

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la technologie

Département d'Electromécanique

Mémoire

Présenté pour obtenir

LE DIPLOME DE MASTER

FILIERE : Electromécanique

Spécialité : Electromécanique

Présenté Par

➤ **Zemmit Khalil**

➤ **Benlefki Lotfi**

Intitulé

Étude et Simulation du Filtrage Actif Parallèle Basé sur la Méthode des Puissances p-q

Soutenu le : / /2022

Devant le Jury composé de :

<i>Nom & Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Etablissement</i>
M. BEKKOUCHE TEWFIK	MCA	Président	Univ-BBA
M. AISSA OUALID	MCA	Encadreur	Univ-BBA
M. TALHAOUI HICHAM	MCA	Examineur	Univ-BBA
M. REFFAS ABDERRAHIM	MCA	Examineur	Univ-BBA

Année Universitaire 2021/2022

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la technologie

Département d'Electromécanique

Mémoire

Présenté pour obtenir

LE DIPLOME DE MASTER

FILIERE : Electromécanique

Spécialité : Electromécanique

Présenté Par

➤ **Zemmit Khalil**

➤ **Benlefki Lotfi**

Intitulé

Étude et Simulation du Filtrage Actif Parallèle Basé sur la Méthode des Puissances p-q

Soutenu le : / /2022

Devant le Jury composé de :

<i>Nom & Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Etablissement</i>
<i>M. BEKKOUCHE Tewfik</i>	<i>MCA</i>	<i>Président</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. AISSA OUALID</i>	<i>MCA</i>	<i>Encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. TALHAOUI Hicham</i>	<i>MCA</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M. REFFAS Abderrahim</i>	<i>MCA</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>

Année Universitaire 2021/2022

Dédicaces

A nos chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de nos études,

A nos chères sœurs pour leurs encouragements permanents et leur soutien moral.

A nos chers frères pour leur appui et leur encouragement.

A toutes nos familles pour leur soutien tout au long de notre parcours universitaire.

Zemmit & Benlefki

Remerciements

Le travail que nous présentons dans ce mémoire de fin d'études a été réalisé au département Electromécanique de l'Université Mohamed El-Bachir El-Ibrahim de Bordj Bou Arreridj, Algérie.

*Nous voudrions exprimer toutes nos reconnaissances à notre encadreur du mémoire de fin d'études le **Dr. AISSA OUALID**, enseignant chercheur à l'Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahim de Bordj Bou Arreridj, pour son encadrement, son soutien permanent, pour tous ses encouragements et discussions ainsi que pour ses précieux conseils tout au long de l'élaboration de ce travail.*

*En toute fidélité, un précieux remerciement au **Dr. BOUDECHICHE GHANIA** pour son aide et ses conseils.*

Nous remercions aussi monsieur le président et les membres du jury d'avoir accepté de juger notre travail.

Nos vifs remerciements vont également à tous nos amis pour leur soutien moral tout le long de la préparation de ce mémoire de fin d'études.

Enfin, on ne peut clore cette page de remerciements, sans exprimer notre profonde reconnaissance à l'ensemble du personnel du département Electromécanique: enseignants, ingénieurs, administrateurs et agents qui ont déployé des efforts remarquables pour nous faciliter la concrétisation de ce travail.

Liste des Symboles et des Acronymes

Liste des Symboles :

T	Etat de l'interrupteur (ouvert ou fermé).
S	Nombre des interrupteurs.
L	Inductance de la charge.
R	Résistance de la charge.
L_f	Inductance du filtre de couplage.
R_f	Résistance du filtre de couplage.
L_s	Inductance de la source.
R_s	Résistance de la source.
C_{dc}	Condensateur du bus continu.
V_{dc}	Tension du bus continu.
V_{dcref}	Tension de référence du bus continu.
P_{dc}	Puissance absorbée par le condensateur.
i_s	Courant de la source.
i_c	Courant de la charge.
i_f	Courant injecté par le filtre.
v_s	Tension de la source.
PI	Proportionnel-Intégral.
K_i	Gain intégral du régulateur.
K_p	Gain proportionnel du régulateur.
P	Valeur instantanée de la puissance réelle.
Q	Valeur instantanée de la puissance Imaginaire
V_m	Tension maximale de la source.
α - β	Repère de Concordia.
v_α	Tension instantanée suivant l'axe α .
v_β	Tension instantanée suivant l'axe β .
i_α	Courant instantané suivant l'axe α .
i_β	Courant instantané suivant l'axe β .
$\hat{\theta}$	Angle estimé.
f_c	Fréquence de coupure.
ξ	Coefficient d'amortissement.

C_1	Composante fondamentale.
C_h	Composante harmonique de rang h.
I_h	Courant harmonique de range h.
ω_n	Pulsation naturelle.

Liste des Acronymes :

CEI	Commission Electrotechnique Internationale.
<i>DC</i>	Direct Current.
<i>FAP</i>	Filtre Actif Parallèle.
FPH	Filtre Passe Haut.
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers.
IGBT	Insulated-Gate Bipolar Transistor.
<i>PLL</i>	Phase-Locked Loop.
THD	Total Harmonic Distortion.
UPQC	Unified Power Quality Conditioner.
FFT	Fast Fourier Transform.
CEM	Compatibilité électromagnétique.

*Listes des figures
et des tableaux*

Liste des figures

Figure 1.1 : Creux et coupures de tension.....	05
Figure 1.2 : Fluctuations de tension.....	06
Figure 1.3 : Cas particulier de déséquilibre du système triphasé de tension.....	06
Figure 1.4 : Variation de fréquence	06
Figure 1.5 : Harmoniques.....	07
Figure 1.6 : Représentation des harmoniques et inter-harmoniques.....	07
Figure 1.7 : Représentation de deux signaux l'un fondamental et l'autre d'ordre 3	08
Figure 1.8 : Diagramme de Fresnel des puissances	10
Figure 1.9 : Filtre passif résonant	15
Figure 1.10 : Filtre passif amorti	16
Figure 1.11 : Filtre actif parallèle	17
Figure 1.12 : Filtre actif série	17
Figure 1.13 : Combinaison parallèle-série actif	18
Figure 1.14 : Filtre actif hybride.....	18
Figure 2.1 : Structure générale du filtre actif parallèle	21
Figure 2.2 : Onduleur triphasé de tension.	22
Figure 2.3 : Etats de commutations des interrupteurs de l'onduleur	24
Figure 2.4 : Schéma de calcul des courants de références de sources avec le régulateur PI $V_{s\ max}$	26
Figure 2.5 : Synoptique de la boucle de régulation de la tension du bus continu Vdc	27
Figure 2.6 : Schéma simplifié de régulation de la tension du bus continu par le régulateur PI classique	28
Figure 2.7 : Schéma illustratif de la commande directe en courant par hystérésis du FAP	29
Figure 2.8 : Signaux de commandes par hystérésis	29
Figure 2.9 : Schéma bloque de la commande étudiée (Commande classique)	31

Liste des figures et liste des tableaux

Figure 2.10 : Résultat de simulation avec zoom du FAP basé sur le contrôle classique en courant par hystérésis : tensions et courants de sources ainsi que les courants du filtre et de la charge.	32
Figure 2.11 : Résultat de simulation de la tension du bus continu avec sa référence pour le FAP.	33
Figure 2.12 : Résultat de simulation du courant de source de la phase (a) avant filtrage par hystérésis	33
Figure 2.13 : FFT du courant de source de la phase (a) avant filtrage actif (Commande classique)	34
Figure 2.14 : Résultat de simulation du courant de source de la phase (a) après filtrage par hystérésis (Commande classique)	34
Figure 2.15 : FFT du courant de source de la phase (a) après filtrage actif parallèle (Commande classique)	34
Figure 3.1 : Structure générale du FAP contrôlé par la commande p-q	38
Figure 3.2 : Filtres d'extraction de la composante alternative	39
Figure 3.3 : Commande d'un filtre actif de puissance pour la compensation des courants harmoniques et l'énergie réactive par la méthode directe des puissances instantanées	40
Figure 3.4 : Résultats de simulation avec zoom du FAP shunt basé sur le contrôle p-q avec le régulateur PI (tensions et courants de source ainsi que courants de filtre et de charge) trois phases	41-42
Figure 3.5 : Résultats de simulation avec zoom du FAP shunt basé sur le contrôle p-q avec le régulateur PI (tensions et courants de source ainsi que courants de filtre et de charge) de la phase a	42-43
Figure 3.6 : Tension et courant de source avec FFT : (a) sans FAP, (b) avec FAP basé sur le contrôle p-q	43
Figure 3.7 : Tension du bus continu du FAP basé sur la stratégie p-q	44
Figure 3.8 : Puissances active et réactive de source du FAP basé sur la stratégie p-q	45

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Valeurs des niveaux de compatibilité pour les tensions harmoniques (CEI 61000-2-2)	11
Tableau 1.2 : Limites des émissions des courants harmoniques (CEI 61000-3-2)	11
Tableau 1.3 : Limites de perturbations définies par la norme EN 50160	12
Tableau 1.4 : Limite IEEE pour la tension harmonique.	13
Tableau 1.5 : Limite IEEE des émissions de courants harmoniques	13
Tableau 1.6 : Classification IEEE des perturbations électromagnétiques.	14
Tableau 2.1 : Tensions générées par l'onduleur de tension	24
Tableau 2.2 : Paramètres de simulation du filtre actif parallèle étudié.	30
Tableau 3.1 : Etude comparative	45

Résumé :

L'utilisation sans cesse croissante des convertisseurs statiques tels que les redresseurs à diodes et à thyristors dans le secteur industriel influe négativement sur la dégradation de la qualité d'énergie des systèmes électriques. Ces genres de convertisseurs sont connus comme charge non linéaire, caractérisés par leurs absorptions de courants non sinusoïdaux et leurs fonctionnements sous un facteur de puissance dégradé. Cependant, ces convertisseurs sont considérés comme source principale d'injection de courants harmoniques. Le présent projet de fin d'études a pour but d'améliorer la qualité de l'énergie électrique alimentant une charge polluante à l'aide d'un filtre actif parallèle de puissance basé sur la commande des puissances p-q. Cette méthode assure une bonne maîtrise du convertisseur DC/AC caractérisant ce filtre. L'efficacité de ce dernier a été évaluée avec succès par le logiciel MATLAB/Simulink où les résultats obtenus sont très acceptables.

Mots clés : Convertisseur statique, Charge non linéaire, Filtrage actif parallèle, Commande p-q, Qualité d'énergie, Distorsion harmonique totale.

Abstract :

The ever-increasing use of static converters such as diode and thyristor rectifiers in the industrial sector has a negative influence on the degradation of the energy quality of electrical systems. These types of converters are known as non-linear loads, characterized by their absorption of non-sinusoidal currents and their operation under a degraded power factor. However, these converters are considered as the main source of injection of harmonic currents. The purpose of this end-of-studies project is to improve the quality of the electrical energy supplying a polluting load using a parallel active power filter based on the control of the p-q powers. This method ensures good control of the DC/AC converter characterizing this filter. The effectiveness of the latter has been successfully evaluated by the MATLAB/Simulink software where the results obtained are very acceptable.

Keywords : Static converter, Nonlinear load, Parallel active filter, p-q control, Power quality, Total harmonic distortion.

ملخص :

إن الاستخدام المتزايد باستمرار للمحولات الثابتة مثل مقومات الصمام الثنائي و الثايرستور في القطاع الصناعي له تأثير سلبي على تدهور جودة الطاقة في الأنظمة الكهربائية. تُعرف هذه الأنواع من المحولات بالأحمال غير الخطية والتي تتميز بامتصاصها للتيارات غير الجيبية وتشغيلها تحت عامل طاقة متدهور. ومع ذلك، تعتبر هذه المحولات المصدر الرئيسي لحقن التيار التوافقي. يهدف مشروع نهاية الدراسة هذا إلى تحسين جودة الطاقة الكهربائية التي تتزود بحمولة ملوثة باستخدام مرشح طاقة نشط موازٍ يعتمد على التحكم في الطاقة p-q لضمان تحكم جيد في المحول. تضمن هذه الطريقة التحكم الجيد في المحول DC / AC الذي يميز هذا المرشح. تم تقييم فعالية هذا الأخير بنجاح بواسطة برنامج المحول MATLAB/Simulink حيث ان النتائج التي تم الحصول عليها مقبولة للغاية.

الكلمات الرئيسية : المحول الثابت، الحمل غير الخطي، الترشيح النشط المتوازي، التحكم p-q ، جودة الطاقة، التشويه التوافقي الكلي.

Sommaire

Sommaire

Introduction générale	1
<i>Chapitre 01 : Perturbations et Solutions Envisagées pour la Dépollution dans les Installations Electriques</i>	
1.1 Introduction	4
1.2 Qualité de l'énergie électrique	4
1.3 Perturbations électriques et leurs origines	5
1.3.1 Creux et coupures de tension	5
1.3.2 Fluctuation de tension	5
1.3.3 Déséquilibre du système triphasé de tension	6
1.3.4 Variation de fréquence	6
1.3.5 Variation harmoniques et inter-harmoniques	7
1.4 Perturbations harmoniques	8
1.4.1 Origines des harmoniques.....	8
1.4.2 Conséquences des harmoniques	8
1.4.3 Caractérisation des perturbations harmoniques	9
1.4.3.1 Taux de distorsion harmonique	9
1.4.3.2 Facteur de puissance	9
1.5 Normes et réglementation	10
1.6 solution de dépollution du réseau électrique	14
1.6.1 Solutions traditionnelles de dépollution	14
1.6.2 Solutions modernes de dépollution	16
1.6.2.1 Filtre actif parallèle	16
1.6.2.2 Filtre actif série	17
1.6.2.3 Filtre combiné	18
1.6.2.4 Filtre actif hybride	18

1.7 Conclusion 19

***Chapitre 02 : Présentation et Simulation
du Filtre Actif Parallèle Classique***

2.1 Introduction 21

2.2 Description du filtre actif parallèle 21

 2.2.1 Élément de dépollution (convertisseur DC/AC) 22

 2.2.2 Système de stockage d'énergie 25

 2.2.3 Inductance de couplage 25

2.3 Commande en courant du filtre actif parallèle 26

 2.3.1 Production des références de courants harmoniques et régulation du bus continu 26

 2.3.1.1 Régulateur Proportionnel-Intégral (PI) 28

 2.3.2 Délivrance des signaux de commande du dispositif de dépollution 29

2.4 Simulation de la commande étudiée 30

2.5 Conclusion 35

***Chapitre 03 : Présentation et Simulation du Filtre
Actif Parallèle Proposé***

3.1 Introduction..... 37

3.2 Stratégie des puissances instantanées (p-q) 37

3.3 Résultats de simulation 40

3.4 Etude comparative..... 45

3.5 Conclusion 46

Conclusion générale et perspectives 48

Références Bibliographiques..... 50

Introduction Générale

Introduction Générale

Au cours des dernières années, le domaine de l'électronique de puissance a connu un développement considérable et offre un énorme potentiel de conversion de l'énergie électrique. La recherche dans ce domaine considère plusieurs aspects, notamment les topologies des convertisseurs, les structures et les performances des interrupteurs de puissance ainsi que les techniques de commande [1]. D'autre part, suite à l'utilisation croissante de charges non linéaires, basées sur l'électronique de puissance reliées aux réseaux électriques ont des effets négatifs. Ces charges non linéaires produisent des courants harmoniques en fonction de la consommation résultante de la puissance réactive et une dégradation du facteur de puissance du réseau électrique [2,3]. Les perturbations causées par ces charges non linéaires au réseau de distribution sont appelées pollution harmonique qui a des conséquences néfastes sur les appareils électriques connectés au réseau [3-6]. Il est donc impérieux d'imposer des règles harmoniques de contrôle de la pollution aux fins de la protection des consommateurs ainsi que les fournisseurs d'énergie, grâce à l'introduction de dispositions réglementaires appropriées. Nous citerons certaines normes internationales adaptées récemment, comme IEEE Standard 519, EN 50160 et CEI 61000 qui imposent des limites et des exigences aux THD des courants (5%) et des tensions (3%) au sein du réseau d'alimentation [6].

Le travail présenté dans ce mémoire concerne particulièrement l'étude et la simulation d'un filtre actif parallèle à structure de tension à trois fils, destiné à compenser les courants harmoniques générés par la charge non linéaire et la compensation de l'énergie réactive. Le filtre actif parallèle dispose de deux fonctions principales : une fonction d'identification de courant harmonique et une fonction de commande de l'onduleur pour injecter les courants de compensation. Notre travail concerne l'étude conjointe de l'identification harmonique et de la commande de convertisseur [7].

Pour atteindre ces objectifs, notre mémoire sera divisé en trois chapitres :

Le premier chapitre sera consacré à présenter les différents phénomènes qui affectent la qualité de l'énergie électrique, On présentera les solutions traditionnelles et modernes de dépollution.

Le deuxième chapitre présentera le principe de fonctionnement d'un filtre actif parallèle et sa structure ainsi que la stratégie de la commande classique du filtre actif de puissance. Cette dernière est basée sur le régulateur de tension PI et les comparateurs à hystérésis du courant.

Le troisième chapitre présentera la stratégie de commande pour contrôler les courants du FAP par la méthode des puissances p-q. Les différents résultats de simulation obtenus sont aussi présentés dans ce chapitre.

Enfin, on terminera par une conclusion générale et quelques perspectives.

CHAPITRE 01 :
Perturbations et Solutions
Envisagées pour la
Dépollution dans les
Installations Electriques

1.1 Introduction

Comme tout générateur d'énergie électrique, un réseau de puissance fournit de l'énergie aux appareils utilisateurs par l'intermédiaire des tensions qu'il maintient à leurs bornes [2]. Il permet également de fournir la puissance électrique nécessaire aux différentes charges connectées au réseau électrique. L'un des paramètres essentiels de ces tensions est la forme d'onde qui doit être la plus proche possible d'une sinusoïde. Lorsque celle-ci n'est plus sinusoïdale, on rencontre des perturbations qui peuvent affecter le bon fonctionnement de nombreux équipements et de charges raccordées sur le réseau. Dans ces conditions, des problèmes de compatibilité électromagnétiques peuvent survenir entre les éléments connectés au réseau [8].

