



People's Democratic Republic of Algeria
Ministry of Higher Education and Scientific Research
University of El Oued
Faculty of Technology



A Doctoral Thesis

Submitted in Fulfillment of the Requirements for Degree of Doctorate in Science

Field: Electrical Engineering

Specialization: Electrical Network

**Contribution à l'amélioration de la qualité de l'énergie
électrique pour les sources d'énergie renouvelable**

Presented by: NEKKAR Djamel

Defended on 05/02/2026, in the presence of the Examination Committee:

Name	Rank	Affiliation	Role
Mr: GUIA Talal	Professor	University of El Oued	Chair
Mr. CHELLI Zoubir	Professor	University of Souk Ahras	Supervisor and Rapporteur
Mr. ZELLOUMA Laid	Professor	University of El Oued	Assistant Supervisor
Mr. BEKAKRA Youcef	Professor	University of El Oued	Examiner
Mr. BOUKADOUM Aziz	Professor	University of Tebessa	Examiner
Mr. DJEGHQDER Yacine	Professor	University of Souk Ahras	Examiner

Academic Year: 2025-2026 /1447-1448 AH

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

(قُلْ هُوَ اللَّهُ أَحَدٌ ۝ اللَّهُ الصَّمَدُ ۝ لَمْ يَلِدْ وَلَمْ يُولَدْ ۝ وَلَمْ يَكُن لَّهُ كُفُوًا أَحَدٌ ۝)

Dédicaces

Je rends grâce à Allah de m'avoir accordé la force nécessaire pour terminer ce travail.

Je dédie de tout mon cœur ce travail :

À ma famille, particulièrement à mon Père et ma Mère Ainsi que ma femme, qui a toujours été là pour croire en moi, me permettant de réaliser ce rêve et qui, à chaque occasion, m'a accordé sa confiance lorsque j'ai eu des incertitudes. Pour leur appui sans faille, leur présence discrète dans mon existence et aussi pour avoir contribué à faire de moi la personne que je suis, peu importe ce que vous en pensez, je vous garantis que si j'ai atteint ce niveau, c'est grâce à vous.

Remerciement

*Avant tout, j'exprime ma profonde gratitude à mon directeur de thèse, Monsieur le Professeur **Z. CHELLI**, professeur à l'Université de Souk Ahras, pour l'encadrement rigoureux dont il a fait preuve, pour sa disponibilité constante, ainsi que pour ses orientations scientifiques éclairées et ses précieux conseils tout au long de l'élaboration de ce travail.*

*J'adresse également mes sincères remerciements à Monsieur le Professeur **L. ZELLOUMA**, professeur à l'Université d'El Oued, pour avoir assuré la co-direction de cette thèse.*

*Je tiens à exprimer ma haute considération et ma profonde reconnaissance aux honorables membres du jury, à savoir Monsieur le Professeur **GUIA Talal**, Monsieur le Professeur **BEKAKRA Youcef**, Monsieur le Professeur **BOUKADOUM Aziz**, Monsieur le Professeur **DJEGHQDER Yacine**, pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'évaluer ce travail, pour l'intérêt qu'ils lui ont porté, ainsi que pour leurs remarques pertinentes et leurs critiques constructives qui ont grandement contribué à l'amélioration de cette thèse.*

*Je voudrais remercier chaleureusement mon ami, Monsieur le Professeur **L. ZEGHADNIA**, pour son soutien.*

Bien évidemment, merci à tous les membres du département d'électrotechnique de l'Université d'El-Oued pour leur soutien durant les quatre dernières années.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE.....	14
-----------------------------------	-----------

Chapitre I: Qualité de l'énergie électrique

I.1 Introduction.....	18
I.2 Qualité de l'énergie électrique.....	18
I.2.1 Problèmes de qualité de l'énergie.....	18
I.2.2 Problèmes majeurs de qualité de l'énergie.....	20
I.2.2.1 Déséquilibre du Système Triphasé.....	20
I.2.2.2 Creux de Tension.....	20
I.2.2.3 Fluctuations de Tension (Flicker).....	21
I.2.2.4 Distorsion de la forme d'onde	22
I.2.2.5 Les harmoniques	22
I.3 Solutions pour optimiser la qualité de l'énergie.....	22
I.3.1 Solution pour le déséquilibre du système triphasé.....	23
I.3.2 Solution pour le creux de tension.....	23
I.3.3 Solution pour la fluctuation de tension (Flicker).....	23
I.3.4 Dépollution des Harmoniques.....	23
I.3.4.1 Les solutions classiques de dépollution.....	23
I.3.4.1.1 Protection de conducteur neutre.....	23
I.3.4.1.2 Démarche sur l'harmonique de l'impédance Source.....	24
I.3.4.1.3 Positionnement d'une inductance de lissage dans la ligne....	24
I.3.4.1.4 Compensation de la puissance réactive	24
I.3.4.1.5 Action sur la structure de l'installation	24
I.3.4.1.6 Les filtres passifs.....	24
a) Catégorisation des filtres passifs.....	24
b) Filtre passif série.....	25
c) Filtre passif parallèle.....	25
e) Filtre résonant	25
f) Filtre passif amorti	26
h) Les points forts et les point faibles des filtres passifs	26
I.3.4.2 Les solutions contemporaines.....	27
I.3.4.2.1 Les filtres actifs	27
I.3.4.2.2 Classements des filtres actifs.....	27
a) Filtre actif série	27
b) Filtre actif parallèle	28
c) Filtre actif universelle (UPQC).....	28
I.3.4.2.3 Les points forts et les points faibles du filtre actif	29
I.3.4.2.4 Filtre hybride.....	29
I.4 Conclusion.....	30

Chapitre II: Filtre Actif Série

II.1 Introduction.....	32
II.2 Structure générale du filtre actif série	32
II.2.1 Analyse de la partie puissance	33
II.2.1.1 Onduleur de tension.....	33
II.2.1.2 Filtre de sortie.....	34
II.2.1.3 Système de stockage d'énergie.....	35
II.2.1.4 Transformateurs d'injection et protection du F.A.S.....	36
II.2.2 Etudes de la partie commande	37
II.2.2.1 Commande de l'onduleur.....	37
II.2.2.2 Identification des tensions perturbatrices.....	37
II.2.2.3 Régulation de la tension du filtre actif série.....	38

II.3	Stratégies de contrôle.....	38
II.3.1	Méthodes des puissances active et réactive instantanées (PQ).....	38
II.3.2	Méthode de référence synchrone (d-q).....	40
II.3.3	Méthode basée sur le calcul des composantes symétriques.....	41
II.4	Conclusion.....	43

Chapitre III: Filtre Actif Parallèle

III.1	Introduction.....	45
III.2	Structure du Filtre Actif Parallèle	45
III.2.1	Etudes de la partie puissance	46
III.2.1.1	Modélisation de l'onduleur de tension deux niveaux.....	46
III.2.1.2	Dispositif de stockage d'énergie.....	47
III.2.1.3	Filtre de sortie	48
III.2.2	Etude de la partie commande	48
III.2.2.1	Commande en pleine onde.....	49
III.2.2.2	Commande par hystérésis.....	49
III.2.2.3	Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI).....	50
III.2.2.4	Commande par MLI vectorielle	51
III.2.3	Réglage de la tension de bus continue	52
III.2.4	Technique de la Régulation.....	52
III.2.5	Dimensionnement des paramètres du filtre actif parallèle.....	53
III.2.5.1	Dimensionnement du condensateur.....	53
III.2.5.2	Planification du filtre de sortie.....	53
III.3	Techniques d'identification des harmoniques.....	54
III.3.1	Théorie de la puissance instantanée (pq).....	54
III.3.2	Théorie du référentiel synchrone (dq).....	57
III.3.3	Théorie des puissances instantanées dans le référentiel (pqr).....	59
III.4	Conclusion.....	62

Chapitre IV: Etude et simulation d'UPQC

IV.1	Introduction	64
IV.2	Principe de fonctionnement de l'UPQC	64
IV.3	Configurations de l'UPQC.....	65
IV.3.1	Classification en fonction du système d'alimentation	65
IV.3.1.1	Structure UPQC monophasée à deux fils.....	65
IV.3.1.2	Structure UPQC triphasée à trois fils.....	66
IV.3.1.3	Structure UPQC triphasée à quatre fils.....	67
IV.3.2	Classification en fonction du système d'alimentation.....	67
IV.3.2.1	Convertisseur de source de tension.....	67
IV.3.2.2	Convertisseur de source de courant.....	68
IV.3.3	Classification UPQC en fonction de la configuration.....	68
IV.3.3.1	L'UPQC Shunt gauche et droit.....	68
IV.3.3.2	L'UPQC Interligne.....	69
IV.3.3.3	L'UPQC Multi-convertisseur.....	69
IV.3.3.4	L'UPQC Multi-niveau Modulaire.....	70
IV.3.3.5	L'UPQC Générateur Distribué.....	71
IV.4	Simulation de compensation avec matlab simulink	72
IV.5	Conclusion.....	77

Chapitre V: Association PV-UPQC

V.1	Introduction.....	79
V.2	Définition de l'énergie renouvelable.....	79
V.2.1	L'énergie solaire.....	79
V.2.2	L'énergie éolienne.....	80
V.2.3	Biomasse.....	80
V.2.4	L'hydraulique.....	81
V.3	Description du fonctionnement d'un système photovoltaïque solaire.....	81

V.4	Description de structure d'un système photovoltaïque solaire.....	82
V.4.1	Modélisation électrique d'une cellule photovoltaïque.....	83
V.4.2	Principe du suivi MPPT.....	86
V.4.3	Convertisseurs DC/DC.....	87
V.4.4	Convertisseurs survolteur « boost ».....	87
V.5	Configuration et conception du système pour la simulation numérique.....	89
V.6	Conclusion.....	98

CONCLUSION GENERALE	99
----------------------------------	-----------

Bibliographie.....	102
---------------------------	------------

Résumé: -----

Les équipements à base d'électronique de puissance constituent aujourd'hui une part essentielle des systèmes modernes de distribution d'énergie électrique. Toutefois, leur utilisation engendre des problèmes de qualité de l'énergie, notamment par la génération d'harmoniques qui perturbent le réseau de distribution ainsi que par la consommation de puissance réactive. Par ailleurs, les équipements modernes deviennent de plus en plus sensibles à la qualité de la tension d'alimentation, ce qui nécessite souvent une augmentation de la capacité de production d'énergie, solution difficile et coûteuse face aux contraintes environnementales. Dans ce contexte, l'objectif de cette thèse est d'étudier et d'analyser le conditionneur universel de qualité de l'énergie (UPQC) afin d'améliorer la qualité de l'énergie électrique et de compenser les perturbations dues aux charges non linéaires. Après un rappel des origines et des effets des problèmes de qualité de l'énergie sur les réseaux électriques, les dispositifs actifs de compensation sont présentés. L'UPQC, composé d'un filtre actif série et d'un filtre actif parallèle, a été étudié en termes de structure et de stratégies de commande. La contribution principale de ce travail réside dans l'intégration d'un système photovoltaïque au bus continu de l'UPQC selon deux configurations : avec et sans convertisseur DC-DC boost. Les résultats de simulation montrent une amélioration significative de la qualité de l'énergie, avec une réduction du taux de distorsion harmonique et une bonne régulation de la tension du bus continu. La configuration sans boost permet de simplifier la structure du système et de réduire le coût global tout en conservant des performances comparables.

Mots clés : Qualité de l'énergie, filtres actifs de puissance, conditionneur UPQC, compensation harmonique, système photovoltaïque, intégration PV-UPQC.

Abstract : -----

Power electronics-based equipment has become an essential part of modern electrical power distribution systems. However, their widespread use introduces power quality problems, mainly due to harmonic distortion injected into the distribution network and the consumption of reactive power. In addition, modern equipment is increasingly sensitive to the quality of the supply voltage, which often requires an increase in power generation capacity, a solution that remains difficult and costly, especially under environmental constraints. In this context, the objective of this thesis is to study and analyze the Unified Power Quality Conditioner (UPQC) in order to improve power quality and compensate for disturbances caused by nonlinear loads. After reviewing the origins and effects of power quality problems in electrical networks, active compensation devices are presented. The UPQC, composed of a series active filter and a shunt active filter, is studied in terms of its structure and control strategies. The main contribution of this work lies in the integration of a photovoltaic system into the DC bus of the UPQC according to two configurations: with and without a DC-DC boost converter. Simulation results show a significant improvement in power quality, with a reduction in total harmonic distortion and proper regulation of the DC bus voltage. The configuration without the boost converter simplifies the system structure and reduces the overall cost while maintaining comparable performance.

Keywords: Power Quality, Active Power Filters, Unified Power Quality Conditioner (UPQC), Harmonic Compensation, Photovoltaic System, PV-UPQC Integration.

ملخص

تُعدّ المعدات المعتمدة على إلكترونيات القدرة جزءاً أساسياً من أنظمة توزيع الطاقة الكهربائية الحديثة. إلا أن استخدامها يؤدي إلى ظهور مشاكل في جودة الطاقة، خاصة نتيجة توليد التوافقيات التي تُشوّه شبكة التوزيع واستهلاك القدرة غير الفعّالة. كما أصبحت التجهيزات الحديثة أكثر حساسية لجودة جهد التغذية، مما يستلزم أحياناً زيادة قدرة التوليد الكهربائي، وهو حل صعب ومكلف في ظل القيود البيئية. في هذا السياق، تهدف هذه الأطروحة إلى دراسة وتحليل معوّض جودة الطاقة الموحد (UPQC) من أجل تحسين جودة الطاقة الكهربائية وتعويض الاضطرابات الناتجة عن الأحمال غير الخطية. بعد عرض أسباب وتأثيرات مشاكل جودة الطاقة في الشبكات الكهربائية، تم تقديم أجهزة التعويض النشطة، حيث تمت دراسة معوّض جودة الطاقة الموحد، المكوّن من مرشح نشط على التوالي ومرشح نشط على التوازي، من حيث البنية واستراتيجيات التحكم. تكمن المساهمة الرئيسية لهذا العمل في دمج نظام كهروضوئي مع الناقل المستمر لمعوّض جودة الطاقة الموحد وفق تكوينين: مع محوّل رافع للجهد وبدونه مع تنظيم جهد الناقل المستمر. أظهرت نتائج المحاكاة تحسناً ملحوظاً في جودة الطاقة مع انخفاض معدل التشوّه التوافقي الكلي وتنظيم جيد لجهد الحافلة المستمرة. كما أتاح التكوين دون محوّل رافع تبسيط بنية النظام وتقليل التكلفة الإجمالية مع الحفاظ على أداء مماثل.

الكلمات المفتاحية: جودة الطاقة الكهربائية، المرشحات النشطة للقدرة، معوّض جودة الطاقة الموحد (UPQC)، تعويض التوافقيات،

النظام الكهروضوئي، تكامل PV-UPQC

ABREVIATION ET SYMBOLE

AC : courant alternatif.
DC : Courant continu
PCC : Point de couplage commun.
IEEE : Institute of Electrical and Electronics Engineers.
 U_{i1} : Composante inverse de tension.
 U_{i0} : Composante homopolaire de tension.
 U_{iD} : Composante directe de tension.
THD : Taux de distorsion harmonique.
R : Résistance.
L : Inductance.
C : Condensateur.
 V_c : Tension de compensation.
 V_L : Tension de charge.
 C_L : Condensateur de charge.
 R_L : Résistance de charge.
PV : Photovoltaïque.
GES : Gaz à effet de serre.
NT : Fonctionnement nominale.
MPPT : Maximum Power Point Tracking
 i_s : Courant de source.
 i_c : Courant de compensation.
 i_L : Courant de charge.
 L_L : Inductance de charge.
 R_L : Résistance de charge.
UPQC : Le conditionneur de qualité d'énergie unifié.
 V_{sf} : La tension de sortie de l'onduleur.
 V_{inj} : La tension aux bornes du condensateur.
 C_{sf} : Condensateur de sortie de l'onduleur.
 I_L : Le courant de charge.
 f_{cs} : La fréquence de résonance.
 V_{dc-n} La tension nominale.
 V_{dc-f} La tension de décharge.
 L_t : Inductance de transformateur.
 R_t : Résistance de transformateur.

\hat{V}_p : Valeur crête de la tension de la porteuse.
 U_{ch} : Tension instantané de charge.
 i_{ch} : Courant instantané de charge.
 V_p : Séquences positives de tension.
 V_n : Séquences négatives de tension.
 V_0 : Séquences homopolaires de tension.
 U_n : Facteur négatif.
 M_p : Facteur d'amplitude.
 R_f : Résistance de filtre passif.
 L_f : Inductance de filtre.
 V_{dc} : Tension de bus continue.
 C_{dc} : Capacité de bus continue.
MLI : Modulation de largeur d'impulsions.
 v_f : Tension de filtre.
 i_f : Courant de filtre.
 i_l : Courant de charge.
 i_h : Courant harmonique.
 i_{ref} : Courant de référence.
 $v_{dc\ ref}$: Tension de référence.
 $X_\alpha ; X_\beta$: Valeur dans le repère ($\alpha\beta$).
 p : Puissance instantané active.
 q : Puissance instantané réactive.
 \bar{p}, \bar{q} : Puissance continue liée à la composante fondamentale active et réactive du courant.
 \tilde{p}, \tilde{q} : Puissance alternative liées à la somme des composantes harmonique du courant.
 v_u : Vecteur unité.
 i_p : Projection de courant sur l'axe p.
 i_q : Projection de courant sur l'axe q.
 i_r : Projection de courant sur l'axe r.
 v_p : Projection de tension sur l'axe p.
 v_q : Projection de tension sur l'axe q.
 v_r : Projection de tension sur l'axe r.
 I_{loss} : Le courant de référence additionnel.
 K_p, k_i : Les termes du correcteur PI.
 ζ : Coefficient d'amortissement.
 ω_c : Fréquence de la coupure.

f_c : Fréquence de la commutation.

I_{PV} : Courant photoélectrique.

V_{PV} : Tension photoélectrique.

E : L'irradiante solaire.

T_m : Température du module.

η_{PV} : L'efficacité du module PV mesurée à la température de référence

T_R : Température de référence de la cellule (25 °C).

β_R : Coefficient de température pour l'efficacité de la cellule (typiquement 0,004–0,005/°C).

T_C : Température du module PV.

γ : Coefficient d'intensité de radiation pour l'efficacité des cellules.

T_A : Température ambiante.

I_{ph} : Courant photonique.

G : L'éclairement énergétique.

I_D : Courant de diode.

I_0 : Courant de saturation sombre.

q : Charge de l'électron.

k : Constante de Boltzmann

T : Température de cellule de la jonction.

I_{SC} : Courant de court-circuit.

V_{OC} : Tension de circuit ouvert.

R_S : Résistance série interne dans le circuit équivalent PV.

R_{Sh} : Résistance parallèle interne dans le circuit équivalent PV.

I_{Sh} : Courant aux bornes de la résistance parallèle.

I_{mp} : Courant maximale de puissance.

V_{mp} : Tension maximale de puissance.

Introduction Générale

Introduction Générale

Parmi les principales responsabilités d'un système énergétique est de fournir de l'électricité sous forme de sinusoïdes et de courant avec des dimensions et des fréquences appropriées aux clients aux points de connexion commune (PCC). Bien que le courant généré par les machines synchrones dans les centrales électriques soit presque sinusoïdal, certaines conditions indésirables telles que les feux de circulation et les courts circuits, ainsi que les charges non linéaires, entraînent des perturbations et des fluctuations de tension et de courant.

Effectivement, les charges non linéaires génèrent des harmoniques de courant et consomment de la puissance réactive, influençant directement la forme des ondes de tension et de courant. Cela provoque une défaillance chez plusieurs équipements sensibles, comme les dispositifs médicaux, les ordinateurs, les automates programmables, les machines tournantes, entre autres. Il est donc crucial de réduire les harmoniques prédominantes à moins de 5 %, en accord avec la norme harmonique IEEE 519. Ainsi, il a été suggéré de mettre en place des normes de délimitation d'harmoniques afin de restreindre les courants harmoniques injectées par des charges non linéaires dans le réseau pour réduire ces perturbations et par conséquent améliorer la qualité de l'énergie fournie, plusieurs options sont à disposition, parmi lesquelles : Les filtres passifs, aussi appelés filtres pièges, ont été utilisés pour éliminer les harmoniques des courants et optimiser le facteur de puissance. Les systèmes de filtrage classiques ont certains désavantages, car ils sont bloqués sur des fréquences prédéfinies, ce qui entraîne l'apparition de phénomènes de résonance, etc. C'est la raison pour laquelle l'utilisation des filtres actifs de puissance a considérablement progressé au cours de cette dernière décennie. En temps réel, ils neutralisent les perturbations causées par une charge polluante. Cependant, le contrôle des filtres actifs est complexe. Deux des filtres actifs les plus couramment employés sont le filtre actif en parallèle et le filtre actif en série. Le filtre passif parallèle exige une liaison parallèle à l'alimentation pour neutraliser les harmoniques de courant et la puissance réactive. Et pour le filtre actif série, il doit être connecté à la source de tension afin de compenser à la fois les tensions harmoniques et les autres perturbations liées à la tension. La solution universelle pour compenser tous les types de perturbations de courant et de tension est le conditionneur universel de puissance UPQC « Unified Power Quality Conditioner ». Plusieurs paramètres ont une forte influence sur les performances de ces systèmes de filtrage. Parmi ceux-ci : la configuration du convertisseur, la méthode de

détection de la référence de courant ou de la tension, le contrôleur utilisé pour suivre ces courants ou tensions de référence, ainsi que la capacité de commande du convertisseur composant le filtre actif.

Ce travail est structuré en cinq sections principales, organisées comme suit :

- Au début du premier chapitre, nous examinons d'abord les divers problèmes qui impactent la qualité de l'énergie électrique, afin de mettre en évidence leurs origines et leurs répercussions sur les installations. Par la suite, nous abordons les méthodes de lutte et les diverses solutions existantes.
- Dans le second chapitre, nous exposons la composition du filtre actif en série à deux niveaux. Puis, nous examinerons les diverses stratégies de contrôle.
- Le troisième chapitre traitera du filtre actif en parallèle. La structure et les méthodes de commande serrantes sont exposées et expliquées en détail.
- Le quatrième chapitre présente le principe de fonctionnement de l'UPQC ainsi que les différentes configurations possibles. Ensuite, un module de compensation du réseau basé sur l'utilisation de l'UPQC est implémenté et validé par simulation sous l'environnement MATLAB/Simulink.
- Dans le cinquième chapitre, qui constitue l'objectif principal de cette thèse, le système photovoltaïque et ses différents composants sont présentés, notamment le générateur photovoltaïque, le dispositif MPPT et le convertisseur DC-DC. Ensuite, afin d'assurer une alimentation stable et de bonne qualité pour l'UPQC, l'intégration du système photovoltaïque avec l'UPQC est étudiée selon deux configurations distinctes. Les performances de l'association PV-UPQC sont enfin évaluées et validées à l'aide de simulations réalisées sous l'environnement MATLAB/Simulink

Pour finir, notre travail se terminera par une conclusion.

Chapitre I :
Qualité de l'énergie électrique

I.1 INTRODUCTION

Ce chapitre constitue l'introduction à notre travail de recherche. Il débutera par une présentation de quelques aspects clés concernant la qualité de l'énergie au niveau du réseau de distribution. Les problèmes de qualité de l'énergie sont discutés en termes de profil de tension et de courant, de divers appareils couramment utilisés, ainsi que du profil de charge du système d'alimentation électrique. Après une discussion sur les problèmes de qualité de l'énergie, les solutions détaillées possibles sont présentées. L'étude de la littérature est menée sur des dispositifs d'alimentation personnalisés.

I.2 Qualité de l'énergie électrique

La définition de la qualité de l'énergie électrique varie selon le référentiel utilisé par chacun, basé sur le point de vue du service public, du fabricant et du client. La qualité de l'énergie est une question axée pour le consommateur, et le point de référence de l'utilisateur final prime. Par conséquent, la qualité de l'énergie est définie comme « Tout problème d'alimentation se manifestant par des écarts de tension, de courant ou de fréquence entraînant une panne ou un mauvais fonctionnement de l'équipement du client ». La définition de la qualité de l'énergie provient de la norme IEEE 1100 et se lit comme suit : « La qualité de l'énergie est le concept d'alimentation et de mise à la terre d'un équipement sensible d'une manière adaptée au fonctionnement de cet équipement ». Les clients qui consomment de l'énergie électrique visent à obtenir une forme d'onde de tension idéale. Ainsi, l'intérêt des clients pour la qualité de l'énergie concerne principalement la qualité de la tension. D'un autre côté, les préoccupations des services publics se concentrent à la fois sur la qualité de l'énergie [1].

