

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A.MIRA-BEJAIA



Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique

Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme de master en électrotechnique
Option : Electrotechnique industriel

Thème

**Etude de la structure de la nouvelle topologie d'un redresseur
à faible taux de distorsion harmonique et à facteur de
puissance élevé.**

Préparé par :

KORICHI Chabane

LATRECHE Khalil

Dirigé par :

Mr. BEKKA. H

Examiné par :

Mr BOUTBAL

Mr TAMALOUSTE

Année Universitaire : 2018/2019



Remerciements

Nous voulons exprimer par ces quelques lignes nos remerciements, notre gratitude envers tous ceux qui par leur présence, leur soutien, leur disponibilité et leurs conseils, nous avons en courage d'accomplir ce projet.

Nous commençons par remercier Mr Bekka Hakim qui nous a fait l'honneur d'être notre encadreur.

Nous le remercions profondément pour son encouragement continu et aussi d'être toujours là pour nous écouter, nous aider et nous guider à retrouver le bon chemin par ses précieux conseils.

Ainsi que son soutien moral et sa preuve de compréhension, ce qui nous a donné la force et le courage d'accomplir ce projet.

Nous tenons à remercier également nos amis, pour leurs aides et leurs soutiens, en leur souhaitant une bonne continuation.

Nous tenons d'autre part à remercier les respectables membres du jury de bien vouloir nous accorder un peu de leur temps précieux pour commenter, discuter et critiquer notre travail.



A ma très chère mère

Affable, honorable, aimable : Tu représentes pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi.

Ta prière et ta bénédiction m'ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études.

Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer ce que tu mérites pour tous les sacrifices que tu n'as cessé de me donner depuis ma naissance, durant mon enfance et même à l'âge adulte.

Tu as fait plus qu'une mère puisse faire pour que ses enfants suivent le bon chemin dans leur vie et leurs études.

Je te dédie ce travail en témoignage de mon profond amour. Puisse Dieu, le tout puissant, te préserver et t'accorder santé, longue vie et bonheur.

A mon très cher père

Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour vous. Rien au monde ne vaut les efforts fournis jours et nuits pour mon éducation et mon bien être.

Ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma formation.

Je te dédie ce travail en témoignage de mon profond amour. Puisse Dieu, le tout puissant, te préserver et t'accorder santé, longue vie et bonheur.

A mes très chers frères et mes chères sœurs

Les mots ne suffisent guère pour exprimer l'attachement, l'amour et l'affection que je porte pour vous. Mes anges gardiens et mes fidèles compagnons dans les moments les plus délicats de cette vie mystérieuse. Je vous dédie ce travail avec tous mes vœux de bonheur, de santé et de réussite.

A tous les membres de ma famille cousins, cousines, tantes, oncles.

A tous mes amies.

Chabane

DEDICACES

A ma très chère mère

Affable, honorable, aimable : Tu représentes pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi. Ta prière et ta bénédiction m'ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études. Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer ce que tu mérites pour tous les sacrifices que tu n'as cessé de me donner depuis ma naissance, durant mon enfance et même à l'âge adulte. Tu as fait plus qu'une mère puisse faire pour que ses enfants suivent le bon chemin dans leur vie et leurs études. Je te dédie ce travail en témoignage de mon profond amour. Puisse Dieu, le tout puissant, te préserver et t'accorder santé, longue vie et bonheur.

A mon très cher père

Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour vous. Rien au monde ne vaut les efforts fournis jours et nuits pour mon éducation et mon bien être. Ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma formation. Je te dédie ce travail en témoignage de mon profond amour. Puisse Dieu, le tout puissant, te préserver et t'accorder santé, longue vie et bonheur.

A mes très chers frères

FAROUK, FOUED ET AISSAME. Les mots ne suffisent guère pour exprimer l'attachement, l'amour et l'affection que je porte pour vous. Je vous dédie ce travail avec tous mes vœux de bonheur, de santé et de réussite.

A tous mes amis

WALID, HAROUN, MOURAD, TOUFIK, NADIR, SYF, DIHIA, KENZA et mon binôme CHABANE et à tout ceux dont j'ai le regret de ne pas cité leurs noms.

L'ATRECHE Khalil

Chapitre I : Etat de l'art sur l'influence des harmoniques sur le réseau électrique.

| | |
|---|----|
| Figure I.1 : Diagramme de Fresnel des puissances..... | 05 |
| Figure I.2 : Représentation spectrale d'un signal périodique..... | 07 |
| Figure I.3 : Charge non linéaire..... | 08 |
| Figure I.4 : Charge linéaire..... | 08 |
| Figure I.5 : Principe du filtre passif..... | 13 |
| Figure I.6 : Branchement d'un filtre passif résonnant..... | 14 |
| Figure I.7 : Branchement d'un filtre passif amortie (passe-haut)..... | 15 |
| Figure I.8 : Montage d'un filtre actif parallèle..... | 17 |
| Figure I.9 : Montage d'un filtre actif en série..... | 17 |
| Figure I.10 : Combinaison parallèle -série actif (UPQC)..... | 18 |
| Figure I.11 : Schéma d'un filtre actif série avec filtre passif parallèle..... | 19 |
| Figure I.12 : Schéma d'un filtre actif série connecté en série avec filtre passif série..... | 19 |
| Figure I.13 : Schéma d'un filtre actif parallèle avec filtre passif parallèle..... | 20 |

**Chapitre II : Etude d'un pont redresseur (non commandé et commandé)
triphase avec et sans filtrage.**

| | |
|---|----|
| Figure II.1 : Schéma du redresseur pont de Graëtz triphasé à diodes avec une charge résistive..... | 24 |
| Figure II.2 : Allure des signaux entrés et sortie de la tension du redresseur PD3..... | 26 |
| Figure II.3 : Allure de signal du courant de la source I_1 du redresseur PD3..... | 26 |
| Figure II.4 : Analyse spectrale du courant I_1 avant le filtrage..... | 26 |
| Figure II.5 : Le THD du courant de la source avant la compensation..... | 28 |
| Figure II.6 : Schéma du redresseur pont de Graëtz triphasé à diodes avec un FPP..... | 29 |

| | |
|--|----|
| Figure II.7 : Allure de signal du courant de la source I_1 et I_f du FPP. | 30 |
| Figure II.8 : Analyse spectrale du courants I_1 de la source et I_f du FPP..... | 30 |
| Figure II.9 : Le THD du courant de la source après la compensation. | 31 |
| Figure II.10 : Schéma du redresseur pont de Graëtz triphasé à diodes avec un FAP..... | 32 |
| Figure II.11 : Allure de signal du courant de la source I_1 et I_f du FAP. | 33 |
| Figure II.12 : Analyse spectrale du courant I_1 de la source et I_f du FAP..... | 33 |
| Figure II.13 : Le THD du courant de la source après la compensation. | 35 |
| Figure II.14 : Schéma du redresseur pont de Graëtz triphasé à diodes avec une charge inductive | 35 |
| Figure II.15 : Allure de signal du courant de la source I_1 d'un redresseur PD3 avec une charge purement inductive. | 36 |
| Figure II.16 : Analyse spectrale du courant I_1 de la partie permanent avant du filtrage. | 36 |
| Figure II.17 : Le THD du courant de la source avant la compensation..... | 37 |
| Figure II.18 : Schéma du redresseur pont de Graëtz triphasé à diodes avec FPP..... | 38 |
| Figure II.19 : Allure de signal du courant de la source I_1 et I_f du FPP. | 38 |
| Figure II.20 : Analyse spectrale du courant I_1 de la source et I_f du FPP. | 38 |
| Figure II.21 : Le THD du courant de la source après la compensation. | 40 |
| Figure II.22 : Schéma du redresseur pont de Graëtz triphasé à diodes avec FAP..... | 40 |
| Figure II.23 : Allure de signal du courant de la source I_1 et I_f du FAP. | 41 |
| Figure II.24 : Analyse spectrale du courant I_1 de la source et I_f du FAP..... | 41 |
| Figure II.25 : Le THD du courant de la source après la compensation. | 42 |
| Figure II.26 : Schéma du redresseur pont de Graëtz triphasé à thyristor (commandé). | 43 |
| Figure II.27 : Allure des signaux entrés et sortie de la tension du redresseur PD3 commandé... | 43 |

| | |
|--|----|
| Figure II.28 : Allure de signal du courant de la source I_1 d'un redresseur PD3 commandé. .43 | 43 |
| Figure II.29 : Analyse spectrale du courant I_1 de la source d'un redresseur PD3 commandé avant filtrage.....44 | 44 |
| Figure II.30 : Le THD du courant de la source après la compensation.45 | 45 |
| Figure II.31 : Schéma du redresseur pont de Graëtz triphasé à thyristor (commandé) avec le FPP.46 | 46 |
| Figure II.32 : Allure de signal du courant de la source I_1 et I_f du FPP.46 | 46 |
| Figure II.33 : Analyse spectrale du courant I_1 de la source et I_f du FPP.47 | 47 |
| Figure II.34 : Le THD du courant de la source après la compensation.48 | 48 |
| Figure II.35 : Schéma du redresseur pont de Graëtz triphasé à thyristor(commandé) avec FAP.49 | 49 |
| Figure II.36 : Allure de signal du courant de la source I_1 et I_f du FAP.49 | 49 |
| Figure II.37 : Analyse spectrale du courant I_1 de la source et I_f du FAP.....50 | 50 |
| Figure II.38 : Le THD du courant de la source après la compensation.51 | 51 |
| Figure II.39 : Schéma du redresseur pont de Graëtz triphasé à thyristor (commandé) avec une charge purement inductive.51 | 51 |
| Figure II.40 : Allure de signal du courant de la source I_1 d'un redresseur PD3 commandé avec une charge purement inductive.52 | 52 |
| Figure II.41 : Analyse spectrale du courant I_1 de la source d'un redresseur commandé avec une charge purement inductive.52 | 52 |
| Figure II.42 : Le THD du courant de la source avant la compensation.53 | 53 |
| Figure II.43 : Allure de signal du courant de la source I_1 et I_f du FPP.54 | 54 |
| Figure II.44 : Analyse spectrale du courant I_1 de la source et I_f du FPP.54 | 54 |
| Figure II.45 : Le THD du courant de la source après la compensation.55 | 55 |

| | |
|---|----|
| Figure II.46 : Allure de signal du courant I_1 de la source et I_f du FAP. | 56 |
| Figure II.47 : Analyse spectrale du courant I_1 de la source et I_f du FAP..... | 56 |
| Figure II.48 : Le THD du courant de la source après la compensation. | 57 |
| Figure II.49 : Schéma de la commande et de la puissance d'un redresseur MLI. | 58 |
| Figure II.50 : Allure des signaux entrés et sortie de la tension du redresseur MLI..... | 59 |
| Figure II.51 : Allure de signal du courant de la source I_1 du redresseur MLI. | 59 |
| Figure II.52 : Analyse spectrale du courant I_1 de la source d'un redresseur MLI. | 59 |
| Figure II.53 : Le THD du courant de la source..... | 61 |
| Chapitre III : Structure de la nouvelle topologie d'un redresseur à faible taux de distorsion harmonique et à facteur de puissance élevé. | |
| Figure III.1 : Structure de la nouvelle topologie de redresseur à faible taux de distorsion harmonique et à facteur de puissance élevé. | 64 |
| Figure III.2 : Formes d'onde d'un courant à 12 impulsions. | 65 |
| Figure III.3 : Forme d'onde du courant de ligne, courant de la charge et le courant harmonique. | 66 |
| Figure III.4 : Schéma du circuit électrique du redresseur proposé. | 67 |
| Figure III.5 : Contribution des convertisseurs DC/DC..... | 67 |
| Figure III.6 : Représentation de la contribution en puissance des convertisseurs DC/DC et du pont de Graëtz en fonction de la puissance totale de sortie [%]..... | 70 |
| Figure III.7 : Forme d'onde du courant de ligne, courant de la charge et le courant harmonique sur une période de douze impulsions. | 70 |
| Figure III.8 : Schéma fonctionnel de la stratégie de contrôle en boucle fermée. | 71 |
| Figure III.9 : Schéma globale de la structure de la nouvelle topologie d'un redresseur à faible TDH et à FP élevé. | 72 |

| | |
|--|----|
| Figure III.10 : Schéma d'un Hacheur (A) et son stratégie de contrôle (B). | 72 |
| Figure III.11 : Allure des signaux entrés de la tension du montage de simulation. | 73 |
| Figure III.12 : Allure du courant d'entrée de bras du redresseur I_{ch1} et I_{f1} le courant d'entrée des convertisseurs DC/DC. | 74 |
| Figure III.13 : Allure de signal du courant de la source I_{s1} | 74 |
| Figure III.14 : Analyse spectrale du courant de la source I_{s1} | 74 |
| Figure III.15 : Le THD du courant de la source après la compensation. | 76 |

Chapitre I : Etat de l'art sur l'influence des harmoniques sur le réseau électrique.

| | |
|---|----|
| Tableau I-1 : TDH _h pour diverses charges non linéaires..... | 04 |
| Tableau I-2 : Ensemble des matériels électriques perturbés par la pollution harmonique. | 10 |
| Tableau I-3 : Limites des composantes harmoniques en courants. | 11 |
| Tableau I-4 : Niveaux de compatibilité des harmoniques en tension [CEI-61000-2-2]..... | 12 |
| Tableau I-5 : Quelque avantages et inconvénient de dépollution harmonique..... | 20 |
| Tableau I-6 : Comparaisons entre le filtre passif et le filtre actif. | 21 |

Chapitre II : Etude d'un pont redresseur (non commandé et commandé) triphase avec et sans filtrage.

| | |
|---|----|
| Tableau II-1 : Les résultats du développement de la série de Fourier..... | 25 |
| Tableau II-2 : Les valeurs du courant efficace et leur THD..... | 27 |
| Tableau II-3 : les résultats du calcul des capacités et des inductances de filtrages de chaque rang..... | 29 |
| Tableau II-4 : Les valeurs du courant efficace et leur THD..... | 31 |
| Tableau II-5 : Les valeurs du courant efficace et leur THD..... | 34 |
| Tableau II-6 : Les valeurs du courant efficace et leur THD..... | 37 |
| Tableau II-7 : Les valeurs du courant efficace et leur THD..... | 39 |
| Tableau II-8 : Les valeurs du courant efficace et leur THD..... | 42 |
| Tableau II-9 : Les valeurs du courant efficace et leur THD..... | 45 |
| Tableau II-10 : Les valeurs du courant efficace et leur THD..... | 47 |
| Tableau II-11 : Les valeurs du courant efficace et leur THD..... | 50 |
| Tableau II-12 : Les valeurs du courant efficace et leur THD..... | 53 |
| Tableau II-13 : Les valeurs du courant efficace et leur THD..... | 55 |
| Tableau II-14 : Les valeurs du courant efficace et leur THD..... | 57 |
| Tableau II-15 : Les valeurs du courant efficace et leur THD..... | 60 |

Tableau II-16 : Les données des composants utilisé dans les schémas de simulation.61

Chapitre III : Structure de la nouvelle topologie d'un redresseur à faible taux de distorsion harmonique et à facteur de puissance élevé.

Tableau III-1 : les paramètre utilisé pour la simulation.73

Tableau III-2 : Les valeurs du courant efficace et leur THD.75

THD : Taux de Distorsion Harmonique.

THD_h : Taux de Distorsion Harmonique de rang h.

CEI : Commission Electrotechnique Internationale.

y_{heff} : La valeur efficace de l'harmonique de rang h.

y_{1eff} : La valeur efficace du fondamental.

h : Rang de l'harmonique.

I_h : La valeur efficace des courants harmoniques.

Fc : Le facteur de crête.

S : la puissance apparente.

Q : la puissance réactive.

P : la puissance active.

D : la puissance déformante.

F.P : le facteur de puissance.

F_{dis} : le facteur de distorsion.

φ_1 : Le déphasage entre le courant fondamental et la tension.

y_{max} : la valeur max (de la tension ou du courant).

y_{eff} : la valeur efficace (de la tension ou du courant).

Q₀ : Facteur de qualité.

ω_0 : La pulsation propre.

τ : Le temps de relaxation (encore appelée durée caractéristique).

RCD : les charges résistance, condensateur et diode.

a_n et b_n : les coefficients de Fourier.

a_0 : la valeur moyenne de $x(t)$.

IEEE : Institute of Electrical and Electronics Engineers.

STD : Standard.

FPP : filtre passif parallèle.

FPS : filtre passif série.

FAP : filtre actif parallèle.

FAS : Filtre actif série.

UPQC : Combinaison Parallèle Série Actif, en anglais Unified Power Quality Conditioner.

MLI : Modulation en largeur d'impulsions.

D₁, D₂, D₃, D₄, D₅ et D₆ : les diodes.

IGBT : Le transistor bipolaire à grille isolée, en anglais *Insulated Gate Bipolar Transistor*.

DC : Le courant continu.

AC : le courant alternatif.

GTO : Le thyristor à extinction par la gâchette, en anglais *Gate Turn-Off Thyristor*.

V_{s1}(t), V_{s2}(t) et V_{s3}(t) : Tensions de source.

I_{s1}(t), I_{s2}(t) et I_{s3}(t) : Courants de source.

I_{ch1}(t), I_{ch2}(t) et I_{ch3}(t) : Courant d'entrée de bras du redresseur.

I_{f1}(t), I_{f2}(t) et I_{f3}(t) : Courants de filtrage.

L : Inductance.

I_{1eff} : Le courant efficace de la phase 1.

C : Capacité.

R : Résistance.

PD3 : pont de diode en triphasé.

mW : milliwatts.

GW : gigawatts.

| | |
|---|----|
| Introduction générale..... | 01 |
| Chapitre I : Etat de l'art sur l'influence des harmoniques sur le réseau électrique. | |
| I.1. Introduction. | 03 |
| I.2. Définition des harmoniques..... | 03 |
| I.3. Les caractéristiques des perturbations harmoniques. | 03 |
| I.3.1. Le taux de distorsion harmonique THD..... | 04 |
| I.3.2. Le facteur de puissance FP..... | 04 |
| I.3.3. Le facteur de crête Fc. | 06 |
| I.3.4. Le facteur de qualité Q ₀ | 06 |
| I.4. Les types des harmoniques. | 06 |
| I.4.1. Inters harmoniques. | 07 |
| I.4.2. Infra harmoniques. | 07 |
| I.5. Les grandeurs caractéristiques..... | 07 |
| I.5.1. Les différentes types des charges..... | 07 |
| I.5.1.1. Charge non linéaire..... | 07 |
| I.5.1.2. Charge linéaire..... | 08 |
| I.5.2. Série de Fourier. | 08 |
| I.6. Les effets des harmoniques..... | 09 |
| I.6.1. Les effets instantanés. | 09 |
| I.6.2. Les effets différés. | 09 |
| I.7. Les normes..... | 11 |
| I.7.1. Normes IEEE STD 519-1992..... | 11 |

| | |
|--|-----------|
| I.7.2. Normes CEI-61000. | 11 |
| I.8. Méthodes des minimisation les harmoniques. | 12 |
| I.8.1. Techniques traditionnelles de dépollution..... | 12 |
| I.8.1.1. Filtrages passifs. | 13 |
| I.8.2. Solutions modernes de dépollution. | 15 |
| I.8.2.1. Filtre actif parallèle..... | 16 |
| I.8.2.2. Filtre actif série..... | 17 |
| I.8.2.3. Combinaison parallèle série actif. | 18 |
| I.8.3. Filtrage hybride. | 18 |
| I.8.3.1. Filtre actif série avec des filtres passifs parallèles..... | 18 |
| I.8.3.2. Filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles. | 19 |
| I.8.3.3. Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle. | 19 |
| I.8.4. Les avantages et les inconvénients des dépollutions harmoniques. | 20 |
| I.8.5. Comparaison générale entre le filtre passif et le filtre actif..... | 20 |
| Conclusion..... | 21 |
| Chapitre II : Etude d'un pont redresseur (non commandé et commandé) triphasé avec et sans filtrage. | |
| II.1. Introduction..... | 22 |
| II.2. Les demains d'utilisation..... | 22 |
| II.2.1. Quelques applications usuelles. | 23 |
| II.3. Redressement non commandé PD3 (diodes). | 23 |
| II.3.1. Principe de fonctionnement du PD3. | 23 |
| II.3.2. Etude des tensions..... | 23 |

| | |
|---|----|
| II.3.2.1. La valeur moyenne de la tension de sortie U_{cmoy} | 23 |
| II.3.2.2. Valeur efficace de la tension de sortie U_{ceff} | 24 |
| II.3. 3. Etude des courants. | 24 |
| II.3.3.1. La valeur de courant I_{max} | 24 |
| II.3.4. Etude le redresseur sur charge résistive. | 24 |
| II.3.4.1. Sans filtrage..... | 24 |
| II.3.4.2. Avec filtre passif parallèle (FPP). | 28 |
| II.3.4.3. Avec un filtre active parallèle (FAP). | 32 |
| II.3.5. Avec une charge purement inductive..... | 35 |
| II.3.5.1. Avec un filtre passif parallèle (FPP). | 38 |
| II.3.5.2. Avec un filtre actif parallèle (FAP)..... | 40 |
| II.4. Redressement commandé PD3 (thyristor)..... | 43 |
| II.4.1. Avec une charge résistive. | 43 |
| II.4.1.1. Avec filtre passif parallèle (FPP). | 46 |
| II.4.1.2. Avec un filtre active parallèle (FAP). | 48 |
| II.4.2. Avec une charge purement inductive..... | 51 |
| II.4.2.1. Avec filtre passif parallèle (FPP). | 54 |
| II.4.2.2. Avec filtre active (FAP). | 56 |
| II.5. Redresseur MLI. | 58 |
| II.5.1. Principe de fonctionnement en redresseur MLI..... | 58 |
| II.6. Les données des composant utilisé dans les schémas précédents. | 61 |
| Conclusion..... | 62 |

Chapitre III : Structure de la nouvelle topologie d'un redresseur à faible taux de distorsion harmonique et à facteur de puissance élevé.

| | |
|---|----|
| III.1. Introduction. | 63 |
| III.2. Structure de la nouvelle topologie d'un redresseur à faible taux de distorsion harmonique et à facteur de puissance élevé..... | 63 |
| III.3. Principe de fonctionnement..... | 64 |
| III.4. Circuit électrique de la nouvelle topologie de redresseur à faible taux de distorsion harmonique et à facteur de puissance élevé. | 66 |
| III.5. Contribution en puissance des convertisseurs DC/DC..... | 67 |
| III.6. Stratégie de contrôle..... | 70 |
| III.7. Montage de simulation. | 71 |
| III.8. Paramètre utilisé pour la simulation..... | 73 |
| III.9. Résultat de simulation..... | 73 |
| Conclusion..... | 76 |
| Conclusion générale..... | 78 |
| Bibliographié. | 79 |

Introduction générale

Depuis plusieurs années, on observe sur les réseaux électriques une augmentation des équipements électriques qui utilisent des convertisseurs statiques. Ces équipements électriques sont considérés comme des charges non linéaires (charge polluante) émettant des courants harmoniques dont les fréquences sont des multiples entiers de la fréquence fondamentale, ou parfois à des fréquences quelconques. Le passage de ces courants harmoniques dans les impédances du réseau électrique peut entraîner des tensions harmoniques aux points de raccordement et alors polluer les consommateurs alimentés par le même réseau électrique. Par conséquent il est nécessaire de réduire ces harmoniques, pour cette raison des standards de délimitations d'harmonique ont été recommandés pour limiter les harmoniques de courant injecté dans le réseau par ces charges non linéaire.

Pour réduire ces perturbations et ainsi améliorer la qualité de l'énergie, il existe plusieurs solutions, parmi elle : les filtres passifs. Le filtrage passif consiste à piéger les courants harmoniques dans des circuits LC, accordés sur les rangs d'harmoniques à filtrer. Les rangs 5 et 7 sont les plus couramment filtrés. Cependant, cette solution, qui est techniquement simple et de faible investissement, est d'une efficacité moyenne. Les performances des filtres passifs sont limitées en termes de réduction de la pollution harmonique. Les inconvénients proviennent de la limitation en puissance, de l'encombrement, du coût des composants passifs ainsi que du circuit résonant qu'ils forment. C'est pourquoi la solution des filtres actifs s'est largement développée. Ces filtres actifs ont pour principal objectif de compenser les courants harmoniques injectés dans le réseau. L'utilisation des filtres actifs permet d'éviter les inconvénients majeurs des filtres passifs, qui sont le risque de résonance et la possibilité de surcharge.

Les inconvénients des filtres passifs et des filtres actifs classiques peuvent être simultanément limités en utilisant la nouvelle topologie du redresseur à faible taux de distorsion harmonique et à facteur de puissance plus élevé. La conception de ce type de convertisseur est faite à base d'un ensemble de hacheurs de puissance de type élévateur, qui agissent comme des sources des courants harmoniques en opposition de phase avec ceux du réseau afin de rétablir un courant de source quasi sinusoïdal.

L'utilisation de cette nouvelle topologie est aujourd'hui considérée comme une solution qui permet de réduire presque tous les harmoniques dans les réseaux électriques.

Le travail présenté comporte trois chapitres organisés comme suite :

Dans le premier chapitre, nous abordons en premier lieu les différents problèmes affectant la qualité de l'énergie électrique, ce qui tend à montrer les origines des harmoniques et leurs conséquences sur les installations. Nous focalisons le point sur celui des harmoniques, compte tenu de sa gravité avec la prolifération des charges non-linéaires. Ensuite nous passons aux moyens de luttés et les différentes solutions traditionnelles et modernes de dépollution harmonique existantes.

Dans le deuxième chapitre, nous étudions les redresseurs (commandé et non commandé), en effectuant une analyse des courant harmonique injecté par ces dernier au réseau, cela en passant par une étude théorique du fonctionnement de ces convertisseur. Ensuite nous utilisons les filtres passifs parallèles et les filtres actifs parallèles pour minimiser les perturbations. Les résultats de ce chapitre sont réalisés par l'intermédiaire de programme de simulation PSIM.

Le troisième chapitre est consacré à la conception d'un redresseur triphasé à faible taux de distorsion harmonique et à facteur de puissance élevé, ainsi que les résultats obtenus avec le circuit proposé par simulation à l'aide du logiciel PSIM.

Enfin, notre travail sera clôturé par une conclusion générale.

Chapitre I :

**Etat de l'art sur l'influence des harmoniques sur le
réseau électrique.**

I.1. Introduction

L'intérêt toujours croissant suscité par le problème des harmoniques chez les spécialistes démontre l'ampleur de ce phénomène dans les réseaux électriques. Dans le but de filtrer les harmoniques, différentes études permettent aujourd'hui de comprendre non seulement leur génération et leur propagation, mais aussi de mesurer leur ampleur dans un réseau de distribution. Les travaux antérieurs sur le filtrage démontrent que l'usage requis d'un réseau d'énergie électrique suppose la présence d'une onde de qualité acceptable, et d'une continuité dans la distribution de l'énergie. Dans l'utilisation courante connue jusqu'à nos jours, un réseau de distribution électrique sur son standard est triphasé, de courant alternatif avec une fréquence de 50Hz. [1]

Dans ce chapitre, nous allons aborder une étude théorique de l'influence des harmoniques sur le réseau électrique, les caractéristiques des courants harmoniques, le cas des sources d'harmoniques ainsi que les effets des courants harmoniques dans un réseau de distribution électrique, puis les différentes solutions de dépollution des réseaux électriques, et on termine ce chapitre avec une petite conclusion.

I.2. Définition des harmoniques

Les harmoniques sont des perturbations permanentes affectant la forme d'onde du courant et celle de la tension du réseau électrique. Ces perturbations résultent de la superposition, sur l'onde fondamentale à 50Hz, d'ondes également sinusoïdales mais de fréquences multiples de celle du fondamentale, due à la présence des harmoniques. Les récepteurs absorbent des courants non sinusoïdaux qui traversent les impédances du réseau et provoquent ainsi une déformation de la sinusoïde de tension d'alimentation. La déformation de la forme d'onde est caractérisée par l'apparition de fréquences harmoniques de la tension. Le domaine de la fréquence qui correspond à l'étude des harmoniques est généralement compris entre l'harmonique 2 et celui du rang 40. [2]

I.3. Les caractéristiques des perturbations harmoniques

Différentes grandeurs sont définies pour caractériser la distorsion en régime déformé le taux global de distorsion harmonique (THD) et le facteur de puissance sont les plus employés

pour quantifier respectivement les perturbations harmoniques et la consommation de puissance réactive. [3]

I.3.1. Le taux de distorsion harmonique THD

On définit le taux de distorsion harmonique (THD), appliqué au courant ou à la tension, par :

$$THD(y)\% = 100 \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} y_{heff}^2}}{y_{1eff}} \quad (I.1)$$

y_{heff} : La valeur efficace de l'harmonique de rang h.

y_{1eff} : La valeur efficace du fondamental.

h : Rang de l'harmonique.

On peut écrire aussi :

$$THD(y)\% = 100 \frac{\sqrt{y_{eff}^2 - y_{1eff}^2}}{y_{1eff}} \quad (I.2)$$

A titre d'exemple, le tableau (I-1) nous montre les différents taux de distorsion en courant.

Tableau I-1 : THD_h pour diverses charges non linéaires. [4]

| Charges non linéaires | THD _h % |
|----------------------------------|--------------------|
| Variateur de vitesse | 80% |
| Alimentation de micro-ordinateur | 70% |
| Tube fluorescent | >100% |

I.3.2. Le facteur de puissance

La puissance apparente S d'un signal perturbé est composée de 3 parties :

La puissance active P, puissance réactive Q et la puissance déformante D. son expression est donnée par l'équation (I.3) :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (I.3)$$

La puissance réactive Q est associée au courant fondamental. La puissance déformante D est due aux harmoniques de courant avec :

$$D = 3V_1\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2} \quad (\text{I.4})$$

Où est I_h la valeur efficace des courants harmoniques.

Pour un signal sinusoïdal le facteur de puissance FP est :

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2+Q^2}} = \cos\varphi \quad (\text{I.5})$$

Et pour un signal non sinusoïdal :

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

On aura :

$$FP = \frac{I_{h1}}{I_h} = F_{dis}\cos\varphi_1 \quad (\text{I.7})$$

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

φ_1 : Le déphasage entre le courant fondamental et la tension.

La figure (I.1) représente le diagramme de Fresnel des puissances :

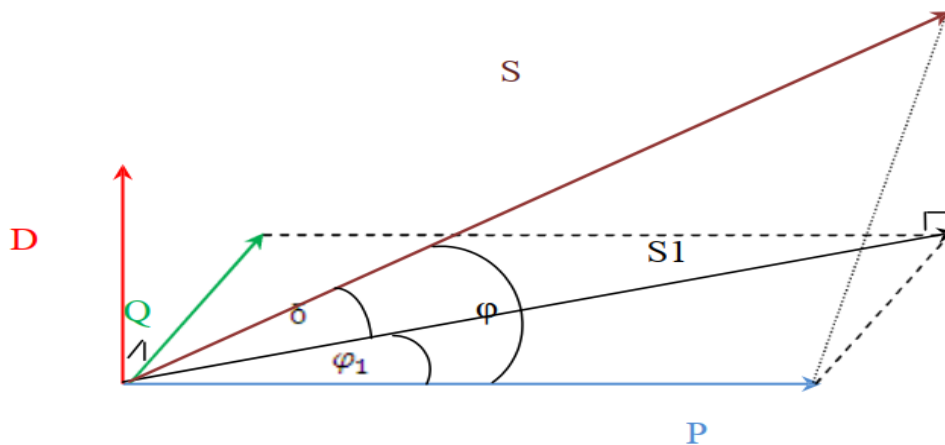


Figure I.1 : Diagramme de Fresnel des puissances. [4]

I.3.3. Le facteur de crête F_c

Le facteur de crête est le rapport entre la valeur de crête du courant ou de la tension et la valeur efficace.

$$F_c = \frac{y_{max}}{y_{eff}} \quad (I.8)$$

y_{max} : la valeur max (de la tension ou du courant).

y_{eff} : la valeur efficace (de la tension ou du courant).

