الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

Département du Génie Électrique



Mémoire de Fin d'Études

Présenté pour l'obtention du Diplôme
De Master en électrotechnique

Option : **Energie Renouvelable**

THEME

Commande d'un filtre actif parallèle alimenté par une source d'énergie renouvelable

Pro posé et dirigé par,

M. MORSLI Abdelkader

Dr. HENINI Nourddine

Préparé et présenté par,

ELMOKREFI ALI.

MELLATI MOHAMED.


بسم الله الرحمن الرحيم

Dédicace

A la mémoire de mon père AHMED décédé le 14 juin 2017, je vous dois tout après Allah. Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude, la profondeur de mon amour, le respect et la reconnaissance. Trouvez la paix et le repos éternel.

À ma chère mère, en lui exprimant mon amour, mon respect et vive gratitude pour sa patience, pour ses sacrifices tout les longs des années, qu'Allah la protège.

A ma femme, mes enfants Mohammed, et ALLA Errahmane

A mes frères et sœurs

A ma famille.

A mon binôme Mohamed Mellati

A mes Amies.

A tous les scientifiques qui travaillent pour le bonheur de l'humanité.

Dédicace

A la mémoire de mon père mohamed

À ma chère mère, en lui exprimant mon amour, mon respect et vive gratitude pour sa patience, pour ses sacrifices tout les longs des années, qu'Allah la protège.

A ma femme, mes enfants Mohammed moncif, et abd el madjid rihame kaouther

A mes frères et sœurs

A ma famille.

A mon binôme ali mokorfi

A mes Amies.

A tous les scientifiques qui travaillent pour le bonheur de l'humanité.

Remerciements

Je tiens à remercier tout premièrement Allah le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience, qu'il m'a donné durant toutes ces années.

A l'issue de ce travail, je tiens à adresser ma reconnaissance et mes remerciements à toutes les personnes qui ont contribué, chacune à leur manière, à l'accomplissement de cette thèse.

Tout d'abord, je tiens à remercier notre promoteur de thèse Monsieur ***MORSLI A E K****, pour avoir d'abord proposé*

ce thème et à notre Co-promoteur Mr. ***Hanini*** *Dr de l'Université de Médéa, , son encadrement, pour tous ses encouragements et discussions tout*

de cette période et ses précieux conseils.

Je tiens à remercier vivement les membres de jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail et cette thèse :

Monsieur ***Moualdia Mahfoud*** *docteur à l'Université de Médéa, d'avoir accepté de juger mon travail et de présider le jury de soutenance de cette thèse.*

Messieurs ***Madjbar****, docteur à l'Université de Médéa, Pour m'avoir fait l'honneur d'accepter d'être les examinateurs de cette thèse.*

Je voudrais remercier de tout mon cœur ma mère, ma femme, mes enfants pour leur patience infinie, leur soutien inconditionnel, leurs encouragements tout au long de ces années d'études.

Finalement, je tiens à exprimer mes reconnaissances à tous mes frères, sœurs et amis et collègues pour le soutien moral.

ملخص

الهدف من هذا العمل هو دراسة تنفيذ خوارزميات التعويض باستخدام مصفات النشطة ، للقضاء على التيارات التوافقية المتولدة من الأحمال غير الخطية في شبكات توزيع الطاقة الصناعية المشوهة

بالإضافة إلى الحلول المقترحة، نجد الخوارزمية الأكثر انتشارًا استنادًا إلى نظري والمعروفة أيضًا باسم نظرية القدرة التفاعلية الفورية ***notch ,P-Q***

جديد و درجة التوافقيات التوافقية الحالية و التوافق التوافقي ، باستخدام ***P-Q*** في هذا العمل ، نستخدم أمر مرشح الفلطية النشط المتوازي ، الفلتر النشط المتوازي المدعوم من مصدر الطاقة المتجددة.

، القدرة الآنية ، الطاقة التفاعلية ، معدل التشوه التوافقي ***(FAP)*** الكلمات المفتاحية: المرشح النشط المتوازي ***(THD)***

Résumé

Le but de notre travail est l'étude de la mise en œuvre des algorithmes de compensation à l'aide de filtre actif parallèle à structure de tension, pour la mitigation les courants harmoniques générés par les charges non linéaires dans les réseaux électriques distordus.

Dans la littérature, en outre des solutions proposées, on trouve l'algorithme le plus répandu basé sur la théorie P-Q, connu aussi sous le nom de théorie de puissance réactive instantanée.

Dans ce travail nous utilisons une nouvelle commande P-Q et filtre coupe-bande(notch) de compensation des courants harmoniques et de puissance réactive, en utilisant un filtre actif parallèle de tension,.

Mots clés : Filtre actif parallèle (FAP), puissance instantané, puissance réactive, taux de distorsion harmoniques (THD), filtre notch.

Sommaire

Chapitre I *Etat de l'art : pollutions du réseau électrique et leurs solutions*

I.1 INTRODUCTION 1

I.2 Harmonique 1

I.2.1 Inters harmoniques 1

I.2.2 Infra-harmoniques 1

I.2.3 Composante harmonique individuelle (ou composante harmonique de rang h) 4

I.3 Distorsion harmonique totale (THD) 4

I.3.1THD en courant ou en tension 5

I.4 Origine des harmoniques et perturbation sur le réseau électrique 6

I.4.1Perturbations induites par les charges non-linéaires « courant et tension harmoniques » 6

I.5 Circulation des courants harmoniques dans les réseaux 7

I.6 Normes imposées sur le THD 8

I.6.1 Niveaux de compatibilité harmonique en amont du point commun de raccordement 8

I.6.2 Limites sur l'émission harmonique des équipements 9

I.6.3Guide pour la mesure des harmoniques 9

-IEC 61000-4-7 9

I.7 Solutions de base pour atténuer les harmoniques 13

I.7.1 Positionner les charges polluantes en amont du réseau 13

I.7.2Regrouper les charges polluantes 14

I.7.3 Séparer les sources 14

I.7.4Utiliser des transformateurs à couplages particuliers 15

I.7.5 Placer des inductances dans l'installation 15

I.8 Choisir un schéma de liaison à la terre adapté 15

I.8.1Cas du régime TNC 15

Le régime de neutre TNC doit donc être réservé à l'alimentation des circuits de puissance, en tête d'installation, et est à proscrire dans le cas de l'alimentation de charges sensibles. 16

I.8.2Cas du régime TNS 16

I.9 Filtrage des harmoniques 16

I.9.1Filtre passif 16

I.9.1.1 Applications typiques 16

I.9.1.2 Principe de fonctionnement 17
I.9.2Filtre actif (ou compensateur actif) 17
I.9.2.1 Applications typiques 17
I.9.2.2 Principe de fonctionnement 18
I.9.3Filtre hybride 18
I.9.3.1 Applications typiques 18
I.9.3.2 Principe de fonctionnement 19
I.10 Critères de choix 19
I.10.1 Le filtre passif 19
I.10.2 Le compensateur actif 20
I.10.3 Le filtre hybride 20
I.10 Etat de l'art des filtres actifs parallèles 20
nI.11 Conclusio 23

Chapitre II ***Filtrage actif parallèle de tension***

II.2 Point de raccordement 24
Figure (II.1): *Raccordement d'un filtre actif parallèle.* 24
II.3 Rôle du filtre actif 25
II.4 Structure filtre actif parallèle source de tension 25
II.4.1 Principe de fonctionnement 25
II.4.2 l'onduleur de tension 26
II.5- Filtre de découplage 27
II.6 Source d'énergie du l'onduleur 27
II.7 Présentation de convertisseur de tension à deux niveaux 28
II.8 Modélisation du réseau électrique 29
II.9 Modélisation de la charge 30
II.10 Puissance apparente, puissance réactive et puissance de distorsion 31
II.11 Conclusion 33

Chapitre III ***Commande d'un FAP à deux niveaux par les méthodes P_Q et NOTCH alimenté par PV***

III.1 Introduction 34
III .2 Strategies de commande du filtre actif 34
III.2.1 Principe de commande du filtre actif 34
III.3 Détermination des courants harmoniques de référence 35
III.4 Méthodes des puissances instantanées 35
III.4.1 Puissances instantanées active et réactive 35
III.4.1.1 Les puissances instantanées : 35
III.4.1.2 Algorithme « p-q » d'extraction des courant harmoniques 39
III.5 Algorithme du filtre coupe-bande (notch filter) 40
III.6 Conclusion 42

Chapitre IV ***Résultats de simulation et interprétations***

IV.1 : Introduction 44
IV. 2 : Caractéristique du courant de source avant le filtrage 45
IV.3 : Résultat de simulation du filtre actif parallèle contrôlé par l'algorithme P-Q par commande noth 48
IV .4 : paramètres du convertisseur boost 49
IV.6 Conclusion 56

Liste des figures :

Figure I.1 : Représentation des inters et infra harmoniques.....2

Figure I. 2: Exemples de formes d'onde de courant déformé monophasées (en haut) et triphasées (en bas). 2

Figure I. 3: Exemple d'un courant contenant des harmoniques et décomposition en rangs harmoniques de rang 1 (fondamental), 3, 5, 7 et 9 4

Figure I.4:Schéma unifilaire représentant l'impédance du circuit d'alimentation vue par l'harmonique de rang h 6

Figure I.4a: Schéma d'une installation alimentant une charge non-linéaire, pour laquelle seuls les phénomènes liés à la fréquence 50 Hz (fréquence fondamentale) sont pris en considération.....7

Figure I.4b: Schéma de la même installation, pour laquelle seuls les phénomènes liés à la fréquence de l'harmonique de rang h sont pris en compte. 7

Figure. I. 5: Circulation des courants harmoniques dans un réseau.....8

Figure I.7: Alimentation le plus en amont possible des charges non-linéaires (schéma conseillé).....14

Figure I.8: Regroupement des charges non-linéaires et alimentation le plus en amont possible (schéma conseillé).....14

Figure I. 9: Alimentation des charges polluantes par transformateur séparé.....14

Figure I. 10: L'utilisation d'un transformateur Dyd stoppe la propagation des harmoniques de rangs 5 et 7 vers l'amont du réseau.....15

Figure I.11: Principe d'utilisation d'un filtre passif.....17

Figure I. 12: Principe d'utilisation d'un filtre actif.....18

Figure I. 13: Principe d'utilisation d'un filtre hybride.....19

Figure (II.1): Raccordement d'un filtre actif parallèle.....23

Figure (II.2)*:* principe du compensateur shunt idéal.....24

Figure II.3 Filtre actif parallèle type source de tension.....25

Figure II.4 Schéma du circuit de puissance d'un filtre actif à structure tension.....25

Figure II.5 Schéma de liaison entre l'onduleur de tension et le réseau.....26

Figure II.6 Schéma de l'onduleur de tension triphasé a deux niveaux. 27

Figure II.7Les huit configurations possibles d'un onduleur triphasé à deux niveaux 28

Figure II.8 schéma électrique d'un réseau triphasé 29

Figure II.9 schéma de la charge polluante.....29

Figure II.10 Représentation vectorielle de la puissance apparente 30

Figure III.1 : Schéma principe de commande FAP 33

Figure III.3 : Algorithme P-Q d'extraction du courant harmonique. 38

Figure. IV. 1 : Alimentation directe dans une charge non-linéaire sans filtre actif. 44

Figure.I V. 1.1 : Allure du courant de charge i_{ca} avant filtrage actif. 45

Figure.IV. 1.2: Spectre harmonique de i_{ca} 46

Figure. IV. 1.3: Allure du courant de charge i_{ca} déphasé de la tension d'alimentation v_{sa} 46

Figure. IV .2 .1: Filtre Actif Parallèle basé sur un onduleur deux-niveaux commandé par commande notch 47

Figure. IV. 2.2 :filtre actif parallèle contrôlé par l'algorithme P-Q 47

Figure. IV. 2.3 : Filtre Actif Parallèle basé sur un onduleur deux-niveaux commandé par commande notch alimenté par pv 47

Figure. IV. 2.4 : Filtre Actif Parallèle basé sur un onduleur deux-niveaux commandé par commande PQ alimenté par pv 47

Figure. IV. 2.5. :panneau pv avec booste 47

Figure. IV.3.1 : Courant généré par le filtre actif i_{ha} et sa référence i_{ha}* Par commande notch 50

Figure.I V.3.2 : Courant généré par le filtre actif i_{ha} et sa référence i_{ha}* Par commande p-q 50

Figure. IV.3.3 : Courant généré par le filtre actif i_{ha} et sa référence i_{ha}* Par commande NOTCH avec source renouvelable 50

Figure.I V.3.4 : Courant généré par le filtre actif i_{ha} et sa référence i_{ha}* Par commande p-q avec source renouvelable 50

Figure. IV. 4.1: Courants de charge non-linéaire i_{ca}, de source i_{sa} et de filtre i_{ha}. ....

Par commande notch 51

Figure.I V. 4.2: Courants de charge non-linéaire i_{ca}, de source i_{sa} et de filtre i_{ha}.

Par commande p-q 51

Figure.I V. 4.3: Courants de charge non-linéaire i_{ca}, de source i_{sa} et de filtre i_{ha}. ....

Par commande NOTCH avec source renouvelable 51

Figure. IV. 4.4: Courants de charge non-linéaire i_{ca}, de source i_{sa} et de filtre i_{ha}. ....

Par commande p-q avec source renouvelable 51

Figure. IV. 5.1: Allure de i_{sa} après filtrage actif contrôlé par commande notch ... 52

Figure. IV. 5.2: Allure de i_{sa} après filtrage actif contrôlé par algorithme P-Q 52

Figure. IV. 5.3: Allure de i_{sa} après filtrage actif contrôlé par commande NOTCH avec source renouvelable 52
Figure. IV. 5.4: Allure de i_{sa} après filtrage actif contrôlé par algorithme P-Q avec source renouvelable.....52
Figure. IV. 6.1 : Spectre harmonique de i_{sa} après filtrage actif commandé par.....
notch.....53
Figure.I V. 6.2 : Spectre harmonique de i_{sa} après filtrage actif contrôlé par P-Q...53
Figure. IV. 6.3 : Spectre harmonique de i_{sa} après filtrage actif contrôlé par NOTCH avec source renouvelable 53
Figure. V. 6.4: Spectre harmonique de i_{sa} après filtrage actif contrôlé par P-Q avec source renouvelable.....53
Figure. IV. 7.1: Courant i_{sa} déphasé de la tension v_{sa}.par commande notch.....54
Figure. IV. 7.2: Courant i_{sa} déphasé de la tension v_{sa}.controlé par algorithme pq.54
Figure. IV. 7.3: Courant i_{sa} déphasé de la tension v_{sa}.controlé par nortch.. alimenté par pv.....54
Figure. IV. 7.4: Courant i_{sa} déphasé de la tension v_{sa}.controlé par algorithme p-q ... alimente par pv.....54
Figure. IV. 7.3 : vdc de booste 55
Figure .IV. 7.4: vdc de pv.....55

Liste des tableaux

tableau 1 limites des tensions harmoniquesselon 11
tableau 2 niveaux de compatibilite pour les tensions harmoniques individuelles sur les reseaux publics basse tension. 11
tableau 3 taux (en % dev1) des tensions harmoniques acceptables.....12
tableau 4:limitation des emissions de courants harmoniques1..... 13
tableau 4 tableau parametres de simulation communs aux applications considerees. 48
tableau 5 tableau de caracteristique du panneau photovoltaïque :.....49

Liste des acronymes

THD	: Taux de Distorsion Harmonique
F_{dis}	: Facteur de distorsion
F_c	: Facteur de crête
F_p	: Facteur de puissance
S	: Puissance apparente [VA]
P	: Puissance active [W]
Q	: Puissance réactive [VAR]
D	: Puissance de déformation [VAD]
CEI	: Commission Electroniques International
GTO	: thyristor à extinction par la gâchette (Gate Turn-Off Thyristor)
IGBT	: transistor bipolaire à grille isolée (Insulated Gate Bipolar Transistor)
FAP	: Filtre Actif Parallèle
FAS	: Filtre Actif Série
UPQC	: Unified Power Quality Conditioner
THDi	: Taux de distorsion harmonique « intensité »
THDu	: Taux de distorsion harmonique « tension »
DSP	: Processeur de signal numérique (Digital signal processor)
HVDC	: Courant continu haute tension (High-voltage direct current)
KVA	: Kilo Volt Ampère
MVA	: Méga Volt Ampère
NPC	: Neutre point-serré (Neutral-Point Clamped)
IGCT	: (Integrated Gate-Commutated Thyristors)
h	: rang de l'harmonique
Uh	: tension harmonique
Ih	: courant harmonique
Irms	**:**

Liste des symboles

$\mathbf{i_{c1}}$	Courant fondamental [A]
$\mathbf{i_{ci}}$	Courant des différentes harmoniques [A]
$\mathbf{I_c}$	Courant de charge [A]
$\mathbf{Z_{cc}}$	Impédance de court circuit [Ω]
$\mathbf{R_{cc}}$	Résistance de court circuit [Ω]
$\mathbf{L_{cc}}$	Inductance de court circuit [H]
$\mathbf{i_{cha}}$	Courant de charge active [A]
$\mathbf{i_{ch}}$	Courant de charge [A]
$\mathbf{i_{chn}}$	Courant de charge harmonique [A]
$\mathbf{i_{chr}}$	Courant de charge réactive [A]
$\mathbf{i_s}$	Courant de la source [A]
$\mathbf{i_f}$	Courant de filtre [A].
$\mathbf{i_c}$	courant crete
$\mathbf{C_{df}}$	Condensateur [F]
$\mathbf{V_{dc}}$	Tension continue [V]
$\mathbf{V_s}$	Tension simple du réseau [V]
$\mathbf{I_h}$	Courant harmonique du rang h [A]
$\boldsymbol{\alpha}$	L'angle d'allumage des thyristors
$\boldsymbol{\omega}$	Pulsation
$\boldsymbol{\omega_h}$	Pulsation la plus faible des harmoniques
$\mathbf{I_{fh}}$	Courant de filtre de la grandeur fondamental [A]
$\mathbf{V_{fh}}$	Tension de filtre de la grandeur fondamental [V]
$\mathbf{L_f}$	Inductance de filtre [H]

Liste des acronymes

THD : Taux de Distorsion Harmonique

RMS :**R**oot Mean Square (**R**acine-**M**oyenne-**C**arré)

F_{dis} :Facteur de distorsion

F_c : Facteur de crête

F_p : Facteur de puissance

S : Puissance apparente [VA]
P : Puissance active [W]

Q : Puissance réactive [VAR]

D : Puissance de déformation [VAD]

U_h : tension harmonique

Z_h : impédance harmonique

I_h : courant harmonique

CEI : Commission Electroniques International

GTO : thyristor à extinction par la gâchette (Gate Turn-Off Thyristor) IGBT : transistor bipolaire à grille isolée (Insulated Gate Bipolar Transistor) FAP : Filtre Actif Parallèle

FAS : Filtre Actif Série

UPQC : Unified Power Quality Conditioner

THDi : Taux de distorsion harmonique « intensité »
THDu : Taux de distorsion harmonique « tension »

DSP : Processeur de signal numérique (Digital signal processor)

HVDC : Courant continu haute tension (High-voltage direct current)
KVA : Kilo Volt Ampère

MVA : Méga Volt Ampère

NPC : Neutre point-serré (Neutral-Point Clamped)
IGCT : (Integrated Gate-Commutated Thyristors)

INTRODUCTION GENERALE

L'utilisation de l'électronique de puissance dans les installations de conversion d'énergie électrique a considérablement contribué à l'amélioration des performances et de l'efficacité de ces systèmes. En revanche, les convertisseurs statiques ont participé à la détérioration de la qualité du courant et de la tension des réseaux de distribution. En effet, ces systèmes consomment des courants non sinusoïdaux et ils se comportent comme des générateurs de courants harmoniques. Par l'intermédiaire de l'impédance de court-circuit du réseau, les courants harmoniques déforment la tension de celui-ci. Les déformations du courant et de la tension peuvent perturber le fonctionnement normal des équipements électriques. C'est pourquoi, les distributeurs d'énergie ayant la contrainte de fournir une tension sinusoïdale, prennent en charge l'atténuation des perturbations harmoniques au moyen d'installations de forte puissance. Cependant, les nouvelles réglementations internationales imposent aux consommateurs des limites aux harmoniques, engendrées par leurs systèmes, tant en courant qu'en tension. Ainsi, le filtrage des composantes harmoniques est au centre des préoccupations des distributeurs d'une part et des utilisateurs d'énergie électrique d'autre part, ils adoptent donc, les uns comme les autres, les limites proposées par les normes IEEE 519- 1992, IEEE 1159-1995, CEI 61000-2-2 et CEI 61000-3-2**.**

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

Grâce aux progrès remarquables réalisés au cours des dernières années dans le domaine des semi-conducteurs de puissance commandables à l'ouverture et à la fermeture et fonctionnant à des fréquences très élevés, ont permis de concevoir des dispositifs de filtrage modernes des harmoniques auto-adaptables appelés filtrage actifs. Le but de ces filtres est de générer soit des courants , soi t des tensions harmoniques de manière à compenser les perturbations responsables de la dégradation des per for man ces des équipements et ins tal lat ion s électriques.

Le filtre actif est un onduleur de tension ou de courant qui injecte dans le réseau des courants perturbateurs égaux à ceux absorbés par la charge polluante, mais en opposition de phase avec ceux-ci conduisant ainsi à des courants sinusoïdaux courant côté réseau. Ainsi l'objectif du filtre actif parallèle consiste à empêcher les courants harmoniques produits par

des charges polluantes, de circuler à travers l'impédance du réseau, située en amont du point de connexion du filtre actif [1].

Pour atteindre notre objectif de filtrage, ce mémoire est divisé en quatre chapitres:

Le premier chapitre est spécialisé à un état de l'art sur la pollution harmonique du réseau électrique et leurs solutions, les origines ainsi les conséquences de la pollution et les normes imposes sur le THD et les solutions classiques et modernes.

Dans le deuxième chapitre de ce mémoire, nous choisissons le filtre actif parallèle FAP à structure de tension à deux niveaux, nous citons le point de raccordement ainsi le rôle avec structure de FAP et modélisations circuit de puissance d'un filtre actif à structure tension, et

Liaison entre l'onduleur de tension et le réseau, l'onduleur de tension triphasé a deux niveaux.

Le troisième chapitre de cette thèse présente les stratégies de commandes en tension (puissance instantanée P-Q , filtre notch) avec alimentation par source énergie renouvelable comme photovoltaïque.

Le dernier chapitre une simulation a été faite de notre système de filtrage par quatre phase, phases 1et 2 méthode de puissance instantanée P-Q avant et après filtrage et le système alimenté par source continu puis source photovoltaïque.

Phases 3et4 par Filtre adaptatif cloche (notch) avant et après filtrage et le système alimenté par source continu puis source photovoltaïque. et finalement voir la différence entre les deux commandes du coté THD.