I.2.1 Problèmes de qualité de l'énergie

La qualité de l'électricité n'a jamais été une préoccupation importante jusqu'en 1980. En effet, entre 1960 et 1970, la principale préoccupation tournait autour de la disponibilité de l'approvisionnement électrique. Cependant, en 1980, la fiabilité de l'approvisionnement électrique a atteint 99,9999 % pour les pays développés et les charges installées pendant ces périodes étaient principalement des charges linéaires et introduisaient peu de pollutions dans le réseau. Ils comprennent :

- Charges du moteur ;
- Charges de chauffage résistives ;
- Usines de fusion.

Cependant, de 1970 à 1980, il y a eu une crise énergétique [2]. Cela a entraîné une hausse des prix du pétrole, ce qui a conduit à un accent accru sur la performance du système. Cela a conduit à une croissance de l'utilisation de dispositifs ou de charges électroniques de puissance pilotés par l'électronique de puissance [3][4]. Bien qu'ils promettent une efficacité opérationnelle élevée, Ils engendrent des distorsions ou dégradent la qualité de l'énergie au sein des réseaux électriques. Certains de ces appareils ou charges sont :

- Charges de convertisseur (par exemple, alimentations à découpage) ;
- Gradateurs de lumière ;
- Charges voûtées (par exemple, fours, fonderies).

De plus, les équipements ou processus électriques sont interconnectés entre eux dans le réseau. Ils sont donc exposés aux éventuelles perturbations pouvant survenir sur le réseau. Par exemple, la défaillance d'un équipement ou d'un processus due à une détérioration de la qualité énergétique peut avoir des conséquences importantes sur d'autres équipements ou processus. Cela peut leur causer des désagréments et/ou des pertes financières. Par conséquent, il y a une prise de conscience grandissante de l'importance d'améliorer la qualité de l'énergie dans les systèmes électriques, en complément du maintien d'une alimentation électrique stable.

Le problème de qualité de l'énergie est caractérisé par les paramètres suivants [5] :

- Forme d'onde parfaitement sinusoïdale ; pas de distorsion, de pointes, de creux ;
- Equilibre et symétrie parfaite des phases d'amplitude et de phase ;
- Stabilité de fréquence ;
- Limites acceptables pour le facteur de puissance.

Les perturbations désignent tous les phénomènes, qu'ils soient internes ou externes au réseau, susceptibles d'altérer de façon temporaire ou permanente l'amplitude et/ou la forme des paramètres électriques du réseau (courant, tension, fréquence). On peut catégoriser ces perturbations en fonction de deux facteurs : la durée ou le type d'attribution, soit leurs impacts sur les paramètres électriques. Dans les systèmes électriques actuels, qui évoluent rapidement, on constate plusieurs problèmes liés à la qualité de l'énergie. Ceux-ci peuvent être classés en fonction d'événements tels que l'état transitoire et stable, de quantités telles que le courant, la tension et la fréquence, ou de la charge et des systèmes d'alimentation. Dans la plupart des cas, la tension est prise en compte, car la qualité de la tension est la question abordée par souci de commodité. La qualité de la tension est principalement reconnue par trois facteurs que sont l'amplitude, la forme de l'onde et la fréquence.

I.2.2 Problèmes majeurs de qualité de l'énergie

Les problèmes importants de qualité de l'énergie sont :

I.2.2.1 Déséquilibre du Système Triphasé :

Un système triphasé tension/courant se compose de trois paramètres similaires et synchronisés, quand ils possèdent la même amplitude et sont décalés de $\pm 120^\circ$; dans ce cas, nous parlons d'un système équilibré. Si ces conditions de phase et d'amplitude ne sont pas respectées, ne sont pas égales en amplitude et peuvent même ne pas être également déplacés dans le temps, on parle d'un système triphasé déséquilibré, voir figure.1.1 [6].

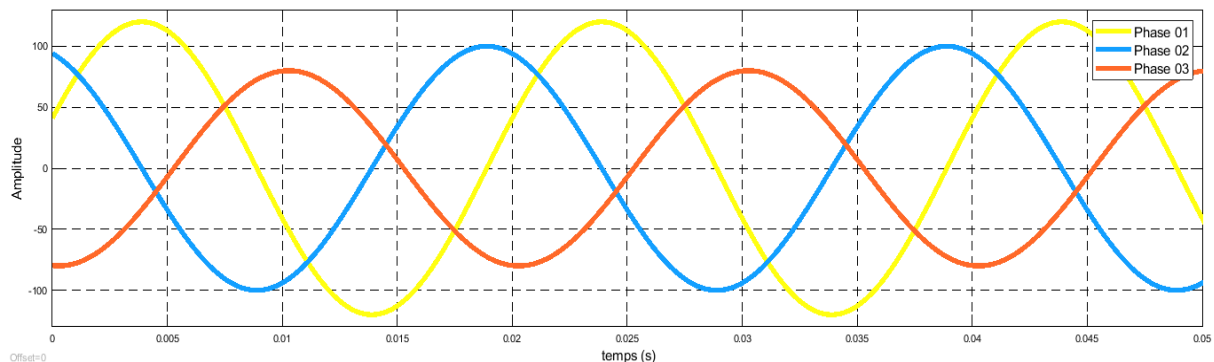


Figure 1.1: système triphasé de tension/courant déséquilibré.

La méthode des composantes de Fortescue permet de déterminer le degré de déséquilibre en comparant la composante inverse (U_{1i}) (ou homopolaire (U_{1o})) du fondamental à la composante directe (U_{1d}) du fondamental.

$$\Delta U_i = \frac{|U_{1i}|}{|U_{1d}|} \quad (1.1)$$

et

$$\Delta U_o = \frac{|U_{1o}|}{|U_{1d}|} \quad (1.2)$$

Les défauts monophasés ou biphasés entraînent des déséquilibres jusqu'à l'activation des dispositifs de protection.

I.2.2.2 Creux de Tension

Les chutes de tension sont principalement causées par des courants momentanés de haute intensité qui circulent à travers le Système. Les causes primordiales des surcharges intègrent les irrégularités du système d'alimentation, le démarrage du moteur et l'alimentation du

transformateur [7]. Un exemple spécifique de creux de tension est une brève interruption, tel qu'illustre la figure 1.2.

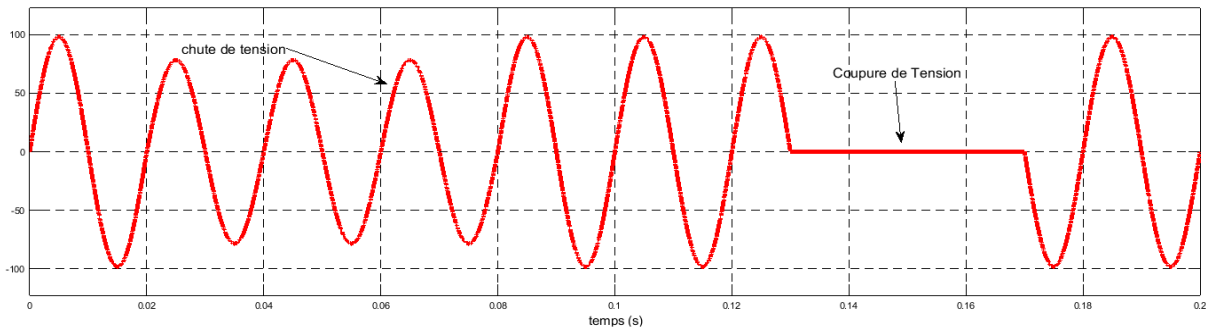


Figure 1.2: Creux et coupures de tension.

Les anomalies dans le système d'alimentation sont la source principale des chutes de tension, notamment les courts-circuits monophasés. En cas de court-circuit, la tension sur la phase défectueuse chute à un niveau variant entre 0 et 1 (pu) pour une grande partie du réseau avoisinant. Ce niveau dépend de l'impédance entre le site du défaut et le point où l'on effectue la mesure [8].

1.2.2.3 Fluctuations de Tension (Flicker):

Les fluctuations de tension sont définies comme la variation cyclique de la tension avec une amplitude ne dépassant pas 10 %. Cette variation d'amplitude est généralement bien inférieure au seuil de sensibilité de la plupart des équipements et, par conséquent, des problèmes de fonctionnement ne se produisent que dans de rares cas. À l'exception de ces cas très particuliers, l'effet perturbateur principal des fluctuations de tension est de provoquer des variations de l'intensité lumineuse des sources de lumière [9]. Le mot "Flicker" provient de l'effet visible sur les lampes (éclatement de la lumière) causé par les variations de tension. Comme illustré dans la Figure 1.3. Les variations de tension dans les réseaux de transmission et distribution sont largement attribuables à l'utilisation des fours à arc [10].

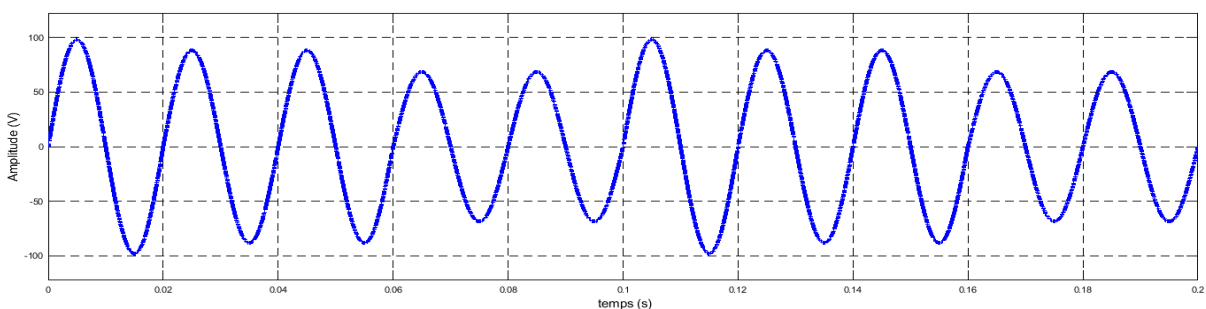


Figure 1.3: Fluctuations de tension.

I.2.2.4 Distorsion de la forme d'onde :

C'est une déviation en régime stable du profil d'onde de tension ou de courant par rapport à une onde sinusoïdale parfaite à une fréquence fondamentale, définie par la composition spectrale de la déviation.

I.2.2.5 Les harmoniques :

Les harmoniques sont des tensions ou des courants sinusoïdaux dont les fréquences sont des multiples entiers de la fréquence fondamentale de la tension d'alimentation, Figure 1.4. L'usage accru des dispositifs d'électronique de puissance dans les réseaux électriques participe à la dégradation de la tension d'alimentation. Effectivement, ces charges qualifiées de déformantes sont non linéaires et requièrent du réseau électrique un courant non sinusoïdal contenant des harmoniques. Ces harmoniques qui traversent les impédances du réseau peuvent, lorsqu'elles sont de grande amplitude, engendrer des tensions harmoniques et par conséquent troubler l'opération des autres appareils connectés au point de raccordement commun [11]. Le taux de distorsion harmonique (THD) donne la mesure du contenu harmonique dans un signal et est généralement utilisé pour désigner le niveau d'harmoniques présents dans la tension/courant.

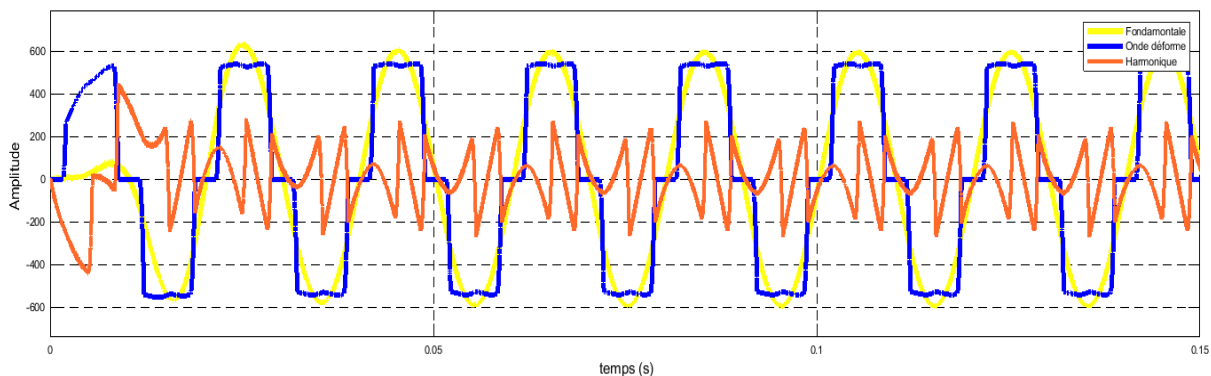


Figure 1.4: Forme d'onde déformée avec composantes fondamentale et harmonique.

I.3 Solutions pour optimiser la qualité énergétique

Le choix de la solution la plus appropriée dépend des caractéristiques de l'offre au point de connexion, des contraintes de charge et des considérations économiques. Il existe deux méthodes distinctes pour améliorer la qualité de l'énergie électrique. L'un est le conditionnement de la charge, qui vise à rendre les équipements du processus industriel moins sensibles aux problèmes de qualité de l'énergie, ce qui leur permet ainsi de les surmonter. Une autre possibilité est l'installation d'un appareil de conditionnement qui aide à atténuer ou à prévenir les perturbations issues du réseau [12].

I.3.1 Solution pour le déséquilibre du système triphasé

L'approche conventionnelle en matière d'équilibrage de charge consiste à répartir uniformément les charges nominales sur chaque phase. Normalement, cela est suffisant pour que de graves déséquilibres de tension ne se produisent pas fréquemment. Lorsque l'équilibre de charge est inévitable, surtout en présence de charges monophasées importantes, il convient d'utiliser un équipement spécial de rééquilibrage pour contrebalancer la perturbation. L'objectif de son fonctionnement est généralement l'élimination ou la restriction des composants de charge à séquence négative et zéro. Cette procédure est connue sous le nom d'équilibrage [13].

I.3.2 Solution pour le creux de tension

Diverses techniques sont suggérées dans les publications pour protéger les appareils des baisses de tension. On peut les diviser en trois groupes distincts : l'implantation de matériels compensateurs, l'emploi d'une source d'alimentation supplémentaire et la transformation des configurations des convertisseurs.

I.3.3 Solution pour la fluctuation de tension (Flicker):

Parmi les options pour gérer les fluctuations de tension, on retrouve le changement du type d'éclairage, la mise en place de dispositifs d'alimentation sans coupure, l'ajustement du perturbateur (par exemple, l'adoption d'une méthode alternative de démarrage des moteurs à démarrage fréquent contribue à réduire les surintensités), l'augmentation de la puissance des courts-circuits et la dissociation électrique avec la charge perturbatrice des systèmes d'éclairage [14].

I.3.4 Dépollution des Harmoniques

Les systèmes de compensation sont essentiellement déployés dans les systèmes d'électronique de puissance afin d'optimiser la qualité énergétique. Ils fonctionnent en collaboration avec le réseau, en ajoutant leur énergie à celle de celui-ci [15]. Il existe deux types de solutions possibles. L'une implique l'utilisation de convertisseurs statiques peu ou moins polluants, tandis que l'autre procède à un filtrage des facteurs harmoniques [16]. Il est possible de classer les solutions de dépollution en deux catégories pour remédier à toutes les perturbations : les solutions traditionnelles et les solutions modernes.

I.3.4.1 les solutions classiques de dépollution

I.3.4.1.1 Protection de conducteur neutre.

Pour éviter que le conducteur neutre ne soit détruit par l'ajout de composants homopolaires, il serait suffisant de consolider sa structure. Une fois renforcé, le conducteur neutre devrait être

en mesure de résister à l'intensification du courant.

I.3.4.1.2 Démarche sur l'harmonique de l'impédance Source

Ceci est une approche utile qui vise à réduire l'impédance harmonique de la source, en connectant la charge non linéaire directement à un transformateur suffisamment puissant ; ou en optant pour un générateur ayant une impédance harmonique basse.

I.3.4.1.3 Positionnement d'une inductance de filtrage dans la ligne.

Afin de limiter la diffusion des effets indésirables dans le réseau, on peut contrôler les harmoniques de certains convertisseurs en plaçant une inductance, appelée inductance de lissage, entre leur point de raccordement et leur entrée. L'augmentation de l'inductance de ligne entraîne une augmentation proportionnelle de la distorsion en tension aux bornes de la charge.

I.3.4.1.4 Compensation de la puissance réactive

La consommation de la puissance réactive est principalement assurée par les moteurs asynchrones et, plus récemment, par des équipements basés sur l'électronique de puissance. L'objectif des techniques de compensation est d'améliorer le facteur de puissance. L'option la plus facile est d'installer des batteries de condensateurs en parallèle avec le système. Le désavantage de cette technique est que la puissance réactive fournie par les condensateurs reste constante et ne s'ajuste pas aux besoins changeants.

I.3.4.1.5 Action sur la structure de l'installation

Afin d'éviter les préjudices, il serait préférable de faire preuve de prudence lors du raccordement des composants dans un réseau de distribution ; par exemple, nous devons éviter de brancher un récepteur sensible en parallèle avec une charge non linéaire. De manière similaire, il est sage de s'assurer qu'une charge non linéaire fortement polluante soit alimentée par une autre source.

I.3.4.1.6 Les filtres passifs

Le concept de filtrage passif consiste à ajuster localement l'impédance du circuit pour dévier les courants harmoniques et, par conséquent, supprimer les tensions harmoniques qui en découlent. Ces filtres contiennent des composants capacitifs et inductifs agencés pour réaliser une résonance en série à une fréquence précise.

a) Catégorisation des filtres passifs:

Les filtres passifs peuvent être catégorisés en fonction de leur position sur le réseau, leur méthode de connexion, leur niveau d'atténuation ainsi que leur fréquence de résonance. On peut classer les filtres passifs en deux catégories : les filtres en parallèle et les filtres en série. En fonction de l'option sélectionnée, les harmoniques peuvent être généralement

stoppés par une forte impédance en série entre le convertisseur et le réseau, détournés par une impédance en parallèle faible ou un mélange des deux [17].

b) Filtre passif série : Pour réduire les distorsions harmoniques produites par les charges polluantes, il est possible d'intégrer un filtre passif série dans l'alimentation d'entrée de ligne, figure 1.5. Ce filtre présente une impédance élevée afin de faciliter le passage des harmoniques de la source vers la charge non linéaire. En connectant le filtre passif en série à une fréquence déterminée, celui-ci offre une impédance élevée uniquement à sa fréquence d'accord.

En règle générale, en fonction de la caractéristique physique de L et C choisie, une bande étroite apparaît autour de la fréquence d'accord lorsque l'impédance demeure haute [18].

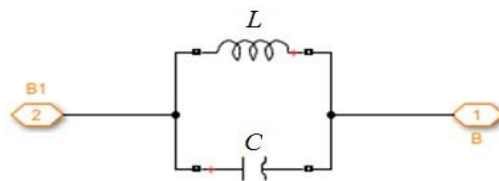


Figure 1.5: Filtre passif série.

c) Filtre passif parallèle : La Figure 1.6 présente le filtre passif parallèle. L'utilisation du filtre passif parallèle se limite au côté alternatif pour deux motifs:

- 1) Ce dernier ne transmet que le courant harmonique et est relié à la terre.
- 2) À la fréquence fondamentale, il a l'avantage de délivrer de la puissance réactive.

Un filtre passif parallèle est bien plus économique tout en offrant une efficacité comparable à celle du filtre passif série. On utilise principalement le filtre passif parallèle dans le contexte des charges produisant des courants harmoniques [19].

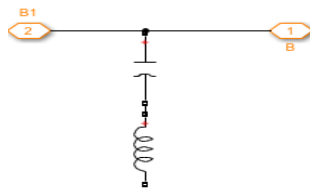


Figure 1.6: Filtre passif parallèle.

En général dans l'usage, on rencontre deux types de filtres passifs parallèles : le filtre passif résonant et le filtre passif amorti.

e) Filtre résonant : L'avantage du filtre résonant passif (voir figure 1.7) réside dans sa forte sélectivité. Il peut être positionné en parallèle ou devant la charge non linéaire, facilitant ainsi le passage du courant harmonique à la fréquence pour laquelle le filtre est accordé. De plus, il peut être installé simultanément avec d'autres filtres résonnants [20] [21] [22].

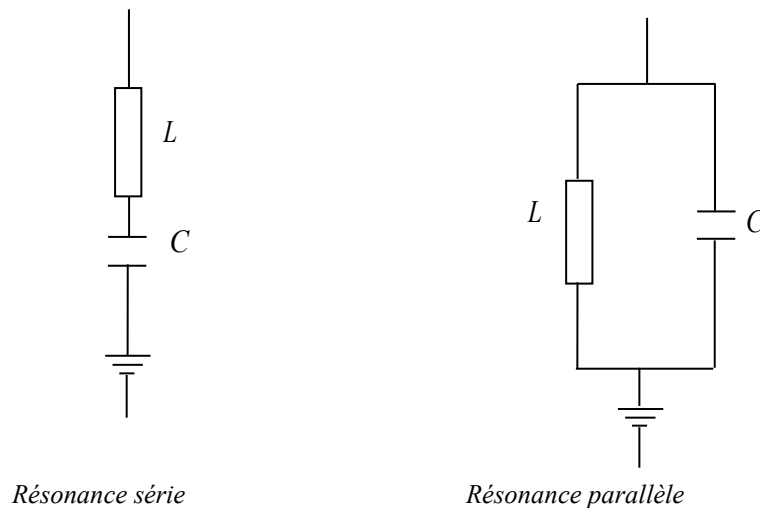


Figure 1.7: Filtres résonants agissant sur plusieurs rangs harmoniques.

f) Filtre passif amorti : Le filtre passif amorti (Figure 2.8) possède une structure pratiquement identique à celle du filtre passif résonant. La seule différence réside dans le fait que, pour lui, l'inductance et la résistance sont disposées en divergent, ensuite ils sont mises avec la capacité en série. Le filtre amorti, contrairement au filtre résonant, a la capacité de filtrer plusieurs fréquences simultanément. En effet, il est conçu pour filtrer la fréquence à laquelle il est accordé, ainsi que les fréquences supérieures dans la présentation spectral, d'où l'appellation « filtre amorti passe-haut » [20] [21] [22].

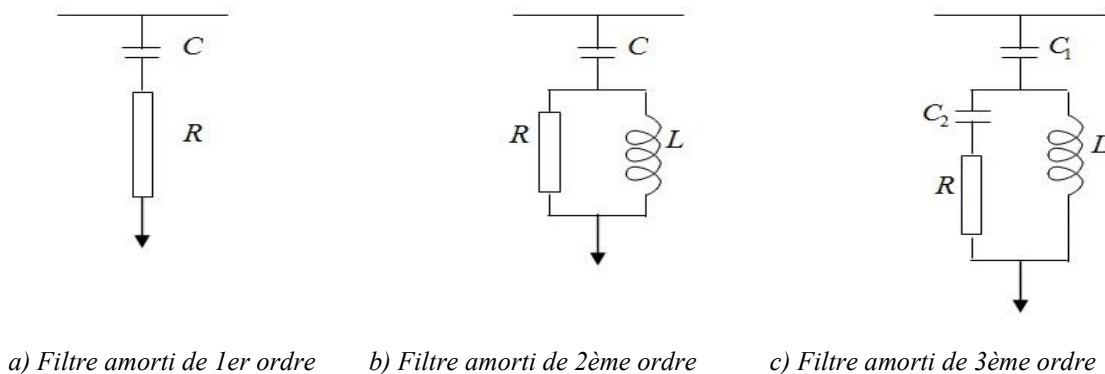


Figure 1.8: Filtre amorti.

h) Les points forts et les point faibles de filtre passif : il a déjà prouvé sa robustesse dans le secteur industriel en raison de ses coûts réduits, de son efficacité élevée et de sa simplicité d'installation et d'exploitation [23].

Toutefois, il comporte les ponts faibles suivants [24]:

- L'impédance de ces éléments peut engendrer des résonances en série ou en parallèle avec l'impédance de la ligne, ce qui accentue la distorsion des courants.

- De bénéficier d'une rémunération fixe pour la puissance réactive sans tenir compte de l'état de la charge.
- D'être surchargé lorsque la tension de la source contient des harmoniques.
- D'être encombrant et de causer des vibrations.

Ainsi, avant l'implémentation d'un tel filtre, une analyse approfondie est indispensable pour éviter la résonance et la surcharge.

