aucun mot ne saurait exprimer l'amour, le dévouement et le respect que je porte pour vous. Que Allah vous préserve dans cette vie et dans l'au-delà.

À mon frère Aghiles, qui a toujours su m'encourager et me donner des conseils, qu'aujourd'hui il est d'autant plus un ami qu'un frère pour moi.

À mon ami Z. Lounes, pour ces qualités humaines dont j'admire les sens d'aide, de protection et de détermination.

À mon binôme Mourad, avec qui j'ai travaillé dans la sérénité et le calme durant toutes les phases de la réalisation de ce mémoire.

À vous tous, qui avez su me soutenir et m'encourager

Merzouk

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

À mes très chers parents pour leur sacrifice et leur soutien durant tout le long de mon parcours. Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être. Que Allah vous protège et vous accorde de la santé.

À tous les membres de ma famille, petits et grands, ainsi qu'à tous ceux qui me sont chers. J'exprime à travers ces mots mes sentiments d'amour et de fraternité ainsi que d'honneur que je réserve pour vous.

À tous mes amis et mes camarades, exceptionnellement mon ami et mon binôme S. Merzouk, avec qui j'ai partagé des moments inoubliables où nous avons appris ensemble à s'entraider et se soutenir, ainsi que mon ami Z. Lounes pour ces encouragements inlassables et son aide remarquable.

À vous tous, qui avez su me soutenir et m'encourager. Je saisi cette occasion pour vous exprimer ma profonde gratitude.

Mourad

Liste des figures

Figure I.1	Creux de tension.....	5
Figure I.2	Fluctuation de tension.	6
Figure I.3	Exemple de régime triphasé déséquilibré.....	7
Figure I.4	Variation de fréquence.	7
Figure I.5	Synthèse d'un signal à partir des harmoniques.....	8
Figure I.6	Filtre actif série.....	16
Figure I.7	Filtre actif parallèle.	18
Figure I.8	Combinaison parallèle-série actifs.	19
Figure II.1	Schéma simplifié d'un réseau électrique.	23
Figure II.2	la déformation d'une tension de réseau électrique.....	23
Figure II.3	Schéma de simulation du redresseur sous Simulink.....	31
Figure II.4	Allure de la tension redressée.	32
Figure II.5	Analyse spectrale de la tension redressée.	32
Figure II.7	Analyse spectrale du courant redressé.	33
Figure II.6	Allure du courant de charge redressé.....	33
Figure II.8	Allure des tensions à l'entrée du redresseur.	34
Figure II.9	Allure des courants à l'entrée du redresseur.	34
Figure II.10	Analyse spectrale des courants à l'entrée du redresseur.....	35
Figure II.11	Allure de la tension redressée.	35
Figure II.12	Analyse spectrale de la tension redressée.	36
Figure II.13	Allure du courant redressé.	36
Figure II.14	Analyse spectrale du courant redressé.....	37
Figure II.15	Allure des tensions à l'entrée du redresseur.	37
Figure II.16	Analyse spectrale de la tension aux bornes de la phase perturbée.....	38
Figure II.17	Allure des courants à l'entrée du redresseur.	38
Figure II.18	Analyse spectrale des tensions à l'entrée du redresseur.	39
Figure II.19	Allure des tensions à la sortie du redresseur.....	39
Figure II.21	Allure du courant redressée.	40
Figure II.20	Analyse spectrale des tensions à l'entrée du redresseur.	40

Figure II.22	Analyse spectrale du courant redressé.	41
Figure II.23	Allure des tensions à l'entrée du redresseur.	41
Figure II.24	Analyse spectrale des tensions à l'entrée du redresseur.	42
Figure II.25	Allure des courants à l'entrée du redresseur.	42
Figure II.26	Analyse spectrale des courants à l'entrée du redresseur.	43
Figure III.1	représentation de la puissance apparente.	49
Figure IV.1	Principe du filtrage actif.	57
Figure IV.2	Structure générale d'un filtre actif série.	58
Figure IV.4	Interrupteurs de puissance.	59
Figure IV.3	Filtre active à structure active.	59
Figure IV.5	Représentation du repère triphasé abc et le repère biphasé $\alpha\beta$	63
Figure IV.6	Les six vecteurs de commande forment un hexagone.	63
Figure IV.7	Représentation de V_{ref} dans le repère $\alpha\beta$	64
Figure IV.8	Représentation des huit vecteurs de commande et de $[\![V_{ref}]\!]$ dans le plan $\alpha\beta$. .	65
Figure IV.9	Représentation vectorielle de V_{ref} en fonction de deux tensions adjacentes.	66
Figure IV.10	Boucle de régulation de la tension injectée.	67
Figure V.1	Modèle du filtre actif série sous Matlab/Simulink.	70
Figure V.2	Tension du réseau.	71
Figure V.3	Tension aux bornes du filtre actif série.	71
Figure V.4	Tension de charge.	72
Figure V.5	Spectre harmonique de la tension de charge.	72
Figure V.6	La tension d'onduleur.	73
Figure V.7	Forme de la tension de l'onduleur après filtrage.	73
Figure V. 8	Tension du réseau.	74
Figure V.9	Spectre harmonique de tension du réseau.	74
Figure V.10	Tension fournie par l'onduleur après filtrage.	75
Figure V.11	Spectre harmonique de la tension injectée.	76

Figure V. 12	Tension de charge.	76
Figure V.13	Spectre harmonique de la tension de charge.....	77
Figure V.14	La tension d'onduleur.	77
Figure V.15	Spectre harmonique de la tension d'onduleur.	78
Figure V.16	La tension de réseau et la tension injectée.....	78
Figure V.17	La tension du réseau.	79
Figure V.18	Spectre harmonique de la tension de réseau.	79
Figure V.19	La tension injectée.	80
Figure V.20	Spectre harmonique de la tension injectée.....	80
Figure V.21	La tension de charge.	81
Figure V.22	Spectre harmonique de la tension de charge.....	81
Figure V.23	La tension d'onduleur.	82
Figure V.24	Spectre harmonique de la tension d'onduleur.	82
Figure V.25	La tension de réseau et la tension injectée.....	83
Figure V.26	La tension du réseau.	84
Figure V.27	Spectre harmonique de la tension de réseau.	84
Figure V.28	La tension fournie par l'onduleur après filtrage.	85
Figure V.29	Spectre harmonique de la tension injectée.....	85
Figure V.30	Tension de charge.	86
Figure V.31	Spectre harmonique de la tension de charge.....	86
Figure V.32	La tension d'onduleur.	87
Figure V.33	Spectre harmonique de la tension d'onduleur.	87
Figure V.34	La tension du réseau.	88
Figure V.35	Spectre harmonique de la tension de réseau.	88
Figure V.36	La tension de charge.	89

Liste des tableaux

Tableau I.1	Comparaison des différents types de filtrage.....	19
Tableau II.1	les intervalles de conduction des thyristors	26
Tableau IV.1	Tensions délivrées par l'onduleur	61
Tableau IV.2	Temps de commutations dans chaque secteur.	67

Table de matières

Introduction générale	1
Chapitre I.....	3
I.1 Introduction.....	3
I.2 La qualité de l'énergie électrique	3
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	4
I.3 Les perturbations électriques et leurs origines.....	4
I.3.1 Creux de tension.....	5
I.3.2 Fluctuations de la tension.....	6
I.3.3 Court-circuits et ouverture brusque de source du courant	6
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	8
I.4.2 Décomposition d'un courant distordu périodique en série de Fourier	9
I.4.3 Conséquence des harmoniques	9
I.4.3.1 Effets instantanés.....	10
I.4.3.2 Effets à terme.....	10
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).....	15
I.5.2.1 Principe de fonctionnement du filtre actif.....	15
I.5.2.2 Filtre actif série (FAS).....	16
I.5.2.3 Filtre actif parallèle (FAP)	17

I.5.2.4	La structure hybride.....	18
I.5.2.5	Combinaison de filtres actifs parallèles et séries.....	18
I.6	Comparaison des différents filtrages	19
I.7	Choix de la structure.....	20
I.8	Domaines d'application des filtres actifs.....	20
I.9	Conclusion	21
Chapitre II	22
Modélisation de la charge sensible	22
II.1	Introduction	22
II.2	Modélisation du réseau électrique perturbé.....	22
II.3	Modélisation de la charge sensible.....	24
II.3.1	Modélisation du redresseur à thyristors.....	24
II.3.1.1	Fonctionnement du redresseur en pont de Gräetz.....	25
II.3.1.2	Étude du fonctionnement ($\alpha=\pi/3$).....	26
II.3.1.3	Étude en tenant compte du phénomène d'empiètement.....	28
II.3.2	Simulation.....	31
II.3.3	Interprétation des résultats de simulation :	43
II.4	Conclusion :.....	44
Chapitre III	45
Méthodes d'identifications des tensions de référence	45
I.1	Introduction.....	45
III.2	Les méthodes d'identification des tensions de références	45
III.2.1	Choix de la méthode.....	45
III.2.2	Méthode de la décomposition en composante symétrique	46
III.2.3	Méthode des puissances instantanées.....	49
III.2.3.1	Séparation des puissances perturbatrices.....	52
III.2.3.2	Identification des tensions de références	53
III.2.3.3	Algorithme d'identification	54
III.3	Conclusion	55

Chapitre IV.....	56
Modélisation de filtre actif série	56
IV.1 Introduction.....	56
IV.2 Principe de la compensation actif série.....	56
IV.3 Topologie générale d'un compensateur actif série	57
IV.4.Étude de la partie puissance.....	58
IV.4.1.Onduleur de tension	58
IV.4.2.Tension fournie par l'onduleur.....	59
IV.4.3.Alimentation de l'onduleur	61
IV.4.4.Filtre de sortie	61
IV.5.La Commande de l'Onduleur	61
IV.5.1.Commande par MLI vectorielle	62
IV.6.Conclusion	67
Chapitre V	68
Résultats de simulation	68
V.1 Introduction.....	68
V.2 Conditions de simulation.....	68
V.3 Résultats de simulation	69
V.3.1 Analyse du cas d'une sous tension réseau.....	73
V.3.2 Analyse du cas d'une surtension réseau	78
V.3.3 Analyse d'un cas d'un réseau déséquilibré	82
V.3.4 Réseau équilibré avec présence d'harmoniques	87
V.4 Conclusion.....	88
Conclusion générale.....	89
Références bibliographiques	91

Introduction générale

Les réseaux électriques fournissent dans le cas idéal des tensions de forme purement sinusoïdale avec une tension efficace et une fréquence fixe. Cependant, selon des études publiées dans la littérature, nous constatons que la qualité de l'onde électrique est loin d'être parfaite.

Le problème principal provoquant des défauts, est la présence des courants Harmoniques produits par les charges non linéaires. La propagation de ces courants à travers les différentes impédances du réseau crée des tensions harmoniques qui se superposent à la tension fondamentale. Les Tensions déformées résultantes ont des effets néfastes sur les équipements de Puissance, les dispositifs de commande et de surveillance, les circuits de protection et sur les charges sensibles aux harmoniques. On peut également cite les asservissements nécessitants des fonctionnements bien défini.

Pour diminuer ou supprimer ces perturbations et ainsi améliorer la qualité de l'énergie distribuée, plusieurs solutions existent parmi ces elles les dispositifs de filtrage actif de puissance.

L'utilisation de dispositifs de filtrage tels que les filtres passifs dits résonnants et/ou amortis peut ainsi empêcher les courants harmoniques de se propager dans les réseaux électriques. Ils peuvent également être utilisés pour compenser la puissance réactive. Cependant ces solutions restent problématiques. Par exemple une composition par banc de condensateurs peut provoquer des sursensions dans le réseau, si l'énergie réactive fournie dépasse les besoins.

La solution la plus séduisante reste l'utilisation des convertisseurs de l'électronique de puissance, principalement l'onduleur. L'intérêt de ces convertisseurs réside dans le fait qu'ils sont capables de prendre des impédances apparentes variables et totalement comandable. C'est dans cette optique que s'inscrit notre projet de fin d'étude. Ainsi nous allons étudier un filtre actif série, qui devrait se comporté comme un générateur de tension variable en amplitude et en phase, imposant un profil de tension telle que, additionnée à celle du réseau, la tension au point de connexion reste toujours purement sinusoïdale de fréquence et d'amplitude parfaitement connu.

Pour compenser les tensions perturbatrices (chute de tension, déséquilibre, harmoniques de tension) venant de la source est également, ou bien provoqués par la circulation des courant perturbateurs à travers l'impédance de source, généralement le filtre actif série est la solution la plus robuste pour protéger les charges sensibles contre ces perturbations. C'est dans cette thématique que s'inscrit notre projet de fin d'étude.

Ce présent mémoire est réparti comme suit :

Le premier chapitre est consacré à la description des problèmes liés aux perturbations électriques dans un réseau basse tension, leurs origines et leurs conséquences. Nous présenterons également les solutions traditionnelles et modernes de compensation, particulièrement les différentes structures de filtrage actif.

Dans le deuxième chapitre nous présenterons la modélisation du réseau électrique perturbé, ainsi que la modélisation d'un redresseur triphasé à base de thyristors, qui est une charge dont les variations de la tension redressé sont fortement liées à la forme des tensions des réseaux. Un exemple d'étude des conséquences de ces variations sur la valeur de la tension fournie par ce redresseur à sa charge est présenté.

Pour un bon fonctionnement du filtre, une bonne identification des tensions de référence est indispensable, pour cela le troisième chapitre sera consacré à la méthode d'identifications des puissances instantanées sous un régime quelconque, qui nous mène ainsi vers une connaissance instantanée des tensions de références nous permettant un bon contrôle du filtre actif.

Dans le quatrième chapitre, le filtre actif série seras modéliser a fins de le mettre en exécution sous un logicielle de simulation, la base de ce filtre actif est l'onduleur de tension triphasé à deux niveaux.

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

Enfin, nous terminons avec une conclusion générale pour rappeler les principaux résultats et nous donnons quelques suggestions en guise de perspectives pour des futures recherches.

Chapitre I

Les problèmes des perturbations électriques

I.1 Introduction

Depuis quelques années, les mesures de puissance et de la qualité du réseau électrique prennent beaucoup d'importance. Parallèlement, il existe un besoin croissant pour une meilleure qualité et une plus grande fiabilité du réseau électrique. Par conséquent, l'utilisation accrue, dans l'industrie, des systèmes commandés à base d'électronique de puissance provoque de plus en plus des problèmes de perturbation au niveau des réseaux électriques tels que les distorsions harmoniques, les déséquilibres, le papillotement, les coupures brèves, les creux de tension, les surtensions temporaires, les variations de fréquence et de tension, et les surtensions transitoires ; et des fois même de phénomène de résonance créant ainsi des désagréments important pour les utilisateurs du réseau [1].

En outre, ces perturbations peuvent générer des nuisances, pannes ou des dégâts par l'affectation d'un ou plusieurs paramètres de la tension du réseau électrique suivants: la fréquence, l'amplitude, la symétrie des tensions triphasées et la forme de l'onde.

Dans ce chapitre nous allons présenter les principales perturbations affectant la qualité de l'onde électrique, notamment les harmoniques.

Nous parlerons également de leurs origines, des conséquences. Nous discuterons ensuite les solutions envisagées pour pallier aux problèmes liés aux perturbations harmoniques, en particulier le filtrage actif.

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 [2].

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 l'IEEE. Les normes qu'ils ont établies sont, de façon respective, la série CEI 61000 et l'IEEE Standard 519. [3]

De façon générale ces normes, identifiant les principales sources de perturbations électromagnétiques, décrivent les effets de ces perturbations sur les réseaux, et donnent des méthodes d'analyse et de mesure pour les harmoniques.

I.3 Les perturbations électriques et leurs origines

Les réseaux électriques sont très pollués et soumis à de multiples agressions à 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 10% et 90% 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 [4].

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 [5].

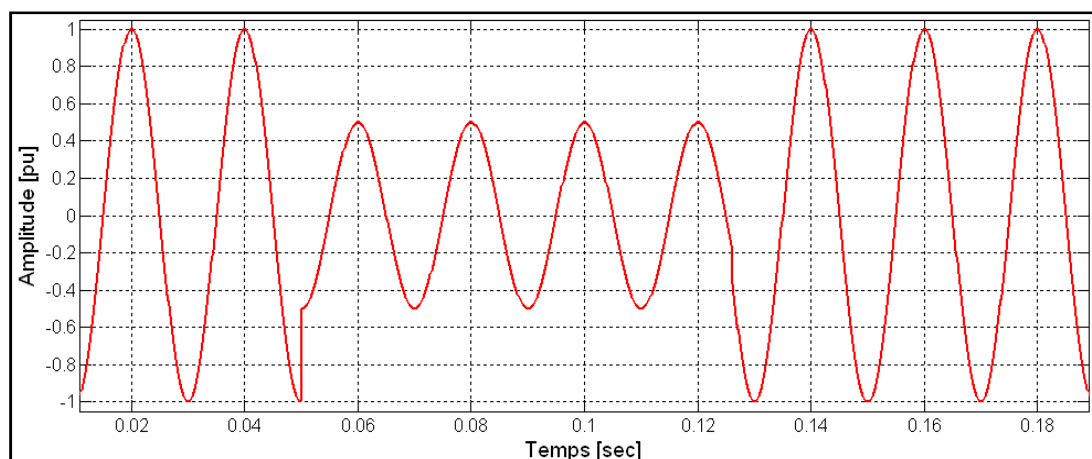


Figure I.1 Creux de tension.

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 fluctuée 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 [6].

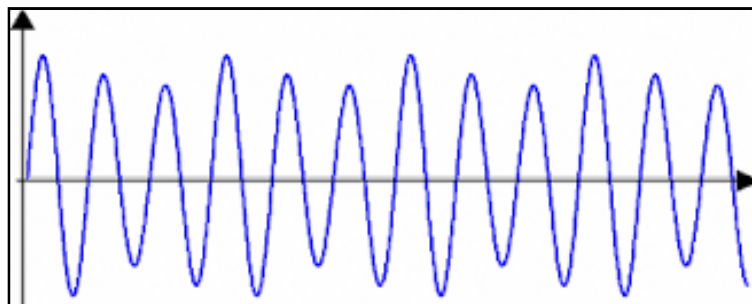


Figure I.2 Fluctuation de tension.

I.3.3 Court-circuits et ouverture brusque de source du courant

1- 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 , ou une chute de tension pouvant atteindre la valeur zéro.

2- l'ouverture brusque d'une source du courant provoque une apparition d'une sur-tension ce superposant a celle du réseau. Exemple les surtensions induite par le phénomène d'empiétement dans les redresseur.

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 la même fréquence, déphasées entre elles de $\pm 120^\circ$. Lorsque les grandeurs ne vérifient pas ces conditions de phase, de fréquence et d'amplitude, on parle d'un système triphasé déséquilibré figure(I.3).

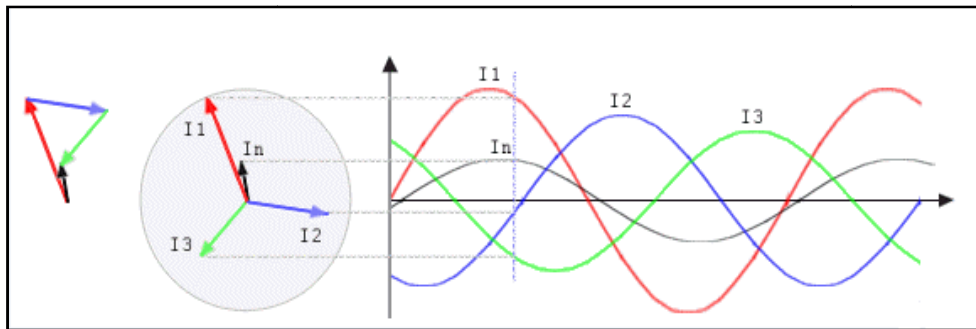


Figure I.3 Exemple de régime triphasé déséquilibré.

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

Les réseaux de distributions ou de transports ont une fréquence constante, sa variation est très rare sauf dans des circonstances exceptionnelles, comme dans le cas de certains défauts graves sur le réseau. Dans les conditions normales d'exploitations, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle de $50 \text{ Hz} \pm 1\%$. [7]

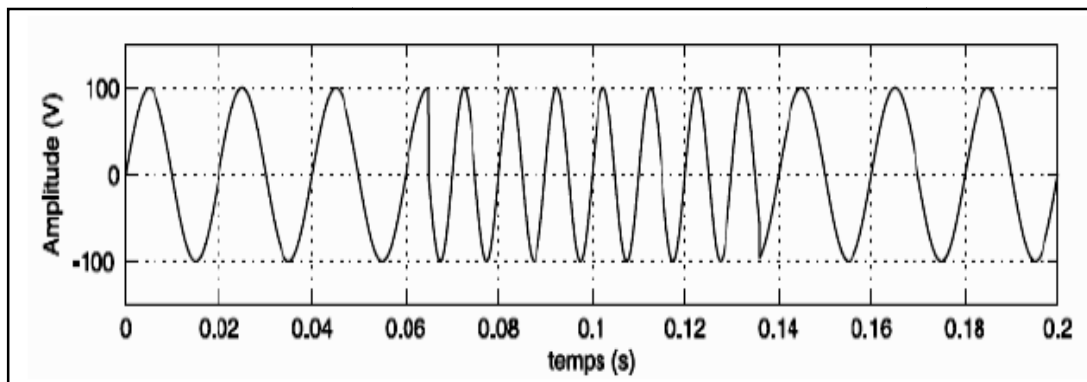


Figure I.4 Variation de fréquence.

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.

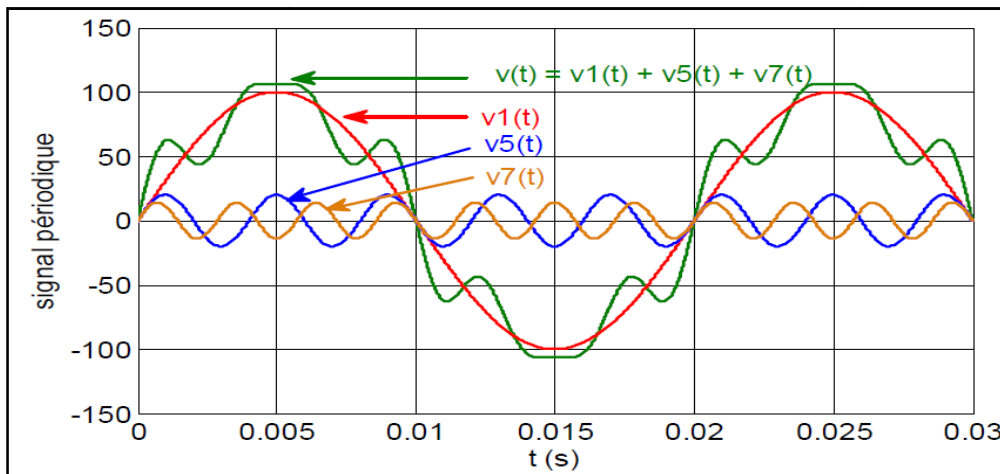


Figure I.5 Synthèse d'un signal à partir des harmoniques.

Dans la plupart des cas, les harmoniques présents sur les réseaux électriques proviennent de l'utilisation de charges non linéaires. Une charge non linéaire appelle 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 à laquelle elle est raccordée. [8]

I.4.1 Sources harmoniques

Les harmoniques sont la superposition sur l'onde fondamentale (en Algérie à 50 Hz), d'ondes également sinusoïdales mais de fréquences multiples de celle du fondamental. Les charges domestiques et industrielles non linéaires tels que les appareils d'éclairage fluorescent, les fours à arcs, les redresseurs..., représentent la plus grande majorité de sources d'harmoniques. [9]

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 :

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

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

$n\varphi_n$: phase de l'harmonique de rang n

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

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

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

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

Nous donne :

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

I.4.3 Conséquence des harmoniques

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. [10]

I.4.3.1 Effets instantanés

Les effets instantanés apparaissent immédiatement dans certains appareillages.

a) Défaux 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.

b) 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.

c) 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.

d) 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 qui conduit à une fatigue prématurée du matériel, des lignes et amènent un déclassement des équipements.

a) Échauffement 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 de l'échauffement du neutre et des matériels bobinés comme les transformateurs ou les moteurs.

b) Échauffement 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.

c) Échauffement dû aux pertes supplémentaires sur des machines et des transformateurs

Échauffements causés par les pertes dans les stators des machines et principalement dans leurs circuits rotoriques (cage, amortisseurs, circuits magnétiques) à cause de différences importantes de vitesse entre les champs tournants des inducteurs harmoniques et le rotor. Les harmoniques génèrent aussi des pertes supplémentaires dans les transformateurs, par effet de Joule dans les enroulements, accentuées par l'effet de peau et des pertes par hystérésis et courants de Foucault dans le circuit magnétique.

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)

$$p(t) = 3v(t) \cdot i(t) \quad (\text{I.6})$$

$$S = 3I_{\text{eff}} \cdot V_{\text{eff}} \quad (\text{I.7})$$

$$P = 3 \sum_{n=1}^{\infty} I_n \cdot V_n \cos(n\varphi_n) \text{ où } \varphi_n = \beta_n - \alpha_n \quad (\text{I.8})$$

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 puissance déformante (D) est introduite, elle est estimée par certains auteurs comme suite :

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

Cette estimation est faite dans le cas où la tension du réseau est purement sinusoïdale

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 apparaître 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 :

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

Ce facteur est toujours comparé à $\sqrt{2}$, sa valeur dans le cas d'une forme purement sinusoïdale.

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 [11]. 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 :

a) Compensateur statique

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

b) Filtrage passif

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. [12]

Cependant, ce filtre possède un certain nombre de défauts qui sont cités ci-dessous :

- c) 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 .
- d) 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.
- e) 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.
- f) Le filtre passif possède un ensemble de résonances avec la source soulevant la possibilité d'exciter cette résonance sous certaines conditions.
- g) Les filtres passifs accordés sur une fréquence dominante de la charge ont tendance à attirer les harmoniques de courants des charges ambiantes.
- h) 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, surtout dans le cas des systèmes de distribution. 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[13]. 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 [14].

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

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 tension ou des courants harmoniques, de forme adéquate de tel sorte à maintenir la tension

du réseau au point de raccordement de forme de phase de fréquence et d'amplitude bien définie [5].

Les convertisseurs de puissance dit « onduleur » 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. 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. [15]

I.5.2.2 Filtre actif série (FAS)

Le rôle d'un FAS est de modifier localement l'impédance du réseau. Il se comporte comme une source de tension harmonique qui annule les tensions perturbatrices (creux, déséquilibre, harmonique) venant de la source et celles générées par la circulation de courants perturbateurs à travers l'impédance du réseau. Ainsi, la tension aux bornes de la charge sera de forme purement sinusoïdale, d'amplitude et de fréquence parfaitement Controller. [16]

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 : $V_s = V_{ch} + V_{fa}$.

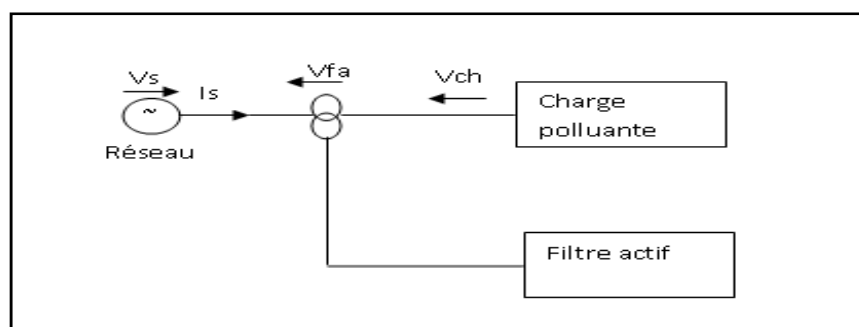


Figure I.6 Filtre actif série.

I.5.2.2.1 Principe de fonctionnement

Le filtre actif série (FAS) est placé en série entre la source et la charge sensible pour forcer la tension fournie à être purement sinusoïdale. Cette approche est basée sur le principe d'isoler la perturbation par le contrôle de la tension de sortie du FAS. En d'autres mots, le

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 fournie à la charge sera 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).

- 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 en fonction de la quantité de l'énergie réactive demandée.

I.5.2.2.2 Mise en œuvre

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.

