

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des Sciences Appliquées

Département de Génie Electrique



Mémoire MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et technologies

Filière : Électrotechnique

Spécialité : Électrotechnique Industrielle

Présenté par :

Mohammed lahreche - Tayeb Berrekbia

Thème :

Filtrage des Harmoniques pour Améliorer la Qualité d'Énergie d'un Réseau Electrique

Soumis au jury composé de :

M.Kouras sid-Ali	Président	UKM Ouargla
M. Benaouadj Mahdi	Encadreur/rapporteur	UKM Ouargla
M.Rezoug Mohammed Redha	Examineur	UKM Ouargla

Année universitaire : 2023/2024

Remerciement

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à Dieu qui nous a accordé ses bienfaits et nous a dotés de santé, de patience et de courage tout au long de ces longues années .d'études

Nous adressons nos sincères remerciements à nos parents qui ont été le pilier de notre réussite et qui nous ont permis d'atteindre ce stade, ainsi qu'à toutes les personnes et amis qui nous ont soutenus, guidés et contribué au succès de cette .année scolaire

Nous tenons également à remercier notre professeur encadrant, M. [Mehdi Bin Awaj](#), pour son soutien précieux et .ses précieux conseils

Enfin, nous dédions ce modeste travail à tous ceux qui nous .ont transmis un savoir dans ce domaine de la connaissance

Nous implorons Dieu de faire de ce travail une source d'inspiration et de lumière pour tous les étudiants en quête de .savoir

.Merci à tous

Résumé

L'utilisation croissante de l'appareillage pollueur surtout dans le domaine de l'électronique de puissance a causé l'apparition des harmoniques et la détérioration de la qualité de l'onde de courant fournie. Pour cette raison, plusieurs solutions de dépollution harmonique ont été adoptées dont l'utilisation du filtrage actif présente la méthode la plus efficace et la plus appropriée.

Ce travail s'intéresse à l'amélioration de la qualité énergétique d'un réseau électrique.

Pour arriver à cet objectif, trois étapes primordiales ont été poursuivies :

- 1) Identification des courants harmoniques.
- 2) Insertion et commande d'un filtre actif parallèle.
- 3) Vérification de l'efficacité de la stratégie de filtrage adoptée en comparant les taux de distorsion harmonique (THD) avant et après filtrage.

Les divers résultats obtenus prouvent la capacité du filtre actif inséré à décontaminer la pollution harmonique et par conséquent améliorer la qualité d'énergie.

Mots-clés : Filtre actif parallèle, Identification des harmoniques, Qualité d'énergie, Réseau électrique.

الملخص :

أدى الاستخدام المتزايد للمعدات الملوثة ، خاصة في مجال إلكترونيات الطاقة ، إلى ظهور التوافقيات وتدهور جودة الموجة الكهربائية المقدمة . لهذا السبب ، تم اعتماد العديد من الحلول للتحكم في التلوث التوافقي، حيث يمثل استخدام الترشيح النشط الطريقة الأكثر كفاءة و ملائمة.

تحديد التيارات التوافقية.

الإدراج والتحكم في مرشح متوازي نشط.

التحقق من فاعلية استراتيجية التصفية المعتمدة بمقارنة معدلات التشوه التوافقي (THD) قبل وبعد التصفية.

تثبت النتائج المختلفة المتحصل عليها قدرة المرشح النشط المدرج على إزالة التلوث التوافقي وبالتالي تحسين جودة الطاقة

الكلمات المفتاحية : مرشح نشط متوازي، تحديد التوافقيات، جودة الطاقة، الشبكة الكهربائية.

Abstract

The increasing use of polluting equipment, especially in the field of power electronics, has caused the appearance of harmonics and the deterioration of the quality of the supplied current wave. For this reason, several harmonic pollution control solutions have been adopted, and the use of the active filtering presents the most efficient and appropriate method.

This work concerns improving energy quality of an electrical network. To achieve this objective, three essential steps were pursued:

- 1) Identification of the harmonic currents.
- 2) Insertion and control of an active parallel filter.
- 3) Checking effectiveness of the adopted filtering strategy by comparing the harmonic distortion rates (THD) before and after filtering.

The various obtained results prove capacity of the inserted active filter to decontaminate harmonic pollution and consequently improve energy quality.

Keywords: Parallel active filter, Harmonics identification, Energy quality, Electrical network

Table des matières

Remerciement	2
Introduction générale.....	2
Chapitre I :.....	4
La pollution et dépollution harmonique.....	4
I.1. Introduction.....	5
I.2. La pollution harmonique.....	5
I. 2. 1. Origine des perturbation harmonique.....	6
I. 2.1.1. Appareils de production de transport et de distribution	6
I. 2.1.2. Secteur industriel	6
I. 2.1.3. Secteur domestique	6
I. 2.2. Conséquences des harmonique.....	6
I. 2.2.1. Echauffement.....	6
I. 2.2.2. Creux et coupures de tension	7
Figure I.1 : Creux et coupures de tension [6].	7
I. 2.2.3. Déséquilibre du système triphasé de tension	7
Figure I.2 : Déséquilibre du système triphasé de tension [5].	7
I. 2.2.4. Inter-harmonique.....	7
Figure I.3 : Harmonique de courant [5].	8
I. 2.2.5. Fluctuation de tension.....	8
Figure I.4: Fluctuation de tension [13].	9
I. 3. Solution de dépollution des réseaux électrique.....	9
Figure I.5 : Différentes solutions utilisées dans le filtrage du courant [13].	9
I. 3.1. Les solutions traditionnelles	10
I. 3.1.1. Augmentation de la puissance de court-circuit du réseau.....	10
I. 3.1.2. Utilisation d'inductances anti-harmoniques	10
I. 3.1.3. Placement d'une inductance de ligne	10
I. 3.1.4. Compensation de la puissance réactive.....	10
I. 3.1.5. Filtres passifs	11
Figure I.6 : Filtrages passifs [13].	11
I. 3.1.6. Filtre passif résonant	12
Figure I.7 : Filtre passif résonant [13].	12
I. 3.1.7. Filtre passif amorti.....	12
Figure I.8 : Filtre passif amorti [13].	12

Figure I.9 :Différents types de filtres amortis [15].....	13
I. 3.2. Solutions des modernes	13
I. 3.2.1. Filtre actif série (FAS)	13
Figure I.10 : Filtre actif série (FAS) [15].....	14
I. 3.2.2. Filtre hybrides actifs et passifs	14
Figure I.11 : Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle [5].....	14
Figure I.12 : Filtre actif série avec des filtres passifs parallèles [5]....	Erreur ! Signet non défini.
I. 3.2.3. Filtre actif parallèle (FAP)	15
Figure I.13 : Filtre actif parallèle (FAP) [5].....	15
I. 4. Conclusion	15
Chapitre II :	4
Identifications des courants harmoniques dans un réseau électrique	4
II.2. Impact d'une charge non linéaire:	19
Figure II.1 : Schéma de simulation avant l'ajout de la charge polluante.....	19
Figure II.2 : Formes des tensions pour chaque phase avant l'ajout de la charge polluante.....	20
Figure II.3 : Formes des courants pour chaque phase avant l'ajout de la charge polluante.....	20
Figure II.4 : THD de la tension V_a	21
Figure II.5 : THD de la tension V_b	22
Figure II.6 : THD de la tension V_c	22
Figure II.7 : THD du courant I_a	23
Figure II.8 : THD du courant I_b	24
Figure II.9 : THD du courant I_c	24
Figure II.10 : Schéma de simulation après l'ajout de la charge polluante.....	25
Figure II.11 : Formes des courants pour chaque phase après l'ajout de la charge polluante	26
Figure II.12 : THD du courant I_a	27
Figure II.13 : THD du courant I_b	27
Figure II.14 : THD du courant I_c	28
II.3. Identification des harmoniques par la méthode des PIRI	28
Figure II.15 : Filtre actif commandé par la méthode des puissances instantanées.....	30

II.4. Identification des harmoniques par la méthode du référentiel synchrone	30
Figure II.16 : Filtre actif commandé par la méthode du référentiel synchrone	31
II.5. Comparaison entre les signaux de référence générés par chaque méthode	31
Tableau II.1 : Paramètres de la source triphasée d'alimentation	31
Tableau II.2 : Paramètres de la charge triphasée	31
Figure II.17 : Courants absorbés par la charge	33
Figure II.18 : Courant de référence de la phase 1 généré par la méthode des PIRI	33
Figure II.19 : Courant de référence de la phase 1 généré par la méthode du référentiel synchrone	34
Figure II.20 : Courant de référence de la phase 2 généré par la méthode des PIRI	34
Figure II.21 : Courant de référence de la phase 2 généré par la méthode du référentiel synchrone	34
Figure II.23 : Courant de référence de la phase 3 généré par la méthode des PIRI	35
Figure II.24 : Courant de référence de la phase 3 généré par la méthode du référentiel synchrone	35
II.6. Conclusion	35
III.1. Introduction	38
III.2. Partie puissance du filtre actif parallèle à structure tension	38
Figure III.1 : Schéma du circuit de puissance d'un filtre actif parallèle à structure tension	39
Tableau III.1 : Tensions en sortie de l'onduleur	40
III.3. Partie commande du filtre actif parallèle	41
Figure III.2 : Principe de la commande des interrupteurs par hystérésis	42
Figure III.3 : Modèle simplifié d'un contrôleur de bande d'hystérésis	43
III.4. Résultats de simulation	43
Tableau III.2 : Paramètres du réseau d'alimentation	44
Tableau III.3 : Paramètres de la charge non-linéaire	44
Tableau III.4 : Paramètres du filtre actif parallèle	44
Figure III.4 : Modèle de simulation établi sous Matlab/Simulink après insertion du filtre actif parallèle	44
Figure III.5 : Formes d'onde des courants de la source, de la charge et du filtre actif parallèle pour la phase (a)	45

Figure III.6 : Formes d'onde des courants de la source, de la charge et du filtre actif parallèle pour la phase (b).	45
Figure III.7 : Formes d'onde des courants de la source, de la charge et du filtre actif parallèle pour la phase (c).	46
Figure III.8 : Spectre harmonique du courant de la source (phase (a)) après filtrage.	46
Figure III.9 : Spectre harmonique du courant de la source (phase (b)) après filtrage.	46
Figure III.10 : Spectre harmonique du courant de la source (phase (c)) après filtrage	47
Tableau III.5 : THD avant et après filtrage des harmoniques.	47
III.5. Conclusion	47
Conclusion générale	51
Références et Bibliographique	55

Liste des figures

Figure I.1 : Creux et coupures de tension [6].....	7
Figure I.2 : Déséquilibre du système triphasé de tension [5].....	7
Figure I.3 : Harmonique de courant [5].	8
Figure I.4: Fluctuation de tension [13].	9
Figure I.5 : Différentes solutions utilisées dans le filtrage du courant [13].....	9
Figure I.6 : Filtrages passifs [13].	11
Figure I.7 : Filtre passif résonant [13].	12
Figure I.8 : Filtre passif amorti [13].....	12
Figure I.9 :Différents types de filtres amortis [15].	13
Figure I.10 : Filtre actif série (FAS) [15].....	14
Figure I.11 : Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle [5].	14
Figure I.12 : Filtre actif série avec des filtres passifs parallèles [5]. Erreur ! Signet non défini.	
Figure I.13 : Filtre actif parallèle (FAP) [5].	15
Figure II.1 : Schéma de simulation avant l'ajout de la charge polluante	19
Figure II.2 : Formes des tensions pour chaque phase avant l'ajout de la charge polluante.....	20
Figure II.3 : Formes des courants pour chaque phase avant l'ajout de la charge polluante.....	20
Figure II.4 : THD de la tension V_a	21
Figure II.5 : THD de la tension V_b	22
Figure II.6 : THD de la tension V_c	22
Figure II.7 : THD du courant I_a	23
Figure II.8 : THD du courant I_b	24
Figure II.9 : THD du courant I_c	24
Figure II.10 : Schéma de simulation après l'ajout de la charge polluante.....	25
Figure II.11 : Formes des courants pour chaque phase après l'ajout de la charge polluante.....	26
Figure II.12 : THD du courant I_a	27
Figure II.13 : THD du courant I_b	27
Figure II.14 : THD du courant I	28
Figure II.15 : Filtre actif commandé par la méthode des puissances instantanées	30
Figure II.16 : Filtre actif commandé par la méthode du référentiel synchrone	31

Liste des figures

Figure II.17 : Courants absorbés par la charge	33
Figure II.18 : Courant de référence de la phase 1 généré par la méthode des PIRI.....	33
Figure II.19 : Courant de référence de la phase 1 généré par la méthode du référentiel synchrone	34
Figure II.20 : Courant de référence de la phase 2 généré par la méthode des PIRI.....	34
Figure II.21 : Courant de référence de la phase 2 généré par la méthode du référentiel synchrone	34
Figure II.22 : Courant de référence de la phase 3 généré par la méthode des PIRI.....	35
Figure II.23 : Courant de référence de la phase 3 généré par la méthode du référentiel synchrone	35
Figure III.1 : Schéma du circuit de puissance d'un filtre actif parallèle à structure tension.....	39
Figure III.2 : Principe de la commande des interrupteurs par hystérésis.....	42
Figure III.3 : Modèle simplifié d'un contrôleur de bande d'hystérésis	43
Figure III.4 : Modèle de simulation établi sous Matlab/Simulink après insertion du filtre actif parallèle.....	44
Figure III.5 : Formes d'onde des courants de la source, de la charge et du filtre actif parallèle pour la phase (a).	45
Figure III.6 : Formes d'onde des courants de la source, de la charge et du filtre actif parallèle pour la phase (b).....	45
Figure III.7 : Formes d'onde des courants de la source, de la charge et du filtre actif parallèle pour la phase (c).	46
Figure III.8 : Spectre harmonique du courant de la source (phase (a)) après filtrage..	46
Figure III.9 : Spectre harmonique du courant de la source (phase (b)) après filtrage.	46
Figure III.10 : Spectre harmonique du courant de la source (phase (c)) après filtrage	47

Liste des tableau

Tableau II.1 : Paramètres de la source triphasée d'alimentation	31
Tableau II.2 : Paramètres de la charge triphasée.....	31
Tableau III.1 : Tensions en sortie de l'onduleur	40
Tableau III.2 : Paramètres du réseau d'alimentation.....	44
Tableau III.3 : Paramètres de la charge non-linéaire	44
Tableau III.4 : Paramètres du filtre actif parallèle	44
Tableau III.5 : THD avant et après filtrage des harmoniques.	47

Introduction

Introduction générale

Ces dernières années, l'expansion de l'utilisation des équipements électriques a considérablement détérioré la qualité de l'énergie dans les réseaux électriques. En effet, les convertisseurs statiques (tels que les semi-conducteurs, les variateurs de vitesse, etc.) sont de plus en plus répandus, tant dans les environnements industriels que domestiques

Pour remédier à cette dégradation de la qualité de l'énergie distribuée, diverses solutions ont été envisagées. Parmi celles-ci, les filtres passifs, souvent désignés sous le nom de "filtres piègeurs d'harmoniques", ont été largement utilisés pour éliminer les harmoniques de courant et améliorer le facteur de puissance. Bien que ces solutions soient simples et peu coûteuses, elles étaient traditionnellement employées pour atténuer la distorsion causée par les courants harmoniques dans les systèmes d'alimentation industriels. Cependant, leur efficacité est conditionnée par l'impédance du système et le courant harmonique de la charge non linéaire, ce qui les rend inefficaces dans certaines situations[1]

Pour remédier aux limitations des filtres passifs, les filtres actifs de puissance ont été introduits. Ils sont connectés en parallèle avec les équipements générant des perturbations, et injectent dans le réseau électrique un courant de même amplitude que celui du courant harmonique à éliminer. Il est également crucial de noter que les performances des filtres actifs dépendent étroitement de l'algorithme de détection des références harmoniques ainsi que de la méthode utilisée pour les suivre.

L'objectif principal de ce manuscrit est d'améliorer la qualité de l'énergie dans un réseau électrique. Pour atteindre cet objectif, notre travail est divisé en trois chapitres:

- Le premier chapitre examine les causes et les conséquences des harmoniques sur les réseaux et les équipements, ainsi que les différentes solutions traditionnelles et modernes disponibles.
- Dans le deuxième chapitre, nous présentons les méthodes d'identification des courants harmoniques, telles que la méthode des puissances instantanées réelles et

imaginaires (PIRI), la méthode du référentiel synchrone. Les signaux de référence générés par chaque méthode sont ensuite comparés.

- Le troisième chapitre se concentre sur la dépollution harmonique en utilisant un filtre actif parallèle. Les différentes valeurs du taux de distorsion harmonique (THD) avant et après le filtrage démontrent l'efficacité de la stratégie choisie pour améliorer la qualité de l'énergie.

En conclusion, nous résumerons les principaux résultats obtenus dans ce mémoire et discuterons de leurs implications dans le contexte plus large de l'amélioration de la qualité de l'énergie dans les réseaux électriques.

Chapitre I :

La pollution et dépollution harmonique

I. 1.Introduction

Le signal électrique est exposé à plusieurs distorsions avec des caractéristiques différentes qui affectent la qualité de cette énergie en fonction de la tension au point de connexion, comme un déséquilibre de tension et de courant et des distorsions d'ondes. Ces distorsions peuvent entraîner des dysfonctionnements, des dommages ou des confusions. qui affectent négativement

Les paramètres de tension suivants dans le réseau électrique : fréquence, crête, symétrie des tensions triphasées et forme d'onde. Dans ce chapitre, nous examinons certaines des causes et des effets des harmoniques et comment les solutions d'élimination de la pollution affectent la qualité de l'énergie dans les réseaux électriques.

I. 2. La pollution harmonique

Les fréquences secondaires dans les systèmes d'alimentation électrique peuvent provenir de différentes sources, mais elles proviennent généralement des appareils comportant des éléments de commutation, tels que les transformateurs (comme les transformateurs de courant), ainsi que des appareils présentant des caractéristiques non linéaires de tension et de courant, comme les fours à arc saturé, les transformateurs et les machines rotatives [2].

La présence de ces fréquences secondaires peut causer de nombreux problèmes dans les systèmes d'alimentation, principalement en raison de l'effet nocif qu'elles peuvent avoir sur les appareils électriques en augmentant la chaleur, les pertes supplémentaires et la détérioration des composants tels que les transformateurs, les câbles et les condensateurs.

Les fréquences secondaires sont des composants d'ondes sinusoïdales avec des fréquences multiples entières par rapport à la fréquence fondamentale du système, généralement de 50 ou 60 Hz. Elles se superposent à l'onde fondamentale et peuvent poser un problème particulier dans les systèmes sensibles nécessitant une alimentation électrique de haute qualité, tels que les équipements électroniques, les systèmes de communication et les installations industrielles de précision.