I.3.4.2 Les solutions contemporaines

I.3.4.2.1 Les filtres actifs

Les limitations des méthodes classiques de dépollution, comme le filtrage passif (antirésonance, surcharge et forte dépendance à l'environnement,...) ont mené à l'élaboration de configurations développées « auto-adaptatives » afin de procéder à la suppression des harmoniques, nommées les filtres actifs. S'ajoute à des systèmes de convertisseurs déjà en place. L'idée du filtrage actif se fonde sur l'injection de courants (ou de tensions) harmoniques en phase opposée aux harmoniques que l'on désire minimiser.

I.3.4.2.2 Classements des filtres actifs

Dans les ouvrages spécialisés, les filtres actifs peuvent être catégorisés soit en fonction de leur disposition, série, parallèle et leurs agencements, soit selon leur circuit d'électronique de puissance ou encore selon la stratégie de contrôle-commande implémentée.

a) Filtre actif série :

Le F.A.S est branché entre le réseau d'alimentation et la charge via un transformateur de courant, dans le but de contraindre la courant source à prendre une forme sinusoïdale. Cela exige une tension en série afin de séparer la tension liée à la charge. Autrement dit, le FAS offre une résistance importante aux courants harmoniques, agissant comme un mécanisme d'isolation qui empêche le passage des courants harmoniques de la charge vers la source et de la source d'alimentation vers les autres charges. Donc, la tension appliquée à la charge à protéger est exclusivement sinusoïdale [25] [26] [27].

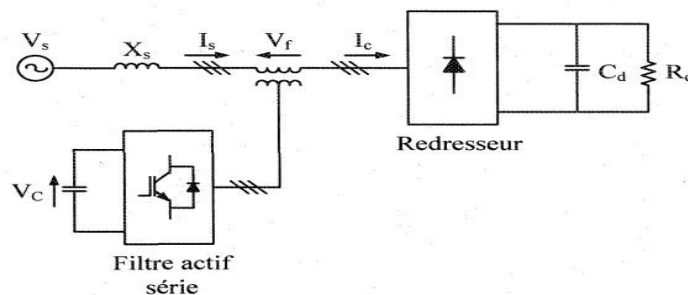


Figure 1.9: Configuration de filtre actif série.

b) Filtre actif parallèle : désigné aussi comme un filtre actif « shunt », il est branché en parallèle au réseau. Il est conçu pour la puissance harmonique (ou le courant harmonique) uniquement absorbée par la ou les charges non linéaires. Son indépendance complète par rapport à la source et à la charge lui octroie une auto-adaptabilité, une fiabilité et des performances. Dans ce contexte, le filtre actif parallèle agit comme un générateur de courants. Il injecte dans le réseau des courants équivalents aux courants harmoniques créés par la charge non linéaire en phase inversée. Donc, après compensation, le courant de ligne devient sinusoïdal. Cette configuration en shunt offre aussi la possibilité de compenser la puissance réactive [28].

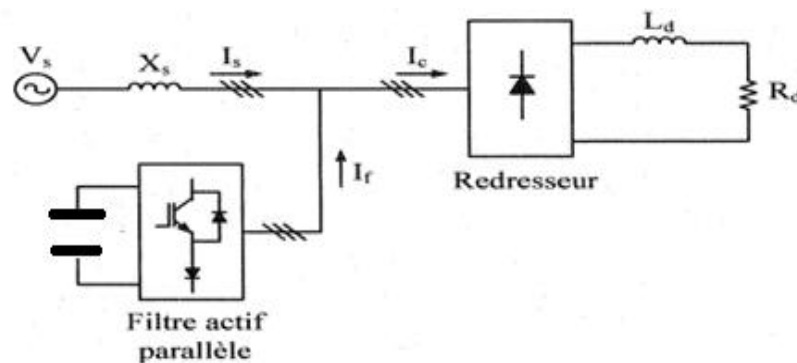


Figure 1.10: Configuration de filtre actif parallèle.

c) Filtre actif universelle (UPQC) : L'union d'un filtre actif en série et d'un autre en parallèle est désignée sous le terme de conditionneur universel de la qualité d'onde (UPQC), provenant de son nom anglais « Unified Power Quality Conditionner ». La configuration offre la possibilité d'explorer diverses fonctions simultanément pour améliorer la qualité de la tension (compensation des harmoniques, de l'énergie réactive, régulation et stabilisation de tension, etc.).

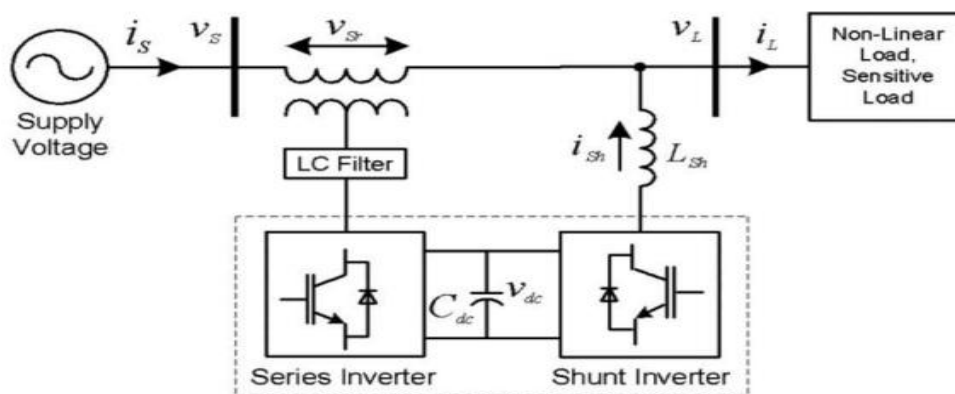


Figure 1.11: Configuration de filtre actif universel «UPQC».

Les principales tâches du FAS consistent à isoler les harmoniques entre l'origine et la charge génératrice de pollution, à compenser la puissance réactive et à équilibrer les tensions inégales. La mission du FAP consiste à atténuer les courants harmoniques, à neutraliser la puissance réactive, à neutraliser les courants de séquence négative et à gérer la régulation de la capacité du côté ce entre les deux filtres actifs [29].

I.3.4.2.3 Les points forts et les points faibles du filtre actif : Le filtre actif offre plusieurs points forts à savoir [30] :

- Le danger d'un phénomène de résonance (amplification des harmoniques) entre le filtre et l'impédance du réseau, présent avec un filtre passif, est minimisé.
- Quand le niveau de pollution à neutraliser dépasse ce que le filtre actif peut gérer, il n'y a aucun risque de surcharge puisque celui-ci fonctionne à sa capacité maximale et tout danger de destruction est prévenu.
- Il est insensible à la variation des caractéristiques du réseau.
- Il s'ajuste automatiquement en fonction de l'évolution des charges et du réseau.
- Il a la capacité de compenser plusieurs harmoniques (dans le cadre de sa bande passante).

Toutefois, le filtrage actif présente des points faibles [31]:

- Le coût de celui-ci est nettement supérieur à celui du filtre passif.
- Il offre la possibilité de compenser l'énergie réactive, mais à un prix nettement supérieur au filtrage passif.

I.3.4.2.4 Filtre hybride : L'hybridité de la structure découle de la combinaison d'un filtre actif avec un filtre passif. Sa force tient au fait que le filtre actif améliore et préserve les performances de filtrage en fonction de la charge et des modifications du réseau, tandis que le filtre passif gère une grande partie des harmoniques.

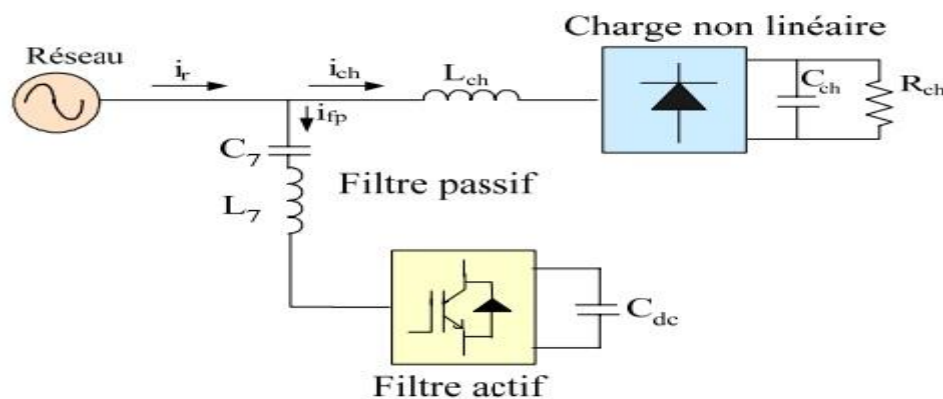


Figure I.12: Configuration de filtre hybride.

Ainsi, l'utilisation de composants passifs réduit significativement la puissance nécessaire au convertisseur qui fonctionne comme un filtre actif. Cette organisation a vu le jour pour répondre à la nécessité d'optimiser l'efficacité et de diminuer les dépenses relatives aux filtres de conception simple [32][33].

I.4 Conclusion

Comme démontré dans ce premier chapitre, des perturbations comme les creux de tension, le déséquilibre et les harmoniques affectent la qualité de l'énergie électrique, conduisant à une dégradation de cette dernière et par conséquent à une insatisfaction du client et un service de mauvaise qualité. Cependant, on peut trouver des méthodes, qu'elles soient classiques ou innovantes, pour atténuer les effets des perturbations et garantir une alimentation de haut niveau. Les méthodes traditionnelles comme les filtres passifs montrent une efficacité moyenne face à des charges non linéaires et changeantes. Par conséquent, avec les progrès en électronique de puissance et en informatique, la recherche s'est orientée vers de nouvelles approches, notamment les filtres actifs : série, parallèle et hybride.

Nous proposerons une analyse approfondie du filtre actif de série dans chapitre suivant.

Chapitre II :
Filtre Actif Série

II.1 Introduction

Selon la philosophie de la qualité de l'énergie électrique, une perturbation électrique désigne toute changement de paramètre de tension du réseau par rapport à la sa forme et à sa valeur nominale. Par extension, les phénomènes qui modifient la forme du courant peuvent également être considérés comme des perturbations, puisqu'ils ont un impact direct sur la tension. La variation de la fréquence du réseau, les harmoniques, le déséquilibre, les variations de tension sont les principales perturbations rencontrées. Ils provoquent des effets délétères sur les appareils électriques, qui se manifestent généralement par des surchauffes dégradant leur performance, voire entraînant leur destruction complète. Dans cette optique, afin de lutter contre le phénomène des perturbations harmoniques, des méthodes de dépollution traditionnelles et modernes ont été suggérées. Cependant, les méthodes classiques, utilisant des circuits passifs LC calculés en accord avec les rangs d'harmonique à filtrer, sont fréquemment limitées en termes d'encombrement et de résonance. En outre, les filtres passifs ne sont pas en mesure de s'ajuster à le progrès du réseau et de la charge non linéaire, ce qui limite leur efficacité moyenne. Les avancées dans l'électronique de puissance ont permis l'utilisation de filtres actifs basés sur des convertisseurs statiques. Ces filtres sont moins volumineux, n'interfèrent pas avec les composants du réseau et démontrent une flexibilité considérable face aux changements du réseau électrique et de la charge non linéaire. Leurs objectifs primordiaux sont d'atténuer les harmoniques produites dans le réseau et parfois de gérer l'énergie réactive absorbée par les charges non linéaires.

II.2 Structure générale du filtre actif série

L'emploi du filtre actif en série aide à protéger les charges fragiles contre les fluctuations de tension sur le réseau électrique. Grâce à un transformateur d'injection de tension, il entre en contact avec le réseau infecté et la charge à protéger. Elle comprend une section dédiée à la puissance et une autre centrée sur le contrôle et la commande, comme illustré dans la Figure 2.1. La partie puissance est constituée d'un onduleur triphasé à modulation de largeur d'impulsions, d'éléments de stockage d'énergie avec un système d'alimentation en courant continu, d'un filtre de sortie du second ordre et de trois transformateurs monophasés pour l'injection de tension. Un système by-pass préserve le filtre actif série d'un court-circuit en aval côté charge [35][36]. Dans la section contrôle-commande, Il est possible de détecter les tensions perturbatrices, de réguler les tensions injectées et de gérer les interrupteurs de l'onduleur, généralement dans un mode MLI.

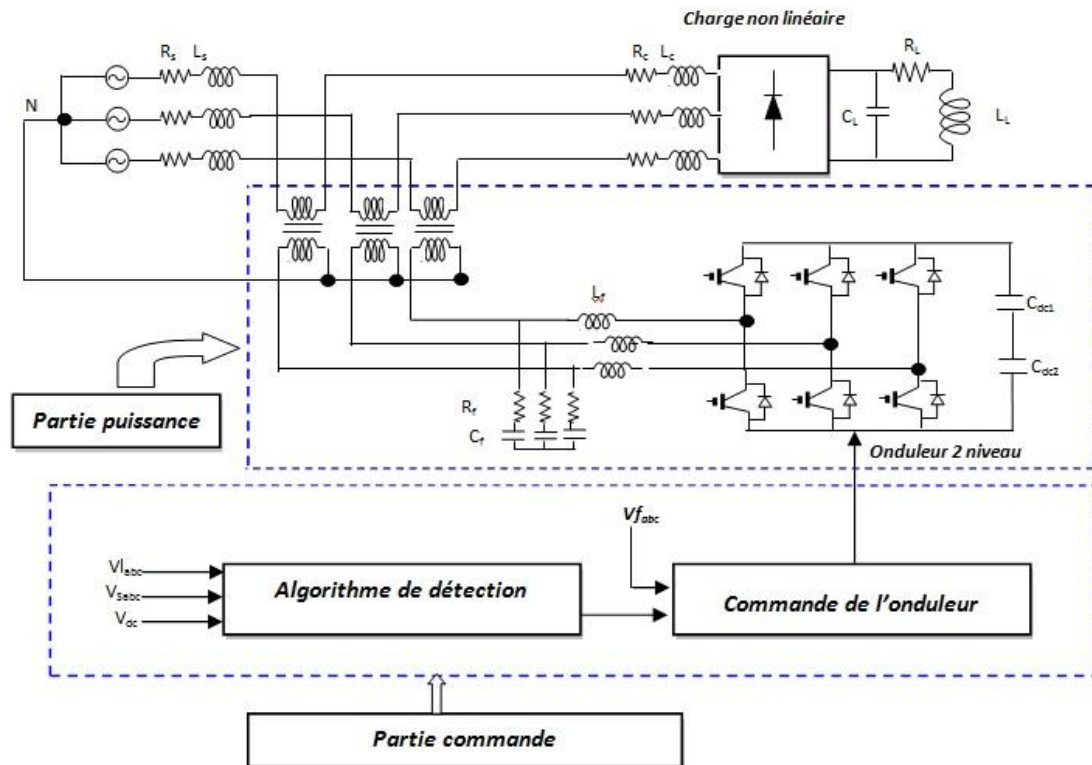


Figure 2.1: Composition d'un filtre actif Série.

II.2.1 Analyse de la partie puissance

Dans ce paragraphe, nous allons analyser minutieusement les composants de cette partie de la structure. Dans un premier temps, nous analyserons l'onduleur en traversant le filtre de sortie, pour ensuite conclure avec les transformateurs d'injection de tension et la protection contre les défauts liés à la charge des transformateurs.

II.2.1.1 Onduleur de tension

L'onduleur de tension est un dispositif de conversion entre deux types des sources : une source de courant alternatif et une source de courant continu. La coexistence de ces deux sources impose l'obligation de suivre certaines règles opérationnelles :

- Il est crucial que l'alimentation du courant alternatif ne soit jamais en circuit ouvert, car le flux de courant doit constamment avoir une voie dégagée. C'est la raison pour laquelle les diodes sont disposées en parallèle avec les commutateurs.
- Il est impératif de ne jamais court-circuiter la source de tension aux bornes de l'onduleur, ce qui signifie que les deux interrupteurs d'un même bras doivent avoir deux commandes supplémentaires.

Comme le montre la figure 2.2, les six interrupteurs employés dans l'onduleur de tension sont disposés symétriquement sur trois bras à interrupteurs actionnés par fermeture et ouverture (IGBT, GTO) accompagnés de diodes placées en antiparallèle.

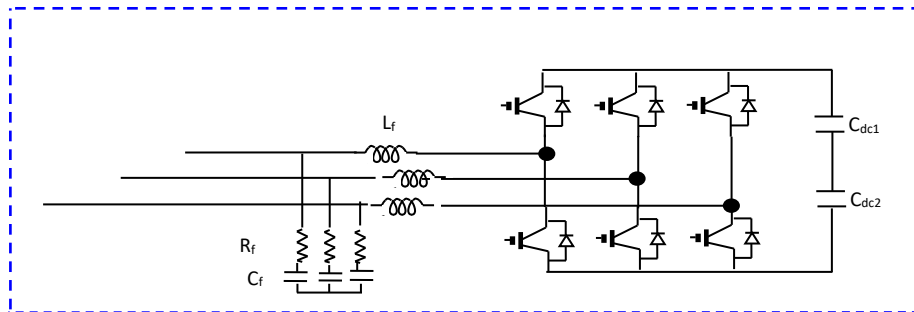


Figure 2.2: Configuration de l'onduleur de tension.

II.2.1.2 Filtre de sortie

Typiquement, le filtre de sortie est un filtre passif du second ordre (L_{sf} , R_{sf} , C_{sf}). L'union de l'inverseur et du filtre de sortie fonctionne comme une source de tension. Le rôle du filtre de sortie est de réduire les composantes induites par les commutations de l'onduleur, en reliant le filtre actif au réseau électrique [37].

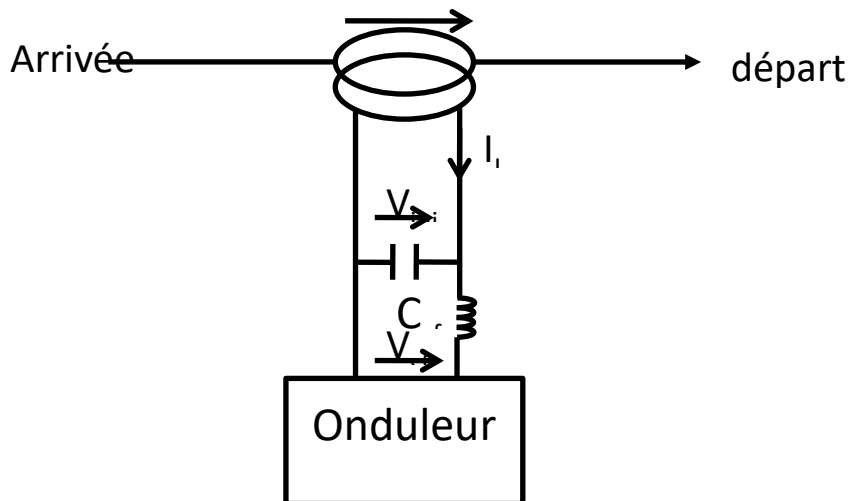


Figure 2.3 : Module du filtre de sortie.

En se basant sur la figure 2.3, où V_{sf} représente la tension sortante de l'onduleur, V_{inj} correspond à la tension appliquée au condensateur C_{sf} et I_L désigne le courant de la charge à protéger, les équations qui caractérisent le filtre de sortie sont:

$$\left\{ \begin{aligned} V_{inj}(s) &= \frac{B_1(s)}{A(s)} V_{sf}(s) + \frac{B_2(s)}{A(s)} I_L(s) \end{aligned} \right. \quad (2.1)$$

$$\begin{aligned}
 A(s) &= a_1 s^2 + a_2 s + a_3 \\
 B_1(s) &= b_0 \\
 B_2(s) &= (b_{21} s + b_{22})
 \end{aligned}
 \tag{2.2}$$

Et

$$\begin{cases}
 a_1 = L_{sf} \cdot C_{sf} \\
 a_2 = R_{sf} \cdot C_{sf} \\
 a_3 = 1 \\
 b_0 = 1 \\
 b_{21} = L_{sf} \\
 b_{22} = R_{sf}
 \end{cases}
 \tag{2.3}$$

La fonction de transfert du filtre de sortie associé au système d'origine est représentée par $(B1(s)/A(s))$, tandis que celle correspondant au modèle de perturbation est indiquée par $(B2(s)/A(s))$. Ces perturbations sont dues à la transition du courant de la charge à protéger, appelée I_L .

La formule fournit la fréquence de résonance f_{cs} du système initial est donnée par la relation :

$$f_{cs} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_{sf} \cdot C_{sf}}}
 \tag{2.4}$$

II.2.1.3 Système de stockage d'énergie

La sélection d'un système de stockage à deux condensateurs (C_{dc1}, C_{dc2}) avec un Point au milieu, tel que illustré dans la figure 2.2, permet de mesurer une tension continue V_{dc} aux bornes des condensateurs sans variation. Cela offre également la possibilité de disposer d'un système triphasé distinct du filtre actif série, qui fonctionnent comme un demi-pont. En revanche, cette décision concernant le filtre actif parallèle aurait altéré sa dynamique, qui dépendait notamment de la tension continue. En effet, un système de stockage sans point médian donne à l'onduleur la possibilité d'obtenir une tension de sortie maximale de $V_f = 2/3 \cdot V_{dc}$ au lieu de $V_{dc}/2$ comme dans une structure avec un point médian [37].

Pour assurer une tension de sortie optimale de l'inverseur, il est essentiel de conserver les deux tensions continues ($V_{dc}/2$) dans une fourchette spécifique. En effet, l'étendue de la tension de sortie produite par le filtre actif en série est directement affectée par la valeur minimale des tensions continues. Il existe plusieurs options possibles à ce sujet :

- l'utilisation d'un système DC autonome qui utilise des batteries pour alimenter les condensateurs de stockage d'énergie [35]. Cette option assure une indépendance considérable au filtre actif série, tout en préservant une tension de sortie plutôt stable lors de la décharge.
- La configuration comprend un pont redresseur à diodes, qu'il soit en phase triphasée [38] ou monophasée [39], comme montré dans la figure.2.1. Puisque le pont redresseur est alimenté par le réseau électrique, chaque condensateur sera pourvu de la tension simple du réseau. Dans cette configuration, les capacités de stockage sont importantes pour assurer, lors de perturbations du réseau, une faible ondulation aux bornes des condensateurs [40]. Dans cette situation, il est aussi indispensable de contrôler le dimensionnement en courant des diodes du pont redresseur.
- On peut envisager l'emploi de super condensateurs ou de supraconducteurs pour des filtres actifs à haute puissance et à tension continue assez faible. [35].

Dans la seconde proposition, il est essentiel que la diminution de tension du condensateur durant la phase de décharge n'affecte pas la performance compensatrice du filtre actif en série. Il est possible de le réaliser si la tension nominale (V_{dc-n}) et celle à l'issue de la période de décharge (V_{dc-f}) ne sont pas identiques.

II.2.1.4 Transformateurs d'injection et protection du F.A.S

L'injection de tension (L_t , R_t) à travers Les transformateurs permet d'introduire la tension générée par l'onduleur en série avec le réseau électrique en fonction du rapport de transformation souhaité, comme démontré dans la figure 2.3. Ainsi, ces transformateurs, appelés transformateurs de courant, ont pour fonction de diminuer le courant de la charge qui traverse l'onduleur de tension grâce à leurs taux de transformation. En plus de cela, ces transformateurs, en raison de leurs caractéristiques magnétiques de saturation, jouent un rôle dans la sauvegarde du filtre actif série contre les anomalies de charge [41].

L'utilisation de ces transformateurs présente des inconvénients tels que leurs coûts élevés et la baisse de tension causée par leurs inductances de fuite (L_t , R_t).

Pour sélectionner un filtre actif série sans transformateur d'injection, il est requis d'utiliser trois onduleurs monophasés avec trois alimentations continues distinctes. En recourant à un filtre actif en série avec un onduleur multicellulaire et un bus continu unique, on peut accroître l'énergie nécessaire pour compenser les mêmes variations de tension [35].

Un système by-pass protège le filtre série contre un court-circuit en aval côté charge, composé d'une impédance variante, de deux thyristors antiparallèles en série avec une résistance faible, et de transformateurs à circuit magnétique saturable [41].

II.2.2 Etudes de la partie commande

Trois aspects cruciaux constituent la base du contrôle actif du filtre en série : la commande de l'onduleur de tension, la reconnaissance des tensions perturbatrices et le réglage des tensions insérées dans le réseau électrique.

II.2.2.1 Commande de l'onduleur

Le contrôle de l'onduleur de tension s'effectue par Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI). La figure 2.4 présente une comparaison entre le signal d'entrée $V_{entrée}$ (modulateur) et un signal triangulaire V_p , porteur, à une fréquence déterminée qui fixe la fréquence de commutation de l'onduleur [37].