Chapitre I

Etat de l'art : pollutions du réseau électrique et leurs solutions

I.1 Introduction

Généralement, le distributeur d'énergie délivre l'énergie électrique sous forme d'un système triphasé de tensions sinusoïdales. Les paramètres caractéristiques de ce système sont la fréquence, l'amplitude, la forme d'onde, qui doit être sinusoïdale et la symétrie du système triphasé. Mais depuis quelques années, avec l'évolution technologique des composants d'électronique de puissance les distributeurs d'énergie rencontrent plusieurs problèmes liés à l'accroissement du nombre de convertisseurs statiques raccordés aux réseaux de distribution d'énergie. En effet, ces convertisseurs sont des sources polluantes qui absorbent des courants non sinusoïdaux et consomment pour la plupart de la puissance réactive.

Les harmoniques générés sont des perturbations permanentes affectant la forme d'onde de la tension du réseau. Ces perturbations se superposent à l'onde fondamentale. Elles ont donc pour conséquence de modifier l'onde de tension ou de courant ce qui se traduit par une dégradation du facteur de puissance et/ou par la génération de courants et de tensions alternatives de fréquence différente de celle du fondamental [2].

Dans ce chapitre, nous abordons de la source des harmoniques, ainsi les types et l'influence du raccordement des convertisseurs statiques sur les réseaux électriques et, nous présentons les solutions classiquement et modernes mises en œuvre pour dépolluer les réseaux électriques.

I.2 Harmonique

Un harmonique est une composante sinusoïdale d'une onde périodique ou d'une quantité possédant une fréquence qui est multiple entier de la fréquence fondamentale.

I.2.1 Inters harmoniques

Les inter-harmoniques sont des signaux de fréquence non multiple de la fréquence fondamentale.

I.2.2 Infra-harmoniques

Les infra harmoniques sont des signaux de fréquence inférieure à celle du fondamentale.

Remarque

En général, le domaine des fréquences qui correspond à l'étude des harmoniques est compris entre 100-2500 Hz, soit de l'harmonique de rang 2 jusqu'à l'harmonique de rang 50 [**3].** Et l'amplitude des harmoniques décroît généralement avec la fréquence **[4].**Voir figure (I.1**) [5].**

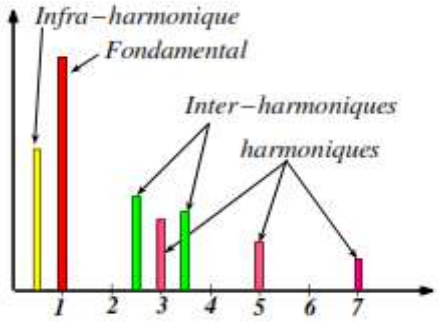


Figure I.1 : Représentation des inters et infra harmoniques.

La présence d'harmoniques dans les systèmes électriques signifie que le courant et la tension sont déformés et s'écartent de formes d'ondes sinusoïdales.

Les courants harmoniques sont causés par des charges non linéaires connectées au système de distribution. Une charge est dite non linéaire lorsque le courant qu'elle absorbe n'a pas la même forme d'onde que la tension d'alimentation. La circulation de courants harmoniques dans les impédances du réseau crée ensuite des harmoniques de tension, qui déforment la tension d'alimentation, voir **Figure(I.2)** où sont représentées des ondes de courant typiques pour des charges non linéaires

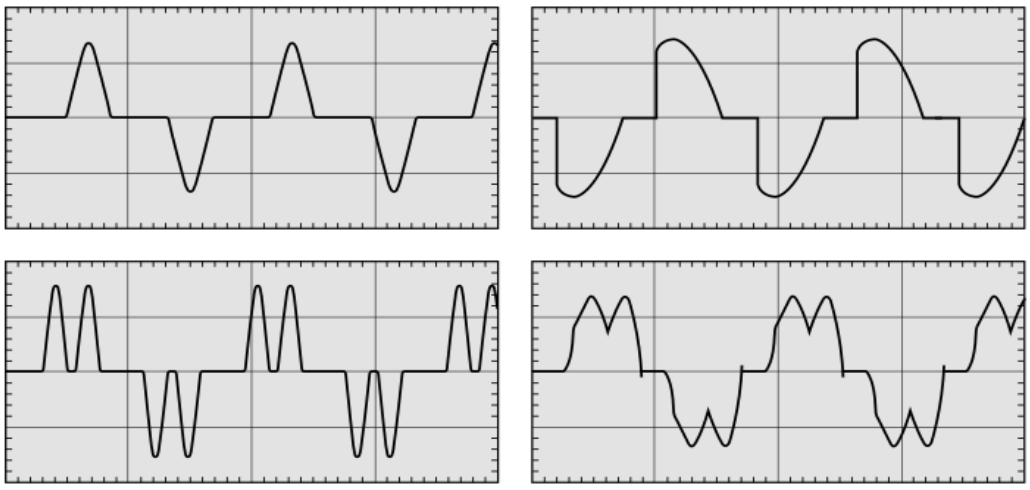


Figure I. 2: Exemples de formes d'onde de courant déformé monophasées (en haut) et triphasées (en bas).

Le théorème de Fourier indique que toutes les fonctions périodiques non sinusoïdales peuvent être représentées comme la somme des termes (i.e. une série) constituée de :

- un terme sinusoïdal à la fréquence fondamentale,
- des termes sinusoïdaux (harmoniques) dont les fréquences sont des multiples entiers de la fréquence fondamentale,
- une composante continue, le cas échéant.

L'harmonique de rang h (communément appelé "harmonique h") d'un signal est la composante sinusoïdale dont la fréquence est h fois la fréquence fondamentale.

L'équation de la décomposition harmonique d'une fonction périodique y(t) est présentée ci-dessous :

$$\mathbf{Y(t) = y_0 + \sqrt{2}(y_1 sin\,(\omega t - \varphi\,1) + y_2 sin\,(2\omega t - \varphi\,2) + \cdots . + y_n + y_h sin(h\omega t - \varphi_h))}$$

Qui peut s'écrire sous forme de somme

$$\mathbf{y(t) = Y_0 + \sum_{h=1}^{h=\infty} y_h \sqrt{2}\, sin\,(h\omega t - \varphi_h)} \qquad \text{(I.2)}$$

Où :

- $\mathbf{Y_0}$: valeur de la composante continue généralement nulle et considérée comme telle ci-après,
- $\mathbf{Y_h}$: valeur efficace de l'harmonique de rang h,
- $\boldsymbol{\omega}$: vitesse angulaire de la fréquence fondamentale $(2\pi.f_1 = 2\,\pi\,/T)$
- $\boldsymbol{\varphi}_h$: phase de la composante harmonique à t = 0.
- **h** : rang de l'harmonique,

La **Figure (I.3)** représente un exemple d'une onde de courant affectée par la distorsion harmonique sur un système de distribution électrique à 50 Hz. Le signal déformé est la somme de composantes harmoniques superposées :

- la valeur de la fréquence fondamentale (ou harmonique de rang 1) est de 50 Hz,
- l'harmonique de rang 3 a une fréquence de 150 Hz,
- l'harmonique de rang 5 a une fréquence de 250 Hz,
- etc.

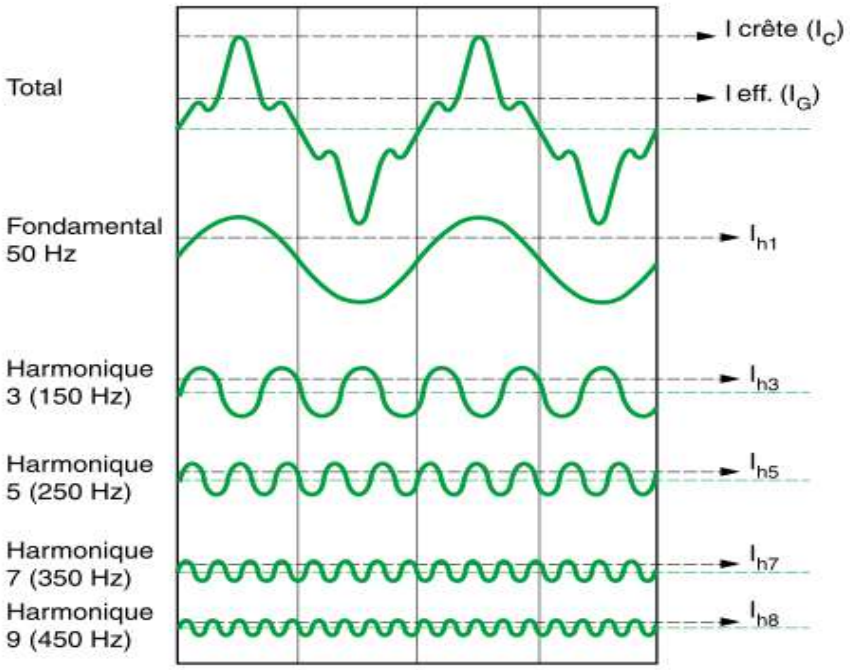


Figure I. 3: Exemple d'un courant contenant des harmoniques et décomposition en rangs harmoniques de rang 1 (fondamental), 3, 5, 7 et 9

I.2.3 Composante harmonique individuelle (ou composante harmonique de rang h)

La composante harmonique individuelle est définie comme étant le pourcentage d'harmoniques de rang h par rapport à la composante fondamentale.

Notamment :

$$\mathbf{U_h = 100\frac{u_h}{U1}}$$ Pourles harmoniques de tension (I.3)

$$\boldsymbol{I_h = 100\frac{I_h}{I1}}$$ Pour les harmoniques de courant (I.4)

I.3 Distorsion harmonique totale (THD)

La distorsion harmonique totale (THD) est un indicateur de la distorsion d'un signal. Il est largement utilisé en génie électrique et dans la gestion des harmoniques en particulier.

Pour un signal Y, le THD est défini comme suit :

$$\mathbf{THD} = \sqrt{\sum_{h=2}^{h=H}\left(\frac{Yh}{Y1}\right)^2} = \frac{\sqrt{Y2^2+Y3^2+\cdots+YH^2}}{Y1}$$ **(** I.5)

THD : est le rapport entre la valeur efficace de toutes les composantes harmoniques du signal Y, ramenée à la composante fondamentale Y1.

H : est généralement pris égal à 50, mais peut être limité dans la plupart des cas à 25.

A noter que THD peut être supérieur à 1 et est généralement exprimé en pourcentage.

I.3.1THD en courant ou en tension

Pour les harmoniques de courant l'équation est :

$$\mathbf{THDi} = \sqrt{\sum_{\mathbf{h=2}}^{\mathbf{h=H}} \left(\frac{\mathbf{Ih}}{\mathbf{I1}}\right)^{\mathbf{2}}} \quad \text{(I.6)}$$

En introduisant la valeur efficace du courant **:Irms** $= \sqrt{\sum_{\mathbf{h=1}}^{\mathbf{h=H}} \mathbf{Ih^2}}$ (I.7)

Nous obtenons la relation suivante :$\mathbf{THDi} = \sqrt{\left(\frac{\mathbf{Irms}}{\mathbf{I1}}\right)^{\mathbf{2}} - \mathbf{1}}$' (I.8)

Equivalent à **:**

$$\mathbf{I_{rms}} = \mathbf{I1}\sqrt{\mathbf{1} + \mathbf{THD_i}^{\mathbf{2}}} \quad \text{(I.9)}$$

Exemple

Pour **THDi = 40%,** nous obtenons :

$$\mathbf{Irms} = \mathbf{I1}\sqrt{\mathbf{1} + (\mathbf{0.4})^{\mathbf{2}}} = \mathbf{I1}\sqrt{\mathbf{1 + 0.16}} \approx \mathbf{I1} * \mathbf{1.08} \quad \text{(I.10)}$$

Pour les harmoniques de tension, l'équation est $\mathbf{THDu} = \sqrt{\sum_{\mathbf{h=2}}^{\mathbf{h=H}} \left(\frac{\mathbf{Uh}}{\mathbf{U1}}\right)^{\mathbf{2}}}$ (I.11)

I.4 Origine des harmoniques et perturbation sur le réseau électrique

Les dispositifs générateurs d'harmoniques sont présents dans tous les secteurs industriels, tertiaires et domestiques. Les harmoniques sont le fait d'une charge non-linéaire (le courant qu'elle absorbe n'a pas la même forme que la tension qui l'alimente).

Exemples de charges non-linéaires :

- les équipements industriels (machines à souder, fours à arc, fours à induction, redresseurs),
- les variateurs de vitesse pour moteurs asynchrones ou moteurs à courant continu,
- les onduleurs,
- les appareils de bureautique (ordinateurs, photocopieurs, fax, etc.),
- les appareils domestiques (TV, fours micro-ondes, éclairage néon, etc.),
- certains équipements avec saturation magnétique (transformateurs).

I.4.1Perturbations induites par les charges non-linéaires « courant et tension harmoniques »

L'alimentation de charges non-linéaires génère des courants harmoniques, circulant dans le réseau. La tension harmonique est due à la circulation du courant harmonique dans les impédances des circuits d'alimentation (ensemble transformateur et réseau, dans le cas de la **Figure (I.4)**).

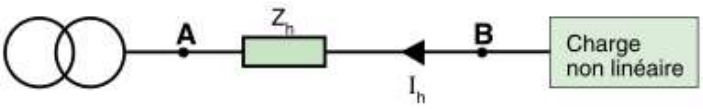


Figure I.4:Schéma unifilaire représentant l'impédance du circuit d'alimentation vue par l'harmonique de rang h

L'impédance inductive d'un conducteur augmente en fonction de la fréquence du courant qui le parcourt. A chaque courant harmonique de rang h correspond donc une impédance de circuit d'alimentation $\mathbf{Z_h}$.

Le courant harmonique de rang h va créer à travers l'impédance $\mathbf{Z_h}$ une tension harmonique $\mathbf{U_h}$, avec $\mathbf{U_h = Z_h \times I_h}$, par simple application de la loi d'Ohm. La tension en B est donc déformée. Tout appareil alimenté à partir du point B recevra alors une tension perturbée.

Cette déformation sera d'autant plus forte que les impédances du réseau sont importantes, pour un courant harmonique donné.

I.5 Circulation des courants harmoniques dans les réseaux

Tout se passe comme si les charges non-linéaires réinjectaient un courant harmonique dans le réseau en direction de la source.

Les **Figures (I.4a**, **I.4b**) présentent la vue d'une installation polluée par les harmoniques considérant tout d'abord l'installation parcourue par le courant de fréquence 50 Hz (voir Fig. 4a), auquel se superpose l'installation parcourue par le courant harmonique de rang h (voir Figure.I. 4b).

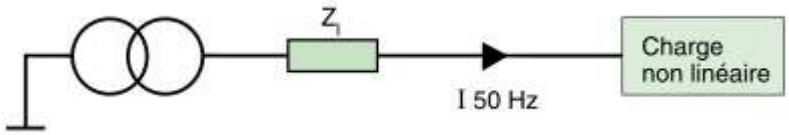


Figure I.4a: Schéma d'une installation alimentant une charge non-linéaire, pour laquelle seuls les phénomènes liés à la fréquence 50 Hz (fréquence fondamentale) sont pris en considération

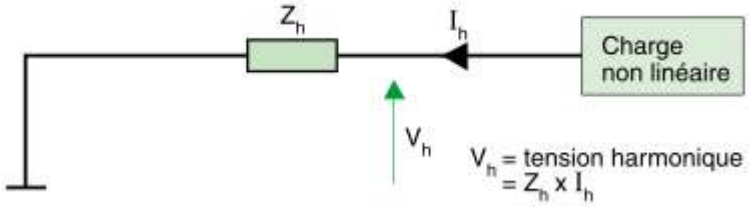


Figure I.4b: Schéma de la même installation, pour laquelle seuls les phénomènes liés à la fréquence de l'harmonique de rang h sont pris en compte.

L'alimentation de cette charge non-linéaire génère dans le réseau la circulation du courant I_{50Hz} (représenté sur la Figure I.4a), auquel s'ajoute chacun des courants harmoniques I_h (représenté sur la Fig.4b) correspondant à chaque harmonique de rang h.

Considérant toujours le modèle des charges réinjectant un courant harmonique dans le réseau, la **Figure (I.5**) représente la circulation des courants harmoniques dans un réseau.

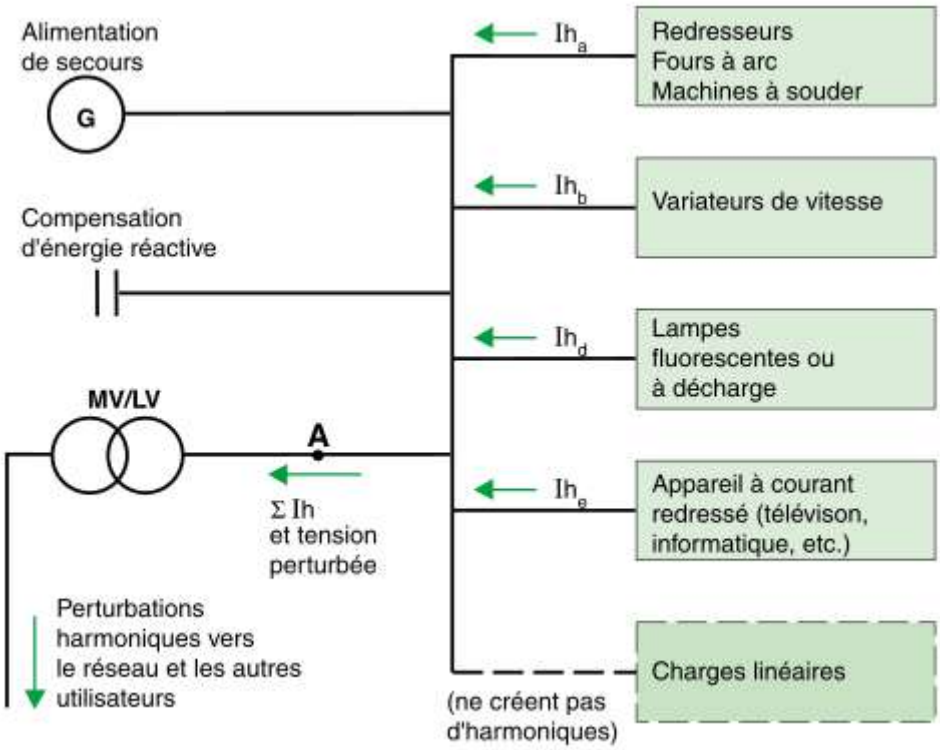


Figure. **I. 5**: Circulation des courants harmoniques dans un réseau

A remarquer sur cette figure que si certaines charges créent dans le réseau des courants harmoniques, d'autres charges peuvent absorber ces courants.

I.6 Normes imposées sur le THD

Les consommateurs ainsi que les distributeurs de l'énergie électrique sont conscients de l'importance d'une réglementation standard unique pour les problèmes de la pollution harmonique. Une telle réglementation universelle n'existe pas encore, cependant des organismes comme IEC (Commission Électrotechnique Internationale) en Europe [1], [6] et IEEE en Amérique [7], élaborent des normes efficaces qui peuvent être regroupées en trois catégories:

I.6.1 Niveaux de compatibilité harmonique en amont du point commun de raccordement

I.6.2 Limites sur l'émission harmonique des équipements

I.6.3Guide pour la mesure des harmoniques

La norme IEEE-519, par exemple, définit des limites pour les tensions et courants harmoniques au point commun de raccordement(PCC) pour assurer le bon fonctionnement des récepteurs dans d'autres sites. À titre d'exemple, les taux individuels maximaux des tensions harmoniques ainsi que le THD à ne pas dépasser sont donnés dans le tableau1.1.

Tableau 1.1 : Limites des tensions harmoniques selon **IEEE-519**

Tension au jeu de barres	**Composante harmonique**	**THD maximal**
69kv et moins	**3.0**	**5.0**
115kV à 161 kV	**1.5**	**2.5**
Plus de 161 kV	**1.0**	**1.5**

D'autre part, les principales normes en matière de pollution harmonique basse tension sont définies au niveau international par la norme CEI 61000 : **[2] [5] [8] [9].**

CEI 61000-2-2 : cette norme fixe les limites de compatibilité pour les perturbations conduites basse fréquence et la transmission de signaux sur les réseaux publics d'alimentation basse tension. Les phénomènes perturbateurs incluent les harmoniques (tableau 1.2), inter-harmoniques, fluctuations de tension, creux de tension, déséquilibres de tension transitoires, etc.

Tableau1.2 :**CEI61000-2-2**:Niveaux de compatibilité pour les tensions harmoniques individuelles sur les réseaux publics basse tension.

Harmoniques impairs non multiples de 3		**Harmoniques impairs multiples de 3**		**Harmoniques pairs**	
Rang harmonique	Tension harmonique	Rang harmonique	Tension harmonique	Rang harmonique	Tension harmonique
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,3	6	0,5
13	3	21	0,2	8	0,5
17	2	>21	0,2	10	0,5
19	1,5			12	0,2
23	1,5			>12	0,2
25	1,5				
>25	0,2+12,5				

CEI 61000-2-4 : cette norme fixe les limites de compatibilité pour les réseaux industriels et non publics basse tension et moyenne tension, à l'exclusion des réseaux de navires, des avions, des plateformes offshores et des installations ferroviaires afin de pour établir les limites d'émission sur les réseaux industriels et de choisir les niveaux d'immunité des équipements inclus dans ces systèmes

Tableau 1.3:Taux (en % deV1) des tensions harmoniques acceptables (CEI61000-2-4).

Rang harmonique	Classe1 : matériels et systèmes sensibles	Classe 2 : réseaux industriels	Classe 3 : réseaux industriels perturbés
2	2	2	3
3	3	5	6
4	1	1	1,5
5	3	6	8
6	0,5	0,5	1
7	3	5	7
8	0,5	0,5	1
9	1,5	1,5	2,5
10	0,5	0,5	1
11	3	3,5	5
Pair >10	0,2	0,2	1
13	3	3	4,5
15	0,3	0,3	2
17	2	2	4
19	1,5	1,5	4
21	0,2	0,2	1,75
Impair >21 et=3h	0,2	0,2	1
23	1,5	1,5	3,5
25	1,5	1,5	3,5
Impair, >21 et≠3h	0,2+12,5/h	0,2+12,5/h	$5*(11/h)^{1/2}$
THD	**5%**	**8%**	**10%**

CEI61000-3-2cette norme spécifie les limites pour les émissions de courant harmonique des matériels individuels raccordés aux réseaux publics pour les appareils consommant moins de16 A par phase.

Tableau1.4:CEI61000-3-2:Limites d'émission de courants harmoniques des appareils basse tension de courant inférieur à16A et de classe A.

Rang harmonique	Courant harmonique maximal autorisé (A)
2	1,08
3	2,30
4	0,43
5	1,14
6	0,30
7	0,77
$8 \leq h \leq 40$	0,23*8
9	0,40
11	0,33
13	0,21
$15 \leq h \leq 39$	0,15*15

Letableau1.4 indique les limites d'émission pour ces appareils faisant partie de la classe A, c'est-à-dire autres que les outils portatifs, appareils d'éclairage et appareils ayant un courant d'entrée à forme d'onde spéciale dont la puissance active est inférieure à600W.

CEI61000-3-4: cette norme spécifie les limites pour les émissions de courant harmonique des équipements individuels d'intensité assignée supérieure à16A et jusqu'à75A. Ces limites s'appliquent aux réseaux publics de tensions nominales entre230V (monophasée) et 600V (triphasé).