I.5.2.3 Filtre actif parallèle (FAP)

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

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)

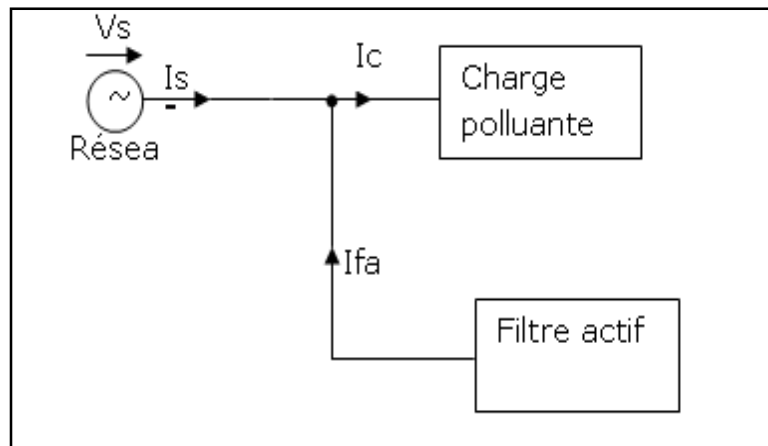


Figure I.7 Filtre actif parallèle.

I.5.2.4 La structure hybride

Le filtre hybride est une topologie de filtre qui combine les avantages des filtres passifs et des filtres actifs. Pour cette raison, il est considéré comme l'une des meilleures solutions pour filtrer les harmoniques de courant des réseaux de distribution. Une des principales raisons de l'utilisation du filtre actif hybride est liée au développement des semi-conducteurs de puissance tels que les transistors de puissance de types MOSFET ou IGBT [20] ; [21].

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

C'est une solution de compensation universelle basée sur le fonctionnement simultané des filtres actifs parallèle et série figure (I.8). Donc, elle possède les avantages cumulés des filtres actifs parallèles et série. Cette nouvelle topologie est appelée combinaison parallèle série actif ou en anglais Unified Power Quality Conditioner (UPQC). Un filtre actif série

placé en amont du filtre actif parallèle permet de dépolluer la source des tensions perturbatrices; or s'il est placé en aval, il permet d'isoler la charge de la source perturbée [18] ; [19].

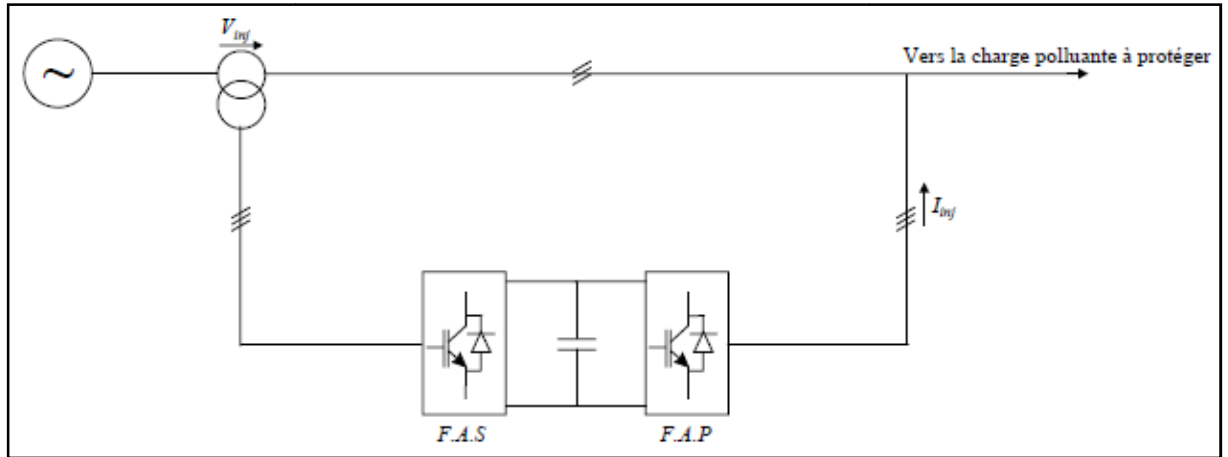


Figure I.8 Combinaison parallèle-série actifs.

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 [22].

Tableau I.1 Comparaison des différents types de filtrage.

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	Pas d'amélioration de la forme d'onde.

	réseau.	
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 les différentes origines des perturbations affectant les réseaux électriques et les solutions de dépollution existantes. Ces perturbations étant néfastes pour les installations électriques à cause des dysfonctionnements éventuels qu'ils peuvent engendrer. Par conséquent, leur compensation est amplement souhaitée pour des raisons technico-économiques.

Nous allons nous intéresser dans la suite aux solutions modernes tel que le filtre actif série qui sera l'objet de ce mémoire.

Chapitre II

Modélisation de la charge sensible

II.1 Introduction

L'énergie électrique, principalement produite et distribuée sous forme de tensions triphasées sinusoïdales, permet de fournir la puissance électrique nécessaire aux différentes charges. Lorsque la forme d'onde de la tension n'est plus sinusoïdale, on rencontre des perturbations qui peuvent affecter le bon fonctionnement de nombreux équipements et de charges raccordés au réseau.

L'utilisation croissante des équipements de l'électronique de puissance contribue à la détérioration de la tension d'alimentation. En effet, ces charges dites déformantes sont non linéaires et appellent du réseau électrique un courant non sinusoïdal possédant un contenu harmonique.

Dans ce chapitre on va étudier l'impact de la qualité de la tension du réseau sur un redresseur à thyristors en pont triphasé alimentant une charge RLE. [23] ; [24].

II.2 Modélisation du réseau électrique perturbé

L'énergie électrique est distribuée sous forme de trois tensions sinusoïdales constituant le réseau triphasé.

- L'impédance du réseau et du transformateur d'isolement ramené au secondaire est écrite :

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

Avec : $\omega = 2\pi f$

- On donne :

$$V_{s1} = V_1 \sin \omega t - V_5 \sin(5\omega t - \varphi_5) + V_7 \sin(7\omega t - \varphi_7) \quad (\text{II.2})$$

$$V_{s2} = V_1 \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3} - \varphi_1) - V_5 \sin(5\omega t - \frac{2\pi}{3} - \varphi_5) + V_7 \sin(7\omega t - \frac{2\pi}{3} - \varphi_7) \quad (\text{II.3})$$

$$V_{s3} = V_1 \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3} - \varphi_1) - V_5 \sin(5\omega t + \frac{2\pi}{3} - \varphi_5) + V_7 \sin(7\omega t + \frac{2\pi}{3} - \varphi_7) \quad (\text{II.4})$$

$$I_{s1} = I_1 \sin \omega t - I_5 \sin(5\omega t - \beta_5) + I_7 \sin(7\omega t - \beta_7) \quad (\text{II.5})$$

Chapitre II Modélisation de la charge sensible

$$I_{s2} = I_1 \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3} - \beta_1) - I_5 \sin(5\omega t - \frac{2\pi}{3} - \beta_5) + I_7 \sin(7\omega t - \frac{2\pi}{3} - \beta_7) \quad (\text{II.6})$$

$$I_{s3} = I_1 \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3} - \beta_1) - I_5 \sin(5\omega t + \frac{2\pi}{3} - \beta_5) + I_7 \sin(7\omega t + \frac{2\pi}{3} - \beta_7) \quad (\text{II.7})$$

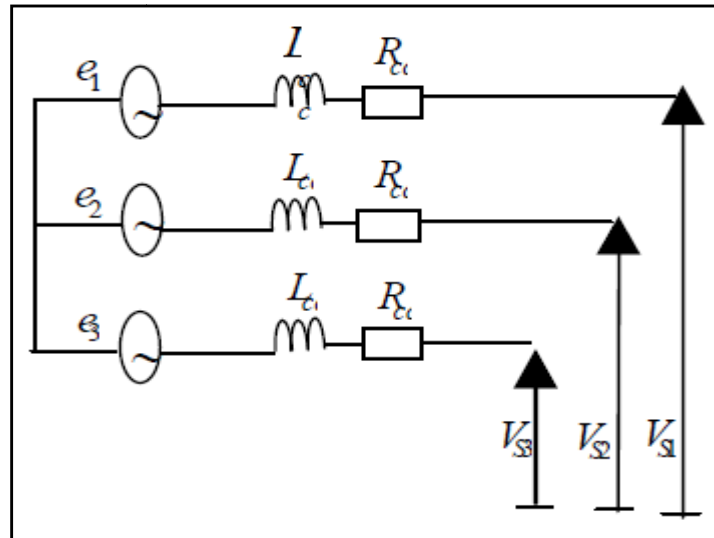


Figure II.1 Schéma simplifié d'un réseau électrique.

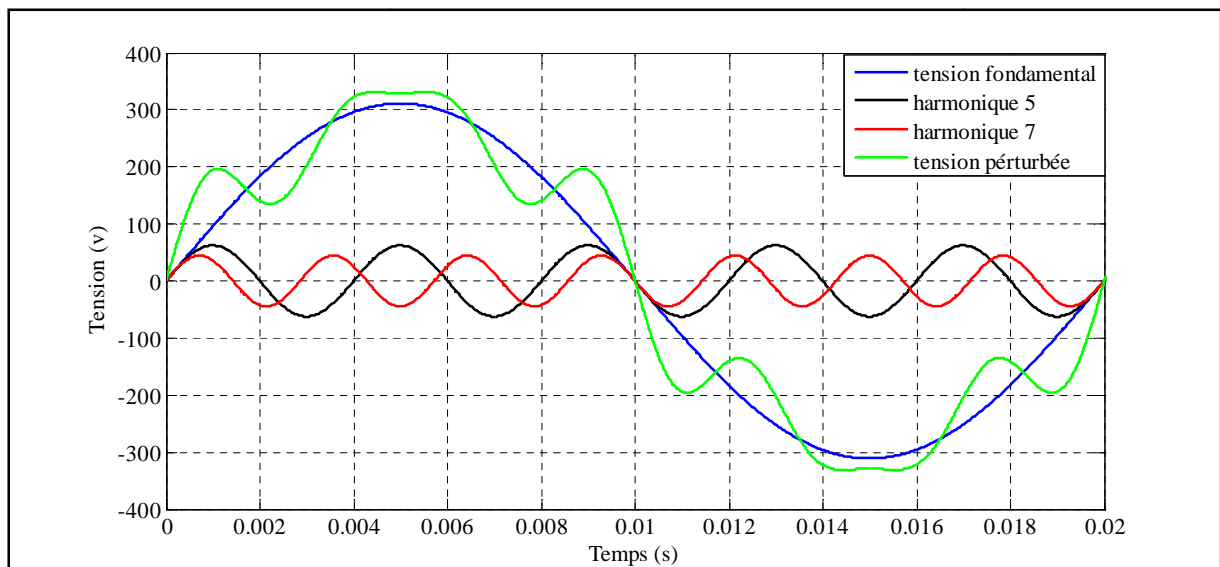


Figure II.2 la déformation d'une tension de réseau électrique.

II.3 Modélisation de la charge sensible

Nous avons pris comme charge sensible 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, souvent appelés simplement redresseurs, sont les convertisseurs de l'électronique de puissance qui assurent directement la conversion alternatif-continu. Alimentés par une source de tension alternative monophasée ou polyphasée, ils permettent d'alimenter avec une énergie électrique de type continu un récepteur branché à leur sortie.

On utilise un redresseur chaque fois que l'on a besoin de tensions continues, alors que l'énergie électrique est disponible en alternatif. Comme c'est sous cette seconde forme que l'énergie électrique est presque toujours générée et distribuée, les redresseurs ont un très vaste domaine d'applications.

Les redresseurs à diodes, ou redresseurs non contrôlés, ne permettent pas de faire varier le rapport entre la ou les tensions alternatives d'entrée et la tension continue de sortie. De plus, ils sont irréversibles, c'est-à-dire que la puissance ne peut aller que du côté alternatif vers le côté continu.

Les redresseurs à thyristors, ou redresseurs contrôlés, permettent, pour une tension alternative d'entrée fixée, de faire varier la tension continue de sortie. Ils sont de plus réversibles; lorsqu'ils assurent le transfert de puissance du côté continu vers le côté alternatif, on dit qu'ils fonctionnent en onduleurs non autonomes.

Le montage est constitué essentiellement d'un pont triphasé appelé « pont Gräetz ». Le pont de Gräetz 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 [25].

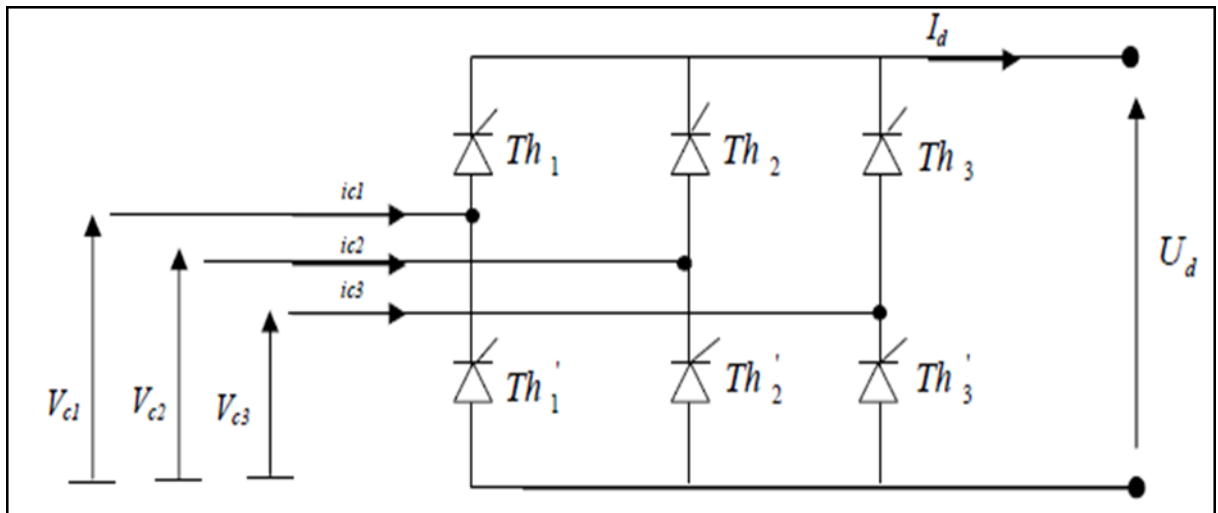


Figure II.3 Schéma d'un redresseur triphasé à thyristor

II.3.1.1 Fonctionnement du redresseur en pont de Grätetz

Il 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 VS_1 passe par sa valeur crête l'impulsion d'amorçage suivante ira au thyristor T'_3 . Mais le thyristor T'_3 ne 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 [25].

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

Le tableau suivant donne les intervalles de conductions des thyristors à condition que le système de tension d'alimentation soit purement sinusoïdal et équilibré.

Tableau II.1 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, α_0]	0	0	1	1	0	0	V _{S3}	V _{S1}	V _{S3} - V _{S1} = U ₃₁
[α_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 _{S1}	V _{S2}	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

a) Étude des tensions et des courants

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

➤ Étude des tensions

• Tension redressée :

Si le réseau est équilibré, dans ce cas le tableau II.1 est respecté, à ce moment le calcul de la tension moyenne fournie par le redresseur a la charge se calculera de la façon suivante

La tension redressée est périodique, de période ($\frac{T}{6} = \frac{\pi}{3}$).

La valeur moyenne redressée est :

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

Chapitre II Modélisation de la charge sensible

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

On aura :

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

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

- **Tension efficace :**

$$V_{C_{eff}} = \left[\frac{1}{T} \int_0^T V_C^2(t) dt \right]^{\frac{1}{2}} = \left[\frac{3}{\pi} \int_{\alpha_0+\alpha}^{\alpha_0+\alpha+\frac{\pi}{3}} [V_{eff} \sqrt{2}\sqrt{3} \sin(\theta + \alpha_0)]^2 d\theta \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{II.11})$$

$$V_{C_{eff}} = V_{eff} \sqrt{2}\sqrt{3} \left[\frac{3}{\pi} \int_{\alpha_0+\alpha}^{\alpha_0+\alpha+\frac{\pi}{3}} \sin^2(\theta + \alpha_0) d\theta \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{II.12})$$

- **Facteur d'ondulation :**

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

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 :**

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

➤ Étude 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 :

$$I_{C_{moy}} = \frac{1}{T} \int_0^T i_c(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_c(t) dt = I_C \quad (II.15)$$

b) Bilan des puissances

- **Puissance active :**

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

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

- **Puissance réactive :**

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

- **Puissance apparente :**

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

- **Puissance déformante :**

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

- **Facteur de puissance :**

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

II.3.1.3 Étude 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

Chapitre II Modélisation de la charge sensible

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 :

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

$$\text{➤ } V_b = V\sqrt{2} \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (\text{II.22})$$

$$\text{➤ } V_c = V\sqrt{2} \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (\text{II.23})$$

On calcul :

a) Chute de la tension due à l'empiètement

Étape initiale : T_1 conduit seul :

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

$$i_{s1} = I_c \quad (\text{II.24})$$

$$L_s \omega \frac{di_{s1}}{d\theta} = 0 \Rightarrow V_c = V_{s1} \quad (\text{II.25})$$

Étape finale: T_2 conduit seul :

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

$$i_{s2} = I_c \quad (\text{II.26})$$

$$L_s \omega \frac{di_{s2}}{d\theta} = 0 \Rightarrow V_c = V_{s2} \quad (\text{II.27})$$

Étape intermédiaire : T_1 et T_2 conduisent simultanément :

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

$$i_{s1} + i_{s2} = I_c \quad (II.28)$$

On a:

$$V_{s1} - L_s \omega \frac{di_{s1}}{d\theta} = V_c \quad (II.29)$$

$$V_{s2} - L_s \omega \frac{di_{s2}}{d\theta} = V_c \quad (II.30)$$

$$i_{s1} + i_{s2} = I_c \Rightarrow \frac{d(i_{s1} + i_{s2})}{d\theta} = 0 \quad (II.31)$$

b) Chute de tension instantanée due à l'empiétement

$$\Delta_3 V_{emp} = L_s \omega \frac{di_{s2}}{d\theta} \quad (II.32)$$

$$\text{On a: } 2L_s \omega \frac{di_{s2}}{d\theta} = V_{s2} - V_{s1} \text{ et } L_s \omega \frac{di_{s2}}{d\theta} = \Delta_3 V_{emp} \quad (II.33)$$

$$\text{Donc : } \Delta_3 V_{emp} = \frac{V_{s2} - V_{s1}}{2} \quad (II.34)$$

Le résultat donné par l'équation (II.34) représente la chute de tension instantanée durant l'intervalle de commutation où d'empiétement.

c) Chute de tension moyenne due à l'empiétement

$$U_{c_{moy}} = \frac{1}{T} \int_{\alpha}^{\alpha+T} (V_{s1} - V_{s3}) dt - \frac{1}{T} \int_{\alpha}^{\alpha+T} L \left(\frac{di_{s1}}{dt} - \frac{di_{s3}}{dt} \right) dt - \frac{1}{T} \int_0^T R (i_{s1} - i_{s3}) dt - \frac{1}{T} \int_0^T 2V_{T1} dt = \frac{1}{T} \int_{\alpha}^{\alpha+T} L \omega \frac{di_s}{dt} dt = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+\frac{\pi}{3}} L \omega di_s \quad (II.35)$$

$$\Delta U_{c_{moy}} = \frac{3\sqrt{GV}}{\pi} \cos \alpha - \frac{3}{2} L_w L_c - 2RI_c \quad (II.36)$$

▪ Forme du courant i_{s1} et i_{s2} :

$$(II.29)-(II.30): V_{s1} - V_{s2} - L_s \omega \frac{di_{s1}}{d\theta} + L_s \omega \frac{di_{s2}}{d\theta} = 0 \quad (II.37)$$

$$(II.31) \Leftrightarrow \frac{di_{s1}}{d\theta} + \frac{di_{s2}}{d\theta} = 0$$

$$(I_c \text{ Parfaitement lissé}), \frac{di_{s1}}{d\theta} = -\frac{di_{s2}}{d\theta} \quad (II.38)$$

$$-V_{s1} + V_{s2} - 2L_s \omega \frac{di_{s2}}{d\theta} = 0 \rightarrow \frac{di_{s2}}{d\theta} = \frac{V_{s2} - V_{s1}}{2L_s \omega} \quad (II.39)$$

L'équation (II.39) 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 leurs qualités 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.

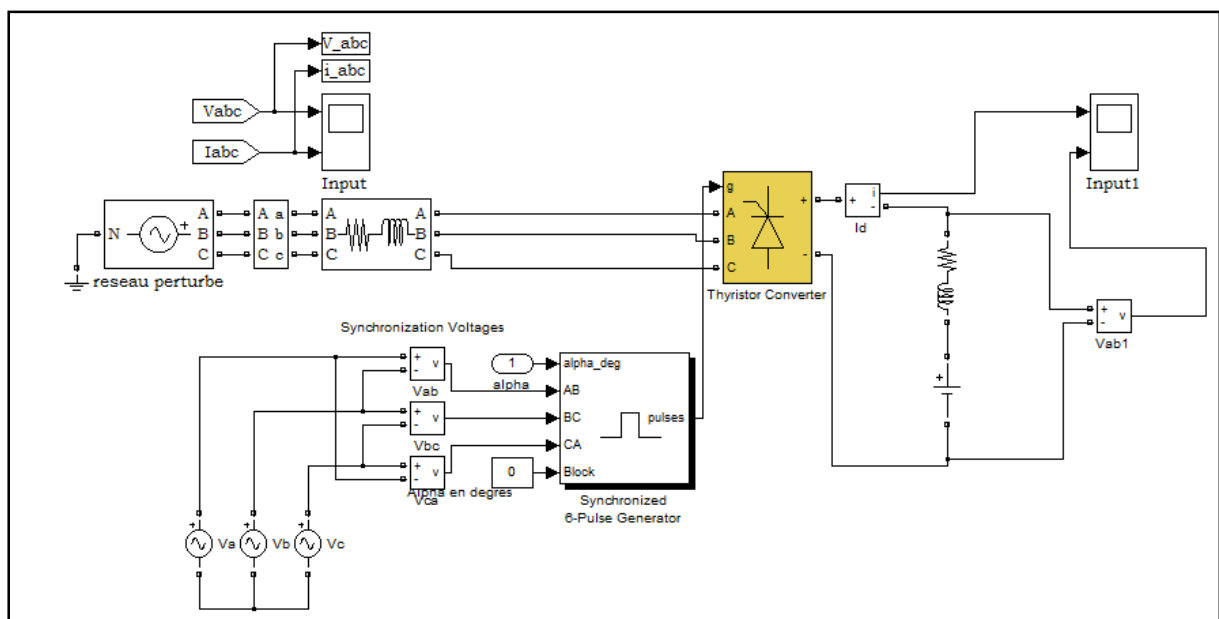


Figure II.3 Schéma de simulation du redresseur sous Simulink.

Après simulation de ce redresseur, et en considérant le phénomène d'empiétement, nous avons obtenu les résultats suivants :

- **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.

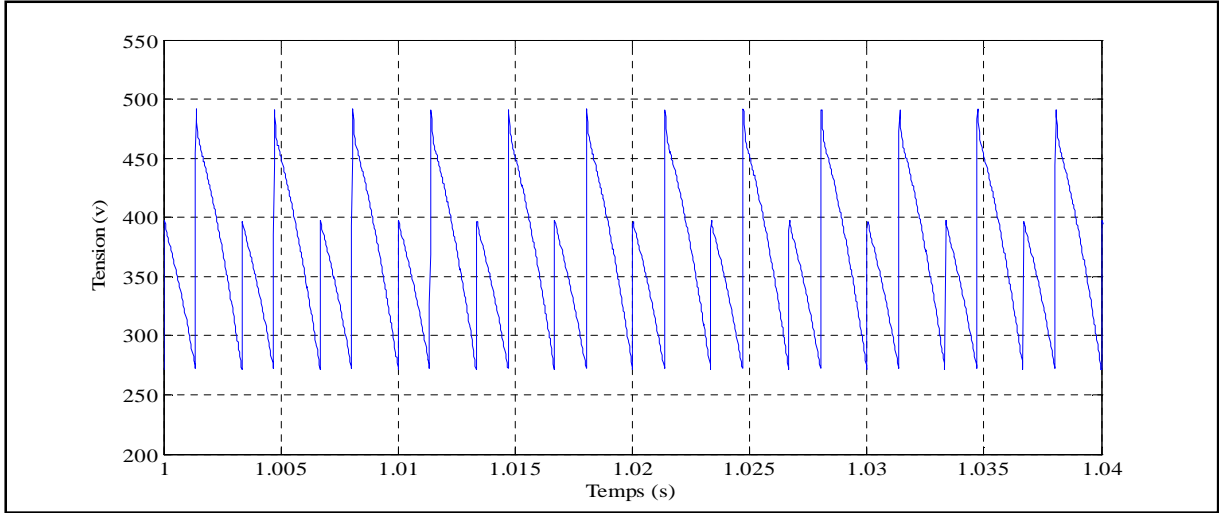


Figure II.4 Allure de la tension redressée.

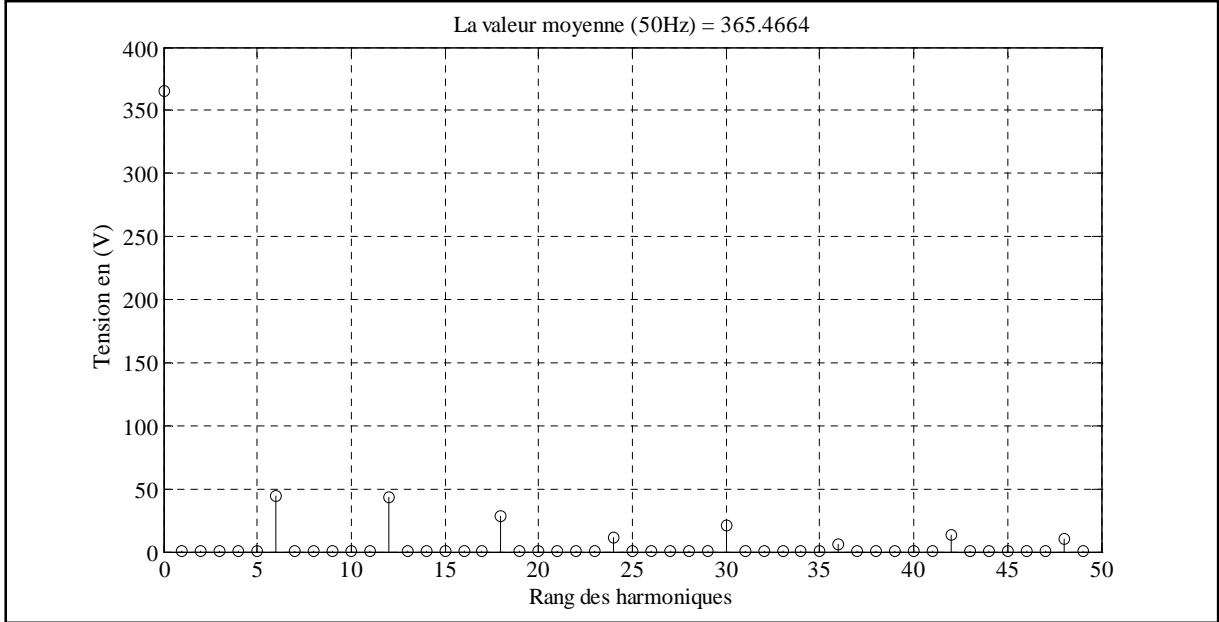


Figure II.5 Analyse spectrale de la tension redressée.

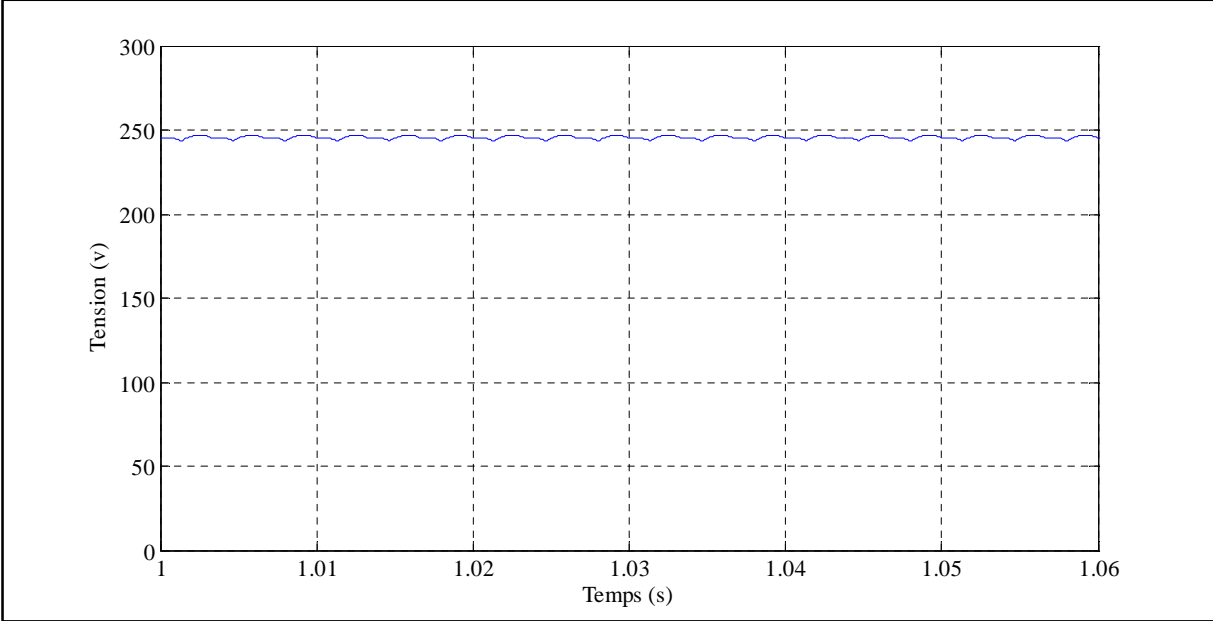


Figure II.6 Allure du courant de charge redressé.