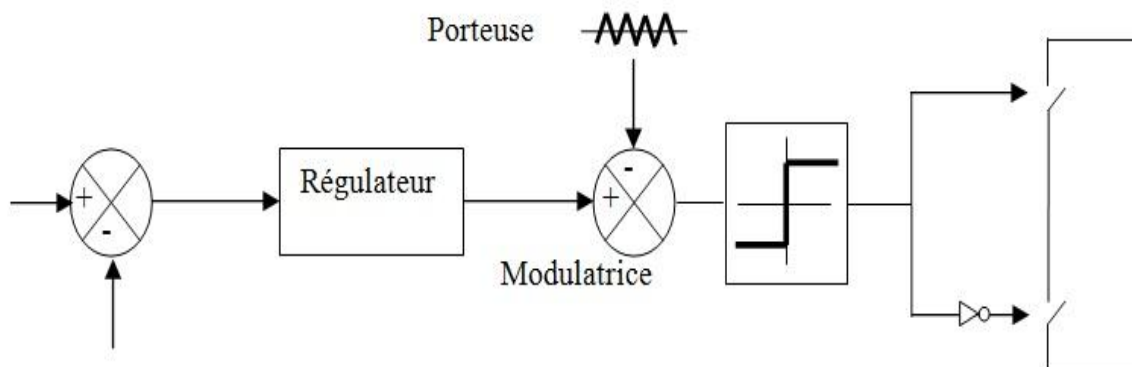


Figure 2.4 : Fondement de commande de l'onduleur par MLI.

On donne V_{sf} la tension de sortie de l'onduleur par :

$$\begin{cases} V_{sf} = K.V_{entrée} \\ K = \frac{V_{dc}}{2.V_p} \end{cases} \quad (II.5)$$

Avec \hat{V}_p le pic de la tension du signal porteur, et V_{dc} la tension de bus continue.

II.2.2.2 Identification des tensions perturbatrices

L'injection de tensions perturbatrices par l'onduleur, qui sont en opposition de phase, est déterminée via la technique d'identification dans le but d'assainir la tension aux extrémités de la charge à protéger. ils correspondent aux tensions déséquilibrées et harmoniques, ainsi qu'aux ruptures de tension. Différentes approches d'identification ont déjà été suggérées dans les écrits. La plupart des techniques reposent sur le calcul des composantes symétriques dans le cadre du système de Park (d,q), nécessitant une expertise pointue du réseau électrique en présence d'harmoniques de tension.

II.2.2.3 Régulation de la tension du filtre actif série

Après avoir identifié les tensions perturbatrices et pour assurer une injection rapide, exacte et robuste de ces tensions, diverses méthodes de contrôle de la tension de sortie de l'onduleur ont été proposées dans les publications académiques.

II.3 Stratégies de contrôle

Plusieurs méthodes ont été examinées afin de détecter les éléments perturbateurs affectant la composante directe de la tension du réseau électrique. On trouve entre autres, des méthodes s'appuyant sur le calcul des composantes symétriques, celles fondées sur l'évaluation des perturbations dans le système de coordonnées (d,q), ainsi que les techniques employant un système basé sur une PLL. Nous allons présenter dans cette section les principales techniques pour identifier les tensions de compensation requises pour assurer le fonctionnement optimal d'un FAS [37][42][43].

II.3.1 Méthodes des puissances active et réactive instantanées (PQ)

La théorie des puissances actives et réactives instantanées permet d'identifier deux stratégies pour détecter les tensions perturbatrices. La première méthode implique de convertir les tensions instantanées triphasées de charge U_{cha} , U_{chb} , U_{chc} et les courants i_{cha} , i_{chb} , i_{chc} en coordonné biphasé (α - β). Ainsi, on obtient respectivement deux tensions de phase u_α , u_β et deux courants de phase i_α , i_β sont respectivement obtenus:

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{cha} \\ U_{chb} \\ U_{chc} \end{bmatrix} = C_{32} \begin{bmatrix} U_{cha} \\ U_{chb} \\ U_{chc} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{cha} \\ i_{chb} \\ i_{chc} \end{bmatrix} = C_{32} \begin{bmatrix} i_{cha} \\ i_{chb} \\ i_{chc} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

La matrice C_{32} permet de changer un système triphasé (abc) en un système biphasé (α - β).

Dans le repère (α - β), \vec{u} sera fragmenté en \vec{u}_α et \vec{u}_β ainsi que \vec{i} que sera \vec{i}_α et \vec{i}_β , on a alors :

$$\begin{cases} \vec{u} = \vec{u}_\alpha + \vec{u}_\beta \\ \vec{i} = \vec{i}_\alpha + \vec{i}_\beta \end{cases} \quad (2.8)$$

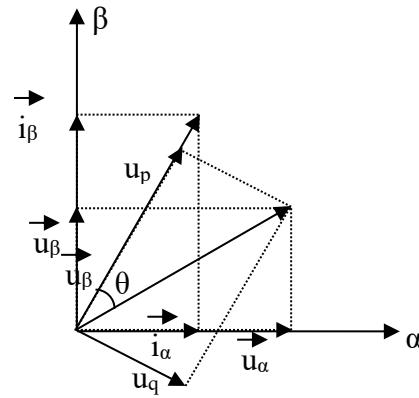


Figure 2.5 : Diagramme vectoriel des tensions et des courants.

Assumons que u_p est la projection de \vec{u} dans la direction de \vec{i} et u_q est la projection de \vec{u} dans la direction orthogonale de \vec{i} , les expressions de u_p et u_q sont données par :

$$\begin{bmatrix} u_p \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \omega t & -\cos \omega t \\ -\cos \omega t & -\sin \omega t \end{bmatrix} \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{cha} \\ U_{chb} \\ U_{chc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.9})$$

$$\begin{bmatrix} u_p \\ u_q \end{bmatrix} = C_{pq} C_{32} \begin{bmatrix} U_{cha} \\ U_{chb} \\ U_{chc} \end{bmatrix}$$

Avec :

C_{pq} est la transformation matricielle permettant la conversion des tensions de phase u_α et u_β en u_p et u_q .

En cas d'asymétrie ou de richesse harmonique des tensions U_{cha} , U_{chb} et U_{chc} , les composantes \bar{u}_p et \bar{u}_q dans u_p et u_q correspondent respectivement à la séquence positive fondamentale active et réactive des tensions de phase triphasées, tandis que les composantes alternatifs correspondent aux composantes harmoniques des trois tensions de phase présentes. Ainsi, il est possible d'obtenir les composantes principales U_{chaf} , U_{chbf} et U_{chef} en effectuant une transformation inverse [44] :

$$\begin{bmatrix} U_{chaf} \\ U_{chbf} \\ U_{chef} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin \omega t & -\cos \omega t \\ -\cos \omega t & -\sin \omega t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{u}_p \\ \bar{u}_q \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

$$\begin{bmatrix} U_{chaf} \\ U_{chbf} \\ U_{chef} \end{bmatrix} = C_{32} C_{pq}^{-1} \begin{bmatrix} \bar{u}_p \\ \bar{u}_q \end{bmatrix}$$

Ou C_{pq}^{-1} est la matrice opposé de C_{pq} . Toutefois, il est possible de calculer les composantes harmoniques de compensation en fonction de :

$$\begin{bmatrix} U_{ca} \\ U_{cb} \\ U_{cc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{cha} \\ U_{chb} \\ U_{chc} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} U_{chaf} \\ U_{chbf} \\ U_{chcf} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

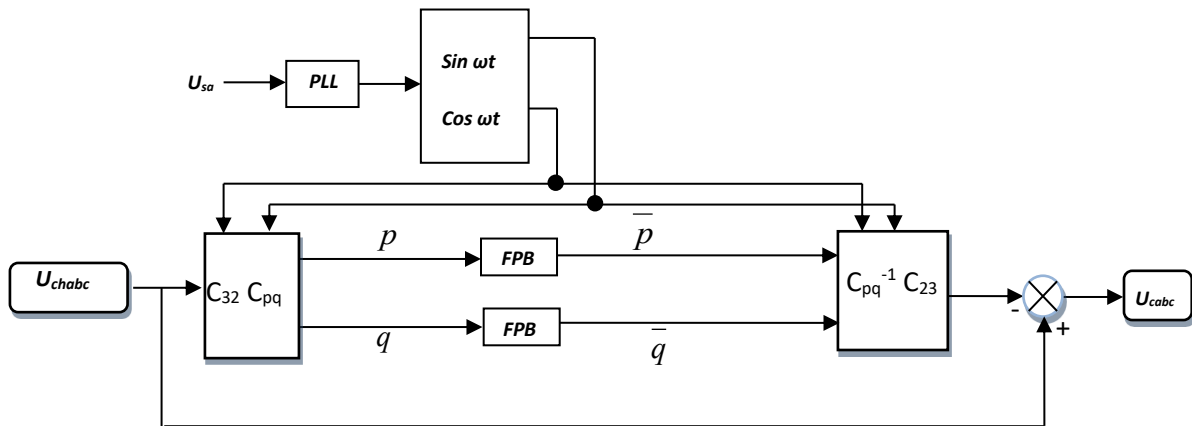


Figure 2.6 : identification de la tension de référence par la méthode PQ.

II.3.2 Méthode de référence synchrone (d-q)

Avec cette approche, on décompose les tensions perturbatrices en séquences positives V_p , négatives V_n et homopolaires V_o . Grâce à la méthode de transformation de Park, on obtient des valeurs constantes pour chaque composante symétrique, soit $V_{p(d,q,mes)}$, $V_{n(d,q,mes)}$ et $V_{o(d,q,mes)}$. [37][42][45]. Dans le repère de Park, les tensions de référence sont définies en déterminant les composantes désirées dans le système direct et en quadrature. Ceci est fait pour la composante positive à partir des valeurs ($V_{p(d-des)}$, $V_{p(q-des)}$), pour la composante négative à partir des valeurs ($V_{n(d-des)}$, $V_{n(q-des)}$), et pour la composante homopolaire à partir des valeurs ($V_{o(d-des)}$, $V_{o(q-des)}$). Donc on peut écrire :

$$\begin{aligned} V_{d,ref}^p &= V_{d,des}^p - V_{d,mes}^p \\ V_{q,ref}^p &= V_{q,des}^p - V_{q,mes}^p \\ V_{d,ref}^n &= V_{d,des}^n - V_{d,mes}^n \\ V_{q,ref}^n &= V_{q,des}^n - V_{q,mes}^n \\ V_{d,ref}^0 &= V_{d,des}^0 - V_{d,mes}^0 \\ V_{q,ref}^0 &= V_{q,des}^0 - V_{q,mes}^0 \end{aligned} \quad (2.12)$$

Ensuite, on calcule les tensions perturbatrices (tensions de référence) triphasées en utilisant la transformation suivante :

$$\begin{bmatrix} V_{ref1} \\ V_{ref2} \\ V_{ref3} \end{bmatrix} = C_{23} P(\omega, t) \begin{pmatrix} V_{d,ref}^p \\ V_{q,ref} \end{pmatrix} + C_{23} P(-\omega, t) \begin{pmatrix} V_{d,ref}^n \\ V_{q,ref}^n \end{pmatrix} \quad (2.13)$$

$$P(\omega, t) = \begin{pmatrix} \cos \omega t & -\sin \omega t \\ \sin \omega t & \cos \omega t \end{pmatrix}$$

C_{23} représente la transformation inverse de Concordia.

En présence de composantes harmoniques, cette méthode devient complexe, car elle exige l'utilisation des transformations directes et inverses de Park pour chaque fréquence, ainsi que de filtrer les signaux à une fréquence différente de celle de la transformation de Park. Il convient de noter que ces techniques exigent une compréhension détaillée de la tension du réseau et pourraient conduire à une surdimensionnement du filtre actif en série, si l'on ne tient pas compte de la conservation de l'angle de la composante directe de tension lors de l'ajustement de la tension à la charge.

II.3.3 Méthode basée sur le calcul des composantes symétriques

Cette technique découle du calcul des éléments symétriques de la tension du réseau électrique [40][41][45][48]. L'équation ci-dessous donne les tensions d'un réseau électrique configuré en triangle. :

$$[V_{abc}] = [V_{ab} \quad V_{bc} \quad V_{ca}]^T \quad (2.14)$$

Ces tensions peuvent être divisées en trois types : les séquences positives (V_p), connues sous le nom de directes, les négatives (V_n), appelées inverses, et les homopolaires (V_0), conformément à l'équation (2.15):

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_p \\ V_n \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

$$\alpha = e^{j120}$$

Comme le réseau à l'étude comprend trois fils, les composantes homopolaires V_0 se retrouvent nulles. Pour identifier la composante négative, il faut d'abord définir le premier paramètre de compensation. L'élément négatif U_n , aussi désigné comme taux inverse, se réfère au rapport entre les composantes négatives et positives de la tension.:

$$U_n = \frac{V_n}{V_p} \quad (2.16)$$

Pour déterminer la composante positive requise pour contrôler la tension de la charge à protéger, il est nécessaire de déterminer le deuxième paramètre de compensation.

On appelle facteur d'amplitude M_p le ratio entre la composante positive et la tension de référence V_{d-des} :

$$M_p = \frac{V_p}{V_{d,des}} \quad (2.17)$$

Les tensions composites requises pour équilibrer les tensions négatives sont:

$$\begin{aligned} [U_c] &= -V_n \cdot [T_n] \\ [T_n] &= [1 \quad \alpha \quad \alpha^2]^T \end{aligned} \quad (2.18)$$

En substituant les valeurs de V_n et V_p des équations (2.16) et (2.17) dans l'expression (2.18), on obtient:

$$[U_c] = -U_n \cdot M_p [T_n] \quad (2.19)$$

Les tensions négatives simples ($V_{n1,2,3}$) peuvent être obtenues par l'équation suivante :

$$[V_{n1,2,3}] = \frac{U_c}{1-\alpha} = -U_n \cdot M_p \cdot \frac{[T_n]}{1-\alpha} \quad (2.20)$$

On obtient les tensions composées nécessaires pour réguler la tension de la charge afin d'atteindre une amplitude V_{d-des} (tensions de référence) par :

$$\begin{aligned} [M_c] &= -V_p [T_p] \\ [T_p] &= V_p [1 \quad \alpha^2 \quad \alpha]^T \end{aligned} \quad (2.21)$$

En reportant la relation (II.17) dans (II.21), on trouve :

$$[M_c] = (1 - M_p) [T_p] \quad (2.22)$$

Les tensions positives simples $V_{p1,2,3}$ peuvent être obtenues par l'équation suivante :

$$[V_{p1,2,3}] = \frac{M_p}{1-\alpha^2} = \frac{(1-M_p)}{1-\alpha^2} \cdot [T_p] \quad (2.23)$$

A partir des équations (II.20) et (II.23), on obtient les tensions nécessaires pour réguler et compenser le déséquilibre de tension de la charge à protéger :

$$\begin{aligned} [V_{ref1,2,3}] &= [V_{n1,2,3}] + [V_{p1,2,3}] \\ [V_{ref1,2,3}] &= \frac{[T_p]}{1-\alpha^2} - M_p \left(\frac{[T_p]}{1-\alpha^2} + U_n \frac{[T_n]}{1-\alpha} \right) \end{aligned} \quad (2.24)$$

La compensation des composantes inverses et directes d'une tension déséquilibrée est possible grâce à cette méthode, mais elle ne permet pas la compensation de la composante homopolaire ni des harmoniques [37][42].

II.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'idée du filtre actif en série comme moyen de minimiser les perturbations telles que les harmoniques. Nous avons également discuté en profondeur des aspects liés à la puissance et au contrôle. L'onduleur de tension à deux niveaux, le filtre de sortie, le dispositif de stockage et le transformateur d'injection et protection ont été introduits successivement, ainsi que les méthodes de commande liées à la puissance. Dans le prochain chapitre, nous examinerons le filtre actif en parallèle.

**Chapitre III:
Filtre Actif Parallèle**

III.1 Introduction

L'emploi croissant du filtrage actif comme technique de neutralisation des harmoniques vise à concevoir des systèmes de dépollution entre les réseaux électriques et les dispositifs polluants. L'efficacité économique des filtres actifs est primordiale pour le fournisseur d'énergie, étant donné qu'il est confronté à des pertes substantielles dans les transformateurs et les lignes électriques, ainsi qu'à l'interaction entre la source d'énergie et les charges. L'interaction entre les charges et la pollution harmonieuse engendrent aussi des complications pour l'industrie et les récepteurs, conduisant à une baisse de productivité. L'utilisation efficace d'un filtre actif parallèle dépend fortement des choix relatifs aux méthodes de contrôle appliquées. Afin de surveiller les variations du courant de référence et d'atteindre un niveau de filtrage satisfaisant [46][47].

Ce chapitre offre une présentation globale des différentes composantes du filtre actif parallèle.

III.2 Structure du Filtre Actif Parallèle

La Figure 3.1 présente la structure générale d'un FAP triphasé, soulignant qu'il est composé de deux éléments : le composant puissance et le composant contrôle commande.

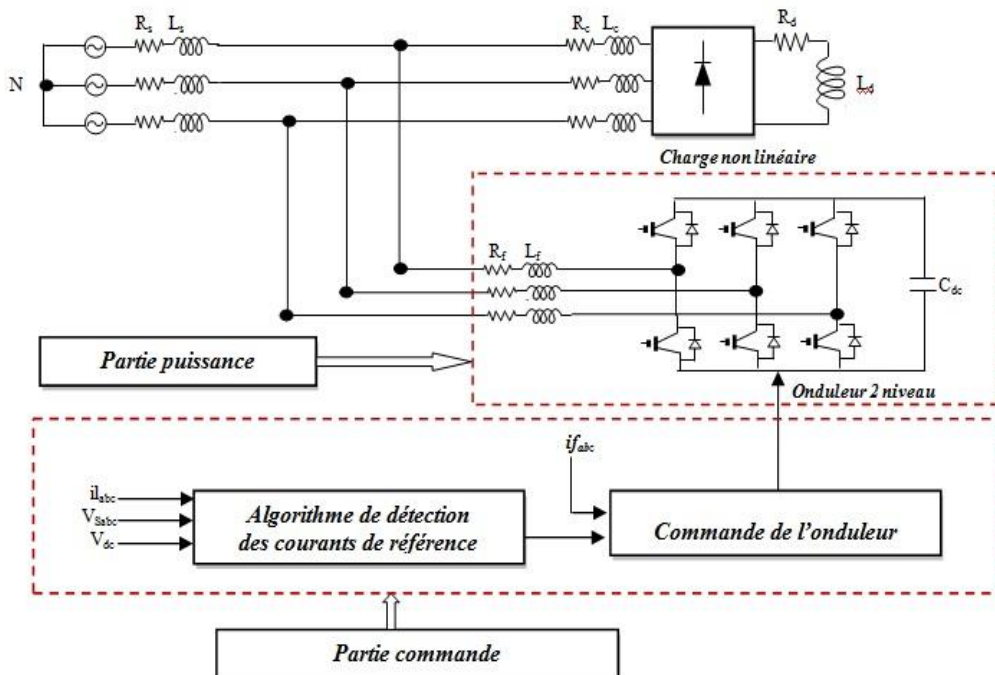


Figure 3.1: structure d'un filtre actif parallèle.

La partie puissance est généralement composée d'un onduleur de tension à deux niveaux avec une diode antiparallèle, d'un circuit de stockage d'énergie, généralement capacitif, et d'un filtre à la sortie de l'onduleur. Pour la partie de commande il se divise en deux étapes : la

première consiste à identifier les harmoniques de référence, tandis que la seconde effectue la régulation du bus de tension continue [46].

III.2.1 Etudes de la partie puissance

III.2.1.1 Modélisation de l'onduleur de tension deux niveaux

Concernant la configuration de tension (Figure 3.2), les interrupteurs sont monodirectionnels en ce qui concerne la tension, mais doivent être capables de réversibilité pour le courant. Afin d'y parvenir, il est nécessaire que les composants semi-conducteurs de l'onduleur soient connectés en parallèle avec des diodes. Les semi-conducteurs sont mis sous tension et hors tension pour pouvoir les contrôler [47].

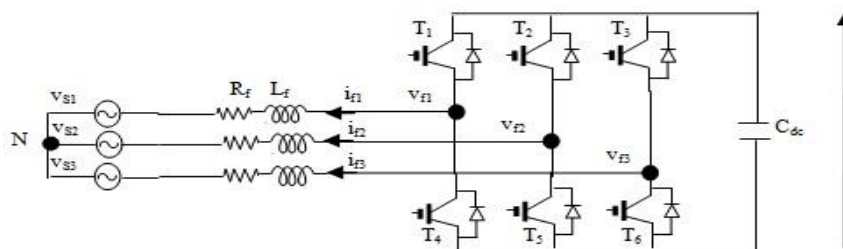


Figure 3.2: Composition de l'onduleur de tension deux niveaux

Cette configuration empêche la fermeture conjointe des semi-conducteurs d'un même bras par crainte d'engendrer un court-circuit sur le condensateur. Toutefois, dans certaines circonstances, tous les deux peuvent demeurer non fermés (temps mort). Ainsi, l'activation d'une des diodes sur le même bras assure la continuité des flux. En pratique, on fait appel aux deux semi-conducteurs d'un même bras de façon complémentaire : l'activation de l'un conduit à la désactivation de l'autre. L'état des commutateurs équivalents n'est pas influencé par la direction des courants. Ils sont uniquement sous la supervision de la commande. L'état où tous les semi-conducteurs d'un bras donné sont totalement ouverts n'est atteint que lors des transitions afin d'éviter les courts-circuits. L'action d'ouvrir et de fermer les commutateurs de l'onduleur illustré dans la Figure 3.2 est conditionnée par l'état des signaux de contrôle (S_1 , S_2 , S_3), tel que défini par :

$$S_1 = \begin{cases} 1 & T_1 \text{ fermé} & T_4 \text{ ouvert} \\ 0 & T_1 \text{ ouvert} & T_4 \text{ fermé} \end{cases}$$

$$S_2 = \begin{cases} 1 & T_2 \text{ fermé} & T_5 \text{ ouvert} \\ 0 & T_2 \text{ ouvert} & T_5 \text{ fermé} \end{cases}$$

$$S_3 = \begin{cases} 1 & T_3 \text{ fermé} & T_6 \text{ ouvert} \\ 0 & T_3 \text{ ouvert} & T_6 \text{ fermé} \end{cases}$$

Les tensions de ligne, imposées par l'onduleur, sont alors définies par :

$$\begin{bmatrix} v_{f1} - v_{f2} \\ v_{f2} - v_{f3} \\ v_{f3} - v_{f1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_1 - S_2 \\ S_2 - S_3 \\ S_3 - S_1 \end{bmatrix} v_{dc} \quad (3.1)$$

Les tensions de sortie de l'onduleur, indiquées par v_{fx} ; où ($x = \{1, 2, 3\}$), sont référencées vis-à-vis du neutre du réseau et respectent l'équation suivante:

$$v_{fx} = v_{sx} + L_f \frac{di_{fx}}{dt} + R_f i_{fx} \quad (3.2)$$

Dans l'hypothèse que les tensions du réseau sont en équilibre et que la somme des courants générés par l'onduleur est égale à zéro, on peut exprimer:

$$\begin{cases} v_{s1} + v_{s2} + v_{s3} = 0 \\ i_{f1} + i_{f2} + i_{f3} = 0 \end{cases} \quad (3.3)$$

Il est donc possible à partir des équations (3.2) et (3.3) de déduire la relation suivante.:

$$v_{f1} + v_{f2} + v_{f3} = 0 \quad (3.4)$$

Nous tirons de l'équation (3.1) et (3.4), nous obtenons:

$$\begin{bmatrix} v_{f1} \\ v_{f2} \\ v_{f3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2S_1 & -S_2 & -S_3 \\ -S_1 & 2S_2 & -S_3 \\ -S_1 & -S_2 & 2S_3 \end{bmatrix} \frac{v_{dc}}{3} \quad (3.5)$$

Étant donné que les grandeurs S_1 , S_2 et S_3 peuvent chacune avoir deux valeurs (0 ou 1), on obtient ainsi huit actions possibles, comme le montre le tableau 3.1

État	S_1	S_2	S_3	v_{f1}	v_{f2}	v_{f3}
0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	$2v_{dc}/3$	$-v_{dc}/3$	$-v_{dc}/3$
2	0	1	0	$-v_{dc}/3$	$2v_{dc}/3$	$-v_{dc}/3$
3	1	1	0	$v_{dc}/3$	$v_{dc}/3$	$-2v_{dc}/3$
4	0	0	1	$-v_{dc}/3$	$-v_{dc}/3$	$2v_{dc}/3$
5	1	0	1	$v_{dc}/3$	$-2v_{dc}/3$	$v_{dc}/3$
6	0	1	1	$-2v_{dc}/3$	$v_{dc}/3$	$v_{dc}/3$
7	1	1	1	0	0	0

Tableau 3.1: valeur de tensions produites par l'onduleur de tension deux niveaux.

