



République Algérienne démocratique populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la
recherche scientifique



Université El chahid El cheikh Laarbi Tebessi Tébessa

Faculté de technologie

Département : Génie Électrique

MEMOIRE

Présenter pour l'obtention du diplôme de Master Académique

Spécialité : Electrotechnique Industriel

Commande d'ordre fractionnaire d'un Filtre actif parallèle

Réalisées par :

ROUBA Imene

ZERMAT Nour El Houda

Encadré par :

Dr. METATLA Samir

Présenté et soutenu publiquement, le: **06 Juin 2023**

Devant le jury composé de:

Dr. BOUGUERNE Abla

MCA

Présidente

Dr. DJABBAR Med Salah

MCB

Examineur

Dr. METATLA Samir

MCB

Encadreur

Année universitaire : 2022/2023

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remercîments

*Nous tenons à exprimer nos remerciement et nôtres profondes gratitudes avant tout à **ALLAH** le tout puissant pour la volonté, la santé, le courage et la patience, qu'il nous a donné durant toutes ces longues années.*

A ceux qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

*Je saisi cette occasion pour remercier tout le monde particulièrement monsieur **Samir Metatla** d'avoir accepté de m'encadré et pour ses conseils précieuses et le soutien affectif dont j'ai bénéficié tout au long de la période d'élaboration de ce mémoire.*

Ensuite, on tient nous tenons à remercier vivement et du fond du cœur toute les personnes ayant apporté leur aides et contribué à notre formation.

Nous remercions aussi tous les professeurs sans exception.

Nous tenons à remercier les membres de jurys pour l'intérêt qu'il a manifesté pour notre travail.

En fin, nous tenons à remercier vivement toutes personnes qui nous ont aidés à élaborer et réaliser ce mémoire, ainsi à tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin à accomplir ce travail.

Nos respects.

Dédicace

Je tiens à dédier ce travail à :

*À mon père **Nawi**.*

*À ma chère mère **Wanasa**.*

Qu'ils trouvent en moi la source de leur fierté.

À qui je dois tout.

À mes frères et sœurs.

Housseem et Atef et Sameh et Malika.

*Mon binôme **Zermat Nour Elhouda**.*

*À tous mes **familles**.*

*Mes amies proches : **Abla, Sabah, Abir**.*

*À tous mes **amis**.*

*Mes professeures qui doivent voir dans ce travail la fierté d'un savoir
bien acquis.*

*Et en fin tous ceux qui m'ont aidé et soutenu de près ou de loin durant
l'élaboration de ce travail.*

Imene

Dédicace

Je tiens à dédier ce travail à :

Mes chers parents.

*Mon père **Ibrahim**, qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie. Puisse dieu faire en sorte que ce travail porte son fruit, merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de toi.*

*Ma mère **Hadda**, qui oeuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude.*

*Mes frères et sœurs: **Abd El Rahim** رحمه الله, **Khawla**, **Sonia**, **Mahdi**.
Qui n'ont cessé d'être pour moi des exemples de persévérance, de courage et générosité.*

*Mon binôme: **Rouba Imene**.*

A tout ma famille sans exception.

Mes amies proches : meilleur amie Malak, Safa, Chaima, Moufida, Salima, Nour hane, Fadwa. Qui n'ont cessé de m'encourager et m'aider à mon travail.

Houda

Abstract :

The electrical energy is supplied as a purely sinusoidal current, but nowadays, and because of the development of the electronics equipment that disturbance in the quality of electrical energy this condition is not verified to solve this. Problem our work will be devoted to the reduction of harmonic currents in the electrical network by simulating the injection of a parallel active filter voltage in the network using the software Simulink-MATLAB and using the method of the powers PQ snapshots and for control of PAF using fractional order control (PI^λ fractional)..

Keywords : active filters, parallel actives, reactive powers, harmonics, classic PI, fractional PI^λ .

Résumer :

L'énergie électrique est fournie sous forme de courant purement sinusoidal, mais matériel d'électronique provoque des harmonique dans le réseau, pour résoudre ce problème notre travail sera consacré à la réduction des courants harmonique dans le réseau électrique en simulant l'injection d'un filtre actif parallèle de tension dans le réseau à l'aide du logiciel Simulink-MATLAB et en utilisant la méthode des puissances instantanés P-Q et pour la commande du FAP en utilisant la commande d'ordre fractionnaire (PI^λ fractionnaire).

Les mots clés : filtres actifs, filtres actifs parallèles, puissance réactive, les harmoniques, PI classique, PI^λ fractionnaire.

ملخص :

يتم توفير الطاقة الكهربائية على شكل تيار جيبي بحت، ولكن في الوقت الحاضر و بسبب تطور المعدات الالكترونية التي تسبب اضطرابات في جودة الطاقة الكهربائية، لحل هذه المشكلة سيخصص عملنا لتقليل التيارات التوافقية في الشبكة الكهربائية، عن طريق محاكاة حقن جهد نشط مواز التصفية في الشبكة باستخدام برنامج المحاكاة Simulink-MATLAB، و استخدام طريقة PQ، و للتحكم في FAP باستخدام التحكم في الترتيب الكسري PI^λ .

الكلمات الرئيسية : المرشحات النشطة، المرشحات النشطة المتوازية، القدرة التفاعلية، التوافقيات، PI الكلاسيكية، PI^λ .

Résumé

Introduction générale..... 1

Chapitre I : Perturbations des réseaux électriques ; leurs provenances et conséquences

I 1 Introduction 5

I 2 Types et origine des perturbations 5

I 2 1 Perturbations liés aux fluctuations de la fréquence 6

I 2 2 Perturbations liés à l'amplitude des trois tensions..... 6

I 2 2 1 Creux de tension 6

I 2 2 2 Coupures de tension 6

I 2 2 3 Fluctuations de tension 7

I 2 2 4 Surtension. 7

I 2 3 Perturbations liés à la symétrie du système triphasé 8

I 2 4 Perturbation lié à la forme d'onde des trois tensions..... 8

I 2 4 1 Harmoniques 8

I 3 Conclusion..... 18

Chapitre II : Dépollution des réseaux électriques

II 1 Introduction..... 20

II 2 Les solutions traditionnelles..... 20

II 2 1 Solutions de dépollution des courants harmoniques 20

Table des matières

II 2 1 1 Surdimensionnement ou déclassement de l'installation électrique...	20
II 2 1 2 Transformateurs spéciaux	21
II 2 1 3 Inductances séries.....	24
II 2 1 4 Filtrage passif	26
II 2 2 Solutions de dépollution des tensions.....	29
II 3 Solutions modernes	29
II 3 1 Le filtre actif série.....	30
II 3 2 Le filtre actif parallèle	30
II 3 3 Le filtre actif universel	31
II 4 Comparatif et choix du filtrage actif parallèle.....	32
II 5 Conclusion.....	34
Chapitre III. Etude, dimensionnement et régulation d'un filtre actif parallèle à deux niveaux	
III 1 Introduction.....	36
III 2 Point de raccordement	36
III 3 Rôle du filtre actif	37
III 4 Structure générale d'un filtre actif parallèle	38
III 4 1 Etude de la partie puissance	39
III 4 1 1 Onduleur de tension triphasé à deux niveaux	39
III 4 1 2 Système de stockage de l'énergie	41
III 4 1 3 Filtre de sortie	42

Table des matières

III 4 2 Etude de la partie commande	42
III 5 Simulation numérique sous Matlab Simulink	51
III 5 1 Résultats de simulation et interprétation sans filtrage	52
III 5 2 Simulation de l'ensemble réseau-filtre actif (commande d'ordre entier)- charge polluante	54
III 6 Conclusion	62
 Chapitre IV : La commande d'ordre fractionnaire d'un FAP à deux niveaux	
IV.1. Introduction.....	64
IV 2 Commande d'ordre fractionnaire	64
IV 3 Régulateur d'ordre fractionnaire $[[PI]]^{\lambda} D^{\mu}$	64
IV 4 Simulation numérique sous Matlab Simulink.....	66
IV 5 Conclusion	69
Conclusion Générale.....	71
Bibliographie.....	73

Liste des tableaux

Tableaux	Titres	N°
Tableau I.1	Limite des composantes harmoniques en courant (norme CEI 61000-3-2).	17
Tableau II.1	Récapitulatif des solutions de dépollution.	33
Tableau III.1	Tensions à la sortie de l'onduleur.	41
Tableau III.2	Modes de compensation de la commande des puissances instantanées.	45
Tableau III.3	Critères et définition d'une bonne qualité de régulation.	46
Tableau III.4	Amplitudes des harmoniques avant et après le filtrage.	61
Tableau IV.1	Amplitudes des harmoniques avant et après le filtrage ($\lambda=1$, $\lambda=1.85$).	68
Tableau IV.2	Performances statiques et dynamiques d'un système de compensation avec différents régulateurs.	68

Liste des figures

Figures	Titres	N°
Figure I.1	Variation de fréquence [3].	6
Figure I.2	Perturbations liés à l'amplitude des tensions [3].	7
Figure I.3	Déséquilibre de tension [3].	8
Figure I.4	Perturbations harmoniques [3].	8
Figure I.5	Spectre harmonique [3].	8
Figure I.6	Courants de ligne pour une charge linéaire et son spectre Harmonique [3].	10
Figure I.7	Courants de ligne pour une charge non linéaire et son spectre Harmonique [3].	11
Figure I.8	Diagramme de Fresnel des puissances d'un signal sinusoïdal sans harmoniques.	11
Figure I.9	Diagramme de Fresnel des puissances en présence des harmoniques.	13
Figure II.1	Transformateur de mise à la terre branché au réseau.	21
Figure II.2	Courant de source sans et avec transformateur de mise à la terre.	21
Figure II.3	Spectre harmonique avant insertion du transformateur de mise à la terre.	22
Figure II.4	Spectre harmonique après insertion du transformateur de mise à la terre.	22
Figure II.5	Transformateur à couplage DY branché au réseau.	23
Figure II.6	Courant de source sans et avec transformateur à couplage DY.	23
Figure II.7	Spectre harmonique avant insertion du transformateur à couplage DY.	23
Figure II.8	Spectre harmonique après insertion du transformateur à couplage DY.	24
Figure II.9	Inductance de filtrage branché au réseau.	24
Figure II.10	Courant de source sans et avec inductance de filtrage.	25
Figure II.11	Spectre harmonique avant insertion de l'inductance de filtrage.	25
Figure II.12	Spectre harmonique après insertion de l'inductance de filtrage.	25
Figure II.13	Filtre résonant et amorti branché au réseau.	26
Figure II.14	Courant de source et spectre harmonique avant annulation des harmoniques.	27
Figure II.15	Courant de source et spectre harmonique après annulation de H5 et H7.	28
Figure II.16	Courant de source et spectre harmonique après insertion du filtre	28

Liste des figures

	amorti seul.	
Figure II.17	Courant de source et spectre harmonique après insertion du filtre résonant et amorti.	29
Figure II.18	Filtre actif série.	30
Figure II.19	Filtre actif parallèle.	31
Figure II.20	Combinaison des filtres actifs série et parallèle.	32
Figure III.1	Raccordement d'un filtre actif parallèle.	36
Figure III.2	Schéma de principe du filtre actif parallèle.	37
Figure III.3	Structure générale du filtre actif parallèle.	38
Figure III.4	Onduleur de tension.	39
Figure III.5	Interrupteurs de puissance.	39
Figure III.6	Schéma représentant le principe de séparation des puissances.	45
Figure III.7	Boucle de régulation de la tension du bus continue avec I_{dc} .	48
Figure III.8	Boucle de régulation de la tension du bus continue avec P_{dc} .	49
Figure III.9	Principe de commande par hystérésis [21].	50
Figure III.10	Principe de commande des courants par MLI [21].	51
Figure III.11	Schéma du système sans filtrage.	52
Figure III.12	Tension de source V_{sabc} .	52
Figure III.13	Courant de source i_{sabc} .	53
Figure III.14	Tension de charge V_{chabc} .	53
Figure III.15	Courant de charge i_{chabc} .	53
Figure III.16	Courant de source de la phase a i_{sa} et son Spectre harmonique.	54
Figure III.17	Réseau électrique alimente une charge non linéaire avec FAP à commande par hystérésis.	55
Figure III.18	La méthode d'identification des puissances instantanées pq.	55
Figure III.19	Tension de source après transformée de concordia.	56
Figure III.20	Courant de charge après transformé de concordia.	56
Figure III.21	Puissance réelle instantanée.	56
Figure III.22	Puissance imaginaire instantanée.	57
Figure III.23	Puissance réelle oscillatoire.	57
Figure III.24	Puissance imaginaire oscillatoire.	57
Figure III.25	Courant de référence biphasé.	58
Figure III.26	Courant de référence triphasé.	58

Liste des figures

Figure III.27	Méthode pq et comparateur a hystérésis.	58
Figure III.28	Courant injecté par le FAP triphasé.	59
Figure III.29	Courants de référence irefa et injecté par le FAP ifa.	59
Figure III.30	Tension aux bornes de condensateur et tension de référence Vdc et Vdcref.	59
Figure III.31	Puissance à la sortie de régulateur PI.	60
Figure III.32	Courant de charge et courant injecté par le FAP et de source après filtrage.	60
Figure III.33	Courant de source triphasé après filtrage.	60
Figure III.34	Courant de source isa après filtrage et son spectre harmonique.	61
Figure IV.1	Disposition du régulateur $PI^\lambda D^\mu$ dans le plan (λ, μ) .	65
Figure IV.2	Boucle de régulation de la tension du bus continue par un régulateur FO-PI.	66
Figure IV.3	Réseau électrique alimente une charge non linéaire avec FAP à commande par hystérésis ordre fractionnaire $\lambda=1.85$.	66
Figure IV.4	Tension aux bornes de condensateur PI et PI fractionnaire et tension de référence Vdc et Vdcref.	67
Figure IV.5	Courant de source de la phase à isa et son Spectre harmonique.	67

Liste des symboles :

<i>a, an, bn</i>	Les coefficients de fourrier.
<i>C</i>	Capacité.
<i>D</i>	La puissance déformante due aux harmoniques du courant.
<i>F</i>	Fréquence.
<i>h</i>	Rang de l'harmonique.
<i>fp</i>	Fréquence du la porteuse.
<i>fr</i>	Fréquence du signal de référence sinusoïdal.
<i>ic1(t), ic2(t), ic3(t)</i>	Les courants de ligne d'un système triphasé.
<i>ich</i>	Courant de la charge polluante.
<i>if</i>	Courant de filtre.
<i>ih</i>	Compensent harmonique.
<i>iinj</i>	Courant injectée par FAP.
<i>is</i>	Courant de la source.
<i>iref</i>	Le courant référence.
<i>irefa, irefb, irefc</i>	Les courants de référence triphasés.
i_{fK}^{ref}	Les courants harmoniques triphasés.
$i_{f\alpha}^{ref}, i_{f\beta}^{ref}$	Les courants diphasés par la transformation inverse de Concordia.
<i>Ki</i>	Le gain d'intégral.
<i>Kp</i>	Le gain proportionnel.
<i>L</i>	L'inductance.
<i>m</i>	L'indice de modulation.
<i>P</i>	Puissance active.
<i>p</i>	Les puissances instantanées réelles.
\bar{p}, \bar{q}	Les composantes continues de p et q.
\tilde{p}, \tilde{q}	Les composantes oscillatoires de p et q.
<i>Q</i>	La puissance réactive.
<i>q</i>	Les puissances instantanées imaginaires.
<i>r</i>	Le coefficient de réglage.
<i>R</i>	La résistance.

Symboles et Acronymes

R_c, L_c	L'impédance de couplage.
R_{ch}, L_{ch}	L'impédance de la charge.
R_f, L_f	L'impédance de filtre.
R_s, L_s	L'impédance de la source.
S	Puissance apparente.
S	Opérateur de Laplace égale à $j\omega$.
S_{123}	Etats des interrupteurs de l'onduleur.
t	Le temps.
V	Tension de source.
V_{ao}, V_{bo}, V_{co}	Les tensions triphasées de sortie par rapport à la référence de la source continue «0».
V_{dc}	Tension à la borne de condensateur.
v_{dcref}	La tension de référence.
$vs(t), vs2(t), vs3(t)$	Les tensions simples de la source.
ω	Pulsation du réseau.
ω_n	Fréquence propre du filtre.
x_1	La composante fondamentale.
x_h	La composante harmonique de rang h.
\emptyset	Le déphasage entre le courant fondamental et la tension.
ξ	Le coefficient d'amortissement.
μ	L'ordre d'intégration.
λ	L'ordre de différentiation.

Liste des acronymes :

FAP	F iltre A ctif de P uissance.
FAS	F iltre A ctif S érie.
FFT	T ransforme de F ourrier rapide.
FO-PI	F ractional O rdre P roportional I ntegral controller.
FPP	F iltre P assif P arallèle.
IGBT	I nsulated G ate B ipolar T ransistor.
MLI	M odulation de la L argeur d' I mpulsions.
MLI-ST	M odulation de L argeur d' I mpulsion S inus- T riangle.
PI	P roportional I ntegral controller.
PID	P roportionel I ntégral D érivateur.
PLL	P hase L ocked L oop.
THD	T aux de D istorsions H armoniques.
THD_i	T aux de D istorsions H armoniques en C ourant.
THD_v	T aux de D istorsions H armoniques en T ension.
UPQC	U nified P ower Q uality C onditioner.

Introduction

générale

Depuis de nombreuses années, le fournisseur d'énergie électrique s'efforce d'en garantir la qualité. Les premiers efforts se sont portés sur la continuité de service afin de rendre toujours disponible l'accès à l'énergie chez l'utilisateur.

Aujourd'hui, les critères de qualité ont évolué avec le développement des équipements où l'électronique prend une place prépondérante dans les systèmes de commande et de contrôle et qui entraîne de plus en plus de problèmes de perturbations au niveau des réseaux électriques [3].

D'un côté, l'expansion de l'électronique de puissance et l'utilisation de plus en plus des équipements électroniques (redresseurs, gradateurs, cycloconvertisseurs, ordinateurs, radio, imprimantes, téléviseurs, etc) ont fait que le problème de la pollution des réseaux électriques par les harmoniques s'intensifie rapidement. On appelle ces équipements des charges non linéaires car ils absorbent des courants non sinusoïdaux, consomment de la puissance réactive et produisent une augmentation de pertes de puissance supplémentaires dans les lignes de transport [30].

En effet, le développement croissant des appareils générateurs d'harmoniques entraînera une hausse sensible des perturbations injectées par les clients. On s'attend à un dépassement de 50% à 150% des niveaux limités par les normes internationales d'ici quelques années si rien n'est réellement entrepris [30].

D'un autre côté, c'est grâce aux progrès réalisés ces dernières années dans le domaine de l'électronique de puissance que les convertisseurs statiques voient progressivement leur champ d'applications s'élargir. Il est possible de réduire la génération d'harmonique par l'utilisation de convertisseurs « propres » tels les redresseurs à prélèvement sinusoïdal. Mais dès lors que l'installation comporte déjà des convertisseurs de grande puissance polluants, le rajout d'une structure absorbant les harmoniques générés est mieux adapté, c'est ainsi qu'on fait appel aux filtres de puissance [5].

On distingue deux types de filtres, les filtres passifs qui sont beaucoup utilisés, mais qui présentent certains inconvénients du fait que les harmoniques couvrent un domaine fréquentiel large et fluctuant. En outre, ils peuvent présenter des risques d'apparition de résonance avec le réseau auquel ils sont connectés. Pour toutes ces raisons et des raisons d'encombrement, une autre solution de dépollution des réseaux électriques a été proposée, ce sont les filtres actifs [11].

Les filtres actifs plus souples et moins encombrants, sont basés essentiellement sur les onduleurs de tension commandés soit par hystérésis ou par la Modulation de Largeur d'Impulsion « MLI ». Leur principe, mathématiquement parlant, est la production et l'injection de courants ou tensions harmoniques d'égale amplitude et en opposition de phase avec les harmoniques produits par la charge non linéaire et que l'on désire compenser, ce qui permet de garder le courant du réseau sinusoïdal à tout instant. Physiquement, le filtre actif fait appel à la puissance active du réseau qu'il transforme en une puissance réactive appelée par la charge non linéaire [18].

L'onduleur joue le rôle d'interface entre source d'énergie électrique et consommateur. Il est constitué d'interrupteurs de puissance réalisant la connexion de ses nœuds d'entrée à ses nœuds de sortie, permettant ainsi d'y contrôler le transfert d'énergie. Lorsqu'il permet de commuter chaque entrée ou sortie entre deux niveaux de tension ou de courant, on parle alors d'onduleur à deux niveaux.

L'intérêt majeur de la commande d'ordre fractionnaire est l'amélioration ou l'optimisation des performances des systèmes.

L'objectif de notre travail est de modéliser un filtre actif parallèle à base de l'onduleur à deux niveaux, tout en réduisant le taux de distorsion harmonique, commandé par la technique par hystérésis. Dans le but d'améliorer le taux de distorsion totale du courant de source et rendre la forme des courants plus proche de la sinusoïde.

Ce mémoire est divisé en quatre chapitres comme suite :

Le premier chapitre du mémoire recense les perturbations qui peuvent apparaître dans les réseaux et expose leurs origines, leurs analyses et leurs conséquences ainsi que les normes visant à diminuer leurs proliférations.

Dans le second chapitre, nous présenterons les solutions de dépollution des réseaux électriques existantes, tant traditionnelles que modernes. L'utilisation du filtre actif parallèle a été retenue pour la suite de nos travaux.

Dans le troisième chapitre, nous présenterons le principe de fonctionnement du filtre actif parallèle de puissance, la structure générale du FAP, les différentes stratégies de commande de l'onduleur de tension et la régulation d'ordre entier par PI et la simulation par Simulink Matlab de système globale.

Introduction générale

Dans le quatrième chapitre, nous traiterons la commande d'ordre fractionnaire d'un filtre actif parallèle pour l'amélioration ou l'optimisation des performances des systèmes et leur simulation par Simulink Matlab.

Finalement, nous avons terminé ce mémoire par une conclusion générale.

Chapitre I

I.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. Cette tension subit généralement beaucoup de perturbations [1].

Dans ce chapitre nous allons tout d'abord voir les perturbations qui peuvent apparaître dans le réseau électrique et qui affectent les courants et les tensions comme les perturbations liés aux fluctuations de la fréquence, perturbations liés à l'amplitude des trois tensions, perturbations liés à la symétrie du système triphasé est perturbation lié à la forme d'onde des trois tensions, ainsi nous détaillerons les perturbations harmoniques sources, caractéristiques, effets... .

Finalement, nous exposerons les normes internationales imposées aux utilisateurs et les solutions de dépollution.

I.2 Types et origine des perturbations :

Les tensions d'un réseau électrique constituent un système alternatif triphasé, dont la fréquence (habituellement 50 Hz en Europe ou 60 Hz aux États Unis). Les paramètres caractéristiques d'un tel système sont [1] :

- La pulsation ou fréquence des trois tensions ;
- L'amplitude des tensions ;
- La symétrie du système triphasé (égalité des amplitudes et des déphasages entre les phases) ;
- La forme d'onde qui doit être la plus proche possible d'une sinusoïde des tensions.

Toute perturbation électrique se manifestant dans les tensions, les courants ou la fréquence et susceptible de causer une défaillance ou du dysfonctionnement des équipements électriques, est classifiée comme un problème de la qualité de l'onde, Toutefois, les problèmes les plus souvent rencontrés sont [1] :

- Perturbations liés aux fluctuations de la fréquence (variation de fréquence) ;
- Perturbations liés à l'amplitude des trois tensions (les creux, coupures, fluctuations de tension et surtension) ;
- Perturbations liés à la symétrie du système triphasé (les déséquilibres) ;

- Perturbation lié à la forme d'onde des trois tensions (les harmoniques).

I.2.1 Perturbations liés aux fluctuations de la fréquence (Variation de fréquence) :

Une variation sensible de la fréquence du réseau peut apparaître sur les réseaux des utilisateurs non interconnectés ou alimentés par une source thermique autonome, comme le montre la figure (I.1). Au niveau des réseaux de distribution ou de transport, cette variation de la fréquence est très rare et n'est présente que lors de circonstances exceptionnelles, comme dans le cas de certains défauts graves sur le réseau. Dans des conditions normales d'exploitation, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle $50 \text{ Hz} \pm 1\%$ [2].

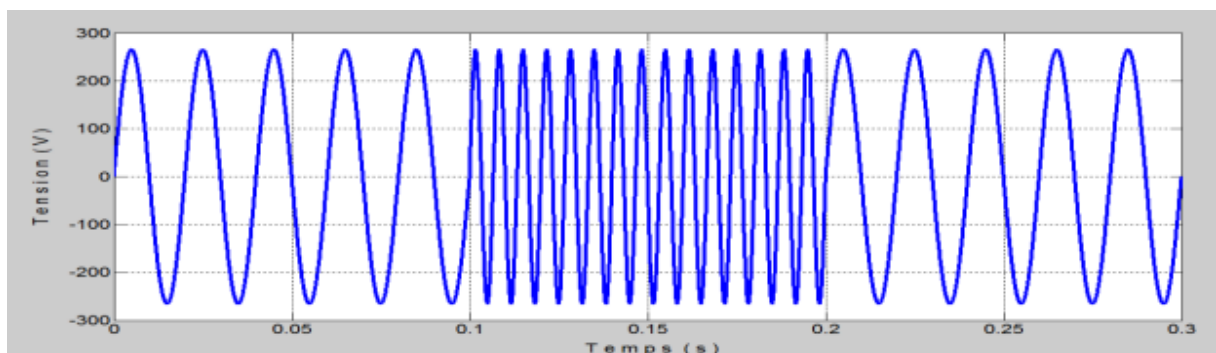


Figure I.1: Variation de fréquence [3].

I.2.2 Perturbations liés à l'amplitude des trois tensions :

I.2.2.1 Creux de tension :

Le creux de tension est une diminution brutale de la tension à une valeur située entre 10% et 90% de la tension nominale pendant une durée allant de 10 ms jusqu'à quelques secondes [4]. Les creux de tension sont produits par des courts-circuits survenant dans le réseau général. Ils sont aussi dus aux démarrages des grosses charges électriques comme les moteurs, les ascenseurs, l'éclairage, le chauffage. Ce phénomène provoque un mauvais fonctionnement des dispositifs de protection et des pannes intempestives [5].

I.2.2.2 Coupures de tension :

Une coupure de tension quant à elle est une diminution brutale de la tension à une valeur supérieure à 90 % de la tension nominale ou disparition totale pendant une durée généralement comprise entre 10 ms et une minute pour les coupures brèves et supérieure à

une minute pour les coupures longues. La plupart des appareils électriques admettent une coupure totale d'alimentation d'une durée inférieure à 10 ms [2].