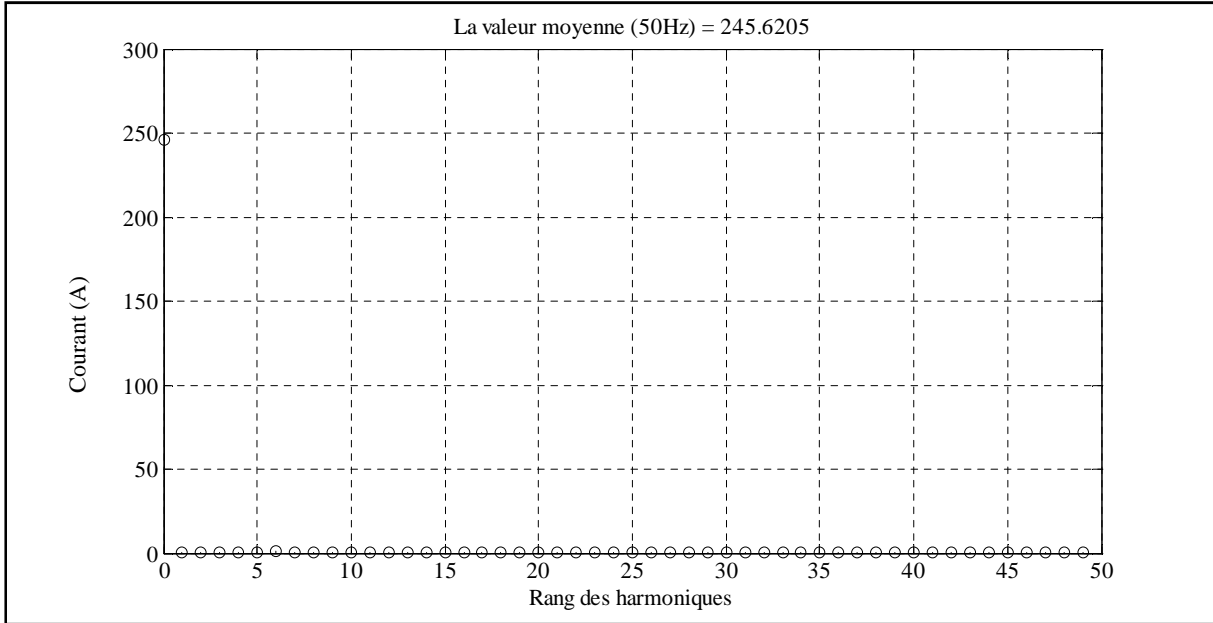


Figure II.7 Analyse spectrale du courant redressé.

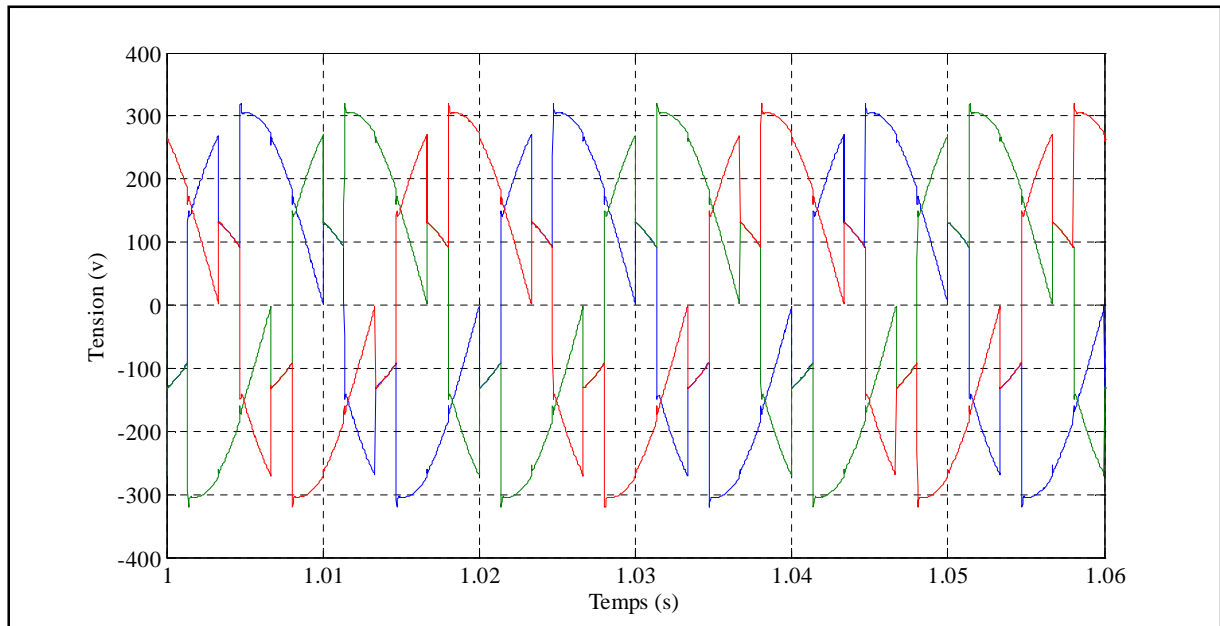


Figure II.8 Allure des tensions à l'entrée du redresseur.

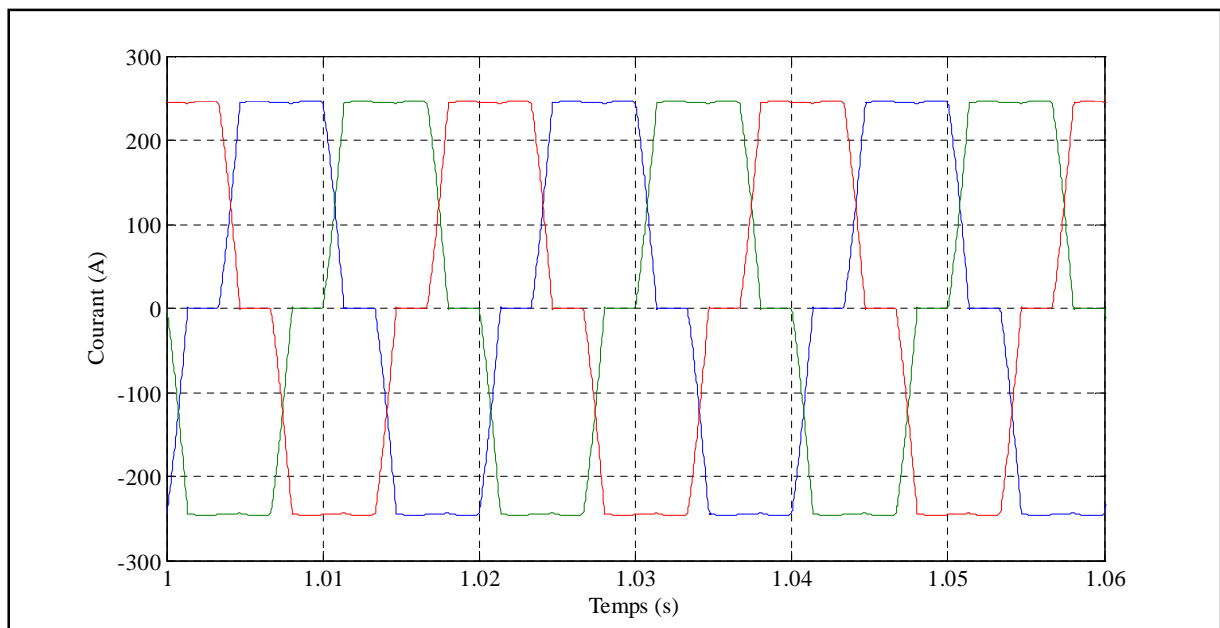


Figure II.9 Allure des courants à l'entrée du redresseur.

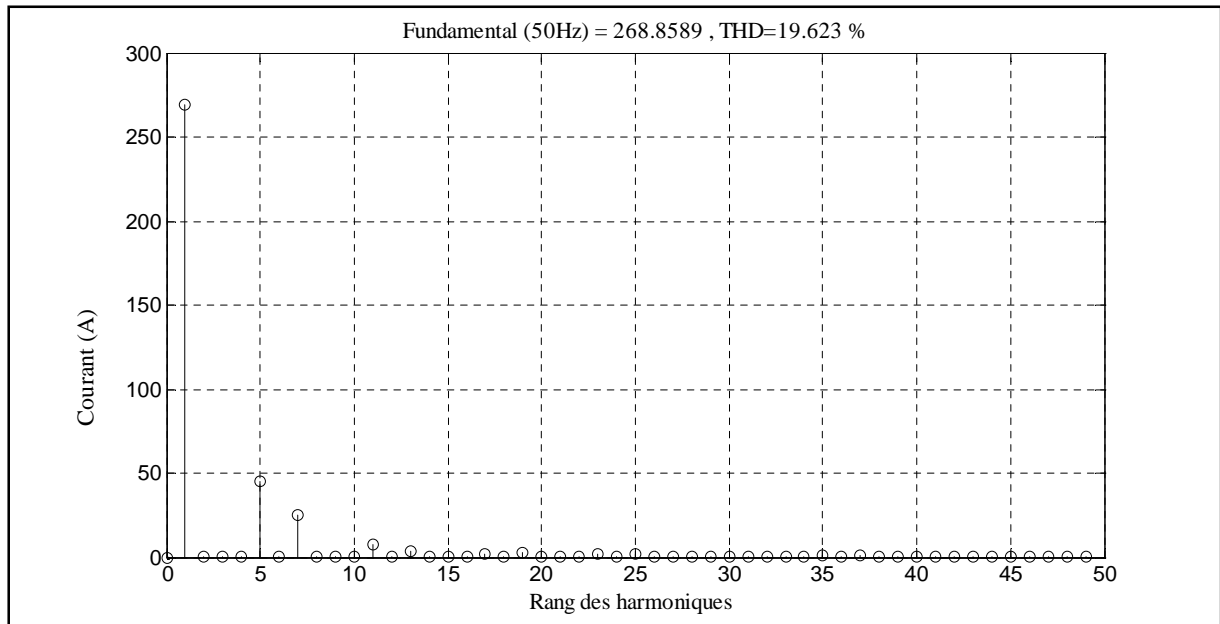


Figure II.10 Analyse spectrale des courants à l'entrée du redresseur.

- **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.

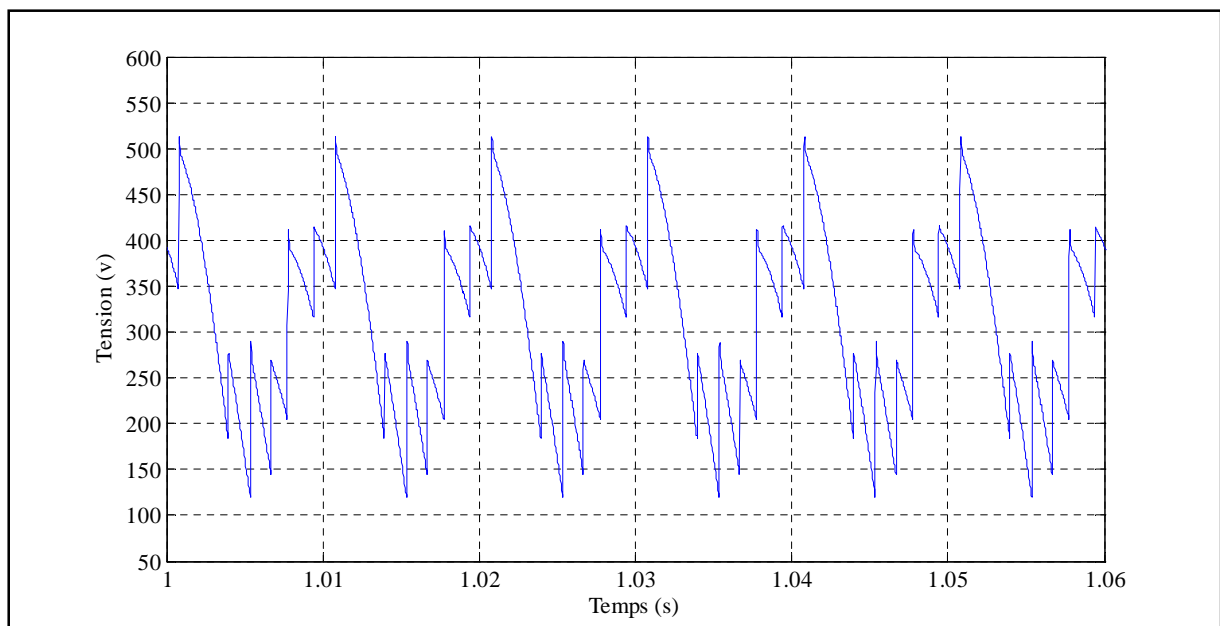


Figure II.11 Allure de la tension redressée.

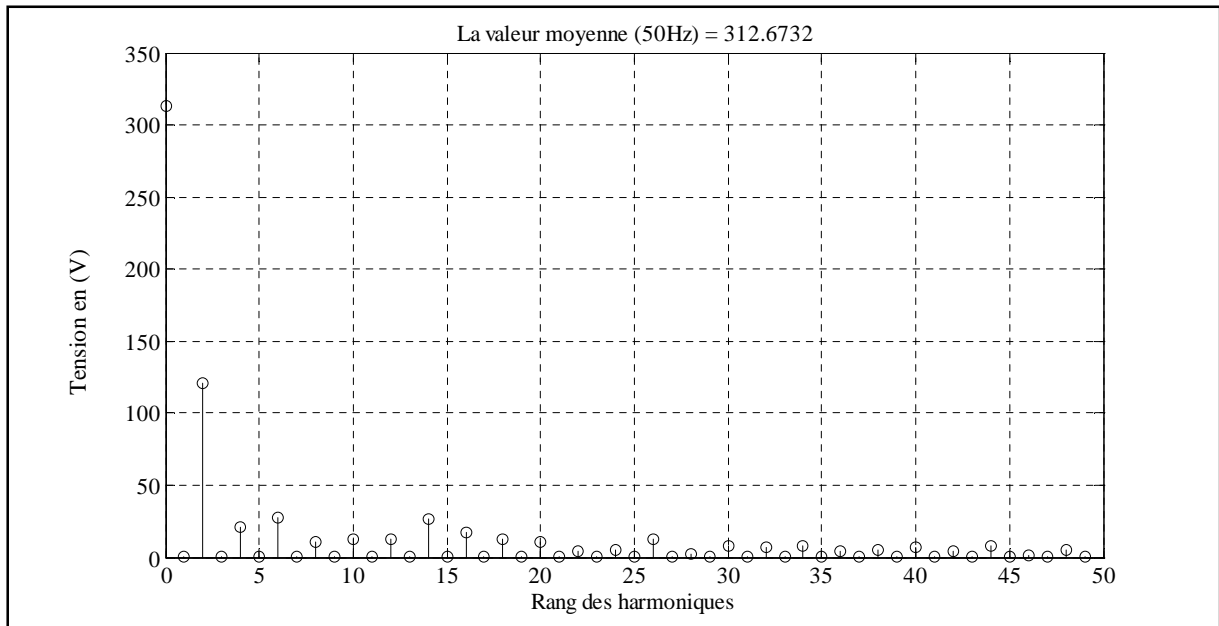


Figure II.12 Analyse spectrale de la tension redressée.

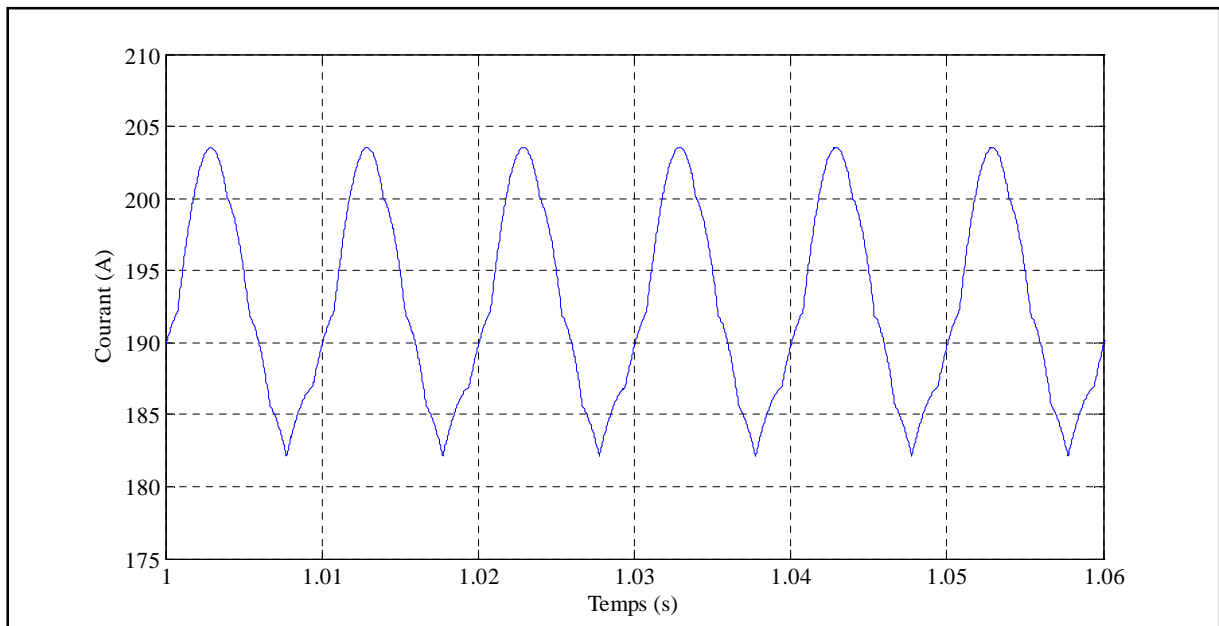


Figure II.13 Allure du courant redressé.

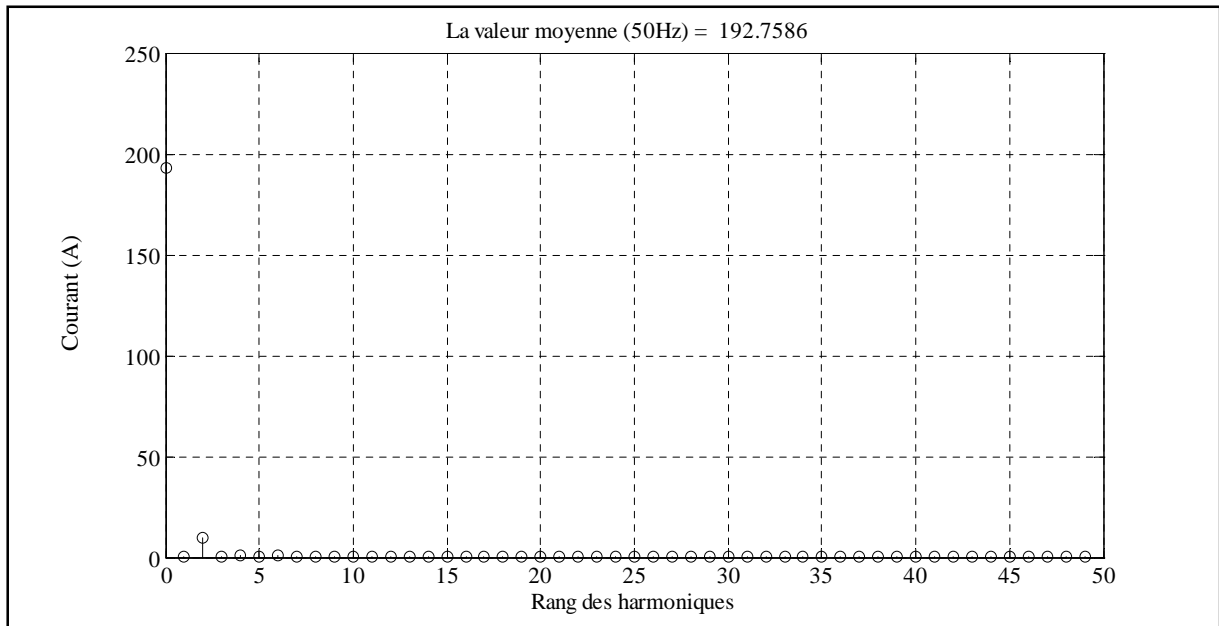


Figure II.14 Analyse spectrale du courant redressé.

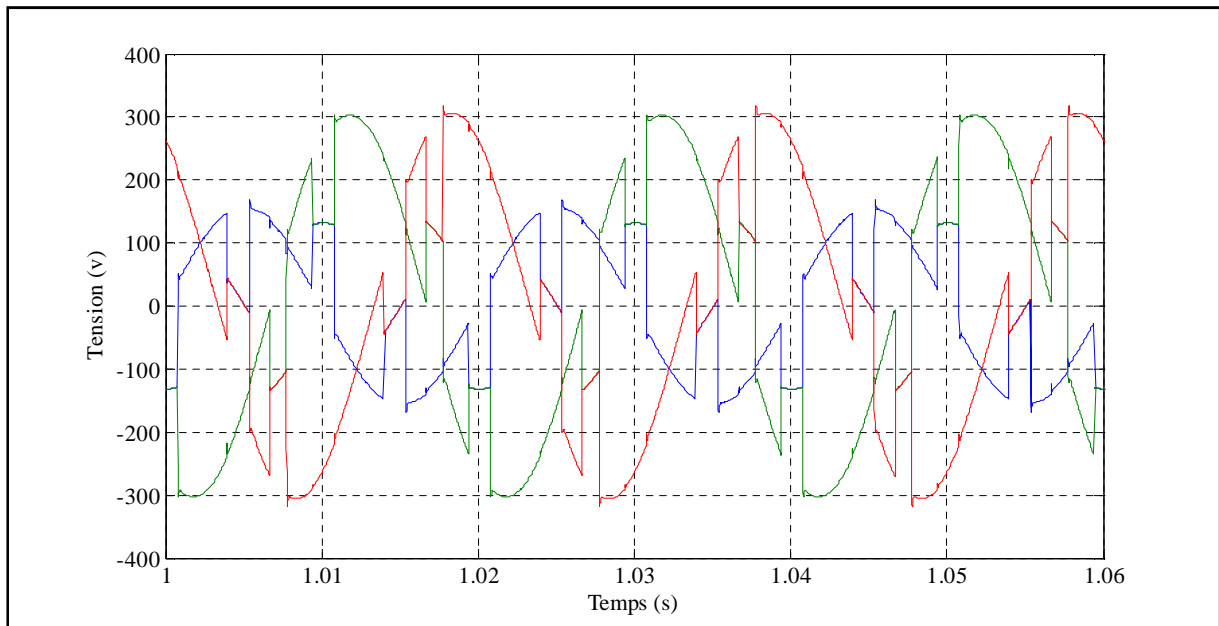


Figure II.15 Allure des tensions à l'entrée du redresseur.

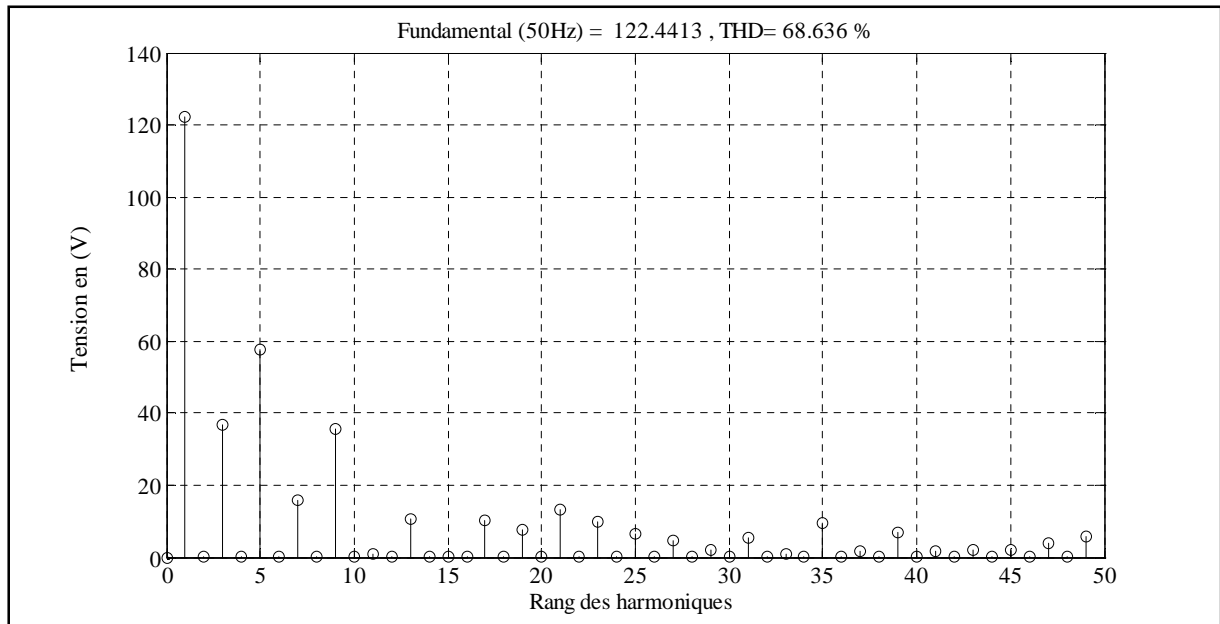


Figure II.16 Analyse spectrale de la tension aux bornes de la phase perturbée.

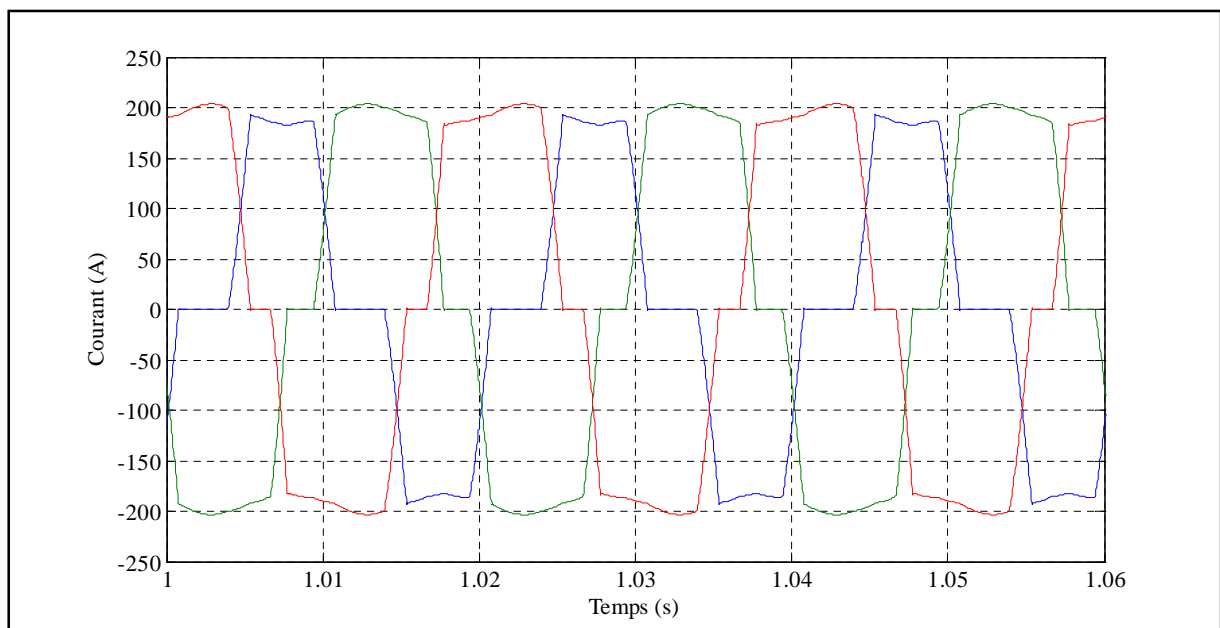


Figure II.17 Allure des courants à l'entrée du redresseur.