III.2.1.2 Dispositif de stockage d'énergie

On stocke souvent l'énergie en continu en utilisant un système de stockage basé sur des éléments capacitif, illustré par un condensateur C_{dc} qui agit en tant que source de tension continue V_{dc} . La sélection des paramètres du système de stockage (V_{dc} et C_{dc}) influence la

dynamique ainsi que la performance de compensation du filtre actif parallèle. Effectivement, une tension V_{dc} haute favorise un meilleur comportement du filtre actif. De plus, les variations de la tension continue V_{dc} , causées par les courants générés par le filtre actif et limitées par le choix de C_{dc} , peuvent affecter l'efficacité de la compensation du filtre actif en parallèle. Les dits variations sont d'une importance notable compte tenu de l'ampleur élevée du courant du filtre et de sa fréquence relativement basse [48].

III.2.1.3 Filtre de sortie

Le rôle du filtre de sortie est d'assurer la liaison entre le réseau électrique et l'onduleur de tension. La dimension de ce filtre doit tenir compte des deux éléments cruciaux suivants :

- Il est primordial que le filtre actif assure une réduction suffisante des rebonds générés par la commutation des semi-conducteurs de l'onduleur.
- Il est nécessaire de maintenir les performances du filtre actif, telles que définies par:

$$\frac{di_f}{dt} = \frac{di_{ref}}{dt} \quad (3.6)$$

Dans la plupart des travaux de recherche, on utilise un filtre de sortie du premier ordre, qui se compose d'une inductance L_f et d'une résistance interne R_f . En se conformant à l'équation (3.6), un faible niveau de L_f favorise l'obtention d'une dynamique idéale du FAP [49][50].

III.2.2 Etude de la partie commande

L'étape de contrôle commande inclut une phase initiale consacrée à la détection des harmoniques, dont l'efficacité du filtrage dépend largement de la méthode d'identification des harmoniques de référence.

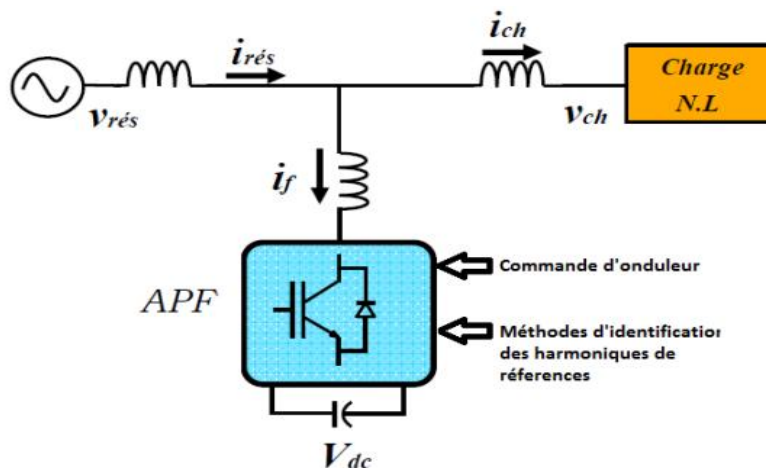


Figure 3.3: Commande du FAP

Cette étape est suivie d'une seconde phase qui s'occupe de la régulation de la tension continue. La commande de l'onduleur est générée lors de la troisième et dernière étape [51].

Le contrôle du filtre actif parallèle dépend de la spécificité de l'onduleur qui produit le courant destiné au réseau, ainsi que de la méthode choisie pour le contrôler.

III.2.2.1 Commande en pleine onde

La méthode d'opération sans aucun doute la plus évidente et simple, qui consiste à utiliser « exclusivement » les deux niveaux de tension disponibles par bras pour produire un système de tensions alternatives « rectangulaires » en sortie de l'inverseur, est la commande en onde pleine. On peut se référer à la figure 3.4 pour visualiser les formes d'onde obtenues. Donc, chaque cellule de commutation n'effectue que deux changements de niveau par cycle du signal fondamental [52].

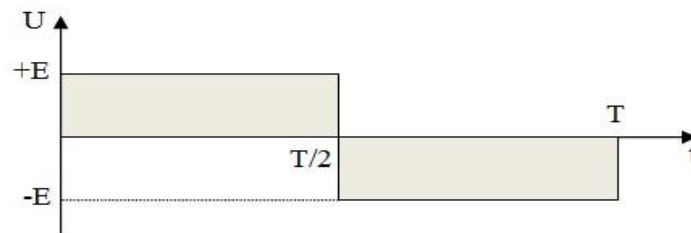


Figure 3.4: Commande en pleine onde

T_1 est commandé entre 0 et π , non commandé entre π et 2π .

Les commandes de T_2 et T_3 sont respectivement décalées de $2\pi/3$ et $4\pi/3$ en arrière.

Les commandes de T_4 ; T_5 et T_6 : sont respectivement complémentaires de celles de T_1 ; T_2 ; T_3 .

III.2.2.2 Commande par hystérésis

La commande par hystérésis, également appelée commande binaire, est un type de contrôle non linéaire basé sur la différence entre le courant de référence et le courant produit par l'onduleur. On compare l'erreur à un modèle connu sous le nom de bande d'hystérésis. Lorsque l'erreur atteint la limite inférieure ou supérieure, un ordre de contrôle est émis pour maintenir la situation à l'intérieur de cette bande. Cette méthode présente l'avantage principal de sa simplicité d'application, comme le démontre la Figure 3.5[53].

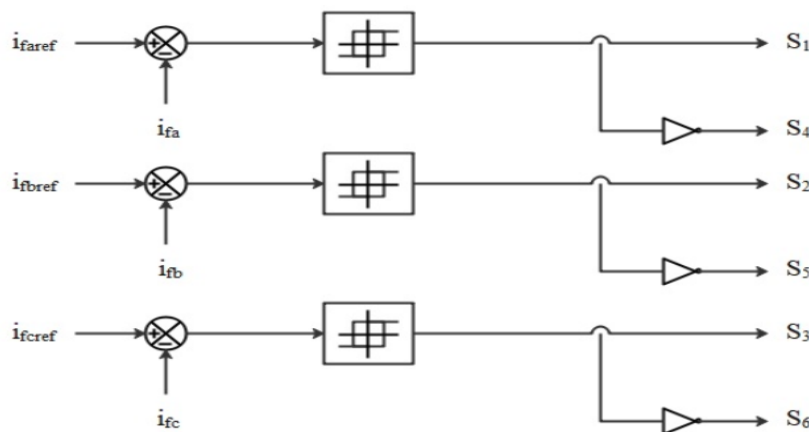


Figure 3.5: Principe de commande par hystérésis

Toutefois, la taille de cette commande est déterminée en établissant la largeur de la bande. En application, on estime généralement une valeur proche de 5% de la tension nominale. Durant une étape de découpage, les tensions transitoires générées par l'onduleur produisent des variations de tension triangulaire qui seront utilisées pour la commutation autonome de l'onduleur via une chaîne d'hystérésis, remplaçant ainsi le modulateur, comme démontré dans la Figure 3.6.

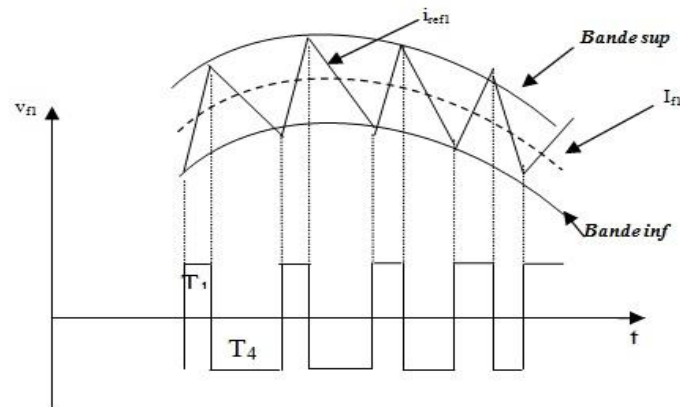


Figure 3.6: Commande des interrupteurs par hystérésis.

Le mécanisme d'hystérésis intégré permet de repérer aisément l'erreur de tension maximale, ce qui requiert l'emploi d'un contrôle triphasé offrant le changement souhaité de la tension de phase associée [47].

III.2.2.3 Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI)

La figure 3.7 illustre le concept de contrôle via MLI. En effet, ce contrôle offre, tout comme la commande d'hystérésis modulée, la possibilité de générer une différence entre le courant de référence i_{refl} et le courant réel i_{fl} . Par la suite, cette erreur sera intégrée dans l'entrée d'un régulateur.

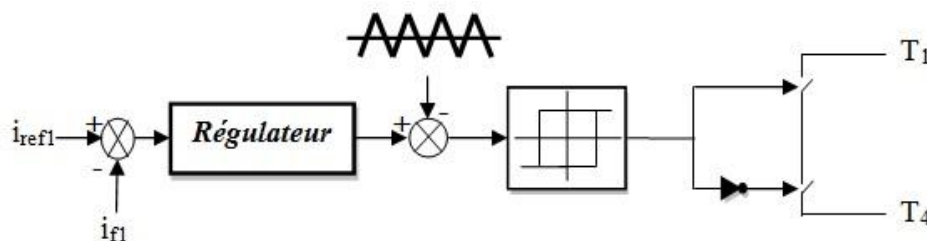


Figure 3.7: Fondement de commande des courants par MLI

La portée de référence à établir est connue sous le nom de modulante et son amplitude crête à crête ne doit pas dépasser la tension continue V_{dc} . La plupart du temps, la porteuse est un signal triangulaire dont la période correspond à celle de la commutation, et qui possède une amplitude crête à crête équivalente à V_{dc} . Pour des raisons de simplicité, nous pouvons

également supposer que la porteuse et la modulante sont des signaux unitaires par rapport à V_{dc} . On établit le signal de référence en calculant la moyenne sur la durée de commutation et en reconnaissant les actions d'allumage ou d'extinction des interrupteurs par la comparaison entre le signal modulant et le signal porteur, Figure 3.8. Par conséquent, plus l'amplitude instantanée du signal modulant est importante, plus la durée de l'impulsion sera grande : le faisceau d'impulsions représente une « section » du signal modulant à la fréquence élevée de la porteuse, également appelée fréquence de commutation [54].

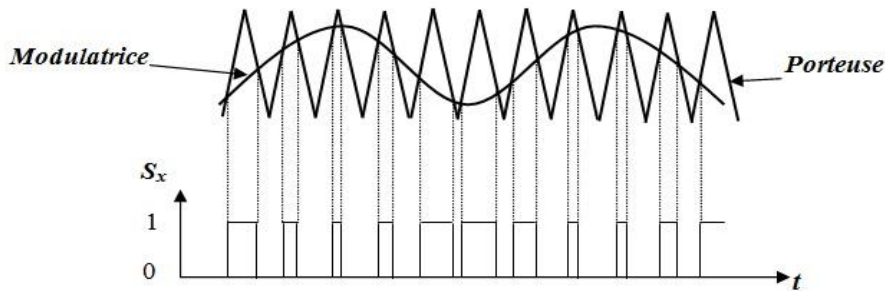


Figure 3.8 : Contrôle des commutateurs par MLI naturelle.

III.2.2.4 Commande par MLI vectorielle

D'après la figure 3.9, cette approche de contrôle divise le plan α - β des courants et tensions en six zones, en présentant un décalage de 30° entre courant et tension.

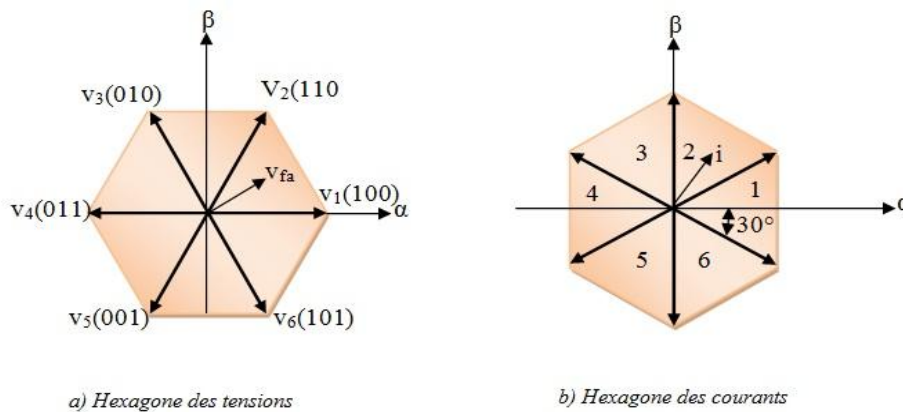


Figure 3.9: Quadrants de tensions et courants identifiés dans le plan α - β .

L'hexagone de tension de la Figure. 3.9, est la représentation vectorielle des vecteurs non nuls \vec{V}_1 à \vec{V}_6 (\vec{V}_0 et \vec{V}_7 étant les vecteurs nuls correspondant aux états 000 et 111 respectivement).

Par la suite, l'algorithme de contrôle doit déterminer la zone, au sein des six zones de l'hexagone de courant où se trouve l'erreur de courant Δi , puis choisir le vecteur de tension de

sortie du filtre actif V_{FA} qui appartient à l'hexagone de tension. Ceci a pour objectif d'obliger l'erreur Δi à changer dans la direction inverse, afin de conserver le courant de sortie proche de sa valeur cible [55].

III.2.3 Réglage de la tension de bus continue.

Une source de tension continue est essentielle pour produire des tensions alternées à la sortie de l'inverseur, en servant de source d'alimentation. Les variations de la source continue, représentée par un condensateur dans le système de stockage capacitif, sont dues aux pertes survenant lors de la conduction et de l'actionnement des commutateurs du convertisseur, du filtre en sortie ainsi qu'à l'adaptation de la charge connectée au bus continu [56].

L'objectif principal de la régulation du bus continu est de maintenir la charge du condensateur en compensant les pertes résultant des commutateurs de puissance effectuant des changements, d'où la naissance de l'effet Joule qui peut détériorer les courants d'injection tout en entraînant une variation de l'énergie emmagasinée dans le condensateur [57].

III.2.4 Technique de la Régulation

Il faut maintenir la stabilité de la tension du bus continu en contrôlant le cycle de charge et de décharge du condensateur. Cela s'effectue en apportant de l'énergie active provenant du réseau électrique. Ce contrôle se caractérise par une lenteur comparée à celle du contrôle des harmoniques, ce qui nous permet occasionnellement de considérer une source de bus continu idéale pour la gestion des harmoniques. Afin de maîtriser cette tension, nous faisons fréquemment appel à un régulateur du type PI [58].

Le concept de cette régulation est présenté dans la figure 3.10. Le régulateur PI génère le courant de référence additionnel I_{loss} comme suit :

$$I_{loss} = k_p (V_{dc}^* - V_{dc}) + k_i \int (V_{dc}^* - V_{dc}) dt \quad (3.7)$$

On utilise k_p et k_i comme les paramètres du régulateur PI. Ils sont établis sur la base de l'analyse de la fonction de transfert en boucle fermée représentée dans la figure 3.10.

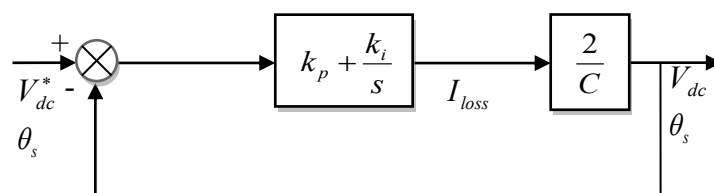


Figure 3.10: Boucle de réglage de tension continu V_{dc} .

On détermine la fonction de transfert à travers l'équation:

$$\frac{V_{dc}}{V_{dc}^*} = \frac{2\xi\omega_c s + \omega_c^2}{s^2 + 2\xi\omega_c s + \omega_c^2} \quad (3.8)$$

Le coefficient d'amortissement ζ et la fréquence de coupure ω_c sont décrits par :

$$\begin{cases} \omega_c = \sqrt{\frac{2k_i}{C}} \\ \xi = k_p \sqrt{\frac{1}{2k_i C}} \end{cases} \quad (3.9)$$

III.2.5 Dimensionnement des éléments du filtre actif parallèle

III.2.5.1 Dimensionnement du condensateur

Des perturbations de la tension continue du bus se produisent aux bornes du condensateur suite à des variations abruptes de la puissance instantanée consommée par la charge. On peut maîtriser ces fluctuations perturbatrices en optant judicieusement pour la valeur du condensateur [59]. La tension de surtension maximale que le condensateur peut supporter est indiquée par :

$$V_{dc,max} = \frac{1}{C} \cdot \int_{\theta_1}^{\theta_2} i_{dc}(t) dt + v_{dc} \quad (3.10)$$

Avec:

θ_1, θ_2 : Angles présents dans l'intervalle $[0, 2\pi]$.

On peut définir la capacité du condensateur C par l'équation. :

$$C = \frac{1}{\Delta V_{dc}} \cdot \int_{\theta_1}^{\theta_2} i_{dc}(t) dt \quad (3.11)$$

La valeur moyenne du courant i_{dc} consommé par le condensateur est indiquée par:

$$\int_{\theta_1}^{\theta_2} i_{dc}(t) dt = I_{FAm} \int_{\theta_1}^{\theta_2} [\sin(\omega t) + \sin(\omega t + 2\pi/3)] dt \quad (3.12)$$

I_{FAm} représente l'amplitude maximale du courant i_f , et les variations de la tension du bus continu ΔV_{dc} correspondent à 5 % de V_{dc} .

III.2.5.2 Planification du filtre de sortie

Pour atténuer les harmoniques de haute fréquence générées par les commutations de l'onduleur, un filtre passif à inductance L_f est intégré en sortie du filtre actif. L'évaluation de L_f est effectuée en prenant en compte la contrainte que pour une fréquence de commutation spécifique, la pente du courant i_f est inférieure à celle d'une porteuse triangulaire qui définit cette fréquence [60]. On définit la pente de la porteuse triangulaire par :

$$\alpha = 4 \cdot \varepsilon \cdot f_c \quad (3.13)$$

D'où: ε représente l'amplitude de l'onde triangulaire, tandis que f_c correspond à la fréquence de basculement des commutateurs du filtre actif.

La pente maximale de i_f , dans le cas d'un filtre actif à point milieu, est donnée par:

$$\frac{di_f}{dt} = \frac{0,5 \cdot V_{dc} + V_{sm}}{L_f} \quad (3.14)$$

D'où une valeur de L_f estimée à:

$$L_f = \frac{0,5 \cdot V_{dc} + V_{sm}}{4 \cdot \varepsilon \cdot f_c} \quad (3.15)$$

III. 3 Techniques d'identification des harmoniques

L'efficacité du filtre actif parallèle dépend des semi-conducteurs de puissance utilisés dans la conception de l'onduleur, ainsi que de la technique de contrôle sélectionnée pour la compensation des harmoniques du courant. Les méthodes de commande pour les filtres actifs peuvent être catégorisées comme des stratégies de contrôle dans les domaines temporel et fréquentiel. Les techniques en domaine fréquentiel se basent sur l'analyse de Fourier (comme la transformée discrète, la transformée rapide, la transformée discrète récursive, etc.) pour détecter les harmoniques du courant. Ces techniques conviennent parfaitement aux charges dont le contenu harmonique change progressivement. De plus, elles offrent l'avantage de détecter les harmoniques une par une : ce qui facilite donc une compensation ciblée. Cependant, les principaux inconvénients de ces techniques incluent des performances moyennes en phase temporaire et un volume significatif pour déterminer la mémoire requis [61]. Dans le domaine temporel, les techniques de contrôle reposent sur l'évaluation immédiate des signaux harmoniques de référence par rapport aux signaux harmoniques effectifs. Le but est de maintenir une concordance précise entre le courant ou la tension instantanée de référence et le signal réel, avec une marge d'erreur acceptable. Sans doute, le défi majeur de cette méthode consiste à supprimer l'élément fondamental afin de produire des signaux harmoniques de référence [49]. Sans conteste, la méthode des puissances instantanées est l'une des stratégies les plus éprouvées qui soient. On utilise également d'autres techniques comme la théorie de la référence synchrone (dq), ainsi que la théorie des puissances instantanées dans le référentiel (pqr).

III.3.1 Théorie de la puissance instantanée (pq)

Akagi et ses collègues ont présenté en 1983 «La théorie généralisée de la puissance réactive instantanée dans les circuits triphasés», également appelée théorie (pq). Ses valeurs instantanées sont utilisées dans les systèmes d'alimentation triphasés, qu'ils soient neutres ou

non, et elle s'applique aussi bien aux opérations en régime permanent qu'aux opérations transitoires [62].

L'application de la théorie (pq) consiste à transformer un système coordonnées (abc) en un système de coordonnées (α, β). C'est une transformation algébrique, connue sous le nom de transformation de Clark, qui engendre aussi un cadre de référence fixe où les coordonnées (α, β) demeurent orthogonales [63].

La conversion est effectuée à partir de la relation suivante:

$$\begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

En appliquant cette relation au courant de charge et à la tension de la source, on obtient:

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{la} \\ i_{lb} \\ i_{lc} \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

En ce qui concerne la puissance active et réactive dans le plan α - β , il sera:

$$\begin{cases} p = v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta \\ q = v_\alpha i_\beta - v_\beta i_\alpha \end{cases} \quad (3.19)$$

En substituant les tensions et courants biphasés par leurs équivalents triphasés, on obtient:

$$\begin{cases} p = v_{sa} i_{la} + v_{sb} i_{lb} + v_{sc} i_{lc} \\ q = -\frac{1}{\sqrt{3}} [(v_{sa} - v_{sb}) i_{lc} + (v_{sb} - v_{sc}) i_{la} + (v_{sc} - v_{sa}) i_{lb}] \end{cases} \quad (3.20)$$

On pose:

$$\Delta = v_\alpha^2 + v_\beta^2 \quad (3.21)$$

Et à partir de l'expression (3.19) on a:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

Dans le cas où les tensions sont sinusoïdales et alimentent une charge non linéaire, les puissances instantanées p et q ont pour expression:

$$\begin{cases} p = \bar{p} + \tilde{p} \\ q = \bar{q} + \tilde{q} \end{cases} \quad (3.23)$$

Où

- ✚ \bar{p}, \bar{q} : Puissance continue liée à la composante fondamentale active et réactive du courant.
- ✚ \tilde{p}, \tilde{q} : Puissance alternative liées à la somme des composantes harmoniques du courant.
- ✚ Pour l'extraction de puissance alternative on utilise la méthode de filtrage illustré sur la Figure 3.11.

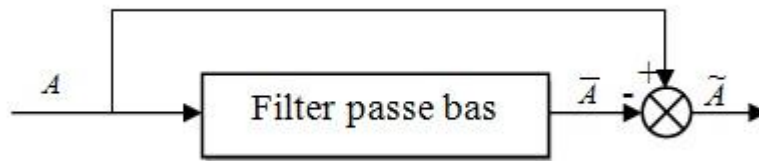


Figure 3.11: Technique d'extraction des composantes alternatives de p et q.

En substituant (3.23) dans (3.22), on obtient:

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{p} \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{q} \end{bmatrix} + \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

Ainsi, la relation déterminera le courant harmonique est:

$$\begin{bmatrix} \tilde{i}_a \\ \tilde{i}_b \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

Si l'on utilise la transformation inverse de Clark (Figure 3.12), on obtient:

$$\begin{bmatrix} i_a^* \\ i_b^* \\ i_c^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{i}_a \\ \tilde{i}_b \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

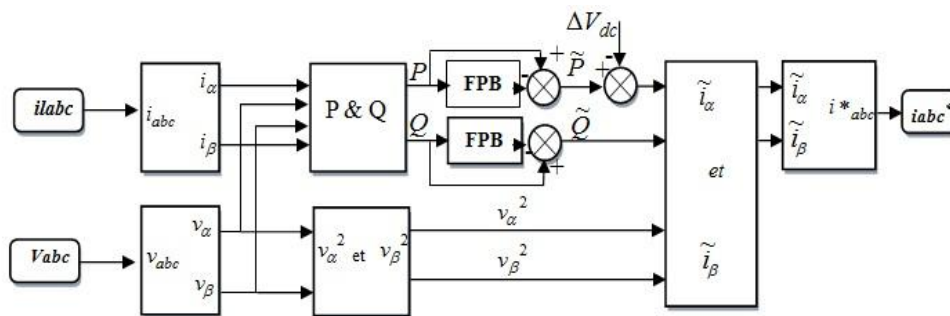


Figure 3.12: Principe de la méthode (pq)

III.3.2 Théorie du référentiel synchrone (dq)

Nous utilisons la transformation de Park pour convertir le courant en un cadre tournant. Par conséquent, les courants incluent une part constante associée au signal principal et une part différée reliée aux harmoniques. On peut différencier ces deux composants en utilisant un filtre passe-haut ou un filtre passe-bas (Figure 3.15)[64][65].