- Pour un signal sinusoïdal, ce facteur est donc égal à $\sqrt{2}$.
- Pour un signal non-sinusoïdal, il peut être soit inférieur, soit supérieur à $\sqrt{2}$.

Ce facteur est plus particulièrement utile pour attirer l'attention sur la présence des valeurs de crête exceptionnelles par rapport à la valeur efficace. Un facteur de crête très élevé signifie des surintensités ponctuelles importantes. Ces surintensités, détectées par les dispositifs de protection, peuvent être à l'origine de déclenchements intempestifs. [5]

I.3.4. Facteur de qualité Q_0

Le facteur de qualité d'un système est une mesure sans unité du taux d'amortissement d'un oscillateur. On introduit souvent le paramètre sans dimension Q_0 appelé facteur de qualité défini par :

$$Q_0 = \omega_0 \tau \quad (I.9)$$

Avec ω_0 la pulsation propre.

Et τ le temps de relaxation (encore appelée durée caractéristique).

Plus le facteur de qualité est élevé, plus la bande passante est petite, et plus la résonance est "piquée". Le facteur de qualité permet donc de quantifier la "qualité d'un filtre" (qu'il soit électronique, acoustique, optique... etc) : plus Q est élevé, plus le filtre est sélectif. [21]

I.4. Types des harmoniques

En règle générale, on distingue les harmoniques de rangs pairs (2, 4, 6, 8 ...etc.) et les harmoniques de rangs impairs (3, 5, 7 ...etc.) plus influentes, dans les réseaux industriels. Il existe aussi d'autres types d'harmoniques tel que :

I.4.1. Inters harmoniques

Sont superposées à l'onde fondamentale mais ne sont pas des multiples entiers de la fréquence du réseau électrique. L'apparition des inter-harmoniques est en augmentation et leurs origines principales sont dues aux convertisseurs de fréquence, les variateurs de vitesse et d'autres équipements similaires de contrôle-commande. (Voir figure (I.2)). [6]

I.4.2. Infra harmoniques

Ce sont des composantes de fréquences inférieures à celle du fondamental. (Voir figure (I.2)). [2]

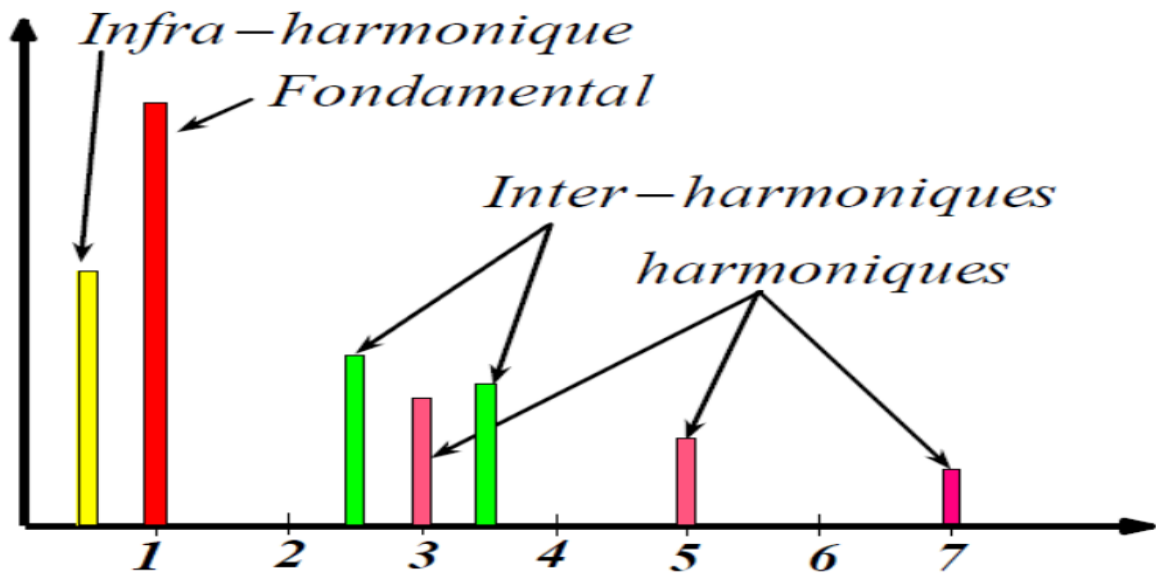


Figure I.2 : Représentation spectrale d'un signal périodique. [2]

I.5. Les grandeurs caractéristiques

I.5.1. Les différents types des charges

I.5.1.1. Charge non linéaire

Les charges non linéaires consomment un courant qui n'est pas sinusoïdal lorsque la tension est sinusoïdale. Elles représentent les principales sources d'émission en courants harmoniques sur les réseaux électriques. Un bon exemple en sont les conversions d'électronique de puissance. [7], [8]

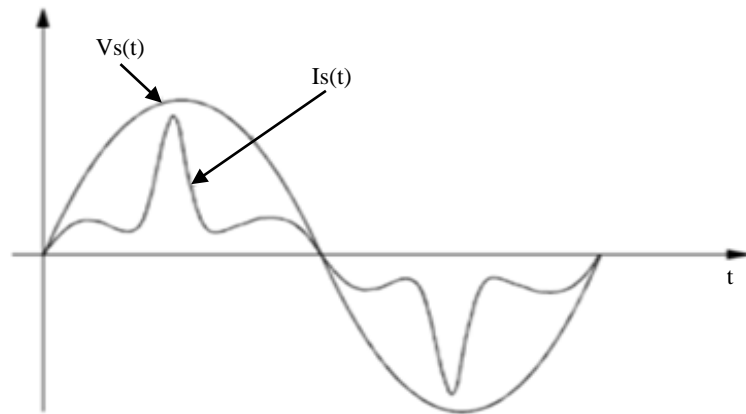


Figure I.3. Charge non linéaire. [7]

I.5.1.2. Charge linéaire

Une charge est dite linéaire, si alimentée par une tension sinusoïdale, elle consomme un courant sinusoïdal. Cependant, le courant et la tension peuvent être déphasés. Les charges linéaires couramment utilisées sont constituées de résistances, de capacités et d'inductances. [7], [8]

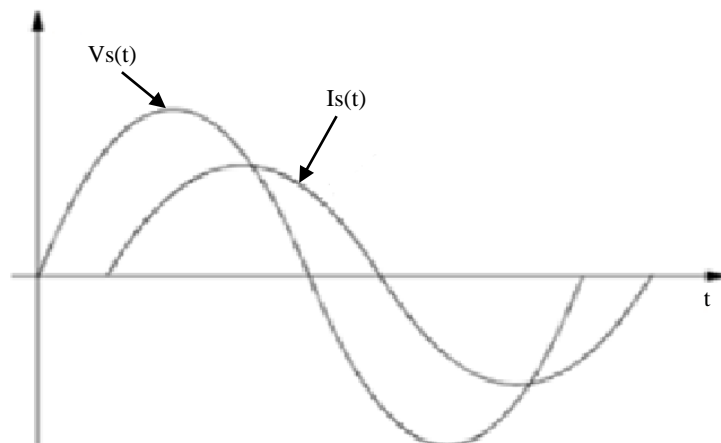


Figure I.4. Charge linéaire. [7]

I.5.2. Série de Fourier

Ceci revient à dire que : tout signal, périodique de période $T=1/f$, peut être décomposé en une somme infinie de termes sinus et cosinus de fréquences multiples mathématiquement, cela s'écrit [4] :

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cdot \cos(n\omega t) + b_n \cdot \sin(n\omega t)) \quad (\text{I.10})$$

$$\text{Où} \quad a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt \quad (\text{I.11})$$

Et pour $n \in \mathbb{N}^*$

$$\text{On a:} \quad a_n = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \cos(n\omega t) dt \quad (\text{I.12})$$

$$\text{Et} \quad b_n = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \sin(n\omega t) dt \quad (\text{I.13})$$

a_n et b_n : les coefficients de Fourier.

a_0 : la valeur moyenne de $x(t)$.

I.6. Les effets des harmoniques

Les tensions et courants harmoniques superposés à l'onde fondamentale conjuguent leurs effets sur les appareils et équipements utilisés. Ces grandeurs harmoniques ont des effets différents selon les récepteurs rencontrés. [9]

On a deux types d'effets :

- ✓ effets instantanés.
- ✓ effets différés.

I.6.1. Les effets instantanés

Les effets instantanés concernent les appareils produisant une image électronique (écrans d'ordinateurs, télévisions), les appareils produisant un son censé être de bonne qualité (chaîne HI-FI, téléphonique) ou la précision des appareils de mesure. [4], [9]

I.6.2. Les effets différés

Les effets différés sont souvent liés à un sur échauffement plus ou moins important. Ces effets sont dus essentiellement à deux phénomènes : [4], [9]

- ✓ L'échauffement des conducteurs ou des composants traversés par les courants harmoniques.
- ✓ Le vieillissement des isolants.

Chapitre I - Etat de l'art sur l'influence des harmoniques sur le réseau électrique.

Tableau I-2 : Ensemble des matériels électriques perturbés par la pollution harmonique. [4]

| Nature du matériel électrique | Effet de la pollution harmonique |
|---|---|
| - Machines tournantes (Moteurs triphasés, alternateurs). | - Echauffement supplémentaire (effet Joule) dans les enroulements statoriques, couples oscillatoires. Augmentation du bruit. |
| - Transformateurs | - Pertes supplémentaires dans le fer (par courants de Foucault) et dans les enroulements (par effet Joule). - Risque de saturation en présence d'harmoniques paires. |
| - Câbles | - Augmentation des pertes surtout dans le neutre où s'ajoutent les harmoniques de rang 3 et multiple de 6 Pertes diélectriques supplémentaires |
| - Electronique de puissance (ponts redresseurs à thyristors, transistor...etc.) | - Troubles fonctionnels liés à la forme d'onde (commutation synchronisation) |
| - Condensateurs de puissance | - Pertes diélectriques supplémentaires aboutissant à un vieillissement prématuré des condensateurs |
| - Ordinateurs. | - Dysfonctionnement lié aux couples pulsatoires des moteurs d'entraînement des supports magnétiques. |
| - Dispositifs de protection (fusibles, disjoncteurs magnétothermiques.) | - Fonctionnement intempestif. |
| - Compteur d'énergie. | - Erreur de mesure. |
| - Téléviseurs. | - Déformation d'image. |
| - Lampes à décharge. | - Risque de vacillement sous l'effet de l'harmonique de rang 2. |

I.7. Les normes

Pour limiter les effets des perturbations harmoniques sur les réseaux électriques, des normes ont été mises en place. Les deux principaux organismes qui ont établi de telles normes sont la Commission Électrotechnique Internationale CEI et IEEE. Les normes qu'ils ont établies sont de façon respective la série CEI 61000 et l'IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) Standard 519-1992. [10], [11]

I.7.1. Norme IEEE STD 519-1992

Cette norme détermine la procédure pour contrôler les harmoniques présents sur le réseau électrique ainsi que les limites recommandées de la pollution harmonique générée par les clients et de distorsion harmonique totale sur le réseau électrique. [10]

I.7.2. Normes CEI-61000

- Les normes CEI-61000-3-2 (tableau (I-3)) fixe la limitation des courants injectés dans le réseau public pour des équipements dont le courant par phase est inférieur à 16 Ampères. Il s'agit des appareils du domaine domestique. [11]

Tableau I-3 : Limites des composantes harmoniques en courants.

| Harmoniques impairs | | Harmoniques pairs | |
|---------------------|---|--------------------|---|
| Rang | Courant harmonique Admissible maximal (A) | Rang | Courant harmonique Admissible maximal (A) |
| 3 | 2.30 | 2 | 1.08 |
| 5 | 1.14 | 4 | 0.43 |
| 7 | 0.77 | 6 | 0.30 |
| 9 | 0.40 | $8 \leq k \leq 40$ | $0.23 * 8/k$ |
| 11 | 0.33 | | |
| 13 | 0.21 | | |
| $15 \leq k \leq 39$ | $0.15 * 15/k$ | | |

- Norme CEI-61000-3-4 est en cours d'élaboration pour les appareils dont le courant consommé est supérieur à 16 Ampères.

- Le tableau (I-4) nous montre les normes, CEI-61000-2-2 et CEI-61000-2-4, que doivent respecter au niveau des points de raccordement basse tension, sur les réseaux public et industriel. [11]

Tableau I-4 : Niveaux de compatibilité des harmoniques en tension [CEI-61000-2-2].

| Harmoniques impairs non multiples de 3 | | Harmoniques impairs multiples de 3 | | Harmoniques pairs | |
|--|-----------------------|------------------------------------|---------|-------------------|---------|
| Rang | THD (%) | Rang | THD (%) | Rang | THD (%) |
| 5 | 6 | 3 | 5 | 2 | 2 |
| 7 | 5 | 9 | 1.5 | 4 | 1 |
| 11 | 3.5 | 15 | 0.3 | 6 | 0.5 |
| 13 | 3 | 21 | 0.2 | 8 | 0.5 |
| 17 | 2 | >21 | 0.2 | 10 | 0.5 |
| 19 | 1.5 | | | 12 | 0.2 |
| 23 | 1.5 | | | >12 | 0.2 |
| 25 | 1.5 | | | | |
| >25 | $0.2+1.3\frac{25}{K}$ | | | | |

I.8. Méthodes des minimisation les harmoniques

Les perturbations engendrées par les charges peuvent être atténuées soit :

- ✓ Avec un système auxiliaire de filtrage pour les perturbations harmoniques.
- ✓ En limitant la consommation de puissance réactive.
- ✓ En modifiant la topologie du convertisseur pour limiter l'amplitude des sources de courants harmoniques.
- ✓ En augmentant la puissance de court-circuit du réseau par rapport à la puissance du générateur.

Alors, selon la littérature, les techniques de dépollution des réseaux électriques peuvent être classées en deux groupes :

- Les techniques traditionnelles.
- Les techniques modernes. [12]

I.8.1. Techniques traditionnelles de dépollution

Elles apportent une solution facile et rapide pour certains cas de perturbations bien localisées et utilisent des composants passifs (inductances, condensateurs, transformateurs) et /ou des branchements qui modifient le schéma de l'installation communément appelé filtres

passifs. Le rôle de ces filtres est l'absorption des harmoniques et la réduction concomitante du THD. Leur principe consiste à placer, en parallèle avec le réseau d'alimentation, une impédance de valeur très faible autour de la fréquence à filtrer et suffisamment importante à la fréquence fondamentale du réseau. [12]

I.8.1.1. Filtrages passifs

Une perturbation harmonique basse fréquence est réduite par un filtre passif composé d'une inductance et d'un condensateur en série et accordé sur la fréquence harmonique à atténuer. Les filtres passifs les plus utilisés sont les filtres résonnants et les filtres passe-haut. En effet, la dépollution d'une installation se fait par une association de filtres passifs résonnants, chacun accordé sur une fréquence harmonique différente. Le filtre correspondant au dernier harmonique à atténuer est en général amorti et du second ordre (résistance en parallèle avec une inductance) afin de réduire les tensions harmoniques de rang supérieur. [13]

La figure (I.5) ci-dessous montre le principe d'un filtrage passif :

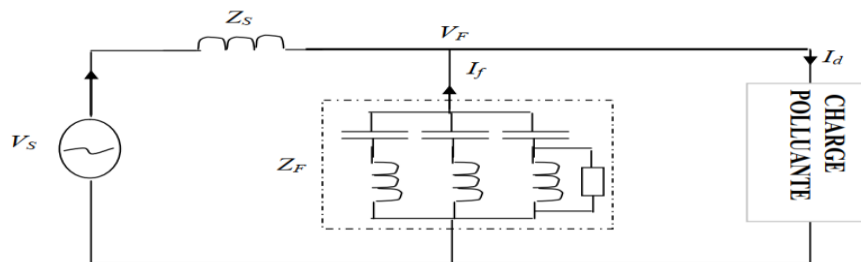


Figure I.5 : Principe du filtre passif. [13]

Le dimensionnement de ces filtres dépend des harmoniques à éliminer des performances exigées, de la structure du réseau et de la nature des récepteurs. Par cette technique, il est en général plus aisé de rejeter les harmoniques de rang élevé que celles de rang faible. [13]

• Principe de fonctionnement

Le principe du filtrage passif est d'éviter les courants harmoniques au même temps éliminer les tensions harmoniques résultantes en modifiant l'impédance locale du réseau. [14]

On peut classer les filtres passifs selon les paramètres suivants :

- ✓ Leur emplacement sur le réseau.
- ✓ Leur mode de connexion.
- ✓ Leur degré d'amortissement.
- ✓ Leur fréquence de résonance.

On utilise généralement deux types de filtre passif :

1. Filtres passifs résonnants

Ils sont constitués d'un circuit RLC en série accordé sur une fréquence déterminée. Ces filtres sont très sélectifs [15]. La figure (I.6) présente le schéma de branchement du filtre passif résonnant.

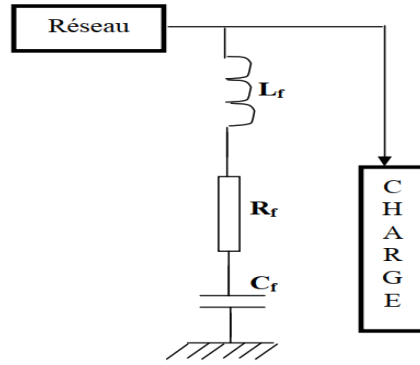


Figure I.6 : Branchement d'un filtre passif résonnant. [15]

Le filtre a une impédance Z_f donnée par :

$$Z_f = R_f + j \left(L_f \omega - \frac{1}{C_f \omega} \right) \quad (\text{I.14})$$

A sa fréquence de résonance, son impédance se réduit à une petite valeur soit R_f , car la réactance inductive devient égale à la réactance capacitive. Donc, on peut écrire :

$$L_f \omega_{\text{res}} = \frac{1}{C_f \omega_{\text{res}}} \quad (\text{I.15})$$

Ce type de filtre est caractérisé par l'emplacement de trois filtres, deux pour les harmoniques d'ordre inférieurs et un filtre pour les harmoniques d'ordre supérieurs, c'est-à-dire pour un pont triphasé nous avons besoin d'un filtre passe bas pour le cinquième et l'autre pour le septième harmonique et d'un filtre passe haut pour tous les harmoniques au-delà de 11^{ème}. [16]

2. Filtres passifs amorti (Passe Haut)

Ces filtres présentent une faible impédance sur une large bande de fréquence. Ils sont beaucoup moins sélectifs et réduisent les harmoniques supérieures au voisinage de leurs rangs d'accord. [16] La figure (I.7), représente le schéma de branchement d'un filtre amorti. Ces filtres présentent des performances moins bonnes que celles des filtres résonnants. En revanche, les conséquences d'une variation de la capacité ou de la fréquence sont très limitées.

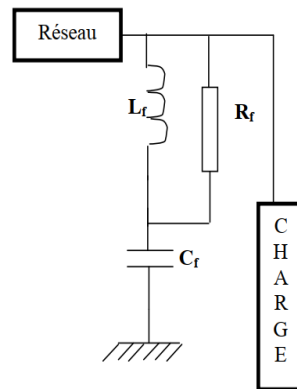


Figure I.7 : Branchement d'un filtre passif amorti (passe-haut). [16]

3. Inconvénients du filtrage passif

- une connaissance approfondie de la configuration du réseau électrique est nécessaire.
- Les variations de l'impédance du réseau peuvent détériorer la performance du filtre.
- Le réseau peut former un système résonnant avec un filtre et les fréquences voisines de la fréquence de résonance sont amplifiées.
- Equipement volumineux.
- Inadaptabilité et perte d'efficacité lorsque les caractéristiques du réseau électrique évoluent.

I.8.2. Solutions modernes de dépollution

Deux raisons principales ont conduit à concevoir une nouvelle structure de filtrage moderne et efficace appelée filtre actif. La première raison est due aux inconvénients inhérents aux solutions traditionnelles de dépollution qui ne répondent plus à l'évolution des charges et des réseaux électriques. En effet, les méthodes dites « classiques » de filtrage ou de dépollution des réseaux électriques présentent un certain nombre d'inconvénients. Le plus important d'entre eux est sans doute le fait d'être sensible aux évolutions de l'environnement. Ils voient leur efficacité baisser avec les variations des perturbations (variation des fréquences et des amplitudes des harmoniques). [16]

La seconde raison fait suite à l'apparition de nouveaux composants à commutation forcée, comme les transistors bipolaires, les thyristors GTO et les transistors IGBT qui ont permis de réaliser de nouvelles structures qui permettent le contrôle de la forme d'onde de la phase du

courant d'entrée. Le but de ces filtres est de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à compenser les perturbations responsables de la dégradation des performances des équipements et installations électriques. Ainsi le filtrage actif tend à annuler les courants harmoniques en injectant dans la source perturbatrice des courants harmoniques d'amplitudes identiques, mais en opposition de phases à l'aide d'un pont onduleur. A cet effet, une mesure du courant de la charge non linéaire permet de connaître le courant à fournir. [16]

Nous citerons trois configurations possibles de filtres actifs :

- **Le filtre actif parallèle (FAP)** : conçu pour compenser toutes les perturbations de courant comme les harmoniques, les déséquilibres et la puissance réactive.
- **Le filtre actif série (FAS)** : conçu pour compenser toutes les perturbations de tensions comme les harmoniques, les déséquilibres et les creux de tension.
- **La combinaison parallèle série actif** : solution universelle pour compenser toutes les perturbations en courant et en tension.

I.8.2.1. Filtre actif parallèle (FAP)

Il est appelé aussi compensateur shunt, il est connecté en parallèle sur le réseau de distribution figure (I.8). Il est habituellement commandé comme un générateur de courant. Son principe est d'injecter dans le réseau électrique des courants harmoniques I_{inj} égaux à ceux absorbés par la charge non linéaire mais en opposition de phase, de telle sorte que le courant fourni par le réseau I_s soit sinusoïdal et en phase avec la tension simple correspondante. Ainsi, il empêche les courants harmoniques, réactifs et déséquilibrés de circuler à travers l'impédance du réseau. Par conséquent, Il améliore le taux de distorsion en courant et en tension. [17]

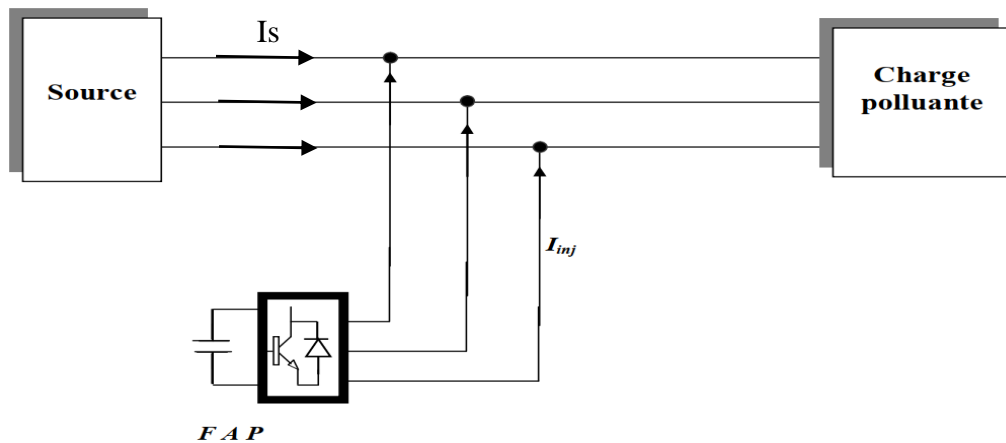


Figure I.8 : Montage d'un filtre actif parallèle. [17]

I.8.2.2. Filtre actif série (FAS)

Le filtre actif série est connecté en série sur le réseau comme le montré la figure (I.9). Il se comporte comme une source de tension qui engendre des tensions harmoniques dont la somme avec la tension du réseau est une onde sinusoïdale. [17]

Il est destiné à protéger les installations qui sont sensibles aux tensions perturbatrices (harmoniques, creux, déséquilibrés) provenant de la source et également celles provoquées par la circulation des courants perturbateurs à travers l'impédance du réseau. Cette structure est proche, dans le principe des conditionneurs de réseau. Toutefois, cette topologie présente quelques difficultés et inconvénients lors de sa mise en œuvre, elle ne permet pas de compenser les courants harmoniques consommés par la charge. [17]

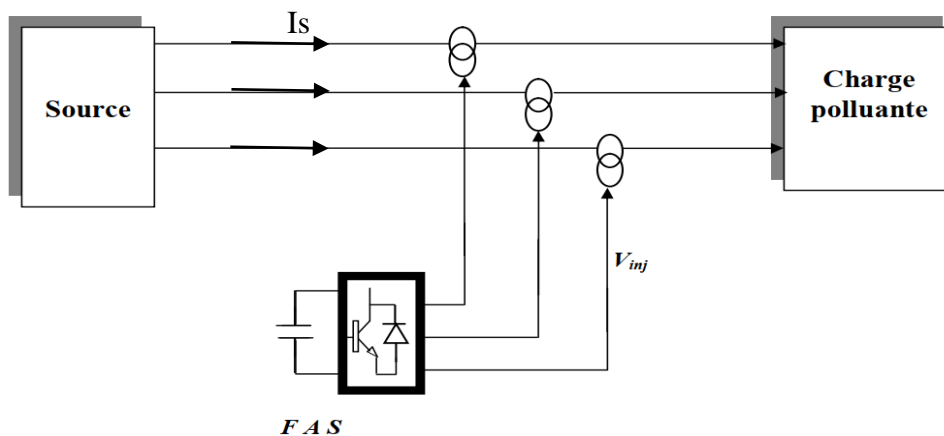


Figure I.9 : Montage du filtre actif en série. [17]

I.8.2.3. Combinaison parallèle série actif

C'est une solution de compensation universelle basée sur le fonctionnement simultané des filtres actifs parallèle et série figure (I.10). Donc, elle possède les avantages cumulés des filtres actifs parallèle 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, comme il est montré ci-dessous, permet de dépolluer la source des tensions perturbatrices ; ou s'il est placé en aval, il permet d'isoler la charge de la source perturbée. [17], [18]

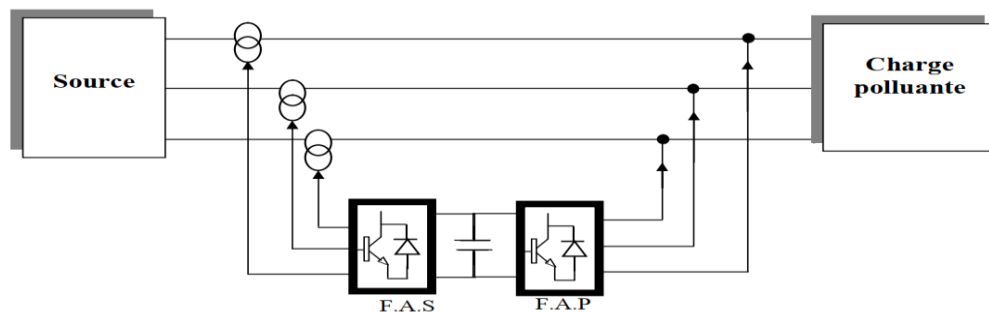


Figure I.10 : Combinaison parallèle -série actif (UPQC). [17]

I.8.3. Filtrage hybride

Il faut noter l'existence de plusieurs autres combinaisons mixtes de filtres actifs avec cette fois-ci les filtres passifs. Ces combinaisons dites combinaisons hybrides active et passive. Ces structures sont conçues pour réduire le dimensionnement et par conséquent le prix des filtres actifs. Dans ce cas, les filtres passifs qui ont pour rôle d'éliminer les harmoniques prépondérantes, permettent de réduire le dimensionnement des filtres actifs qui ne compensent que le reste des perturbations. Plusieurs configurations ont été présentées dans la littérature dont les plus étudiées sont : [19]

I.8.3.1. Filtre actif série avec des filtres passifs parallèles

Dans ce cas, le rôle du filtre actif série (FAS) est d'empêcher les courants harmoniques de circuler vers le réseau et de les obliger à passer par les filtres passifs raccordés à leurs fréquences comme le montre la figure suivante :

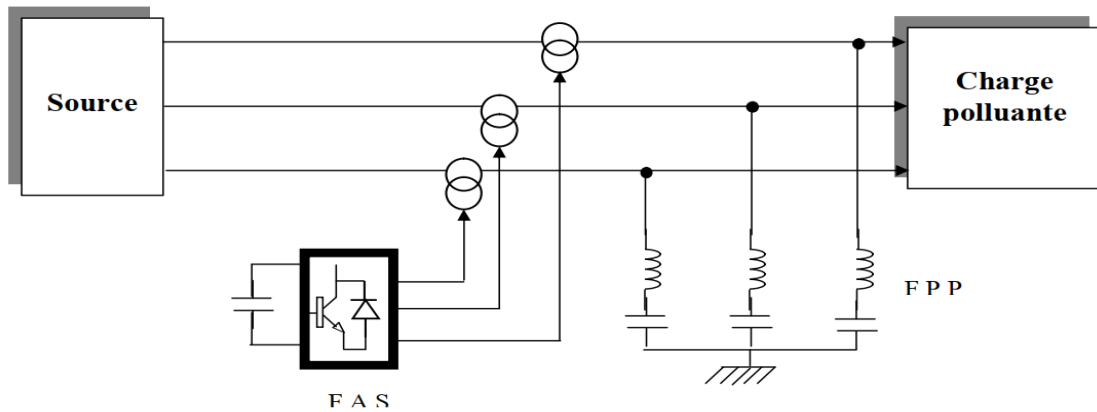


Figure I.11 : Schéma d'un filtre actif série avec filtre passif parallèle. [19]

I.8.3.2. Filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles

Le principe de fonctionnement de cette configuration est le même que le précédent. Il a l'avantage de réduire encore le dimensionnement du filtre actif série car le courant qui le traverse est faible, de plus, le filtre actif série est à l'abri d'un éventuel court-circuit de la charge. [19]

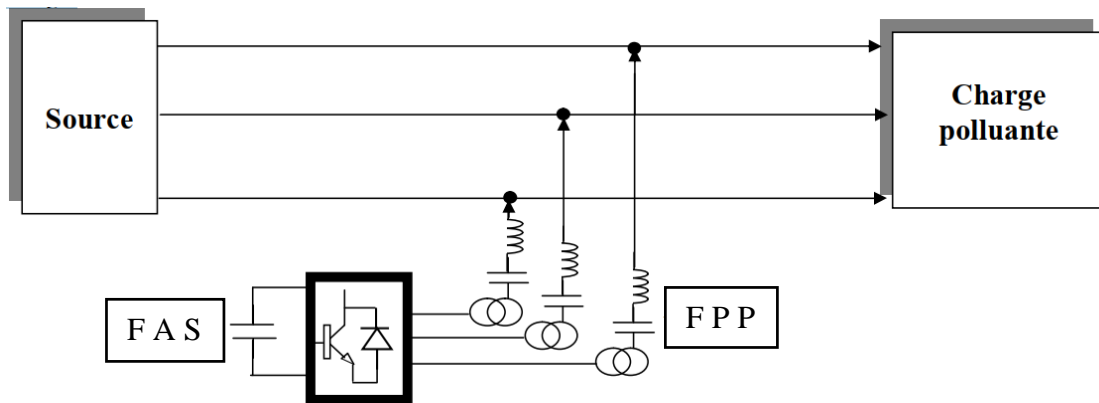


Figure I.12 : Schéma d'un filtre actif série connecté en série avec filtre passif série. [19]

I.8.3.3. Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle.

