



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Abderrahmane MIRA- BEJAIA

Faculté De Technologie

Département de Génie Électrique

Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme de master en Électrotechnique

Option : commande des systèmes électrique & électromécanique

Thème

Contribution à La Commande d'un filtre actif parallèle

Présenté par :

Mr. Galou Elhacène .

Melle. Hamani Rachida .

Encadré par:

Mr. Z. Boudries.

Année Universitaire 2016/2017

Liste des figures

Figure (I.1) Creux de tension	5
Figure (I.2) Fluctuations de tension	6
Figure (I.3) Déséquilibre en amplitude et en phase courant et tension	7
Figure (I.4) Variation de fréquence	7
Figure (I.5) représentation spectrale Fondamental et inter harmoniques	8
Figure(I.6) Décomposition d'un signal périodique	9
Fig. (I.7) : Le spectre des harmoniques du courant de charge polluante.	11
Figure (I.8) Diagramme de Fresnel des puissances	12
Figure(II.1) montage de steinmtz	18
Figure(II.2) transformateur YZ	18
Figure (II.3) Filtre amorti	20
Figure (II.4) Filtre résonant agissant sur plusieurs rangs d'harmonique	21
Figure (II.5) Filtre actif série	23
Figure (II.6.)Filtre actif parallèle	24
Figure (II.7)Filtre combiné parallèle-série (UPQC)	25
Fig (II.8) Filtre actif série et filtre passif parallèle	26
Fig (II.9) Filtre actif série connecté en série avec un filtre passif parallèle	26
Fig(II.10) Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle.	27
Figure (III. 1) Principe du filtre actif parallèle.....	32
Figure (III. 2) Schéma et les signaux générés par le filtre actif parallèle.	33
Figure. III.3. Structure générale du filtre actif parallèle	33
Figure (III-4): Structure onduleur tension.	35
Figure (III-5): Structure d'un onduleur de tension triphasé	35
Figure (III-6): Principe de la commande des courants par hystérésis.	37

Figure (III-7): Principe de commande des courants par MLI	38
Figure(III-8): Schéma de principe d'onduleur monophasé commandé par MLI sinus-triangle.....	38
Figure.III.9. Onduleur de tension à trois bras employé comme FAP.	39
Figure. III.10.Représentation vectorielle des tensions générées par l'onduleur de tension d'un FAP	42
Figure (III.11) : Schéma représentant le principe d'identification des courants harmoniques.	44
Figure(III.12.) Schéma représentant le principe de séparation des puissances.....	46
Figure (III.13) : Structure d'un filtre actif shunt basé sur la méthode des puissances instantanées	47
Figure (III.14) Principe de la méthode (pq).	49
Figure(IV.1)Structure générale du filtre actif parallèle.	50
Figure (IV.2.) Schéma de simulation du circuit étudié	52
Figure (IV.3.) Forme d'ondes du courant de source	52
Figure (IV.4) analyse spectrale du courant avant le filtrage	53
Figure (IV.5) Allure du courant I_a et la tension V_{sa} de la source	53
Figure(IV.6) Schéma bloc du filtre actif parallèle commandé par MLI sinus triangulaire ..	54
Figure (IV.7) Allure de la tension de référence et de la porteuse. (V_p et V_{ref})	55
Figure (IV.8) Allure du courant I_a de la source	55
Figure(IV.9) Tension d'entrée du pont convertisseur V_{an}	56
Figure (IV.10) Allures des courants de la source après compensation.	57
Figure (IV.11) Allure du courant de la charge.	57
Figure (IV.12) Allure du courant injecté par le filtre actif.	58
Figure (IV.13) Allures du courant harmonique de référence et le courant injecté par le filtre.	58
Figure (IV.14) Allures du courant et de la tension de la source.	59
Figure (IV.15) Le THD de courant de la source après compensation.	59

Figure (IV.16) Analyse spectrale du courant après compensation 60

Liste des tableaux

Tableau I.2 Engagement EMERAUDE sur les harmoniques de tension (réseaux HTA).	14
Tableau I.3 Engagement EMERAUDE sur les harmoniques de tension (réseaux HTB).	14
Tableau I .4 Limitation EMERAUDE des courants harmoniques.	15
Tableau II.1 Avantages et inconvénients des différents filtrages	28
Tableau II.2 Comparaison entre le filtre actif et le filtre passif	29
Tableau.III.1 Tensions générées par l'onduleur de tension	41

Acronymes

EDF : Electricité de France

THD : Taux de Distorsion Harmonique

CEI : Commission Electrotechnique Internationale

n : Rang de l'harmonique

S : la puissance apparente

Q : la puissance réactive

P : la puissance active

D : la puissance déformante

F.P : le facteur de puissance

EDF : Electricité de France

V_{dc} : tension aux bornes du condensateur de l'onduleur

i_s : courant de la source

FPB : *filtre passe bas*

FAP : filtre actif parallèle.

FAS : Filtre actif série.

MLI : Modulation en largeur d'impulsions.

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

IGBT : Le transistor bipolaire à grille isolée, en anglais *InsulatedGateBipolar Transistor*.

v_{s1} , v_{s2} , v_{s3} : *Tensions de source*

i_{s1} , i_{s2} , i_{s3} : *Courants de source*

i_{c1} , i_{c2} , i_{c3} : *Courants de charge*

i_{inj1} , i_{inj2} , i_{inj3} : *Courants harmoniques injectés*

C dc Condensateur du bus continue

L Inductance

C Capacité

R Résistance

M L'indice de modulation

V_p l'amplitude de la porteuse



BIBLIOGRAPHIE

- [1] **L. ZELLOUMA** « Contribution à l'étude du filtrage des harmoniques des réseaux de distribution à l'aide du filtre actif » Thèse de doctorat. Université badjimokhtar Annaba, 2010.
- [2] **L. MORAN et J. DIXON** « Power Electronics Handbook », Academic Press, Chapter 39 pp.1-36 ,2007.
- [3] **H. AKAGI, Y. KANAZAWA, A. NABAE** « Generalized theory of the instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components », IEEE Trans .Ind .Appl , vol. IA-20, No.9,pp. 652-630, 1984.
- [4] **C. COLLOMBET, J. LUPIN et J. SCHONEK** «Perturbations harmoniques dans les réseaux pollués, et leur traitement ». Cahier Technique Schneider Electric n° 152, septembre 1999.
- [5] **S .BOUGUERRA et I.BOURENNANE** « filtrage actifs parallèles des réseaux électriques avec compensation de l'énergie réactive ». mémoire d'ingénieur d'état en génie électrotechnique, Université de m'sila, 2007.
- [6] **M. Shafiee Koor** : "*Amélioration de la qualité de l'énergie à l'aide de compensateurs Actifs : série, parallèle ou conditionneurs unifiés de réseaux électriques*", Thèse de doctorat de l'école Polytechnique de l'université de Nantes, Nantes, 2006.
- [7] **L. BENCHAITA** *Etude, par simulation numérique et expérimentation, d'un filtre actif Parallèle à structure courant avec une nouvelle méthode de contrôle - commande* » Thèse de docteur de l'université Henri Poincaré, Nancy 1, 1998.
- [8] **B. SZABADOS** «Répercussions sur le réseau électrique de l'alimentation des convertisseurs de grande puissance », RGE, Vol. 12, pp. 791-796,1984.
- [9] **KEBIRI SAMIA** << modélisation et simulation d un filtre actif multi niveaux >> thèse magistrale, université mouloud Mammeri, tizi_ ouzou, 2009

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

- [10] **STEEVE BEAULIEU** << étude et mise au point d'un filtre actif d'harmoniques en vue d'améliorer la qualité de l'alimentation électrique>> mémoire université du quebec a chicoutiml, 2007
- [11] **SOUFIANE BEN ALI Dr. SADDAM BOUHANAK** << étude et simulation d'un filtre actif parallèle quatre fils >> mémoire de Fin d'Étude, Université Echahid Hama Lakhder d'El-Oued 2015
- [12] **Boucif Abdelmalek** << Filtrage actif d'un réseau Électrique >> Mémoire de Fin d'Etudes, Université Mohamed Khider Biskra, 2014
- [13] **Alali Mohamad Alaa Eddin** <<Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension >> THÈSE, École Doctorale Sciences Pour l'Ingénieur ULP – ENSAIS – ENGEES – URS, 2002
- [14] : **BOUKADOUM Aziz** << Contribution à l'étude des stratégies d'identification Harmoniques et de commande basées sur les techniques avancées pour les compensateurs actifs des réseaux électriques >> thèse de doctorat, université badji mokhtar annaba ,2015
- [15] **GHADBANE Ismail** <<Etude Et Réalisation D'un Filtre Actif Parallèle En Utilisant Différentes Stratégies De Contrôle >>, thèse de Doctorat, Université Mohamed **Khider** – **Biskra**, 2016
- [16] **KOUARA HANANE** <<application d'un filtre actif série au contrôle à tension d'un réseau basse tension>>, thèse de magistrale, université de Batna, 2006
- [17] **NEKKAR DJAMEL** <<contribution à l'étude des stratégies de commande des filtres actifs triphasés>>, thèse de magistrale, université Mohamed Cherif, souk- ahras, 2014
- [18] **HAMOUDI FARID** << commande robuste d'un filtre actif shunt a quatre fils>>, thèse de magistrale, université hadj lekher, batna, 2008
- [19] **BOULAHIA ABDELMALEK** << étude des convertisseurs statiques destines à la qualité de l'énergie électrique >>, thèse de magistrale, université de constantine, 2009
- [20] **TADJER SID-Ahmed** <<Etude d'un système de compensation d'harmoniques en utilisant un générateur photovoltaïque <<GPV>> >>, thèse de magistrale, université de M'Hamed bougara-boumerdes, 2008
- [21] **Abdusalem Mohamed Muftah**, « Structures et stratégies de commande des filtres actifs parallèle et hybride avec validations expérimentales», Thèse de Doctorat en génie électrique, Université Henri Poincaré, (France) 2008.
- [22] **Yue MA, Zhu Ling**, « An analysis and simulation of shunt hybrid active power filter » Proceeding of International Conference on Electrical Machines and Systems 2007, Oct. 8-11, Seoul Korea, pp. 90-93, 2007.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

- [23] **Akagi. H**, « Active Harmonic Filters» , Proceedings IEEE, Vol. 93, N° 12, pp. 2128-2141, Décembre 2005.
- [24] **Mekri Fatiha**, « Commande robuste des conditionneurs actifs de puissance », Thèse de Doctorat en génie électrique, Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes, (France) 2007.
- [25] **Amaia Lopez de Heredia Bermeo**, « Commande avancées des systèmes dédiés à l'amélioration de la qualité de l'énergie : de la basse tension à la moyenne tension », Thèse de Doctorat en génie électrique, Institut National Polytechnique de Grenoble, (France) 2006.
- [26] **Tadger Sid Ahmed**, "Étude d'un système de compensation des harmoniques en utilisant un générateur voltaïque GPV", Thèse de Magister en génie électrique, Université M'hamed Bougara de Boumerdès, (Algérie) 2008.
- [27] **B.SAMIR**, « Filtrage actif parallèle des réseaux électriques avec compensation de l'énergie réactive », Thèse ingénieur d'état en génie électrique Université Msila 2007.
- [28] **Thierry Gouraud**, « Identification et rejet de perturbations harmoniques dans des réseaux de distribution électrique », Thèse de Doctorat de l'Ecole Centrale de Nantes, 7 Janvier 1997. de Doctorat de l'Université de Louis Pasteur – Strasbourg, 12 Septembre 2002.
- [29] **C. Lott, O. Lapierre, H. Pouliquen et S. Saadate**, « Filtrage actif des harmoniques en courant et en tension des réseaux électriques: modélisation, simulation numérique et expérimentation », Dec1997, PP.2433-2457.
- [30] **Z. Laid, B.-S. Salem**, « Etude et réalisation d'un onduleur monophasé utilisant la technique PWM à base " MOSFET" », Mémoire d'ingénieur de l'Université de Biskra, 2004.
- [31] **M.D. Epanya** « Application du filtrage actif pour une mise en œuvre de méthode de prédiction et de contrôle d'harmoniques dans un réseau de distribution électrique», Mémoire de maîtrise en génie électrique. Université du Québec 2010.
- [32] **Abdelaziz Chaghi**, « Contribution au contrôle du courant sur un réseau de distribution électrique application d'un compensateur actif », Thèse de Doctorat de l'Université de Batna, 2004.
- [33] **P. Ladoux, G. Collé**, « Compensateur d'harmoniques et de puissance réactive », Publication RESELEC 2002.
- [34] **H. Akagi**, "Modern active filters and traditional passive filters", Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences, vol. 54, no. 3, 2006.
- [35] **M. Routimo, M. Salo, H. Tuusa**, " Comparison of voltage-source and current source shunt active power filters", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 22, no.2, pp. 636-643, March 2007.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

- [36] **S. Karim** « Continuité de service des convertisseurs triphasés de puissance et prototypage "FPGA in the loop application au filtre actif parallèle », Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, Janvier 2009
- [37] **OMEIRI AMAR** «Simulation d'un filtre actif parallèle de puissance pour la compensation des harmoniques de courant », Thèse de doctorat, Université badjimokhtar annaba, 2007.
- [38] **Boucif Abdelmalek** «Filtrage actif d'un réseau Électrique», Mémoire de Fin d'Etudes Université Mohamed Khider Biskra, 2013 / 2014
- [39] **H. Akagi** « New trends in active filters for power conditioning », IEEE Trans. On Industry applications, vol. 32, No. 6, pp. 1312-1322, November/December 1996.
- [40] **H. Akagi** « Control strategy and site selection of a shunt active filter for damping of harmonic propagation in power distribution systems », IEEE Trans. on power delivery, vol. 12, No. 1, pp. 354-363, January 1997.
- [41] **Sahli Abdeslem** « *Filtrage actif et contrôle de puissances : application aux systèmes photovoltaïques interconnectés au réseau.* », Mémoire de Magister en génie électrique. universite ferhat abbas – setif UFAS (algerie)
- [42] **BENNAIDJA Tarek** « *Filtrage actif pour les réseaux déséquilibrés et distordus.* », Mémoire de Magister en génie électrique , universite ferhat abbas – setif-1- ufas (algerie)

Remerciement

Un merci de cœur au « bon Dieu » le tout puissant qui nous a donné la santé, la volonté et le courage afin de réaliser ce modeste travail.

Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements très chaleureusement et notre sincère gratitude :

A Notre promoteur Mr Z. BOUDRIES, pour son orientation, Ses conseils, et sa disponibilité à tout moment de besoin d'orientation. Toutes nos reconnaissances pour vous.

A Mr ALOUI et Mr MADI , pour accepter d'examiner et de juger notre travail.

Nos sentiments de reconnaissance et nos remerciements vont également à l'encontre de toute personne qui a participé de près ou de loin, directement ou indirectement à la réalisation de ce travail.

Que Dieu vous accorde, son aide, dans tous vos projets et activités.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

Mes très cher parents, ma mère qui m'a encouragé et priée durant tout Sa vie pour que je puisse réussir, et à mon père qui est toujours prêt à tout donner afin de me voir devenir ce que je suis, merci mes parents.

A mon frère : Rachid

A ma sœur : Hakima

A Tous mes ami(e)s plus particulièrement l'équipe (Hassou,Didouche, Tinhinane, Bahia,Hakou...)et toute la promotion 2016/2017, Électrotechnique.

H. Rachida

Je dédie ce modeste travail à :

Mes très cher parents, ma mère qui m'a encouragé et priée durant tout sa vie pour que je puisse réussir, et à mon père qui est toujours prêt à tout donner afin de me voir devenir ce que je suis, merci mes parents.

A mes frères : Yahia, Lahlou, Majid,

A mes sœur : Karima, Ounissa

Tous mes ami(e)s plus particulièrement l'équipe (Midou, kouceila, Bilal, Ghilas) et toute la promotion 2016/2017, Électrotechnique.

G. Elhacene

Liste des figures

Figure (I.1) Creux de tension	5
Figure (I.2) Fluctuations de tension	6
Figure (I.3) Déséquilibre en amplitude et en phase courant et tension	7
Figure (I.4) Variation de fréquence	7
Figure (I.5) représentation spectrale Fondamental et inter harmoniques	8
Figure(I.6) Décomposition d'un signal périodique	9
Fig. (I.7) : Le spectre des harmoniques du courant de charge polluante.	11
Figure (I.8) Diagramme de Fresnel des puissances	12
Figure(II.1) montage de steinmtz	18
Figure(II.2) transformateur YZ	18
Figure (II.3) Filtre amorti	20
Figure (II.4) Filtre résonant agissant sur plusieurs rangs d'harmonique	21
Figure (II.5) Filtre actif série	23
Figure (II.6.)Filtre actif parallèle	24
Figure (II.7)Filtre combiné parallèle-série (UPQC)	25
Fig (II.8) Filtre actif série et filtre passif parallèle	26
Fig (II.9) Filtre actif série connecté en série avec un filtre passif parallèle	26
Fig(II.10) Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle.	27
Figure (III. 1) Principe du filtre actif parallèle.....	32
Figure (III. 2) Schéma et les signaux générés par le filtre actif parallèle.	33
Figure. III.3. Structure générale du filtre actif parallèle	33
Figure (III-4): Structure onduleur tension.	35
Figure (III-5): Structure d'un onduleur de tension triphasé	35
Figure (III-6): Principe de la commande des courants par hystérésis.	37

Figure (III-7): Principe de commande des courants par MLI	38
Figure(III-8): Schéma de principe d'onduleur monophasé commandé par MLI sinus-triangle.....	38
Figure.III.9. Onduleur de tension à trois bras employé comme FAP.	39
Figure. III.10.Représentation vectorielle des tensions générées par l'onduleur de tension d'un FAP	42
Figure (III.11) : Schéma représentant le principe d'identification des courants harmoniques.	44
Figure(III.12.) Schéma représentant le principe de séparation des puissances.....	46
Figure (III.13) : Structure d'un filtre actif shunt basé sur la méthode des puissances instantanées	47
Figure (III.14) Principe de la méthode (pq).	49
Figure(IV.1)Structure générale du filtre actif parallèle.	50
Figure (IV.2.) Schéma de simulation du circuit étudié	52
Figure (IV.3.) Forme d'ondes du courant de source	52
Figure (IV.4) analyse spectrale du courant avant le filtrage	53
Figure (IV.5) Allure du courant I_a et la tension V_{sa} de la source	53
Figure(IV.6) Schéma bloc du filtre actif parallèle commandé par MLI sinus triangulaire ..	54
Figure (IV.7) Allure de la tension de référence et de la porteuse. (V_p et V_{ref})	55
Figure (IV.8) Allure du courant I_a de la source	55
Figure(IV.9) Tension d'entrée du pont convertisseur V_{an}	56
Figure (IV.10) Allures des courants de la source après compensation.	57
Figure (IV.11) Allure du courant de la charge.	57
Figure (IV.12) Allure du courant injecté par le filtre actif.	58
Figure (IV.13) Allures du courant harmonique de référence et le courant injecté par le filtre.	58
Figure (IV.14) Allures du courant et de la tension de la source.	59
Figure (IV.15) Le THD de courant de la source après compensation.	59

Figure (IV.16) Analyse spectrale du courant après compensation	60
--	----

Liste des tableaux

Tableau I.2 Engagement EMERAUDE sur les harmoniques de tension (réseaux HTA).	14
Tableau I.3 Engagement EMERAUDE sur les harmoniques de tension (réseaux HTB).	14
Tableau I .4 Limitation EMERAUDE des courants harmoniques.	15
Tableau II.1 Avantages et inconvénients des différents filtrages	28
Tableau II.2 Comparaison entre le filtre actif et le filtre passif	29
Tableau.III.1 Tensions générées par l'onduleur de tension	41

Acronymes

EDF : Electricité de France

THD : Taux de Distorsion Harmonique

CEI : Commission Electrotechnique Internationale

n : Rang de l'harmonique

S : la puissance apparente

Q : la puissance réactive

P : la puissance active

D : la puissance déformante

F.P : le facteur de puissance

EDF : Electricité de France

V_{dc} : tension aux bornes du condensateur de l'onduleur

i_s : courant de la source

FPB : *filtre passe bas*

FAP : filtre actif parallèle.

FAS : Filtre actif série.

MLI : Modulation en largeur d'impulsions.

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

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

v_{s1} , v_{s2} , v_{s3} : *Tensions de source*

i_{s1} , i_{s2} , i_{s3} : *Courants de source*

i_{c1} , i_{c2} , i_{c3} : *Courants de charge*

i_{inj1} , i_{inj2} , i_{inj3} : *Courants harmoniques injectés*

C dc Condensateur du bus continue

L Inductance

C Capacité

R Résistance

M L'indice de modulation

V_p l'amplitude de la porteuse

Introduction générale.....	1
Chapitre I : Introduction à la pollution harmonique	
Introduction	3
I.1. Qualité de l'énergie électrique	4
I.2.Perturbation électrique	5
I.2.1.Creux de tension.....	5
I.2.2.coupure de tension	6
I.2.3.Fluctuation de tension	6
I.2.4. Déséquilibre du système triphasé.....	6
I.2.5.Variation de fréquence	7
I.2. 6.Harmonique et inter harmonique	8
I.2.6.1.Source d'harmoniques.....	8
I.2.6.2.Conséquences néfaste des harmoniques.....	9
I.3.Décomposition d'un signal périodique	9
I.3.1. Grandeurs caractéristiques	10
I.3.1.1. Grandeur harmonique.....	10
I.3.1.2.Rang de l'harmonique	10
I.3.1.3.Série de Fourier	10
I.3.1.4.Valeur efficace d'une grandeur alternative	11
I.3.1.5.Taux de distorsion harmonique	11
I.3.1.6. Spectre d'harmonique	11
I.4.Influence des harmoniques sur le facteur de puissance FP	12
I.5. Réglementation de perturbation	13
Chapitre II : Solutions de dépollution	
Conclusion.....	16
Introduction	17
II.1.Techniques de dépollutions	17
II.1.1.Techniques traditionnelles	17
II.1.1.1.Solutions de dépollution des courants harmoniques	17
II.1.1.1.1.Compensation de la puissance réactive.....	17
II.1.1.1.2.Rééquilibrage des courants du réseau électrique	17
II.1.1.1.3.Compensation des courants harmoniques.....	18
a-Transformateur à secondaire zigzag	18
b-Transformateur à plusieurs secondaires	19
II.1.1.1.4.Placement d'une inductance de ligne.....	19

II.1.1.1.5. Augmentation de la puissance de court-circuit	19
II.1.1.2. Compensation des tensions harmoniques	19
➤ Principe de fonctionnement	20
a- Filtre amorti	20
➤ Quelques avantages du filtre amorti	20
b- Filtre résonant	21
II.1.2. Techniques modernes	21
II.1. 2.1. Filtrage actif	21
➤ Comparaison des différents filtres	28
Conclusion	30

Chapitre III : Etude d'un filtre actif parallèle

Introduction	31
III. 1 Principe du filtre actif parallèle	31
III-2 Structure d'un filtre actif parallèle	33
III-3. Structure de l'onduleur de tension	34
III-4 Onduleur de tension triphasé	35
III.5 Principe des onduleurs MLI	36
III.6 Commande de l'onduleur	36
III.6.1. Commande par hystérésis	36
III. 6. 2. Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI)	37
III. 6. 2. 1. Principe de MLI sinus-triangle	38
III.7. Modélisation de l'onduleur de tension à deux niveaux	39
III.8. Stratégie de commande du filtre actif parallèle	42
III.9. identification des courants harmonique	43
III.9.1. Méthode des courants	43
III.9.1 .1. Algorithme de la méthode des courants	44
III.9.2. Méthodes sur les puissances instantanées	44
III.9.3. Méthode de détection synchrone	48
Conclusion	49

Chapitre IV : Simulation et interprétation des résultats

Introduction	50
IV .1 .Structure générale du filtre parallèle	50
IV .2 .Modélisation et simulation du filtre actif parallèle	51
IV.3. Résultats de simulation et analyse	52
IV.3.1. Résultats de simulation sans compensation	52
IV.4.1 Méthode des courants	54
III.4.1 Résultats de simulation :	54
III.4.1.2 Interprétation des résultats :	56

IV.5.1.2 Interprétation des résultats	60
IV.6 Conclusion.....	61
Conclusion Générale	62

Introduction générale

La qualité de l'électricité est devenue un sujet stratégique pour les compagnies d'électricité, les personnels d'exploitation, de maintenance ou de gestion de sites tertiaires ou industriels, et les constructeurs d'équipements. L'une des propriétés particulières de l'électricité est que certaines de ses caractéristiques dépendent à la fois du producteur / distributeur d'électricité, des fabricants d'équipements et du client. Parmi les principaux phénomènes qui dégradent la qualité de l'Energie électrique du client, on trouve les distorsions harmoniques.