Pour définir les courants de référence d'un filtre actif parallèle, on distingue cinq phases [66]:

- 1) **la 1^{ère} phase:** Convertir les courants de charge triphasés (i_{1a} , i_{1b} , i_{1c}) à ($i_{1\alpha}$, $i_{1\beta}$, i_{10}) en utilisant l'équation (3.27):

$$\begin{bmatrix} i_{1\alpha} \\ i_{1\beta} \\ i_{10} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{1a} \\ i_{1b} \\ i_{1c} \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

- 2) **la 2^e phase:** Modifier les courants $i_{1\alpha}$ et $i_{1\beta}$ à i_{1d} et i_{1q} par:

$$\begin{bmatrix} i_{1d} \\ i_{1q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \sin(\omega t) \\ -\sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{1\alpha} \\ i_{1\beta} \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

Avec ω représente la pulsation électrique.

La figure 3.13 illustre le modèle vectoriel de transition du système de coordonnées (abc) vers le système de coordonnées (dq)..

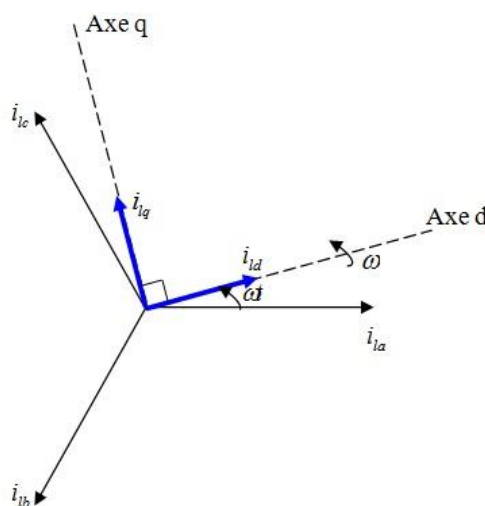


Figure 3.13 : forme vectorielle de transition de le coordonnées abc vers le de coordonnées dq.

On peut décomposer les courants i_{1d} et i_{1q} en deux termes, les composantes fondamentales et harmoniques. Les harmoniques se comportent comme une composante alternative et les termes fondamentaux se comportent comme une composante continue, donc on peut écrire :

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{ld} \\ \dot{i}_{lq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{i}_{ld} + \tilde{i}_{ld} \\ \bar{i}_{lq} + \tilde{i}_{lq} \end{bmatrix} \tag{3.29}$$

Avec :

- ✚ $\bar{i}_{ld}, \bar{i}_{lq}$: Composante continue (fondamentale) dans le repère dq.
- ✚ $\tilde{i}_{ld}, \tilde{i}_{lq}$: Composante alternative (harmonique) dans le repère dq.

- 3) **La 3^e phase** : Il est démontré dans la deuxième phase que les courants de charge se composent de deux éléments. Pour cette phase, on emploie un filtre passe-bas (FPB) pour distinguer les éléments harmoniques, comme l'illustre la figure 3.14
- 4) **La 4^e phase** : Pour effectuer la transformation des composantes harmoniques ($\tilde{i}_{ld}, \tilde{i}_{lq}$) du système de coordonnées dq vers le système de coordonnées $\alpha\beta$ ($\tilde{i}_{l\alpha}, \tilde{i}_{l\beta}$) en applique l'équation suivant :

$$\begin{bmatrix} \tilde{i}_{l\alpha} \\ \tilde{i}_{l\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & -\sin(\omega t) \\ \sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{i}_{ld} \\ \tilde{i}_{lq} \end{bmatrix} \tag{3.30}$$

- 5) **La 5^e phase** : en se basant sur l'équation (3.31) on peut calculé les courants de référence triphasés (i_a^*, i_b^*, i_c^*):

$$\begin{bmatrix} i_a^* \\ i_b^* \\ i_c^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{i}_{l\alpha} \\ \tilde{i}_{l\beta} \\ \tilde{i}_{l0} \end{bmatrix} \tag{3.31}$$

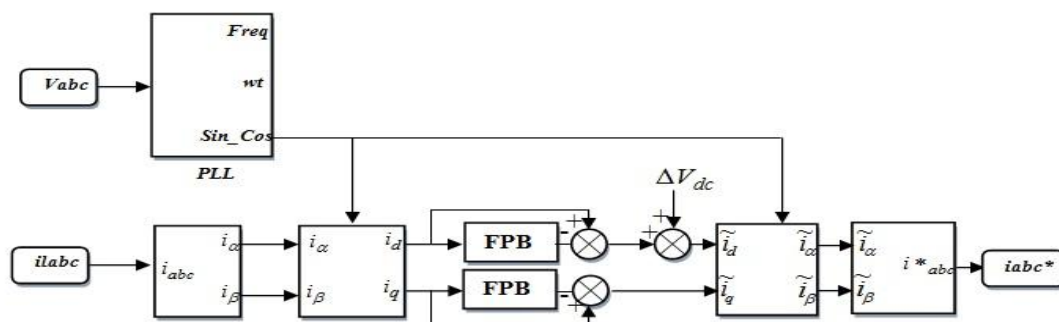


Figure 3.14: Fondement de la méthode (dq)

Pour transmettre une puissance régulée, l'inverseur doit constamment être en phase avec le réseau. L'objectif du bloc de synchronisation est de capter la phase de la tension instantanée du réseau. Diverses méthodes sont employées, la plus répandue étant l'utilisation d'une boucle de verrouillage de phase (PLL : Phase Locked Loop) [67].

III.3.3 Théorie des puissances instantanées dans le référentiel (pqr)

La théorie en question a été présentée par H. Kim et al, dont le concept n'est pas particulièrement éloigné de la théorie (pq). Sa structure globale est illustrée à la Figure 3.15.

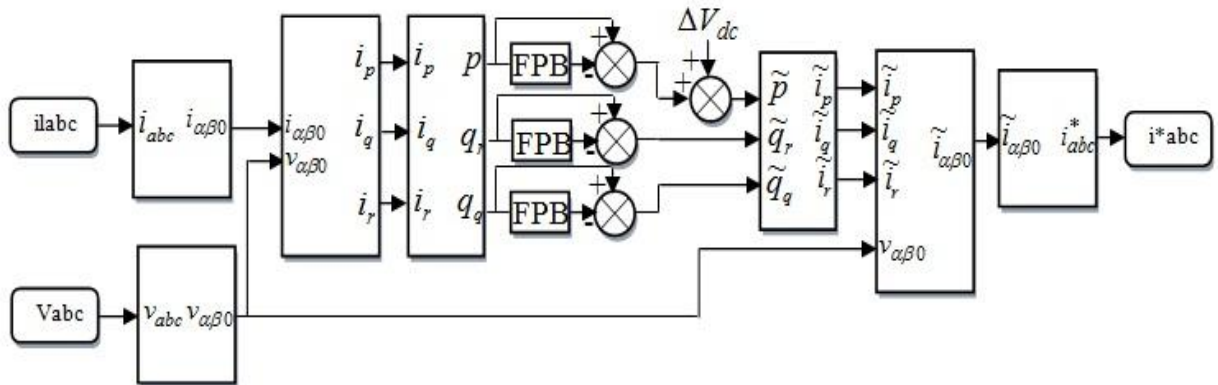


Figure 3.15: Principe de la méthode (pqr)

Selon la théorie, l'espace de référence (pqr) proposé offre la possibilité de présenter les grandeurs électriques et d'identifier les harmoniques à corriger. Le vecteur de tension est positionné sur l'axe p, alors que l'axe q est orthogonal à p et se trouve sur le plan (αβ0). En outre, l'axe r est orthogonal aux axes p et q, comme démontré dans la Figure 3.16 [68].

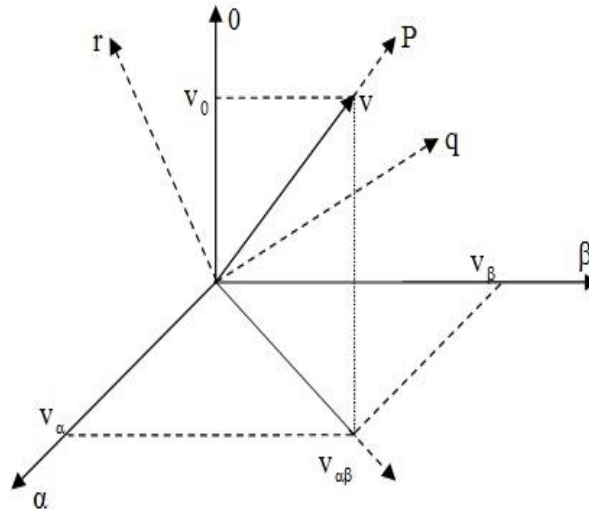


Figure 3.16 : Lien entre le plan (αβ0) et le plan (pqr).

La transition du système de coordonnées abc au système (αβ0) est garantie par l'équation suivante :

$$\begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \\ X_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \tag{3.32}$$

Donc:

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

$$v_{\alpha\beta 0} = \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_0 \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

Par conséquent, le vecteur unitaire sur l'axe p qui suit la même direction que le vecteur de tension est déterminé par l'équation ci-dessous :

$$v_{up} = \frac{1}{v_{\alpha\beta 0}} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_0 \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

Avec :

$$v_{\alpha\beta 0} = \sqrt{v_\alpha^2 + v_\beta^2 + v_0^2} \quad (3.36)$$

Et pour toute vecteur unité v_{uq} sur le plan ($\alpha\beta$) qui est perpendiculaire à v_{up} , est donné par:

$$v_{uq} = \frac{1}{v_{\alpha\beta}} \begin{bmatrix} -v_\beta \\ v_\alpha \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

Avec:

$$v_{\alpha\beta} = \sqrt{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \quad (3.38)$$

Ainsi, si v_{uq} représente le vecteur unitaire sur l'axe q, alors le vecteur unitaire sur l'axe r se définit par:

$$v_{ur} = v_{up} \cdot v_{uq} \quad (3.39)$$

Alors:

$$v_{ur} = \frac{1}{v_{\alpha\beta 0}} \begin{bmatrix} \frac{-v_0 v_\alpha}{v_{\alpha\beta}} \\ \frac{-v_0 v_\beta}{v_{\alpha\beta}} \\ v_{\alpha\beta} \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

Dans ce contexte, il est envisageable de réaliser la projection de l'ensemble des vecteurs sur les vecteurs unitaires v_{up} , v_{uq} et v_{ur} . Dans le système ($\alpha\beta 0$), le vecteur courant est représenté par:

$$\mathbf{i}_{\alpha\beta 0} = \begin{bmatrix} \mathbf{i}_\alpha \\ \mathbf{i}_\beta \\ \mathbf{i}_0 \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

Donc les projections \mathbf{i}_p , \mathbf{i}_q et \mathbf{i}_r est données par:

$$\mathbf{i}_{pqr} = \begin{bmatrix} \mathbf{i}_p \\ \mathbf{i}_q \\ \mathbf{i}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\mathbf{u}_{up} \cdot \mathbf{i}_{\alpha\beta 0}) \mathbf{u}_{up} \\ (\mathbf{u}_{uq} \cdot \mathbf{i}_{\alpha\beta 0}) \mathbf{u}_{uq} \\ (\mathbf{u}_{ur} \cdot \mathbf{i}_{\alpha\beta 0}) \mathbf{u}_{ur} \end{bmatrix} \quad (3.42)$$

On substitue les équations (3.35), (3.37) et (3.40) dans l'équation (3.42) et on obtient:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{i}_p \\ \mathbf{i}_q \\ \mathbf{i}_r \end{bmatrix} = \frac{1}{V_{\alpha\beta 0}} \begin{bmatrix} V_\alpha & V_\beta & V_0 \\ -V_{\alpha\beta 0} V_\beta & V_{\alpha\beta 0} V_\alpha & 0 \\ V_{\alpha\beta} & V_{\alpha\beta} & \\ -\frac{V_0 V_\alpha}{V_{\alpha\beta}} & -\frac{V_0 V_\beta}{V_{\alpha\beta}} & V_{\alpha\beta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_\alpha \\ \mathbf{i}_\beta \\ \mathbf{i}_0 \end{bmatrix} \quad (3.43)$$

Pour la conversion du système de coordonnées (pqr) vers $(\alpha\beta 0)$, elle prendra la forme suivante:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{i}_\alpha \\ \mathbf{i}_\beta \\ \mathbf{i}_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{V_{\alpha\beta 0}} \begin{bmatrix} V_\alpha & \frac{-V_{\alpha\beta 0} V_\beta}{V_{\alpha\beta}} & \frac{-V_0 V_\alpha}{V_{\alpha\beta}} \\ V_\beta & \frac{V_{\alpha\beta 0} V_\alpha}{V_{\alpha\beta}} & \frac{-V_0 V_\beta}{V_{\alpha\beta}} \\ V_0 & 0 & V_{\alpha\beta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_p \\ \mathbf{i}_q \\ \mathbf{i}_r \end{bmatrix} \quad (3.44)$$

Les projections du vecteur tension sur les vecteurs unitaires sont obtenues de manière similaire :

$$\mathbf{v}_{pqr} = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_p \\ \mathbf{v}_q \\ \mathbf{v}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\mathbf{u}_{up} \cdot \mathbf{v}_{\alpha\beta 0}) \mathbf{u}_{up} \\ (\mathbf{u}_{uq} \cdot \mathbf{v}_{\alpha\beta 0}) \mathbf{u}_{uq} \\ (\mathbf{u}_{ur} \cdot \mathbf{v}_{\alpha\beta 0}) \mathbf{u}_{ur} \end{bmatrix} \quad (3.45)$$

donc:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}_p \\ \mathbf{v}_q \\ \mathbf{v}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{\alpha\beta 0} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{v}_\alpha \\ \mathbf{v}_\beta \\ \mathbf{v}_0 \end{bmatrix} \quad (3.46)$$

Les puissances active et réactive dans le référentiel (pqr) sont définies respectivement par :

$$\mathbf{p} = \mathbf{v}_p \cdot \mathbf{i}_p = V_p \mathbf{i}_p \quad (3.47)$$

et

$$\mathbf{q}_{pqr} = v_{pqr} \times \mathbf{i}_{pqr} = \begin{bmatrix} 0 \\ v_p \mathbf{i}_r \\ v_p \mathbf{i}_q \end{bmatrix} \quad (3.48)$$

donc:

$$\begin{bmatrix} p \\ q_r \\ q_q \end{bmatrix} = v_p \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_p \\ i_q \\ i_r \end{bmatrix} \quad (3.49)$$

avec : q_q la puissance réactive sur l'axe q , q_r la puissance réactive sur l'axe r .

Il est également possible d'exprimer les courants en termes de puissances comme suit:

$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_q \\ i_r \end{bmatrix} = \frac{1}{v_p} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q_r \\ q_q \end{bmatrix} \quad (3.50)$$

III.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons détaillé le concept du filtre actif parallèle comme méthode de purification des réseaux électriques des courants perturbateurs tels que le courant harmonique. Nous avons également expliqué en détail la partie puissance et la partie commande. Nous avons successivement exposé l'onduleur de tension à deux niveaux, ainsi que le dispositif de stockage et le filtre de sortie pour la section puissance, et les méthodes de contrôle de l'onduleur pour la section commande. De plus, nous avons présenté trois approches distinctes pour la détection des harmoniques : l'approche des puissances instantanées (pq), le modèle du référentiel synchronisé (dq) et le modèle des puissances instantanées en référentiel (pqr). Ces techniques fournissent directement l'onde harmonique à compenser.

Dans le chapitre suivant, nous examinerons le dispositif de conditionnement de qualité de puissance unifié (UPQC).

**Chapitre IV:
Etude et Simulation d'UPQC**

VI.1 Introduction

De nos jours, les enjeux liés à la qualité de l'alimentation prennent une importance du fait du nombre croissant d'appareils à basse de l'électronique de puissance qui agissent comme des charges non linéaires. Une grande diversité de solutions aux problèmes de qualité de l'électricité est disponible tant pour l'opérateur du réseau de distribution que pour le consommateur. Parmi les solutions proposées figure le conditionneur de qualité d'énergie unifié UPQC.

Dans ce chapitre pour la 1^{er} partie on va examiner le principe de l'UPQC; les différentes configurations et a la fin l'application de l'UPQC sur un système à charge non linéaire puis on va appliquer la compensation sur une réseau à basse d'un source renouvelable.

VI.2 Principe de fonctionnement de l'UPQC

L'UPQC est une combinaison de deux convertisseurs en parallèle et en série qui sont des Filtres de puissance actif, avec un condensateur CC commun (figure 4.1). Le FAP a la capacité d'injecter un courant réactif afin de rectifier le facteur de puissance, d'injecter un courant harmonique pour traiter les harmoniques du courant de charge et d'équilibrer les courants d'alimentation en injectant des composants de séquence négative et zéro en fonction des besoins de la charge. Il a aussi la capacité de réguler la tension du bus CC. Les tensions du bus de charge sont régulées par un FAS qui injecte des tensions de séquence négative et nulle pour compenser celles de la source. Il contrôle également l'amplitude de la tension de charge en injectant les composants de puissance active nécessaires, et minimise les harmoniques dans les tensions de la source en injectant des tensions harmoniques [70].

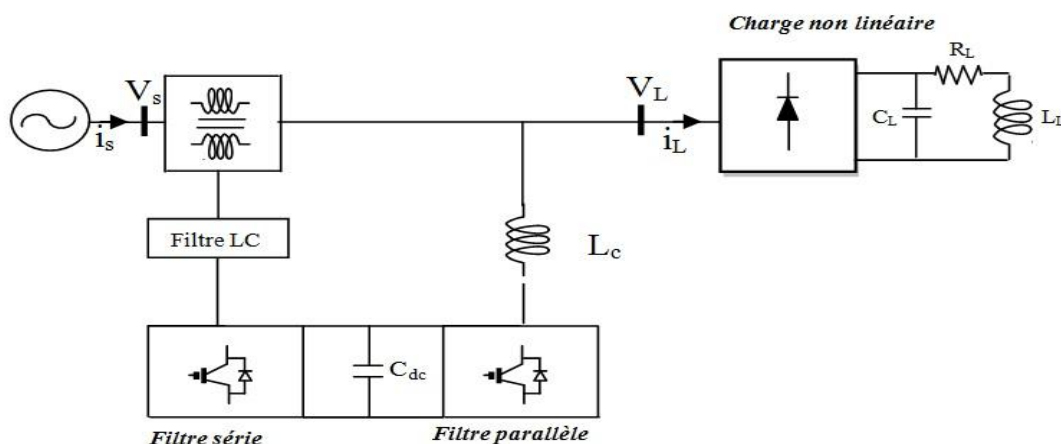


Figure 4.1: conditionneur de qualité d'énergie unifié UPQC.

On peut séparer le système UPQC en deux entités principales : l'unité de contrôle et le circuit de puissance. La détection des perturbations, la production de signaux de référence, la

production de signaux de commande et les mesures de tension/courant sont tous inclus dans l'unité de contrôle. Le circuit de puissance comprend deux convertisseurs de tension provenant des sources, des filtres harmoniques et des transformateurs d'injection.

Les performances des UPQC sont évaluées en fonction du taux de distorsion harmonique (THD) qui doit être conforme à la norme IEEE 519:

Pour les courants :

$$THD\% = \frac{100 \sqrt{\sum_{i=2}^n I_{si}^2}}{I_{s1}} \quad (4.1)$$

Pour les tensions :

$$THD\% = \frac{100 \sqrt{\sum_{v=2}^n V_{sv}^2}}{V_{s1}} \quad (4.2)$$

IV. 3 Configurations de l'UPQC

Les alimentations basse et moyenne tension peuvent utiliser l'UPQC. D'après son système physique, cet UPQC est habituellement classé en trois ensembles tels que mentionnés ci-dessous [71].

- ✓ Classification en fonction du système d'alimentation;
- ✓ Classification en fonction du convertisseur;
- ✓ Classification UPQC en fonction de la configuration.

IV.3.1 Classification en fonction du système d'alimentation

Comme nous le savons, on peut distinguer trois catégories de sources d'alimentation en courant alternatif : monophasé à deux fils, triphasé à trois fils et triphasé à quatre fils. Il est possible de choisir entre des charges de puissance alternative monophasées ou triphasées. Dans le but de diminuer les problèmes de qualité de l'alimentation dans les systèmes monophasés et triphasés mentionnés précédemment, l'UPQC est classé en fonction du système d'alimentation et du système de charge de la manière suivante :

IV.3.1.1 structure UPQC monophasé à deux fils

L'UPQC monophasé à deux fils peut être utilisé pour résoudre les problèmes de qualité de l'énergie dans les systèmes monophasés, en utilisant deux convertisseurs en pont H (Figure 4.2). Le nombre de commutateurs à semi-conducteurs est de huit dans les deux configurations de convertisseurs à pont H de l'UPQC [71][72][73][74]. Dans les deux topologies de convertisseurs à pont H de l'UPQC, le nombre de commutateurs à semi-conducteurs est de huit.

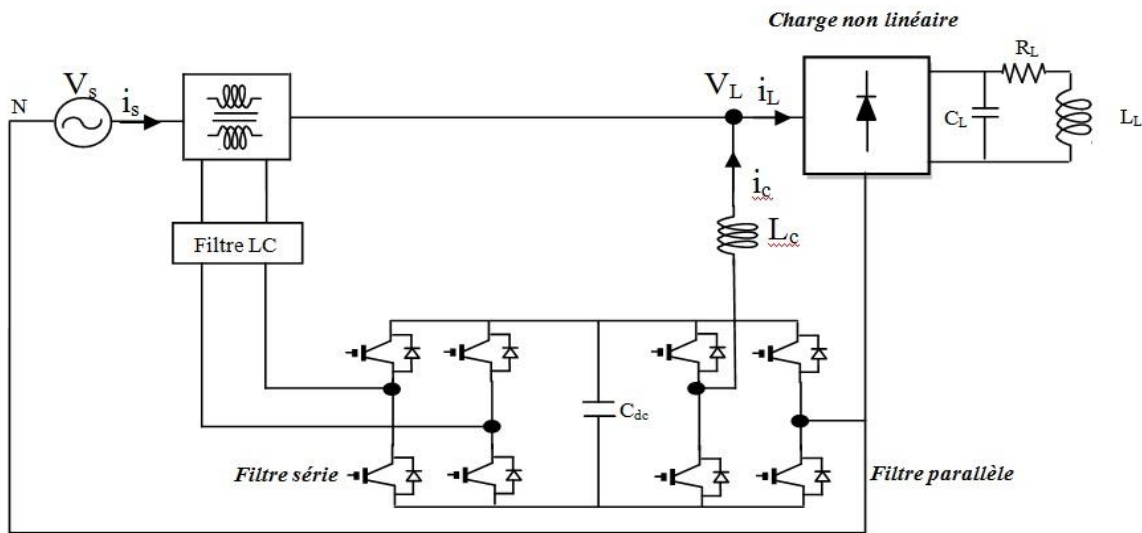


Figure 4.2: structure UPQC monophasé à deux fils.

D'autres auteurs proposent deux types de topologies réduites de commutateurs à semi-conducteurs pour l'UPQC monophasé, à savoir l'UPQC monophasé à trois bras et l'UPQC monophasé à demi-point. Le nombre de commutateurs à semi-conducteurs dans l'UPQC monophasé à trois branches et l'UPQC monophasé à demi-point est réduit à six et quatre, respectivement. Toutefois, la diminution des commutateurs à semi-conducteurs a un impact sur les capacités d'amélioration de la qualité de l'énergie de l'UPQC [75].

IV.3.1.2 structure UPQC triphasé à trois fils

Les charges triphasées courantes dans le système électrique triphasé à trois fils, telles que les moteurs électriques, le chauffage de l'espace, les chaudières électriques, l'éclairage électrique, les fours à arc et les cuisinières électriques, sont développées pour fonctionner sur une source d'alimentation triphasée à trois fils, ce qui entraîne des problèmes de qualité de l'alimentation mentionnés précédemment.