Dans ce cas, le rôle du filtre actif parallèle est de compenser les courants harmoniques basse fréquence émis par la charge polluante. Le filtre passif accordé sur une fréquence élevée, élimine les harmoniques hautes fréquences y compris ceux créés par le filtre actif parallèle. [19]

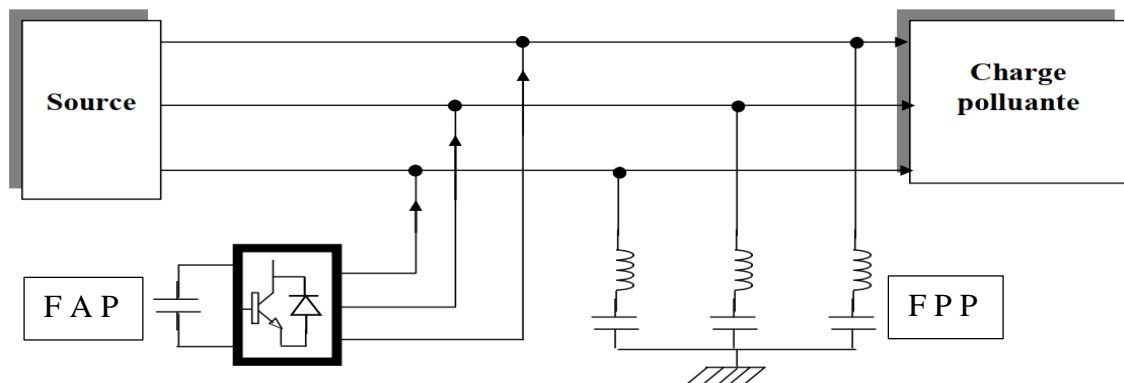


Figure I.13 : Schéma d'un filtre actif parallèle avec filtre passif parallèle. [19]

I.8.4. Les avantages et les inconvénients des dépollutions harmoniques

Tableau I-5 : Quelques avantages et inconvénients de la dépollution harmonique. [20]

| Principes | Avantages | Inconvénient |
|---------------------------------|---|--|
| Filtrage passif | - amélioration de la forme du courant | - risque de résonance, pas d'adaptabilité |
| Filtrage active série | - amélioration de la forme de la tension, adaptabilité aux variations de charge et du réseau | - pas d'amélioration de la forme du courant |
| Filtrage active parallèle | - amélioration de la forme du courant, adaptabilité aux variations de charge et du réseau | - amélioration de la forme de la tension pas toujours évidente |
| Filtrage active parallèle-série | - amélioration de la forme du courant, amélioration de la forme de la tension, adaptabilité aux variations de charge et du réseau | - réalisation difficile |

I.8.5. Comparaison générale entre le filtre passif et le filtre actif

Le tableau ci-dessous illustre les différents avantages et inconvénients majeurs des deux types de dispositifs de filtrage :

Tableau I-6 : Comparaisons entre le filtre passif et le filtre actif. [10]

| Caractéristiques | Filtre passif | Filtre actif |
|---|---|--|
| Adaptation à l'évolution de la charge et du réseau | Non | Oui, ce fait automatique. |
| Limite de compensation de rang harmonique | -Le filtre résonant ne compense qu'un rang harmonique à la fois. -Le filtre amorti compense dans la limite de sa bande passante. | Compense dans la limite de sa bande passante qui est déterminée par la fréquence de commutation maximale des semi-conducteurs de son onduleur. |
| Risque de résonance entre le filtre et le réseau | Oui | Non |
| Compensation de puissance réactive | Oui | Oui, mais à coût plus élevé que pour le filtre passif. |
| Possibilité de surcharge lorsque le courant harmonique dépasse le dimensionnement du filtre | Oui | Non |
| Compensation dans les réseaux haute puissance | Oui | Oui, mais à cout très élevé |

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'origine, les effets ainsi que les normes, et les solutions qui s'appliquent au phénomène des perturbations qui existent au niveau des réseaux électriques.

Lorsque la forme d'onde de la tension ou de courant de la source n'est plus sinusoïdale, donc il y a la présence des harmoniques dans le signal (le signal perturbé). Ces harmoniques sont généralement causés par les charges non linéaires, dans ce cas-là on utilise les méthodes de dépollution traditionnelles ou modernes pour minimiser ces perturbations dans les réseaux électriques.

Le chapitre suivant traitera d'étude et de simulation des méthodes de minimisation des harmoniques dans les signaux perturbés, avec les charges non linéaires.

Chapitre II :

Etude d'un pont redresseur (non commandé et commandé) triphasé avec et sans filtrage.

II.1. Introduction

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 en courant continu le récepteur branché à leur sortie. [22]

Les redresseurs à pont de diodes triphasés alimentent bien souvent une charge hautement capacitive. Ces charges sont généralement non linéaires, qui absorbent un courant non sinusoïdal et se comportent comme des générateurs d'harmoniques. Le courant de ligne est alors très riche en harmoniques cinq et sept. Ces harmoniques se propagent de la charge vers le réseau et engendrent des chutes de tension harmonique qui s'ajoutent à la composante fondamentale de la tension délivrée par le réseau. Il en résulte un THD du courant de ligne très élevé. Ces courants harmoniques en revanche créent dans l'inductance du réseau des chutes de tension qui viennent déformer la tension de ligne, perturbent ainsi les autres équipements qui sont branchés sur le réseau, elles consomment parfois de l'énergie réactive, la forme d'onde du courant de la source perd sa forme sinusoïdale et obtient également une dégradation du facteur de puissance. Par ce fait, les distributeurs d'énergie électrique se voient donc obligés d'imposer des normes et de se protéger contre ces perturbations. [10]

Dans ce chapitre, nous allons aborder une étude théorique d'un redresseur PD3 commandé et non commandé, avec filtrages et sans filtrages, et une autre étude avec le programme de simulation PSIM, et on interprète les résultats de la simulation et les résultats obtenus théoriquement, on termine ce chapitre avec une petite conclusion.

II.2. Les domaines d'utilisation

La conversion alternative / continue est utilisée dans une très large plage de puissance :

- De quelques mW (milliwatts) pour les alimentations de petits ensembles électroniques (chargeur de téléphone portable).
- A plusieurs GW (gigawatts) pour l'interconnexion de réseaux de distribution d'énergie électrique de phases différentes. [22]

II.2.1. Quelques applications usuelles

- Alimentation des structures électroniques sous tension continue de bas niveau (3,3 à 15V) à partir du réseau 50Hz en HIFI, télévision, électroménager.
- Recharge des accumulateurs d'appareils nomades (téléphone, ordinateur portable...).
- Entraînement des machines à courant continu à vitesse variable.
- Electrolyse en industrie électrochimique. [23]

II.3. Redressement non commandé PD3 (à diodes)

II.3.1. Principe de fonctionnement du PD3

Les tensions V_1 , V_2 et V_3 sont des tensions entre phases et neutre (tensions simples) de valeur efficace V . Si les enroulements sont montés en étoile, en utilisant le neutre se sont alors les tensions simples qui sont utilisées, ce qui fait perdre l'intérêt du triphasé. [10] Les diodes D1, D3 et D5 qui sont à cathode commune conduisent lorsqu'elles sont soumises au potentiel le plus élevé. Les diodes D2, D4 et D6 qui sont à anode commune conduisent que si elles sont soumises au potentielle plus faible.

Supposons que nous avons le système triphasé suivant :

$$V_1 = V\sqrt{2} \sin(\omega t) \quad (\text{II.1})$$

$$V_2 = V\sqrt{2} \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \quad (\text{II.2})$$

$$V_3 = V\sqrt{2} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \quad (\text{II.3})$$

II.3.2. Etude des tensions

La tension redressée U_c est périodique de période $T/3$.

II.3.2.1. La valeur moyenne de la tension de sortie U_{cmoy}

$$U_{cmoy} = \frac{1}{T} \int_0^T V(\theta) d\theta = \frac{3\sqrt{3}.V_m}{\pi} \quad (\text{II.4})$$

Tell que $V(\theta) = V_m \sin \theta \quad (\text{II.5})$

Et $V_m = V\sqrt{2} \quad (\text{II.6})$

II.3.2.2. Valeur efficace de la tension de sortie U_{ceff}

$$U_{ceff}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T V^2(\theta) d\theta \quad (II.7)$$

Donc
$$U_{ceff} = \frac{\sqrt{6} \cdot V_m}{2} \quad (II.8)$$

II.3. 3. Etude des courants

II.3.3.1. La valeur de courant I_{max}

$$I_{max} = I_c \quad (II.9)$$

II.3.4. Etude du redresseur sur charge résistive

II.3.4.1. Sans filtrage

Le montage de loin le plus utilisé est le montage en pont, ou parallèle double PD3 dit aussi montage en pont de Graëtz triphasé. [24]

La figure (II.1) représente le schéma du redresseur pont de Graëtz triphasé (PD3) à diode avec une charge résistive.

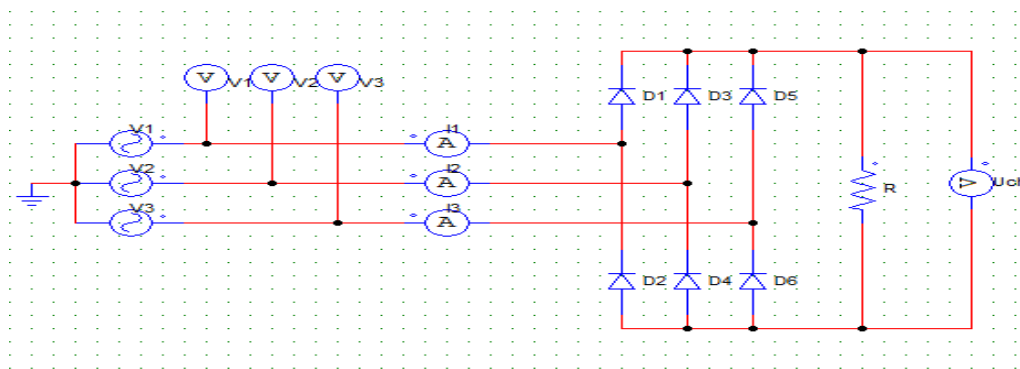


Figure II.1 : Schéma du redresseur pont de Graëtz triphasé à diodes avec une charge résistive.

• **Etude théorique**

La décomposition en série de Fourier du signal périodique de période 2π de la figure (II.3) donne les résultats suivant :

La valeur moyenne du courant de la source est nulle.

Chapitre II - Etude d'un pont redresseur (non commandé et commandé) triphasé avec et sans filtrage.

$$I_{1moy} = 0$$

A partir de la figure (II.3) on obtient que le signal soit impair.

Donc $An = 0$ et $bn > 0$

A partir de la fonction (I.13)

On a
$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T I_0 \sin(n\omega t) dt$$

$$b_n = \frac{4}{T} \int_0^{T/2} I_0 \sin(n\omega t) dt$$

$$b_n = \frac{4}{T} \int_{T/12}^{5T/12} I_0 \sin(n\omega t) dt$$

Donc
$$b_n = \frac{2I_0}{n\pi} \left(\cos \frac{n\pi}{6} - \cos \left(\frac{5n\pi}{6} \right) \right)$$

Si n est paire donc $bn = 0$.

Si n est impaire donc $n = 2p + 1$.

Les résultats sont placés dans le tableau (II-1)

Tableau II-1 : Les résultats du développement de la série de Fourier.

| n | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|-------|---|----------------------------|---|---|---|-----------------------------|---|-----------------------------|---|---|----|------------------------------|
| b_n | 0 | $\frac{2\sqrt{3}I_0}{\pi}$ | 0 | 0 | 0 | $\frac{2\sqrt{3}I_0}{5\pi}$ | 0 | $\frac{2\sqrt{3}I_0}{7\pi}$ | 0 | 0 | 0 | $\frac{2\sqrt{3}I_0}{11\pi}$ |

- **Les résultats de la simulation**

Dans cette partie on utilise le logiciel PSIM, et on simule le montage de la figure (II.1).

Les allures obtenues sont représentées dans les figures suivantes :

Chapitre II - Etude d'un pont redresseur (non commandé et commandé) triphasé avec et sans filtrage.

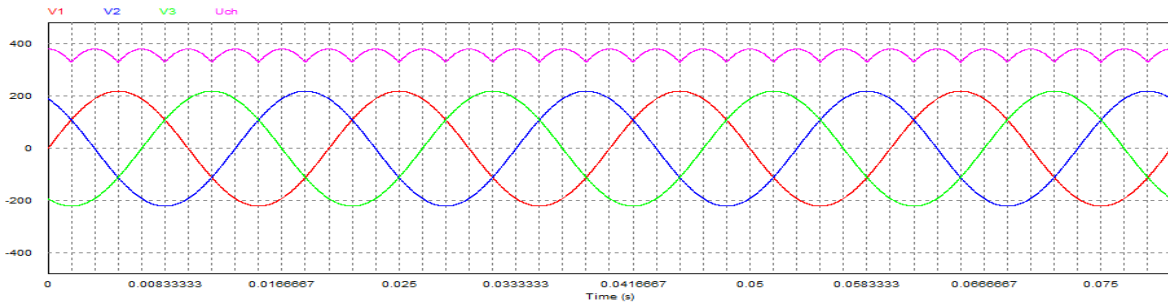


Figure II.2 : Allure des signaux entrés et sortie de la tension du redresseur PD3.

V_1 , V_2 et V_3 sont des tensions de la source.

U_{ch} c'est la tension redressée.

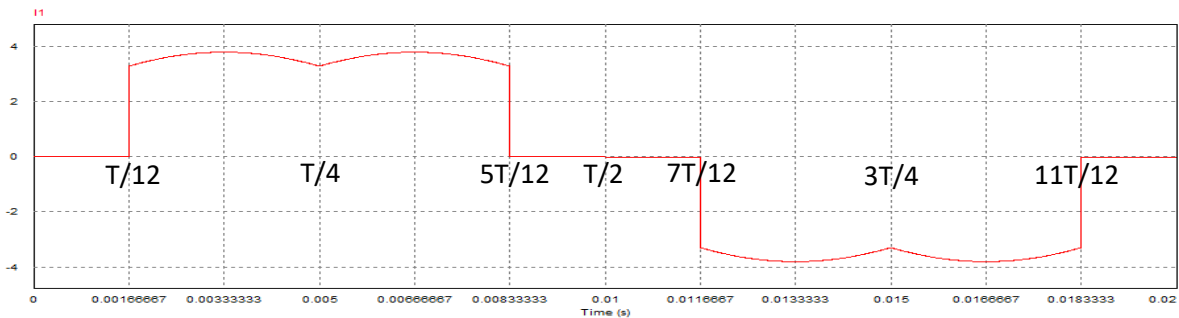


Figure II.3 : Allure de signal du courant de la source I_1 du redresseur PD3.

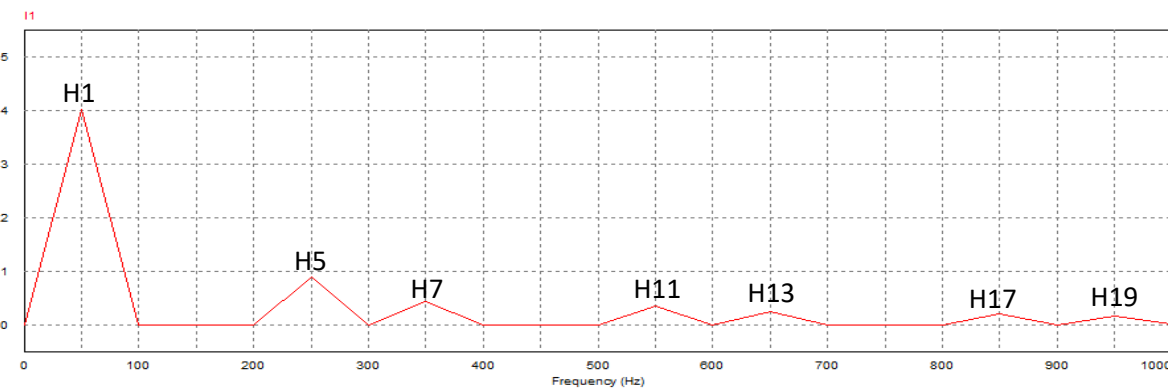


Figure II.4 : Analyse spectrale du courant I_1 avant le filtrage.

La figure (II.2) présente les tensions de la source et de la charge, et les tensions de la source sont purement sinusoïdales.

La figure (II.3) présente l'allure du courant de la source I_1 , ce courant n'est pas sinusoïdal, donc il est très riche en harmoniques.

Chapitre II - Etude d'un pont redresseur (non commandé et commandé) triphasé avec et sans filtrage.

La figure (II.4) présente l'analyse spectrale du courant harmonique dans la phase 1 de la source.

A partir des résultats de la figure (II.4), on trace le tableau suivant qui représente les valeurs du courant efficace phase 1 de la source, ainsi le THD du courant fondamental et des rangs harmoniques :

Tableau II-2 : Les valeurs du courant efficace et leur THD.

| Rang | Valeur du I_{eff} (A) | THD _h (%) |
|---------------------------------|--------------------------------|----------------------|
| 1 | 4.02 | 100 |
| 3 | 0 | 0 |
| 5 | 0.9 | 22.38 |
| 7 | 0.45 | 11.19 |
| 9 | 0 | 0 |
| 11 | 0.36 | 8.95 |
| 13 | 0.26 | 6.46 |
| 15 | 0 | 0 |
| 17 | 0.22 | 5.47 |
| 19 | 0.18 | 4.47 |
| $I_{\text{eff}} = 2.97\text{A}$ | | |
| $P = 1.33 \text{ kW.}$ | | |
| $S = 1.38 \text{ VA.}$ | | |
| $\text{FP} = 0.956.$ | | |

A partir de la relation (I.1), on obtient le résultat suivant :

$$\text{THD}\% = 28.26\%.$$

La figure (II.5) représente l'allure du THD de courant de la source avant la compensation :

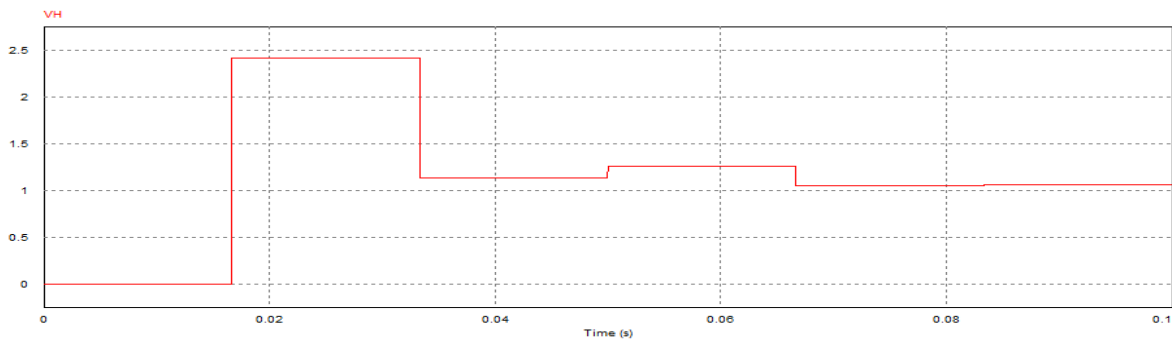


Figure II.5 : Le THD du courant de la source avant la compensation.

- **Interprétation les résultats**

On remarque que les résultats qu'on a calculés dans l'étude théorique sont des mêmes avec les résultats de la simulation du montage de la figure (II.1), et on remarque aussi que le courant de la source est très riche en harmonique de rang $(2k+1, k=2, \dots, 50)$, ainsi qu'on a obtenus un THD global de l'ordre de 28.26%, et les résultats qu'on a obtenus sont dans les normes CEI-61000-3-2.

Les harmoniques de rang 5 et 7 sont non négligeables, par conséquent on peut améliorer le THD et minimiser les perturbations dans ce système, avec raccordement des filtres passifs et actifs au réseau électrique.

Dans ce chapitre nous avons choisi les deux cas : filtres passif et actif parallèle.

II.3.4.2. Avec filtre passif parallèle (FPP)

Dans cette partie on ajout un filtre passif parallèle (FPP) pour minimiser juste l'harmonique de rang (soit le rang 5 ou 7), sont des rangs les plus gênants, qu'on a obtient dans le spectrale de la figure (II.4), et on simule le montage de la figure (II.5) :

Chapitre II - Etude d'un pont redresseur (non commandé et commandé) triphasé avec et sans filtrage.

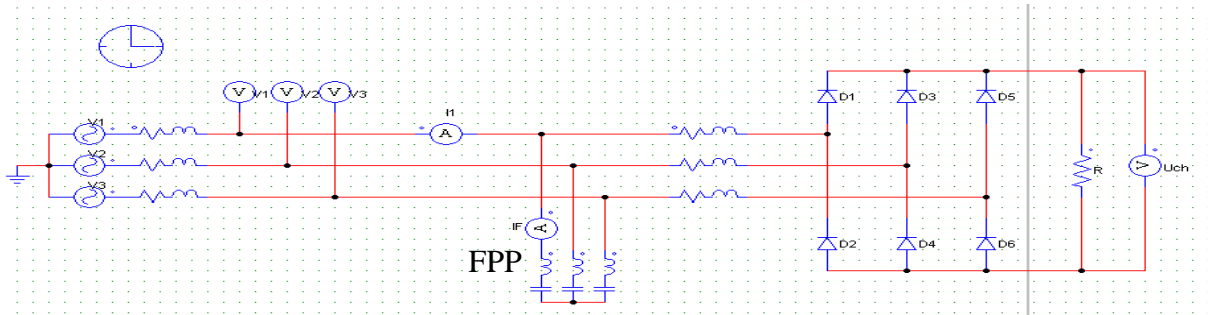


Figure II.6 : Schéma du redresseur pont de Graëtz triphasé à diodes avec un FPP.

• Etude théorique

Dans ce cas on fixe la valeur de la résistance de la charge $R = 100 \Omega$.

Pour un facteur de qualité de 100, la réactance de l'inductance est :

$$Q_0 = h * X_L / R \quad (\text{II.10})$$

$$X_L = R \frac{Q_0}{h} \quad (\text{II.11})$$

La réactance de la capacité est :

$$Q_0 = \frac{X_C}{h * R} \quad (\text{II.12})$$

$$X_C = Q_0 * h * R \quad (\text{II.13})$$

$$X_C = \frac{1}{Cw} \quad (\text{II.14})$$

$$C_f = \frac{1}{X_C * w} \quad (\text{II.15})$$

A partir de la relation (I.15), on obtient :

$$L_f = \frac{1}{C_f w_{res}^2} \quad (\text{II.16})$$

Telle que :

$$w_{res} = 2\pi h f \quad (\text{II.17})$$

Les résultats du calcul sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau II-3 : les résultats du calcul des capacités et des inductances de filtrages de chaque rang.

| | H ₅ | H ₇ | H ₁₁ | H ₁₃ | H ₁₇ | H ₁₉ |
|---------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| X _L (Ω) | 2000 | 1428.57 | 909.09 | 769.23 | 588.24 | 526.32 |
| X _C (Ω) | 50000 | 70000 | 110000 | 130000 | 170000 | 190000 |
| C _f (nF) | 12.74 | 6.5 | 0.42 | 0.3 | 0.17 | 0.14 |
| L _f (H) | 31.85 | 31.85 | 5.07 | 5.07 | 5.07 | 5.07 |

Chapitre II - Etude d'un pont redresseur (non commandé et commandé) triphasé avec et sans filtrage.

- **Les résultats de la simulation**

Les allures obtenues avec la simulation du schéma de la figure (II.6) sont représentées dans les figures suivantes :

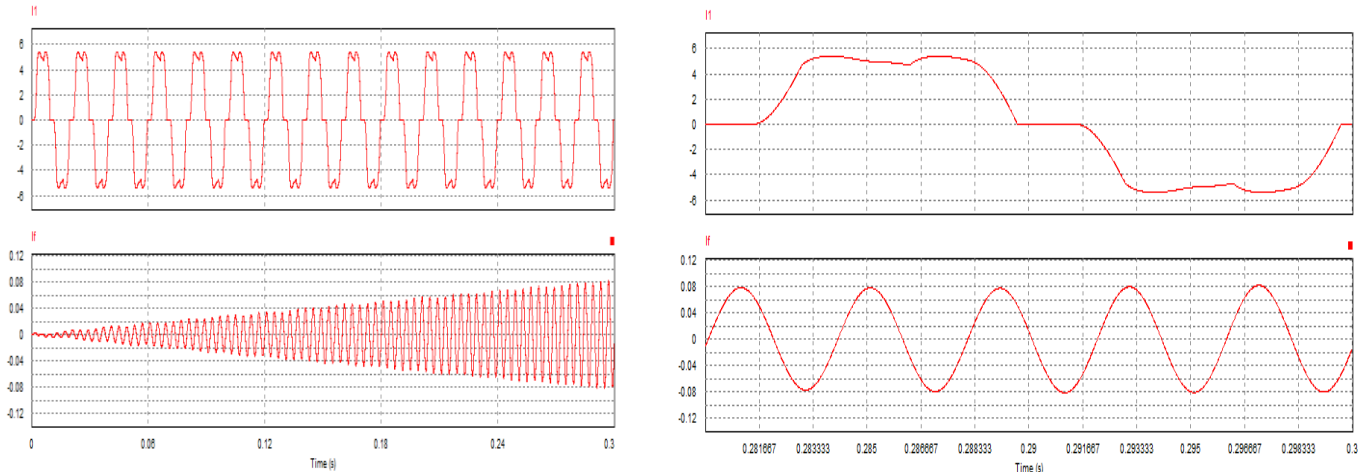


Figure II.7 : Allure de signal du courant de la source I_1 et I_f du FPP.

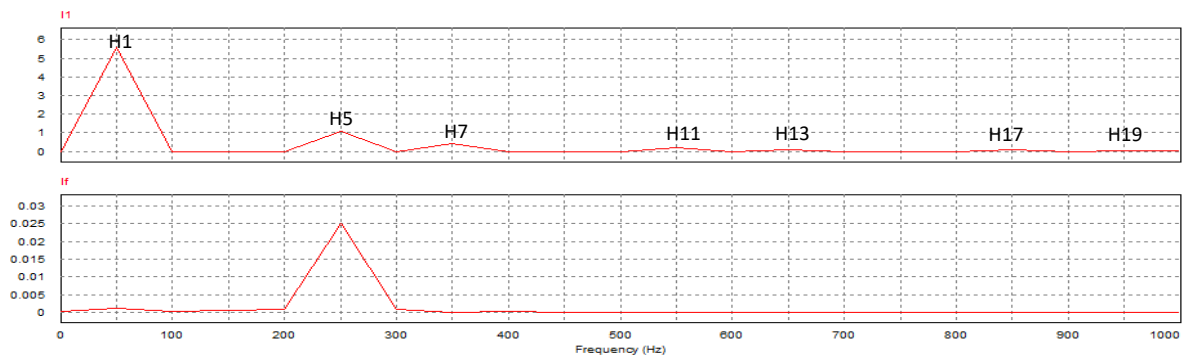


Figure II.8 : Analyse spectrale du courant I_1 de la source et I_f du FPP.

La figure (II.7) présente l'allure du courant de la source I_1 , ce courant n'est pas sinusoïdal donc il est très riche en harmoniques, et aussi représente l'allure du courant au niveau de FPP I_f , ce courant est de la forme sinusoïdale.

La figure (II.8) présente l'analyse spectrale du courant harmonique dans la phase 1 de la source, le THD de la source avec le FPP a diminué par rapport au montage sans filtrage.

A partir des résultats de la figure (II.8), on trace le tableau suivant qui représente les valeurs du courant efficace de la phase 1, ainsi le THD du courant fondamental et des rangs harmoniques :

Chapitre II - Etude d'un pont redresseur (non commandé et commandé) triphasé avec et sans filtrage.

Tableau II-4 : Les valeurs du courant efficace et leur THD.

| Rang | Valeur du $I_{1\text{eff}}$ (A) | THD _h (%) |
|------|---------------------------------|----------------------|
| 1 | 5.59 | 100 |
| 3 | 0 | 0 |
| 5 | 1.09 | 19.5 |
| 7 | 0.41 | 7.33 |
| 9 | 0 | 0 |
| 11 | 0.19 | 3.4 |
| 13 | 0.1 | 1.79 |
| 15 | 0 | 0 |
| 17 | 0.07 | 1.25 |
| 19 | 0.031 | 0.55 |

A partir de la relation (I.1), on obtient le résultat suivant :

$$\text{THD}\% = 21.22\%.$$

La figure (II.9) représente l'allure du THD de courant de la source après la compensation :

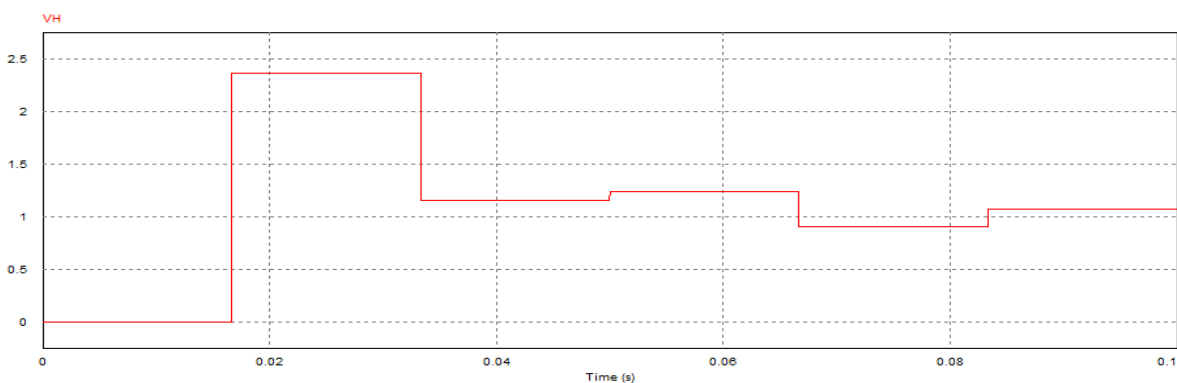


Figure II.9 : Le THD du courant de la source après la compensation.

- **Interprétation**

Lorsque nous branchons le FPP, on remarque qu'il y a une réelle amélioration du THD, il est passé à 21.22%, par rapport au cas sans FPP où il était à 28.26%, et les résultats qu'on a obtenus sont dans les normes CEI-61000-3-2.