La problématique des harmoniques dans le réseau électrique, également appelée pollution harmonique, n'est pas un phénomène nouveau. La distorsion harmonique est générée par les charges non linéaires connectées au réseau et qui absorbent des courants non sinusoïdaux. Ces harmoniques de courant vont à leur tour générer des tensions harmoniques aux différents points de connexion au réseau.

Dans les systèmes triphasés, Un récepteur triphasé qui n'est pas équilibré et que l'on alimente par un réseau triphasé équilibré conduit à des déséquilibres de tension dus à la circulation de courants non équilibrés dans les impédances du réseau et provoque des courants excessifs au niveau du neutre.

Ces courants excessifs, les harmoniques injectés, la présence de puissance réactive, les déséquilibres et autres problèmes générés par ce type de charge conduit à un affaiblissement du rendement global du système et du facteur de puissance. [42]

Pour faire face à ce problème, la solution classique qui est connue depuis bien longtemps consiste en l'utilisation des filtres passifs. Cette solution est la plus répandue et pratiquement la plus simple et la moins chère mais le filtrage passif pose certains problèmes : manque d'adaptabilité lors de variations de l'impédance du réseau, de la charge et résonance possible avec l'impédance du réseau et dans certains cas défavorables où cette résonance est excitée, celle-ci peut entraîner une tension harmonique élevée et un courant harmonique important dans la capacité du filtre et dans le réseau. L'objet de notre travail est d'introduire un filtre actif parallèle pour éliminer les pollutions créées par les différentes charges non linéaires.

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.

Introduction

La pollution harmonique est l'une des préoccupations principales des spécialistes dans le domaine du génie électrique ces trente dernières années.

Si au début de leur apparition, les harmoniques étaient essentiellement causés par la saturation des circuits magnétiques, aujourd'hui c'est plutôt les charges non linéaires à base d'électronique de puissance qui en sont la cause principale. En effet, de nos jours, on trouve les systèmes à base d'électronique de puissance dans la production d'énergie, comme l'excitation des alternateurs, le couplage au réseau des sources de productions décentralisées à travers une interface d'électronique de puissance. Dans la distribution d'énergie, on trouve des systèmes de compensation et d'optimisation de puissance. Finalement, chez le récepteur final, les charges sont alimentées à travers des redresseurs, gradateurs, . . . etc. Il ne faut surtout pas cerner le problème de la pollution harmonique autour des charges industrielles, car quelques charges domestiques monophasées comme le matériel informatique, téléviseur, climatisation ou l'éclairage fluorescent sont plus polluantes. Ces charges non linéaires absorbent des courants non sinusoïdaux, et par conséquent engendrent des harmoniques dont la circulation dans le réseau cause une dégradation de l'onde de tension et augmente les pertes de puissance, sans oublier la perturbation au fonctionnement normal de certains équipements, voir même le risque de destruction. Les mesures de puissance et de la qualité du réseau électrique prennent beaucoup d'importance. Parallèlement, il existe un besoin croissant pour une meilleure qualité et une plus grande fiabilité du réseau électrique. Par conséquent, l'utilisation accrue, dans l'industrie, des systèmes commandés à base d'électronique de puissance provoque de plus en plus des problèmes de perturbation au niveau des réseaux électriques [1], tels que les distorsions harmoniques, les déséquilibres, le papillotement, les coupures brèves, les creux de tension, les surtensions temporaires, les variations de fréquence et de tension, et les surtensions transitoires. En outre, ces perturbations peuvent générer des nuisances, pannes ou des dégâts par l'affectation d'un ou plusieurs paramètres de la tension du réseau électrique suivants: la fréquence, l'amplitude, la symétrie des tensions triphasées et la forme de l'onde.

I.1. Qualité de l'énergie électrique

La qualité de l'énergie est une notion assez large qui recouvre à la fois la qualité de la fourniture électrique, la qualité de l'onde de tension et la qualité des courants. Lorsque la tension est présente, les principaux phénomènes pouvant l'affecter sont d'une part les variations lentes : creux de tension, surtensions, coupures, déséquilibres et d'autre part des variations rapides : surtensions transitoires, flicker ainsi que les harmoniques. La qualité des courants reflète par contre la possibilité des charges à fonctionner sans perturber ni réduire l'efficacité du système de puissance. C'est pourquoi certains considèrent que la qualité de l'électricité se réduit à la qualité de la tension [6]. La qualité de l'alimentation électrique ou qualité de l'onde fait référence à la mesure du degré de conformité d'une source d'alimentation électrique par rapport à un certain nombre de critères ou de normes à caractère quantitatif et absolu. L'énergie électrique est délivrée sous forme d'un système triphasé de tensions sinusoïdales. Les paramètres caractéristiques de ce système sont les suivants :

- La fréquence ;
- L'amplitude ;
- La forme d'onde qui doit être sinusoïdale ;
- La symétrie du système triphasé, caractérisée par l'égalité des modules des trois tensions et de leurs déphasages relatifs.

Tout phénomène physique affectant une ou plusieurs de ces caractéristiques peut être considéré comme perturbation. En pratique, ces perturbations sont classées selon la durée du phénomène. Ainsi, il est possible de distinguer :

- Les altérations de l'onde de tension (harmoniques, déséquilibre, flicker). Ces phénomènes sont permanents ou durent au minimum plusieurs minutes ;
- Les creux de tension et coupures brèves d'une durée de l'ordre d'une à quelques secondes ;
- Les surtensions transitoires, de durée inférieure à une période [7].

I.2. Perturbation électrique

L'énergie électrique est délivrée sous forme de tension, caractérisée par sa fréquence, son amplitude et sa forme d'onde qui doit être sinusoïdale. La qualité de la tension peut être affectée, soit par des perturbations aléatoires à caractère accidentel, soit par des perturbations existantes en permanence ou pendant des instants de durées bien déterminées. Ces perturbations sont classées comme suit :

I.2.1. Creux de tension

Le creux de tension est une diminution de son amplitude (entre 10% à 90% de la tension nominale) pendant un temps de 10 millisecondes jusqu'à quelques secondes. Les creux de tension sont dus en général à des défauts dans les réseaux publics ou ceux des utilisateurs. Ils apparaissent aussi lors des manœuvres d'enclenchement mettant en jeu des courants de fortes intensités (moteurs, transformateurs, etc.). [2]

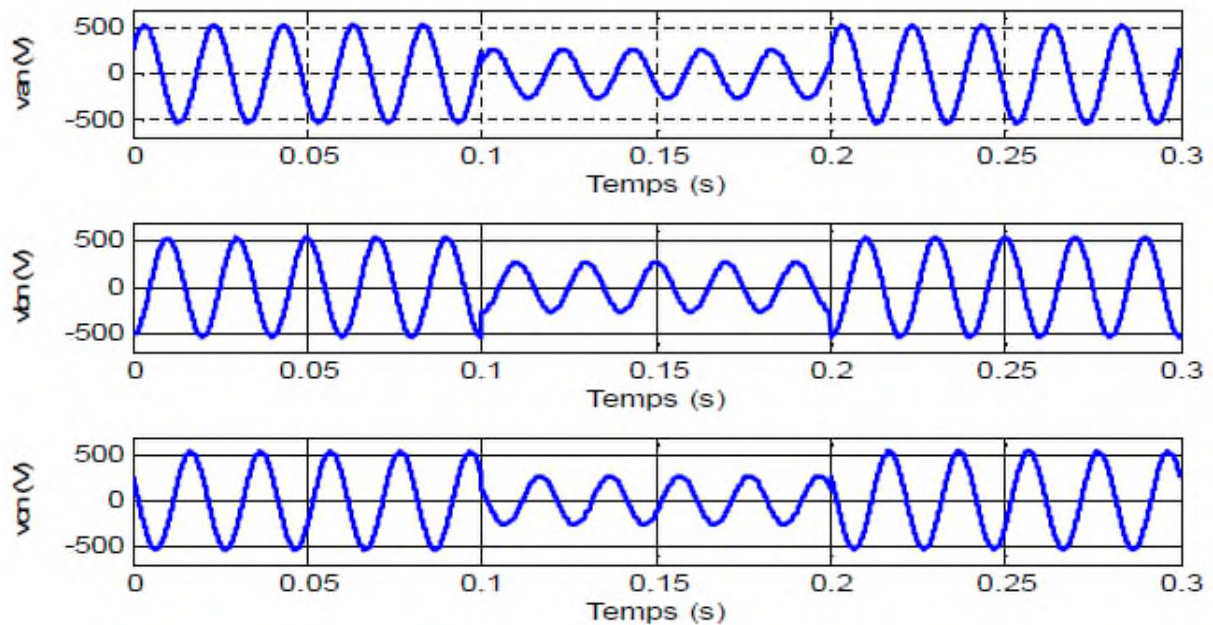


Figure. 1.1 Creux de tension. [14]

I.2.2.coupure de tension

Une coupure brève est une diminution de la tension pendant une courte durée qui n'excède par une minute. Ces coupures sont dues au fonctionnement du système de protection des réseaux aériens évitant ainsi des coupures longues. [2] La figure 1.1 montre un exemple d'un creux de tension triphasé entre 0.1 à 0.2 s.

I.2.3.Fluctuation de tension

Les fluctuations de tension sont des variations périodiques ou erratiques de l'enveloppe de la tension qui se produisent à des intervalles de temps de quelques centièmes de secondes. L'amplitude de la tension doit se situer dans une bande de $\pm 10\%$ de sa valeur nominale. Ces fluctuations entraînent des variations de flux lumineux pour les lampes à incandescence créant un papillotement de la lumière. [2] La figure 1.2 montre un exemple d'une fluctuation de tension.

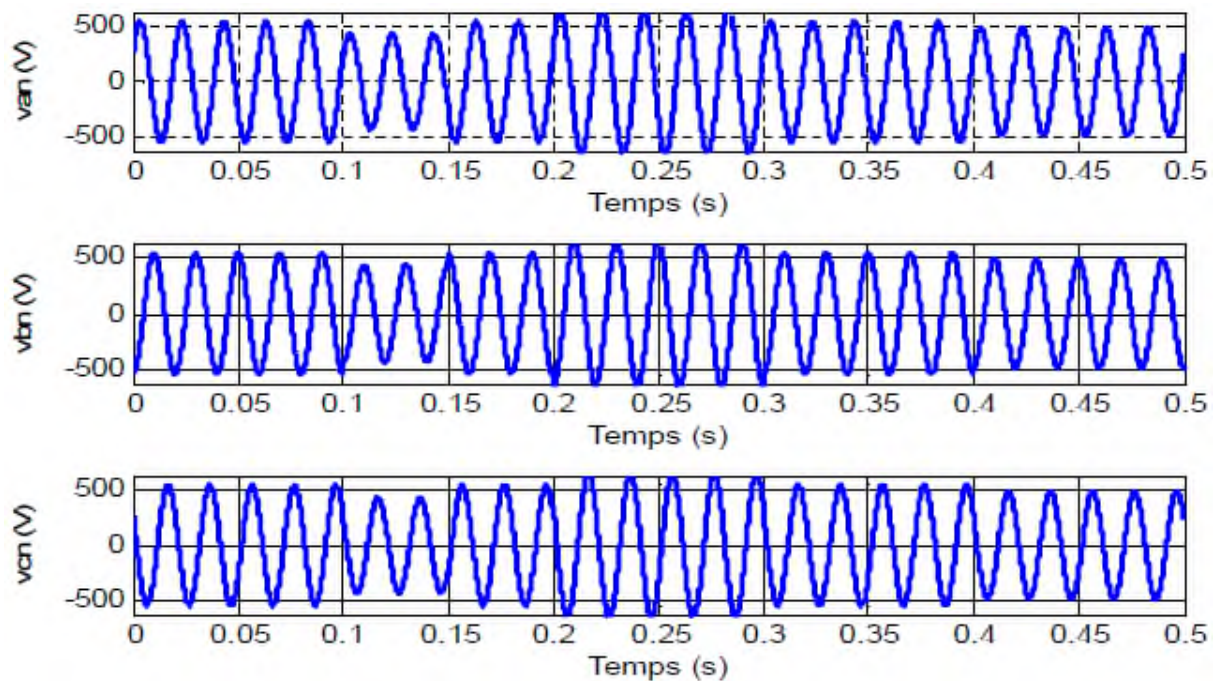
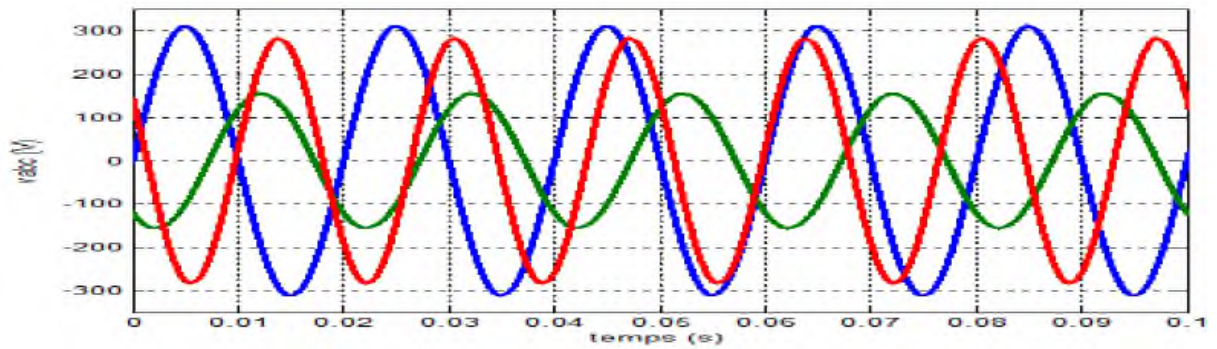


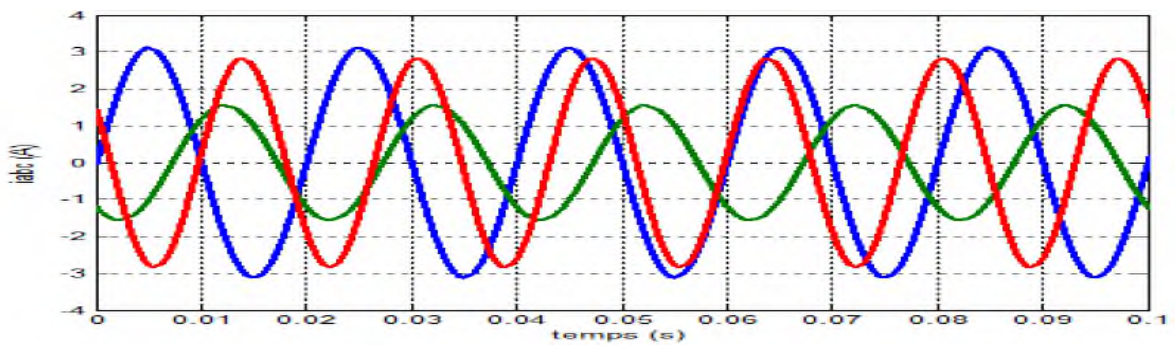
Figure. 1.2. Fluctuations de tension. [14]

I.2.4. Déséquilibre du système triphasé

Lorsque les trois tensions ne sont pas identiques en amplitude et/ou ne sont pas décalées d'un angle de 120° les unes par rapport aux autres, on parlera du déséquilibre du système triphasé. Les deux figures (a. la courbe de la tension et b. la courbe du courant) représentent respectivement, un exemple de déséquilibre de courants et de tensions d'un système triphasé.



a. la courbe de la tension



b. la courbe du courant

Figure. 1.3 Déséquilibre en amplitude et en phase. [14]

I.2.5. Variation de fréquence

Les réseaux de distributions ou de transport ont une fréquence constante, sa variation est très rare sauf dans des circonstances exceptionnelles, comme dans le cas de certains défauts graves sur le réseau. Dans les conditions normales d'exploitations, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle de 50 Hz \pm 1%. La figure I.4 montre un exemple sur la variation de fréquence d'un réseau électrique.

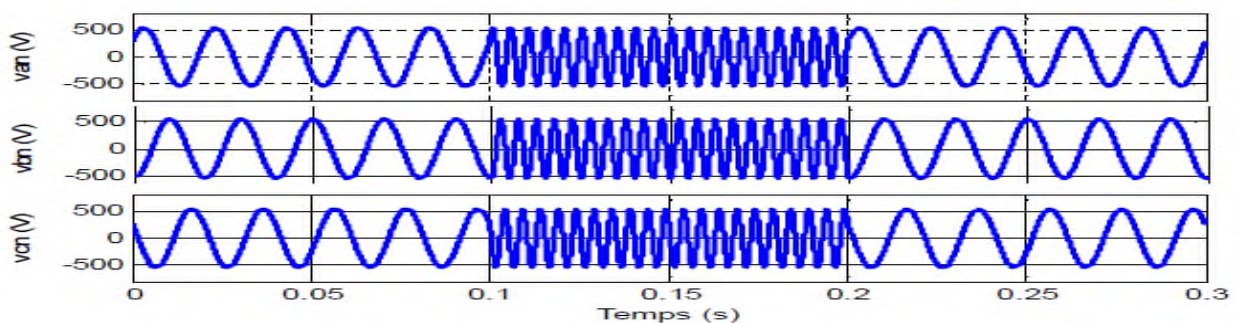


Figure. 1.4 Variation de fréquence. [14]

I.2. 6.Harmonique et inter harmonique

Les harmoniques sont une superposition à l'onde fondamentale (50Hz) des ondes sinusoïdales mais de fréquences multiples entier du fondamental. La principale source de la présence des harmoniques dans les réseaux électriques est l'utilisation intensive des convertisseurs statiques.

Les inter harmoniques sont superposés à l'onde fondamentale mais ne sont pas des multiples entiers de la fréquence des réseaux. Comme montre la (figure.1.5).

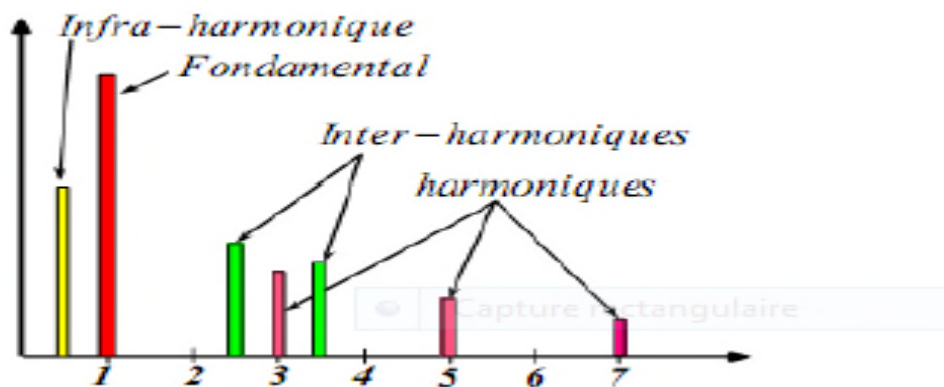


Figure. 1.5 Fondamental et inter-harmoniques. . [41]

I.2.6.1.Source d'harmoniques

La cause principale de l'existence des harmoniques de tension est l'injection des courants non sinusoïdaux par des charges non linéaires, ou des charges déséquilibrées branchées au réseau. Les harmoniques sont des perturbations permanentes affectant la forme d'onde de la tension du réseau. Ces perturbations résultent de la superposition, sur l'onde fondamentale, d'ondes également sinusoïdales mais de fréquences multiples de celle du fondamental [6]. En général, les harmoniques pairs sont négligeables et seuls les harmoniques impairs existent [7].

I.2.6.2. Conséquences néfastes des harmoniques

Les tensions et les courants harmoniques ont des effets indésirables et néfastes sur le fonctionnement, la rentabilité et la durée de vie de certains équipements électriques [3].

- Alternateurs : pertes supplémentaires dans les enroulements statoriques et dans les amortisseurs liés à la circulation des courants harmoniques.
- Lignes : pertes ohmiques supplémentaires.
- Moteur à courant alternatif : pertes supplémentaires dans le fer et dans les enroulements plus réchauffement du moteur.
- Condensateur de puissance : pertes diélectriques supplémentaires conduisant au vieillissement rapide du condensateur
- Equipement de l'électronique de puissance : dysfonctionnement lié à la déformation de la tension.

I.3. Décomposition d'un signal périodique

Un signal déformé se compose généralement de plusieurs harmoniques, les courbes de la figure nous montrent la décomposition d'un signal périodique en série de FOURIER.