I. 2. 1. Origine des perturbation harmonique**I. 2.1.1. Appareils de production de transport et de distribution**

Cette catégorie concerne les équipements utilisés dans la distribution de l'énergie électrique tels que les générateurs et les transformateurs. Généralement, la tension du réseau électrique est caractérisée par un faible taux de distorsion, mais des défauts de fabrication peuvent entraîner une pollution harmonique. De plus, les machines synchrones produisent des fréquences harmoniques lors de la distribution de leur puissance électromotrice [3].

I. 2.1.2. Secteur industriel

Les transformateurs électroniques de puissance tels que les redresseurs et les variateurs de vitesse, les fours à arc et à induction, ainsi que les variateurs de vitesse, constituent les principales causes de perturbation harmonique dans l'environnement industriel. Ces appareils entraînent une détérioration significative de la qualité du réseau électrique, car les transformateurs électroniques de puissance fonctionnant en commutation absorbent des courants présentant un spectre harmonique élevé. La circulation de ces courants à travers la résistance de court-circuit entraîne une distorsion de la forme d'onde au point de connexion des appareils au réseau [3].

I. 2.1.3. Secteur domestique

Le secteur résidentiel contribue de manière significative à la pollution harmonique observée sur les réseaux électriques. Les principaux équipements électriques perturbateurs comprennent les appareils électroménagers, les téléviseurs, les gradateurs de lumière et les lampes fluorescentes [3].

I. 2.2. Conséquences des harmonique**I. 2.2.1. Echauffement**

❖ *Echauffement des câbles et des équipements* : Ces effets peuvent être à moyen terme (de quelques secondes à quelques heures) ou à long terme (de quelques heures à quelques années) et concernent les câbles qui peuvent être le siège du sur échauffement comme le neutre et les matériels bobinés (transformateurs ou moteurs).

❖ *Echauffement des condensateurs* : L'échauffement est causé par les pertes dans le diélectrique. Les condensateurs sont sensibles à la présence d'harmoniques. Ces échauffements peuvent conduire au claquage [4].

I. 2.2.2. Creux et coupures de tension

Il s'est avéré qu'une chute de tension se produit lorsque cette dernière manifeste une diminution d'amplitude entre 10% et 90% de sa valeur nominal (U_n) pendant une durée allant de 10 ms à 1 minute.

Par contre, une coupure de tension est due à une diminution de l'amplitude de cette tension. Généralement, pour des coupures brèves, il y a lieu d'une diminution supérieure à 90% de U_n pour un temps $10 \text{ ms} < t < 1 \text{ min}$ [5].

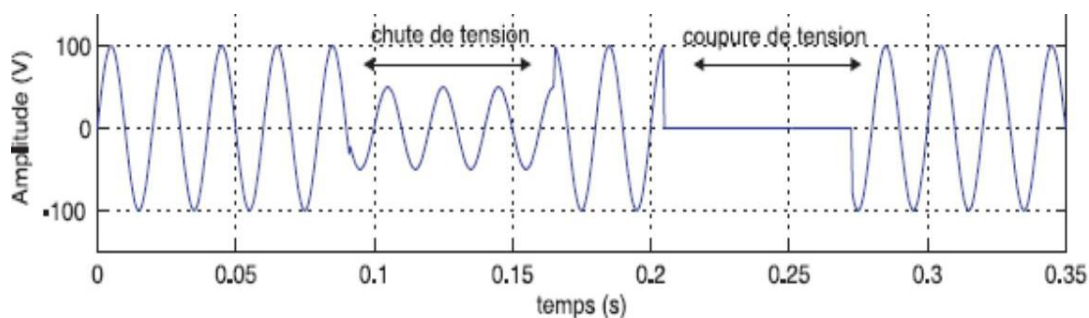


Figure I.1 : Creux et coupures de tension [6].

I. 2.2.3. Déséquilibre du système triphasé de tension

On parle de déséquilibre du système triphasé lorsque les trois tensions ne sont pas similaires en amplitude et/ou ne sont pas décalées d'un angle de 120° l'une par rapport à l'autre [6].

Un réseau électrique triphasé équilibré alimentant un récepteur électrique triphasé non équilibré conduit à des déséquilibres de tension dus à la circulation de courants non équilibrés dans les impédances du réseau [6].

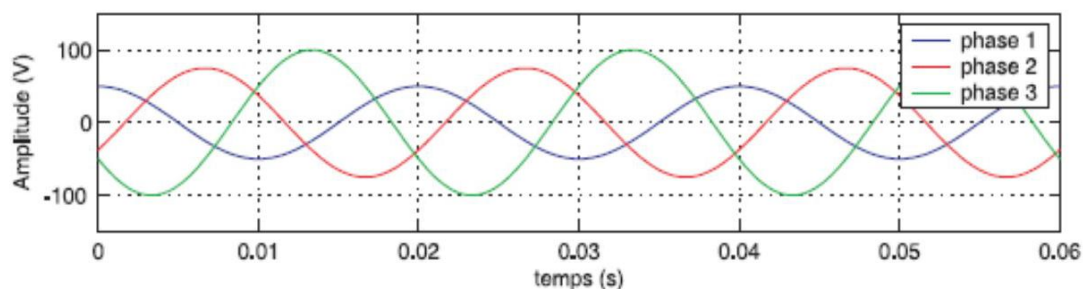


Figure I.2 : Déséquilibre du système triphasé de tension [5].

I. 2.2.4. Inter-harmonique

Les harmoniques sont une superposition sur l'onde fondamentale à 50 Hz d'ondes sinusoïdales avec des multiples entiers de la fréquence fondamentale.

La principale source de la présence des harmoniques dans les réseaux électriques est l'utilisation de plus en plus croissante d'équipements de l'électronique de puissance à base de thyristors et de transistors.

Les inters harmoniques se superposent à l'onde fondamentale, mais ne sont pas des multiples entiers de la fréquence fondamentale. Les inters harmoniques sont de plus en plus courants et leurs principales sources comprennent les convertisseurs de fréquence, les variateurs de vitesse et d'autres dispositifs de commande électriques [5].

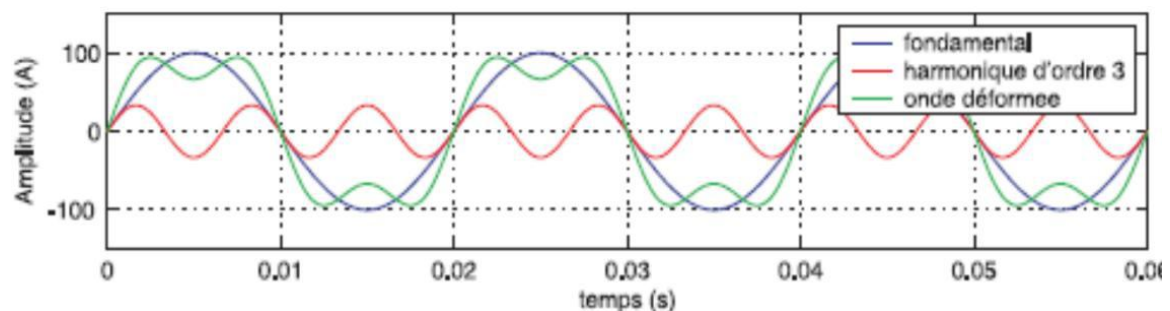


Figure I.3 : Harmonique de courant [5].

I. 2.2.5. Fluctuation de tension

Les creux et les coupures de tension sont susceptibles de perturber le fonctionnement de nombreuses installations industrielles tertiaires et domestiques raccordées au réseau. En effet, ce type de perturbation est la cause la plus fréquente de problèmes de qualité d'énergie qui peut se traduire par des conséquences néfastes, allant de la dégradation de fonctionnement des équipements électriques jusqu'à leur destruction totale [7][8].

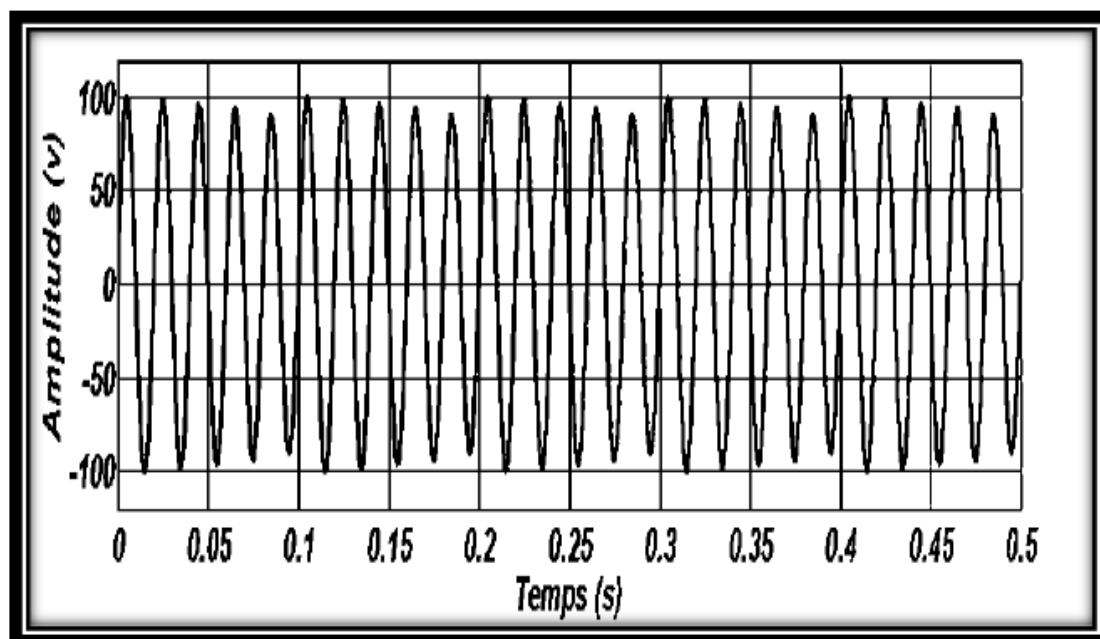


Figure I.4: Fluctuation de tension [13].

I. 3. Solution de dépollution des réseaux électrique

Pour pallier les interruptions de courant mentionnées dans la figure (I.4) deux ensembles de solutions de dépollution sont disponibles : l'une de nature traditionnelle, l'autre plus moderne.

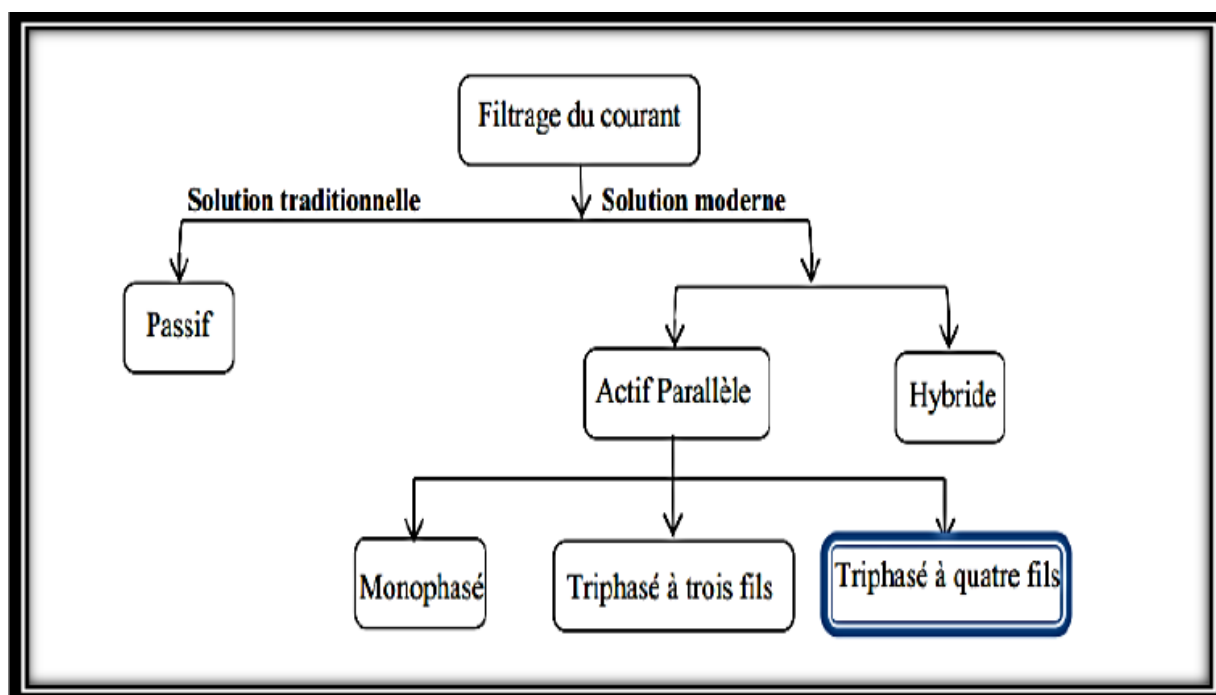


Figure I.5 : Différentes solutions utilisées dans le filtrage du courant [13].

I. 3.1. Les solutions traditionnelles

Elles apportent une solution facile et rapide pour certains cas de perturbations bien localisées et utilisent des composants passifs (inductances, condensateurs, transformateurs) et/ou des branchements qui modifient le schéma de l'installation [9].

I. 3.1.1. Augmentation de la puissance de court-circuit du réseau

L'impédance de court-circuit d'un point dans le réseau est inversement proportionnelle à la puissance de court-circuit disponible à ce point. Par conséquent, une puissance de court-circuit élevée réduit l'impact des harmoniques. Cependant, si l'on néglige les phénomènes de résonance, la puissance harmonique augmente lorsque la puissance de court-circuit diminue. Réduire l'impédance totale en amont de la charge non linéaire peut diminuer la tension induite par les harmoniques de courant, réduisant ainsi le taux de distorsion harmonique en tension au point de raccordement. Malheureusement, cela n'atténue pas les courants harmoniques eux-mêmes [10].

I. 3.1.2. Utilisation d'inductances anti-harmoniques

Cette méthode vise à protéger les condensateurs utilisés pour améliorer le facteur de puissance en les associant à une inductance en série. L'inductance est dimensionnée de manière à éviter que la fréquence de résonance ne coïncide avec l'une des harmoniques présentes dans le système [11].

I. 3.1.3. Placement d'une inductance de ligne

Afin de réduire les effets indésirables dans le réseau, il est envisageable de limiter les courants harmoniques émis par certains convertisseurs. Cette approche est couramment adoptée pour les variateurs de vitesse et les redresseurs triphasés. Elle implique l'installation d'une inductance en série en amont des charges non linéaires. Cette configuration permet généralement de diviser la distorsion du courant d'environ deux [10].

I. 3.1.4. Compensation de la puissance réactive

La compensation de l'énergie réactive est employée pour limiter le transport de cette énergie, ce qui peut entraîner une chute de tension et des pertes le long de la ligne. Diverses méthodes de compensation sont utilisées pour améliorer le facteur de puissance. La plus simple consiste à installer des batteries de condensateurs en

parallèle avec le réseau ou avec la charge, comme dans le cas des moteurs asynchrones [12].

I. 3.1.5. Filtres passifs

Ce sont les premiers gadgets qui ont été utilisés pour éliminer les harmoniques. Ils sont constitués d'inductances, de condensateurs et de résistances, qui sont tous des composants passifs.

Les filtres d'harmoniques sont souvent reliés en série avec des charges génératrices d'harmoniques (redresseurs à diodes ou à thyristors, fours à arc électrique...).

Le filtre passif résonnant et le filtre passif amorti ou passe-haut sont deux des dispositifs de filtrage passif les plus largement utilisés [9].

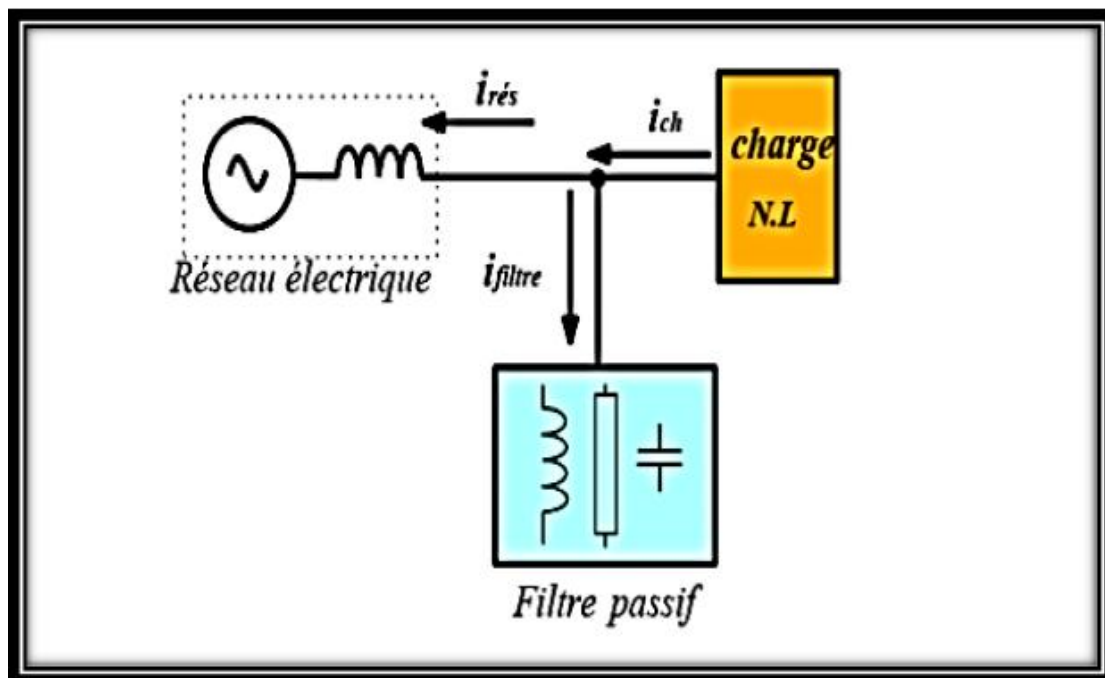


Figure I.6 : Filtrages passifs [13].

I. 3.1.6. Filtre passif résonant

C'est un filtre sélectif constitué, d'une résistance, d'un condensateur et d'une bobine en série comme décrit sur la figure :

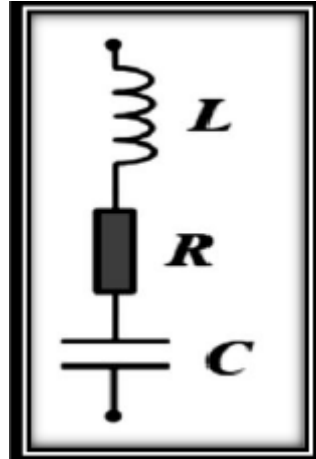


Figure I.7 : Filtre passif résonant [13].