II.3.4.3. Avec un filtre active parallèle (FAP)

Dans cette partie nous avons débranché le filtre passif parallèle (FPP), et on le remplace par un filtre actif parallèle (FAP), pour montrer leur influence sur le réseau électrique, et pour minimiser des harmoniques qu'on a obtenus dans le spectrale de la figure (II.4), et on simuler le montage de la figure (II.10) :

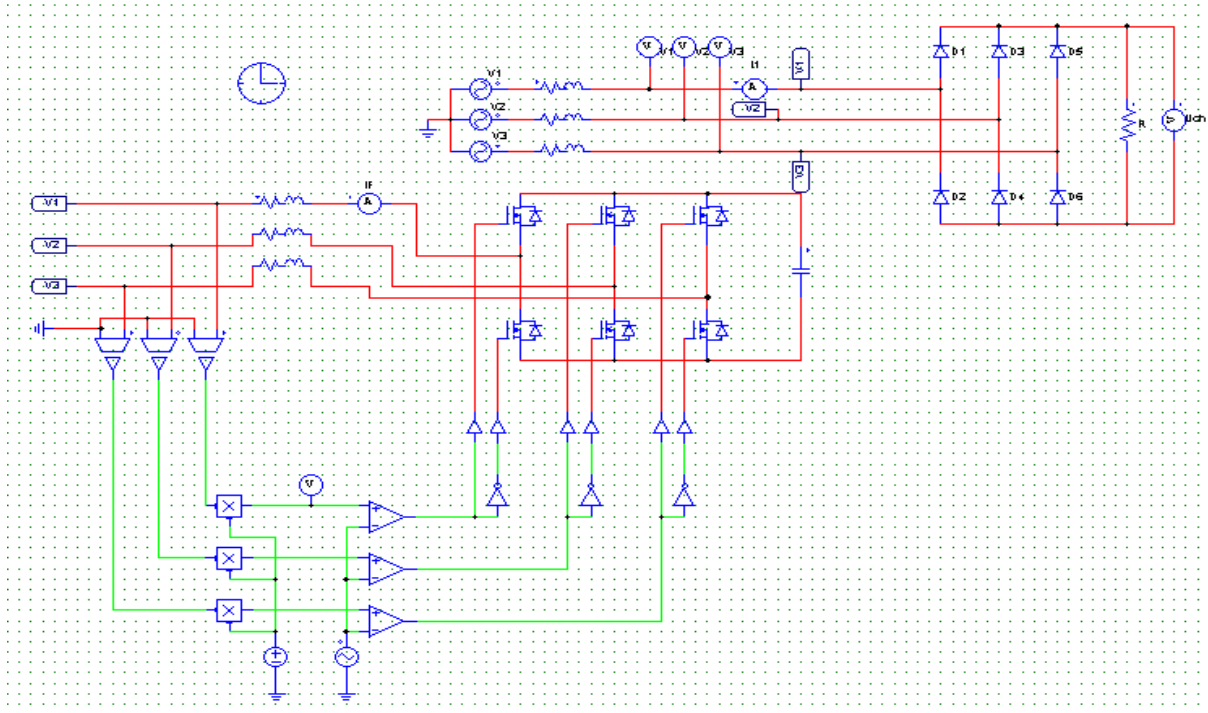


Figure II.10 : Schéma du redresseur pont de Graëtz triphasé à diodes avec un FAP.

- **Etude théorique**

Dans cette étude on va calculer la valeur de la capacité du filtre active parallèle (FAP) :

On a $V = 220V$ et $f = 50Hz$.

$$U_{moy} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} V = 514.86V.$$

A partir de la relation (II.7), on obtient

$$U_{eff} = \frac{\sqrt{6}}{2} V_m = 381.05V$$

La valeur maximale entre phase de la source comme le montre l'équation (II.18) est de :

$$U_{max} = \sqrt{2} U_{eff} \tag{II.18}$$

Chapitre II - Etude d'un pont redresseur (non commandé et commandé) triphasé avec et sans filtrage.

Donc $U_{max} = 538.88V.$

On a $V_{max} = U_{max}/\sqrt{3}$ (II.19)

Donc $V_{max} = 311.13 V.$

Et $U_{min} = \frac{3}{2} V_{max}$ (II.20)

Donc $U_{min} = 466.69V.$

L'ondulation de la tension enlevée est donnée par l'équation (II.21) :

$$\Delta U = U_{max} - U_{min} \quad (II.21)$$

Donc $\Delta U = 72.19V.$

Pour notre cas la capacité est égale :

$$C_f = I / (f * \Delta U) \quad (II.22)$$

$$C_f = 6.09 \text{ mF}.$$

• Les résultats de la simulation

Les allures obtenues avec la simulation du schéma de la figure (II.10) sont représentées dans les figures suivantes :

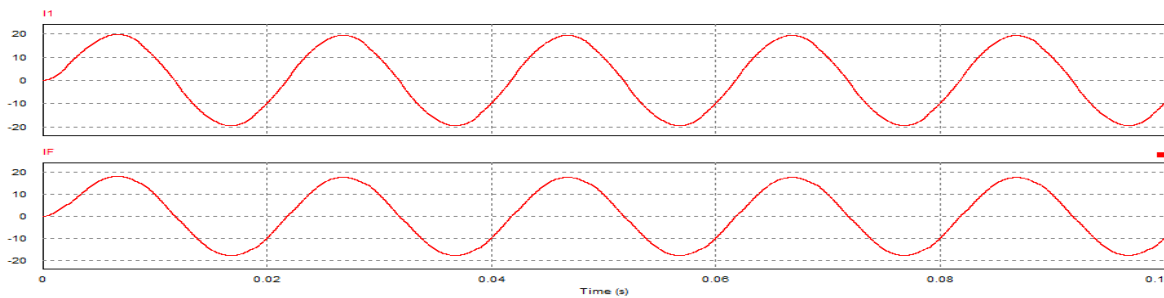


Figure II.11 : Allure de signal du courant de la source I_1 et I_f du FAP.

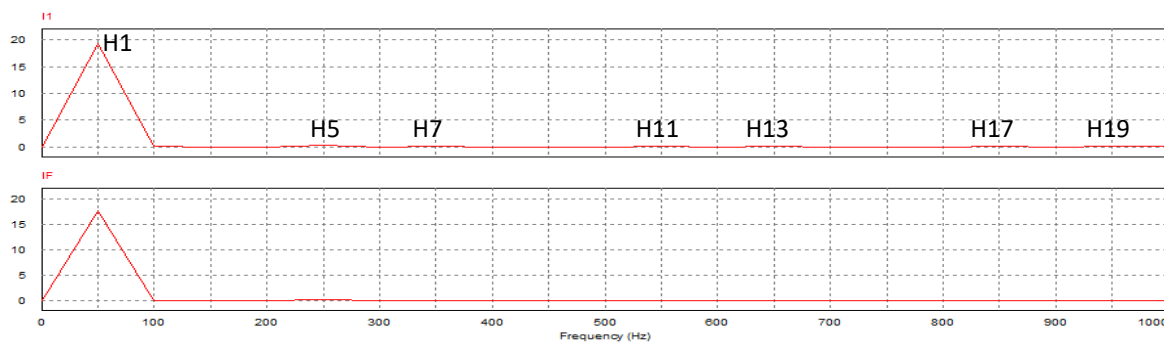


Figure II.12 : Analyse spectrale du courant I_1 de la source et I_f du FAP.

Chapitre II - Etude d'un pont redresseur (non commandé et commandé) triphasé avec et sans filtrage.

La figure (II.11) présente l'allure du courant de la source I_1 , ce courant est de la forme presque sinusoïdale, donc les harmoniques sont presque négligeables, et aussi représente l'allure du courant au niveau du FAP I_f , ce courant est de la forme sinusoïdale.

La figure (II.12) présente l'analyse spectrale du courant harmonique dans la phase 1 de la source. On observe que le THD de la source avec le FAP est presque nul par rapport au montage avec le FPP et sans filtrage.

A partir des résultats de la figure (II.12) on trace le tableau suivant qui représente les valeurs du courant efficace phase 1, ainsi le THD du courant fondamental et des rangs harmoniques :

Tableau II-5 : Les valeurs du courant efficace et leur THD.

| Rang | Valeur du $I_{1\text{eff}}$ (A) | THD _h (%) |
|------|---------------------------------|----------------------|
| 1 | 19.38 | 100 |
| 3 | 0 | 0 |
| 5 | 0.21 | 1.08 |
| 7 | 0.097 | 0.5 |
| 9 | 0 | 0 |
| 11 | 0.07 | 0.36 |
| 13 | 0.04 | 0.2 |
| 15 | 0 | 0 |
| 17 | 0.03 | 0.15 |
| 19 | 0.02 | 0.1 |

A partir de la relation (I.1), on obtient le résultat suivant :

$$\text{THD}\% = 1.28 \%$$

La figure (II.13) représente l'allure du THD de courant de la source après la compensation :

Chapitre II - Etude d'un pont redresseur (non commandé et commandé) triphasé avec et sans filtrage.

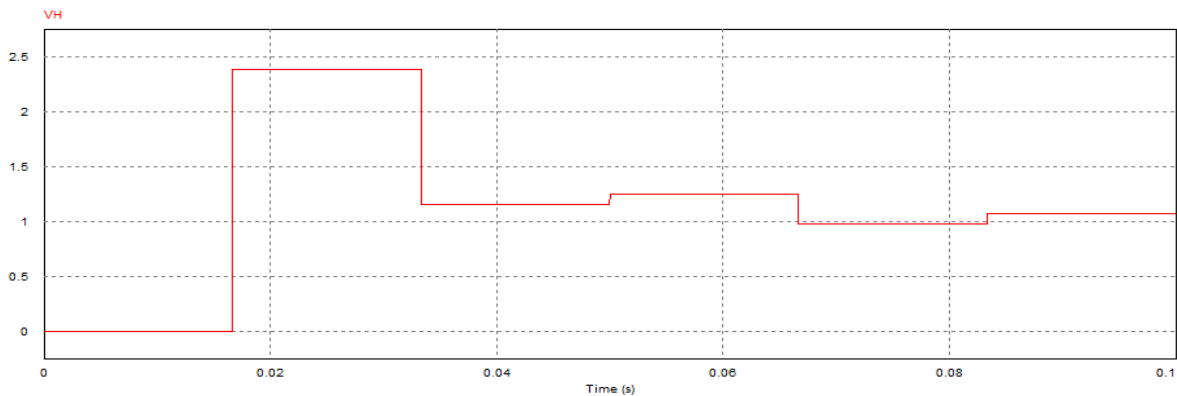


Figure II.13 : Le THD du courant de la source après la compensation.

• Interprétation

Quand on se connecte le FAP, on remarque qu'il y a une réelle amélioration du THD, il est passé à 1.28%, par rapport au cas avec et sans du FPP, et les résultats on a obtenus sont dans les normes CEI-61000-3-4.

II.3.5. Avec une charge purement inductive

On remplace la charge résistive par une charge purement inductive, comme présenter la figure (II.14) suivante :

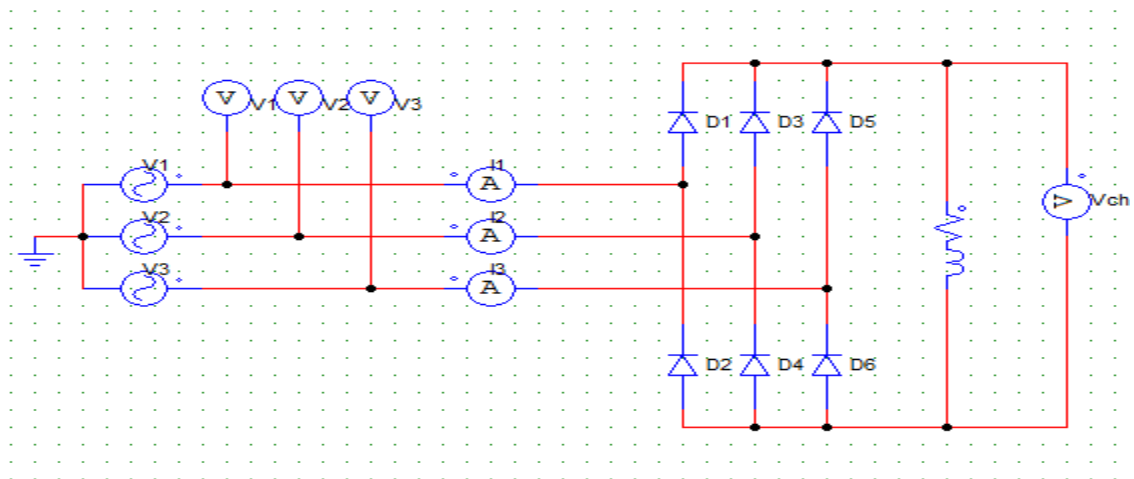


Figure II.14 : Schéma du redresseur pont de Graëtz triphasé à diodes avec une charge inductive.

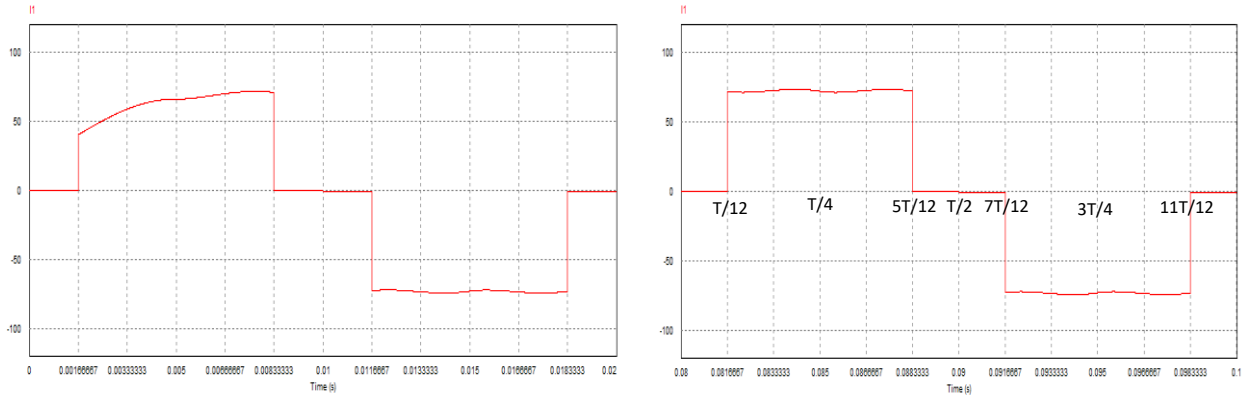
• Etude théorique

Dans cette partie on a étudié le cas d'un régime permanent, et les résultats qu'on a obtenus sont les mêmes avec l'étude théorique du montage d'un redresseur PD3 avec une charge résistive, mais les valeurs des courants de la source sont différentes.

Chapitre II - Etude d'un pont redresseur (non commandé et commandé) triphasé avec et sans filtrage.

• Les résultats de la simulation

Les allures de la simulation de la figure (II.14) sont représentées dans les figure suivantes :



A- Régime transitoire.

B- Régime permanent.

Figure II.15 : Allure de signal du courant de la source I_1 d'un redresseur PD3 avec une charge purement inductive.

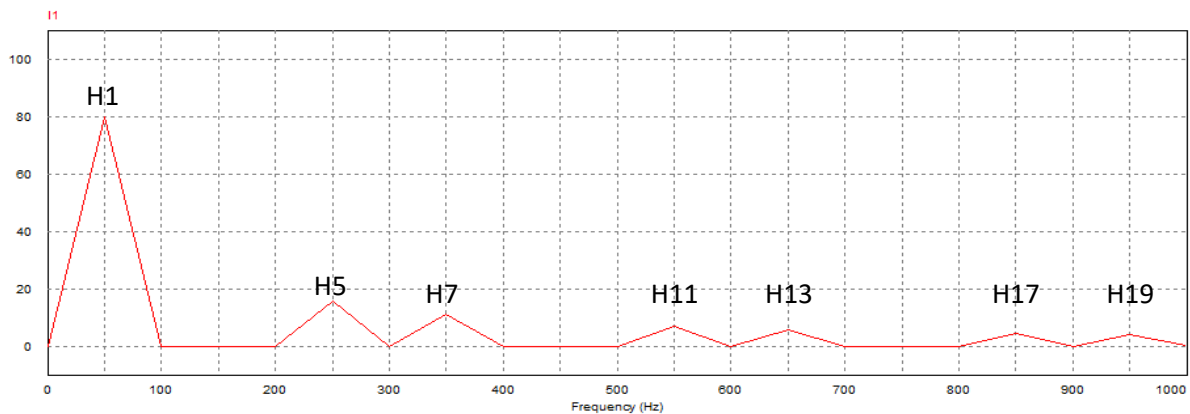


Figure II.16 : Analyse spectrale du courant I_1 de la partie permanent avant du filtrage.

La figure (II.15) présente l'allure du courant de la source I_1 , ce courant n'est pas sinusoïdal, donc il est très riche en harmoniques.

La figure (II.16) présente l'analyse spectrale du courant harmonique dans la phase 1 de la source.

A partir des résultats de la figure (II.16) on trace le tableau suivant qui représente les valeurs du courant efficace de la phase 1, ainsi le THD du courant fondamental et des rangs harmoniques :

Chapitre II - Etude d'un pont redresseur (non commandé et commandé) triphasé avec et sans filtrage.

Tableau II-6 : Les valeurs du courant efficace et leur THD.

| Rang | Valeur du I_{eff} (A) | THD _h % |
|------|--------------------------------|--------------------|
| 1 | 80.03 | 100 |
| 3 | 0 | 0 |
| 5 | 16.15 | 20.18 |
| 7 | 11.24 | 14.04 |
| 9 | 0 | 0 |
| 11 | 7.15 | 8.93 |
| 13 | 6.11 | 7.63 |
| 15 | 0 | 0 |
| 17 | 4.58 | 5.72 |
| 19 | 4.18 | 5.22 |

A partir de la relation (I.1), on obtient le résultat suivant :

$$\text{THD}\% = 28.33 \%$$

La figure (II.17) représente l'allure du THD de courant de la source avant la compensation.

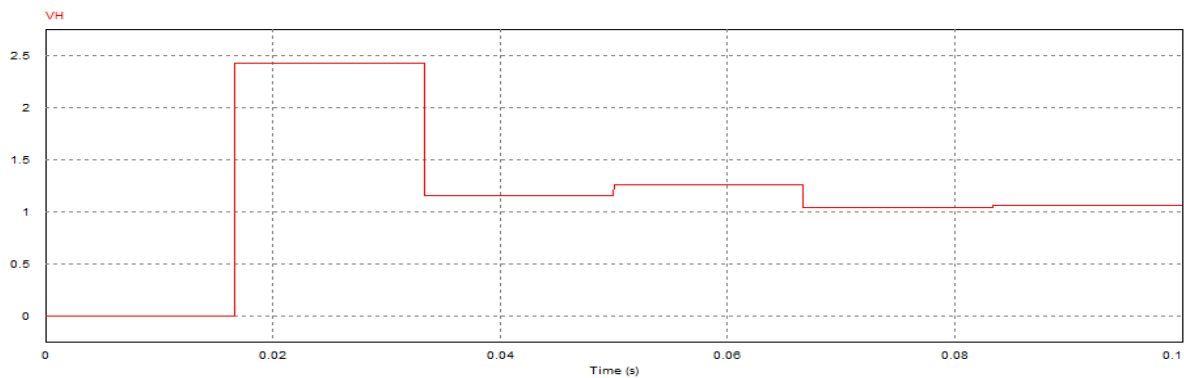


Figure II.17 : Le THD du courant de la source avant la compensation.

- **Interprétation**

On remarque que les résultats calculer dans l'étude théorique sont des mêmes avec les résultats de la simulation du montage de la figure (II.14), et on remarque que le courant de la source est très riche en harmonique de rang $(2k+1, k=2, \dots, 50)$, ainsi qu'on a obtenus un THD global de l'ordre de 28.33%, et les résultats qu'on a obtenus sont dans les normes CEI-61000-3-4.

II.3.5.1. Avec un filtre passif parallèle (FPP)

Dans cette partie on ajoute un filtre passif parallèle (FPP) pour minimiser les harmoniques qu'on a obtenus dans la simulation du montage de la figure (II.14) sans filtrage.

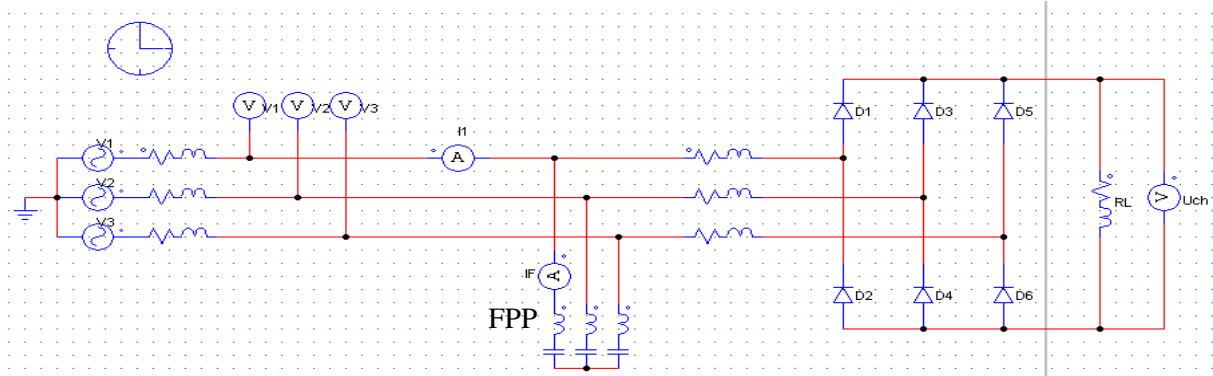


Figure II.18 : Schéma du redresseur pont de Graëtz triphasé à diodes avec FPP.

Les allures qu'on a obtenues à partir de la simulation de la figure (II.18) sont représenté dans les figures suivantes :

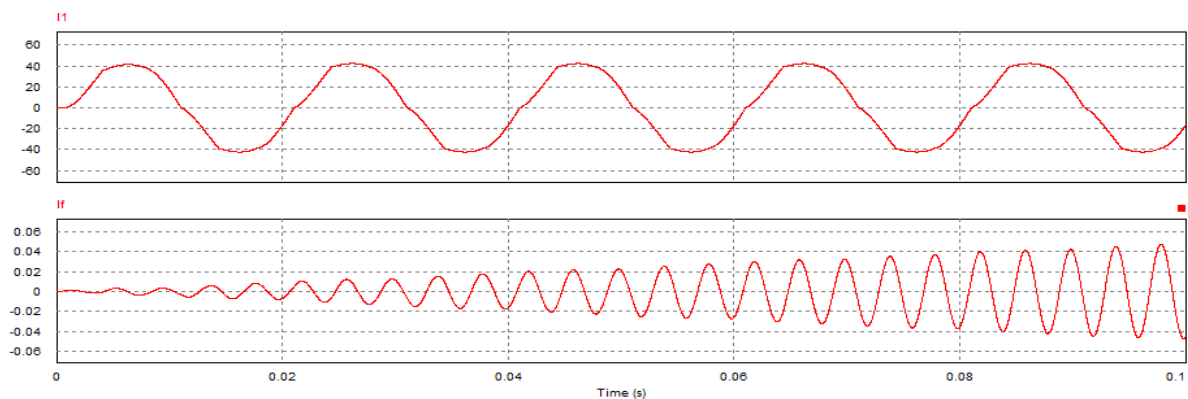


Figure II.19 : Allure de signal du courant de la source I_1 et I_f du FPP.

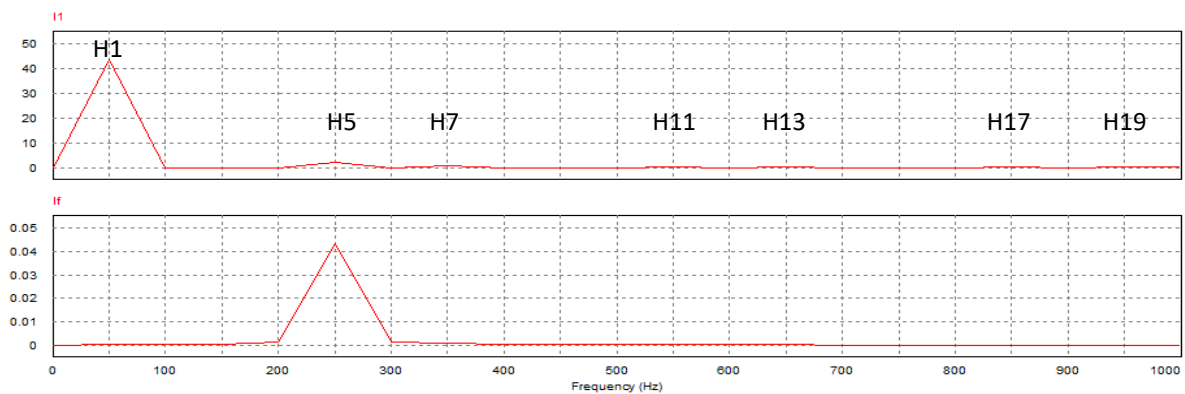


Figure II.20 : Analyse spectrale du courant I_1 de la source et I_f du FPP.

Chapitre II - Etude d'un pont redresseur (non commandé et commandé) triphasé avec et sans filtrage.

La figure (II.19) présente l'allure du courant de la source I_1 , ce courant est de la forme presque sinusoïdale, donc les harmoniques sont presque négligeables, et aussi représente l'allure du courant au niveau du FPP I_f , ce courant est de la forme sinusoïdale.

La figure (II.20) présente l'analyse spectrale du courant harmonique dans la phase 1 de la source. On remarque que le THD de la source avec le FPP est presque nul par rapport à la simulation du montage sans filtrage.

A partir des résultats de la figure (II.20), on trace le tableau suivant qui représente les valeurs du courant efficace phase 1, ainsi le THD du courant fondamental et des rangs harmoniques :

Tableau II-7 : Les valeurs du courant efficace et leur THD.

| Rang | Valeur du $I_{1\text{eff}}$ (A) | THD _h % |
|------|---------------------------------|--------------------|
| 1 | 43.55 | 100 |
| 3 | 0 | 0 |
| 5 | 1.91 | 4.38 |
| 7 | 0.69 | 1.58 |
| 9 | 0 | 0 |
| 11 | 0.35 | 0.8 |
| 13 | 0.21 | 0.48 |
| 15 | 0 | 0 |
| 17 | 0.14 | 0.32 |
| 19 | 0.1 | 0.23 |

A partir de la relation (I.1), on obtient le résultat suivant :

$$\text{THD \%} = 4.77\%.$$

La figure (II.21) représente l'allure du THD de courant de la source après la compensation :

Chapitre II - Etude d'un pont redresseur (non commandé et commandé) triphasé avec et sans filtrage.

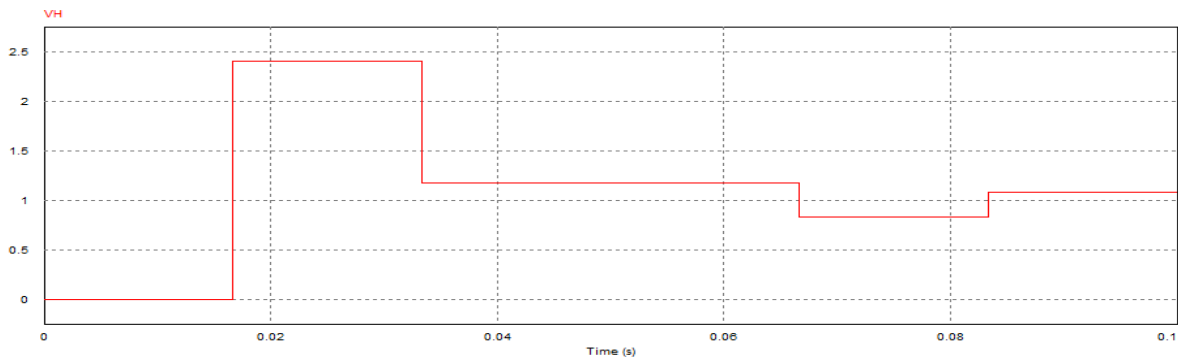


Figure II.21 : Le THD du courant de la source après la compensation.

• Interprétation

Quand on se connecte le FPP, on remarque qu'il y a une réelle amélioration du THD, il est passé à 4.77%, par rapport au cas sans FPP où il était à 28.33%, et les résultats qu'on a obtenus sont dans les normes CEI-61000-3-4.

II.3.5.2. Avec un filtre actif parallèle (FAP)

La figure (II.22) présente le schéma de la simulation d'un redresseur pont de Graëtz triphasé PD3 à diodes avec une charge purement inductive, et avec FAP.

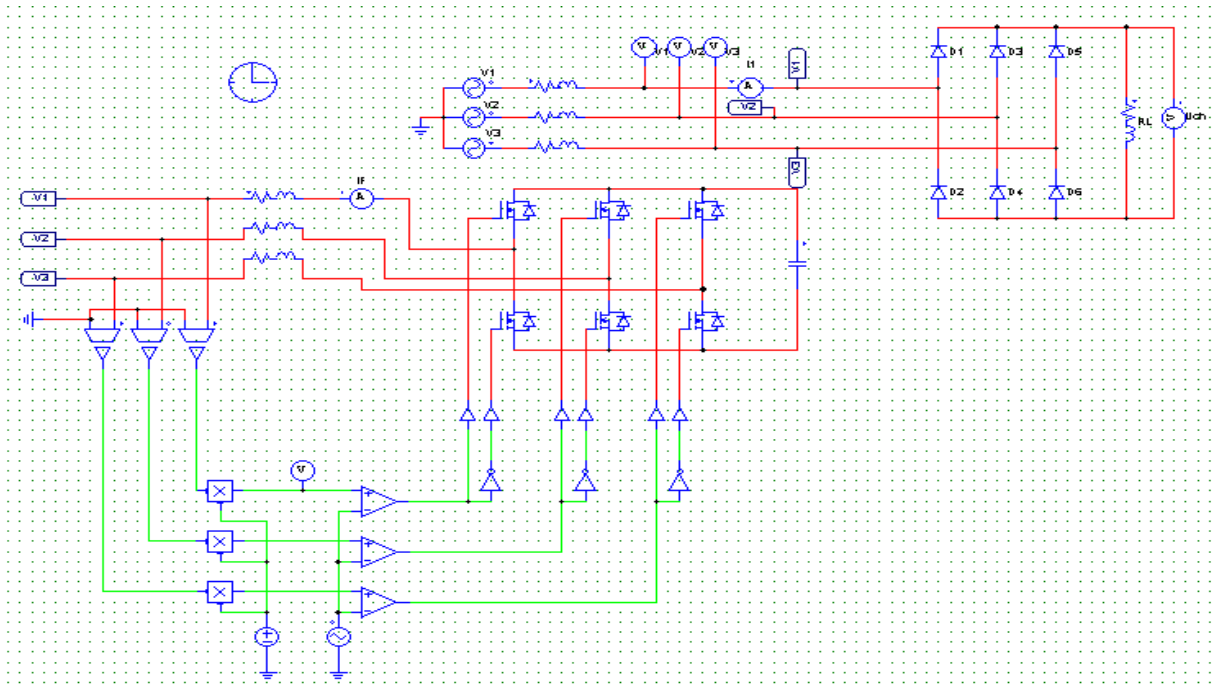


Figure II.22 : Schéma du redresseur pont de Graëtz triphasé à diodes avec FAP.

Les allures qu'on a obtenus à partir de la simulation de la figure (II.22) sont représentés dans les figures suivantes :

Chapitre II - Etude d'un pont redresseur (non commandé et commandé) triphasé avec et sans filtrage.