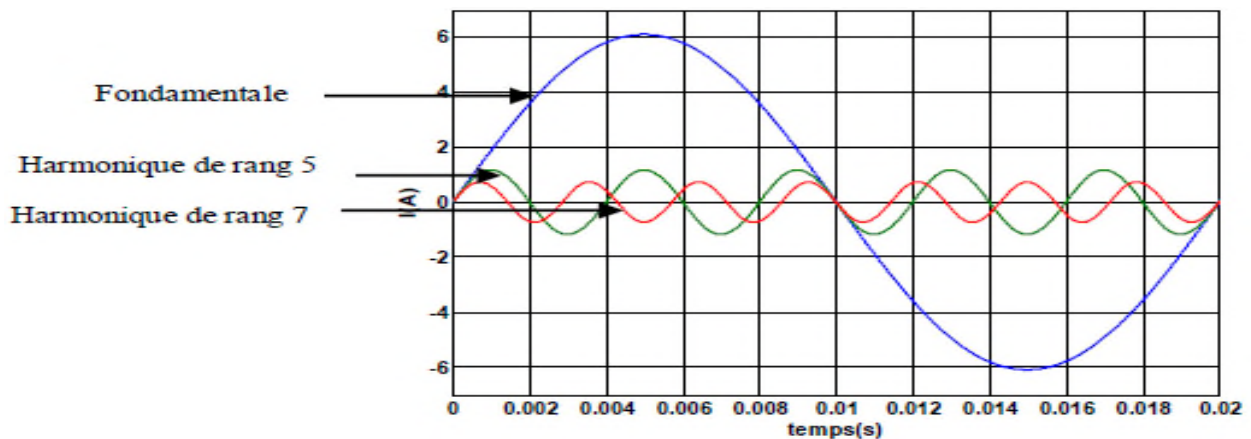


Figure. I.6. Décomposition d'un signal périodique. [11]

I.3.1. Grandeurs caractéristiques

I.3.1.1. Grandeur harmonique

C'est l'une des composantes sinusoïdales de la variation d'une grandeur physique possédant une fréquence multiple de celle de la composante fondamentale. L'amplitude de l'harmonique est généralement de quelques pour cent de celle du fondamental. [4]

I.3.1.2. Rang de l'harmonique

C'est le rapport de sa fréquence f_n à celle de la fondamentale (généralement la fréquence industrielle, 50 ou 60 Hz) :

$$n = f_n / f_1 \quad (\text{I.1})$$

Par principe, le fondamental f_1 a le rang un. [5]

I.3.1.3. Série de Fourier

« tout signal périodiques de période $T = 1/f$, peut se décomposer en une somme infinie des termes sinus et cosinus de fréquences multiples de f ». Mathématiquement, cela s'écrit :

$$S(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \quad (\text{I.2})$$

La valeur a_0 représente la valeur moyenne de $s(t)$.

On calcule les coefficients a_n et b_n avec les formules suivantes :

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T S(t) \cos(n\omega t) dt \quad \text{et} \quad b_n = \frac{2}{T} \int_0^T S(t) \sin(n\omega t) dt \quad (\text{I.3})$$

De plus, il existe quelques prérequis qui permettent de ne pas faire de calculs inutiles :

- si la fonction est symétrique par glissement, la valeur a_0 est nulle ;
- si la fonction est paire, les coefficients b_n sont nuls ;
- si la fonction est impaire, les coefficients a_n sont nuls ;
- si la fonction possède une symétrie sur ses deux demi-périodes, les termes d'indice pairs sont nuls. [5]

I.3.1.4. Valeur efficace d'une grandeur alternative

Il y a identité entre l'expression usuelle de cette valeur efficace calculée à partir de l'évolution temporelle de la grandeur alternative $|y(t)|$ et l'expression calculée à partir de son contenu harmonique :

$$Y^2_{\text{eff}} = \int_0^T \frac{1}{T} \times Y^2(t) dt = \sum_{n=1}^{n=\infty} Y_n^2 \quad (\text{I.4})$$

Notons qu'en présence d'harmoniques, les appareils de mesure doivent avoir une bande passante élevée (> 1 kHz). [6]

I.3.1.5. Taux de distorsion harmonique

Le taux de distorsion est un paramètre qui définit globalement la déformation d'une grandeur alternative.

$$\text{THD (\%)} = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n Y_i^2}}{Y_1} \times 100 \quad (\text{I.5})$$

Y_1 : La valeur efficace de la composante fondamentale (du courant ou de la tension).

Y_n : Les valeurs efficaces exactes des différentes composantes harmoniques (du courant ou de la tension).

I.3.1.6. Spectre d'harmonique

C'est la représentation de l'amplitude des harmoniques en fonction de leur rang, la valeur des harmoniques étant généralement exprimée en pourcentage du fondamental par un histogramme (figure I.2). [5]

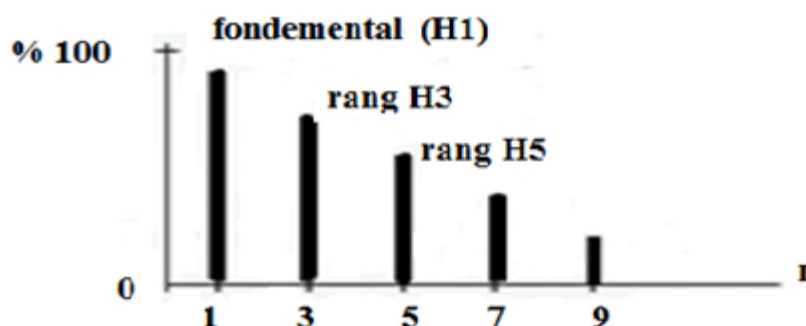


Figure I.7. Le spectre des harmoniques du courant de charge polluante. Il est à noter que l'amplitude (l'énergie) des raies harmoniques décroît en fonction de leur rang.

I.4. Influence des harmoniques sur le facteur de puissance FP

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

En présence des harmoniques, la puissance apparente S est composée de trois parties ; actives P, réactive Q et déformante D. Cette dernière est la puissance provoquée par les courants harmoniques, comme montre par équation suivante :

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

$$P = 3.U. I_1 \cos \varphi_1 \quad (\text{I.7})$$

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

$$Q = 3.U.I_1 . \sin \varphi_1$$

(I.8)

$$D = 3V_{\text{eff}} \sqrt{\sum_{h=2}^{50} \frac{I^2}{h}} \quad (\text{I.9})$$

Le facteur de puissance (*F.P.*) devient :

$$F.P. = \frac{P}{\sqrt{p^2 + Q^2 + D^2}} \quad (\text{I.10})$$

Remarque : le facteur de puissance décroît à cause de la puissance déformante qui est générée par les perturbations harmoniques

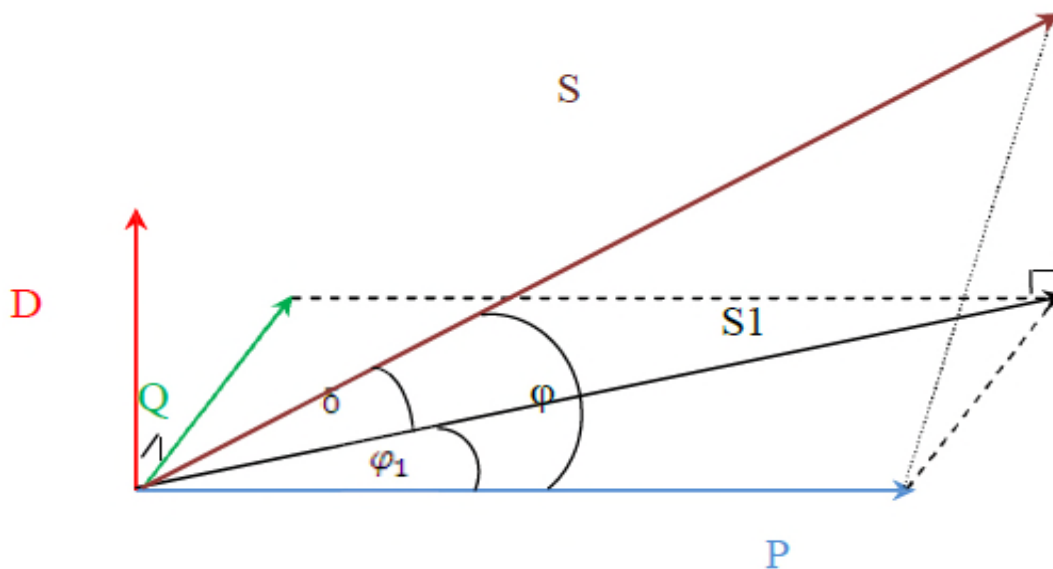


Figure I.8. Diagramme de Fresnel des puissances. [11]

I.5. Réglementation de perturbation

D'après le contrat EMERAUDE d'EDF, les deux parties (fournisseur et récepteur) doivent s'engager à respecter les normes limitant les perturbations harmoniques.

De son côté, EDF s'engage à ce que les taux individuels de tension harmonique, exprimés en pourcentage de la tension fondamentale $V(t)$ pour les réseaux HTA (1 à 50 kV), ne dépassent pas les seuils donnés dans le tableau ci-dessous.

Tableau (I.2): Engagement EMERAUDE sur les harmoniques de tension (réseaux HTA). .
[11]

		Multiple de 3		Non Multiple de 3	
Vh/V ₁ (%)	Rang	Vh/V ₁ (%)	Rang	Vh/V ₁ (%)	Rang
2	2	5	3	6	5
1	4	1.5	9	5	7
0.5	6 à 24	0.5	15 et 21	3.5	11
Le THD global de tension ne dépassant pas 3 %				3	13
				2	17
				1.5	19.23 et 25

Concernant les réseaux HTB (plus de 50 kV), EDF s'engage à ne pas dépasser les seuils donnés dans le suivant :

Tableau (I.3) : Engagement EMERAUDE sur les harmoniques de tension (réseaux HTB).

Harmoniques pairs		Harmoniques impairs			
		Multiple de 3		Non Multiple de 3	
Vh/V ₁ (%)	Rang	Vh/V ₁ (%)	Rang	Vh/V ₁ (%)	Rang
1.5	2	2	3	2	5 et 7
1	4	1	9	1.5	11 et 13
0.5	6 à 24	0.5	15 et 21	1	17 et 19
Le THD global de tension ne dépassant pas 3 %				0.7	23 et 25

Les règles de limitation des courants harmoniques recommandées aux clients par EDF à travers le contrat EMERAUDE sont données dans le tableau ci-dessous:

Tableau (I.4) Limitation EMERAUDE des courants harmoniques. . [11]

I_h /I₁ (%)	Rangspaires	I_h/I₁ (%)	Rangs impaires
2	2	4	3
1	4	5	5 et 7
0.5	>4	2	9
		3	11 et 13
		2	>13

Les limitations en tension harmonique que les clients d'EDF doivent respecter sont :

- Pour un harmonique pair : $\frac{V_h}{V_1} = 0.6 \%$;
- Pour un harmonique impair : $\frac{V_h}{V_1} = 1 \%$;
- Pour le taux de distorsion globale de tension : THD <1,6 %.

Il est d'usage de dire que, dans les installations industrielles, les tensions harmoniques dont le THD est inférieur à 5% ne produisent pas d'effet notable. Entre 5% et 7% on commence à observer des effets, et pour plus de 10% les effets sont quasi certains.

Concernant la puissance réactive, EDF autorise ses clients à en consommer, sans être facturé, Jusqu'à 40% de la puissance active absorbée. Cela se traduit, pour des charges linéaires, par un facteur de puissance $\cos\phi = 0,928$ ou par un angle de phase $21,8^\circ$. [8]

Conclusion

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.

Introduction

Ce chapitre sera consacré à l'étude théorique des différentes structures utilisées actuellement dans les réseaux pour l'amélioration de la qualité de l'énergie. Pour dépolluer le courant et la tension harmonique et diminuer ainsi le taux de distorsion harmonique THD, On peut agir à deux niveaux :

- du côté distributeur en filtrant la tension source ;
- du côté client en compensant les courants harmoniques absorbés par la charge non linéaire [9].

II.1. Techniques de dépollutions

II.1.1. Techniques traditionnelles

Elles sont présentées selon le type de dépollution, on peut citer :

II.1.1.1. Solutions de dépollution des courants harmoniques

II.1.1.1.1. Compensation de la puissance réactive

La puissance réactive est majoritairement consommée par les moteurs asynchrones et plus récemment par des dispositifs à base d'électronique de puissance. Différentes méthodes de compensation sont utilisées pour relever le facteur de puissance [19], la plus simple consiste à placer des batteries de condensateurs en parallèle avec le réseau à proximité des charges qui ont un mauvais facteur de puissance pour la compensation locale ou près d'un transformateur d'alimentation pour la compensation globale [13].

II.1.1.1.2. Rééquilibrage des courants du réseau électrique

On peut rééquilibrer les courants dans un réseau par deux méthodes :

- La répartition égale des charges monophasées et biphasées sur les trois phases du réseau.
- l'installation d'un compensateur passif, appelé *montage de Steinmetz* (figure. II.1), qui permet d'équilibrer l'impédance du réseau mais uniquement à la fréquence 50 Hz, car à des fréquences différentes de 50 Hz, le *montage de Steinmetz* provoque un fort déséquilibre avec résonances qu'il faut éviter d'exciter à proximité d'un générateur d'harmoniques. [13], [16].

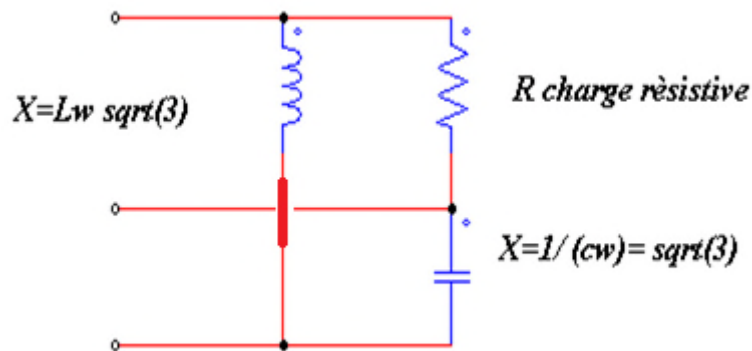


Figure. II.1 : montage de Steinmetz. [9]

II.1.1.1.3.Compensation des courants harmoniques

L'objectif de cette méthode est de diminuer ou arrêter la propagation des courants harmoniques dans le réseau en utilisant un transformateur approprié.

a-Transformateur à secondaire zigzag

Le couplage en zigzag (figure II 2), est utilisé lorsque la charge non linéaire est du type redresseur ou gradateur. Ce couplage empêche le passage des harmoniques crées par ces charges au primaire du transformateur [9].

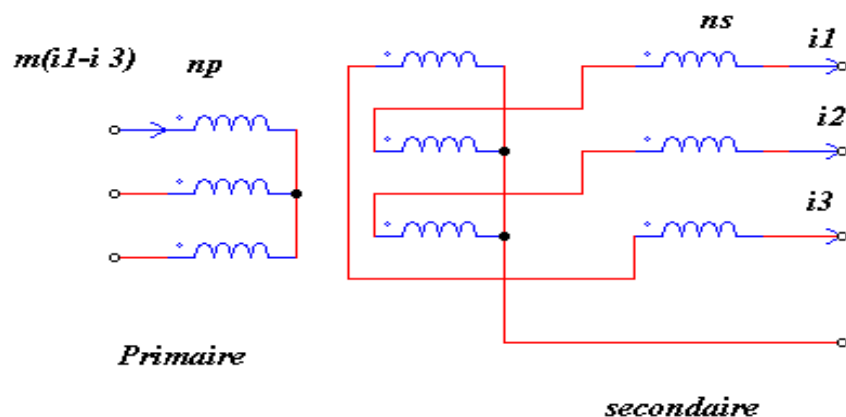


Figure. II.2.transformateur YZ. [9]

b-Transformateur à plusieurs secondaires

Cette méthode permet de réduire le contenu spectrale des courants harmoniques, le nombre de secondaire est inversement proportionnel au taux de distorsion, plus le nombre de secondaire augmente plus le taux de distorsion diminue, si bien que le montage devient complexe. [9]

II.1.1.1.4.Placement d'une inductance de ligne

Cette solution est utilisée pour les entraînements à vitesse réglable (variateurs de vitesse) et les redresseurs, elle consiste à insérer une inductance série en amont d'une charge non linéaire, la distorsion harmonique est divisée approximativement par deux. Elle a pour but la limitation de la prolifération des harmoniques [19].

II.1.1.1.5.Augmentation de la puissance de court-circuit

Si on néglige les phénomènes de résonance, la puissance harmonique diminue en augmentant la puissance de court-circuit. La diminution du taux de distorsion harmonique est le fruit de la diminution totale de l'impédance en amont de la charge non linéaire [17].

II.1.1.2.Compensation des tensions harmoniques***II.1.1.2.1.Diminution de l'impédance de la source***

Lorsque l'impédance de la source est grande cela entraîne une augmentation du THD en tension pour un courant absorbé non sinusoïdal, donc on doit abaisser l'impédance de la source. En pratique cela revient, par exemple, à brancher la charge polluante sur un transformateur surdimensionné en puissance apparente et de tension de court-circuit très faible.

II.1.1.2 .2.filtre passif

Il représente une solution conventionnelle aux problèmes de distorsion harmonique et qui existe depuis longtemps. Les filtres passifs sont des éléments à base d'inductances, capacités et résistances configurés et réglés pour contrôler les harmoniques.

➤ Principe de fonctionnement

Le principe du filtrage passif est d'éviter les courants harmoniques au même temps éliminer les tensions harmoniques résultantes en modifiant l'impédance locale du réseau [10].

On peut classer les filtres passifs selon les paramètres suivants:

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

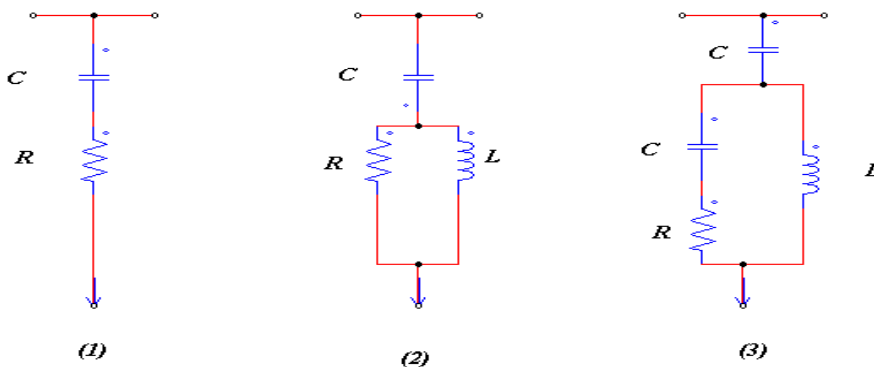
On utilise généralement deux types de filtre passif.

a-Filtre amorti

Le filtre amorti peut réduire le risque de résonance non souhaitée, et permet de réduire considérablement la taille du filtre passif, en fonctionnant sur une large gamme de fréquence. On distingue trois types de filtre amorti (figure II.3): le filtre de premier ordre est très peu utilisé car il exige une grande capacité et provoque des pertes de puissance élevées. Les filtres de deuxième et troisième ordre sont plus performants. [17], [18].

➤ Quelques avantages du filtre amorti

- ✓ Performances moins sensibles aux variations de température, aux déviations de fréquence et aux tolérances des composants ;
- ✓ Faible valeur d'impédance pour une large gamme de fréquence harmonique. [10]



1-filtre amorti premier ordre 2-filtre amorti deuxième ordre 3-filtre amorti troisième ordre

Figure. II.3 .filtre amorti. [9].

b- Filtre résonant

Le filtre passif résonant (figure II .4), est constitué d'un circuit résonant composé d'un condensateur et d'une inductance en série accordé sur la fréquence de l'harmonique que l'on veut éliminer. Ce filtre a pour caractéristique une impédance très faible à un courant harmonique déterminé [22] . Lorsqu'on souhaite réaliser le filtrage d'un signal déformé entaché par plusieurs courants harmoniques, il est nécessaire de prévoir un ensemble de filtres, chacun d'entre eux agit sur le rang harmonique à éliminer. [20], [17].

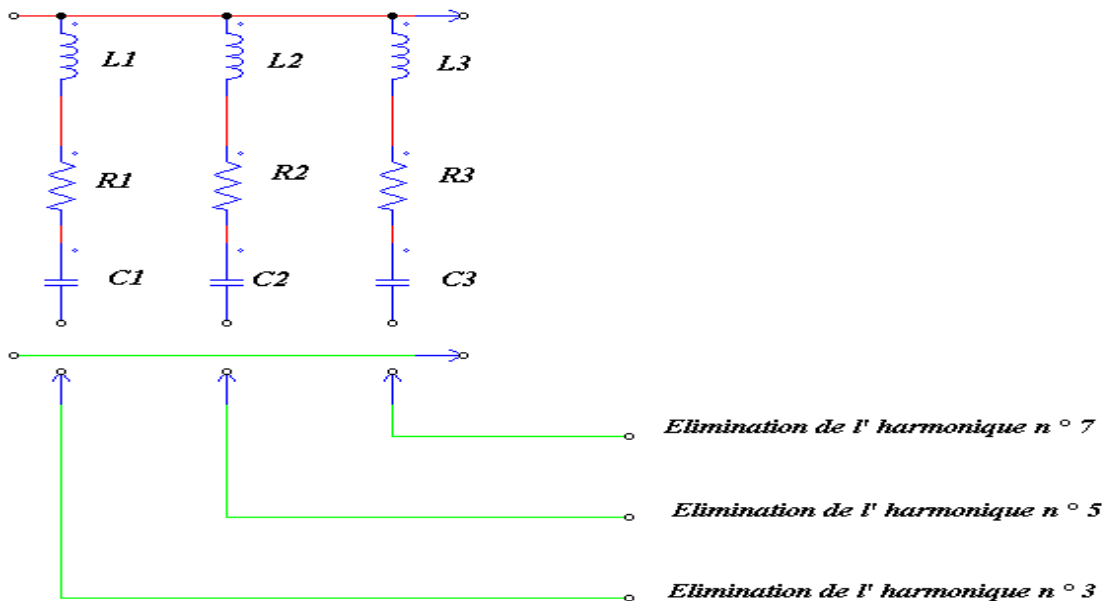


Figure. II.4 .Filtre résonant agissant sur plusieurs rangs d'harmonique. [9]

II.1.2. Techniques modernes

II.1. 2.1. Filtrage actif

Ces solutions sont proposées comme des solutions efficaces de dépollution des réseaux électriques afin de traiter les inconvénients inhérents aux solutions traditionnelles que présentent les filtres passifs (non adaptabilité aux variations de la charge et du réseau, apparition des résonances). 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 parallèle (FAP), soit en série (FAS) suivant qu'il est conçu respectivement pour compenser les courants ou les tensions harmoniques, soit associé à des filtres passifs pour constituer ce qu'on appelle les filtres hybrides [21], [13], [22].

