

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البلدية

Université SAAD
DAHLAB de
BLIDA



Mémoire de Projet de Fin d'Études.

Présenté par:

Le binôme

Mr SEMRANI IDRIS

ET

Mr ACHEROUF AMAR

Pour l'obtention du diplôme de Master "2" en Électrotechnique.

Spécialité: Machines Electriques.

Thème:

**Étude Et Simulation D'un Filtre Actif Parallèle À Deux Niveau
Pour La Compensation Des Harmoniques De Courant**

Promoteur : Guergah Manel

Année Universitaire : 2021/2022

Remerciement

*Cette thèse n'aurait jamais vu le jour sans l'aide de Dieu, le tout puissant,
pour
nous avoir donné la santé, le courage, la patience, la volonté et la force
nécessaire, pour affronter toutes les difficultés et les obstacles à travers notre
Chemin d'étude.*

*Mener à bien un projet de thèse est un exercice difficile, exigeant un fort
investissement, mais apportant nécessairement, en retour, un sentiment de
satisfaction dû à l'accomplissement réussi d'un travail.*

*Nous tenons à remercier tout particulièrement mon encadreur Madame
guergah qui nous a aidés et encouragés durant toute cette période de travail,
nous adressons notre gratitude pour la pertinence de ces conseils et ces remarques
ainsi que sa présence.*

*Ainsi, je tiens également à exprimer toute ma gratitude et ma reconnaissance à
tous les membres du jury qui acceptent de juger notre travail et pour l'intérêt
qu'ils l'ont porté.*

*Enfin, nous tenons à remercier tous ceux et celles de près ou de loin qui nous ont
aidé d'une façon ou d'une autre à élaborer notre travail.*

Dédicace

« Certes, il y'a des travaux pénibles ; mais la joie de la réussite n'a-t-elle pas à compenser nos douleurs ? »

Jean de la Bruyère.

Je dédie ce modeste travail à

*À la plus belle créature que Dieu a créée sur terre,
À cette source de tendresse, de patience et de générosité,
À ma mère.*

*À mon école, qui a été mon ombre durant toutes les années d'études, et qui a veillé tout au long de ma vie à m'encourager, à me donner l'aide et à me protéger.
À mon père. À ma grand-mère*

À mes chères sœurs : fatima, imane, pour leur encouragement et leur soutien moral tout long de ces années d'études

*À mon binôme : amar
Un grand merci avec qui j'ai partagé des moments difficiles.*

Une spéciale dédicace pour mes chers amis et camarade «anes», «massi»,«fatah»,«rida», je n'oublierai jamais les moments agréables qu'on a passé ensemble vous étiez à la hauteur de mes attentes.

À mes chers amis «zaki», « Houssem »,«Issam », «walid », sans oublier mon ancien binôme « wafi », Je ne trouve pas les mots justes et sincères pour vous exprimer mon affection et mes pensées, vous êtes pour moi des amis sur qui je peux compter. Je vous aime tous terriblement.

Mes derniers remerciements, et ce ne sont pas les moindres, vont à nos professeurs et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à L'aboutissement de ce travail.

SEMRANI IDRIS

Dédicace

أعوذ بالله من الشيطان الرجيم

و برحمته فبذلك فليفرحوا هو خير مما يجمعون ﴿١﴾ قل بفضل الله

سورة يونس : ٨٠ هـ

الحمد لله والشكر لله ثم أهدي هذا العمل المتواضع إلى كل من أضاء بعلمه عقل غيره أو هدى بالجواب الصحيح حيرة سائله

C'est avec mots simples mais débordant d'émotion que je dédie ce Travail :

A mes chers parents

Mon très cher père Acherouf Hidouche : aucune dédicace ne saurait exprimer, l'estime, et le respect que j'ai toujours eu pour toi, et rien au monde ne vaut tes efforts fournis pour notre éducation, instruction et bien être.

Ma très chère mère : qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi, merci pour ta compréhension durant toute la période de préparation de ce mémoire.

Je dédie aussi ce travail :

A mes sœurs

À mes chers oncles et tantes et leurs enfants et toute la famille Kheil et la famille Latrem

A mes oncles Mustapha, rachid, Redouane, Mohamed

Mes sincères remerciements vont à mon ami et binôme Semrani Idris qui a accepté de partager avec moi cette superbe expérience.

A nous camarades Terkiyacine, Lamrifares, Tighilit lamine, Boularasislem, Mouloud houdaifa, Djama Mohamed, TaaneIslem, Guebli Riad, Bouzid Mohamed, Djamel, ainsi que toute la promo hydraulique 2020.

A mes amis Dahmane, Amine, NessrEdinne, Yacine, Salim, Sidali, Mehdi, Anouar, Raoufe, Abdellah .

A toutes les personnes qui nous ont aidés, guidés, conseillés du domaine machine électrique.

Un très grand merci à nos professeurs de Département d'électronique

ACHEROUF AMAR

Résumé

Dans un réseau électrique, les harmoniques, la puissance réactive, les déséquilibres de courant et de tension ont des effets néfastes sur les équipements électriques. Le filtre actif parallèle représente une solution moderne et efficace pour la mitigation des perturbations du courant électrique. Il est connecté en parallèle avec les charges productrices des harmoniques.

L'objectif de notre travail est l'étude du filtre actif parallèle triphasé et les différentes méthodes utilisées dans sa commande.

La commande du filtre actif parallèle s'appuie sur deux axes distincts : l'un concerne l'identification des courants harmoniques et l'autre s'intéresse au contrôle des courants

injectés dans le réseau par le filtre actif, il existe plusieurs méthodes d'identification des courants harmoniques tels que la méthode des puissances instantanées, la méthode modifiée des puissances instantanées et la méthode basée sur un filtre multi-variables.

En ce qui concerne la structure du filtre actif parallèle de notre travail, basée sur un onduleur à deux niveaux commandé par la stratégie Hystérésis en courant et par M.L.I; (modulation de largeurs d'impulsions), un schéma synoptique des deux méthodes est présenté ainsi qu'un asservissement des deux méthodes étudiées pour montrer les performances de chaque commande et qui ont prouvé leur efficacité en matière de diminution du taux de distorsion harmonique.

Mots clés :

Filtre actif parallèle, puissances instantanées, courants harmoniques, taux de distorsion harmonique, filtre multi-variables.

ABSTRACT

In an electrical network, harmonics, reactive power, current and voltage imbalances have negative effects on electrical equipment. The parallel active filter represents a modern and efficient solution for mitigation of the disruptions of the electrical current. It is connected in parallel with the loads producing harmonics.

The aim of our work is the study of three-phase parallel active filter and the different methods used in the command.

The command of parallel active filter is based on two distinct areas :The first one relates to the identification of harmonic currents and the second one focuses on the control of currents injected into the network by the active filter. There are several methods to Identify harmonic currents such us: The instantaneous power method, the modified method of instantaneous power and the method based on a multivariate filter.

As regards, the active filter structure parallel to our work, based on two-level inverter controlled by the hysteresis current strategy and by P.W.M; (Pulse Width Modulation), a block diagram of the two methods is presented and a servo of the two methods discussed for showing the performance of each order and have proven effective in terms of reducing the harmonic distortion.

Keywords:

Parallel active filter, instantaneous power, harmonic currents, distortion harmonic, multi-variable filter.

Liste des acronymes

C_{ch} : Le condensateur de la charge.

C_F : Le condensateur du filtre actif.

C_{dc} : La capacité du condensateur.

D_I : La puissance déformante de la charge.

e_a : La tension du réseau de la phase "a".

e_b : La tension du réseau de la phase "b".

e_c : La tension du réseau de la phase "c".

E_{min} : L'énergie minimale emmagasinée dans le condensateur.

E_{max} : L'énergie maximale emmagasinée dans le condensateur.

f : La fréquence.

f_c : La fréquence de coupure du filtre d'extraction des harmoniques.

f_s : La Fréquence fondamentale du réseau électrique.

G_{BF} : La fonction de transfert.

h : Le rang harmonique.

I_h : Le courant harmonique de rang (A).

I_f : Le courant du réseau.

I_{ch} : Le courant de la charge.

I_{fp} : Le courant du filtre actif.

I_{AF} : La source du courant.

i_d : Le courant de charge coté continu.

i_{ia} : Le courant de la charge coté alternatif dans la phase "a".

i_{iaeff} : La valeur efficace du courant de la charge coté alternatif dans la phase "a".

i_{sabc} : Les courants du réseau électrique.

$i_{s\alpha\beta}$: Les courants du réseau électrique dans le repère stationnaire.
 i_{sdq} : Les courants du réseau électrique dans le repère synchrone.
 i_{fabc} : Les courants du filtre actif.
 $i_{f\alpha\beta}$: Les courants du filtre actif dans le repère stationnaire.
 i_{fdq} : Les courants du filtre actif dans le repère synchrone .
 i_{iabc} : Les courants de la charge.
 $i_{i\alpha\beta}$: Les courants de la charge dans le repère stationnaire.
 $i_{i\alpha\beta}$: Les courants de la charge dans le repère synchrone.
 i^*_{sabc} : Les courants de référence du réseau électrique.
 $i^*_{s\alpha\beta}$: Les courants de référence du réseau électrique dans le repère stationnaire.
 i^*_{sdq} : Les courants de référence du réseau électrique dans le repère synchrone.
 i^*_{fabc} : Les courants de référence du filtre actif.
 $i^*_{f\alpha\beta}$: Les courants de référence du filtre actif dans le repère stationnaire.
 i^*_{fdq} : Les courants de référence du filtre actif dans le repère synchrone.
 $I_{l.fon.eff}$: Le courant de la charge fondamentale.
 $I_{l.har}$: Les courants harmoniques produits par la charge.
 $\tilde{i}_{i\alpha\beta}$: Les courants perturbateurs.
 K : Le constant à fixer.
 k_{pdc}, k_{idc} : Les constants du régulateur PI de la tension continue.
 L_{ch} : L'inductance de la charge.
 L_f : L'inductance du filtre actif.
 L_s : L'inductance du réseau électrique.
 L_l : L'inductance de la charge.
 L_d : L'inductance de la charge cotée continue.
 P : Les pertes totales par effet Joule.
 $P(t)$: La puissance instantanée.

\bar{p} : La puissance continue liée à la composante fondamentale active.

\tilde{p} : Les puissances actives alternatives. P_1 : La puissance active de la charge.

P_{dc} : La puissance absorbée par le condensateur.

$q(t)$: La puissance imaginaire instantanée.

q : La puissance réactive.

\bar{q} : La puissance continue liée à la composante fondamentale réactive.

\tilde{q} : Les puissances réactives alternatives.

Q : La puissance réactive de la charge.

R : La résistance du conducteur.

R_f : La résistance du filtre actif.

R_s : La résistance du réseau électrique.

R_l : La résistance de la charge.

R_d : La résistance de la charge cotée continue.

S : La puissance apparente.

S_f : La puissance apparente du filtre.

S_l : La puissance apparente de la charge.

$S_{l.har}$: La puissance correspondante aux harmoniques produite par la charge.

S_{abc} : Les états des interrupteurs de l'onduleur.

t : Le temps.

ΔT : La période d'ondulation de la tension continue.

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

\bar{U}_d : La valeur moyenne de la tension redressée.

U_d : La tension redressée.

$v_{s\beta}$: Les tensions du réseau électrique au point de raccordement du filtre actif dans le repère stationnaire.

v_{sabc} : Les tensions du réseau électrique au point de raccordement du filtre actif .

v_{sdq} : Les tensions du réseau électrique au point de raccordement du filtre actif dans le repère synchrone.

v_{sabc} : Les coordonnées orthogonales (en retard de 90°) des tensions simples.

V_{AF} : La source de tension.

V_{dc} : La tension aux bornes du condensateur.

ΔV_{dc} : L'ondulation de la tension continue.

$V_{f \max}$: La valeur maximale de la tension à l'entrée de l'onduleur.

$V_{s \max}$: La valeur maximale de la tension simple au point de raccordement du filtre.

V_{dc} : La tension de référence du condensateur.

ω_c : La pulsation fondamentale du réseau.

Liste des abréviations

C.E.M: Compatibilité Electromagnétique.

C.E.I: Compatibilité Electromagnétique International.

CENELEC : Compatibilité Electromagnétique Européen.

C.E: Communauté Européenne.

D: Symbole d'une Diode.

F.A.S: Filtre Actif Sérié.

F.A.P: Filtre Actif Parallèle.

F.P.H: Filtre Passe Haut.

F.P.B: Filtre Passe Bas.

F.M.V: Filtre Multi-Variables.

G.T.O: En anglais ;(Gate Turn Off thyristor).

I.G.B.T: En anglais ; (Insolated Gate Bipolar Transistor).

M.L.I: Modulation de Largeurs d'Impulsions.

P.L.L: En anglais ; (Phase Locked Loop).

P.I: Régulateur Proportionnel Intégral.

T.H.D: En anglais ; (Total Harmonic Distorsion) et en français ;(Taux de Distorsion Harmonique).

T.C.D : Transformation de Concordia Directe.

U.T.E ou C.E.F: Compatibilité Electromagnétique Français.

U.E: Union Européenne.

U.P.Q.C: Unfied Power Quality Conditioner.

Y/Y: Câblage du transformateur en (étoile /étoile).

Y/ Δ : Câblage du transformateur en (étoile /triangle).

Liste des tableaux

Chapitre 1

Tableau I. 1 Limites des composantes harmoniques en courant	10
Tableau I. 2 Limites des émissions de courants harmoniques	11
Tableau I. 3 Niveaux de compatibilité des harmoniques de tension (CEI-1000-2-2)..	12

Chapitre 3

Tableau III. 1 Tensions possibles à la sortie de l'onduleur	47
---	----

Liste des figures

Chapitre 1

Figure I. 1 Creux de tension.....	5
Figure I. 2 Les Flickers	5
Figure I. 3 Variation de fréquence.....	6
Figure I. 4 Les harmoniques	6
Figure I. 5 Onde déformé et sa décomposition.....	7
Figure I. 6 Représentation spectrale des harmoniques.....	7

Chapitre 2

Figure II. 1 Inductances (Selfs)	19
Figure II. 2 Montage de Steinmetz pour le rééquilibrage	20
Figure II. 3 Filtre passif série.....	21
Figure II. 4 Filtre passif parallèle	21
Figure II. 5 Filtre passif amorti ou passe-haut.....	22
Figure II. 6 Filtre résonant	22
Figure II. 7 Filtre actif série	24
Figure II. 8 Filtre actif parallèle.....	25
Figure II. 9 La combinaison parallèle-série actifs	26
Figure II. 10 Le filtre actif série avec des filtres passifs parallèles	27
Figure II. 11 Le filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles	28
Figure II. 12 Le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle	29

Chapitre 3

Figure III. 1 Réseau électrique triphasé	32
Figure III. 2 Tensions du reseau triphasé.....	32

Figure III. 3 Redresseur à diodes (pont de Graëtz) avec charge "RL"	33
Figure III. 4 Filtre actif parallèle	34
Figure III. 5 Courant pollué, courant harmonique et courant filtré.....	34
Figure III. 6 Structure générale du filtre actif parallèle.	35
Figure III. 7 Schéma représentant le principe de séparation des puissances.	37
Figure III. 8: Diagramme d'extraction des courants de référence pour la méthode p-q	39
Figure III. 9 Détermination des courants de référence par la méthode des puissances instantanées.	40
Figure III. 10 Filtre passe haut.....	41
Figure III. 11 : Filtre passe bas.	41
Figure III. 12 Principe du F.M.V.....	42
Figure III. 13 Détermination des courants de référence à l'aide de (F.M.V).	43
Figure III. 14 Structure de l'onduleur de tension à deux niveaux	45
Figure III. 15 Schéma de liaison entre l'onduleur de tension et le réseau.....	46
Figure III. 16 Schéma de commande par hystérésis.....	48
Figure III. 17 Commande des interrupteurs par hystérésis à bande fixe.....	49
Figure III. 18 Allure de la tension de l'onduleur à deux niveaux par la commande hystérésis	50
Figure III. 19 Allure du courant de l'onduleur et le courant de référence par la commande hystérésis.....	50
Figure III. 20 Principe de commande du courant par M.L.I	51
Figure III. 21 : Allure du courant de l'onduleur et le courant de référence par la commande M.L.I.	51
Figure III. 22 Allure de la tension de l'onduleur à deux niveaux par la commande M.L.I.....	52

Chapitre 4

Figure IV. 1 Schéma de la simulation du circuit étudié avant filtrage	56
Figure IV. 2 Allure des tensions de la source avant filtrage	56
Figure IV. 3 Forme du courant de la source Avant filtrage	57

Figure IV. 4 Allure de la tension et du courant d'une phase avant filtrage	57
Figure IV. 5 Analyse spectrale du courant avant le filtrage	58
Figure IV. 6 Schéma de simulation étudié après filtrage	58
Figure IV. 7 Allure de la tension de référence et de la porteuse	59
Figure IV. 8 Forme du courant de la source après filtrage	60
Figure IV. 9 Allure du courant de la charge après filtrage	60
Figure IV. 10 Comparaison entre le courant de la source et le courant de la charge après filtrage	61
Figure IV. 11 Le courant harmonique référence	61
Figure IV. 12 le courant injecté par le filtre	62
Figure IV. 13 Le courant et la tension de la source après filtrage	62
Figure IV. 14 Analyse spectrale du courant après le filtrage	63
Figure IV. 15 Allure de la puissance active et réactive après filtrage	63
Figure IV. 16 Allure du facteur de puissance après filtrage	64

Sommaire

Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre 1 : Généralité sur les perturbations du réseau électrique	3
1 Introduction	4
1.1 Les principaux perturbations sur le réseau électrique.....	4
1.1.1 Creux de tension et coupures brèves.....	4
1.1.2 Les fluctuations rapides de tension (flickers)	5
1.1.3 Variation de la fréquence	5
1.1.4 Les harmoniques	6
1.1.4.1 Les caractéristiques des perturbations harmoniques :	6
1.1.4.2 Expression de la grandeur déformée	8
1.1.4.3 Développement en série de Fourier.....	8
1.1.4.4 Taux de distorsion harmonique (THD).....	8
1.1.4.5 Les normes internationales.....	9
1.2 Les causes et les origines des harmoniques.....	12
1.3 Principales Conséquences des harmoniques	14
1.3.1 Surcharge des conducteurs	14
1.3.2 Déclenchement de protections.....	15
1.3.3 Effet sur les moteurs à induction	15
1.3.4 Perturbations de passage par zéro	15
1.3.5 Déclassement des transformateurs	16
1.3.6 Conséquences sur le conducteur de neutre	16
1.4 Conclusion	16
Chapitre 2 : Moyens d'éliminer la pollution du réseau électrique	17
2 Introduction	18
2.1 Solutions traditionnels de dépollution.....	18
2.1.1 Agir sur la structure de l'installation	18
2.1.2 Surdimensionnement ou déclassement de l'installation électrique.....	18
2.1.3 Transformateur à couplage spécial.....	19
2.1.4 Inductances (selfs) série	19
2.1.5 Rééquilibrage des courants et des tensions	19
2.1.6 Utilisation de filtre passif.....	20

2.1.6.1	Classification des filtres passifs :	20
2.1.6.2	Filtre passif série	21
2.1.6.3	Filtre passif parallèle	21
2.1.6.4	Filtre passif amorti ou passe-haut	22
2.1.6.5	Filtre résonant	22
2.2	Solutions modernes	23
2.2.1	Filtres actifs	24
2.2.1.1	Filtres actif série	24
2.2.1.2	Filtre actif parallèle	25
2.2.1.3	La combinaison parallèle-série actifs (UPQC)	25
2.2.1.4	Combinaison hybride active et passive	26
2.2.1.5	Le filtre actif série avec des filtres passifs parallèles	27
2.2.1.6	Le filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles	27
2.2.1.7	Le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle	28
2.3	Conclusion	29
Chapitre 3 : Étude et modélisation du filtre actif parallèle à deux niveaux		30
3	Introduction	31
3.1	Modélisation du réseau électrique	32
3.2	Modélisation de la charge polluante	33
3.3	Identification des courants harmoniques:	35
3.3.1	Méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées	36
3.3.1.1	Calcul des courants harmoniques	39
3.3.1.2	Théorie de modification des puissances instantanées	43
3.4	L'onduleur de tension à deux niveaux	44
3.4.1	Commande de l'onduleur	48
3.4.1.1	Commande par hystérésis	48
3.4.1.2	Commande par hystérésis à bande fixe	49
3.4.1.3	Commande par M.L.I sinusoïdale	51
3.5	Conclusion	52
Chapitre 4 : Simulation et interprétation des résultats		54
4	Introduction	55
4.1	Modélisation et simulation du filtre actif parallèle choisis	55
4.1.1	Modèle de la source	55

4.1.2	Modèle de la charge polluante	55
4.1.3	Modèle du filtre actif parallèle	55
4.2	Résultats de simulation et analyse des résultats.....	56
4.2.1	Résultats de simulation sans compensation.....	56
4.2.2	Résultats de simulation avec compensation des courants harmoniques	58
4.2.3	Interprétation des résultats :	59
4.2.4	Interprétation des résultats.....	64
4.3	Conclusion	65
	Conclusion générale.....	66
	66
5	Bibliography	69

Introduction générale

Introduction générale

Introduction générale (1) (2)

Depuis de nombreuses années, le fournisseur d'énergie électrique s'efforce de garantir la qualité de l'énergie électrique, les premiers efforts se sont portés sur la continuité de service afin de rendre toujours disponible l'accès à l'énergie chez l'utilisateur. Aujourd'hui, les critères de qualité ont évolué avec le développement des équipements où l'électronique prend une place prépondérante dans les systèmes de commande et de contrôle et qui entraîne de plus en plus de problèmes de perturbations au niveau des réseaux électriques.