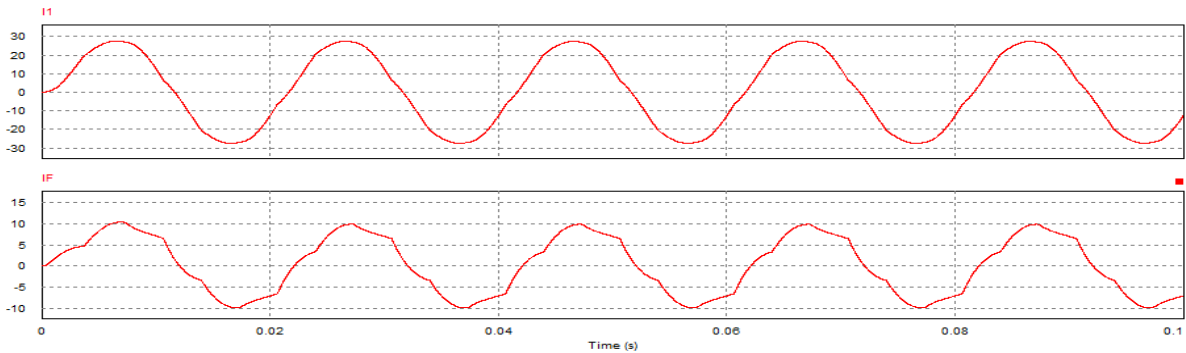


Figure II.23 : Allure de signal du courant de la source I_1 et I_f du FAP.

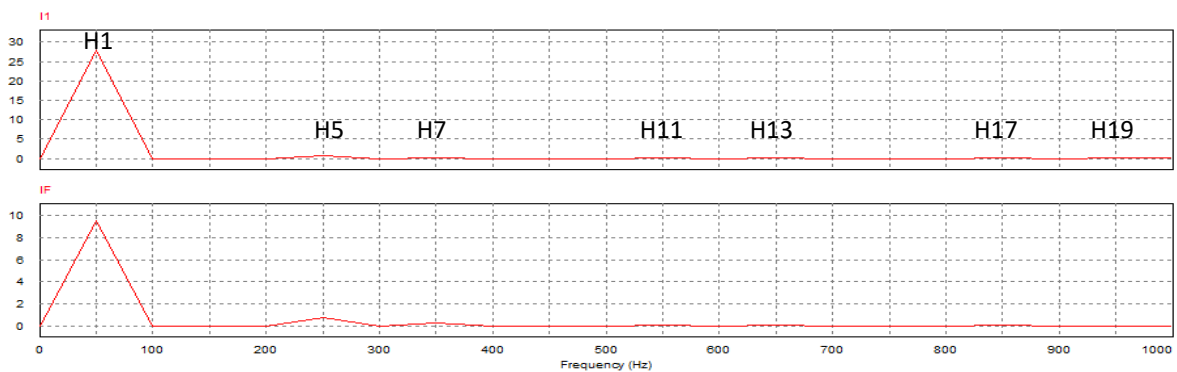


Figure II.24 : Analyse spectrale du courant I_1 de la source et I_f du FAP.

La figure (II.23) présente l'allure du courant de la source I_1 , ce courant est de la forme presque sinusoïdale donc les harmoniques sont presque négligeables, et aussi représente l'allure du courant dans la même figure au niveau du FAP I_f , ce courant est de la forme presque sinusoïdale.

La figure (II.24) présente l'analyse spectrale du courant harmonique dans la phase 1 de la source. On remarque que le THD de la source avec le FAP est diminué par rapport au montage précédent avec et sans filtrage.

A partir des résultats de la figure (II.24) on trace le tableau suivant qui représente les valeurs du courant efficace de la phase 1, ainsi le THD du courant fondamental et des rangs harmoniques :

Chapitre II - Etude d'un pont redresseur (non commandé et commandé) triphasé avec et sans filtrage.

Tableau II-8 : Les valeurs du courant efficace et leur THD.

| Rang | Valeur du I_{eff} (A) | TDH _h % |
|------|--------------------------------|--------------------|
| 1 | 25.95 | 100 |
| 3 | 0 | 0 |
| 5 | 0.78 | 3 |
| 7 | 0.29 | 1.11 |
| 9 | 0 | 0 |
| 11 | 0.14 | 0.54 |
| 13 | 0.091 | 0.35 |
| 15 | 0 | 0 |
| 17 | 0.055 | 0.21 |
| 19 | 0.042 | 0.16 |

A partir de la relation (I.1), on obtient le résultat suivant :

$$\text{THD \%} = 3.28\%.$$

La figure (II.25) représente l'allure du THD de courant de la source après la compensation :

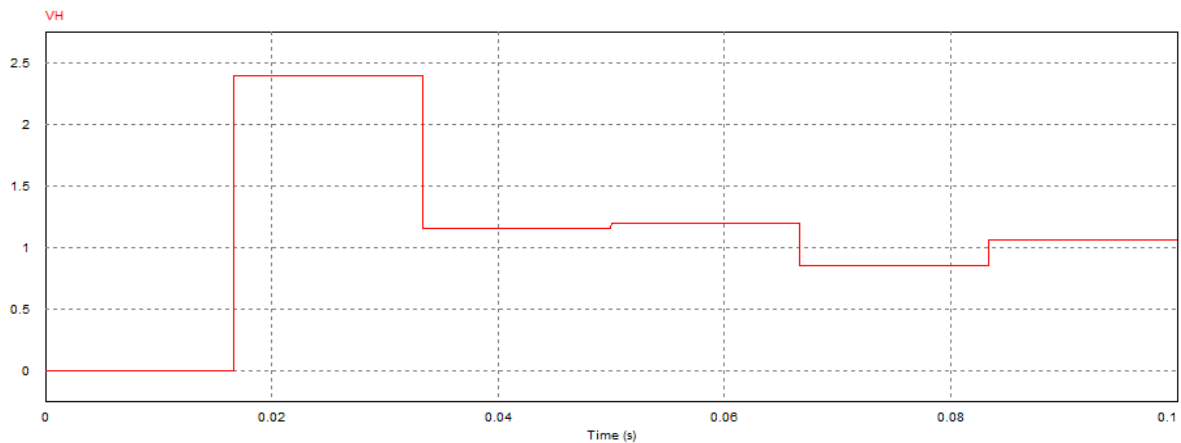


Figure II.25 : Le THD du courant de la source après la compensation.

- **Interprétation**

On remarque que le FAP s'adapte aux variations de la charge non linéaire, et le THD du courant de la source est égale à 3.28% plus petite par rapport aux autres cas de la simulation, ce qui prouve la bonne qualité de filtrage, et les résultats qu'on a obtenus sont répons aux normes CEI-61000-3-4.

II.4. Redressement commandé PD3 (thyristor)

II.4.1. Avec une charge résistive

La figure (II.26) présente le schéma de la simulation d'un redresseur pont de Graëtz triphasé PD3 à thyristor (commandé), avec une charge résistive.

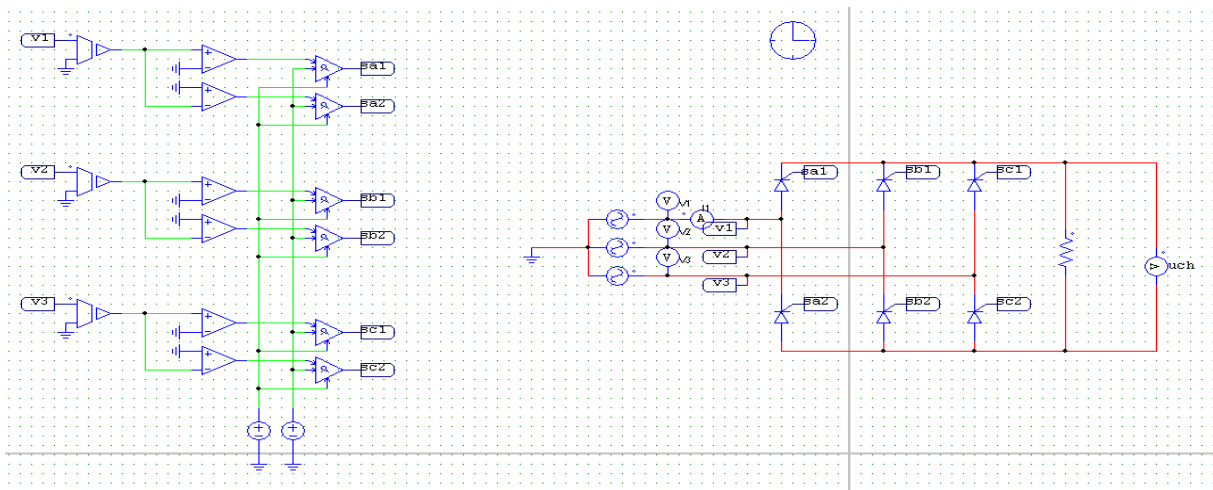


Figure II.26 : Schéma du redresseur pont de Graëtz triphasé à thyristor (commandé).

Les allures qu'on a obtenus à partir de la simulation de la figure (II.26) sont représenté dans les figures suivantes :

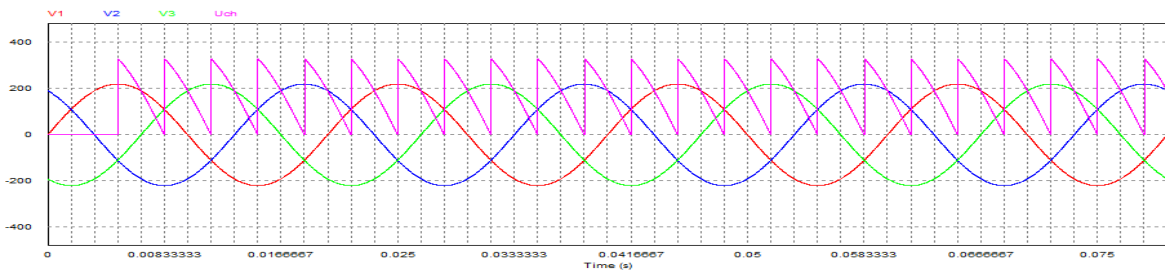


Figure II.27 : Allure des signaux entrés et sortie de la tension du redresseur PD3 commandé.

V_1 , V_2 et V_3 sont des tensions de la source, et U_{ch} c'est la tension redressée.

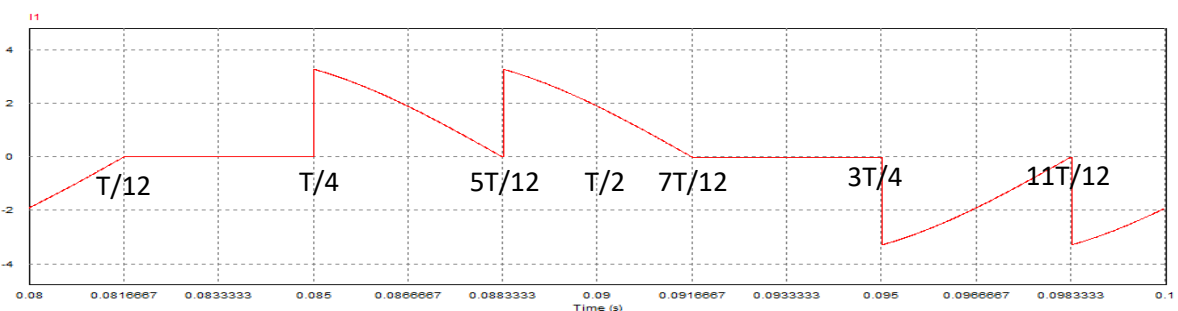


Figure II.28 : Allure de signal du courant de la source I_1 du redresseur PD3 commandé.

Chapitre II - Etude d'un pont redresseur (non commandé et commandé) triphasé avec et sans filtrage.

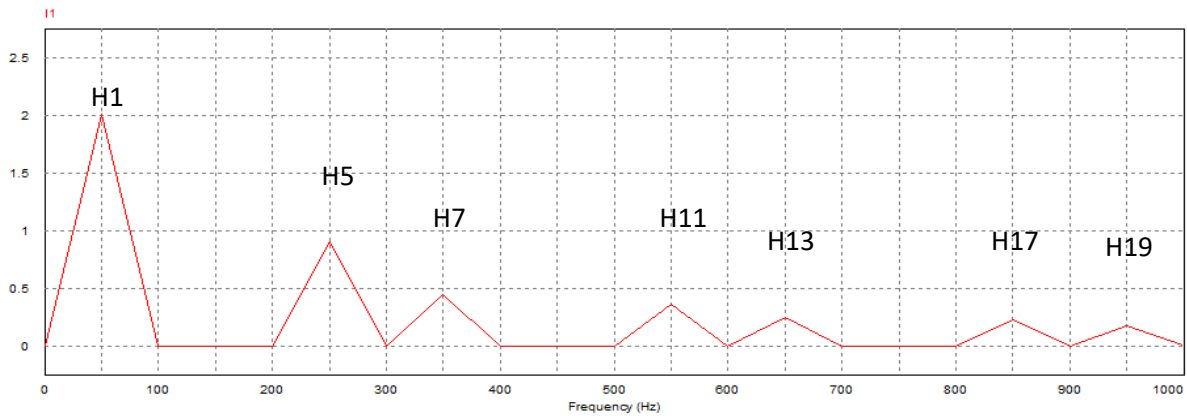


Figure II.29 : Analyse spectrale du courant I_1 de la source d'un redresseur PD3 commandé avant filtrage.

La figure (II.27) présente les tensions de la source et de la charge, et les tensions de la source sont purement sinusoïdales.

La figure (II.28) présente l'allure du courant de la source I_1 , ce courant n'est pas sinusoïdal, donc il est très riche en harmoniques.

La figure (II.29) présente l'analyse spectrale du courant harmonique dans la phase 1 de la source.

A partir des résultats de la figure (II.29) on trace le tableau suivant qui représente les valeurs du courant efficace de la phase 1, ainsi le THD du courant fondamental et des rangs harmoniques :

Chapitre II - Etude d'un pont redresseur (non commandé et commandé) triphasé avec et sans filtrage.

Tableau II-9 : Les valeurs du courant efficace et leur THD.

| Rang | Valeur du $I_{1\text{eff}}$ (A) | THD _h % |
|------|---------------------------------|--------------------|
| 1 | 2.02 | 100 |
| 3 | 0 | 0 |
| 5 | 0.91 | 45.05 |
| 7 | 0.44 | 21.78 |
| 9 | 0 | 0 |
| 11 | 0.36 | 17.82 |
| 13 | 0.25 | 12.37 |
| 15 | 0 | 0 |
| 17 | 0.23 | 11.38 |
| 19 | 0.17 | 8.41 |

A partir de la relation (I.1), on obtient le résultat suivant :

$$\text{TDH}\% = 56.34 \%$$

La figure (II.30) représente l'allure du THD de courant de la source avant la compensation :

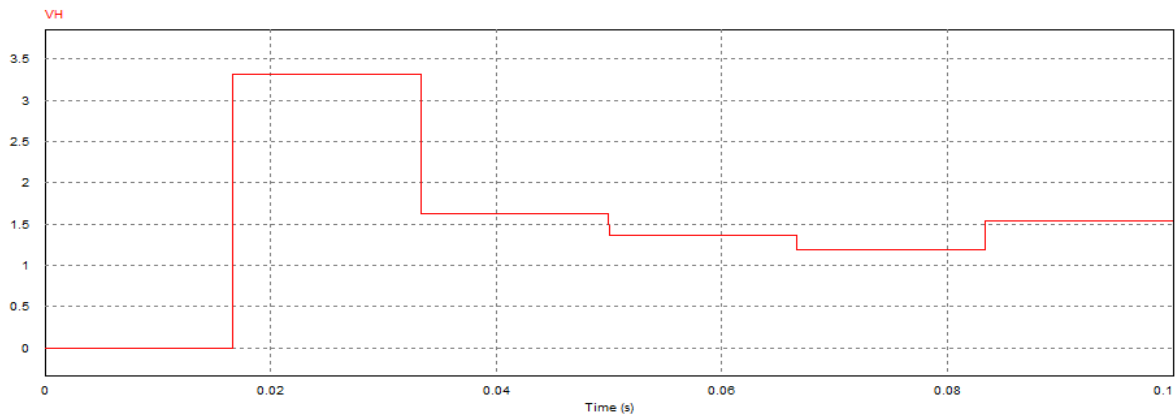


Figure II.30 : Le THD du courant de la source avant la compensation.

- **Interprétation**

On remarque que le courant de la source est très riche en harmonique de rang $(2k+1, k=2, \dots, 50)$, ainsi qu'on obtient un THD global de l'ordre de 56.34%, et les résultats qu'on a obtenus sont dans les normes CEI-61000-3-2.

II.4.1.1. Avec filtre passif parallèle (FPP)

La figure (II.31) présente le schéma de la simulation d'un redresseur pont de Graëtz triphasé PD3 à thyristor(commandé) avec une charge résistive, et avec le FPP.

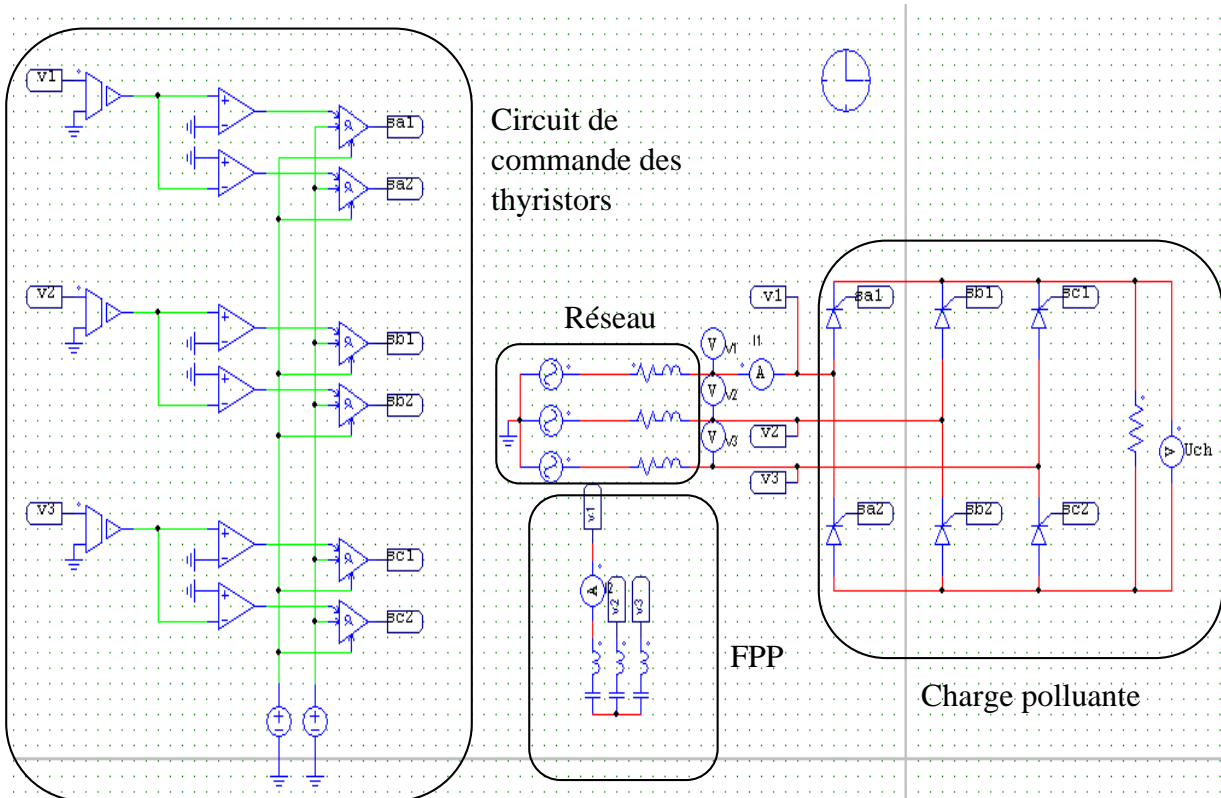


Figure II.31 : Schéma du redresseur pont de Graëtz triphasé à thyristor (commandé) avec le FPP.

Les allures qu'on a obtenus à partir de la simulation de la figure (II.31) sont représenté dans les figures suivantes :

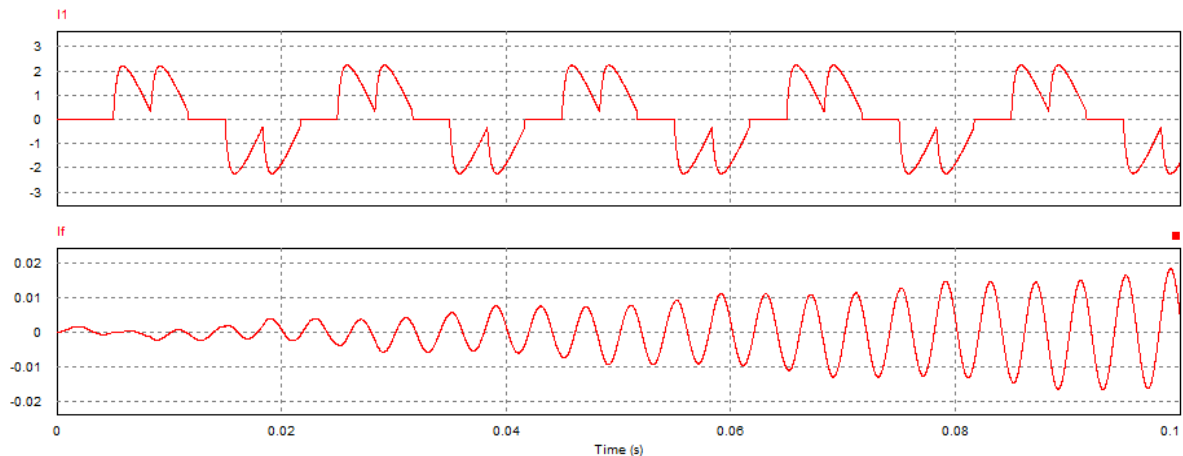


Figure II.32 : Allure de signal du courant de la source I_1 et I_f du FPP.

Chapitre II - Etude d'un pont redresseur (non commandé et commandé) triphasé avec et sans filtrage.

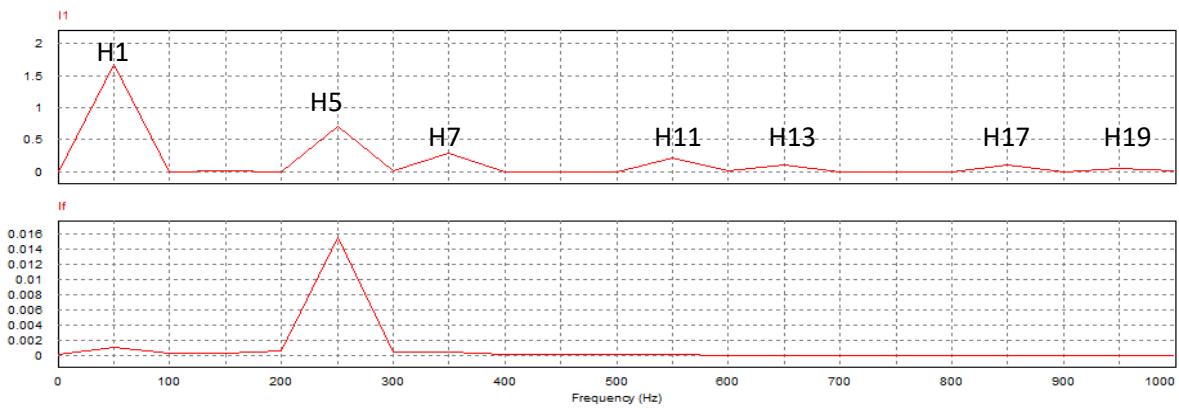


Figure II.33 : Analyse spectrale du courant I_1 de la source et I_f du FPP.

La figure (II.32) présente l'allure du courant de la source I_1 , et aussi représente l'allure du courant au niveau du FPP I_f , ce courant est de la forme sinusoïdale.

La figure (II.33) présente l'analyse spectrale du courant harmonique dans la phase 1 de la source. On remarque que le THD de la source avec le FPP est diminué par rapport au montage sans filtrage.

A partir des résultats de la figure (II.33), on trace le tableau suivant qui représente les valeurs du courant efficace phase 1, ainsi le THD du courant fondamental et des rangs harmoniques :

Tableau II-10 : Les valeurs du courant efficace et leur THD.

| Rang | Valeur du $I_{1\text{eff}}$ (A) | THD _h % |
|------|---------------------------------|--------------------|
| 1 | 1.69 | 100 |
| 3 | 0 | 0 |
| 5 | 0.69 | 40.82 |
| 7 | 0.27 | 15.97 |
| 9 | 0 | 0 |
| 11 | 0.21 | 12.42 |
| 13 | 0.1 | 5.91 |
| 15 | 0 | 0 |
| 17 | 0.1 | 5.91 |
| 19 | 0.053 | 3.13 |

Chapitre II - Etude d'un pont redresseur (non commandé et commandé) triphasé avec et sans filtrage.

A partir de la relation (I.1), et on obtient le résultat suivant :

$$\text{THD}\% = 46.43\%.$$

La figure (II.34) représente l'allure du THD de courant de la source après la compensation :

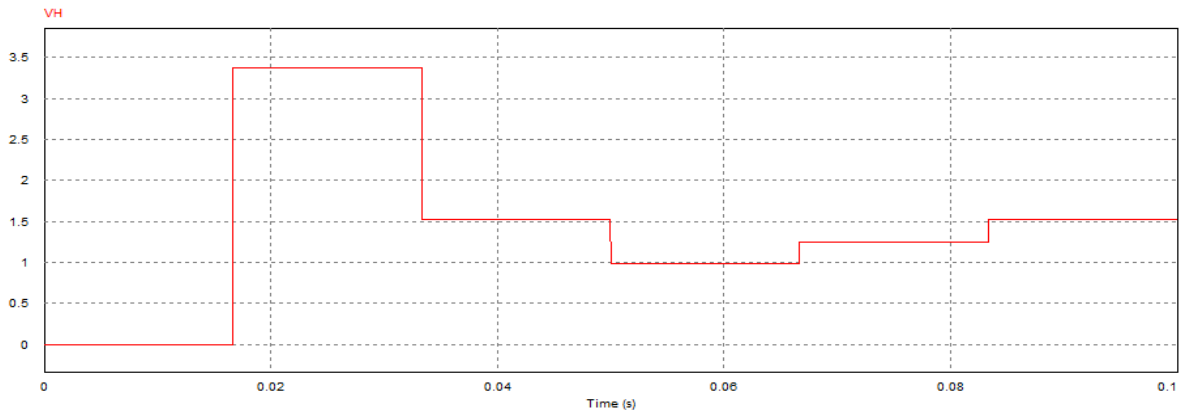


Figure II.34 : Le THD du courant de la source après la compensation.

- **Interprétation**

Quand on se connecte le FPP, on peut remarquer une petite amélioration du THD, il est passé de 56.34% cas sans filtre à 46.43% avec le FPP, et les résultats qu'on a obtenus sont dans les normes CEI-61000-3-2.

II.4.1.2. Avec un filtre active parallèle (FAP)

La figure (II.35) présente le schéma de la simulation d'un redresseur pont de Graëtz triphasé PD3 à thyristor(commandé) avec une charge résistive, et avec FAP.

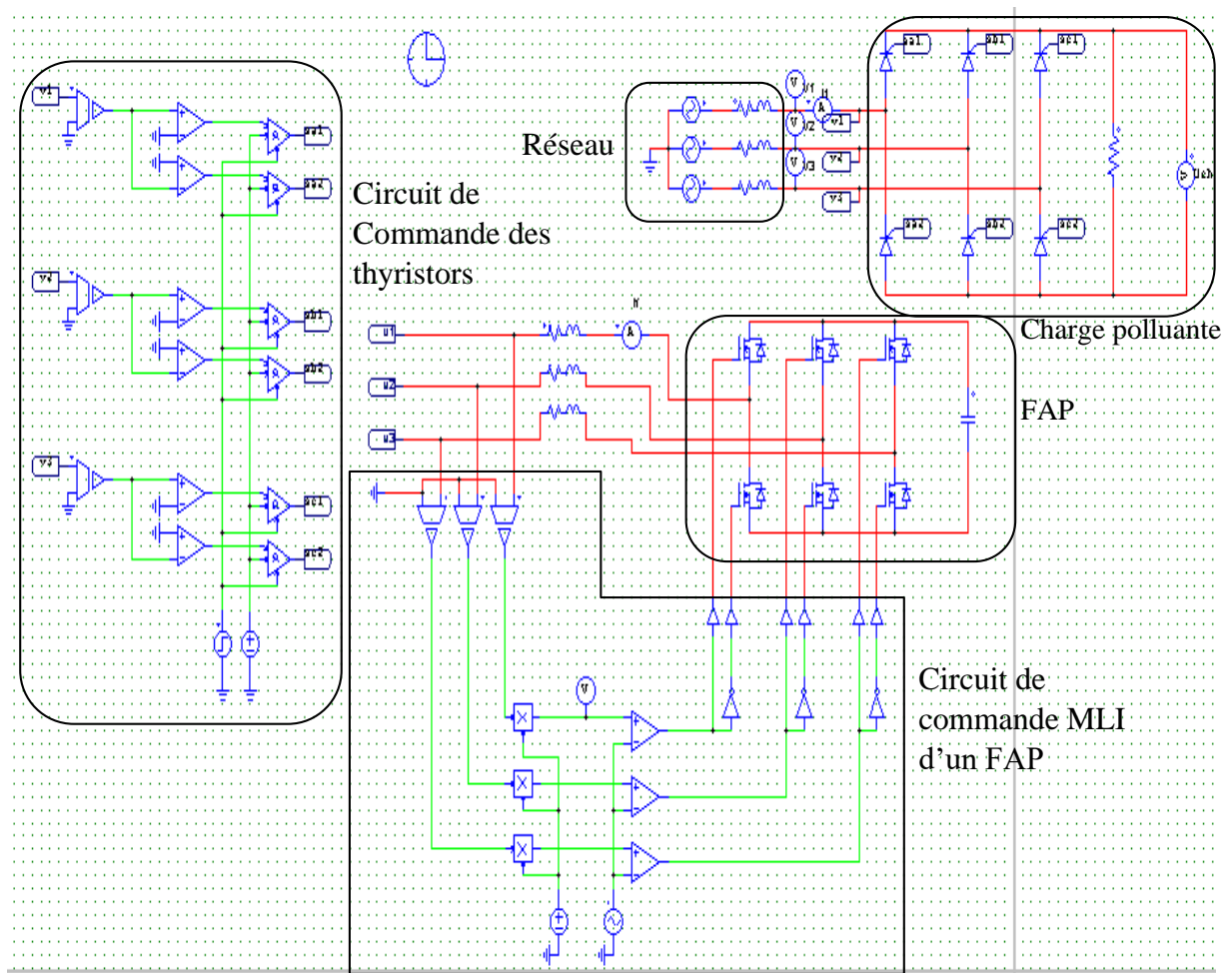


Figure II.35 : Schéma du redresseur pont de Graëtz triphasé à thyristor (commandé) avec FAP.

Les allures qu'on a obtenus à partir de la simulation de la figure (II.35) sont représenté dans les figures suivantes :

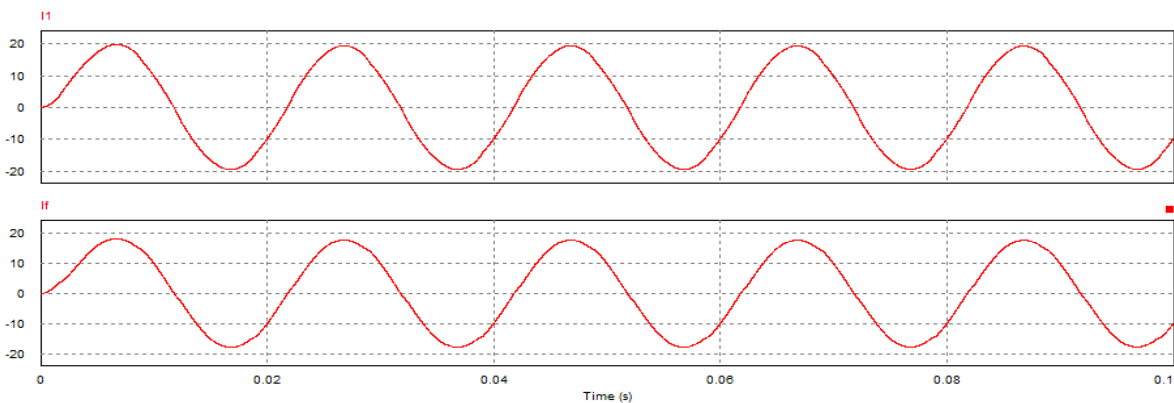


Figure II.36 : Allure de signal du courant de la source I_1 et I_f du FAP.