L'objectif de ce chapitre introductif est de présenter une étude sur la pollution harmonique dans le réseau électrique et les différents moyens de dépollution. Nous exposons dans un premier temps les bases techniques et théoriques permettant d'effectuer une étude des harmoniques et des générateurs de grandeurs électriques harmoniques surtout celles produites par les redresseurs classiques à commutation naturelle. Pour cela, nous parlons de problématique des harmoniques, de leurs conséquences et des limites tolérées et imposées par les normes internationales des perturbations. Nous présentons ensuite les différentes solutions possibles face à la problématique des harmoniques dans les réseaux électriques et nous évoquons aussi l'utilité et le rôle primordial de l'électronique de puissance dans la constitution et la mise en œuvre des structures modernes de compensations [3].

1.2 Qualité de l'énergie électrique

Sauf exception, les tensions d'un réseau électrique constituent un système triphasé alternatif, dont la fréquence de base est de 50 Hz ou de 60 Hz. Chacune de ces phases devra avoir impérativement les paramètres suivants [9] :

- De même fréquence ;
- De même déphasage ;
- De même amplitude ;
- Et doit être équilibré côté source et symétrique côté charge.

1.3 Perturbations électriques et leurs origines

Les perturbations électriques affectent l'un des paramètres de la qualité d'énergie. Ces différentes perturbations un ou plusieurs des quatre paramètres précédemment définis. On peut alors distinguer les différents types de perturbations suivants [6],[10] :

1.3.1 Creux et coupures de tension

Un creux de tension est une diminution brutale de la tension d'une valeur entre 10% et 90% de sa valeur nominale (U_n) pendant une durée allant de 10 ms à 1 minute.

Cependant, une coupure de tension est définie comme diminution brutale de la tension. Généralement, pour des coupures brèves, il y a lieu d'une diminution supérieure à 90% de U_n pour un temps $10 \text{ ms} < t < 1 \text{ min}$. La Figure 1.1 montre un exemple de coupure et de creux de tension [9].

Les principales causes des creux de tension sont les perturbations causées par l'exploitation de réseaux tels que la mise sous tension de grands transformateurs. Activation des condensateurs, démarrage simple des grands moteurs...etc.

Les creux de tension peuvent causer des perturbations au niveau du couple pour les machines en rotation ; pannes intempestives ; perturbation d'appareillage électronique.

Les conséquences peuvent être extrêmement coûteuses (temps de redémarrage se chiffrant en heures, voire en jours ; pertes de données informatiques ; dégâts aux produits, voire aux équipements de production ; ... etc [11].

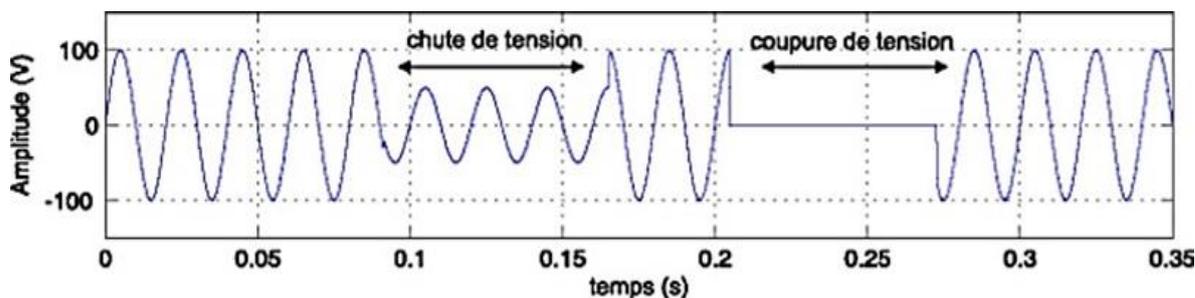


Figure 1.1 : Creux et coupures de tension [13].

1.3.2 Fluctuations de tension

Les fluctuations de tension sont des variations d'amplitude de tension de plus ou moins 10 % sur une période d'une certaine seconde. La Figure 1.2 illustre un exemple de fluctuation de tension [9].

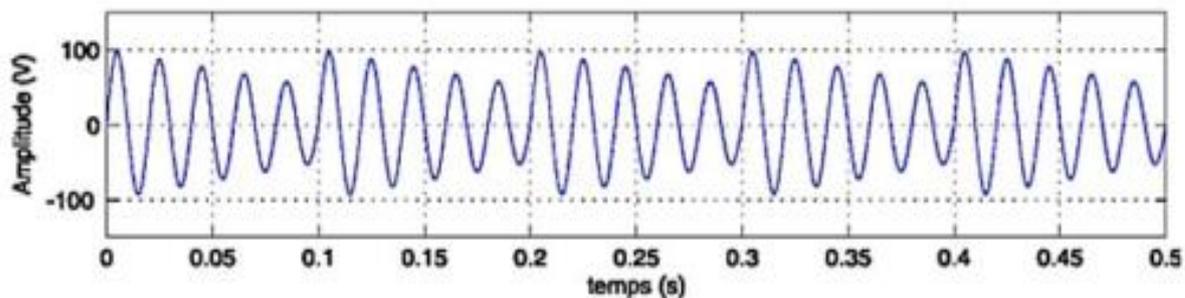


Figure 1.2 : Fluctuations de tension [13].

1.3.3 Déséquilibre du système triphasé de tension

Un système d'alimentation triphasé est dit équilibré ou symétrique si les tensions et les courants triphasés ont la même amplitude et sont décalés de 120° l'un par rapport à l'autre comme le montre la Figure 1.3 [12].

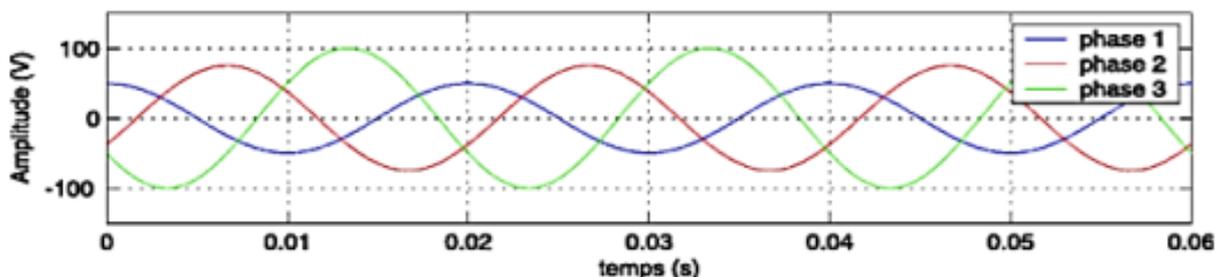


Figure 1.3 : Cas particulier de déséquilibre du système triphasé de tension [13].

1.3.4 Variation de fréquence

Des changements importants dans la fréquence du réseau peuvent affecter le réseau, comme le montre la Figure 1.4. Ceci est rare et n'est observé que dans des conditions spécifiques où la valeur moyenne de la fréquence fondamentale est de 50 Hz [12].

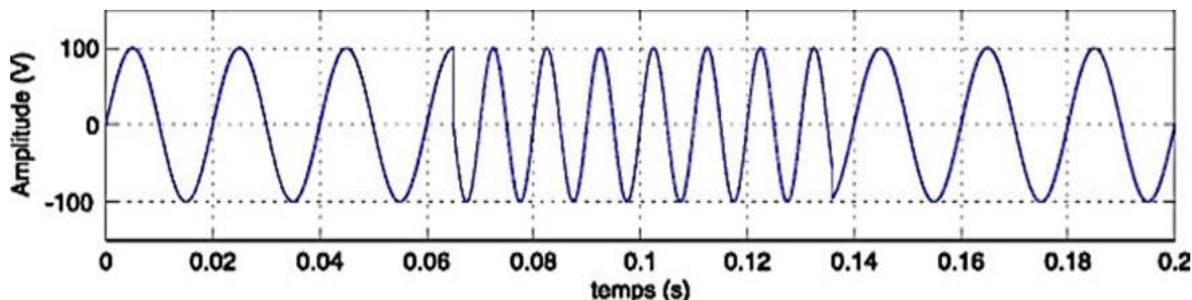


Figure 1.4 : Variation de fréquence [13].

1.3.5 Variation harmoniques et inter-harmoniques

Les harmoniques rencontrées sur les réseaux de distribution dues à une utilisation excessive des charges non linéaires générant des courants harmoniques. Ces harmoniques sont des superpositions de l'onde fondamentale à 50Hz, qui est aussi une onde sinusoïdale, mais à un multiple entier de la fréquence fondamentale.

La Figure 1.5 illustre la superposition de la 3ème harmonique sur le courant fondamental à 50Hz [13].

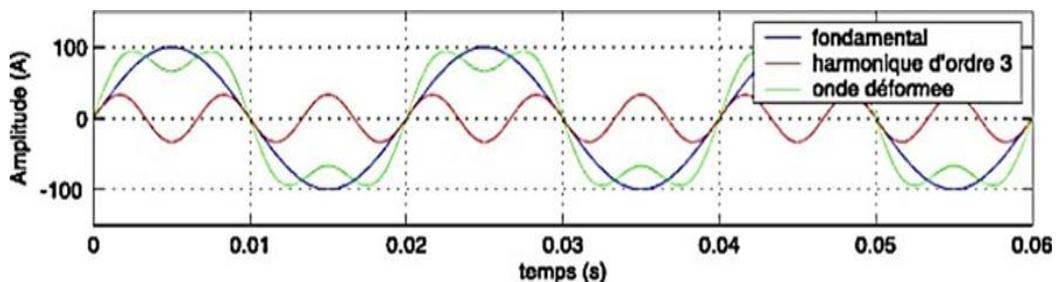


Figure 1.5 : Harmoniques [13].

Cependant, les inter-harmoniques sont des composants dont les fréquences ne sont pas des multiples entiers de la fréquence de la puissance fondamentale.

Les infra-harmoniques sont des composantes sinusoïdales qui ont des fréquences inférieures à celle du fondamental. La Figure 1.6 montre les harmoniques et inter-harmoniques [14].

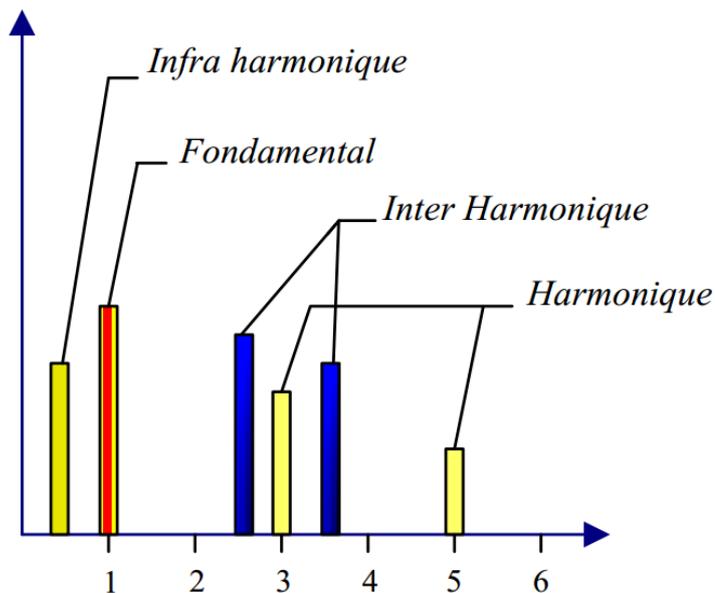


Figure 1.6 : Représentation des harmoniques et inter-harmoniques.

1.4 Perturbations harmoniques

1.4.1 Origines des harmoniques

Le signal harmonique est une superposition sur l'onde fondamentale à 50 Hz ainsi que sur les ondes sinusoïdales mais de fréquences multiples entier de celle du fondamental. La Figure.1 montre la superposition de l'harmonique de rang 3 sur une fondamentale à fréquence 50 Hz. La principale source de la présence de courants harmoniques dans les réseaux électriques est l'utilisation de plus en plus croissante d'équipements à base d'électronique de puissance [7].

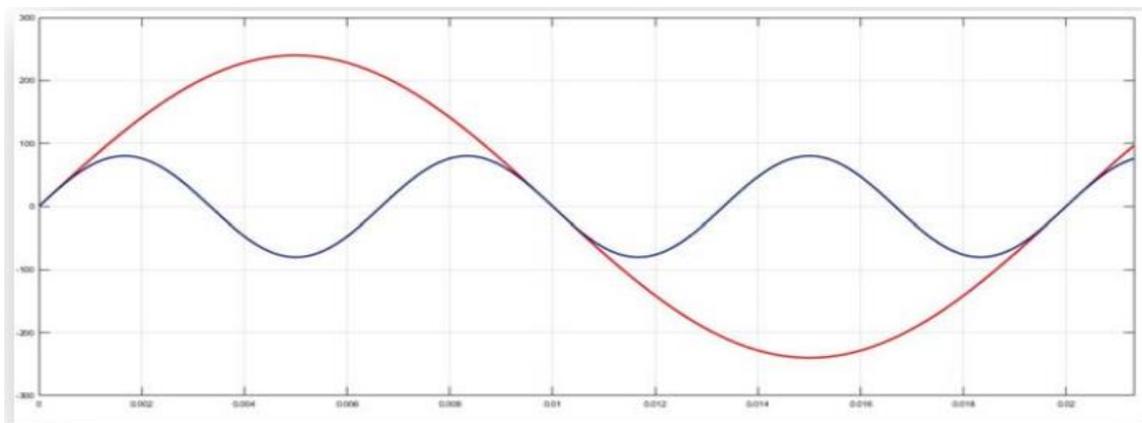


Figure 1.7 : Représentation de deux signaux l'un fondamental et l'autre d'ordre 3 [7].

1.4.2 Conséquences des harmoniques

De nombreux effets des harmoniques sur les installations et les équipements électriques peuvent être cités. Les effets les plus importants sont l'échauffement, l'interférence avec les réseaux de télécommunication, les défauts de fonctionnement de certains équipements électriques et le risque d'excitation de résonance [6],[15] :

Effets à court terme :

- ✓ Le circuit de protection n'est pas déclenché à temps ;
- ✓ Interférence avec les réseaux de télécommunication distants ;
- ✓ Défaillance du dispositif de commande ou de régulation ;
- ✓ Vibration des moteurs alternatifs ;
- ✓ Diminution de la précision des équipements de mesure ;
- ✓ Bruit dans les inductances ou les transformateurs ;

Effets à long terme :

- ✓ La chaleur et les pertes dues aux effets Joule dans les équipements et les câbles ;
- ✓ Vieillessement des isolateurs et des moteurs ;
- ✓ Risque d'excitation par résonance ;
- ✓ Fatigue mécanique des équipements.

1.4.3 Caractérisation des perturbations harmoniques

Différents critères sont définis pour quantifier ces perturbations. Parmi ces critères, nous citerons les plus utilisés [16].

1.4.3.1 Taux de distorsion harmonique THD (%)

Le taux de distorsion harmonique est le rapport des valeurs efficaces entre la fréquence fondamentale et les autres. Le taux de distorsion harmonique d'un système varie avec le niveau et la fréquence du signal d'essai. Ces paramètres de la mesure doivent être spécifiés dans les procédures et les comptes rendus, est représentés par l'équation suivante [17] :

$$THD(\%) = \frac{\sum_{h=2}^{\infty} C_h^2}{C_1^2} \quad (1.1)$$

C_1 : désigne la composante fondamentale.

C_h : désigne le composant harmonique de rang h.

1.4.3.2 Facteur de puissance

En présence de des harmoniques, la puissance apparente S est composée d'une puissance active (P), réactive (Q) et déformante (D). Son expression est donnée par l'équation suivante [18] :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (1.2)$$

Dans le cas d'un signal sinusoïdal, le facteur de puissance F_p est égal au quotient de la puissance active P et de la puissance apparente S :

$$F_p = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad (1.3)$$

Le facteur de puissance sera toujours inférieur à 1.

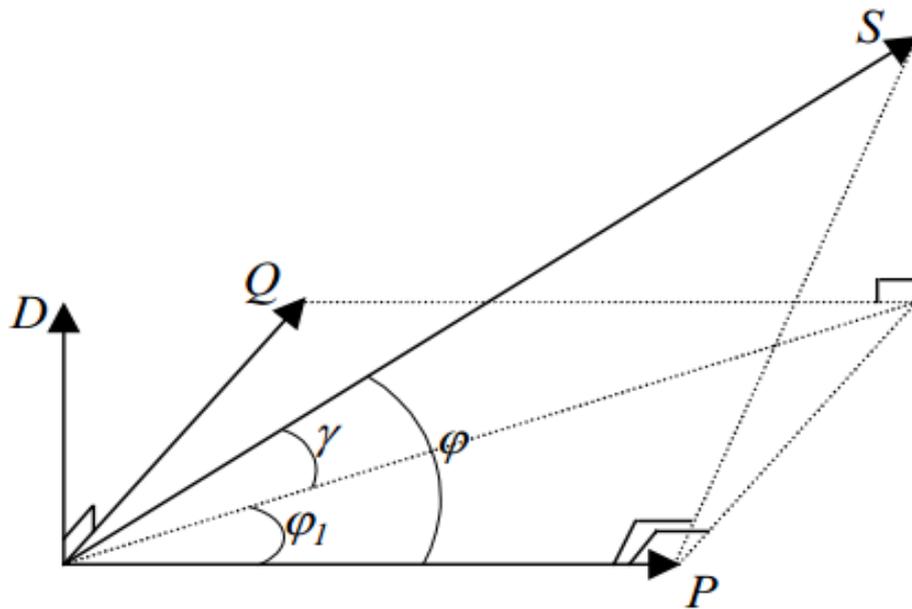


Figure 1.8 : Diagramme de Fresnel des puissances [2].

1.5 Normes et réglementation

Pour assurer une qualité d'énergie satisfaisante en limitant les effets des perturbations harmoniques, les distributeurs énergétiques et les utilisateurs doivent être en conformité avec les normes. L'objectif des normes et des réglementations est de limiter les dysfonctionnements occasionnés par les harmoniques. Ces normes doivent être d'origines diverses, à titre d'exemple : Commission Electrotechnique Internationale (CEI) et Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) sont les deux principaux organismes de normalisation internationaux dans le domaine électrotechnique [6],[19].