I.2.2.3 Fluctuations de tension (Flicker, Papillotement de la tension) :

Les fluctuations de tension sont erratiques de l'enveloppe des variations périodiques ou de la tension. Ce sont des variations brutales de l'amplitude de la tension situées dans une bande de -10% à +10% et se produisent sur un intervalle de temps de quelques centièmes de secondes. Elles sont en particulier dues à la propagation sur les lignes du réseau de courants d'appel importants. L'origine principale de ces courants c'est le fonctionnement d'appareil dont la puissance absorbée varie de manière rapide, comme les fours à arc et des machines à souder. Ces fluctuations se traduisent par des variations d'intensité, visible au niveau de l'éclairage causant un gêne visuel perceptible pour une variation de 1% de la tension. Ce phénomène de papillotement est appelé flicker [4].

I.2.2.4 Surtension (Bosse de tension):

C'est une augmentation très brève de l'amplitude de la tension du réseau de 1,1 jusqu'à 1,8 de la tension nominale, elle se manifeste sous forme d'une bosse de tension qui peut provoquer l'échauffement des conducteurs et mène parfois à la destruction des équipements électriques. Souvent provoquée par des phénomènes d'origine atmosphérique telle que la foudre et au moment des déclenchements de charges importantes [3].

La figure (I.2) montre un exemple de creux, coupure, fluctuation de tension et surtension.

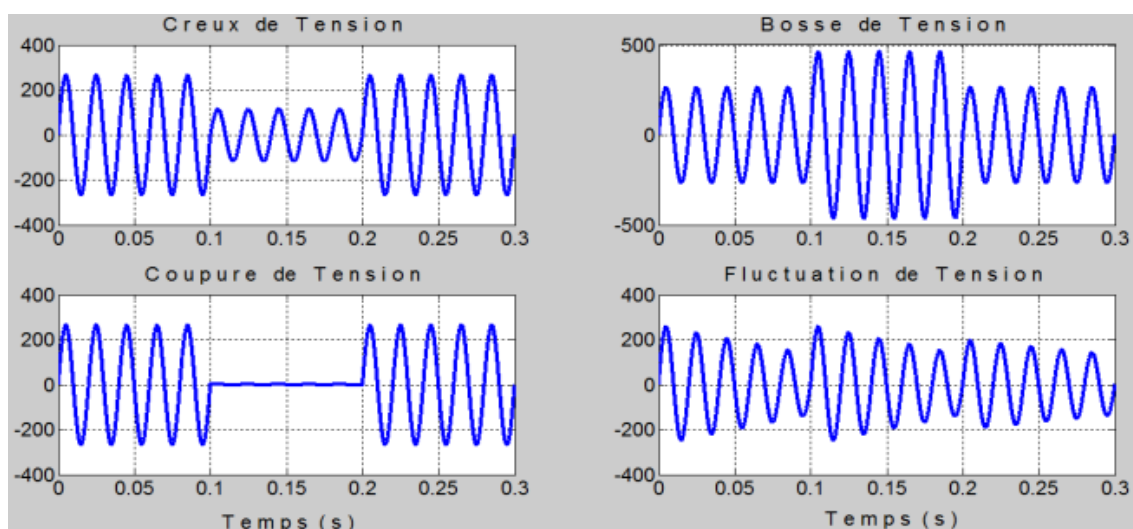


Figure I.2: Perturbations liés à l'amplitude des tensions [3].

I.2.3 Perturbations liés à la symétrie du système triphasé (Déséquilibre du système Triphasé) :

Un système d'alimentation triphasé est dit équilibré lorsque les tensions et les courants triphasés ont la même amplitude et sont déphasés de 120° l'un par rapport à l'autre. C'est l'un de ces deux conditions n'est pas vérifié on dit que le système est un système déséquilibré [6]. Comme le montre la figure (I.3).

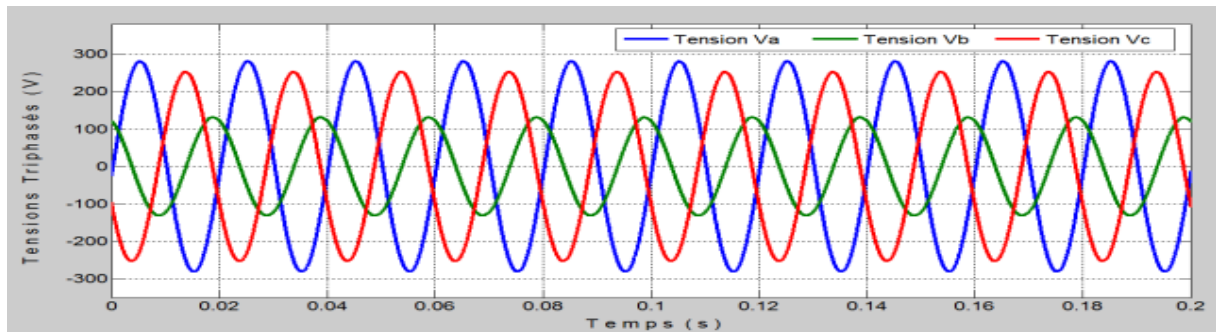


Figure I.3: Déséquilibre de tension [3].

I.2.4 Perturbation lié à la forme d'onde des trois tensions :

I.2.4.1 Harmoniques :

a) Définition :

Les harmoniques sont une superposition sur l'onde fondamentale à 50 Hz, d'ondes également sinusoïdales mais de fréquences multiples entières de celle du fondamental. La figure (I.4) montre l'influence des harmoniques h5 et h7 sur la fondamentale.

Ils sont générés le plus souvent par des charges non-linéaires. Les harmoniques de tension sont exprimés en % de l'amplitude de la fondamentale et les harmoniques de courant sont exprimés en ampère.

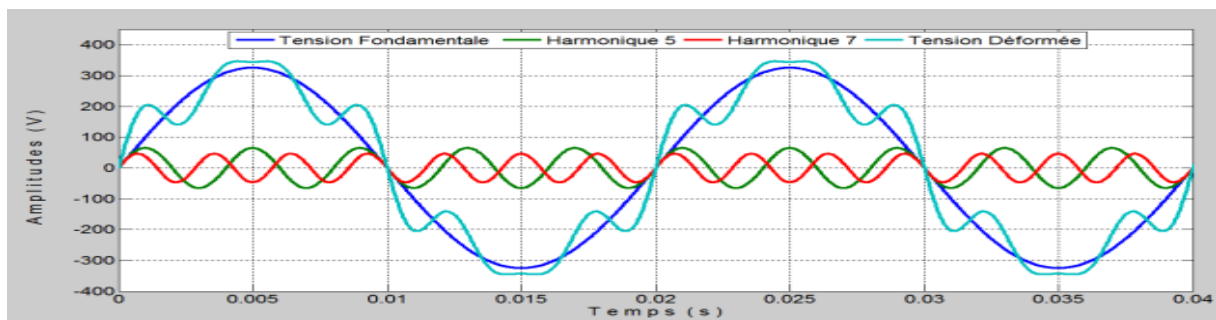


Figure I.5: Perturbations harmoniques [3].

Remarque :

- On appelle charge un équipement ou une installation connectée au réseau électrique et consommant de l'énergie à 50 Hz, il existe deux types de charge :
- Une charge linéaire absorbe un courant sinusoïdal lorsqu'elle est soumise à une tension sinusoïdale. Une résistance, une inductance sans fer, un condensateur, une machine électromagnétique non saturée, une lampe à incandescence sont autant d'exemples de charges linéaires [1].
- Une charge non linéaire absorbe un courant non sinusoïdal lorsqu'elle est soumise à une tension sinusoïdale c'est-à-dire la relation entre la tension et le courant n'est plus linéaire. On peut citer, à titre d'exemples de charges non linéaires, des machines électromagnétiques saturées, des dispositifs d'électronique de puissance comprenant les convertisseurs statiques, lampes à décharge, le matériel informatique, les téléviseurs et appareils électroménagers en grands nombres,... etc.

b) Sources des harmoniques :

La prolifération des équipements électriques utilisant des convertisseurs statiques a entraîné ces dernières années une augmentation sensible du niveau de pollution harmonique des réseaux électriques. Ces équipements électriques sont considérés comme des charges non linéaires émettant des courants harmoniques dont les fréquences sont des multiples entiers de la fréquence fondamentale, ou parfois à des fréquences quelconques. Le passage de ces courants harmoniques dans les impédances du réseau électrique peut entraîner des tensions harmoniques aux points de raccordement et ainsi polluer les consommateurs alimentés par le même réseau électrique [2].

1- Emission en tension :

L'émission harmonique en tension due aux matériels de réseaux entre pour une faible part, et avec des taux généralement faible, dans la distorsion des réseaux. Elle est due aux imperfections de construction (dissymétrie, distribution non sinusoïdale du champ dans les alternateurs, saturation des circuits magnétiques etc....) des bobinages des machines tournantes et des transformateurs [2].

2- Emission en courant :

Les charges non linéaires consomment un courant qui n'est pas sinusoïdale. Elles représentent les principales sources d'émission en courants harmoniques sur les réseaux.

On peut distinguer sept différents types de « charges perturbatrices élémentaires » chez l'utilisateur, dont quatre sont des montages électroniques [4] :

- le redresseur monophasé à filtre capacitif ;
- le gradateur monophasé ;
- le redresseur triphasé à thyristors ;
- le redresseur triphasé à diodes et filtre capacitif ;
- les moteurs asynchrones ;
- les lampes ;
- les appareils à arc électrique.

c) Caractérisation des perturbations harmoniques :

1- Spectre harmonique :

Un signal déformé se compose généralement de plusieurs harmoniques. On représente souvent ce signal sous forme d'un spectre dans la figure (I.6), ce spectre c'est l'histogramme donnant l'amplitude de chaque harmonique en fonction du rang [1].

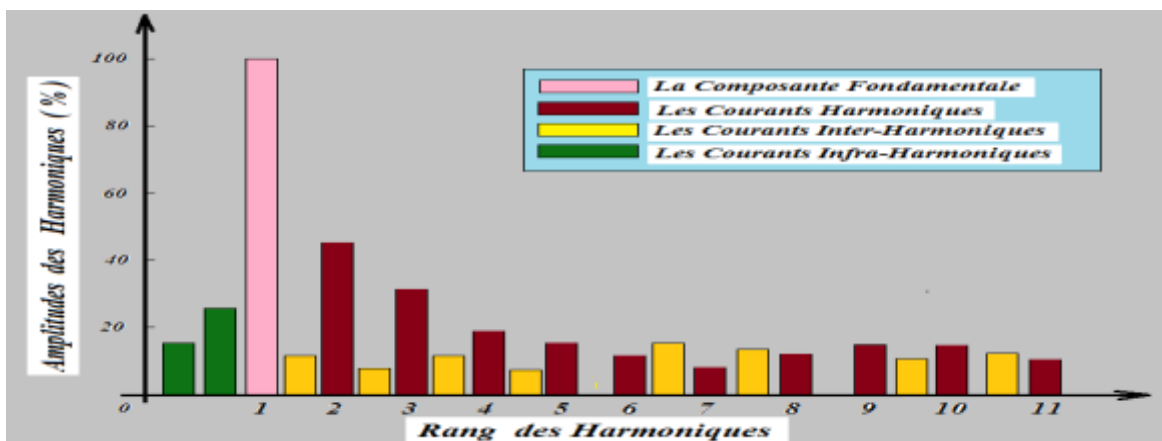


Figure I.6: Spectre harmonique [3].

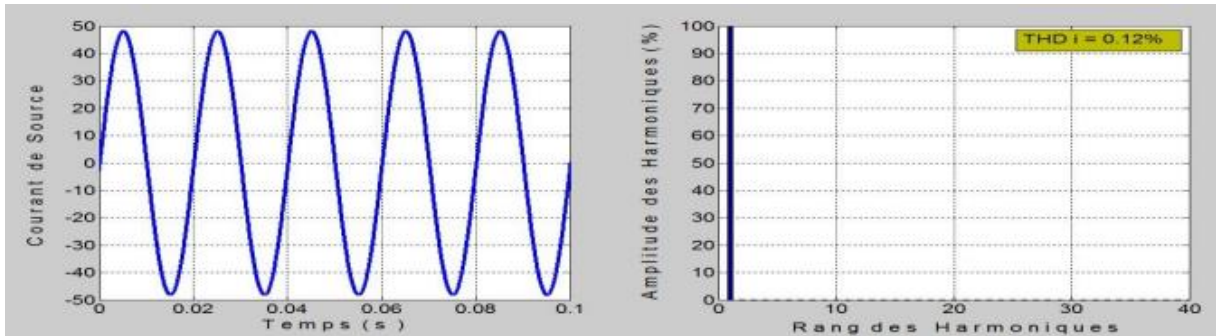


Figure I.7: Courants de ligne pour une charge linéaire et son spectre Harmonique [3].

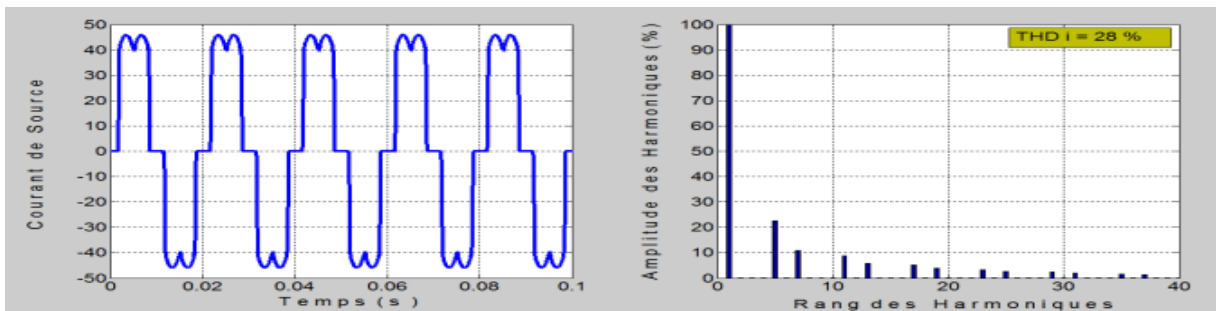


Figure I.8: Courants de ligne pour une charge non linéaire et son spectre Harmonique [3].

- **Inters harmoniques:** ce sont des composantes sinusoïdales d'une grandeur qui ne sont pas des fréquences multiples entières de celle du fondamental.
- **Infra harmoniques:** ce sont des composantes qui sont à des fréquences inférieures à celle du fondamental.

2- Rang de l'harmonique (h) :

On définit le rang harmonique « h » comme le rapport de sa fréquence F_n à celle du fondamental 50 Hz.

$$\text{Rang } h \text{ est défini par : } h = \frac{x_n}{x_1} \quad (\text{I.1})$$

x_n : La composante harmonique de rang n.

x_1 : La composante fondamentale.

Les harmoniques de rang pair (2, 4, 6, 8...), très souvent négligeables en milieu industriel, s'annulent en raison de la symétrie du signal. Ils n'existent qu'en présence d'une composante continue. Par contre, les harmoniques de rang impair (3, 5, 7, 9...) sont fréquemment rencontrés sur le réseau électrique [1].

Les outils de calcul permettant la détection de la présence des harmoniques sont le calcul du taux de distorsion harmonique THD et aussi le calcul du facteur de puissance Fp.

3- Taux d'harmonique individuel (τ_n) :

Le taux de distorsion d'un harmonique « τ_n », c'est le rapport entre la réelle valeur efficace de l'harmonique d'un signal (courant ou tension) par rapport à la valeur efficace du même signal à la fréquence fondamentale [9] :

$$\tau_n = \frac{\text{valeur efficace de l'harmonique au rang considéré } n}{\text{valeur efficace du fondamental } 1} \quad (\text{I.2})$$

$$\tau_v \text{ En tension : } \tau_v = \frac{V_n}{V_1} \quad (\text{I.3})$$

$$\tau_i \text{ En courant : } \tau_i = \frac{I_n}{I_1} \quad (\text{I.4})$$

4- Taux d'harmonique global (THD) :

Le taux d'harmonique globale « THD » c'est l'ensemble des harmoniques du signal analysé. Plus le signal déformé, plus le taux de distorsion harmonique important, ce qui signifie que le niveau de richesse du signal en harmoniques est conséquent. Ce taux de distorsion harmonique global est égal au rapport de la valeur efficace de l'ensemble des tensions ou courants harmoniques par rapport à la valeur de la tension ou courant efficace du fondamental.

$$THD = \frac{\text{valeur efficace des harmoniques}}{\text{valeur efficace du fondamental}} \quad (\text{I.5})$$

$$THD_v \text{ En tension : } THD_v(\%) = 100 \cdot \frac{\sqrt{\sum_{n>1}^n V_n^2}}{V_1} \quad (\text{I.6})$$

$$THD_i \text{ En courant : } THD_i(\%) = 100 \cdot \frac{\sqrt{\sum_{n>1}^n I_n^2}}{I_1} \quad (\text{I.7})$$

Lorsque le THD est égale à zéro, on peut conclure qu'il n'ya pas d'harmoniques sur le réseau.

5- Facteur de puissance (Fp) :

Pour un signal sinusoïdal le facteur de puissance est donné par le rapport entre la puissance active P et la puissance apparente S. Comme il est montré dans le diagramme de Fresnel de la figure (I.9).

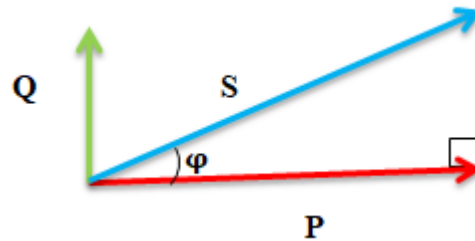


Figure I.9: Diagramme de Fresnel des puissances d'un signal sinusoïdal sans harmoniques.

$$Fp = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2+Q^2}} \quad (\text{I.8})$$

$$P = V.I . \cos\varphi \quad (\text{I.9})$$

$$Q = V.I . \sin\varphi \quad (\text{I.10})$$

Avec :

V: valeur efficace de la tension du réseau électrique.

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

Q: représente la puissance réactive.

La puissance apparente S de la charge définit par :

$$S = V.I \quad (\text{I. 11})$$

En présence des harmoniques, la puissance apparente S est composée de trois parties : active P, réactive Q et déformante D comme il est montré dans le diagramme de Fresnel de la figure (I.10).

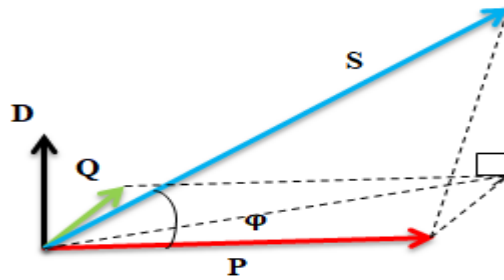


Figure I.10: Diagramme de Fresnel des puissances en présence des harmoniques.

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \quad (\text{I. 12})$$

En présence des harmoniques, la puissance déformante (D) donnée par la relation :

$$D = 3 \cdot V \sqrt{\sum_{n=2}^{50} I_n^2} \quad (\text{I. 13})$$

Par définition le facteur de puissance vaut :

$$Fp = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad (\text{I. 14})$$

Remarque :

- la notion de « $\cos\phi$ » n'est plus applicable dans le cas de signaux déformés. On parle alors de facteur de puissance « Fp » [10].
- Dans un milieu permanent sinusoïdal $Fp = \cos\phi$ (I. 15)
- Dans un milieu harmonique $Fp < \cos\phi$ on voit bien que les harmoniques affectent aussi le facteur de puissance.
- On constate que la puissance déformante et la puissance réactive contribuent à la dégradation du facteur de puissance [1].

d) Analyse des harmoniques :

La théorie classique de l'énergie électrique ne tient compte que des systèmes électriques basés sur des signaux sinusoïdaux. Cependant les signaux électriques présents sur les réseaux (surtout les courants) sont souvent perturbés et ils ne sont pas parfaitement sinusoïdaux. Dans le domaine de la qualité de l'énergie, il est indispensable de bien connaître tous les échanges d'énergie entre le réseau et les différentes charges de façon à pouvoir compenser les éventuelles perturbations [2].

L'analyse des signaux non sinusoïdaux est basée sur deux concepts mathématiques qui sont les harmoniques, qui permettent la décomposition des signaux électriques perturbés (non sinusoïdaux) en composantes idéales et perturbations. Le concept d'harmonique a été introduit au début du XIXème siècle par Joseph Fourier [7], en démontrant que tout signal périodique non sinusoïdal peut être représenté par une somme ou série des sinusoïdes de fréquences discrètes. La composante zéro de la série dite de Fourier est la composante continue, tandis que la première composante est appelée composante fondamentale. Dans le cas des systèmes raccordés au réseau, celle-ci est une composante à la fréquence nominale du réseau (50Hz). Le reste des composantes de la série sont appelés harmoniques et sont multiples de la fréquence fondamentale [2].

Le signal de la figure (I.5) peut représenter un courant ou une tension. Il est périodique, de période T, donc de fréquence $F = 1/T$ et de pulsation $\omega = 2\pi F$. Ce signal $S(t)$ se décompose en série de Fourier:

$$S(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(\omega_n t) + b_n \sin(\omega_n t)] \quad (\text{I.16})$$

a_0, a_n, b_n sont les coefficients de fourier

$$\text{Avec : } a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T s(t) dt \quad (\text{I.17})$$

$$\text{Et pour : } h \geq 1 \quad a_n = \frac{2}{T} \int_0^T s(t) \cos(\omega_n t) dt \quad (\text{I.18})$$

$$\text{Et : } b_n = \frac{2}{T} \int_0^T s(t) \sin(\omega_n t) dt \quad (\text{I.19})$$

e) Effets des harmoniques :

Les effets des harmoniques les plus connus et les plus spectaculaires sont la destruction des condensateurs ou des disjoncteurs sous l'effet des forts courants harmoniques amplifiés par des résonances. Un autre phénomène, de plus en plus rencontré, est l'échauffement des transformateurs et des conducteurs de neutre sous l'effet des courants harmoniques de rang 3 on distingue deux type d'effets [6].

1- Effets instantanés :

Ce sont les effets immédiats sur le fonctionnement d'un matériel comme. Par exemple, dans les appareils qui produisant une image électroniques (écrans d'ordinateurs,

téléviseurs), les appareils produisant un son censé être de bonne qualité (chaîne HI-FI, téléphone) ou la précision des appareils de mesure [6].

2- Effets différés (à terme) :

Les effets différés sont souvent liés à un sur échauffement plus au moins important. Ces effets sont dus essentiellement à deux phénomènes, l'échauffement des conducteurs ou des composants traversés par des courants harmoniques et le vieillissement des isolants, on peut distinguer trois classes :

- **Les effets à court terme** (jusqu'à quelque secondes).
- **Les effets à moyen terme** (de quelque secondes à quelques heures).
- **Les effets à long terme** (de quelque heure à quelques années) [6].

f) Normes et réglementation :

Les deux principaux organismes de normalisation internationaux dans le domaine électrotechnique sont la CEI (Commission Electrotechnique Internationale), et l'IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers). Ces deux organismes réalisent la principale activité de normalisation dans le domaine des perturbations électriques au niveau mondial mais n'ont pas une uniformité de critères en ce qui concerne la définition des interactions entre le réseau et les charges connectées [2].

L'objectif des normes et des réglementations est de limiter les dysfonctionnements occasionnés par les harmoniques. La Commission Electrotechnique Internationale (CEI) définit le niveau des courants et des tensions harmoniques à ne pas dépasser par une série de normes de compatibilité électromagnétique (CEI 61000). Nous pouvons citer à titre d'exemple [2]:

La norme CEI 61000-3-2: cette norme (tableau I.1) fixe la limitation des courants injectés dans le réseau publique pour des équipements dont le courant par phase est inférieur à 16A. Il s'agit des appareils du domaine domestique.

Tableau I.1: Limite des composantes harmoniques en courant (norme CEI 61000-3-2).

Rang harmonique	Courant harmonique maximal autorisé (A)
Harmoniques impaires	
3	2.3
5	1.14
7	0.77
9	0.40
11	0.33
13	0.21
$15 \leq h \leq 39$	$0.15 * 15/h$
Harmoniques paires	
2	1.08
4	0.43
6	0.3
$8 \leq h \leq 40$	$0.23 * 8/h$

g) Filtrage des composants harmoniques :

Il existe deux solutions principales de dépollutions électriques pour réduire les perturbations la solution de dépollution traditionnelle qui consiste à utiliser les convertisseurs statiques peu ou moins polluant et les solutions de dépollution moderne qui utilise le filtrage pour compenser les harmoniques. C'est ce que nous étudierons dans le deuxième chapitre.

I.3 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons d'abord présenté les différentes origines des perturbations affectant les réseaux électriques (creux et coupures de tension, fluctuations de tension, les déséquilibres, variation de fréquence, perturbations harmoniques...).

Ensuite nous avons concentré sur les harmoniques, les grandeurs caractéristiques liées aux harmoniques sont présentées, puis nous avons vu les réglementations imposées afin de limiter la prolifération des harmoniques dans le réseau électrique.

Enfin, pour diminuer les effets de ces perturbations harmoniques, les différentes solutions ont été présentées superficiellement et seront approfondis dans le chapitre suivant.

Chapitre II

II.1 Introduction :

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

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

II.2 Les solutions traditionnelles :

Ce sont des techniques qui doivent être connues par tous les électriciens. Qui est la méthode la moins coûteuse et la plus utilisée. Elles apportent une solution plus facile et rapide pour certains cas de perturbation bien localisée. Elles utilisent des composants passifs (inductances, condensateurs, transformateurs) et/ou des branchements qui modifient le schéma de l'installation [2].

II.2.1 Solutions de dépollution des courants harmoniques :

Afin de dépolluer les réseaux électriques des perturbations du courant, plusieurs solutions ont été introduites dans la littérature :

II.2.1.1 Surdimensionnement ou déclassement de l'installation électrique :

L'objectif n'est pas d'éliminer les courants harmoniques circulant dans l'installation électrique, mais plutôt de « faire avec », en évitant leurs conséquences. Au moment de la conception d'une installation nouvelle, l'idée consiste à surdimensionner tous les éléments de l'installation susceptibles de véhiculer des courants harmoniques, à savoir les transformateurs, les câbles, les disjoncteurs, les groupes électrogènes et les tableaux de distribution. La solution la plus largement utilisée est le surdimensionnement du conducteur neutre. La conséquence est un accroissement important du coût de l'installation. Dans des installations existantes, la solution la plus répandue consiste à déclasser les équipements de distribution électrique soumis aux courants harmoniques. La conséquence est l'impossibilité de tirer profit du potentiel réel de l'installation [11].

II.2.1.2 Transformateurs spéciaux :

a) Transformateur de mise à la terre :

Afin d'éviter le passage des courants harmoniques par le conducteur de neutre, l'ajout d'un transformateur de mise à la terre créant un neutre artificiel est une solution efficace. Ce type de transformateur fournit un chemin de faible impédance pour les courants harmoniques qui sont déviés dans son propre neutre [11].