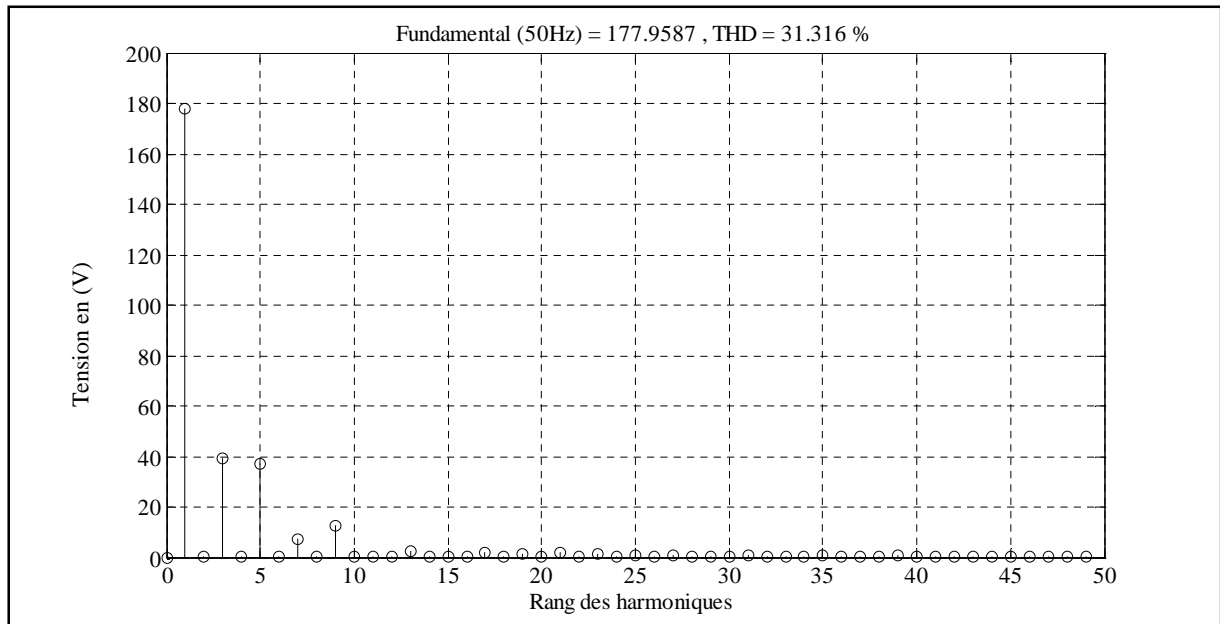


Figure II.18 Analyse spectrale des tensions à l'entrée du redresseur.

- **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 $R=0.4 \Omega$, $L= 15e-3 H$

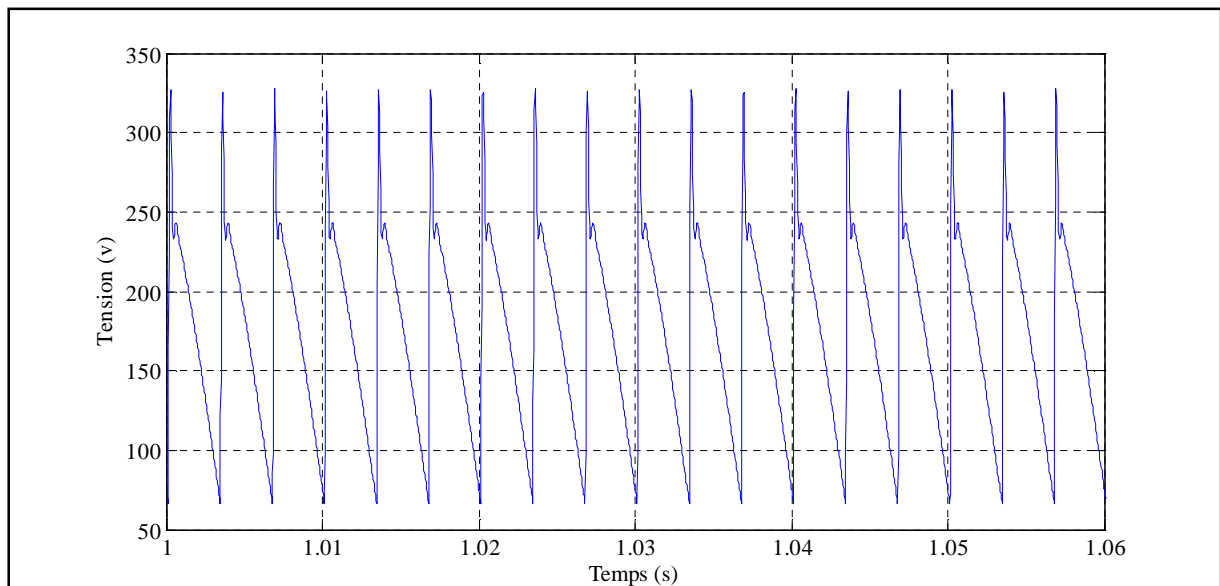


Figure II.19 Allure des tensions à la sortie du redresseur.

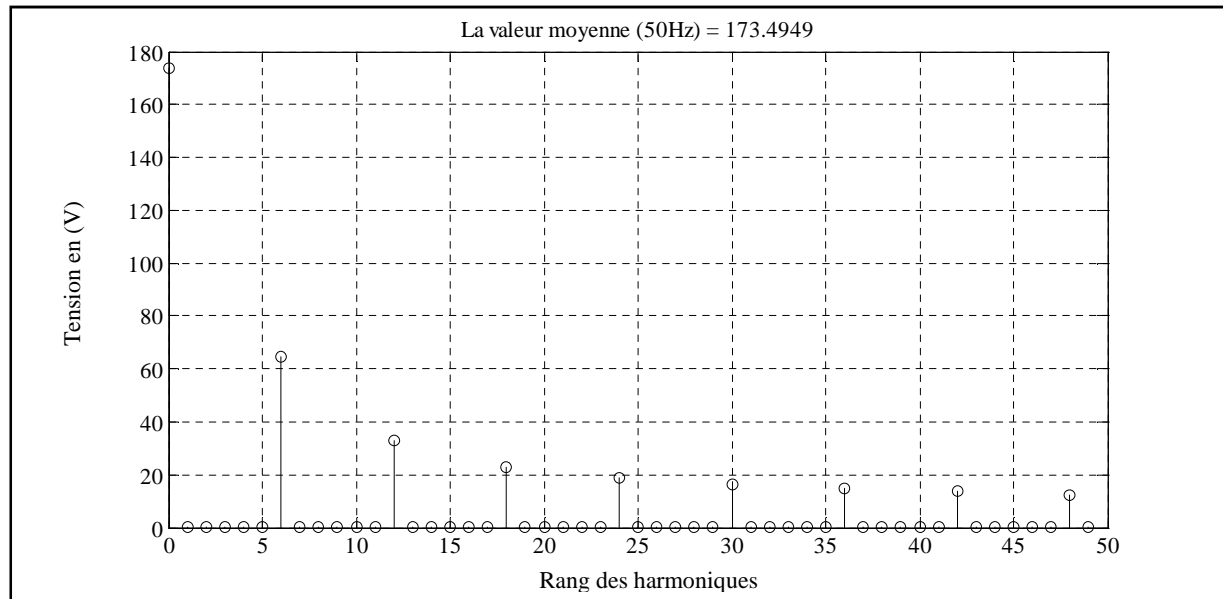


Figure II.20 Analyse spectrale des tensions à l'entrée du redresseur.

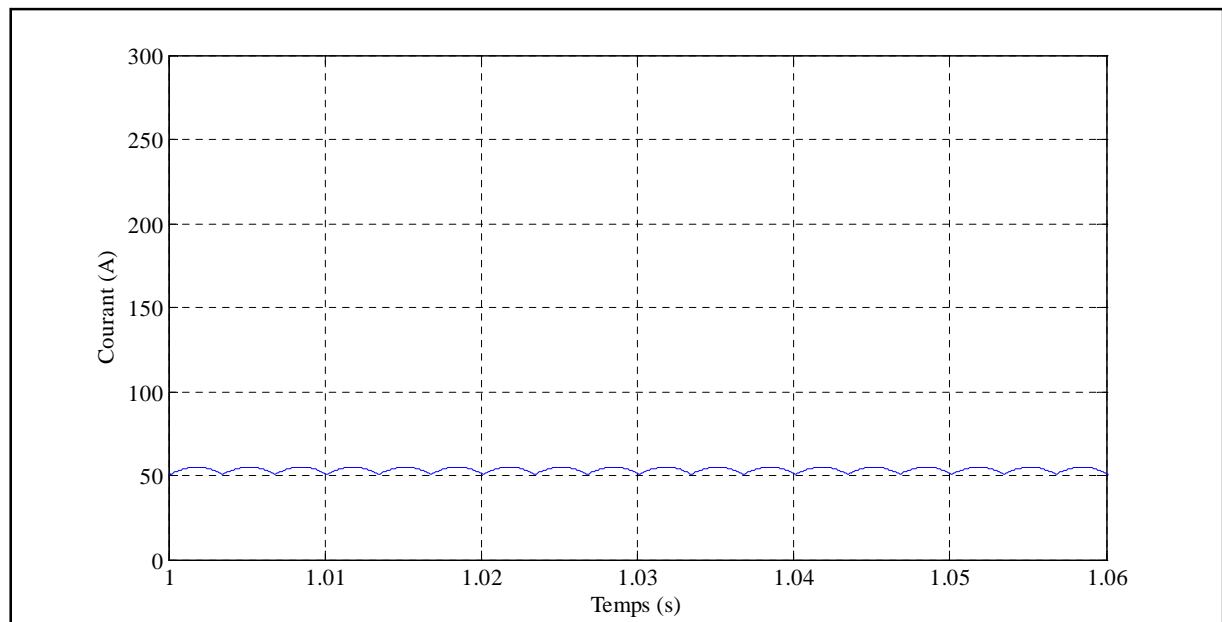


Figure II.21 Allure du courant redressé.

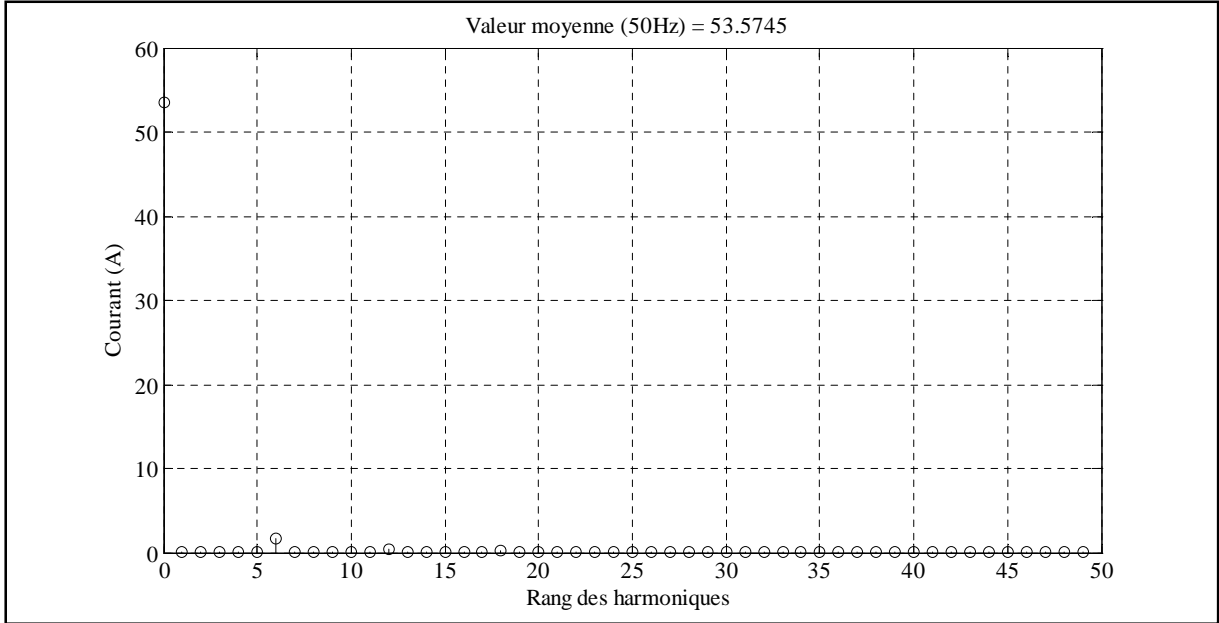


Figure II.22 Analyse spectrale du courant redressé.

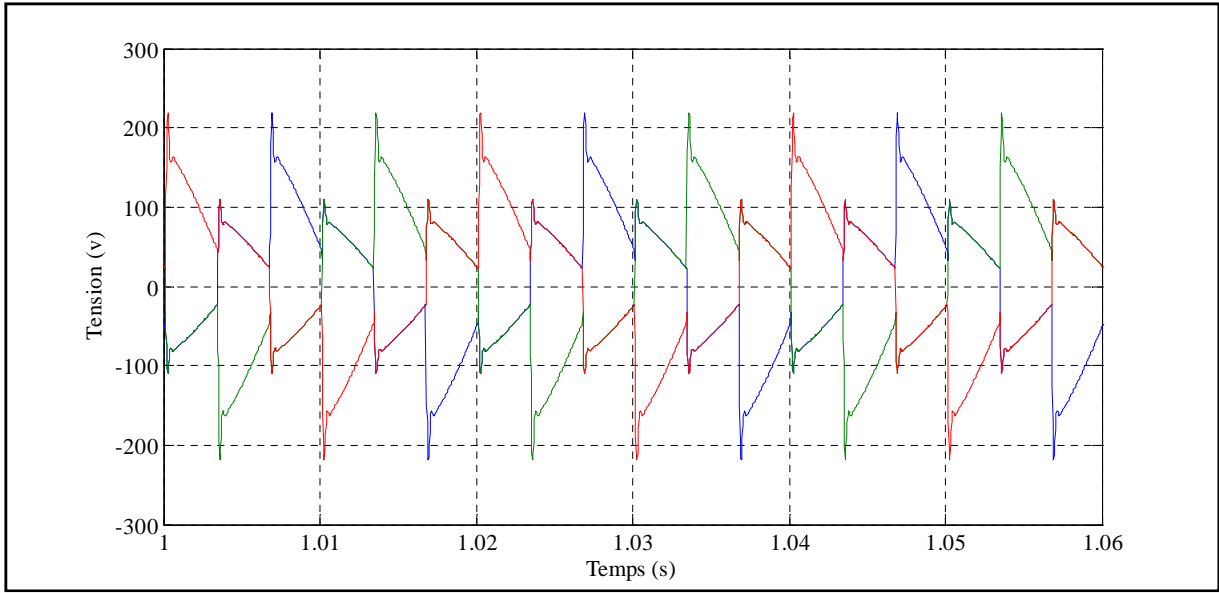


Figure II.23 Allure des tensions à l'entrée du redresseur.

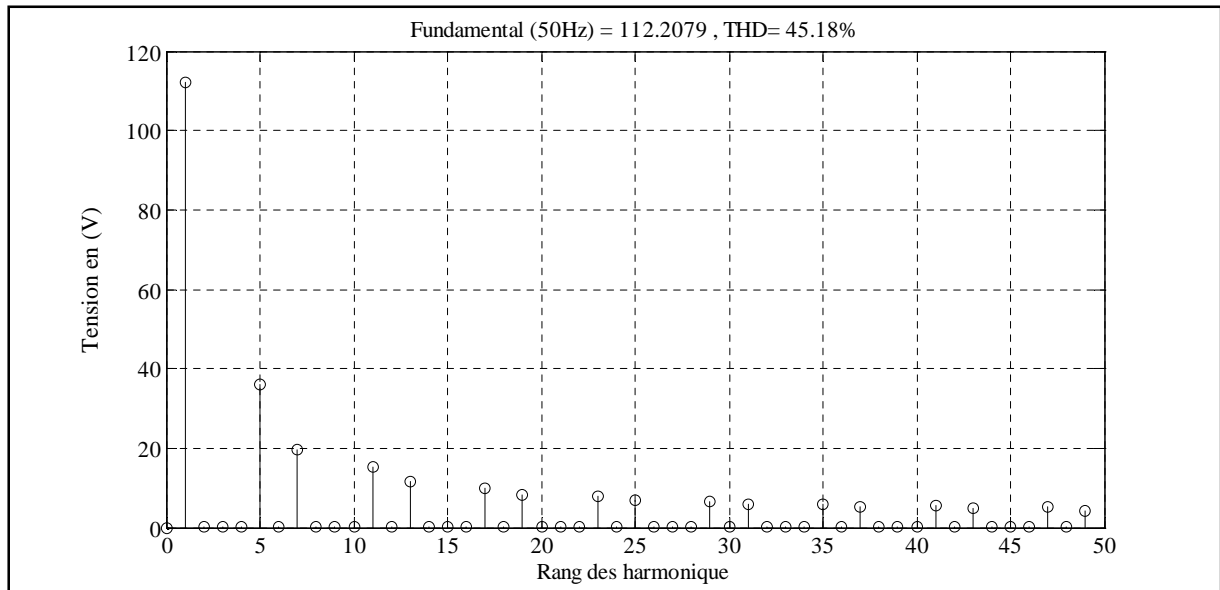


Figure II.24 Analyse spectrale des tensions à l'entrée du redresseur.

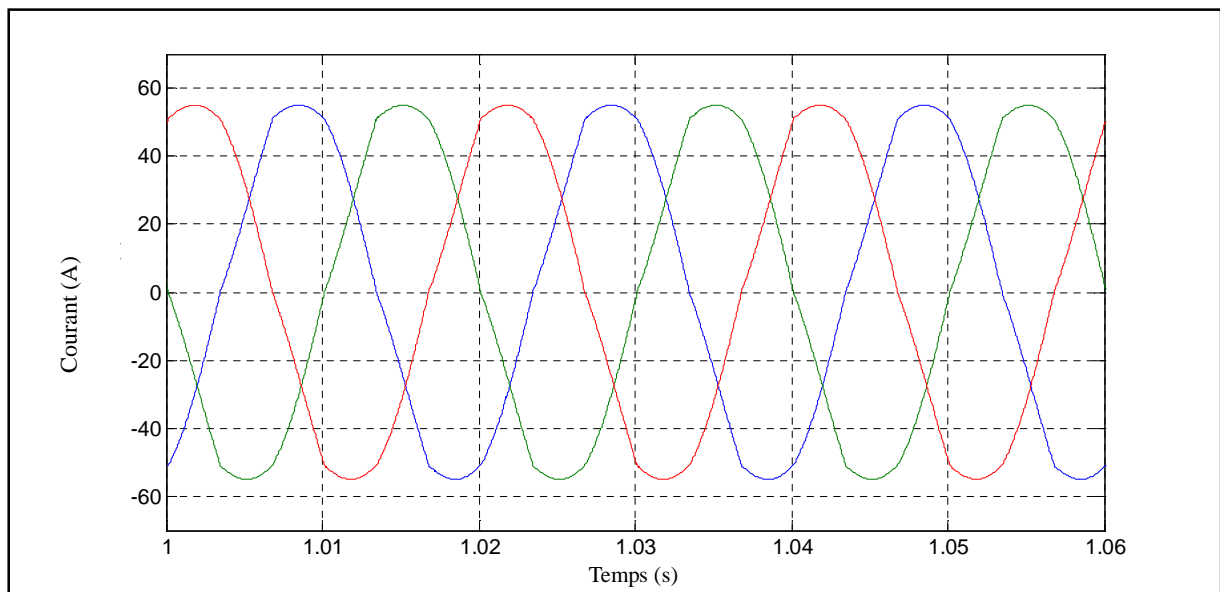


Figure II.25 Allure des courants à l'entrée du redresseur.

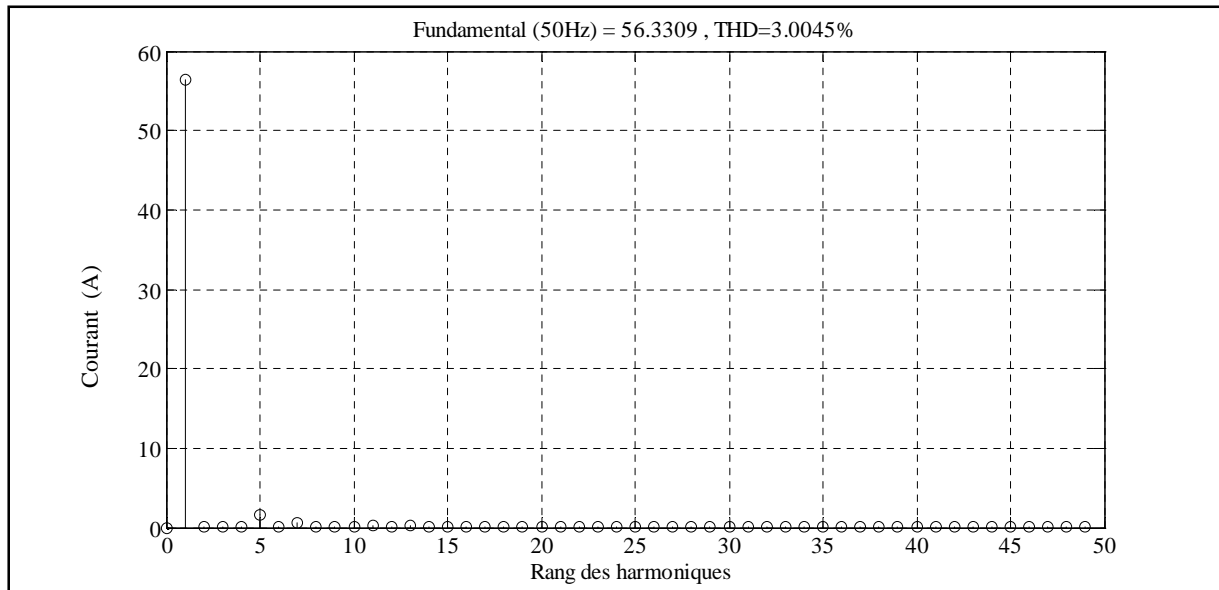


Figure II.26 Analyse spectrale des courants à l'entrée du redresseur.

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 au chutes de tensions qu'un tel filtre peut provoquer, du côté de la charge la valeur moyenne redressée est ramenée à 112V. De même que dans le cas précédent, cela pose un problème de control.

II.4 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons constaté qu'un réseau électrique, si 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 tous 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 indispensable. 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.

Chapitre III

Méthodes d'identifications des tensions de référence

I.1.Introduction

Le problème de la qualité d'énergie devient de plus en plus préoccupant depuis ces dernières décennies. Ceci à cause de l'utilisation accrue des charges dites non linéaires notamment les convertisseurs statiques, les ordinateurs, les fours à arc électriques etc. pour pallier à ce problème plusieurs solutions ont été développées.

Le filtre actif série s'est montré être la solution la plus efficace pour la compensation des problèmes liée à la tension. Cependant ces performances dépendent de la technique utilisée pour identifier les tensions harmoniques de références et la stratégie de commande mise en œuvre. Il existe plusieurs techniques d'identification des harmoniques de référence et stratégies de commande [26].

Dans ce chapitre on va présenter l'identification des tensions de références 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 séparation de la contribution de la partie active du fondamentale.

C'est la méthode d'identification la plus utilisée, elle est aussi appelée méthode des puissances réelles et imaginaires instantanées. Elle offre l'avantage de choisir les perturbations à compenser avec précision, rapidité et facilité d'implantation [27]. 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

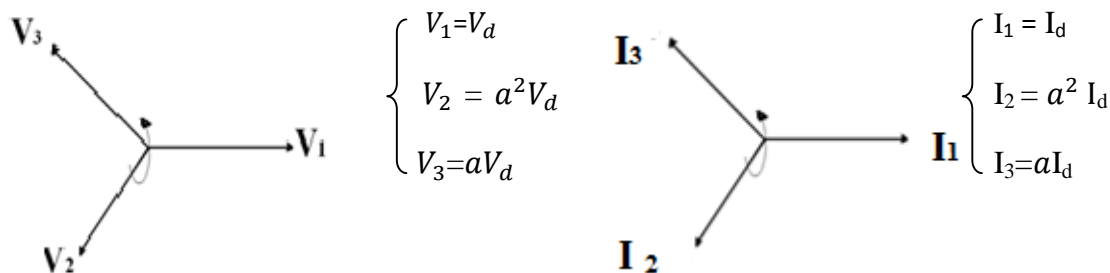
Le principe de la décomposition en composantes symétriques est d'exprimer un système des signaux sinusoïdaux triphasé quelconque, mais à la même fréquence (courant ou tension) comme la somme des trois systèmes triphasés particuliers, qui sont le système « direct », « Inverse » et « homopolaire » [27] [28] [29].

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° .

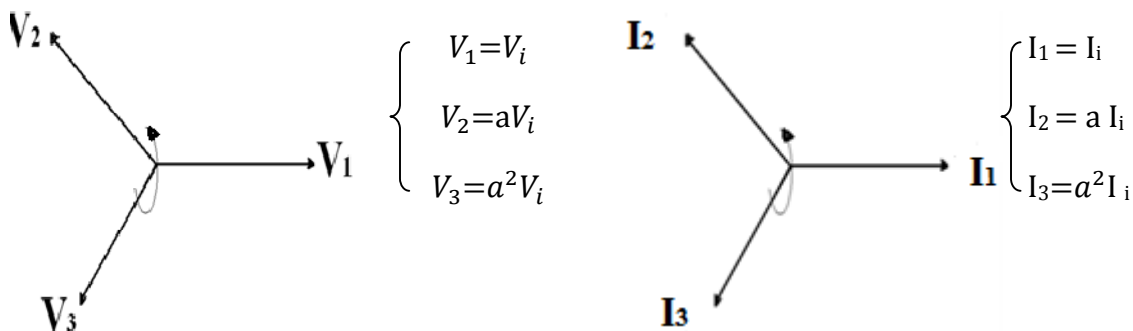
Pour un système inverse on passe de la phase 1 aux phases 2 et 3 par un déphasage de $+120^\circ$ et $+240^\circ$. Un système homopolaire est un système sinusoïdal triphasé dans lequel les trois phases sont identiques. Chacun de ces systèmes peut être associé à une représentation vectorielle ou encore 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 : $a = e^{j\frac{2\pi}{3}}$

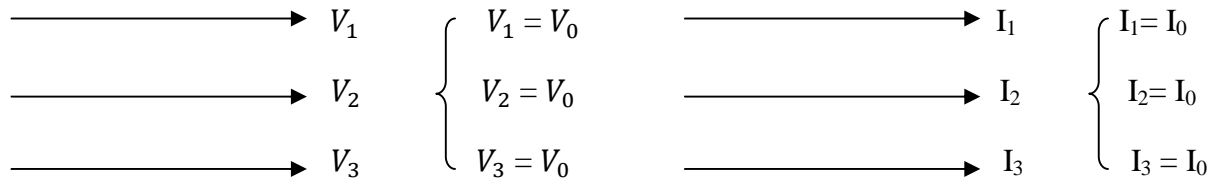
- **Système direct**



- **Système inverse**



- **Système homopolaire:**



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 :

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

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

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

Pour le courant :

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

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

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

Ces relations peuvent encore s'exprimer en matrices :

$$\begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_o \\ V_d \\ V_i \end{pmatrix} \quad (\text{III.7})$$

Et :

$$\begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_o \\ I_d \\ I_i \end{pmatrix} \quad (\text{III.8})$$

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

$$\begin{vmatrix} V_o \\ V_d \\ V_i \end{vmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{pmatrix} \begin{vmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{vmatrix} \quad (\text{III.9})$$

Et :

$$\begin{vmatrix} I_o \\ I_d \\ I_i \end{vmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{pmatrix} \begin{vmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{vmatrix} \quad (\text{III.10})$$

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} :

$$F_3^{-1} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{pmatrix} \quad (\text{III.12})$$

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 :

$$V_{1,2,3} = F_3 \cdot V_{o,d,i} \quad (\text{III.13})$$

$$V_{o,d,i} = F_3^{-1} \cdot V_{1,2,3} \quad (\text{III.14})$$

Et :

$$I_{1,2,3} = F_3 \cdot I_{o,d,i} \quad (\text{III.15})$$

$$I_{o,d,i} = F_3^{-1} \cdot I_{1,2,3} \quad (\text{III.16})$$

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

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 α, β) en utilisant la transformation de Clark, 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 (α, β) [27,30,31,32].