Ces dispositifs sensibles, mais qui dégradent également la qualité de la tension, existent dans toutes les catégories d'utilisateurs telle que le domaine industriel par l'emploi de convertisseurs de l'électronique de puissance, le domaine tertiaire avec le développement de l'informatique et le domaine domestique par l'utilisation en grand nombre des téléviseurs, magnétoscopes, lampes à économie d'énergie, ...

Le respect des normes de la qualité de l'énergie électrique impose, si une charge non linéaire est connectée au réseau électrique, de concevoir un système qui restreint la dissipation des composantes harmoniques. Deux types de solutions sont envisageables. La première consiste à utiliser des convertisseurs statiques peu ou moins polluants, tandis que la seconde consiste à réaliser un filtrage des composantes harmoniques. La solution classique de filtrage qui est connue depuis longtemps consiste en l'utilisation de filtres passifs. Cette solution est la plus répandue et pratiquement la plus simple et la moins chère, mais elle présente deux inconvénients majeurs. Le premier est lié au phénomène de résonance avec le réseau qui est à l'origine de l'amplification de tout harmonique à fréquence voisine de celle du réseau. Le deuxième inconvénient est la dépendance des performances du filtre passif aux caractéristiques du réseau sur lequel il est connecté.

Jusqu'à présent plusieurs solutions de dépollution des réseaux électriques ont été déjà proposées dans la littérature. Ils se distinguent, soit par leur mode de branchement sur le réseau (parallèle ou série), soit par leur mode de contrôle, ou bien par la structure de leur circuit de puissance. Celles qui répondent le mieux aux contraintes industrielles d'aujourd'hui sont les filtres actifs parallèles, série et combinaison parallèle-série actifs.

Introduction générale

Le filtre actif parallèle peut être utilisé pour compenser les courants harmoniques et déséquilibrés de même que la puissance réactive. Le filtre série actif peut compenser à la fois les tensions harmoniques et déséquilibrées, et les creux de tension. La combinaison parallèle- série actifs correspond à une solution universelle de compensation pour un, plusieurs ou tous les types de perturbation, de courant et de tension que l'on observe sur le réseau.

Le premier chapitre, sera consacré aux problèmes rencontrés dans les réseaux électriques, ainsi que les critères de quantification et les normes imposées sur ces perturbations.

Le deuxième chapitre, citera les deux systèmes de dépollutions à savoir la dépollution traditionnelle et moderne ainsi qu'une comparaison entre les filtres passifs et les filtre actifs.

Le troisième chapitre, sera dédié à l'étude d'un filtre actif parallèle à deux niveaux, on y a cité les différentes méthodes d'identification des courants harmoniques. Dans le quatrième chapitre, nous passerons à la simulation et l'analyse des résultats obtenues. Enfin nous terminons ce travail par une conclusion générale.

Chapitre 1 :
Généralité sur
les
perturbations
du réseau
électrique

Chapitre 1 : Généralité sur les perturbations du réseau électrique

1 Introduction

Le distributeur d'énergie doit fournir à l'ensemble de ses clients et utilisateurs une énergie de bonne qualité sous la forme de trois tensions sinusoïdales constituant un réseau triphasé équilibré. La qualité de cette énergie dépend de celle de la tension aux points de raccordement. Toutefois, cette tension subit généralement des altérations durant son transport jusqu'à son arrivée chez le client, industriel ou particulier.

Les origines de ces altérations sont nombreuses; outre les incidents relatifs à la nature physique et matérielle des organes d'exploitation du réseau, il existe aussi des causes intrinsèques spécifiques au fonctionnement de certains récepteurs particuliers.

Nous commencerons ce chapitre par un exposé des paramètres de la qualité de l'énergie électrique. Nous parlerons également de l'origine, l'analyse et l'effet des harmoniques sur les récepteurs électriques.

1.1 Les principales perturbations sur le réseau électrique

1.1.1 Creux de tension et coupures brèves

Un creux de tension (sag ou dip en anglais), est une baisse brutale de la tension en un point du réseau électrique à une valeur comprise (par convention) entre 90% et 10% par rapport à la tension de référence (U_{ref}), suivie d'un rétablissement de cette tension après un court laps de temps compris entre la demi-période fondamentale du réseau (8 ms à 16ms) et une minute. La tension de référence est généralement la tension nominale pour les réseaux BT et la tension déclarée ou avant perturbation pour les réseaux MT et HT. (1)

Les coupures brèves sont un cas particulier des creux de tension de profondeur supérieure à 90% (IEEE1159) et de durée allant jusqu'à 1 minute.

Chapitre 1 : Généralité sur les perturbations du réseau électrique

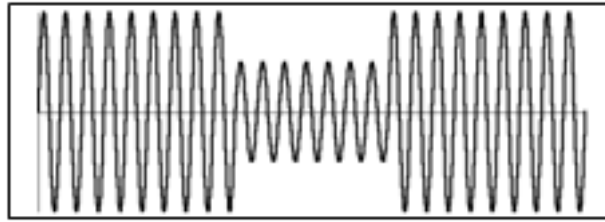


Figure I. 1 Creux de tension

1.1.2 Les fluctuations rapides de tension (flickers)

Les variations de tension sont des variations de la valeur efficace ou de la valeur crête d'amplitude inférieure à 10 % de la tension nominale et les fluctuations de tension sont une suite de variations de tension ou des variations cycliques ou aléatoires de l'enveloppe d'une tension dont les caractéristiques sont la fréquence de la variation et l'amplitude. (1) (2)

- Les variations lentes de tension sont causées par la variation lente des charges connectées au réseau ;
- Les fluctuations de tension sont principalement dues à des charges industrielles rapidement variables comme les machines à souder, les fours à arc, les laminoirs.

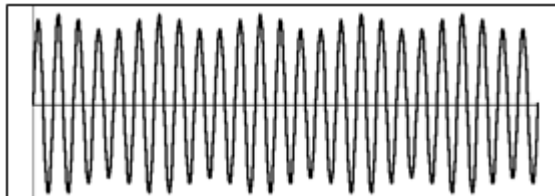


Figure I. 2 Les Flickers

1.1.3 Variation de la fréquence

Une variation sensible de la fréquence du réseau peut apparaître sur les réseaux des utilisateurs non interconnectés ou alimentés par une source thermique autonome (voir la figure I.3). Au niveau des réseaux de distribution ou de transport, cette variation de la fréquence est très rare et n'est présente que lors de circonstances exceptionnelles, comme dans le cas de certains défauts graves sur le réseau. Dans des conditions normales d'exploitation, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle $50\text{Hz} \pm 1\%$. (1)

Chapitre 1 : Généralité sur les perturbations du réseau électrique

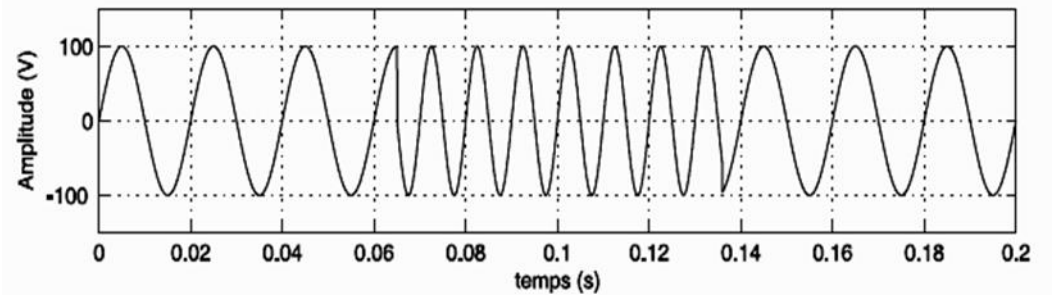


Figure I. 3 Variation de fréquence

1.1.4 Les harmoniques

Une perturbation harmonique est définie comme une déformation de la forme d'onde d'un signal sinusoïdal pur. Sur le réseau électrique, les perturbations de la forme d'onde sont principalement dues à la présence de charges non linéaires. (4)

On peut aussi la définir comme des tensions ou des courants sinusoïdaux dont la fréquence est un multiple entier de la fréquence fondamentale du réseau ; les harmoniques impaires existent mais les harmoniques paires en général n'existent pas.

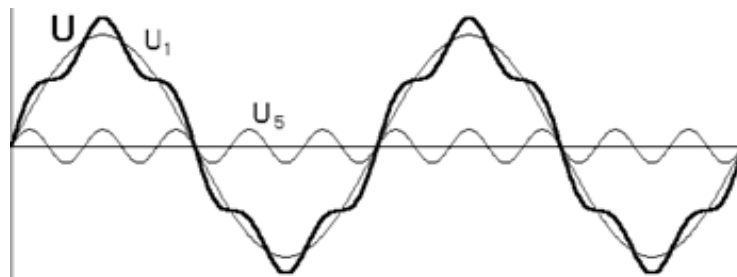


Figure I. 4 Les harmoniques

1.1.4.1 Les caractéristiques des perturbations harmoniques :

Les harmoniques présentes sur les réseaux électriques proviennent de l'utilisation de charges non linéaires. Quand elles sont connectées au réseau d'une certaine fréquence. (5)

Elles absorbent un courant pas sinusoïdal mais de même fréquence.

Chapitre 1 : Généralité sur les perturbations du réseau électrique

Ces charges se comportent comme des sources de courant harmonique, c'est-à-dire que le courant est fixe par la charge et non par tension du réseau. Ces courants provoquent, dans le réseau, des chutes de tension harmoniques selon la loi d'Ohm :

$$\vec{V}_h = \vec{Z}_h \cdot \vec{I}_h \quad (1.1)$$

\vec{V}_h : Tension harmonique de rang h ;

\vec{Z}_h : Impédances harmoniques de rang h ;

\vec{I}_h : Courant harmonique de rang h ;

- **Rang harmonique** : Est le rapport de sa fréquence f_n à celle du fondamental, généralement la fréquence industrielle (50Hz-60Hz) Le fondamental f_1 a le rang 1.

$$\frac{f_n}{f_1} = n \quad (1.2)$$

- **Spectre** : C'est un histogramme donnant l'amplitude de chaque harmonique en fonction de rang l'amplitude est donnée en valeur relative par rapport au fondamental en un point spécifié. La figure ci-dessous montre un exemple de spectre.

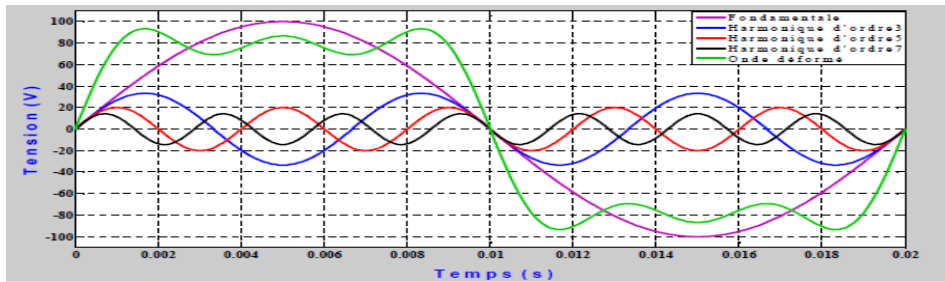


Figure I. 5 Onde déformée et sa décomposition

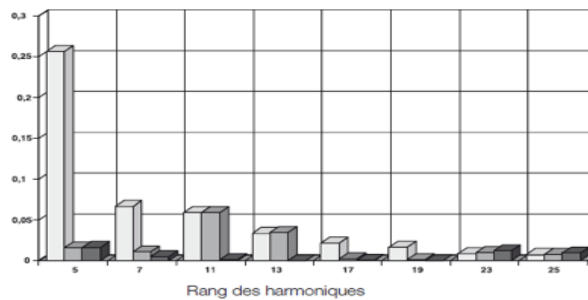


Figure I. 6 Représentation spectrale des harmoniques

Chapitre 1 : Généralité sur les perturbations du réseau électrique

1.1.4.2 Expression de la grandeur déformée

L'analyse des signaux non sinusoïdaux est basée sur deux concepts mathématiques qui sont les harmoniques, qui permettent la décomposition des signaux électriques perturbés (non sinusoïdaux) en composantes idéales et perturbations. Le concept d'harmonique a été introduit au début du XIX^{ème} siècle par Joseph Fourier, en démontrant que tout signal périodique non sinusoïdal peut être représenté par une somme ou série des sinusoïdes de fréquences discrètes. La composante zéro de la série dite de Fourier est la composante continue, tandis que la première composante est appelée composante fondamentale. Dans le cas des systèmes raccordés au réseau, celle-ci est une composante à la fréquence nominale du réseau (50Hz). Le reste des composantes de la série sont appelés harmoniques et sont multiples de la fréquence fondamentale.

1.1.4.3 Développement en série de Fourier

Toute fonction périodique peut être représentée par une série de Fourier de la forme :

$$Y(t) = Y_0 + \sum_{n=1}^{n=\infty} Y_n \sqrt{2} \sin(n\omega t - \varphi_n) \quad (1.3)$$

Où :

Y_0 = Amplitude de la composante continue, généralement nulle en distribution électrique en régime permanent.

Y_n = Valeur efficace de la composante de rang n .

φ_n = Déphasage de la composante harmonique au temps initial. (5)

1.1.4.4 Taux de distorsion harmonique (THD)

Le taux de distorsion harmonique est une mesure de la linéarité du traitement du signal effectuée en comparant le signal en sortie d'un appareil à un signal d'entrée parfaitement sinusoïdal. La non-linéarité du système déforme cette sinusoïde. Le signal de sortie reste un phénomène périodique. Un signal phénomène périodique peut s'analyser en une somme de sinusoïdes de fréquences multiples de celle donnant la

Chapitre 1 : Généralité sur les perturbations du réseau électrique

période, appelée fréquence fondamentale. Chacune de ces sinusoïdes est un harmonique de rang égal au quotient de sa fréquence par la fréquence fondamentale. Le taux de distorsion harmonique est le rapport des valeurs efficaces entre la fréquence fondamentale et les autres. (5)

Le THD d'un système varie avec le niveau et avec la fréquence du signal d'essai. Ces paramètres de la mesure doivent être spécifiés dans les procédures et les comptes rendus.

Pour un signal Y , le taux de distorsion harmonique THD est défini par la formule :

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} y_h^2}}{y_1} \quad (1.4)$$

Où :

y_1 : est la fréquence fondamentale.

1.1.4.5 Les normes internationales

Au niveau international (CEI), les normes CEI-1000 définissent les niveaux des courants et des tensions harmoniques à respecter. Le tableau. I.1 présente la norme CEI-1000- 3-2 qui fixe la limitation des courants injectés dans un réseau public basse tension pour des équipements dont le courant par phase est inférieur à 16A. (4)

Chapitre 1 : Généralité sur les perturbations du réseau électrique

Harmonique impaire		Harmonique paire	
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<=h+40	0.23*8/H
11	0.33		
13	0.21		
15<=h<=39	0.15*15/h		

Tableau I. 1 Limites des composantes harmoniques en courant

La norme (CEI-1000-3-4) spécifie les limites d'émissions de courants harmoniques
 Des équipements individuels d'intensité assignée supérieure à 16A et jusqu'à 75A
 Ces limites s'appliquent aux réseaux publics de tensions nominales comprises entre
 230 V (monophasé) et 600 V (triphase).

Chapitre 1 : Généralité sur les perturbations du réseau électrique

Rang	Courant harmonique en du fondamental
3	21.6
5	10.7
7	7.2
9	3.8
11	3.1
13	2.0
15	0.7
17	1.2
19	1.1
21	≤ 0.6
23	0.9
25	0.8
27	≤ 0.6
29	0.7
31	0.7
≥ 33	≤ 0.6
pair	≤ 0.6 ou $0.158/h$

Tableau I. 2 Limites des émissions de courants harmoniques

Les normes CEI-1000-2-2 et CEI-1000-2-4 précisent le niveau des harmoniques détensions a respecter au point de raccordement sur les réseaux de distribution basse tension, public et industriel respectivement.

Le tableau I.3 présente les niveaux de compatibilité pour les tensions harmoniques sur les réseaux publics basse tension.

Chapitre 1 : Généralité sur les perturbations du réseau électrique

Harmoniques impairs non multiples de 3		Harmoniques impairs multiples de 3		Harmoniques paires	
Rang	Tension harmonique en % du fondamental	Rang	Tension harmonique en % du fondamental	Rang	Tension harmonique en % du fondamental
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	305	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	$0.2+0.5*25/k$				

Tableau I. 3 Niveaux de compatibilité des harmoniques de tension (CEI-1000-2-2)

1.2 Les causes et les origines des harmoniques

La prolifération des équipements électriques utilisant des convertisseurs statiques a entraîné ces dernières années une augmentation sensible du niveau de pollution harmonique des réseaux électriques. Ces équipements électriques sont considérés comme des charges non linéaires 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 ainsi polluer les consommateurs alimentés par le même réseau électrique. (2) (1)

Émission en tension : L'émission harmonique en tension due aux matériels de réseaux entre pour une faible part, et avec des taux généralement faible, dans la distorsion des réseaux. Elle est due aux imperfections de construction (dissymétrie, distribution non sinusoïdale du champ dans les alternateurs, saturation des circuits magnétiques etc....) des bobinages des machines tournantes et des transformateurs.

Chapitre 1 : Généralité sur les perturbations du réseau électrique

Alternateurs : Les alternateurs des centrales de production fournissent une tension d'alimentation qui contient très peu d'harmoniques ($< 0.5\%$). Le contenu harmonique de la tension générée par les alternateurs est lié à la qualité du bobinage et des pièces polaires qui assurent la forme sinusoïdale de l'onde. Sur un groupe électrogène, le taux de distorsion harmonique en tension est généralement inférieur à 5% à vide et inférieur à 1% lorsque le groupe électrogène débite à pleine puissance sur une charge linéaire.

Transformateurs : Les transformateurs peuvent être générateurs de tensions harmoniques lorsqu'ils fonctionnent en régime saturé. Sur les réseaux, le taux de distorsion harmonique en tension dû à ces appareils reste toujours faible.

Alimentations statiques interruptibles (ASI) : Ces dispositifs ont des performances très intéressantes pour la protection du matériel contre les creux de tension et les coupures. En revanche, ils ont parfois des limitations dans le domaine harmonique qu'il convient de connaître pour bien les maîtriser. En effet, le réseau protégé alimente généralement des charges non linéaires comme du matériel informatique. Pour une ASI d'une puissance de 80KVA, le taux de distorsion harmonique en tension est inférieur à 4% pour une charge linéaire, est inférieur à 7% pour une charge non linéaire. En générale, le taux de distorsion harmonique en tension diminue avec l'augmentation de la puissance de l'ASI. Il faut bien noter qu'en charge, le taux de tension harmonique est dû essentiellement aux courants harmoniques créés par les charges non linéaires qui sont alimentées par l'ASI. 1.3.2

Émission en courant : Les charges non linéaires consomment un courant qui n'est pas sinusoïdale. Elles représentent les principales sources d'émission en courants harmoniques sur les réseaux. On peut distinguer sept différents types de « charges perturbatrices élémentaires » chez l'utilisateur, dont quatre sont des montages électroniques :

- Le redresseur monophasé à filtre capacitif,
- Le gradateur monophasé,
- Le redresseur triphasé à thyristors,

Chapitre 1 : Généralité sur les perturbations du réseau électrique

- Le redresseur triphasé à diodes et filtre capacitif,
- Les moteurs asynchrones,
- Les lampes,
- Les appareils à arc électrique.

Le redresseur triphasé à thyristors : Le redresseur triphasé à thyristors, en pont de graetz, constitue l'un des montages de l'électronique de puissance les plus répandus dans le secteur industriel. Ils représentent 55% de la puissance des matériels électroniques. Dans le domaine de la vitesse variable. Les redresseurs triphasés à thyristors sont la principale source de pollution harmonique dans le secteur industriel.

Les charges non linéaires passives : On distingue trois types de charges passives non linéaires. Ce sont, d'une part, les lampes et les petits moteurs dans les secteurs tertiaire, domestique et industriel et, d'autre part, les fours à arc dans le secteur industriel.

Les lampes : On distingue deux types de lampes qui produisent des courants harmoniques :

Les lampes fluorescentes et les lampes à vapeur haute pression. Elles représentent les deux tiers de la puissance consommée par l'éclairage. La génération d'harmoniques dans ces lampes est liée à la nature fortement non linéaire du phénomène entraînant l'illumination, ainsi qu'à la présence d'un ballast.

Les appareils à arc électrique : Les appareils à arc électrique regroupent les fours à arc à courant alternatif, dont la puissance peut atteindre plusieurs dizaines de MW, et les machines de soudure à l'arc, à courant alternatif ou continu.