Les avantages des filtres actifs par rapport aux filtres passifs sont les suivants [23] :

- ✓ Le volume physique du filtre est plus réduit ;
- ✓ La capacité de filtrage est supérieure ;
- ✓ La flexibilité et adaptabilité sont très supérieures.

Ils présentent, par ailleurs, quelques inconvénients :

- ✓ Leur coût élevé a limité leur implantation dans l'industrie ;
- ✓ Les pertes sont plus élevées.

II.1. 2 .1.1.Rôle du filtre actif

En principe le rôle du filtre actif est d'éliminer les composantes harmoniques qui se prolifèrent dans les réseaux et cela en injectant des courants d'amplitude similaire mais de phase opposée au courant harmonique créé par la charge afin que le courant dans la ligne garde une allure sinusoïdale. [10]

II.1. 2 .1.2.Principe de fonctionnement du filtre actif

Les filtres actifs sont composés d'onduleurs qui sont des convertisseurs statiques de puissance alimenté par une source de courant ou de tension continue, l'onduleur peut délivrer un courant ou une tension dont le contenu harmonique dépend uniquement de la loi de commande de commutation des interrupteurs [9]. Les filtres actifs agissent donc comme des sources de tension ou de courant harmoniques en opposition de phase avec ceux du réseau afin de rétablir un courant de source quasi sinusoïdal [10].

- Il existe trois types de topologies de filtres actifs

II.1.2.1.3. Filtre actif série (F.A.S)

Le filtre actif série est connecté en série sur le réseau comme le montré la figureII.1. Il se comporte comme une source de tension qui engendre des tensions harmoniques dont la somme avec la tension du réseau est une onde sinusoïdale.

Il est destiné à protéger les installations qui sont sensibles aux tensions perturbatrices (harmoniques, creux, déséquilibrés) provenant de la source et également celles provoquées par la circulation des courants perturbateurs à travers l'impédance du réseau. Cette structure est proche, dans le principe, à des conditionneurs de réseau. Toutefois, cette topologie présente quelques difficultés et inconvénients lors de sa mise en œuvre, elle ne permet pas de compenser les courants harmoniques consommés par la charge. [11]

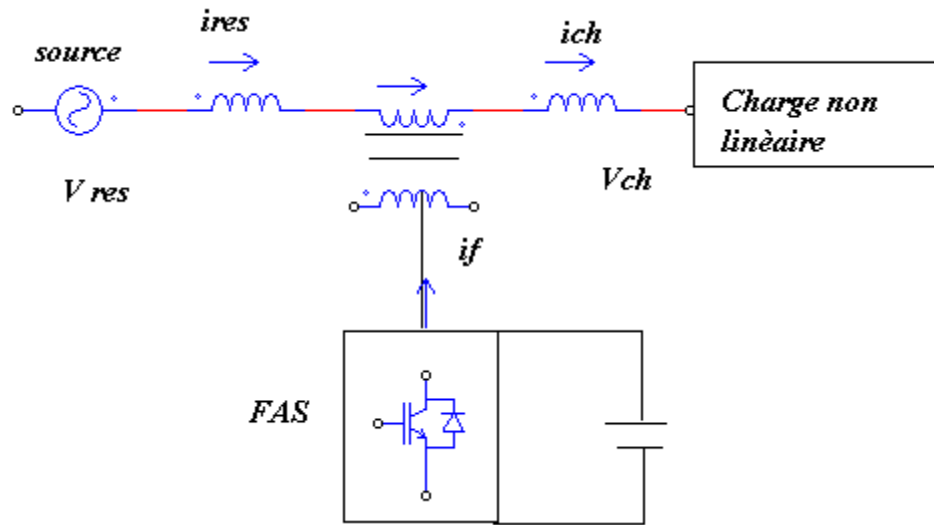


Figure. II.5. Filtre actif série. [13]

II.1.2.1.3.1 .Mise en œuvre

Le filtre actif Série (F.A.S) est une solution adaptée à la compensation des tensions perturbatrices, harmoniques, déséquilibrées et des creux de tension. Ces perturbations trouvent généralement leurs origines dans le réseau lui-même mais peuvent parfois être provoquées par les charges elles-mêmes. [13]

II.1.2.1.4.Filtre actif parallèle (F.A.P)

Le filtre actif connecté en parallèle sur le réseau est le plus souvent contrôlé comme un générateur de courant. Il injecte dans le réseau des courants harmoniques égaux à ceux absorbés par la charge polluante, mais en opposition de phase avec ceux-ci. Le courant coté réseaux sera ainsi sinusoïdal, cependant la tension au point de raccordement ne le sera que si la tension ne contient pas d'harmoniques. Ainsi l'objectif d'un filtre parallèle générateur de courant consiste à empêcher les courants harmoniques absorbés par la charge non linéaire de circuler à travers l'impédance du réseau située en amont du point de connexion du filtre. Le dimensionnement du filtre actif est lié au courant harmonique à générer. La majorité des filtres actifs parallèles actuellement installés sur les réseaux électriques fonctionnent selon ce principe. [12]

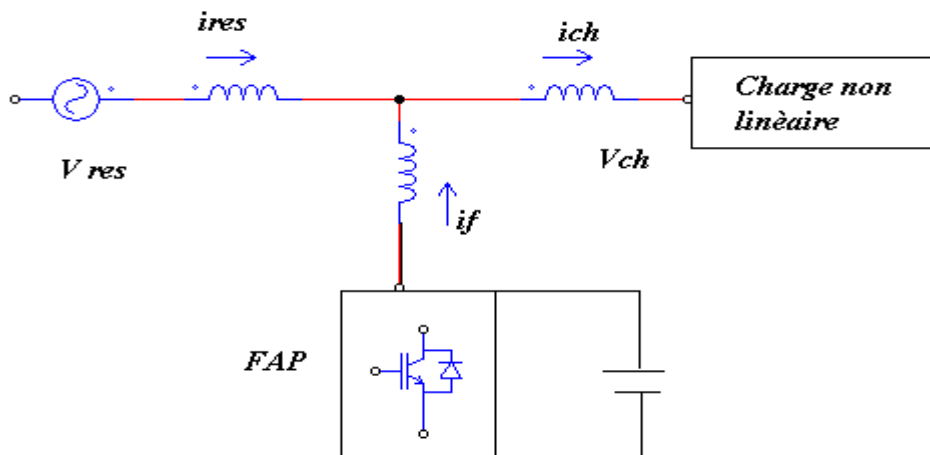


Figure. II.6. Filtre actif parallèle. [13]

II.1.2.1.5. Filtre combiné parallèle-série (UPQC)

D'après ce qui précède, ni le FAP, ni le FAS de puissance ne sont capables d'effectuer un filtrage total, donnant une tension sinusoïdale du côté de la charge et un courant sans harmoniques du côté du réseau. Cet objectif peut être atteint en utilisant un conditionneur d'énergie électrique de puissance communément appelé (Unified Power Quality Conditioner : UPQC) composé de ces deux filtres actifs de puissance comme le montre la Fig. II-7 l'un connecté en série et l'autre en parallèle avec la charge. L'UPQC permet de réaliser simultanément l'isolation harmonique, tension ou courant, entre la source et la charge et la compensation des différents types de perturbations :

harmoniques de courant et de tension, creux tension, surtension et déséquilibre de tension [26], [25], [24], [13].

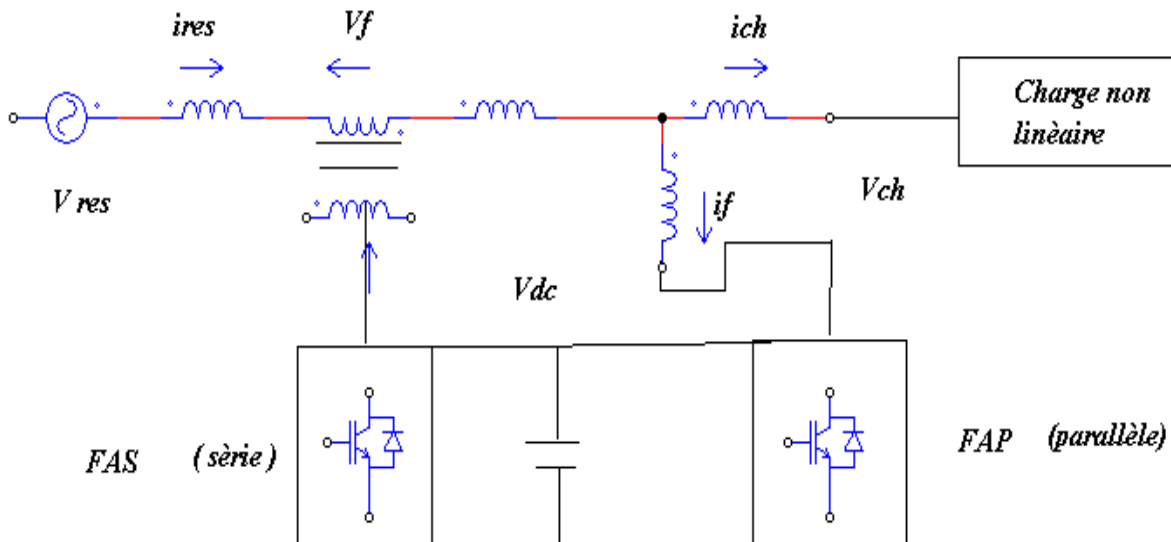


Figure. II.7. Filtre combiné parallèle-série (UPQC). [13]

II.1.2.1.6. 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 [13].

Les filtres hybrides les plus étudiés sont :

- 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.

II.1.2.1.6.1. Le filtre actif série avec des filtres passifs parallèles

Le rôle du FAS dans ce cas est d'empêcher les courants harmoniques de circuler vers le réseau et de les obliger à passer par les filtres passifs raccordés à leurs fréquences comme le montre la Figure. II.8. [15]

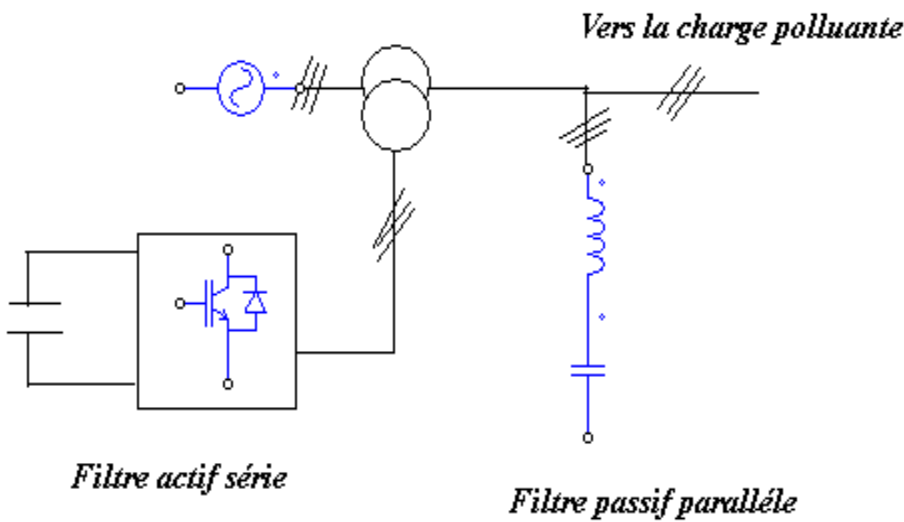


Figure. II.8. Filtre actif série et filtre passif parallèle. [13]

II.1.2.1.6.2. Le filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles

Le principe de fonctionnement de cette configuration, présentée en Figure (I.9) est la même que la précédente avec l'avantage de réduire encore le dimensionnement du FAS car le courant qui le traverse est plus faible. De plus, le FAS est à l'abri d'un éventuel court-circuit de la charge [14][15].

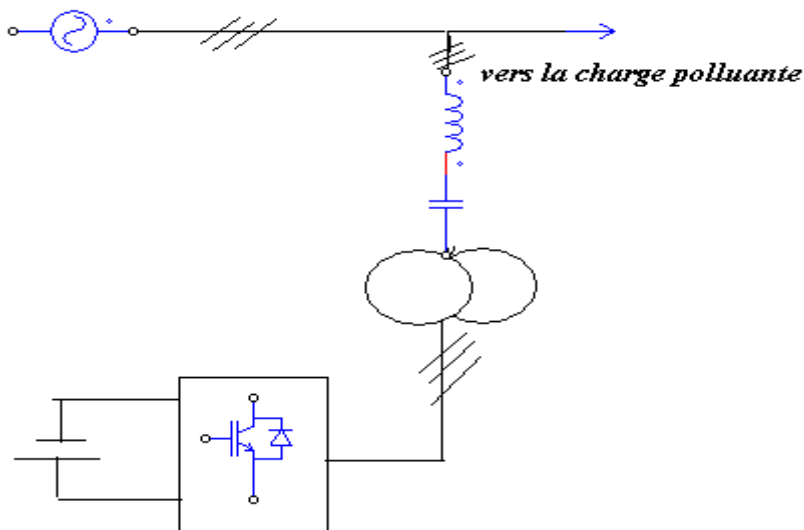


Figure. II.9. Filtre actif série connecté en série avec un filtre passif parallèle. [13]

II.1.2.1.6.3. Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle

Le rôle du *filtre actif parallèle* dans cette configuration, montrée en Fig. II.10, est la compensation de courants harmoniques basses fréquences émis par la charge polluante. Le filtre passif accordé sur une fréquence élevée, élimine les harmoniques hautes fréquences y compris ceux créés par le *filtre actif parallèle*. Ce type de filtrage a déjà été appliqué à la compensation des courants harmoniques émis par un cyclo convertisseur de forte puissance [14].

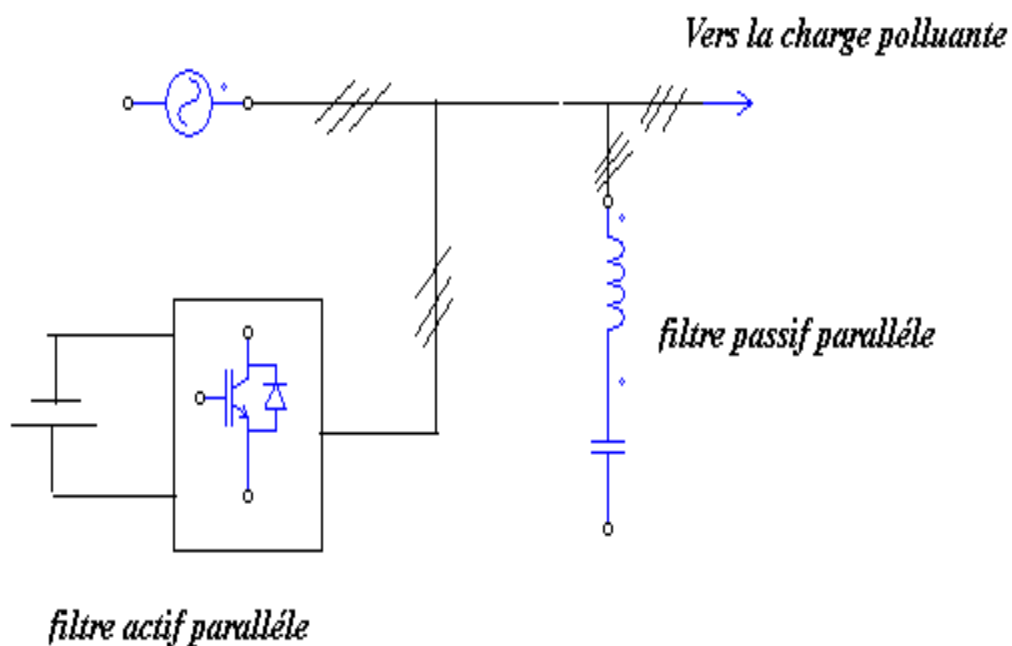


Figure II.10 .Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle. [13]

➤ Comparaison des différents filtres

Tableau II.1 Avantages et inconvénients des différents filtrages [10].

Principes	Avantages	Inconvénients
Filtrage passif	Amélioration de la forme du courant	Risque de résonance, pas d'adaptabilité, encombrant
Filtrage actif parallèle	Amélioration de la forme du courant, adaptabilité aux variations de la charge du réseau	Amélioration de la forme de tension n'est pas toujours évidente
Filtrage actif série	Amélioration de la forme de tension, adaptabilité aux variations de la charge du réseau	Pas Amélioration de la forme du courant
Combinaison parallèles série actif	Amélioration de la forme du courant, Amélioration de la forme de tension, adaptabilité aux variations de la charge du réseau	Réalisation difficile

Le tableau II.2 donne une comparaison entre le filtre actif et le filtre passif

Tableau II.2 comparaison entre le filtre actif et le filtre passif [10].

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

Conclusion

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

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. Sa structure a été divisée en deux parties, la partie puissance et la partie contrôle-commande. Dans la partie puissance, on a retrouvé les trois principaux blocs de cette structure : L'onduleur de tension qui est un élément fondamental de ce filtre, l'élément de stockage d'énergie et le filtre de sortie. La partie contrôle-commande, comporte des blocs pour identifier des courants perturbateurs et la régulation du courant injecté par l'onduleur.

Deux méthodes d'identification sont utilisées : la méthode des courants et la méthode des puissances instantanées. L'objectif de ce chapitre est de comprendre le fonctionnement du filtre actif parallèle.

Le filtre actif est un onduleur de tension à MLI 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.

III. 1 Principe du filtre actif parallèle

Ce filtre est le plus souvent commandé comme un générateur de courant, il génère des courants harmoniques, en opposition de phase avec le réseau, afin que la somme avec ceux-ci soit nulle. On obtient alors des courants sinusoïdaux au niveau du réseau. Il permet donc de supprimer au point de raccordement tous les harmoniques de courants de la charge non linéaire.

En pratique, on ne peut pas obtenir un courant de ligne purement sinusoïdal comme dans le cas idéal mais le but est d'avoir un courant qui sera le plus proche possible de la sinusoïde. La simulation par PSIM permet d'apprécier la réalité de la compensation.

En général, le filtre actif parallèle est utilisé pour la dépollution des réseaux BT et MT. Son impédance totale vis à vis de la source et de la charge lui confère une bonne auto-adaptabilité avec des performances appréciables. [27]

La structure générale du FAP est la suivante :

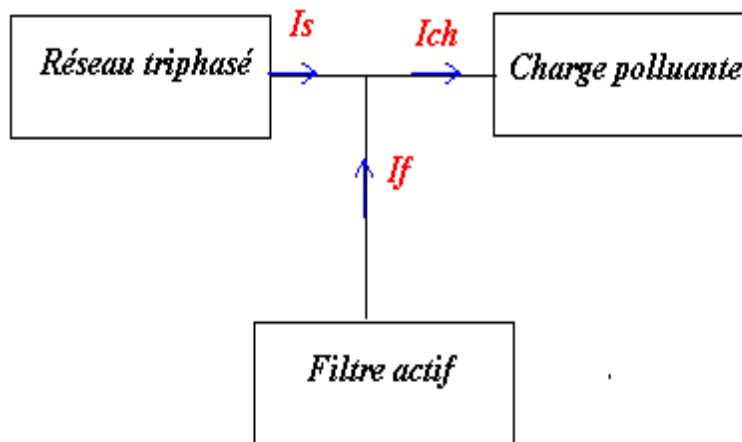


Figure III. 1: schéma de Principe du filtre actif parallèle.

Donc le filtre actif parallèle doit fournir la puissance déformante et ou la puissance réactive. Ainsi, le réseau fournit uniquement la puissance fondamentale active et ou réactive. Pour cela le circuit de contrôle, en agissant sur les signaux de gâchette des semi-conducteurs (transistors, GTO, IGBT,..), doit imposer la valeur instantanée du courant débité par l'onduleur (I_{inj1} , I_{inj2} , I_{inj3}) de telle sorte que le courant fourni par le réseau (I_{s1} , I_{s2} , I_{s3}) soit sinusoïdale et en phase avec la tension du réseau.

Dans le cas général, le courant absorbé par la charge comporte une composante active (I_{cha}), une composante réactive (I_{chr}) et une composante harmonique (ΣI_{chn}). Avec

$$I_{ch} = I_{cha} + I_{chr} + \sum_{n=1}^{\infty} I_{chn} \quad \text{III.1}$$

Le compensateur actif ne peut absorber ou fournir de la puissance active puisqu'il ne comporte pas de source active. D'après la première loi de Kirchhoff, le courant fournit par la source est égale à :

$$I_S = I_{ch} - I_{inj} \quad \text{III.2}$$

La source fournit la puissance active absorbée par la charge. Le filtre actif parallèle fournit la puissance réactive et déformante

$$I_S = I_{cha}, I_{inj} = I_{chr} + \sum_{n=1}^{\infty} I_{chn} \quad \text{III.3}$$

Le filtre actif se compose de deux parties distinctes, partie puissance et la partie commande. La partie puissance est constituée d'un élément de stockage d'énergie, d'un pont onduleur triphasé et d'un filtre de sortie généralement du premier ordre. Pour la partie commande, on a le bloc d'identification des courants de références, le contrôle du courant réseau ainsi que la commande.