- **La norme internationale CEI 61000** : Elle se rapporte à la compatibilité électromagnétique (CEM) dont certaines parties ont été rendues obligatoires dans l'union européenne et retranscrites dans les droits nationaux sous l'appellation NF EN 61000 [16].
- **La norme internationale CEI 61000-2-2** : elle définit les niveaux de compatibilité de tensions harmoniques sur le réseau basse tension pour protéger les équipements raccordés sur ce réseau électrique comme le montre le tableau 1.1.

Tableau 1.1 : Valeurs des niveaux de compatibilité pour les tensions harmoniques (CEI 61000-2-2) [6].

Rangs impairs		Rangs impairs		Rangs pairs	
Rang	Taux (%)	Rang	Taux (%)	Rang	Taux (%)
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.3	6	0.5
13	3	21	0.2	8	0.5
17	2	> 21	0.2	10	0.5
19	1.5			12	0.2
23	1.5			>12	0.2
25	1.5				
>25	0,2+1,3*25/h				

- **La norme internationale CEI 61000-3-2 :** Elle détermine les niveaux de compatibilité des courants injectés dans le réseau pour des équipements dont le courant de phase est inférieur à 16A [6] (Courant appelé par les appareils ≤ 16 A par phase), comme le montre le tableau 1.2.

Tableau 1.2 : Limites des émissions des courants harmoniques (CEI 61000-3-2) [6].

Rang harmonique	Courant harmonique maximal autorisé (A)
Harmoniques impaires	
2	1.08
3	2.30
4	0.43
5	1.14
6	0.30
7	0.77
$8 \leq h \leq 40$	$0.23 * 8/h$
Harmoniques paires	
9	0.4
11	0.33
13	0.21
$15 \leq h \leq 39$	$0,15 * 15/h$

L'objectif de la CEI est de promouvoir la coopération internationale sur toutes les questions relatives à la normalisation dans les domaines électriques et électroniques [9].

- La norme EN 50160 définit les caractéristiques principales des tensions fournies par les réseaux de distribution basse ou moyenne tension qui précise les caractéristiques de la tension fournie par les réseaux publics basse tension, comme le montre le tableau 1.3 [10],[16].

Tableau 1.3 : Limites de perturbations définies par la norme EN 50160 [13].

Amplitude de la tension	<ul style="list-style-type: none">• Pour chaque période d'une semaine 95% des valeurs efficaces moyennes sur 10 minutes doivent être dans la plage $V_n \pm 10\%$
Variations rapides de la tension	<ul style="list-style-type: none">• De 5 à 10% de V_n (4 à 6% en moyenne tension).
Creux de tension	<ul style="list-style-type: none">• Profondeur : entre 10% à 99% de V_n.• Durée : entre 10 ms et 1minute.• Nombre : quelques dizaines à 1millier par an.
Coupures brèves	<ul style="list-style-type: none">• Durée: jusqu'à 3 minutes.• Nombre : quelques dizaines à plusieurs centaines par an.
Coupures longues	<ul style="list-style-type: none">• Durée: supérieure à 3 minutes.• Nombre : entre 10 et 50 par an.
Fréquences	<ul style="list-style-type: none">• 50Hz $\pm 1\%$ pendant 95% d'une semaine.• 50Hz +4%, 6% pendant 100% d'une semaine.

IAS (Industrial Applications Society) et **PES** (Power Engineering Society) sont les deux entreprises de l'IEEE qui peuvent également œuvrer pour garantir une bonne qualité de l'énergie [7] :

Norme IEEE : elle définit les exigences et les recommandations pratiques relatives au contrôle harmonique des systèmes électriques d'énergie. Cette norme s'applique aussi bien aux fournisseurs qu'aux utilisateurs et couvre toutes les plages de puissance. Dans ce standard, les limites sont données par rapport au quotient des courants de court-circuit au point de raccordement du réseau et du courant de charge fondamental [2],[16].

La norme IEEE 519 recommande notamment une distorsion harmonique de la tension totale inférieure à 5 % pour les systèmes dont la tension est inférieure à 69 kV et la distorsion harmonique de la tension individuelle est inférieure à 3% comme représenté dans les tableaux 1.4 et 1.5 [10].

Tableau 1.4 : Limite IEEE pour la tension harmonique [6].

Tension au point de raccordement (Vn)	Distorsion Harmonique Individuelle (%)	THD Vn (%)
Vn ≤ 69kV	3,0	5,0
69kV < Vn ≤ 161kV	1,5	2,5
Vn > 161kV	1,0	1,5

Tableau 1.5 : Limite IEEE des émissions de courants harmoniques [6].

Vn ≤ 69kV						
Icc / Ich	h < 11	11 ≤ h < 17	17 ≤ h < 23	23 ≤ h < 35	35 ≤ h	TDD
<20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20-50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50-100	10.0	4.5	4	1.5	0.7	12.0
100-1000	12		5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0
69kV < Vn ≤ 161kV						
<20	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
20-50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0
50-100	5.0	2.25	2.0	1.25	0.35	6.0
100-1000	6.0	2.75	2.5	1.0	0.5	7.5
>1000	7.5	3.5	3.0	1.25	0.7	10
Vn > 161kV						
<50	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
≥50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0

Tableau 1.6 : Classification IEEE des perturbations électromagnétiques [6].

		Durée	Magnitude de tension
Variations de courte durée			
Instantané	Creux	0.5–30cycles	0.1–0.9p.u.
	Surtension	0.5–30cycles	1.1–1.8p.u.
Momentané	Coupure	0.5cycles–3s	<0.1p.u.
	Creux	30cycles–3s	0.1–0.9p.u.
	Surtension	30cycles–3s	1.1–1.8p.u.
Temporaire	Coupure	3s–1min	<0.1p.u.
	Creux	3s–1min	0.1–0.9p.u.
	Surtension	3s–1min	1.1–1.8p.u.
Variations de longue durée			
	Coupure longue	> 1min	0.0p.u.
	Surtension	> 1min	0.8–0.9p.u.
	Sous-tension	> 1min	1.1–1.2p.u.

1.6 Solutions de dépollution du réseau électrique

Les solutions de réduction des perturbations harmoniques peuvent être regroupées en deux groupes : les solutions traditionnelles et les solutions modernes. La première consiste à utiliser des convertisseurs statiques moins ou peu polluants, tandis que la seconde consiste en la mise en œuvre d'un filtrage des composantes harmoniques et à compenser les courants ou les tensions harmoniques [7].

1.6.1 Solutions traditionnelles de dépollution

Ce sont des techniques qui doivent être connues de tous les électriciens. Elles apportent une solution facile et rapide pour certains cas de perturbations bien localisées et utilisent des composants passifs (inductances, condensateurs, transformateurs) et des branchements qui

modifient le schéma de l'installation [16],[20]. Il existe plusieurs solutions pour limiter la propagation des signaux harmoniques dans les réseaux électriques :

➤ **Agir sur la structure de l'installation :**

Le grand pollueur est alimenté par un transformateur séparé afin de le séparer d'un récepteur sensible. Pour le pollueur moyen, il est préférable de l'alimenter par des câbles distincts au lieu d'une transmission parallèle [13].

➤ **Rééquilibrage des courants du réseau électrique :**

Puisque les courants déséquilibrés dans un réseau électrique basse tension résultent généralement des charges monophasées et biphasées mal réparties, la solution préconisée consiste en une répartition identique des charges sur les trois phases. Les charges monophasées et triphasées mal distribuées entraînant un déséquilibre des courants dans un système électrique basse tension [2], [18].

➤ **Filtrage passif**

Cette méthode est plus économique et la plus utilisée. L'utilisation de l'inductance et du condensateur est ajustée pour contrôler les harmoniques. Il existe pour ce type de filtrage passif deux types à savoir :

- **Filtres passifs résonants :** qui sont constitués d'un circuit LC série avec résistance utilisée généralement pour éliminer les harmoniques de rang 5 et 7 [9].

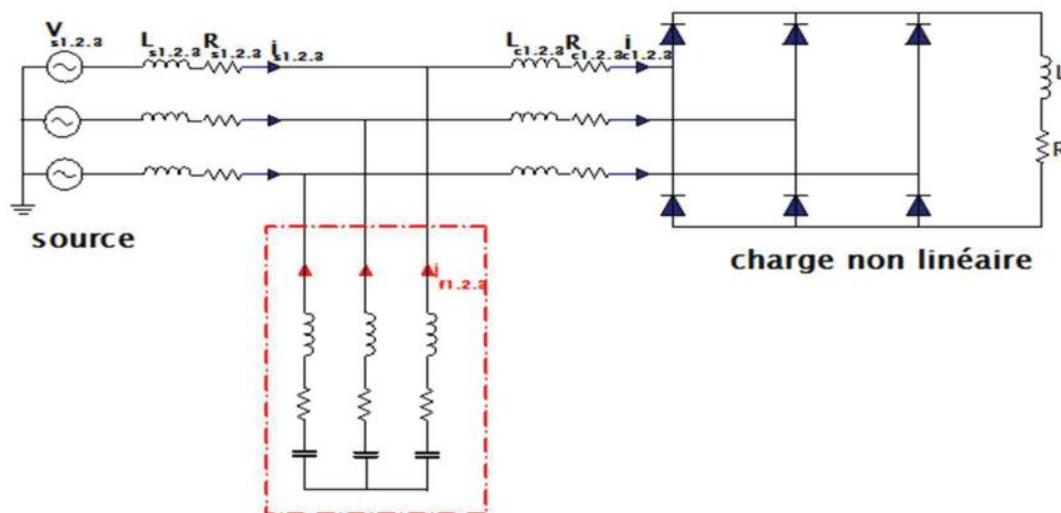


Figure 1.9 : Filtre passif résonant [9].

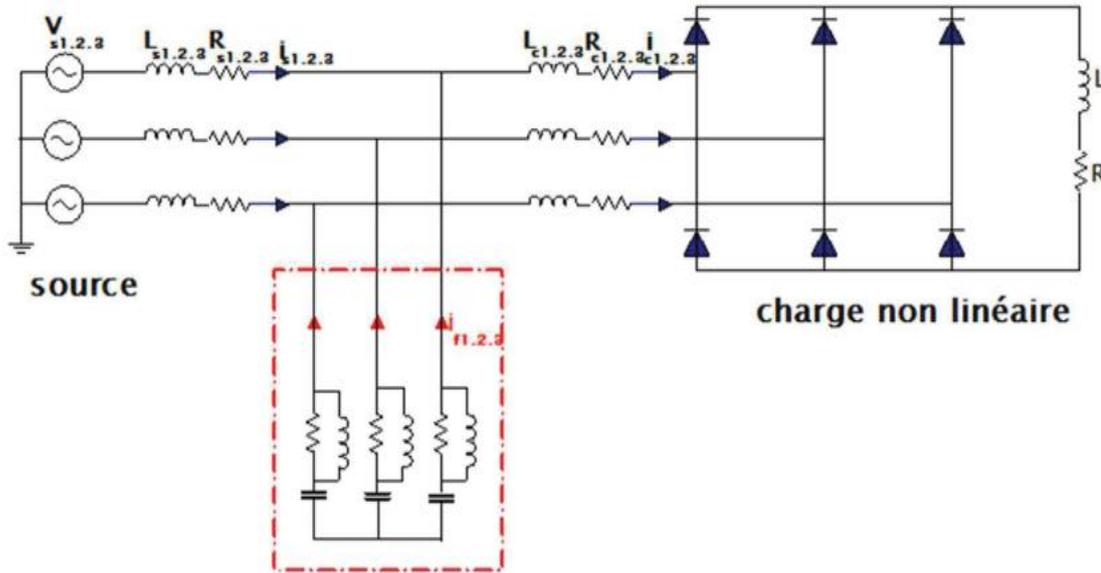


Figure 1.10 : Filtre passif amorti [9].

Malgré sa large utilisation dans l'industrie, ce dispositif a certains inconvénients [13] :

- Problèmes de résonance avec l'impédance du réseau ;
- Equipements volumineux ;
- Manque de souplesse à s'adapter aux variations de la charge et du réseau.

1.6.2 Solutions modernes de dépollution

Les solutions de dépollution traditionnelle ne répondant plus à l'évolution des réseaux électriques et des charges à protéger pour fournir aux utilisateurs une bonne qualité de l'énergie électrique, même dans les conditions de fonctionnement les plus perturbées. Avec l'émergence de nouvelles technologies basées sur les semi-conducteurs telles que MOSFET et IGBT. Le but de ces filtres est de générer des courants harmoniques ou des tensions afin de compenser les perturbations responsables de la dégradation du rendement des équipements et installations électriques. Les principaux types de filtrages actifs existants sont : les filtres actifs parallèles ; les filtres actifs série ; les filtres combinés parallèle série et les filtres actifs hybrides actif-passif [14],[21].

1.6.2.1 Filtre actif parallèle

Il est aussi appelé compensateur de dérivation, connecté en parallèle au réseau de distribution. Il est habituellement contrôlé comme un générateur de courant. Son Principe est

d'injecter dans le réseau électrique des courants harmoniques (i_{inj}) égaux à ceux absorbés par la charge non linéaire mais en opposition de phase, de sorte que le courant fourni par le réseau (i_s) soit sinusoïdal. Ainsi, il empêche les courants harmoniques de ne pas passer par l'impédance du réseau. Par conséquent, il améliore le taux de distorsion harmonique du courant [22],[23].

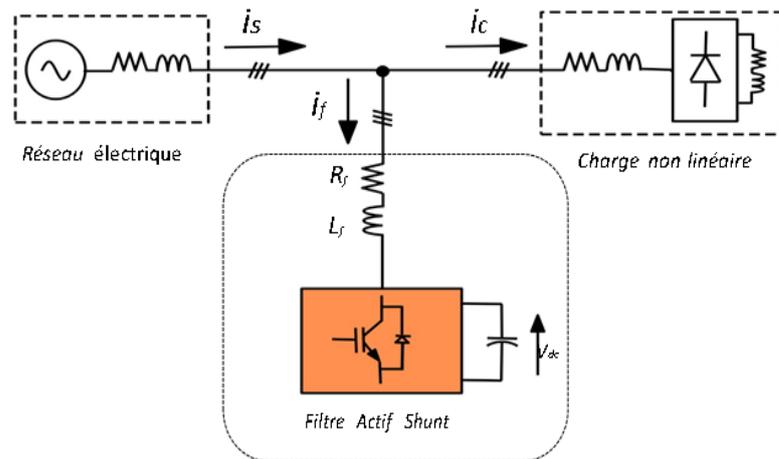


Figure 1.11 : Filtre actif parallèle [13].

1.6.2.2 Filtre actif série

Il est considéré comme une source de tension reliée en série avec le réseau électrique. On propose généralement la résolution des harmoniques de tension. Le filtre actif de puissance génère des tensions harmoniques pour compenser les tensions harmoniques présentes au réseau électrique [9].

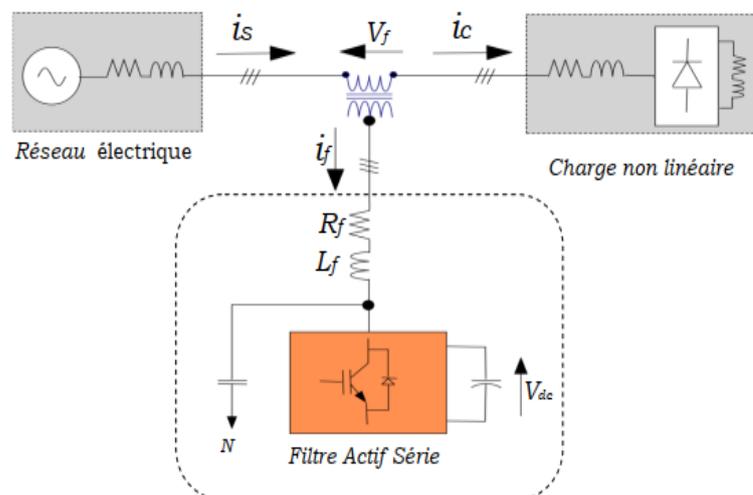


Figure 1.12 : Filtre actif série [13].

1.6.2.3 Filtre combiné

Il s'agit d'une solution de compensation universelle basée sur le fonctionnement simultané de filtres actifs en parallèle et série. Donc, il présente les avantages cumulés de filtres actifs en parallèle et en série. Cette topologie est appelée en anglais Unified Power Quality Conditionner « UPQC » [7].

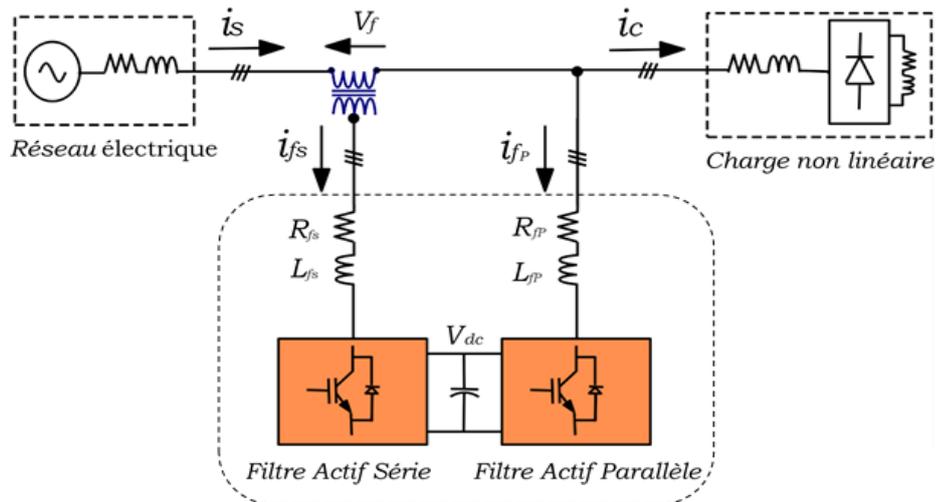


Figure 1.13 : Combinaison parallèle-série actif [13].

1.6.2.4 Filtre actif hybride

Pour réduire le dimensionnement et en conséquence le prix des filtres actifs, la combinaison des filtres passifs et actifs représente une bonne solution (Figure 1.14) [10]. Le rôle des filtres passifs réside dans l'élimination des harmoniques basse fréquence.