1.3 Principales Conséquences des harmoniques

1.3.1 Surcharge des conducteurs

L'augmentation du courant effectif peut impliquer que le courant qui va circuler dans les conducteurs soit supérieur au courant admissible, rendant nécessaire d'augmenter la section de ceux-ci si l'effet provoqué par les courants harmoniques n'a pas été pris

Chapitre 1 : Généralité sur les perturbations du réseau électrique

en compte. Ce problème peut être particulièrement critique pour les conducteurs neutres, car les harmoniques triples (impairs multiples de 3 : 3, 9, 15), causés principalement par des charges monophasées, provoquent le retour de la somme des courants harmoniques par le neutre. Il est essentiel de contrôler le niveau des surintensités dans le neutre, car une surchauffe peut entraîner une dégradation importante, voire une coupure de ce dernier s'il n'est pas correctement contrôlé. La coupure du neutre entraînerait une surtension permanente dans le réseau, détruisant les équipements non protégés contre cette situation. (6)

1.3.2 Déclenchement de protections

Le courant effectif circulant dans les conducteurs peut être considérablement modifié avec l'augmentation du courant due aux harmoniques de l'installation, pouvant dépasser les limites thermiques des disjoncteurs et provoquer leur déclenchement. Bien que cela soit plus improbable, la présence d'harmoniques peut provoquer le déclenchement des disjoncteurs par protection magnétique dans le cas où le facteur de crête de l'onde de courant dépasse la limite de ces valeurs. (7)

1.3.3 Effet sur les moteurs à induction

Les moteurs à induction verront leurs pertes augmenter à la suite de l'augmentation des courants parasites. De plus, et en fonction des séquences de rotation induites par les champs magnétiques générés par les harmoniques en tension, le moteur peut subir simultanément des accélérations (séquence positive), un freinage (séquence négative) ou les deux à la fois, provoquant des vibrations et des excentricités qui entraînent la désagrégation mécanique de ses composants. L'étude des déclassements de moteurs en fonction du taux de distorsion de tension est incluse dans les normes EN 60034-12 et NEMA MG1. En bref, les facteurs observés entraînent une perte de couple dans le moteur et une diminution de ses performances. (7)

1.3.4 Perturbations de passage par zéro

De nombreux appareils électroniques ont des contrôleurs qui activent le fonctionnement de la charge avec le passage par zéro de la tension. Ceci est utilisé pour minimiser les pics de courant de commutation de nombreuses charges inductives et minimiser leur impact au niveau de la compatibilité électromagnétique. En cas de

Chapitre 1 : Généralité sur les perturbations du réseau électrique

distorsion de la tension, le fonctionnement de ce type d'appareil peut être totalement erroné et entraîner sa panne, une boucle, une réinitialisation, etc.

1.3.5 Déclassement des transformateurs

La présence d'harmoniques dans le réseau augmente la valeur des pertes dues à l'hystérésis et des pertes dues aux courants de Foucault dans les transformateurs, augmentant leur température de fonctionnement et réduisant par conséquent leur durée de vie. Ainsi, les transformateurs affectés par les courants harmoniques subiront un déclassement de la puissance (perte de capacité) à laquelle ils peuvent fonctionner sans générer un échauffement supérieur à la normale. (7)

1.3.6 Conséquences sur le conducteur de neutre

Dans un système équilibré, les composantes homopolaires dans le neutre sont nulles. Ceci n'est pas le cas des systèmes comportant une charge non linéaire. En effet, les courants homopolaires des harmoniques de rang multiple de 3 vont s'additionner dans le conducteur neutre. L'intensité de ces courants superposés peut endommager sérieusement le câble du neutre. (8)

1.4 Conclusion

La présence des harmoniques sur les réseaux de distribution est de plus en plus importante, en causant une série de problèmes de détérioration de la qualité de l'onde de tension, ce qui rend nécessaire un surdimensionnement des installations et occasionne des pertes additionnelles significatives.

Dans ce chapitre, nous avons présenté des perturbations qui existent au niveau des réseaux électrique. Comme nous l'avons mentionné, les harmoniques sont des perturbations qui engendrent des effets néfastes sur les équipements électriques. Des critères de quantification sont mis à la disposition des ingénieurs pour limiter ces perturbations. Et pour cela des normes sont fixés pour limiter ces perturbations et pour cette cause nous allons aborder les systèmes de dépollution des réseaux électriques dans le prochain chapitre. (7)

Chapitre 2 :
Moyens
d'éliminer la
pollution du
réseau
électrique

Chapitre 2 : Moyens de maigrir de la pollution du réseau électrique

2 Introduction

Le respect des normes de la qualité de l'énergie électrique impose, si une charge non linéaire est connectée au réseau électrique, de concevoir un système qui restreint la dissipation des composantes harmoniques. Deux types de solutions sont envisageables. La première consiste à utiliser des convertisseurs statiques peu ou moins polluants, tandis que la seconde consiste à réaliser un filtrage des composantes harmoniques. (2)

La première classe de solutions s'intéresse à la conception des circuits tandis que la seconde, que nous présentons par la suite consiste à filtrer les courants harmoniques. Les principales techniques se rattachant à cette dernière approche sont proposées dans ce chapitre.

2.1 Solutions traditionnels de dépollution

Ce sont des techniques que tout électricien devrait connaître. Elles offrent une solution simple et rapide à certains cas de défauts bien localisés, en utilisant des composants passifs (inductances, condensateurs, transformateurs) et/ou des connexions qui modifient le schéma de l'installation. (3)

2.1.1 Agir sur la structure de l'installation

Il est souhaitable d'alimenter un grand pollueur par un transformateur à part, afin de le séparer d'un récepteur sensible. Face à un pollueur moyen il est préférable d'effectuer l'alimentation par des câbles distincts au lieu de les connecter en parallèle. Une distribution en étoile permet le découplage par les impédances naturelles et/ou additionnelles. (1)

2.1.2 Surdimensionnement ou déclassement de l'installation électrique

On procède généralement au surdimensionnement des équipements afin d'assurer leur tenue aux surcharges harmoniques. Cette solution n'agit pas sur les harmoniques qui ne subissent aucune action curative de la part de l'utilisateur. Par cette approche, les problèmes liés à la pollution harmoniques sont résolus pendant une durée limitée. Le déclassement des équipements de distribution électrique soumis aux harmoniques est

Chapitre 2 : Moyens de maigrir de la pollution du réseau électrique

utilisé dans le cas des installations existantes. Cette méthode cause un surcoût de production et ne tire pas profit du potentiel réel de l'installation. (2)

2.1.3 Transformateur à couplage spécial

Le choix de couplages appropriés des transformateurs permet de limiter la circulation des courants harmoniques. L'utilisation d'un transformateur d'isolement, de rapport 1/1 à couplage triangle-étoile ou triangle-zigzag, empêche la propagation des courants harmoniques de rang 3 et leurs multiples circulant dans le neutre. Ce procédé n'a aucun effet sur les autres rangs harmoniques. Cette solution limite, au contraire, la puissance disponible de la source, et augmente l'impédance de ligne. Il en résulte une augmentation de la distorsion en tension due aux autres rangs harmoniques. (2)

2.1.4 Inductances (selfs) série

Cette solution, utilisée pour les entraînements à vitesse réglable (variateurs de vitesse), et les redresseurs triphasés, consiste à introduire une inductance série en amont d'une charge non-linéaire. Peu onéreuse, la self a cependant efficacité limitée. La distorsion en courant est divisée approximativement par deux. (6)

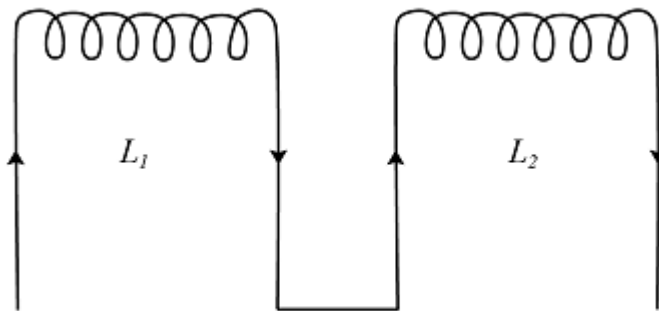


Figure II. 1 Inductances (Selfs)

2.1.5 Rééquilibrage des courants et des tensions

Puisque les courants déséquilibrés dans un réseau électrique basse tension résultent généralement des charges monophasées et biphasées mal réparties, la première solution est la répartition égale des charges sur les trois phases. (9)

Chapitre 2 : Moyens de maigrir de la pollution du réseau électrique

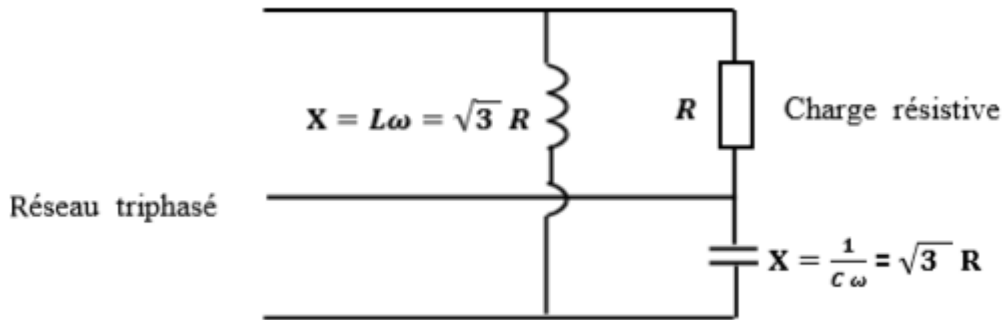


Figure II. 2 Montage de Steinmetz pour le rééquilibrage

2.1.6 Utilisation de filtre passif

Le filtrage consiste à placer en parallèle sur le réseau d'alimentation une impédance de valeur très faible autour de la fréquence à filtrer et suffisamment importante à la fréquence fondamentale du réseau. Parmi les dispositifs de filtrage les plus répandus, on distingue le filtre passif parallèle, filtre passif série et le passif amorti ou passe-haut. Le filtre passif a pour objet, dans le cas des harmoniques, de diminuer l'impédance du réseau à une fréquence donnée. Les courants harmoniques à cette fréquence sont alors dérivés dans le filtre et créent peu de distorsion sur le réseau. Le rang d'accord h_a correspond au multiple, entier ou non, de la fréquence nominale du réseau pour lequel l'impédance du filtre LC est minimale. (10)

2.1.6.1 Classification des filtres passifs :

Les solutions conventionnelles aux problèmes de distorsion harmonique existent depuis longtemps. Le filtrage passif est la plus simple solution conventionnelle pour atténuer la distorsion harmonique. Les filtres passifs sont des éléments à base d'inductance, capacité et résistance configurés et réglés pour contrôler les harmoniques. On peut classer les filtres passifs suivant leur fréquence de résonance, leur mode de connexion et leur emplacement sur le réseau. Sa conception nécessite une étude approfondie du réseau électrique et un travail de conception de bureau d'étude. Le dimensionnement dépend du spectre harmonique de la charge et de l'impédance de la source d'énergie. Cette solution est la plus simple et la moins chère mais sans doute, elle n'est pas la plus efficace. (10)

Chapitre 2 : Moyens de maigrir de la pollution du réseau électrique

2.1.6.2 Filtre passif série

Une façon d'atténuer les harmoniques générées par les charges non linéaires est d'introduire un filtre passif série (II.3), dans l'alimentation d'entrée ligne de sorte que le filtre offre une impédance élevée à la circulation des harmoniques à partir de la source à la charge non-linéaire (10)

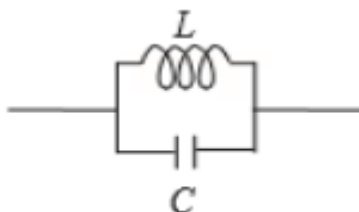


Figure II. 3 Filtre passif série

2.1.6.3 Filtre passif parallèle

Le filtre passif parallèle est montré sur la Figure (II.4) Il est constitué d'une inductance en parallèle avec un condensateur. Il présente une impédance faible pour tous les harmoniques et une impédance suffisamment importante par rapport au fondamental, ce qui empêche les courants harmoniques de se propager vers le réseau . (10)

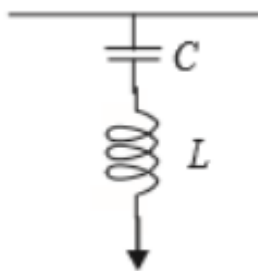


Figure II. 4 Filtre passif parallèle

Chapitre 2 : Moyens de maigrir de la pollution du réseau électrique

2.1.6.4 Filtre passif amorti ou passe-haut

Le filtre passif amorti ou passe-haut compense les harmoniques supérieurs ou égales à sa fréquence propre. Il peut se connecter en parallèle avec d'autres résonants. Ces dispositifs sont utilisés pour empêcher les courants harmoniques de se propager dans les réseaux électriques, et pour compenser la puissance réactive. (1)

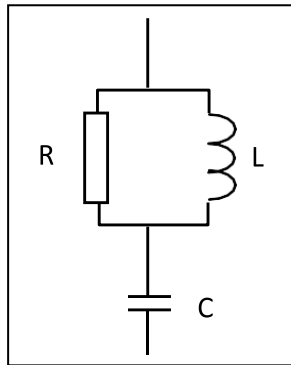


Figure II. 5 Filtre passif amorti ou passe-haut

2.1.6.5 Filtre résonant

C'est un filtre très sélectif constitué d'un ensemble RLC en série voir la figure (II.6) et il est accordé sur une fréquence déterminée. Sa performance est caractérisée par la réduction de la tension harmonique entre ses bornes. Cette solution consiste aussi à offrir au courant harmonique que l'on désire éliminer, un chemin moins résistant que la ligne. Elle exploite la résonance série des circuits formés par l'association d'éléments inductifs et capacitifs, ces circuits, pour chaque paire (L, C) une fréquence dite de résonance où l'impédance de circuit est très basse. (1)

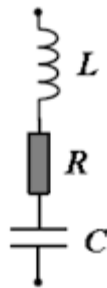


Figure II. 6 Filtre résonant

Chapitre 2 : Moyens de maigrir de la pollution du réseau électrique

De même, leurs inconvénients se résument en :

Le filtrage passif se limite à l'atténuation d'harmoniques d'un rang bien déterminé; ce qui limite son effet, donc cette solution s'avère parfois inactive, à cause de la dérivation de la fréquence de résonance qui est due soit au changement de la structure du réseau ou bien au vieillissement des composants du filtre passif, pis encore cela peut engendrer l'effet inverse à savoir l'amplification des harmoniques, cela peut se traduire par une surintensité ou une surtension; son in adaptabilité nous contraint à concevoir un filtre spécifique pour chaque catégorie de charge selon les harmoniques qu'elles produisent.

2.2 Solutions modernes

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 des solutions traditionnelles de dépollution qui ne répondent plus à l'évolution des charges et des réseaux électriques. La seconde raison fait suite à l'apparition de nouveaux composants semi-conducteurs, comme les thyristors GTO et les transistors IGBT. 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.

Nous citerons quatre topologies 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 tension comme les harmoniques, les déséquilibres et les creux de tension,
- La combinaison parallèle-série actifs : solution universelle pour compenser toutes les perturbations en courant et en tension.
- Combinaison hybride active et passive : Ces structures sont conçues dans le but d'optimiser le rapport performance/coût. (1) (2)

Chapitre 2 : Moyens de maigrir de la pollution du réseau électrique

2.2.1 Filtres actifs

Le but de ces filtres actifs est de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à ce que le courant ou la tension redevienne sinusoïdal. Le filtre actif est connecté au réseau soit en série (FAS), soit en parallèle (FAP) suivant qu'il est conçu respectivement pour compenser les tensions ou les courants harmoniques, soit associé à des filtres passifs. Pour fournir aux consommateurs une énergie électrique de qualité, même dans les conditions de fonctionnement les plus perturbées, les filtres actifs sont proposés comme des solutions de dépollution des réseaux électriques. différentes topologies de filtres actifs usuels sont présentées. (8)

2.2.1.1 Filtres actif série

Le filtre actif série se comporte dans ce cas, comme une source de tension qui s'oppose aux tensions perturbatrices (creux, déséquilibre, harmonique) venant de la source et également à celles provoquées par la circulation des courants perturbateurs à travers l'impédance du réseau. Ainsi la tension aux bornes de la charge à protéger est purement sinusoïdale. (8) (2)

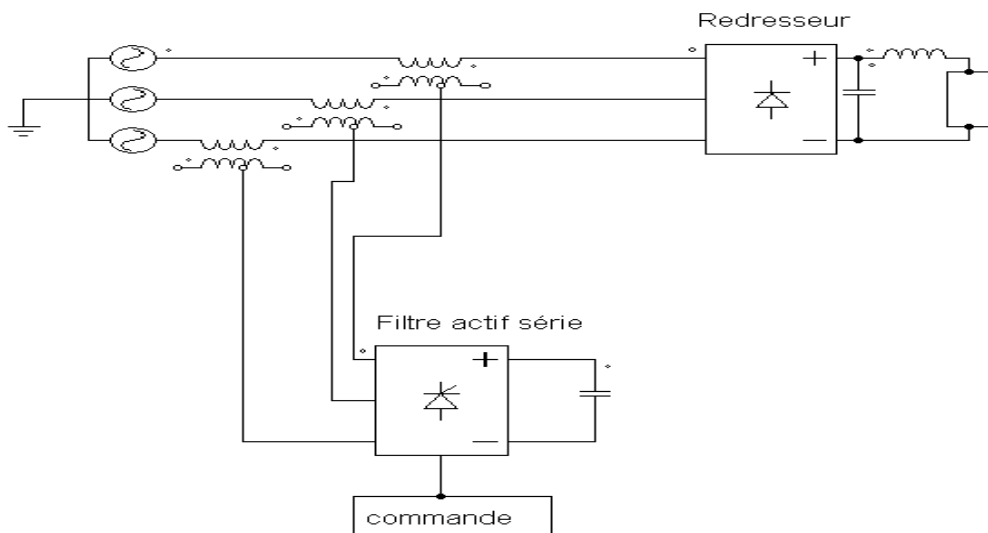


Figure II. 7 Filtre actif série

Chapitre 2 : Moyens de maigrir de la pollution du réseau électrique

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

2.2.1.2 Filtre actif parallèle

Appelé aussi compensateur shunt, il est connecté en parallèle sur le réseau de distribution. Il est le plus souvent commandé comme un générateur de courant. Il restitue dans le réseau électrique les 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. Son indépendance vis-à-vis de la source et de la charge lui assure auto-adaptabilité, fiabilité et performance. (1)

Le filtre actif parallèle empêche les courants harmoniques, réactifs et déséquilibres de circuler à travers l'impédance du réseau. Il améliore ainsi les taux de distorsion en courant et en tension.

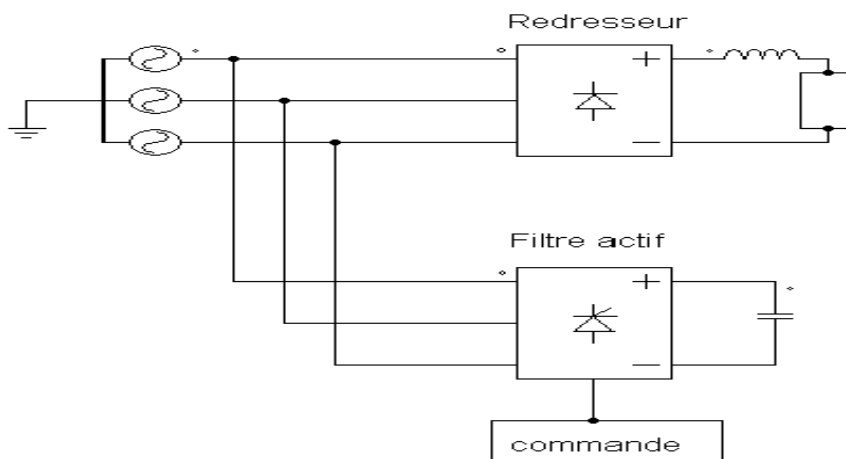


Figure II. 8 Filtre actif parallèle

2.2.1.3 La combinaison parallèle-série actifs (UPQC)

La combinaison parallèle-série actifs aussi appelée Unified Power Quality Conditioner (*UPQC*), résulte de l'association des deux filtres actifs parallèle et série.

Chapitre 2 : Moyens de maigrir de la pollution du réseau électrique

Profitant des avantages des deux filtres actifs, l'UPQC assure un courant et une tension sinusoïdaux du réseau électrique à partir d'un courant et d'une tension perturbés de celui-ci.

Le filtre actif série, lorsqu'il est placé en amont du filtre actif parallèle, permet de dépolluer la source des tensions perturbatrices. Lorsqu'il est placé en aval, il permet d'isoler la charge de la source perturbée. (8)

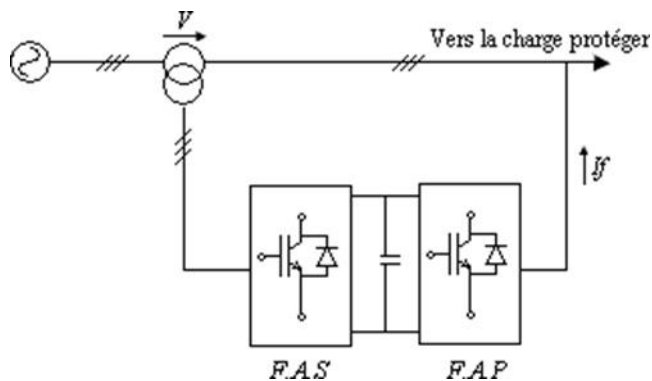


Figure II. 9 La combinaison parallèle-série actifs

2.2.1.4 Combinaison hybride active et passive

Afin de réduire le dimensionnement et par conséquent le prix des filtres actifs, l'association de filtres actifs de faible puissance à des filtres passifs peut être une solution. Dans ce cas, les filtres passifs ont pour rôle d'éliminer les harmoniques prépondérants permettant de réduire le dimensionnement des filtres actifs qui ne compensent que le reste des perturbations. Plusieurs configurations ont été présentées dans la littérature, les plus étudiées étant :

- le filtre actif série avec des filtres passifs parallèles
- le filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles
- le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle (8)

Chapitre 2 : Moyens de maigrir de la pollution du réseau électrique

2.2.1.5 Le filtre actif série avec des filtres passifs parallèles

Cette configuration permet d'une part de minimiser la puissance du filtre actif car une grande partie des courants harmoniques est absorbée par les filtres passifs et d'autre part d'améliorer les performances des filtres passifs. Il réduit ainsi les risques d'antirésonance entre les éléments du filtre passif et l'impédance du réseau. (6) (1)

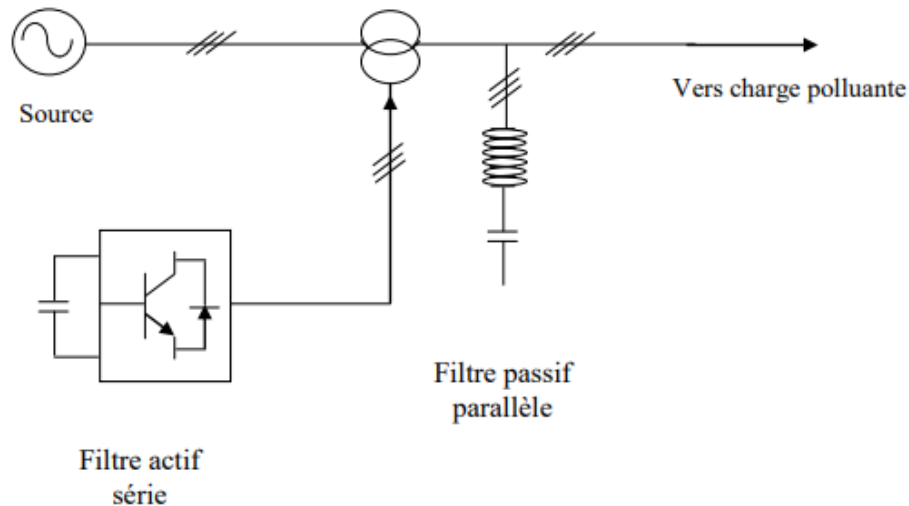


Figure II. 10 Le filtre actif série avec des filtres passifs parallèles

2.2.1.6 Le filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles

Dans cette configuration, le compensateur n'agit que sur les courants harmoniques, et améliore l'efficacité des filtres passifs: il évite l'amplification des tensions harmoniques amont aux fréquences d'anti résonance des filtres passifs, il atténue fortement les courants harmoniques entre charge et source par «abaissement» de l'impédance globale (filtres passifs plus compensateur actif). Puisque le compensateur actif n'est pas traversé par la totalité du courant réseau, son dimensionnement (et en particulier celui du coupleur magnétique) peut être réduit.