Tableau 1.5:CEI61000-3-4:Limitation des émissions de courants harmoniques

Rang harmonique	Courant harmonique en % du fondamental
3	21,6
5	10,7
7	7,2
9	3,8
11	3,1
13	2,0
15	0,7
17	1,2
19	1,1
21	≤0

23	0,9
25	0,8
27	≤0,6
29	0,7
31	0,7
33	≤0,6
pair	≤0,6 ou ≤8

CEI61000-4-13:Le but de cette norme est d'établir une référence commune pour l'évaluation de l'immunité fonctionnelle des matériels électriques et électroniques soumis aux harmoniques et inter-harmoniques et aux fréquences des signaux transmis sur le réseau. Les niveaux proposés correspondent généralement aux environnements résidentiels, commerciaux, et de l'industrie légère. Elle donne les essais d'immunité basse fréquence aux harmoniques et inter-harmoniques incluant les signaux transmis sur le réseau électrique alternatif. Le tableau1.6 donne les taux des harmoniques en tension à utiliser pour vérifier l'immunité des appareils pour les matériels et systèmes sensibles (classe1) et les réseaux industriels (classe2)

Tableau1.6:CEI61000-4-13:Taux des harmoniques en tension à utiliser pour vérifier L'immunité des appareils.

Rang harmonique	**Classe1 : matériels et systèmes sensibles**	**Classe 2 : réseaux industriels**
3	8	8
5	8	1
7	6,5	1
9	2,5	4
11	5	7
13	4,5	6
15	-	3
17	3	5
19	2	5
21	-	2
23	2	4
25	2	4
27	-	2
29	1,5	4
31	1,5	3

D'autre part, pour assurer la compatibilité entre les installations sensibles alimentées par le Réseau, il faut imposer des limites d'émission et donner des niveaux d'immunité suffisants

Amplitude de la tension	Pour chaque période d'une semaine 95%des valeurs efficaces moyennes sur 10minutes doivent être dans la plage *Vn*±10%
Variations rapides de la tension	De5% à10% de *Vn*(4à6% en moyenne tension)
Creux de tension	Profondeur: entre10% à99% de *Vn* Durée: entre10 mset1 minute Nombre: quelquesdizainesà1 millier par an
Coupures brèves	Durée: jusqu'à3 minutes Nombre: quelques dizaines à plusieurs centaines par an
Coupures longues	Drée: supérieure à 3minutes Nombre: entre10 et50 par an
Fréquence	50 Hz± 1% pendant95% d'une semaine 50Hz+ 4%, 6% pendant100% d'une semaine

.

Tableau 1.7:Limitesdeperturbationsdéfiniespar**EN50160**

Les caractéristiques principales de la tension fournie par un réseau de distribution(*MT* ou *BT*),définies par la norme Européenne ***EN 50160***, précisent les tolérances qui doivent être garanties pour la tension et la fréquence ainsi que les niveaux des perturbations habituellement rencontrées**[2][10].**

I.7 Solutions de base pour atténuer les harmoniques

Pour limiter la propagation des harmoniques dans le réseau, des dispositions peuvent être prises et sont à observer en particulier dans le cas d'une nouvelle installation.

I.7.1 Positionner les charges polluantes en amont du réseau

La perturbation harmonique globale croît lorsque la puissance de court-circuit diminue. En dehors de toute considération économique, il est donc préférable de connecter les charges polluantes le plus en amont possible voir **Figure (I.7**).

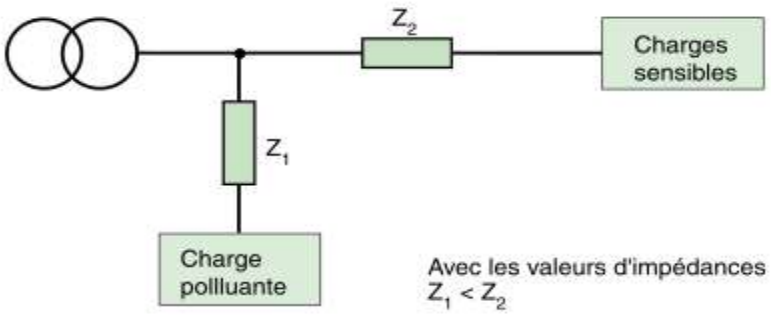


Figure I.7: Alimentation le plus en amont possible des charges non-linéaires (schéma conseillé)

I.7.2Regrouper les charges polluantes

Pour établir un schéma unifilaire, il convient de séparer les équipements perturbateurs des autres voir **Figure (I.8**): en pratique, alimenter les charges polluantes et non polluantes par des jeux de barres différents.

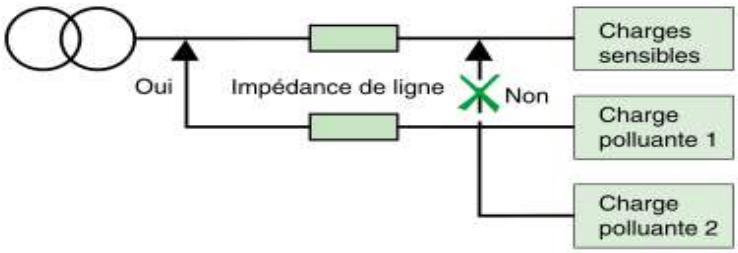


Figure I.8: Regroupement des charges non-linéaires et alimentation le plus en amont possible (schéma conseillé)

I.7.3 Séparer les sources

Dans la lutte contre les harmoniques, une amélioration supplémentaire est obtenue en réalisant une alimentation par transformateur séparé, selon le schéma de principe suivant voir **Figure (I.9**).

L'inconvénient de cette solution est l'augmentation du coût de l'installation.

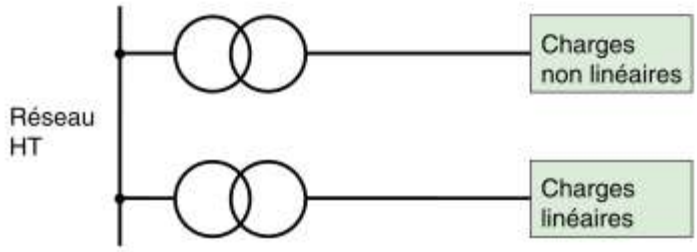


Figure I. 9: Alimentation des charges polluantes par transformateur séparé

I.7.4Utiliser des transformateurs à couplages particuliers

L'effet de couplage de transformateurs permet la suppression de certains rangs d'harmoniques. En fonction des types de couplages différents rangs d'harmoniques sont arrêtés :

- un couplage Dyd arrête les harmoniques de rangs 5 et 7 voir **Figure (I.10**),
- un couplage Dy arrête les harmoniques de rang 3,
- un couplage DZ 5 arrête les harmoniques de rang 5.

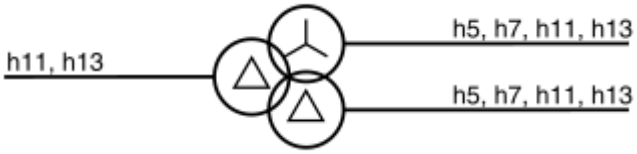


Figure I. 10: L'utilisation d'un transformateur Dyd stoppe la propagation des harmoniques de rangs 5 et 7 vers l'amont du réseau.

I.7.5 Placer des inductances dans l'installation

Dans le cas d'alimentation de variateurs de vitesse, il est possible de lisser le courant en mettant en place des inductances de ligne. Et l'augmentation de l'impédance du circuit d'alimentation limite le courant harmonique.

La mise en place de selfs anti-harmoniques sur les batteries de condensateurs augmente l'impédance de l'ensemble self et condensateur pour les harmoniques de rangs élevés. Cela évite le phénomène de résonance et protège les condensateurs.

I.8 Choisir un schéma de liaison à la terre adapté

I.8.1Cas du régime TNC

Dans le cas du régime de neutre TNC, un seul conducteur (PEN) assure la protection en cas de défaut (terre) et assure le transit des courants de déséquilibre.

En régime permanent, les courants harmoniques transitent dans le PEN. Or, celui-ci a une certaine impédance, ce qui implique de petites différences de potentiel (de l'ordre de quelques volts) entre appareils, et peut entraîner le dysfonctionnement des équipements électroniques.

Le régime de neutre TNC doit donc être réservé à l'alimentation des circuits de puissance, en tête d'installation, et est à proscrire dans le cas de l'alimentation de charges sensibles.

I.8.2Cas du régime TNS

Il est conseillé dans le cas de présence d'harmoniques. En effet, le conducteur de neutre et le conducteur de protection PE étant complètement séparés, le potentiel du réseau est beaucoup mieux fixé.

I.9 Filtrage des harmoniques

Dans le cas où les actions préventives ci-dessus sont insuffisantes, il est nécessaire d'équiper l'installation polluée de dispositif de filtrage.

Il existe trois types de filtres :

- le filtre passif,
- le filtre actif,
- le filtre hybride.

I.9.1Filtre passif

I.9.1.1 Applications typiques

- Installations industrielles avec un ensemble de générateurs d'harmoniques de puissance totale supérieure à 200 kVA environ (variateurs de vitesse, alimentations sans interruptions, redresseurs...).
- Installation présentant un besoin de compensation d'énergie réactive.
- Nécessité de réduction du taux de distorsion en tension pour éviter la perturbation de récepteurs sensibles.
- Nécessité de réduction du taux de distorsion en courant pour éviter les surcharges.

I.9.1.2 Principe de fonctionnement

Un circuit LC accordé sur chaque fréquence d'harmonique à filtrer, est placé en parallèle sur le générateur d'harmoniques voir **Figure (I.11**). Ce circuit de dérivation absorbe les harmoniques et évite que ceux-ci ne circulent dans l'alimentation.

En général, le filtre passif est accordé sur un rang d'harmonique proche de l'harmonique à éliminer. Plusieurs branches de filtres en parallèle peuvent être utilisées lorsque l'on souhaite une réduction forte du taux de distorsion sur plusieurs rangs.

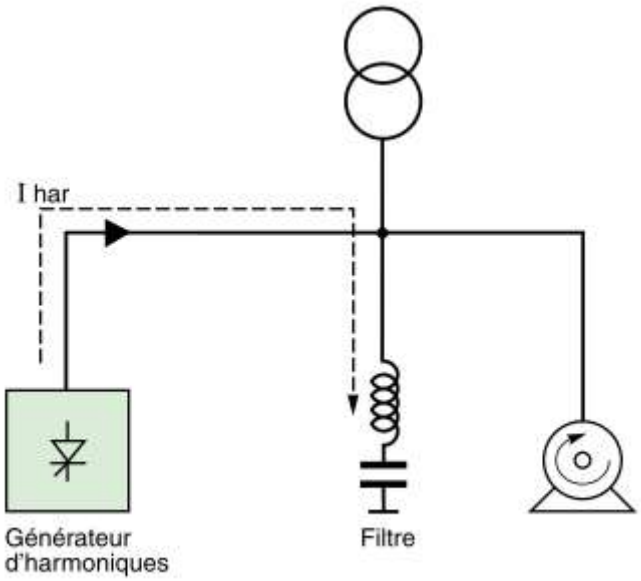


Figure I.11: Principe d'utilisation d'un filtre passif

I.9.2Filtre actif (ou compensateur actif)

I.9.2.1 Applications typiques

- Installations tertiaires avec générateurs d'harmoniques de puissance totale inférieure à 200 kVA (variateurs de vitesse, alimentations sans interruptions, bureautique...).
- Nécessité de réduction du taux de distorsion en courant pour éviter les surcharges.

I.9.2.2 Principe de fonctionnement

Ce sont des systèmes électroniques de puissance installés en série ou en parallèle avec la charge non-linéaire, visant à compenser soit les tensions harmoniques, soit les courants harmoniques générés par la charge. La **Figure (I.12)** donne un exemple de filtre actif parallèle compensant le courant harmonique (Ihar = -Iact).

Le filtre actif réinjecte en opposition de phase les harmoniques présents sur l'alimentation de la charge, de telle sorte que le courant de ligne Is soit sinusoïdal.

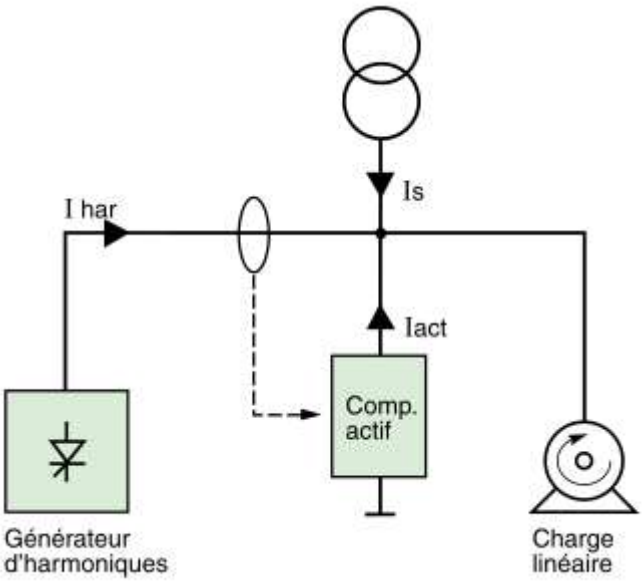


Figure I. 12: Principe d'utilisation d'un filtre actif

I.9.3Filtre hybride

I.9.3.1 Applications typiques

- Installations industrielles avec un ensemble de générateurs d'harmoniques de puissance totale supérieure à 200 kVA environ (variateurs de vitesse, alimentations sans interruptions, redresseurs...).
- Installation présentant un besoin de compensation d'énergie réactive.
- Nécessité de réduction du taux de distorsion en tension pour éviter la perturbation de récepteurs sensibles.
- Nécessité de réduction du taux de distorsion en courant pour éviter les surcharges.
- Recherche de conformité à des limites strictes d'émission harmonique.

I.9.3.2 Principe de fonctionnement

Les deux types de dispositifs précédents peuvent être associés au sein d'un même équipement et constituer un filtre hybride voir **Figure (I.13**). Cette nouvelle solution de filtrage permet de cumuler les avantages des solutions existantes et de couvrir un large domaine de puissance et de performances.

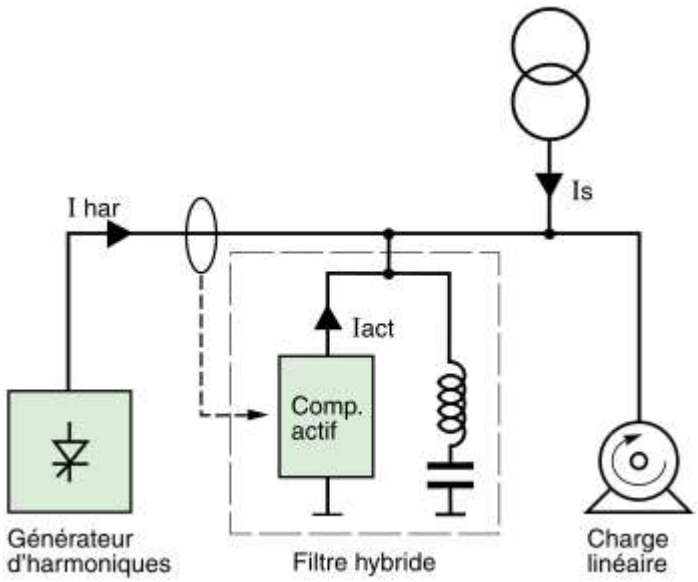


Figure I. 13: Principe d'utilisation d'un filtre hybride

I.10 Critères de choix

I.10.1 Le filtre passif

Permet à la fois la compensation d'énergie réactive et une grande capacité de filtrage en courant.

Le filtre passif réduit aussi les tensions harmoniques des installations dont la tension d'alimentation est polluée. Si la puissance réactive fournie est importante, il est conseillé de mettre hors tension le filtre passif pendant les périodes de faible charge.

L'étude de raccordement d'un filtre doit tenir compte de la présence éventuelle d'une batterie de compensation et peut conduire à sa suppression.

I.10.2 Le compensateur actif

Permet le filtrage des harmoniques sur une large bande de fréquence. Il s'adapte à n'importe quelle charge. Cependant, sa puissance harmonique est limitée.

I.10.3 Le filtre hybride

Réunit l'ensemble des performances des filtres passifs et actifs.

I.10 filtres actifs parallèles

Puisqu'ils constituent la structure maitresse de cette thèse, il s'avère important de dresser un bref historique sur l'évolution des filtres actifs parallèles avant de clôturer ce chapitre.

Dans les premières références [11] [12], les filtres actifs parallèles sont conçus à partir d'onduleurs à thyristors commandés en MLI [13]. Ces filtres ont été développés pour éliminer les harmoniques générés par les convertisseurs utilisés dans les systèmes de transmission de courant continu à haute tension (HVDC). Toutefois, à cette époque la technologie des interrupteurs d'électronique de puissance ne permettait pas un développement applicatif significatif.

Par la suite, des progrès importants ont été accomplis avec la commercialisation de composants d'électronique de puissance qui commutent des puissances de plus en plus

importantes avec des fréquences de plus en plus élevées. Ainsi, en 1982, le premier FAP de 800kVA, composé d'un commutateur de courant à MLI et thyristors GTO, a été installé pour la compensation d'harmoniques [14], Plus tard, de nombreux onduleurs de puissance commandés en MLI ont été développés pour des applications de filtrage actif [15] [16]. En conséquence, les filtres actifs parallèles ont commencé à être commercialisés et installés à travers le monde et surtout au Japon, où en 1996, il y avait plus de cinq cents filtres actifs parallèles installés avec des puissances allant de 50kVA à 2MVA [17].

Les premiers dispositifs ne compensaient que les perturbations harmoniques de courant. Toutefois, les filtres actifs ont évolué et des prototypes avec des fonctionnalités plus nombreuses sont apparus. Les filtres actifs modernes, en plus de compenser et amortir les courants harmoniques, compensent les déséquilibres de courant, contrôlent la puissance réactive et le flicker.

Pour l'instant, tous les filtres actifs parallèles étaient installés par des consommateurs industriels. Néanmoins, l'installation par le distributeur d'énergie de ces dispositifs peut s'envisager. Dans ce cas, l'objectif principal est d'amortir la résonance entre les condensateurs de compensation de puissance réactive et l'inductance de la ligne plutôt que de réduire la distorsion harmonique de la tension sur un réseau de distribution [18].

Au cours de l'année 1997, la topologie multi niveaux a débuté aussi pour des applications de filtrage actif. La référence [19]. présente un filtre actif avec un onduleur clampé par le neutre et dans [20] l'auteur a présenté un filtre actif en utilisant des onduleurs en cascade de 11 niveaux. Les années qui ont suivi ont vu de nombreuses publications sur les filtres actifs multi niveaux avec différentes topologies : dans [21], l'auteur propose une topologie à capacité flottante avec commutation douce; la référence [22] utilise un convertisseur en cascade asymétrique, etc. Cependant, de nos jours, la plupart des filtres actifs parallèles utilisent des convertisseurs clampés par le neutre [23] [24] [25]. L'évolution des dispositifs d'électronique de puissance vers des applications à chaque fois plus puissantes est palpable dans le domaine des filtres actifs, même si cela reste à moindre échelle qu'ailleurs. On constate de plus en plus, une évolution vers des tensions et des puissances plus élevées, y compris sans transformateur de couplage.

La première référence sur un filtre actif connecté à un réseau de moyenne tension date de 2001. La référence [26] propose la connexion d'un filtre actif shunt monophasé à l'extrémité d'une ligne de traction de 25kV dans le but de diminuer les harmoniques de

tension aux rangs 3, 5 et 7 au point de connexion du filtre et de fournir de la puissance réactive pour maintenir la tension sur la ligne. Par la suite, [27] propose une étude similaire mais avec un convertisseur de topologie hybride à cinq niveaux. Un bras de ce convertisseur est composé d'un convertisseur clampé par le neutre qui utilise des IGBTs et l'autre bras est composé d'un convertisseur à deux niveaux conventionnel à IGCTs, Une contribution plus récente est consacrée à un filtre actif à base d'onduleurs en cascade connecté à un réseau de 4.16kV avec transformateur [28]. L'auteur constate qu'une combinaison des semi-conducteurs de puissance élevée et une inductance de filtre réduit en moyenne tension peut être une solution compétitive, au niveau du coût, par rapport aux filtres actifs conventionnels en basse tension. Néanmoins, à présent, les références liées aux filtres actifs de moyenne tension dans la littérature sont relativement limitées et on constate plutôt une évolution vers l'utilisation de filtres hybrides pour ce type d'application. En effet, ces filtres se présentent comme une solution très intéressante pour surmonter les limitations des filtres actifs, surtout en ce qui concerne la montée en tension.

D'un côté, dans [29], l'auteur propose l'utilisation d'un filtre actif hybride à base d'un onduleur multi niveaux à capacité flottante pour se connecter à un réseau de 20kV. L'onduleur se comporte comme un diviseur de tension dans le but de limiter la tension que doit supporter le filtre actif. D'un autre côté, dans [30], est décrit un filtre actif hybride biniveaux, constitué d'un filtre passif relié directement en série (sans transformateur) à un filtre actif, le tout directement connecté à un réseau de 3.3kV. Une étude similaire est réalisée dans [31] où le filtre est connecté à un réseau de 6.6kV mais dans ce cas le but du filtre est d'amortir les harmoniques de la ligne. Finalement, dans [32] l'auteur propose un filtre actif hybride sans transformateur avec topologie NPC qui se connecte à un réseau de distribution de 6kV/10kV [5]

I.11 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la distorsion harmonique et les différentes sources de perturbation affectant la forme d'onde des tensions du réseau électrique ainsi que leurs effets néfastes sur les équipements électriques qui y sont connectés. Ces effets sont à l'origine d'échauffements et de dégradations du fonctionnement de ces équipements. Les normes imposées ont été également présentées. Elles fixent les limites de la génération d'harmoniques.

Plusieurs solutions traditionnelles et modernes de dépollution ont été présentées. Nous avons montré que la solution classique à base de filtres passifs est souvent pénalisée en termes d'encombrements et de résonance. De plus, les filtres passifs ne peuvent pas s'adapter à l'évolution du réseau et aux charges polluantes. Donc le filtre actif parallèle c'est meilleur solution pour lutte contre et plus adapter avec les charges évolutives.

CHAPITRE II

Filtrage actif parallèle de tension

II-1 Introduction

Le filtre actif parallèle FAP est un onduleur de tension qui convertir la tension continu à alternatif. Il est constitué de trois bras (A, B, C), chaque bras composés de deux transistors IGBT et de deux diodes en antiparallèle, il injecte dans le réseau des courants harmoniques égaux et en opposition de phase à ceux absorbés par la charge non linéaire (polluante). Cette structure à pour défi de mitigation de manière efficace global ou partiel des harmoniques de courant qui circule dans le réseau électrique.

Dans ce chapitre nous étudierons la structure générale du filtre actif parallèle FAP.

II.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 (II.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.