En présence des harmoniques, la puissance apparente est composée de trois parties : active (P), décalage (Q) et déformante (D), l'ensemble des puissances du a la déformation et au décalage des courant par rapport à la tension représente la puissance réactive, ainsi l'expression de la puissance apparent sera donne par la relation suivante :

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

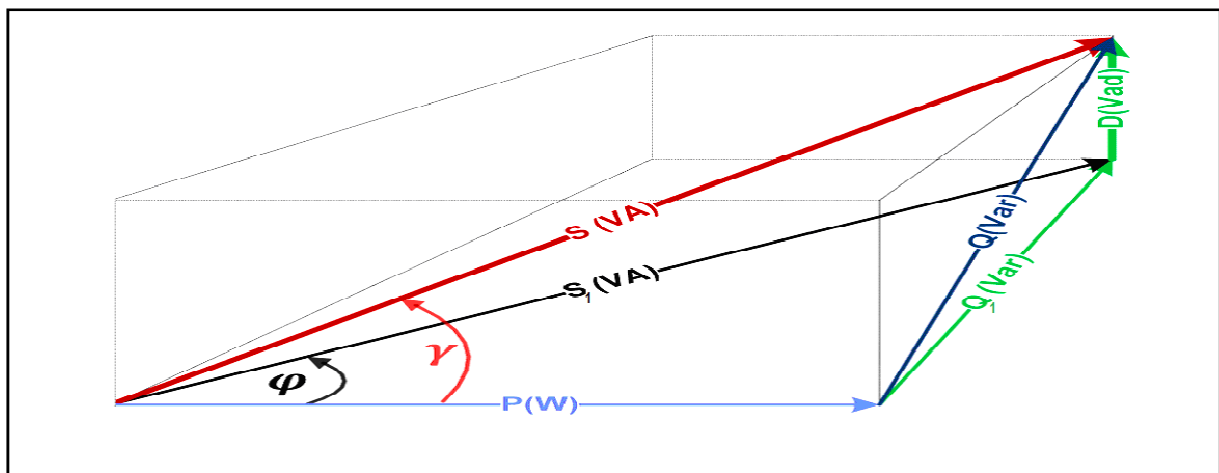


Figure III.1 représentation de la puissance apparente.

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 :

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

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

Avec :

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

Si on note (V_d, V_q) et (I_d, I_q) 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) et (I_d, I_q) 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 :

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

Chapitre III Méthodes d'identifications des tensions de référence

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.

\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, réactive 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 :

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

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

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

$$P_o = V_o * I_o \quad (\text{III.30})$$

$$Q = V_d * I_q - V_q * I_d \quad (III.31)$$

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 véhiculé par le fondamentale peut être dimensionné. Un circuit constitué d'un filtre passe haut avec un soustracteur peut être employé, comme le présente le schéma suivant :



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 premier 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 :

$$P = \bar{p} + \tilde{p} \quad (III.32)$$

$$q = \bar{q} + \tilde{q} \quad (III.33)$$

$$P_0 = \bar{P}_0 \quad (III.34)$$

\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} :

$$\begin{pmatrix} V_{hd} \\ V_{hq} \end{pmatrix} = \frac{1}{I_d^2 + I_q^2} \begin{pmatrix} I_d & I_q \\ I_q & -I_d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{p} - \bar{p}_0 \\ \tilde{q} \end{pmatrix} \quad (\text{III.35})$$

Avec :

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

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

$$\begin{pmatrix} V_{refa} \\ V_{refb} \\ V_{refc} \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{hd} \\ V_{hq} \\ V_0 \end{pmatrix} \quad (\text{III.36})$$

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

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

$$V_{refc} = \sqrt{\frac{2}{3}} (\cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) V_d + \sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) V_q) \quad (\text{III.39})$$

($V_{refa}, V_{refb}, V_{refc}$) : Les tensions harmoniques références.

III.2.3.3 Algorithme d'identification

La méthode que nous avons expliquée si dessus, peut être résumée par les schémas ci-après qui illustrent les différentes étapes qui nous permettent d'obtenir les valeurs des tensions de références.

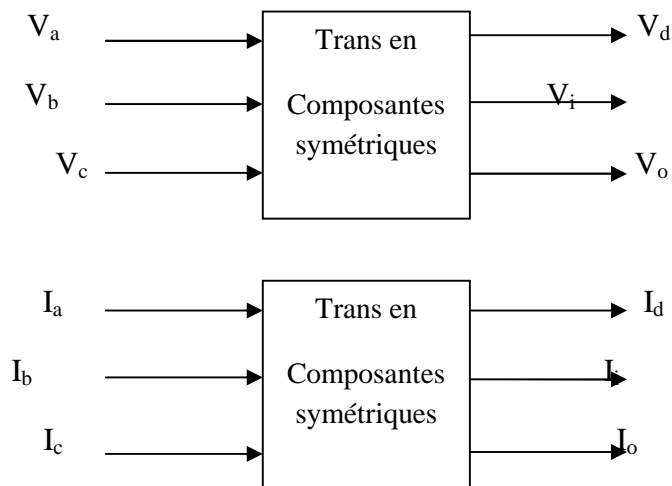
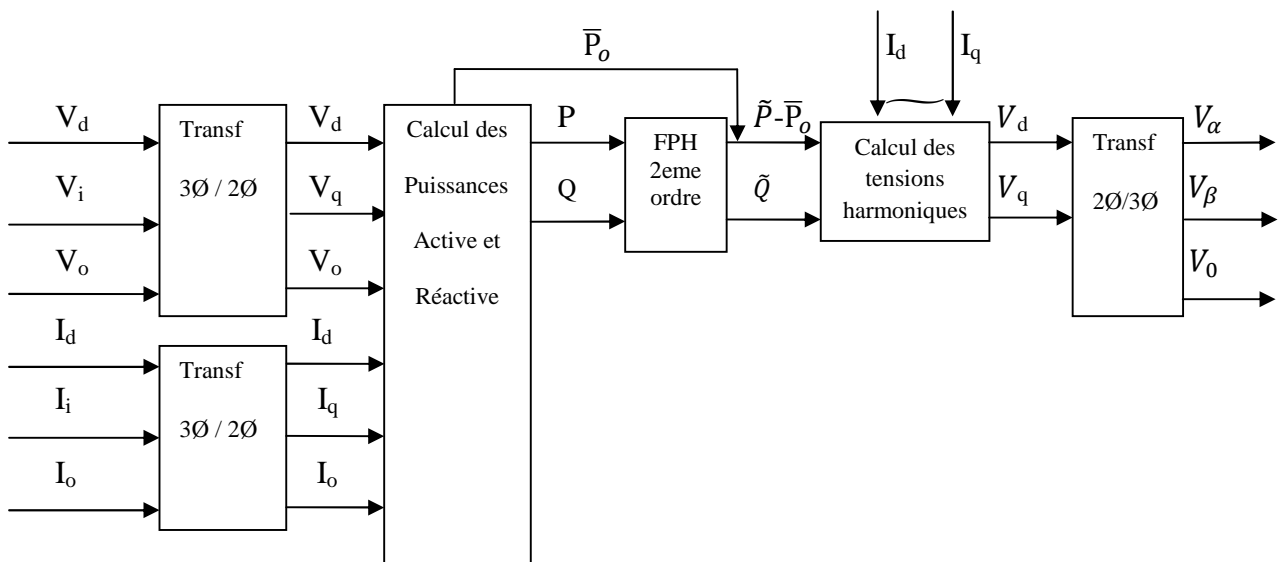


Figure III.4 : Méthode d'extraction des composantes symétriques.



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.

Chapitre IV

Modélisation de filtre actif série

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 sinusoïdale quel que soit les déformations provenant du réseau et les valeur 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 sensible 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 souhaitées. 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. [28, 30]

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 identifiées à partir de la tension du réseau perturbé.

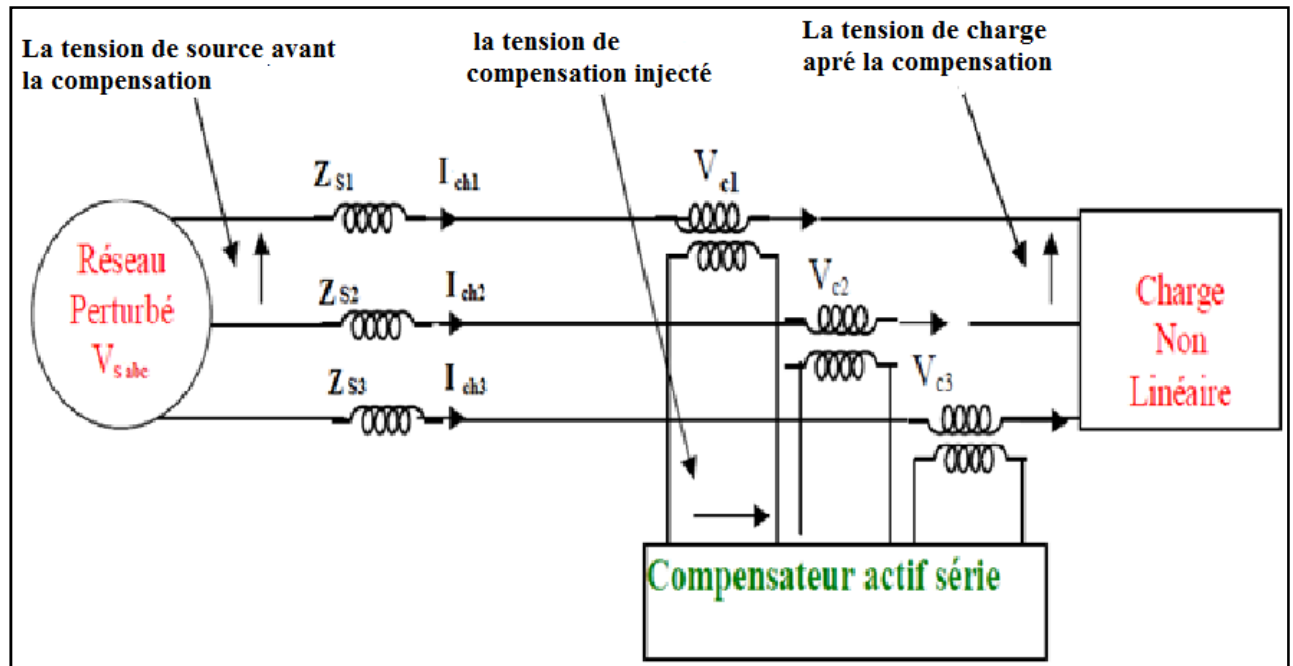


Figure IV.1 Principe du filtrage actif.

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 provoquées 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 [3].

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

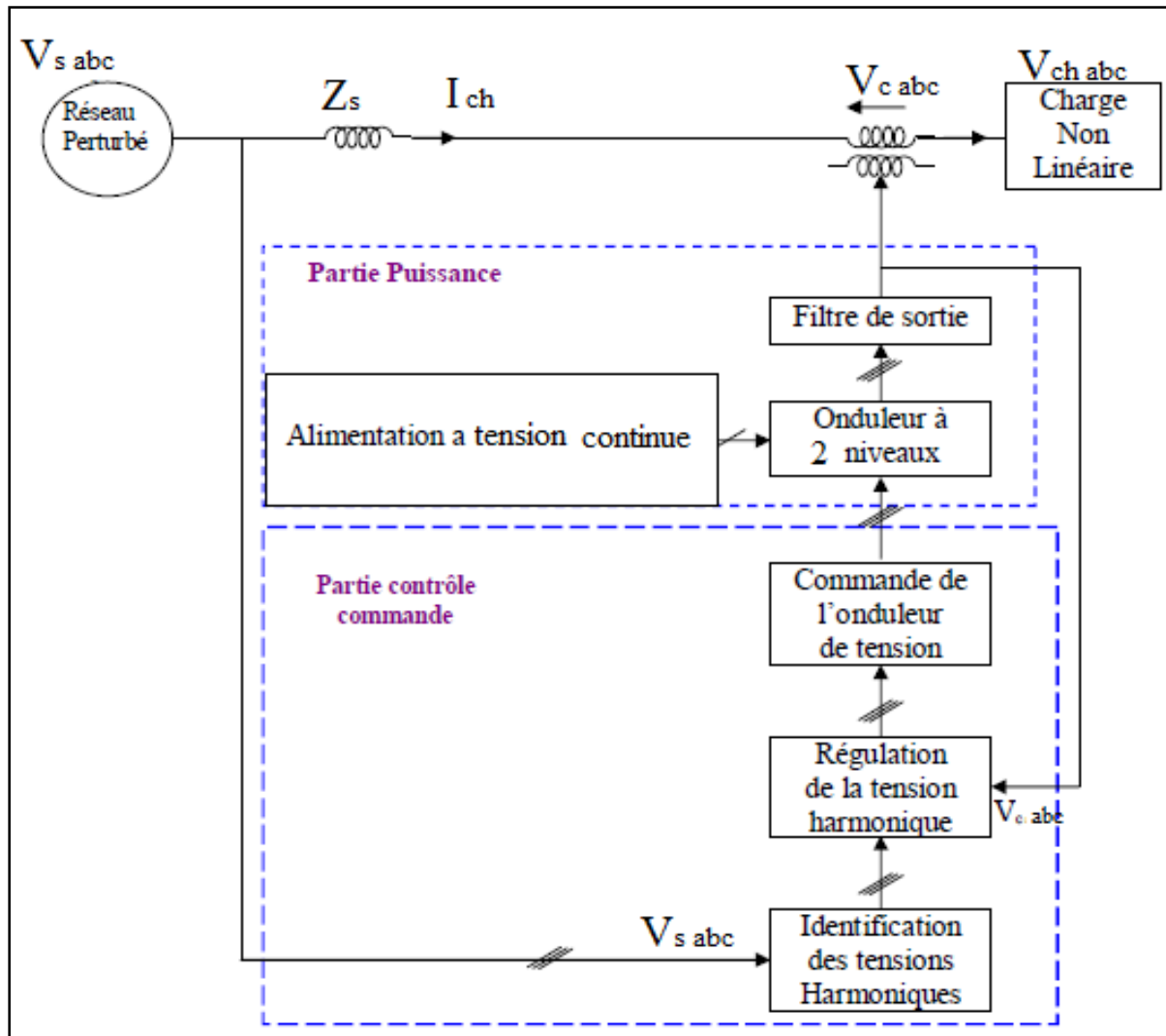


Figure IV.2 Structure générale d'un filtre actif série.

IV.4. Etude de la partie puissance

La partie puissance est constituée d'un onduleur de tension triphasé à deux niveaux commandé par MLI vectorielle, d'un élément source d'énergie de nature tension continu, d'un filtre de sortie de premier ordre, et d'un transformateur triphasé permettant d'incrémenter le filtre en série afin de pouvoir mettre en série les tensions avec le générateur pour avoir les tensions souhaitées aux bornes du récepteur. [33]

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.

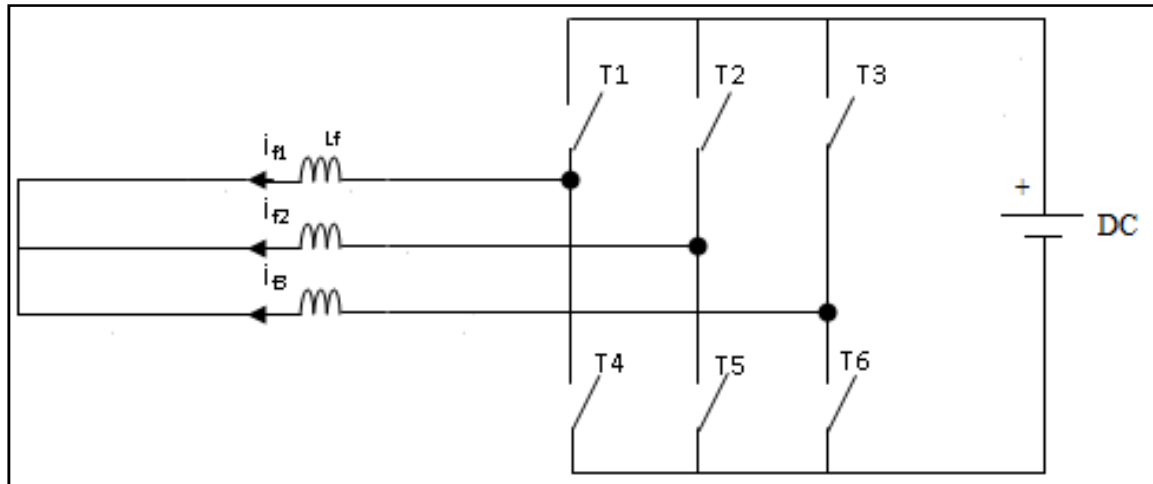


Figure IV.3 Filtre active à structure active.

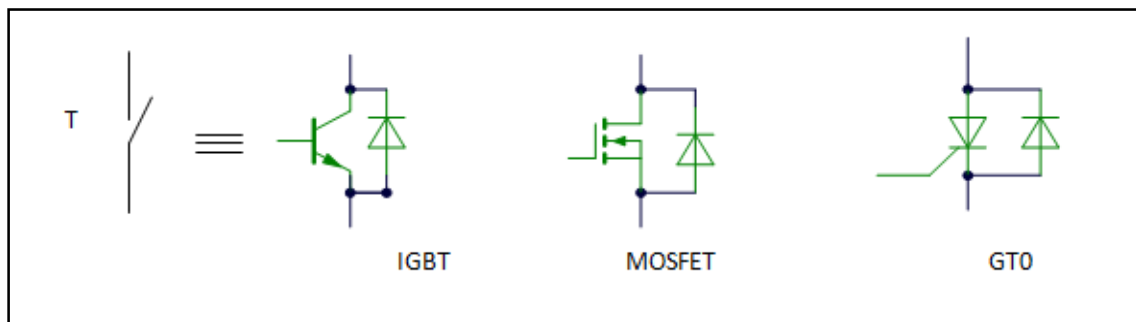


Figure IV.4 Interrupteurs de puissance.

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 :

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

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

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

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 déduit 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. Alimentation de l'onduleur

Pour l'alimentation de l'onduleur, une source de tension parfaitement lissée de 600V a été utilisée. Cette source peut être, un hacheur à cumulation inductive connecté aux bornes d'un redresseur pour fixer la tension continue à 600 V.

IV.4.4. 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

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 MLI vectorielle.

IV.5.1. Commande par MLI vectorielle

a) Principe

Dans la modulation vectorielle, on représente par seul vecteur les trois tensions sinusoïdales de sortie que l'on désire. On approxime au mieux ce vecteur pendant chaque intervalle de modulation en agissant sur la commande des trois jeux d'interrupteurs complémentaires[34], (T1-T2), (T3-T4), (T5- T6).

b) Transformation de Concordia

La modulation vectorielle est donc basée sur la représentation des trois tensions de phases comme un seul vecteur d'espace, ceci est obtenu par le biais d'une transformation d'un plan triphasé en un plan biphasé, il s'agit de la transformation de Concordia qui consiste substituer aux trois tensions de phase V_a, V_b, V_c exprimées dans le repère triphasé (abc) leurs composantes V_α, V_β, V_o exprimées dans un système de coordonnées biphasé ($\alpha\beta o$).

La relation entre les deux repères est :

$$f_{\alpha\beta o} = C_{\alpha\beta o} f_{abc} \quad (IV.10)$$

telque:

$$C_{\alpha\beta o} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 2 & -1 & 2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 1 & 2 & 1 & 2 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (IV.11)$$

$$f_{\alpha\beta o} = [f_\alpha \quad f_\beta \quad f_o]^T; f_{abc} = [f_a \quad f_b \quad f_c]$$

f Peut être soit une tension, un courant ou un flux.

Comme il est décrit sur la figure (IV.5), cette transformation est équivalente à une projection orthogonale de $[a \quad b \quad c]^T$ sur un système bidimensionnel perpendiculaire au vecteur $[1 \quad 1 \quad 1]^T$ (équivalent au plan ($\alpha\beta o$) dans le système de coordonnées triphasé [35] ; [36].

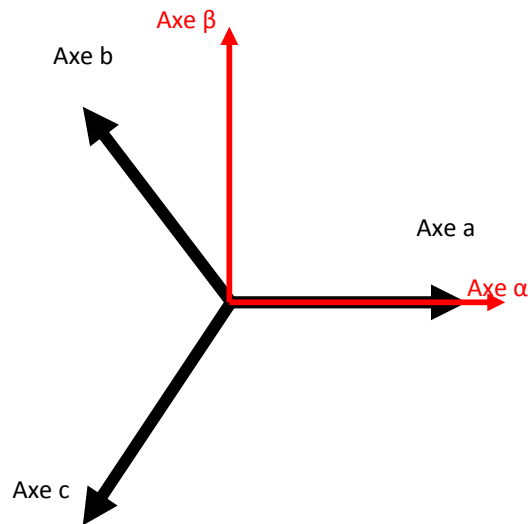


Figure IV.5 Représentation du repère triphasé abc et le repère biphasé $\alpha\beta$.

c) Représentation vectorielle

Dans le plan biphasé (α, β) et en considérant \vec{V}_f le vecteur correspondant aux tensions de l'onduleur, les huit cas possibles du vecteur \vec{V}_f sont donnés par la Figure (IV.6).

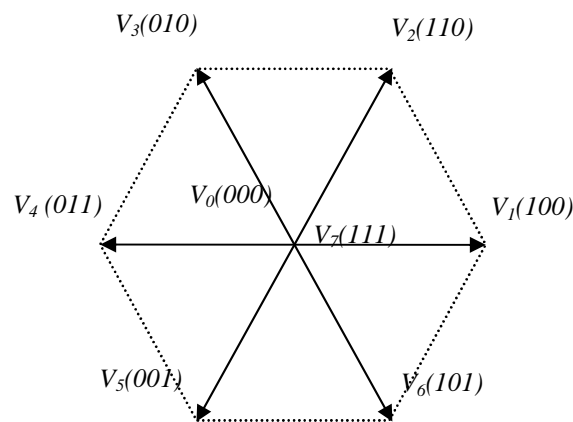


Figure IV.6 Les six vecteurs de commande forment un hexagone.

Où V_{ref} 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.6).

La même transformation peut être appliquée à la tension désirée à la sortie de l'onduleur de telle façon à obtenir la tension de référence désirée V_{ref} dans le référentiel $(\alpha\beta)$ figure (IV.7) Donc, la modulation vectorielle peut être implémentée de la manière suivante :

- 1^{ère} étape : Détermination des tensions de référence $V_\alpha, V_\beta, V_{ref}$ et l'angle α [37];
- 2^{ème} étape : Génération des séries d'impulsions T_1, T_2 et T_0 ;
- 3^{ème} étape : Détermination des instants de commutation pour chaque transistor ($T1$ à $T6$)

d) Etape1 : la détermination de $V_\alpha, V_\beta, V_{ref}$ et l'angle α

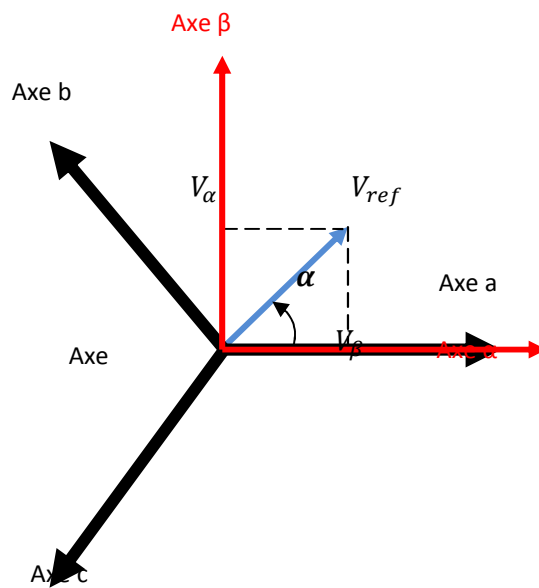


Figure IV.7 Représentation de V_{ref} dans le repère $\alpha\beta$.

D'après la figure (IV.7) , $V_\alpha, V_\beta, V_{ref}$ et l'angle α sont déterminés comme suit :

$$V_\alpha = V_{an} \cos(0) - V_{bn} \cos\left(\frac{\pi}{3}\right) - V_{cn} \cos\left(\frac{\pi}{3}\right) = V_{an} - \frac{1}{2} V_{bn} - \frac{1}{2} V_{cn} \tag{IV.12}$$

$$V_\beta = V_{an} \cos\frac{\pi}{2} + V_{bn} \cos\frac{\pi}{6} - V_{cn} \cos\frac{\pi}{6} = 0 + \frac{\sqrt{3}}{2} V_{bn} - \frac{\sqrt{3}}{2} V_{cn} \tag{IV.13}$$

1

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} \tag{IV.14}$$

$$|V_{ref}| = \sqrt{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \tag{IV.15}$$

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{V_\alpha}{V_\beta}\right) = \omega t = 2\pi f t$$

f : Fréquence du fondamental.

e) Étape 2: génération des séries d'impulsions T_1 , T_2 et T_0

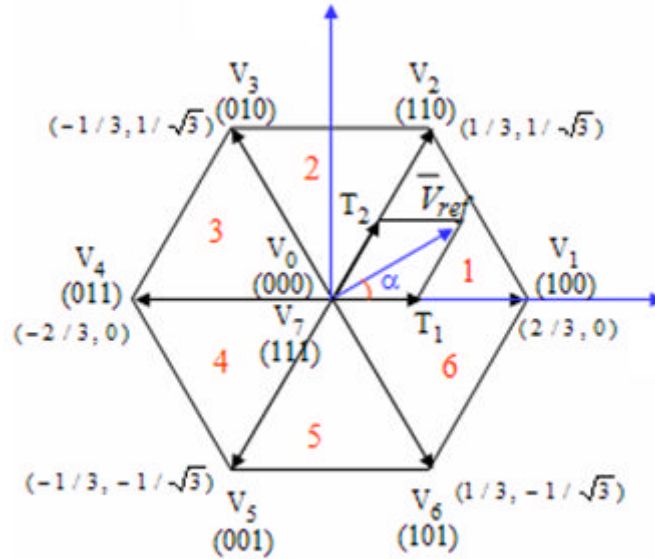


Figure IV.8 Représentation des huit vecteurs de commande et de $[\bar{V}_{ref}]$ dans le plan $\alpha\beta$.

- Durée des temps de commutation dans le secteur 1

$$\int_0^{T_z} \bar{V}_{ref} dt = \int_0^{T_1} \bar{V}_1 dt + \int_{T_1}^{T_1+T_2} \bar{V}_2 dt + \int_{T_1+T_2}^{T_z} \bar{V}_0 dt \quad (IV.16)$$

$$T_z \cdot \bar{V}_{ref} = (T_1 \bar{V}_1 + T_2 \bar{V}_2) \quad (IV.17)$$

$$\Rightarrow T_z \cdot \bar{V}_{ref} \begin{bmatrix} \cos(\alpha) \\ \sin(\alpha) \end{bmatrix} = T_1 \frac{2}{3} U_c \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + T_2 \frac{2}{3} U_c \begin{bmatrix} \cos(\pi/3) \\ \sin(\pi/3) \end{bmatrix} \quad (IV.18)$$

Tel que : $0 \leq \alpha \leq 60^\circ$

$$T_1 = T_z r \frac{\sin(\pi/3 - \alpha)}{\sin(\pi/3)} \quad (IV.19)$$

$$T_2 = T_z r \frac{\sin(\alpha)}{\sin(\pi/3)} \quad (IV.20)$$

$$T_0 = T_z - (T_1 + T_2) \quad (IV.21)$$

Tel que : $T_z = \frac{1}{f_z}$ et $r = \frac{|\bar{V}_{ref}|}{\frac{2}{3} U_c}$

- Durée des temps de commutation dans un secteur quelconque [37]

$$\begin{aligned}
T_1 &= \frac{\sqrt{3} T_z |\bar{V}_{ref}|}{U_c} \left(\sin\left(\frac{\pi}{3} - \alpha + \frac{n-1}{3}\pi\right) \right) \\
&= \frac{\sqrt{3} T_z |\bar{V}_{ref}|}{U_c} \left(\sin\left(n\frac{\pi}{3} - \alpha\right) \right) \\
&= \frac{\sqrt{3} T_z |\bar{V}_{ref}|}{U_c} \left(\sin\frac{n\pi}{3} \cos\alpha - \cos\frac{n\pi}{3} \sin\alpha \right)
\end{aligned} \tag{IV.22}$$

$$\begin{aligned}
T_2 &= \frac{\sqrt{3} T_z |\bar{V}_{ref}|}{U_c} \left(\sin\left(\alpha - \frac{n-1}{3}\pi\right) \right) \\
&= \frac{\sqrt{3} T_z |\bar{V}_{ref}|}{U_c} \left(-\cos\alpha \sin\frac{n-1}{3}\pi + \sin\alpha \cos\frac{n-1}{3}\pi \right)
\end{aligned} \tag{IV.23}$$

$$T_0 = T_z - T_1 \tag{IV.24}$$

(n allons de 1 à 6 (n étant le nombre de secteurs total; $0 \leq \alpha \leq 60^\circ$))

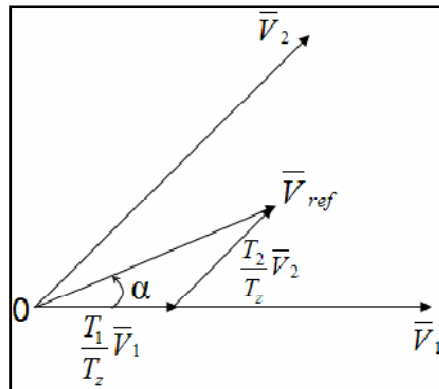


Figure IV.9 Représentation vectorielle de V_{ref} en fonction de deux tensions adjacentes.

f) Étape 3: détermination des instants de commutation pour chaque interrupteur

Le tableau (IV.2), montre des portions de temps (durée des commutations) qui doivent être allouées à chaque vecteur de tension dans chaque secteur. [37]

Tableau IV.2 Temps de commutations dans chaque secteur.