Cette structure est donc bien adaptée à traiter les réseaux de puissance et tension élevées, tout en assurant le réphasage des composantes fondamentales. Son principal inconvénient est que les filtres passifs sont définis en fonction de la nature de chaque charge: une étude préalable est impérative. Enfin, la quasi-totalité des tensions harmoniques préexistantes (sur la source) sont présentes côté charge. Dans ce sens, cette configuration peut être assimilée au compensateur actif de type «shunt». (4) (7)

Chapitre 2 : Moyens de maigrir de la pollution du réseau électrique

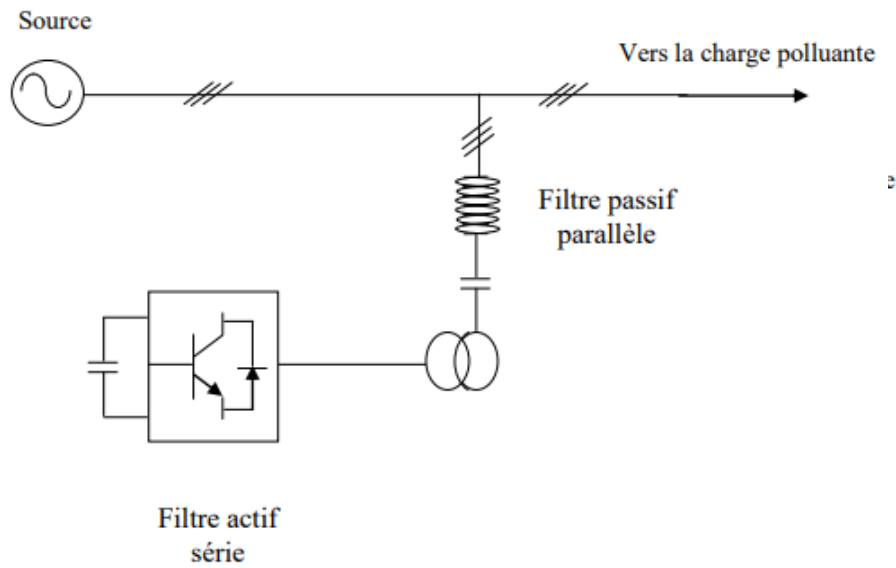


Figure II. 11 Le filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles

2.2.1.7 Le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle

Le rôle du filtre actif parallèle dans cette configuration, est la compensation des courants harmoniques basses fréquences émis par la charge polluante. Le filtre passif accordé sur une fréquence élevée, élimine les harmoniques hautes fréquences y compris ceux créés par le (F A P). Ce type de filtrage a déjà été appliqué à la compensation des courants harmoniques émis par un cyclo-convertisseur de forte puissance. (8) (9)

Chapitre 2 : Moyens de maigrir de la pollution du réseau électrique

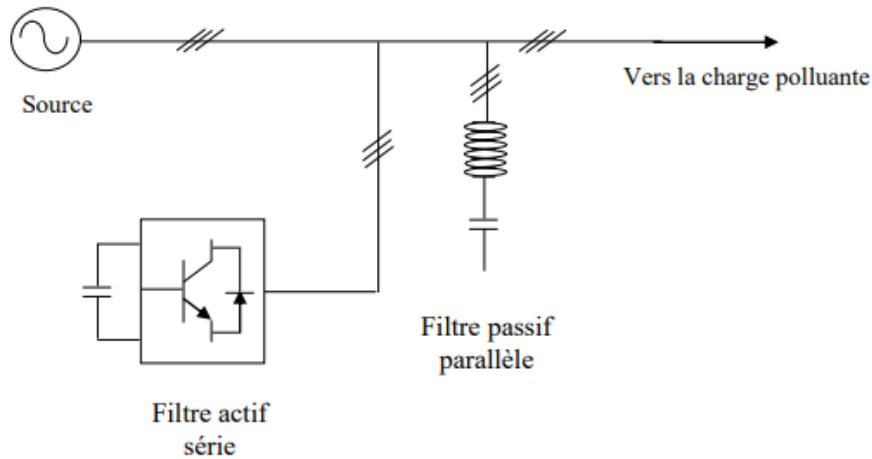


Figure II. 12 Le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle

2.3 Conclusion

Pour diminuer les effets de ces perturbations harmoniques, différentes solutions traditionnelles et modernes de dépollution ont été présentées dans ce chapitre. Les solutions classiques ne sont pas très efficaces pour traiter ce problème ; les technologies mises en œuvre, telles que les filtres passifs, sont souvent pénalisantes en termes d'encombrement et de résonance. De plus, les filtres passifs ne peuvent pas s'adapter à l'évolution du réseau et des charges polluantes.

En ce qui concerne les solutions modernes, nous avons présenté les deux topologies utilisées, le filtre actif et le filtre hybride. Ces topologies ont pour but de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à ce que le courant et la tension du réseau redeviennent sinusoïdaux. En effet, grâce aux progrès réalisés dans le domaine de l'électronique de puissance, ces solutions peu encombrantes n'occasionnent aucune résonance avec les éléments passifs du réseau et font preuve d'une grande flexibilité face à l'évolution du réseau électrique et de la charge polluante. (9) (8)

Chapitre 3 :
Étude et
modélisation
du filtre actif
parallèle à
deux niveaux

Chapitre 3: Etude et modélisation du filtre actif parallèle à deux niveaux

3 Introduction

Le filtrage actif parallèle de puissance (FAP) est une solution moderne et adéquate permettant de remédier aux perturbations en courant. Ce compensateur peut être utilisé pour compenser les courants harmoniques et les courants déséquilibrés.

Dans ce chapitre nous allons étudier le filtre actif parallèle et sa structure, modéliser notre réseau électrique et la charge polluante. Ainsi que la méthode d'identification des harmoniques intitulée la méthode des puissances instantanées.

Le filtre actif est un onduleur de tension à MLI et à hystérésis qui traite l'élimination des harmoniques. Il doit donc, absorber des courants éliminant les harmoniques créés par la charge polluante pont redresseur dans notre cas. Cette structure a pour vocation d'éliminer de façon active toute ou une partie des harmoniques de courant. L'utilisation des onduleurs pour filtrage actif, suppose l'emploi de fréquences de découpages très supérieures aux fréquences harmoniques que l'on veut éliminer.

Chapitre 3: Etude et modélisation du filtre actif parallèle à deux niveaux

3.1 Modélisation du réseau électrique

Le réseau est assimilable à une source de tension sinusoïdale en série avec une impédance, dite de court-circuit. D'où la représentation du réseau par un système des forces électromotrices triphasé équilibré en série avec une impédance.

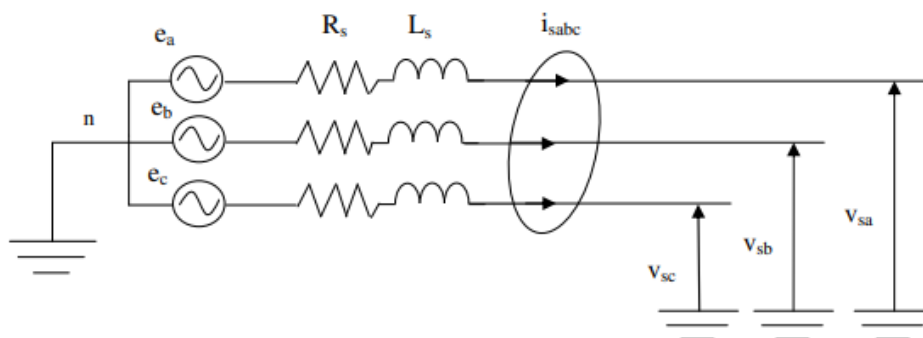


Figure III. 1 Réseau électrique triphasé

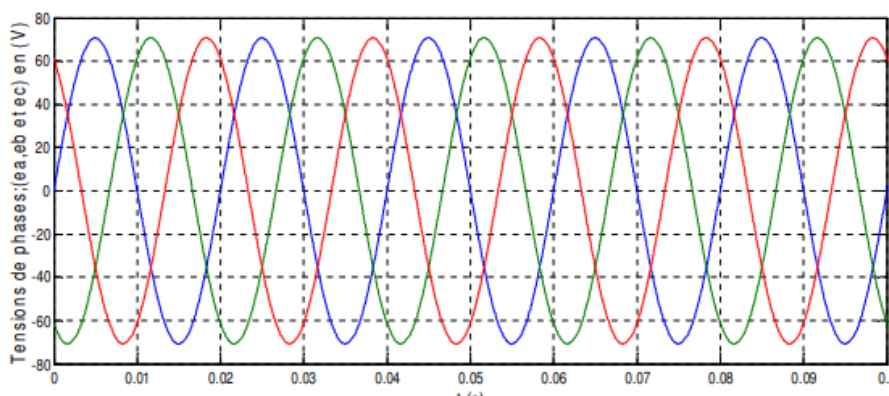


Figure III. 2 Tensions du réseau triphasé

Les tensions du réseau électrique sont données par :

$$e_a = \sqrt{2} v \sin(\omega t) ; \quad (3.1)$$

$$e_b = \sqrt{2} v \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) ; \quad (3.2)$$

$$e_c = \sqrt{2} v \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) ; \quad (3.3)$$

Chapitre 3: Etude et modélisation du filtre actif parallèle à deux niveaux

Où :

$\omega = 2\pi f_s$: Pulsation du réseau.

3.2 Modélisation de la charge polluante

La charge polluante est un redresseur de tension triphasé à diodes (pont de Graëtz), connectée au réseau par l'intermédiaire d'une impédance de ligne (L_l, R_l), et alimentant une charge inductive (L_d, R_d) côté continu.

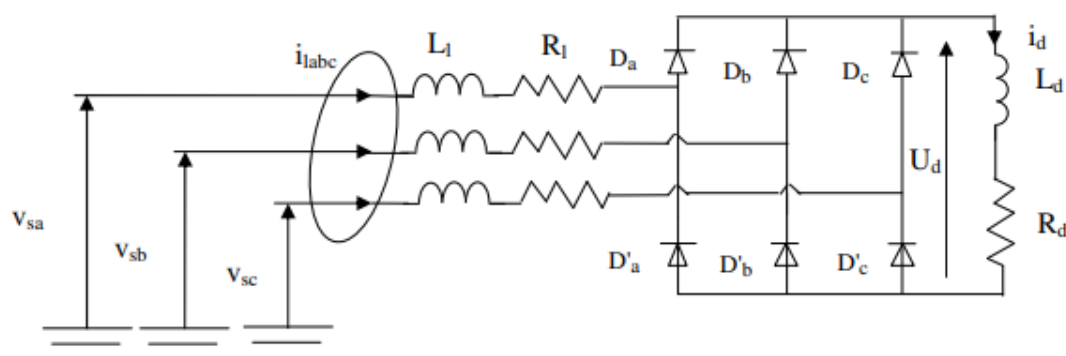


Figure III. 3 Redresseur à diodes (pont de Graëtz) avec charge "RL".

Le filtre actif connecté en parallèle sur le réseau, comme le montre la figure (III.4) est le plus souvent commandé comme un générateur de courant. Il injecte dans le réseau des courants perturbateurs égaux à ceux absorbés par la charge polluante, mais en opposition de phase avec ceux-ci, à fin de rendre le courant du réseau électrique à la forme sinusoïdale figure (III.5). Il empêche les courants perturbateurs (harmoniques, réactifs et déséquilibrés), produits par des charges polluantes, de circuler à travers l'impédance du réseau, située en amont du point de connexion du filtre actif. La figure (III.6) représente la structure générale du filtre actif parallèle, la quelle se présente sous forme de deux blocs : la partie puissance et la partie contrôle-commande.

La partie puissance est constituée :

Chapitre 3: Etude et modélisation du filtre actif parallèle à deux niveaux

- 1- d'un onduleur de tension à base d'interrupteurs de puissance, commandé à l'amorçage et au blocage (GTO, IGBT,...etc.) avec des diodes en antiparallèles,
- 2- d'un circuit de stockage d'énergie, souvent capacitif,
- 3- d'un filtre de sortie.

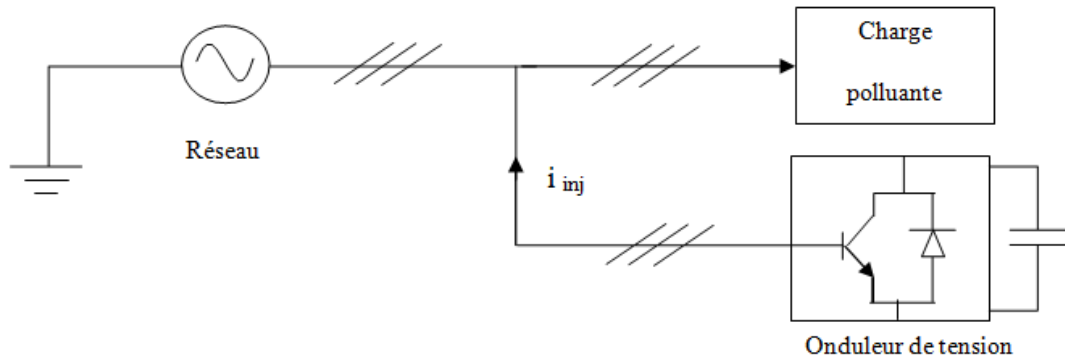


Figure III. 4 Filtre actif parallèle

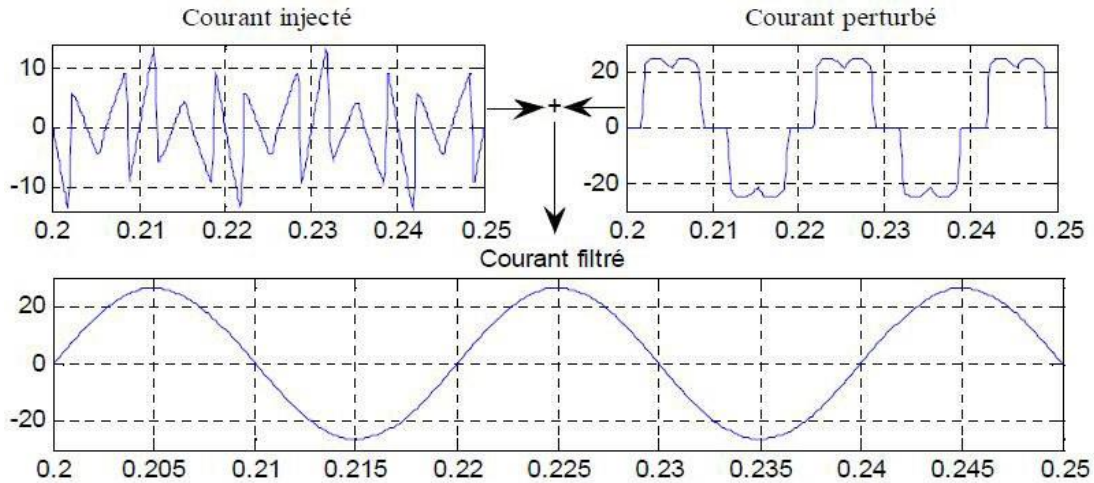


Figure III. 5 Courant pollué, courant harmonique et courant filtré.

La partie contrôle-commande quant à elle est constituée :

- 1- de la méthode d'identification des courants perturbés,
- 2- de la régulation de la tension continue appliquée aux éléments de stockage d'énergie,

Chapitre 3: Etude et modélisation du filtre actif parallèle à deux niveaux

3- de la régulation des courants injectés sur le réseau à partir de l'onduleur de tension,

4- de la commande de l'onduleur de tension.

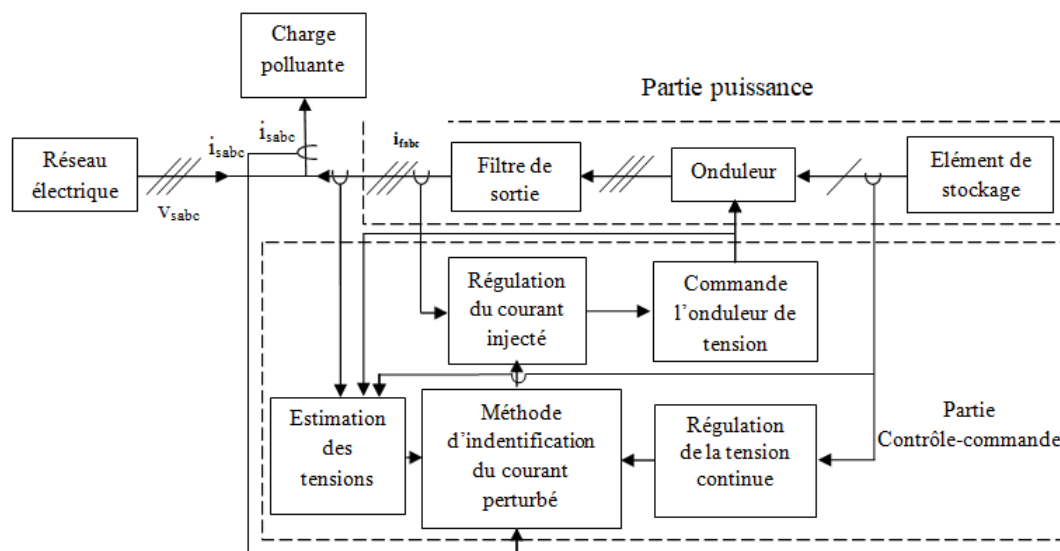


Figure III. 6 Structure générale du filtre actif parallèle.

3.3 Identification des courants harmoniques:

Le but du filtrage est de compenser les harmoniques produits dans les réseaux électriques par des charges non linéaires ou linéaires et de rendre les signaux de courant et de tension du réseau à la forme sinusoïdale. La première étape dans le filtrage est la détection des harmoniques à éliminer dans le but de les injecter dans le réseau électrique. Une bonne détection assure une bonne compensation des harmoniques et cela permet d'améliorer la qualité du signal du réseau.

La méthode présentée est basée sur le calcul des puissances instantanées dans le domaine temporel. Certaines de ces méthodes se basent sur le calcul des puissances harmoniques de la charge. D'autres peuvent être utilisées pour compenser à la fois les courants harmoniques et la puissance réactive, en se basant sur la soustraction de la partie fondamentale active du courant total.

Les méthodes du domaine temporel permettent une réponse plus rapide et requièrent moins d'opérations que les méthodes précédentes. (12) (8) (13)

Chapitre 3: Etude et modélisation du filtre actif parallèle à deux niveaux

3.3.1 Méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées

Cette méthode offre l'avantage de choisir la perturbation à compenser avec précision, rapidité, et facilité d'implantation. Elle n'est cependant valable que si les tensions appliquées à l'entrée de l'identificateur sont équilibrées. Dans le cas où la tension du réseau est polluée, un système à base de P.L.L est ajouté après la mesure des tensions au point de connexion du filtre actif. Une autre solution efficace de ce problème peut être l'insertion d'un filtre appelé filtre multi-variables (F.M.V) après la mesure. L'étude du fonctionnement du filtre (F.M.V) est présentée ci-après.

Cette méthode exploite la transformation des paramètres du système dans le repère triphasé abc en biphasé dans le repère stationnaire. Cette transformation est appelée la Transformation de Concordia Directe (T.C.D). Notons par (V_0, V_α, V_β) et (i_0, i_α, i_β) représentant respectivement les tensions au point de raccordement du filtre actif et les courants absorbés par les charges polluantes. La transformation (T.C.D) permet d'écrire ces composantes dans le repère stationnaire comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Les composante ayant l'indice (0) représentant les composantes homopolaires du système triphasé de courant et de tension, on considère que le réseaux étudié est à neutre isolé et composé de trois fils ce qui empêche la circulation des composantes homopolaire.