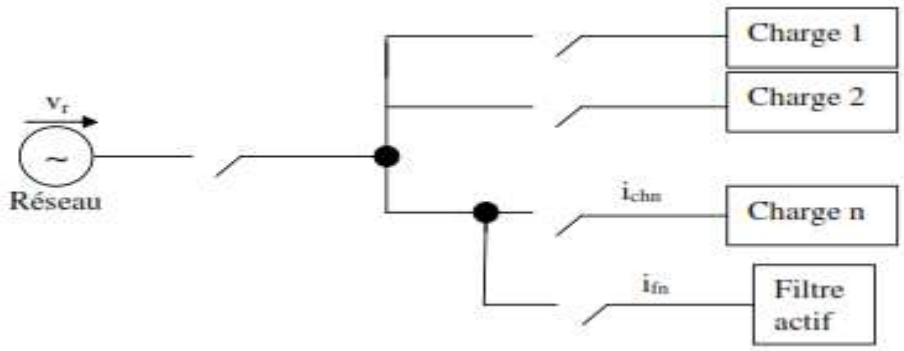


Figure (II.1): *Raccordement d'un filtre actif parallèle.*

Dans l'idéal, la correction des harmoniques doit être effectuée à leur point d'origine. Un certain nombre de critères financier ces techniques sont prises en compte pour assurer le choix optimal [33].

II.3 Role 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. [34] La figure (II.2) illustre le principe de compensation parallèle idéale.

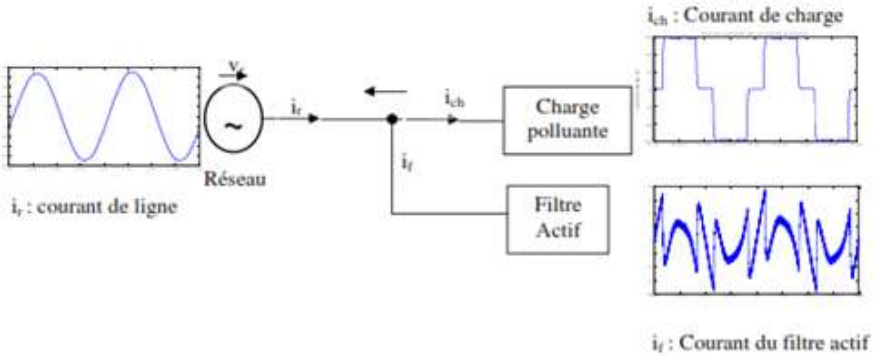


Figure (II.2)*: principe du compensateur shunt idéal*

II.4 Structure filtre actif parallèle source de tension

II.4.1 Principe de fonctionnement

Le filtre actif connecté en parallèle sur le réseau, comme le montre la(Figure II.2), est le plus souvent commandé comme un générateur de courant [35], [36], [37].

Il injecte dans le réseau des courants perturbateurs égaux à ceux absorbés par la charge polluante, mais en opposition de phase avec ceux-ci. Le courant côté réseau est alors sinusoïdal. Ainsi l'objectif du filtre actif parallèle (F.A.P) consiste à empêcher les courants perturbateurs (harmoniques, réactifs et déséquilibrés), produits par des charges polluantes, de circuler à travers l'impédance du réseau, située en amont du point de connexion du filtre actif [1].

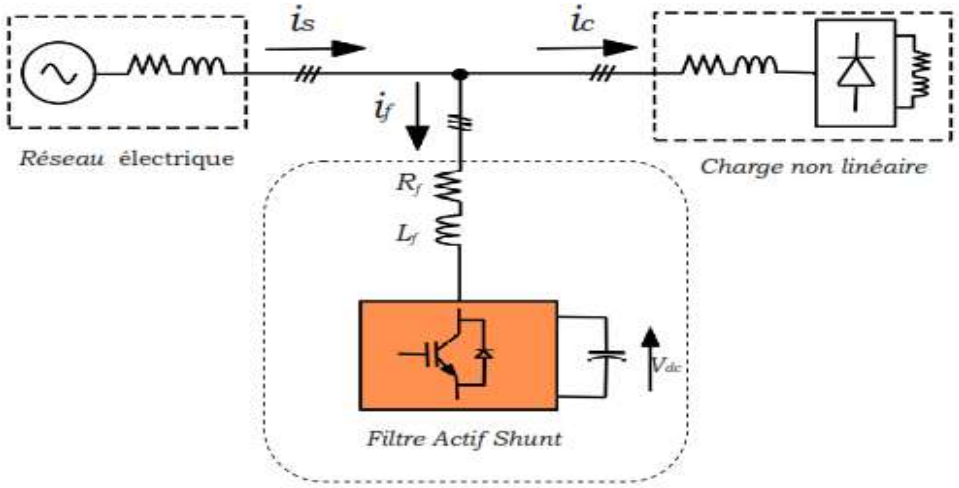


Figure II.3: Filtre actif parallèle type source de tension

II.4.2 l'onduleur de tension

L'onduleur triphasé est constitué d'interrupteurs bidirectionnels en courant. Ils sont réalisés par des semi-conducteurs commandables à l'ouverture et à la fermeture (de type IGBT dans la majorité des cas) montés en antiparallèle avec une diode. Pour cette structure, on doit respecter les contraintes suivantes :

- A un instant donné, un seul interrupteur d'un même bras doit conduire afin d'éviter tout court-circuit de la source de tension,

- Le courant de ligne doit toujours trouver un chemin possible d'où la mets-en antiparallèle de diodes au niveau des interrupteurs [38].

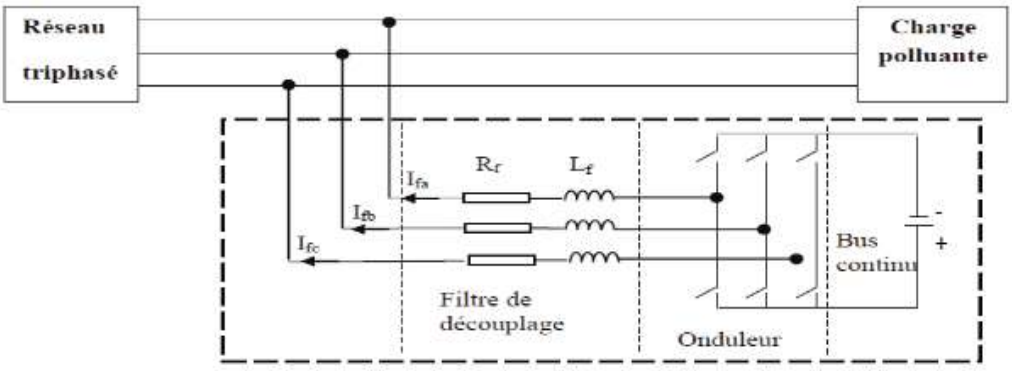


Figure II.4: Schéma du circuit de puissance d'un filtre actif à structure tension

Le filtre de sortie est un filtre passif habituellement du premier ordre (L_f, R_f) employé pour connecter l'onduleur de tension au réseau électrique [5], [39]. Dans ce cas, le pont onduleur est l'interface entre deux types de sources : source de courant côté alternatif et source de tension côté continu [39]. La figure III.3 représente le schéma équivalent par phase d'un filtre actif connecté au réseau électrique.

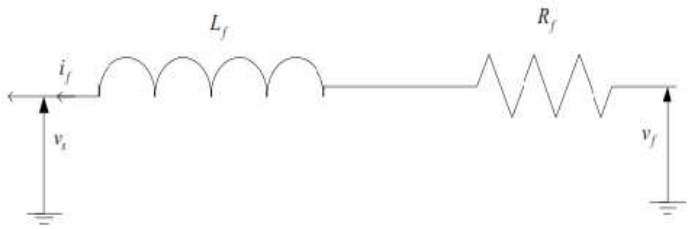


Figure II.5: Schéma de liaison entre l'onduleur de tension et le réseau

II.5- Filtre de découplage

Le but du filtre de découplage est de permettre la connexion de l'onduleur de tension au réseau électrique qui est très souvent considéré comme une source de courant qui génère des courants harmoniques à partir de la différence des tensions entre la sortie du pont onduleur et le réseau [40]. Ce filtre est un filtre qui limite certes la dynamique du courant mais réduit en même temps la propagation sur le réseau électrique des composantes dues aux commutations [41].

II.6 Source d'énergie du l'onduleur

La source de l'énergie de l'alimentation du filtre actif parallèle FAP continu se fait par un système de l'énergie renouvelable dont photovoltaïque, représenté par un Gpv et hacheur boost qui sont jouent le rôle d'une source de tension continu V_{dc}..

II.7 Présentation de convertisseur de tension à deux niveaux

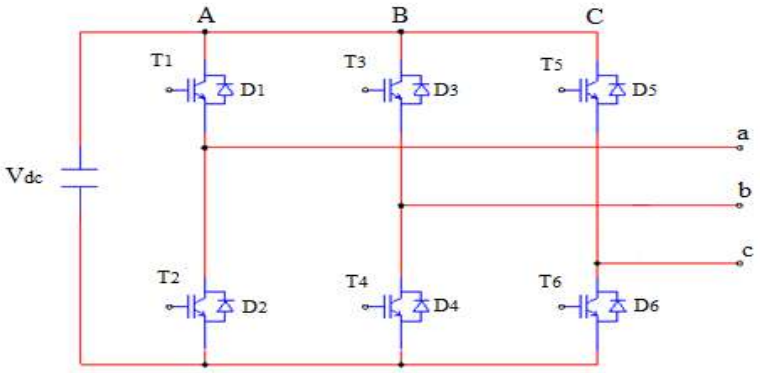


Figure II.6 *Schéma de l'onduleur de tension triphasé a deux niveaux.*

L'ouverture et la fermeture des interrupteurs de l'onduleur de la Figure(II.6) dépendent de l'état des signaux de commande (S_a,S_b,S_c), comme défini ci-dessous[42]

$$S_a = \begin{cases} 1 \;\; si \;\; T_1 \;\; fermé \;\; et \;\; T_2 \;\; ouvert \\ 0 \;\; si \;\; T_1 \;\; ouvert \;\; et \;\; T_2 \;\; fermé \end{cases}$$

$$S_b = \begin{cases} 1 \;\; si \;\; T_3 \;\; fermé \;\; et \;\; T_4 \;\; ouvert \\ 0 \;\; si \;\; T_3 \;\; ouvert \;\; et \;\; T_4 \;\; fermé \end{cases}$$

$$S_c = \begin{cases} 1 \;\; si \;\; T_5 \;\; fermé \;\; et \;\; T_6 \;\; ouvert \\ 0 \;\; si \;\; T_5 \;\; ouvert \;\; et \;\; T_6 \;\; fermé \end{cases}$$

En pratique, les deux semi-conducteurs d'un même bras ne doivent jamais conduire en même temps afin d'éviter de court-circuiter la source de tension ; il faut donc générer un

Temps d'attente, également appelé temps mort, entre la commande au blocage d'un interrupteur

et la commande à l'amorçage de l'autre interrupteur du même bras. Ainsi, à partir des états des interrupteurs présentés par les variables T_1, T_2 et T_3, on obtient huit cas possibles pour les 3 tensions de sortie du filtre actif V_{fi} (référencées par rapport au point de mi-tension continue), comme le montre le Tableau II.1 [39].

V_{fa}	V_{fb}	V_{fc}	T_1	T_2	T_3	*Cas N°*
0	0	0	0	0	0	0
$2V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	1	0	0	1
$-V_{dc}/3$	$2V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	0	1	0	2
$V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$	$-2V_{dc}/3$	1	1	0	3
$-V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	$2V_{dc}/3$	0	0	1	4
$V_{dc}/3$	$-2V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$	1	0	1	5
$-2V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$	0	1	1	6
0	0	0	1	1	1	7

On pourra exprimer huit configurations possibles, comme le montre la Figure (II.7) [42].

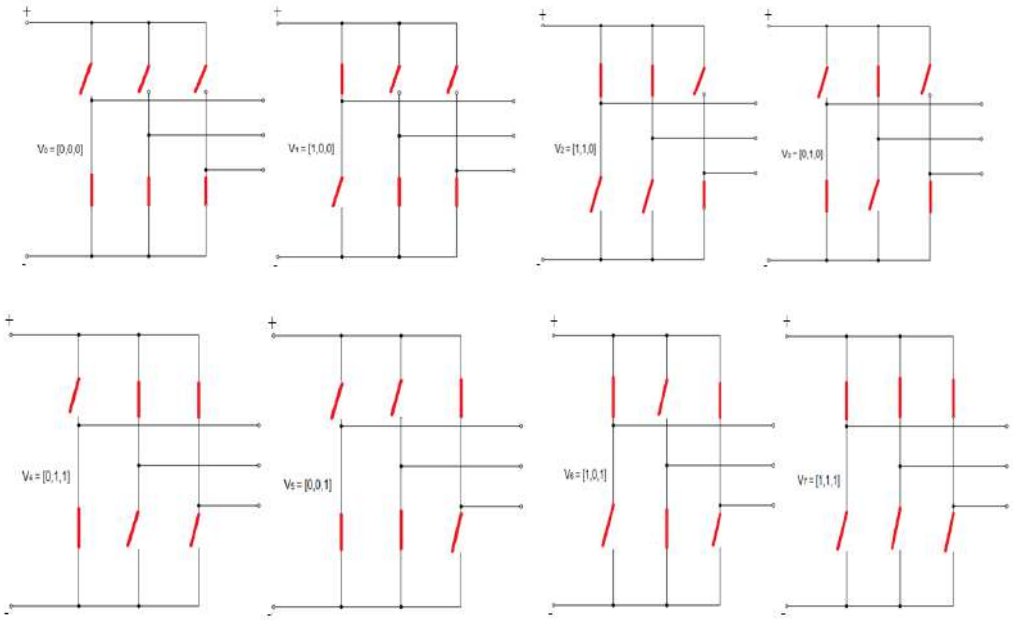


Figure II.7 : *Les huit configurations possibles d'un onduleur triphasé à deux niveaux*

II.8 Modélisation du réseau électrique

Le réseau est assimilable à une source de tension sinusoïdale en série avec une impédance, dite de court circuit. La figure (II.8) montre le schéma de principe d'un réseau électrique triphasé.

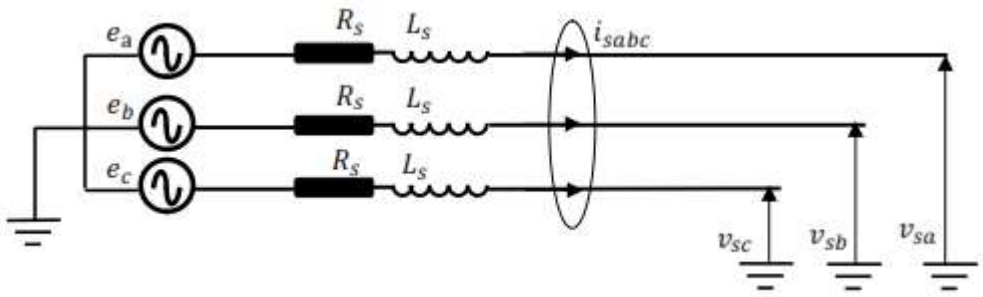


Figure II.8: Schéma électrique d'un réseau triphasé

Les tensions sont exprimées par le système d'équation suivant :

$e_{a}=\sqrt{2}v\ sin\ (\omega t)$

II.1

$e_{b}=\sqrt{2}v\ sin\ (\omega t-\frac{2\pi}{3})$

II.2 $e_{c}=\sqrt{2}v\ sin\ (\omega t+\frac{2\pi}{3})$

II.3 Ou , $\omega_{=2}\ \pi f_s$

est la pulsation du réseau et V la valeur efficace de sa tension

II.9 Modélisation de la charge

Considérons que la charge polluante est un redresseur de tension triphasé à diodes (pont de Graëtz), connectée au réseau par l'intermédiaire d'une impédance de ligne (L_l,R_l), et alimentant une charge inductive (L_d,R_d). Le schéma de principe est illustre par la figure II.9 [43].

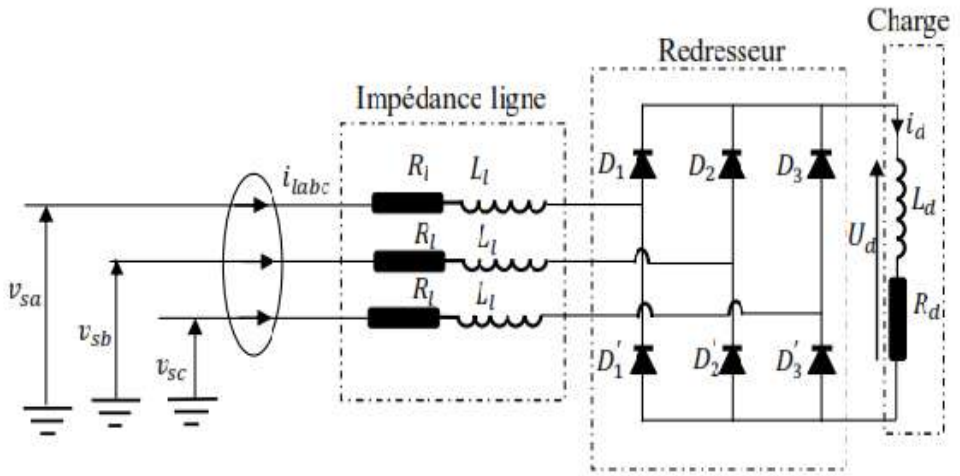


Figure II.9 : schéma de la charge polluante

Pour simplifie le calcule, on suppose que :

Le redresseur idéal et l'empiètement est nul, deux diodes de même bras D_i et D_{i+3} avec i=1,2 et3 ne peuvent pas conduire simultanément. Lorsque D_1 conduit, l'une deux diodes D_b' et D_c' conduit également. Il en vient que D_1 lorsque $\mathbf{V}_{sa}$ est supérieur à $\mathbf{V}_{sb}$ et $\mathbf{V}_{sc}$ ou encore $\mathbf{V}_{sa} = \text{Max}(\mathbf{V}_{sj)}$, j= a,b,c

Le même raisonnement conduit aux conditions suivantes :

D_i conduit si $\mathbf{V}_{si} = \text{Max}(v_{sj})$, j=a,b,c

D_i' conduit si $\mathbf{V}_{si} = \text{Max}(v_{sj})$, j=a,b,c

Durant une séquence de conduction, la tension du redresseur est déduite par la relation dont la valeur moyenne est donnée par

u_d=Max (v_{sj})-Min (v_{sj}) ; j=a,b,c

$$U_d = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} Vmax = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V\sqrt{2} \qquad \text{II.4}$$

II.10 Puissance apparente, puissance réactive et puissance de distorsion

En régime déformé, on doit modifier la définition de la puissance apparente pour qu'elle tienne compte du courant harmonique :

$$\boldsymbol{S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \qquad \text{II.5}$$

Nous voyons dans cette expression (II.5) un nouveau terme qui apparaît, il s'agit de la puissance de distorsion D. La figure suivante (II.10) illustre vectoriellement ces puissances [44][45].

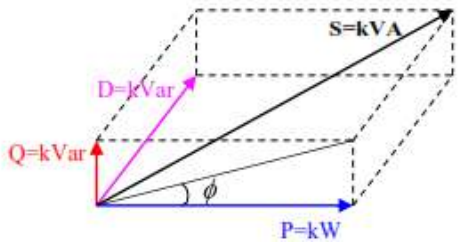


Figure II.10 : *Représentation vectorielle de la puissance apparente*

$$I_{eff=}\sqrt{I_{1.eff}^2+I_{2.eff}^2+I_{3.eff}^2+\cdots+I_{n.eff}^2} \quad \text{II.6}$$

$$\mathbf{D = v\sqrt{I_{2.eff}^2 + I_{32.eff}^2 + \cdots + I_{n.eff}^2}} \quad \text{II.7}$$

$$\mathbf{P= V\,I_1 \cos\ \varphi_1} \quad \text{II.8}$$

$$\mathbf{Q= V_{eff}I_{1.eff}\sin\varphi_1} \quad \text{II.9}$$

$$\mathbf{S=V_{eff}I_{eff}} \quad \text{II.10}$$

Le facteur de puissance est le rapport entre la puissance active et apparente. Cependant, le facteur de puissance s'en trouve modifié par la présence de la puissance de distorsion.

$$\boldsymbol{F_P = \frac{P}{S} \neq \cos\varphi}$$

$$\boldsymbol{F_P = \frac{P}{S} = \frac{V_{eff}I_{eff}\cos\varphi}{V_{eff}I_{eff}} = \frac{I_{1,eff}}{I_{eff}}\cos\varphi_1} \quad \text{II.11}$$

$$\boldsymbol{F_{dis} = \frac{I_{1,eff}}{I_{eff}}} \quad \text{II.12}$$

$$\boldsymbol{F_{dép} = \cos\ \varphi_1} \quad \text{II.13}$$

$$\boldsymbol{F_{p=}F_{dip}.F_{dép}} \quad \text{II.14}$$

Ou $\boldsymbol{F_{dip:}}$ facteur de distorsion.

$\boldsymbol{F_{dép}}$: Facteur de déplacement

II.11 Conclusion

Dans ce chapitre , nous avons choisis Le filtre actif parallèle FAP comme parmi les meilleurs solutions dont présenté le role, le raccoredement et la modélisation du l'onduleur ainsi de la charge non linéaire avec prendre en considération la puissance déformante.

.

P

CHAPITRE III

Commande d'un FAP à deux niveaux par les méthodes P_Q et NOTCH alimenté par PV

III.1 Introduction

Le filtre actif parallèle FAP travaille est en combinaison avec le réseau, le système de filtrage contient deux parties : l'identification des courant harmonique et la commande du filtre, dans notre chapitre on utilise la méthode de puissances instantanées par l'algorithme P-Q et l'autre de filtre coupe bande (notch).

Notre filtre, est un onduleur de tension à deux niveaux, alimenté par une source d'énergie renouvelable (photovoltaïque).

III .2 Strategies de commande du filtre actif

III.2.1 Principe de commande du filtre actif

Le rôle de la commande est la génération de courants harmoniques produits par le filtre actif afin qu'ils suivent en temps réel leurs références harmoniques. Dans un premier temps, il faut donc déterminer ces courants harmoniques de référence. L'objectif est de compenser l'ensemble des harmoniques de courant générés par la charge non linéaire [46 i_s i_c

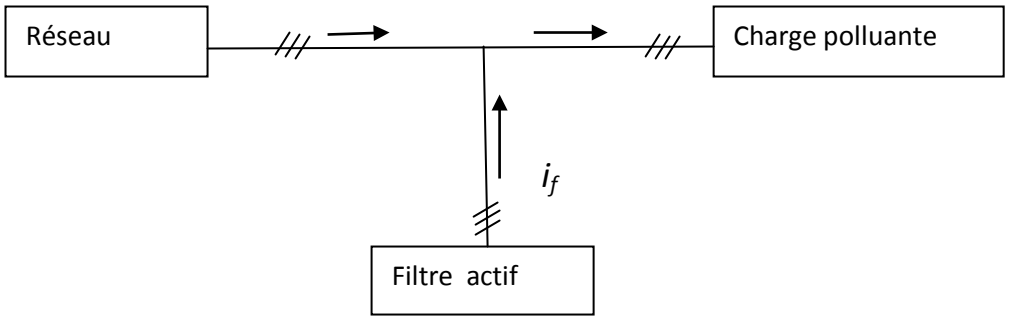


Figure III.1 : *Schéma principe de commande FAP*

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

- détermination des courants harmoniques de la charge polluante,
- commande de l'onduleur du filtre actif ou poursuite des références de courant,
- régulation de la tension aux bornes de la source de tension continue

III.3 Determination des courants harmoniques de référence

La charge polluante absorbe un courant constitué d'une composante fondamentale et de composantes harmoniques. Le but du filtrage actif est la génération de courants harmoniques de même amplitude mais en opposition de phase avec ceux absorbés par la charge. Ainsi, le courant absorbé au réseau sera sinusoïdal. Il est dons nécessaire d'identifier avec précision les courants harmoniques de la charge polluante.