Secteur	Les interrupteurs du haut	Les interrupteurs du bas
1	$S_1 = T_1 + T_2 + T_0 / 2$ $S_3 = T_2 + T_0 / 2$ $S_5 = T_0 / 2$	$S_4 = T_0 / 2$ $S_6 = T_1 + T_0 / 2$ $S_2 = T_1 + T_2 + T_0 / 2$
2	$S_1 = T_1 + T_0 / 2$ $S_3 = T_1 + T_2 + T_0 / 2$ $S_5 = T_0 / 2$	$S_4 = T_2 + T_0 / 2$ $S_6 = T_0 / 2$ $S_2 = T_1 + T_2 + T_0 / 2$
3	$S_1 = T_0 / 2$ $S_3 = T_1 + T_2 + T_0 / 2$ $S_5 = T_2 + T_0 / 2$	$S_4 = T_1 + T_2 + T_0 / 2$ $S_6 = T_0 / 2$ $S_2 = T_1 + T_0 / 2$
4	$S_1 = T_0 / 2$ $S_3 = T_1 + T_0 / 2$ $S_5 = T_1 + T_2 + T_0 / 2$	$S_4 = T_1 + T_2 + T_0 / 2$ $S_6 = T_2 + T_0 / 2$ $S_2 = T_0 / 2$
5	$S_1 = T_2 + T_0 / 2$ $S_3 = T_0 / 2$ $S_5 = T_1 + T_2 + T_0 / 2$	$S_4 = T_1 + T_0 / 2$ $S_6 = T_1 + T_2 + T_0 / 2$ $S_2 = T_0 / 2$
6	$S_1 = T_1 + T_2 + T_0 / 2$ $S_3 = T_0 / 2$ $S_5 = T_1 + T_0 / 2$	$S_4 = T_0 / 2$ $S_6 = T_1 + T_2 + T_0 / 2$ $S_2 = T_2 + T_0 / 2$

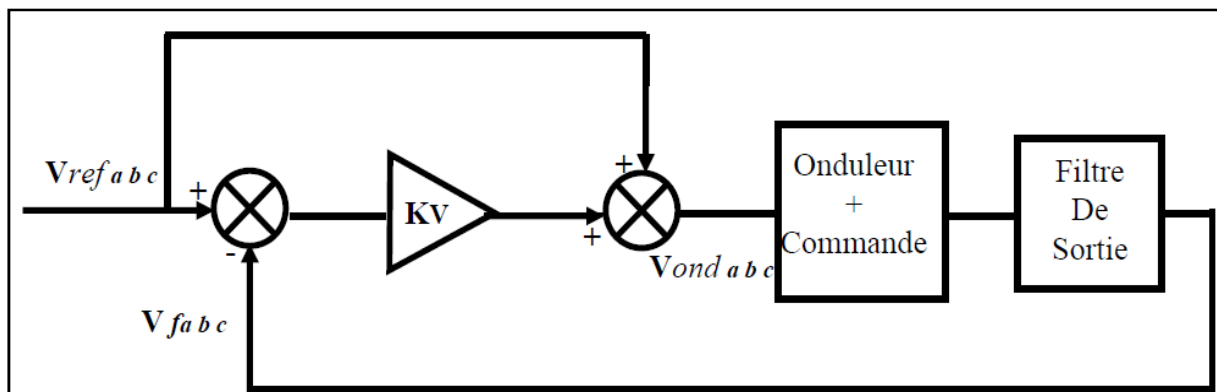


Figure IV.10 Boucle de régulation de la tension injectée.

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 V

Résultats de simulation

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 du réseau.

Après une description des éléments caractéristiques, nous représentons les résultats obtenus grâce à des programmes de simulation que nous avons développés sous MATLAB / SIMULINK.

V.2 Conditions de simulation

Les éléments caractérisant le réseau électrique sont les suivants :

Source :

Tension efficace : $V_s = 230V$

La fréquence : $f = 50 \text{ Hz}$

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

La charge polluante : Redresseur triphasé tout thyristors qui alimente une charge de type moteur à courant continu, modélisé par une inductance en série avec une résistance et une F.C.E.M, avec :

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

Filtre de sortie sur la ligne du filtre actif série :

$$C = 20 \mu\text{F}, R = 1 \Omega$$

Coté continue de l'onduleur :

$$V = 600 \text{ V}$$

Ainsi le programme de simulation sous Matlab/Simulink est le suivant :

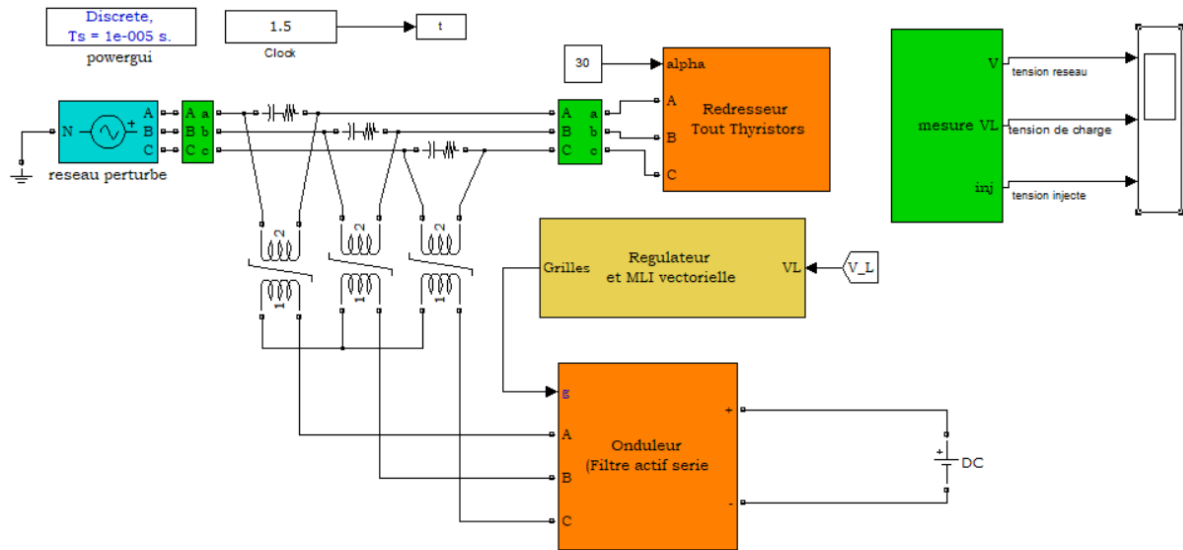


Figure V.1 Modèle du filtre actif série sous Matlab/Simulink.

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.2) :

- De 0.5 ms à 1 ms : Une chute de tension de 50%
- De 1 ms à 1,5 ms fonctionnement normal
- Ensuite de 1.5 ms à 2 ms : une surtension de 25 % est appliquée
- A l'instant $t = 2$ ms une surtension de 50 % est appliquée

Ensuite, nous allons nous intéresser à l'impact de ces perturbations après leur compensation sur la tension instantanée fournie par le redresseur thyristors à sa charge ; cette tension doit avoir une valeur moyenne constante à quelque soit l'état du réseau.

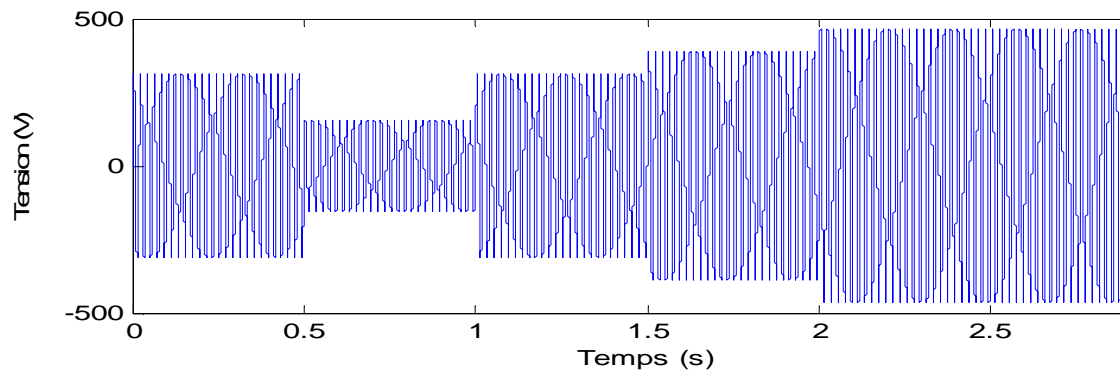


Figure V.2 Tension du réseau.

Sa charge représente la charge sensible nécessitant une alimentation stable triphasé est équilibré. Ainsi, le profil des tensions de références à incéré pour compose les fluctuations subit par le réseau sont représentées respectivement sur les figures (V.3) et (V.4)

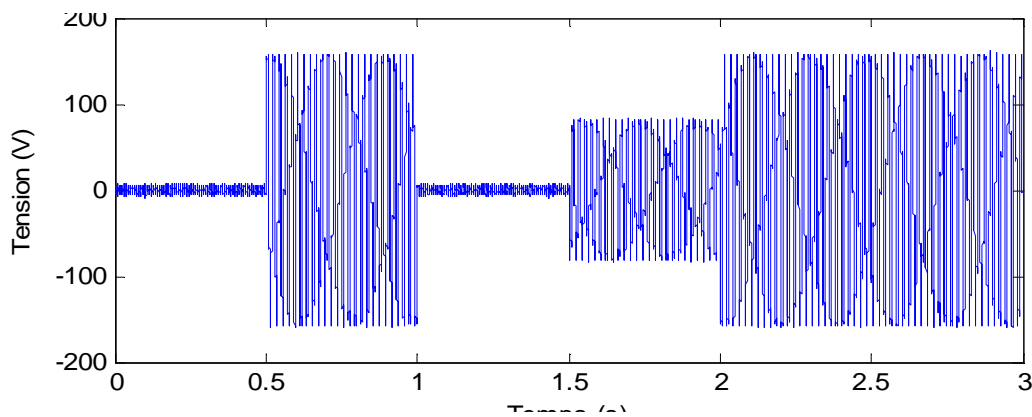


Figure V.3 Tension aux bornes du filtre actif série.

Après simulation une analyse spectrale de la tension de charge est effectuée, ces résultats sont représentés sur la figure (V.5). 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.

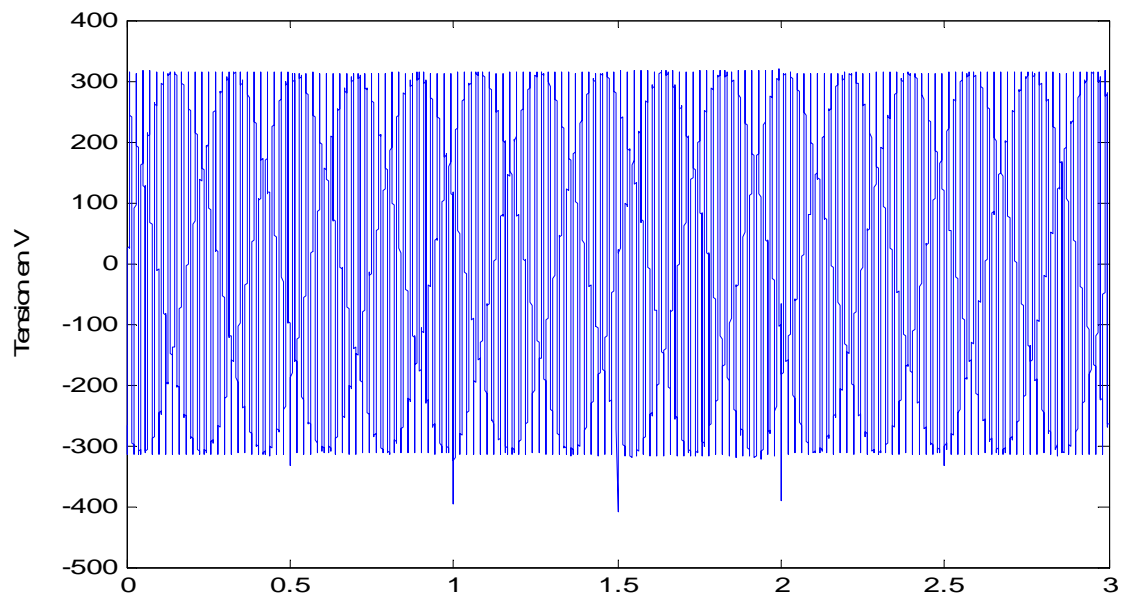


Figure V.4 Tension de charge.

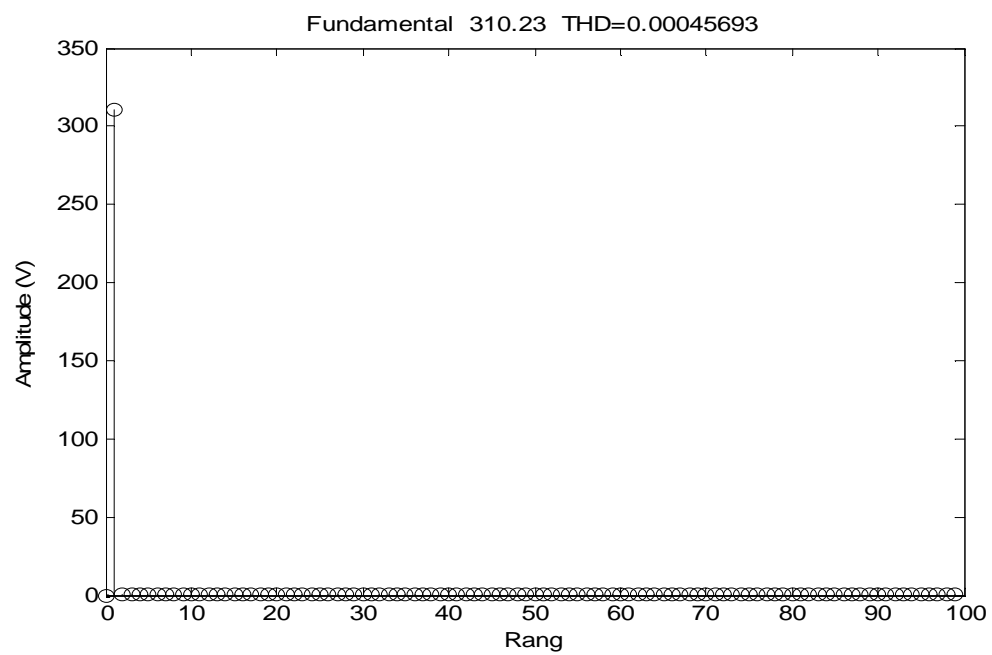


Figure V.5 Spectre harmonique de la tension de charge.

La figure (V.6) 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.7). Ce dernier a un profil sinusoidal.

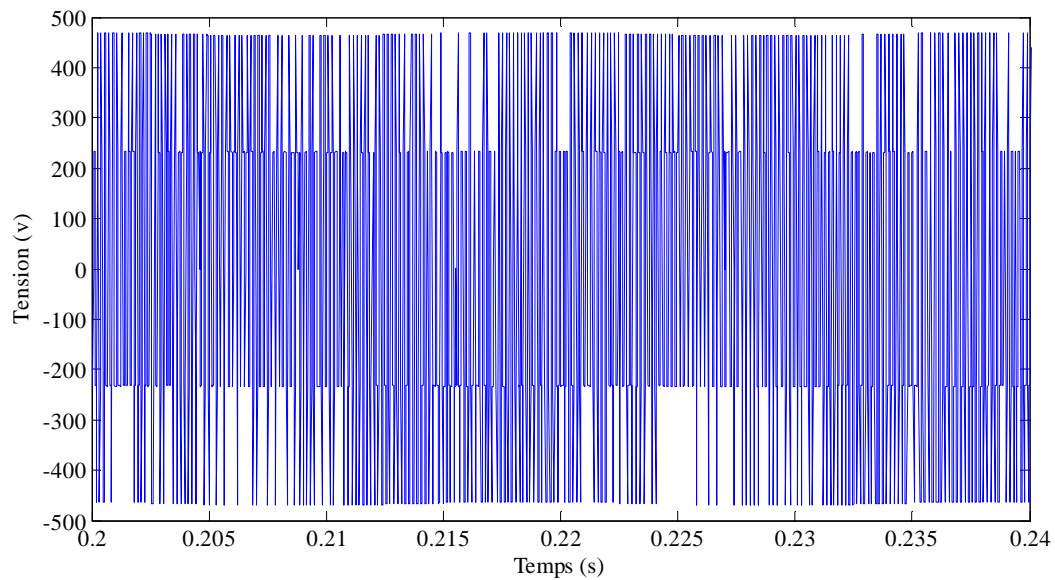


Figure V.6 La tension d'onduleur.

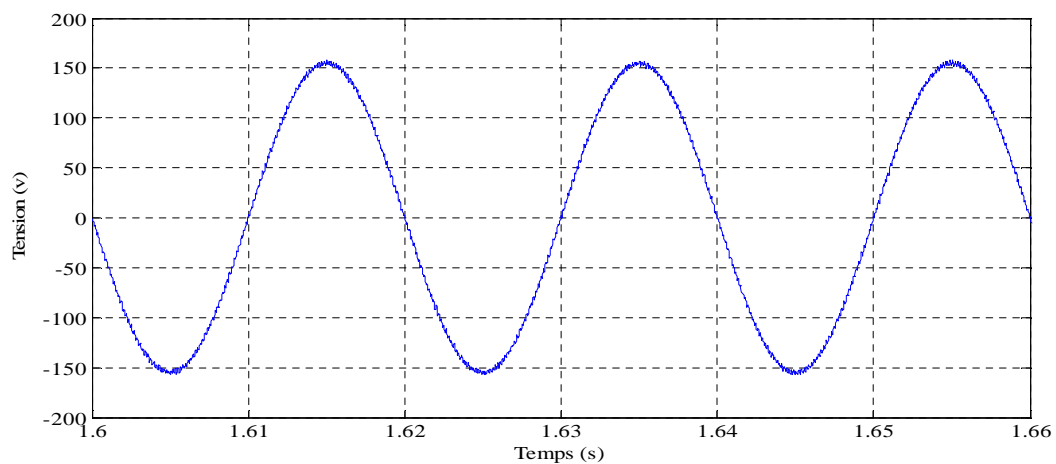
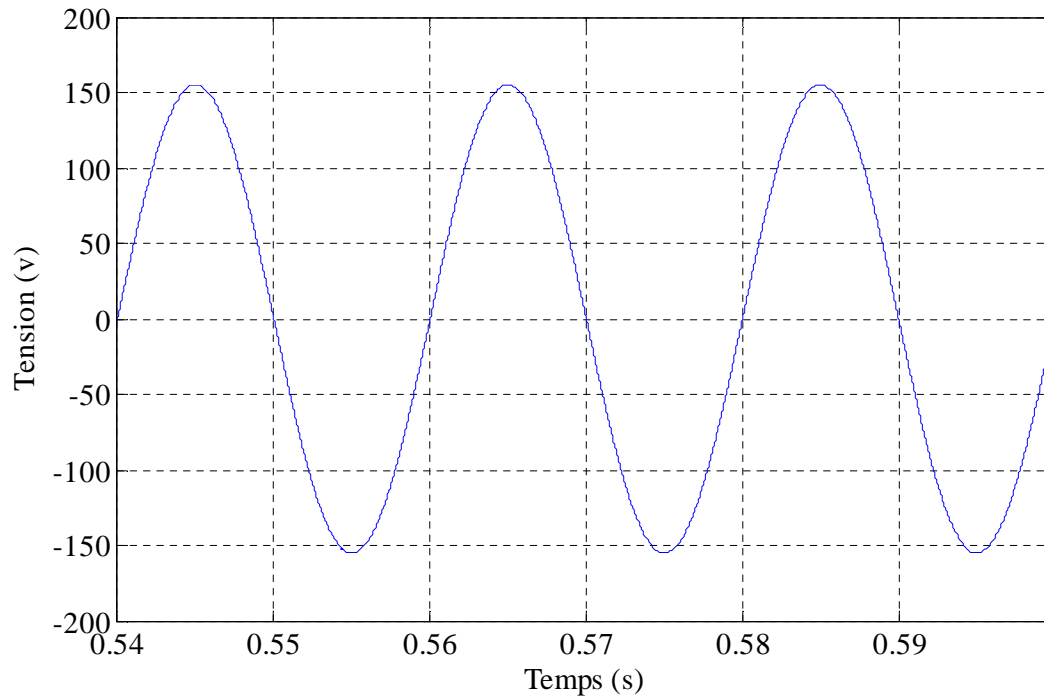


Figure V.7 Forme de la tension de l'onduleur après filtrage.

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

Les figures (V.8) et (V.9) 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 109.68V ce qui confirme la proportion de 50% de chute, et un THD de 0.022 %.



FigureV. 8 Tension du réseau.

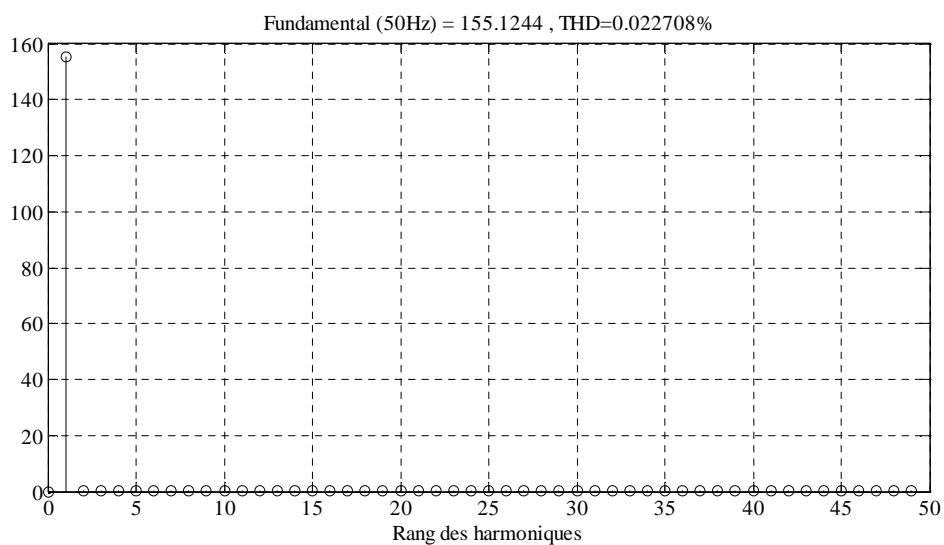


Figure V.9 Spectre harmonique de tension du réseau.

Ainsi, Les figures (V.10) et (V.11) 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 3 %, cette valeur respecte largement la norme CEI qui imposent un THD globale inférieur à 5%. On constate également que le spectre de la tension est au voisinage du rang $n=80$, ceci est du au fait du choix des secteurs au niveau de l'algorithme de la MLI vectorielle ou notre fréquence de découpage est a 2kHz. La somme des grandeurs représentées sur les figure V.9 et figure V.7 nous restitue que la tension du réseau triphasé équilibré et constante de 230V de fréquence 50Hz.

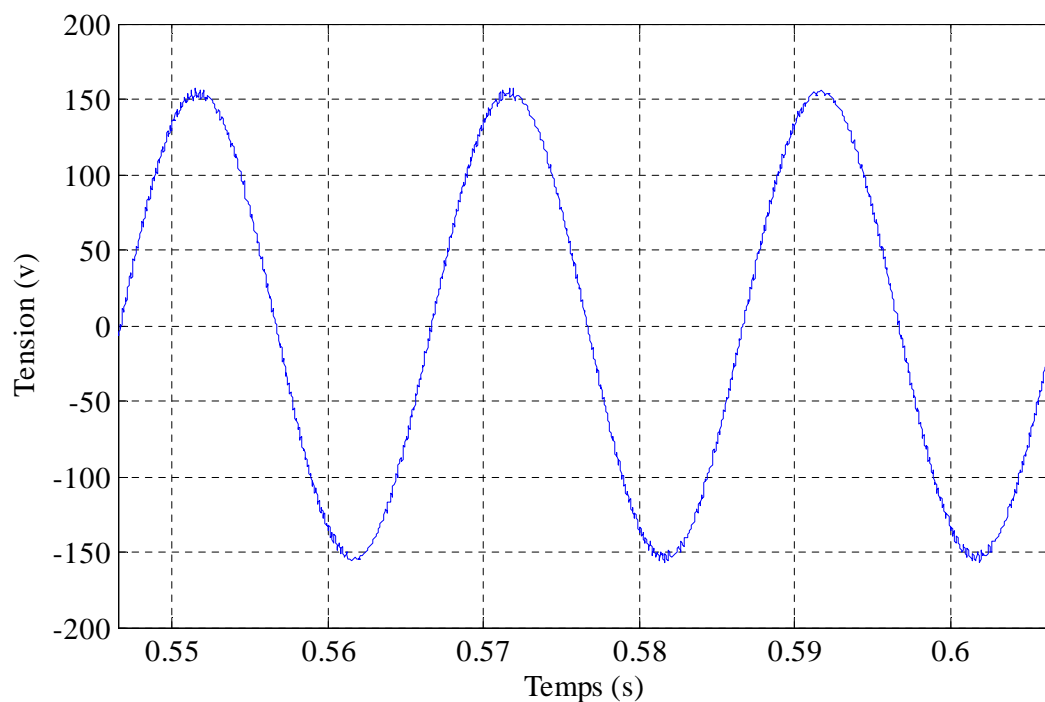


Figure V.10 Tension fournie par l'onduleur après filtrage.

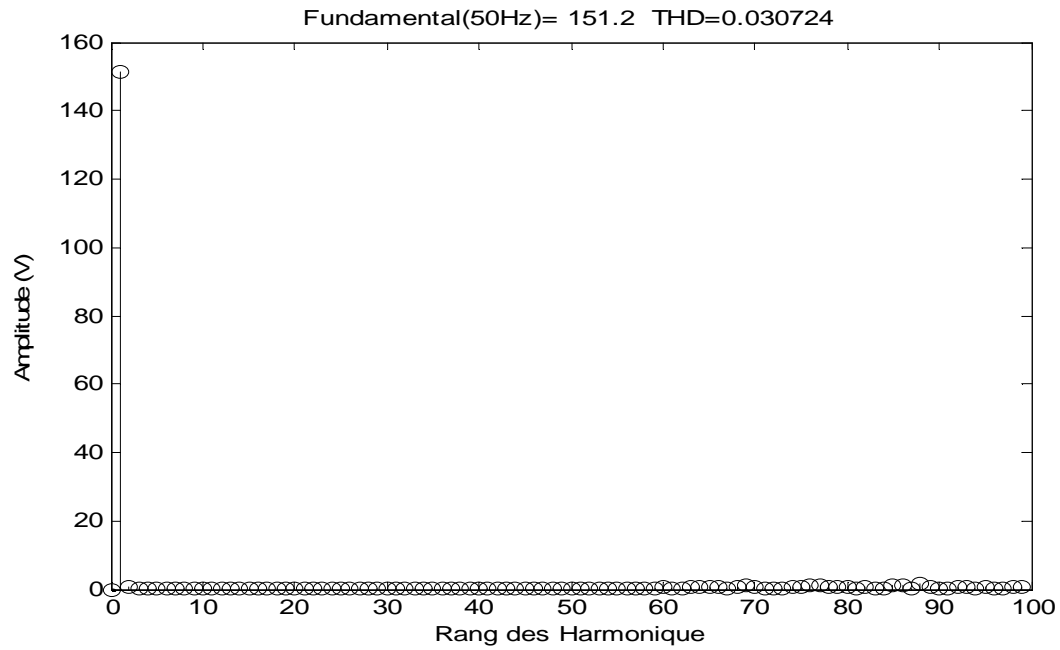


Figure V.11 Spectre harmonique de la tension injectée.

Les figures (V.12) et (V.13) 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 0.048%.