I. 3.1.7. Filtre passif amorti

Il s'agit d'un filtre passe-haut constitué d'une inductance en parallèle avec une résistance, le tout en série avec un condensateur. Ce type de filtre amorti peut réduire le risque de résonance non désirée et permet de considérablement réduire la taille du filtre passif, tout en fonctionnant sur une large gamme de fréquences. On distingue trois types de filtres amortis : le filtre du premier ordre est peu utilisé car il nécessite une grande capacité et entraîne des pertes de puissance élevées. En revanche, les filtres du deuxième et du troisième ordre offrent de meilleures performances [13].

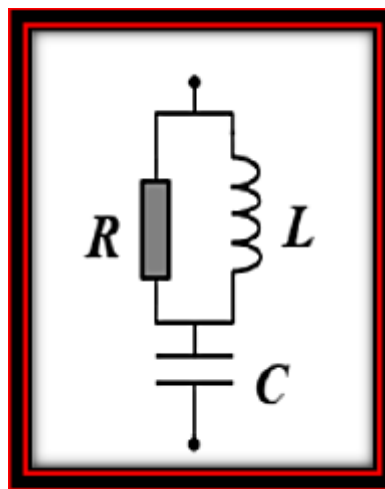


Figure I.8 : Filtre passif amorti [13].

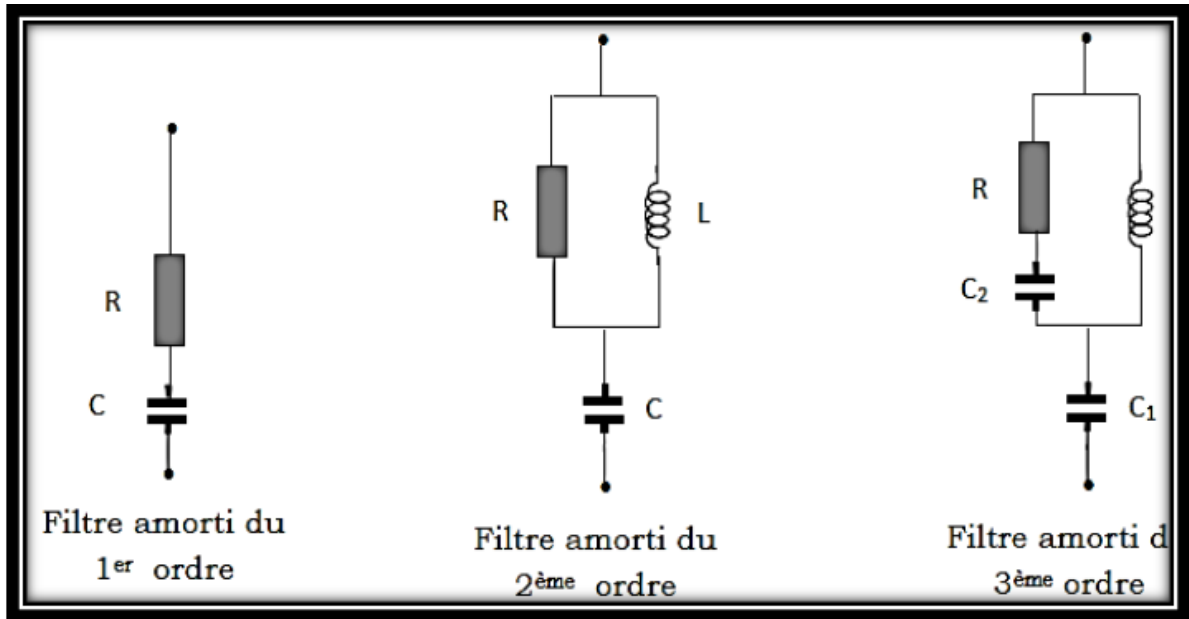


Figure I.9 : Différents types de filtres amortis [15].

I. 3.2. Solutions des modernes

Il y a deux raisons principales qui ont conduit à la conception d'une nouvelle structure filaire moderne et efficace appelée filtre actif. La première raison réside dans les lacunes des solutions traditionnelles d'élimination de la pollution qui ne répondent plus aux changements dans les charges et les réseaux. Quant à la deuxième raison, elle est liée à l'émergence de nouveaux composants semi-conducteurs tels que le thyristor GTO et les transistors IGBT et MOSFET.

Le but de ces filtres est de générer des courants ou des tensions harmoniques pour compenser les perturbations responsables de la détérioration des performances des équipements et des installations électriques.

I. 3.2.1. Filtre actif série (FAS)

Le filtre actif série se comporte comme une source de tension qui s'oppose aux tensions perturbatrices (creux, déséquilibre, harmonique) venant de la source et également celles provoquées par la circulation des courants perturbateurs à travers l'impédance du réseau. Ainsi la tension aux bornes de la charge à protéger est purement sinusoïdale [9].

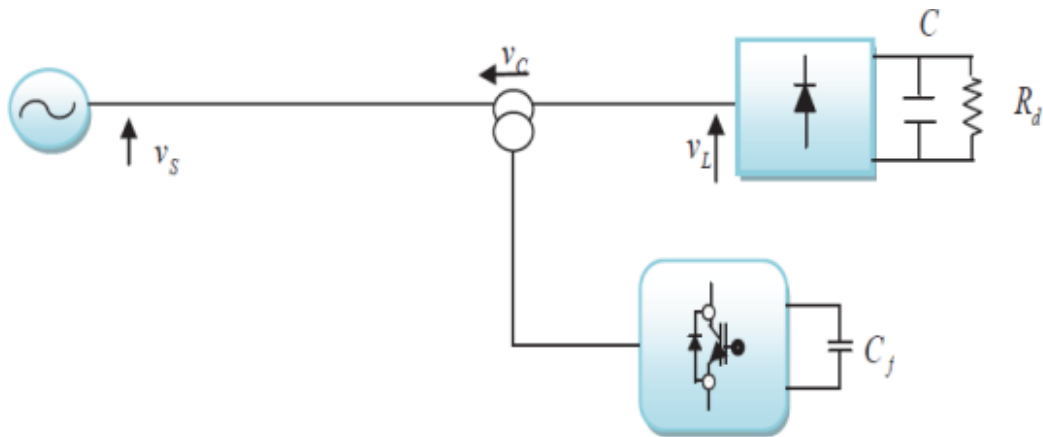


Figure I.10 : Filtre actif série (FAS) [15].

I. 3.2.2. Filtre hybrides actifs et passifs

Pour réduire le volume et le coût du filtre actif, un filtre passif lui est attaché.

Le rôle du filtre passif est d'éliminer les fréquences spécifiques permettant une réduction de la taille du filtre actif qui compensera le reste des perturbations.

Les formations les plus étudiées dans la littérature sont.

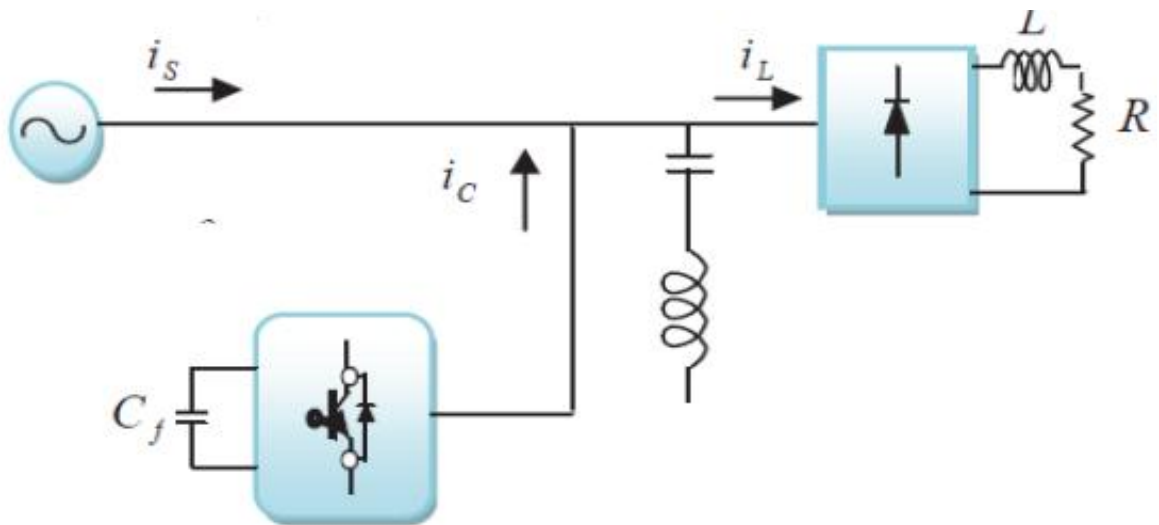


Figure I.11 : Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle [5].

I. 3.2.3. Filtre actif parallèle (FAP)

Le filtre actif parallèle peut être considéré comme un générateur de courant ou de tension. Lorsqu'il fonctionne comme un générateur de courant, il est contrôlé pour être injecté dans le réseau avec des courants équivalents à ceux consommés par la charge, mais avec des phases inversées. Après compensation, le courant du source est nul. D'autre part, la tension au point de connexion ne sera nulle que si la source de tension du réseau est exempte d'harmoniques. La taille du filtre actif dépend du courant harmonique à compenser. De plus, le filtre peut également compenser le courant réactif mais avec des dimensions plus grandes .

Lorsqu'il agit comme un compensateur de courant harmonique, il permet d'éliminer tous les harmoniques des courants non linéaires à la connexion. En revanche, lorsqu'il agit comme un compensateur de tension harmonique, il permet de maintenir la tension électrique à la connexion nulle, indépendamment de la qualité de la source de tension ou du courant consommé par la charge. En général, le filtre actif parallèle est utilisé pour éliminer la pollution des réseaux de tension basse et moyenne. Son indépendance totale par rapport à la source et à la charge lui confère une bonne capacité d'adaptation aux performances estimées [14].

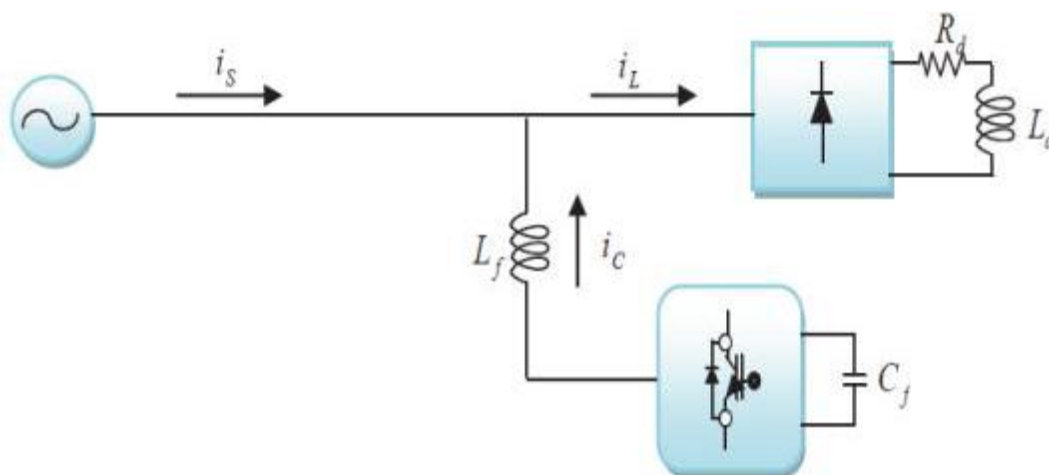


Figure I.13 : Filtre actif parallèle (FAP) [5].

I. 4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté différents types de perturbations affectant l'onde de tension du réseau électrique. La chute de tension et ses fluctuations, qui y conduisent, détériorent son état dans les deux grandeurs. Comme nous l'avons expliqué, beaucoup d'harmoniques et de temps de voisinage et ces virus peuvent vous

empêcher de créer des équipements. Nous avons également montré que la plupart des méthodes de résolution des problèmes de solution classiques se font sur des filtres manuels en termes de volume et de résonance.

Dans le chapitre suivant, nous étudie et modalisation étudierons avec détails le filtre actif parallèle

Chapitre II :
Identifications des
courants harmoniques
dans un réseau électrique

Introduction

L'identification précise des harmoniques est cruciale pour leur compensation efficace. Si les harmoniques ne sont pas correctement identifiées, même un système de commande hautement performant ne pourra pas apporter des corrections adéquates. Pour cette raison, diverses méthodes d'identification ont été développées et documentées. Parmi ces méthodes figurent :

- La méthode des puissances instantanées (PIRI).
- La méthode du référentiel synchrone (RS).

II.2. Impact d'une charge non linéaire:

Dans cette section, nous examinerons comment une charge non linéaire, telle qu'un redresseur triphasé, influe sur les grandeurs électriques d'un réseau électrique, notamment les tensions et les courants.

II.2.1. Avant l'ajout de la charge polluante:

La figure II.1 montre le schéma de simulation avant l'ajout de la charge polluante

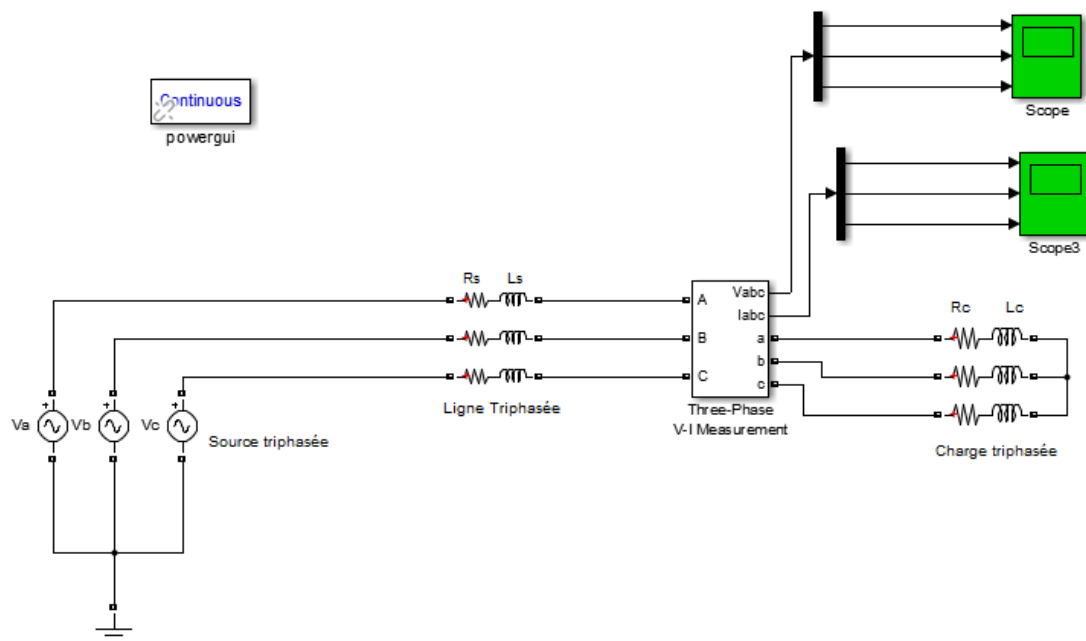


Figure II.1 : Schéma de simulation avant l'ajout de la charge polluante

Chapitre II : Identification des courants harmoniques dans réseau électrique

Les figures II.2 et II.3 illustrent les formes des courants et tensions pour chaque phase.

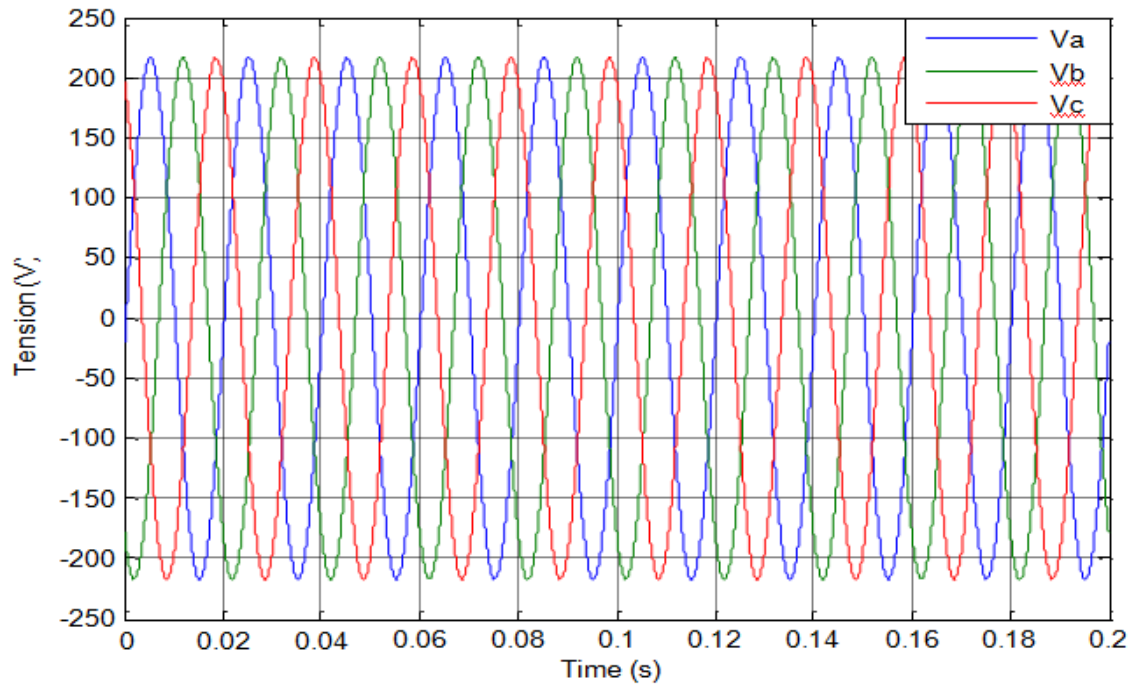


Figure II.2 : Formes des tensions pour chaque phase avant l'ajout de la charge polluante

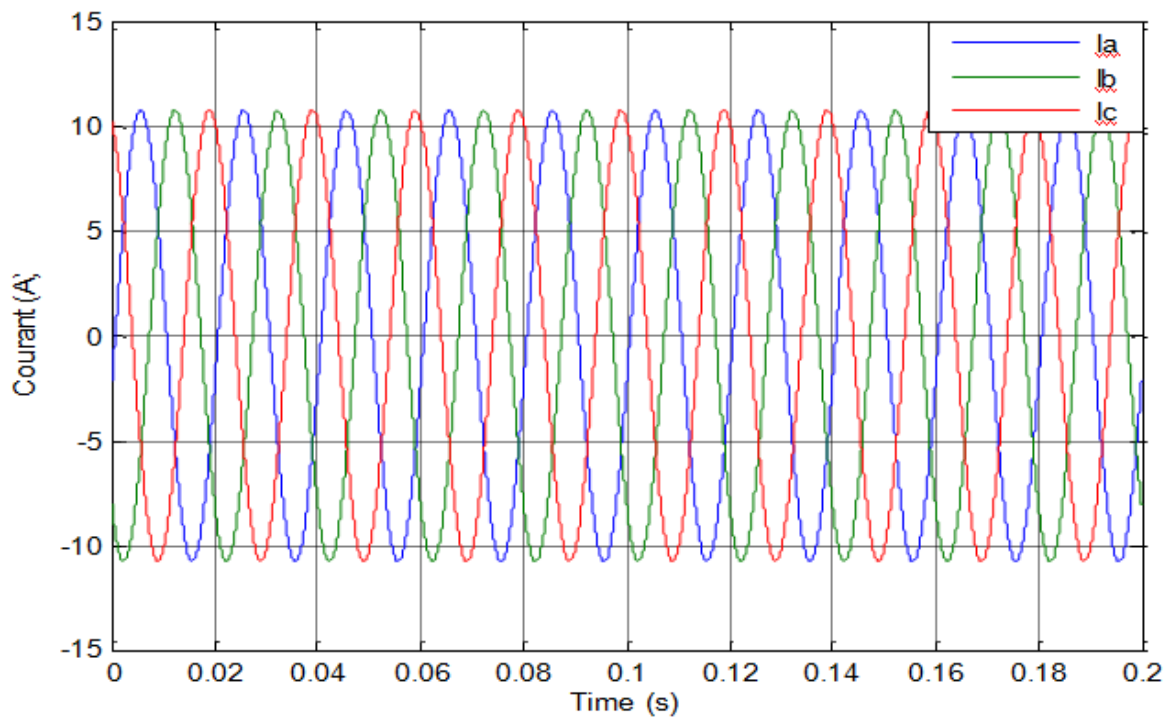


Figure II.3 : Formes des courants pour chaque phase avant l'ajout de la charge polluante

Chapitre II : Identification des courants harmoniques dans réseau électrique

Les résultats obtenus montrent que les courants et tensions pour chaque phase sont sinusoïdaux alternatifs.