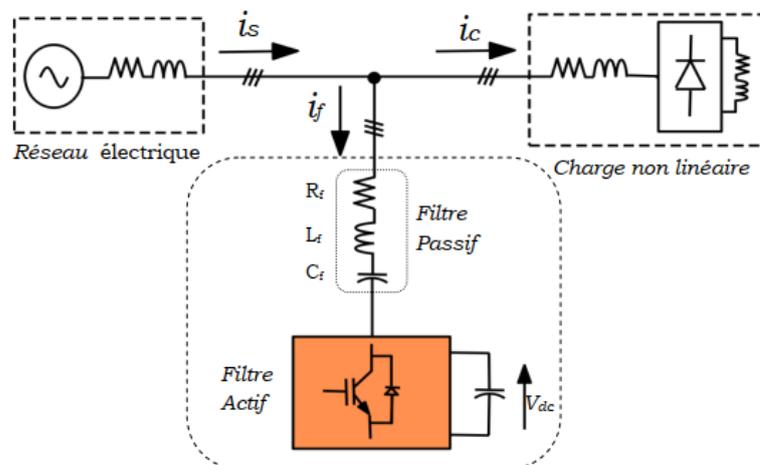


Figure 1.14 : Filtre actif hybride [13].

1.8 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les divers problèmes de pollution du réseau électrique engendrés par les charges polluantes (non-linéaires). De plus, on a présenté les normes fixées par les organismes internationaux. Ensuite, nous avons vu les solutions classiques et modernes appliquées pour la dépollution des réseaux électriques. Les solutions classiques telles que les filtres passifs qui présentent certaines limites et des solutions modernes à base de filtres actifs de puissance efficace pour la compensation des harmoniques. Le deuxième chapitre sera dédié à l'étude et la simulation d'un filtre actif parallèle de puissance.

CHAPITRE 02 :
Présentation et Simulation
du Filtre Actif Parallèle
Classique

2.1 Introduction

Le filtrage actif parallèle est une méthode moderne utilisée pour l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique, la réduction du taux de distorsion harmonique et l'augmentation du facteur de puissance [24]. Les objectifs de recherche que nous avons représentés dans ce chapitre consistent d'améliorer les performances de compensation du filtre actif parallèle dans le cas de conditions indésirables de fonctionnement des réseaux électriques [2]. Nous avons montré dans le chapitre précédent que les courants prélevés sur le réseau électrique par les ponts redresseurs à commutation naturelle (à diodes ou à thyristors) sont très loin d'être sinusoïdaux [3]. Ainsi, pour réduire les harmoniques du courant et l'énergie réactive au niveau de la source, nous proposons de présenter dans ce chapitre le filtrage actif parallèle commandé par la stratégie classique avec hystérésis.

2.2 Description du filtre actif parallèle

La structure générale du filtre actif parallèle (FAP) se compose essentiellement d'une partie puissance et d'une partie commande [6].

La partie puissance se compose d'un :

- Onduleur de tension à base d'interrupteurs de puissance (GTO, IGBT, ...etc.), commandables à l'amorçage et au blocage avec des diodes en antiparallèle ;
- Condensateur lui servant de source de stockage d'énergie;
- Filtre de sortie (inductances de couplage).

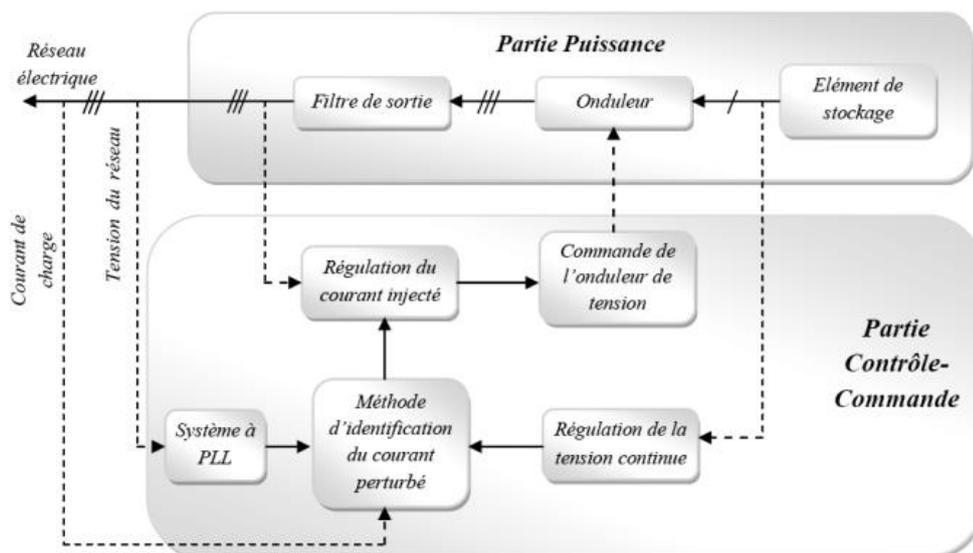


Figure 2.1 : Structure générale du filtre actif parallèle [11].

La partie commande a pour rôle de commander la commutation des éléments semi-conducteurs formant l'onduleur de la partie puissance. Elle se compose d'un :

- Système à base de PLL qui sera intégré dans la méthode d'identification des courants;
- Circuit d'identification des courants perturbés;
- Régulateur de courant injecté sur le réseau à partir de l'onduleur de tension;
- Régulateur de la tension aux bornes de l'élément de stockage;
- Système de commande de l'onduleur de tension.

2.2.1 Élément de dépollution (convertisseur DC/AC)

L'onduleur est un convertisseur statique de type continu/alternatif à partir d'une source de tension continue. Cet onduleur est constitué de six interrupteurs réversibles en courant «formant les trois bras», qui sont des composants semi-conducteurs (transistors bipolaires, IGBT, GTO) en antiparallèle avec des diodes, commandés à la fermeture et à l'ouverture comme le montre la figure 2.2 [9]. Le stockage de l'énergie du côté continu se fait par l'intermédiaire d'un condensateur C_{dc} de tension V_{dc} . Le filtre de sortie est un filtre passif habituellement du premier ordre (L_f, R_f) employé pour connecter l'onduleur de tension au réseau électrique [2].

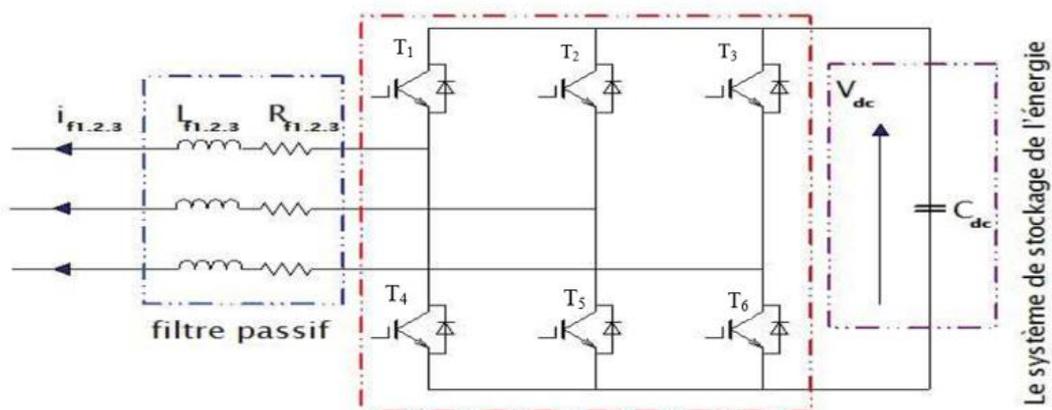


Figure 2.2 : Onduleur triphasé de tension.

Pour cette structure, on doit respecter les contraintes suivantes :

- Le courant de ligne doit toujours circuler à travers un chemin possible assuré par les diodes, insérées en parallèles avec les interrupteurs de puissances de chaque bras ;
- A un instant donné, un seul interrupteur d'un même bras doit être passant afin d'éviter tout court-circuit de la source de tension.

En pratique, nous commandons les deux semi-conducteurs d'un même bras de façon complémentaire, la conduction de l'un entraîne le blocage de l'autre [3]. Afin d'éviter un court-circuit à cause du délai de blocage des interrupteurs, il faut insérer sur un même bras, un temps d'attente, également appelé temps mort, entre la commande de blocage d'un interrupteur et la commande d'amorçage de l'autre [25].

L'ouverture et la fermeture des interrupteurs de l'onduleur dépendent de l'état des signaux de commande (S1, S2, S3) comme défini ci-dessous :

$$S_1 = \begin{cases} 1, & T_1 \text{ fermé et } T_4 \text{ ouvert} \\ 0, & T_4 \text{ fermé et } T_1 \text{ ouvert} \end{cases} \quad (2.1)$$

$$S_2 = \begin{cases} 1, & T_2 \text{ fermé et } T_5 \text{ ouvert} \\ 0, & T_5 \text{ fermé et } T_2 \text{ ouvert} \end{cases} \quad (2.2)$$

$$S_3 = \begin{cases} 1, & T_3 \text{ fermé et } T_6 \text{ ouvert} \\ 0, & T_6 \text{ fermé et } T_3 \text{ ouvert} \end{cases} \quad (2.3)$$

Les tensions composées (V12, V23, V31) à la sortie de l'onduleur dépendent de l'état des signaux de commande (S1, S2, S3) comme suit :

$$\begin{cases} V_{12} = V_{dc} (S_1 - S_2) \\ V_{23} = V_{dc} (S_2 - S_3) \\ V_{31} = V_{dc} (S_3 - S_1) \end{cases} \quad (2.4)$$

On suppose que les tensions simples (e1, e2, e3) forment un système triphasé équilibré, donc, on peut les synthétiser comme suit :

$$\begin{cases} e_1 = \frac{V_{dc}}{3} (2S_1 - S_2 - S_3) \\ e_2 = \frac{V_{dc}}{3} (2S_2 - S_1 - S_3) \\ e_3 = \frac{V_{dc}}{3} (2S_3 - S_1 - S_2) \end{cases} \quad (2.5)$$

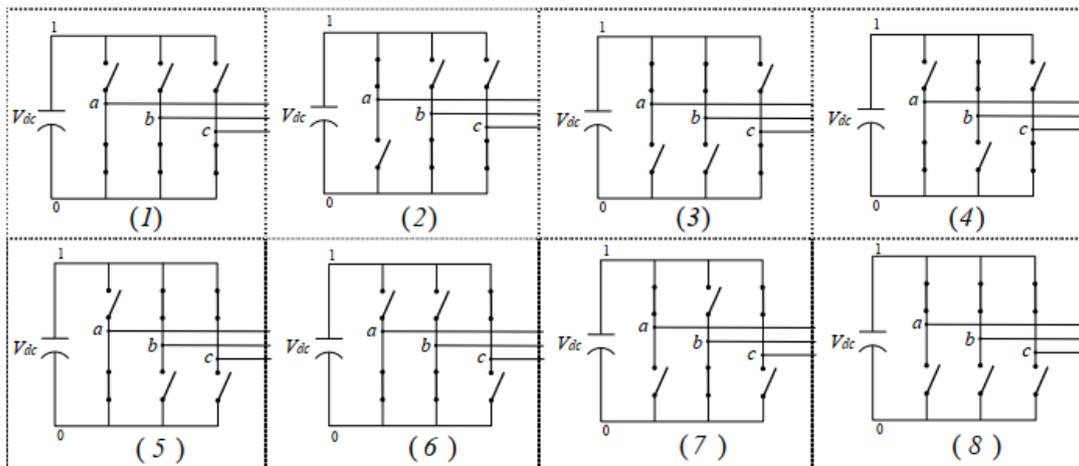


Figure 2.3 : Etats de commutations des interrupteurs de l'onduleur [16].

A partir des états des interrupteurs présentés par les variables S1, S2 et S3, on peut observer huit configurations possibles de l'onduleur, comme récapitulé dans la Figure 2.3 et le Tableau 2.1. Chaque configuration est déterminée par l'état des interrupteurs du commutateur supérieur et ceux du commutateur inférieur qui sont à l'état opposé par principe de complémentarité. Ainsi, huit cas possibles de tension de sortie de l'onduleur peuvent être exprimés [2], [10], comme le montre le Tableau 2.1:

Tableau 2.1 : Tensions générées par l'onduleur de tension [13].

N° du Cas	S1	S2	S3	V1n	V2n	V3n
1	0	0	0	0	0	0
2	0	0	1	$-V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	$2V_{dc}/3$
3	0	1	0	$-V_{dc}/3$	$2V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$
4	0	1	1	$-2V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$
5	1	0	0	$2V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$
6	1	0	1	$V_{dc}/3$	$-2V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$
7	1	1	0	$-V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$	$-2V_{dc}/3$
8	1	1	1	0	0	0

2.2.2 Système de stockage d'énergie

Le système de stockage d'énergie dans un onduleur de tension est un condensateur (C_{dc}), qui joue le rôle d'une source de tension continue (V_{dc}). Ce condensateur doit emmagasiner une quantité d'énergie, mais à cause des pertes dans les interrupteurs, elle reçoit son énergie du réseau à travers l'onduleur. Pour son fonctionnement, la tension V_{dc} est maintenue constante afin de remédier aux fluctuations qui peuvent affecter la qualité du filtrage [26].

L'élément de stockage de l'énergie le plus adapté est une capacité placée du côté continu de l'onduleur qui a deux tâches essentielles [16], [27] :

- Il sert comme élément de stockage d'énergie pour compenser la différence de la puissance réelle entre la charge et la source lors des périodes transitoires.
- En régime permanent, il maintient la tension du bus continu V_{dc} constante avec des faibles oscillations ;

La méthode la plus simple, se base sur la mesure du courant harmonique I_h du rang le plus faible. La capacité C_{dc} se calcule de la façon suivante [28] :

$$C = \frac{I_h}{\varepsilon V_{dc} \omega_h} \quad (2.6)$$

Avec ω_h : la pulsation la plus faible des harmoniques à compenser.

I_h : le courant harmonique du range h.

2.2.3 Inductance de couplage (filtre de sortie)

Afin de connecter l'onduleur de tension en parallèle avec le réseau et lui faire remplir le rôle de source de courant, il est nécessaire de disposer entre les deux un filtre de raccordement dit encore de sortie de nature inductive. La fonction de ce filtre permet d'une part de convertir le compensateur en un dipôle de courant du point de vue réseau ; et d'autre part à limiter la dynamique du courant de façon à le rendre plus facile à contrôler [3]. Dans la plupart des cas, le filtre employé à la sortie de l'onduleur est une inductance appelée inductance de couplage ou inductance de lissage. Cette inductance est un paramètre important parce qu'avec une fréquence de commutation élevée, il faut régler le niveau d'ondulations du courant de compensation à injecter [24]. Pour un filtrage performant, les interrupteurs du convertisseur doivent être commandés parfaitement. Pour une fréquence de commutation élevée et une

faible puissance, l'inductance doit être suffisamment faible pour permettre de suivre la vitesse à laquelle le courant de compensation change. Cependant, pour une faible puissance et fréquence de commutation, l'inductance doit être de grande valeur pour ralentir la vitesse de changement du courant de compensation [16], [24].

2.3 Commande en courant du filtre actif parallèle

La partie commande du filtre actif est constituée de modules distincts réalisant les fonctions suivantes :

- Identification des courants harmoniques ;
- Régulation de la tension du bus continu ;
- Stratégie de commande de l'onduleur .

2.3.1 Production des références de courants harmoniques et régulation du bus continu

Diverses méthodes ont été proposées par les auteurs pour déterminer les courants de source de référence. Dans notre travail, la méthode utilisée consiste à employer un détecteur de crête. L'amplitude des courants de source est générée par une boucle de régulation de la tension du bus continu du FAP en utilisant le régulateurs PI [3]. Les courants de référence instantanés i_{sa}^* , i_{sb}^* , i_{sc}^* sont calculés à partir de la multiplication de trois unités sinusoïdales ($1\sin(\omega t)$, $1\sin(\omega t+2\pi/3)$, $1\sin(\omega t+4\pi/3)$) par la valeur crête de courants de références de la source $I_s \max$.

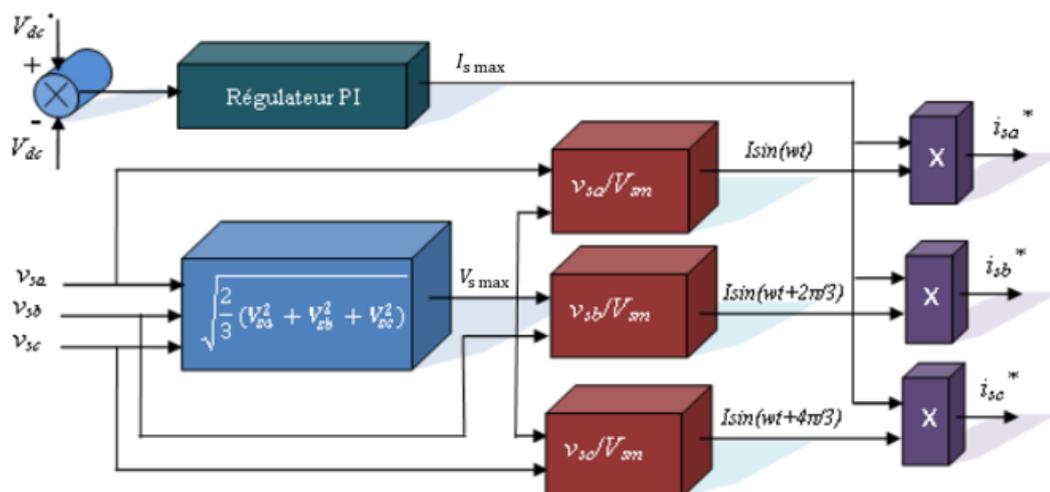


Figure 2.4 : Schéma de calcul des courants de références de sources avec le régulateur PI $V_s \max$ [3].

Les trois sinus unitaires sont obtenus à partir de la division de trois tensions du réseau par leur amplitude $V_s \max$. Cette dernière est obtenue avec cette équation :

$$V_{s \max} = \sqrt{\frac{2}{3}(V_{sa}^2 + V_{sb}^2 + V_{sc}^2)} \quad (2.7)$$

Cette méthode exige que la tension réseau soit saine (sinusoïdale et équilibrée), sinon elle n'est pas applicable. Puisque la tension du réseau est souvent perturbée et/ou déformée, et afin de généraliser l'application de cette méthode d'identification que nous avons adoptée à tout type de tension, l'utilisation de la boucle à verrouillage de phase (Phase-Locked-Loop (PLL)) est indispensable pour la synthèse des trois sinus unitaires [2].