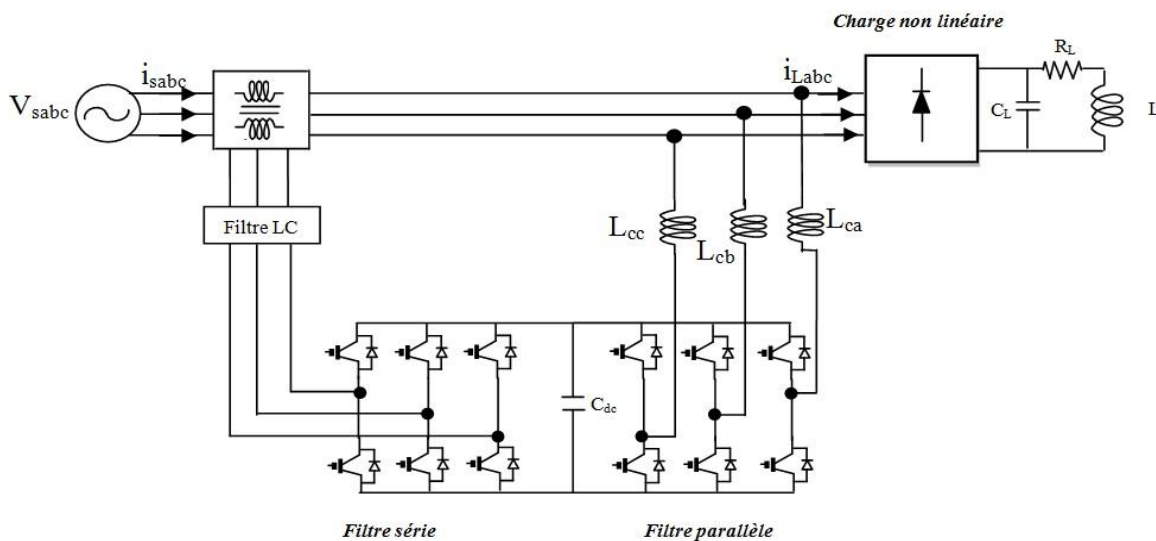


Figure 4.3: structure UPQC triphasé à trois fils.

Les UPQC triphasés à trois fils (voir Figure 4.3), qui sont la topologie la plus sollicitées, sont utilisés pour atténuer les problèmes de qualité de l'énergie [76][77][78][79].

IV.3.1.3 structure UPQC triphasé à quatre fils

Plusieurs usines utilisent une source d'alimentation triphasée à quatre fils pour fournir de l'énergie à une large gamme d'équipements monophasés et triphasés. Le conducteur neutre, qui est le quatrième fil, produit un flux excessif de courant neutre et nécessite une compensation supplémentaire. Les deux condensateurs divisés représentés dans la Figure 4.4 ne sont qu'un des nombreux designs alternatifs de filtre actif parallèle [80].

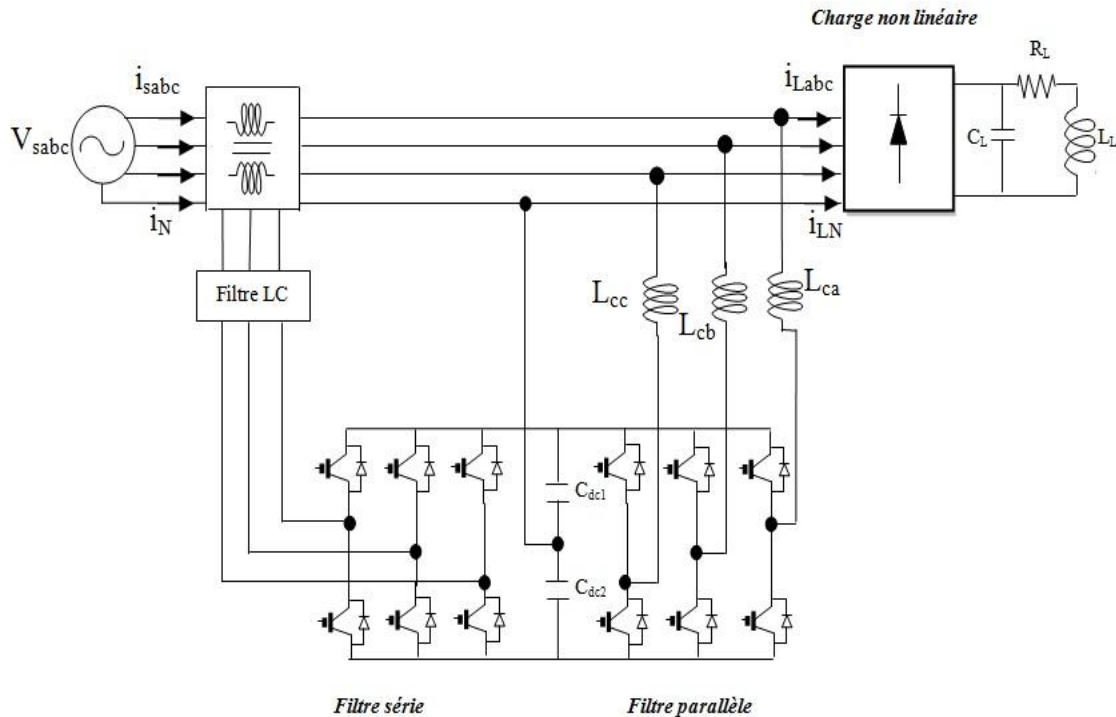


Figure 4.4: structure UPQC triphasé à quatre fils.

IV.3.2 Classification en fonction du système d'alimentation

En fonction du type de convertisseurs utilisés dans l'UPQC, ils peuvent être classés en deux catégories :

IV.3.2.1 Convertisseur de source de tension

Le type de convertisseur le plus couramment employé dans les UPQC est le convertisseur à source de tension (VSC) (Figure 4.1). Le UPQC basé sur le VSC se compose de deux VSC connectés dos à dos et d'un condensateur partagé. Le condensateur est maintenu à la valeur de tension de référence et est responsable de la coordination de la puissance entre les deux VSC. Les topologies utilisées dans la plupart des études sur le sujet de l'UPQC sont basées sur le VSC [81][82]. Les avantages de l'utilisation des VSC dans les UPQC sont : 1) faible poids, 2) faible coût en capital, et 3) capacité de fonctionnement multi niveau.

IV.3.2.2 Convertisseur de source de courant

Il est possible que le UPQC soit composé de deux convertisseurs à source de courant (CSC) reliés en série qui partagent un lien CC grâce à une inductance [76][83]. L'utilisation de cet inducteur permet de contrôler la puissance d'entrée de manière à ce qu'elle soit équivalente à la somme des pertes liées au fonctionnement de l'UPQC et à la puissance de sortie. Les CSC ne sont pas largement utilisés dans les topologies UPQC, car les CSC présentent les inconvénients suivants : 1) coût en capital élevé, 2) pertes de fonctionnement élevées, et 3) incapacité à fournir un fonctionnement multi-niveaux.

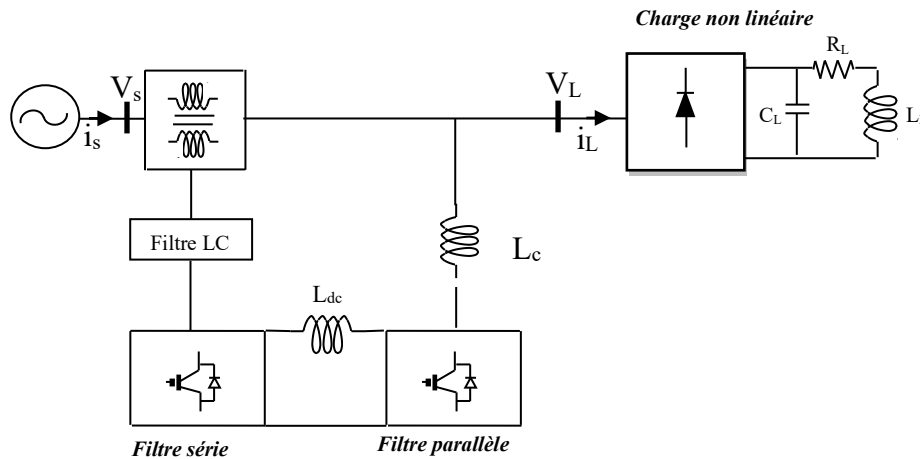


Figure 4.5:UPQC à basse d'un convertisseur de source de courant.

IV.3.3 Classification UPQC en fonction de la configuration

Basé sur les configurations de l'UPQC, la classification est effectuée comme suit :

IV.3.3.1 L'UPQC Shunt gauche et droit

La catégorie UPQC à dérivation gauche et droite est l'une des catégories basées sur la configuration.

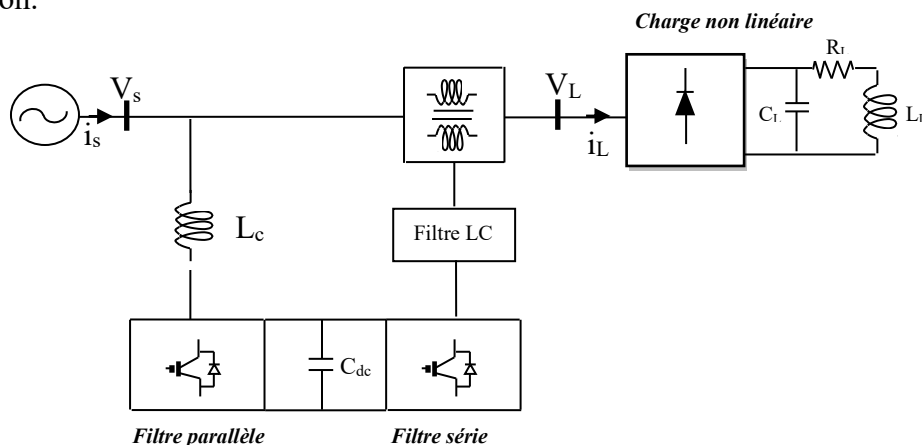


Figure 4.6:configuration UPQC shunt gauche.

Les deux convertisseurs de l'UPQC sont connectés l'un à l'autre. On peut le classer selon l'emplacement de l'onduleur shunt par rapport à l'onduleur en série.

L'onduleur shunt du côté gauche de l'UPQC est appelé shunt gauche UPQC (UPQCL), tandis que le shunt droit UPQC (UPQC-R) est appelé shunt droit UPQC [84]. La configuration de l'UPQC-L est présentée dans la Figure 4.6 [85].

Peu importe le type de courant de charge, la plupart des courants passant par le transformateur en série dans l'UPQC-R sont sinusoïdaux. Grâce à cette configuration, l'onduleur en dérivation diminue les fluctuations de courant [86]. L'arrangement UPQC-R peut être utilisé dans un état où il absorbe une puissance nulle tout en maintenant un facteur de puissance unitaire à l'extrémité de la charge.

En réduisant le THD de la tension de charge et du courant source, UPQC-R a obtenu une compensation améliorée par rapport à UPQC-L. Les deux approches UPQC ont démontré des résultats similaires dans la réduction des oscillations des composants de puissance réactive [84]. Les Figures (4.1 à 4.5) illustrent la configuration du système UPQC-R, ce qui signifie qu'UPQC-R offre une performance globale optimale par rapport à UPQCL.

IV.3.3.2 L'UPQC Interligne

Les deux convertisseurs sont reliés entre deux lignes de distribution dans la topologie UPQC interligne. Un convertisseur est connecté en série tandis que l'autre est relié en dérivation aux lignes de distribution. L'UPQC interligne permet de commander l'écoulement de puissance entre les deux conducteurs de distribution, ce qui entraîne un compromis sur les capacités de compensation de la qualité de la puissance de l'UPQC [87][88].

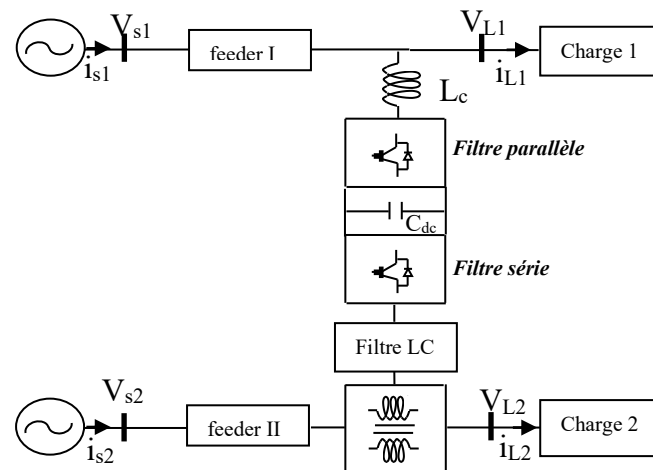


Figure 4.7: configuration UPQC interligne.

IV.3.3.3 L'UPQC Multi-convertisseur

Les chercheurs ont examiné si l'utilisation d'un troisième module de convertisseur pour le support de bus DC, appelé Multi-converter UPQC, pourrait améliorer les performances d'un système UPQC.

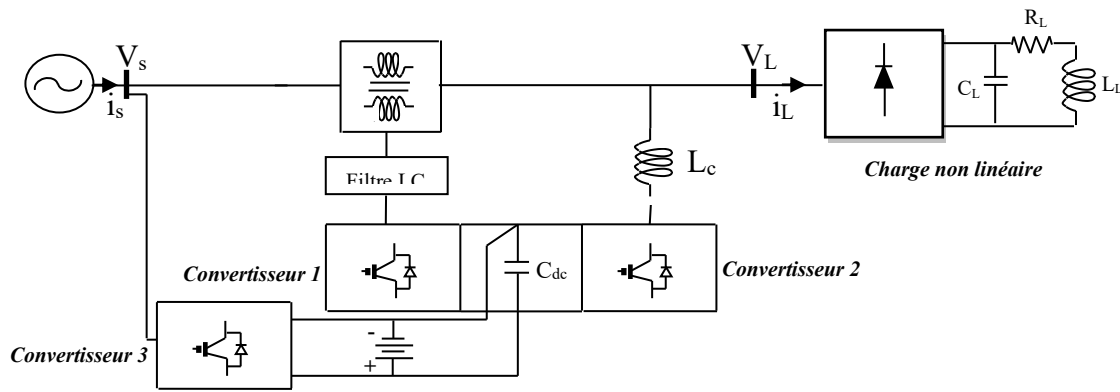


Figure 4.8: configuration UPQC Multi-convertisseur

L'étude [89] aborde les batteries de stockage comme des moyens d'améliorer encore les performances globales du système. On peut connecter le troisième onduleur de différentes manières, que ce soit en parallèle avec le même alimentateur ou en série avec un autre alimentateur [90]. La figure 4.8 illustre la configuration d'un MC-UPQC.

Les chercheurs ont étudié une mise à jour d'une configuration MC-UPQC pour un système multi-feeder. Les différentes configurations de contrôle proposées peuvent assurer une protection totale des charges essentielles et sensibles dans les systèmes de distribution à deux alimentations contre les fluctuations de charge, les baisses/sursauts de tension et les interruptions de défaut. La configuration du MC-UPQC pour un système multi-alimentations est illustrée dans la figure 4.9 [91].

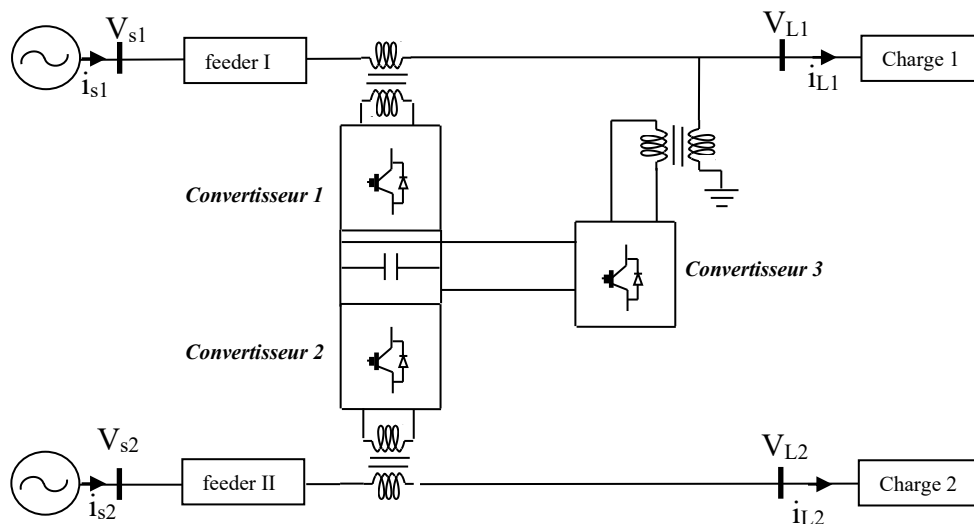


Figure 4.9: configuration de MC-UPQC pour un système multi-alimentations

IV.3.3.4 L'UPQC Multi-niveau Modulaire

Dans les topologies modulaires UPQC [92][93][94][95] les convertisseurs en série et en dérivation se composent de plusieurs H-ponte. Dans [94] et [95], les H-bridges du

convertisseur en série sont en connexion série et directement reliés aux lignes de distribution sans utiliser les transformateurs, de sorte que le gros transformateur en série peut être supprimé. Un transformateur multi-enroulement est appliqué pour relier le convertisseur en dérivation dans les lignes de distribution, tandis que les ponts H du convertisseur en dérivation sont en connexion série [94]. Dans [92][93] et [95], les H-ponts des convertisseurs en série sont en connexion série, tandis que les transformateurs en série sont utilisés pour insérer les convertisseurs en série dans les lignes de distribution. En raison de l'augmentation du nombre de ponts H, le niveau de tension de chaque pont H individuel diminue, ce qui peut aider à obtenir un niveau de puissance plus élevé. Cependant, comme plusieurs ponts H sont appliqués pour les convertisseurs en série et en dérivation, le nombre de commutateurs à semi-conducteurs augmente considérablement. Cela entraîne une augmentation du coût du capital et des pertes d'exploitation de l'ensemble des systèmes UPQC.

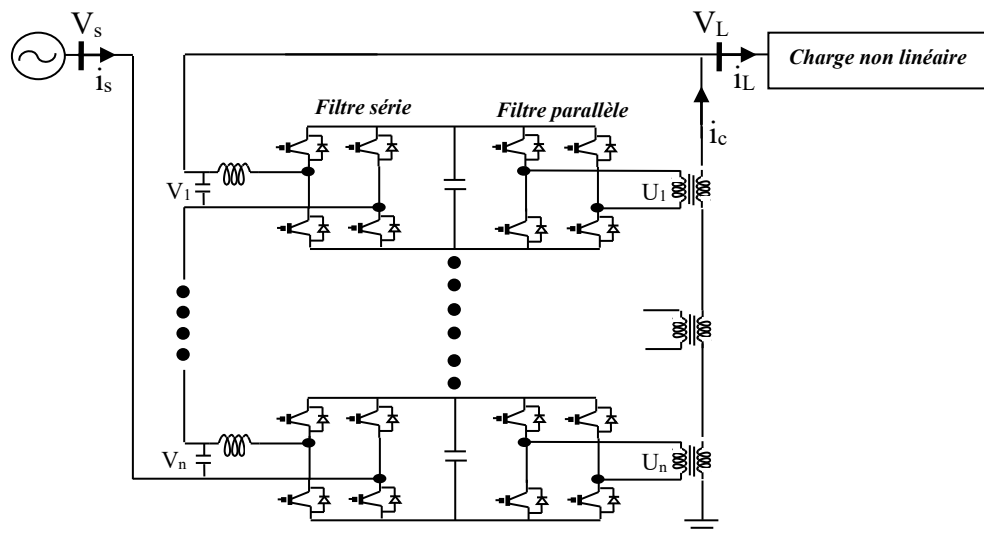


Figure 4.10: configuration d'UPQC Multi-niveau Modulaire

IV.3.3.5 L'UPQC Générateur Distribué

Un autre champ d'étude en progression est l'emploi de l'UPQC pour incorporer les ressources renouvelables comme le solaire et l'éolien dans le réseau distributeur [96]. Cette organisation globale est appelée Générateur Distribué UPQC. (UPQC-DG). Dans cet agencement, les sources DG sont connectées à une connexion CC [97]. Les batteries de secours et de stockage d'énergie de l'UPQC-DG sont connectées au bus CC, ce qui permet d'éviter les interruptions de tension [98]. De plus, deux méthodes de distribution de l'énergie générée par le DG existent. Le mode interconnecté est un moyen qui alimente simultanément la charge et le réseau. Une autre option est le mode insulaire, qui procure de l'énergie pour différentes charges [99]. La Figure 4.11 montre la structure du système UPQC-DG [100].

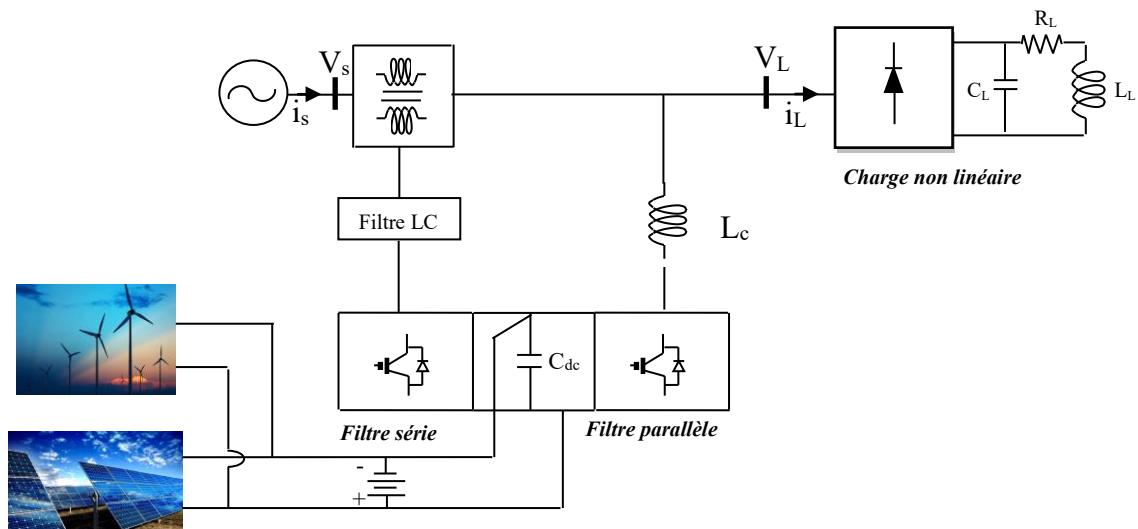


Figure 4.11: configuration d'UPQC Générateur Distribué.

IV.4 Simulation de compensation avec matlab simulink

Dans cette section, nous allons exposer les résultats de la simulation d'un système basé sur un UPQC à deux niveaux, illustré en figure 4.12, avec l'intention que le THD reste sous la barre des 3%.

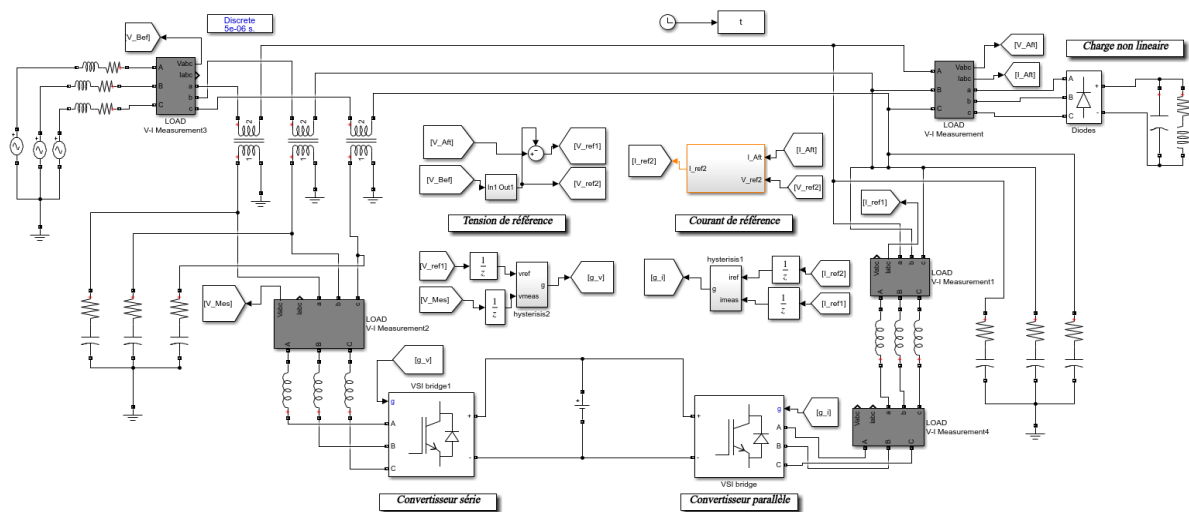


Figure 4.12: Modèle de simulation d'une compensation par l'UPQC établi sous Simulink.