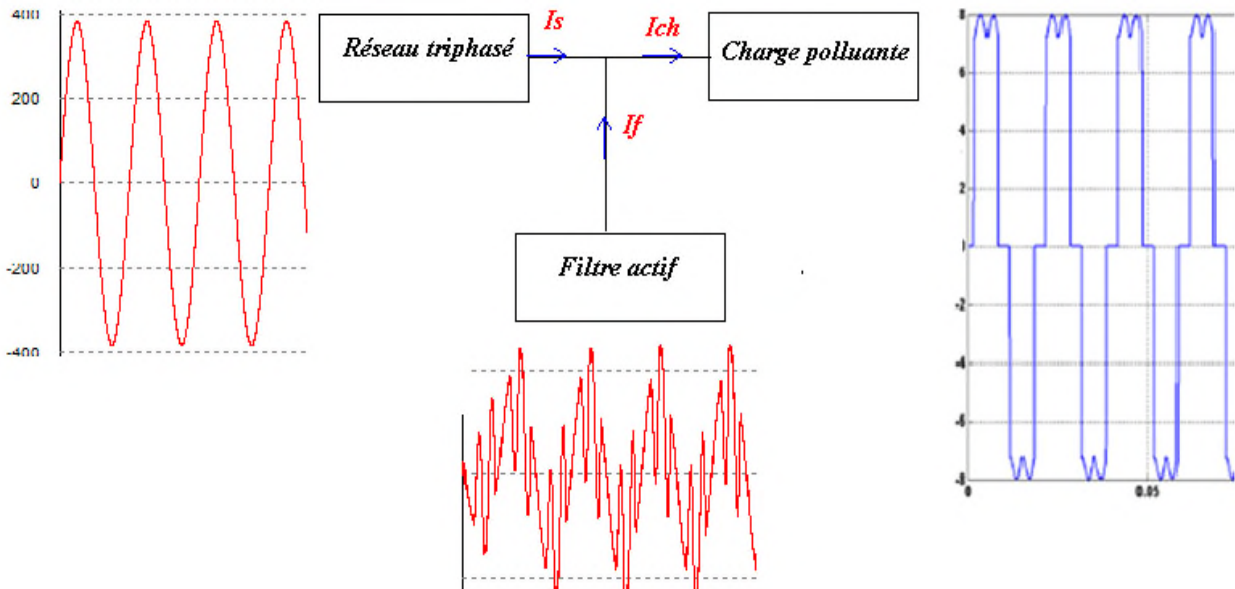


Figure (III. 2) : Schéma de principe des signaux générés par le filtre actif parallèle. [13]

III-2 Structure d'un filtre actif parallèle

La structure générale du filtre actif parallèle est présentée dans la figure (III.3) sous la forme de deux blocs : la partie puissance et la partie contrôle-commande.

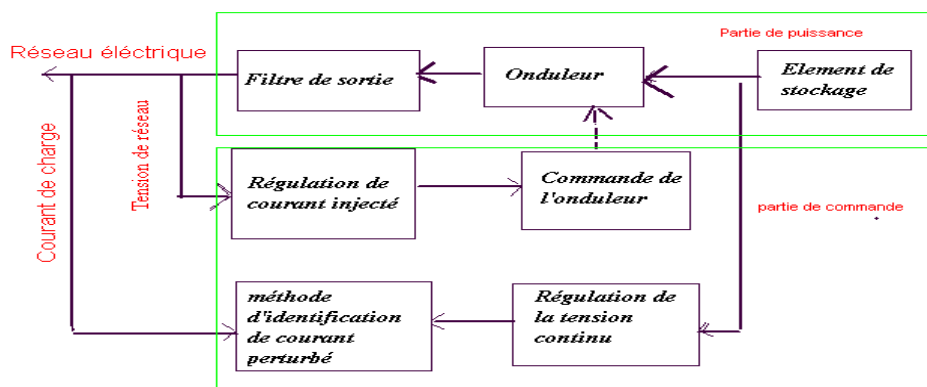


Figure. III.3. Structure générale du filtre actif parallèle. [13]

➤ **La partie puissance** : est constituée :

✓ D'un onduleur à base d'interrupteurs de puissance, commandable à l'amorçage et au blocage (GTO, IGBT, etc ...) avec des diodes antiparallèle.

✓ D'un circuit de stockage d'énergie :

Le stockage de l'énergie peut être par une source de tension continue V_{dc} , ou par un condensateur C_{dc} qui joue le rôle d'une source de tension continue V_{dc} , Le choix des paramètres (V_{dc} et C_{dc}) s'effectue sur la dynamique et sur la qualité de compensation du filtre actif parallèle.

✓ D'un filtre de sortie :

Le filtre de sortie est un filtre passif utilisé pour connecter l'onduleur de tension au réseau électrique, et pour satisfaire les deux critères suivants :

- assurer une bonne dynamique du courant ;
- empêcher les composantes dues aux commutations de se propager sur le réseau électrique.

➤ **La partie contrôle-commande** est constituée de:

✓ Bloc d'identification des courants perturbateurs ;

✓ Bloc de régulation du courant injecté sur le réseau à partir de l'onduleur de tension ;

➤ Commande de l'onduleur de tension.

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 de sortie du filtre et leurs références identifiées à partir des différentes méthodes d'identification.

Pour la régulation du courant de l'onduleur : les deux méthodes utilisées sont par hystérésis et à MLI sinus-triangulaire. [13]

III-3. Structure de l'onduleur de tension

L'onduleur de tension connecté en parallèle au réseau est illustré par la figure III-4. Le Condensateur C_{dc} joue le rôle d'une source de tension continue. La tension à ses bornes V_{dc} doit être positive et maintenue quasiment constante. Ses fluctuations doivent être faibles d'une part pour ne pas dépasser la limite en tension des semi-conducteurs constituant les interrupteurs, d'autre part pour ne pas dégrader les performances du filtre actif.

L'onduleur de tension est relié au réseau par l'intermédiaire d'un filtre. Deux rôles sont dévolus à ce filtre: d'une part transformer les variations de tension V_f en variations de courant, d'autre part filtrer les fréquences de commutation des bras d'onduleur. Les interrupteurs de l'onduleur sont réversibles en courant. Ils sont constitués de semi-conducteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture en antiparallèle avec une diode [28;29].

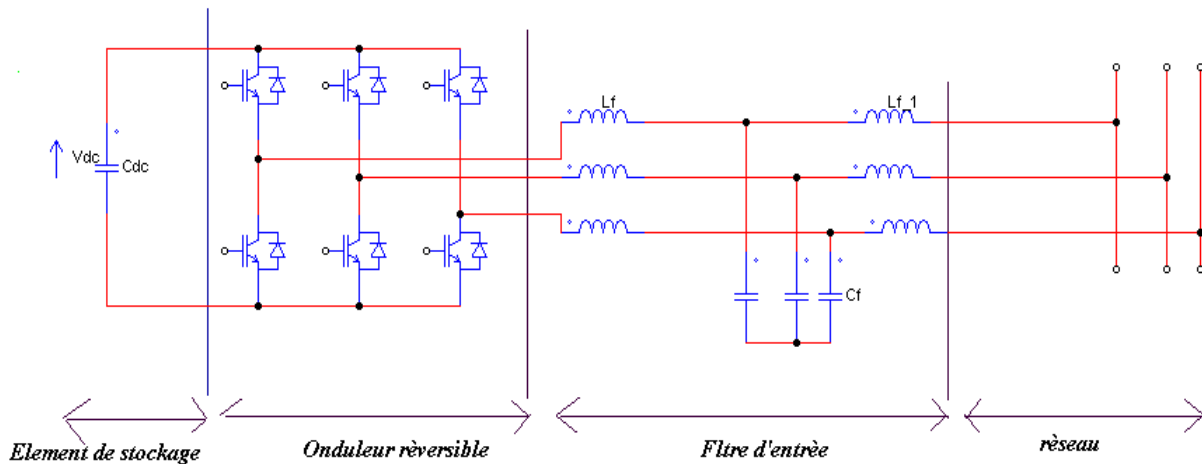


Figure (III-4): Structure onduleur tension.

III-4 Onduleur de tension triphasé

On appelle onduleur de tension, un onduleur alimenté par une source de tension continue, c'est à dire par une source d'impédance interne négligeable; sa tension U n'est pas affectée par la variation du courant i qui la traverse. La source continue impose la tension à l'entrée de l'onduleur et donc à sa sortie.

On peut obtenir la tension triphasée en groupant trois demis ponts monophasés, la figure (III-5) représente un onduleur triphasé 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 transistor et d'une diode en antiparallèle [13;30].

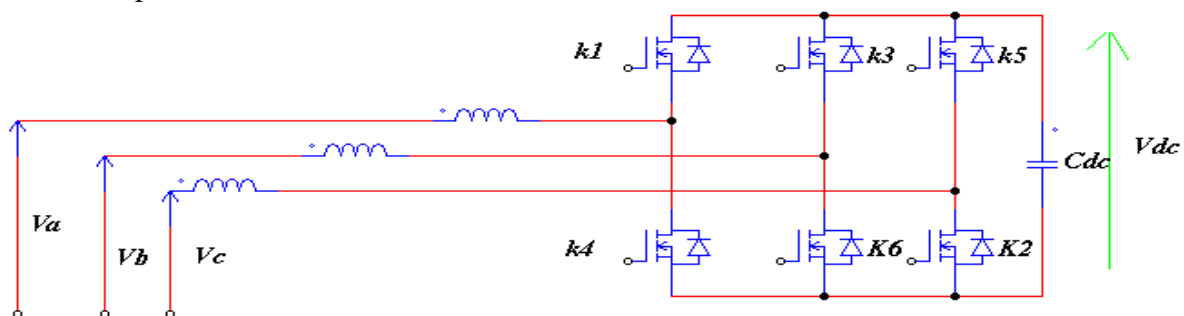


Figure (III-5): Structure d'un onduleur de tension triphasé. [14]

III.5 Principe des onduleurs MLI

L'onduleur MLI est constitué des interrupteurs commandable à l'ouverture et à la fermeture comme les semi-conducteurs (GTO, IGBT, ...) connecté en antiparallèle avec une diode. La tension de sortie se compose de plusieurs créneaux de largeur variables et les instants de commutations sont définis par l'ouverture et la fermeture des interrupteurs, par les intersections de l'onde de référence U_{ref} représentant la tension de sortie recherchée de fréquence f avec l'onde de la porteuse, de fréquence f_p très supérieure à f . (le cas la commande sinus-triangulaire).

- Deux indices caractérisent la commande des interrupteurs :
- L'indice de modulation : $m = \frac{fp}{f}$

Avec $m \gg 1$;

- Le coefficient de réglage : $r = \frac{U_{refmax}}{u_p}$

f_p, U_p : Respectivement la fréquence et l'amplitude de la porteuse ;

f, U_{refmax} : Respectivement la fréquence et l'amplitude maximale de la référence.

III.6 Commande de l'onduleur

Le but de la commande de l'onduleur est de permettre la meilleure reproduction des courants de référence, à travers les ordres de commande appliqués aux interrupteurs de puissance. Les deux principales familles de commande des convertisseurs statiques sont :

La commande par hystérésis et la commande par modulation de largeur d'impulsion MLI. [13]

III.6.1. Commande par hystérésis

La commande par hystérésis, appelée aussi commande en tout ou rien, est une commande non linéaire qui utilise l'erreur existant entre le courant de référence et le courant produit par l'onduleur, cette erreur est comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis.[13]

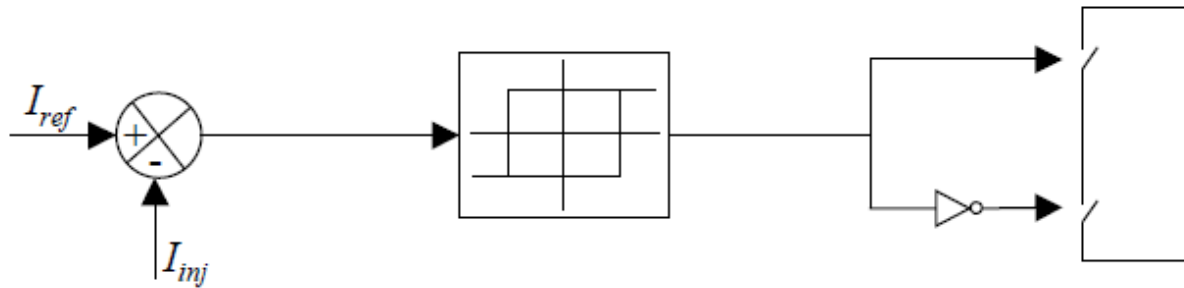


Figure (III-6): Principe de la commande des courants par hystérésis. [13]

Dès que l'erreur atteint la bande inférieure ou supérieure, un ordre de commande de manière à rester à l'intérieur de la bande. La simplicité, comme le montre la figure III-6, est le principal avantage de cette technique. En revanche, les commutations évoluant librement à l'intérieur de la bande d'hystérésis, on ne peut pas maîtriser correctement le spectre haut fréquence dû aux fréquences de commutations.

Ce problème peut être résolu par une autre stratégie de commande qui 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 d'hystérésis [13;32].

III. 6. 2. Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI)

Pour résoudre les problèmes précédents, nous introduisons une deuxième famille de commande de l'onduleur, c'est la technique de commande par MLI, qui permet de résoudre le problème de la maîtrise de la fréquence de commutation. La plus simple et la plus connue des modulations de largeur d'impulsion est sans doute la MLI 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 dernière est ensuite comparée avec un signal triangulaire (porteuse à fréquence élevée fixant la fréquence de commutation). La sortie du comparateur fournit l'ordre de commande des interrupteurs. Le schéma de principe est donné par la figure III-7. [13;32].

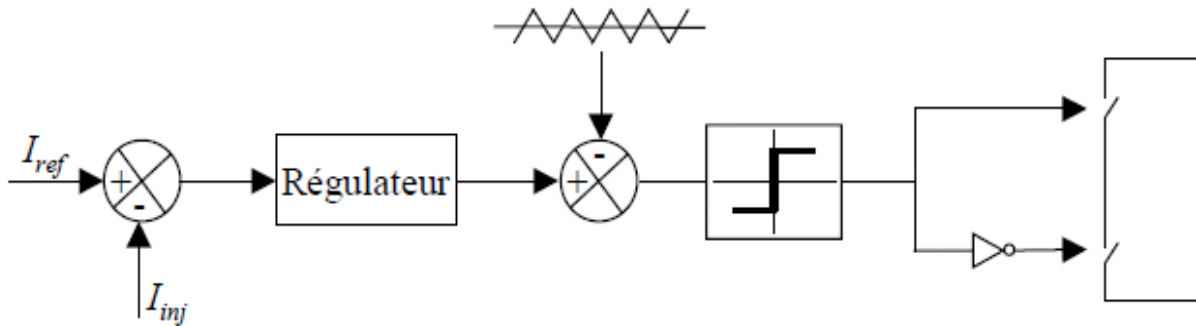


Figure (III-7): Principe de commande des courants par MLI. [13]

III. 6. 2. 1.Principe de MLI sinus-triangle

Le signal de commande des interrupteurs est généré à partir de la comparaison du signal de référence sinusoïdal, (de fréquence $f_o=1/T_o$) et du signal de modulation triangulaire ou la porteuse (de fréquence $f_d = 1/T_d$).[37].

➤ Caractéristique

Deux paramètres caractérisent la commande :

- L'indice de modulation : $m = f_d/f_o$, avec $m \gg 1$.
- Le coefficient de réglage : $r = V_{Rmax} / V_{Pmax}$. Généralement reste compris entre 0 et 1 [33].

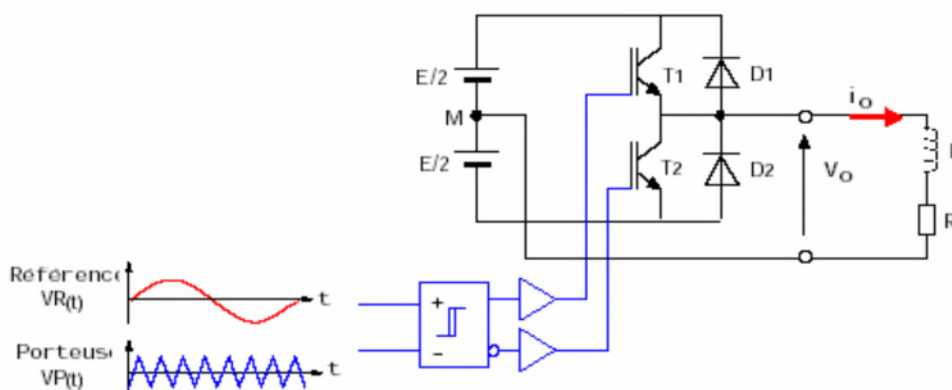


Figure III-8: Schéma de principe de l'onduleur monophasé commandé par MLI sinus-triangle [33].

III.7. Modélisation de l'onduleur de tension à deux niveaux

La figure. III.9 représente un onduleur de tension à trois bras utilisé comme FAP commandé à sur réseau électrique triphasé. Chaque bras de l'onduleur comporte deux interrupteurs réversibles en courant, commandés à la fermeture et à l'ouverture. Le stockage de l'énergie côté continu se fait par l'intermédiaire d'un condensateur C_{dc} qui joue le rôle d'une source de tension continue V_{dc} régulée à une valeur positive constante. Un filtre passif à la sortie de l'onduleur souvent du premier ordre (L_f, R_f) sert à connecter l'onduleur de tension au réseau électrique.

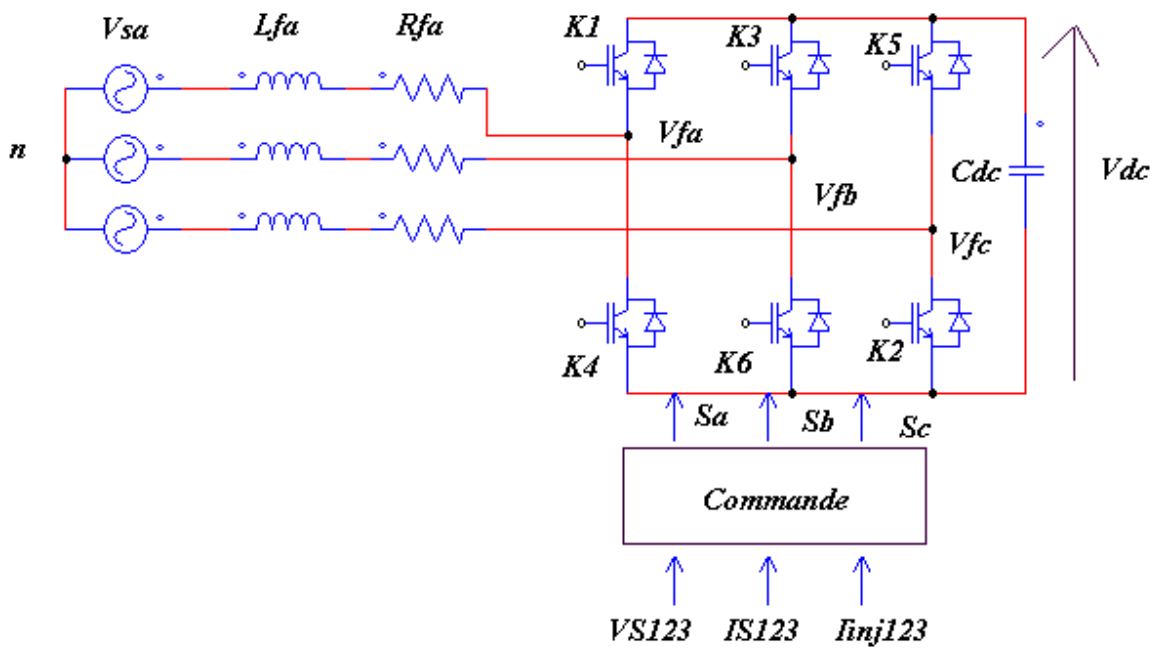


Figure.III.9 : Onduleur de tension à trois bras employé comme FAP. [13]

Les deux interrupteurs d'un même bras sont commandés de façon complémentaire. L'ouverture et la fermeture des interrupteurs dépendent de l'état des signaux de commande (S_a, S_b, S_c)

Comme défini ci-dessous [1]:

$$S_a = \begin{cases} 1 & K_1 \text{ fermè et } K_4 \text{ ouvert} \\ 0 & K_1 \text{ ouvert et } K_4 \text{ fermè} \end{cases}$$

$$S_b = \begin{cases} 1 & K_2 \text{ fermè et } K_5 \text{ ouvert} \\ 0 & K_2 \text{ ouvert et } K_5 \text{ fermè} \end{cases}$$

III.4

$$S_c = \begin{cases} 1 & K_3 \text{ fermé et } K_6 \text{ ouvert} \\ 0 & K_3 \text{ ouvert et } K_6 \text{ fermé} \end{cases}$$

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

$$\begin{bmatrix} v_{fa} \\ v_{fb} \\ v_{fc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_a & -S_b \\ S_b & -S_c \\ S_c & -S_a \end{bmatrix} V_{dc} \quad \text{III.5}$$

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 :

$$\begin{bmatrix} v_{fa} \\ v_{fb} \\ v_{fc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} - R_f \begin{bmatrix} i_{fa} \\ i_{fb} \\ i_{fc} \end{bmatrix} - L_f \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{fa} \\ i_{fb} \\ i_{fc} \end{bmatrix} \quad \text{III.6}$$

On suppose que les trois tensions du réseau soient équilibrées et sachant que la somme des courants injectés par l'onduleur est nulle, on peut écrire :

$$\begin{cases} v_{sa} + v_{sb} + v_{sc} = 0 \\ i_{fa} + i_{fb} + i_{fc} = 0 \end{cases} \quad \text{III.7}$$

Nous pouvons donc déduire la relation suivant

$$v_{fa} + v_{fb} + v_{fc} = 0 \quad \text{III.8}$$

A partir des équations (III.4) et (III.7), nous obtenons :

$$\begin{bmatrix} v_{fa} \\ v_{fb} \\ v_{fc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2S_a & -S_b & -S_c \\ -S_a & 2S_b & -S_c \\ -S_a & -S_b & 2S_c \end{bmatrix} \frac{v_{dc}}{3} \quad \text{III.9}$$

Puisque les grandeurs S_a , S_b et S_c peuvent prendre chacune deux valeurs (0 ou 1), on a donc, huit configurations possibles pour les tensions de sortie du filtre actif (v_{fa} , v_{fb} , v_{fc}) référencées au neutre n de la source, ceci est montré par le tableau 3.1 ou. A noter que deux vecteurs sont nuls

(\vec{v}_0 et \vec{v}_f) est \vec{v}_f , la représentation vectorielle des tensions (v_{fa} , v_{fb} et v_{fc}) fournies par l'onduleur dans le repère orthogonal α, β , [13, 34].