Détermination du Taux de Distorsion Harmonique (THD) :

Le calcul du Taux de Distorsion Harmonique permet de détecter la présence d'harmoniques dans un réseau électrique. Il existe deux types de THD : en tension (qui se manifeste à la source) et en courant (provoqué par les charges). Lorsque le THD est nul, cela signifie qu'il n'y a pas d'harmoniques dans le réseau.

- **THD des tensions pour chaque phase :**

Les figures II.4, II.5 et II.6 présentent l'analyse spectrale de la tension de source effectuée sur les trois phases.

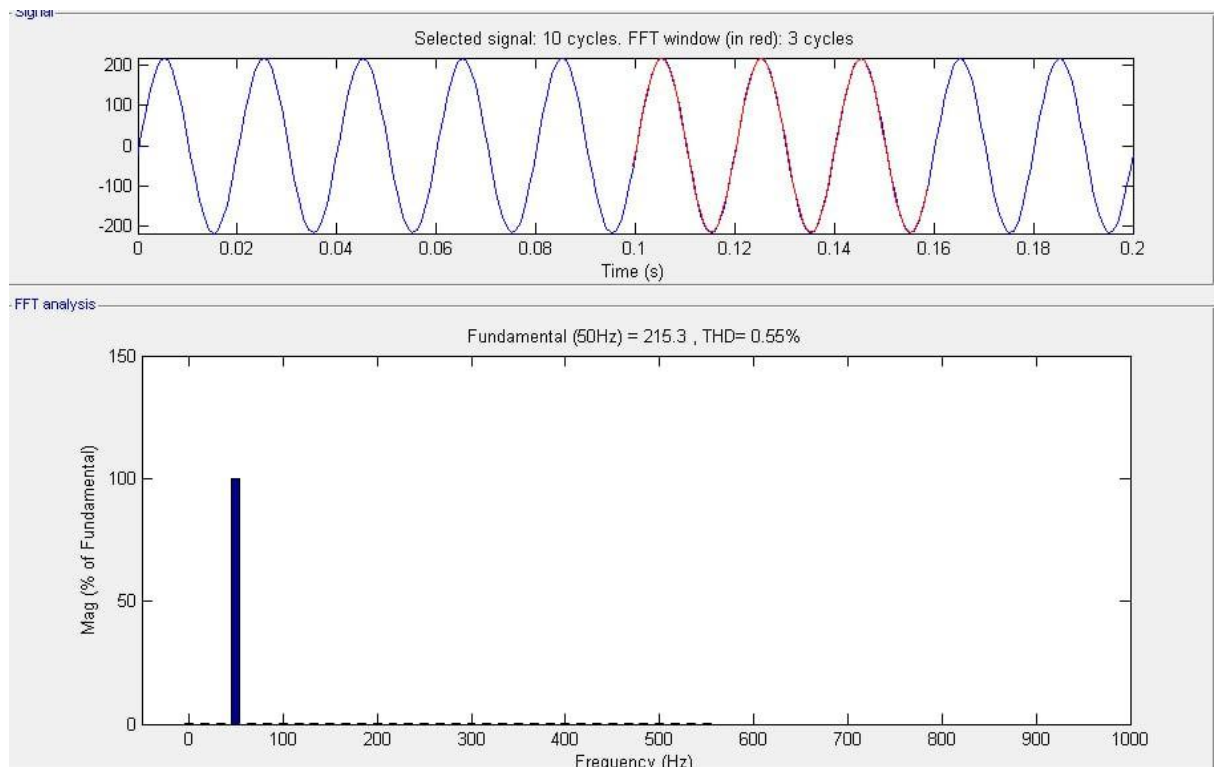


Figure II.4 : THD de la tension V_a

Chapitre II : Identification des courants harmoniques dans réseau électrique

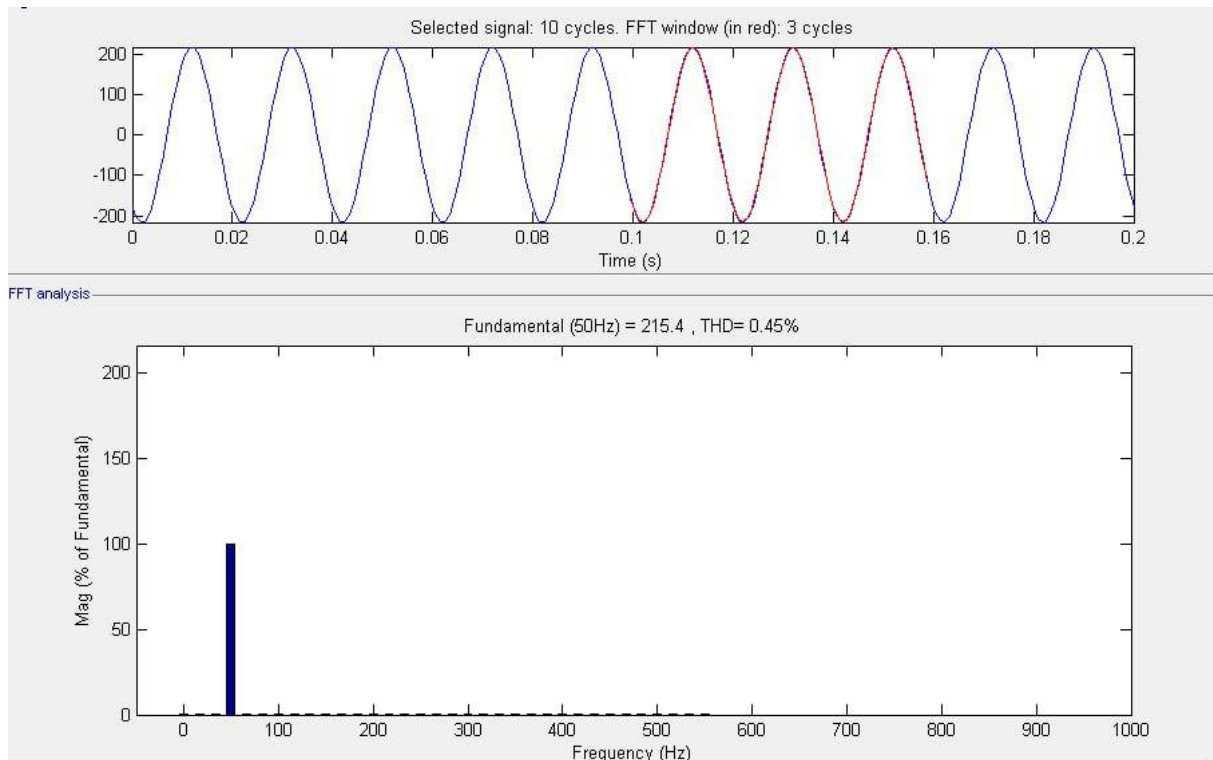


Figure II.5 : THD de la tension Vb

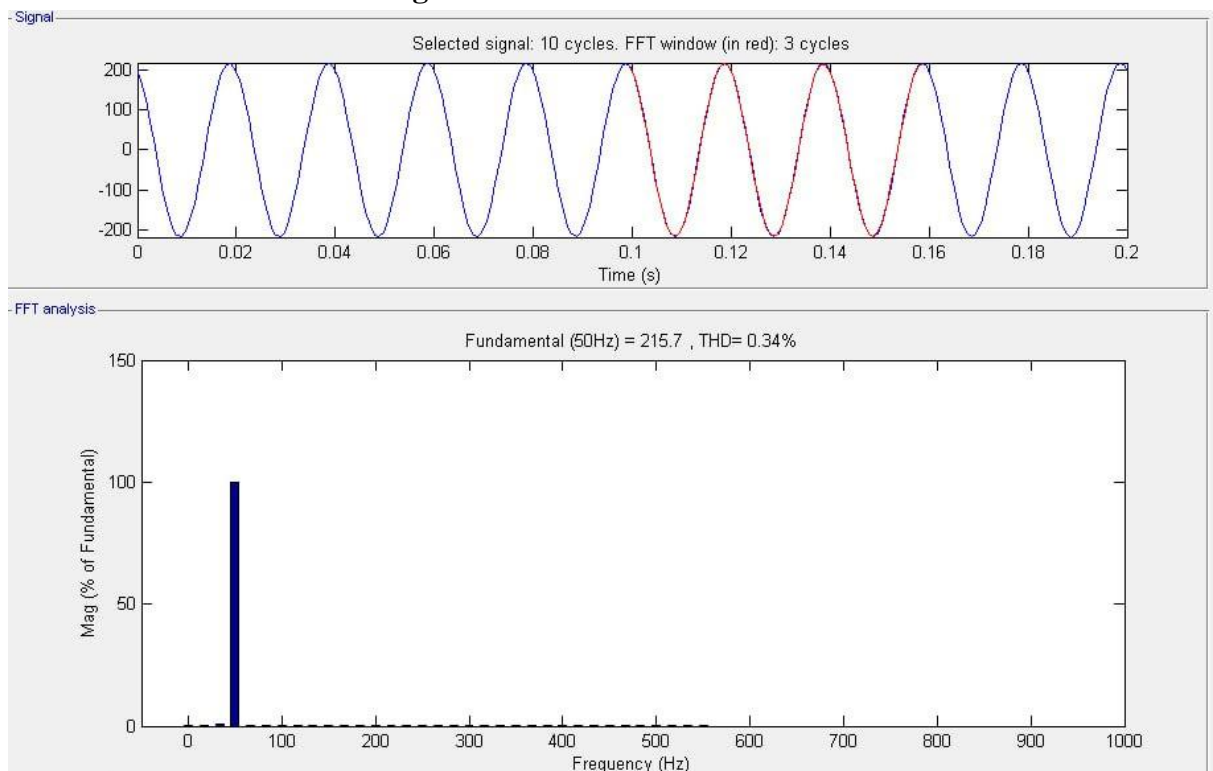


Figure II.6 : THD de la tension Vc

THD des courants pour chaque phase:

Chapitre II : Identification des courants harmoniques dans réseau électrique

Les figures II.7, II.8 et II.9 montrent l'analyse spectrale du courant absorbé par la charge effectuée sur les trois phases avant l'ajout du redresseur.

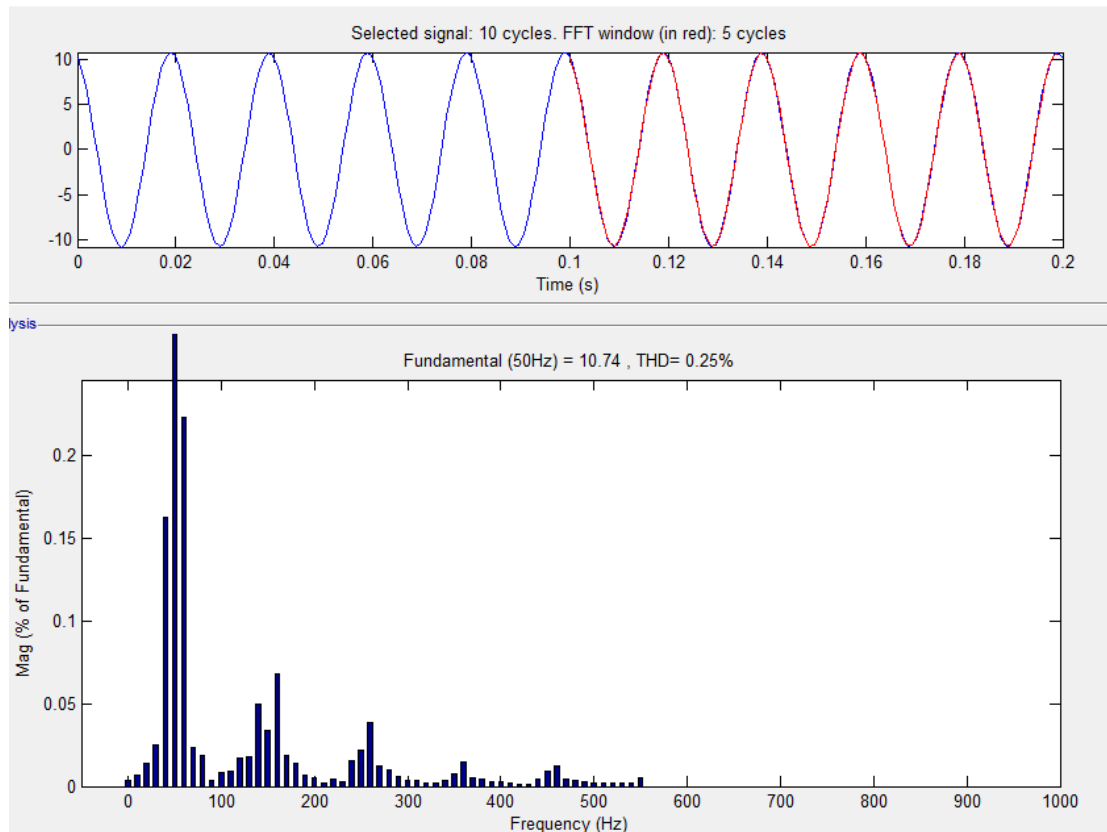


Figure II.7 : THD du courant Ia

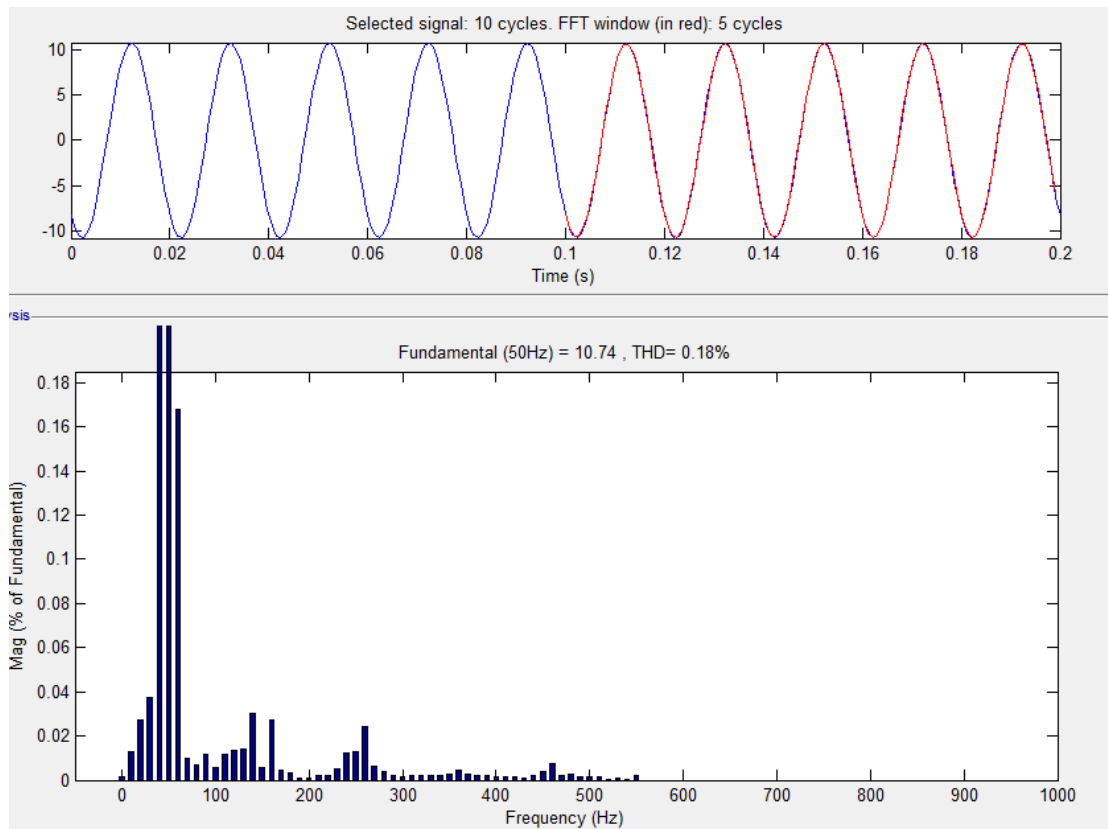


Figure II.8 : THD du courant Ib

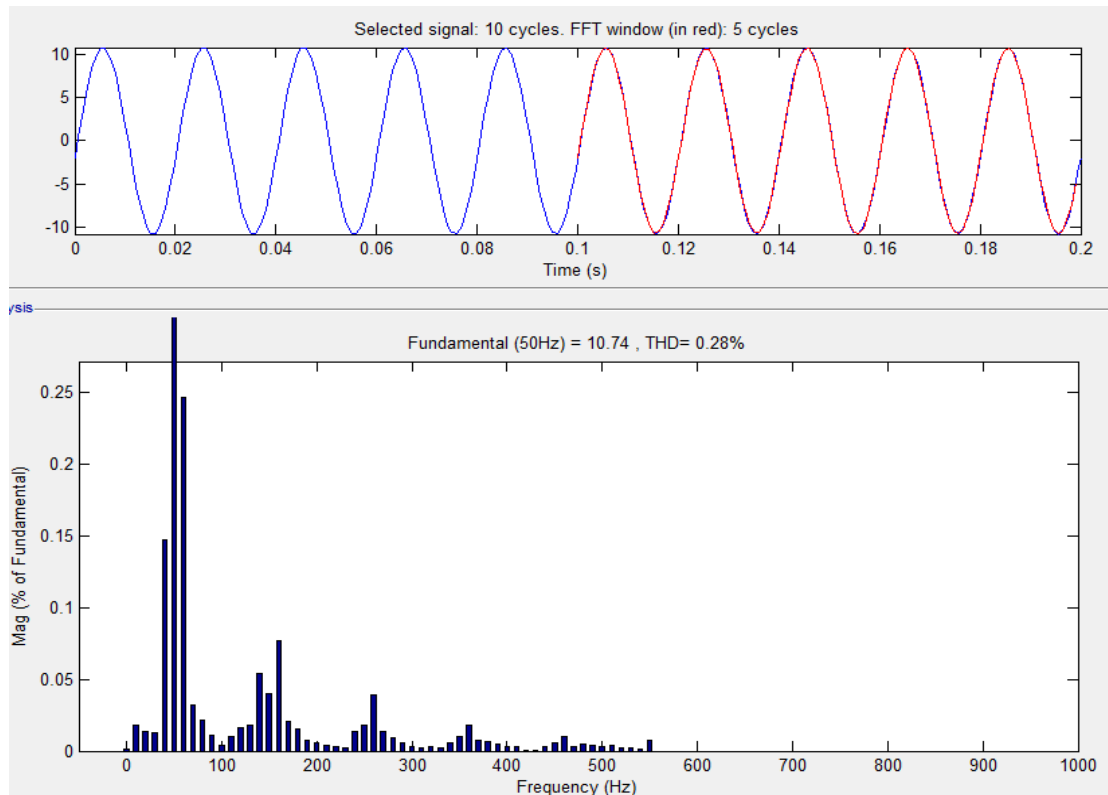


Figure II.9 : THD du courant Ic

Chapitre II : Identification des courants harmoniques dans réseau électrique

L'analyse des spectres des courants et tensions ainsi que les divers THD pour chaque phase prouvent que le réseau électrique ne présente aucune pollution harmonique.