Modèle de simulation pour voir les paramètres de simulation allée à l'annexe (A) :

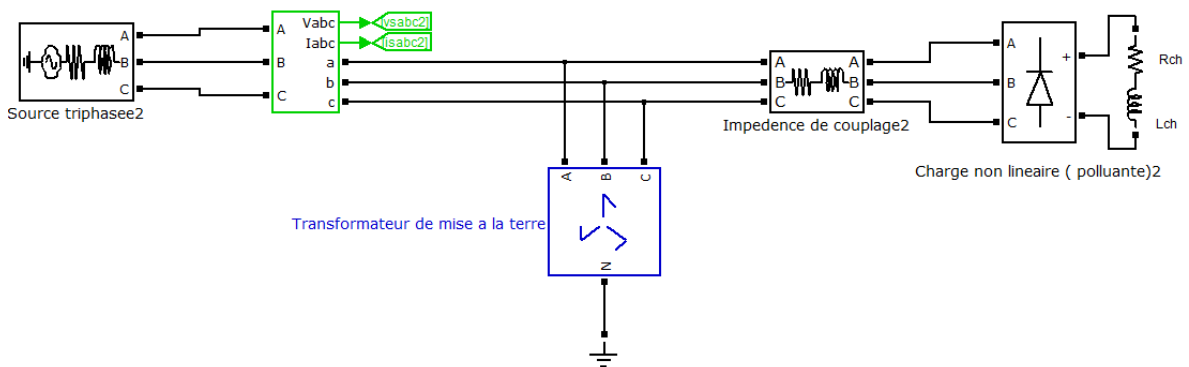


Figure II.1: Transformateur de mise à la terre branché au réseau.

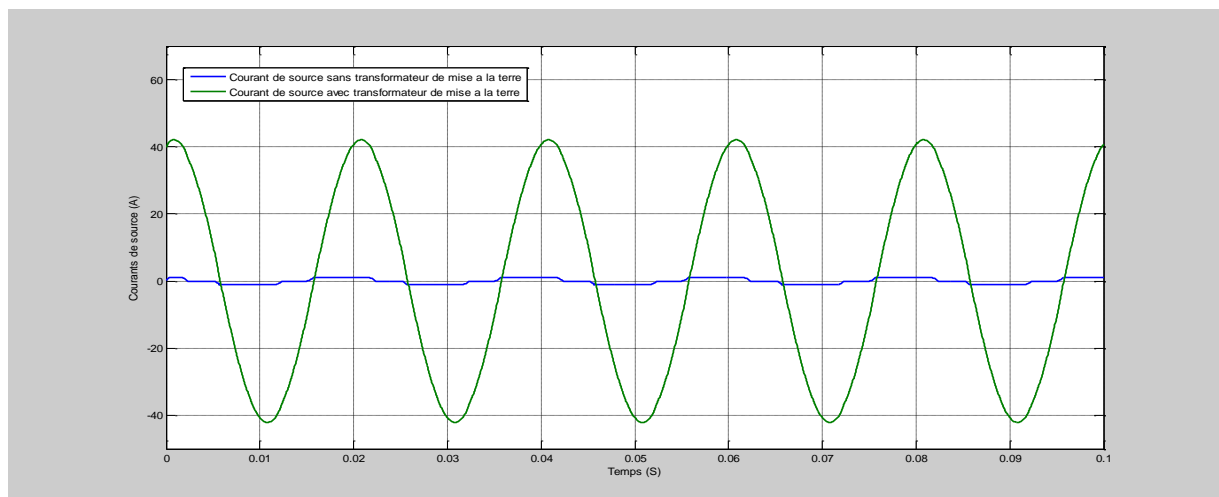


Figure II.2: Courant de source sans et avec transformateur de mise à la terre.

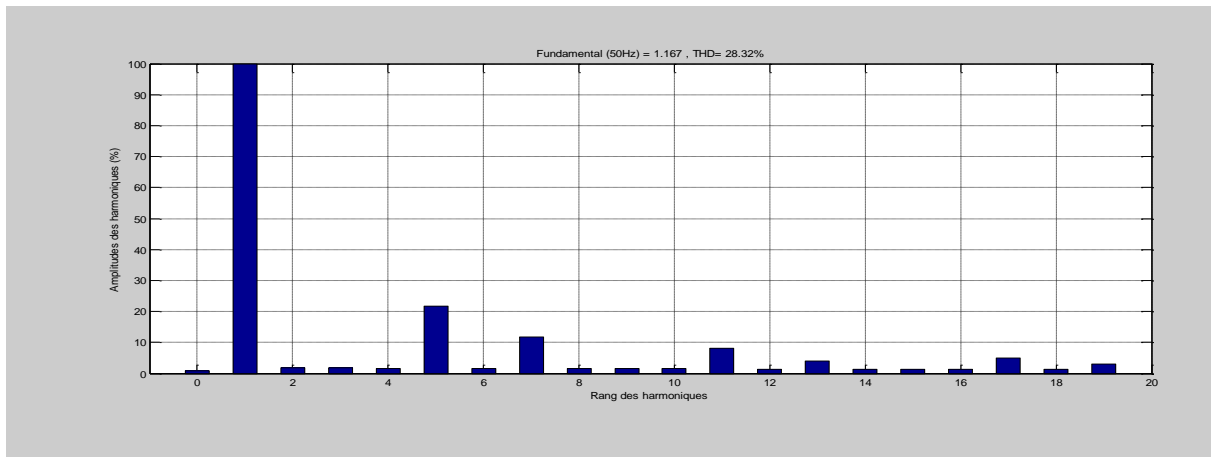


Figure II.3: Spectre harmonique avant insertion du transformateur de mise à la terre.

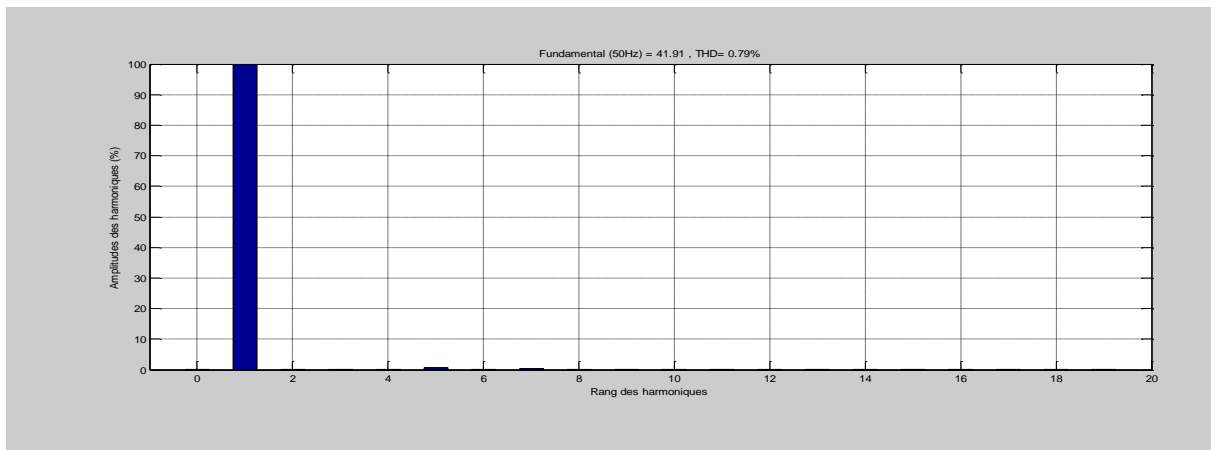


Figure II.4: Spectre harmonique après insertion du transformateur de mise à la terre.

b) Utiliser des transformateurs à couplages particuliers :

Si une grosse charge non linéaire est identifiée, on peut tout simplement l'isoler derrière un transformateur. Les transformateurs ayant la capacité de supprimer certains harmoniques sont les transformateurs HT/BT, étoile-zig zag et triangle-étoile. Ces couplages permettent d'avoir le minimum de distorsion au secondaire et permet d'éviter le transfert de la composante harmonique (harmonique multiple de trois) au primaire [11].

L'effet de couplage des transformateurs permet la suppression de certains rangs d'harmoniques.

- Un couplage Dyd arrête les harmoniques de rangs 5 et 7.
- Un couplage Dy arrête les harmoniques de rangs 3.
- Un couplage Dz arrête les harmoniques de rangs 5.

Modèle de simulation pour voir les paramètres de simulation allée à l'annexe (A) :

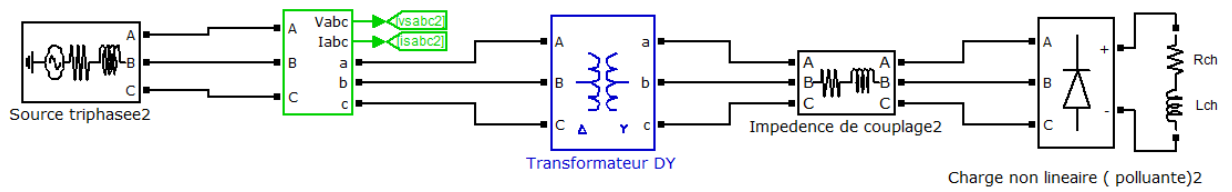


Figure II.5: Transformateur à couplage DY branché au réseau.

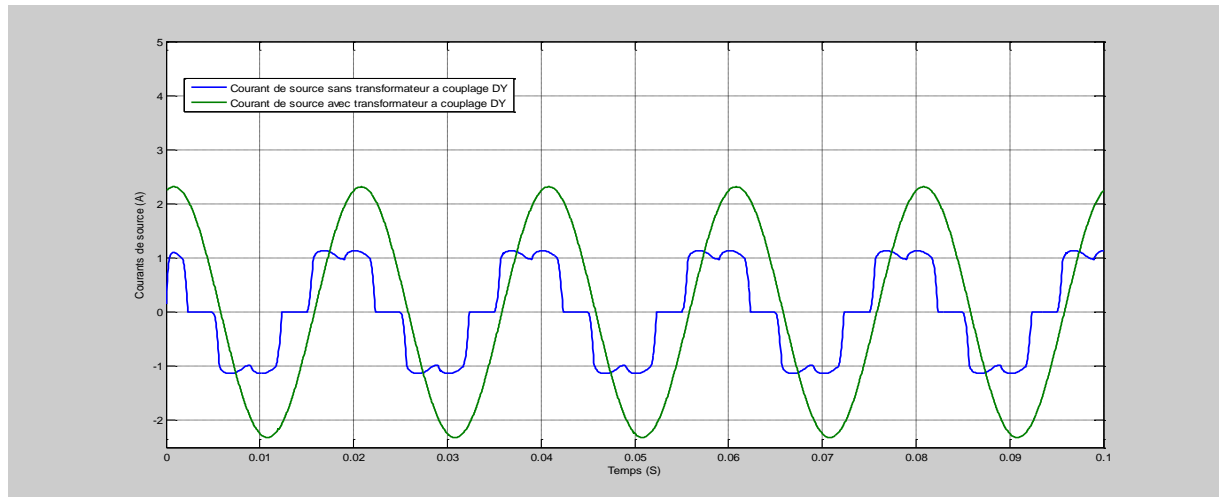


Figure II.6: Courant de source sans et avec transformateur à couplage DY.

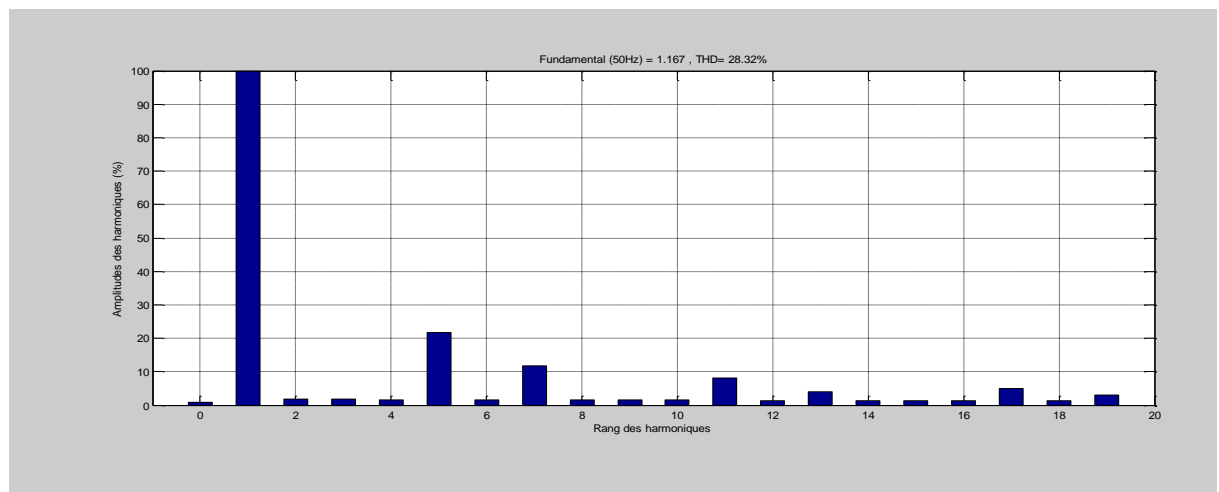


Figure II.7: Spectre harmonique avant insertion du transformateur à couplage DY.

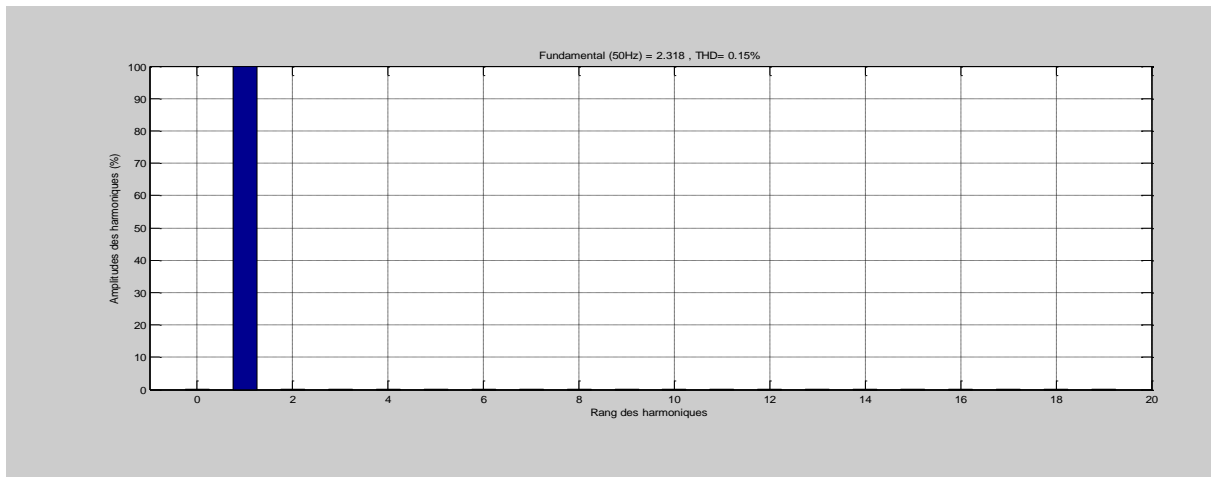


Figure II.8: Spectre harmonique après insertion du transformateur à couplage DY.

II.2.1.3 Inductances (selfs) série :

Cette solution, utilisée pour les entrainements à vitesse réglable (variateurs de vitesse) et les redresseurs triphasés, consiste à introduire une inductance série en amont d'une charge non linéaire. Peu onéreuse, la self a cependant une efficacité limitée. Il faut en installer une par charge non linéaire. La distorsion en courant est divisée approximativement par deux [11].

Modèle de simulation pour voir les paramètres de simulation allée à l'annexe (A) :

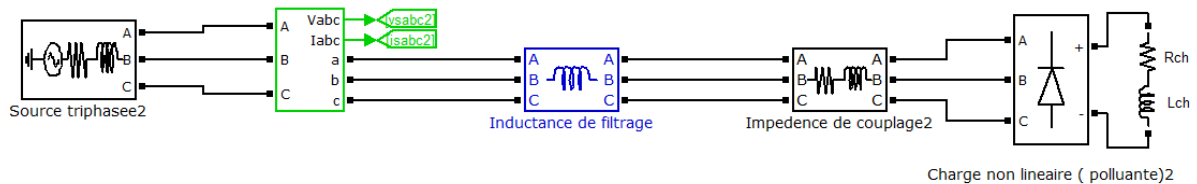


Figure II.9: Inductance de filtrage branché au réseau.

L'incidence de cette inductance sur le courant de la source est illustrée à la figure (II.10). On constate l'atténuation dans l'amplitude des harmoniques, en particulier ceux de rang élevé.

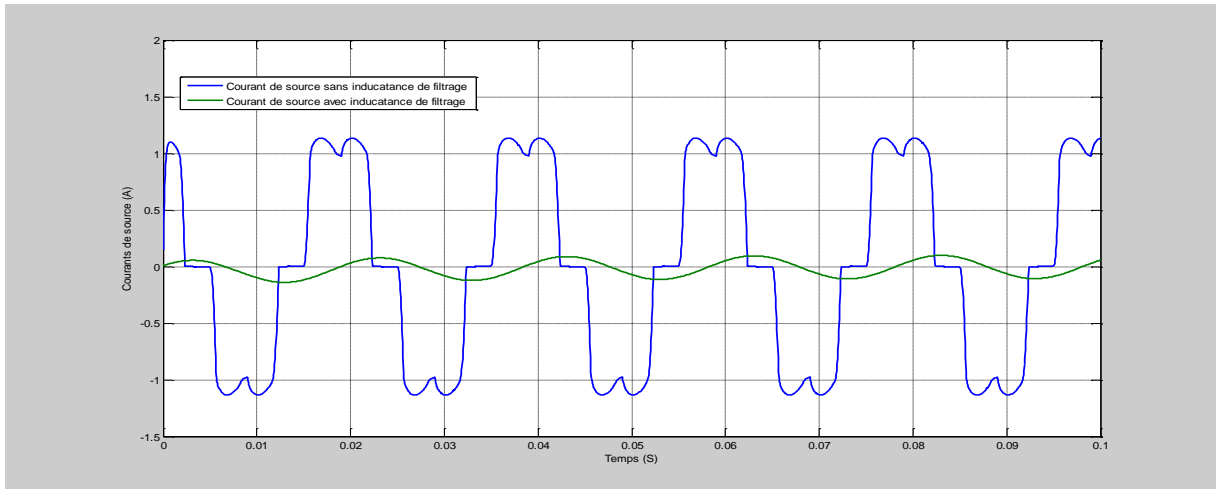


Figure II.10: Courant de source sans et avec inductance de filtrage.

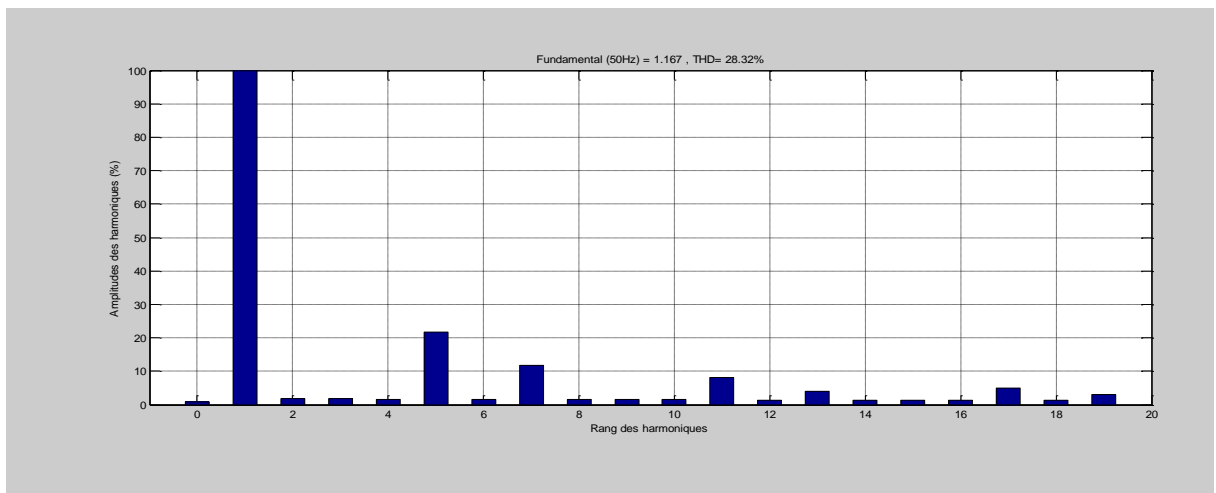


Figure II.11: Spectre harmonique avant insertion de l'inductance de filtrage.

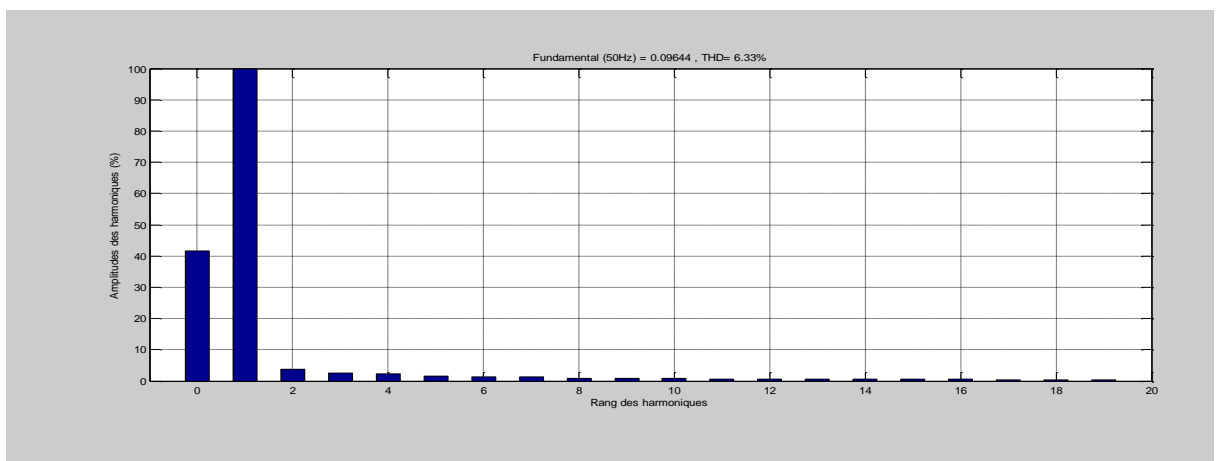


Figure II.12: Spectre harmonique après insertion de l'inductance de filtrage.

Cette solution reste simple, fiable et relativement économique .En revanche elle est limitée en terme d'efficacité, crée une chute de tension en ligne et présente un encombrement important et surtout que la tendance actuelle veut que l'on réduise la taille du convertisseur, tout en réduisant également la taille de l'inductance, ou de surmonter de cette dernière.

Cette inductance constitue le filtre de base de toutes les alimentations sans interruption (ASI) et utiliser avec tous les types de source.

II.2.1.4 Filtrage passif :

Cette solution repose sur le principe de piéger les harmoniques dans des éléments passifs **RLC** connectés, en dérivation au réseau, deux types de filtres passifs sont généralement utilisés, le filtre résonnant et le filtre amorti .Ce dispositif qui permet d'atténuer d'une manière sélectif les courants harmoniques.

Le filtre résonnant est constitué de certain nombre de branches triphasées, de dipôles **LC** en séries groupés en parallèle, chaque branche étant accordée sur un harmonique caractéristique à filtrer. Tandis que le filtre amorti, constitué de certain nombre de branches **[(R // L) + C]** triphasées groupés en parallèle, chaque branche étant accordée sur une bande d'harmonique à filtrer à partir de l'harmonique [4].

Modèle de simulation pour voir les paramètres de simulation allée à l'annexe (A) :

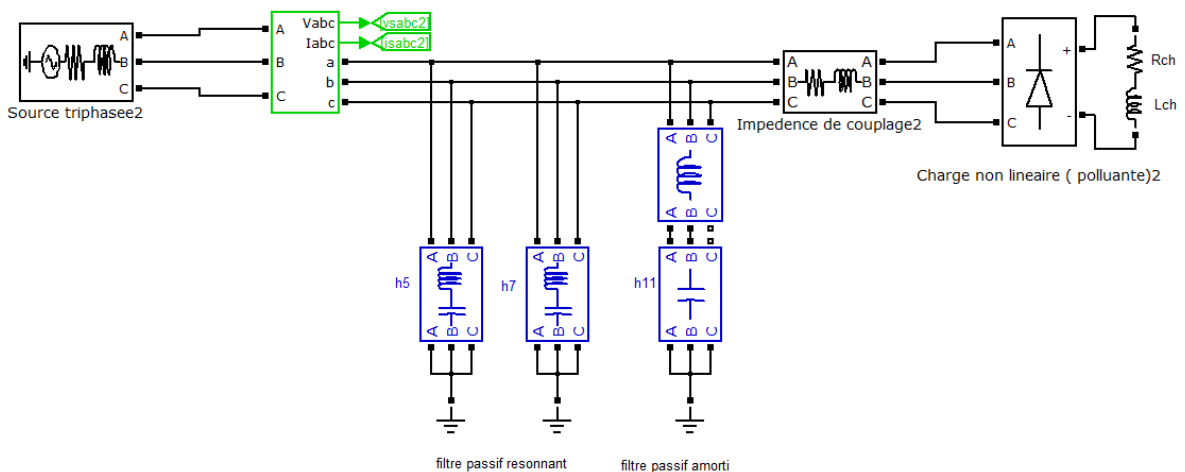


Figure II.13: Filtre résonnant et amorti branché au réseau.

a) **Filtre résonnant :**

Ce filtre est conçu pour éliminer les courants harmoniques d'ordre inférieur h5 et h7. Le rang d'accord na correspond au multiple, entier ou non, de la fréquence nominale du réseau pour lequel l'impédance du filtre LC est minimale tel que [4] :

$$Z = \frac{1+j\left(\frac{R}{L\omega}\right)\frac{\omega^2}{\omega_a^2}-\left(\frac{\omega^2}{\omega_a^2}\right)}{jC\omega} \tag{II.1}$$

Avec: $\omega_a = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ (II.2)

Deux pulsations peuvent être remarquées lors de la connexion du filtre sur l'impédance du réseau :

- Résonance du filtre : $\omega_a = 2\pi f_a = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ (II.3)

- Avec : ω_a : Pulsation d'accord

- Antirésonance du filtre : $\omega_{ar} = 2\pi f_{ar} = \frac{1}{\sqrt{(L_r+L)C}}$ (II.4)

Pour éliminer les harmoniques h5 puis h7, on insère respectivement le filtre résonnant avec le réseau :

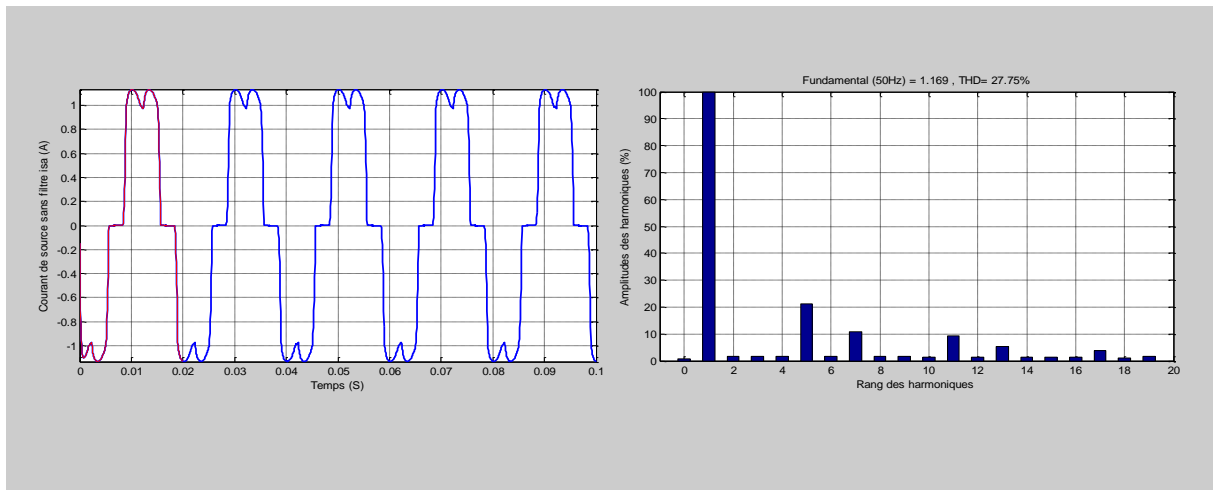


Figure II.14: Courant de source et spectre harmonique avant annulation des harmoniques.