A partir des équations 3.4 et 3.5, on calcule les puissances instantanées, active P et réactive Q, elles sont données par la relation suivante :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Chapitre 3: Etude et modélisation du filtre actif parallèle à deux niveaux

On peut décomposer les puissances instantanées p et q en deux composantes, les composantes continues liées au fondamental et les composantes alternatives liées aux harmoniques. Cela peut s'écrire comme suit :

$$\begin{aligned} P &= \bar{p} + \tilde{p} \\ q &= \bar{q} + \tilde{q} \end{aligned} \quad (3.7)$$

- \bar{p} : La puissance continue liée à la composante fondamentale active du courant et de la tension,

- \bar{q} : La puissance continue liée à la composante fondamentale réactive du courant et de la tension,

- \tilde{p} et \tilde{q} : Les puissances alternatives correspondantes à la somme des composantes perturbatrices du courant et de la tension.

Afin d'isoler les puissances actives et réactives conventionnelles, il faut connaître avec précision les fréquences des pulsations des puissances instantanées formées, il est à noter qu'on considère désormais que le réseau étudié est composé de trois fils ce qui empêche les composantes homopolaires d'y circuler. Après avoir identifié les pulsations des puissances instantanées, le filtre de puissance chargé d'isoler les puissances active et réactive conventionnelles peut être dimensionné. Un circuit constitué d'un filtre passe bas avec un soustracteur peut être employé. (12) (8) (13)

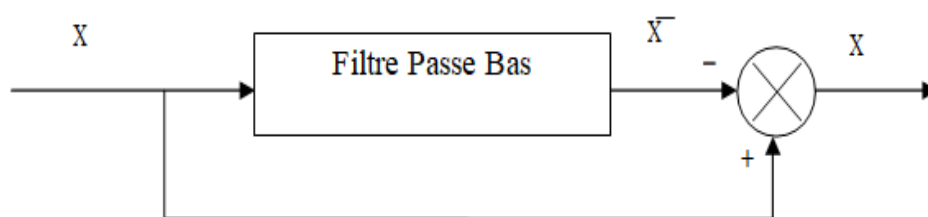


Figure III. 7 Schéma représentant le principe de séparation des puissances.

L'ordre de ce filtre passe-bas définit la dynamique et l'efficacité de la méthode d'identification.

Le filtre passe-bas de quatrième ordre a pour l'extraction des harmoniques.

Chapitre 3: Etude et modélisation du filtre actif parallèle à deux niveaux

La fréquence de coupure du filtre est choisie, selon que la charge soit équilibrée ou déséquilibrée, de manière à ce qu'il puisse bloquer le passage des composantes harmoniques instantanées, et de permettre uniquement le passage des composantes continues représentant les puissances active et réactive à la fréquence fondamentale. Après avoir séparé les puissances, on calcule les courants perturbateurs dans le repère $\alpha\beta$ en se servant de l'expression 3.7 comme suit :

$$\begin{bmatrix} i_{ref\alpha} \\ i_{ref\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_0 - \tilde{P} \\ -\tilde{q} \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Avec :

$$\Delta = v_\alpha^2 + v_\beta^2$$

P_0 est la puissance active fournie par la boucle de tension nécessaire à la régulation de la tension continue. La relation 3.8 est utilisée afin de compenser l'ensemble des harmoniques. Cette technique permet aussi d'effectuer de la compensation de l'énergie réactive puisque l'absorption de l'énergie réactive se traduit par une compensation continue selon l'axe $q(i_q)$ non nulle, le courant du filtre permettant cette compensation est donc :

$$\begin{bmatrix} i_{ref\alpha} \\ i_{ref\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ -\tilde{q} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Et si l'objectif est de compenser la puissance réactive et l'ensemble des harmoniques, on utilise la relation :

$$\begin{bmatrix} i_{ref\alpha} \\ i_{ref\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_0 - \tilde{P} \\ \tilde{q} - \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Les courants de perturbations triphasées qui représentent les courants identifiants, dite courants de référence $i_{ref\alpha}$, sont donnés par la relation suivante :

$$\begin{bmatrix} i_{ref1} \\ i_{ref2} \\ i_{ref3} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ref\alpha} \\ i_{ref\beta} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Chapitre 3: Etude et modélisation du filtre actif parallèle à deux niveaux

La figure 3.6 illustre l'identification des courants de référence lors de la compensation simultanée des courants harmoniques et de l'énergie réactive par la méthode des puissances instantanée à 3 fils

D'où :

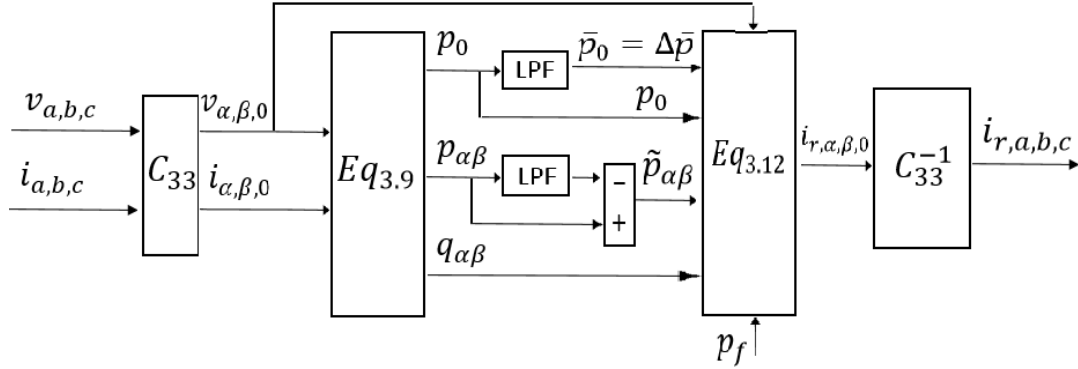


Figure III. 8: Diagramme d'extraction des courants de référence pour la méthode p-q

3.3.1.1 Calcul des courants harmoniques

Nous pouvons recalculer les courants dans le repère stationnaire comme le montre l'équation suivante :

$$\begin{bmatrix} i_{1\alpha} \\ i_{1\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{v_{s\alpha}^2 + v_{s\beta}^2} \begin{bmatrix} v_{s\alpha} & -v_{s\beta} \\ v_{s\beta} & v_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ q_1 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Nous pouvons séparer le courant dans le repère stationnaire en trois composantes, active et réactive à la fréquence fondamentale et les harmoniques. Ceci conduit à:

$$\begin{bmatrix} i_{1\alpha} \\ i_{1\beta} \end{bmatrix} = \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v_{s\alpha} & -v_{s\beta} \\ v_{s\beta} & v_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{p}_1 \\ 0 \end{bmatrix}}_{\text{Courant actif}} + \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v_{s\alpha} & -v_{s\beta} \\ v_{s\beta} & v_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ q_1 \end{bmatrix}}_{\text{Courant réactif}} + \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v_{s\alpha} & -v_{s\beta} \\ v_{s\beta} & v_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p}_1 \\ \tilde{q}_1 \end{bmatrix}}_{\text{Courant harmonique}} \quad (3.13)$$

Courant actif + Courant réactif + Courant harmonique

Chapitre 3: Etude et modélisation du filtre actif parallèle à deux niveaux

Avec :

$$\Delta = v_{s\alpha}^2 + v_{s\beta}^2$$

On suppose " Δ " constant dans l'hypothèse d'une tension sinusoïdale équilibrée du réseau électrique. Cette expression montre donc que l'identification des différentes composantes du courant dans le repère stationnaire revient à séparer des termes continus des puissances réelle et imaginaire instantanées. Les courants perturbateurs triphasés qui représentent les courants identifiés, dits courants de référence du filtre i_f^* , sont calculés à partir de la transformation de Concordia inverse définie par :

$$\begin{bmatrix} i_{fa}^* \\ i_{fb}^* \\ i_{fc}^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{I}_{1\alpha} \\ \tilde{I}_{1\beta} \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Où $\tilde{I}_{1\alpha}$ et $\tilde{I}_{1\beta}$ sont les courants perturbateurs calculés à partir des courants harmoniques. La figure (III.9) représente le schéma de détermination des courants de référence par la méthode des puissances instantanées.

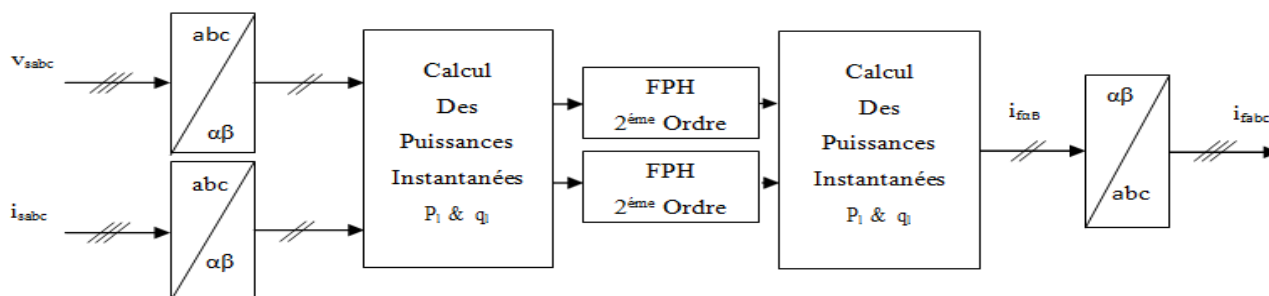


Figure III. 9 Détermination des courants de référence par la méthode des puissances instantanées.

Chapitre 3: Etude et modélisation du filtre actif parallèle à deux niveaux

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



Figure III. 10 Filtre passe haut

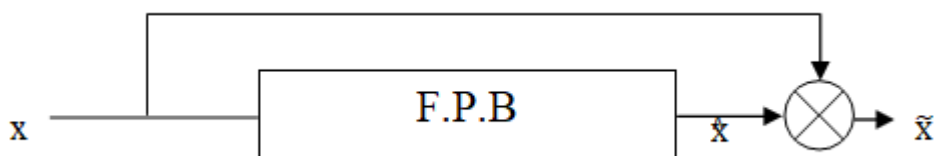


Figure III. 11 : Filtre passe bas.

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

- Pour obtenir une extraction satisfaisante, le régime dynamique est lent. En général, la fréquence de coupure est fixée assez basse, entre 5 Hz et 35 Hz, ce qui engendre alors une instabilité du filtre actif de puissance lors de variations rapides de la charge.
- Dans le cas contraire, si l'on choisit une fréquence de coupure plus élevée, la précision de la détermination de la composante alternative est altérée et peut s'avérer insuffisante.

Pour ces raisons, un nouveau type de filtre d'extraction nommé ici Filtre Multi Variable (F.M.V) a été développé, son principe de base s'appuie sur les travaux de Song Hong-Scok et basé sur l'extraction de la composante fondamentale des signaux, directement selon les axes α - β comme cela est présenté à la figure (III.12)

Chapitre 3: Etude et modélisation du filtre actif parallèle à deux niveaux

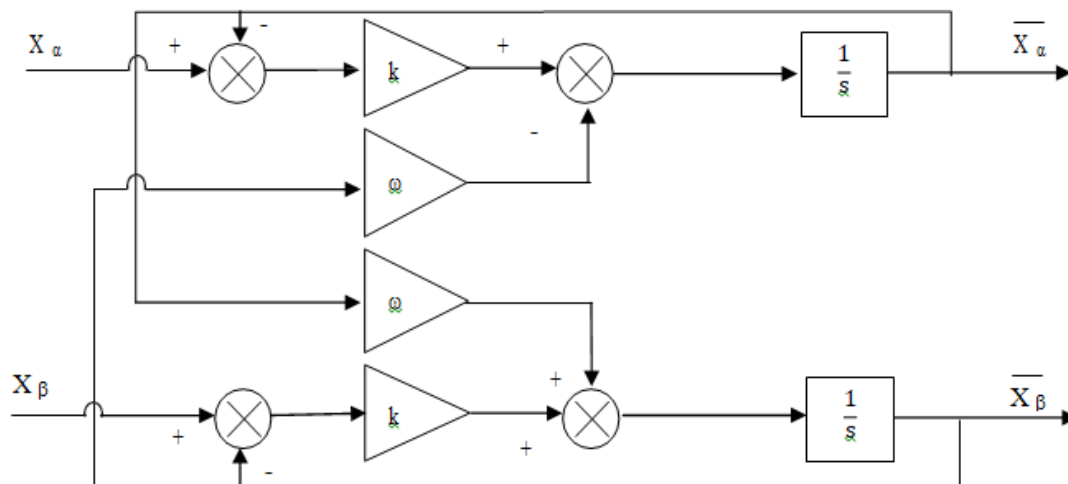


Figure III. 12 Principe du F.M.V.

Selon les axes α - β , les expressions liant les composantes $\hat{x}_{\alpha\beta}$ en sortie du F.M.V aux composantes d'entrée $x_{\alpha\beta}$ sont les suivantes :

$$\begin{aligned} \hat{x}_{\alpha} &= \left(\frac{K}{s} [x_{\alpha}(s) - \hat{X}_{\alpha}(s)] - \frac{\omega_c}{s} \hat{x}_{\beta}(s) \right) \\ \hat{x}_{\beta} &= \left(\frac{K}{s} [x_{\beta}(s) - \hat{x}_{\beta}(s)] - \frac{\omega_c}{s} \hat{x}_{\alpha}(s) \right) \end{aligned} \quad (3.15)$$

Où sont représentés par :

- $X_{\alpha\beta}$: le signal électrique d'entrée selon les axes α , β de nature tension ou courant.
- $\hat{X}_{\alpha\beta}$: les composantes fondamentales de $X_{\alpha\beta}$.
- K : constante à fixer
- $\omega_c = 2\pi f$: pulsation fondamentale du réseau.

Ce filtre F.M.V sera systématiquement mis en œuvre dans toutes les commandes étudiées. Présente le schéma modifié de l'identification des courants de référence par la méthode des puissances instantanées en employant des F.M.Vs.

Chapitre 3: Etude et modélisation du filtre actif parallèle à deux niveaux

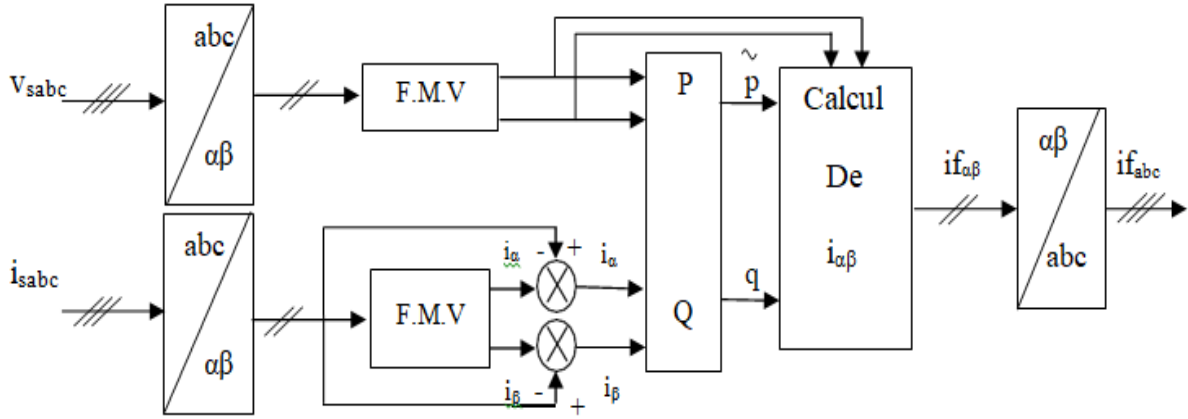


Figure III. 13 Détermination des courants de référence à l'aide de (F.M.V).

3.3.1.2 Théorie de modification des puissances instantanées

Cette théorie est adéquate dans le cas où la source de tensions triphasée est déséquilibrée. Takashi a défini La puissance active instantanée p comme le résultant du produit scalaire entre les trois tensions et les courants, et la puissance imaginaire instantanée q comme le produit vectoriel entre eux comme suit : (12) (8) (13)

$$\begin{cases} p_1 = v_{sa}i_{1a} + v_{sb}i_{1b} + v_{sc}i_{1c} \\ q_1 = v'_{sa}i_{1a} + v_{sb}i_{1b} + v'_{sc}i_{1c} \end{cases} \quad (3.16)$$

Ou v'_{sa} , v_{sb} et v'_{sc} sont les coordonnées orthogonales (en retard de 90°) des tensions simples respectivement v_{sa} , v_{sb} et v_{sc} . Ils sont données par :

$$\begin{bmatrix} v'_{sa} \\ v'_{sb} \\ v'_{sc} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{1}{3}} \begin{bmatrix} v_{sc} & -v_{sb} \\ v_{sa} & -v_{sc} \\ v_{sb} & -v_{sa} \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

La relation (3.17) peut être écrite sous forme matricielle comme suit :

$$\begin{bmatrix} p_1 \\ q_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{sa} & v_{sb} & v_{sc} \\ v'_{sa} & v'_{sb} & v'_{sc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{1a} \\ i_{1b} \\ i_{1c} \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

Chapitre 3: Etude et modélisation du filtre actif parallèle à deux niveaux

Avec :

l'hypothèse d'un système triphasé sans neutre, la somme des courants de phases est nulle ($i_a + i_b + i_c = 0$), la relation (3.18) devient :

$$\begin{bmatrix} P_1 \\ Q_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{Sa} - V_{Sc} & V_{sb} - V_{Sc} \\ V'_{Sa} - V'_{Sc} & V'_{sb} - V'_{Sc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{1a} \\ i_{1b} \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

Pour déterminer les consignes du courant du filtre, il suffit d'écrire :

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} i_{fa}^* \\ i_{fb}^* \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_{Sb} - V_{Sc} & V_{Sc} - V_{Sb} \\ V'_{Sc} - V'_{Sa} & v'_{sa} - v'_{Sc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p}_1 \\ \tilde{q}_1 \end{bmatrix} \\ i_{fc}^* = -(i_{fa}^* + i_{fb}^*) \end{cases} \quad (3.20)$$

$$\text{Où : } \Delta = (v_{sa} - v_{sc})(v'_{sb} - v'_{sc}) - (v_{sb} - v_{sc})(v'_{sa} - v'_{sc})$$

Dans le cas de compensation de l'énergie réactive, la relation (3.20) devient :

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} i_{fa}^* \\ i_{fb}^* \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_{Sb} - V'_{Sc} & V_{Sc} - V_{Sb} \\ V'_{Sc} - v'_{Sa} & v_{sa} - v_{Sc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p}_1 \\ \tilde{q}_1 \end{bmatrix} \\ i_{fc} = -(i_{fa} + i_{fb}^*) \end{cases} \quad (3.21)$$

3.4 L'onduleur de tension à deux niveaux

Les onduleurs de tension constituent une fonction incontournable de l'électronique de puissance. Les deux grands domaines d'application classiques des onduleurs de tension sont les alimentations de secours et les entraînements à vitesse variable, la

Chapitre 3: Etude et modélisation du filtre actif parallèle à deux niveaux

forte évolution des onduleurs de tension s'est appuyée, d'une part, sur le développement des composants semi-conducteurs contrôlables, puissants, robustes, rapides, et d'autre part sur l'utilisation quasi généralisée des techniques dites de modulation de largeur d'impulsion (M.L.I).

La figure (III.14) représente un onduleur triphasé à structure de tension. Il se compose de trois bras à interrupteurs réversibles en courant, commandés à la fermeture et à l'ouverture, réalisés à partir d'un interrupteur (GTO ou IGBT) et d'une diode en antiparallèle qui assure la circulation du courant de roue libre. Le stockage de l'énergie du côté continu se fait par l'intermédiaire d'un condensateur C_{dc} de tension V_{dc} , la tension à ses bornes, V_{dc} est maintenue à une valeur quasi constante. La fluctuation de cette tension doit être faible d'une part pour ne pas dépasser la limite de tension des semi-conducteurs, et d'autre part, pour ne pas dégrader les performances du filtre actif. Le filtre de sortie est un filtre passif habituellement du premier ordre (L_f, R_f), employé pour connecter l'onduleur de tension au réseau électrique. Dans ce cas, le pont onduleur est l'interface entre deux types de sources : source de courant côté alternatif et source de tension côté continu. (12) (8)

La figure (III.15) représente le schéma équivalent par phase d'un filtre actif connecté au réseau électrique.

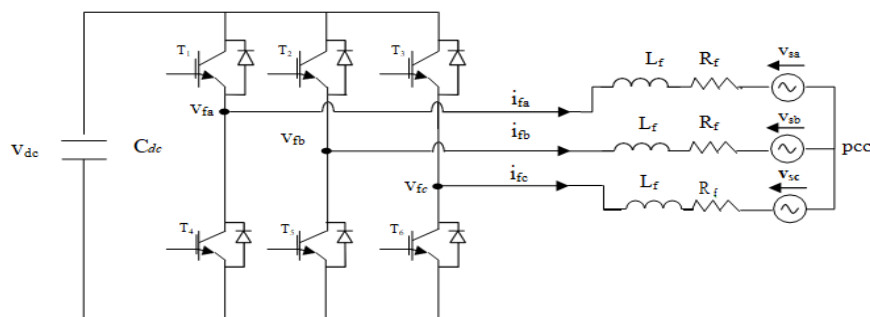


Figure III. 14 Structure de l'onduleur de tension à deux niveaux

Chapitre 3: Etude et modélisation du filtre actif parallèle à deux niveaux

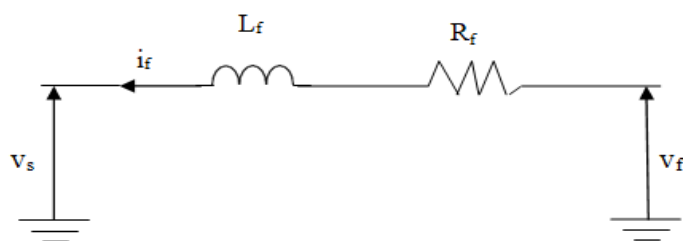


Figure III. 15 Schéma de liaison entre l'onduleur de tension et le réseau

Le schéma de l'onduleur montré dans la figure (III.14), représente un onduleur que l'on appelle à deux niveaux, la sortie de cet onduleur peut prendre deux niveaux de tension ($+V_{dc}$, $-V_{dc}$) dépendante de la tension de la source continue et des impulsions de commande des interrupteurs. En pratique, nous commandons les deux semi-conducteurs d'un même bras de façon complémentaire : la conduction de l'un entraîne le blocage de l'autre.