La détermination des courants de références sinusoïdaux du réseau nécessite une régulation de la tension du bus continu du FAP, non seulement pour générer l'amplitude des courants de référence mais aussi pour bien:

- Limiter ces variations dans des conditions dynamiques pour ne pas altérer les performances du filtre actif ;
- Maintenir cette tension à un niveau fixe tout en compensant les pertes subies par le filtre actif.

Ainsi, le synoptique de la boucle de régulation peut se simplifier comme suit :

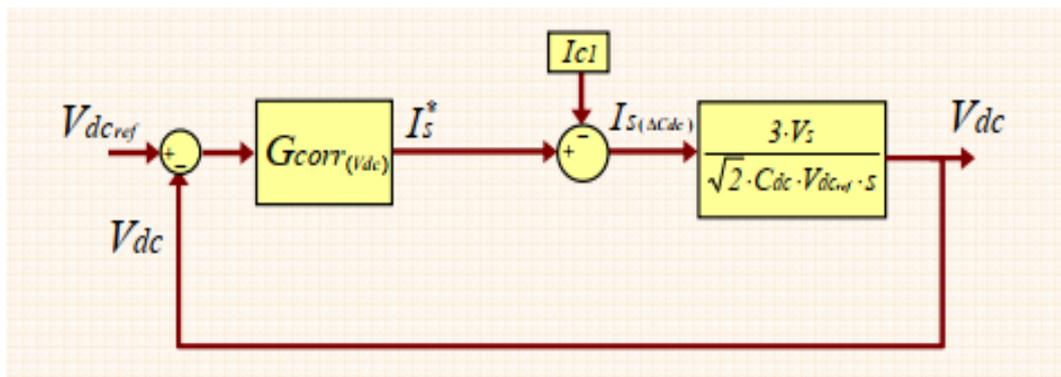


Figure 2.5 : Synoptique de la boucle de régulation de la tension du bus continu V_{dc} [16].

Avec : I_{c1} représente l'amplitude du courant fondamental et $G_{corr}(V_{dc})$ représente la fonction de transfert du régulateur de la tension du bus continu de la boucle externe [11], [16].

2.3.1.1 Régulateur Proportionnel-Intégral (PI)

Le Régulateur Proportionnel-Intégral PI est beaucoup utilisé en raison de sa simplicité d'implémentation et sa possibilité d'obtenir une bonne réponse dynamique, quand ses paramètres sont bien réglés. Le rôle de la boucle de régulation de la tension du bus continu est de maintenir cette tension à une valeur de référence constante, en contrôlant le processus de chargement et de déchargement du condensateur. La tension du bus continu V_{dc} est détectée et comparée à une tension de référence V_{dc-ref} , le résultat de cette comparaison (l'erreur) est appliqué à ce régulateur PI pour obtenir les courants de références [11].

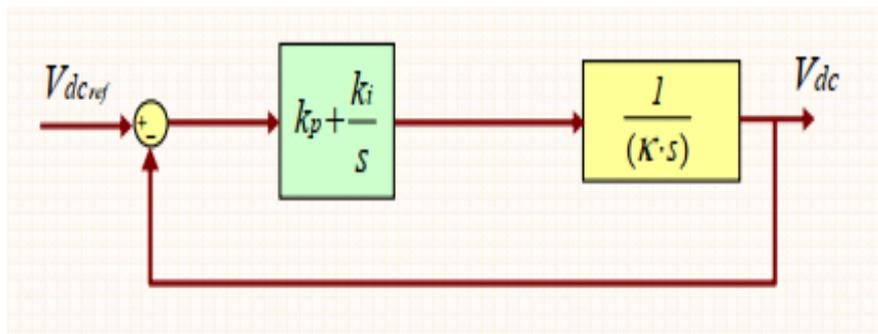


Figure 2.6 : Schéma simplifié de régulation de la tension du bus continu par le régulateur PI classique [16].

Les paramètres du contrôleur PI sont obtenus de la manière suivante [4],[30] :

D'après la figure 2.6, la fonction de transfert du système en boucle fermée s'écrit comme suit :

$$G_{V_{dc}(PI)}(s) = \frac{s K_p + K_i}{K_s^2 + s K_p + K_i} = \frac{\frac{K_p}{K}s + \frac{K_i}{K}}{s^2 + \frac{K_p}{K}s + \frac{K_i}{K}} \quad (2.8)$$

Avec :

$$K = \frac{\sqrt{2} C_{dc} V_{dc-ref}}{3 V_s} \quad (2.9)$$

Cette fonction de transfert représente un système de deuxième ordre. Donc, en égalisant les deux équations caractéristiques :

$$\text{den}(s) = s^2 + 2\xi \omega_n s + \omega_n^2 = s^2 + \frac{K_p}{K} s + \frac{K_i}{K} \quad (2.10)$$

Alors les deux équations qui déterminent les valeurs des deux paramètres K_p et K_i du régulateur PI classique sont données comme suit [16] :

$$\begin{aligned} K_i &= K \omega_n^2 \\ K_p &= 2\xi \omega_n K \quad (\xi \text{ compris entre } 0.5 \text{ et } 0.707) \end{aligned}$$

2.3.2 Délivrance des signaux de commande du dispositif de dépollution

La commande classique à hystérésis (comme le montre la Figure 2.7), 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 [2].

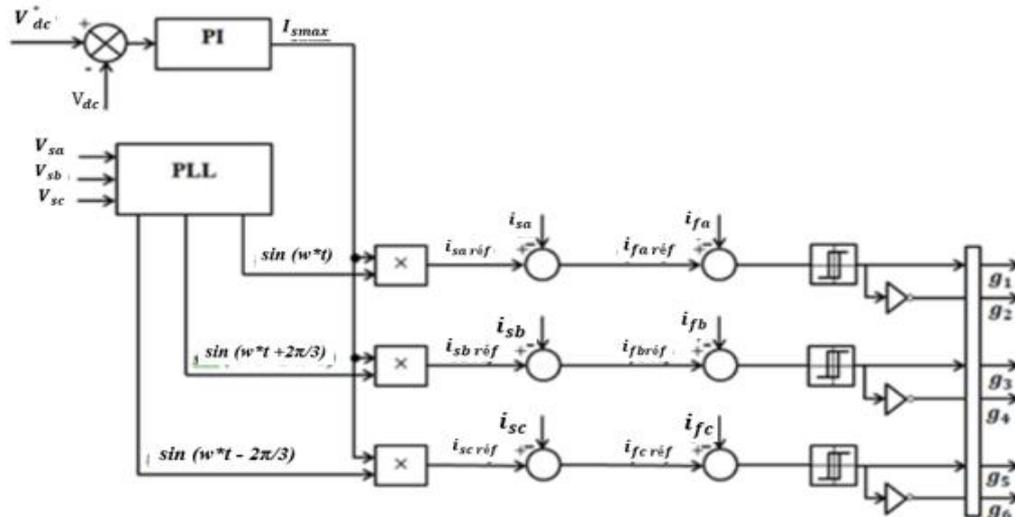


Figure 2.7 : Schéma illustratif de la commande directe en courant par hystérésis du FAP.

Dès que l'erreur atteint la bande inférieure ou supérieure, une commande est envoyée pour qu'elle reste dans la bande (comme le montre la Figure 2.8). La simplicité est le principal avantage de cette technique. D'autre part, les commutations évoluent librement à l'intérieur de la bande d'hystérésis, on ne peut pas maîtriser correctement le spectre haute fréquence dû aux fréquences de commutations [7].

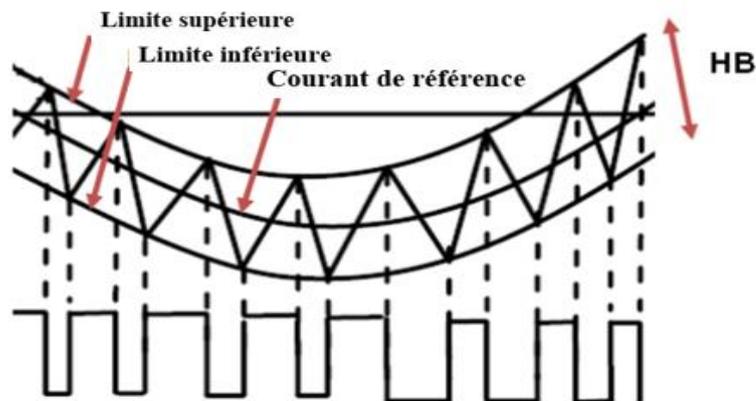


Figure 2.8 : Signaux de commandes par hystérésis [11].

La mesure de la tension V_{dc} du bus continu doit être comparée à la référence V_{dc}^* pour donner le signal d'entrée du régulateur PI qui fournit à sa sortie le courant de source maximal $(I_s)_{max}$ qui va être multiplié par la sinusoïde unitaire produite par un système à verrouillage de phase PLL pour donner le courant de source de référence. Ce dernier doit être comparé à la mesure du courant de source pour donner le signal d'erreur au contrôleur hystérésis. Les interrupteurs de puissance constituant l'onduleur commutent ON et OFF grâce à la charge non-linéarité de ce contrôleur qui fait rentrer l'erreur dans une bande en dehors de laquelle le signal de commande est reconstitué en passant de l'état bas à l'état haut et vice - versa.

2.4 Simulation de la commande étudiée

Le logiciel MATLAB/Simulink nous a permis de faire la simulation de notre système de filtrage actif parallèle basé sur le contrôle direct en courant par les régulateurs à hystérésis.

Les paramètres adoptés pour la simulation de la commande étudiée sont portés sur le tableau suivant :

Tableau 2.2 : Paramètres de simulation du filtre actif parallèle étudié.

Parties du système	Désignations	Valeurs
Réseau électrique	Tension de source Fréquence du réseau électrique Résistance de source Inductance de source	$V_s = 100V$ $F = 50Hz$ $R_s = 0.1 \Omega$ $L_s = 0.15 mH$
Charge non linéaire	Charge résistive Charge inductive	$R_{ch} = 20 \Omega$ $L_{ch} = 5mH$
Filtre actif parallèle	Tension de référence Condensateur du bus continu Inductance du filtre	$V_{dc}^* = 220V$ $C_{dc} = 2200 \mu f$ $L_f = 0.66mH$

Dans cette partie nous présentons les résultats de simulation du FAP classique étudié. Nous évaluerons la robustesse de ce contrôle appliqué au FAP en régime permanent lorsque le FAP est actionné d'une part et lorsqu'il est soumis à une charge non linéaire.

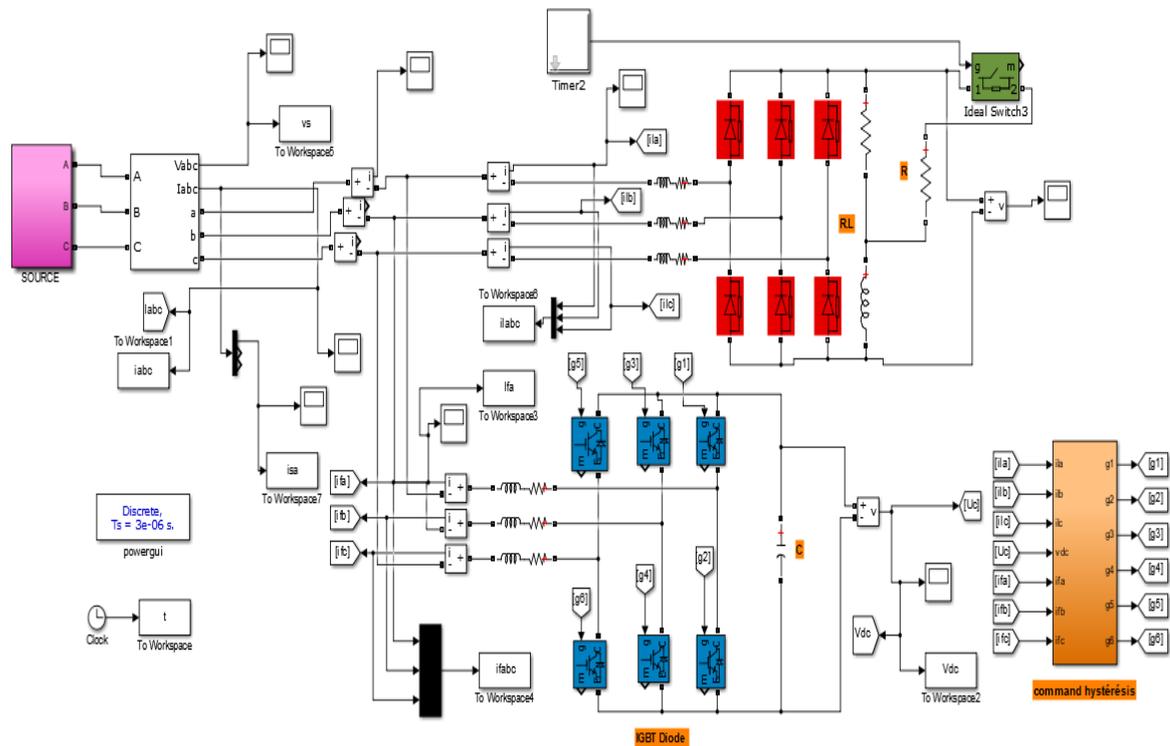


Figure 2.9 : Schéma bloqué de la commande classique étudiée.

La Figure 2.10 montre les résultats de simulations du FAP basées sur le contrôle classique en courant, qui permet de surveiller les tensions et les courants de sources ; les courants du filtre et de charges avant et après filtration et changement de charge non linéaire à l'instant $t = 0,5$ s.

D'après les résultats obtenus, les courants de sources sont pollués à cause de la charge non linéaire. Le spectre harmonique du courant de la première phase est évalué par un THD de 27.30% (avant variation de charge), 25.58% (après variation de charge) comme le montre la Figure 2.13.

Après avoir activé le système de dépollution, le FAP a pu rendre les courants de sources sinusoïdaux et en correspondance avec les tensions de sources à travers leurs courants comme indiqué sur la Figure 2.10. Selon la figure (2.15), le courant de source de la phase (a) est donné sous une forme sinusoïdale où le taux de distorsion harmonique est de 2,46% (avant variation de charge) 4,65% (après variation de charge) (THD < 5% selon la norme internationale de l'IEEE).

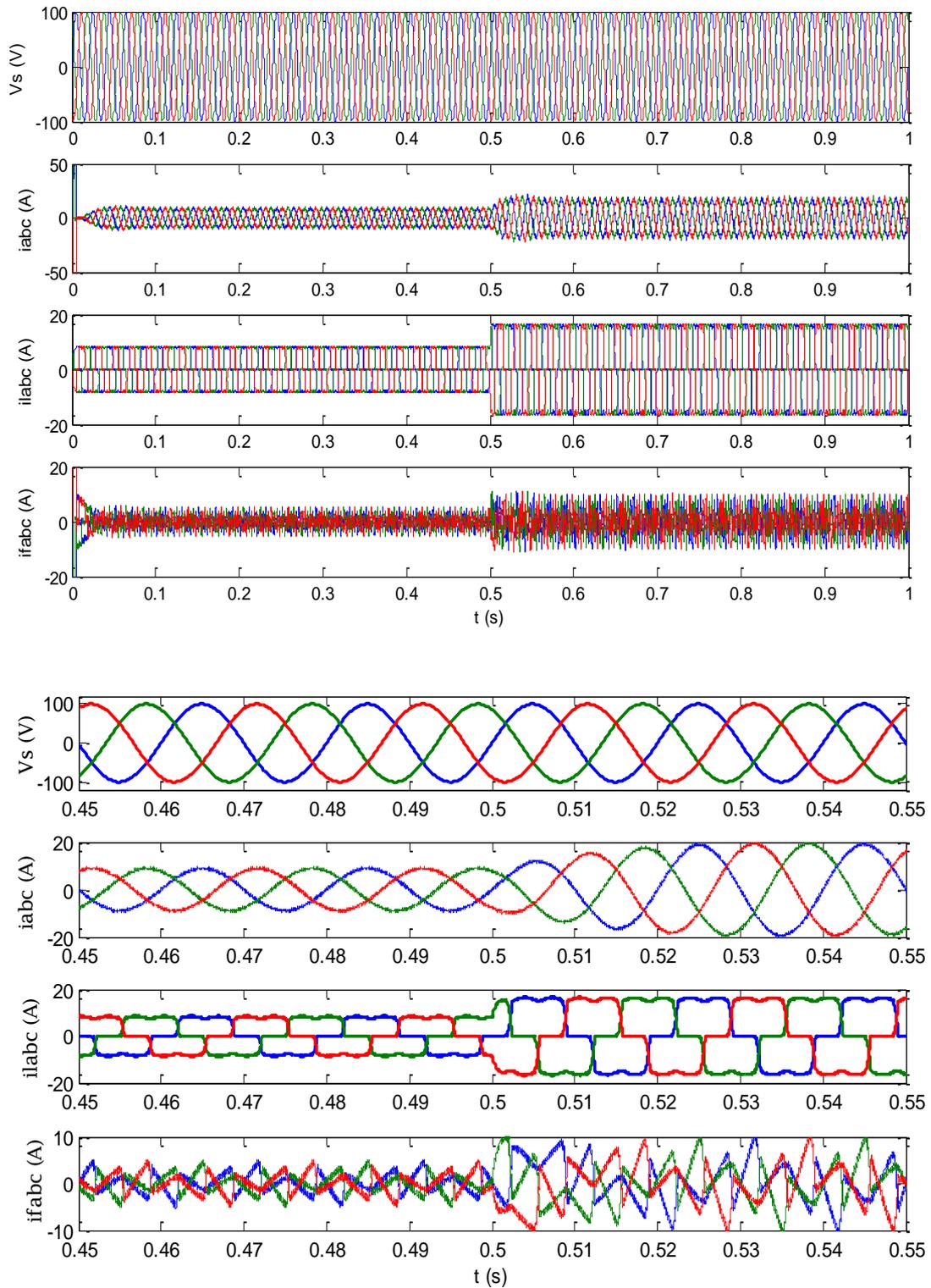


Figure 2.10 : Résultat de simulation avec zoom du FAP basé sur le contrôle classique en courant par hystérésis : tensions et courants de sources ainsi que les courants du filtre et de la charge.