Le choix de la méthode utilisée pour isoler la composante harmonique du courant de charge est un facteur déterminant quant aux performances obtenues par le filtre actif (précision, dynamique, …) [47] [48]. Parmi toutes les méthodes présentées dans la littérature, nous avons choisi de mettre en œuvre une variante de la méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées, La méthode classique des puissances instantanées est devenue aujourd'hui très courante dans les applications comme le filtrage actif car elle réalise le meilleur compromis entre performances statique et dynamique [36].

III.4 Méthodes des puissances instantanées

III.4.1 Puissances instantanées active et réactive

Cette méthode d'identification des courants harmoniques, plus simple, consiste à éliminer la composante continue des puissances active et réactive instantanées ce qui est relativement facile à réaliser [44]. On exploite la transformation de Concordia pour obtenir les puissances active et réactive et nécessite de tensions sinusoïdales à la fréquence fondamentale. On note respectivement les vecteurs des tensions simples au point de raccordement [v_S] et des courants de charge [i_C] d'un système triphasé et équilibré par : [43][38][49] [45].

III.4.1.1 Les puissances instantanées :

La méthode des puissances instantanées a été introduite par H. Akagi. Cette méthode exploite la transformation de Concordia pour obtenir les puissances réelles et imaginaires. Notons par (V_α, V_β) et (I_α, I_β) les composantes orthogonales du repère $\alpha-\beta$ associées respectivement aux tensions de raccordement du filtre actif parallèle (V_s) et aux courants absorbés par les charges polluantes (I_s). La transformation $\alpha-\beta-0$ triphasée permet d'écrire, la relation des tensions suivante : [50] [38] [45].

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{s1} \\ V_{s2} \\ V_{s3} \end{bmatrix} \quad \text{(III.1)}$$

Et la relation des courants ci-dessous :

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{s1} \\ I_{s2} \\ I_{s3} \end{bmatrix} \quad \text{(III.2)}$$

Les composantes avec l'indice (0) représentent les séquences homopolaires du système triphasé de courant et de tension.

Les puissances réelles et imaginaires, notés respectivement p et q, sont définies par la relation matricielle suivante : [45] [51].

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_\alpha & V_\beta \\ -V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} \quad \text{(III.3)}$$

On remplaçant les tensions et les coutants diphasés par leur homologues, on obtient :

$$p = V_\alpha I_\alpha + V_\beta I_\beta = V_a I_a + V_b I_b + V_c I_c \quad \text{(III.4)}$$

De même, pour la puissance imaginaire on a :

$$q = V_\alpha I_\beta + V_\beta I_\alpha = -\frac{1}{\sqrt{3}} \left[(V_a - V_b) I_c + (V_b - V_c) I_a + (V_c - V_a) I_b \right] \quad \text{(III.5)}$$

A partir de l'expression (III.3), on posant :

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

On a :

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \left\{ \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \right\} \quad \text{(III.6)}$$

Ou alors :

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta}\left\{\begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix}\begin{bmatrix} p \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 0 \\ q \end{bmatrix}\right\} = \begin{bmatrix} I_{\alpha p} \\ I_{\beta p} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_{\alpha q} \\ I_{\beta q} \end{bmatrix} \quad \text{(III.7)}$$

Avec :

$$i_{\alpha p} = \frac{V_\alpha}{\Delta} p \qquad i_{\alpha q} = \frac{V_\beta}{\Delta} q$$

(III.8)

$$i_{\beta p} = \frac{V_\beta}{\Delta} p \qquad i_{\beta q} = \frac{V_\alpha}{\Delta} q$$

(III.9)

Les puissances instantanées selon les axes α et β peuvent s'écrire :

$$\begin{bmatrix} P_\alpha \\ P_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_\alpha . i_\alpha \\ V_\beta . i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_\alpha . i_{\alpha p} \\ V_\beta . i_{\beta p} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_\alpha . i_{\alpha q} \\ V_\beta . i_{\beta q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{\alpha p} \\ P_{\beta p} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P_{\alpha q} \\ P_{\beta q} \end{bmatrix}$$

(III.10)

$$P_{\alpha p} = \frac{V_\alpha^{\,2}}{\Delta} p \qquad P_{\alpha q} = -\frac{V_\alpha V_\beta}{\Delta} q$$

(III.11)

$$P_{\beta p} = \frac{V_\beta^{\,2}}{\Delta} p \;\; P_{\beta q} = \frac{V_\alpha V_\beta}{\Delta} q$$

$P_{\alpha p}$: Puissance instantanée active selon l'axe α.

$P_{\beta p}$: Puissance instantanée active selon l'axe β.

$P_{\alpha q}$: Puissance instantanée réactive selon l'axe α.

$P_{\beta q}$: Puissance instantanée réactive selon l'axe β.

D'après les expressions (III.11), on peut écrive :

$$P = P_{\alpha p} + P_{\beta p} + P_{\alpha q} + P_{\beta q} = P_{\alpha p} + P_{\beta p}$$

(III.12)

L'analyse de l'équation (III.12) nous ramène aux conclusions suivantes :

- La somme des puissances instantanées $P_{\alpha p}$ et $P_{\beta p}$ coïncide avec la puissance instantanée dans un circuit triphasé.
- La puissance réactive correspond à la partie de la puissance instantanée qui dépend de q.
- Ces puissances $P_{\alpha p}$ et $P_{\beta p}$ s'annulent entre elles et elles n'apportent aucune contribution au transfert de puissance instantanée entre la source et la charge. [51][45]
- Dans le cas où les tensions sont sinusoïdales et alimentent une charge non linéaire, les puissances instantanées P et q ont pour expression :

$$p = \bar{p} + \tilde{p} \qquad q = \bar{q} + \tilde{q} \qquad \text{(III.13)}$$

Avec :

$\bar{p}$: Puissance continue liée à la composante fondamentale active du courant.

$\bar{q}$: Puissance continue liée à la composante fondamentale réactive du courant.

$\tilde{p}$ et $\tilde{q}$: Puissance alternatives liées à la somme des composantes harmoniques du courant.

En considérant les équations (III.7) et (III.13), nous pouvons séparer le courant dans le repère $(\alpha - \beta)$ en trois composantes active et réactive à la fréquence fondamentale et la somme des harmoniques. [51][45] Ceci conduit à l'équation (III.14) suivante :

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \underbrace{\frac{1}{\nabla}\begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \bar{p} \\ 0 \end{bmatrix}}_{Courant\ \ Actif} + \underbrace{\frac{1}{\nabla}\begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 0 \\ \bar{q} \end{bmatrix}}_{Courant\ \ Réactif} \quad \underbrace{\frac{1}{\nabla}\begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix}}_{Courants\ \ Harmoniques} \qquad \text{(III.14)}$$

Il est évident, d'après la relation (III.14), que pour identifier une des trois composantes, par exemple les courants harmoniques, les parties alternatives des puissances réelle et imaginaire doivent être séparées des parties continues. Cette séparation peut être réalisée en utilisant l'un des deux artifices de filtrage illustré sur la Figure (III.2).

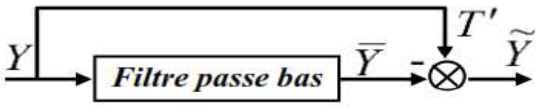


Figure III : *2* *Schéma de principe des filtres utilisés pour l'extraction*

Des composantes alternatives de p et q.

Les courant harmoniques triphasés $i_{k,h}\left(k=1,2,3\right)$ sont obtenues à partir des courants diphasés $i_{\alpha h}$ et $i_{\beta h}$ par la transformation inverse de Concordia soit :

$$\begin{bmatrix} i_{1,h} \\ i_{2,h} \\ i_{3,h} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha,h} \\ i_{\beta,h} \end{bmatrix} \qquad \text{(III.15)}$$

Si V et I_1 représentent respectivement les valeurs efficaces de la tension et du courant fondamental et Φ_1,1 le déphasage entre eux, alors on peut écrire :

$$\begin{cases} \bar{p} = 3VI_1 \cos\Phi_1 \\ \bar{q} = -3VI_1 \sin\Phi_1 \end{cases}$$

(III.16)

Les termes $\bar{p}$ et $\bar{q}$ sont respectivement équivalents à la puissance active conventionnelle et à la puissance réactive conventionnelle.

De cette manière, éliminer les courants harmoniques revient à compenser les composantes alternatives $\tilde{p}$ .... et $\tilde{q}$. La suppression des courants réactifs revient à compenser la composante continue $\bar{q}$ [51] [45].

III.4.1.2 Algorithme « p-q » d'extraction des courant harmoniques

Le schéma de la figure suivante illustre les différentes étapes permettant l'obtention des composantes harmoniques du courant d'une charge non linéaire [52] [45].

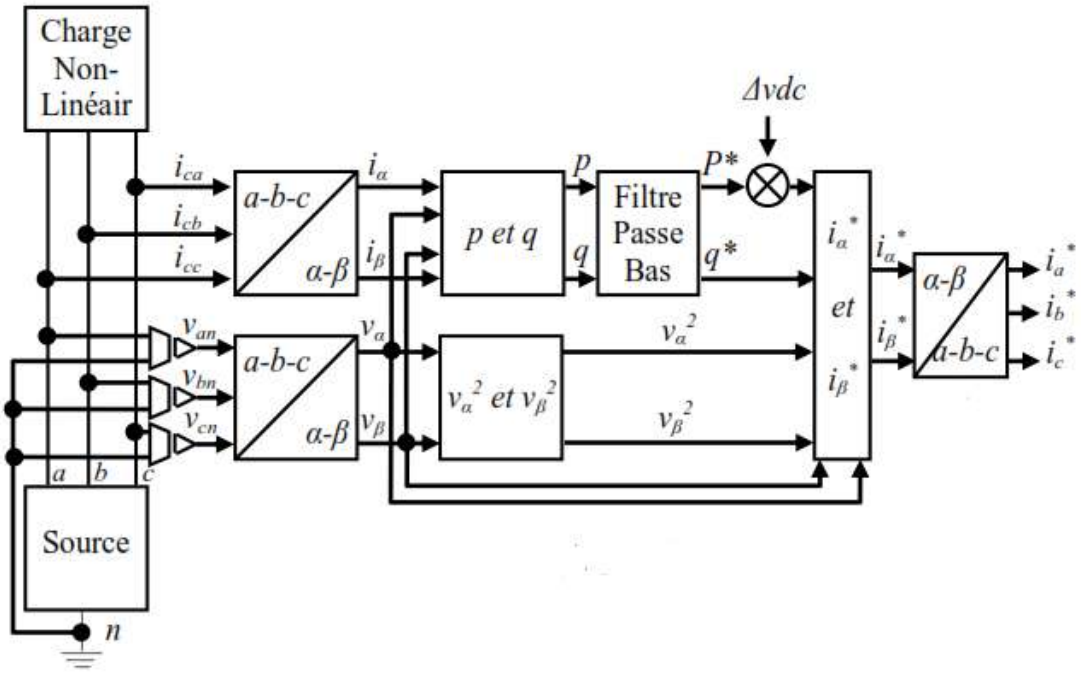


Figure III.3 : *Algorithme P-Q d'extraction du courant harmonique.*

La théorie p-q présentée auparavant est valable uniquement pour les systèmes triphasés dépourvus de composante homopolaire. L'extraction des courants des harmoniques dans des applications monophasées ne peut pas être réalisée par cette méthode. Elle est applicable dans le cas où les tensions V_{sabc} sont déformées, à condition de filtrer les ondulations

Présentées sur le module du vecteur $v_{s\alpha\beta}, \sqrt{v_{s\alpha}^2 + v_{s\beta}^2}$

III.5 Algorithme du filtre coupe-bande (notch filter)

C'est le plus simple des algorithmes de calcul des courants de référence, comme l'illustre le diagramme représenté Figure III.4 Proposé en 1992 par C. A. Quinn & N. Mohan [50], cet algorithme est destiné à la fois à générer les courants de consigne d'un système à 04 fils (muni du fil du neutre) et à réguler la tension continue du filtre actif. L'opération est très aisée: il suffit de faire passer chacun des courants triphasés de charge par un filtre coupe- bande réglé sur la fréquence fondamentale à éliminer. En sortie, on obtient les courants harmoniques de référence de chaque fil y compris le conducteur neutre, étant la somme négative des références des trois phases. Ensuite, les tensions de source vont intervenir afin de fournir seulement la composante fondamentale du courant nécessaire à la charge. Ainsi, le courant du neutre se trouvera démuni de

composantes harmoniques. Idéalement, le filtre actif n'est sensé fournir que de la puissance réactive. La valeur moyenne du courant du côté continu est donc nulle. Cependant, les pertes dans un filtre actif non idéal peuvent engendrer la décharge de l'élément de stockage d'énergie. Ceci peut être évité en ajoutant aux courants de référence calculés, des composantes fondamentales dont l'amplitude peut être déterminée en comparant la valeur actuelle de la tension V_{dc} par la valeur désirée $V_{dc\,désirée}$ (Figure II.4) [53].

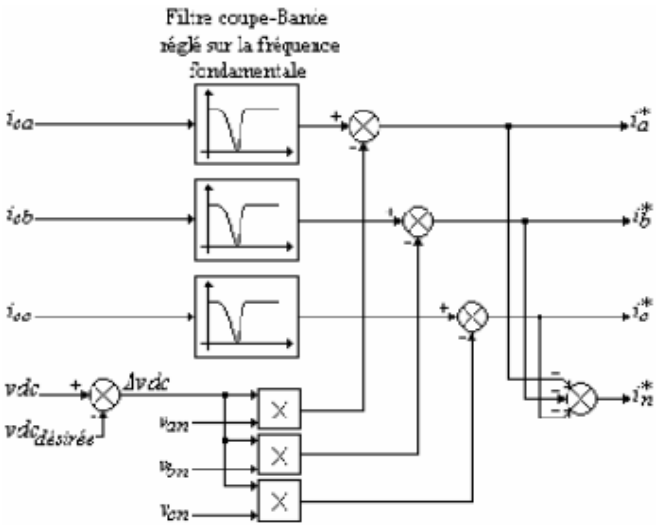


Fig. III.4 : *Génération des courants de référence par l'algorithme du filtre coupe-bande.*

III.6 Conclusion

Dans ce chapitre, on a étudié deux méthodes ou techniques de la commande, la commande par l'algorithme P-Q basé sur les puissances instantanées et l'identification des courants d'harmoniques et la méthode l'algorithme du filtre coupe-bande.

Dans le dernier chapitre, on présentera la simulation et l'interprétation du résultat des différentes commandes telles que la méthode des puissances instantanées et la commande Filtre coupe –bande et de l'alimentation du l'onduleur par source énergie renouvelable.

Chpitre IV

Résultats de simulation et interpétations

IV.1 : Introduction

Dans ce chapitre précédent on à étudié deux méthodes de commande dont les puissances instantanées P-Q et notch, avec l'alimentation de notre onduleur par source d'énergie renouvelable (photovoltaïque) et source.

Le but de ce chapitre est voir les résultats de simulation des différentes méthodes comme suivant :

Dans la première partie de ce chapitre on donne les caractéristiques du courant de source isa avant l'application du filtrage actif parallèle.

La seconde partie présente les résultats de simulation après le filtrage actif parallèle contrôlé par l'algorithme P-Q et par commande notch avec l'alimentation du l'onduleur par source et source renouvelable (photovoltaïque), puis on fait la comparaison entre les résultats de simulation entre les valeurs des THDs et la forme de courant de charge isa.

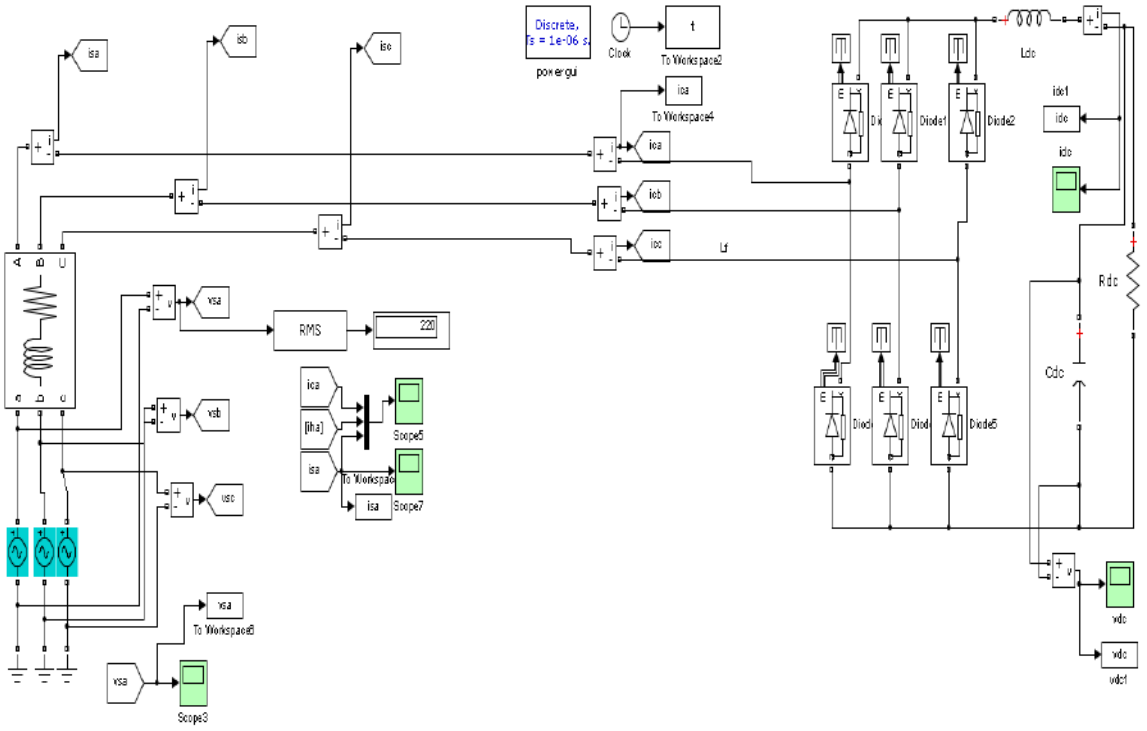


Figure I V. 1 : Alimentation directe dans une charge non-linéaire sans filtre actif.

IV. 2 : Caractéristique du courant de source avant le filtrage

Les graphes du courant de source avant application du filtrage actif sont représentés sur les Figures (IV.1.1), (IV.1.2) et (IV.1.3). On constate une distorsion symétrique du courant i_{ca} (avec

i_{ca}=i_{sa}) par rapport au point de demi période (Figure IV.1.1), ce qui signifie que les harmoniques multiples de 2 et 3 sont inexistants dans le spectre de i_{ca} et que seuls ceux de rang (6h ± 1) sont présents; ceci est confirmé par le spectre de i_{ca} (Figure IV.1.2) représentant les 30 premiers harmoniques les plus

Significatifs, avec un THD de i_{ca} est de 28.52% pour une durée d'observation de 0.1 s.

La distorsion harmonique n'est pas le seul problème rencontré ici car la Figure (IV.1.3) indique une dégradation au niveau du facteur de puissance, ainsi on peut s'attendre à une fluctuation dans l'énergie réactive du système.

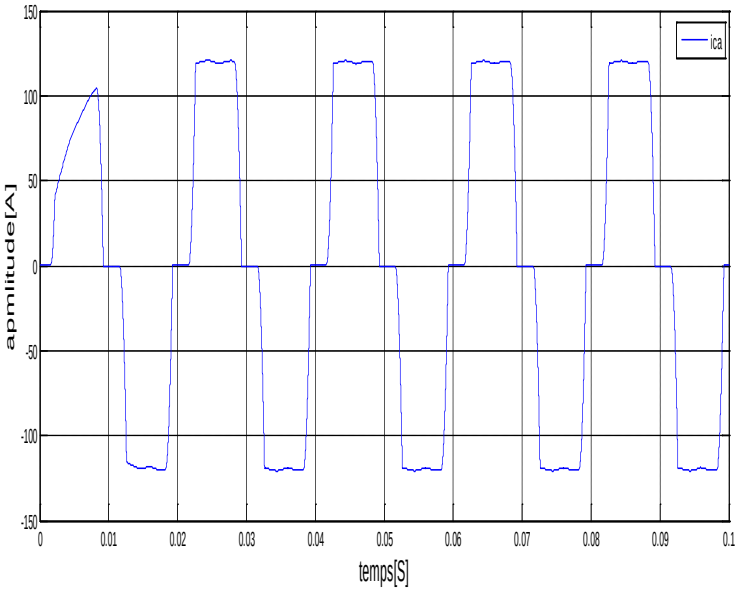


Figure IV. 1.1 : Allure du courant de charge i_{ca} avant filtrage actif.