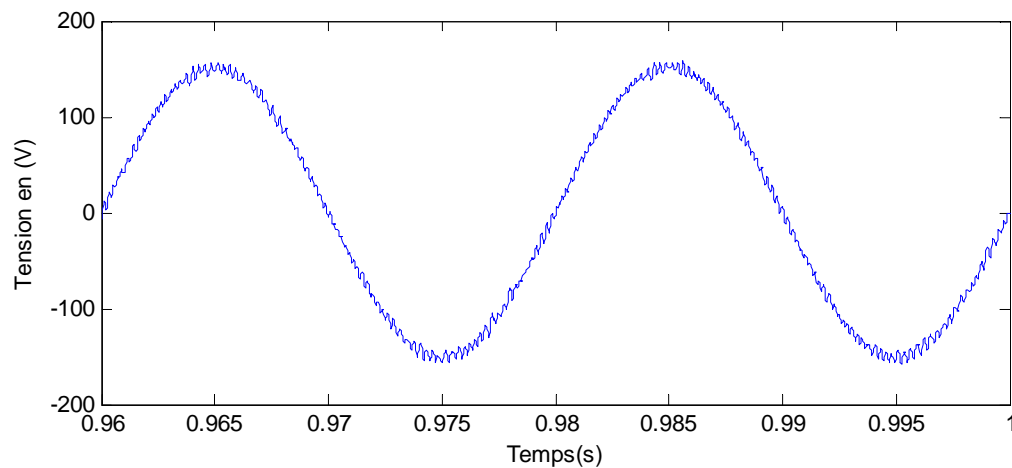


Figure V. 12 Tension de charge.

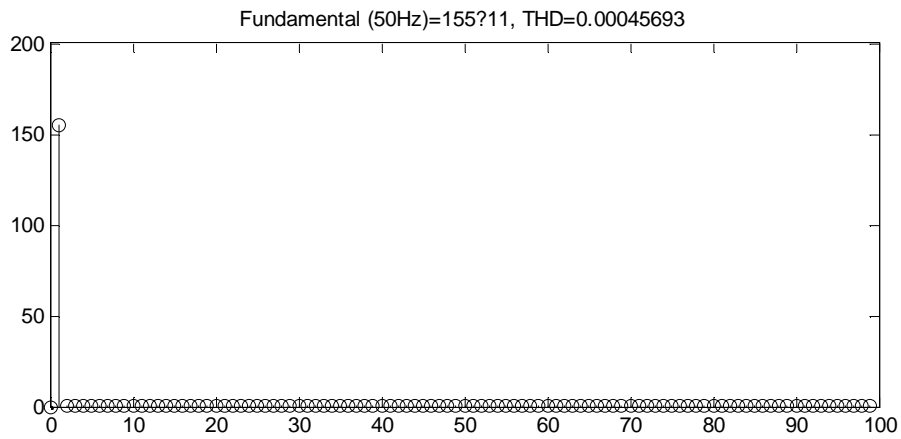


Figure V.13 Spectre harmonique de la tension de charge.

Les figures (V.14) et (V.15) 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%.

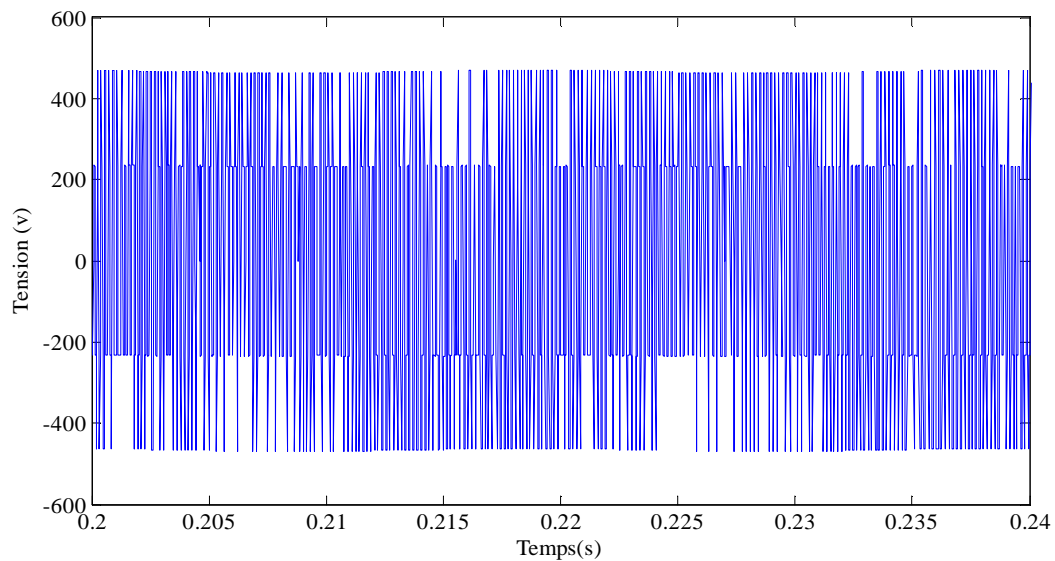


Figure V.14 La tension d'onduleur.

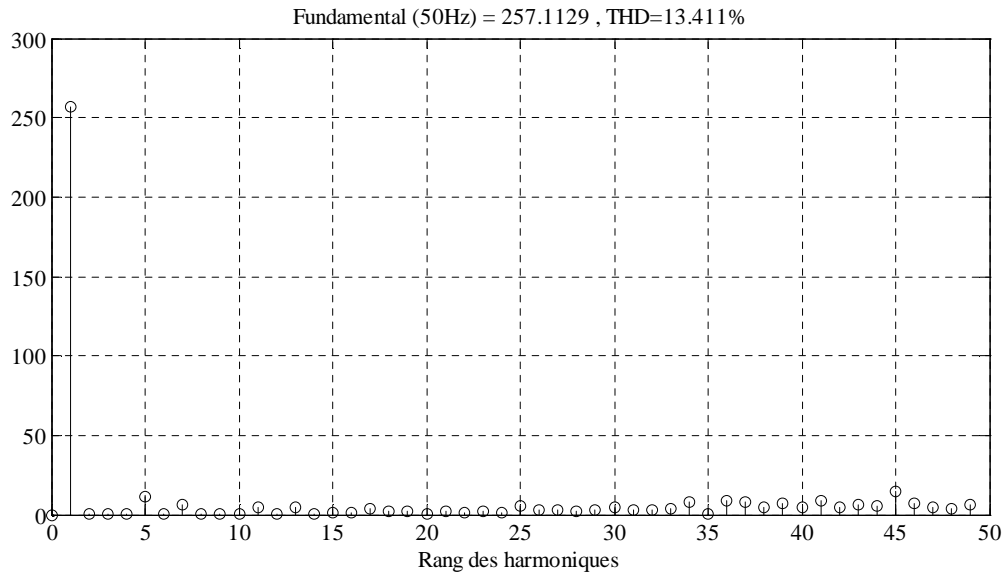


Figure V.15 Spectre harmonique de la tension d'onduleur.

La figure (V.16) représente la forme d'onde de la tension du réseau sous tension et celle injectée par l'onduleur, dans le but de corriger la tension aux borne du redresseur, malgré la perturbation au niveau du réseau.

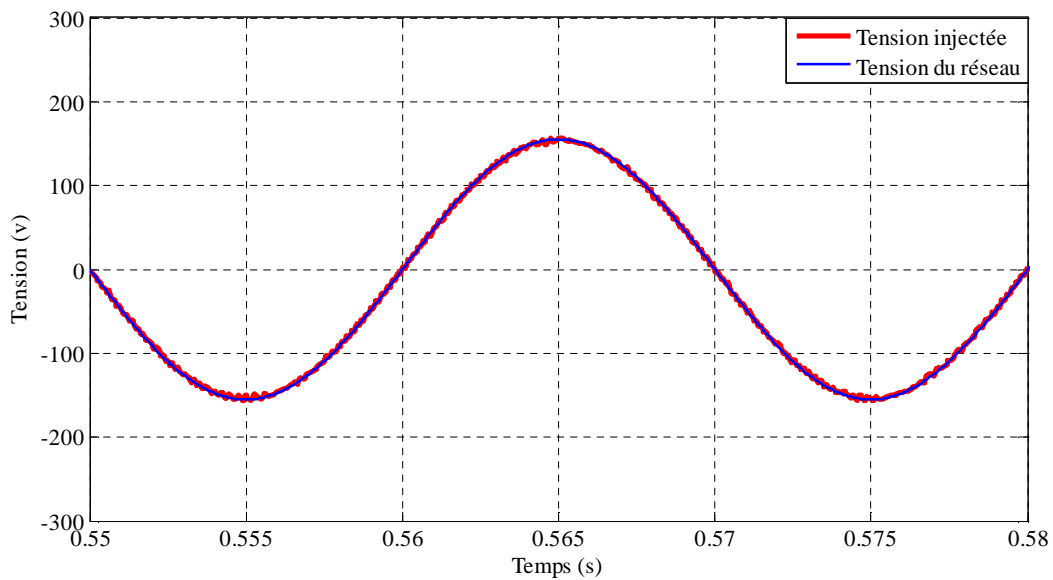


Figure V.16 La tension de réseau et la tension injectée.

En conclusion nous constatons que les deux tensions réseau et filtre sont de même forme, avec la même amplitude et en phase ce qui nous fournit les 230V, 50Hz au bornes de la charge.

V.3.2 Analyse du cas d'une surtension réseau

Les figures (V.17) et (V.18) 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 329.06V ce qui confirme la proportion de 50% de surtension, avec un THD de 0.022 %.

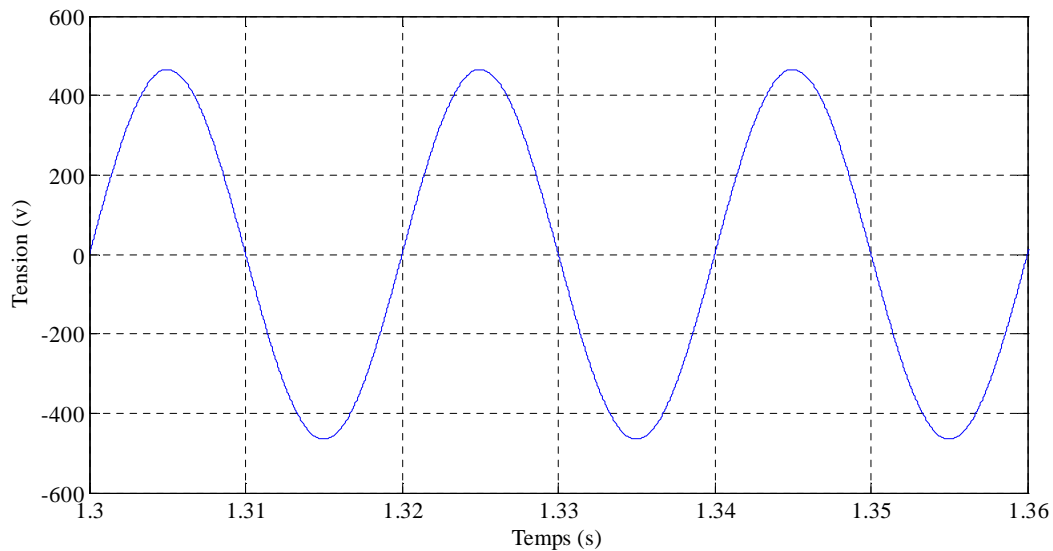


Figure V.17 La tension du réseau.

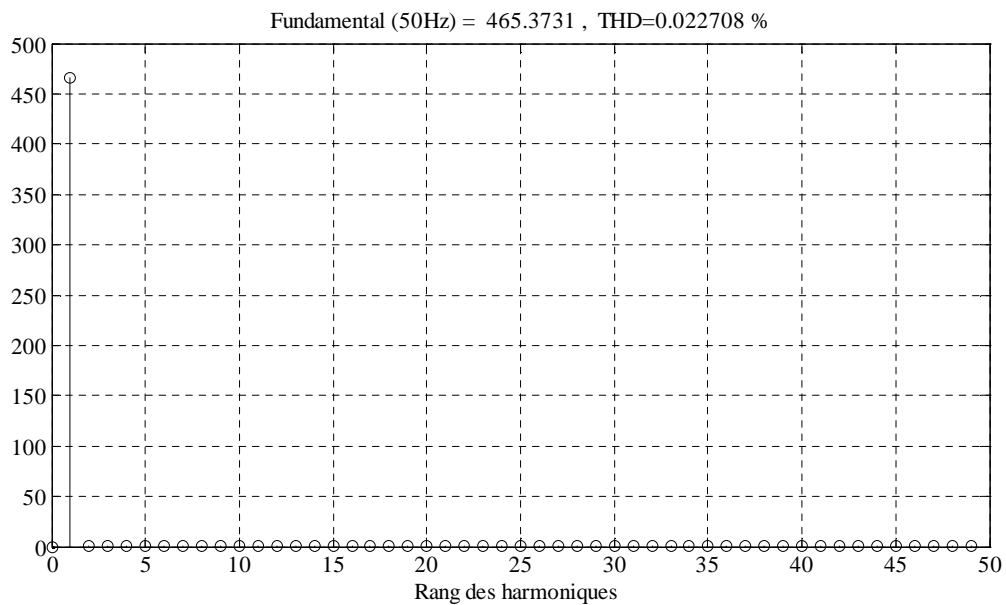


Figure V.18 Spectre harmonique de la tension de réseau.

Ainsi, Les figures (V.19) et (V.20) 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 représentées sur les figure (V.19) et figure (V.20) nous restitue la tension du réseau triphasé équilibré est constante de 230V de fréquence 50Hz.

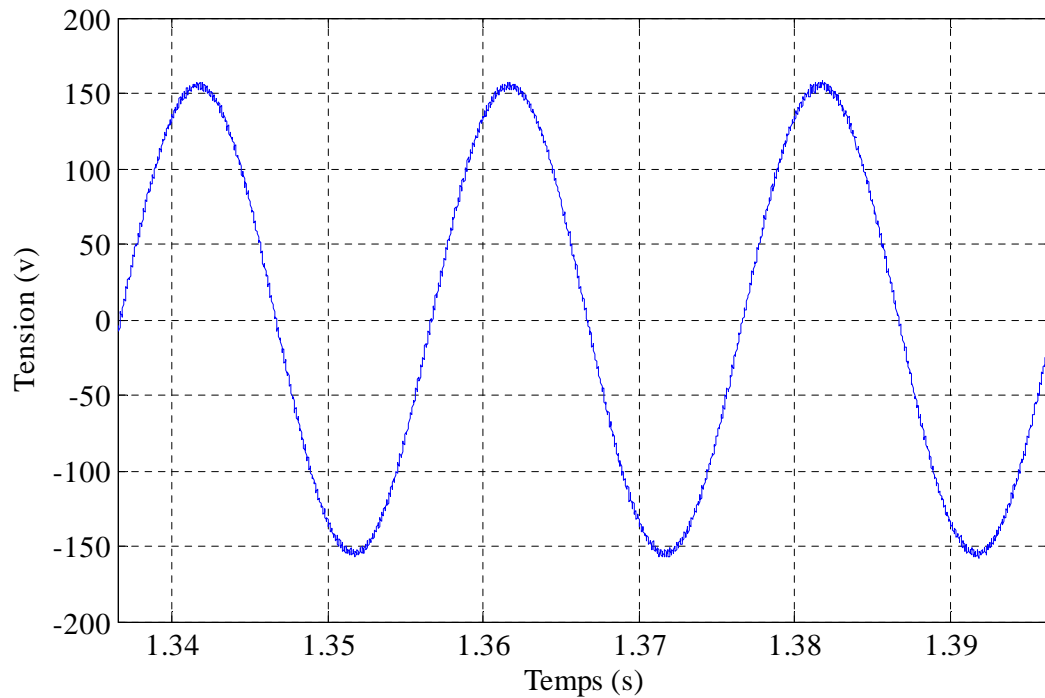


Figure V.19 La tension injectée.

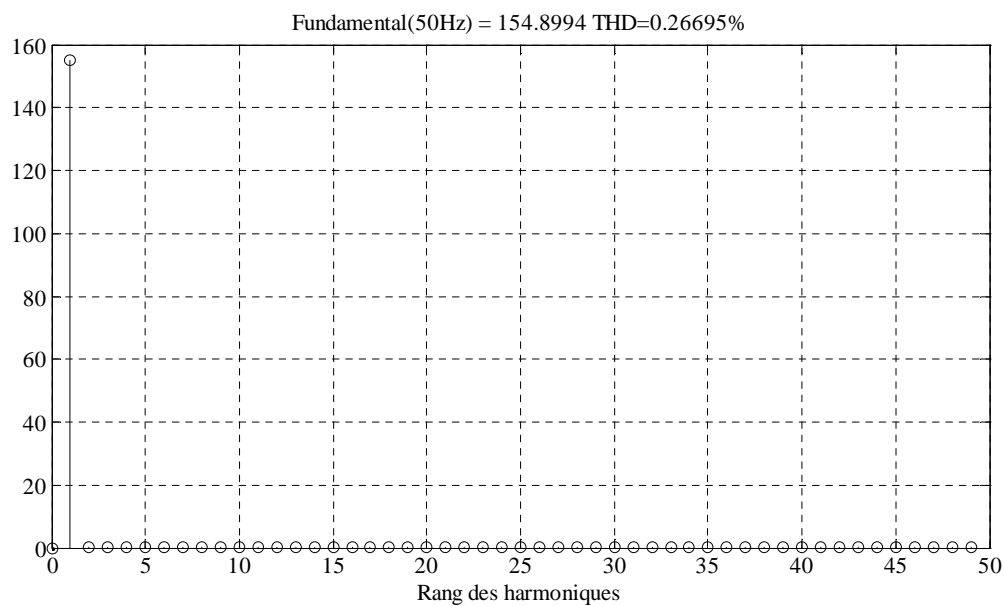


Figure V.20 Spectre harmonique de la tension injectée.

Les figures (V.21) et (V.22) 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%.

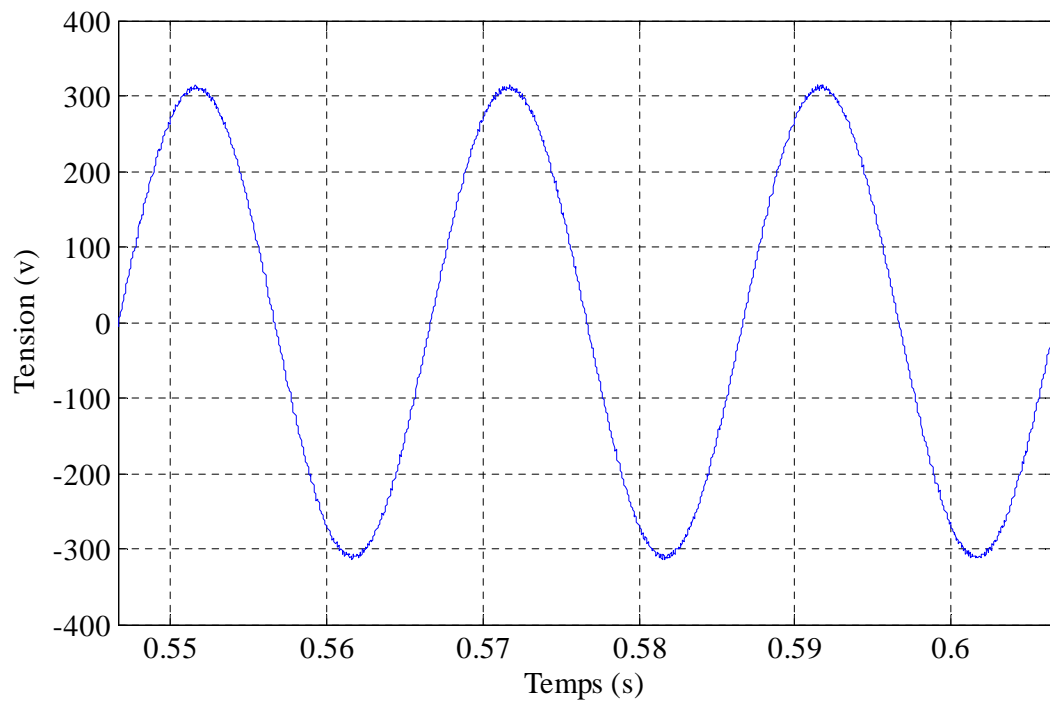


Figure V.21 La tension de charge.

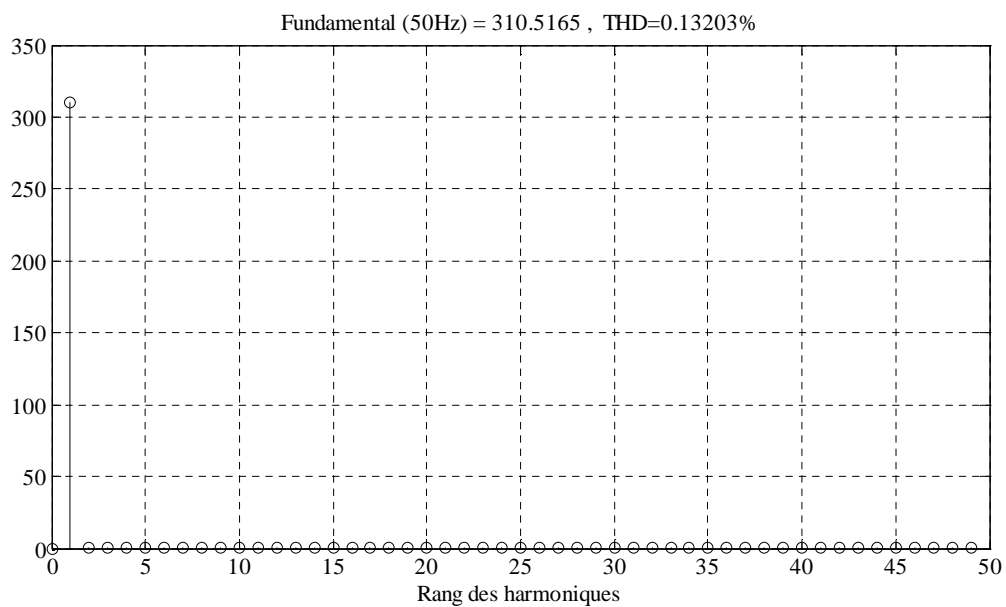


Figure V.22 Spectre harmonique de la tension de charge.

Les figures (V.23) et (V.24) 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%.

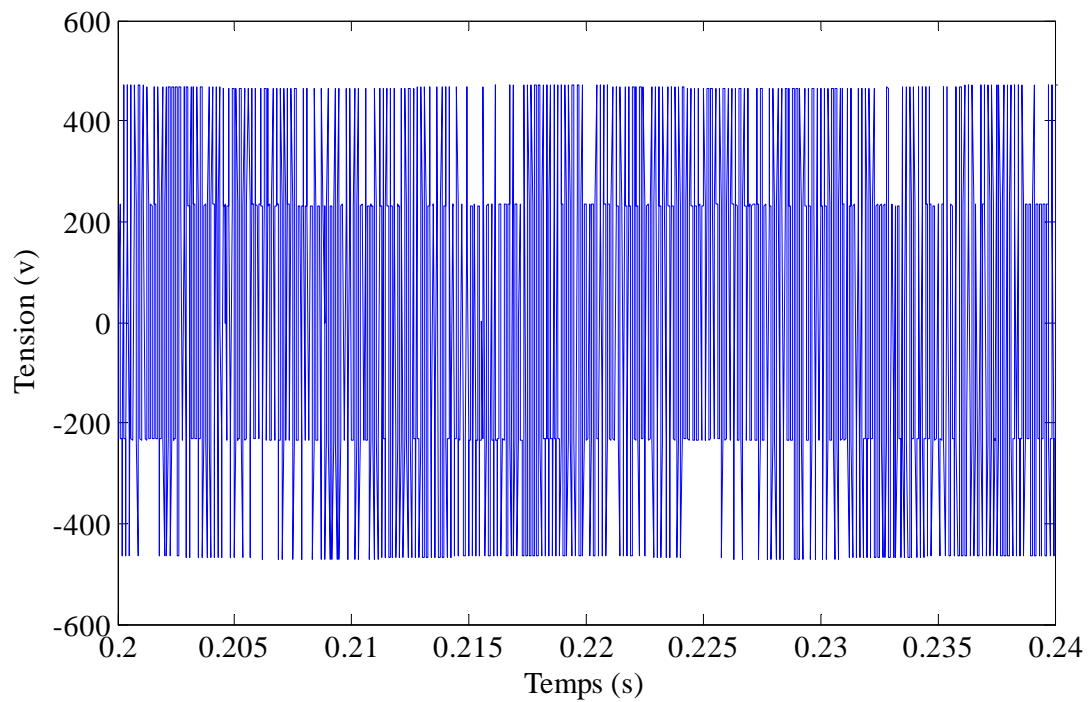


Figure V.23 La tension d'onduleur.

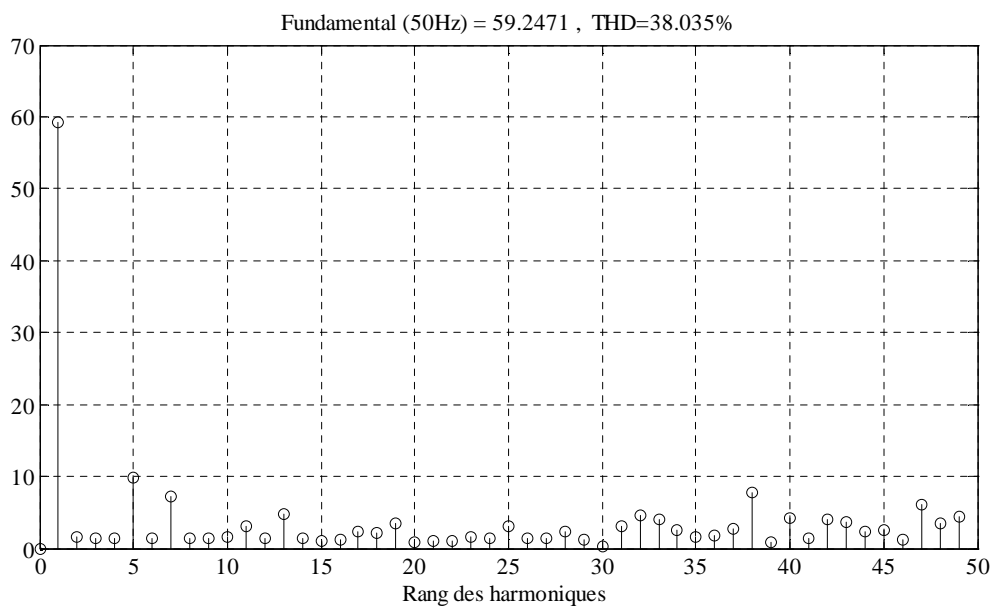


Figure V.24 Spectre harmonique de la tension d'onduleur.

La figure (V.25) et (V.7) représente la forme d'onde de la tension du réseau et la tension injectée par le filtre actif série.

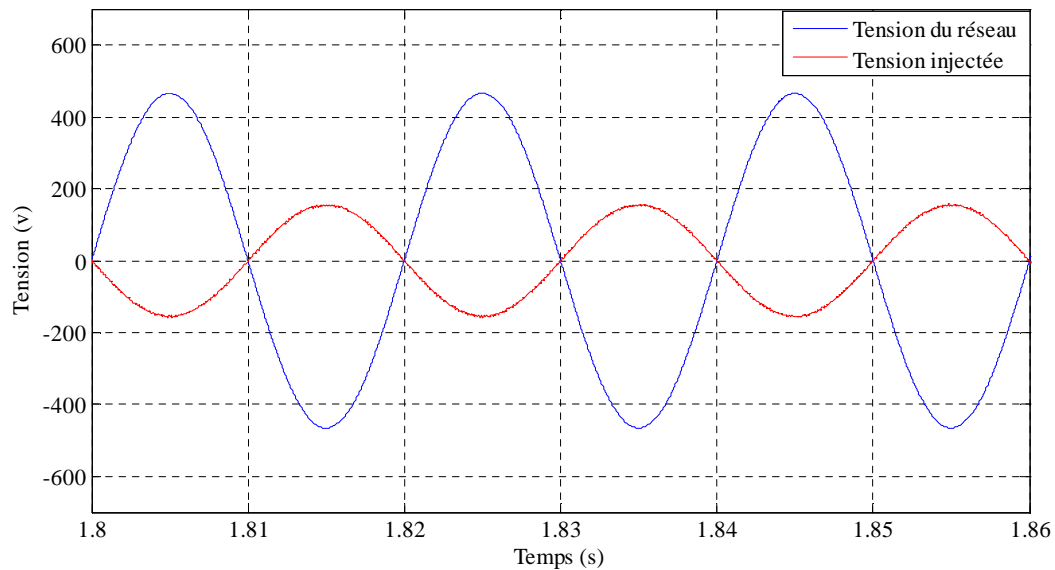


Figure V.25 La tension de réseau et la tension injectée.