L'ouverture et la fermeture des interrupteurs de l'onduleur de la Figure (III.14) dépendent de l'état des signaux de commande (S_a, S_b, S_c), comme défini ci-dessous :

$$\begin{aligned}
 S_a &= \begin{cases} 1 & T_1 \text{ fermè et } T_4 \text{ ouvert} \\ 0 & T_1 \text{ ouvert et } T_4 \text{ fermè} \end{cases} \\
 S_b &= \begin{cases} 1 & T_2 \text{ fermè et } T_5 \text{ ouvert} \\ 0 & T_2 \text{ ouvert et } T_5 \text{ fermè} \end{cases} \\
 S_c &= \begin{cases} 1 & T_3 \text{ fermè et } T_6 \text{ ouvert} \\ 0 & T_3 \text{ ouvert et } T_6 \text{ fermè} \end{cases}
 \end{aligned} \tag{321}$$

Les trois tensions composées à la sortie de l'onduleur sont données par :

$$\begin{bmatrix} v_{fa} & - & v_{fb} \\ v_{fb} & - & v_{fc} \\ v_{fc} & - & v_{fa} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_a & - & S_b \\ S_b & - & S_c \\ S_c & - & S_a \end{bmatrix} V_{dc} \tag{3.22}$$

Les trois tensions simple de sortie de l'onduleur notées (v_{fa}, v_{fb}, v_{fc}) sont référencées par rapport au neutre du réseau et vérifient les équations suivantes :

Chapitre 3: Etude et modélisation du filtre actif parallèle à deux niveaux

$$\begin{bmatrix} v_{fa} \\ v_{fb} \\ v_{fc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} - R_f \begin{bmatrix} i_{fa} \\ i_{fb} \\ i_{fc} \end{bmatrix} - L_f \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{fa} \\ i_{fb} \\ i_{fc} \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

$$\begin{cases} v_{sa} + v_{sb} + v_{sc} = 0 \\ i_{fa} + i_{fb} + i_{fc} = 0 \end{cases} \quad (3.24)$$

D'où

$$v_{fa} + v_{fb} + v_{fc} = 0 \quad (3.25)$$

A partir des équations (3.21) et (3.24). Nous obtenons

$$\begin{bmatrix} v_{fa} \\ v_{fb} \\ v_{fc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2S_a & -S_b & -S_c \\ -S_a & 2S_b & -S_c \\ -S_a & -S_b & 2S_c \end{bmatrix} \frac{v_{dc}}{3}$$

Ainsi, on pourra exprimer huit cas possibles de la tension de sortie du filtre actif V_{fk} (référé au neutre n de la source) comme le montre le Tableau suivant :

Cas	S _a	S _b	S _c	v _{fa} /V _{dc}	v _{fb} /V _{dc}	v _{fc} /V _{dc}
0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	2/3	-1/3	-1/3
2	0	1	0	-1/3	2/3	-1/3
3	1	1	0	1/3	1/3	-2/3
4	0	0	1	-1/3	-1/3	2/3
5	1	0	1	1/3	-2/3	1/3
6	0	1	1	-2/3	1/3	1/3
7	1	1	1	0	0	0

Tableau III. 1 Tensions possibles à la sortie de l'onduleur.

Chapitre 3: Etude et modélisation du filtre actif parallèle à deux niveaux

3.4.1 Commande de l'onduleur

Le but de la commande de l'onduleur est le contrôle des courants à la sortie du filtre afin qu'ils suivent leurs références. Le principe est basé sur la comparaison entre les courants à la sortie du filtre actif et leurs références calculées à partir des différentes méthodes d'extraction et de régulation des courants harmoniques et de la tension du condensateur de stockage d'énergie. (12) (8)

3.4.1.1 Commande par hystérésis

La commande conventionnelle par hystérésis est très couramment utilisée de par sa simplicité d'utilisation et sa robustesse. En fait, cette stratégie assure un contrôle satisfaisant du courant sans exiger une connaissance poussée du modèle du système à contrôler ou de ses paramètres. La figure (III.16) expose son principe qui consiste à établir dans un premier temps le signal d'erreur, différence entre le courant de référence $i_{f\text{ ref}}$ et le courant produit par l'onduleur i_f .

Cette erreur est ensuite comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis, afin de fixer les ordres de commande des interrupteurs. Cette commande présente cependant un inconvénient majeur : elle ne permet pas de contrôler la fréquence de commutation des semi-conducteurs, d'où la présence d'un nombre important d'harmoniques dans les courants générés. (12) (8)

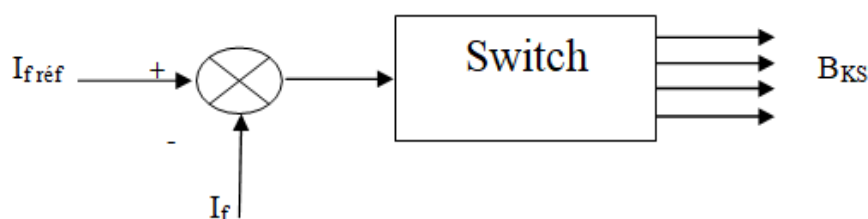


Figure III. 16 Schéma de commande par hystérésis.

Chapitre 3: Etude et modélisation du filtre actif parallèle à deux niveaux

3.4.1.2 Commande par hystérésis à bande fixe

Dans ce cas de contrôle du courant, la fréquence de commutation dépend essentiellement de la dérivée du courant de consigne. Cette dernière dépend de la valeur de l'inductance de découplage et de la chute de tension à ses bornes. Il faut noter que le filtre de couplage a des effets sur la fréquence de commutation et sur le comportement dynamique du filtre actif.

L'avantage principal de cette méthode est la simplicité de mise en œuvre, tandis que la fréquence de commutation variable qu'on ne peut pas maîtriser correctement peut être son majeur inconvénient. Cette fréquence variable rend le filtrage à la sortie difficile. Afin de résoudre ce problème de la maîtrise des fréquences de commutation et de sa répercussion sur les interrupteurs, une autre stratégie de commande peut être proposée, à savoir la « commande par hystérésis modulée ». Mais dans cette stratégie de commande, il est difficile de définir la largeur de la bande de l'hystérésis. De plus, le fonctionnement avec une fréquence de commutation quasi fixe nous empêche de conserver l'avantage d'une rapidité illimitée obtenue par la commande par hystérésis.

(12) (8)

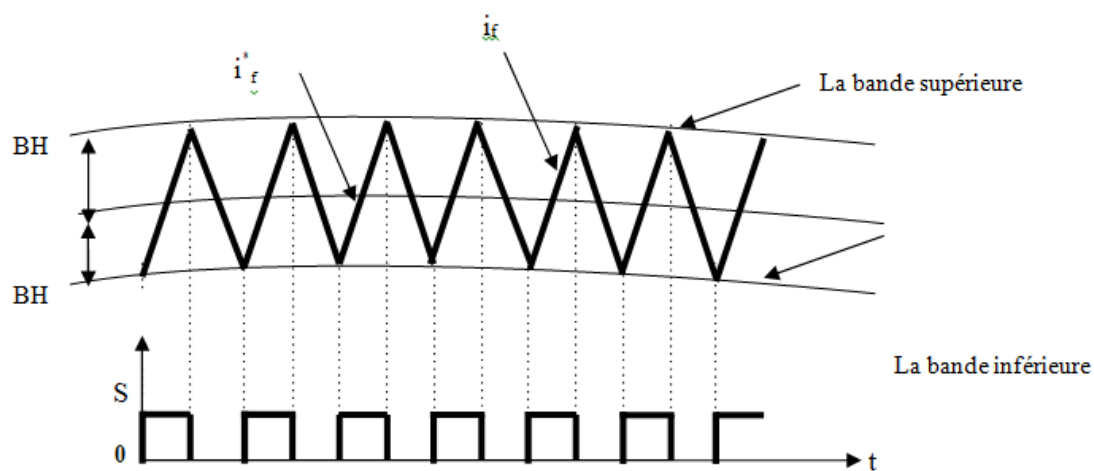


Figure III. 17 Commande des interrupteurs par hystérésis à bande fixe.

Chapitre 3: Etude et modélisation du filtre actif parallèle à deux niveaux

Résultats de simulation

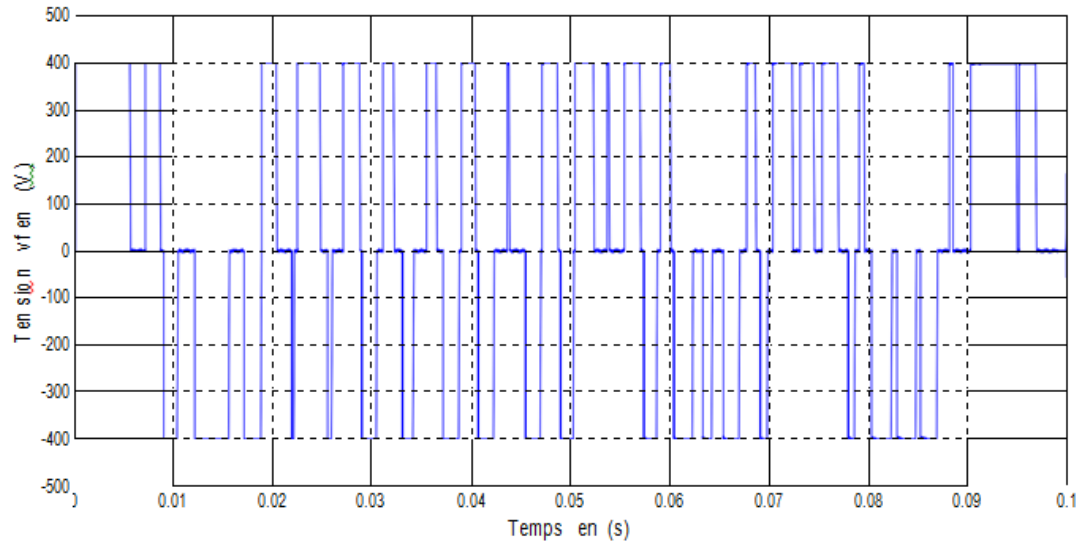


Figure III. 18 Allure de la tension de l'onduleur à deux niveaux par la commande hystérésis

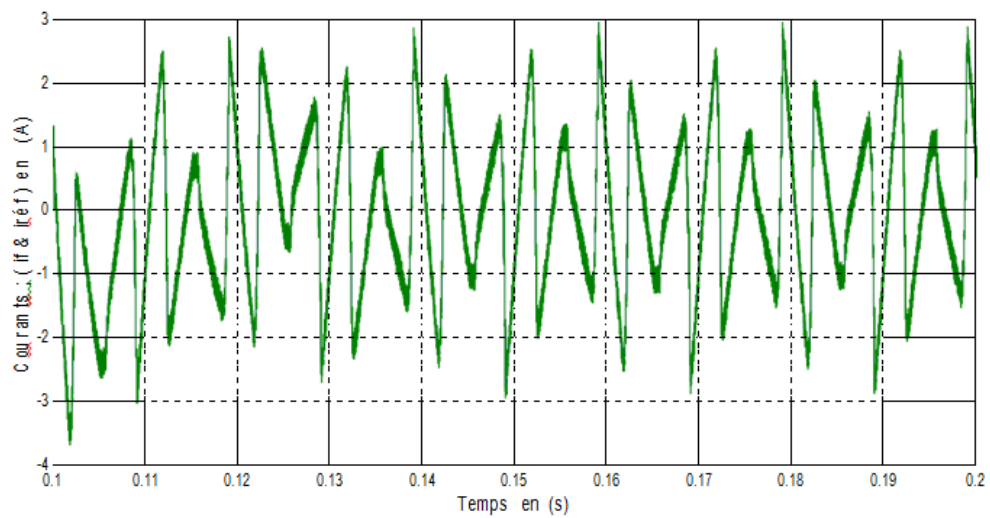


Figure III. 19 Allure du courant de l'onduleur et le courant de référence par la commande hystérésis.

Chapitre 3: Etude et modélisation du filtre actif parallèle à deux niveaux

3.4.1.3 Commande par M.L.I sinusoïdale

La technique de commande par Modulation de Largeur d'impulsion (M.L.I) résout le problème de la maîtrise de la fréquence de commutation en fonctionnant avec une fréquence fixe facile à filtrer en aval de l'onduleur. La plus simple et la plus connue des modulations de largeur d'impulsion est sans doute la M.L.I à échantillonnage naturel. Cette technique de commande met en œuvre d'abord un régulateur qui détermine la tension de référence de l'onduleur à partir de l'écart entre le courant mesuré et sa référence. Cette tension est ensuite comparée avec un signal en dent de scie (porteuse à fréquence élevée fixant la fréquence de commutation). La sortie du comparateur fournit l'ordre de commande des interrupteurs.

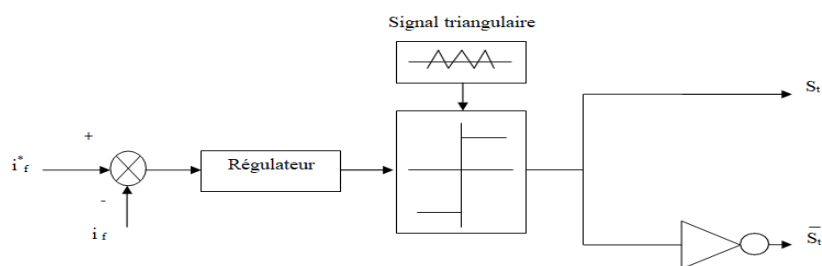


Figure III. 20 Principe de commande du courant par M.L.I

D'autres techniques de MLI existent également dans la littérature comme la MLI à échantillonnage régulier où on peut distinguer deux méthodes :

- La MLI à échantillonnage régulier symétrique où la référence est échantillonnée à chaque période de la porteuse.

Chapitre 3: Etude et modélisation du filtre actif parallèle à deux niveaux

-La MLI à échantillonnage régulier asymétrique où la référence est échantillonnée à la demi-période de la porteuse. (12) (8)

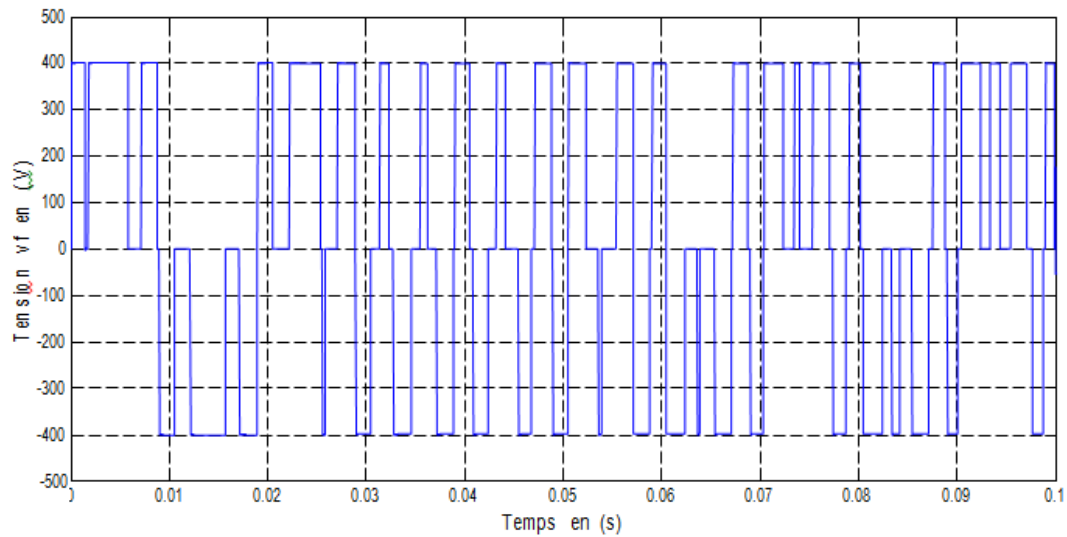
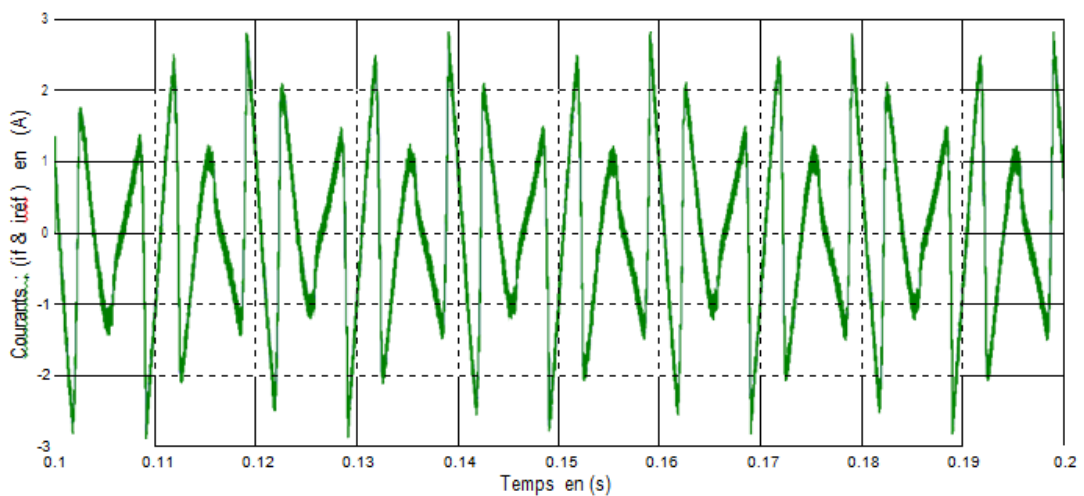


Figure III. 22 Allure de la tension de l'onduleur à deux niveaux par la commande M.L.I.



3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié le filtre shunt comme une solution de dépollution pour minimiser les harmoniques dans le réseau causés par une charge non-linéaire.

A cet effet, la méthode des puissances instantanée a été utilisée pour identifier les courants harmoniques.

Chapitre 3: Etude et modélisation du filtre actif parallèle à deux niveaux

Le prochain chapitre sera consacré à la simulation du filtre actif parallèle et l'interprétation des résultats.

***Chapitre 4 :
Simulation et
interprétation
des résultats***

Chapitre 4:Simulation et interprétation des résultats

4 Introduction

Après avoir étudié dans le chapitre précédent l'algorithme l'identification des courants harmoniques de références, ainsi que les stratégies de commande du filtre actif dans le chapitre précédent, nous allons présenter dans ce chapitre, la simulation sous MATLAB-SIMULINK de notre model d'étude, l'évolution des résultats de simulation obtenus du courant perturbé , va nous permettre de distinguer les valeurs des composants électriques correspondantes et le circuit équivalent adéquat, pour l'amélioration des performances du filtre, dans le but d'élimination des perturbations du courant de réseau, ainsi que celle de la tension du réseau .

4.1 Modélisation et simulation du filtre actif parallèle choisis

Le système simulé comporte un réseau électrique triphasé à trois fils, une charge non linéaire triphasé (pont à diodes) alimentant une charge de type RL et un filtre actif parallèle triphasé à structure tension. Les paramètres de la source, de la charge polluante et celles du filtre actif parallèle sont donnés comme suit :

4.1.1 Modèle de la source

Le réseau électrique est modélisé par une source de tension alternative $V_s = 380$ V ayant des paramètres suivants :

- Fréquence $f = 50$ Hz
- Résistance de ligne $R_s = 0.82 \cdot 10^{-3} \Omega$
- Inductance de ligne $L_s = 0.023 \cdot 10^{-3} H$

4.1.2 Modèle de la charge polluante

La charge polluante consiste en un redresseur (pont à diodes) alimentant une charge composée d'une résistance $R_{ch} = 2 \Omega$ en série avec une inductance $L_{ch} = 2.6 \cdot 10^{-3} H$.

4.1.3 Modèle du filtre actif parallèle

Les valeurs des éléments caractérisant le filtre actif parallèle sont données comme suit :

Chapitre 4: Simulation et interprétation des résultats

$L_f = 0.001$ H, $V_{dc} = 600$ V, $C = 0.004$ f

- La fréquence de la porteuse $F_p = 5000$ Hz
- La fréquence de la bande passante 20 Hz
- La bande d'hystérésis $\Delta i = 0.5$ A.