Chapitre II - Etude d'un pont redresseur (non commandé et commandé) triphasé avec et sans filtrage.

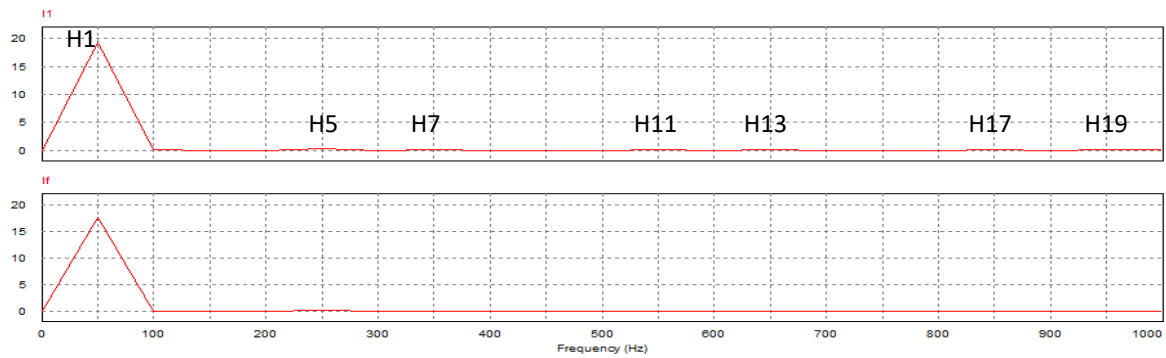


Figure II.37 : Analyse spectrale du courant I_1 de la source et I_f du FAP.

La figure (II.36) présente l'allure du courant de la source I_1 , ce courant est de la forme presque sinusoïdale donc les harmoniques sont presque nuls, et aussi représente l'allure du courant au niveau du FAP I_f , ce courant est de la forme sinusoïdale.

La figure (II.37) présente l'analyse spectrale du courant harmonique dans la phase 1 de la source. On remarque que le THD de la source avec le FAP est diminué (presque nul) par rapport au montage avec et sans filtrage.

A partir des résultats de la figure (II.37), on trace le tableau suivant qui représente les valeurs du courant efficace de la phase 1, ainsi le THD du courant fondamental et des rangs harmoniques :

Tableau II-11 : Les valeurs du courant efficace et leur THD.

| Rang | Valeur du $I_{1\text{eff}}$ (A) | THD _h % |
|------|---------------------------------|--------------------|
| 1 | 19.39 | 100 |
| 3 | 0 | 0 |
| 5 | 0.21 | 1.08 |
| 7 | 0.098 | 0.5 |
| 9 | 0 | 0 |
| 11 | 0.07 | 0.36 |
| 13 | 0.042 | 0.22 |
| 15 | 0 | 0 |
| 17 | 0.033 | 0.17 |
| 19 | 0.021 | 0.1 |

Chapitre II - Etude d'un pont redresseur (non commandé et commandé) triphasé avec et sans filtrage.

A partir de la relation (I.1), on obtient le résultat suivant :

$$\text{THD}\% = 1.28\%.$$

La figure (II.38) représente l'allure du THD de courant de la source après la compensation :

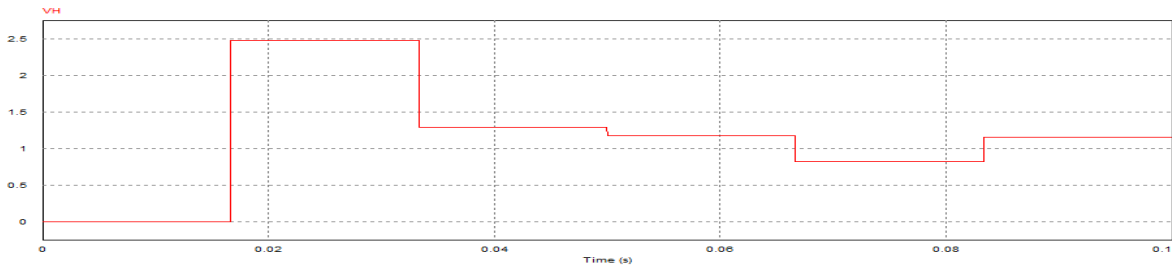


Figure II.38 : Le THD du courant de la source après la compensation.

• Interprétation

On peut remarquer à partir des résultats de la simulation du schéma de la figure (II.27) avec et sans filtrage, il y a une amélioration importante par rapport au réseau avec FPP seul, le THD est passé de 46.43% avec le FPP à une valeur de 1.28% avec le FAP, et les résultats qu'on a obtenus réponds au normes CEI-61000-3-4.

II.4.2. Avec une charge purement inductive

Dans ce cas en remplace la charge résistive avec une charge purement inductive, et on simule le montage de la figure (II.39) :

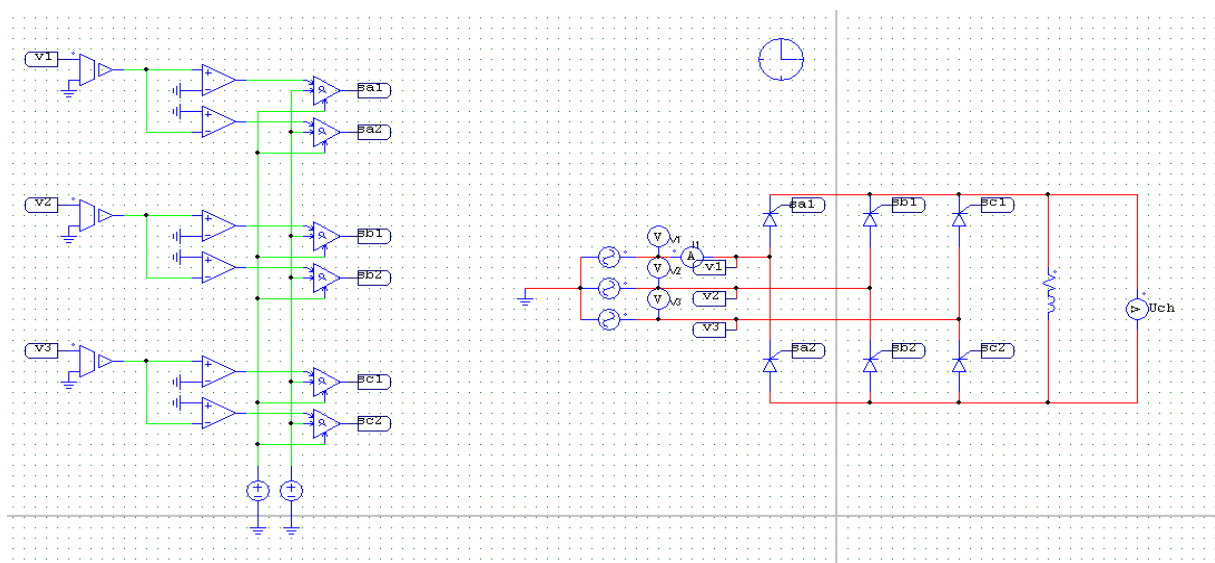
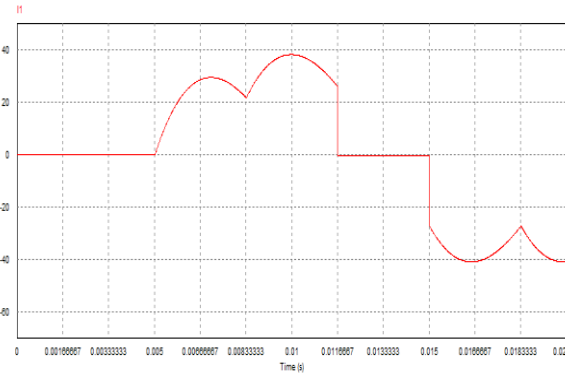


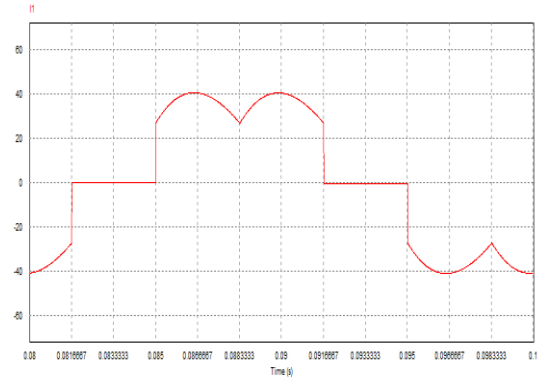
Figure II.39 : Schéma du redresseur pont de Graëtz triphasé à thyristor (commandé) avec une charge purement inductive.

Chapitre II - Etude d'un pont redresseur (non commandé et commandé) triphasé avec et sans filtrage.

Les allures qu'on a obtenus à partir de la simulation de la figure (II.39) sont représenté dans les figures suivantes :



A- Régime transitoire.



B- Régime permanent.

Figure II.40 : Allure de signal du courant de la source I_1 d'un redresseur PD3 commandé avec une charge purement inductive.

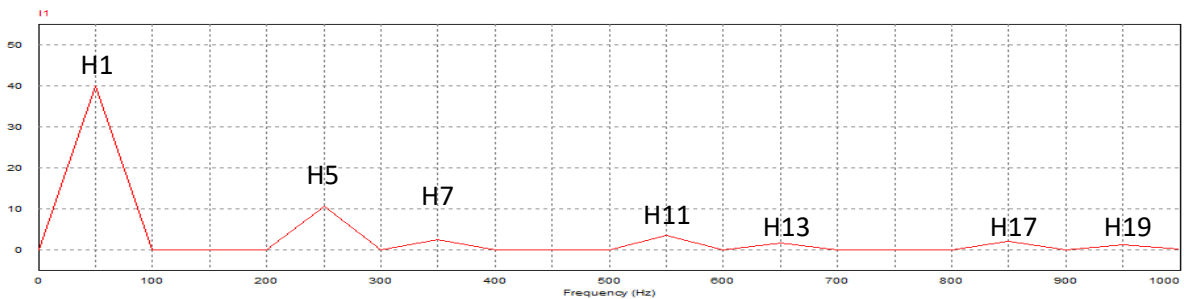


Figure II.41 : Analyse spectrale du courant I_1 de la source d'un redresseur commandé avec une charge purement inductive.

La figure (II.40) présente l'allure du courant de la source I_1 , ce courant n'est pas sinusoïdal, donc il est très riche en harmoniques.

La figure (II.41) présente l'analyse spectrale du courant harmonique dans la phase 1 de la source.

A partir des résultats de la figure (II.41), on trace le tableau suivant qui représente les valeurs du courant efficace phase 1, ainsi le THD du courant fondamental et des rangs harmoniques :

Chapitre II - Etude d'un pont redresseur (non commandé et commandé) triphasé avec et sans filtrage.

Tableau II-12 : Les valeurs du courant efficace et leur THD.

| Rang | Valeur du $I_{1\text{eff}}$ (A) | THD _h (%) |
|------|---------------------------------|----------------------|
| 1 | 40.01 | 100 |
| 3 | 0 | 0 |
| 5 | 10.82 | 27.04 |
| 7 | 2.59 | 6.47 |
| 9 | 0 | 0 |
| 11 | 3.58 | 8.95 |
| 13 | 1.74 | 4.35 |
| 15 | 0 | 0 |
| 17 | 2.09 | 5.22 |
| 19 | 1.29 | 3.22 |

A partir de la relation (I.1), on obtient le résultat suivant :

$$\text{THD}\% = 30.16 \%$$

La figure (II.42) représente l'allure du THD de courant de la source avant la compensation :

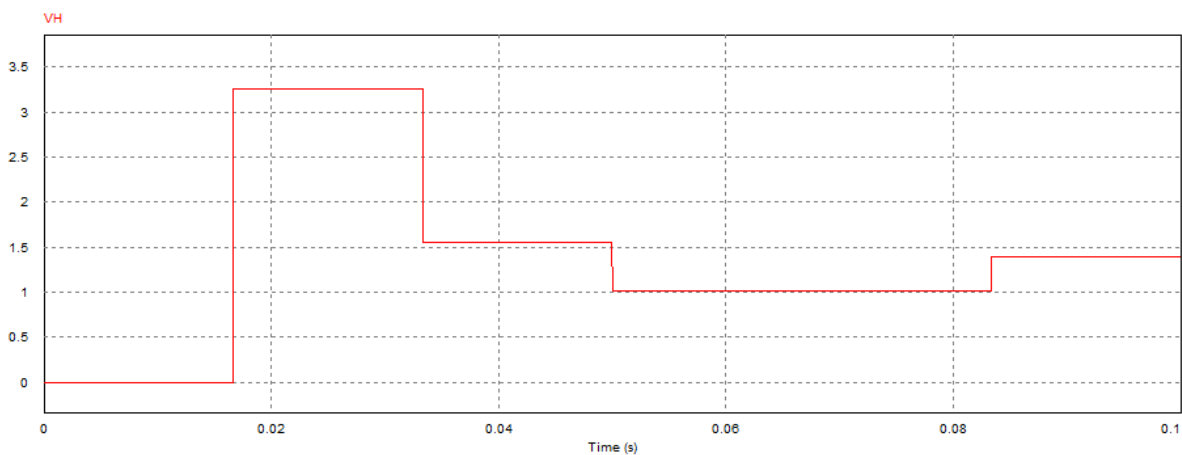


Figure II.42 : Le THD du courant de la source avant la compensation.

- **Interprétation**

On remarque que le courant de la source est très riche en harmonique de rang $(2k+1, k=2, \dots, 50)$, ainsi qu'on a obtenu un THD global de l'ordre de 30.16%, et les résultats qu'on a obtenus sont dans les normes CEI-61000-3-4.

II.4.2.1. Avec filtre passif parallèle (FPP)

Dans ce cas-là on ajout un FPP au montage de la figure (II.39), et les résultats de la simulation sont présenté dans les figure suivantes :

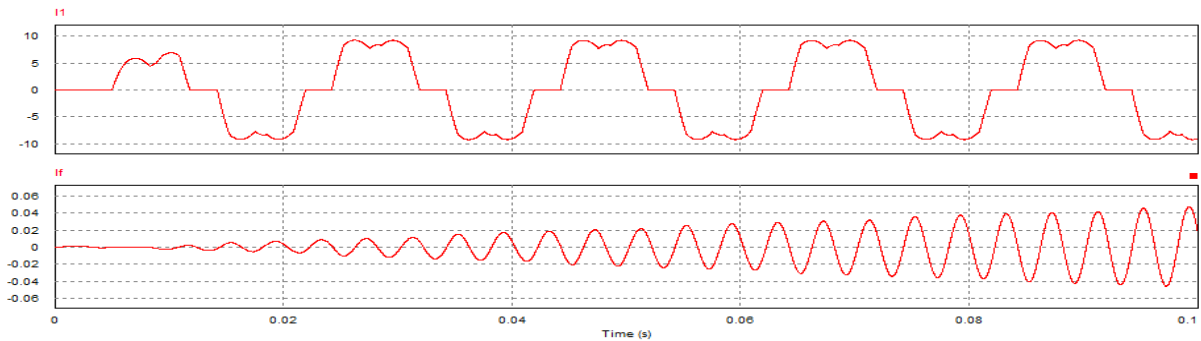


Figure II.43 : Allure de signal du courant de la source I_1 de la source et I_f du FPP.

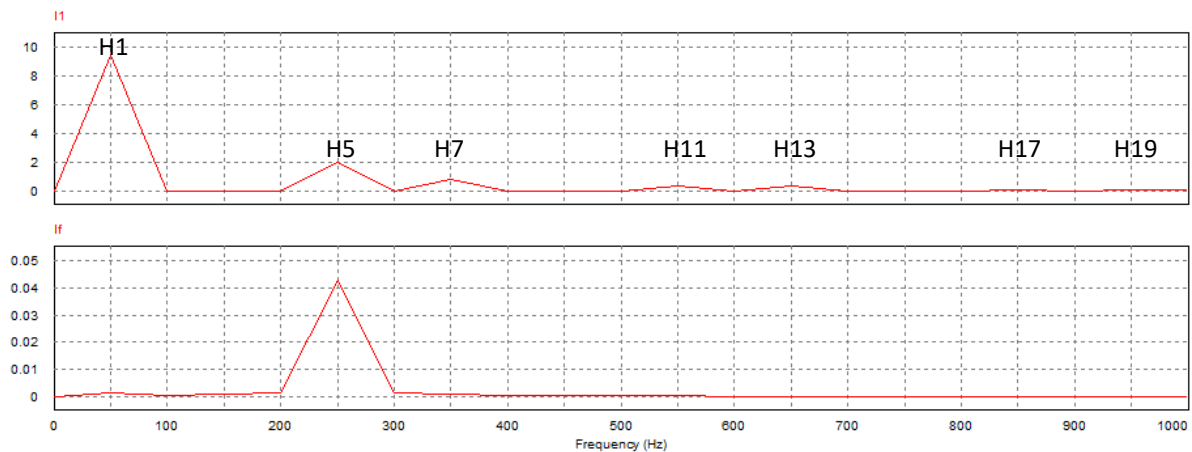


Figure II.44 : Analyse spectrale du courant I_1 de la source et I_f du FPP.

La figure (II.43) présente l'allure du courant de la source (I_1), ce courant n'est pas sinusoïdal, donc il est très riche en harmoniques, et aussi représente l'allure du courant dans la même figure au niveau du FPP I_f , ce courant est de la forme presque sinusoïdale.

La figure (II.44) présente l'analyse spectrale du courant harmonique dans la phase 1 de la source. On remarque que le THD de la source avec le FPP est diminué par rapport au montage précédent sans filtrage.

A partir des résultats de la figure (II.44) on trace le tableau suivant qui représente les valeurs du courant efficace de la phase 1, ainsi le THD du courant fondamental et des rangs harmoniques :

Chapitre II - Etude d'un pont redresseur (non commandé et commandé) triphasé avec et sans filtrage.

Tableau II-13 : Les valeurs du courant efficace et leur THD.

| Rang | Valeur du $I_{1\text{eff}}$ (A) | THD _h (%) |
|------|---------------------------------|----------------------|
| 1 | 9.5 | 100 |
| 3 | 0 | 0 |
| 5 | 1.97 | 20.73 |
| 7 | 0.75 | 7.89 |
| 9 | 0 | 0 |
| 11 | 0.33 | 3.47 |
| 13 | 0.29 | 3.05 |
| 15 | 0 | 0 |
| 17 | 0.032 | 0.33 |
| 19 | 0.061 | 0.64 |

A partir de la relation (I.1), on obtient le résultat suivant :

$$\text{THD}\% = 22.47\%.$$

La figure (II.45) représente l'allure du THD de courant de la source après la compensation :

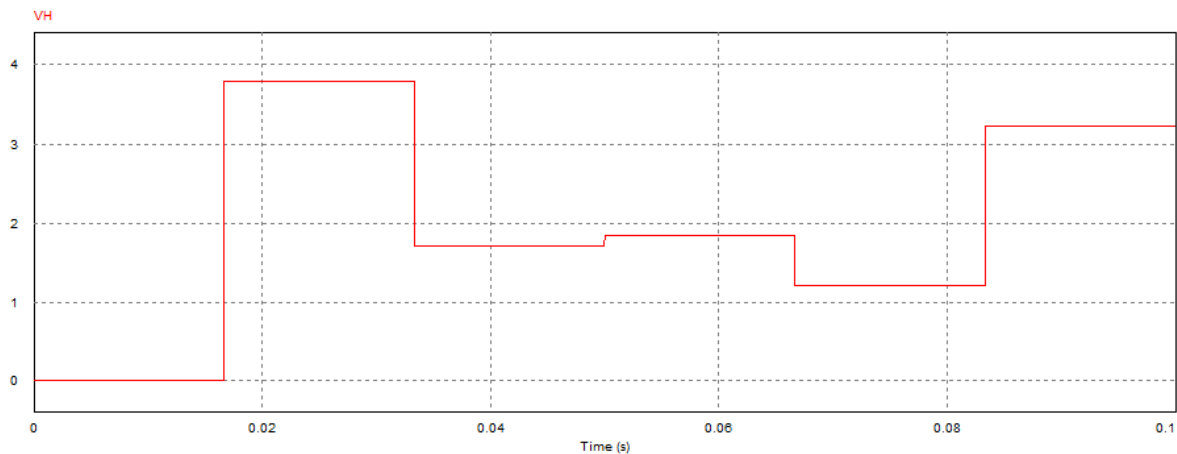


Figure II.45 : Le THD du courant de la source après la compensation.

- **Interprétation**

Quand on se connecte le FPP, on remarque qu'il y a une réelle amélioration du THD, il est passé à 22.47% par rapport au cas sans FPP où il était à 30.16%, et les résultats qu'on a obtenus sont dans les normes CEI-61000-3-2.

II.4.2.2. Avec filtre actif (FAP)

Dans ce cas-là on remplace le FPP avec un FAP, pour minimiser les perturbations dans le réseau électrique.

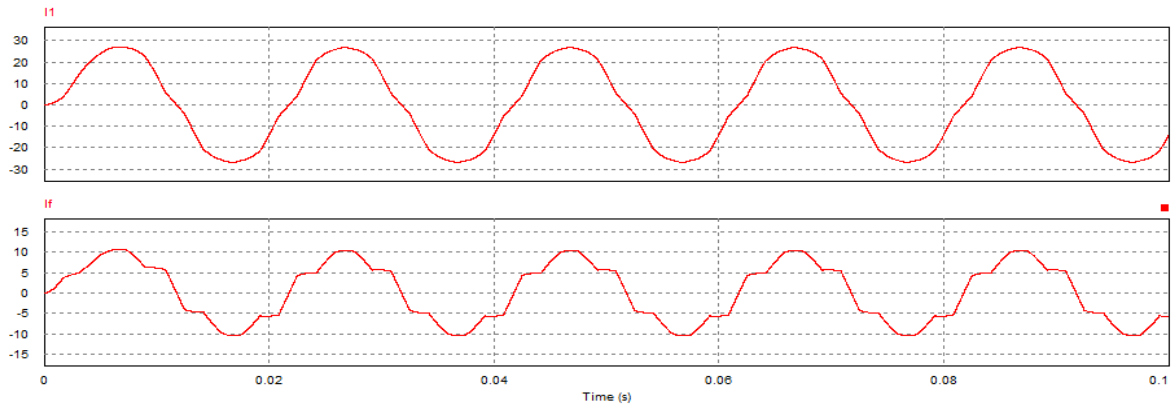


Figure II.46 : Allure de signal du courant de la source I_1 de la source et I_f du FAP.

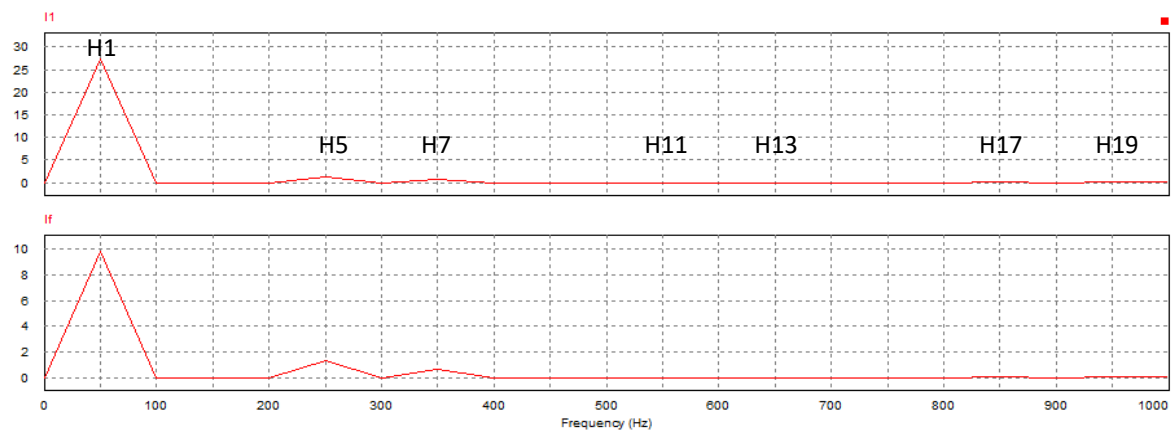


Figure II.47 : Analyse spectrale du courant I_1 de la source et I_f du FAP.

La figure (II.46) présente l'allure du courant de la source (I_1), ce courant est de la forme presque sinusoïdale donc les harmoniques sont presque négligeables, et aussi représente l'allure du courant dans la même figure au niveau du FAP I_f , ce courant est de la forme presque sinusoïdale.

La figure (II.47) présente l'analyse spectrale du courant harmonique dans la phase 1 de la source. On remarque que le THD de la source avec le FAP est diminué par rapport au montage précédent avec et sans filtrage.

Chapitre II - Etude d'un pont redresseur (non commandé et commandé) triphasé avec et sans filtrage.

A partir des résultats de la figure (II.47) on trace le tableau suivant qui représente les valeurs du courant efficace de la phase 1, ainsi le THD du courant fondamental et des rangs harmoniques :

Tableau II-14 : Les valeurs du courant efficace et leur THD.

| Rang | Valeur du I_{eff} (A) | THD _h (%) |
|------|--------------------------------|----------------------|
| 1 | 27.42 | 100 |
| 3 | 0 | 0 |
| 5 | 1.31 | 20.73 |
| 7 | 0.65 | 7.89 |
| 9 | 0 | 0 |
| 11 | 0.017 | 3.47 |
| 13 | 0.006 | 3.05 |
| 15 | 0 | 0 |
| 17 | 0.1 | 0.33 |
| 19 | 0.085 | 0.64 |

A partir de la relation (I.1), on obtient le résultat suivant :

$$\text{THD}\% = 5.35\%.$$

La figure (II.48) représente l'allure du THD de courant de la source après la compensation :

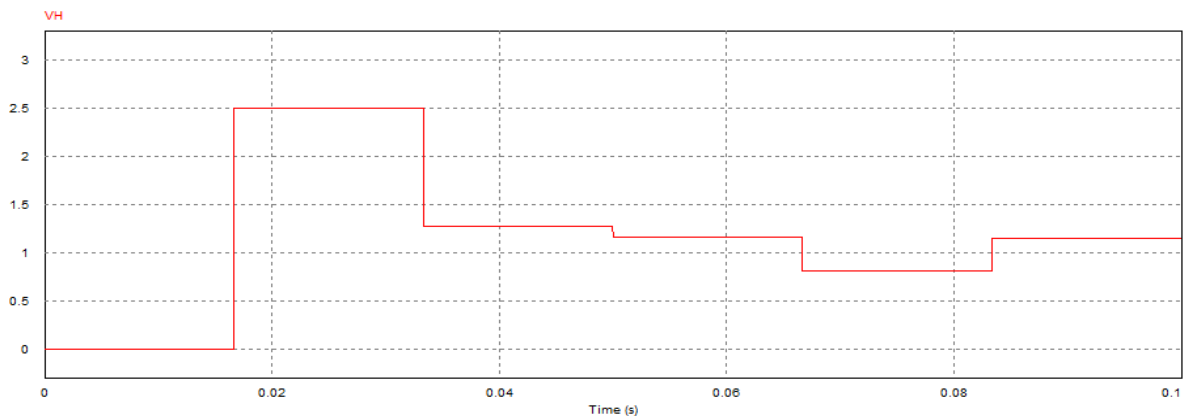


Figure II.48 : Le THD du courant de la source après la compensation.

- **Interprétation**

On peut remarquer à partir des résultats de la simulation du schéma de la figure (II.30) avec et sans filtrage, il y a une amélioration importante par rapport au réseau avec FPP seul, le THD est passé de 22.47% avec le FPP à une valeur de 5.35% avec le FAP, et les résultats qu'on a obtenus réponds aux normes CEI-61000-3-4.

II.5. Redresseur MLI

II.5.1. Principe de fonctionnement

La réversibilité en courant de l'onduleur MLI de la tension autorise son fonctionnement en redresseur MLI du courant. Il s'agit alors d'alimenter une charge (passive ou active) en continu à partir d'un réseau alternatif, le courant prélevé sur ce réseau étant sinusoïdal éventuellement, en phase avec la tension. On peut donc, avec un redresseur MLI, obtenir un facteur de puissance très proche de l'unité. On peut aussi régler, par le contrôle de l'énergie réactive absorbée ou fournie. Toutefois, ce redresseur peut être à structure courant ou à structure tension. [25]

Le schéma de La figure suivante est composé de trois parties :

- Le réseau d'alimentation.
- La charge polluante (charge non linéaire).
- Le circuit de la commande MLI.

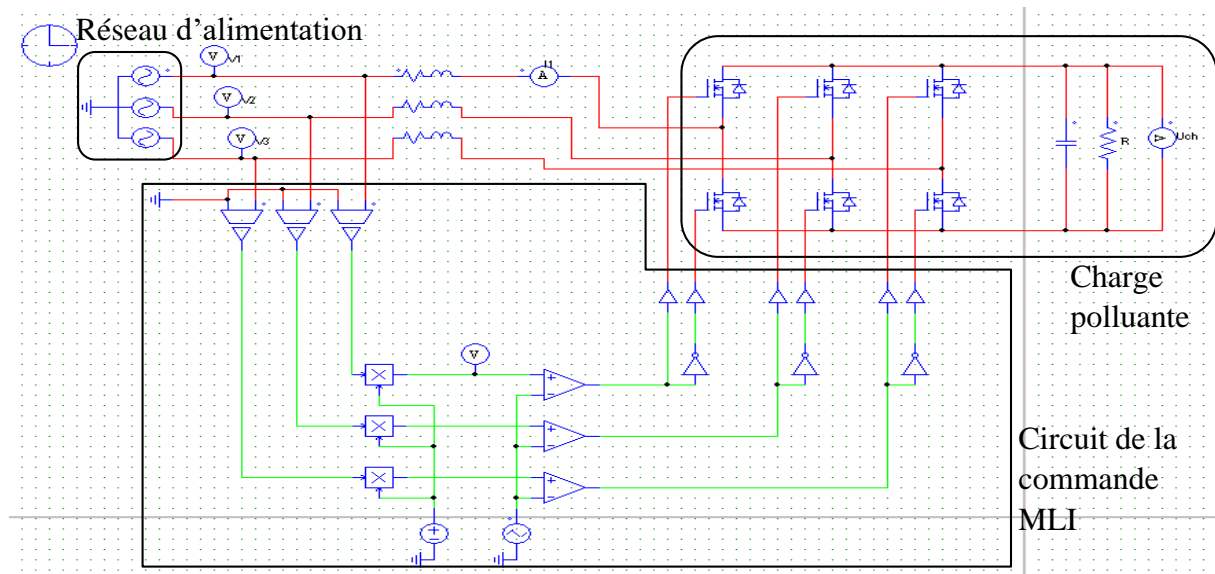


Figure II.49 : Schéma de la commande et de la puissance d'un redresseur MLI.

Chapitre II - Etude d'un pont redresseur (non commandé et commandé) triphasé avec et sans filtrage.