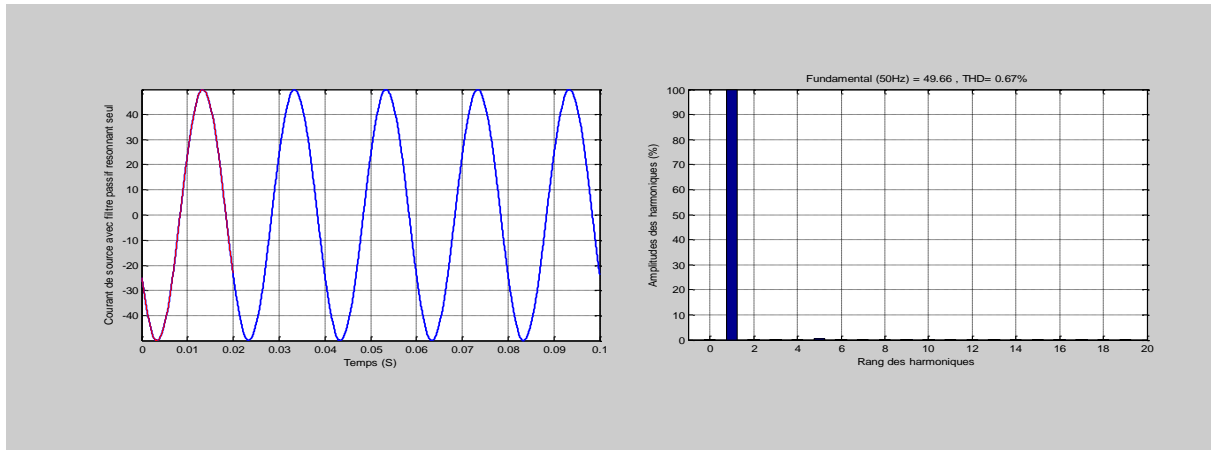


Figure II.15: Courant de source et spectre harmonique après annulation de H5 et H7.

Pour supprimer l'ensemble des harmoniques de fréquence supérieur à la pulsation de résonance (h11, h13, h17 et h19), on utilise généralement un filtre passe-haut du second ordre. Celui-ci, fait l'objet du filtre amorti.

b) Filtre Amorti :

Pour atténuer l'ensemble d'une bande d'harmoniques tels que h11, h13, h17 et h19, on utilise en général un filtre passe-haut du second ordre appelé filtre amorti. L'impédance d'un filtre amorti est donnée par la formule suivante [4] :

$$Z(\omega) = \frac{R + jL\omega + j^2RLC\omega^2}{(R + jL\omega)jC\omega} \tag{II.5}$$

$$\text{Avec : } n_a = \frac{1}{\omega_1\sqrt{LC}} \tag{II.6}$$

Sachant que : n_a : Le rang d'accord ; ω_1 : Pulsation du réseau.

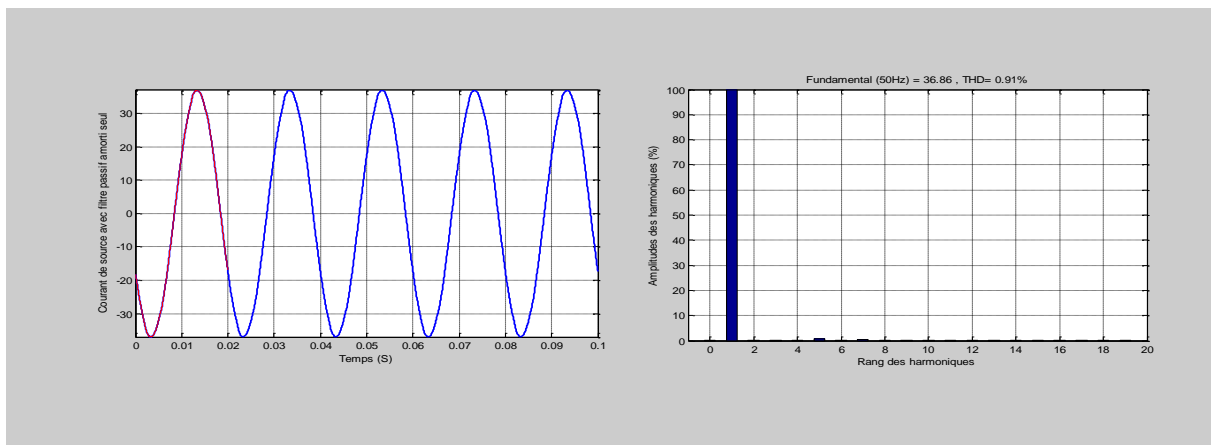


Figure II.16: Courant de source et spectre harmonique après insertion du filtre amorti seul.

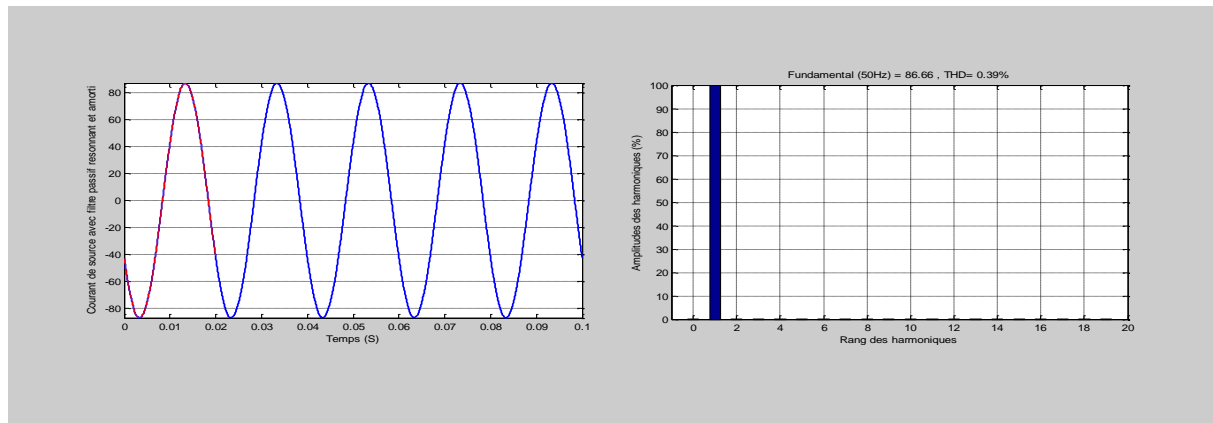


Figure II.17: Courant de source et spectre harmonique après insertion du filtre résonant et amorti.

II.2.2 Solutions de dépollution des tensions :

Pour dépolluer les réseaux électriques du déséquilibre et harmoniques, on peut limiter la circulation des courants perturbateurs en utilisant les solutions traditionnelles présentées précédemment dans le cas des perturbations de courant. Quant aux creux de tension, la solution la plus fréquente dans les milieux sensibles (hôpitaux, sites industriels...etc.) est d'utiliser des groupes électrogènes qui se substituent au réseau électrique. Mais la limitation de la puissance de ces groupes ainsi que la qualité médiocre de l'énergie électrique fournie restent un problème [11].

II.3 Solutions modernes :

Deux raisons principales ont conduit à concevoir une nouvelle structure de filtrage moderne et efficace appelée filtre actif. La première raison est due aux inconvénients inhérents des solutions traditionnelles de dépollution qui ne répondent plus à l'évolution des charges et des réseaux électriques. La seconde raison fait suite à l'apparition de nouveaux composants semi-conducteurs, comme les thyristors GTO et les transistors IGBT et MOSFET. Le but de ces filtres est de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à compenser les perturbations responsables de la dégradation des performances des équipements et installations électriques [11].

Les filtres actifs peuvent être classés suivant leur circuit de puissance, les algorithmes de détection des grandeurs harmoniques, ou les techniques de commande. Il existe plusieurs familles de filtre actif :

- Filtre Actif Série (FAS) conçu pour compenser toutes les perturbations de tension comme les harmoniques, le déséquilibre et les creux de tension.
- Filtre Actif Parallèle (FAP) conçu pour compenser toutes les perturbations de courant comme les harmoniques, le déséquilibre et la puissance réactive.
- Filtre Actif Universel (FAU) nommé aussi (UPQC) (Unified Power Quality Conditioner) solution universelle pour compenser les perturbations liées aux harmoniques de courant et de tension.

II.3.1 Le filtre actif série (FAS) :

Ce filtre est connecté en série sur le réseau comme le montre la figure (II.18). Il se comporte comme une source de tension qui engendre des tensions harmoniques dont la somme avec la tension du réseau est une onde sinusoïdale. Il est destiné à protéger les installations sensibles aux tensions perturbatrices (harmoniques, creux, déséquilibres) provenant de la source et également celles provoquées par la circulation des courants perturbateurs à travers l'impédance du réseau. Cette structure est proche, dans le principe, des conditionneurs de réseau [11]. Toutefois, cette topologie ne permet pas, de compenser les courants harmoniques consommés par la charge.

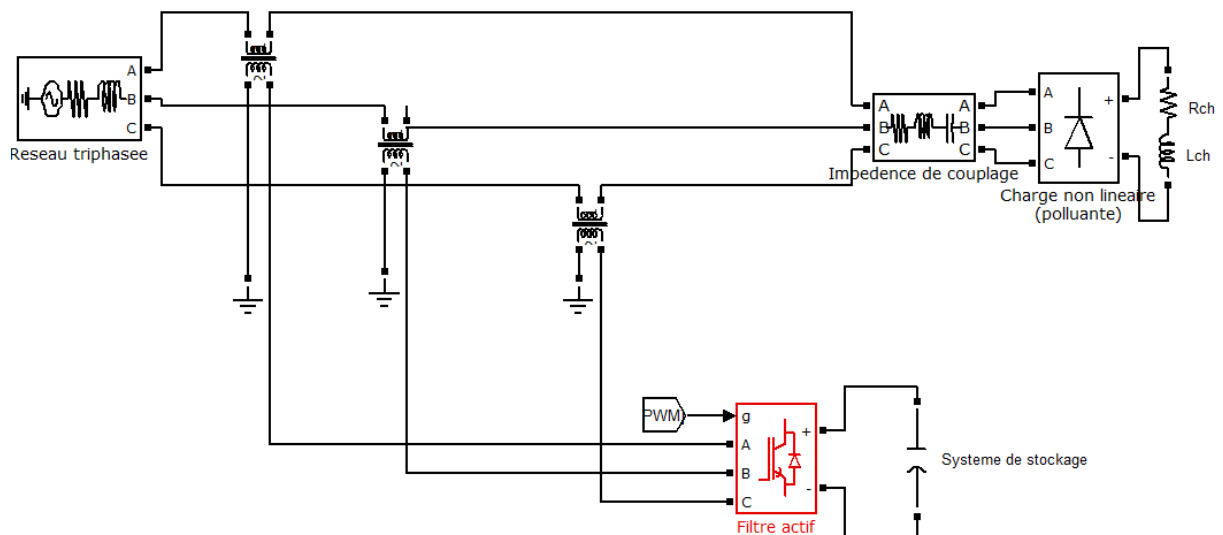


Figure II.18: Filtre actif série [12].

II.3.2 Le filtre actif parallèle (FAP):

Appelé aussi compensateur actif shunt, Ce filtre est connecté en parallèle sur le réseau comme le montre la figure (II.19). Il peut être considéré comme un générateur de courant qui restitue dans le réseau électrique les courants harmoniques égaux à ceux absorbés par la charge non linéaire mais en opposition de phase, de telle sorte que les courants fournis par le réseau i_s soient sinusoïdaux et en phase avec les tensions directes correspondantes [11]. Ce type de filtre est le plus utilisé dans l'industrie (son indépendance vis-à-vis de la source et de la charge lui assure une auto-adaptabilité, fiabilité et performance). Il empêche les courants harmoniques, réactifs et déséquilibrés de circuler à travers l'impédance du réseau. Il améliore ainsi les taux de distorsion en courant et en tension [11].

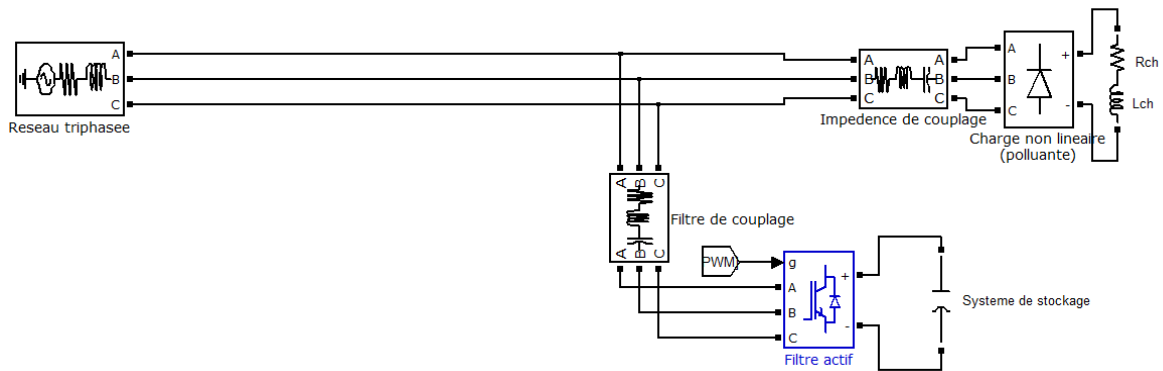


Figure II.19: Filtre actif parallèle [12].

II.3.3 Le filtre actif universel (FAU) :

C'est une solution de compensation universelle basée sur le fonctionnement simultané des filtres actifs parallèle et série comme le montre la figure (II.20). Cette nouvelle topologie est appelée combinaison parallèle-série actifs ou Unified Power Quality Conditioner (UPQC). L'UPQC possède les avantages cumulés des deux types des filtres actifs parallèle et série [11].

Le filtre actif série, lorsqu'il est placé en amont du filtre actif parallèle comme montré sur la figure (II.20), permet de dépolluer la source des tensions perturbatrices. Lorsqu'il est placé en aval, il permet d'isoler la charge de la source perturbée.

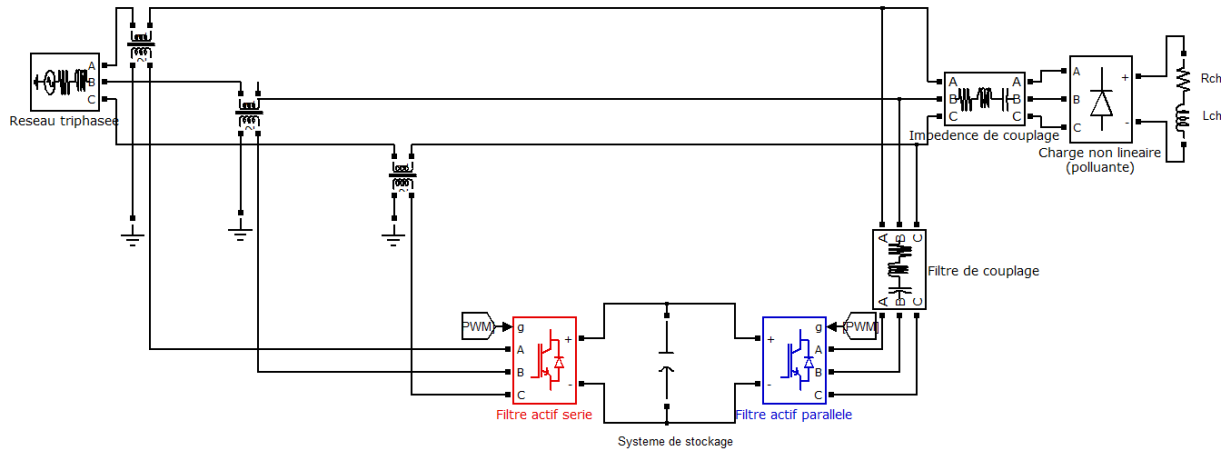


Figure II.20: Combinaison des filtres actifs série et parallèle [12].

Il faut noter l'existence de plusieurs autres combinaisons mixtes de filtres actifs avec cette fois-ci les filtres passifs nommés filtres hybrides. Ces structures sont conçues dans le but d'optimiser le rapport performance/coût. On peut citer trois configurations [11]:

- filtre actif série avec des filtres passifs parallèles ;
- filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles ;
- filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle.

II.4 Comparatif et choix du filtrage actif parallèle (FAP):

Le tableau(II.1) montre un récapitulatif des avantages et inconvénients de quatre schémas de dépollution: filtrage passif, filtrage actif série, filtrage actif parallèle et le filtrage parallèle - série actifs.

Le filtre parallèle - série active compense toutes les perturbations liées à la tension et au courant. Néanmoins, cette solution dite universelle reste difficile à réaliser pratiquement [12]. Le filtre actif parallèle génère des composantes harmoniques aux mêmes fréquences et en opposition de phase aux perturbations mesurées. Il compense les courants harmoniques engendrés par une charge non linéaire, tout en s'adaptant aux évolutions du récepteur. Cependant, la compensation des harmoniques de tension n'est toujours pas évidente avec cette approche [12].

En raison de la législation des normes de qualité de l'énergie (surtout la compensation des harmoniques de courant) et les bonnes performances obtenues par le FAP, nous avons retenu cette topologie de compensation pour notre stratégie de dépollution des perturbations harmoniques.

Tableau II.1: Récapitulatif des solutions de dépollution.

Principes	Avantages	Inconvénients
filtrage passif	amélioration de la forme du courant	risque de résonance, pas d'adaptabilité
filtrage actif série FAS	amélioration de la forme de la tension, adaptabilité aux variations de charge et du réseau	pas d'amélioration de la forme du courant
filtrage actif parallèle FAP	amélioration de la forme du courant, adaptabilité aux variations de charge et du réseau	amélioration de la forme de la tension pas toujours évidente
combinaison parallèle - série actifs UPQC	amélioration de la forme du courant, amélioration de la forme de la tension, adaptabilité aux variations de charge et du réseau	réalisation difficile

II.5 Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre un ensemble de solutions traditionnelles et modernes de dépollution harmonique. La solution classique à base de filtres passifs, déclassement de l'installation électrique, transformateurs spéciaux et inductances série c'est vrai des solutions pratiques mais ne peuvent pas s'adapter à l'évolution des charges polluantes et leurs inconvénients inhérents comme le risque de résonance.

Récemment, en plus du filtrage des harmoniques, les filtres actifs parallèles et séries, et leur combinaison, sont étudiés pour la compensation de tous les types de perturbation susceptible d'apparaître dans un réseau électrique basse tension. En effet, profitant des progrès réalisés dans le domaine de l'électronique de puissance, ces solutions peu encombrantes n'occasionnent aucune résonance avec les éléments passifs du réseau et font preuve d'une grande flexibilité face à l'évolution du réseau électrique et de la charge polluante.

Le filtre actif parallèle (FAP) peut être installé pour compenser toutes les perturbations de courant comme les harmoniques et la puissance réactive.

Le filtre actif série (FAS) peut être installé pour compenser toutes les perturbations de tension comme les harmoniques et les creux de tension.

La combinaison parallèle-série actifs (UPQC) est la solution universelle pour compenser toutes les perturbations en courant et en tension. D'autres propositions et solutions de dépollution consistent à associer des filtres actifs et passifs pour la recherche d'un compromis entre l'efficacité de compensation et le coût. Ces solutions sont très prometteuses dans les futures.

Chapitre III

III.1 Introduction :

Dans les chapitres précédents, nous avons rappelés les différentes origines des perturbations affectant sur les réseaux électrique et les solutions de dépollution existantes, notamment le filtre actif parallèle.

Cette partie est consacrée à une étude plus détaillée du filtre actif parallèle, de sa structure et de sa commande, afin d'atteindre l'objectif essentiel qui est d'améliorer ces performances de compensation lorsque les conditions de fonctionnement du réseau électrique sont sévères.

Pour illustrer ce chapitre, les résultats de simulation que nous avons obtenus dans matlab /simulink seront présentés et commentés.

III.2 Point de raccordement :

On distingue deux types de compensation des filtres actifs : la compensation globale et la compensation locale. Le filtre actif est situé entre le réseau et la (les) charge(s) polluante(s) comme le montre la figure (III.1).

En effet, comme le montre cette figure plusieurs charges sont interconnectées au réseau électrique, on dit que la compensation est globale lorsque le filtre actif est raccordé sur l'entrée du tableau de distribution. Ce type de compensation est favorisé lorsque le nombre de charges non linéaires est considérable avec faible puissance. On dit que la compensation est locale lorsque le filtre actif est raccordé aux bornes d'une seule charge polluante, et on fait appel à cette compensation lorsque le nombre de charges polluantes connectées au réseau est limité mais avec une puissance significative par rapport à la puissance globale [13].

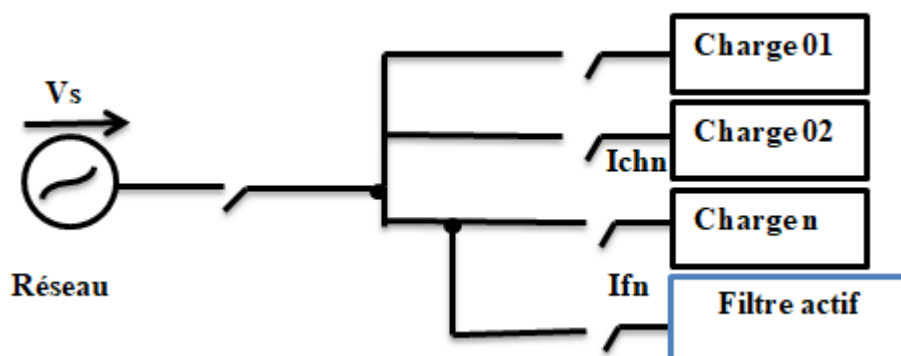


Figure III.1: Raccordement d'un filtre actif parallèle.

Chapitre III Etude, dimensionnement et régulation d'un filtre actif parallèle à deux niveaux

Dans l'idéal, la correction des harmoniques doit être effectuée à leur point d'origine. Un certain nombre de critères financiers et techniques sont pris en compte pour assurer le choix optimal [14].

III.3 Rôle du filtre actif :

Dans le cas idéal le rôle du filtre actif consiste à éliminer tous les harmoniques produits par la charge non linéaire en fournissant à tout instant des harmoniques égaux en amplitude et en opposition de phase à ceux produits par la charge, et ceci afin que le courant dans la ligne reste purement sinusoïdal et égal au fondamental du courant de charge [13].

La figure (III.2) illustre le principe de compensation parallèle idéale.

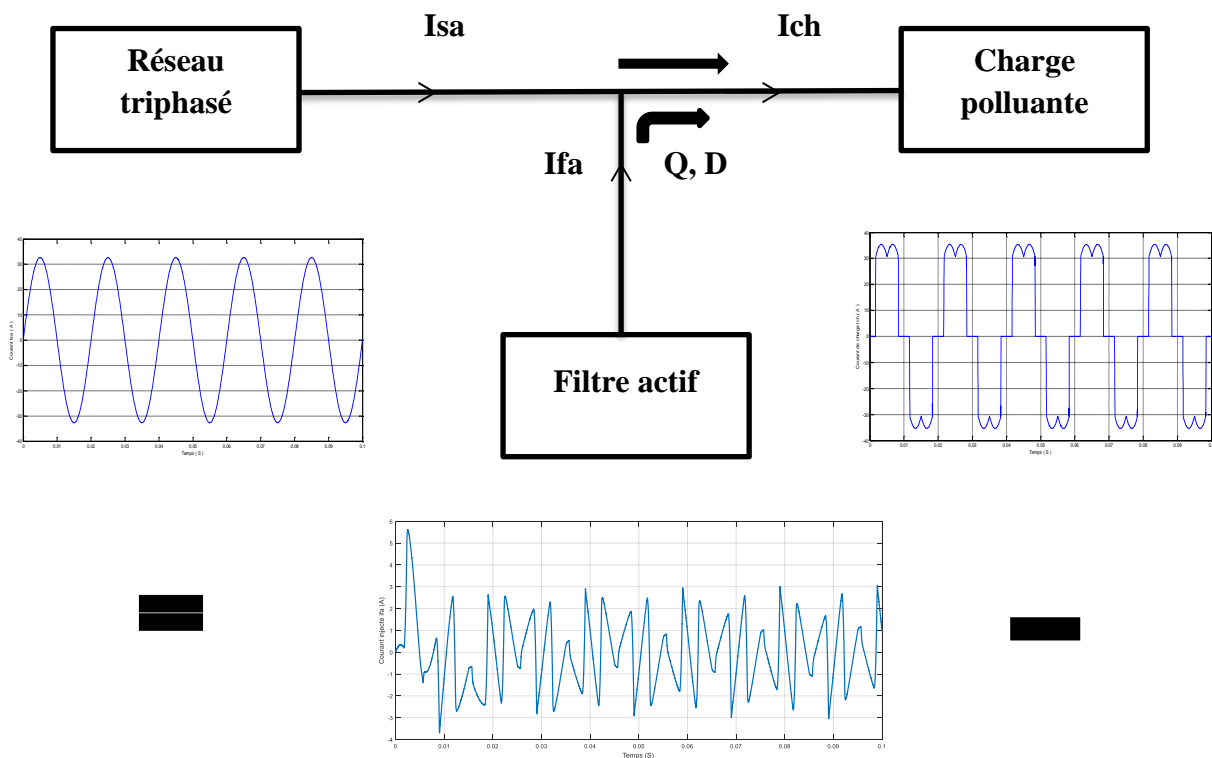


Figure III.2: Schéma de principe du filtre actif parallèle.

En pratique, on ne peut pas obtenir un courant de ligne purement sinusoïdal comme dans le cas idéal mais le but est d'avoir un courant qui sera le plus proche possible de la sinusoïde [13].