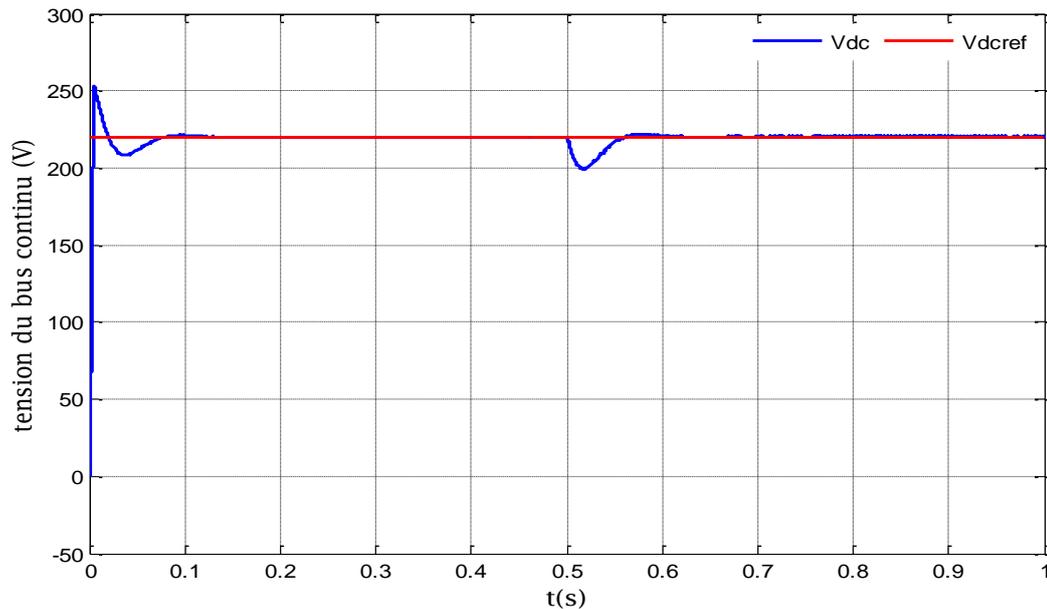


Figure 2.11 : Résultat de simulation de la tension du bus continu avec sa référence pour le FAP.

Après injection du FAP sur le réseau, on peut observer que la tension du bus continu a atteint sa valeur de référence imposée de 220 V avec enregistrement d'un dépassement de 32 V et une chute de tension de 10V comme illustré par la figure 2.11. Le régulateur PI employé a prouvé sa capacité de rejet de la perturbation provoquée sur le bus continu à l'instant $t = 0.5$ s avec enregistrement d'une chute de tension de l'ordre de 18 V pour une durée de 0.05 s.

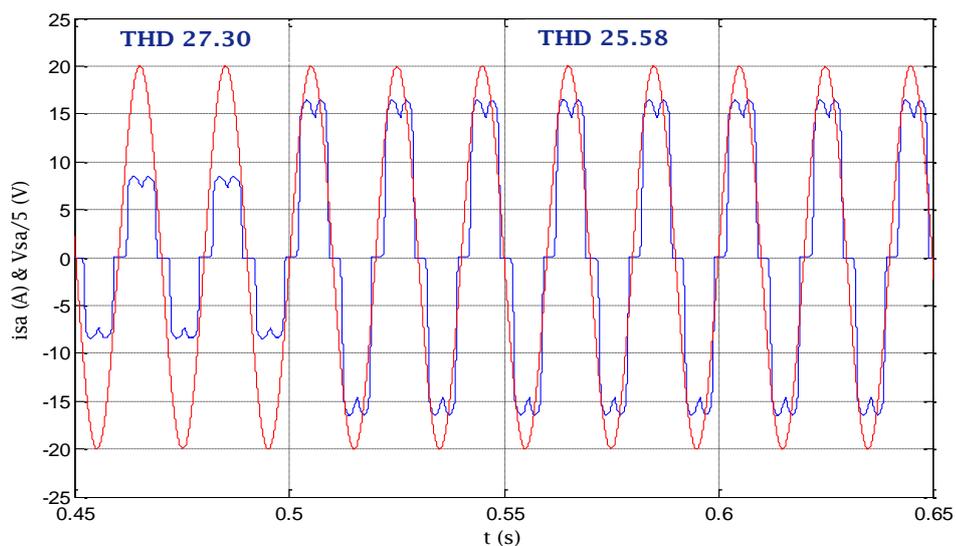


Figure 2.12 : Résultat de simulation du courant de source de la phase (a) avant filtrage par hystérésis.

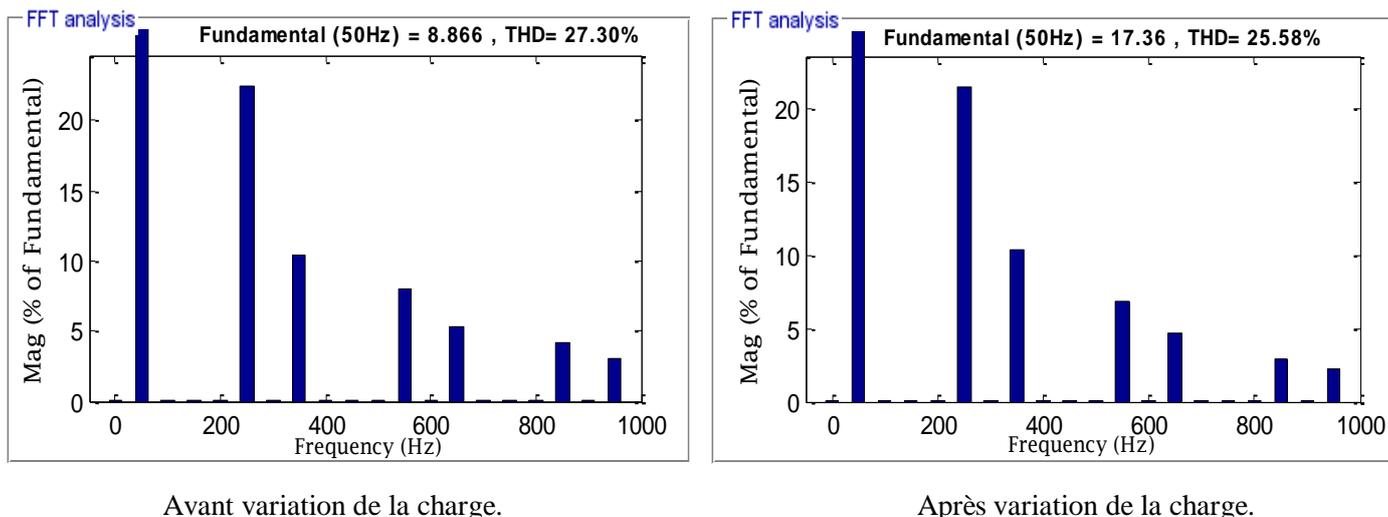


Figure 2.13 : FFT du courant de source de la phase (a) avant filtrage actif (Commande classique).

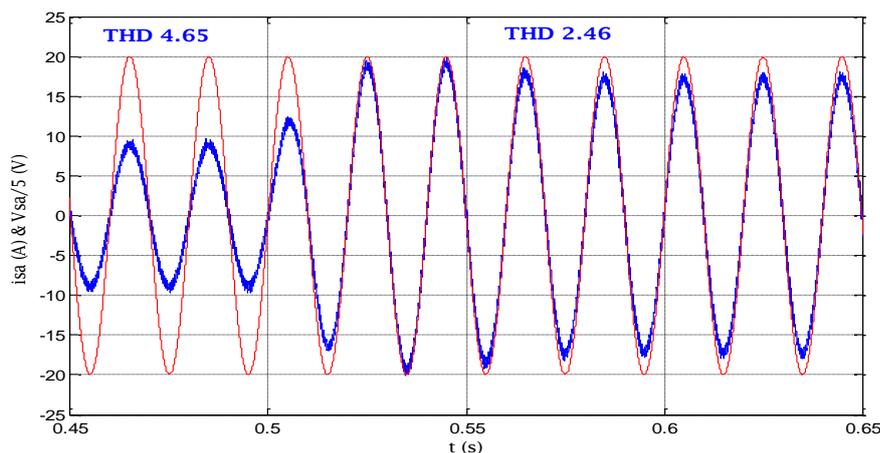


Figure 2.14 : Résultat de simulation du courant de source de la phase (a) après filtrage par hystérésis. (Commande classique).

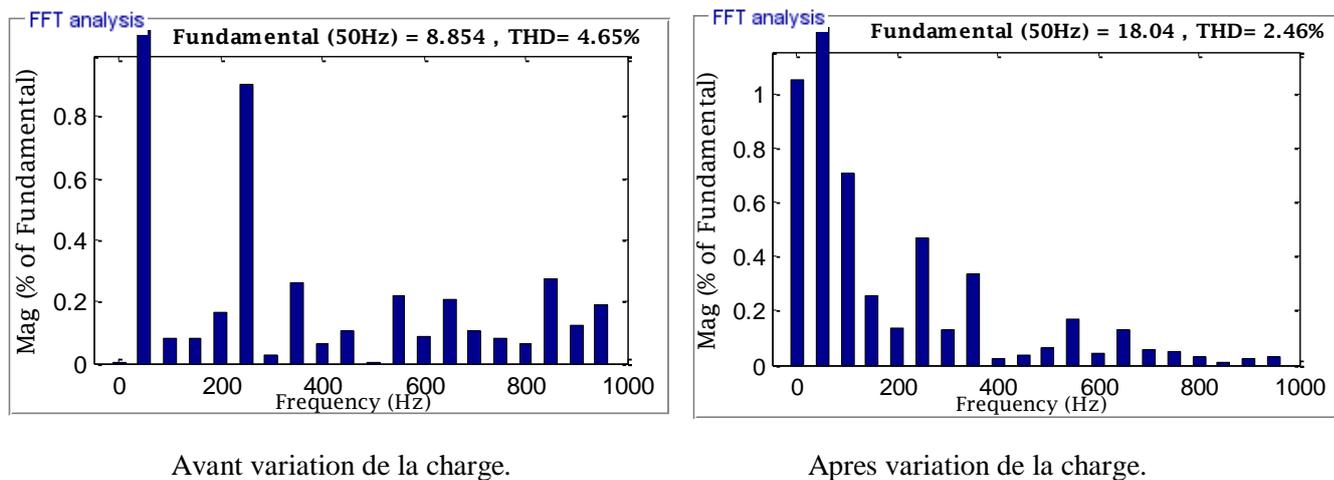


Figure 2.15 : FFT du courant de source de la phase (a) après filtrage actif parallèle (Commande classique).

2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exposé les éléments constituant la structure du filtre actif parallèle, composée de l'onduleur triphasé, de l'élément de stockage d'énergie et de l'inductance de lissage. La commande utilisée est représentée par la stratégie classique par hystérésis pour la délivrance des ordres de commande des interrupteurs de puissance. Nous avons également présenté la régulation de la tension du bus continu par le régulateur proportionnel-intégral PI. A travers les résultats obtenus de la commande classique en courant par hystérésis simulée par MATLAB/Simulink, nous avons constaté que la puissance réactive n'a pas été contrôlée. Pour cette raison, le futur chapitre sera consacré à l'étude et à la simulation de la commande des puissances instantanées p-q.

Chapitre 03 :
Présentation et Simulation
du Filtre Actif
Parallèle Proposé

3.1 Introduction

Dans ces dernières années, les convertisseurs de modulation sont devenus un grand domaine de recherche, pour leurs applications (domestiques et industrielles) diverses. Dans la littérature, de nombreuses stratégies de contrôle ont été présentées pour contrôler ce type de convertisseur, tels que : le contrôle des puissances active et réactive instantanées (p-q) [30]. Dans ce chapitre, nous présentons une étude détaillée sur la stratégie de commande susmentionnée appliquée au FAP. Pour cela, nous commençons par le principe et les étapes de modélisation des contrôles p-q [2]. L'objectif attendu consiste en l'élimination des courants harmoniques et l'amélioration du facteur de puissance, bien que la stratégie de contrôle p-q est simple et présente de bonnes performances mais elle nécessite des transformations de coordonnées (telles que la transformation de Concordia et de PARK) [31],[32].

3.2 Stratégie des puissances instantanées (p-q)

La commande p-q est une méthode temporelle utilisée afin d'éviter les difficultés dues au nombre élevé de calcul lors de la mise en œuvre des méthodes fréquentielles telle que la méthode de Fourier (Transformées de Fourier rapide ou discrète). Cette méthode a été introduite par H. Akagi [30], Son principe est basé sur le passage de systèmes triphasés constitués par les tensions simples et les courants de ligne à un système diphasé (α - β) en utilisant la transformation de Concordia, afin de calculer les puissances imaginaires et réelles instantanées [33]. Notons par (V_α, V_β) et (I_α, I_β) les composantes orthogonales du repère (α - β) associées respectivement aux tensions de raccordement du filtre actif parallèle (V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}) et aux courants absorbés par les charges polluantes (i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}).

La transformation de Concordia notée transformation (α - β) permet d'écrire les relations suivantes dans un système triphasé équilibré [10] :

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & +\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Et les courants par la relation :

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & +\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

La puissance active instantanée $P(t)$ peut être écrite comme :

$$p(t) = V_{sa}i_{sa} + V_{sb}i_{sb} + V_{sc}i_{sc} = V_{\alpha}I_{\alpha} + V_{\beta}I_{\beta} \quad (3.3)$$

Et la puissance réactive instantanée en l'absence des harmoniques peut s'écrire sous la forme suivante :

$$q(t) = -\frac{1}{\sqrt{3}}(V_{sa} - V_{sb}) \cdot i_{sc} + (V_{sb} - V_{sc}) \cdot i_{sa} + (V_{sc} - V_{ca}) \cdot i_{sb} = V_{\alpha} \cdot I_{\beta} - V_{\beta}I_{\alpha} \quad (3.4)$$

A partir des relations (3.2) et (3.3), nous pouvons établir la relation matricielle de la commande p-q peut être donnée par :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{\alpha} & V_{\beta} \\ -V_{\beta} & V_{\alpha} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{\alpha} \\ I_{\beta} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Sachant que chacune des puissances instantanées p et q comporte une partie alternative (composantes harmoniques) et partie continue (composante fondamentale), ce qui nous permet d'écrire l'expression ci-dessous [2]:

$$\begin{cases} P = \bar{P} + \tilde{P} \\ q = \bar{q} + \tilde{q} \end{cases} \quad (3.6)$$

Avec :

\bar{P} Puissance continue liée à la composante fondamentale active du courant et de la tension.

\bar{q} Puissance continue liée à la composante fondamentale réactive du courant et de la tension

\tilde{P} et \tilde{q} puissances alternatives liées à la somme des composantes perturbatrices du courant et de la tension.

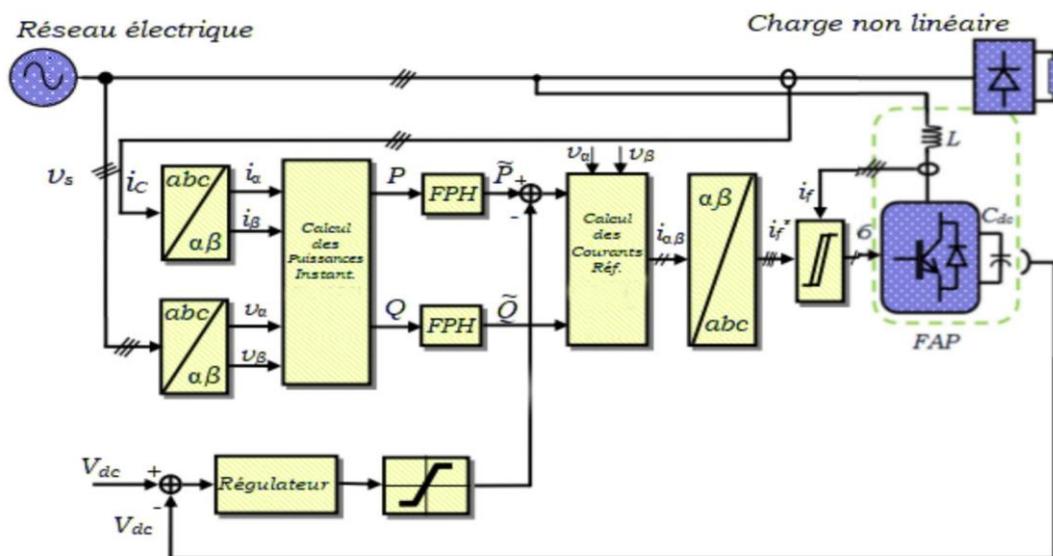


Figure 3.1 : Structure générale du FAP contrôlé par la commande p-q.

L'utilisation d'un filtre passe-bas avec une boucle de retour ou passe-haut pour l'extraction de puissance alternative (composante perturbatrice) comme le présente la figure 3.2.

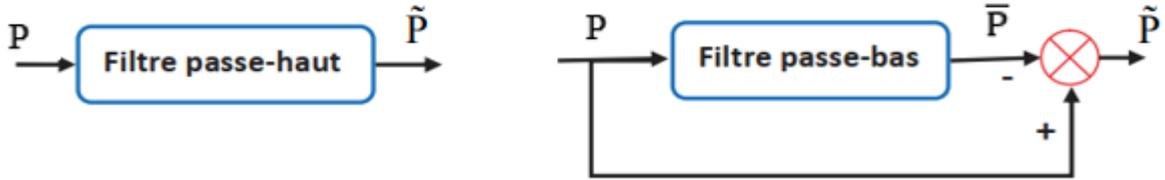


Figure 3.2 : Filtres d'extraction de la composante alternative.

En inversant la relation (3.5), nous pouvons déterminer les courants dans le repère α - β comme le montre l'équation (3.7) :

$$\begin{bmatrix} I_{\alpha} \\ I_{\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{V_{\alpha}^2 + V_{\beta}^2} \begin{bmatrix} V_{\alpha} & -V_{\beta} \\ V_{\beta} & V_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

En plus, le courant du repère (α - β) peut être écrit en trois composantes, réactive et active à la fréquence fondamentale et aux harmoniques.