4.2 Résultats de simulation et analyse des résultats

4.2.1 Résultats de simulation sans compensation

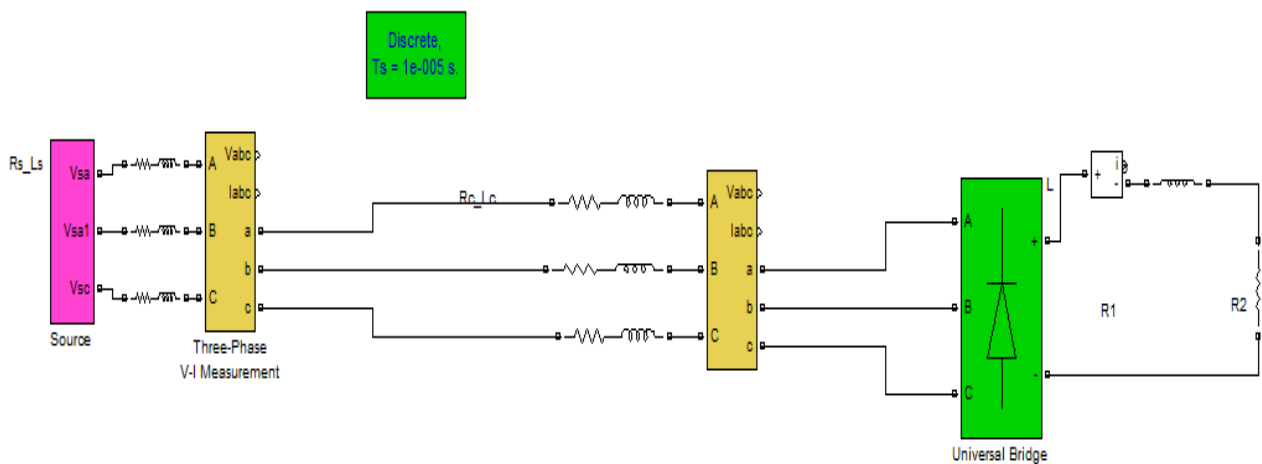


Figure IV. 1 Schéma de la simulation du circuit étudié avant filtrage

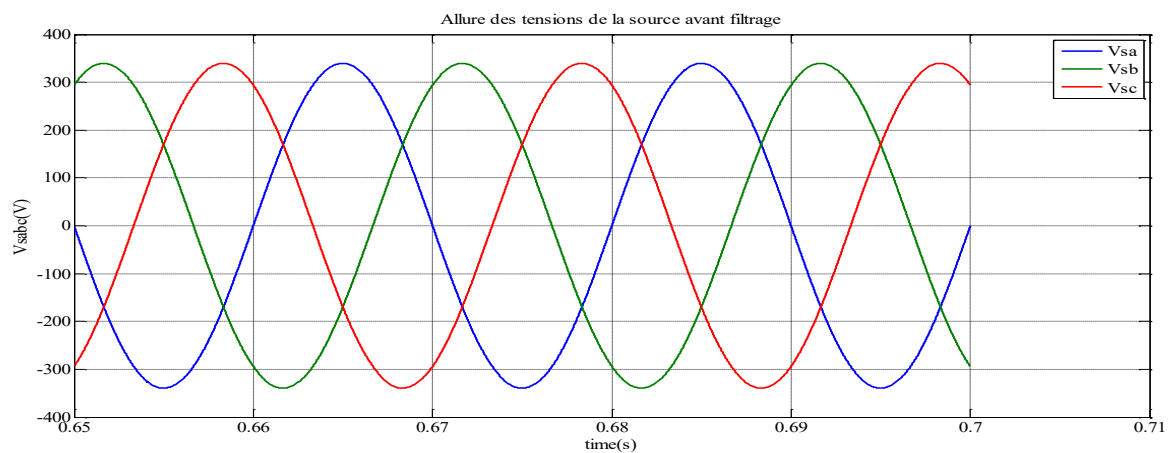


Figure IV. 2 Allure des tensions de la source avant filtrage

Chapitre 4: Simulation et interprétation des résultats

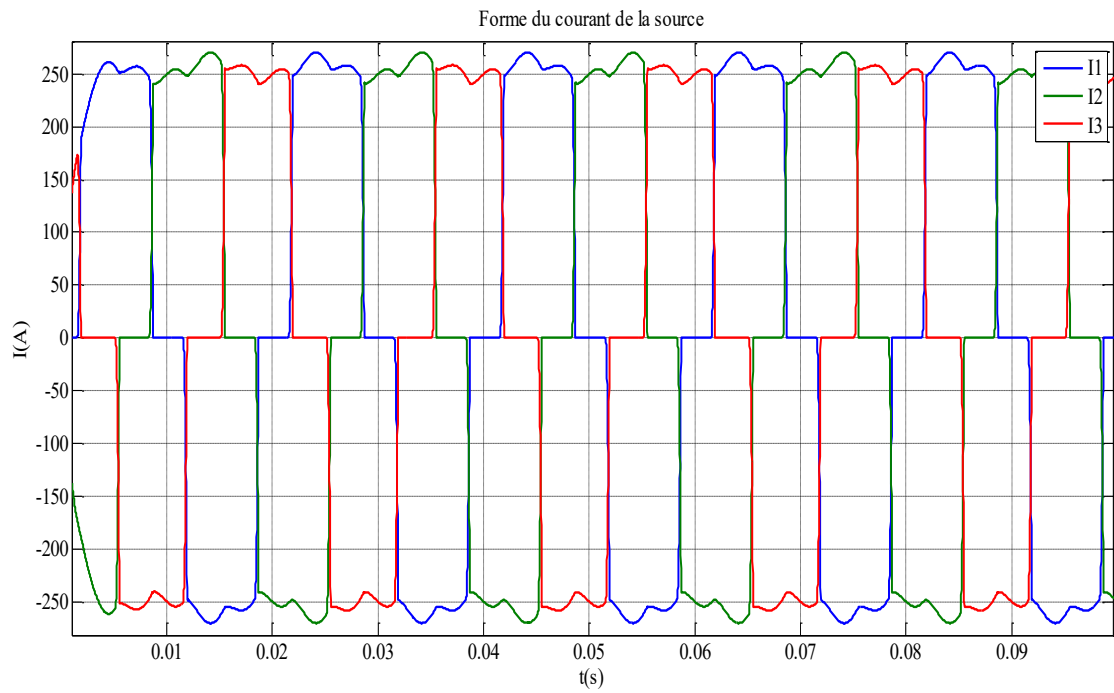


Figure IV. 3 Forme du courant de la source Avant filtrage

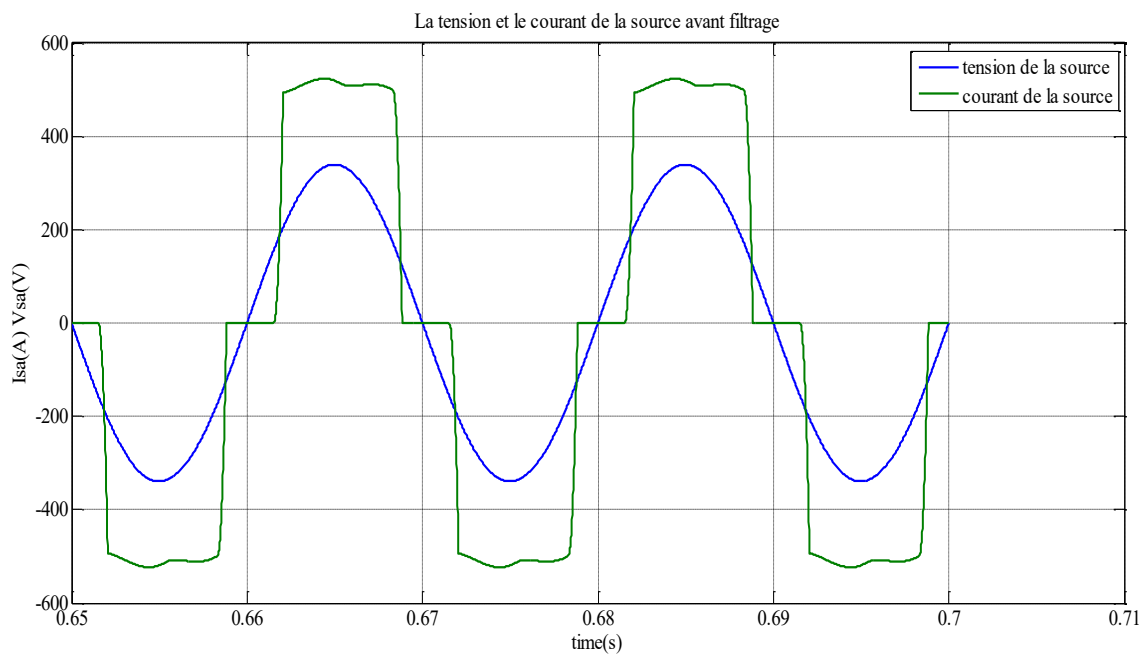


Figure IV. 4 Allure de la tension et du courant d'une phase avant filtrage

Chapitre 4: Simulation et interprétation des résultats

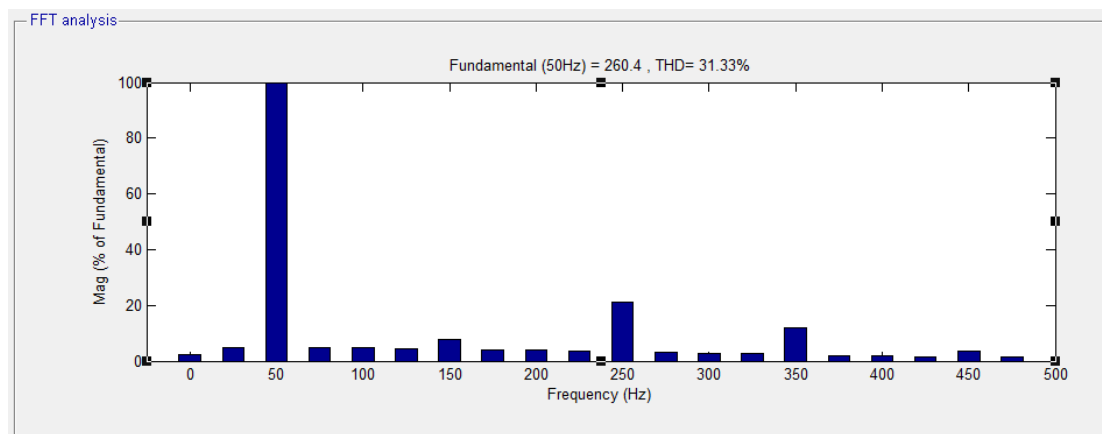


Figure IV. 5 Analyse spectrale du courant avant le filtrage

Les figures () représentent la forme du courant de source et son spectre harmonique respectivement .On remarque que le courant de sources est très riche en harmonique de rang $(2K+1, K=2, \dots, 50)$ ainsi on obtient un THD de l'ordre de 31.33 %. Les harmoniques de rang 5 et 7 ont des valeurs non négligeables, par conséquent nous devons améliorer le THD de ce signal, Ou raccorde le filtre actif au réseau. On remarque par contenance que la tension n'est pas en phase avec le courant ce qui entraîne une consommation de l'énergie réactive et une dégradation du facteur de puissance.

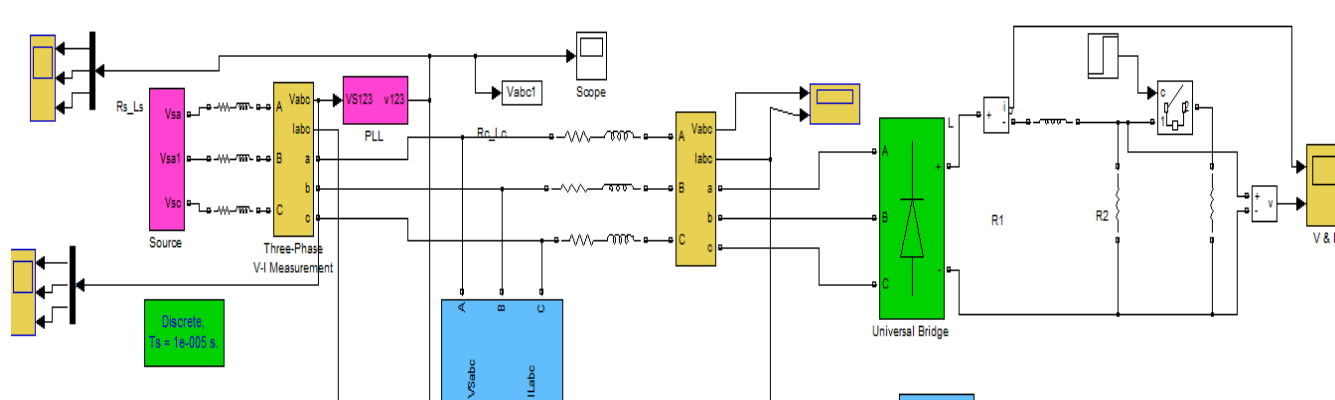


Figure IV. 6 Schéma de simulation étudié après filtrage

Chapitre 4: Simulation et interprétation des résultats

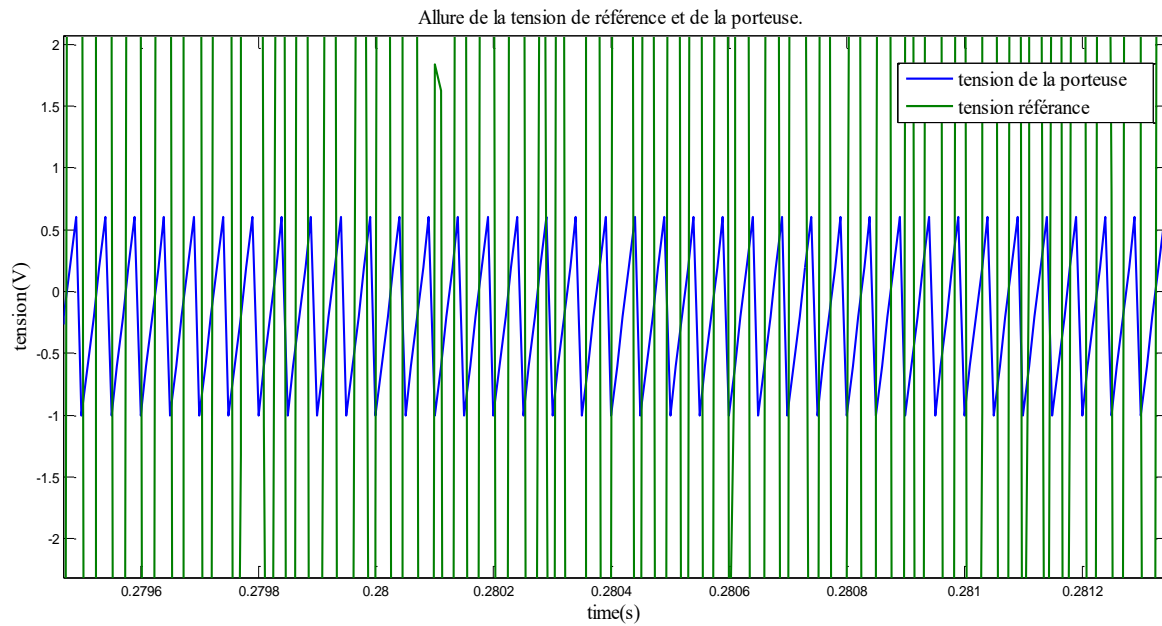


Figure IV. 7 Allure de la tension de référence et de la porteuse

4.2.3 Interprétation des résultats :

La figure (IV.7) montre la comparaison entre la référence et la porteuse triangulaire $V_{\text{réf}}$ de fréquence 5000 Hz. L'intersection entre les deux signaux représente les instants de commutation.

Chapitre 4: Simulation et interprétation des résultats

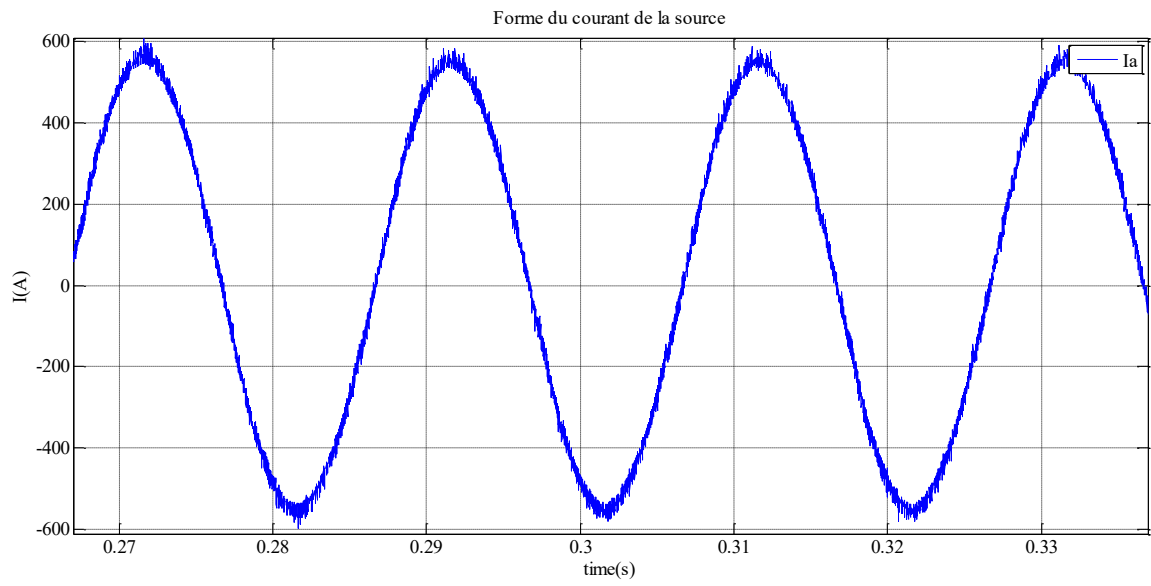


Figure IV. 8 Forme du courant de la source après filtrage

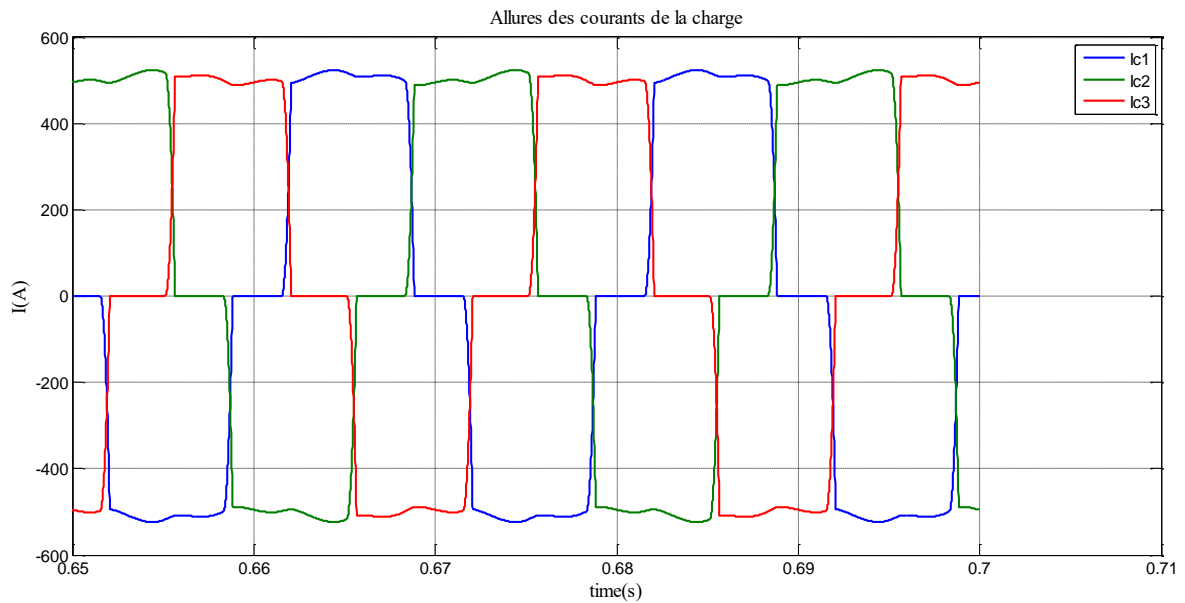


Figure IV. 9 Allure du courant de la charge après filtrage

Chapitre 4: Simulation et interprétation des résultats

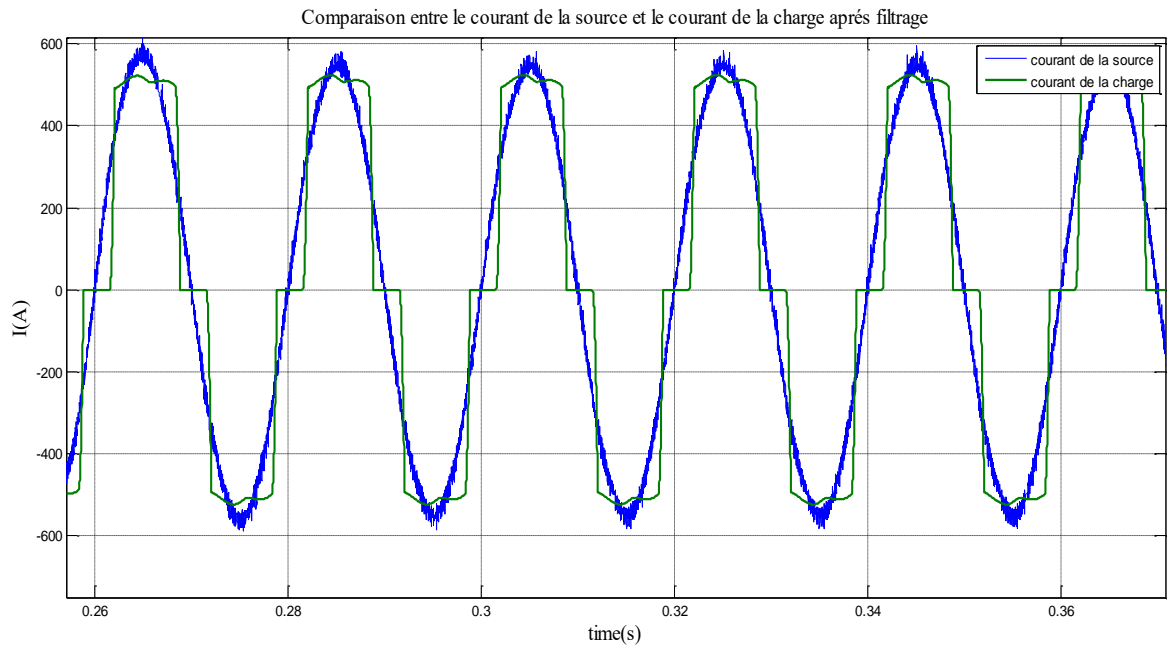


Figure IV. 10 Comparaison entre le courant de la source et le courant de la charge après filtrage