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 230V voir figure (V.21) 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 230V avec une fréquence de 50Hz est réalisé. La nouvelle forme de la tension fournie par le réseau est représentée sur la figure (V.26), et son spectre est donné sur la figure (V.27). Après analyse de cette tension son fondamental à une valeur efficace de 219.38 V avec un THD de 53.83 %. Cette perturbation est uniquement due aux deux harmoniques que nous avons superposées.

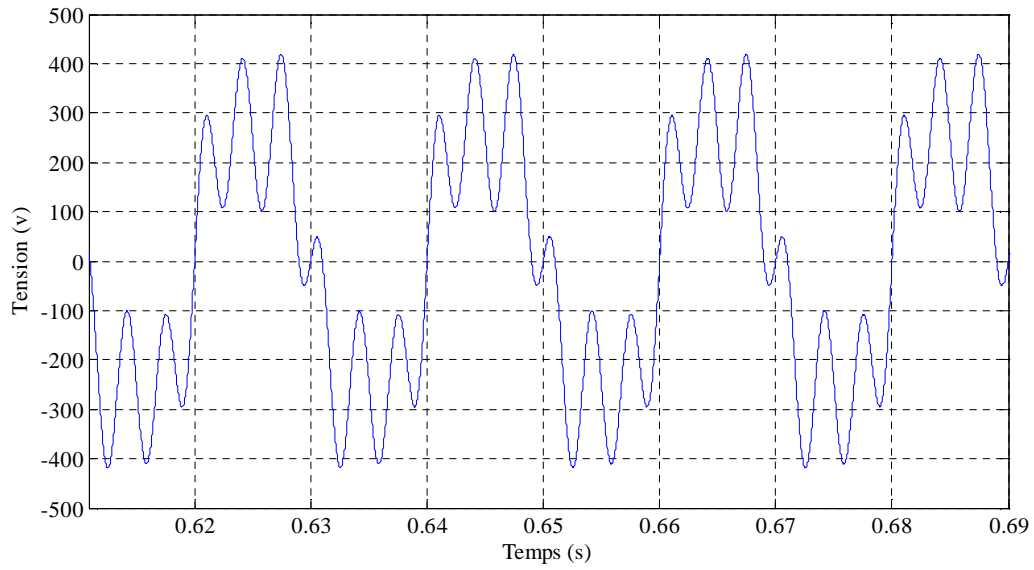


Figure V.26 La tension du réseau.

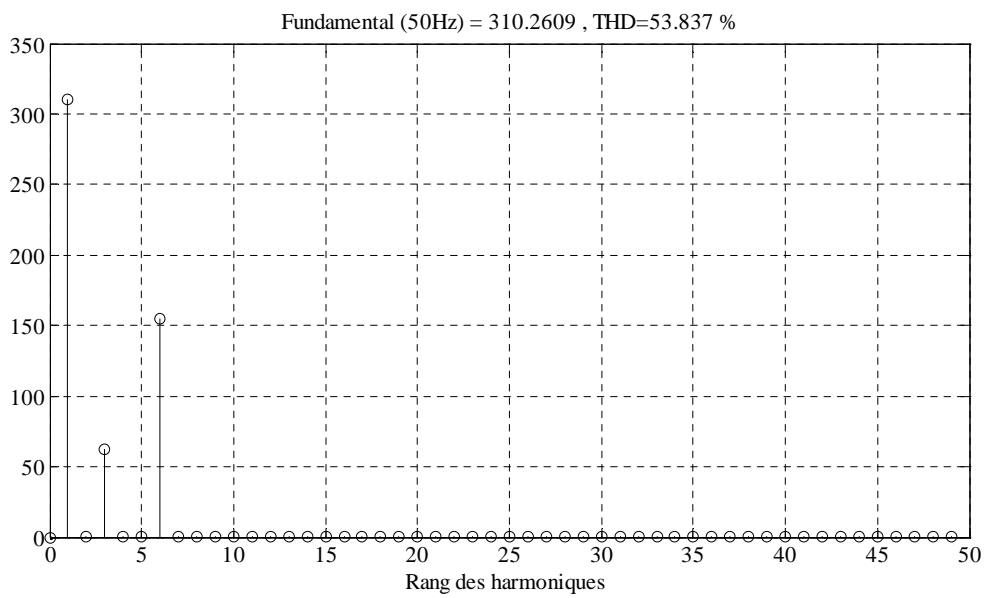


Figure V.27 Spectre harmonique de la tension de réseau.

Les figures (V.28) et (V.29) 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%.

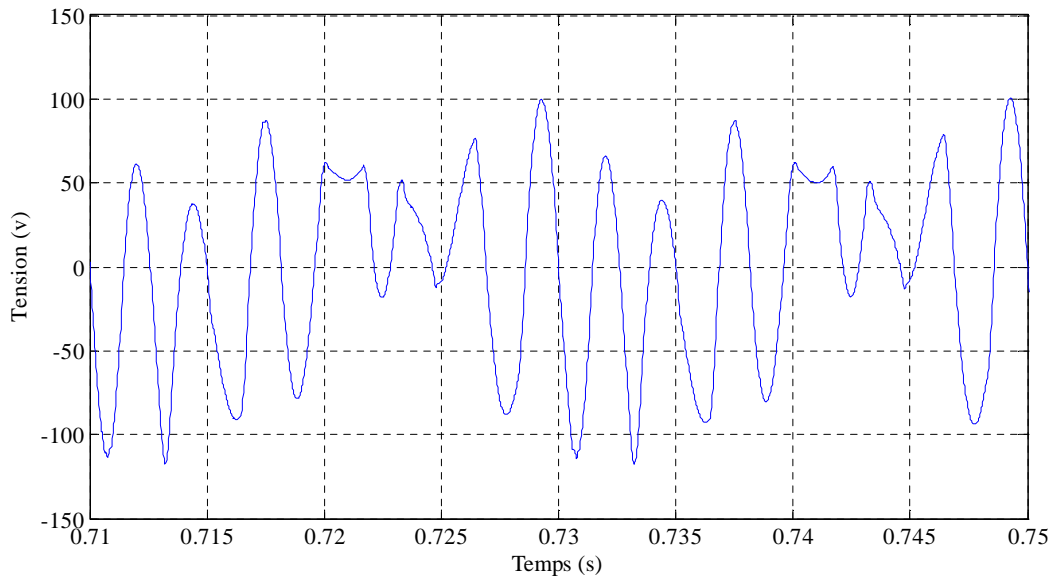


Figure V.28 La tension fournie par l'onduleur après filtrage.

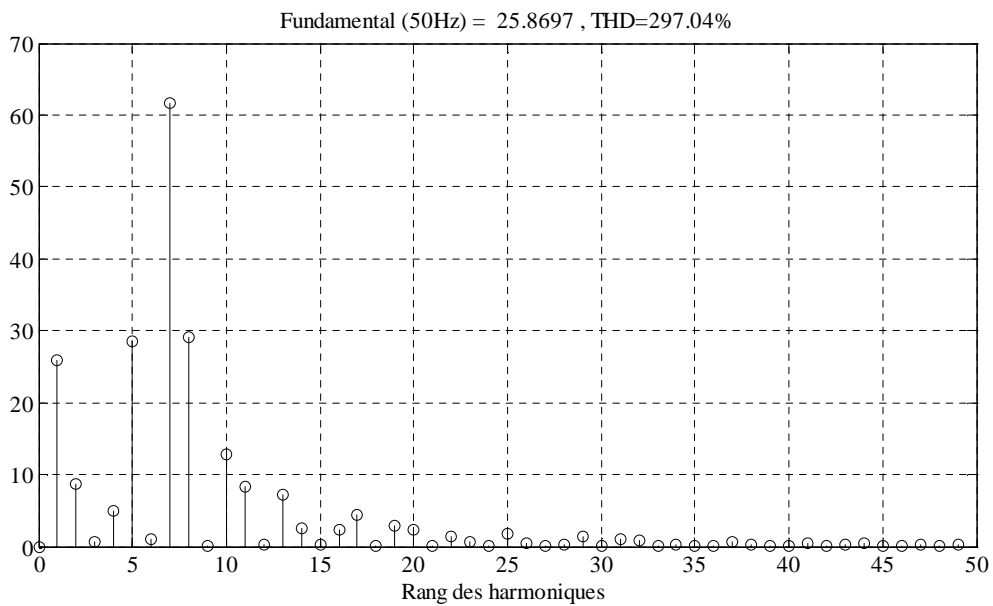


Figure V.29 Spectre harmonique de la tension injectée.

Les figures (V.30) et (V.31) 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%.

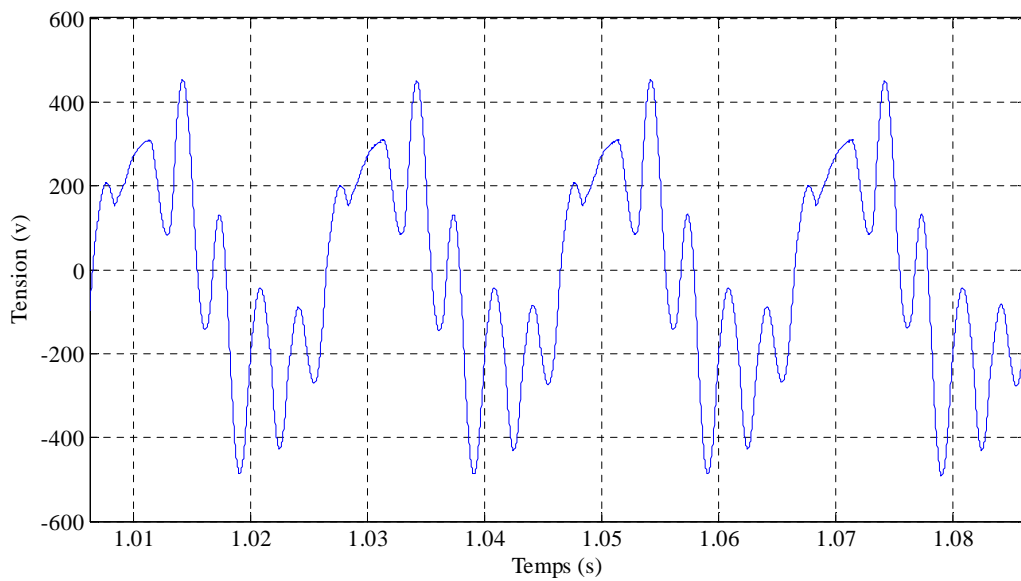


Figure V.30 Tension de charge.

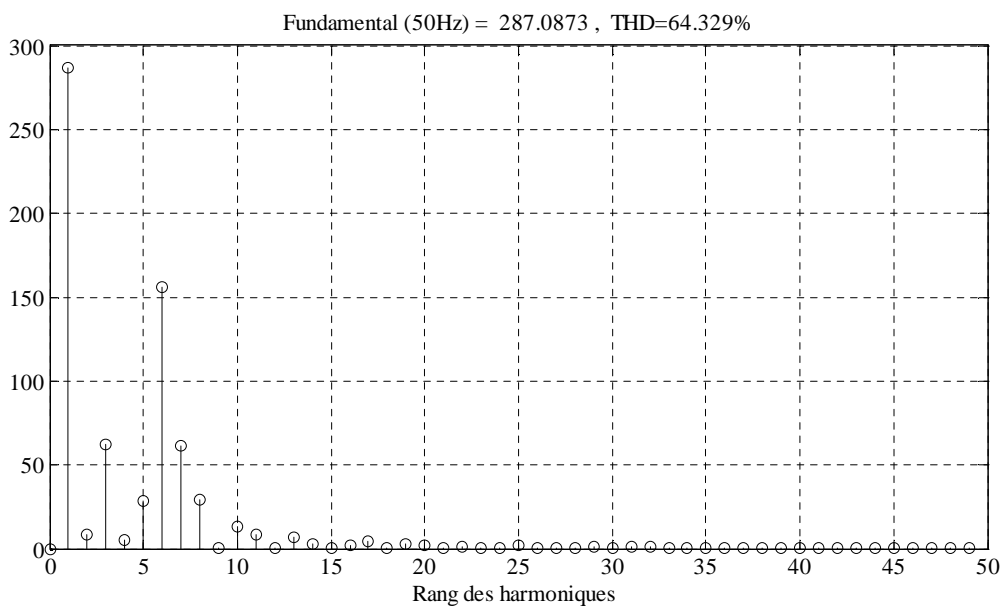


Figure V.31 Spectre harmonique de la tension de charge.

Les figures (V.32) et (V.33) 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 %.

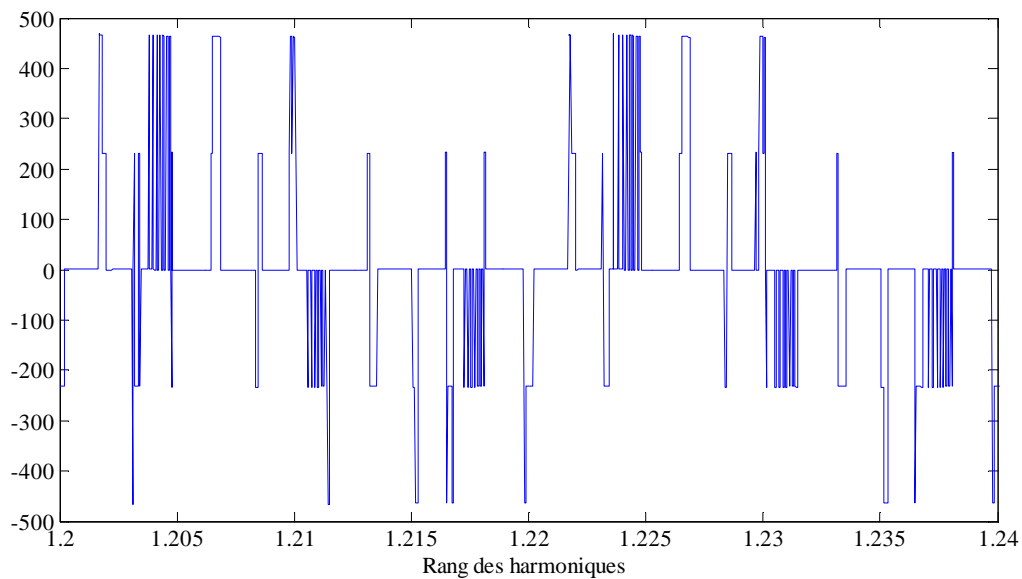


Figure V.32 La tension d'onduleur.

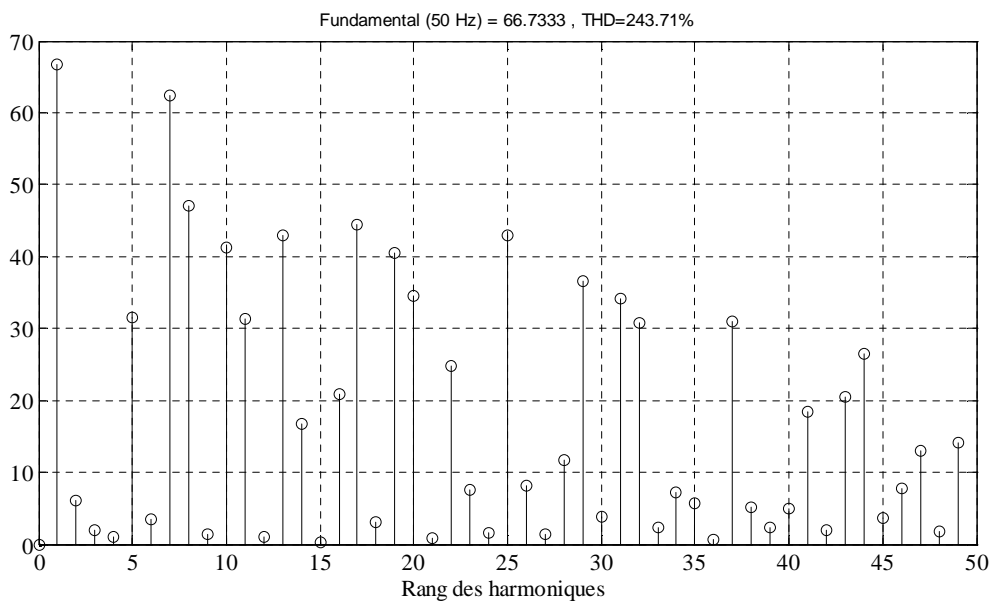


Figure V.33 Spectre harmonique de la tension d'onduleur.

Le modèle de l'onduleur a été fait sous l'hypothèse d'un système équilibré, en analysant rapidement les spectres de la figure (V.27) et celui de la figure (V.29). 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.28) et la figure (V.29).

On constate que le filtre actif série ne compense pas la tension quand le réseau électrique présente 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 « rang 7 » et un autre du système inverse « rang 5 ». Contrairement au cas précédent, la composition est très satisfaisante et elle est mise en évidence grâce aux figures suivantes.

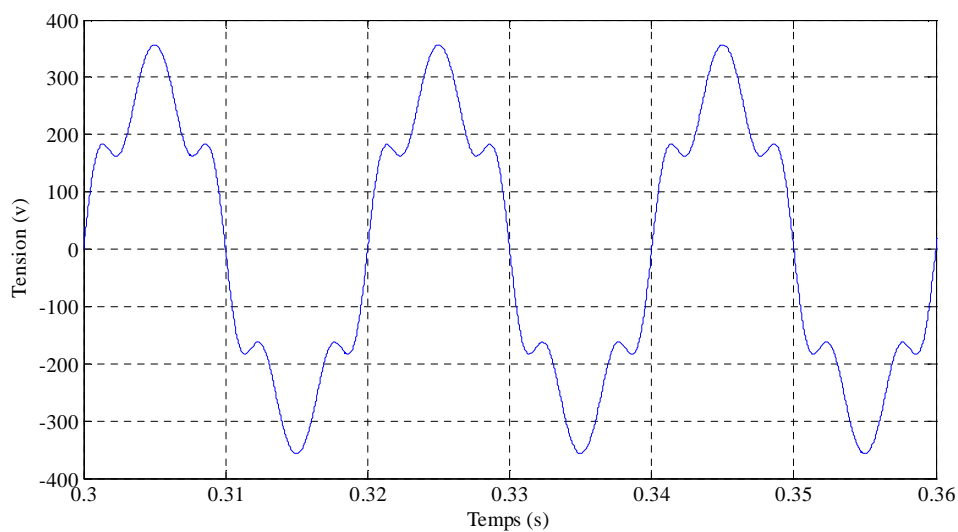


Figure V.34 La tension du réseau.

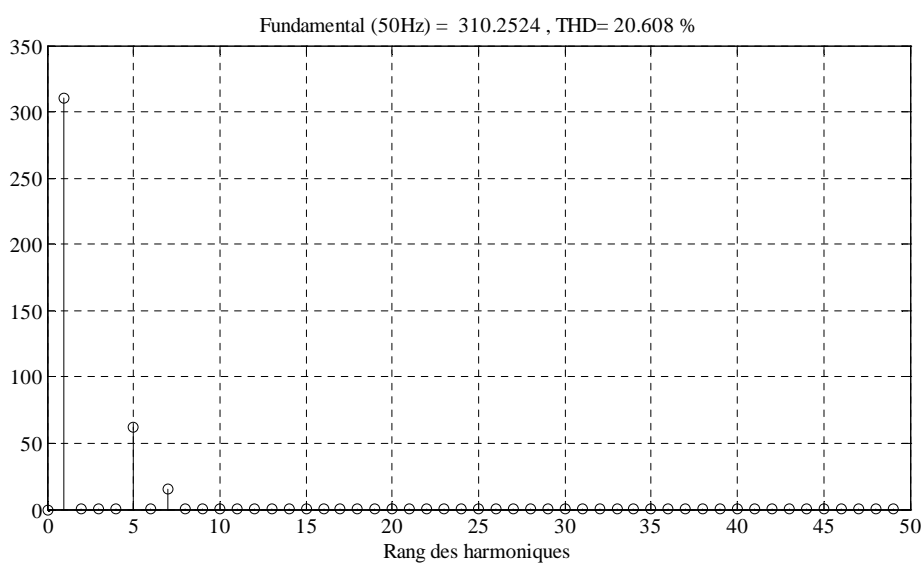


Figure V.35 Spectre harmonique de la tension de réseau.

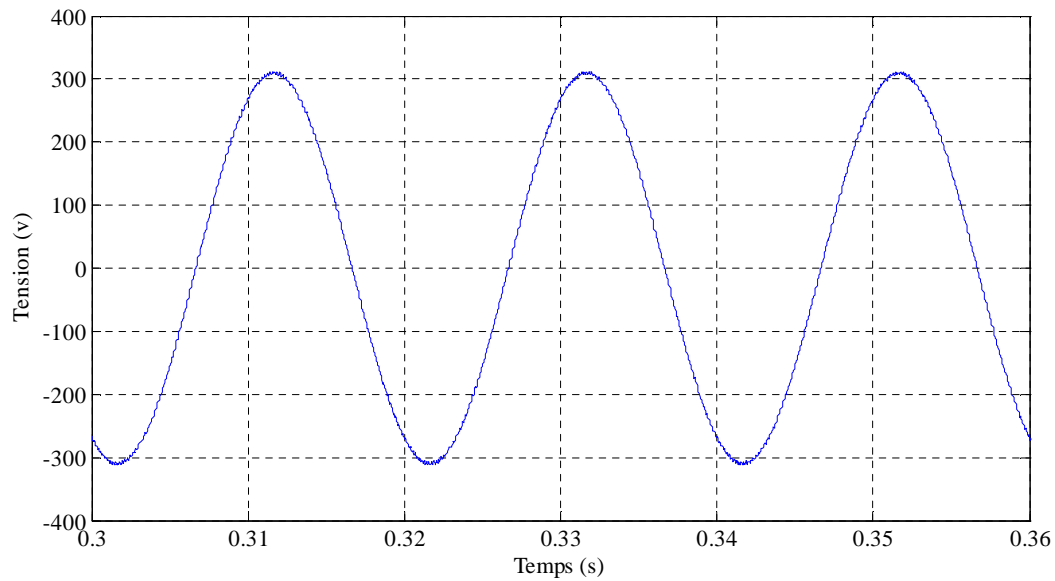


Figure V.36 La tension de charge.

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 MLI vectorielle. 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, à quelque soit l'origine de la perturbation. Toutefois dès qu'un déséquilibre est observé le filtre ne suit plus.

Conclusion générale

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 règle 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 fournie.

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, harmoniques...etc.

Dans ce projet, nous avons étudié une stratégie de dépollution des tensions des réseaux électriques, appelée compensation actif 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 souhaiter 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 sensible, pour ce faire nous avons commencé par modélisé le réseau électrique perturbé, par la suite nous avons modélisé comme charge sensible 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 sensible effectués avec MATLAB / SIMULINK.

Dans le troisième chapitre nous avons déterminé les tensions de références du compensateur actif série. La détection des tensions de référence est basée sur la méthode des puissances instantanée, celle-ci offre un meilleur compromis pratique et théorique. Cela nous

permet d'augmenter le rendement du filtre, de lui confier une meilleure fiabilité, ce qui nous ramène à un filtre efficace, souple et simple d'implantation.

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

Comme perspective à ce travail, nous pouvons citer dans un premier cas, l'utilisation d'autres boucles de régulation associées à la MLI vectorielle d'autre boucle de régulation associé à des techniques plus élaboré, et associé le filtre actif série et actif parallèle pour réaliser un système FACT (Flexible Alternative Courant Transmission) à fins de compenser l'ensemble des perturbations qu'il provienne de la source ou du récepteur.

Références bibliographiques

[1] L. ZELLOUMA

« Contribution à l'étude du filtrage des harmoniques des réseaux de distribution à l'aide du filtre actif » Thèse de doctorat. Université badji mokhtar annaba, 2010.

[2] Mr. HADDAD SALIM

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

[3] 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

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

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

[5] MMohamad AlaaEddinAlali

«Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension» Thèse Doctorat 2002.

[6] 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.

[7] L. MORAN et J. DIXON

« Power Electronics Handbook », Academic Press, Chapter 39 pp.1-36 ,2007.

[8] Kamel DJAZIA

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

[9]F. MEKRI

" Commande robuste des conditionneurs actifs de puissances " Thèse de doctorat, Université des sciences et de la technologie d'Oran,2007.

[10] Abdelmalek BOULAHIA

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

[11]T. GOURAUD

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

[12] 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.

[13] H.Sasaki and T.Machida

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

[14] 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

[15]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.

[16] 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

[17] N.Mohan. and al

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

[18]D. 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. Université de Haute-Alsace, U.F.R, 2005

[19]M.A.E. ALALI.

« Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension ».Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur - Strasbourg I, 12 Sep 2002.

[20]M. M. Abdusalam,

Structures et stratégies de commande des filtres actifs parallèle et hybride avec validations expérimentales, thèse de doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy-i (2008)

[21]Q. Chen, Z. Chen and M. McCormick,

The application and optimization of C-type filter in a combined harmonic power filter. 35th Annual IEEE, Power Electronics Specialists Conference, Aachen, Germany, (2004)

[22]S.KEBIRI

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

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

[23]E. Félice,

« Perturbations harmoniques », Paris : Dunod, 2000.

[24]J. Arrillaga& N.R. Watson,

POWER SYSTEM HARMONICS, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, John Wiley & Sons, 2003.

[25]

[26]-NEAGU, C. BOGDAN, GRIGORAȘ, GHEORGHE, et SCARLATACHE, Florina.

The influence of harmonics on power losses in urban distribution networks. In : Fundamentals of Electrical Engineering (ISFEE), 2016 International Symposium on. IEEE, (2016) 1 - 4 p.

[27] Hirofumi Akagi

Hirofumi Akagi, Edson Hirokazu Watanabe, Mauricio Aredes,

«Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning-Wiley-IEEE Press (2007)»

[28] kouzouabdellah,

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

[29] 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.

[30] 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.

[31] Kifoucherezki

« 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

[32]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.

[33] M.AOUES,

Filtrage actif des harmoniques générés par un redresseur triphasé.

Mémoire de magistère, Université Mouloud MAMMARI DE Tizi-Ouzou. 2004.

[34]: G. SEGUIER, F.LABRIQUE

« les convertisseurs de l'électronique de puissance », conversion CONTINU-ALTERNATIF.
Volume III, Edition Tec&Doc technique - LAVOISIER, Paris 1989.

[35] :Michel Pinard, « CONVERTISSEURS ET ELECTRONIQUE DE PUISSANCE »,
Commande. Description. Mise en œuvre, DUNOD, Paris, 2007.

[36]: M. Poloujadoff, « Conversions électromécaniques », maîtrise d'EEA, C3-
électrotechnique, DUNOD, Paris, 1969.

[37]:http://www.ece.osu.edu/ems/iab2004/JW_Jung_IAB2004.

Résumé

Les réseaux électriques fournissent des tensions purement sinusoïdales, avec une tension efficace et une fréquence fixe. La problématique présentée est comment diminuer ou supprimer les perturbations dues aux tensions harmoniques. Pour cela, nous avons opté pour le filtre actif série qui agit comme une source de tension et de courant harmoniques, qui annule les tensions perturbatrices imminentes de la source ainsi que celles générées par la circulation du courant perturbateur à travers l'impédance du réseau.

Nous avons modélisé un réseau électrique perturbé ainsi qu'un redresseur à tout thyristor qui est une charge sensible. Un montage appelé « pont de Gräetz » est alors réalisé. Trois tests ont été réalisés.

Nous avons obtenu l'allure des tensions à l'entrée puis à la sortie du redresseur et de même, les graphes des courants. Les résultats montrent que si le réseau est traversé par des courants harmoniques, les tensions qu'il fournit à l'utilisateur seront déformées. La présence d'un filtre inductif en série avec le redresseur élimine les harmoniques du courant, néanmoins il provoque une chute de tension difficile à quantifier.

Nous avons présenté ensuite la méthode des puissances instantanées en passant pour la méthode de la décomposition en composantes symétriques. Nous exprimons la matrice de Fortescue faisant la liaison entre la composante réelle et la composante symétrique et nous calculons alors les tensions de référence.

On a simulé la commande de l'onduleur dans le but de permettre la meilleure reproduction des tensions de référence souhaitées. Dans notre cas on a utilisé la commande par MLI vectorielle. Les résultats de simulation de l'ensemble des tensions de réseau-filtre actif série (tension injectée) - tension de charge dans les différents cas de perturbation du réseau.

Une superposition d'une composante homopolaire formée par deux harmoniques de rang 3 et 6 avec la tension purement sinusoïdale est réalisée. Un autre test été fait pour une injection d'harmoniques tout en gardant un système équilibré, donc un harmonique dans le repère direct « rang 7 » et un autre du système inverse « rang 5 ».

Le compensateur série est la meilleure solution pour le développement et l'évolution des organes de l'électronique de puissance, permettant des tensions en forme souhaitée à insérer en série avec le réseau.

Mots-clés : Filtre actif série, harmoniques, réseau électrique, perturbations, simulation.