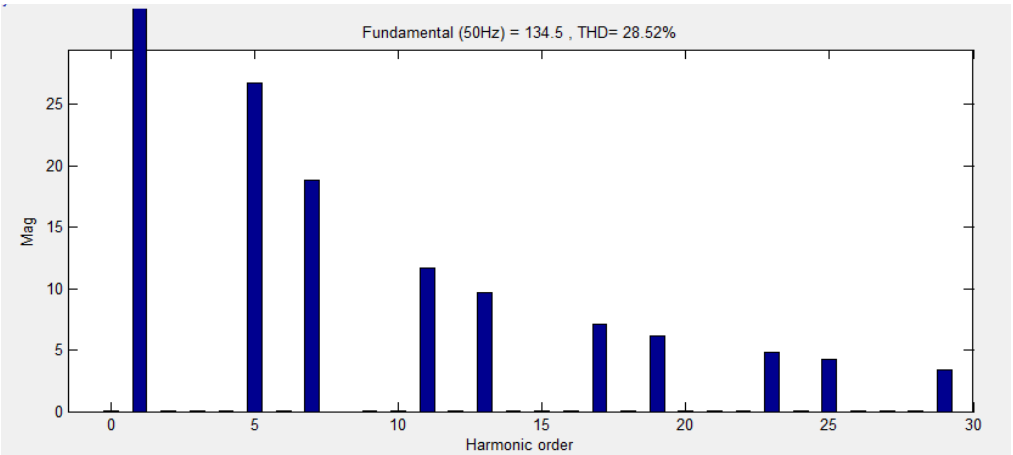


Figure IV. 1.2: Spectre harmonique de i_{ca}

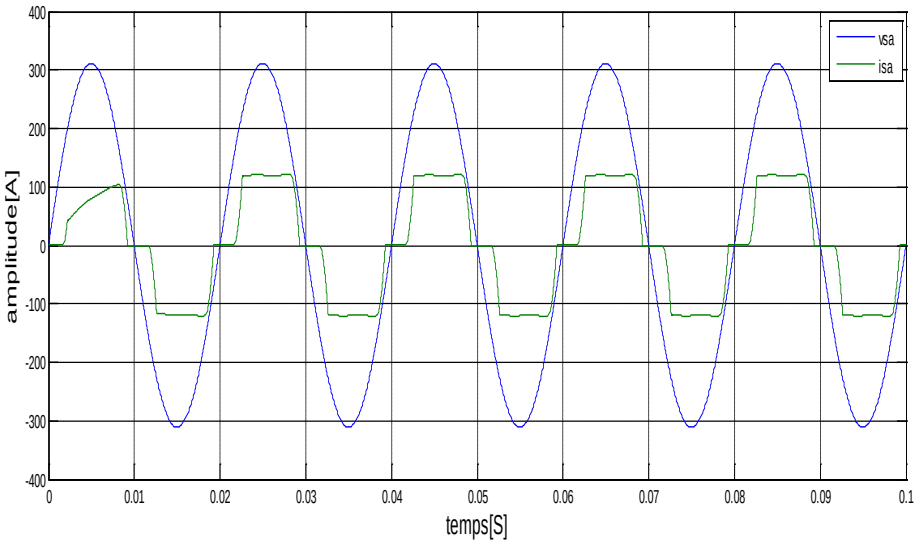


Figure IV.1.3: Allure du courant de charge i_{ca} déphasé de la tension d'alimentation v_{sa}

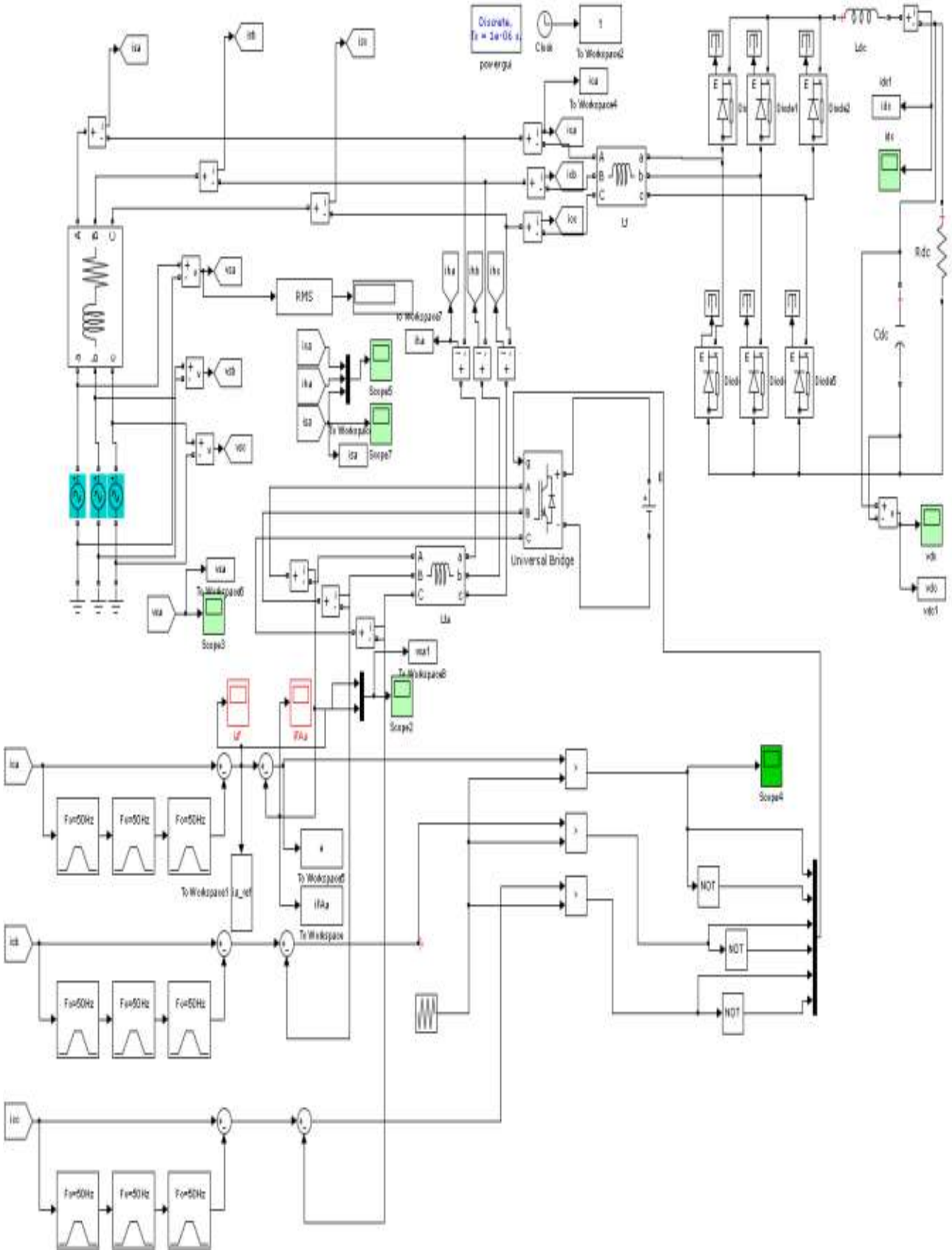


Figure I V.2 .1: Filtre Actif Parallèle basé sur un onduleur deux-niveaux commandé par commande NOTCH

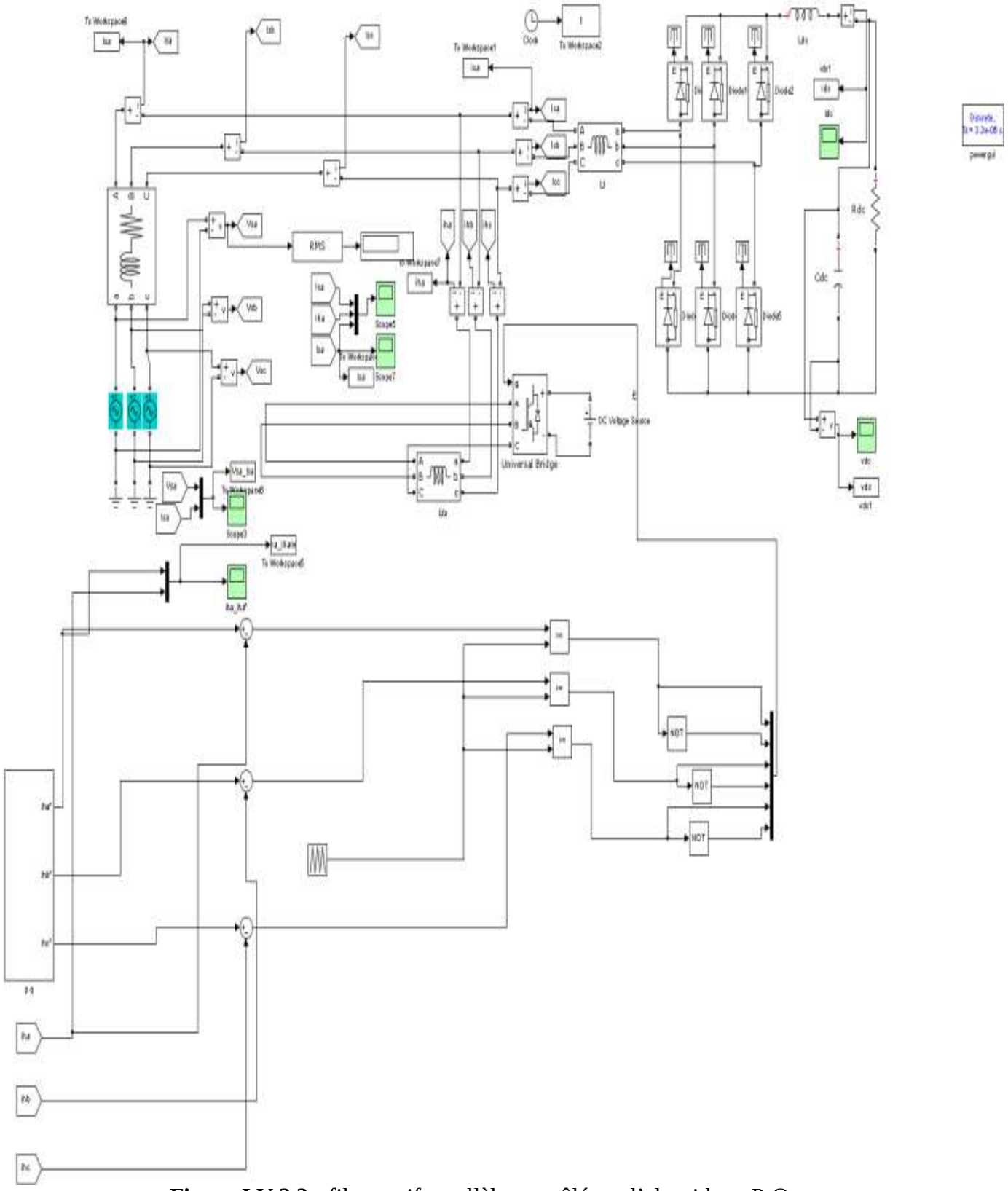
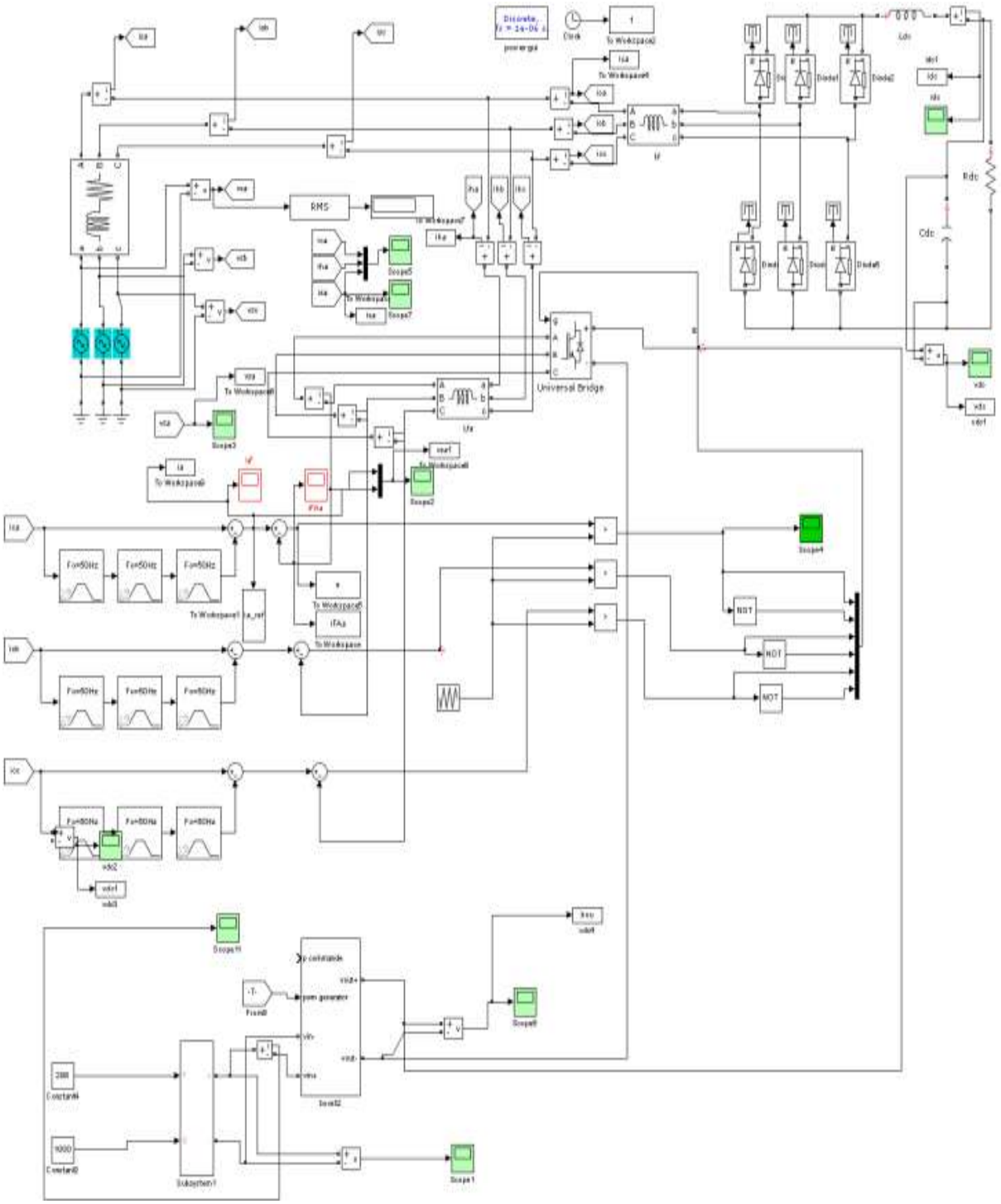


Figure I V.2.2 : filtre actif parallèle contrôlé par l'algorithme P-Q

Figure IV. 2.3 : Filtre Actif Parallèle basé sur un onduleur deux-niveaux commandé par commande NOTCH alimenté par pv



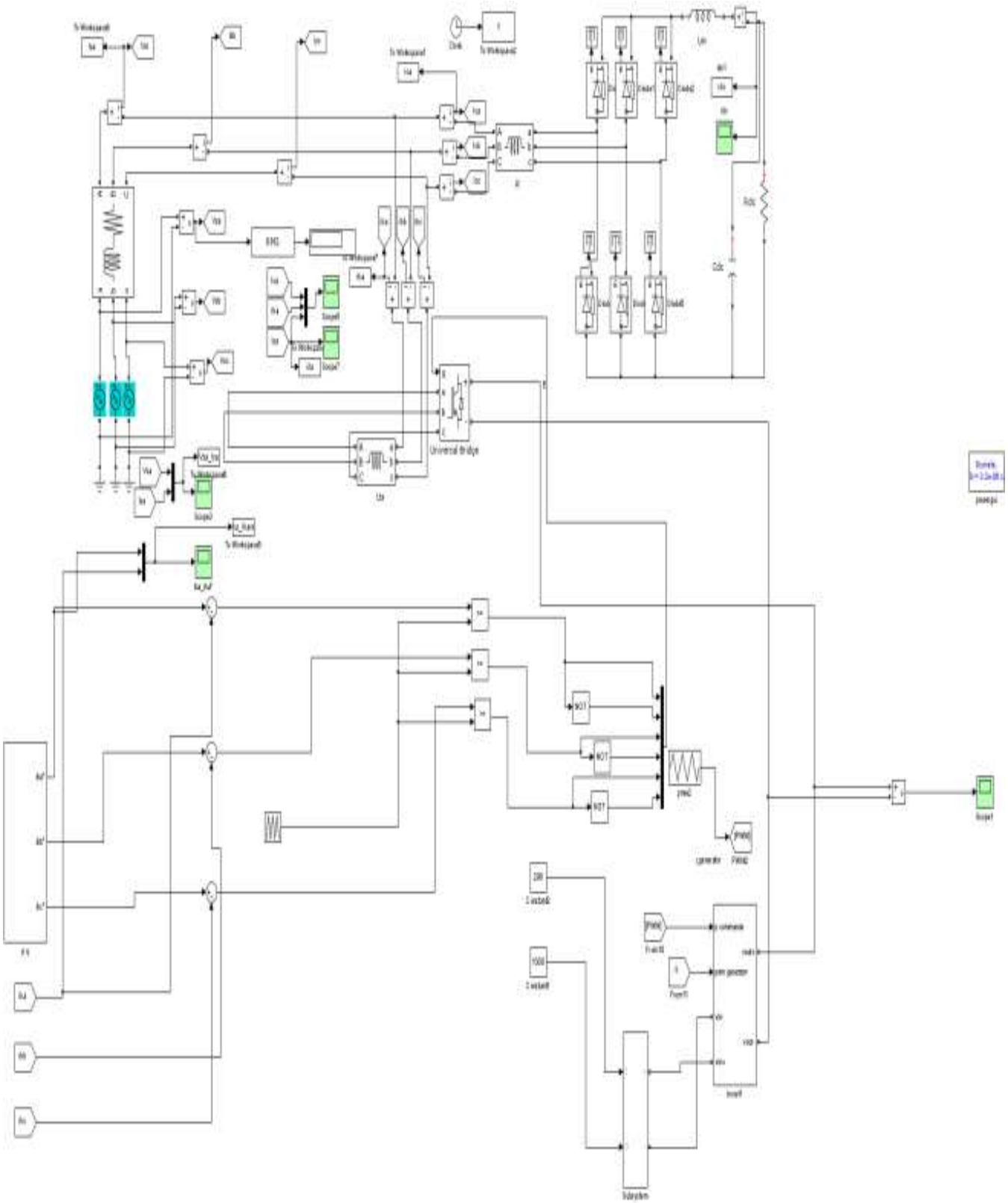


Figure. IV. 2.4 : Filtre Actif Parallèle basé sur un onduleur deux-niveaux commandé par commande PQ alimenté par pv

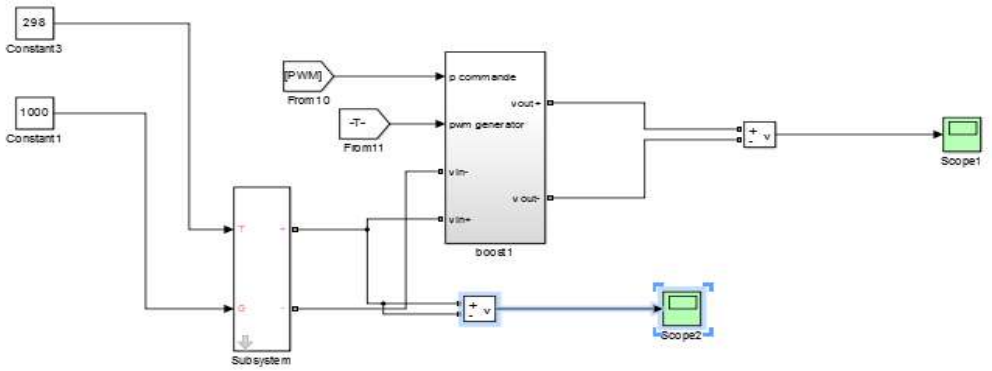


Figure IV.2.5: panneau pv avec booste

I V. 1 : Tableau Paramètres de simulation communs aux applications considérées.

Paramètres		Valeurs numériques
Réseau d'alimentation	Es RMS (efficace)	220 V
	Fréquence f	50 H
	Résistance de ligne R_S	0.1m Ω
	Inductance de ligne L_S	0.03 µH
Charge non-linéaire (Pont de	Puissance apparente S	49.16 KVA
	Angle de retard à l'amorçage α	30°
Charge linéaire (en aval de la charge non-linéaire)	Résistance de charge DC R_{dc}	6.5 Ω
	Inductance de charge DC L_{dc}	20 mH
Filtre actif	Tension du filtre V_C	840 V
	Fréquence de commutation	10 KHz
	Filtre de sortie L_{FA}	1.3 mH
Inductance de correction	Inductance en amont de la charge	1.5 mH
	Résistance en amont de la charge	2 Ω

IV.3 : Résultat de simulation du filtre actif parallèle contrôlé par l'algorithme P-Q par commande noth

Pour la simulation sous *Matlab/Simulink*, on a utilisé les paramètres du tableau (IV.2). On va se contenter de l'étude du courant et de la tension seulement dans la phase *a*, sachant que ceux des deux autres phases sont retardés par rapport à la phase *a* de 120° et 240° respectivement.

IV. 2 : Tableau Paramètres de simulation du FAP par l'algorithme P-Q et notch

Paramètres	Valeurs numériques
Vdc	840 V
Lfa	1.3 mH
T simultion	0.1 s
L_f	1.5 mH
R_f	2 Ω
LC	20 mH
RC	6.5 Ω

IV .4 : paramètres du convertisseur boost

Les paramètres du convertisseur boost est

- Vpv : 620
- V ch : 840V
- Puissance maximale PV : 120 W
- Fs : 10 KHz
- Maximum inducteur courant ripple 10 %
-

IV .3 : Tableau de Caractéristique du panneau photovoltaïque :

Puissance max	120 W
Tension(v max)	33.7 V
Courant (i max)	3.56 A
Courant circuit ouvert i_{co}	3.87 A
Tension circuit ouvert v_{co}	42.1V
Puissance minimum	114w

IV. 5: Courant de source après filtrage actif parallèle

Après l'application du filtre actif parallèle contrôlé par l'algorithme P-Q et notch, on observe une amélioration dans l'allure de i_{sa}, comme illustre la Figure (IV.5.1), (IV.5.2). Donc, i_{sa} a été dépollué à un niveau mieux que la précédente, ceci est conforté par le spectre harmonique de la Figure (IV.6.1) , (IV.6.2, avec un THD (i_{sa}) de 2.53 % et 0.86 % durant 0.1s

C'est le courant i_{sa} est récupéré son allure sinusoïdale nous rassure que le filtre actif a généré un courant i_{ha}* qui suit bien sa référence i_{ha}, comme montre le Figure (IV.3.1), (IV.3.2).