III.4 Structure générale d'un filtre actif parallèle :

On peut diviser un filtre actif parallèle en deux grandes parties comme le montre la figure (III.3) :

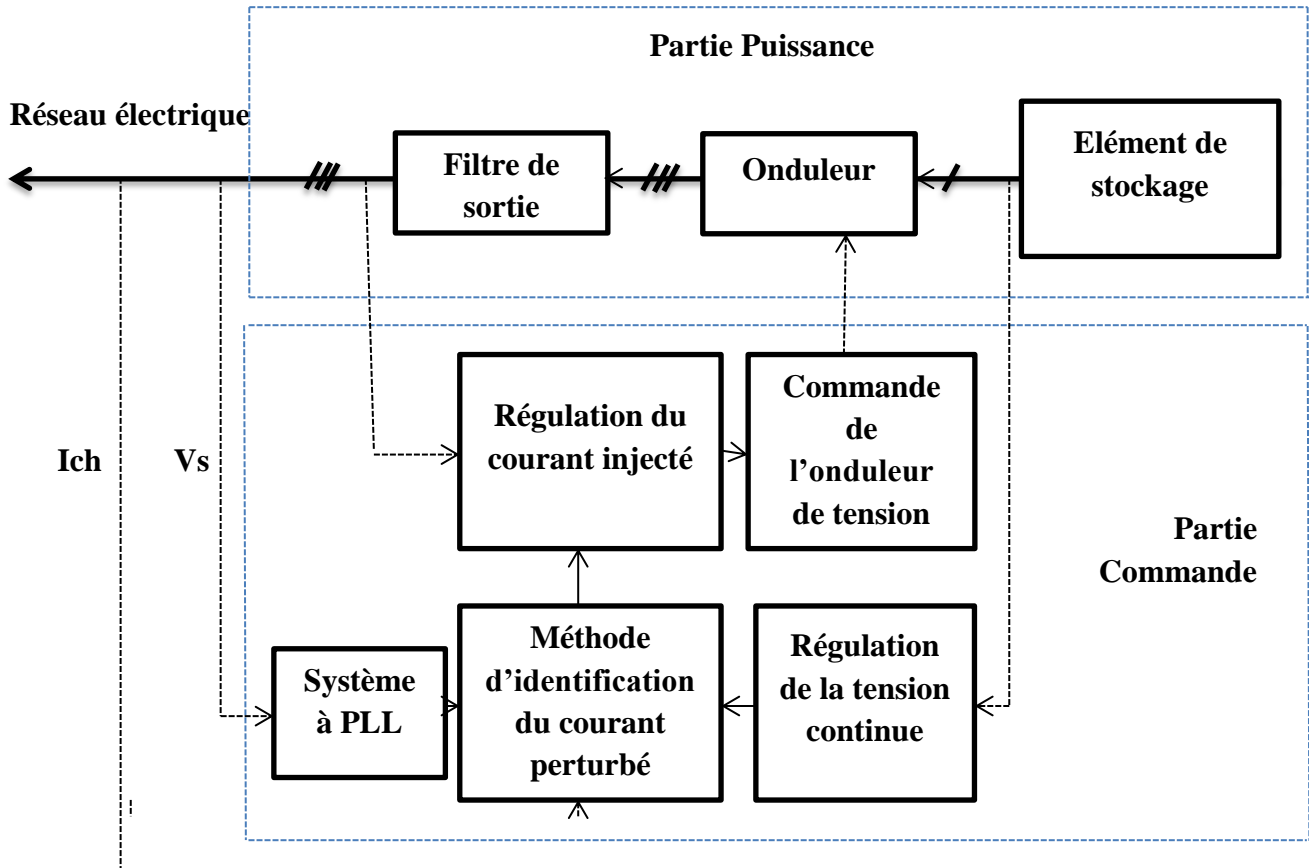


Figure III.3: Structure générale du filtre actif parallèle.

La partie puissance qui est constituée :

- D'un onduleur de tension ;
- D'un circuit de stockage d'énergie, souvent capacitif ;
- D'un filtre de sortie.

La partie commande qui est constituée :

- D'un circuit d'identification des courants perturbés ;
- D'un système à base PLL (boucle de verrouillage de phase) qui sera intégré dans la méthode d'identification des courant ;

- De la régulation de la tension continue appliquée aux éléments de stockage d'énergie ;
- De la régulation du courant injecté sur le réseau à partir de l'onduleur de tension.

III.4.1 Etude de la partie puissance :

III.4.1.1 Onduleur de tension triphasé à deux niveaux :

On appelle onduleur de tension, un onduleur alimenté par une source de tension continue c'est à dire par une source d'impédance interne négligeable sa tension V_{dc} n'est pas affectée par la variation du courant i qui le traverse. La source continue impose la tension à l'entrée de l'onduleur et donc à sa sortie [13].

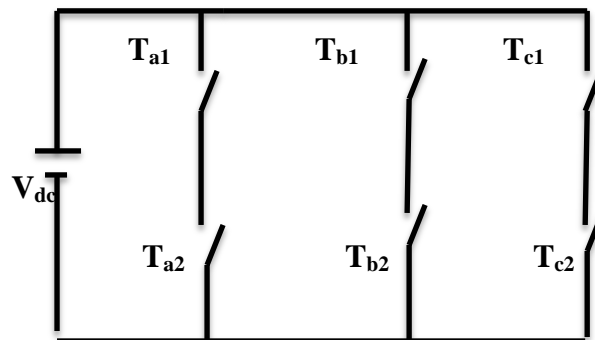


Figure III.4: Onduleur de tension.

On peut obtenir la tension triphasée en groupant trois demis ponts monophasés, Les trois bras de l'onduleur sont formés par six interrupteurs bidirectionnels en courant, qui sont des composants semi-conducteurs commandés à la fermeture et à l'ouverture (IGBT, MOSFET, GTO) comportant une diode en antiparallèle pour obtenir la réversibilité en courant. Cet onduleur est connecté au réseau électrique par un filtre dit de découplage [15].

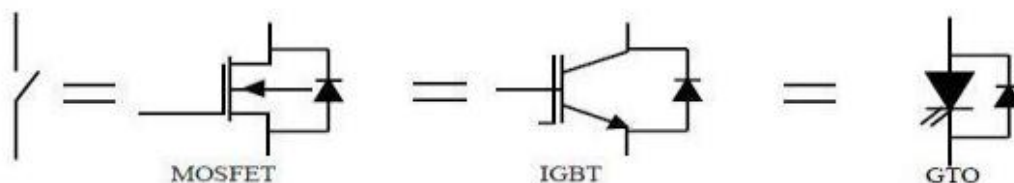


Figure III.5: Interrupteurs de puissance.

a) Tension générées par l'onduleur :

L'onduleur de tension deux niveaux délivre, en sortie, deux niveaux de tensions V_{dc} et 0, en fonction des états des interrupteurs. En théorie, nous commandons les deux semi-conducteurs d'un même bras de façon complémentaire, la conduction de l'un entraîne le blocage de l'autre. Avec cette hypothèse, l'ouverture et la fermeture des interrupteurs de l'onduleur de la Figure (III.6) dépendent de l'état des trois signaux de commande [13].

Pour chaque interrupteur T_{ki} ($K = a, b, c ; i = 1,2$), on définit une fonction de commutation S_{ki} :

$$S_{ki} = \begin{cases} 1 & \text{si } T_{ki} \text{ est fermé} \\ 0 & \text{si } T_{ki} \text{ est ouvert} \end{cases} \quad \text{(III.1)}$$

La complémentarité entre les deux interrupteurs de chaque bras impose l'équation suivante:

$$S_{k2} = 1 - S_{k1} \quad \text{(III.2)}$$

Les tensions triphasées de sortie par rapport à la référence de la source continue « o » peuvent être exprimées par :

$$\begin{bmatrix} V_{ao} \\ V_{bo} \\ V_{co} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{a1} \\ S_{b1} \\ S_{c1} \end{bmatrix} V_{dc} \quad \text{(III.3)}$$

Les tensions composées entre les phases sont données par :

$$\begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{ao} & -V_{bo} \\ V_{bo} & -V_{co} \\ V_{co} & -V_{ao} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{a1} & -S_{b1} \\ S_{b1} & -S_{c1} \\ S_{c1} & -S_{a1} \end{bmatrix} V_{dc} \quad \text{(III.4)}$$

Ainsi, on peut facilement exprimer les tensions simples V_k ($k = a, b, c$) en fonction des fonctions de commutation S_{ki} comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} V_{ab} & -V_{ba} \\ V_{bc} & -V_{cb} \\ V_{ca} & -V_{ac} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2S_{a1} & -S_{b1} & -S_{c1} \\ -S_{a1} & 2S_{b1} & -S_{c1} \\ -S_{a1} & -S_{b1} & 2S_{c1} \end{bmatrix} V_{dc} \quad \text{(III.5)}$$

Puisque les variables S_{c1} , S_{b1} et S_{a1} prennent chacune deux valeurs, il en résulte huit combinaisons de commande, qui sont présentées dans le Tableau (III.1) :

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

Cas	S _{a1}	S _{b1}	S _{c1}	V _a	V _b	V _c
0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	2(V _{dc} /3)	-(V _{dc} /3)	-(V _{dc} /3)
2	0	1	0	-(V _{dc} /3)	2(V _{dc} /3)	-(V _{dc} /3)
3	1	1	0	(V _{dc} /3)	(V _{dc} /3)	-2(V _{dc} /3)
4	0	0	1	-(V _{dc} /3)	-(V _{dc} /3)	2(V _{dc} /3)
5	1	0	1	(V _{dc} /3)	-2(V _{dc} /3)	(V _{dc} /3)
6	0	1	1	-2(V _{dc} /3)	(V _{dc} /3)	(V _{dc} /3)
7	1	1	1	0	0	0

III.4.1.2 Système de stockage de l'énergie :

Le stockage de l'énergie et la fourniture d'une tension continue V_{dc} sont les rôles du condensateur C. Le choix des paramètres du système de stockage n'est pas arbitraire car ils ont une influence sur la dynamique et la qualité de compensation du filtre actif parallèle [13].

En effet, le choix de la tension V_{dc} se répercute en grande partie sur le choix des interrupteurs (voir tableau (III.1)), et l'augmentation de V_{dc} améliore la dynamique du filtre actif, donc elle doit être choisie comme la plus grande tension tout en respectant les contraintes des interrupteurs. Le choix de C se fait de manière à ce que les ondulations de la tension V_{dc} causées par les courants engendrés par le filtre actif soient limitées, car plus ces ondulations sont importantes plus l'amplitude du courant du filtre est grande, sa fréquence est faible et sa qualité de compensation est dégradée.

Ainsi on peut estimer que seuls les premiers harmoniques sont pris en compte dans le choix des paramètres de stockage. Pour démontrer ceci la méthode la plus utilisée et la plus simple se base sur la mesure du courant harmonique I_h du rang le plus faible. La capacité C se calcule de la façon suivante [16] :

$$C = \frac{I_h}{\xi V_{dc} \omega_h} \quad \text{(III.6)}$$

Avec :

ω_h : La plus faible pulsation des harmoniques à compenser.

I_h : Le courant harmonique du rang h.

ξ : Taux d'ondulation généralement de l'ordre de 5% de V_{dc}.

III.4.1.3 Filtre de sortie :

Le filtre de sortie est un filtre passif composé d'une inductance L_f de résistance interne R_f généralement négligeable, utilisé pour connecter l'onduleur de tension au réseau électrique, il est dimensionné de manière à satisfaire les deux critères suivants [13] :

- Assurer la dynamique du courant :

$$\frac{d}{dt} ich = \frac{d}{dt} if \quad (\text{III.7})$$

Avec : ich le courant absorbé par la charge et if le courant du filtre actif.

- Empêcher les composantes dues aux commutations de se propager sur le réseau électrique [13].

III.4.2 Etude de la partie commande :

III.4.2.1 Stratégie de commande du filtre actif parallèle :

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

- Identification à partir de la détection du courant de la charge polluante.
- Identification à partir de la détection du courant de la source.
- Identification à partir de la détection de la tension de la source [17].

La première méthode est la plus utilisée pour le filtre actif parallèle pour compenser les courants perturbateurs causés par les charges polluantes. Cette méthode de détection sera employée dans cette étude.

a) Généralités sur les méthodes d'identification :

Dans la littérature, différentes méthodes d'identification des courants perturbés ont été développés [13], ces méthodes ont pour rôle d'améliorer les performances des systèmes classiques de dépollution des installations électriques. L'identification des composantes harmoniques se fait en général, soit dans l'espace des courants, soit dans l'espace des puissances [16].

Une des méthodes d'identification des plus anciennes est la transformée de Fourier rapide qui nécessite une grande puissance de calcul afin de réaliser toutes les transformations en temps réel [13]. Cette méthode est bien adaptée aux charges où le contenu harmonique varie lentement, son avantage est qu'elle offre la possibilité de sélectionner les harmoniques individuellement et de ne choisir de compenser que les plus prépondérants. Les deux autres méthodes d'identification en temps réel, les plus utilisées, basées sur le filtrage des signaux sont : la méthode de détection synchrone et la méthode des puissances instantanées, elles sont fondées sur le principe de la séparation du fondamental des harmoniques par filtrage [13].

1) Méthode des puissances instantanées :

La méthode des puissances instantanées n'est applicable que si la tension du réseau est parfaitement sinusoïdale et équilibrée [13] [18].

La première étape consiste à ramener la tension v_s de la source et les courants i_{ch} de la charge dans le repère de Concordia en utilisant la transformation de Concordia.

Cette transformation permet de passer d'un système triphasé à un système biphasé, ce qui simplifie les expressions mathématiques et réduit le coût d'implantation [13].

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{s1} \\ V_{s2} \\ V_{s3} \end{bmatrix} \quad (\text{III.8})$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{c1} \\ i_{c2} \\ i_{c3} \end{bmatrix} \quad (\text{III.9})$$

Les puissances instantanées réelle et imaginaire notées respectivement p et q , sont exprimés par la relation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_\alpha & V_\beta \\ -V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{III.10})$$

Chapitre III Etude, dimensionnement et régulation d'un filtre actif parallèle à deux niveaux

En remplaçant les tensions et les courants diphasés par leurs homologues triphasés, on trouve :

$$p = V_{\alpha} i_{\alpha} + V_{\beta} i_{\beta} = V_{s1} i_{c1} + V_{s2} i_{c2} + V_{s3} i_{c3} \quad (\text{III.11})$$

$$q = V_{\beta} i_{\beta} - V_{\alpha} i_{\alpha} = -\frac{1}{\sqrt{3}} [(V_{s1} - V_{s2})i_{c3} + (V_{s2} - V_{s3})i_{c1} + (V_{s3} - V_{s1})] \quad (\text{III.12})$$

Les composantes des puissances réelle et imaginaire instantanées s'expriment comme la somme d'une composante continue et d'une composante oscillatoires:

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{p} + \tilde{p} \\ \bar{q} + \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (\text{III.13})$$

Avec :

\bar{p}, \bar{q} : Les composantes continues de p et q.

\tilde{p}, \tilde{q} : Les composantes oscillatoires de p et q.

L'étape qui suit nous allons utiliser un filtre passe bas dans le but d'éliminé les composantes continue pour avoir seulement les composantes alternatif relatives aux composantes harmoniques recherché. L'ordre de ce filtre passe-bas définit la dynamique et l'efficacité de la méthode d'identification .Des filtres de puissance du cinquième ou huitième ordre ont été proposé .Dans notre étude, nous avants choisi un filtre passe-bas du deuxième ordre en vue de simplifier l'approche d'implantation numérique de ce dernier .En effet, un ordre plus élevé entrainerait des temps de calcul plus longs ce qui peut être préjudiciable dans notre étude. La relation suivante donne l'expression générale d'un filtre passe-bas du deuxième ordre [13]:

$$FBP(p) = \frac{\omega_n^2}{p^2 + 2\xi\omega_n p + \omega_n^2} \quad (\text{III.14})$$

Avec :

p: operateur de Laplace égale à $j\omega t$.

ω_n : fréquence propre du filtre, sa valeur égale à : 314 rad/s.

ξ : est le déplacement ou le coefficient d'amortissement, sa valeur égale a : 0.4.



Figure III.6: Schéma représentant le principe de séparation des puissances.

De l'équation (III.10), nous pouvons déduire les composantes de courant correspondantes :

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_\alpha & V_\beta \\ -V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (\text{III.15})$$

En introduisant (III.12) dans (III.13), les courants dans les axes α - β deviennent :

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{p} \\ \bar{q} \end{bmatrix} + \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (\text{III.16})$$

Suivant la fonction que nous donnons au filtre actif de puissance, nous pouvons compenser soit les harmoniques de courant et l'énergie réactive ou uniquement l'un des deux. Le tableau suivant résume les modes de compensations possibles.

Tableau III.2: Modes de compensation de la commande des puissances instantanées.

	Compensation des harmoniques de courant	Compensation de l'énergie réactive	Compensation des harmoniques et l'énergie réactive
Paramètre de contrôle	$p_f = \tilde{p}$ $q_f = \tilde{q}$	$p_f = 0$ $q_f = \bar{q}$	$p_f = \tilde{p}$ $q_f = q$

Si nous voulons par exemple compenser les harmoniques de courant, et l'énergie réactive l'équation (III.16) devient :

$$\begin{bmatrix} i_{f\alpha}^{ref} \\ i_{f\beta}^{ref} \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ q \end{bmatrix} \quad (\text{III.17})$$

Les courants harmoniques triphasés i_{fk}^{ref} ($k = 1, 2, 3$) sont obtenus à partir des courants diphasés $i_{f\alpha}^{ref}$ et $i_{f\beta}^{ref}$ par la transformation inverse de Concordia soit :

$$\begin{bmatrix} i_{f1}^{ref} \\ i_{f2}^{ref} \\ i_{f3}^{ref} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{f\alpha}^{ref} \\ i_{f\beta}^{ref} \end{bmatrix} \quad \text{(III.18)}$$

b) Système à base de PLL :

L'identification des courants perturbés se fait à partir d'une méthode de calcul basée sur l'exploitation des tensions du réseau $v_{s1,2,3}$ saines, c'est-à-dire sinusoïdales et équilibrées, et pour obtenir ces tensions, on utilise une boucle de verrouillage de phase ou PLL (Phase Locked Loop).

La PLL est la technique la plus répandue pour l'extraction de la composante fondamentale directe de la tension du réseau, son fonctionnement se base sur la transformation de Park pour passer au repère dq. Les tensions $v_{s1, 2,3}$ subissent dans un premier temps la transformation de Concordia dans le repère $\alpha\beta$. Les tensions ainsi obtenues $v_{\alpha, \beta}$ sont exprimés dans le repère de Park par une rotation, l'angle de cette rotation représente l'angle de la composante directe de la tension, il est issu de l'intégration de l'estimation de la pulsation déterminée par le régulateur, ainsi la PLL ne sera verrouillée que lorsque l'angle estimé est égal à l'angle de la tension directe [19].

c) Régulation de la tension continue :

L'objectif de régulation d'éliminer sinon de réduire l'erreur entre le signal de référence et le signale mesuré. Le tableau (III.3) récapitule les critères qui définissent les qualités d'une bonne régulation [20].

Tableau III.3: Critères et définition d'une bonne qualité de régulation.

Critères	Définition
Stabilité	Elle doit toujours converger vers un point d'équilibre stable, et ne doit pas osciller autour du point de consigne.
Précision	Maintenue en permanence au plus près de la consigne.
Rapidité	Atteindre le point d'équilibre en prenant le moins de temps possible.

La source d'alimentation du filtre n'est pas une source de tension autonome mais une capacité qui se charge et se décharge. La tension aux bornes de cette dernière n'est pas constante. Si aucun échange de puissance active n'existe entre la capacité et le réseau, cette dernière sera considérée comme un réservoir pour la circulation des harmoniques. Les principales causes d'échange de puissance et qui sont susceptibles de modifier cette tension sont [21] [22] [23] :

- L'injection des courants fondamentaux pendant les régimes transitoires de la charge polluante,
- Les pertes de commutation et par conduction des interrupteurs de puissance,
- Les pertes par effet Joule dans les composants passifs L et C.

1) Régulation proportionnel intégral (PI) :

La régulation de la tension de source continue est usuellement faite par des correcteurs de type proportionnel intégral (PI). La fonction de transfert de ce régulateur est définie par :

$$K_p + \frac{K_i}{s} \quad \text{(III.19)}$$

La référence est générée par le correcteur PI comme suit :

- Pour une régulation par courant :

$$I_{dc} = K_p(V_{dc-ref} - V_{dc}) + K_i \int (V_{dc-ref} - V_{dc}) dt \quad \text{(III.20)}$$

- Pour une régulation par puissance:

$$P_{dc} = K_{pdc}(V_{dc-ref} - V_{dc})^2 + K_{idc} \int (V_{dc-ref} - V_{dc})^2 dt \quad \text{(III.21)}$$

K_p , k_i , k_{pdc} , et k_{idc} sont les termes proportionnel et intégral du correcteur PI.

Les gains proportionnel et intégral sont déterminés à partir de l'étude de la fonction de transfert en boucle fermée schématisée sur les figures (III.7 et III.8).

- Régulation par I_{dc} :

La tension aux bornes de la capacité du bus continu est :

$$V_{dc} = \frac{1}{C_{dc}} \int I_{dc} dt \quad (\text{III.22})$$

En appliquant la transformé de Laplace on trouve :

$$V_{dc} = \frac{1}{sC_{dc}} I_{dc} \quad (\text{III.23})$$

La fonction de transfert du système en boucle ouverte est :

$$\frac{1}{sC_{dc}} \quad (\text{III.24})$$

La fonction de transfert en boucle fermée s'écrit comme suit :

$$G_{BF} = \frac{\left(1 + \frac{K_p s}{K_i}\right) \frac{K_i}{C_{dc}}}{s^2 + \frac{K_p}{C_{dc}} s + \frac{K_i}{C_{dc}}} \quad (\text{III.25})$$

L'expression générale d'une fonction de transfert du second ordre est :

$$G_{BF} = \frac{\left(1 + \frac{K_p s}{K_i}\right) \omega_c^2}{s^2 + 2\xi \omega_c s + \omega_c^2} \quad (\text{III.26})$$

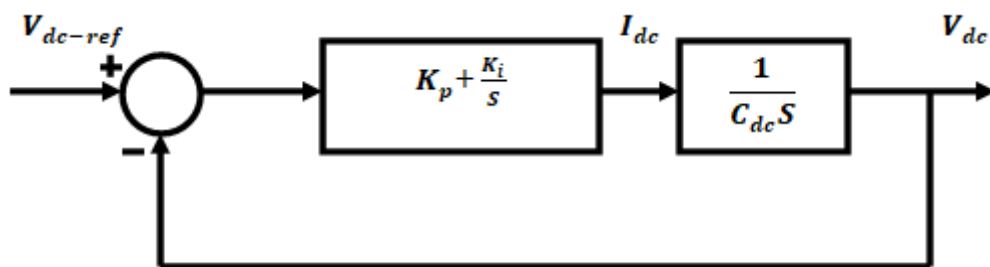


Figure III.7: Boucle de régulation de la tension du bus continue avec I_{dc} .

Après identification de cette dernière équation avec l'équation (III.25) on trouve :

$$K_i = \omega_c^2 C_{dc} \text{ et } K_p = 2\xi \sqrt{K_i} C.$$

- Régulation par P_{dc} :

Si on néglige les pertes au niveau de l'onduleur et dans le filtre de sortie, la relation entre la puissance absorbée par le condensateur et la tension à ses bornes peut s'écrire sous la forme suivante :

$$P_{dc} = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} C_{dc} V_{dc}^2 \right) \quad \text{(III.26)}$$

En appliquant la transformation de Laplace sur cette relation, on obtient :

$$P_{dc} = \frac{1}{2} S C_{dc} V_{dc}^2(S) \quad \text{(III.27)}$$

Le carré de la tension aux bornes du condensateur est donnée par :

$$V_{dc}^2 = \frac{2P_{dc}(S)}{C_{dc}S} \quad \text{(III.28)}$$

A partir de la relation (III.28) et en tenant compte du régulateur PI, la boucle de régulation de tension continue peut être représentée par la figure (III.8).

A partir de la figure (III.8), la fonction de transfert représentant la régulation en boucle fermée de la tension continue est donnée par :

$$G_{BF} = \frac{1 + \frac{K_{Pdc}S}{K_{idc}}}{s^2 + 2\frac{K_{Pdc}S}{C_{dc}} + 2\frac{K_{idc}}{C_{dc}}} \quad \text{(III.29)}$$

Comparant cette équation avec la forme générale d'une fonction de transfert de deuxième ordre, on trouve : $K_{idc} = \frac{1}{2} C_{dc} \omega_{dc}^2$ et $K_{Pdc} = \xi \sqrt{2C_{dc}K_{idc}}$ tel que : $\omega_{dc} = 2\pi f_c$

Pour un compromis entre temps de réponse et dépassement on prend $\xi = 0.707$ et pour un bon filtrage des harmoniques de la tension de boucle on prend $f_c = 30$ Hz.

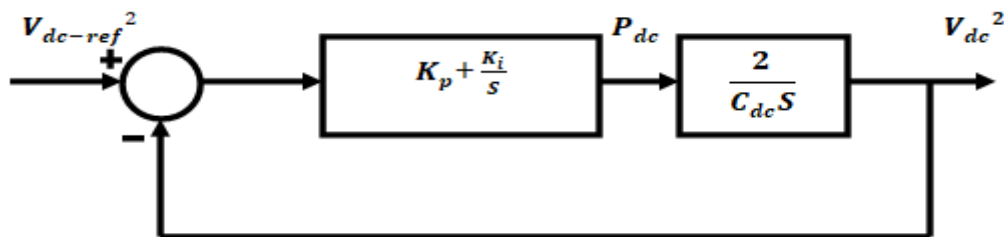


Figure III.8: Boucle de régulation de la tension du bus continue avec P_{dc} .

La sortie du régulateur de tension s'ajoute à la composante active harmonique et donne lieu à un courant actif supplémentaire (cas des méthodes SRF) ou une puissance active (cas des méthodes PQ) permettant de corriger la tension continue V_{dc} [24].

d) Commande de l'onduleur :

Le but de la commande de l'onduleur est de permettre la meilleure reproduction des courants de référence, à travers les ordres de commande appliqués aux interrupteurs de puissance. Les deux principales familles de commande des convertisseurs statiques sont [17]:

- La commande par hystérésis.
- La commande par modulation de largeur d'impulsion MLI.

1) Commande des courants par hystérésis :

La commande par hystérésis, appelée aussi commande en tout ou rien, est une commande non linéaire qui utilise l'erreur existant entre le courant de référence et le courant produit par l'onduleur, cette erreur est comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis [17].

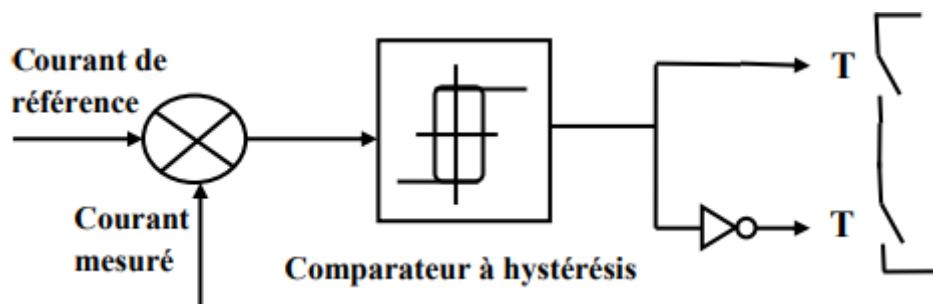


Figure III.9: Principe de commande par hystérésis [25].