En posant $\Delta = V_{\alpha}^2 + V_{\beta}^2$ nous obtenons alors la relation suivante :

$$\begin{bmatrix} I_{\alpha} \\ I_{\beta} \end{bmatrix} = \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_{\alpha} & -V_{\beta} \\ V_{\beta} & V_{\alpha} \end{bmatrix} \cdot [p]}_{\text{Courant actif}} + \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_{\alpha} & -V_{\beta} \\ V_{\beta} & V_{\alpha} \end{bmatrix} \cdot [0]}_{\text{courant réactif}} + \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_{\alpha} & -V_{\beta} \\ V_{\beta} & V_{\alpha} \end{bmatrix} \cdot [q]}_{\text{courants harmoniques}} \quad (3.8)$$

Avec: Δ est supposé constante pour un réseau équilibré et sinusoïdal.

Par l'application de la transformation de Concordia inverse, les courants de références triphasés (I_{refa} , I_{refb} , I_{refc}) sont donnés par :

$$\begin{bmatrix} I_{refa} \\ I_{refb} \\ I_{refc} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & +\frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{\alpha} \\ I_{\beta} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

De ces expressions nous obtenons l'algorithme de commande comme le montre la Figure 3.3 [9].

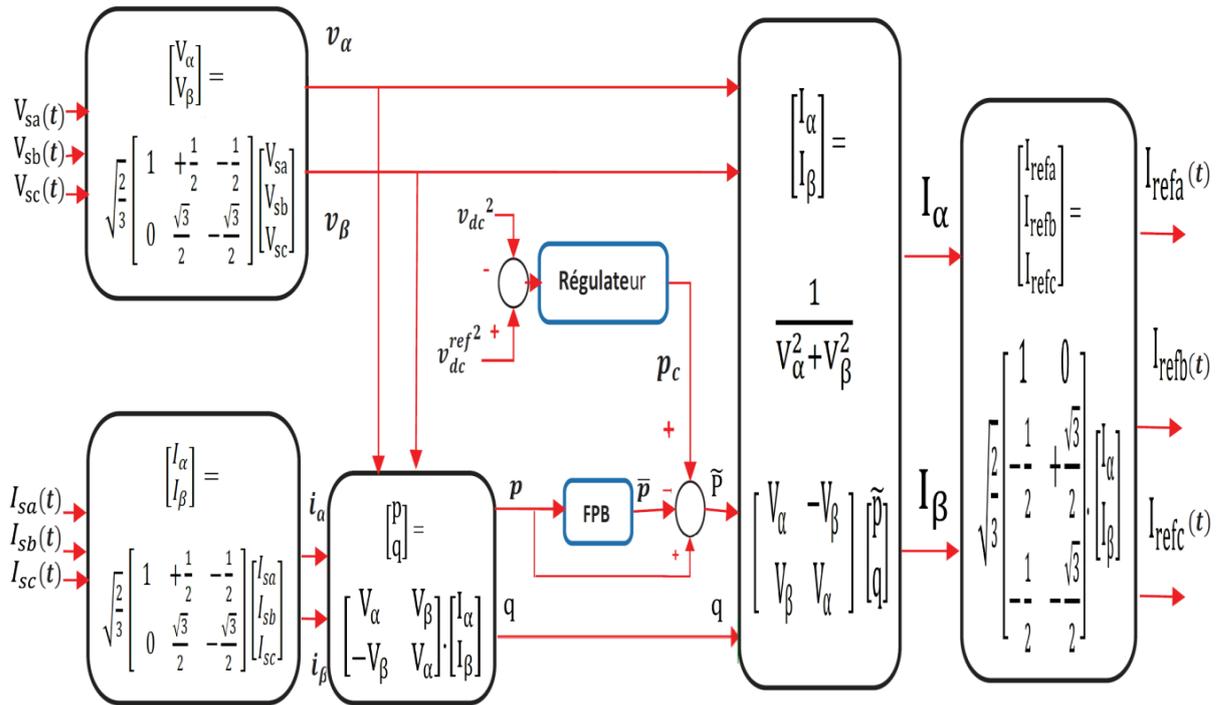


Figure 3.3 : Commande d'un filtre actif de puissance pour la compensation des courants harmoniques et l'énergie réactive par la méthode directe des puissances instantanées p-q [9].

3.3 Résultats de simulation

Pour évaluer et comparer la méthode d'identification précédemment étudiée, nous avons procédé à des simulations des tensions du réseau dans des conditions idéales. La simulation du système global (source, charge polluante, filtre actif parallèle) est effectuée sous l'environnement MATLAB/Simulink. Nous allons donner les résultats de simulation concernant l'étude effectuée de ce type de commande que nous venons de présenter à travers la méthode des puissances active et réactive instantanées, appelée commande p-q.

Les paramètres du système utilisé dans cette simulation ont été groupés dans le Tableau précédent II.2 (chapitre 2) pour assurer la conservation des mêmes paramètres de simulation. Les Figures 3.4 et 3.5 présentent les résultats de simulation avec zoom du FAP shunt basé sur la commande p-q qui contiennent les tensions et les courants de sources, les courants du filtre et de charge avant et après activation du filtrage.

D'après ces résultats, le courant de source est pollué (distordu) à cause de la charge non-linéaire, ceci est confirmé par le spectre harmonique avec un THD de 27.28% (Figure 3.6.a). Après le filtrage, à l'instant $t = 0.2$ s, la commande p-q est activée et le FAP commence à

injecter les courants harmoniques, ce qui permet au courant de source de redevenir sinusoïdal et en phase avec la tension de source (Figure 3.6.b) le THD de ce courant est de 4.17%.

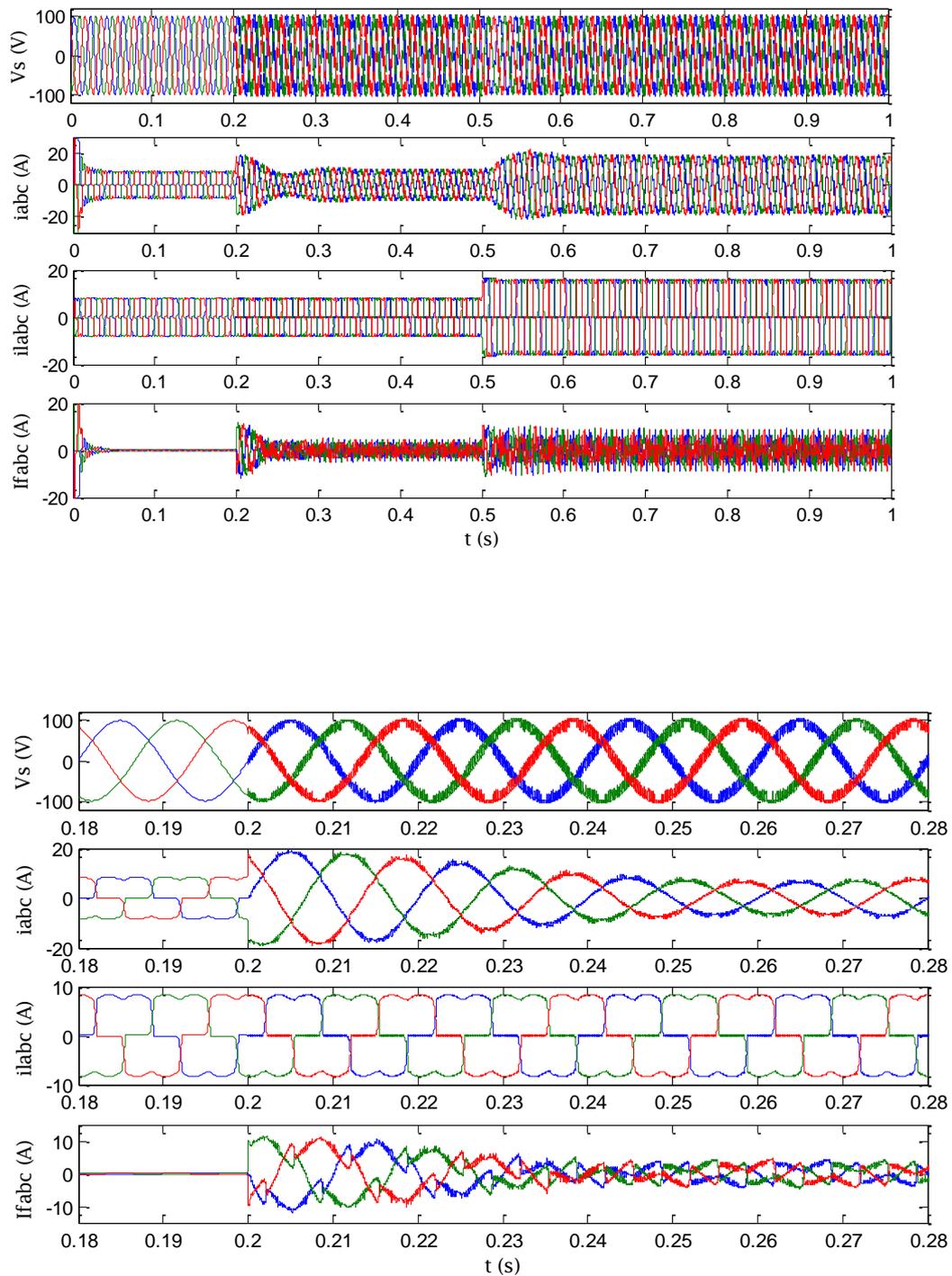


Figure 3.4 : Résultats de simulation avec zoom du FAP shunt basé sur le contrôle p-q avec le régulateur PI (tensions et courants de source ainsi que courants de filtre et de charge) des trois phases.

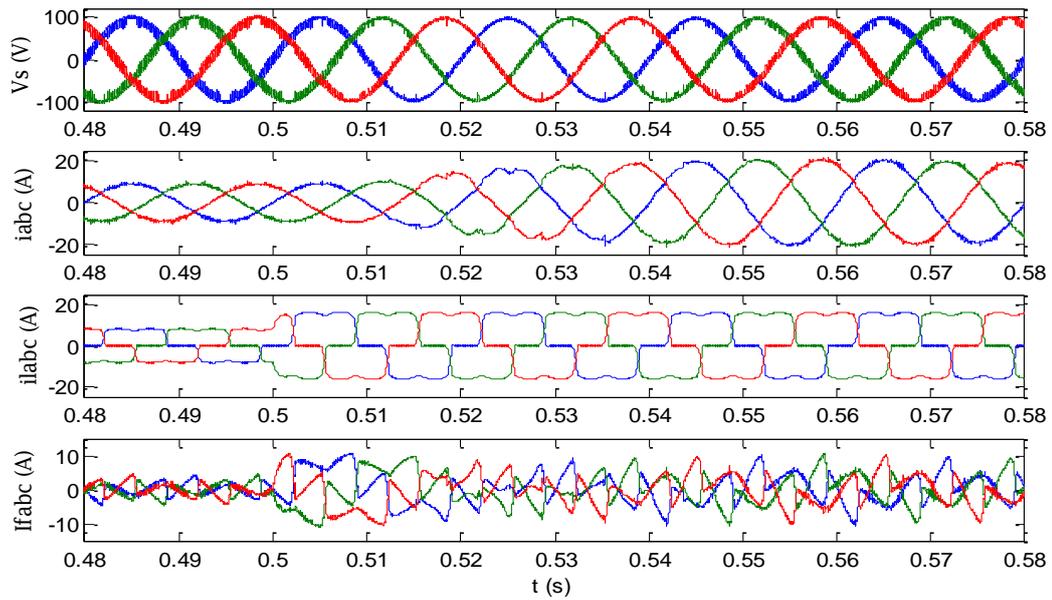


Figure 3.4 : Suite Résultats de simulation avec zoom du FAP shunt basé sur le contrôle p-q avec le régulateur PI (tensions et courants de source ainsi que courants de filtre et de charge) des trois phases.

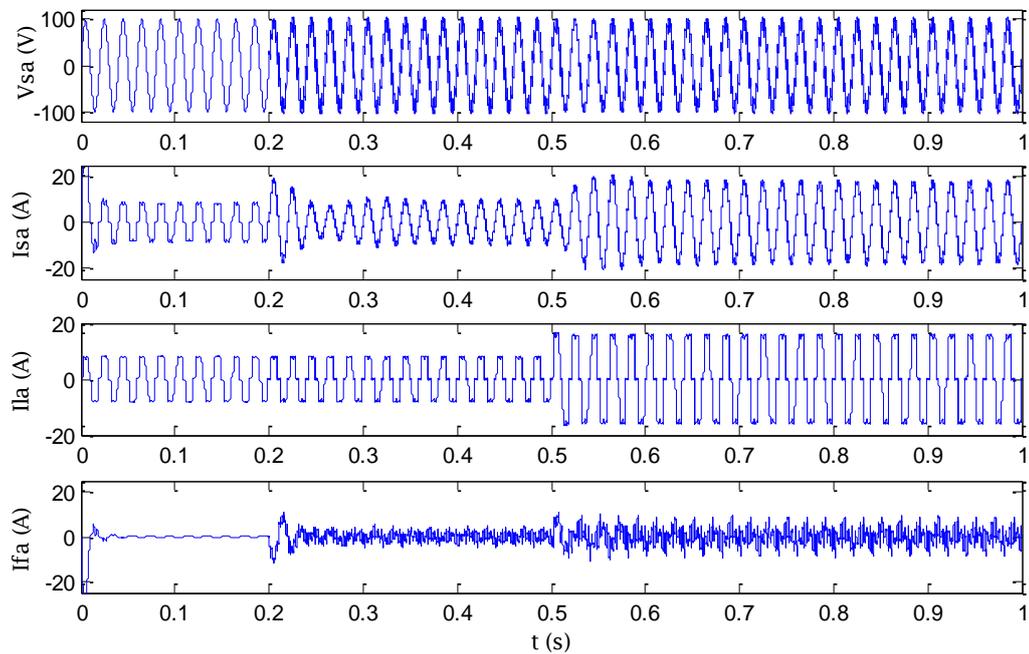


Figure 3.5 : Résultats de simulation avec zoom du FAP shunt basé sur le contrôle p-q avec le régulateur PI (tensions et courants de source ainsi que courants de filtre et de charge) de la phase (a).

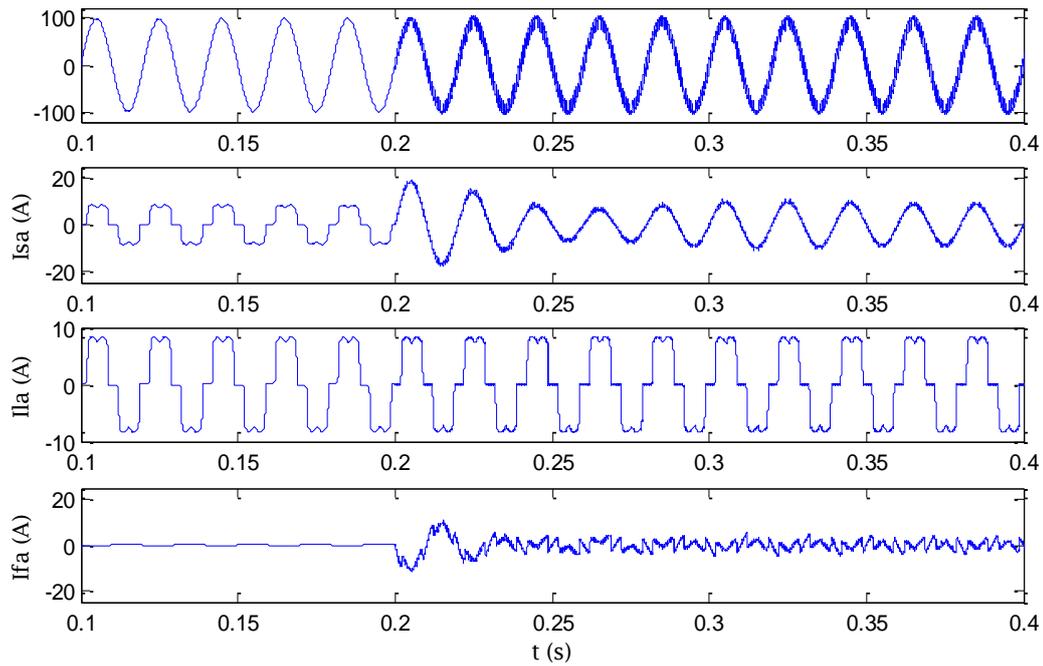


Figure 3.5 : Suite résultats de simulation avec zoom du FAP shunt basé sur le contrôle p-q avec le régulateur PI (tensions et courants de source ainsi que courants de filtre et de charge) de la phase (a).

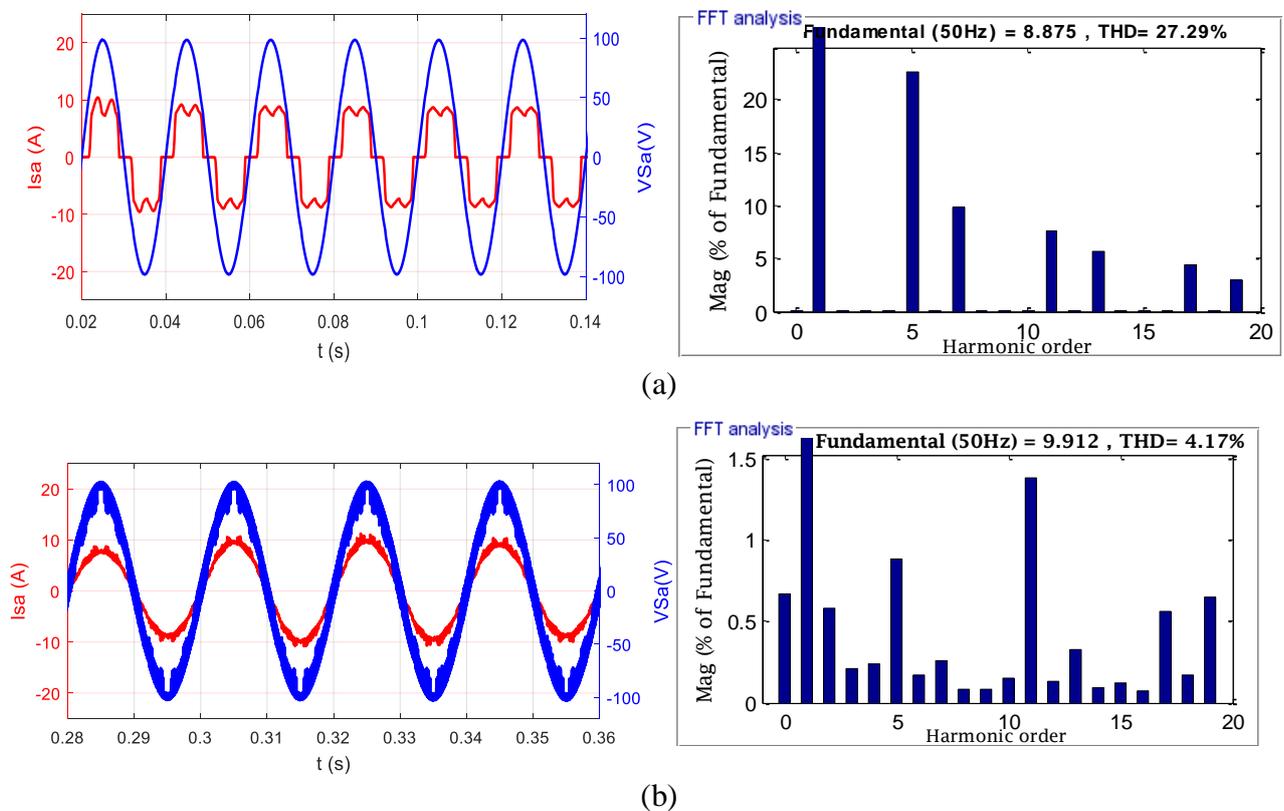


Figure 3.6: Tension et courant de source avec FFT : (a) sans FAP, (b) avec FAP basé sur le contrôle p-q.