II.2.2. Après l'ajout de la charge polluante

La figure II.10 montre le schéma de simulation après l'ajout de la charge polluante.

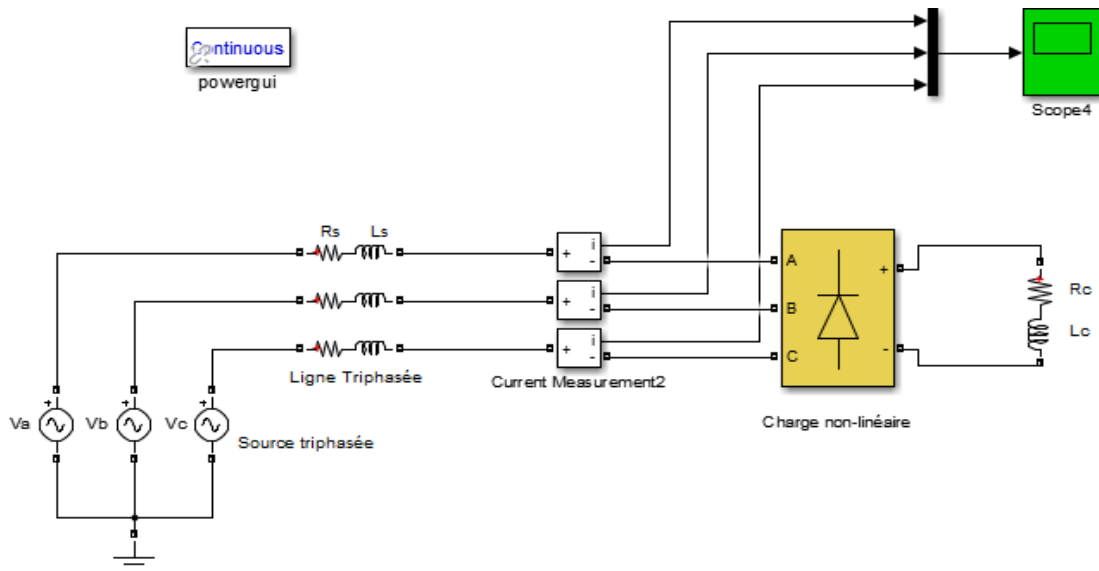


Figure II.10 : Schéma de simulation après l'ajout de la charge polluante

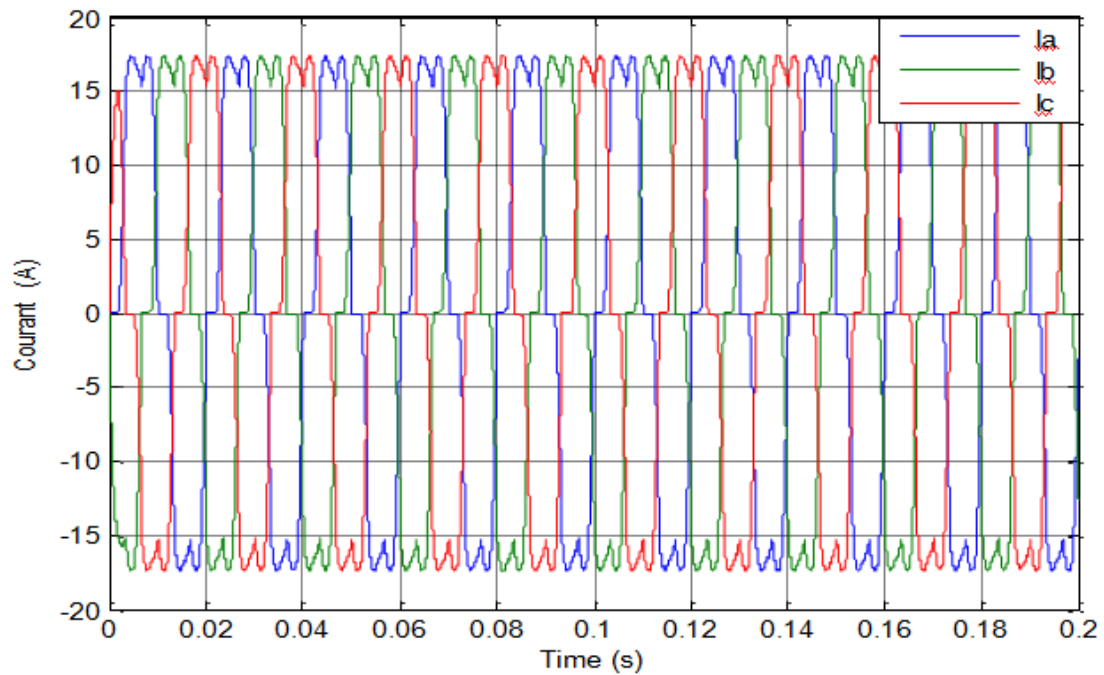


Figure II.11 : Formes des courants pour chaque phase après l'ajout de la charge polluante

Les résultats montrent que les courants et tensions de chaque phase sont alternatifs mais perturbés, avec une augmentation de la valeur maximale du courant par rapport à celle obtenue avant l'ajout du redresseur triphasé.

Détermination des THD des courants pour chaque phase :

Les figures II.12, II.13 et II.14 exposent l'analyse spectrale du courant absorbé par la charge effectuée sur les trois phases après l'ajout du redresseur.

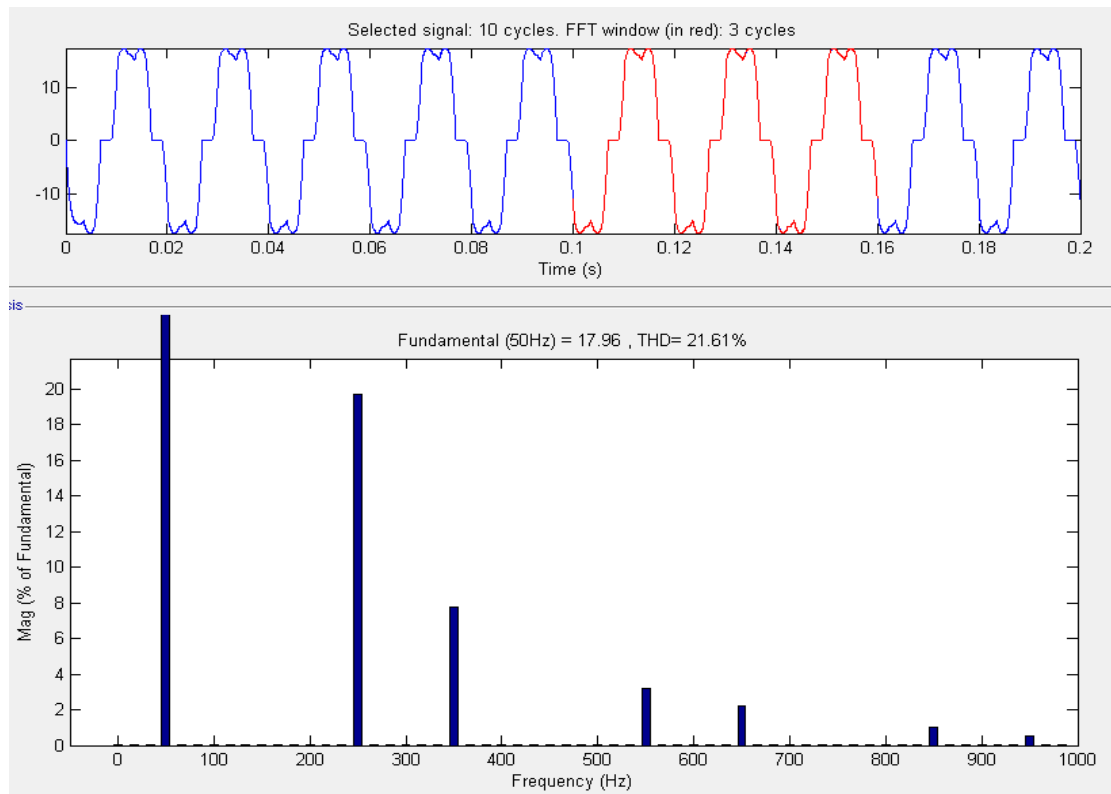


Figure II.12 : THD du courant Ia

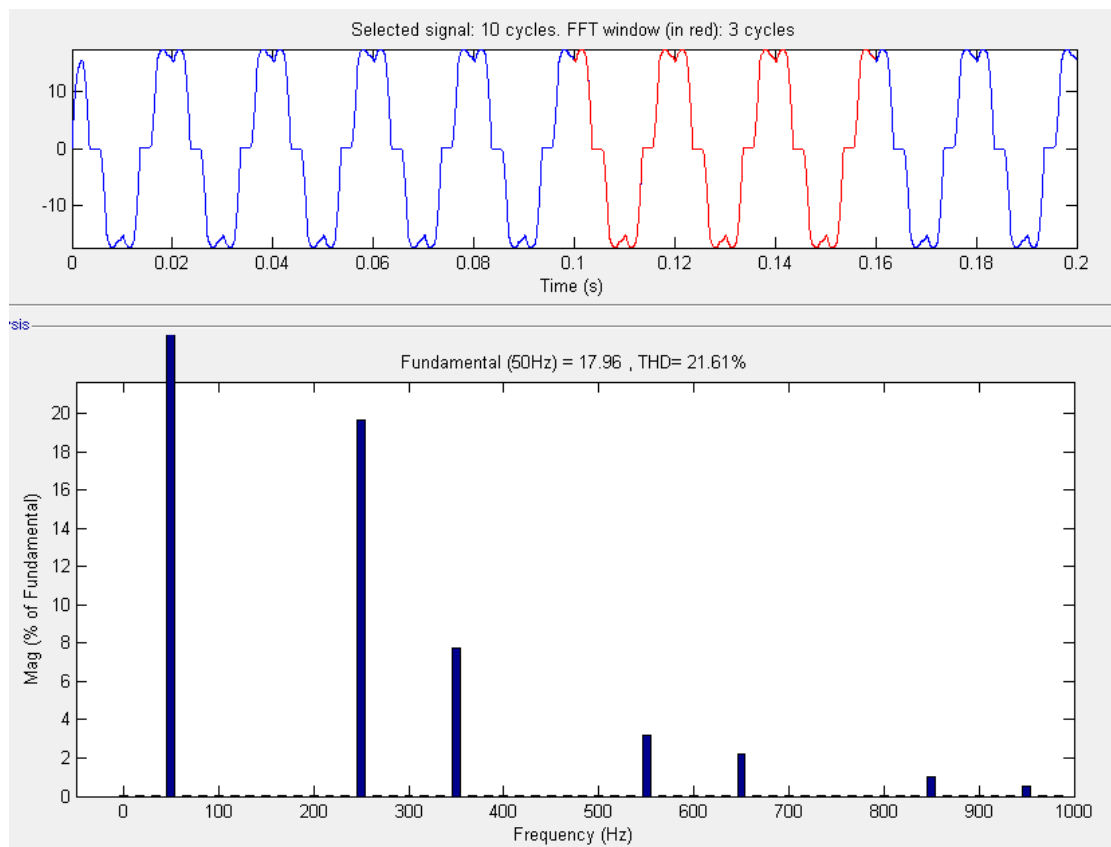


Figure II.13 : THD du courant Ib

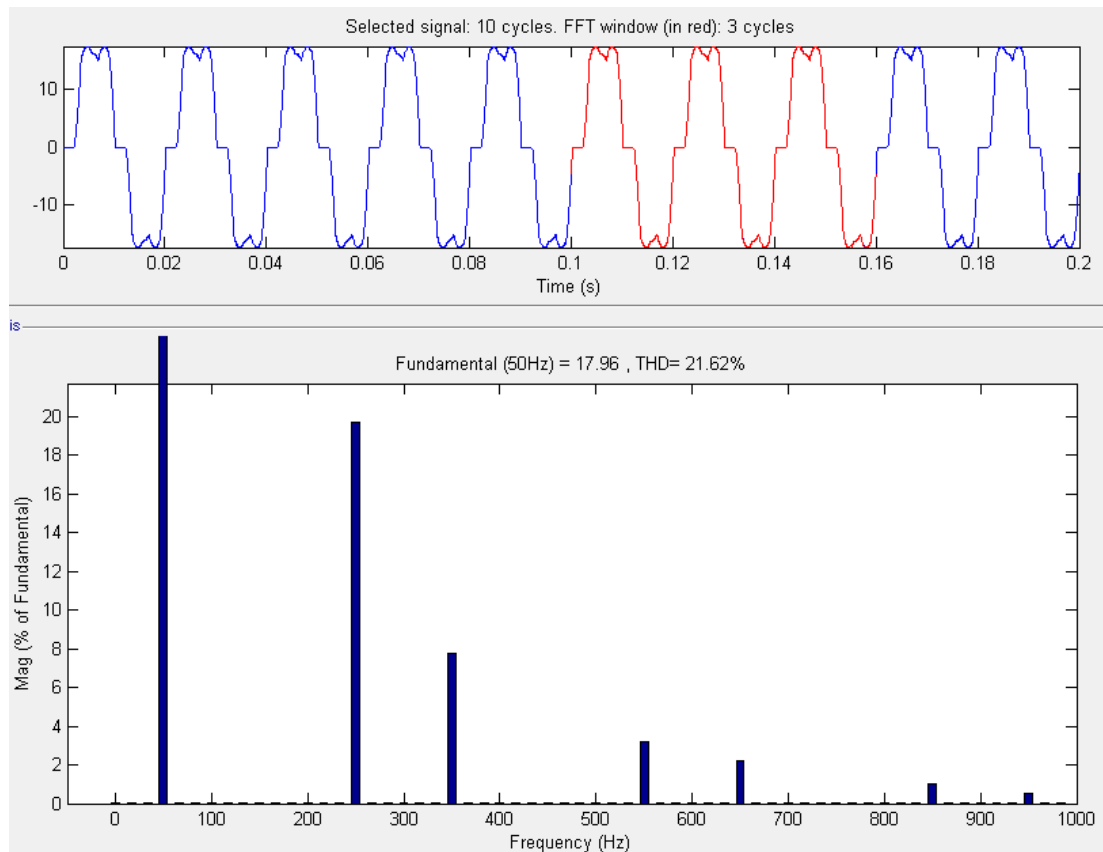


Figure II.14 : THD du courant I_c

Après l'ajout de la charge polluante, on note la présence des courants harmoniques pour chaque phase puissance puisque le redresseur est considéré en tant qu'une charge non linéaire. En effet, l'analyse spectrale des courants absorbés par la charge montre la présence, en plus de la fondamentale (rang 1), des harmoniques de rang 5, 7, 11, 13, 17, 19, etc. Pour le THD, il est de : 21.61%, 21.61% et 21.62%.

II.3. Identification des harmoniques par la méthode des PIRI

La première étape de l'identification consiste à transformer les courants et les tensions du repère triphasé $a-b-c$ vers le repère diphasé $\alpha-\beta$. Cette transformation (appelée Transformation de Concordia Directe (TCD)) permet essentiellement de réduire les contraintes de calcul. Elle est donnée par les équations (II.1) et (II.2) qui permettent de calculer les tensions $v\alpha$ et $v\beta$ et les courants $i\alpha$ et $i\beta$ [16].

$$(II.1) \quad \begin{bmatrix} V\alpha \\ V\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Va \\ Vb \\ Vc \end{bmatrix}$$

Chapitre II : Identification des courants harmoniques dans réseau électrique

$$(II.2) \quad \begin{bmatrix} i\alpha \\ i\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} ia \\ ib \\ ic \end{bmatrix}$$

La puissance réelle instantanée p et la puissance imaginaire instantanée q peuvent être exprimées de façon équivalente en système biphasé par :

$$(II.3) \quad \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V\alpha & V\beta \\ V\beta & V\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i\alpha \\ i\beta \end{bmatrix}$$

Les puissances réelles et imaginaires instantanées, respectivement p et q , sont données par :

$$(II.4) \quad \begin{cases} p = \bar{p} + \tilde{p} \\ q = \bar{q} + \tilde{q} \end{cases}$$

Les puissances p et q peuvent être décomposées en : $p = \bar{p} + \tilde{p}$ et $q = \bar{q} + \tilde{q}$. Dans le cas sinusoïdal, p est la partie continue liée à la composante fondamentale active du courant, q est la partie continue liée à la composante fondamentale réactive du courant, alors que \tilde{p} et \tilde{q} sont les parties fluctuantes liées à la somme des composantes perturbatrices du courant et de la tension.

Un filtre passe-bas permet de séparer la composante fondamentale (autrement dit la partie continue) des composantes perturbatrices (la partie alternative). Deux filtres sont nécessaires : le premier pour isoler la partie p de la puissance active instantanée et le second pour isoler la partie q de la puissance réactive instantanée.