Tableau.III.1 Tensions générées par l'onduleur de tension

N°	S_1	S_2	S_3	v_{fa}	v_{fb}	v_{fc}	\vec{v}_f	
0	0	0	0	0	0	0	$\vec{v}_{f(0)}$	0
1	1	0	0	$\frac{2v_{dc}}{3}$	$\frac{-v_{dc}}{3}$	$\frac{-v_{dc}}{3}$	$\vec{v}_{f(1)}$	$\sqrt{\frac{2}{3}}v_{dc}$
2	1	1	0	$\frac{v_{dc}}{3}$	$\frac{v_{dc}}{3}$	$\frac{-2v_{dc}}{3}$	$\vec{v}_{f(2)}$	$\sqrt{\frac{2}{3}}v_{dc}e^{j\frac{\pi}{3}}$
3	0	1	0	$\frac{-v_{dc}}{3}$	$\frac{2v_{dc}}{3}$	$\frac{-v_{dc}}{3}$	$\vec{v}_{f(3)}$	$\sqrt{\frac{2}{3}}v_{dc}e^{j\frac{2\pi}{3}}$
4	0	1	1	$\frac{-2v_{dc}}{3}$	$\frac{v_{dc}}{3}$	$\frac{v_{dc}}{3}$	$\vec{v}_{f(4)}$	$\sqrt{\frac{2}{3}}v_{dc}e^{-j\pi}$
5	0	0	1	$\frac{-v_{dc}}{3}$	$\frac{-v_{dc}}{3}$	$\frac{2v_{dc}}{3}$	$\vec{v}_{f(5)}$	$\sqrt{\frac{2}{3}}v_{dc}e^{j\frac{-2\pi}{3}}$
6	1	0	1	$\frac{v_{dc}}{3}$	$\frac{-2v_{dc}}{3}$	$\frac{v_{dc}}{3}$	$\vec{v}_{f(6)}$	$\sqrt{\frac{2}{3}}v_{dc}e^{j\frac{-\pi}{3}}$
7	1	1	1	0	0	0	$\vec{v}_{f(7)}$	0

Dans le repère (α, β), en considérant \vec{V}_f le vecteur correspondant aux tensions de sortie du filtre actif, les 8 cas possibles de \vec{V}_f sont donnés par la figure.3.4. Le vecteur \vec{V}_f représente la tension de référence que doit produire l'onduleur. Ceci signifie, que l'onduleur ne peut être capable de fournir des tensions égales aux tensions de référence que si le vecteur formé par ces derniers reste à l'intérieur du polygone présenté dans la figure. III.10. [35,36].

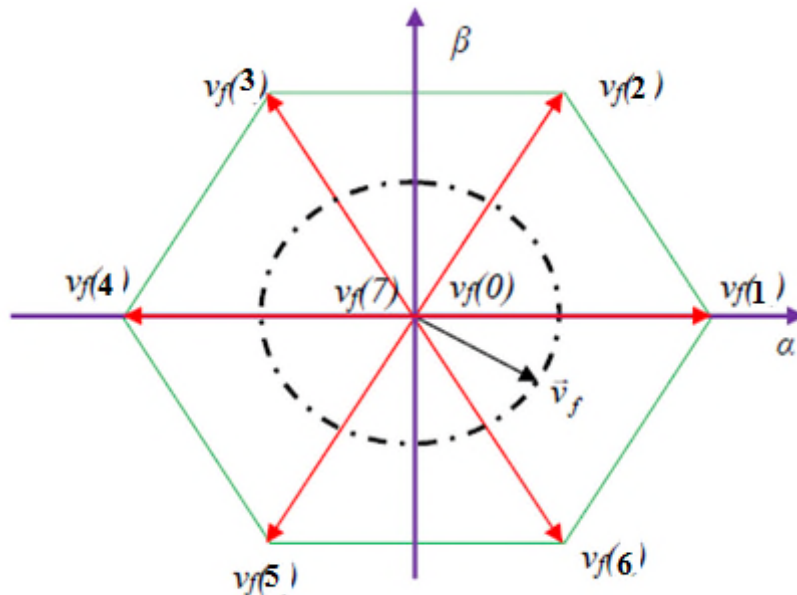


Figure. III.10. Représentation vectorielle des tensions générées par l'onduleur de tension. [13]

III.8. Stratégie de commande du filtre actif parallèle

Afin de commander le filtre actif parallèle, nous devons d'abord identifier les courants harmoniques de la charge polluante, qui servent en effet comme références du filtre actif parallèle. Donc, la stratégie de commande du FAP se base sur la détection des courants perturbateurs dans le domaine temporel. Trois possibilités d'identification des courants perturbateurs peuvent être utilisées.[39, 40]

- ✓ Identification à partir de la détection du courant de la charge polluante ;
- ✓ Identification à partir de la détection du courant de la source ;
- ✓ Identification à partir de la détection de la tension de la source.

III.9. identification des courants harmonique

➤ Généralités sur les méthodes d'identification

Plusieurs méthodes d'identification des courants perturbés, ont été développées afin d'améliorer les performances des systèmes de dépollution classique des installations électriques. En général l'identification des composantes harmoniques se fait soit dans l'espace des courants, soit dans l'espace des puissances. [13, 9, 37]

La transformation de fourier directe est l'une des méthodes les plus anciennes, mais qui nécessite une grande puissance de calcul, afin de réaliser toutes les transformations en temps réel. Pour cela, cette méthode est adaptée aux récepteurs ou les composantes harmoniques évoluent d'une manière lente, elle a pour avantage la capacité de cibler un par un les courants harmoniques qui parcourent le système, par conséquent la possibilité de compenser les composantes les plus prépondérantes.

Deux autres méthodes sont utilisées en temps réel, et qui se basent sur le filtrage des signaux. La première est la méthode des puissances instantanées. L'autre est celle de détection synchrone. Les deux méthodes sont fondées sur le principe de la séparation du fondamental des harmoniques par filtrage.

III.9.1. Méthode des courants

Le principe de cette méthode est d'identifier les courants harmoniques à partir du courant total et forcer l'onduleur à injecter des courants harmoniques inverses dans le réseau, ce qui permet d'éliminer ces harmoniques.

On capte le courant de charge polluante, ce courant est filtré par un filtre passe bande du deuxième ordre, ce qui permet d'éliminer la composante harmonique et ne laisse passer que la composante fondamentale. Le courant total moins la composante fondamentale donne le courant harmonique. Le courant injecté par l'onduleur est réglé autour de ce courant harmonique de référence. Les deux techniques de régulation : MLI sinus-triangulaire et hystérésis sont utilisées. Le filtre de sortie L_f est utilisé pour relier l'onduleur au réseau et pour empêcher les composantes de la commutation de se propager sur le réseau. [38]

III.9.1 .1. Algorithme de la méthode des courants

Le courant absorbé par la charge est composé de la composante fondamentale et des composantes harmoniques à fréquence multiple de la fréquence fondamentale. [38]

$$i_{ch} = i_{ch1} + \sum_{h=2}^{\infty} i_h \quad \text{III.10}$$

Avec :

i_{ch} : le courant total de la charge.

i_{ch1} : le courant fondamental absorbé par la charge.

i_h : le courant harmonique absorbé par la charge.

Le filtre passe bande du deuxième ordre a pour but d'extraire la composante fondamentale du courant. La fréquence centrale est choisie égale à la fréquence fondamentale ($f_c=50\text{Hz}$). Cette méthode est caractérisée par la simplicité.

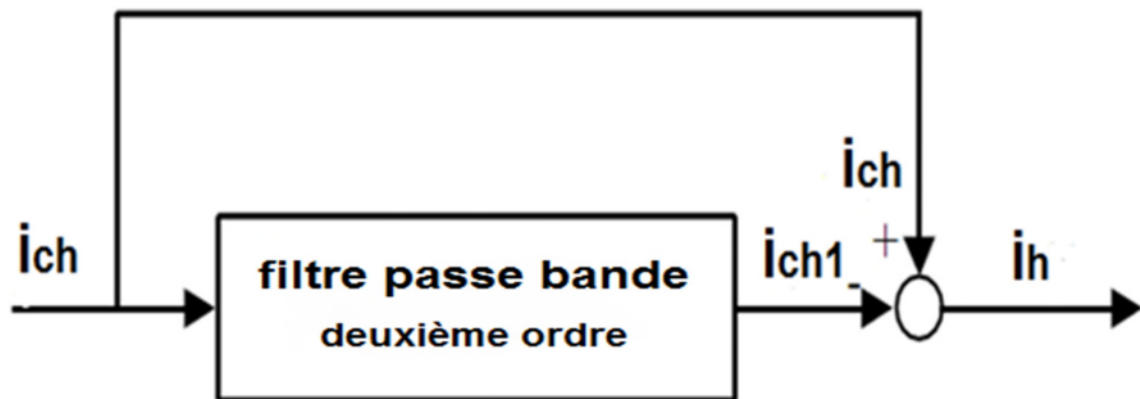


Figure III.11 : Schéma de principe d'identification des courants harmoniques. [38]

III.9.2. Méthodes sur les puissances instantanées

La méthode des puissances instantanées n'est applicable que si la tension du réseau est parfaitement sinusoïdale et équilibrée.

La première étape consiste à ramener la tension V_r de la source et le courant i_{ch} de la charge dans le repère α, β en utilisant la transformation de Concordia.

Cette transformation permet de passer d'un système triphasé à un système biphasé, ce qui simplifie les expressions mathématiques et réduit le coût d'implantation.

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} \quad \text{III.11}$$

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} \quad \text{III.12}$$

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 III.11 et III.12, on calcule les puissances instantanées, active p et réactive q, elles sont données par la relation suivante :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad \text{III.13}$$

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

$$\begin{aligned} P &= \bar{p} + \tilde{p} \\ q &= \bar{q} + \tilde{q} \end{aligned} \quad \text{III.14}$$

Un filtre de puissance est utilisé afin de séparer la composante de la puissance liée aux harmoniques de la puissance liée au fondamental [13]

. Le schéma représente le principe de séparation des puissances et donné par la figure III.12

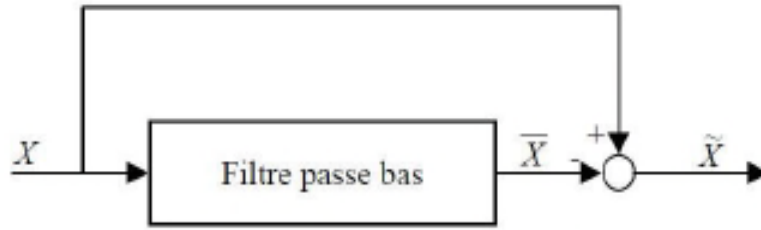


Figure III.12. Schéma de principe de la méthode de séparation des puissances. [13]

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 III.14 comme suit :

$$\begin{bmatrix} i_{ref\alpha} \\ i_{ref\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_0 - \tilde{P} \\ -\tilde{q} \end{bmatrix} \quad \text{III.15}$$

Avec :

$$\Delta = v_\alpha^2 + P_0 \quad \text{III.16}$$

P_0 est la puissance active fournie par la boucle de tension nécessaire à la régulation de la tension continue.

La relation III.15 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 (\tilde{q}) non nulle, le courant du filtre permettant cette compensation est donc :

$$\begin{bmatrix} i_{ref\alpha} \\ i_{ref\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ -\tilde{q} \end{bmatrix} \quad \text{III.17}$$

Et si l'objectif est de compenser la puissance réactive et l'ensemble des harmoniques, on utilise la relation : III.17

$$\begin{bmatrix} i_{ref\alpha} \\ i_{ref\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_0 - \tilde{P} \\ \tilde{q} - \tilde{q} \end{bmatrix} \tag{III.18}$$

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

$$\begin{bmatrix} i_{ref1} \\ i_{ref2} \\ i_{ref3} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ref\alpha} \\ i_{ref\beta} \end{bmatrix} \tag{III.19}$$

La méthode des puissances instantanées est illustrée par la figure III.13

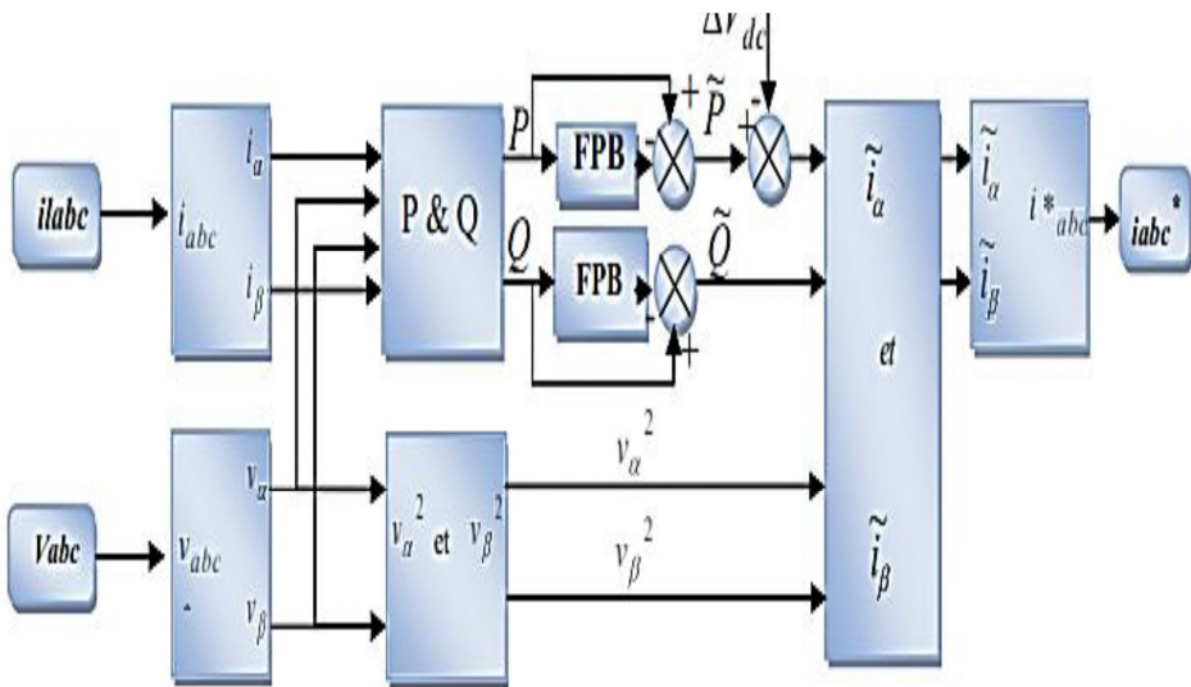


Figure III.13 : Structure d'un filtre actif shunt basé sur la méthode des puissances instantanées.

[15].

III.9.3. Méthode de détection synchrone

La méthode de détection synchrone appelée aussi méthode des courants instantanés travaille dans l'espace de Park dq, elle requiert de ce fait moins de calcul tout en étant précise et plus robuste.

Tout comme la méthode des puissances instantanées, la méthode de détection synchrone n'est applicable que si la tension de réseau est parfaitement sinusoïdale et équilibrée.

D'abord on ramène les courants triphasés de la charge polluante dans le domaine de Park en utilisant la transformée de Park comme suit :

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\theta - \frac{4\pi}{3} \right) \\ \sin \theta & \sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \sin \left(\theta - \frac{4\pi}{3} \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} \quad \text{III.20}$$

Comme pour la méthode des puissances instantanées, on considère que le réseau étudié est composé de trois fils.

θ est l'angle de la transformation de park,

Dans le domaine de la dépollution des réseaux électriques, la pulsation de référence est fixe : c'est la pulsation du réseau notée ω . L'angle de la transformation de Park est défini par :

$$\theta = \omega t \quad \text{III.21}$$

Les courants harmoniques sont composés d'une composante continue liée au fondamental, et d'une composante alternative liée aux harmoniques.

$$i_d = \bar{i}_d + \tilde{i}_d \quad \text{III.22}$$

$$i_q = \bar{i}_q + \tilde{i}_q$$

Pour séparer ces deux composantes de courant et extraire la composante continue, on utilise un filtre passe bas et un soustracteur comme montré dans la figure III.12.

Finalement, pour calculer les courants perturbateurs triphasés qui représentent les courants identifiés, dits de référence i_{ref} , on utilise la transformée inverse de Park. Ces courants sont donnés par la relation suivante :

$$\begin{bmatrix} i_{refd} \\ i_{refq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_0 - \tilde{i}_d \\ -\tilde{i}_q \end{bmatrix}$$

III.23

L'identification des harmoniques par la méthode de détection synchrone est représentée par la figure III.14

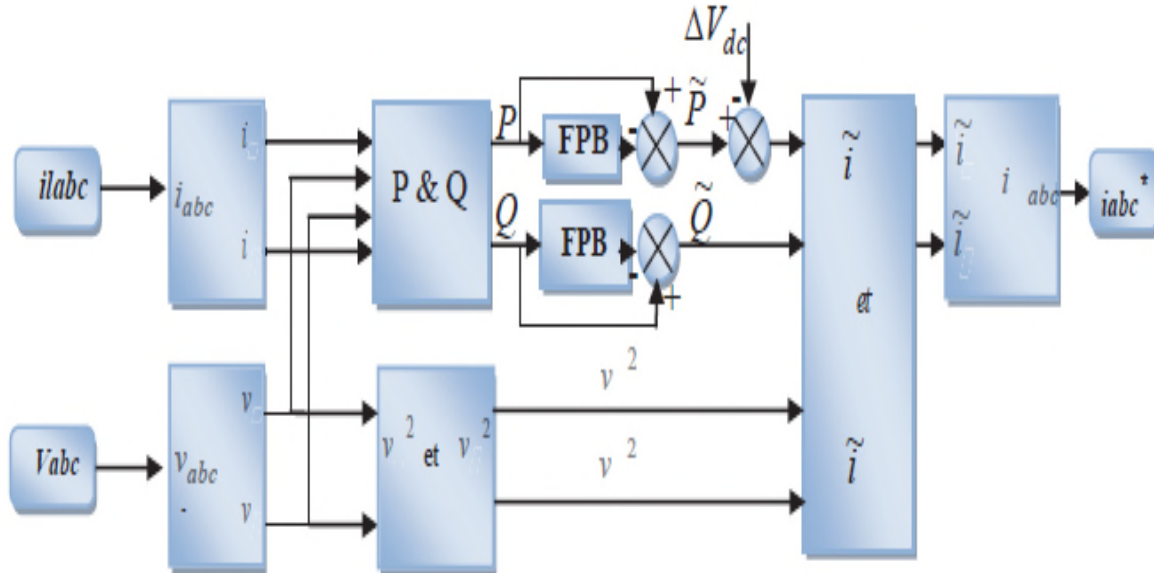


Figure III.14 Principe de la méthode (pq). [15]

Conclusion

Dans, ce chapitre, nous vous présenté l'étude d'un filtre actif parallèle qui consiste en un onduleur à deux niveaux. Nous avons également présenté certaines méthodes d'identifications des courants harmoniques et nous avons choisi la méthode des courants pour sa simplicité. Différentes techniques de modulation ont été citées et nous avons retenu la modulation sinus-triangulaire pour réaliser notre travail. Dans le chapitre suivant, on effectuera les différentes simulations puis on analysera les résultats obtenus.

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 PSIM de notre model d'étude, dans le but d'assurer la compensation les courants harmoniques.

IV .1 .Structure générale du filtre parallèle

Le schéma de simulation est celui de la figure IV.1. Il regroupe la charge non linéaire insérée, le réseau triphasé, un onduleur de tension munis de sa commande et l'algorithme d'identification des courants harmoniques.

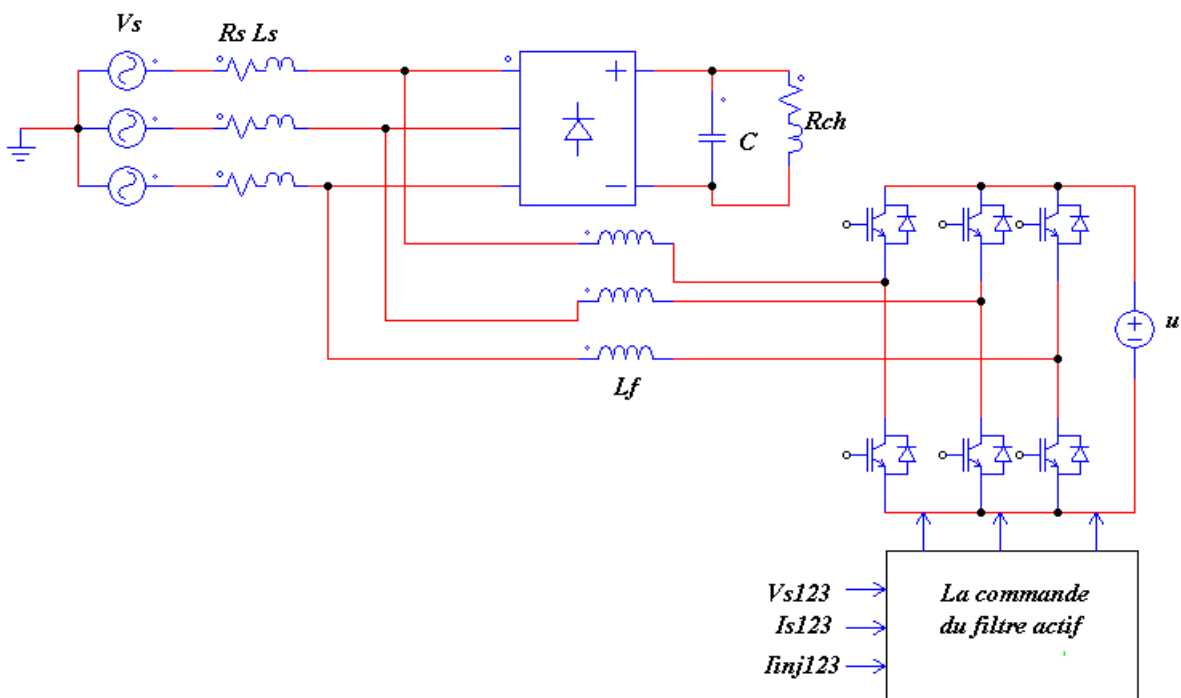


Figure IV.1. Structure générale du filtre actif parallèle.

IV .2 .Modélisation et simulation du filtre actif parallèle

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 :

- **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 $R_s=0.5\Omega$
- ✓ Inductance de ligne $L_s=0.01$ H.

- **Modèle de la charge polluante**

La charge polluante consiste en un redresseur (pont à diodes) alimentant une charge composée d'une résistance $R_{ch}= 20 \Omega$ en série avec une inductance $L_{ch}= 0.02$ H, une capacité $C= 0.0002$ F est montée sur le bus continu.

- **Modèle du filtre actif parallèle**

En sortie du filtre, on trouve un filtre passif, qui est représenté par une inductance L_f . Ce filtre sert d'une part, à connecter l'onduleur de tension au réseau électrique, d'autre part à empêcher les composantes dues aux commutations de se propager sur le réseau électrique. Les valeurs des éléments caractérisant le filtre actif parallèle sont données comme suit :

$L_f= 0.001$ 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.