Dès que l'erreur atteint la bande inférieure ou supérieure, un ordre de commande de manière à rester à l'intérieur de la bande est donné. La simplicité, comme le montre la figure (III.9), est le principal avantage de cette technique. En revanche, les commutations évoluant librement à l'intérieur de la bande d'hystérésis, on ne peut pas maîtriser correctement le spectre haut fréquence dû aux fréquences de commutations. Ce problème peut être résolu par une autre stratégie de commande qui peut être proposée à savoir la

commande par hystérésis modulée. Mais dans cette stratégie de commande, il est difficile de définir la largeur de la bande d'hystérésis [17].

2) Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI) :

Pour résoudre les problèmes précédents, nous introduisons une deuxième famille de commande de l'onduleur, c'est la technique de commande par MLI, qui permet de résoudre le problème de la maîtrise de la fréquence de commutation. La plus simple et la plus connue des modulations de largeur d'impulsion est sans doute la MLI à échantillonnage naturel. Cette technique de commande met en œuvre d'abord un régulateur qui détermine la tension de référence de l'onduleur à partir de l'écart entre le courant mesuré et sa référence [26]. Cette dernière est ensuite comparée avec un signal triangulaire (porteuse à fréquence élevée fixant la fréquence de commutation). La sortie du comparateur fournit l'ordre de commande des interrupteurs. Le schéma de principe est donné par la figure (III.10).

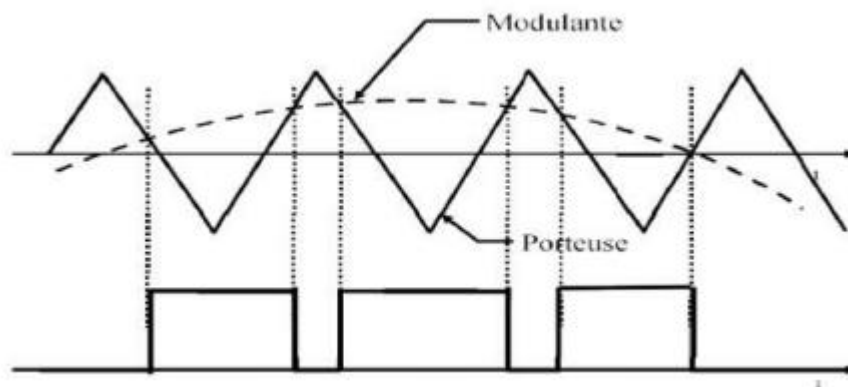


Figure III.10: Principe de commande des courants par MLI [25].

- Principe de MLI sinus-triangle (MLI-ST) :

Le signal de commande des interrupteurs est généré à partir de la comparaison du signal de référence sinusoïdal, de fréquence ($f_r = \frac{1}{T_r}$) et du signal de modulation triangulaire ou la porteuse de fréquence ($f_p = \frac{1}{T_p}$).

Deux paramètres caractérisent la commande :

- L'indice de modulation : $m = \frac{T_p}{T_r}$ avec $m \gg 1$.

- Le coefficient de réglage : $r = \frac{V_{rmax}}{V_{pmax}}$ généralement reste compris entre 0 et 1.

III.5 Simulation numérique sous Matlab Simulink :

Dans cette partie, nous présenterons les résultats de simulation obtenus par la méthode d'identification de courant de référence précédemment étudiée (**puissances instantanées**), à savoir la théorie pq.

La charge polluante est constituée par un pont redresseur triphasé à diodes et le réseau d'alimentation est un réseau triphasé. Le réseau d'alimentation est modélisé par phase par une f.é.m. sinusoïdale en série avec une inductance (L_s) et une résistance (R_s) caractérisant l'impédance de court-circuit du réseau. Le redresseur débite dans une charge ($R_{ch} L_{ch}$). L'inductance (L_c) et la résistance (R_c) à l'entrée du redresseur modélisent l'impédance de ligne et les éventuelles inductances additionnelles mises en œuvre pour limiter les variations de courant. Un filtre actif parallèle triphasé à structure tension, Pour la commande de l'onduleur du filtre actif parallèle, nous avons utilisé la commande par hystérésis.

III.5.1 Résultats de simulation et interprétation sans filtrage :

Modèle de simulation pour voir les paramètres de simulation allée à l'annexe (A).

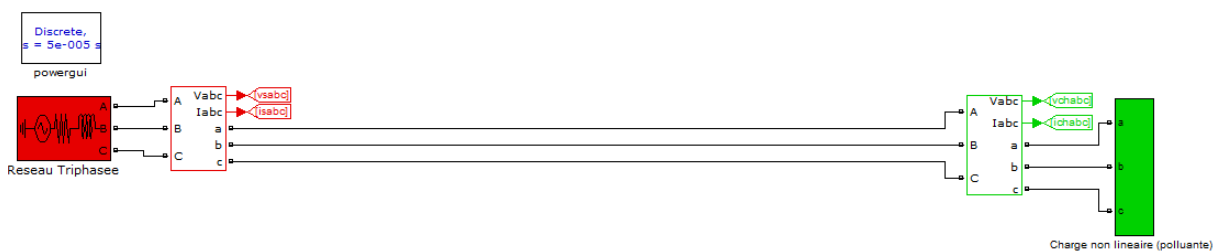


Figure III.11: Schéma du système sans filtrage.

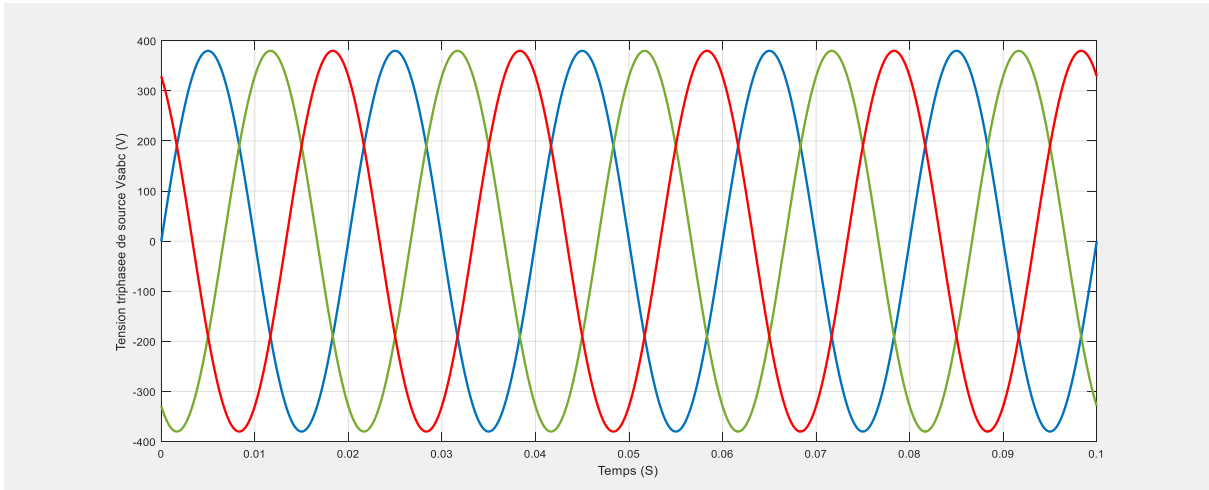


Figure III.12: Tension de source V_{sabc} .

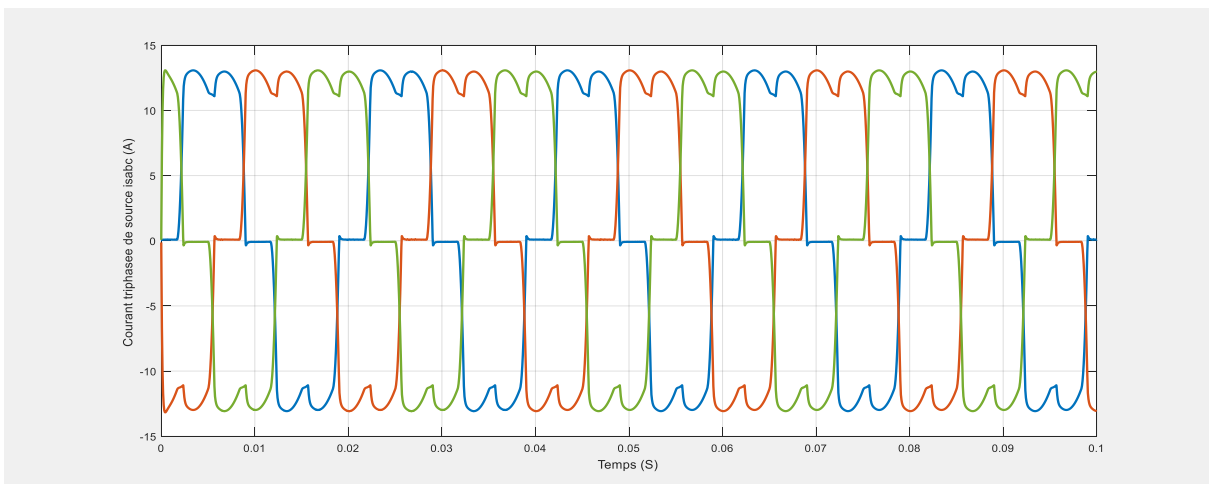


Figure III.13: Courant de source i_{sabc} .

On remarque que la tension au niveau de la source est purement sinusoïdale mais a la présence de la charge non linéaire, le courant circulant au réseau devient perturbé.

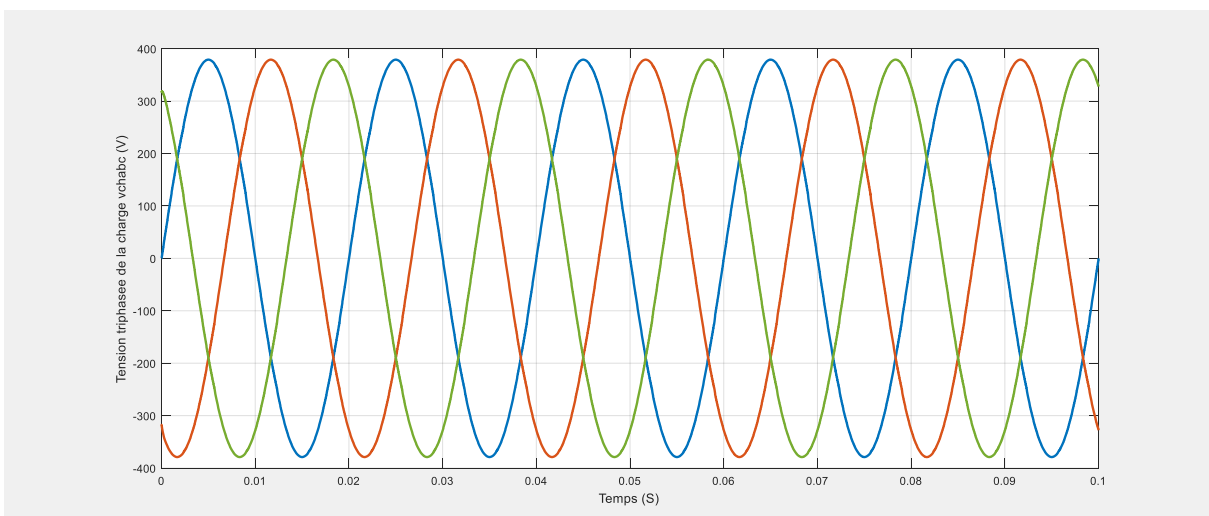


Figure III.14: Tension de charge V_{chaabc} .

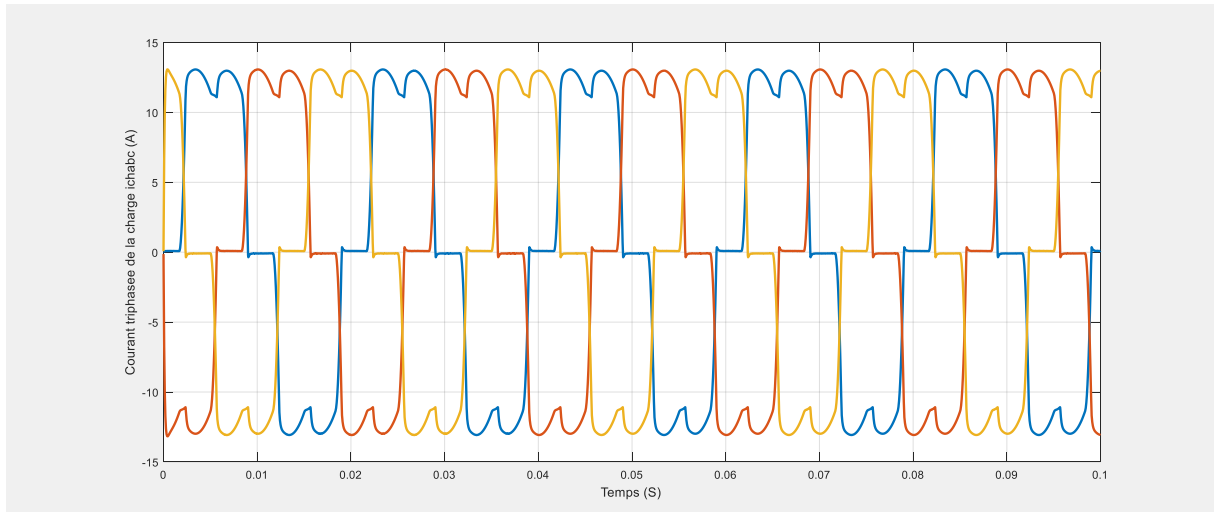


Figure III.15: Courant de charge ichabc.

On remarque que la tension au niveau de la charge est purement sinusoïdale mais le courant circulant à la charge est perturbé.

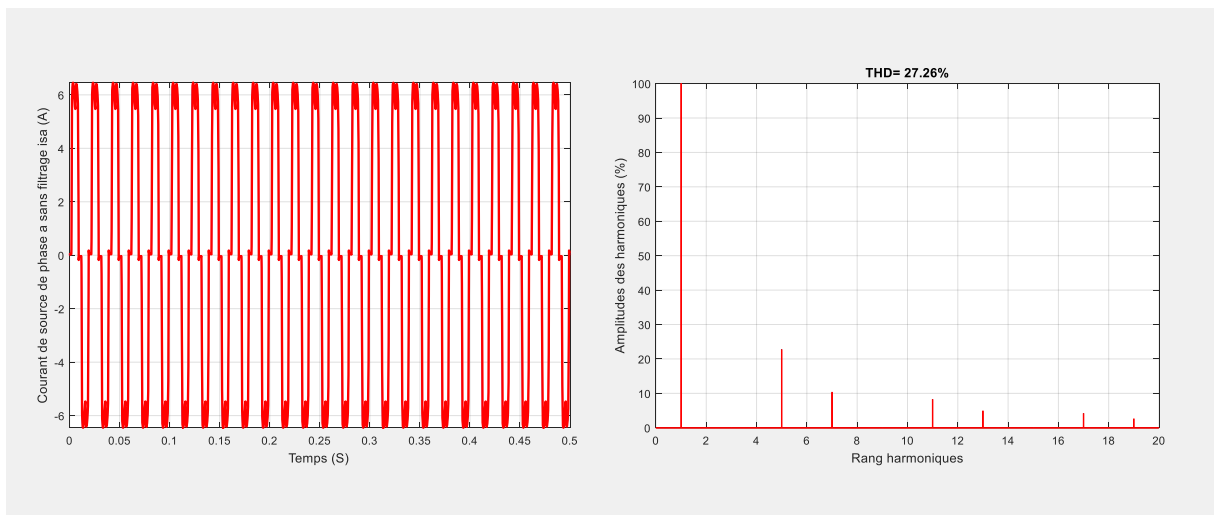


Figure III.16: Courant de source de la phase a isa et son Spectre harmonique.

On remarque que le spectre harmonique est plein d'harmonique.

La charge non linéaire génère des courants non sinusoïdaux qui provoquent La pollution du réseau étudié; En effet, on constate des déformations dans l'onde du courant de source qui perd sa forme sinusoïdale.

III.5.2 Simulation de l'ensemble réseau-filtre actif (commande d'ordre entier)-charge polluante :

Le régulateur PI classique qui est présenté par sa fonction de transfert $G_s(s)$ ce dernier est utilisé dans notre système de filtrage pour stabiliser la tension de V_{dc} .

Les valeurs des paramètres K_p et K_i utilisés pour le régulateur PI ont été définies par la méthode classique de calcul Nicol Ziegler. $K_p=0.1$, $K_i=1$.

Modèle de simulation pour voir les paramètres de simulation allée à l'annexe (A).

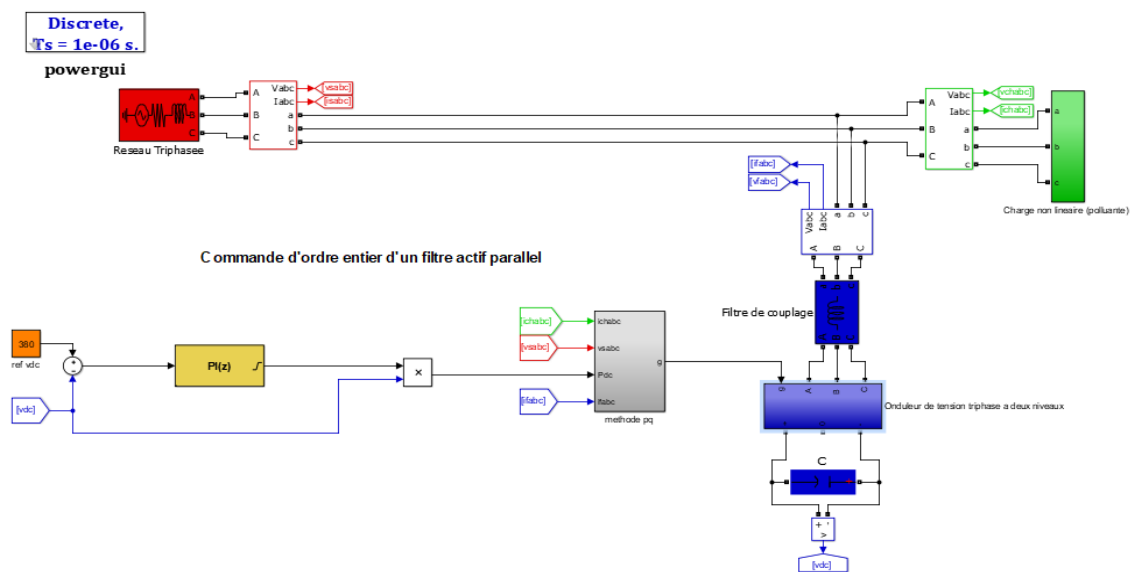


Figure III.17: Réseau électrique alimente une charge non linéaire avec FAP à commande par hystérésis.

- Block méthode pq :

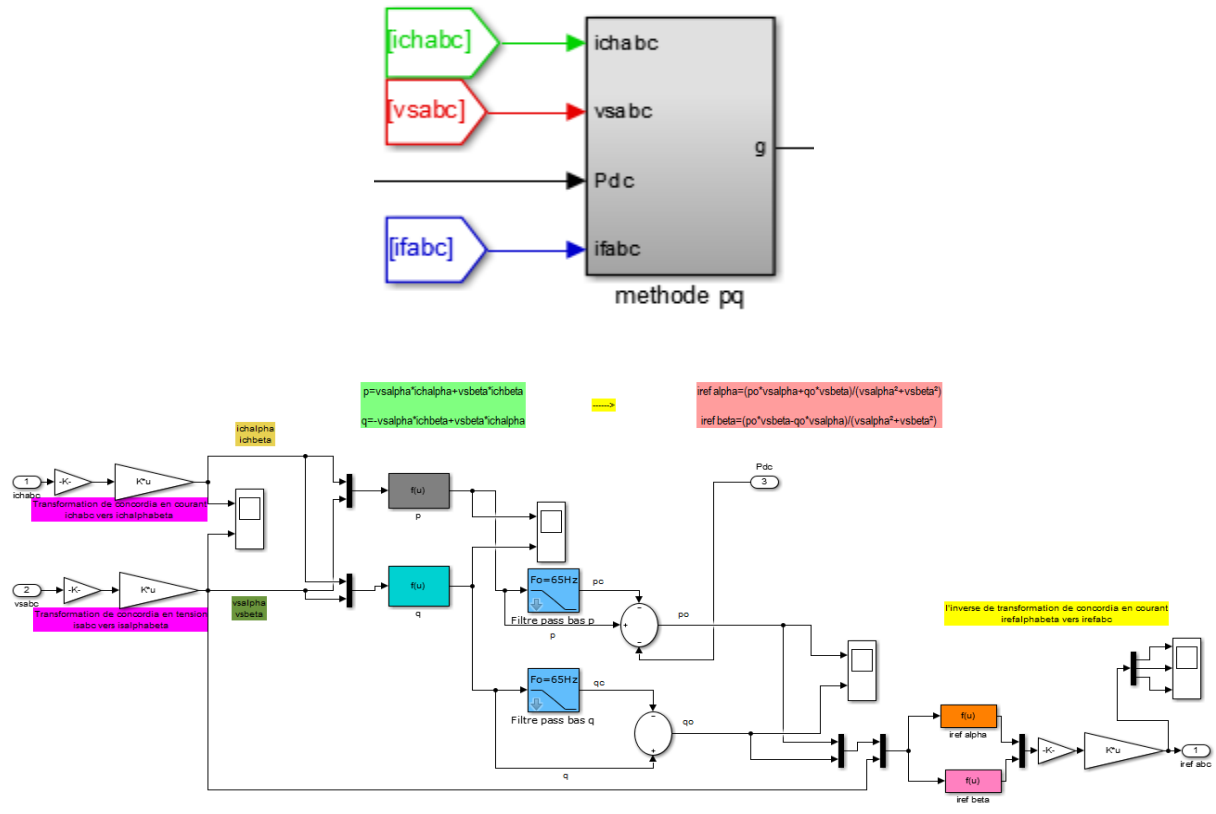


Figure III.18: La méthode d'identification des puissances instantanées pq.

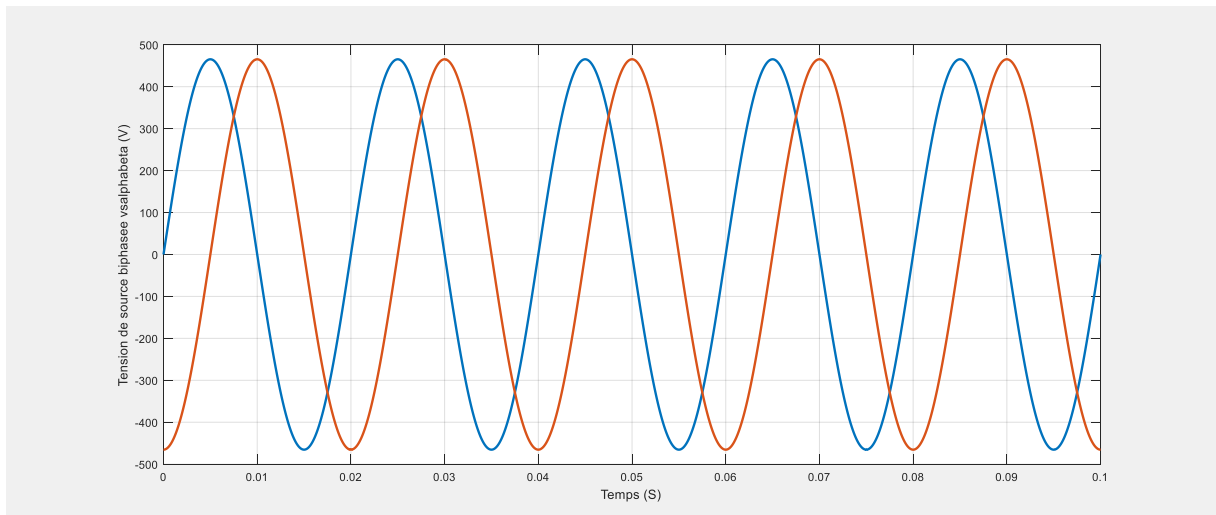


Figure III.19: Tension de source après transformée de concordia.

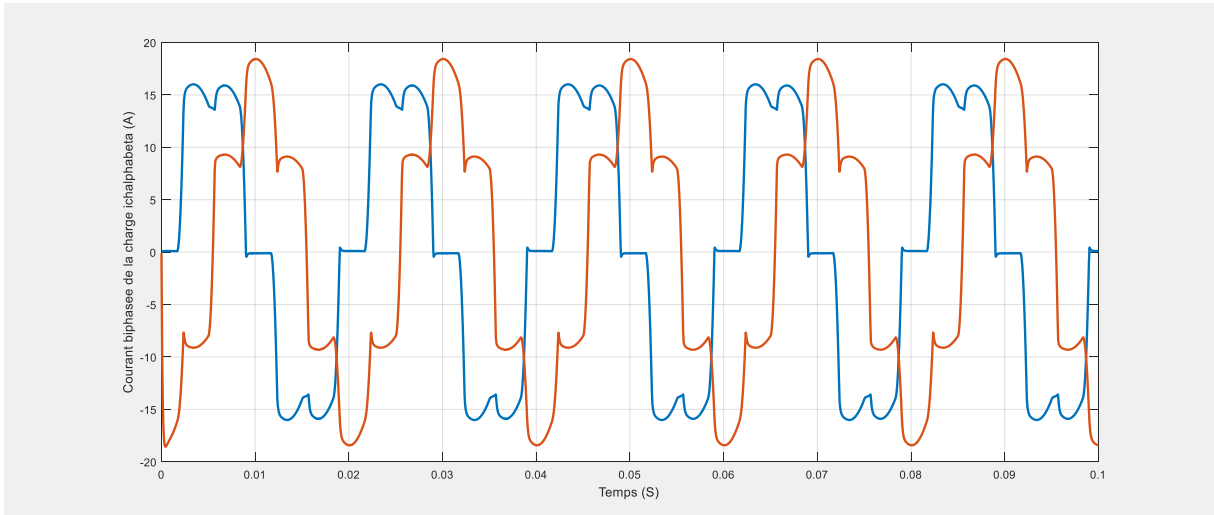


Figure III.20: Courant de charge après transformé de concordia.