Les courants de référence se calculent par la formule suivante :

$$(II.5) \quad \begin{bmatrix} i_{réf1} \\ i_{réf2} \\ i_{réf3} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i\tilde{\alpha} \\ i\tilde{\beta} \end{bmatrix}$$

Ou:

$$(II.6) \quad \begin{bmatrix} i\tilde{\alpha} \\ i\tilde{\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V\alpha & -V\beta \\ V\beta & V\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix}$$

$$\text{et : } \Delta = V\alpha^2 + V\beta^2$$

- Les parties alternatives des puissances \tilde{p} et \tilde{q} permettent de déduire les courants perturbateurs triphasés.

Chapitre II : Identification des courants harmoniques dans réseau électrique

- Les courants perturbateurs représentent les courants de référence qui sont à injecter en opposition de phase sur le réseau électrique pour éliminer les harmoniques.

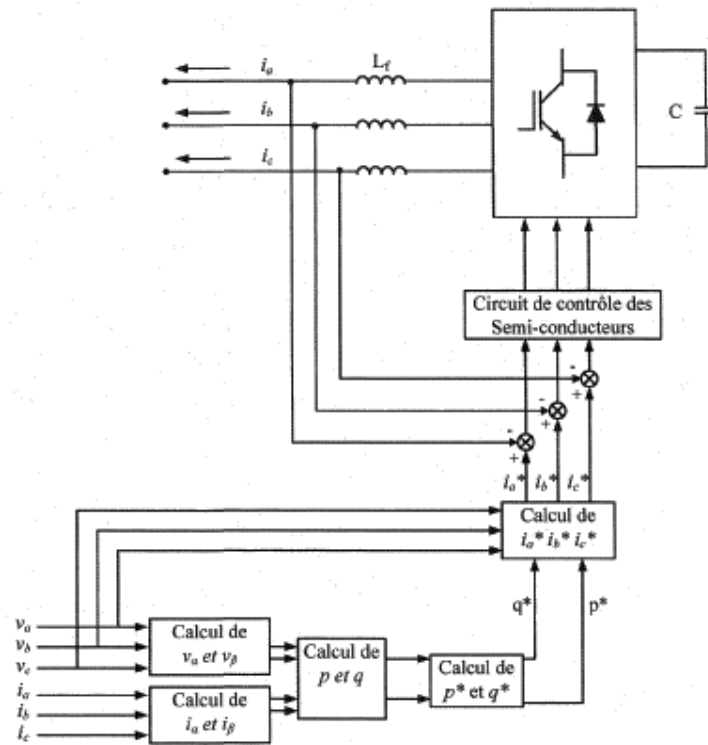


Figure II.15 : Filtre actif commandé par la méthode des puissances instantanées

II.4. Identification des harmoniques par la méthode du référentiel synchrone

Cette méthode appliquée pour le filtrage consiste à transformer les coordonnées $a-b-c$ du courant en coordonnées $d-q$ et ce, à l'aide de la transformée de Park (équation II.7) en fixant la fréquence de celle-ci en synchronisme avec celle du réseau.

$$(II.7) \quad \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \sin(\omega t) & \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos(\omega t) & \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

Le passage du courant dans la transformée de Park synchronisée avec la fréquence du réseau a pour effet de transformer la composante du courant fondamental en composante continue tandis que les composantes du courant harmonique subissent un décalage dans le spectre de fréquence. L'élimination de la composante continue est réalisée par l'ajout d'un filtre passe-haut (FPH). L'obtention du courant de référence s'obtient en effectuant la transformée inverse de Park (équation II.8) toujours en synchronisme avec la fréquence du réseau [16].

$$(II.8) \quad \begin{bmatrix} i_{réf1} \\ i_{réf2} \\ i_{réf3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\omega t) & \cos(\omega t) \\ \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{i}_d \\ \tilde{i}_q \end{bmatrix}$$

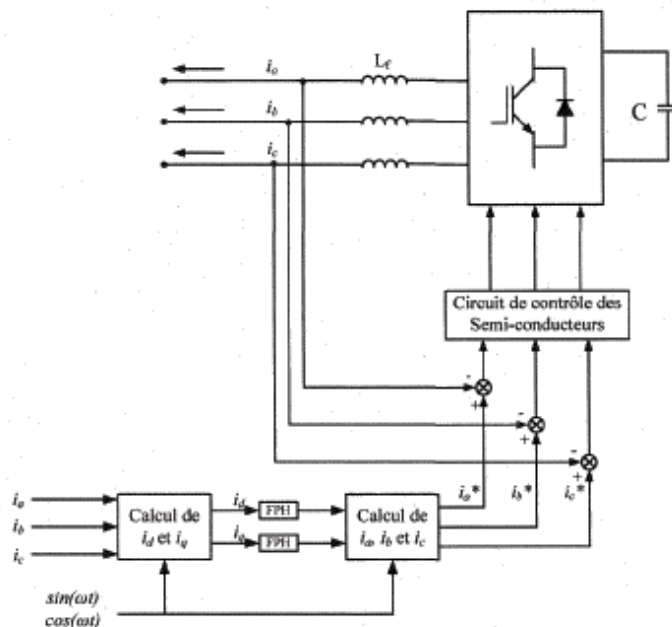


Figure II.16 : Filtre actif commandé par la méthode du référentiel synchrone

II.5. Comparaison entre les signaux de référence générés par chaque méthode

Pour faire la comparaison, on utilise un réseau triphasé composé d'une impédance d'entrée (Z_s) incluant l'impédance de la source et de la ligne. La charge non linéaire est représentée par un redresseur non commandé (à diodes) avec une charge RL série. Les paramètres du réseau et de la charge sont résumés dans les tableaux II.1 et II.2.

Paramètre	$V_{\max(L-N)}$	f (Hz)	Rsource (Ω)	Lsource (H)
Valeur	220	50	0.001	0.006

Tableau II.1 : Paramètres de la source triphasée d'alimentation

Paramètre	Charge		Redresseur	
	Rch(Ω)	Lch(H)	Ron (Ω)	$L_{on}(H)$
Valeur	20	0.006	0.001	0

Tableau II.2 : Paramètres de la charge triphasée

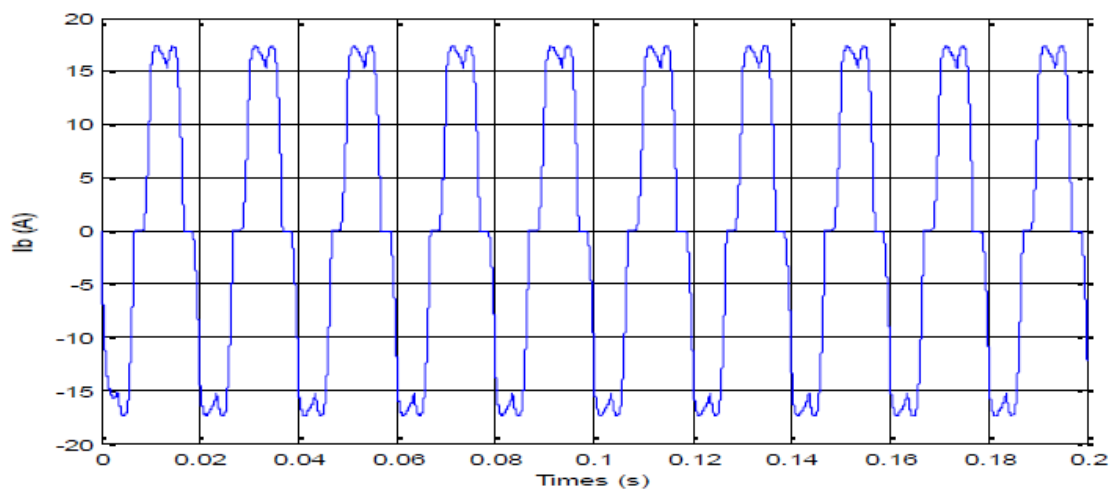
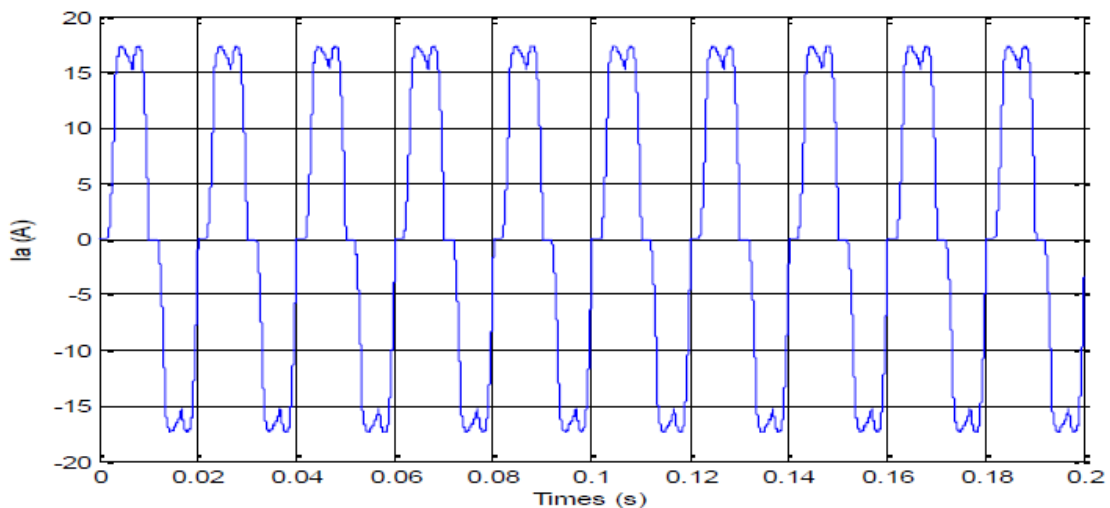
- **Résultats des simulations**

a) Pour la méthode des puissances instantanées

Cette méthode nécessite deux filtres passe-bas afin d'éliminer les parties continues des puissances p et q . La fréquence de coupure de ces filtres a été ajustée à 30 Hz

b) Pour la méthode du référentiel synchrone

Contrairement à la commande basée sur les puissances instantanées, ce type de commande nécessite l'utilisation de deux filtres passe-haut pour éliminer la composante fondamentale des courants résultant de la transformation de Park, avec une fréquence de coupure de ces filtres ajustée à 12 Hz.



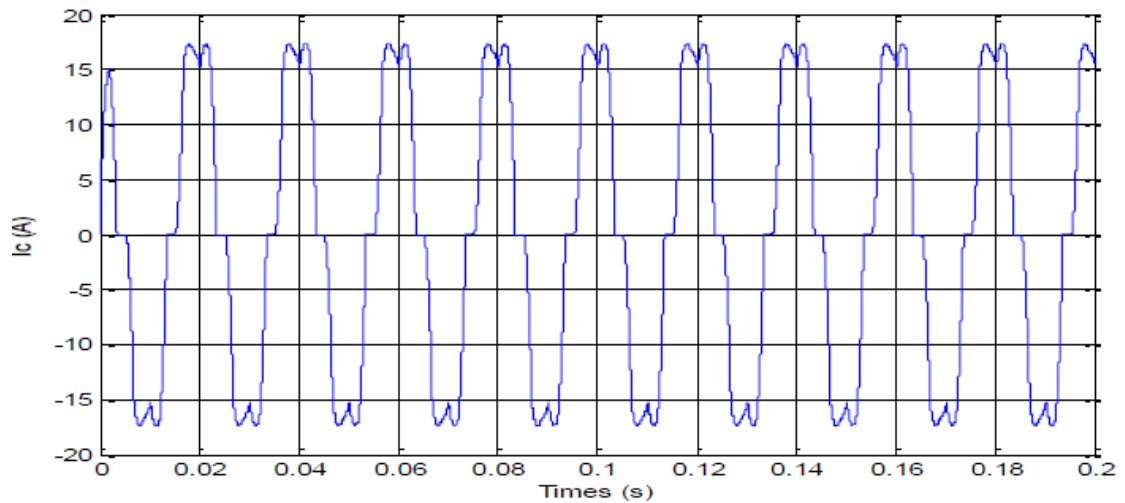


Figure II.17 : Courants absorbés par la charge

- Notons que le courant de charge (courant pollué) est le même pour les trois méthodes (les courants de la figure II.17 sont obtenus par la méthode des PIRI).

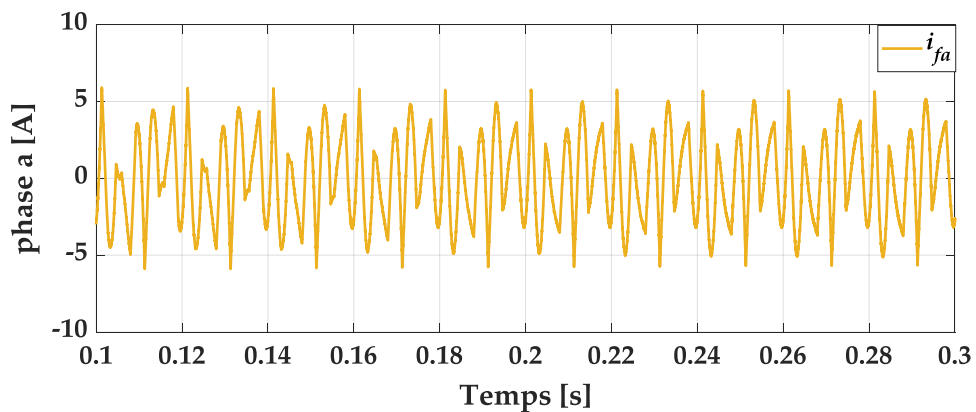


Figure II.18 : Courant de référence de la phase 1 généré par la méthode des PIRI

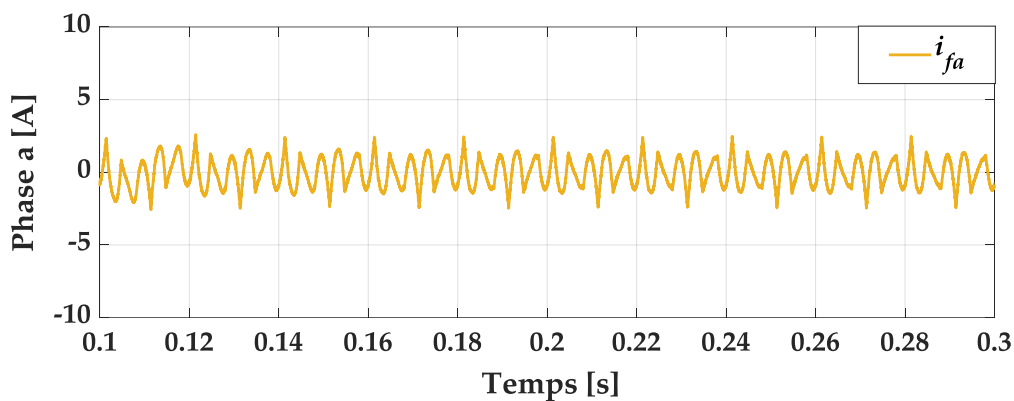


Figure II.19 : Courant de référence de la phase 1 généré par la méthode du référentiel synchrone

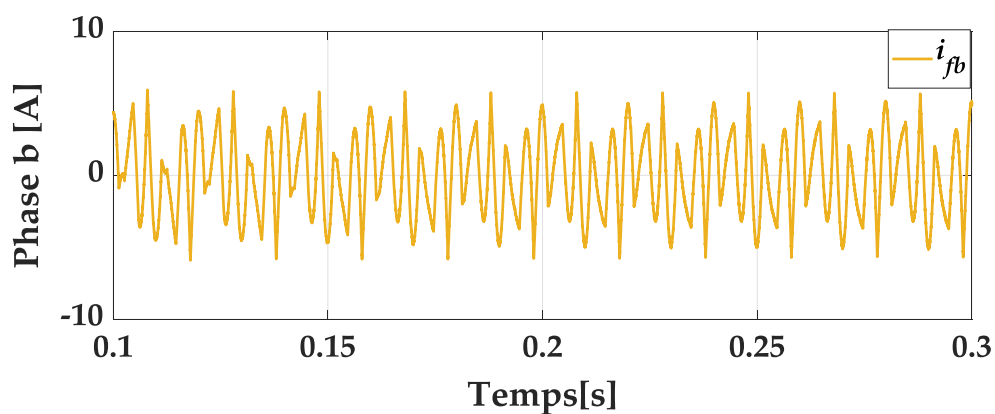


Figure II.20 : Courant de référence de la phase 2 généré par la méthode des PIRI

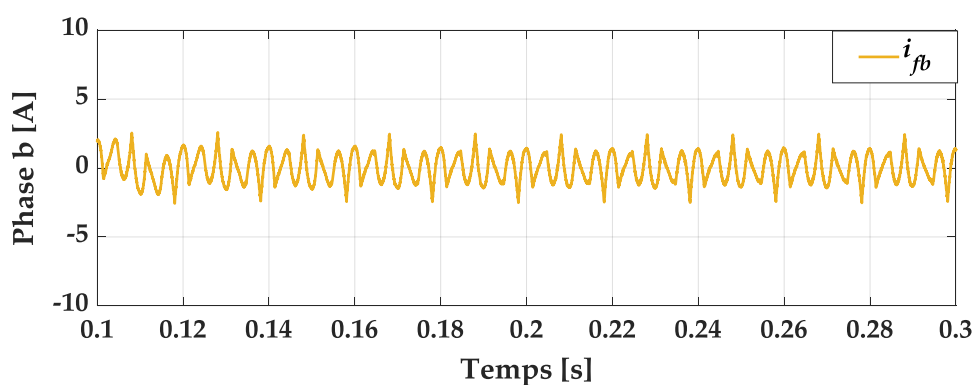


Figure II.21 : Courant de référence de la phase 2 généré par la méthode du référentiel synchrone

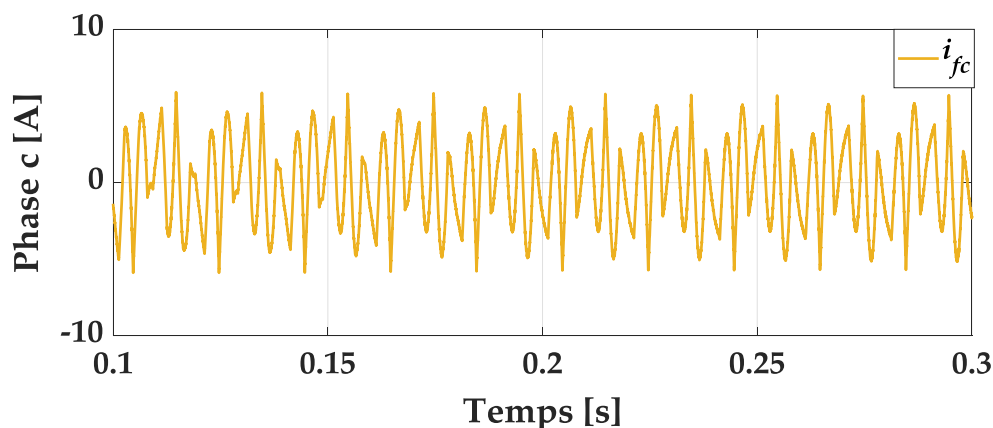


Figure II.23 : Courant de référence de la phase 3 généré par la méthode des PIRI

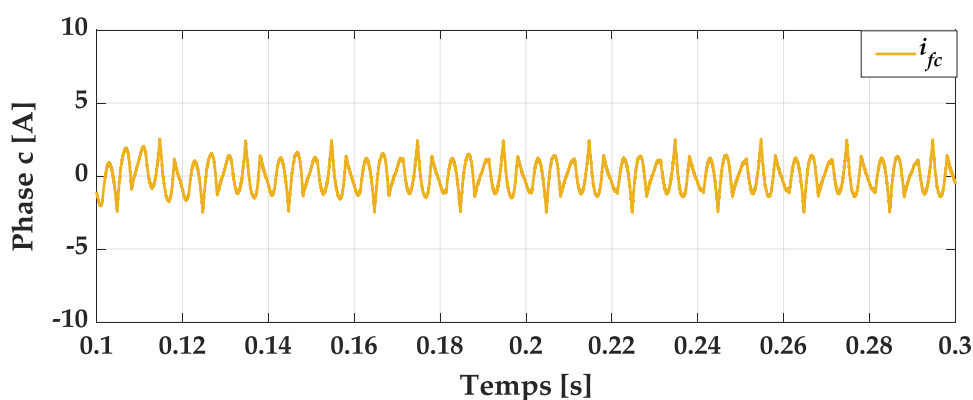


Figure II.24 : Courant de référence de la phase 3 généré par la méthode du référentiel synchrone

- Selon la figure II.17, il est clair que le courant de charge contient un pourcentage élevé d'harmoniques en raison de la nature non linéaire de la charge.
- Les courants de référence sont perturbés.
- Deux algorithmes d'identification (la méthode PIRI et la méthode du référentiel synchrone) fournissent les mêmes courants de référence pour la commande du filtre actif.