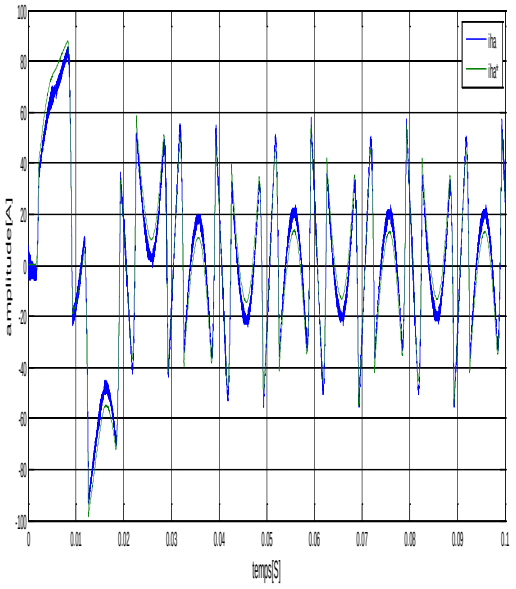


Figure V.3.1 : Courant généré par le filtre actif i_{ha} et sa référence i_{ha}* Par commande notch

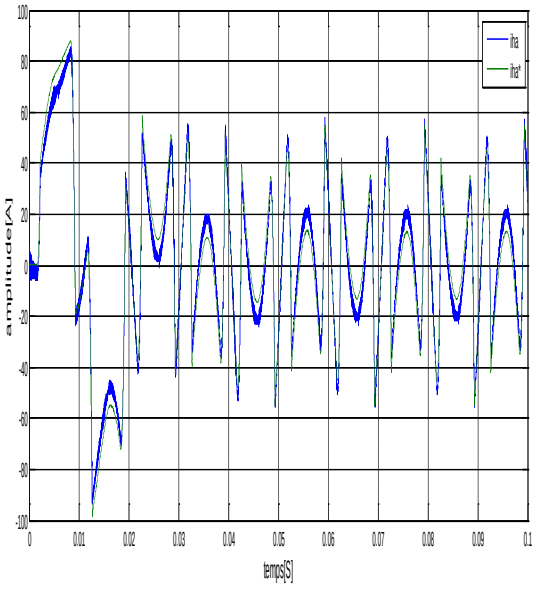


Figure V.3.2 : Courant généré par le filtre actif i_{ha} et sa référence i_{ha}* Par commande p-q

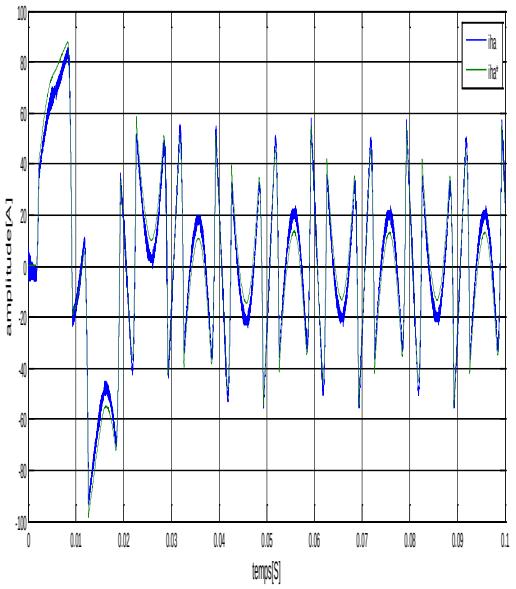


Figure IV.3.3 : Courant généré par le filtre actif i_{ha} et sa référence i_{ha}* Par commande notch avec source renouvelable

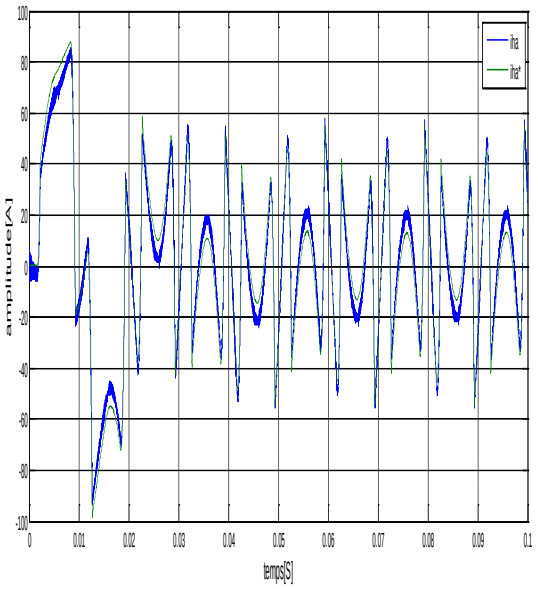


Figure IV.3.4 : Courant généré par le filtre actif i_{ha} et sa référence i_{ha}* Par commande p-q avec source renouvelable

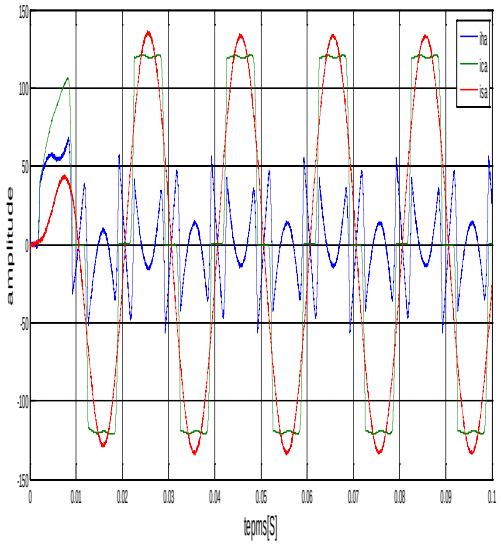


Figure IV. 4.1: Courants de charge non-linéaire i_{ca}, de source i_{sa} et de filtre i_{ha}.
Par commande notch

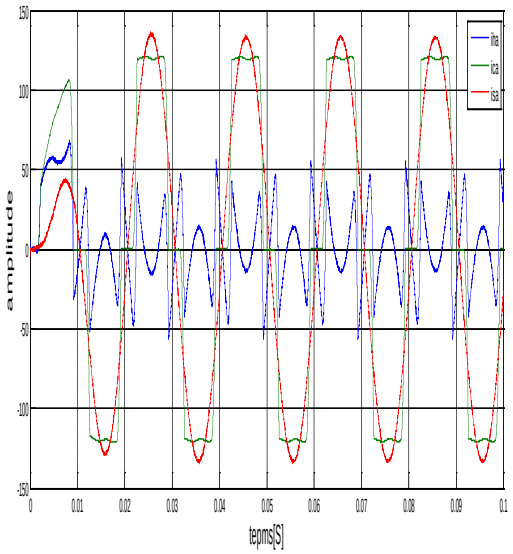


Figure. V. 4.2: Courants de charge non-linéaire i_{ca}, de source i_{sa} et de filtre i_{ha}.
Par commande p-q

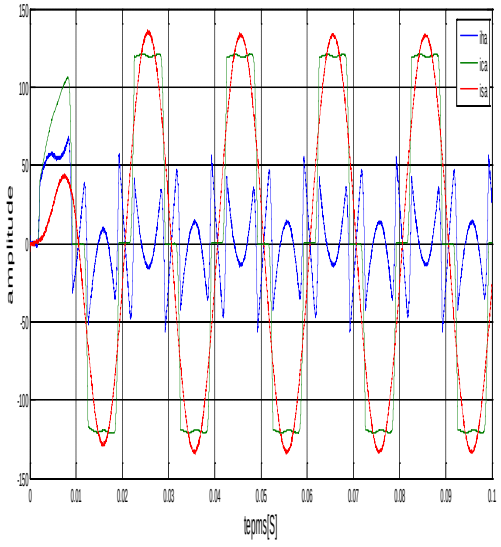


Figure I V.4.3: Courants de charge non-linéaire i_{ca}, de source i_{sa} et de filtre i_{ha}.

Par commande notch avec source renouvelable

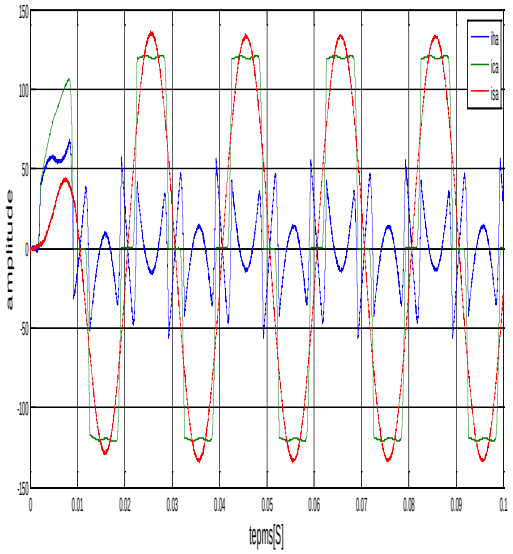


Figure IV. 4.4: Courants de charge non-linéaire i_{ca}, de source i_{sa} et de filtre i_{ha}.

Par commande p-q avec source renouvelable

Les déformations dans la forme de i_{sa} se situent dans les points d'intersection non nulles de i_{ca} et i_{ha}, comme on peut le voir dans la Figure (IV.4.1), (IV.4.2), (IV.4.3), (IV.4.4),

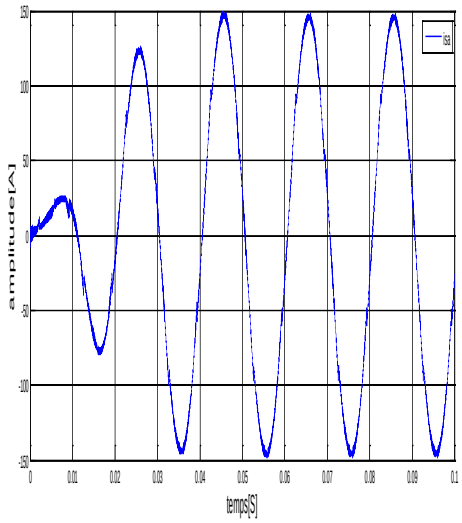


Figure IV. 5.1: Allure de i_{sa} après filtrage actif contrôlé par commande notch

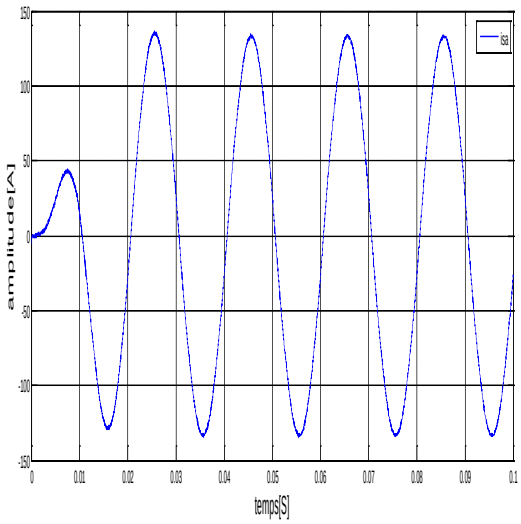


Figure IV. 5.2: Allure de i_{sa} après filtrage actif contrôlé par algorithme P-Q

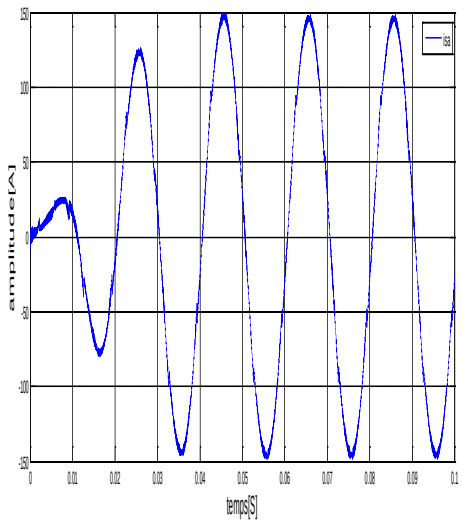


Figure IV. 5.3: Allure de i_{sa} après filtrage actif contrôlé par commande notch avec source renouvelable

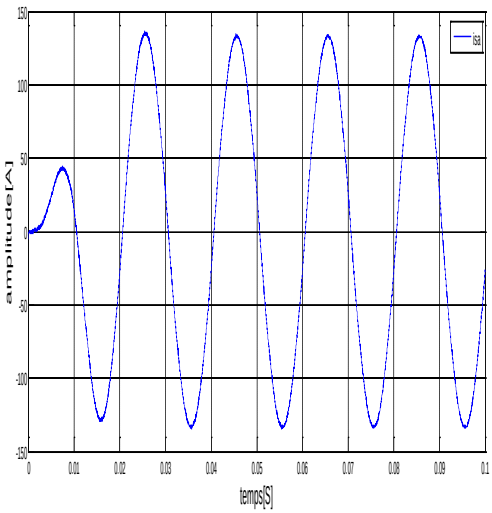


Figure IV. 5.4: Allure de isa après filtrage actif contrôlé par algorithme P-Q avec source renouvelable

Le courant de source i_{sa} après filtrage actif parallèle Les résultats était satisfaisants puisque les déformations ont été réduites

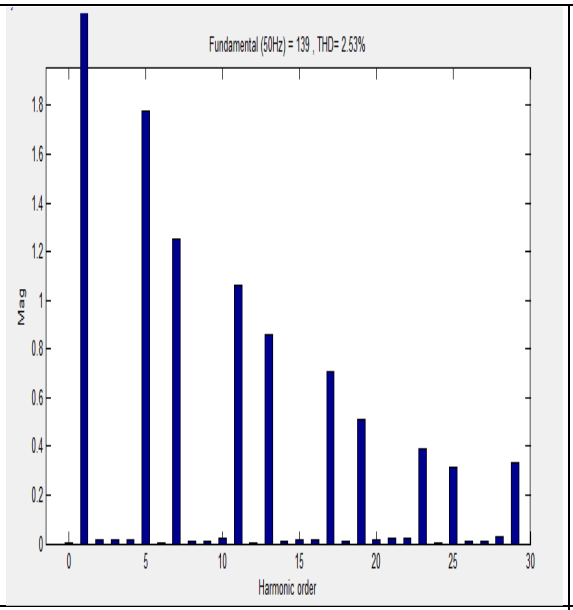


Figure IV. 6.1 : Spectre harmonique de i_{sa} après filtrage actif commandé par notch

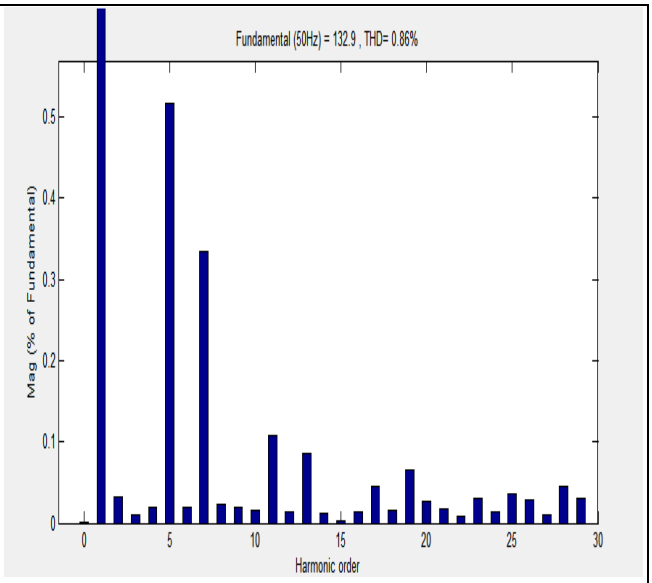


Figure I V. 6.2 : Spectre harmonique de i_{sa} après filtrage actif contrôlé par P-Q

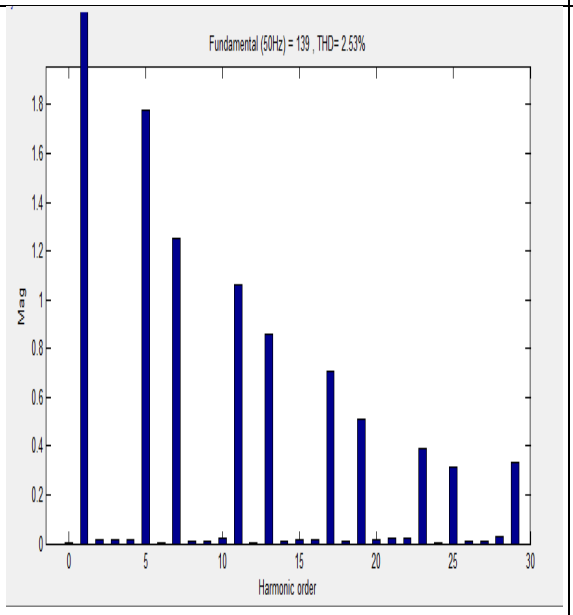


Figure I.V. 6.3 : Spectre harmonique de i_{sa} après filtrage actif contrôlé par notch avec source renouvelable

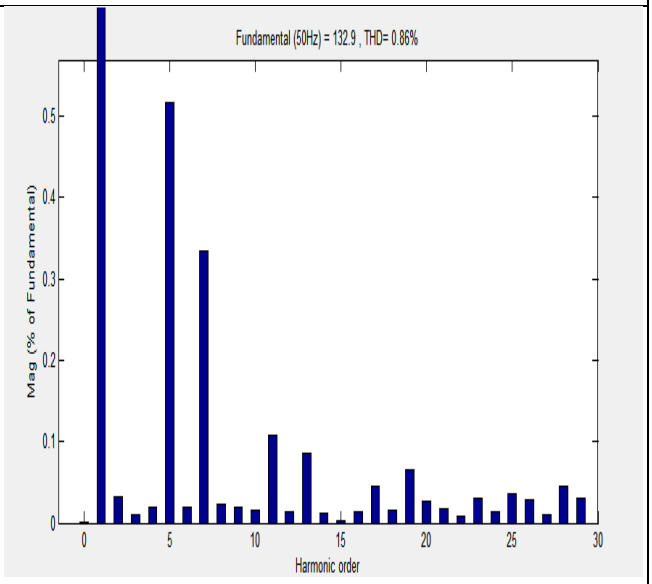


Figure I V. 6.4: Spectre harmonique de i_{sa} après filtrage actif contrôlé par P-Q avec source renouvelable

Les résultats était satisfaisant du courant de source après filtrage actif parallèle puisque les déformations ont été réduites et il en est de même pour le THD (i_{sa}) avec un

nouveau taux de 2.53 % pour méthode p-q et 0.86% pour méthode notch comme illustré dans les Figures (IV.6.1)et (IV.6.2)et(IV.6.3)et (IV.6.4)

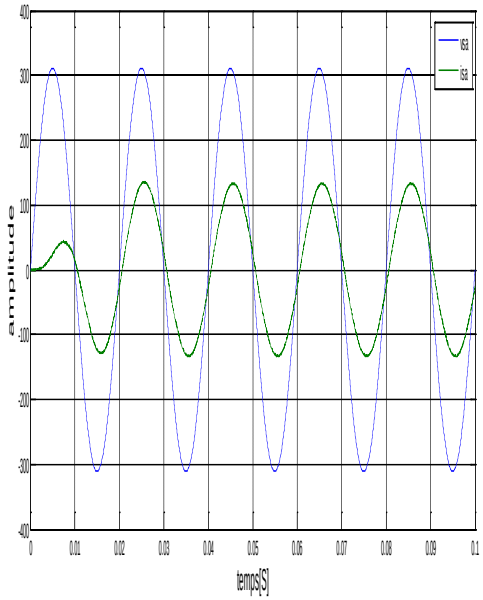


Figure. IV. 7.1: Courant i_{sa} déphasé de la tension v_{sa}.par commande notch

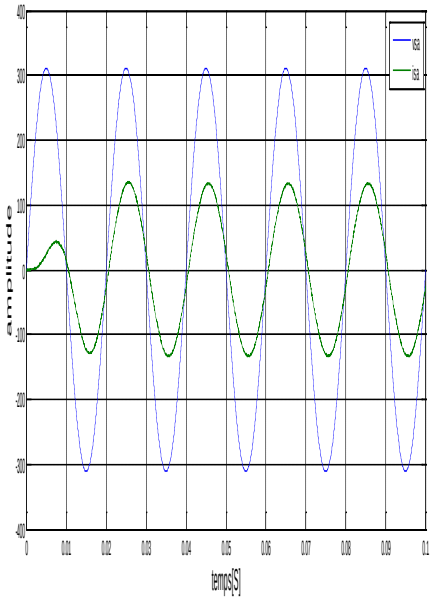


Figure. IV. 7.2: Courant i_{sa} déphasé de la tension v_{sa}.contrôlé par algorithme p-q

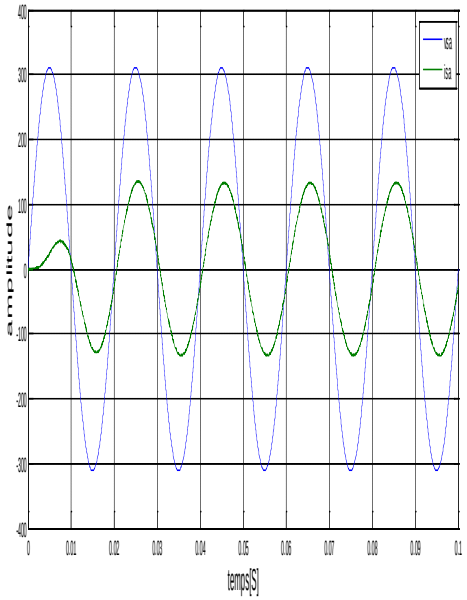


Figure. IV. 7.3: Courant i_{sa} déphasé de la tension v_{sa}.par commande notch avec source renouvelable

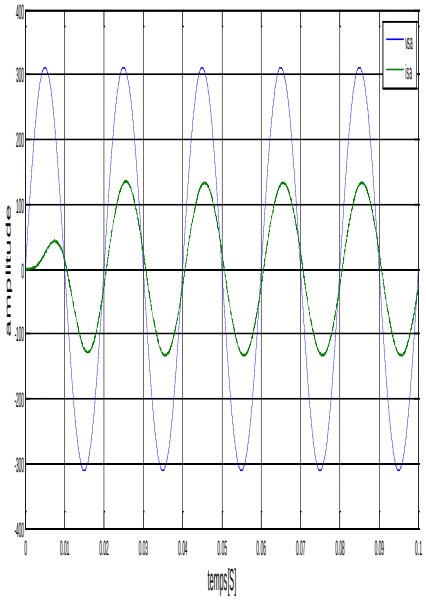


Figure. IV. 7.4: Courant i_{sa} déphasé de la tension v_{sa}.contrôlé par algorithme p-q avec source renouvelable

Dans la Figure (IV.7.1), (IV.7.2), (IV.7.3), (IV.7.4), e on montre le nouveau courant i_{sa} et la tension de source v_{sa}. Les deux ondes sont en phase, malgré la présence d'un léger décalage (retard de i_{sa} *a* par rapport à v_{sa}) engendré par L_f. Ceci induit un facteur de puissance proche de l'unité, donc une bonne compensation de la puissance réactive de la source

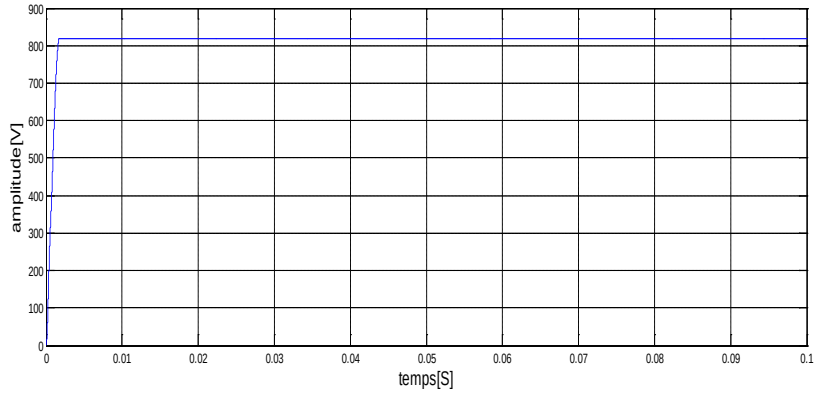


Figure IV. 8.1 : V_{dc} de booste

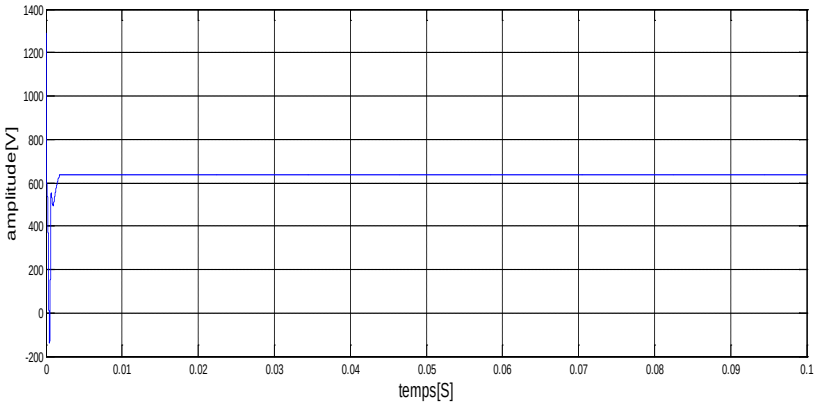


Figure IV. 8.2: V_{pv}

IV.6 Conclusion

Dans la première partie de ce chapitre on a présente les résultat de simulation du courant de source avant l'application du filtre actif parallèle, on remarque que la forme d'onde du courant de source n'est pas sinusoïdale, c'est le même courant de la charge non linéaire, le spectre d'harmonique du courant de source prend une valeur plus élevée (THD (i_{ca}) = 24.03%).