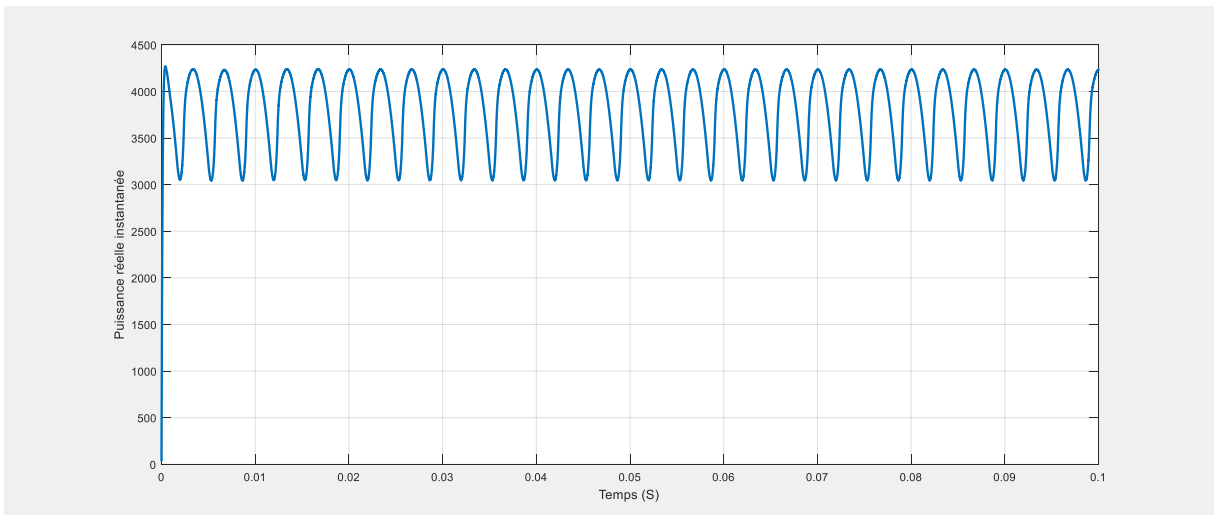


Figure III.21: Puissance réelle instantanée.

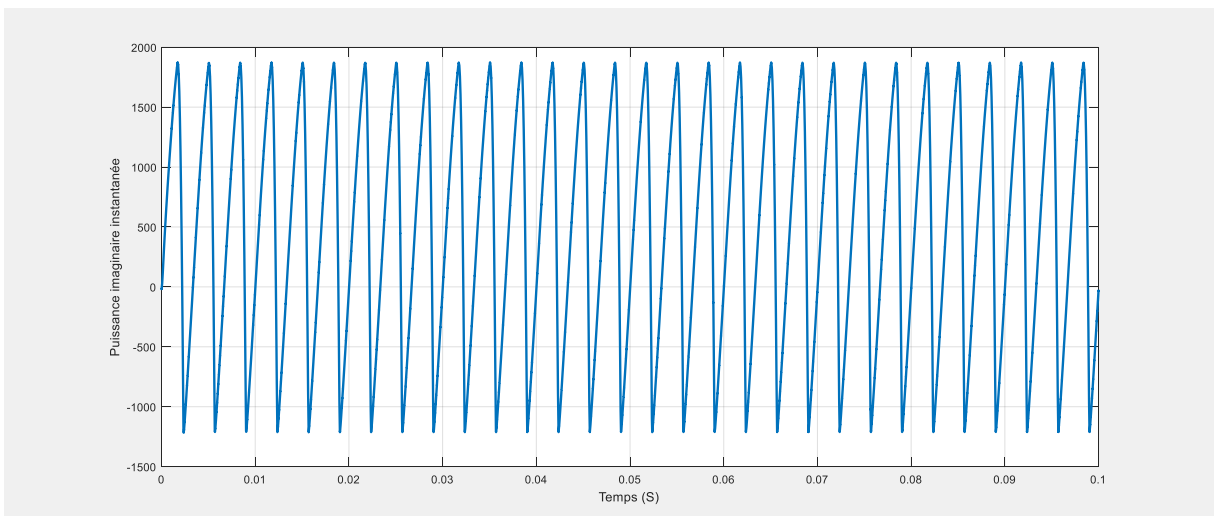


Figure III.22: Puissance imaginaire instantanée.

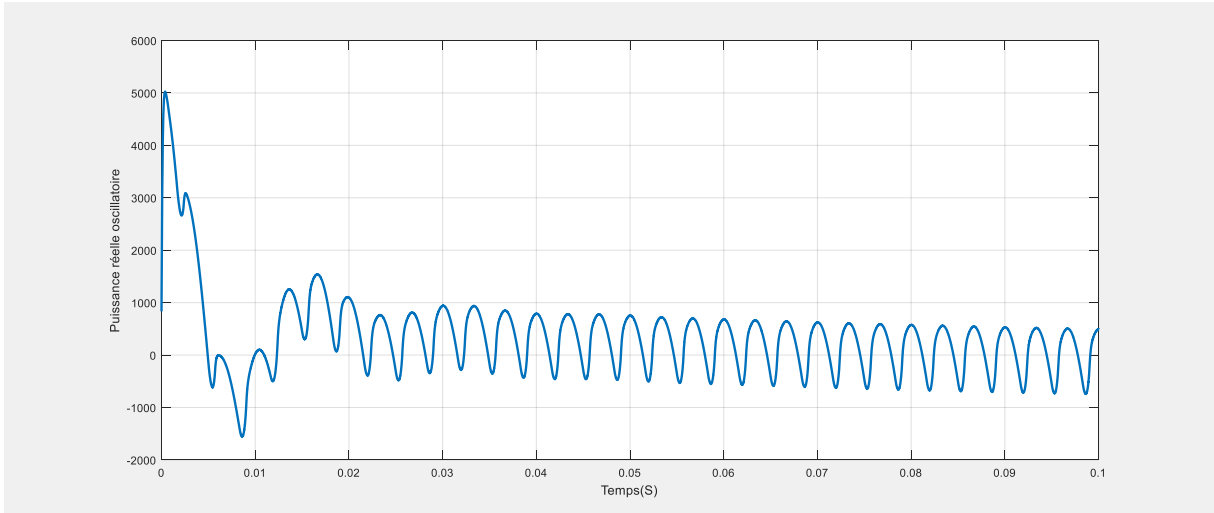


Figure III.23: Puissance réelle oscillatoire.

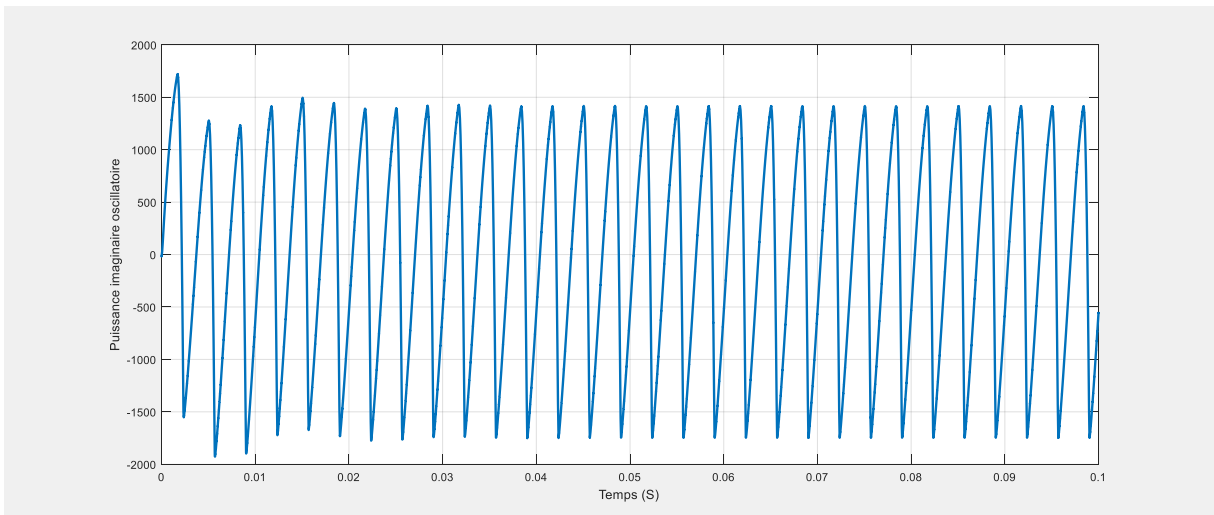


Figure III.24: Puissance imaginaire oscillatoire.

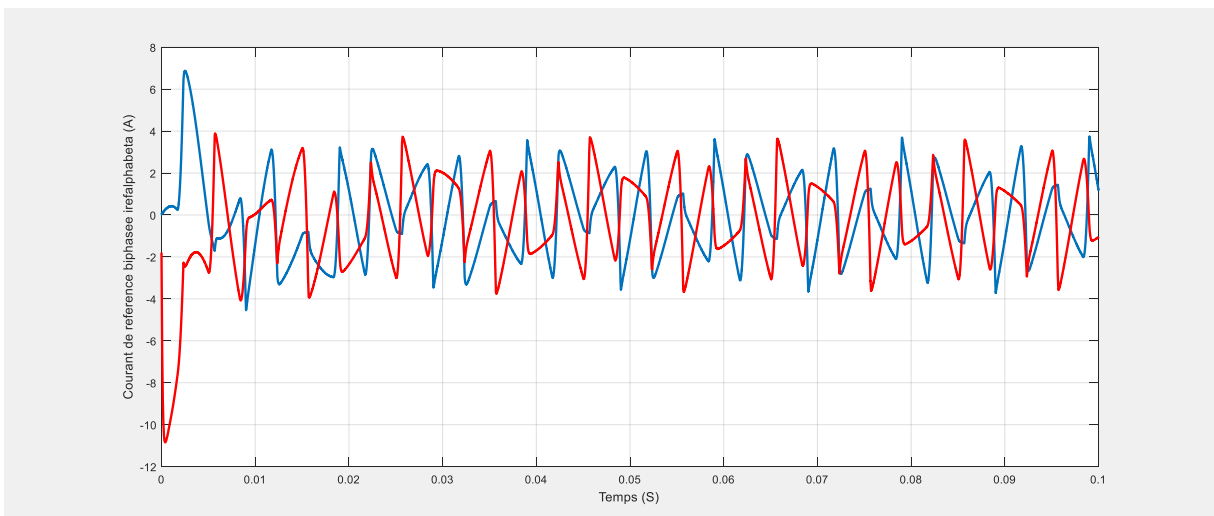


Figure III.25: Courant de référence biphasé.

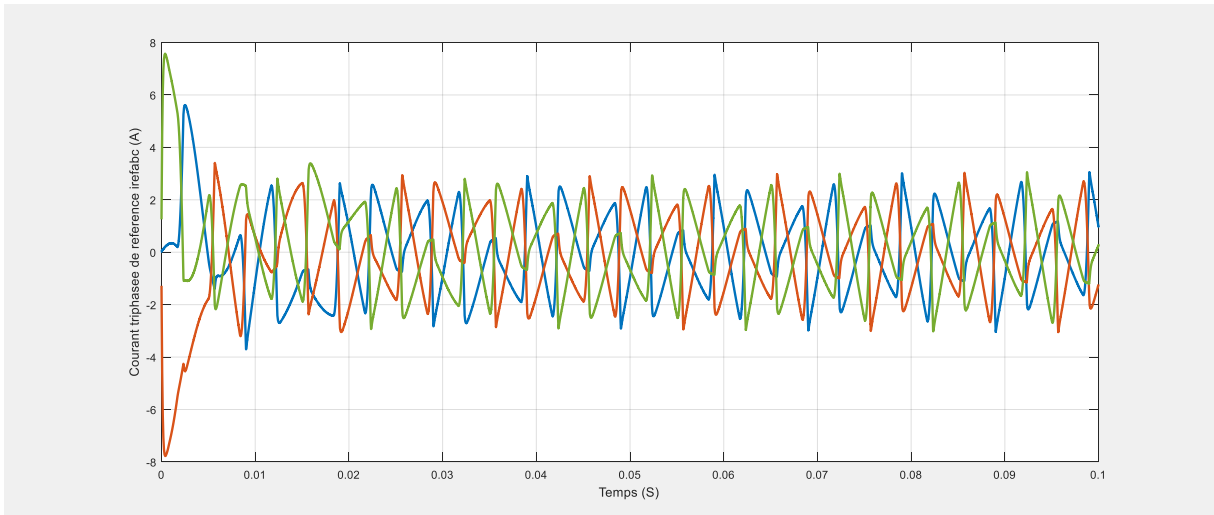


Figure III.26: Courant de référence triphasé.

- Block méthode pq et le comparateur a hystérésis.

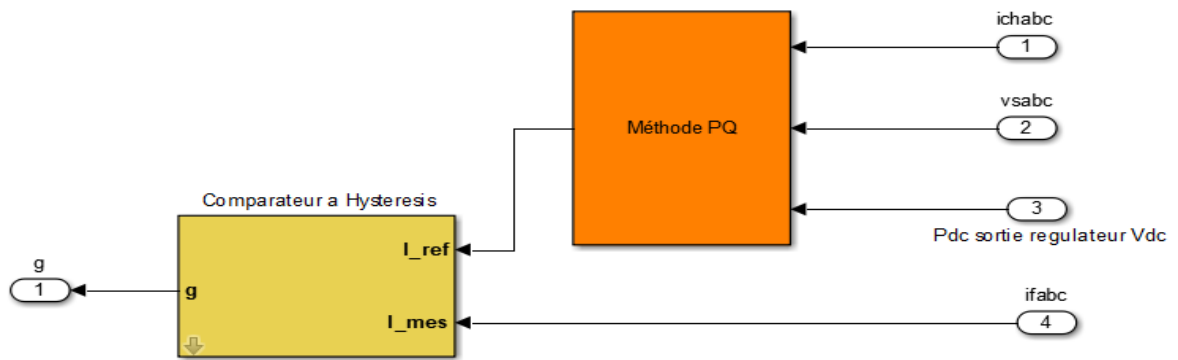


Figure III.27: Méthode pq et comparateur a hystérésis.

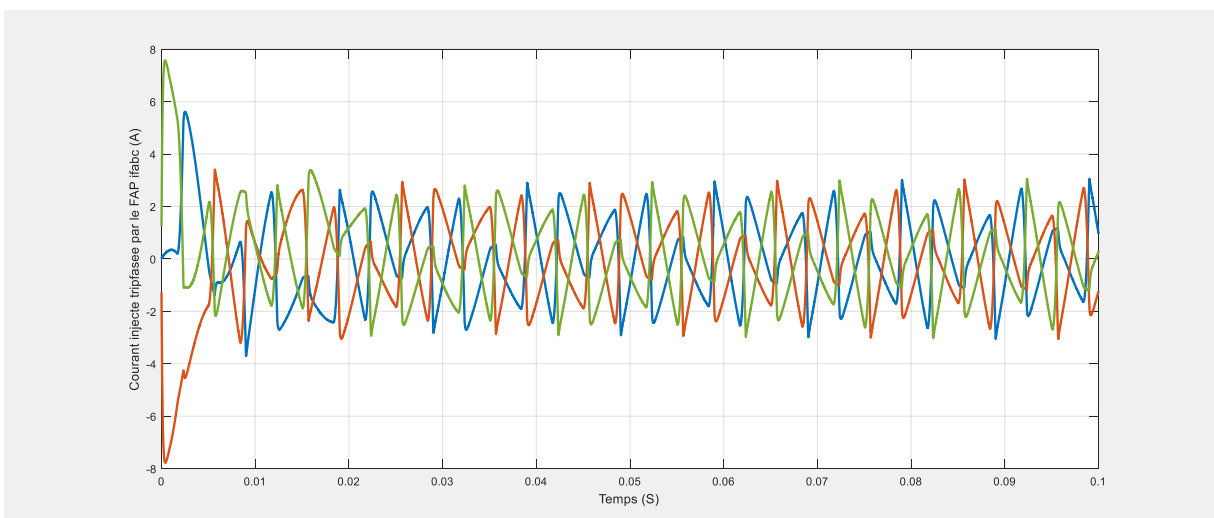


Figure III.28: Courant injecté par le FAP triphasé.

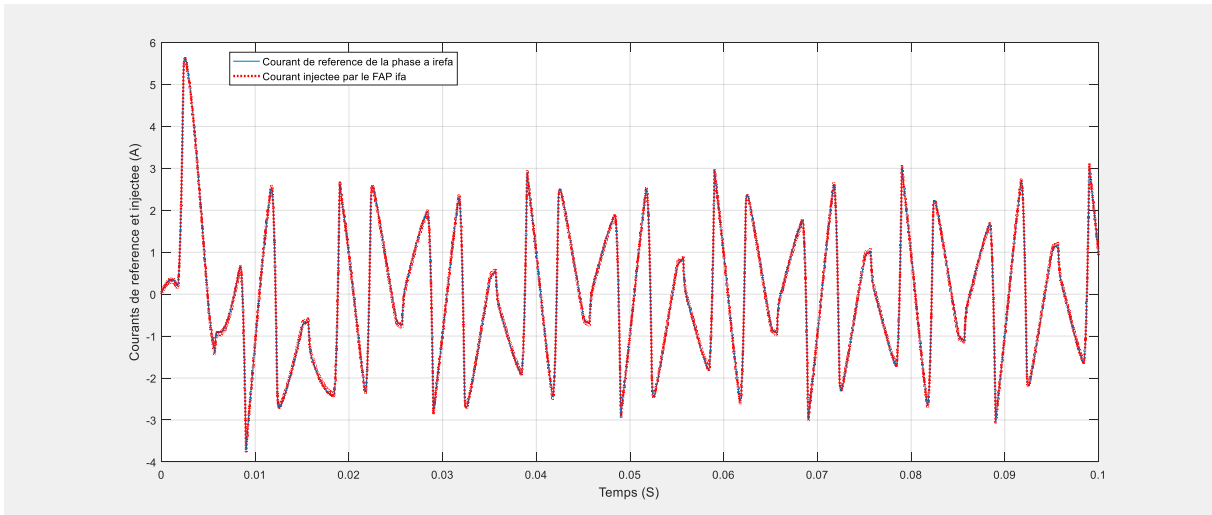


Figure III.29: Courants de référence irefa et injecté par le FAP ifa.

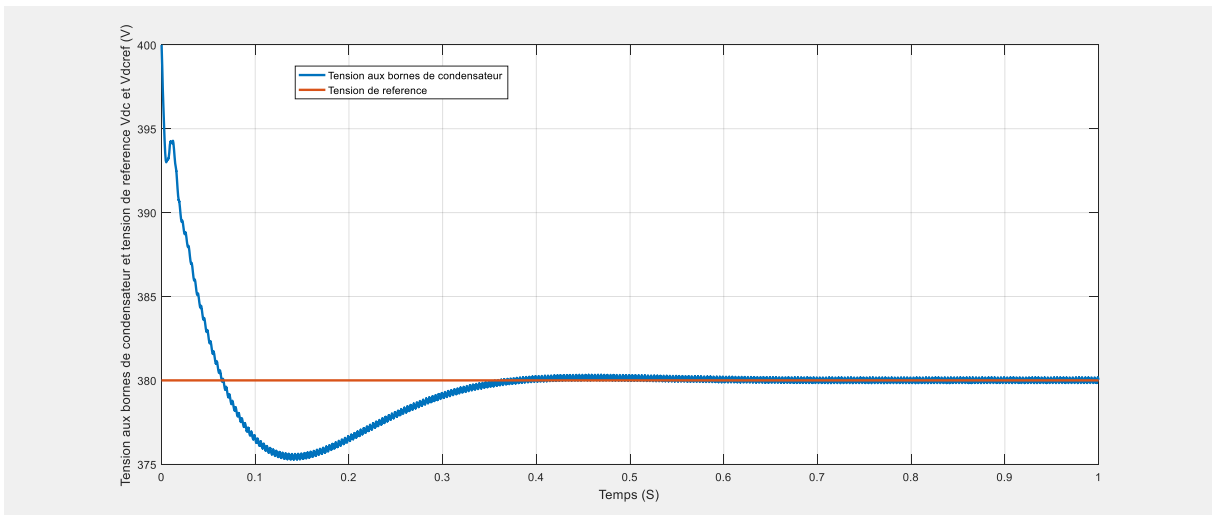


Figure III.30: Tension aux bornes de condensateur et tension de référence Vdc et Vdcref.

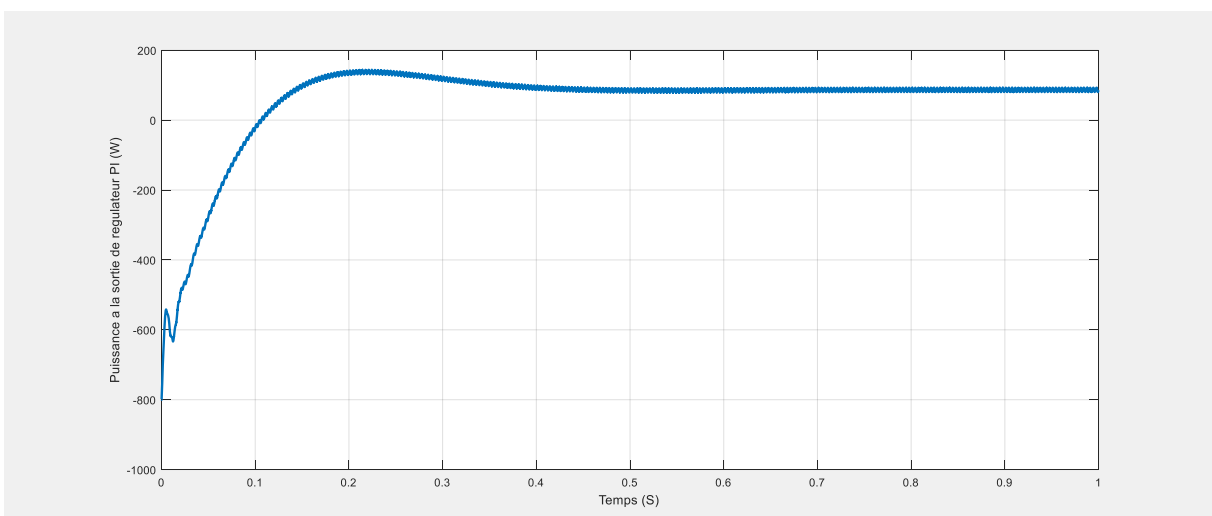


Figure III.31: Puissance à la sortie de régulateur PI.

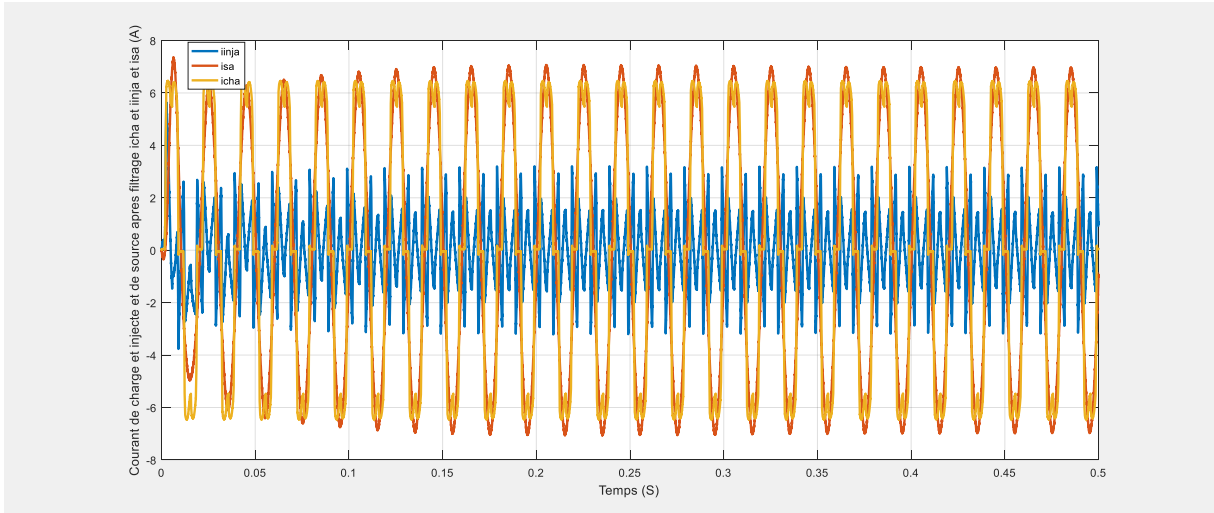


Figure III.32: Courant de charge et courant injecté par le FAP et de source après filtrage.

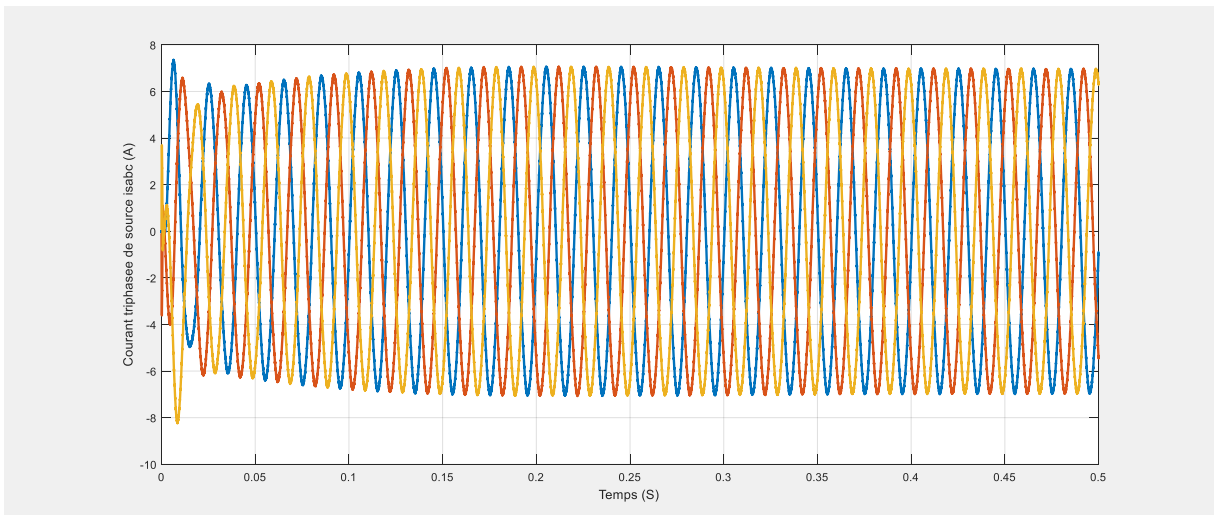


Figure III.33: Courant de source triphasé après filtrage.

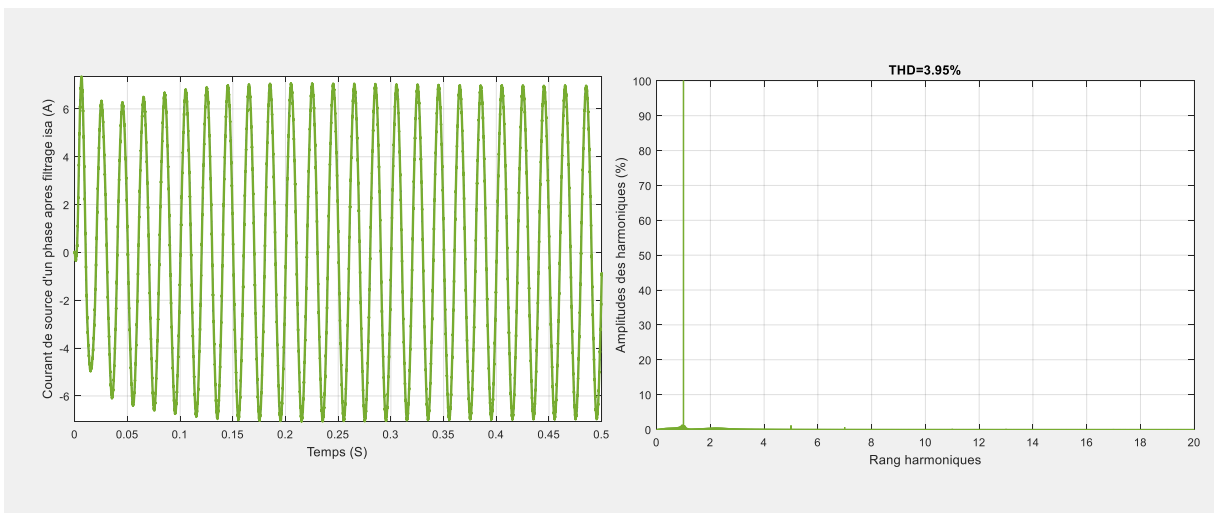


Figure III.34: Courant de source isa après filtrage et son spectre harmonique.