Les allures qu'on a obtenus à partir de la simulation de la figure (II.49) sont représenté dans les figures suivantes :

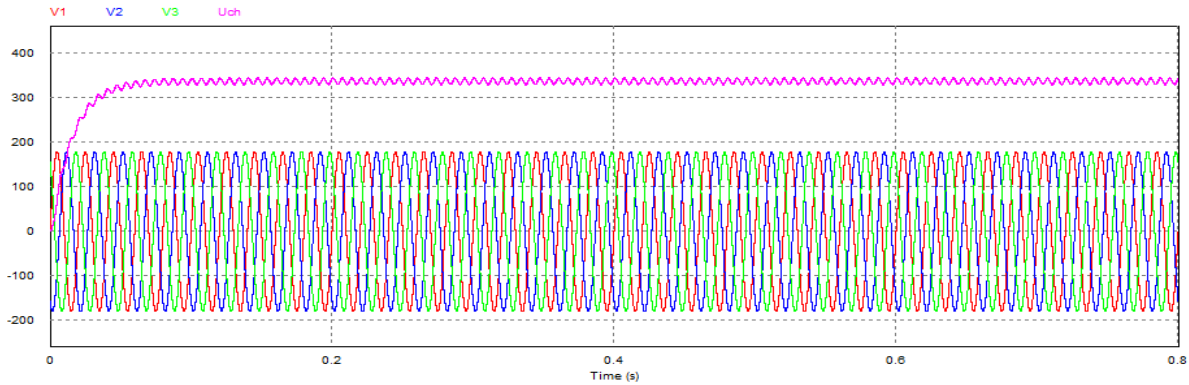


Figure II.50 : Allure des signaux entrés et sortie de la tension du redresseur MLI.

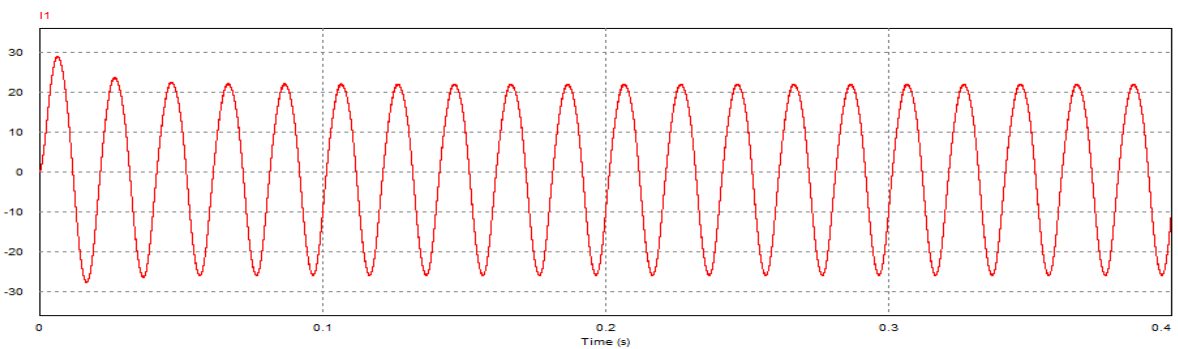


Figure II.51 : Allure de signal du courant de la source I_1 d'un redresseur MLI.

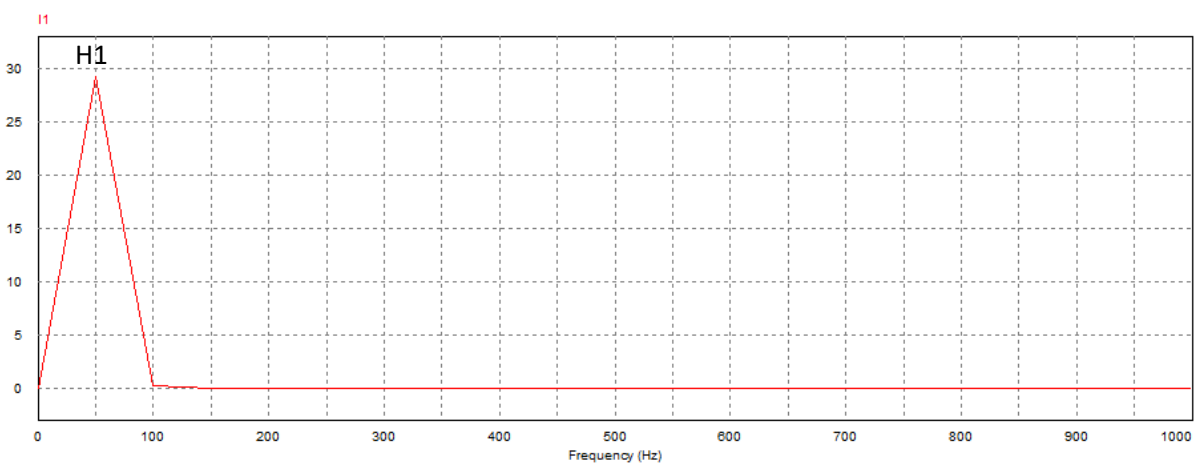


Figure II.52 : Analyse spectrale du courant I_1 de la source d'un redresseur MLI.

Chapitre II - Etude d'un pont redresseur (non commandé et commandé) triphasé avec et sans filtrage.

Les figures (II.50), (II.51) et (II.52) représentent les formes des tensions et du courant de la source, et l'analyse spectrale du courant harmonique dans la phase 1 respectivement. On remarque que le courant de la source est sinusoïdal ce qui minimise les harmoniques.

A partir des résultats de la figure (II.52) on trace le tableau suivant qui représente les valeurs du courant efficace de la phase 1, ainsi le THD du courant fondamental et des rangs harmoniques :

Tableau II-15 : Les valeurs du courant efficace et leur THD.

| Rang | Valeur du $I_{1\text{eff}}$ (A) | THD _h (%) |
|------|---------------------------------|----------------------|
| 1 | 29.29 | 100 |
| 3 | 0 | 0 |
| 5 | 0.0267 | 0.09 |
| 7 | 0.0216 | 0.07 |
| 9 | 0 | 0 |
| 11 | 0.0175 | 0.06 |
| 13 | 0.0166 | 0.056 |
| 15 | 0 | 0 |
| 17 | 0.0168 | 0.057 |
| 19 | 0.0166 | 0.056 |

A partir de la relation (I.1), on obtient le résultat suivant :

$$\text{THD}\% = 0.16\%.$$

La figure (II.53) représente l'allure du THD de courant de la source :

Chapitre II - Etude d'un pont redresseur (non commandé et commandé) triphasé avec et sans filtrage.

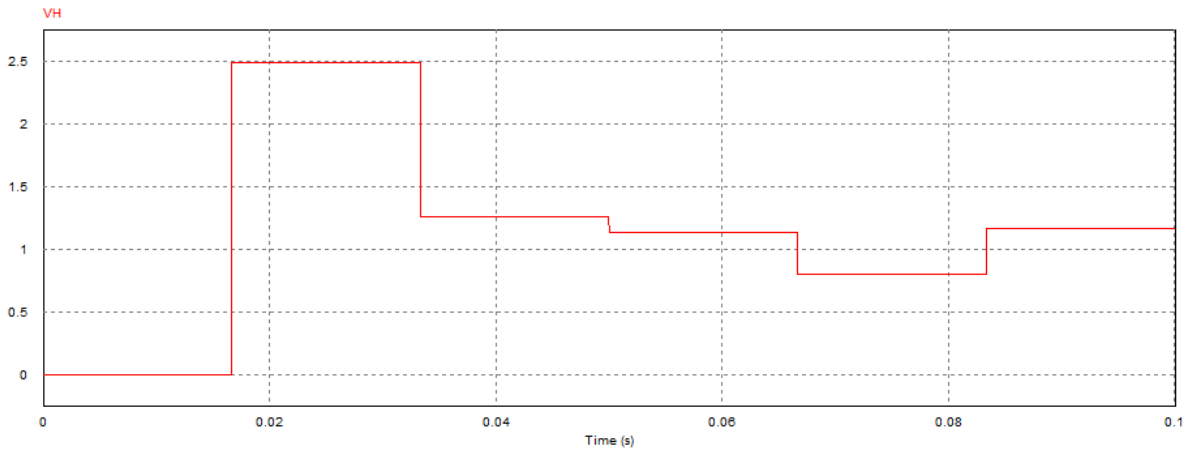


Figure II.53 : Le THD du courant de la source.

- **Interprétation**

On remarque d'après la figure (II.52) et le tableau (II-15), les résultats du THD globale des harmoniques sont presque nul, et les résultats qu'on a obtenus sont dans les normes CEI-61000-3-4.

II.6. Les données des composant utilisé dans les schémas précédents

Les valeurs des éléments caractérisant l'ensemble du réseau avec et sans filtre (passif et actif), et charge polluante avec une résistance et une inductance sont regroupées dans le tableau (II-16) :

Tableau II-16 : Les données des composants utilisé dans les schémas de simulation.

| |
|--|
| Réseau électrique |
| $V_s = 220 \text{ V}, f = 50 \text{ Hz}, (R_s = 5 \Omega, L_s = 10 \text{ mH}).$ |
| Charge résistive |
| $R_{ch} = 100 \Omega.$ |
| Charge purement inductive |
| $R_{ch} = 5 \Omega, L_{ch} = 10\text{mH}.$ |
| FPP |
| $L_f = 31.85\text{H}, C_f = 12.74\text{nF}.$ (pour le rang 5) |
| FAP |
| $C_f = 6.09 \text{ mF}.$ |
| La commande du Thyristor. |
| $\alpha = 60^\circ.$ |

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté quelques structures des convertisseurs AC/DC, tout en donnant leur principe de fonctionnement, leur étude théorique, et la simulation du montage dans chaque cas, comme nous avons présenté aussi les différentes méthodes de dépollution.

Notre choix dans ce chapitre est basé sur le FPP pour les méthodes traditionnelles, et le FAP pour les méthodes modernes, à savoir les FPP sont souvent pénalisés en termes d'encombrement et de résonance. Nous avons aussi présenté les différentes topologies des filtre actif parallèle (FAP), d'après les résultats obtenus nous concluons que le FAP réduit d'une manière efficace les harmoniques dans le réseau électrique. Les résultats qu'on a obtenus respectent les limites imposées par les normes CEI-61000.

Le chapitre suivant traitera de la structure de la nouvelle topologie d'un redresseur à faible taux de distorsion harmonique et à facteur de puissance élevé.

Chapitre III :

Structure de la nouvelle topologie d'un redresseur à faible taux de distorsion harmonique et à facteur de puissance élevé.

III.1. Introduction

Avec l'implantation de plus en plus rapide des équipements d'informatique et de télécommunication, on observe une augmentation de pollution harmonique sur le réseau. Ces courants harmoniques nuisent ainsi au fonctionnement optimal des autres équipements qui sont branchés sur le réseau électrique. [10]

Ce chapitre a pour but de présenter la structure de la nouvelle topologie d'un redresseur à faible taux de distorsion harmonique et à facteur de puissance élevé. Ensuite nous allons démontrer la faisabilité du système de compensation des harmoniques avec le circuit proposé par cette nouvelle topologie, qui réduit les harmoniques et qui corrige de façon inhérente le facteur de puissance.

III.2. Structure de la nouvelle topologie d'un redresseur à faible taux de distorsion harmonique et à facteur de puissance élevé

La structure de la nouvelle topologie du redresseur proposé est obtenue en associant un convertisseur DC/DC en parallèle avec chaque phase d'un redresseur à diodes triphasé PD3 à six impulsions comme illustré par la figure (III.1). Cette structure est une approche novatrice qui permet de surmonter de nombreux inconvénients dans le domaine des redresseurs. Elle est capable de fournir la puissance ultra propre à faible THD et à FP élevé.

Le redresseur proposé combine la robustesse, la simplicité et la fiabilité du redresseur à diodes en pont à six impulsions étudié dans le deuxième chapitre avec le fonctionnement à haute fréquence des convertisseurs DC/DC contrôlés, et par conséquent, le volume, le poids et la taille de la structure proposée sont très réduits avec une plus grande efficacité. Ainsi, la puissance nominale peut être atteinte jusqu'à 50 kW, ce qui ne peut être réalisé avec un redresseur triphasé à facteur de puissance unitaire commandé par de la modulation de largeur d'impulsion MLI. [10]

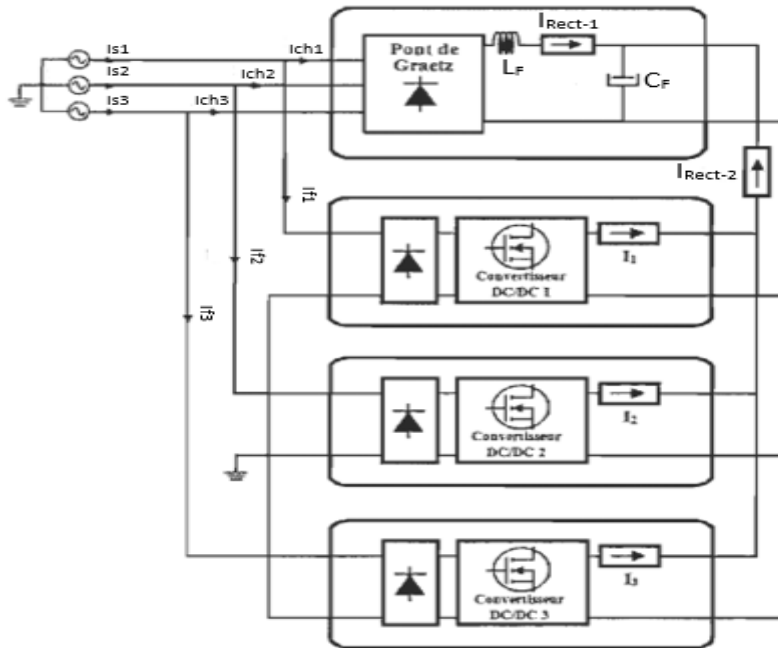


Figure III.1 : Structure de la nouvelle topologie de redresseur à faible taux de distorsion harmonique et à facteur de puissance élevé. [10]

III.3. Principe de fonctionnement

Les courants de lignes proposés sont obtenus par la combinaison des courants d'entrée du pont de Graëtz et des courants d'entrée des convertisseurs DC/DC. Ainsi :

$$\begin{cases} I_{s1}(t) = I_{ch1}(t) + I_{f1}(t) \\ I_{s2}(t) = I_{ch2}(t) + I_{f2}(t) \\ I_{s3}(t) = I_{ch3}(t) + I_{f3}(t) \end{cases} \quad (III.1)$$

Où

- $I_{s1}(t)$, $I_{s2}(t)$ et $I_{s3}(t)$ représentent les courants de lignes.
- $I_{ch1}(t)$, $I_{ch2}(t)$ et $I_{ch3}(t)$ représentent les courants d'entrée des bras du redresseur.
- $I_{f1}(t)$, $I_{f2}(t)$ et $I_{f3}(t)$ représentent les courants d'entrée des convertisseurs DC/DC.

La figure (III.2) montre le principe de construction du courant de ligne I_s à travers deux composantes I_{ch1} et I_{f1} qui sont obtenus lorsque le redresseur proposé fonctionne comme un redresseur triphasé conventionnel à 12 impulsions. On remarque que la forme d'onde du courant I_{f1} impose la caractéristique globale de la forme d'onde I_s ce qui permet l'amélioration

Chapitre III - Structure de la nouvelle topologie d'un redresseur à faible taux de distorsion harmonique et à facteur de puissance élevé.

du taux de distorsion harmonique (THD) des courants de ligne à travers une technique très simple.

Concernant les caractéristiques du redresseur proposé, il est important de souligner que le courant imposé par le convertisseur DC/DC peut prendre n'importe quelle forme d'onde, selon la forme d'onde du courant de ligne qui est souhaité.

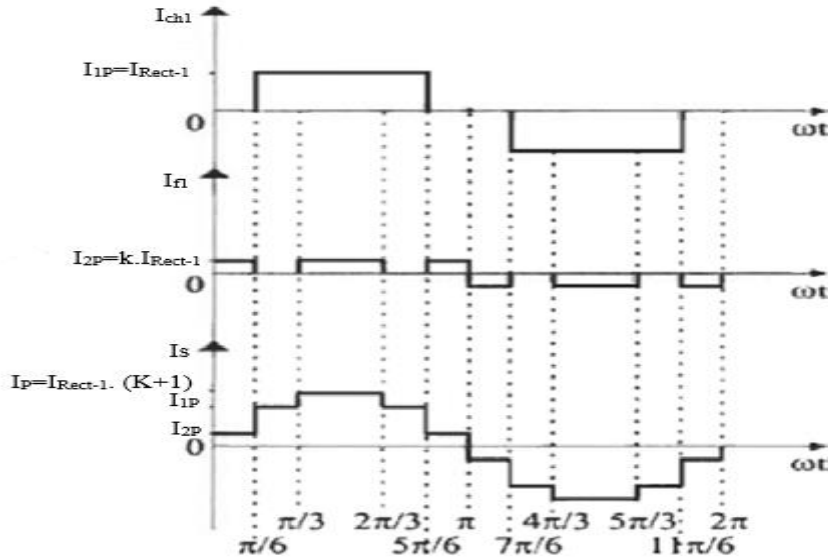


Figure III.2 : Formes d'onde d'un courant à 12 impulsions. [10]

Cette caractéristique assure une plus grande flexibilité, ce qui signifie qu'une forme d'onde sinusoïdale du courant de ligne peut être atteinte, en fournissant un THDI aussi bas que cela peut être réalisé dans les redresseurs à 24 impulsions. [26]

Dans ce contexte, le courant I_{f1} peut être imposé, comme indiqué dans la figure (III.3). Par conséquent, la combinaison des courants I_{ch1} et I_{f1} donne un courant de ligne sinusoïdal, comme dans le cas des redresseurs triphasés à facteur de puissance unitaire commandé par modulation de largeur d'impulsion (MLI), qui ont des stratégies de contrôle complexes et difficile à mettre en œuvre.

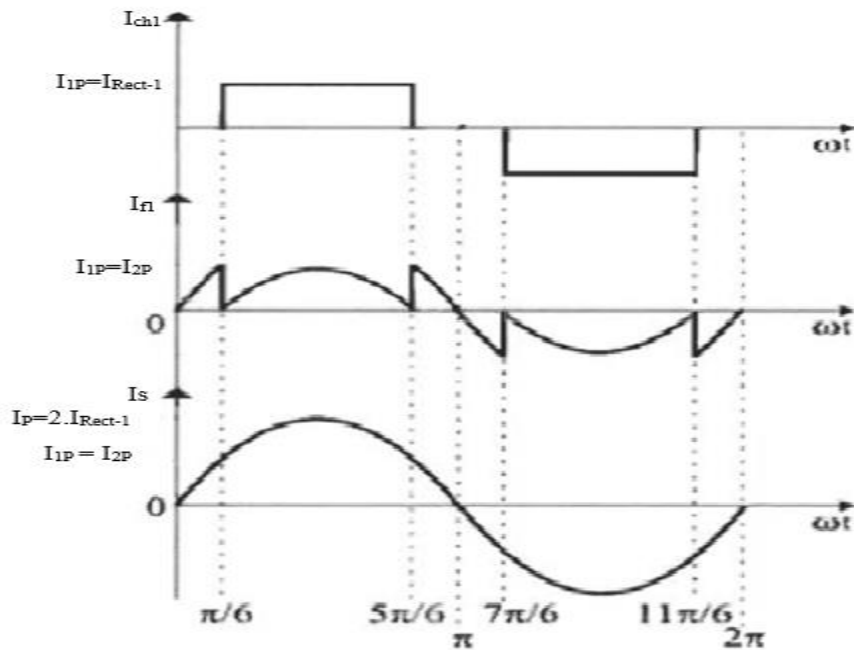


Figure III.3 : Forme d'onde du courant de ligne, courant de la charge et le courant harmonique.

III.4. Circuit électrique de la nouvelle topologie de redresseur à faible taux de distorsion harmonique et à facteur de puissance élevé

La figure (III.4) représente le circuit électrique du redresseur proposé pour réduire le THD et augmenter le FP. Ce circuit est composé d'un redresseur triphasé à six impulsions, et de trois hacheurs élévateurs en parallèle. Chaque convertisseur DC/DC est connecté à la source triphasée par le biais d'un redresseur monophasé, et un transformateur d'adaptation qui permet d'avoir une isolation galvanique. Les convertisseurs DC/DC se comportent comme des sources de courant, et ils sont associés en parallèle avec chaque bras du pont de Graëtz. Les courants de ces sources sont combinés au courant d'entrée du pont de Graëtz, ce qui permet de réduire les harmoniques dans les courants de lignes.

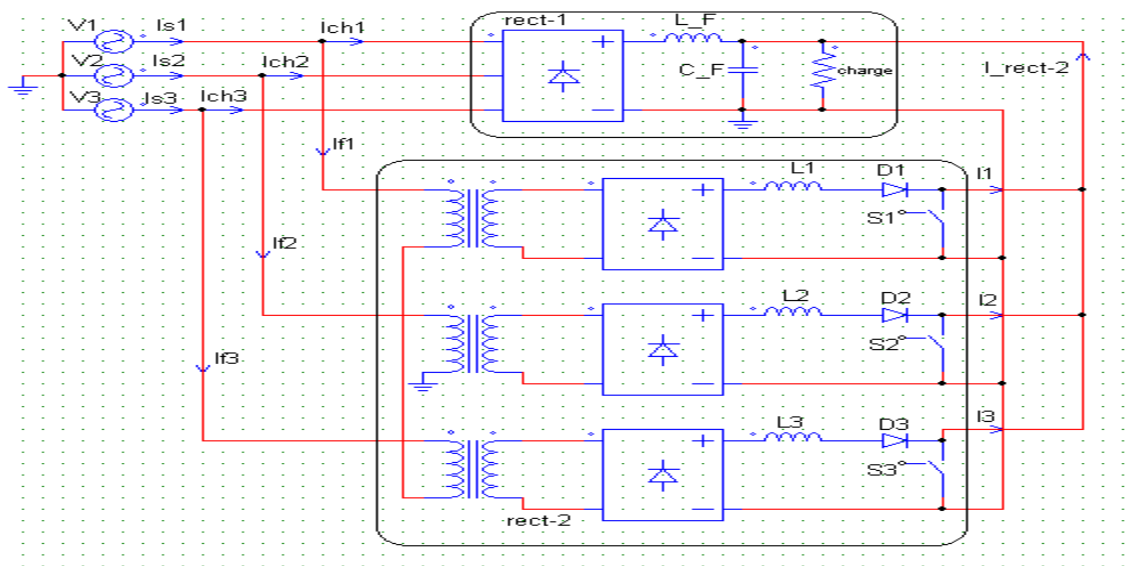


Figure III.4 : Schéma du circuit électrique du redresseur proposé.

III.5. Contribution en puissance des convertisseurs DC/DC

La figure (III.5) illustre les formes d'ondes théoriques de la tension et du courant d'entrée de chaque convertisseur DC/DC.

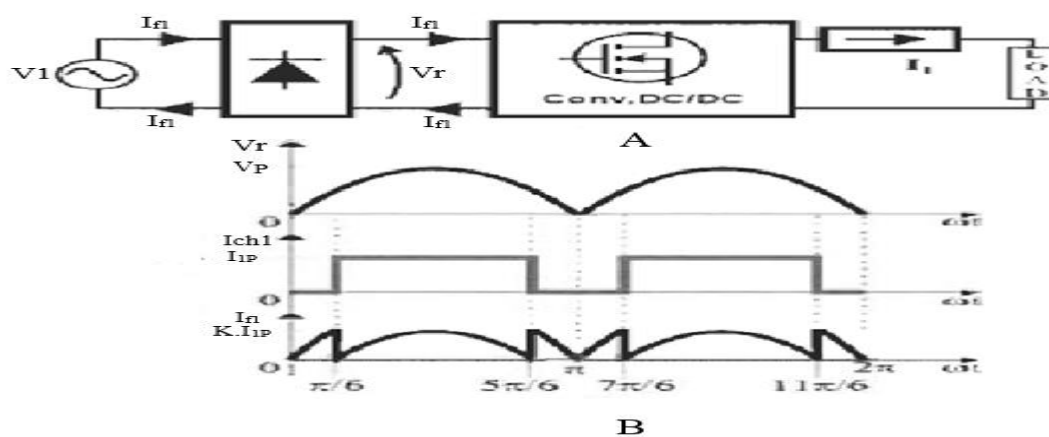


Figure III.5 : Contribution des convertisseurs DC/DC. [10]

La puissance nominale du pont de Graëtz et des convertisseurs DC/DC peut être déterminée en fonction de la valeur de crête des courants d'entrée de ligne I_{ch1} , I_{ch2} , I_{ch3} , I_{f1} , I_{f2} , et I_{f3} . Dans ce contexte, l'objectif est de quantifier la fraction de la puissance délivrée au pont de Graëtz et des convertisseurs DC/DC par rapport à la puissance de sortie totale. Le système va être considéré comme sans perte. Ainsi :

Chapitre III - Structure de la nouvelle topologie d'un redresseur à faible taux de distorsion harmonique et à facteur de puissance élevé.

$$P_0 = P_s = \frac{3}{2} V_p I_p \quad (\text{III.2})$$

P_0 : puissance active totale de sortie.

P_s : puissance active totale d'entrée.

V_p : valeur crête de la tension de la ligne-neutre.

I_p : valeur de crête du courant d'entrée ligne.

Lorsque le redresseur proposé fonctionne comme un redresseur à 12 impulsions, la puissance fournie peut être déterminée comme suit :

$$P_{DC-DC Conv.1} = \frac{1}{\pi} \left[\int_0^{\frac{\pi}{6}} V_p \sin(\omega t) I_{2p} d\omega t + \int_{\frac{\pi}{3}}^{2\pi/3} V_p \sin(\omega t) I_{2p} d\omega t + \int_{5\pi/6}^{\pi} V_p \sin(\omega t) I_{2p} d\omega t \right] \quad (\text{III.3})$$

Où I_{2p} est la valeur crête du courant d'entrée du convertisseur DC/DC considéré.

Le courant imposé par le convertisseur DC/DC doit être proportionnelle au courant d'entrée d'un redresseur à pont de diode à six impulsion afin de réaliser le plus bas THDI. Ainsi la valeur crête du courant d'entrée du convertisseur DC/DC considéré est exprimée par :

$$I_{2p} = k. I_{1p} \quad (\text{III.4})$$

I_{1p} : valeur de crête du courant d'entrée d'un redresseur à pont diode à six impulsions.

k : constante.

Par conséquent, la contribution en puissance des convertisseurs DC/DC est donnée par :

$$P_2 = 3V_p. I_p. \left(\frac{1.268}{\pi} \right) \quad (\text{III.5})$$

La puissance des convertisseurs DC/DC par rapport à la puissance de sortie totale (P_0) peut être déterminée comme :

$$\frac{P_2}{P_0} = \frac{3V_p I_p \left(\frac{1.268}{\pi} \right)}{\frac{3}{2} V_p I_p} \quad (\text{III.6})$$

Puisque la valeur de crête du courant de ligne est :

$$I_p = I_{1p} + I_{2p} = I_{1p}(1 + k) \quad (\text{III.7})$$

Chapitre III - Structure de la nouvelle topologie d'un redresseur à faible taux de distorsion harmonique et à facteur de puissance élevé.

La contribution en puissance des convertisseurs DC/DC peut être exprimée comme suit :

$$\frac{P_2}{P_0} = 2.5336 \left(\frac{k}{\pi(k+1)} \right) \quad (\text{III.8})$$

Pourvu que les convertisseurs DC/DC fonctionnent comme des sources de courant avec un courant imposé convenable et que la puissance nominale de chaque convertisseur est déterminée en fonction de la valeur crête des courants d'entrées imposés (I_{f1} , I_{f2} , et I_{f3}), la puissance nominale du pont de Graëtz est donnée par :

$$P1 = P2 - P0 \quad (\text{III.9})$$

La figure (III.6) représente la contribution en puissance des convertisseurs DC/DC afin de prouver l'exactitude de (III.8) et (III.9). Ainsi, on peut observer que pour $0,33 \leq k \leq 0,36$, le redresseur proposé fonctionne comme un redresseur ordinaire à 12 impulsions et la contribution de l'énergie des convertisseurs DC/DC est d'environ 20% de la puissance de sortie totale (6,67% pour chaque convertisseur DC/DC).

On remarque aussi pour la région de fonctionnement $0,3 \leq k \leq 0,36$, qu'on maximise la contribution de l'énergie du pont redresseur à six impulsions et on minimise la contribution de puissance des convertisseurs DC/DC.

Les autres régions de fonctionnement doivent être évitées afin d'obtenir le plus bas THDI et ainsi la contribution minimale en puissance des convertisseurs DC/DC peut être assurée. [10]

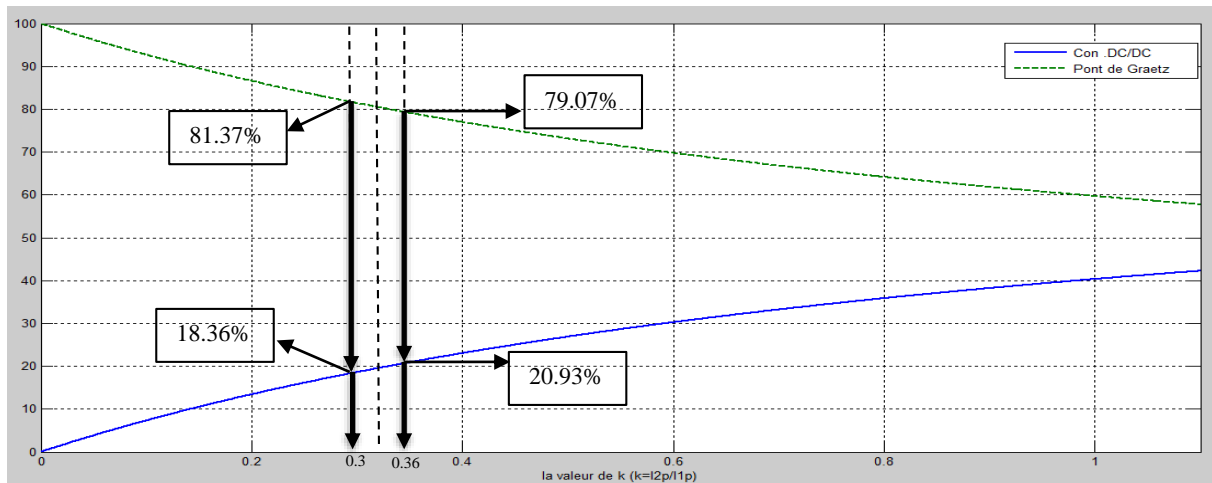


Figure III.6 : Représentation de la contribution en puissance des convertisseurs DC/DC et du pont de Graëtz en fonction de la puissance totale de sortie [%].