II.6. Conclusion

Nous pouvons conclure des résultats de simulation que les algorithmes de commande développés, tels que les puissances instantanées et le référentiel synchrone, offrent des courants de référence similaires pour la commande du filtre actif.

La méthode des puissances instantanées (PIRI) utilise des calculs comme les puissances réelles et imaginaires. La méthode du référentiel synchrone fonctionne dans le repère d-q mais

Chapitre II : Identification des courants harmoniques dans réseau électrique

nécessite moins de calculs. De plus, la méthode du référentiel synchrone utilise uniquement les courants.

Dans le chapitre suivant, nous utiliserons un filtre actif commandé par la méthode des puissances instantanées (PIRI) afin d'améliorer la qualité de l'énergie dans le réseau électrique présenté ci-dessus.

Chapitre III :

Amélioration de la qualité d'énergie par
la mise en oeuvre d'un filtre actif
parallèle

Chapitre III : Amélioration de la qualité d'énergie par la mise en oeuvre d'un filtre actif parallèle.

III.1. Introduction

L'élimination de la pollution harmonique du réseau électrique signifie maintenir la tension alternative requise au point de connexion à partir du courant absorbé par les charges non linéaires. Cela est réalisé à travers différentes structures de contrôle des filtres actifs. La structure la plus couramment utilisée dans les applications industrielles est celle utilisant un onduleur de tension en parallèle avec la charge non linéaire, connue sous le nom de filtre actif parallèle (FAP).

L'objectif de ce chapitre est de présenter les résultats de simulation concernant l'élimination de la pollution harmonique du réseau électrique en utilisant un filtre actif parallèle basé sur un onduleur de tension, contrôlé par la méthode des puissances instantanées réelles et imaginaires (PIRI).

III.2. Partie puissance du filtre actif parallèle à structure tension

La figure III.1 présente le circuit de puissance d'un filtre actif parallèle à structure tension. Le filtre est connecté au réseau électrique par l'intermédiaire d'un filtre inductif (L_f) de sortie. On y distingue trois éléments :

- Onduleur de tension .
- Filtre de sortie .
- Élément de stockage .

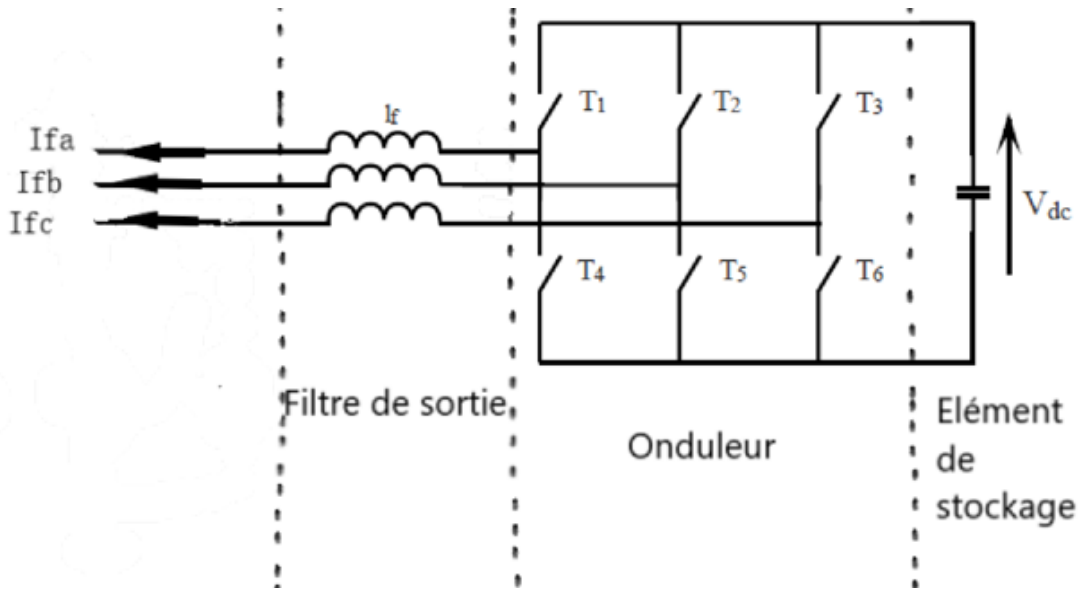


Figure III.1 : Schéma du circuit de puissance d'un filtre actif parallèle à structure tension.

III.2.1. L'onduleur de tension :

L'onduleur triphasé de tension est constitué de commutateurs de courant réversibles, fabriqués à partir de semi-conducteurs contrôlables en ouverture et fermeture (de type IGBT) montés en antiparallèle avec une diode. La commande de deux semi-conducteurs dans la même branche se fait de manière complémentaire, c'est-à-dire que si l'un est ouvert, l'autre est fermé. Selon ce principe, l'ouverture et la fermeture des commutateurs de l'onduleur illustrés dans la figure III.1 dépendent de l'état des signaux de commande (S_a , S_b , S_c). Nous avons :

$$S_a = \begin{cases} 1 & \text{Si: } T_1 \text{ est fermé et } T_4 \text{ est ouvert} \\ 0 & \text{Si: } T_4 \text{ est fermé et } T_1 \text{ est ouvert} \end{cases}$$

$$S_b = \begin{cases} 1 & \text{Si: } T_2 \text{ est fermé et } T_5 \text{ est ouvert} \\ 0 & \text{Si: } T_5 \text{ est fermé et } T_2 \text{ est ouvert} \end{cases}$$

$$S_c = \begin{cases} 1 & \text{Si: } T_3 \text{ est fermé et } T_6 \text{ est ouvert} \\ 0 & \text{Si: } T_6 \text{ est fermé et } T_3 \text{ est ouvert} \end{cases}$$

Les tensions entre phases, imposées par l'onduleur, sont alors définies par :

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

Chapitre III : Amélioration de la qualité d'énergie par la mise en oeuvre d'un filtre actif parallèle.

Les tensions à la sortie de l'onduleur, notées V_{fa} , V_{fb} , V_{fc} , vérifient les équations suivantes :

$$\begin{bmatrix} V_{fa} \\ V_{fb} \\ V_{fc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{Sa} \\ V_{Sb} \\ V_{Sc} \end{bmatrix} + L_f \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{fa} \\ I_{fb} \\ I_{fc} \end{bmatrix}$$

Les tensions du réseau étant supposées équilibrées, et sachant que la somme des courants injectés par l'onduleur est nulle, nous pouvons écrire :

$$\begin{cases} V_{Sa} + V_{Sb} + V_{Sc} = 0 \\ I_{fa} + I_{fb} + I_{fc} = 0 \end{cases}$$

A partir des équations (III.5) et (III.6), nous pouvons déduire que :

$$V_{fa} + V_{fb} + V_{fc} = 0$$

En remplaçant l'équation (III.7) dans l'équation (III.4), nous obtenons :

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

Ainsi, nous pouvons exprimer huit cas de tensions possibles en sortie du filtre actif. Toutes les possibilités sont résumées dans le tableau III.1.

Numéro du cas	S_a	S_b	S_c	V_{fa}	V_{fb}	V_{fc}
0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	$\frac{2V_{dc}}{3}$	$\frac{-V_{dc}}{3}$	$\frac{-V_{dc}}{3}$
2	0	1	0	$\frac{-V_{dc}}{3}$	$\frac{2V_{dc}}{3}$	$\frac{-V_{dc}}{3}$
3	1	1	0	$\frac{V_{dc}}{3}$	$\frac{V_{dc}}{3}$	$\frac{-2V_{dc}}{3}$
4	0	0	1	$\frac{-V_{dc}}{3}$	$\frac{-V_{dc}}{3}$	$\frac{2V_{dc}}{3}$
5	1	0	1	$\frac{V_{dc}}{3}$	$\frac{-2V_{dc}}{3}$	$\frac{V_{dc}}{3}$
6	0	1	1	$\frac{-2V_{dc}}{3}$	$\frac{V_{dc}}{3}$	$\frac{V_{dc}}{3}$
7	1	1	1	0	0	0

Tableau III.1 : Tensions en sortie de l'onduleur

Chapitre III : Amélioration de la qualité d'énergie par la mise en oeuvre d'un filtre actif parallèle.

III.2.2. Le filtre de sortie :

Le rôle du filtre de sortie, ou filtre de découplage, est de connecter l'onduleur de tension au réseau électrique. Bien qu'il limite la dynamique du courant, ce filtre réduit également la propagation des composantes dues aux commutations sur le réseau électrique.

III.2.3. L'élément de stockage

Le stockage de l'énergie du côté continu est souvent réalisé par un système de stockage capacitif représenté par un condensateur (C_{dc}), qui joue le rôle d'une source de tension continue (V_{dc}). Le choix des paramètres de ce système de stockage, à savoir C_{dc} et V_{dc} , influence directement la dynamique et la qualité de compensation du filtre actif parallèle. En effet, une tension élevée (V_{dc}) améliore la dynamique du filtre actif. Cependant, les ondulations de la tension continue (V_{dc}), causées par les courants générés par le filtre actif et limitées par la valeur de C_{dc} , peuvent nuire à la qualité de compensation du filtre actif parallèle. Ces fluctuations deviennent plus importantes lorsque l'amplitude du courant du filtre est élevée et que sa fréquence est basse.

III.3. Partie commande du filtre actif parallèle

Dans cette partie, nous avons utilisé la commande par hystérésis, car elle offre des meilleures performances de compensation statiques et dynamiques. Le principe de la commande des interrupteurs par hystérésis est montré dans la figure III.2.

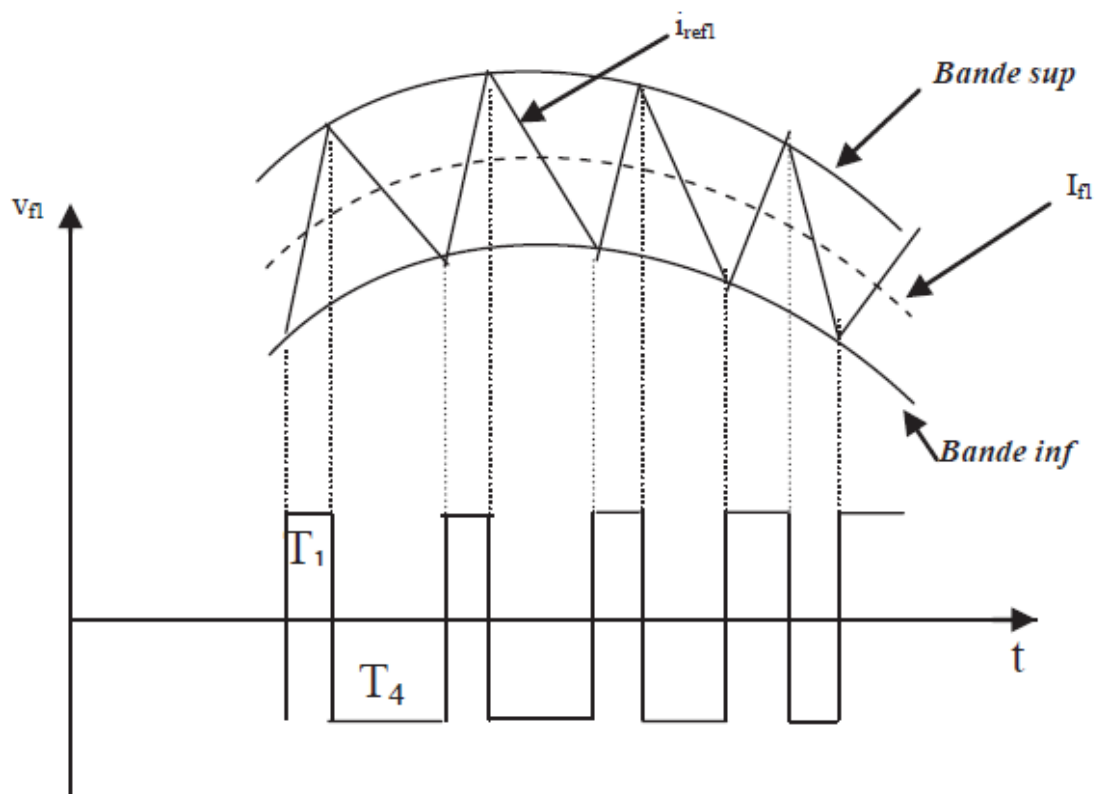


Figure III.2 : Principe de la commande des interrupteurs par hystérésis

La commande par hystérésis, à la fois simple et originale, permet de contrôler un convertisseur en maîtrisant indirectement sa fréquence moyenne de commutation. Cette commande repose sur la connaissance de l'état du convertisseur et sur l'application de règles de commutation faciles à mettre en œuvre.

Chapitre III : Amélioration de la qualité d'énergie par la mise en oeuvre d'un filtre actif parallèle.

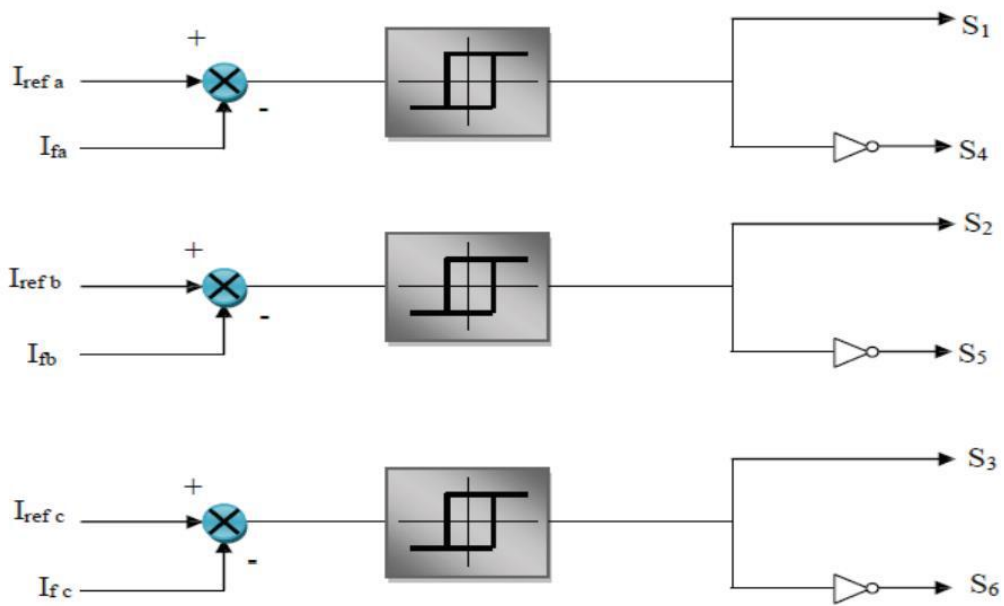


Figure III.3 : Modèle simplifié d'un contrôleur de bande d'hystérésis

Cette technique de contrôle appartient aux commandes non linéaires car elle fonctionne selon le principe du tout ou rien. Elle est bien connue pour ses nombreux avantages, notamment en termes de robustesse et de simplicité de mise en œuvre. Elle offre un temps de réponse rapide en régime dynamique, ainsi qu'une stabilité et une précision satisfaisantes, tout en limitant automatiquement le courant. Le seul paramètre de régulation dans cette commande est la largeur de la bande d'hystérésis, qui détermine l'erreur sur les courants et la fréquence de commutation, bien que cette dernière reste inconnue et variable. La régulation par bande d'hystérésis est l'une des méthodes les plus appropriées pour diverses applications d'onduleurs contrôlés en courant, telles que les entraînements électriques et les filtres actifs.

III.4. Résultats de simulation

Dans cette section, nous allons présenter les résultats de simulation de la décontamination de la pollution harmonique d'un réseau électrique par utilisation d'un filtre actif parallèle à base d'un onduleur de tension commandé par la méthode des puissances instantanées réelles et imaginaires (PIRI).

Chapitre III : Amélioration de la qualité d'énergie par la mise en oeuvre d'un filtre actif parallèle.

Les paramètres de simulation sont rassemblés dans les tableaux III.2, III.3 et III.4.