Tableau III.4: Amplitudes des harmoniques avant et après le filtrage.

Rang d'harmonique	H5	H7	H11	H13	H17	H19
Amplitude avant le filtrage (%)	22,67	10,29	8,16	4,85	4,08	2,56
Amplitude après le filtrage (%)	1,11	0,55	0,09	0,07	0,02	0,01

La figure (III.16), représente la forme d'onde des courants de la source avant le filtrage et son analyse spectrale obtenus avec un filtre actif parallèle deux niveaux. On remarque une distorsion des courants ce qui rend la présence des harmoniques (THD(%)=27,26 %) dans le réseau.

La figure (III.34): Représente la forme d'onde des courants de la source après le filtrage et son analyse spectrale. On remarque que la forme du courant de source est considérablement amélioré, les ondulations ont nettement diminué et le taux de distorsion harmonique (THD (%)=3,95%).

La tension de bus continu suit sa référence correctement.

III.6 Conclusion :

Dans, ce chapitre, nous avons présenté l'étude et la commande d'un filtre actif parallèle à deux niveaux de type tension, comme une solution de dépollution des réseaux électriques des courants harmonique. Les résultats obtenus montrer une diminution des perturbations générées par la charge non linéaire, ce qui confirme l'efficacité de la méthode des puissances active et réactive instantanées pq utilisé pour l'identification des courants harmoniques. Cependant, en vue d'améliorer d'avantage la compensation et les performances spectrales de la forme d'onde du courant, on propose de passer d'une autre méthode de commande qui est la commande d'ordre fractionnaire dans le quatrième chapitre.

Chapitre IV

IV.1 Introduction :

Le calcul d'ordre fractionnaire est un domaine des mathématiques qui traite des dérivés et intégrales des ordres non entiers, en d'autres termes il s'agit d'une généralisation du calcul traditionnel qui conduit à des concepts et des outils similaires mais avec une application beaucoup plus large. Dans les deux dernières décennies le calcul fractionnaire a été redécouvert par les scientifiques et les ingénieurs et a été appliqué dans un nombre croissant de domaines notamment dans le domaine de la théorie de la commande. Le succès des contrôleurs d'ordre fractionnaire est incontestable avec beaucoup de succès en raison d'émergence de méthodes efficaces dans la différenciation et l'intégration des équations d'ordre non entier [27].

Pour cela on va utiliser dans ce chapitre la commande d'ordre fractionnaire pour commander le FAP.

IV.2 Commande d'ordre fractionnaire :

La décennie précédente a connu des efforts de recherche très remarquable reliés au calcul d'ordre fractionnaire et son application dans la théorie de la commande des systèmes. Clairement, pour une boucle fermée de commande des systèmes, il existe quatre situations :

- Système d'ordre entier avec correcteur d'ordre entier ;
- Système d'ordre entier avec correcteur d'ordre fractionnaire ;
- Système d'ordre fractionnaire avec correcteur d'ordre entier ;
- Système d'ordre fractionnaire avec correcteur d'ordre fractionnaire.

En pratique, on considère uniquement le cas du système d'ordre entier avec correcteur d'ordre fractionnaire parce qu'en général le modèle du système peut être déjà obtenu comme un modèle d'ordre entier dans le sens classique [28].

Du point de vue ingénierie, la signification de commande d'ordre fractionnaire est que c'est une généralisation de la théorie de commande d'ordre entier classique qui pourrait mener à une modélisation plus adéquate et des performances de commande plus robuste. En effet, l'intérêt majeur de la commande d'ordre fractionnaire est l'amélioration ou l'optimisation des performances des systèmes [28].

IV.3 Régulateur d'ordre fractionnaire $PI^\lambda D^\mu$:

Le régulateur d'ordre fractionnaire $PI^\lambda D^\mu$ une généralisation du régulateur PID classique a été proposée par Podlubny en 1999. Sa fonction de transfert est donnée par :

$$G(S) = K_P + \frac{K_I}{S^\lambda} + K_D S^\mu \quad (\text{IV.1})$$

Où K_P , K_I et K_D sont des nombres réels et λ et μ sont des nombres réels positifs.

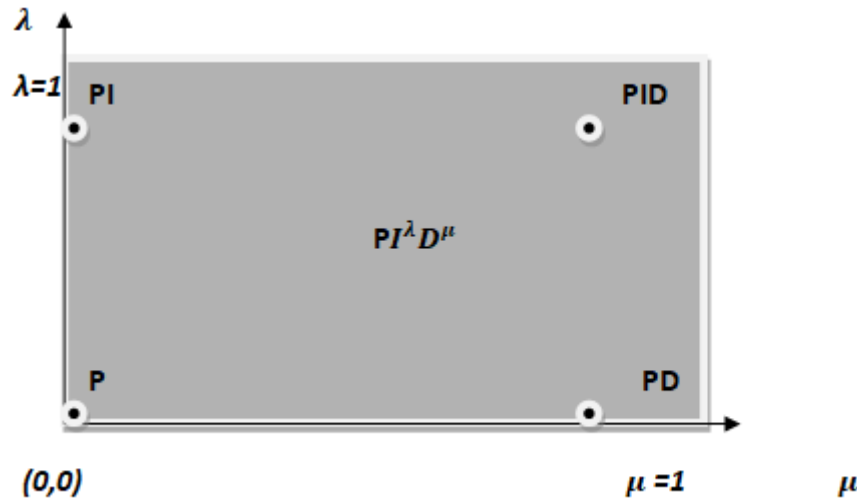


Figure IV.1: Disposition du régulateur $PI^\lambda D^\mu$ dans le plan (λ, μ) .

De l'équation (IV.1), on note $\lambda=\mu=1$ le régulateur d'ordre fractionnaire $PI^\lambda D^\mu$ devient le régulateur PID classique. Figure(IV.1) montre la disposition du régulateur d'ordre fractionnaire $PI^\lambda D^\mu$ dans le plan (λ, μ) .

De la figure (IV.1), on peut facilement voir que tous les types de régulateurs classiques P, PI, PD, PID sont des cas spéciaux du régulateur d'ordre fractionnaire $PI^\lambda D^\mu$. Depuis sa proposition, beaucoup de chercheurs se sont intéressés à l'utilisation et à l'ajustement des paramètres de ce régulateur $PI^\lambda D^\mu$ fractionnaire. L'intérêt de ce genre de contrôleurs est justifié par une meilleure flexibilité. Puisque en plus des trois paramètres classiques de réglage du régulateur PID. Il possède deux autres paramètres de réglage l'ordre d'intégration λ et l'ordre de différentiation μ . Ces deux paramètres peuvent être employés pour remplir des caractéristiques additionnelles ou d'autres conditions intéressantes dans la commande des systèmes asservis linéaires [29].

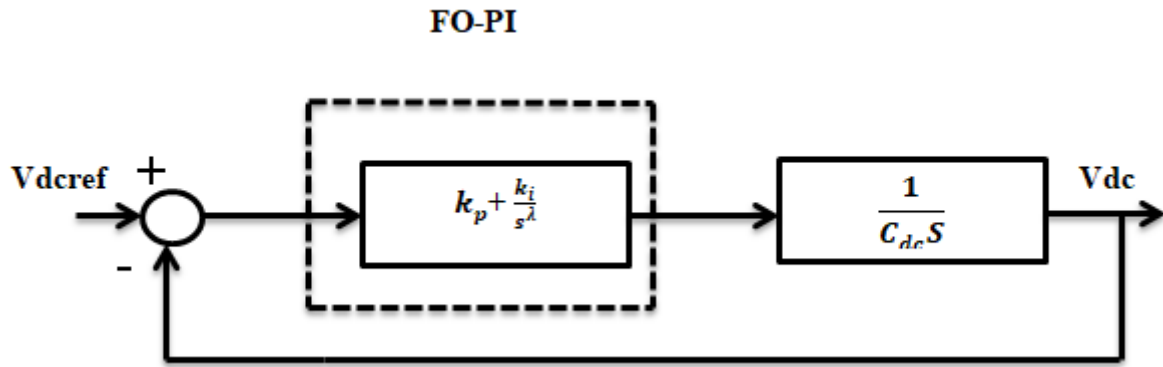


Figure IV.2: Boucle de régulation de la tension du bus continue par un régulateur FO-PI.

IV.4 Simulation numérique sous Matlab Simulink :

Modèle de simulation pour voir les paramètres de simulation allée à l'annexe (A).

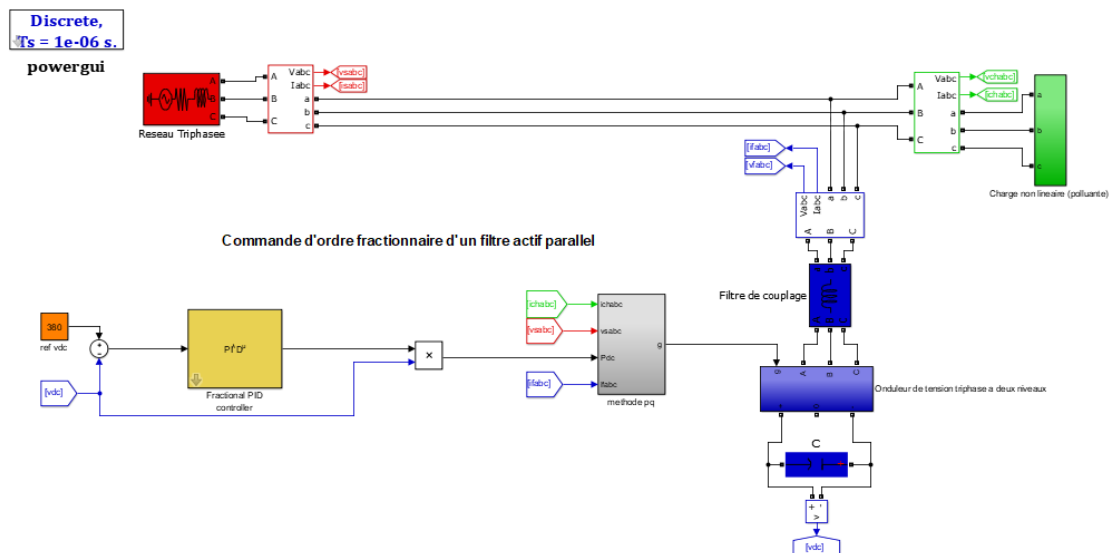


Figure IV.3: Réseau électrique alimente une charge non linéaire avec FAP à commande par hystérésis ordre fractionnaire $\lambda=1.85$.

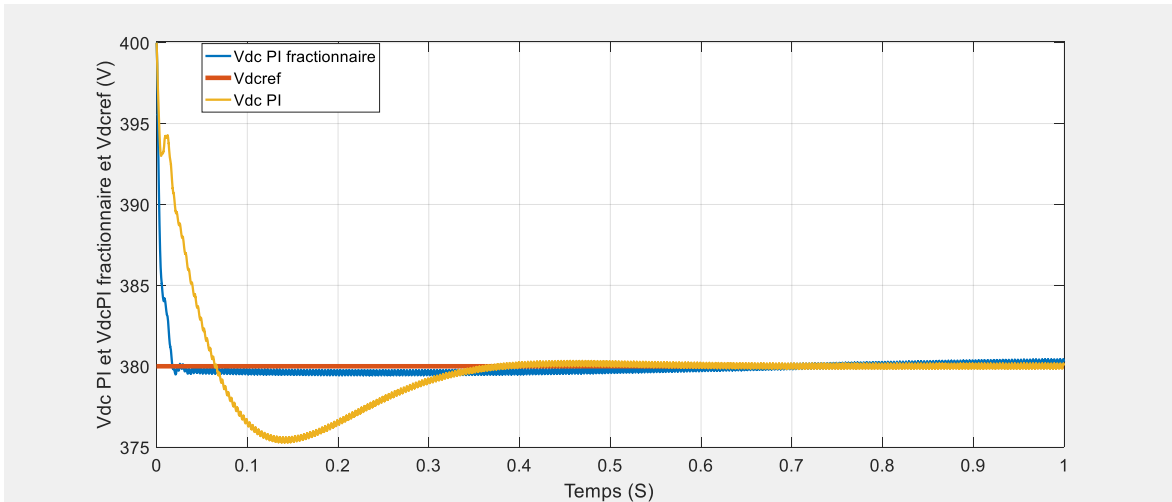


Figure IV.4: Tension aux bornes de condensateur PI et PI fractionnaire et tension de référence Vdc et Vdcref.

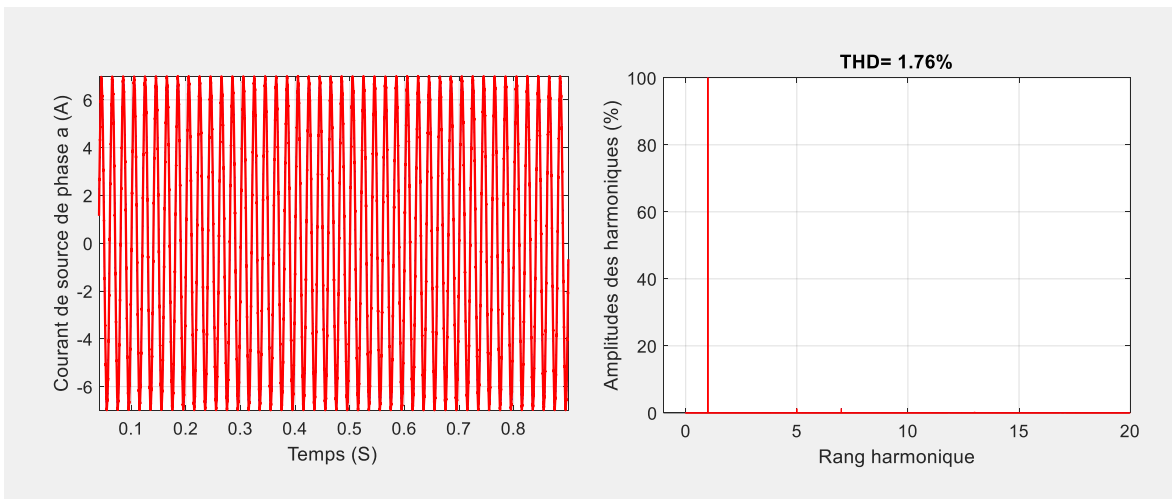


Figure IV.5 : Courant de source de la phase à isa et son Spectre harmonique.

Tableau IV.1: Amplitudes des harmoniques avant et après le filtrage ($\lambda=1$, $\lambda=1.85$)

Rang d'harmonique	H5	H7	H11	H13	H17	H19
Amplitude avant le filtrage (%)	22,67	10,29	8,16	4,85	4,08	2,56
Amplitude après le filtrage (%) $\lambda=1$	1,11	0,55	0,09	0,07	0,02	0,01
Amplitude après le filtrage (%) $\lambda=1.85$	1,00	0,54	0,08	0,06	0,01	0.009

Tableau IV.2: Performances statiques et dynamiques d'un système de compensation avec différents régulateurs.

	tr (S)	D (%)	THD (%)
PI	0,4	15	3,95
FO-PI	0,02	1	1.76

Comme le but de l'introduction de nouveaux correcteurs est l'amélioration de la qualité et les performances des systèmes régulés sans toucher à sa stabilité initiale; alors dans cet exemple, on a comparé quelques performances des deux systèmes avec correcteur PI classique et correcteur d'ordre fractionnaire $PI^{1.85}$. Cette comparaison a été faite en termes du temps de réponse et du dépassement. De la figure (IV.4), on note les améliorations suivantes :

- Le temps de réponse du système d'ordre fractionnaire est 0.02s plus petit que celui du système classique 0.40s.
- Le dépassement du système d'ordre fractionnaire est 1% plus petit que celui du système classique.

IV.5 Conclusion :

Les correcteurs PID étaient les plus populaires du siècle passé. Ils resteront dominants à cause de leur remarquable efficacité, simplicité de mise en œuvre et la large applicabilité. Bien qu'ils soient devenus commercialement disponibles dans les années 1930, l'intérêt à leur conception reste très haut même aujourd'hui. Une précision insuffisante, une stabilité trop relative (instabilité), un temps de réaction trop lent, un dépassement trop important, sont des qualités qui peuvent être inacceptables au regard d'un cahier de charges. Il est donc souvent nécessaire d'intégrer dans le système régulé un réseau correcteur dont l'objectif est d'améliorer un ou plusieurs de ces différents paramètres sans bien sûr le faire au détriment des autres. Donc, les réseaux de correcteurs doivent permettre de réaliser le meilleur compromis entre précision, stabilité et rapidité du système étudié [28].

Une des possibilités d'améliorer la qualité des boucles est l'utilisation des correcteurs d'ordre fractionnaire. Beaucoup de chercheurs ont été intéressés à l'application et à la conception de ce type de correcteur.

Conclusion
générale

Conclusion générale

Ce travail a été consacré aux améliorations des performances des filtres actifs parallèles, avec pour but le filtrage des courants perturbateurs harmoniques et la compensation de l'énergie réactive. Après avoir recensé les origines et les conséquences des perturbations électriques des solutions de dépollution ont été présentées et le choix d'une solution basée sur les principes de filtrage actif type parallèle (FAP) a été retenu. Nos travaux de recherches portent sur l'étude conjointe de l'identification des harmoniques et de la commande de l'onduleur. L'étape d'identification des courants harmoniques est fondamentale dans le processus de filtrage. Sans une bonne estimation de ces courants, le système de commande, même très efficace ne pourrait pas apporter à lui seul, les corrections suffisantes.

Le travail présenté dans ce mémoire porte sur l'étude et la simulation d'un filtre actif parallèle à deux niveaux pour se faire nous l'avons partagé en quatre chapitres.

Dans une première phase, nous avons effectué une étude théorique sur la problématique des perturbations harmoniques générées par des charges non linéaires connectées aux réseaux électriques et les normes standards.

Le second chapitre est consacré à les différentes solutions de dépollution, et le choix d'une solution basé sur les principes de filtrage actif parallèle (FAP) à structure tension a été retenu. Les filtres actifs de puissance ont de meilleures performances de compensation que les filtres passifs conventionnels.

Le troisième chapitre, consacré à l'étude du filtre actif parallèle à deux niveaux, pour se faire nous l'avons partagé en deux parties : la partie puissance dans laquelle nous avons présenté les différentes parties qui constituent le filtre actif parallèle et leurs rôles, et la partie commande qui consiste d'abord en l'identification des harmoniques générés par la charge non linéaire. A la fin, nous avons présenté les deux types de commande de l'onduleur (la commande par hystérésis et la commande par MLI), nous avons utilisé la commande par hystérésis.

Toutes nos simulations ont été faites sous environnement Matlab, les résultats que nous avons obtenus révèlent qu'après le filtrage nous avons obtenu de bons résultats en termes de THD.

Finalement, dans la quatrième chapitre une étude sur la régulation d'ordre fractionnaire.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] Mazouzi Aicha, Mammeri Sabiha, « Modélisation et Simulation d'un Filtre Actif Parallèle multiniveaux » Dirigé par Madi Yazid, université de Abderrahmane Mira-Bejaia, 2019/2020.
- [2] Omeiri Amar, « Simulation d'un filtre actif parallèle de puissance pour la compensation des harmoniques de courant », Dirigé par Haddouche Ali, université de Badji Mokhtar Annaba, 2007.
- [3] Djebbar Med Salah, « Qualité d'énergie des convertisseurs statiques ». Cours, université de Chikh Larbi Tébessi Tébessa.
- [4] G. Desquilbet et C. Foucher et P. Fauquembergue, « Statistical analysis of voltage dips ». Notes EDF, 96NR00 102, 1995.
- [5] N. Ngac-Ky, « Approche neuromimétique pour l'identification et la commande des systèmes électriques: application au filtrage actif et aux actionneurs synchrones. Sciences de l'ingénieur [physics] ». Université de Haute Alsace - Mulhouse, 2010. Français. fftel-00605221f.
- [6] V. Beauvois, « Qualité de la tension, qualité de l'électricité ». Cours, université de Liège, Novembre 2008.
- [7] Dhombres, J. et Robert, J. B, « Fourier - Créateur de la physique- mathématique ». Editions Berlin, 1998.
- [8] A. Amaret et A. Bengana, « Etude et simulation d'un circuit de commande pour un filtre actif de puissance parallèle à deux bras à point milieu pour un réseau électrique à trois fils ». Mémoire master, université Abou BekrBelkaid de Tlemcenle, 25 Juin 2015.
- [9] Adel Ferhi, Ayoub Zerkane, « Modélisation et commande d'un Filtre Actif Parallèle à deux niveaux par le biais d'un régulateur fractionnaire » Dirigé par Djebbar Mohamed Salah, université de de Chikh Larbi Tébessi Tébessa, 2017/2018.
- [10] Ben Amar Asma, « Commande par Réseaux de Neurones Artificiels d'un Filtre Actif Parallèle Triphasé » Dirigé par Ben Attous Djilani, Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued, 28/06/2022.
- [11] Michel Crappe, « Commande et régulation des réseaux électriques » Traité EGEM série génie électrique, LAVOISIER 2003.

Bibliographie

- [12] Hanene Kouara, « Application d'un filtre actif série au contrôle de la tension d'un réseau basse tension » Mémoire de magister, université de Batna 28/02/2006.
- [13] S. KEBIRI, « Modélisation et simulation d'un filtre actif multiniveaux », Thèse de Magister, Université Mouloud MAMMERI, Tizi-Ouzou, Année 2009.
- [14] S. BERNARD, G. TROCHAIN Deuxième génération de compensateur actif d'harmonique forte capacité basée sur le mode d'injection du courant. MGE UPS SYSTEMS, MGE0121UKI 1998.
- [15] N. Reguig et B. Herizi, « Etude et Simulation d'un Filtre Actif de Puissance ». Mémoire de master, université de Mohamed Boudiaf, Msila, 2018.
- [16] C. FETHA, « Analyse et amélioration de l'indice de la non-symétrie de tension dans la qualité de l'énergie électrique ». Thèse de Doctorat, Université de Batna, 2006.
- [17] E. Galouet et R. Hamani, « Contribution à La Commande d'un filtre actif parallèle ». Mémoire fin d'étude, université d'Abderrahmane Mira, Bejaia, 2017.
- [18] MAE. ALALI, « Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques Basses Tension ». Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur – Strasbourg I, 2002.
- [19] 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.
- [20] H. Zayani, « Régulation et Contrôle des Systèmes de Climatisation ». Support de Cours, Institut Supérieur des Etudes Technologiques de Sfax, Tunisie, Année Universitaire: 2014-2015.
- [21] S. A, Tadjer, « Etude d'un Système de Compensation d'Harmonique en Utilisant un Générateur Photovoltaïque, GPV ». Mémoire de magistère, Université M'Hamed BougaraBoumerdès, 2008.
- [22] T. Benslimane, « Commande Numérique d'un Filtre Actif Parallèle Autonome ». Mémoire de Magister, Ecole Militaire Polytechnique d'Alger, 2004.

Bibliographie

- [23] T. Mahni, « Etude et Conception d'un Filtre Actif Parallèle Triphasé à Quatre Fils en vue de sa Commande par des Méthodes d'Intelligence Artificielle ». Thèse de doctorat en sciences, Université Mohamed Khider- Biskra, 19/02/2017.
- [24] L. Zellouma, « Filtrage actif Parallèle des Harmoniques du Courant Générés Par un Pont Redresseur Triphasé non Commandé ». Mémoire de magister, Université de Badji Mokhtar, Annaba, 2006.
- [25] A. Omeiri, « Simulation d'un filtre actif parallèle de puissance pour la compensation des harmoniques de courant ». Thèse de doctorat, université d'Annaba, 2007.
- [26] A. Aredde, « Etude, commande et mise en œuvre de nouvelles structures Multiniveaux ». Thèse doctorat, université de Toulouse, 2011.
- [27] Bode, H. W, « Network Analysis and Feedback Amplifier Design », Tung Hwa Book Company, Shanghai, China, 1949.
- [28] O, Dwyer, A., « Hand book of PI and PID Controller Tuning Rules », London, UK, 2009.
- [29] Lurie, B.J, « Three-parameter tunable Tilt-Integral-Derivative (TID) controller ». United States Patent No. US 5371670 A, Washington, DC : National Aeronautics and Space Administration, USA, 1993.
- [30] N. BRYANT, « Etude et commande généralisées de filtres actifs parallèles : Compensation globale ou sélective des harmoniques : Régime équilibré oueds équilibré ». Thèse de Doctorat, Université de Nantes, 1999.

Annexes

Annexe A

Les paramètres de simulation de chapitre II sont rassemblés dans le tableau suivant :

Réseau d'alimentation						
paramètre	Vs (V)	F(Hz)	Rs (Ω)	Ls (mH)	Rc (Ω)	Lc (mH)
valeurs	400	50	1	1	2	20
Charge non-linéaire						
paramètre	Rch (Ω)			Lch (mH)		
valeurs	500			50		
Inductance de filtrage						
valeurs	10 (H)					
Harmonique 5						
paramètre	L (mH)			C (μ F)		
valeurs	1.6			255		
Harmonique 7						
paramètre	L (mH)			C (μ F)		
valeurs	0.96			215		
Bande d'harmonique 11						
paramètre	L (mH)			C (μ F)		
valeurs	0.19			358		

Les paramètres de simulation de chapitre III, IV sont rassemblés dans le tableau suivant :

Réseau d'alimentation						
Paramètres	Vs (V)	F (Hz)	Rs (Ω)	Ls (mH)	Rc (m Ω)	Lc (mH)
Valeurs	380	50	0,1	0,1	0,1	2
Charge non-linéaire						
Paramètres	Rch (Ω)			Lch (mH)		
Valeurs	200			4		
Filtre de sortie (mH)						
Valeurs	3,5					
Source continue						
Paramètres	Vdc (V)			C (mF)		
Valeurs	400			2350		

Annexe A

Tension de référence			
Valeur	400		
Bande d'hystérésis			
Valeur	0,01		
PI			
Paramètres	Kp	Ki	
Valeurs	0,1	1	
PI^λ			
Paramètres	Kp	Ki	λ
Valeurs	1	10	1.85