III.6. Stratégie de contrôle

L'approche principale du contrôle est d'imposer un courant de ligne à faible THD et à haut facteur de puissance. La stratégie de contrôle doit se concentrer sur l'établissement des relations entre les courants d'entrées I_{ch1} du redresseur pont de Graëtz et le courant d'entrée I_{f1} du convertisseur DC/DC, afin de parvenir à un THDI du courant de ligne raisonnable. Par exemple, si une période de douze impulsions du courant alternatif est souhaitée, la stratégie de contrôle du convertisseur DC/DC doit être établie comme indiqué dans la Figure (III.7) :

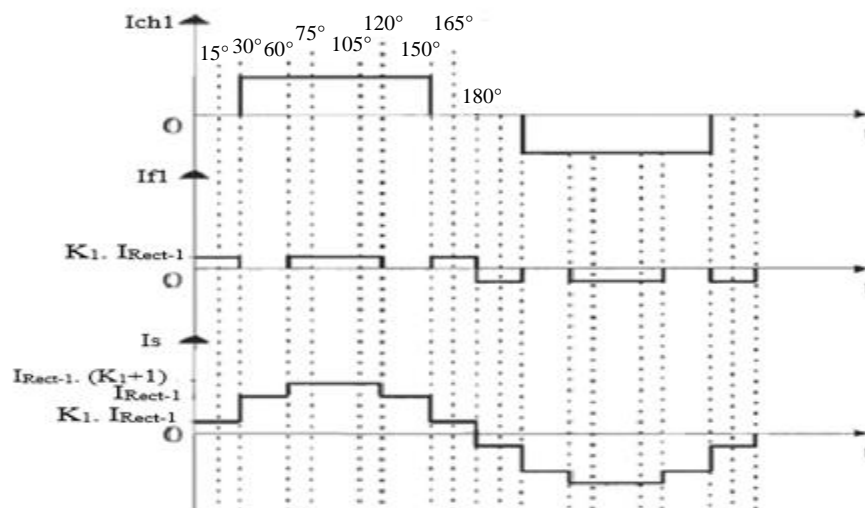


Figure III.7 : Forme d'onde du courant de ligne, courant de la charge et le courant harmonique sur une période de douze impulsions. [10]

Chapitre III - Structure de la nouvelle topologie d'un redresseur à faible taux de distorsion harmonique et à facteur de puissance élevé.

La figure (III.8) donne le schéma fonctionnel de la stratégie de contrôle des convertisseurs DC/DC. La tension V_{ref} est multipliée par une fraction du courant d'entrée I_{ch1} du pont de Graëtz et ajouté ensuite à une tension en dents de scie tension V_s afin d'être en rapport avec le courant qui travers l'inductance L_1 du convertisseur DC/DC. Ainsi, le signal de commande pour le transistor de commutation du convertisseur DC/DC est obtenu et le courant traversant l'inductance L_1 suivra la référence imposée par une stratégie de contrôle.

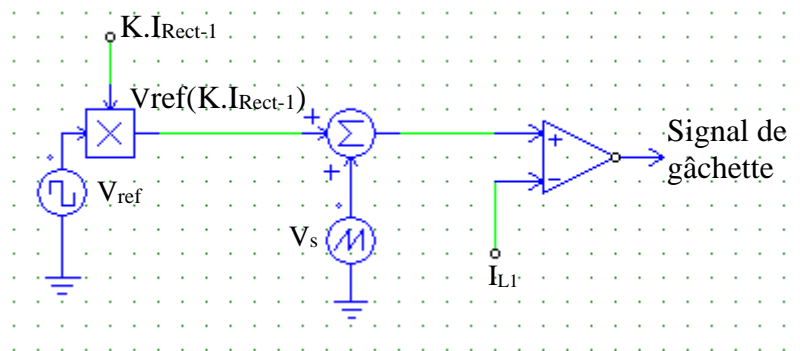


Figure III.8 : Schéma fonctionnel de la stratégie de contrôle en boucle fermée.

III.7. Montage de simulation

Le schéma simulé présenté dans la figure (III.9), il est composé d'un réseau d'alimentation est présenté par un système triphasé de tension sinusoïdale, d'un redresseur triphasé PD3 débitant sur une charge R-L joue de rôle de la charge polluante. Le filtre active (DC/DC) est composé d'un ensemble des hacheurs de puissance de type élévateur, et son propre de circuit de commande.

Chapitre III - Structure de la nouvelle topologie d'un redresseur à faible taux de distorsion harmonique et à facteur de puissance élevé.

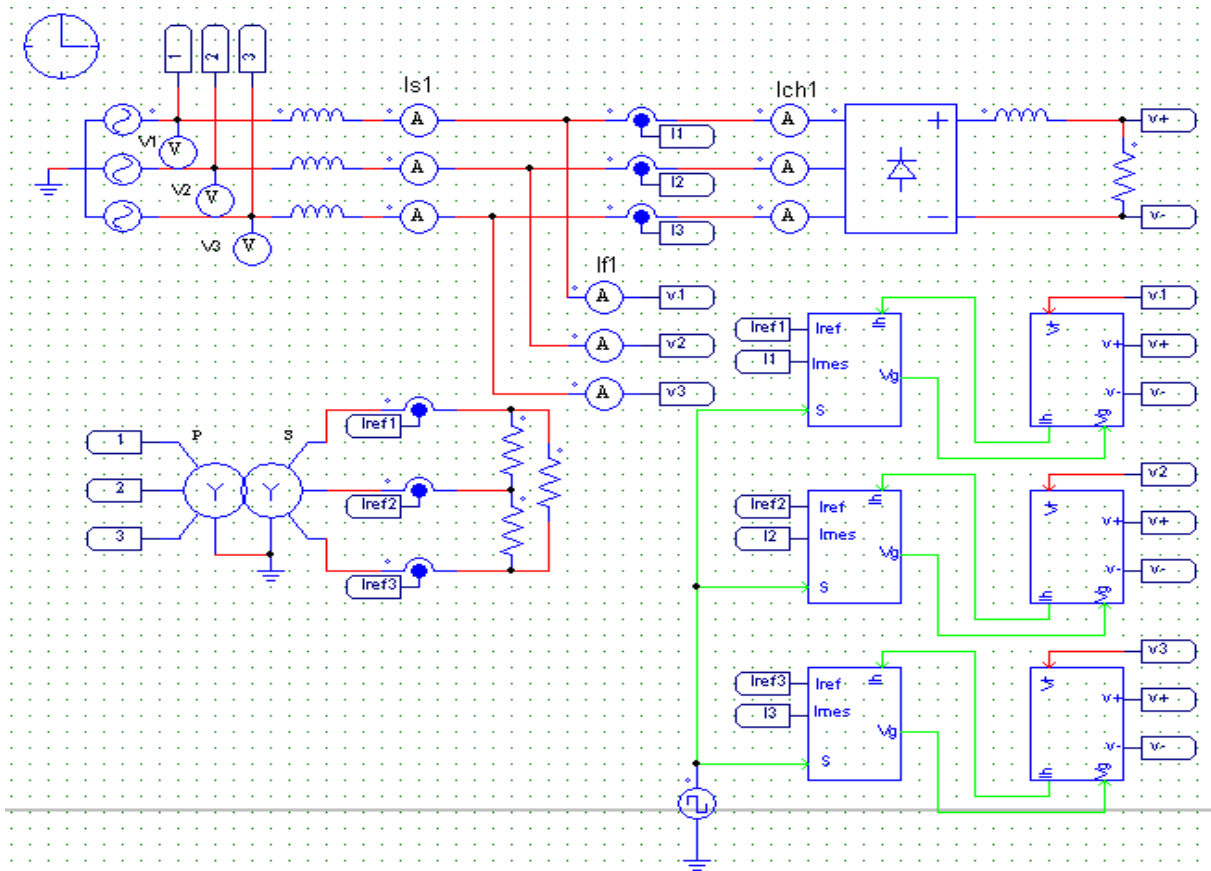


Figure III.9 : Schéma global de la structure de la nouvelle topologie d'un redresseur à faible THD et à FP élevé.

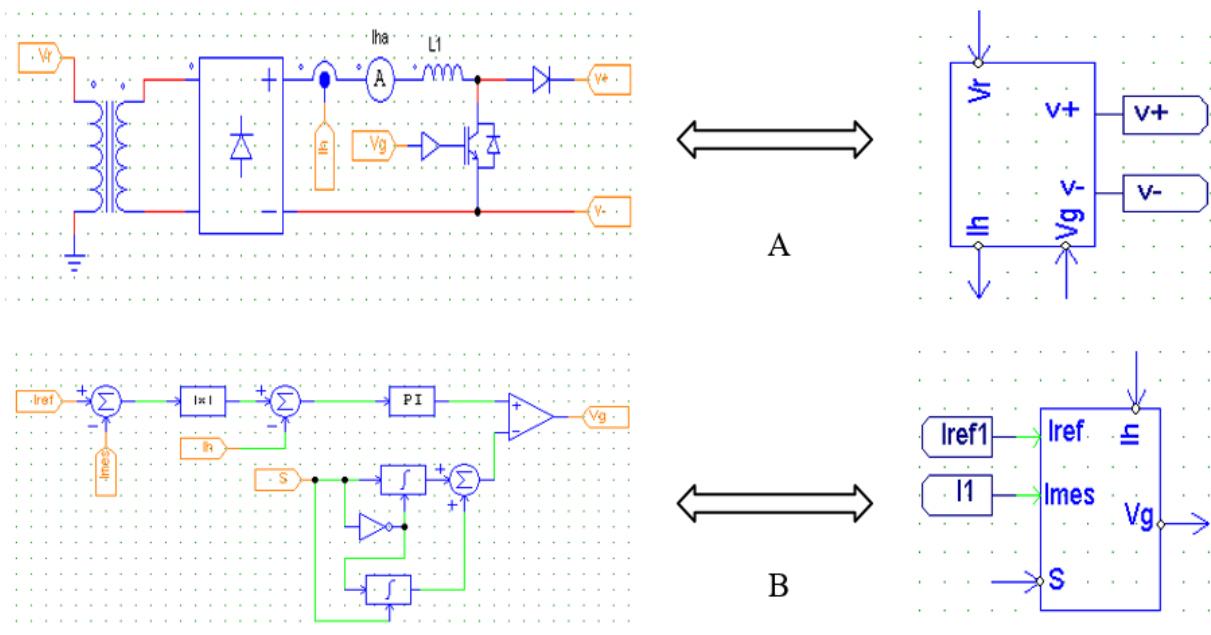


Figure III.10 : Schéma d'un Hacheur (A) et son stratégie de contrôle (B).

III.8. Paramètre utilisé pour la simulation

Le tableau suivant présente les paramètres utilisés pour la simulation du schéma de la figure (IV.1) :

Tableau III-1 : les paramètres utilisés pour la simulation.

| Éléments de l'installation | Valeurs des paramètres de simulation |
|----------------------------|--|
| Réseau | $V = 220 \text{ V}$, $f = 50 \text{ Hz}$ et $L_s = 1 \text{ mH}$. |
| Redresseur | $L_f = 180 \text{ mH}$ et $R_{ch} = 100 \Omega$. |
| Filtre active | $L_1 = L_2 = L_3 = 10 \text{ mH}$ Transformateur Fréquence de commutation 20 KHz |

III.9. Résultats de simulation

Les résultats de simulation sont donnés aux figures (III.11), (III.12), (III.13), (III.14) et (III.15). En effet, la figure (III.11) représente la forme d'onde des signaux de la tension d'entrée du montage de simulation de la figure (III.9).

La figure (III.12), nous montre la forme d'onde du courant I_{ch1} absorbé par un redresseur triphasé à diode et I_{f1} le courant absorbé à l'entrée de convertisseur DC/DC, la somme des deux courants nous donne la forme du courant de la source I_{S1} qui est représenté dans la figure (III.13), et la forme du courant I_{S1} ressemble à un sinus. Ainsi que la figure (III.14) représente l'analyse spectrale du courant de la source I_{S1} . La figure (III.15) représente le THD du courant de la source après la compensation.

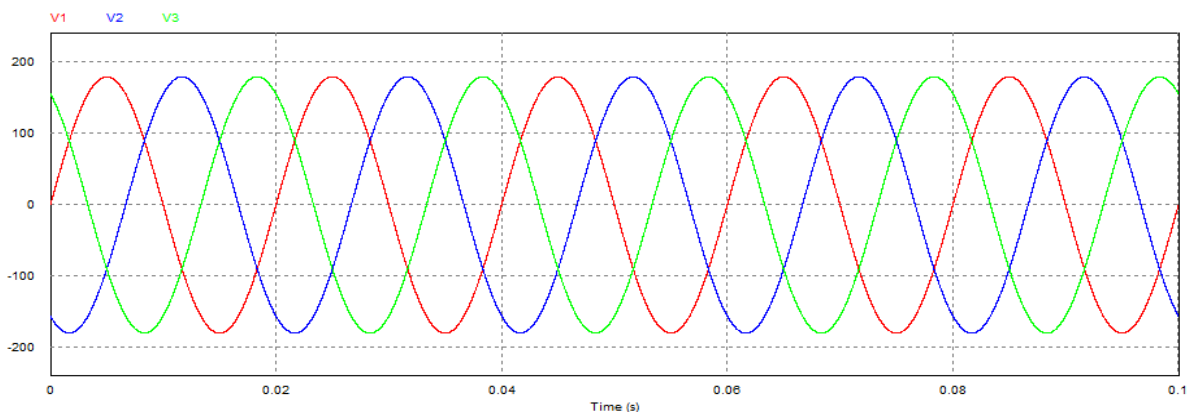


Figure III.11 : Allure des signaux d'entrée de la tension du montage de simulation.

Chapitre III - Structure de la nouvelle topologie d'un redresseur à faible taux de distorsion harmonique et à facteur de puissance élevé.

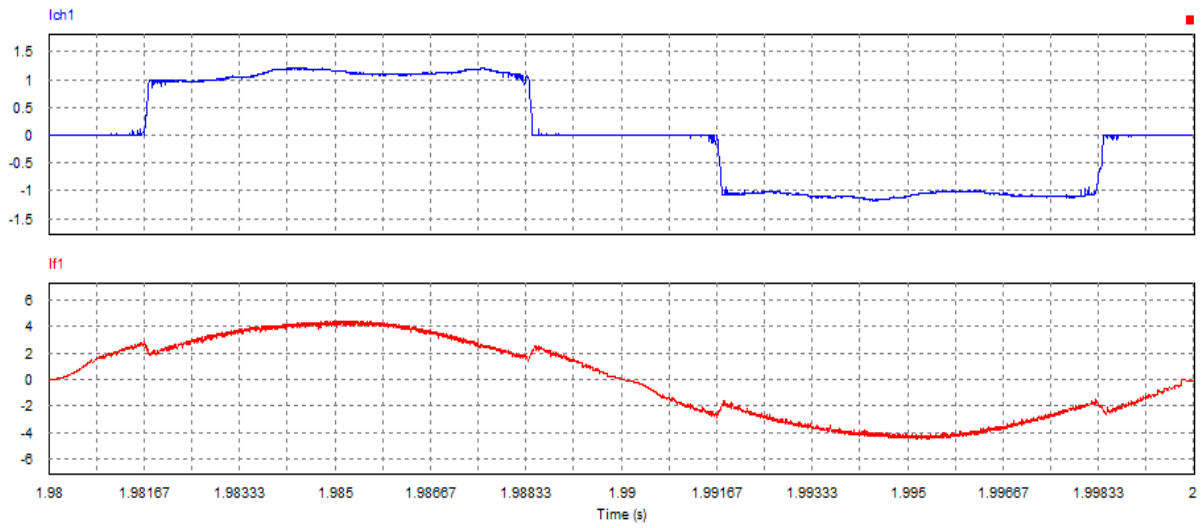


Figure III.12 : Allure du courant d'entrée de bras du redresseur I_{ch1} et I_{f1} le courant d'entrée des convertisseurs DC/DC.

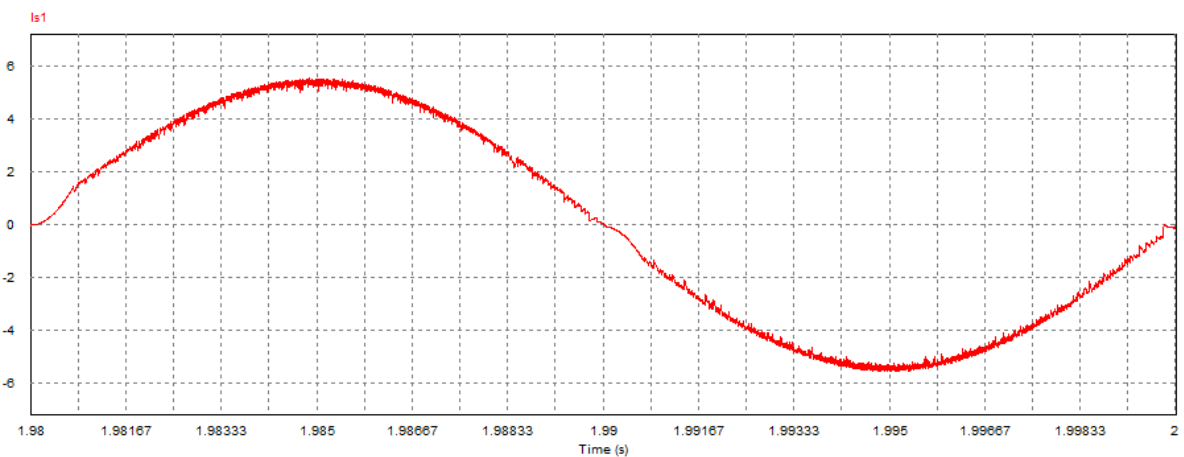


Figure III.13 : Allure de signal du courant de la source I_{s1} .

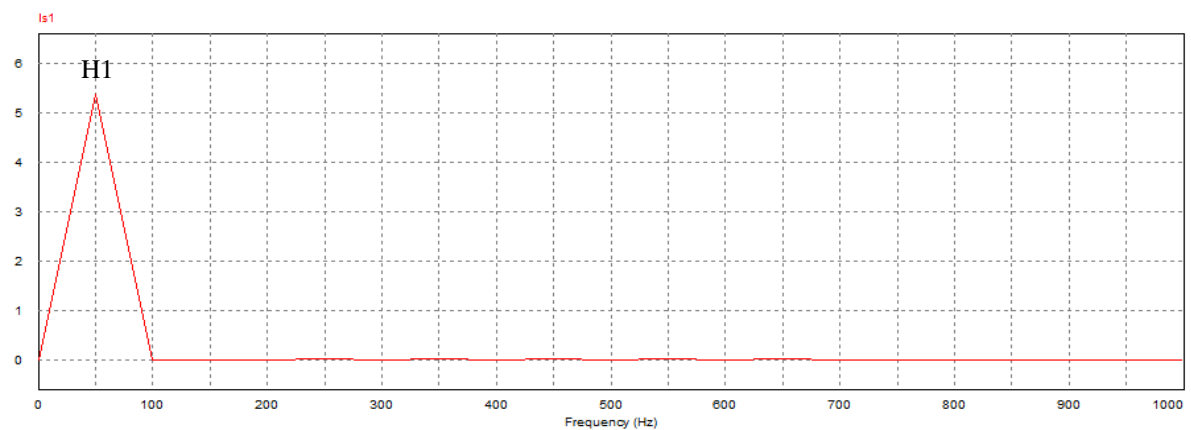


Figure III.14 : Analyse spectrale du courant de la source I_{s1} .

Chapitre III - Structure de la nouvelle topologie d'un redresseur à faible taux de distorsion harmonique et à facteur de puissance élevé.

A partir des résultats de la figure (III.14) on trace le tableau suivant qui représente les valeurs de courant efficace phase 1, ainsi le THD de courant fondamental et des rangs harmoniques :

Tableau III-2 : Les valeurs du courant efficace et leur THD.

| Rang | Valeur du I_{eff} (A) | THD _h (%) |
|------------------------------------|--------------------------------|----------------------|
| 1 | 5.4 | 100 |
| 3 | 0.014 | 0.26 |
| 5 | 0.025 | 0.46 |
| 7 | 0.027 | 0.5 |
| 9 | 0.027 | 0.5 |
| 11 | 0.025 | 0.46 |
| 13 | 0.025 | 0.46 |
| 15 | 0.027 | 0.5 |
| 17 | 0.021 | 0.38 |
| 19 | 0.015 | 0.27 |
| $I_{\text{eff}} = 3.81 \text{ A.}$ | | |
| $P = 484.8 \text{ W.}$ | | |
| $S = 485 \text{ VA.}$ | | |
| $FP = 0.99$ | | |

A partir de la relation (I.1), on obtient le résultat suivant :

$$\text{THD}\% = 1.29\%.$$

Chapitre III - Structure de la nouvelle topologie d'un redresseur à faible taux de distorsion harmonique et à facteur de puissance élevé.

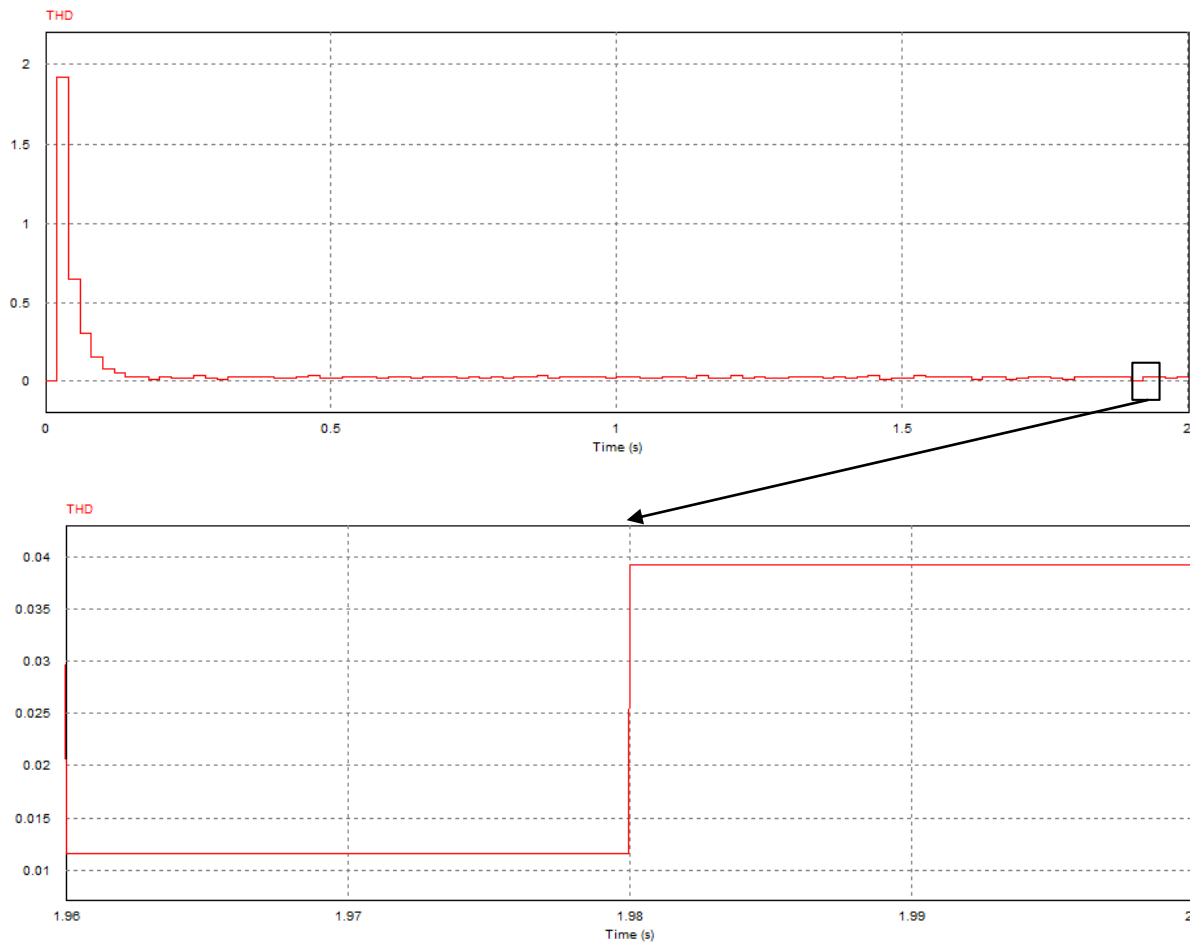


Figure III.15 : Le THD du courant de la source après la compensation.

- **Interprétation**

La compensation avec les convertisseur DC/DC corrige de façon très efficace la forme de courant de ligne I_{s1} . A priori le signal de la figure (III.13) du courant de la source I_{s1} est presque sinusoïdal parfait, mais c'est l'analyse harmonique qui nous donnera l'information sur son degré d'approche d'un vrai signal sinusoïdal. Les harmoniques ont été réduits de façon importante comme montrée dans la figure (III.14) de l'analyse spectral du courant de ligne. Ceci a donc pour effet d'améliorer le THD global de l'installation qui est devenu égal à 1.29% (il était de 28.26% avant d'ajouter les convertisseur DC/DC).

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le principe de la nouvelle topologie de redresseur qui permet de surmonter de nombreux inconvénients dans le domaine des redresseurs tel que la complexité de la commande et le cout des filtres actifs. L'utilisation des convertisseurs DC/DC fonctionnant à haute fréquence pour compenser les courants harmoniques permet de réduire le volume, le poids et la taille de la structure proposée avec une plus grande efficacité.

Ensuite nous avons présenté le système de compensation des harmoniques. Les résultats obtenus dans ce chapitre montrent les formes d'onde et l'analyse spectrale du courant de ligne. Un facteur de puissance quasi-unitaire témoigne de la bonne compensation de la puissance réactive. Le courant de ligne après la compensation est un courant équilibré sinusoïdal presque dépourvu des harmoniques (THD = 1.29%), et le facteur de puissance de (FP = 0.99).

Finalement, l'étude du système de compensation des harmoniques, que nous avons abordée dans ce chapitre, nous a permis d'atteindre de très bonnes performances de compensation des harmoniques qui réduit les harmoniques à des niveaux conformes aux normes et qui corrige de façon inhérente le facteur de puissance.

Conclusion générale

L'objet de ce mémoire porte sur l'étude de la structure de la nouvelle topologie d'un redresseur à faible taux de distorsion harmonique et à facteur de puissance élevé. A travers ce travail nous avons pu toucher dans les trois chapitres à plusieurs disciplines de l'électrotechnique à savoir le réseau électrique, l'électronique de puissance, la commande et les normes en vigueur.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté les différentes sources de pollution des réseaux électriques, leurs conséquences sur le réseau et l'ensemble du matériel électrique ainsi que les différentes méthodes de dépollution (les méthodes traditionnelles et d'autres modernes).

Nous avons consacré le deuxième chapitre à l'étude des redresseurs PD3 commandé et non commandé, ainsi que l'atténuation des harmoniques engendrés par ces convertisseurs avec les filtres passifs parallèles, et les filtres active parallèles, en tenant compte des résultats de simulation obtenus via PSIM nous voyons que le FAP apporte de meilleures performances (THD) que celle du FPP.

Au chapitre III, nous avons présentés la nouvelle topologie d'un redresseur à faible THD et à FP élevé. Ce nouveau concept envisage de placer un convertisseur DC/DC en parallèle avec chaque bras du redresseur triphasé, générant ainsi des courants harmoniques en opposition de phase avec ceux du réseau afin de rétablir un courant de la source quasi sinusoïdale. Les résultats de la simulation montrent que le redresseur conçu apporte une amélioration majeure au THD du courant de ligne (THD=1.29%) et au facteur de puissance (FP=0.99).

Finalement les résultats de la simulation obtenus, sont très encourageants bien que nous pensons qu'il reste de nombreux points à trouver et qu'on n'a pas pu aborder.

Bibliographique

Les ouvrages

- [1] **Marcel Daniel Epanya** « Application du filtrage actif pour une mise en œuvre de méthode de prédiction et de contrôle d'harmoniques dans un réseau de distribution électrique », septembre 2010.
- [2] **Boudache Abdelkrim et Galoul Fayçal** « Etude par simulation d'un filtre actif parallèle », mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en génie électrotechnique université de M'sila 2005/2006.
- [3] **Réseaux industriels** « Correction de la puissance réactive et des harmoniques » Technique d'ingénieur D 3215. Cahier technique Schneider Electric N 152.
- [4] **Thierry Gourand**, « Identification et rejet de perturbations harmoniques dans les réseaux de distribution électrique », Thèse de doctorat, Université de Nantes, Ecole centrale, 7 janvier 1997.
- [5] **Youssef touzani** « commande aléatoire du convertisseur buck-boost a prélèvement sinusoïdal du courant », thèse doctorat en électronique et système, université blaise pascal, juillet 2006.
- [6] **Haj Yousef Omar Hassan Jamil** « Etude d'un Redresseur à MLI à base d'un régulateur flou », mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en génie électrotechnique université de Tebessa 2015/2016.
- [7] **Cahier Techniques Schneider-Electric N° 6883 427 /A**, « Guide de conception des réseaux électriques sur les harmoniques ».
- [8] **ZELLOUMA. L** « Filtrage actif parallèles des harmoniques de courant génère par un pont redresseur triphasé non commande », thèse de magistère de l'université de Annaba, 2006.
- [9] **Thierry Deflandre et Philippe Maurs** « Les harmoniques sur les réseaux électriques », direction des études et recherche en France - édition enrôles -1998.
- [10] **A. Bouatit** « Conception d'un redresseur triphasé à faible taux de distorsion harmonique et à facteur de puissance élevé », thèse présenté à l'université du québec à trois-rivières, janvier 2012.

- [11] **Pierre Hubertin Andrianirina** « Etude et développement des méthodes de contrôle des harmoniques dans le réseau de distribution électrique », mémoire présenté à l'université du Québec à trois-rivières, avril 2007.
- [12] **P. Sagarzi et S. Théoleyre** « Optimisation des installations de compensation en présence d'harmonique », RGE, N°6, pp.12-17, Juin 1988.
- [13] **B. Szabados** « Répercussions sur le réseau électrique de l'alimentation des convertisseurs de grande puissance », RGE, N°12, pp.791-796, 1984.
- [14] **Steeve Beaulieu** « étude et mise au point d'un filtre actif d'harmoniques en vue d'améliorer la qualité de l'alimentation électrique », mémoire université du Québec à Chicoutimi, 2007.
- [15] **K. Aliouane** « Contribution à l'étude du filtrage d'harmoniques des réseaux de distribution à l'aide de l'association de filtres actif et passif parallèle », Thèse doctorat de l'I.N.P. Lorraine, Janvier 1995.
- [16] **L. Mrabet** « Étude par simulation d'un filtre actif parallèle de puissance pour la compensation des courants harmoniques générés par un pont redresseur triphasé ». Mémoire de magistère. L'université Badji Mokhtar Annaba, 2000.
- [17] **D. Ould Abeslam** « techniques neuromimétiques pour la commande dans les systèmes électriques : application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basses tension », Thèse de doctorat, université de Haute Alsace, décembre 2005.
- [18] **M. A. E. Alali** « Contribution à l'Etude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension », Thèse de doctorat, université de Louis Pasteur, Strasbourg, septembre 2002.
- [19] **Miao-Xin Wang** « Filtrage actif de puissance : Etudes et réalisation d'un filtre actif à commande numérique temps réel », Thèse de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, Décembre 1992.
- [20] **Melle Hind DJeghloud** « Filtrage actif parallèle », thèse de doctorat de l'université de mentouri constantine, 2007.
- [22] **G. Séguier** « Les convertisseurs de l'électronique de puissance », vol 1, Lavoisier, Paris, pp. 03, 1984.
- [23] **J.C. Rolin** « Les redresseurs fixes », Lycée G. Eiffel DIJON, 09/2015.

[24] **Hidri Imed** « D'électronique de puissance Les convertisseurs AC-DC et AC-AC » Technologue à l'ISET de Nabeul.

[25] **M. Abdelmalek BOULAHIA** « Etude des Convertisseurs Statiques destinés à la Qualité de l'Energie Electrique », Thèse de magister en électrotechnique. Université de Constantine, Avril 2009.

[26] S. Moultou, « Nouvelles approches de commande d'un filtre actif parallèle à source de courant », Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Trois-Rivières, Octobre 2002.

Les sites web

[21] [http ://pcsi-unautre REGARD.over-blog.com](http://pcsi-unautre REGARD.over-blog.com). Consulté le : 5/06/2019.