Parmètre	$V_s(V)$	$f(HZ)$	$R_s(\Omega)$	$L_s(H)$
Valeur	220	50	0.001	0.01

Tableau III.2 : Paramètres du réseau d'alimentation

Parmètre	$R_d(\Omega)$	$L_d(H)$
Valeur	20	0.006

Tableau III.3 : Paramètres de la charge non-linéaire

Parmètre	$L_f(H)$	$R_f(\Omega)$	$V_{dc}(V)$	$C_{dc}(F)$
Valeur	0.001	0.001	500	0.3

Tableau III.4 : Paramètres du filtre actif parallèle

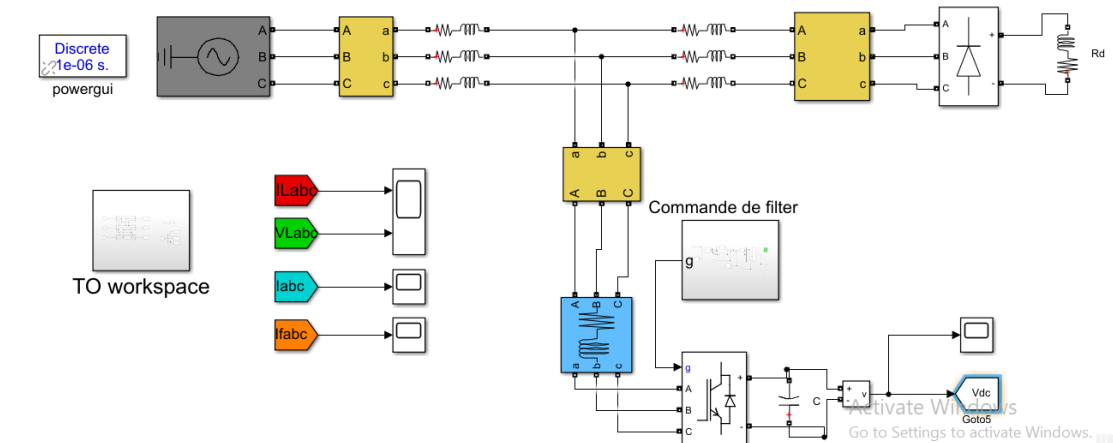


Figure III.4 : Modèle de simulation établi sous Matlab/Simulink après insertion du filtre actif parallèle.

Les figures III.5, III.6 et III.7 exposent les formes d'onde des courants de la source, de la charge et du filtre actif parallèle pour les trois phases « a », « b » et « c ».

Chapitre III : Amélioration de la qualité d'énergie par la mise en oeuvre d'un filtre actif parallèle.

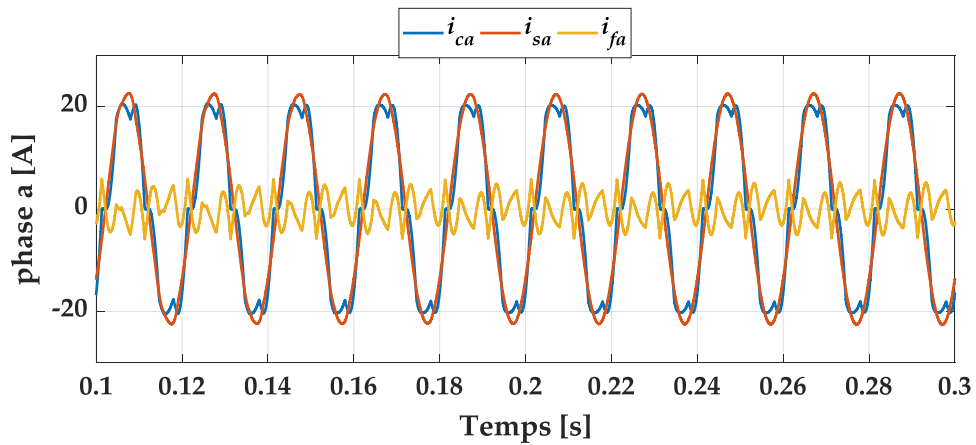


Figure III.5 : Formes d'onde des courants de la source, de la charge et du filtre actif parallèle pour la phase (a).

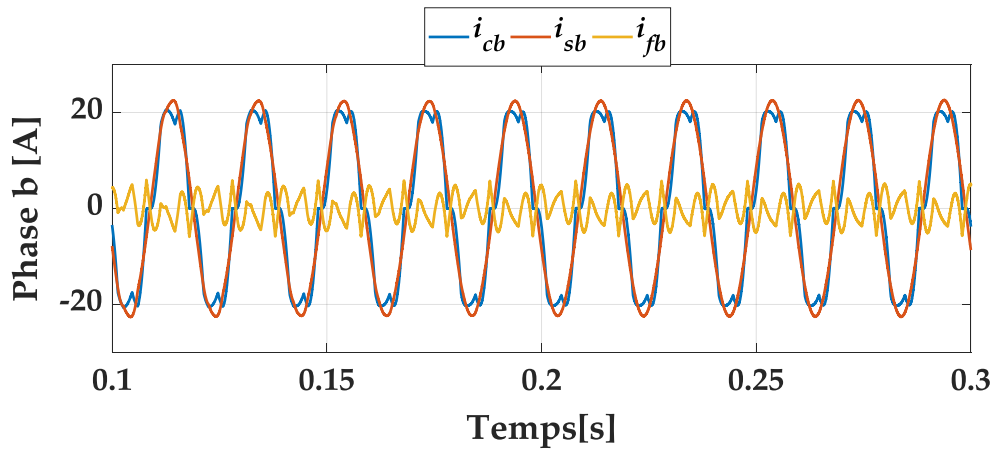
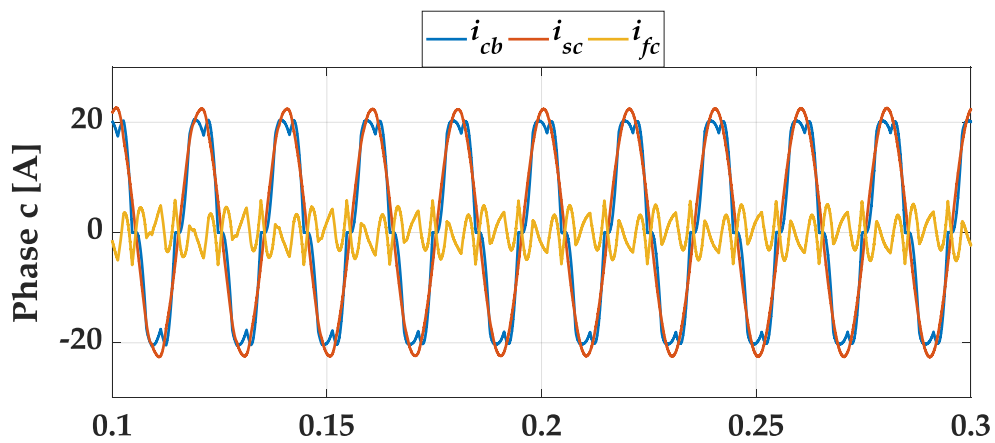


Figure III.6 : Formes d'onde des courants de la source, de la charge et du filtre actif parallèle pour la phase (b).



Chapitre III : Amélioration de la qualité d'énergie par la mise en oeuvre d'un filtre actif parallèle.

Figure III.7 : Formes d'onde des courants de la source, de la charge et du filtre actif parallèle pour la phase (c).

Après injection, dans le réseau, du courant de référence (obtenu par la méthode des puissances instantanées réelles et imaginaires (PIRI), voir chapitre II) produit par le filtre actif, nous pouvons constater que le courant de la source est désormais sinusoïdal et exempt de toutes perturbations harmoniques. En fait, le courant de la source récupère son allure sinusoïdale, si l'onduleur avait injecté un courant qui suit sa référence. Dans ce cas, nous obtenons un courant de source triphasé sinusoïdale.

Les figures III.8, III.9 et III.10 présentent l'analyse spectrale du courant de la source effectuée sur les trois phases après filtrage.

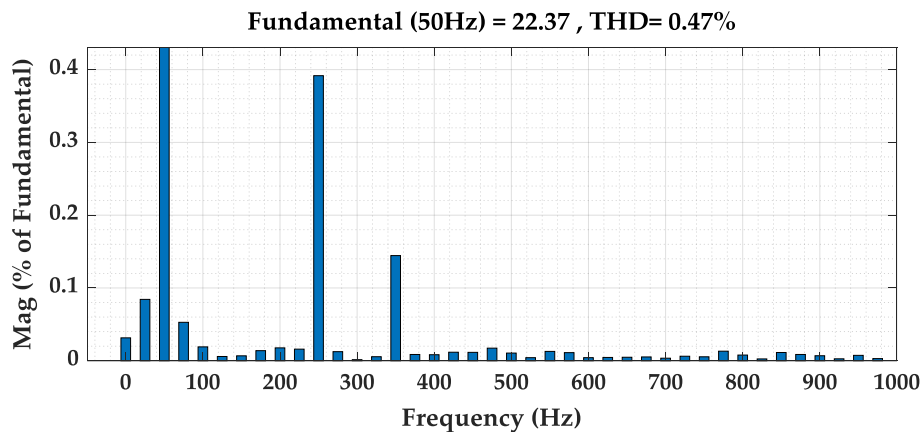


Figure III.8 : Spectre harmonique du courant de la source (phase (a)) après filtrage.

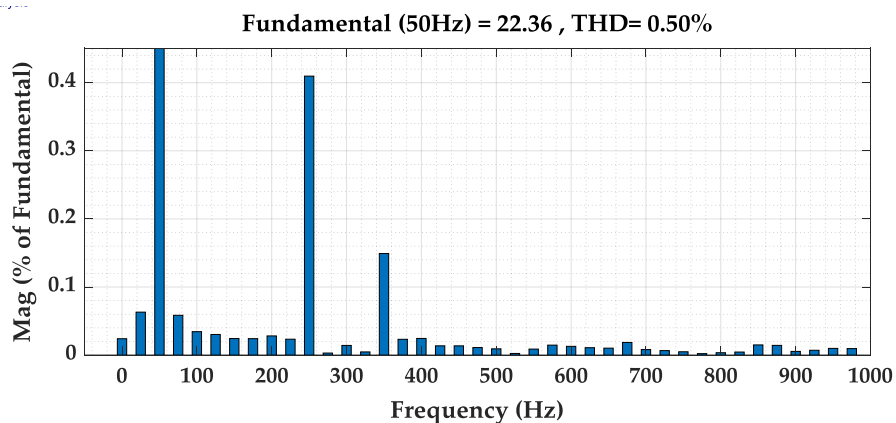


Figure III.9 : Spectre harmonique du courant de la source (phase (b)) après filtrage.

Chapitre III : Amélioration de la qualité d'énergie par la mise en oeuvre d'un filtre actif parallèle.

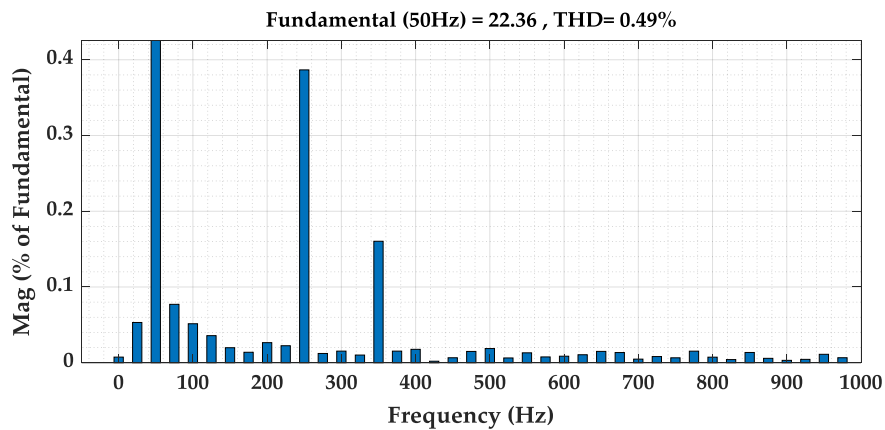


Figure III.10 : Spectre harmonique du courant de la source (phase (c)) après filtrage

Les représentations spectrales montrées dans les figures III.8, III.9 et III.10 confirment la réduction des harmoniques dans les courants de la source. En fait, le THD passe de **21.61%**, **21.61%** et **21.62%** avant filtrage, à **0.47%**, **0.50%** et **0.49%** après filtrage, confirment, ainsi, la bonne stratégie suivie pour le filtrage des harmoniques.

Le tableau III.5 résume les THD avant et après filtrage des harmoniques.

	THD(%)	
	Avant filtrage	Après filtrage
Phase(a)	21.61	0.47
Phase (b)	21.61	0.50
Phase (c)	21.62	0.49

Tableau III.5 : THD avant et après filtrage des harmoniques.

III.5. Conclusion

Dans ce chapitre, un filtre actif parallèle utilisant un onduleur de tension est mis en oeuvre pour minimiser le contenu harmonique des courants de la source. Les différents taux de distorsion harmonique totale (THD) obtenus avant et après le filtrage confirment :

Chapitre III : Amélioration de la qualité d'énergie par la mise en oeuvre d'un filtre actif parallèle.

- ✚ L'importance des méthodes adoptées, telles que la méthode des PIRI dans notre cas, pour l'identification des courants harmoniques de référence.
- ✚ L'efficacité de la stratégie de commande de l'onduleur en injectant ces mêmes courants de référence.

Conclusion générale

Conclusion générale

La présence de charges non linéaires provoque l'injection d'une grande quantité d'harmoniques dans les réseaux de distribution électrique. Ces harmoniques causent une distorsion de la forme du courant de la source, et peuvent même créer une déformation de la forme de la tension lorsque ce courant circule dans l'impédance de la source, entraînant ainsi des effets néfastes.

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre de la proposition d'une solution moderne, basée sur l'électronique de puissance, pour remédier au problème de la pollution harmonique des réseaux électriques et donc améliorer leur qualité de l'énergie : il s'agit du "filtrage actif".

Pour atteindre les objectifs fixés, un filtre actif parallèle (pour le filtrage des courants) basé sur un onduleur de tension à deux niveaux contrôlé par hystérésis a été utilisé.

Afin d'évaluer la capacité du filtre à améliorer la qualité de l'énergie du réseau électrique proposé, nous avons suivi deux démarches principales :

- 1. Détection des courants harmoniques :** pour cette étape, nous avons choisi la méthode des puissances instantanées réelles et imaginaires (PIRI) car elle donne directement la forme de l'onde harmonique à compenser, et possède une réponse adéquate pour le suivi des harmoniques variant dans le temps.
- 2. Calcul des taux de distorsion harmonique (THD).** Les différents résultats obtenus confirment l'efficacité du filtre introduit en diminuant les valeurs des THD avant filtrage par rapport à celles après filtrage.

Références et Bibliographique

Références et Bibliographique

- [1] A. BOUSSAID, « *Filtrage actif des harmoniques dans les réseaux électriques. Contribution à l'amélioration de l'énergie électrique* », Thèse de Doctorat, Université de Constantine, 2017.
- [2] V. Ignatova, « *Méthodes d'analyse de la qualité de l'énergie électrique Application aux creux de tension et à la pollution harmonique* », Thèse de Doctorat, Université de Grenoble, 2006.
- [3] Z. Chelli, « *Amélioration de la qualité de l'énergie électrique par un filtre actif d'harmonique* », Thèse de Doctorat, Université de Annaba, 2015.
- [4] B. Gattal, « *Méthodes d'analyse des perturbations électriques dans la qualité de l'énergie électrique en utilisant des nouvelles techniques pour l'application aux creux de tension* », Mémoire de Magister, Université de Batna, 2012.
- [5] E. BETTEGA et J.-N. FIORINA, « *Cahier technique n°183 : Harmoniques : convertisseurs propres et compensateurs actifs* », Rapport technique, Schneider Electric, Janvier 2000.
- [6] COLLOMBET, C., LUPIN, J. M., et SCHONEK, J, « *Perturbations harmoniques dans les réseaux pollués et leur traitement* », Cahier technique n°152, Schneider Electric, 1999.
- [7] D. Nekkar, « *Contribution à l'étude des Stratégies de Commande des Filtres Actifs Triphasés* », Thèse de Magister, Université de Souk Ahras, 2014.
- [8] A. Arora, « *Solutions innovatrices pour l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique* », Revue Qualité De L'énergie Electrique ABB 3/1998.
- [9] Mohamad Alaa Eddin Alali, « *Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension* », Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur–Strasbourg I, 2002.
- [10] F. Defaÿ, « *Commande prédictive directe d'un convertisseur multicellulaire triphasé pour une application de filtrage actif* », Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, 2008.
- [11] T. GOURAUD, « *Identification et rejet de perturbations harmoniques dans des réseaux de distribution électrique* », Thèse de Doctorat, Université de Nantes, 1997.
- [12] M.A.E. Alali, « *Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension* », Thèse de Doctorat, Université Strasbourg I, 2002.
- [13] H. Kouara, « *Application d'un filtre actif série au contrôle de la tension d'un réseau basse tension* », Mémoire de Magister, Université de Batna, 2006.
- [14] C. Tan Perng, « *A single-phase hybrid active power filters with photovoltaic application* », Thèse de Master en Génie Electrique, Université de Technologie, Malaysia, 2006.

- [15] SANAE Rechka, « *Étude de méthodes de filtrage des harmoniques dans les réseaux électriques de distribution* », Thèse présentée comme exigence partielle pour l'obtention d'un diplôme de maître des sciences appliquée en génie électrique, Avril 2002.
- [16] A. Bouafia, « *Techniques de Commande Prédictive et Floue pour les Systèmes d'Electronique de Puissance : Application aux Redresseurs à MLI* », Thèse de Doctorat en sciences, Université Ferhat Abbas, Sétif, Algérie, 2010.
- [17] Q. Chen, Z. Chen and M. McCormick, « *The application and optimization of C type filterin a combined harmonic power filter* », 35th Annual IEEE, Power Electronics Specialists Conference, Aachen, Germany, 2004.
- [18] Opal-RT Technologies Inc., RT-LAB v7.0 User's Manual, April 2004.
- [19] N. Bruyant, « *Etude et commande généralisées de filtres actifs parallèles* », Thèse de Doctorat, Université de Nantes, Nantes, 1999.
- [19] Q. Chen, Z. Chen and M. McCormick, « *The application and optimization of C type filterin a combined harmonic power filter* », 35th Annual IEEE, Power Electronics Specialists Conference, Aachen, Germany, 2004.
- [20] STEEVE BEAULIEU, « *Etude et mise au point d'un filtre actif d'harmoniques en vue d'améliorer la qualité de l'alimentation électrique* », Mémoire présenté comme exigence partielle de la maîtrise en Ingénierie, Université du Québec à Chicoutimi, Mai 2007.
- [21] J. Arrillaga, N. R Watson, « *Power system quality assessment* », Nanyang Technological University Singapore, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, S Chen, 1985.
- [22] Cedric JOIN, « *Diagnostic des systèmes non linéaires-Contribution aux méthodes de découplage* », Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré-Nancy I, 2002.
- [23] ABDESLAM, D. Ould, WIRA, Patrice, MERCKLÉ, Jean, *et al.* « *Stratégie neuromimétique d'identification et de commande d'un filtre actif parallèle* », Revue Internationale du Génie Electrique, p. 35-64, 2006.
- [24] JOSEPH, Deepthi, KALAIARASI, N., and RAJAN, K, « *A Novel Reference Current Generation Algorithm for Three Phase Shunt Active Power Filter* », In: Power Electronics and Renewable Energy Systems, Springer India, p. 1467-1475, 2015.
- [25] Le Moigne, Philippe, Philippe Delarue, and Sophie Fernandez, « *Modulation par hystérésis de courant à mémoire d'état d'un onduleur triphasé deux niveaux-comportement électrique* », 2014.