IV.3.Résultats de simulation et analyse

IV.3.1. Résultats de simulation sans compensation

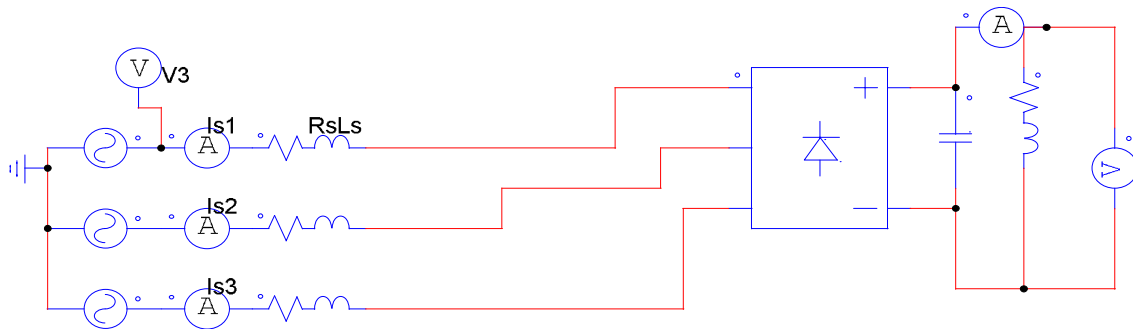


Figure IV.2.Schéma de simulation du circuit étudié

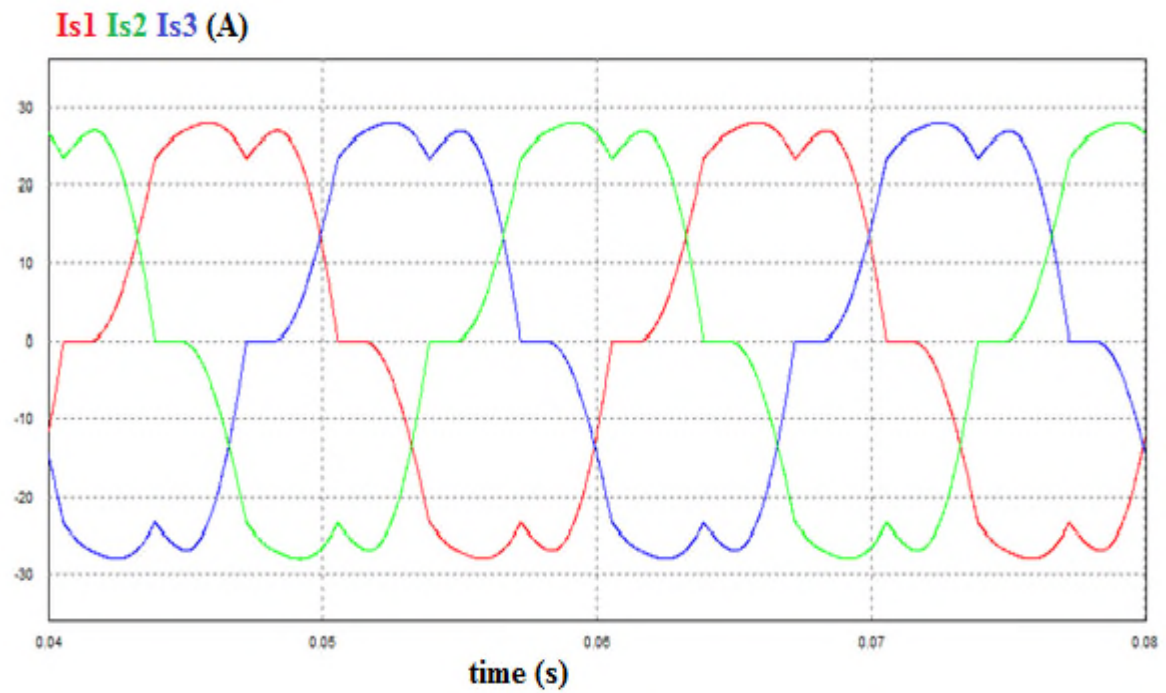


Figure IV.3.Forme d'ondes du courant de source

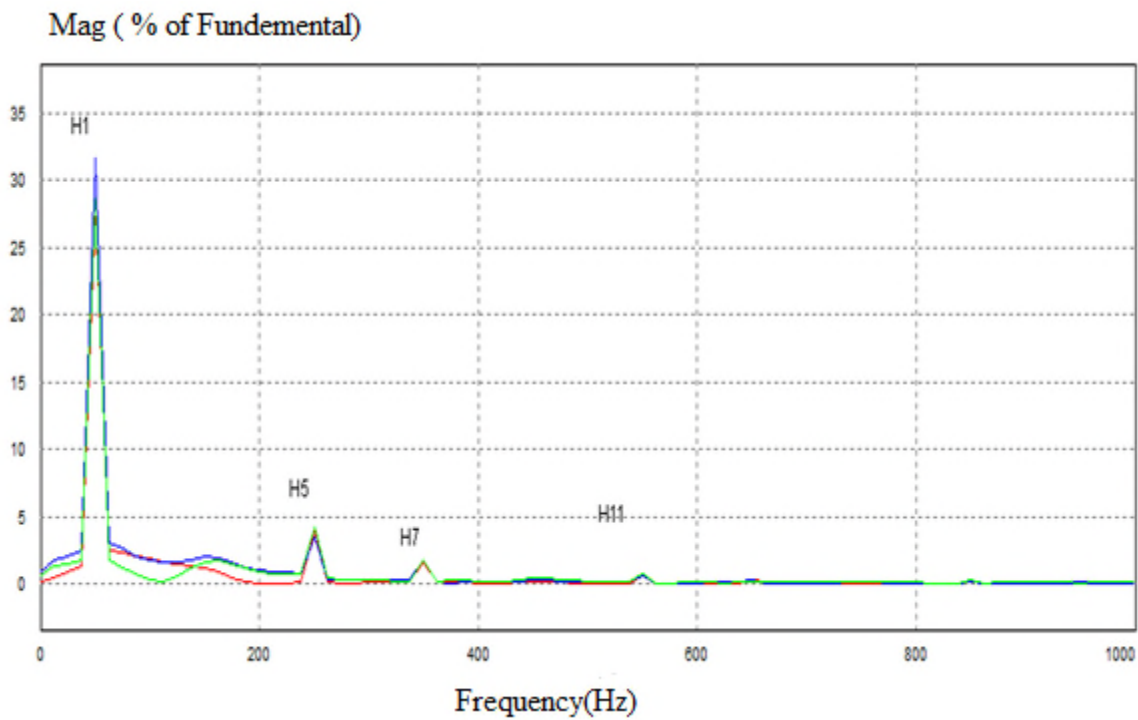


Figure IV.4 Analyse spectrale du courant avant le filtrage

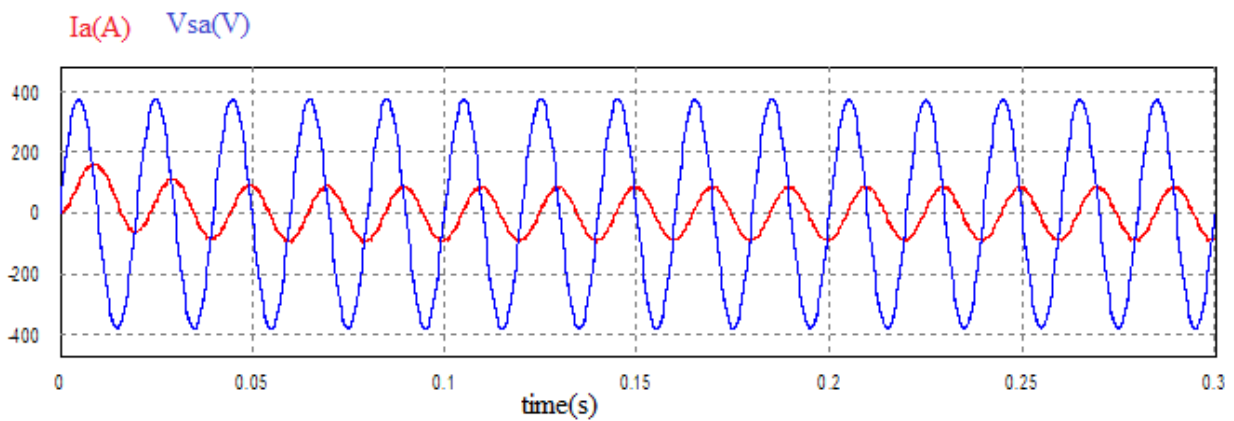


Figure IV.5 Allure du courant I_a et la tension V_{sa} de la source

Les figures IV.3 et IV.4 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 15.44 %. 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. La figure IV.5 représente le courant et la tension de la source. On remarque 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.

IV.4.1 Méthode des courants

III.4.1 Résultats de simulation :

- ✓ régulation de courant par MLI sinus –triangulaire .

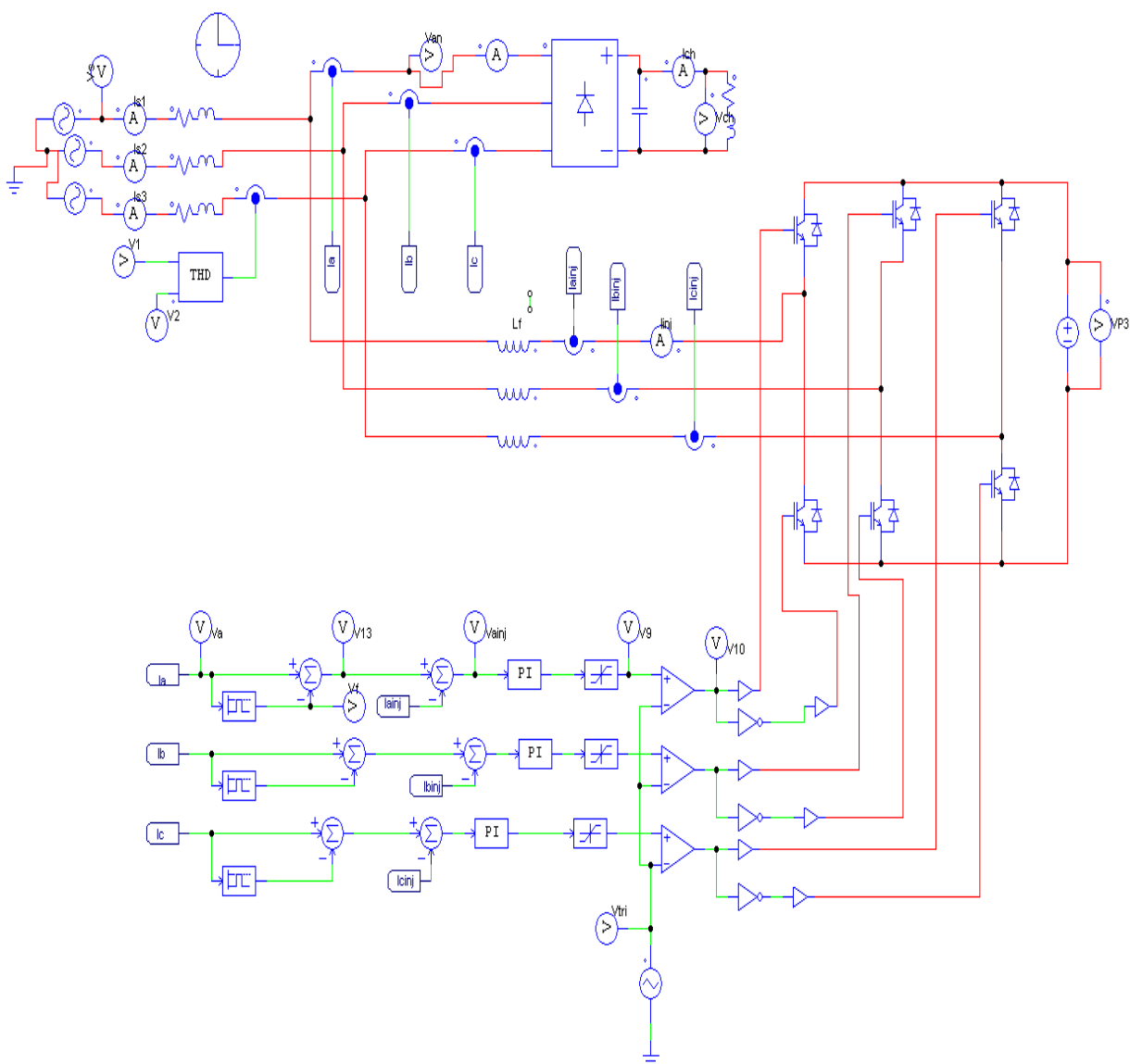


Figure IV.6 Schéma bloc du filtre actif parallèle commandé par MLI sinus triangulaire

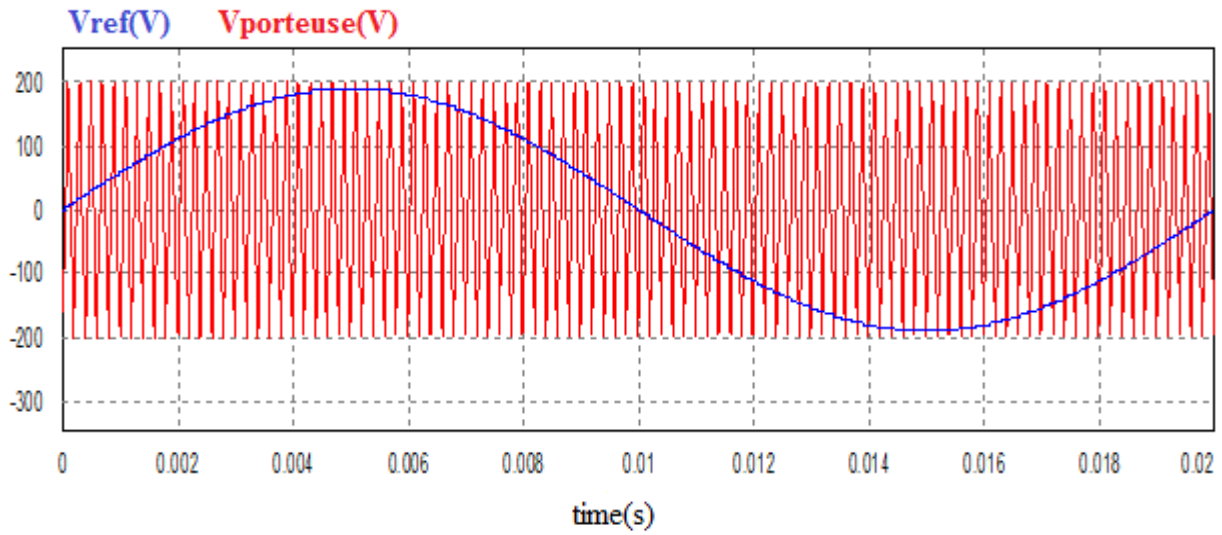


Figure IV.7 Allure de la tension de référence et de la porteuse. (V_p et V_{ref})

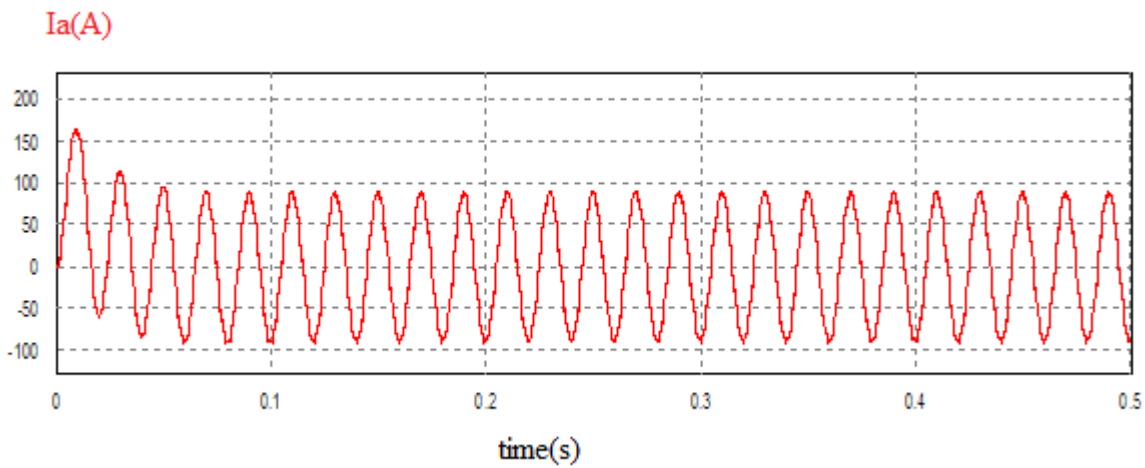


Figure IV.8 Allure du courant I_a de la source

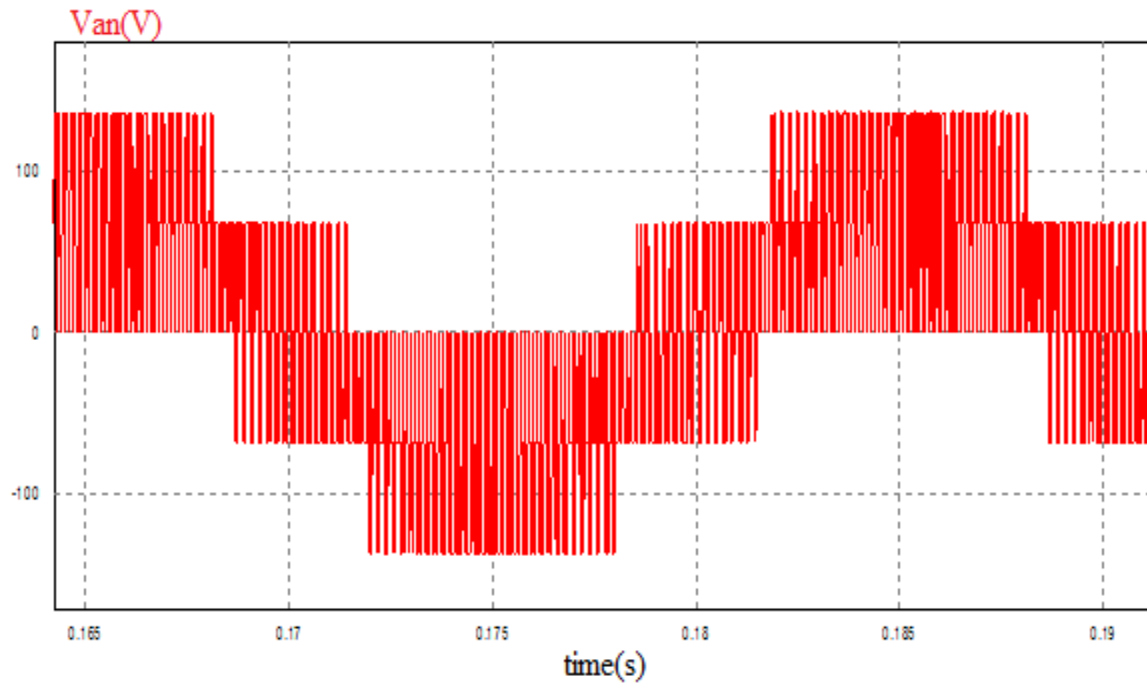


Figure IV.9 Tension d'entrée du pont convertisseur V_{an}

III.4.1.2 Interprétation des résultats :

La figure IV.6 montre la comparaison entre la référence et la porteuse triangulaire V_{ref} de fréquence 5000 Hz. L'intersection entre les deux signaux représente les instants de commutation.

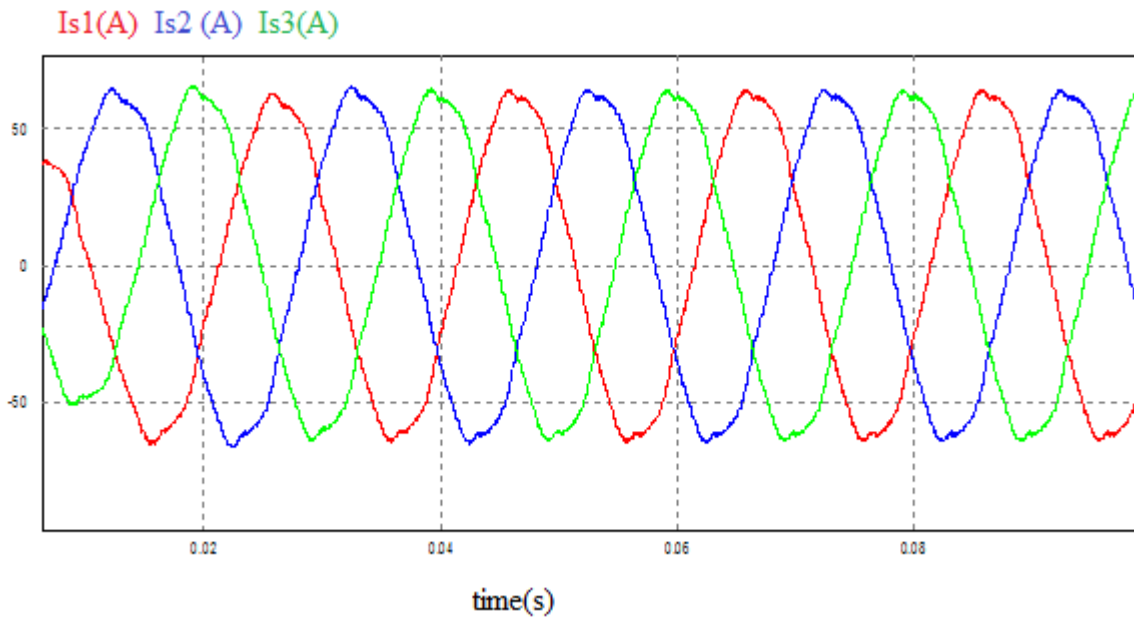


Figure IV.10 Allures des courants de la source après compensation.

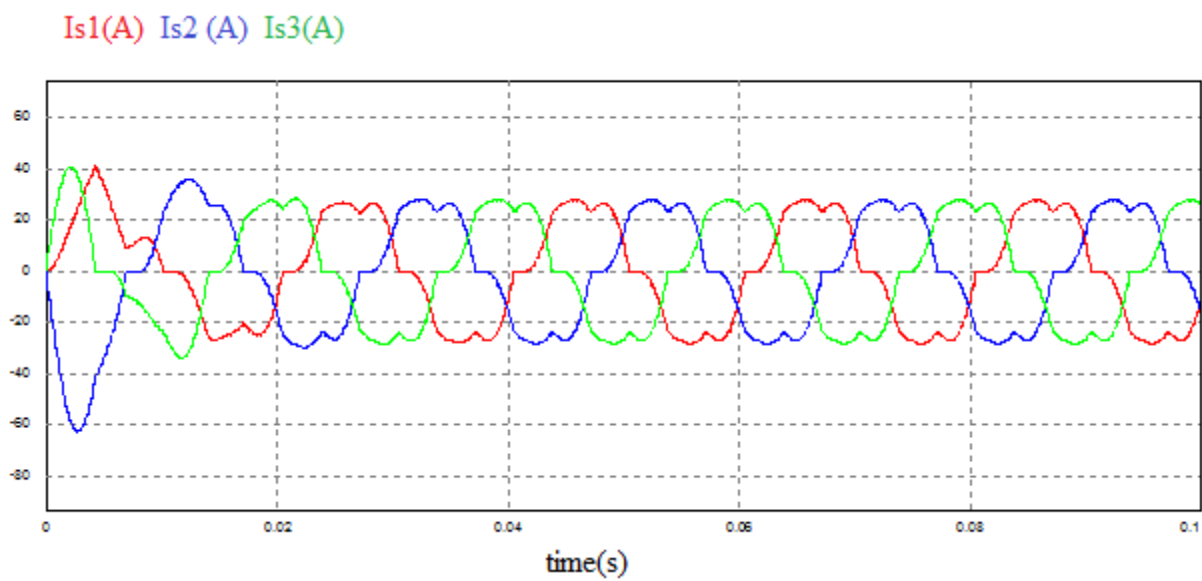


Figure IV.11 Allures des courants de la charge.