Dans la seconde partie, on a représenté les résultats de simulation du filtre commandé par notch et par l'algorithme P-Q avec source continue et source renouvelable, la simulation de de l'algorithme P-Q a donne une bonne forme d'onde sinusoïdale du courant de source, ce qui donne un THD=0.86%. que la simulation du filtre commandé par notch qui donne un THD=2.53%.

Conclusion général

Le travail fait dans ce mémoire présente une synthèse des filtres actifs parallèle de tension, dont les problèmes engendrés par la pollution harmonique dans les réseaux électrique ainsi les solutions (types de filtres). Notre contribution dans ce domaine consiste à l'utilisation d'une théorie d'un filtre actif parallèle à base d'un onduleur de tension à deux niveaux commandé par méthodes de puissances instantanées et notch avec alimentation par source énergie renouvelable Pv. On à partagé de ce mémoire en quatre chapitres.

dans le 1er chapitre à une rappel de la définition de la pollution du réseau électrique et leurs solutions ainsi les normes international exige de réduire et respect un taux THD. Pour garantie le minimum de la qualité d'énergie électrique et l'éta de l'art.

Dans le second chapitre, une conception sur le filtre parallèle FAP de point de raccordement et le rôle avec la structure et principe de fonctionnement et représentation de l'onduleur de tension, modélisation du réseau électrique .

Dans le 3ème chapitre on a exposé quelques techniques de commande (P-Q et notch) comme la détection des grandeurs harmoniques de référence, notamment la théorie de la puissance instantanée, filtre coupe-bande (*notch filter*).

on a d'abord détaillé l'étude de son applicabilité à l'onduleur deux niveaux. Le but était de démontrer comment arrive t-on, par cette technique, à réduire les pertes par commutation.

Dans le 4ème chapitre, on a sélectionné 04 applications des filtres actifs à simuler numériquement sous *Matlab-Simulink*. Il s'agissait de deux filtres parallèles deux niveaux commandés notch et P-Q, avec alimentation du l'onduleur par source continu puis par source de l'énergie renouvelable. …….

Référence

[1] OMEIRI AMAR « simulation d'un filtre actif parallèle de puissance pour la compensation des harmoniques de courant » thèse doctorat de l'université de BADI MOKHTAR ANNABA 2007.

[2] M. SARRA, « contribution a l'etude des filtres actifs hybrides », these de doctorat de l'université de Sétif FERHAT ABBAS, Algérie, (2013).

[3] T. DEFLANDRE, P. MAURAS, « les harmoniques sur les réseaux électriques », edition Eyrolles, septembre1998.

[4] BOUKADOUM AZIZ «contribution à l'analyse et la réduction de la pollution harmonique dans le réseau électrique » thèse de magister de l'université de BADI OKHTAR ANNABA2007.

[5] ABDELMADJID CHAOUI « filtrage actif triphasé pour charges non linéaires » thèse de doctorat l'université de FERHAT ABBAS DE SÉTIF, l'université de Poitiers 2006.

[6] IEC61000-3-4. limits:limitations of emissions of harmonic current sin1ow voltage power supply systems for equipment withrated current greater than 16a.(1998).

[7] IEEE-519.IEEE recommended practices and requirements for harmonic controlin

Electricpower systems.(1992).

[8] CEI 61000-2-4: "compatibilite électromagnétique (cem). 2eme partie, (environnement). 4eme section: niveaux de compatibilite dans les installations industrielles pour les perturbations conduites a basse fréquence". (2002).

[9] IEC61000-3-4"compatibilite electromagnetique (cem). Partie3-4:limites–limitation des emissions decourants harmoniques dans les reseaux bass et ension pour les materielsayantun courant assignesuperieur a16 a. (1998).

[10] y. Abdelli , « etude et commande de convertisseurs statiques multifonctions en vue de l'amelioration de la qualite de l'energie electrique ». These de doctorat de l'universite de nantes, 2005.

[11] B. M. Bird, J. F. Marsh, P. R. McLellan, "Harmonic Reduction in Multiple Converts by

Triple-Frequency Current Injection ", IEE Proceeding, vol. 116, no. 10, pp. 1730-1734,

1969

[12] H. Sasaki, T. Machida, "A New Method to Eliminate AC Harmonics Currents by

Magnetic Compensation ", IEEE Trans. on Power Application System, vol. 90, no.

5, pp. 2009-2019, Sept./Oct. 1971.

[13] l. Gyugyi, e. C. Strycula, "active ac power filters ", conference ias annual

Meeting, 1976, pp. 529-535

[14] h. Akagi, h. Fujita, "new power line conditioner for harmonic compensation in

Power systems ", ieee trans. On power delivery, vol. 10, no. 3, pp. 1570-1575, jul.1995.

[15] H. Akagi, A. Nabae, S. Atoh, "Control Strategy of Active Power Filters using Multiple Voltage-Source PWM Converters ", IEEE Trans. on Industry Applications, vol. IA- 22, no. 3, pp. 460-465, May/Jun. 1986.

[16] F. Z. Peng, H. Akagi, A. Nabae, "A Study of Active Power Filters Using Quad-Séries Voltage-Source PWM Converters for Harmonic Compensation ", IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 5, no. 1, pp. 983-990, Nov./Dec. 1990.

[17] H. Akagi, "New Trends in Active Filters for Power Conditioning ", IEEE Trans. on

Industry Applications, vol. 32, no. 6, pp. 1312-1322, Nov./Dec. 1996.

[18]H. Akagi, "Control Strategy and Site Selection of a Shunt Active Filter for Damping of Harmonic Propagation in Power Distribution Systems ", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 12, no. 1, pp. 354-363, Jan. 1997

[19] v. Aburto, m. Schneider, l. Moran, j. Dixon, "an active power filter implemented with a three level npc voltage-source inverter ", conference pesc'97, vol. 2,jun.1997, pp. 1121-1126.

[20] F. Z. Peng, J: W. McKeever, D. J. Adams, "A Power Line Conditioner Using Cascade Multilevel Inverters for Distribution Systems", Conference IAS Annual Meeting, New Orleans (US), Oct. 1997, pp. 1316-1321.

[21] b. M. Song, "voltage balancing techniques for flying capacitors used in soft-switching multilevel active power filters ", thèse de la faculté de l'institut polytechnique de virginia (etats unis), 2004.

[22] h. Miranda, v. Cardenas, j. Pérez, c. Nuñez, "a hybrid multilevel inverter for shunt active filter using space vector control ", conference pesc'04, aachen (germany), 2004.

[23] s. Hui, z. Ji-yan, l. Wei-dong, "a novel active power filter using multilevel converter with self voltage balancing ", conference powercon'02, vol. 4, oct. 2002, pp. 2275-2279.

[24] m. Saeedifard, a. R. Bakhshai, p. Jain, "an active power filter implemented with a three-level npc converter in conjunction with the classification technique ", conference ccgei'03, montréal (canada), may 2003.

[25] b-r. Lin, h-k. Chiang, k-t. Yang, "shunt active filter with three-phase four-wire npc inverter ", ieee international midwest symposium on circuits and systems, vol. 2, jul. 2004, pp.ii.281-ii.284

[26] p. C. Tan, r. E. Morrison, d. G. Holmes, "voltage form factor control and reactive power compensation in a 25-kv electrified railway system using a shunt active filter based on voltage detection ", ieee trans. On industry applications, vol. 39, no. 2, mar./apr. 2003.

[27] p. C. Tan, p c loh, d. G. Holmes, r. E. Morrison, "application of multilevel active power filtering to a 25 kv traction system ", conference aupec'92, melbourne (australie), 2002.

[28] m. Rastogi, p. W. Hammond, s. R. Simms, "multi-level active filter for medium

Voltage applications ", conference peds'05, vol. 2, nov. 2005, pp. 1508-1513.

[29] s. Loudot, h. Pouliquen, t. Meynard, y. Chéron, "active current filter for mv/hv networks ", conference epe'95, vol. 1, séville (spain), pp. 1129-1134.

[30] s. Srianthumrong, h. Akagi, "a medium-voltage transformerless ac/dc power conversion system consisting of a diode rectifier and a shunt hybrid filter ", ieee trans. On industry applications, vol. 39, n° 3, pp. 874-882, may/jun. 2003.

[31] r. Inzunza, h. Akagi, "a 6.6 kv transformerless shunt hybrid active filter for

Installation on a power distribution system", ieee trans. On power electronics, vol.

20, no. 4, pp. 893-900, jul. 2005.

[32] c. Junling, j. Xinjian, z. Dongqi, d. Likuan, y. Beige, "high power hybrid active power filter for medium-voltage distribution network ", conference icems, vol. 2, no. 6, sep. 2005, pp. 1381-138.

[27] S. BERNARD, G. TROCHAIN Deuxième génération de compensateur actif d'harmoniques forte capacité basé sur le mode d'injection du courant.MGE UPS SYSTEMS, MGE0121UKI 1998

[28] M^{elle} KEBIRI Samia « Modélisation et simulation d'un filtre actif multiniveaux » mémoire de magister UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI, TIZI-OUZOU 2009**.**

[29] J. Xu, « Filtrage actif parallèle des harmoniques des réseaux de distribution d'électricité » Thèse de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy 20 Janvier 1994

[30] A. Salem Nia, « Contribution à l'étude théorique et expérimental d'un filtre actif

parallèle à commande analogique et numérique temps réel » Thèse de l'Institut

National Polytechnique de Lorraine, Nancy 24 Septembre 1996.

[31] H. Benquassimi, « Conception de convertisseurs alternatifs – continu mono étage

A absorption sinusoïdale »Thèse de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, 18 Juin 1998.

[32] M.a.e. Alali, « contribution a l'étude des compensateurs actifs Des réseaux électrique basse tension ». Thèse de doctorat, ULP Strasbourg i. 12 septembre 2002.

[33] CHELLI Zoubir Amélioration de la qualité de l'énergie électrique par un filtre actif d'harmonique thèse doctorat.

[34] JOIN, Cédric. *Diagnostic des systèmes non linéaires-Contribution aux méthodes de*

Découplage. 2002. Thèse de doctorat. Université Henri Poincaré-Nancy I.

[35] J. Xu, « Filtrage actif parallèle des harmoniques des réseaux de distribution d'électricité » Thèse de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy 20 Janvier 1994.

[36] A. Salem Nia,« Contribution à l'étude théorique et expérimental d'un filtre actif parallèle à commande analogique et numérique temps réel » Thèse de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy 24

Septembre 1996.

[37] L. Benchaita, « Etude, par simulation numérique et expérimentation, d'un filtre actif parallèle à structure courant avec une nouvelle méthode de contrôle-commande » Thèse de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy 30 Octobre 1998

[38] M. lardjoum Mohamed youcef, melle. khorchef imane » Commande d'un filtre actif parallèle de puissance par la méthode SVPWM fondu sur un réseau »Master Électrique basse tension-université Médéa (215-216)

[39] MOUSSA Oussama « étude des harmoniques et techniques de commandes du filtre actif » mémoire de magister BATNA2

[40] S. Beaulieu, « Etude et mise au point d'un filtre actif d'harmoniques en vue d'améliorer la qualité de l'alimentation électrique ». Mémoire présenté comme exigence partielle de la maîtrise en ingénierie. Université du Québec à Chicoutimi. MAI

2007.

[41] a.morsli, a.tlemcani, m.s.boucherit et n.ould cherchali, ''Dépollution des Réseaux Electriques Basse Tension utilisant un Filtre Actif Parallèle à deux niveaux contrôé par l'Algorithme P-Q'', Vol 53, N°=2, 2012..

[42] Mohamed Muftah ABDUSALAM « Structures et stratégies de commande des filtres actifs parallèle et hybride avec validations expérimentales »thèse de doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy-I.

[43] l. Asiminoaei, s. Hansen, c. Lascu and f. Blaabjerg, « selective harmonic current

Mitigation with shunt active power filter ». Epe, aalborg, (2007).

[44] j. H. Kim and s. K. Sul, « over modulation strategy for a three-phase four-leg voltage

Source converter ». Ieee, industry applications conference, 37th ias annual meeting,(2003).

[45] MOUSSA Oussama« l'étude des harmoniques et techniques de commandes du filtre actif » thèse magister université Batna 2.

[46] R. Kiffouche, « Identification des harmoniques et génération de

courants de référence - Application au convertisseur statiques ». Mémoire de Magister, Université M'Hamed Bougara de Boumerdes, Juillet 2006.

[47] . M.C. Benslimane, «Compensation générale des harmoniques Etude, dimensionnement et commande d'un filtre actif parallèle». Mémoire de Magister, Université M'Hamed Bougara de Boumerdes. 2002.

[48] CHENNAI Salim, ‘‘Etude, Modélisation & Commande des Filtres Actifs : Apport des Techniques de l’Intelligence Artificielle’’, Thèse de doctorat en génie électrique, université Mohamed Khider- Biskra (Algérie) 2013.

[49] S.Tadjer I.Habi, “Problématiques et identification des perturbations harmoniques dans un réseau basse tension”, article,Laboratoire de la recherche syr l’électrification des entreprises industrièlles, Faculté des Hyrocarbures et de la chimie, Université M’hamed Bougara de Boumerdès, (Algérie).

[50] MAGRAOUI Mohamed, ‘‘Validation de techniques de commande d’un filtre actif parallèle’’, Exigence partielle à la maitrise en génie électrique, L’Ecole De Technologie Supérieure, MONTREAL, (CANADA) 17-septembre 2007.

[51] Amaia Lopez de Heredia Bermeo, “Commande avancées des systèmes dédies a l’amélioration de la qualité de l’énergie : de la basse tension à la moyenne tension”, Thèse de Doctorat en génie électrique, Institut National Polytechnique de Grenoble,(France)

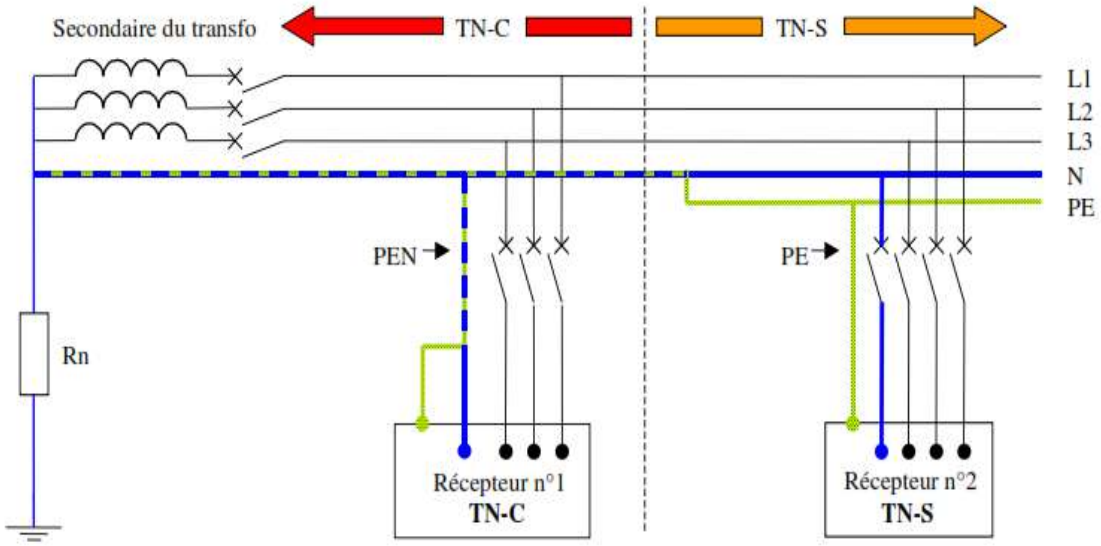
2006.

[51] C. A. Quinn, N Mohan, & H. Mehta, “A four-wire, current-controlled converter provides harmonic neutralization in three-phase, four-wire systems”, in Proc. IEEE APEC’93, pp.

841–846, 1994.

[53] Melle HİND DJEGHLOUD « filtrage actif de puissance » thèse de doctorat UNİVERSİTÉ MENTOURİ CONSTANTİNE 2007.

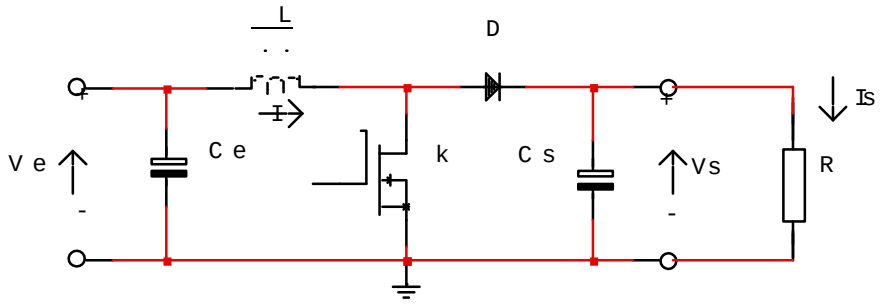
Annexe A


Secondaire du transfo
TN-C
TN-S
L1
L2
L3
N
PE
PEN
PE
Rn
Récepteur n°1
TN-C
Récepteur n°2
TN-S

Annexe B

CONVERTISSEUR ELEVATEUR (BOOST)

PRINCIPE



Le circuit est alimenté par une source de tension V_e, la sortie est chargée par une résistance R et débite un courant I_S.

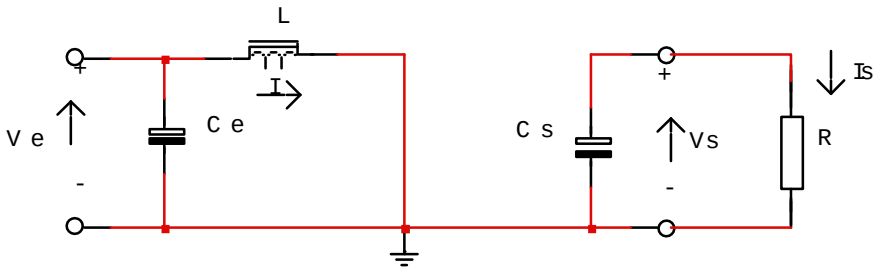
L'interrupteur K, symbolisé ici comme un MOS FET de puissance, est rendu périodiquement conducteur avec un rapport cyclique α à la fréquence F =1/T.

On distingue deux modes de fonctionnement de ce circuit selon que le courant circulant dans l'inductance L est ou non continu (ne s'annule pas au cours de la période).
Le mode conduction continue étant le plus intéressant pour ce convertisseur, nous n'étudierons que ce mode.

ETUDE THEORIQUE EN CONDUCTION CONTINUE

Phase 1 $(0 < t < \alpha T)$

L'interrupteur K est fermé, la diode D est bloquée. Le schéma équivalent du circuit est le suivant:



On a:

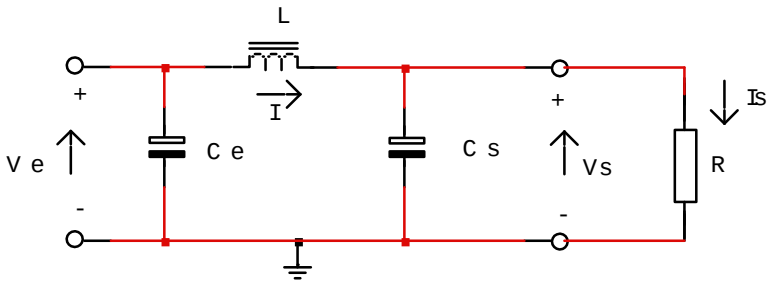
$$V_e = L\frac{di}{dt} \qquad \text{d'où} \qquad i(t) = I_m + \frac{V_e}{L}t$$

A l'instant $t = \alpha T$ le courant dans l'inductance atteint la valeur crête :

$$I_M = I_m + \frac{V_e}{L}\alpha T \qquad (1)$$

<u>Phase 2</u> ($\alpha T < t < T$)

A t = αT on ouvre l'interrupteur K. La diode D devient conductrice et le schéma équivalent du circuit devient :



$$V_e - V_s = L\frac{di}{dt} \quad \text{ou} \quad V_s - V_e = -L\frac{di}{dt}$$

$$i(t) = I_M - \frac{V_s - V_e}{L}(t-\alpha T)$$

A l'instant t = T le courant dans l'inductance atteint sa valeur minimale :

$$I_m = I_M - \frac{V_s - V_e}{L}(1-\alpha)T \qquad (2)$$

Soit ΔI l'ondulation du courant dans l'inductance : $\Delta I = I_M - I_m$

De l'équation (1) on tire:

$$\Delta I = I_M - I_m = \frac{V_e}{L}\alpha T$$

et de l'équation (2):

$$\Delta I = I_M - I_m = \frac{V_s - V_e}{L} (1-\alpha)T$$

En combinant ces deux relations , on peut établir l'expression de la tension de sortie:

$$V_s = \frac{V_e}{(1-\alpha)} \qquad (3)$$

On constate que la tension de sortie du convertisseur ne dépend que de la tension d'entrée et du rapport cyclique α. Celui ci étant toujours compris entre 0 et 1, le convertisseur est toujours élévateur de tension.

On notera que la tension de sortie est théoriquement indépendante de la charge. Dans la pratique, la boucle de régulation ne devra donc compenser que les variations de la tension d'entrée et les imperfections des composants réels.

Courant moyen d'entrée

Tous les éléments étant supposés parfaits, le rendement théorique de ce convertisseur est égal à 1. On peut donc écrire:

$$V_s I_s = V_e I_e$$

En combinant avec l'équation (3), on établi l'expression du courant d'entrée:

$$I_e = \frac{I_s}{(1-\alpha)} \qquad (4)$$

$$I_M = \frac{V_e}{L} \alpha T$$

$$I_{s\,min} = \frac{(1-\alpha)\,\Delta I}{2}$$

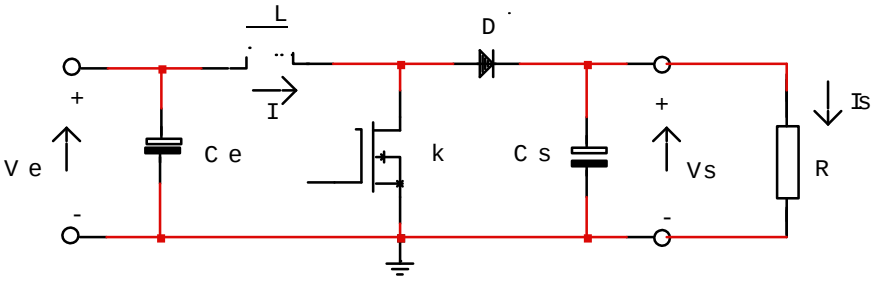
Tension maximale aux bornes de la diode D

Durant la phase 1, lorsque l'interrupteur K conduit, la diode est soumise à la tension de sortie V_S.

$$V_{D\ max} = V_S$$

Calcul de la valeur du condensateur de sortie

$$C = \frac{I_S \alpha\ T}{\Delta V_S}$$



CONVERTISSEUR ELEVATEUR (BOOST)