La tension du bus continu, illustrée sur la Figure 3.7 suit sa consigne ($V_{dref} = 222V$), où le régulateur PI employé a prouvé sa capacité de rejet de la perturbation provoquée sur le bus continu. On peut constater l'apparition d'une hausse de tension de 17 V suivie par une chute de 9 V après injection du FAP à l'instant $t=0.2$ s. Après avoir obtenu les résultats précédents, nous avons effectué une variation de la charge à l'instant $t=0.5$ s où nous avons remarqué une chute de tension de grande amplitude de 52V pour une longue durée de 0.20 s. La tension du bus continu a repris sa valeur de référence au-delà de 0.7 s.

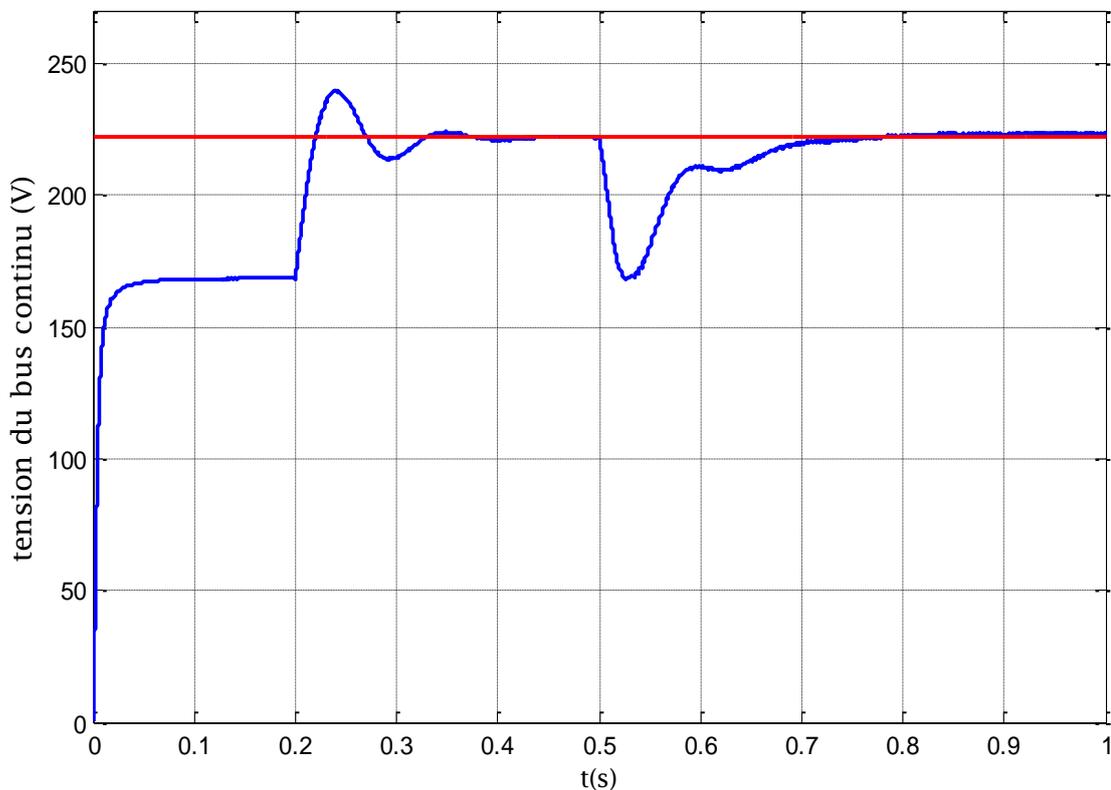


Figure 3.7 : Tension du bus continu du FAP basé sur la stratégie p-q.

A partir de la Figure 3.8 sur laquelle sont illustrés les résultats concernant les puissances de la source active en (W) et réactive en (VAR), on en déduit que dans tout le temps de simulation, le réseau électrique fournit toute la puissance (p_s) à la charge.

Pendant l'intervalle de temps $[0.2 \ 1]$ s, où le FAP est inséré, la puissance réactive du réseau (q_s) devient nulle puisqu'elle demandée par la charge et assurée par le FAP. Alors qu'avant le filtrage, c'est le réseau qui fournit la puissance réactive à la charge non linéaire.

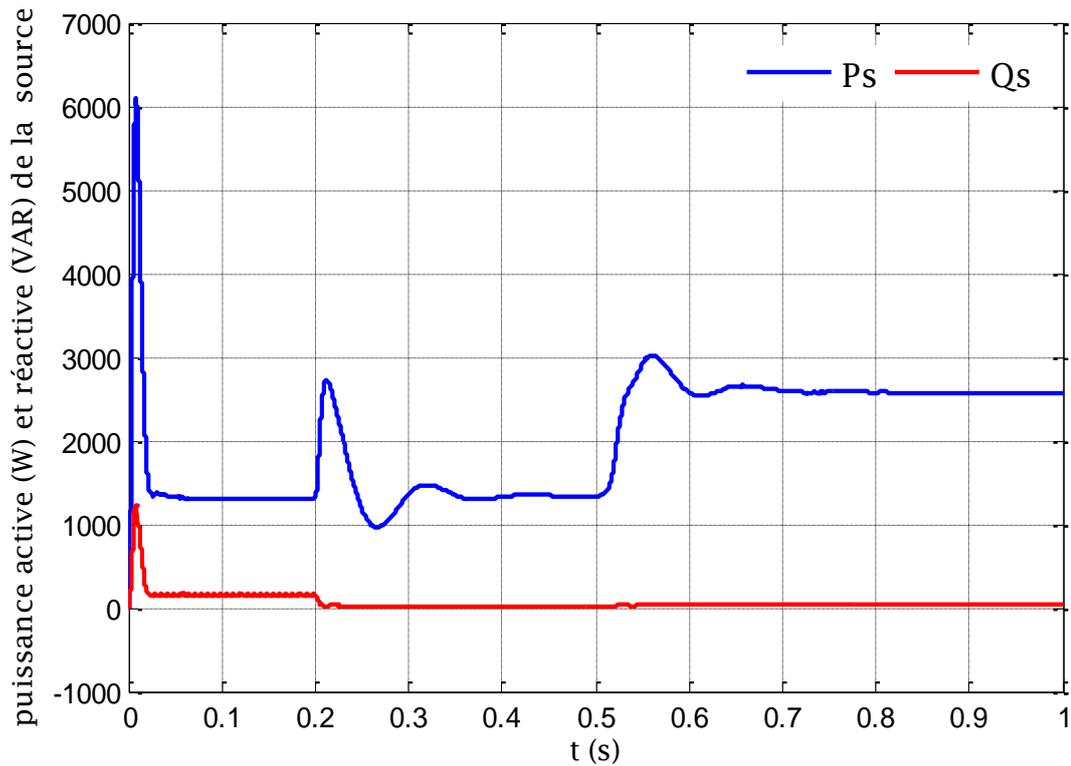


Figure 3.8 : Puissances active et réactive de source du FAP basé sur la stratégie p-q.

3.4 Etude comparative

Afin de vérifier les performances et l'efficacité de la commande p-q dans cette section, nous avons établi une étude comparative entre les deux stratégies de commande présentées précédemment dans le 2eme et le 3eme chapitre, notamment La commande p-q et la commande classique par hystérésis. Le critère de performance adopté pour mener cette étude est le THD du courant de la source. Il est à noter que toutes les études de simulations pour les deux stratégies de contrôle sont exécutées dans les mêmes conditions et avec les mêmes paramètres A partir du Tableau 3.1, on peut constater que : La stratégie de la commande p-q a permis d'obtenir le plus faible taux d'harmoniques du courant de la source évalué à 4.17%.

Tableau 3.1 : Etude comparative.

Contrôle employé	THD du courant de source (%)	
	Sans FAP	Avec FAP
Commande classique par hystérésis	27.30	4.65
Commande p-q	27.29	4.17

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une stratégie de contrôle, qui est : la commande p-q. Cette technique est basée sur le passage de systèmes triphasés constitués par les courants de ligne et les tensions simples à un système diphasé (repère α - β) en utilisant la transformation de Concordia, afin de calculer les puissances imaginaire et réelle instantanées. Les résultats de simulation obtenus montrent la faisabilité et les bonnes performances de la technique de contrôle étudié qui est celle de la commande p-q. Elle offre un faible THD du courant de la source comparé à celui donné par la commande classique par hystérésis.

*Conclusion générale et
perspectives*

Conclusion générale et perspectives

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre de recherche des techniques de commande avancée d'un filtre actif parallèle de puissance pour éliminer les harmoniques de courants générés par des charges non linéaires.

Nous avons expliqué la notion de qualité de l'énergie électrique qui est devenue une exigence importante pour les nombreux utilisateurs. Nous avons également identifié les types et les origines, les conséquences des perturbations affectant le réseau électrique. Pour réduire les effets des perturbations harmoniques, des normes et des recommandations qui définissent les règles de compatibilité électromagnétique (CEM) auxquelles les distributeurs et les utilisateurs d'énergie doivent se conformer ont été appliquées. Nous avons également mis en place des solutions classiques et modernes pour le contrôle de la pollution où nous avons choisi l'utilisation de la solution moderne (filtrage actif parallèle) qui est plus efficace que les solutions traditionnelles existantes dans la littérature.

L'objectif des commandes proposées est résumé en deux points :

- Compenser les courants harmoniques et la puissance réactive absorbée par des charges non linéaires liées à des réseaux électriques équilibrés,
- Maintenir la tension du bus continu à sa valeur souhaitée avec de petits débordements et des chutes de tension avec un court temps de réponse.

Nous avons observé que la qualité du filtrage dépend essentiellement de la régulation du bus continu. Cette dernière permet la compensation de l'énergie réactive. C'est pour cela qu'il est important de réguler ce bus continu. D'autre part, il est indispensable de synthétiser des courants de références de bonne qualité pour que le filtrage soit efficace.

Dans le cas du réseau électrique équilibré, les deux stratégies de commande de l'onduleur de tension ont été proposées : la commande par hystérésis et la commande p-q. Ces deux méthodes étaient simulées et évaluées lors d'une étude comparative basée sur le taux d'harmonique THD du courant de source. Les résultats obtenus démontrent une meilleure performance de la méthode p-q utilisée.

Enfin, comme perspectives nous proposons la validation expérimentale de la commande p-q du filtre étudié, l'utilisation de l'intelligence artificielle et l'intégration de ce filtre actif parallèle dans un système photovoltaïque.

Références
Bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1] B. Nicolas, "Contribution à la commande des convertisseurs statiques", Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse (INPT), Toulouse, 25 Septembre 1996.
- [2] M.A.E. Alali, "Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension", Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur, ULP-Strasbourg 1, France, Septembre 2002.
- [3] N. Belhaouchet, "Fonctionnement a fréquence de commutation constante des convertisseurs de puissance en utilisant des techniques de commande avancées application : amélioration de la qualité de l'énergie," Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas - Setif, 2011.
- [4] S. Ouchen, "Contribution à la commande directe de puissance dédiée au filtrage actif, associé à une source photovoltaïque," Thèse de doctorat, Université de Biskra, 2017.
- [5] B. Boukezata, "Étude et commande d'une chaine de conversion d'énergie d'un système solaire photovoltaïque," Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas - Setif 1, 2017.
- [6] A. Omeiri, "Simulation d'un filtre actif parallèle de puissance pour la compensation des harmoniques de courant," Thèse de doctorat, Université de Annaba, 2007.
- [7] A. bachir, M. Merabti, "Étude et simulation d'un filtre actif parallèle," Mémoire Fin Etudes de Master Académique , Université Aboubakr Belkaïd– Tlemcen –, le 30/09/2020.
- [8] N. alloui, "Contribution à l'amélioration de la qualité de l'énergie dans les réseaux électriques en utilisant les Filtres Hybrides," Thèse de doctorat, Université de Batna 2, 09/10/2017.
- [9] M. Tahri, Z. Djemaa, Thèse : "Étude et simulation d'une commande robuste pour filtre actif, " Mémoire Fin d'Etudes de Master Académique , Université de Abou Bekr Belkaid de Tlemcen, 2016/2017.
- [10] M. Sarra, "Contribution à l'étude des filtres actifs hybrides," Thèse de doctorat, Université de Sétif, 2013.
- [11] R. Belaidi, "Contribution à l'amélioration de la qualité de l'énergie," Thèse de doctorat , Université Badji Mokhtar -Annaba, 2018.
- [12] V. Beauvois, "Cours Qualité de la tension, qualité de l'électricité," Université de Liège, Novembre 2008.

Références Bibliographiques

- [13] G. Boudechiche, "Étude des techniques de commandes innovantes appliquées à un réseau électrique perturbé et déséquilibré interconnecté à une source d'énergie renouvelable à travers un filtre actif de puissance," Thèse de doctorat, université Mohamed El-Bachir EL-Ibrahimi de Bordj Bou Arréridj, 23/09/2021.
- [14] D. Ould Abdeslam, "Techniques neuromimétiques pour la commande dans les systèmes électriques : application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basse tension," Thèse de doctorat, université de Haute- Alsace, 8décembre 2005.
- [15] R. Serge, N. Dzone, "Implantation de réseaux neuro mimétiques sur cible FPGA Application à l'intégration d'un système de filtrage actif," Thèse de doctorat, Université de Strasbourg, 2011.
- [16] A. Chaoui, "Filtrage actif triphasé pour charges non linéaires," Thèse de doctorat, Université de Ferhat Abbas de Sétif, 2010.
- [17] A. Thameur, "Application du multi-niveau au filtrage actif des réseaux," Thèse de doctorat, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2010.
- [18] O. Bouaka, "contribution l'analyse des Onduleurs Multi niveaux fonctionnement Symétrique et asymétriques," Mémoire d'ingénieur d'état, Département d'électrotechnique, université de Batna, 2005.
- [19] A. Amara & A. Bengana, "Étude et simulation d'un circuit de commande pour un filtre actif de puissance," Mémoire Fin d'Etudes de Master Académique , Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen, 25 juin 2015.
- [20] L. Benchaita, "Étude, par simulation numérique et expérimentation, d'un filtre actif parallèle à structure courant avec une nouvelle méthode de contrôle commande," Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, 1998.
- [21] F. Bergeras, "Étude de nouvelles structures de filtres actifs intégrées en hyperfréquences," Thèse de doctorat, Université de Limoges, 2010.
- [22] K. Djazia, "Étude des filtres actifs pour réseaux déséquilibrés et distordus," Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas – Sétif 1, 2015.

Références Bibliographiques

- [23] S. Beaulieu, "Étude et mise au point d'un filtre actif d'harmoniques en vue d'améliorer la qualité de l'alimentation électrique," Mémoire présentée comme exigence partielle de la maîtrise en ingénierie, Université du Québec à Chicoutimi, 2007.
- [24] H. Djeghloud, "Filtrage actif de puissance," Thèse de doctorat en sciences, Université Mentouri Constantine, Algérie, 2007.
- [25] M. X. Wang, "Filtrage actif de puissance : Etudes et réalisation d'un filtre actif à commande numérique temps réel," Thèse de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, 18 Décembre 1992.
- [26] 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 comme exigence partielle de la maîtrise en génie électrique. Université du Québec 2010.
- [27] H. Akagi, E. H. Watanabe, M. Aredes, "Instantaneous power theory and applications to power conditioning," book: Wiley-IEEE Press, pages: 400, chapters :1-8. Electron. Mag, 2007.
- [28] M.A.E. Alali, S. Saadate, Y.A. Chaouis, F. Braun, "Energetic study of a shunt active conditioner compensating current harmonics, power factor and unbalanced, " EPE-PEMC 2000, Konic, Slovak Republic, vol. 5, pp. 211-216, September 2000.
- [29] M. Sarra, K. Djazia, A. Chaoui, F. Krim, "Three-phase Active Power Filter with Proportional Integrator control," Journal of Electrical Systems, n.1, pp 79-84, November 2009.
- [30] H. Akagi, Yoshihira. Kanazawa, Koetsu. Fujita, Akira. Nabae, "Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuits," Proceeding 1983 International power electronics conference. Tokyo, Japan, pp. 1375- 1386, 1983, <https://doi.org/10.1002/ej.4391030409>.
- [31] M. Sarra, G.J. Paul, A. Chaoui, F. Krim, "Experimental Validation of Two Control Techniques Applied to a Three Phase Shunt Active Power Filter for Power Quality Improvement," International Review of Electrical Engineering (I.R.E.E), vol. 6. no. 6, pp. 2825-2836, 2011.

Références Bibliographiques

- [32] M. Sarra, G.J Paul, A. Chaoui, F. Krim, "Two Control Techniques Applied to a Three Phase Shunt Active Power Filter for Power Quatity Improvement with Experimental Validation," European Conference on Power Electronics and Applications (EPE), Birmingham, UK, 2011.
- [33] C.A. Fellague, A. Fellague, "Étude et simulation d'un filtre actif parallèle multi-niveaux," Mémoire Fin d'Etudes de Master Académique , Université Saad Dahlab de Blida, 2017-2018.