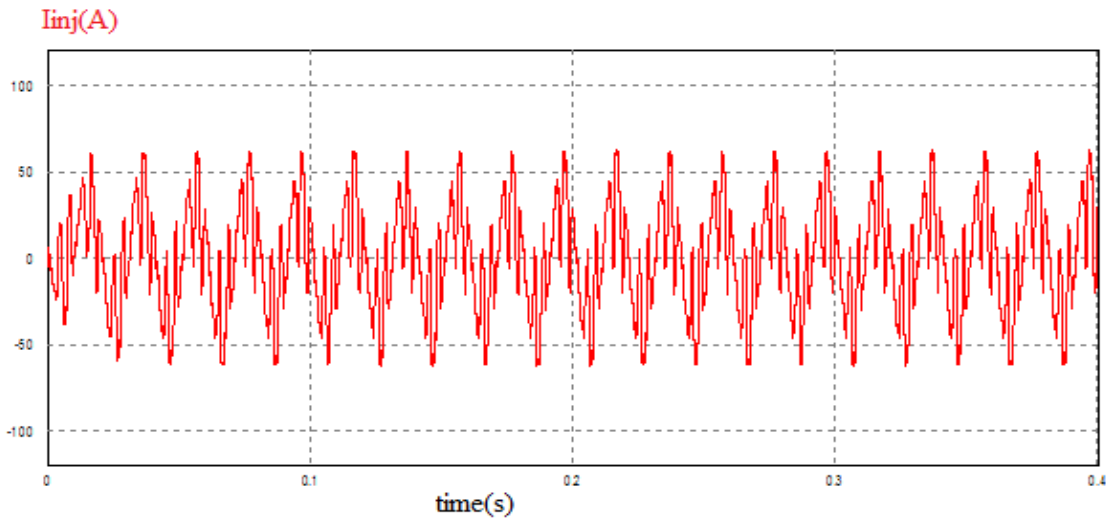


Figure IV.12 Allure du courant injecté par le filtre actif.

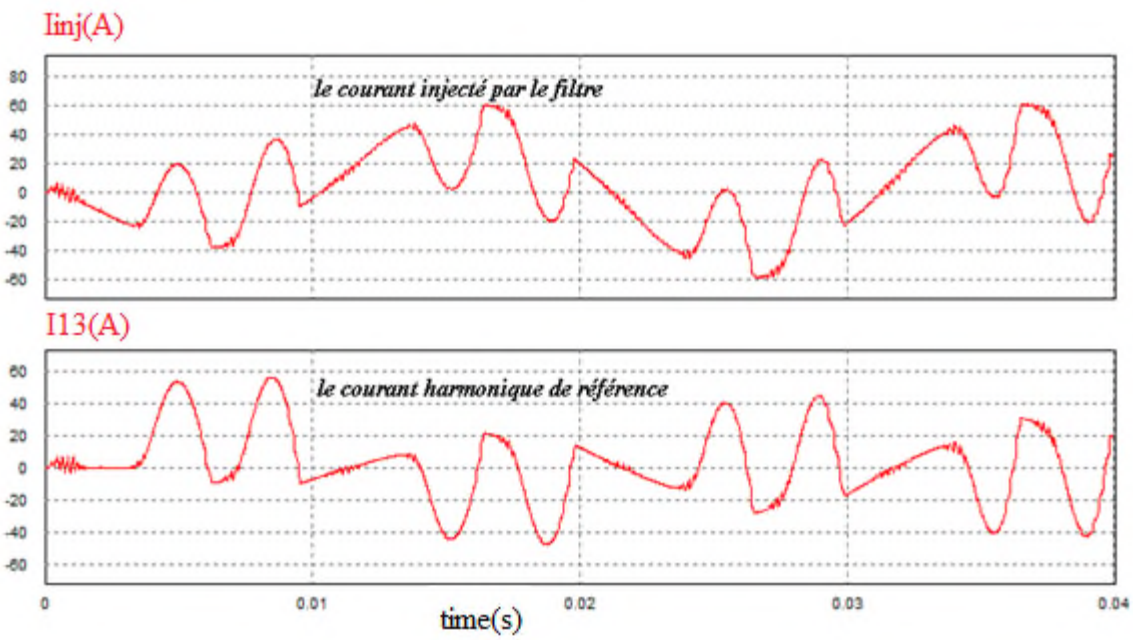


Figure IV.13 Allures du courant harmonique de référence et le courant injecté par le filtre.

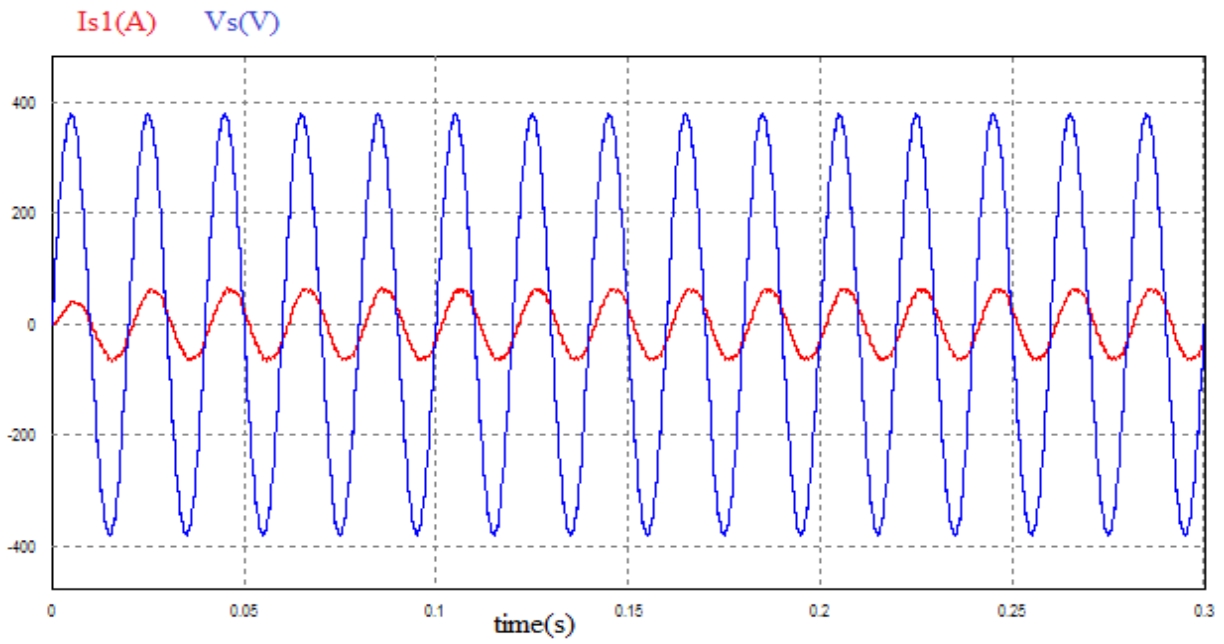


Figure IV.14 Allures du courant et de la tension de la source.

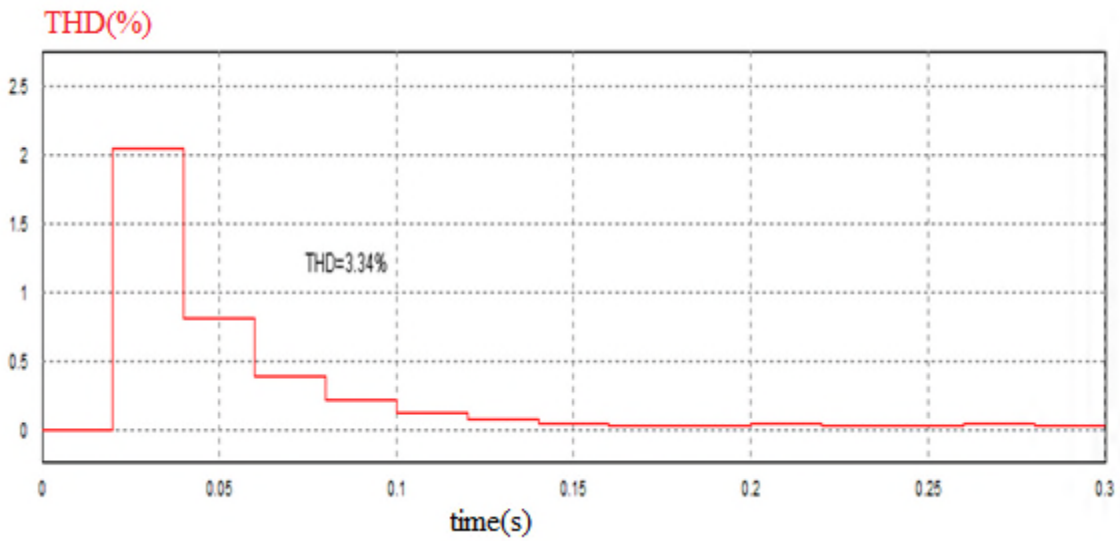


Figure IV.15 Le THD de courant de la source après compensation.

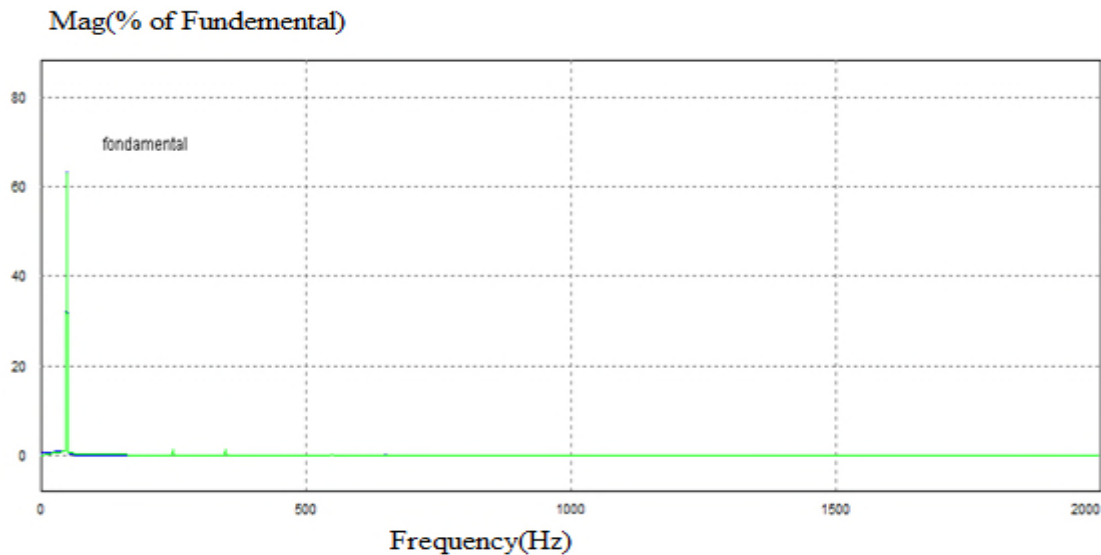


Figure IV.16 Analyse spectrale du courant après compensation

IV.5.1.2 Interprétation des résultats

La figure IV.10 représente les allures des courants 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.13, représente les allures des courants harmoniques de référence I_{13} et le courant injecté par le filtre actif I_{inj} . On constate que le courant injecté suit bien sa référence.

La figure IV.14 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.

La figure IV.15 représente le THD de courant de la source après compensation THD= 3.34 %

La figure IV.16 représente l'analyse harmonique du courant de source après avoir fait la compensation. On remarque l'élimination des harmoniques de rang 5 et 7.

- **Le facteur de puissance (F. P.)**

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

IV.6 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 courants 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

L'objet de ce mémoire porte sur le filtrage actif, en l'occurrence la compensation des courants harmonique par le biais d'un filtre actif parallèle. Pour ce faire, nous avons structuré le contenu de notre travail en quatre chapitres.

Dans les deux au premiers chapitres, nous vous présenté les différentes sources de pollution des réseaux électriques, leurs conséquences sur le réseau et l'ensemble du matériel électrique ainsi que les différentes méthodes de dépollution proposées dans littérature (les méthodes traditionnelles et d'autres modernes).

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 génèrent par la charge non linéaire. Et deux techniques de modulation, MLI et par hystérésis pour la commande l'onduleur,

Au quatrième chapitre nous avons étudié le filtre actif shunt ou la méthode des courants sont utilisées pour identifier les courants perturbateurs. En fin, nous avons présenté les résultats de simulation obtenus via PSIM, 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.

En perspective, il serait intéressant de reprendre le travail en vue de son amélioration par l'emploi d'autres techniques d'identification et de commande du filtre et de comparer les différentes méthodes.



BIBLIOGRAPHIE

- [1] **L. ZELLOUMA** « Contribution à l'étude du filtrage des harmoniques des réseaux de distribution à l'aide du filtre actif » Thèse de doctorat. Université badjimokhtar Annaba, 2010.
- [2] **L. MORAN et J. DIXON** « Power Electronics Handbook », Academic Press, Chapter 39 pp.1-36 ,2007.
- [3] **H. AKAGI, Y. KANAZAWA, A. NABAE** « Generalized theory of the instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components », IEEE Trans .Ind .Appl , vol. IA-20, No.9,pp. 652-630, 1984.
- [4] **C. COLLOMBET, J. LUPIN et J. SCHONEK** «Perturbations harmoniques dans les réseaux pollués, et leur traitement ». Cahier Technique Schneider Electric n° 152, septembre 1999.
- [5] **S .BOUGUERRA et I.BOURENNANE** « filtrage actifs parallèles des réseaux électriques avec compensation de l'énergie réactive ». mémoire d'ingénieur d'état en génie électrotechnique, Université de m'sila, 2007.
- [6] **M. Shafiee Koor** : "*Amélioration de la qualité de l'énergie à l'aide de compensateurs Actifs : série, parallèle ou conditionneurs unifiés de réseaux électriques*", Thèse de doctorat de l'école Polytechnique de l'université de Nantes, Nantes, 2006.
- [7] **L. BENCHAITA** *Etude, par simulation numérique et expérimentation, d'un filtre actif Parallèle à structure courant avec une nouvelle méthode de contrôle - commande* » Thèse de docteur de l'université Henri Poincaré, Nancy 1, 1998.
- [8] **B. SZABADOS** «Répercussions sur le réseau électrique de l'alimentation des convertisseurs de grande puissance », RGE, Vol. 12, pp. 791-796,1984.
- [9] **KEBIRI SAMIA** << modélisation et simulation d un filtre actif multi niveaux >> thèse magistrale, université mouloud Mammeri, tizi_ ouzou, 2009

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

- [10] **STEEVE BEAULIEU** << étude et mise au point d'un filtre actif d'harmoniques en vue d'améliorer la qualité de l'alimentation électrique>> mémoire université du quebec a chicoutiml, 2007
- [11] **SOUFIANE BEN ALI Dr. SADDAM BOUHANAK** << étude et simulation d'un filtre actif parallèle quatre fils >> mémoire de Fin d'Étude, Université Echahid Hama Lakhder d'El-Oued 2015
- [12] **Boucif Abdelmalek** << Filtrage actif d'un réseau Électrique >> Mémoire de Fin d'Etudes, Université Mohamed Khider Biskra, 2014
- [13] **Alali Mohamad Alaa Eddin** <<Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension >> THÈSE, École Doctorale Sciences Pour l'Ingénieur ULP – ENSAIS – ENGEES – URS, 2002
- [14] : **BOUKADOUM Aziz** << Contribution à l'étude des stratégies d'identification Harmoniques et de commande basées sur les techniques avancées pour les compensateurs actifs des réseaux électriques >> thèse de doctorat, université badji mokhtar annaba ,2015
- [15] **GHADBANE Ismail** <<Etude Et Réalisation D'un Filtre Actif Parallèle En Utilisant Différentes Stratégies De Contrôle >>, thèse de Doctorat, Université Mohamed **Khider** – **Biskra**, 2016
- [16] **KOUARA HANANE** <<application d'un filtre actif série au contrôle à tension d'un réseau basse tension>>, thèse de magistrale, université de Batna, 2006
- [17] **NEKKAR DJAMEL** <<contribution à l'étude des stratégies de commande des filtres actifs triphasés>>, thèse de magistrale, université Mohamed Cherif, souk- ahras, 2014
- [18] **HAMOUDI FARID** << commande robuste d'un filtre actif shunt a quatre fils>>, thèse de magistrale, université hadj lekher, batna, 2008
- [19] **BOULAHIA ABDELMALEK** << étude des convertisseurs statiques destines à la qualité de l'énergie électrique >>, thèse de magistrale, université de constantine, 2009
- [20] **TADJER SID-Ahmed** <<Etude d'un système de compensation d'harmoniques en utilisant un générateur photovoltaïque <<GPV>> >>, thèse de magistrale, université de M'Hamed bougara-boumerdes, 2008
- [21] **Abdusalem Mohamed Muftah**, « Structures et stratégies de commande des filtres actifs parallèle et hybride avec validations expérimentales», Thèse de Doctorat en génie électrique, Université Henri Poincaré, (France) 2008.
- [22] **Yue MA, Zhu Ling**, « An analysis and simulation of shunt hybrid active power filter » Proceeding of International Conference on Electrical Machines and Systems 2007, Oct. 8-11, Seoul Korea, pp. 90-93, 2007.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

- [23] **Akagi. H**, « Active Harmonic Filters », Proceedings IEEE, Vol. 93, N° 12, pp. 2128-2141, Décembre 2005.
- [24] **Mekri Fatiha**, « Commande robuste des conditionneurs actifs de puissance », Thèse de Doctorat en génie électrique, Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes, (France) 2007.
- [25] **Amaia Lopez de Heredia Bermeo**, « Commande avancées des systèmes dédiés à l'amélioration de la qualité de l'énergie : de la basse tension à la moyenne tension », Thèse de Doctorat en génie électrique, Institut National Polytechnique de Grenoble, (France) 2006.
- [26] **Tadger Sid Ahmed**, "Étude d'un système de compensation des harmoniques en utilisant un générateur voltaïque GPV", Thèse de Magister en génie électrique, Université M'hamed Bougara de Boumerdès, (Algérie) 2008.
- [27] **B.SAMIR**, « Filtrage actif parallèle des réseaux électriques avec compensation de l'énergie réactive », Thèse ingénieur d'état en génie électrique Université Msila 2007.
- [28] **Thierry Gouraud**, « Identification et rejet de perturbations harmoniques dans des réseaux de distribution électrique », Thèse de Doctorat de l'Ecole Centrale de Nantes, 7 Janvier 1997. de Doctorat de l'Université de Louis Pasteur – Strasbourg, 12 Septembre 2002.
- [29] **C. Lott, O. Lapierre, H. Pouliquen et S. Saadate**, « Filtrage actif des harmoniques en courant et en tension des réseaux électriques: modélisation, simulation numérique et expérimentation », Dec1997, PP.2433-2457.
- [30] **Z. Laid, B.-S. Salem**, « Etude et réalisation d'un onduleur monophasé utilisant la technique PWM à base " MOSFET" », Mémoire d'ingénieur de l'Université de Biskra, 2004.
- [31] **M.D. Epanya** « Application du filtrage actif pour une mise en œuvre de méthode de prédiction et de contrôle d'harmoniques dans un réseau de distribution électrique », Mémoire de maîtrise en génie électrique. Université du Québec 2010.
- [32] **Abdelaziz Chaghi**, « Contribution au contrôle du courant sur un réseau de distribution électrique application d'un compensateur actif », Thèse de Doctorat de l'Université de Batna, 2004.
- [33] **P. Ladoux, G. Collé**, « Compensateur d'harmoniques et de puissance réactive », Publication RESELEC 2002.
- [34] **H. Akagi**, "Modern active filters and traditional passive filters", Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences, vol. 54, no. 3, 2006.
- [35] **M. Routimo, M. Salo, H. Tuusa**, " Comparison of voltage-source and current source shunt active power filters", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 22, no.2, pp. 636-643, March 2007.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

- [36] **S. Karim** « Continuité de service des convertisseurs triphasés de puissance et prototypage "FPGA in the loop application au filtre actif parallèle », Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, Janvier 2009
- [37] **OMEIRI AMAR** «Simulation d'un filtre actif parallèle de puissance pour la compensation des harmoniques de courant », Thèse de doctorat, Université badjimokhtar annaba, 2007.
- [38] **Boucif Abdelmalek** «Filtrage actif d'un réseau Électrique», Mémoire de Fin d'Etudes Université Mohamed Khider Biskra, 2013 / 2014
- [39] **H. Akagi** « New trends in active filters for power conditioning », IEEE Trans. On Industry applications, vol. 32, No. 6, pp. 1312-1322, November/December 1996.
- [40] **H. Akagi** « Control strategy and site selection of a shunt active filter for damping of harmonic propagation in power distribution systems », IEEE Trans. on power delivery, vol. 12, No. 1, pp. 354-363, January 1997.
- [41] **Sahli Abdeslem** « *Filtrage actif et contrôle de puissances : application aux systèmes photovoltaïques interconnectés au réseau.* », Mémoire de Magister en génie électrique. universite ferhat abbas – setif UFAS (algerie)
- [42] **BENNAIDJA Tarek** « *Filtrage actif pour les réseaux déséquilibrés et distordus.* », Mémoire de Magister en génie électrique , universite ferhat abbas – setif-1- ufas (algerie)

Chapitre I : Introduction à la pollution harmonique

Chapitre II : Solutions de dépollution

Chapitre III : Etude d'un filtre actif parallèle

Chapitre IV : Simulation et interprétation des résultats

Liste des tableaux et acronymes

Références bibliographiques

Chapitre I

Chapitre II

Chapitre IV

Chapitre III

Sommaire

Références bibliographiques

Références bibliographiques

Chapitre I

Chapitre I

Chapitre II

Chapitre II

Chapitre III

Chapitre III

Chapitre IV

Chapitre IV

Sommaire

Sommaire