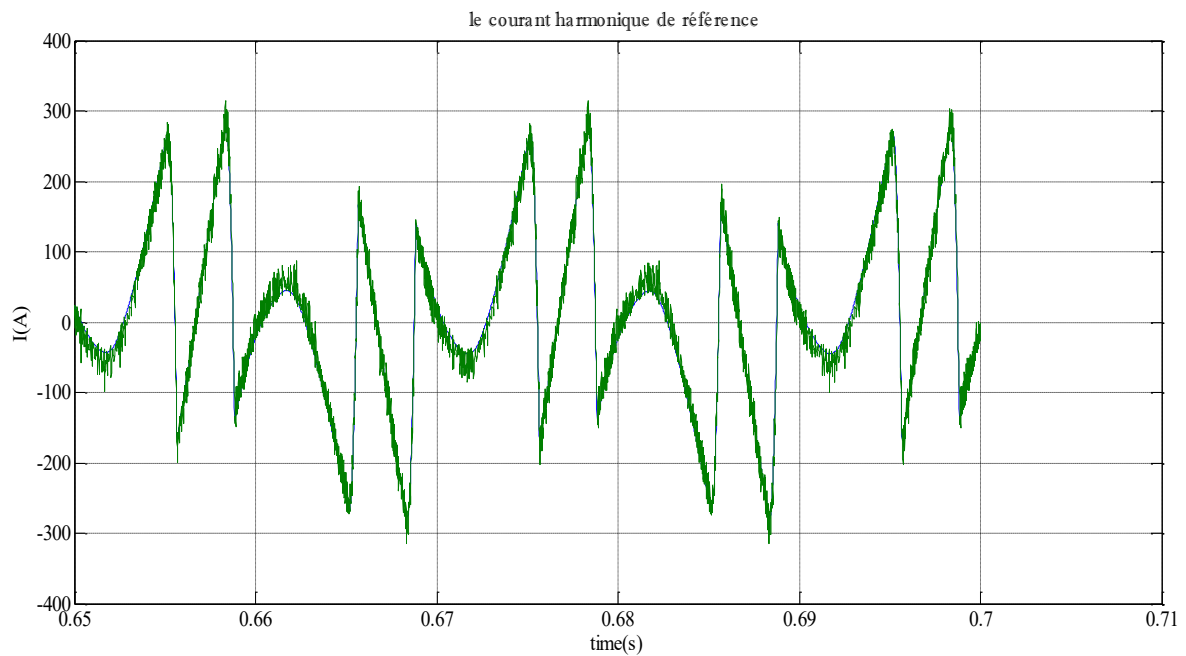


Figure IV. 11 Le courant harmonique référence

Chapitre 4: Simulation et interprétation des résultats

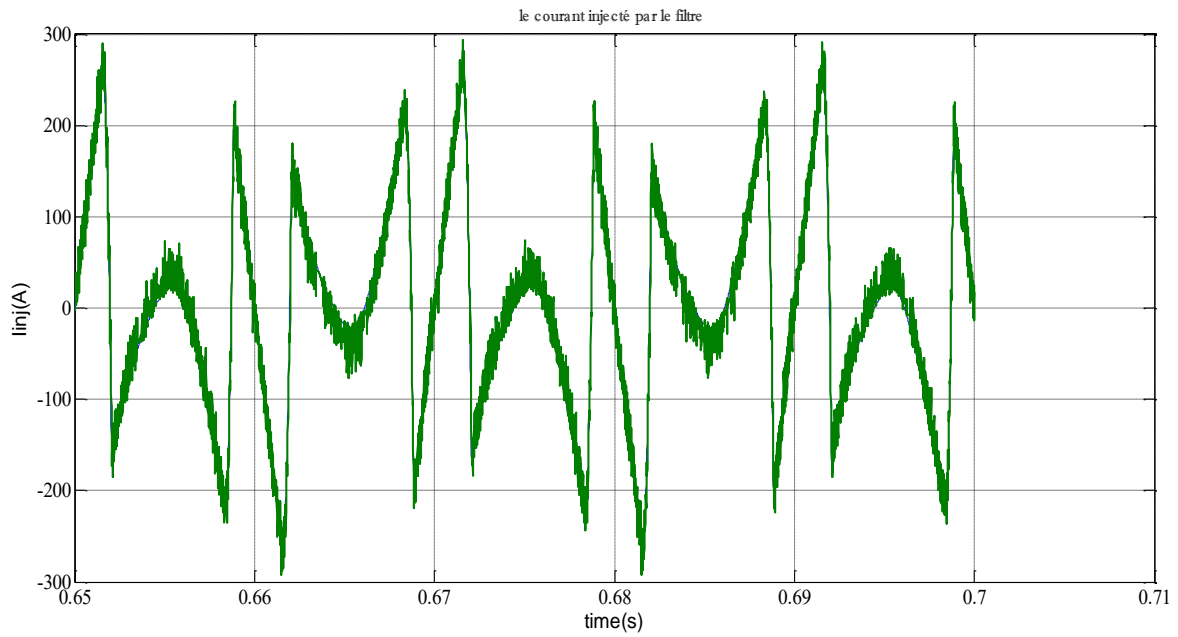


Figure IV. 12 le courant injecté par le filtre

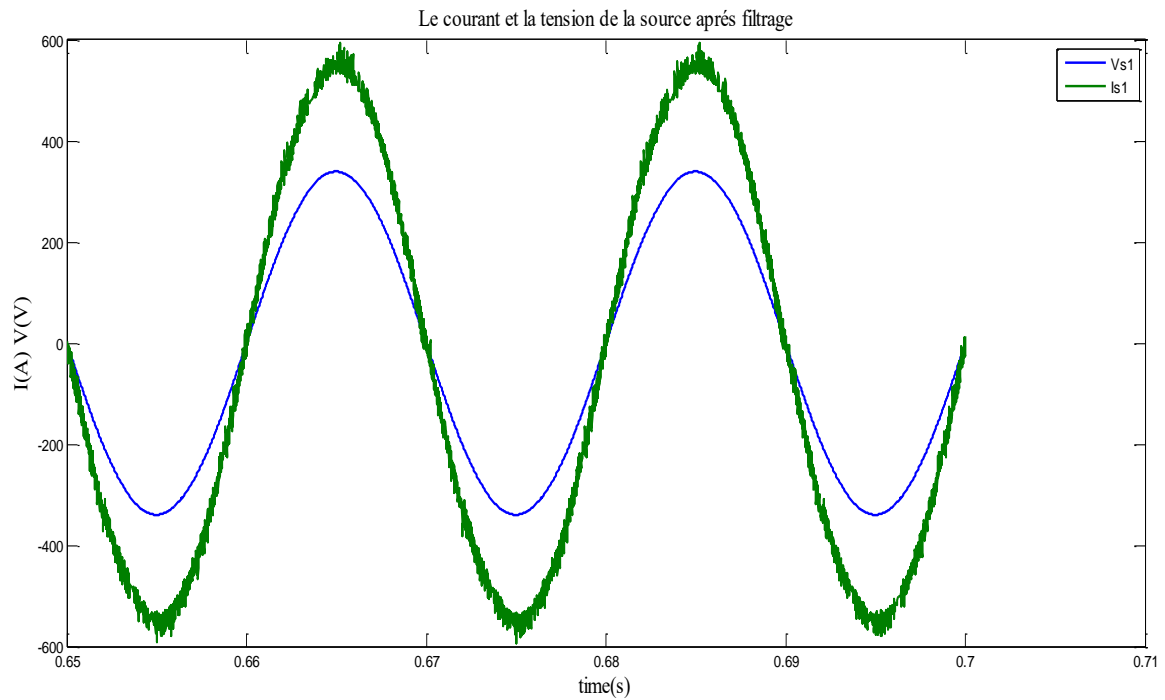


Figure IV. 13 Le courant et la tension de la source après filtrage

Chapitre 4: Simulation et interprétation des résultats

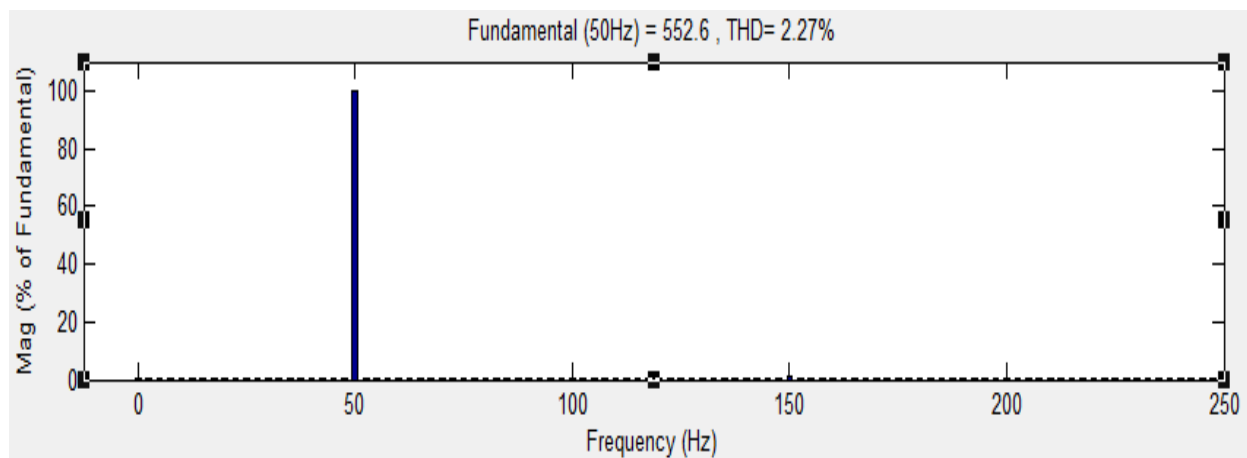


Figure IV. 14 Analyse spectrale du courant après le filtrage

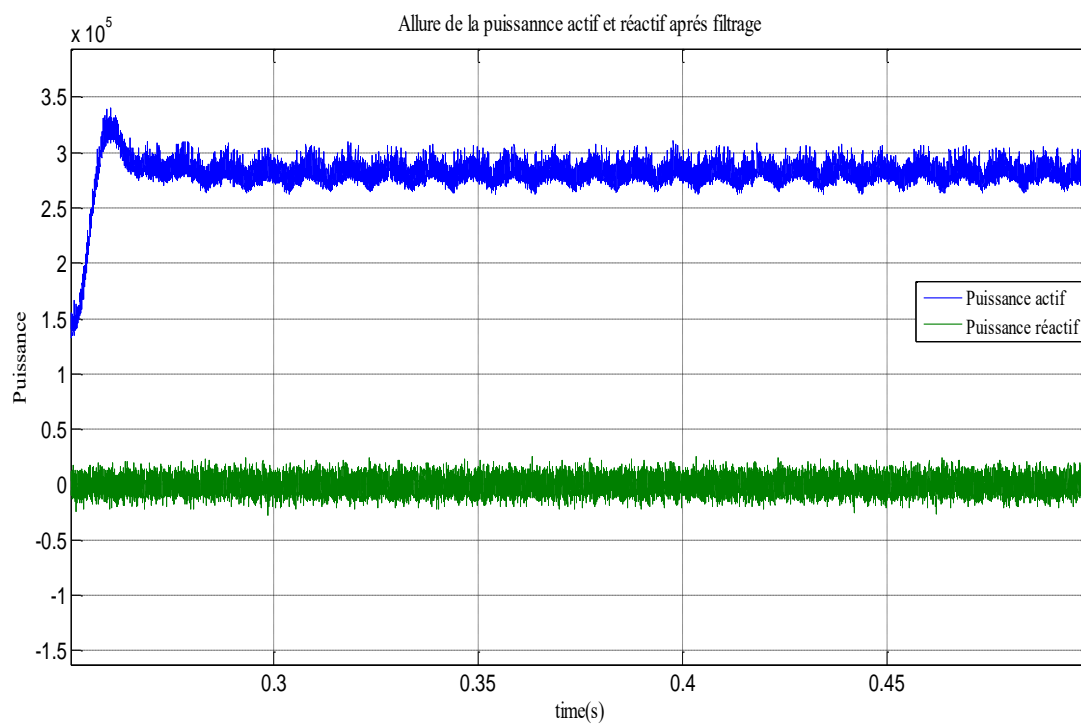


Figure IV. 15 Allure de la puissance active et réactive après filtrage

Chapitre 4: Simulation et interprétation des résultats

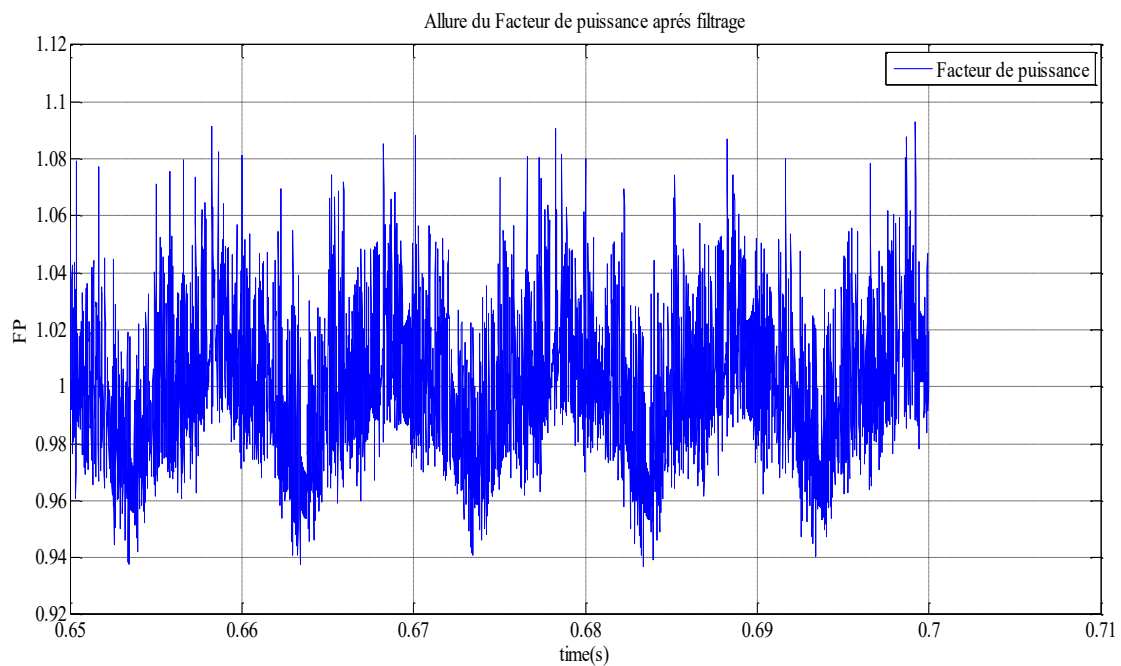


Figure IV. 16 Allure du facteur de puissance après filtrage

Facteur de puissance

$$FP = \frac{P}{\sqrt{(P+Q)^2}} = \frac{1.0797011e^4}{1.2026512e^4} = 0.8977$$

4.2.4 Interprétation des résultats

La figure (IV.8) représente l'allure du courant de la source dans le cas où l'onduleur est commandé par MLI sinus-triangulaire. On constate que la forme est sinusoïdale, ce qui minimise les harmoniques.

La figure (IV.11) et La figure(IV.12), représente les allures des courants harmoniques de référence et le courant injecté par le filtre actif I_{inj} . On constate que le courant injecté suit bien sa référence.

La figure (IV.13) représente l'allure du courant et de la tension de la source. On remarque que le courant est pratiquement en phase avec la tension, d'où un facteur de puissance unitaire.

Chapitre 4:Simulation et interprétation des résultats

La figure (IV.14) représente le THD de courant de la source après compensation
THD= 2.27 %

La figure aussi représente l'analyse harmonique du courant de source après avoir fait la compensation On remarque l'élimination des harmoniques de rang 5 et 7.

4.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié le filtre shunt comme une solution de dépollution pour minimiser les harmoniques dans le réseau causés par une charge non-linéaire .A cet effet, la méthode des puissances instantanés PQ a été utilisée pour identifier les courants harmoniques. Les résultats de simulation ont montré les performances assez acceptables de cette méthode, ceci en plus de sa simplicité.

Conclusion générale

Conclusion générale

De nos jours, la qualité de l'énergie est un domaine de la plus haute importance. À l'heure où l'économie des pays industrialisés repose sur leurs capacités à produire ou à acheter l'énergie, l'utilisation adéquate et sans perte inutile est capitale. Ce projet, bien que ne touchant qu'un de ces domaines de la qualité de l'énergie pourtant si vaste, a permis de faire un bref survol de la problématique liée à la perturbation et la pollution harmonique sur le réseau électrique ainsi que des différents moyens de mitigation utilisés. Une bonne compréhension de la problématique des harmoniques, de leurs influences sur le réseau électrique, ainsi que des moyens de mitigation existant pour les minimiser est maintenant devenue essentielle pour tout ingénieur travaillant dans le domaine de l'électrotechnique.

Dans ce projet, nous avons étudié une stratégie de dépollution des réseaux électriques, appelée filtrage actif parallèle qui a vu son développement avec l'évolution des organes de l'électronique de puissance. Ces derniers nous permettent de concevoir des dispositifs appelés convertisseurs de puissance (onduleurs), permettant l'injection des courants harmoniques dans le réseau. Par conséquent, la source fournira des courants sinusoïdaux en phase avec leurs tensions.

Nous avons consacré le troisième chapitre à l'étude du filtre actif parallèle à deux niveaux. Pour se faire nous l'avons considéré en deux parties : la partie puissance dans laquelle nous avons présenté les différents organes qui constituent le filtre actif parallèle et leurs rôles, et la partie commande qui consiste d'abord en l'identification des courants harmoniques générés par la charge non linéaire. Et deux techniques de modulation, MLI et par hystérésis pour la commande de l'onduleur,

La méthode d'identification des puissances instantanées a été choisie pour identifier le plus grand nombre de perturbations en courant, tels que les courants harmoniques. Cette méthode exige une tension de réseau sinusoïdale, pour pouvoir fournir uniquement les perturbations en courant émises par la charge polluante. Elle offre l'avantage de choisir la perturbation à compenser avec précision, rapidité et facilité d'implantation. La modélisation et de l'ensemble réseau, charge polluante et filtre actif parallèle a été présentée dans le cas de la commande par modulation de largeur d'impulsion pour un type de charge non linéaire à savoir un redresseur triphasé à diodes alimentant une charge RL série ou parallèle. La validation de la méthode des

Conclusion générale

puissances instantanées a été effectuée par simulation à partir du logiciel Matlab-Simulink. Plusieurs cas de simulation accompagnés d'une analyse temporelle et d'une analyse spectrale ont été effectués à partir du modèle de l'ensemble réseau, filtre actif parallèle et charge polluante. Les résultats de simulation montrent que le filtre actif parallèle dépollue efficacement le réseau électrique des harmoniques générées par la charge non linéaire.

Au quatrième chapitre nous avons simulé le filtre actif shunt ou la méthode des puissances instantanées est utilisée pour identifier les courants perturbateurs. En fin, nous avons présenté les résultats de simulation obtenus via SIMULINK-MATLAB, et qui montrent l'aptitude de notre filtre à améliorer le THD qui fut dégradé à cause des courants harmoniques engendrés par la charge non linéaire.

Bibliographie

Bibliographie

5 Bibliography

1. **Abdelkader, Yousfi.** *Amélioration de la qualité de l'énergie électrique en utilisant un onduleur de tension à cinq niveaux.* Clef : Université de Hasiba Benbouali Chlef, 2008.
2. **AMAR, OMEIRI.** *Simulation d'un filtre actif parallèle de puissance pour compensation des harmoniques de courant.* Annaba : Université BADJI MOKHTAR , 2007.
3. *Etude et Commande d'un Filtre Actif Parallèle à Structure de Tension .* **Fatiha, M.** Oran : Mémoire de Magister, Univ. Oran, Octobre 2001.
4. *Travaux pratiques 3 Power Harmonique Filter.* **MR.KKHERFANE.** Blida : Université SAAD DAHLEB BLIDA, 2020.
5. **2010, Schneider Electric - Guide de l'installation électrique et harmoniques, Chapitre M : Détection et atténuation des.** [https://fr.wikipedia.org/wiki/Harmonique_\(électricité\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Harmonique_(électricité)). *Wikipedia.* [En ligne]
6. **Miloud, Mr MORSLI M'BAREK.** *commande linéaire d'un filtre actif parallèle.* Blida : Université SAAD DAHLEB BLIDA, 2016.
7. **énergétique, Technologie pour l'efficacité.** • www.circutor.fr. [En ligne] [Citation : 11 08 2022.]
8. *Commande d'un Filtre Actif Triphasé Parallèle Par Différents Régulateurs.* **ISMAIL, GHADBAN.** Biskra : Université Mohamed Kheider, 2011.
9. **HASSANI, OULD-OUALI SAMI.** *Etude et réalisation d'un filtre actif parallèle commandé par logique floue.* s.l. : Mémoire de Magister de l'ENP , 2002.
10. *Filtrage actif des harmoniques.* **Nouha, Zerara.** Mila : Université de Mila, 2016.
11. **CHOUKRI, BEN HABIB MOHAMED.** *Nouvelle stratégie de commande d'un conditionneur actif de puissance.* Oran : Mémoire de Magiste.
12. *Commandes non linéaires d'un filtre actif parallèle.* **Salih, Mr KAMIL Mohammed et Mr NOURI.** 2009.
13. *Commande d'un filtre actif parallèle.* **Abdelaziz, Mr HAMRAOUI Farid et Mr MEKATI.** s.l. : Master en Electrotechnique, 2011.
14. **Galou Elhacène, Hamani Rachida.** *Contribution a la commande d'un filtre actif parallèle.* Bejaia : Université de Bejaia, 2017.