Un pont redresseur triphasé à diodes, qui constitue la charge polluante, alimente une charge non linéaire (R_L , L_L , C_L), et le réseau d'alimentation utilisé est un réseau triphasé. La phase d'alimentation est représentée par une force électromotrice sinusoïdale associée en série à une inductance (L_s) et une résistance (R_s), qui définissent l'impédance du court-circuit du réseau. Pour la technique d'identification des courants harmoniques, on va utiliser un filtre actif triphasé en parallèle à structure tension. La méthode pq, qui est la théorie généralisée de la puissance réactive instantanée dans les circuits triphasés, est décrite dans le chapitre 3. Un filtre actif série triphasé à structure courant, pour la méthode d'identification des tensions harmonique on va applique la Théorie de la référentielle synchrone « méthode dq » (voir

chapitre 2). Pour la commande des 02 convertisseurs, nous avons utilisé la commande par hystérésis. Le tableau4.1 présente les paramètres de système [101].

TABLE.4.1 Paramètres de système

Parameter		valeur
Power Source	Tension de la source (V_s)	400 V
	Fréquence (F)	50 Hz
	Résistance de la source (R_s)	0.5Ω
	inductance de la source (L_s)	3m H
Non-linear load	Resistance de la charge (R_d)	10Ω
	Inductance de la charge (L_d)	10mH
	Capacité de la charger (C_d)	$0.24\mu F$
filter active parallèle	Inductance de filtre (L_{shn})	3.5mH
	Resistance de filtre (R_{shn})	5Ω
	Capacité de filtre (C_{shn})	$10\mu F$
DC Link	Tension de reference (V_{dcref})	700V
filter active série	Inductance de filtre (L_{ser})	3.5mH
	Resistance de filtre (R_{ser})	5Ω
	Capacité de filtre (C_{ser})	$20\mu F$
	Transformateur en série	1KVA

Les graphiques (4.13 et 4.14) démontrent, respectivement, la tension et le courant de la source avant l'intégration d'UPQC.

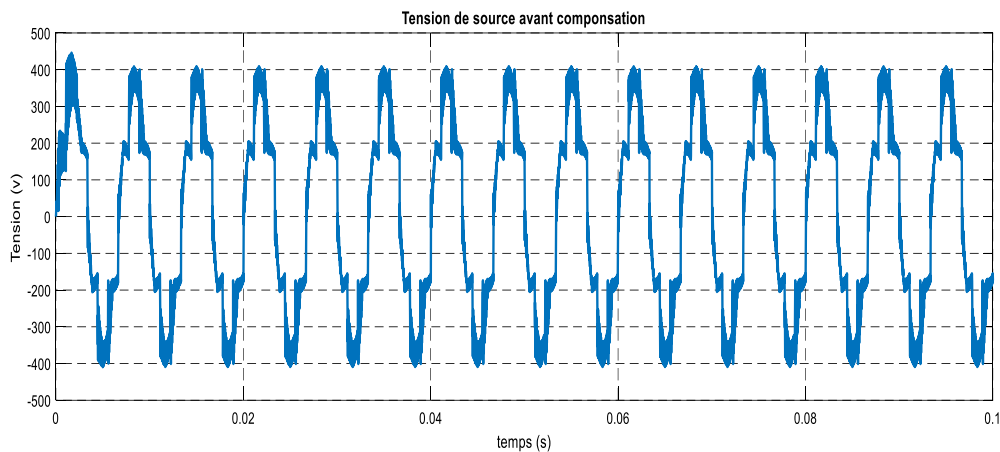


Figure 4.13: Allure de tension de source avant compensation.

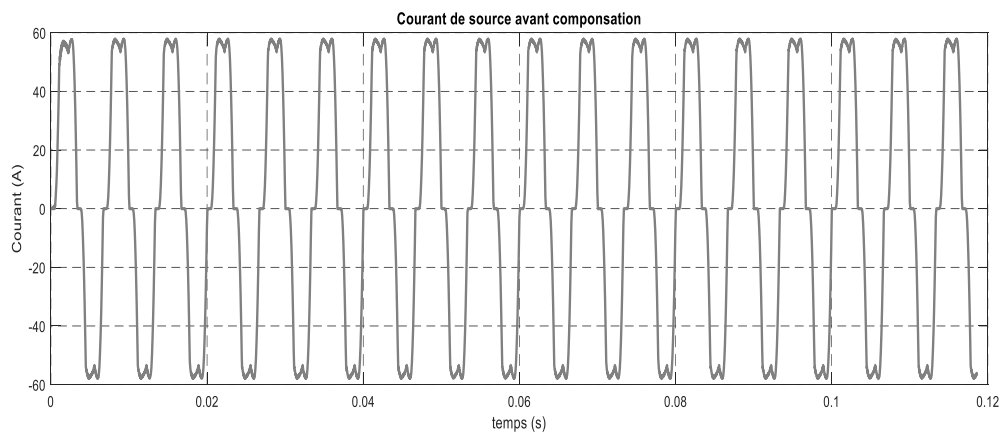


Figure 4.14: Allure de courant de source avant compensation.

On constate que les tensions et les courants non sinusoïdaux sont générés par la charge non linéaire, ce qui entraîne la pollution du réseau analysé. En effet, l'onde du tension et courant de source présente des déformations qui lui font perdre leur forme sinusoïdale.

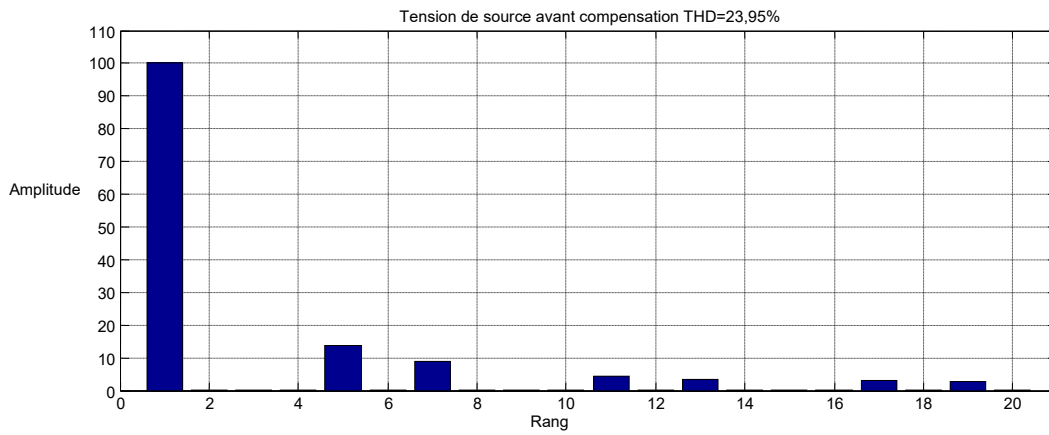


Figure 4.15: L'analyse spectrale de la tension source avant compensation.

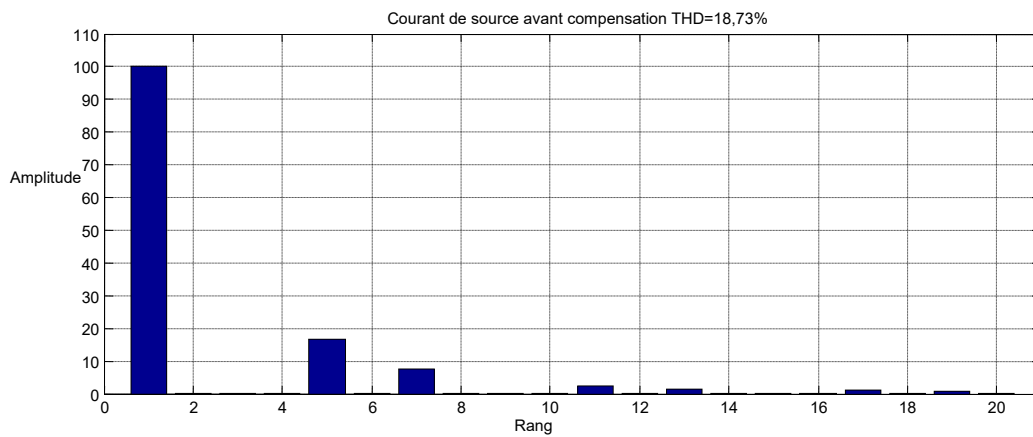


Figure 4.16: L'analyse spectrale du courant source avant compensation.

Les figures 4.15 et 4.16 montrent l'analyse spectrale de la tension et du courant consommé par la charge, mettant en évidence non seulement la fondamentale (premier rang), mais également les harmoniques de rang supérieur. 5, 7, 11, 13, 17, 19. Le taux de distorsion harmonique (THD) s'élève à 23.95% pour la tension et à 18.73% pour le courant.

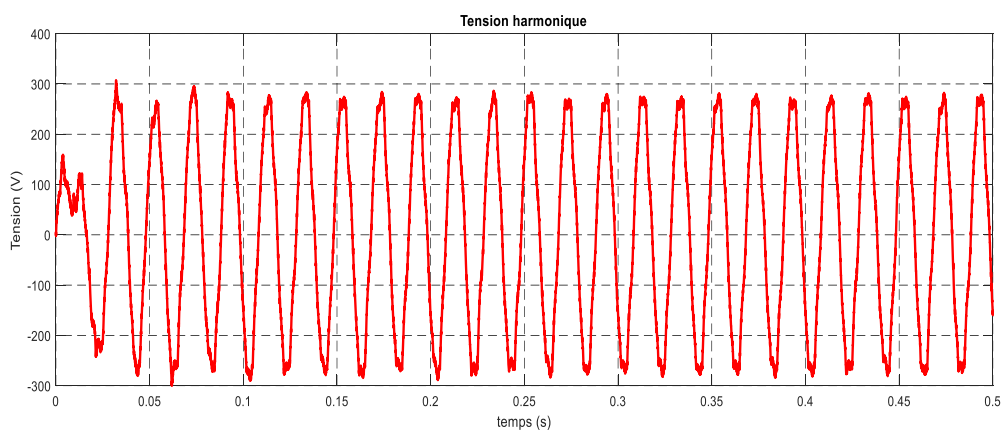


Figure 4.17: Allure de tension harmonique identifié.

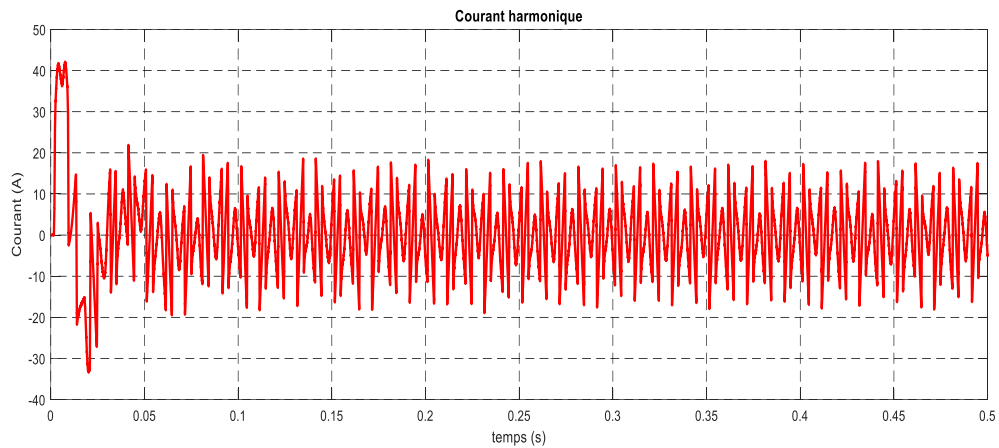


Figure 4.18: Allure de courant harmonique identifié.

Les graphiques 4.17 et 4.18 illustrent la tension et le courant harmonique détectés qui doivent être supprimés, ces signaux présentent une forme non sinusoïdale.

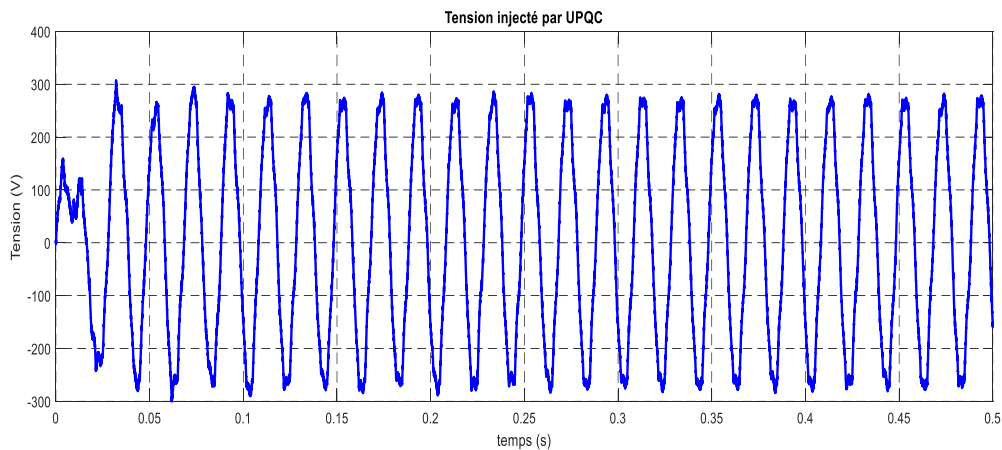


Figure 4.19: Allure de tension injecté par l'UPQC.

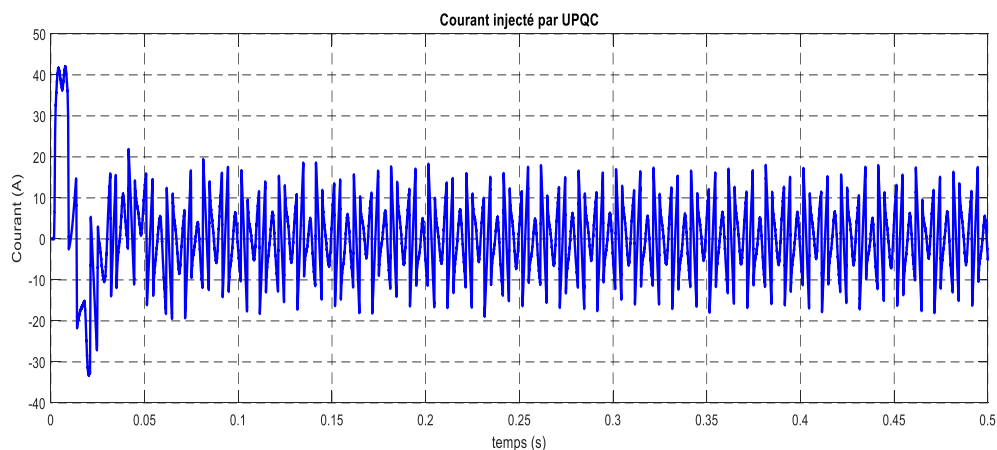


Figure 4.20: Allure de courant injecté par l'UPQC.

Les Figures 4.19 & 4.20, illustre la tension et le courant à injecté par l'UPQC dans le réseau. On remarque que cette tension et ce courant à presque la même forme que la tension et le courant identifié dans les figures 4.17 & 4.18.

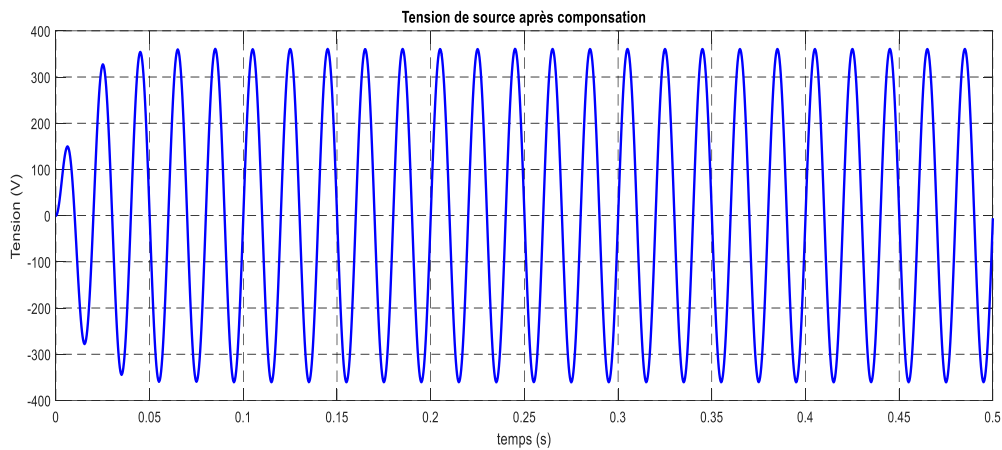


Figure 4.21: Allure de tension de source après compensation.

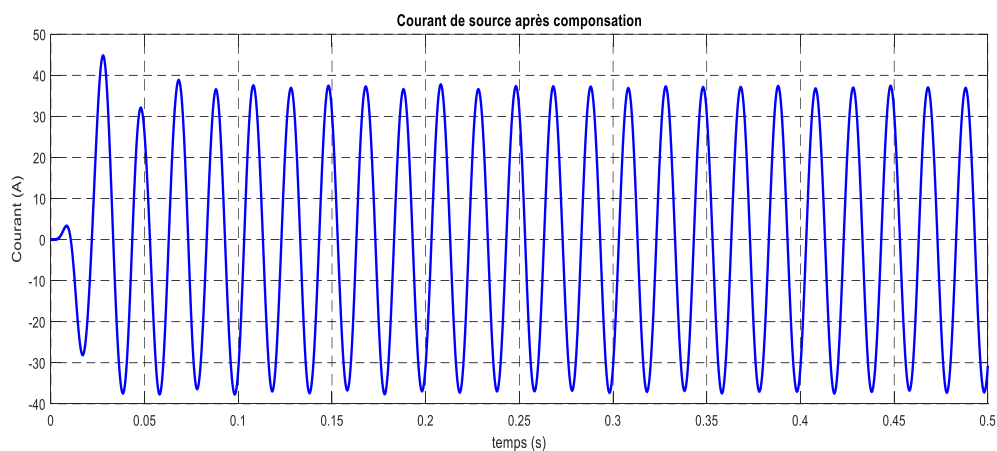


Figure 4.22: Allure de courant de source après compensation.

Après que l'UPQC a introduit la tension et le courant de référence dans le réseau, on constate que lorsque l'UPQC est activé, la tension et le courant du réseau deviennent sinusoïdaux et exempts de perturbations.

L'obtention d'une forme de signal sinusoïdal pour la tension et le courant de source indique que si notre upqc est capable d'injecter une tension et un courant conformes à leur référence, nous observerons alors une tension et un courant de source sinusoïdaux. Les figures 4.21 et 4.22 montrent la nouvelle tension et le courant de source.

Les diagrammes 4.23 et 4.24 illustrent l'analyse spectrale du courant et de la tension source réalisée sur la première phase. Cette illustration spectrale atteste de l'absence d'harmoniques, celles-ci étant compensées.

Le TDH initialement à 23,95% pour la tension a été réduit après compensation à un taux extrêmement bas de 0,57%. Quant au courant, il est passé de 18,73% à 1,16%, attestant ainsi de l'efficacité de l'UPQC suggéré.

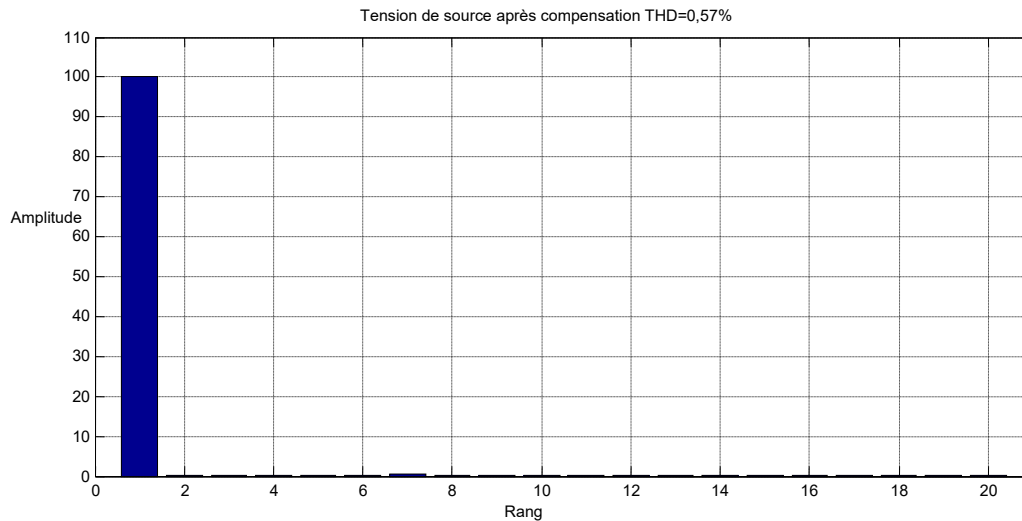


Figure 4.23: Spectre harmonique de la tension source après compensation.

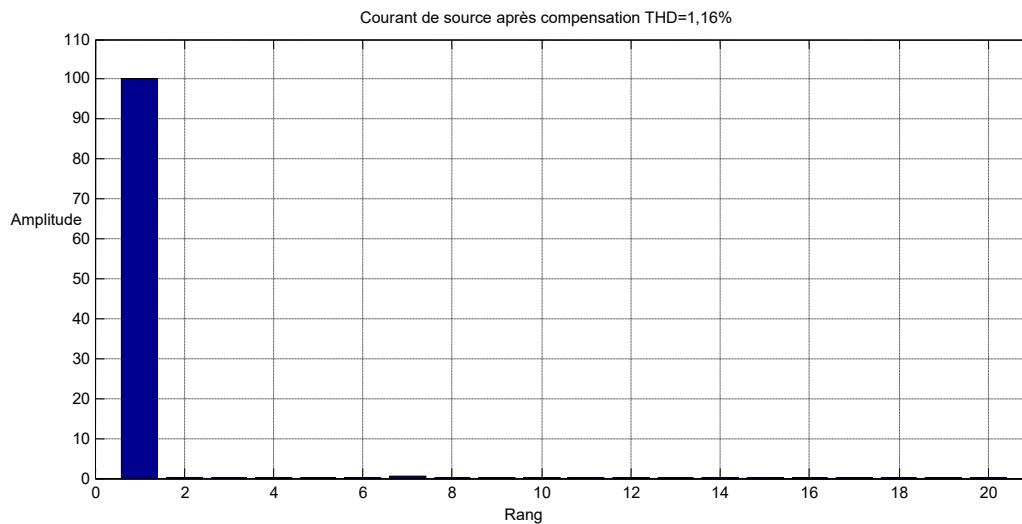


Figure 4.24: Spectre harmonique du courant source après compensation.

VI.5 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons exposé le concept et les diverses configurations d'un conditionneur de qualité de puissance unifié (UPQC). Par la suite, une simulation sur MATLAB d'un module de réseau électrique alimentant une charge linéaire compensée par un UPQC à deux niveaux a été effectuée. Les données de simulations indiquent clairement l'efficacité de l'UPQC en montrant une amélioration notable du taux de distorsion harmonique (THD), qui passe de 23,95% pour la tension à un niveau très bas de 0,57%, et pour le courant, il évolue de 18,73% à 1,16%. Cela illustre l'efficacité de la compensation via un UPQC.

Association PV-UPQC

V.1 Introduction

L'usage des énergies renouvelables pour diverses applications bénéfiques a continuellement progressé, particulièrement suite à la crise pétrolière de la fin des années 1970. Ceci a obligé les scientifiques et les leaders politiques mondiaux à se concentrer sur diverses façons d'exploiter l'énergie renouvelables de façon plus performante et profitable [102][103]. L'une des méthodes les plus couramment employées pour produire de l'énergie renouvelable est le recours aux dispositifs photovoltaïques (PV). Ce genre de technologie d'énergie renouvelable, exempte de polluants lors de son fonctionnement, diminue les coûts d'exploitation et présente une maintenance réduite [104][105]. Le photovoltaïque est un processus qui convertit directement l'énergie solaire en électricité sans nécessiter d'intermédiaire. Les systèmes solaires photovoltaïques, de nature modulaire, peuvent produire des énergies de microwatts à mégawatts [106].

Dans ce chapitre, nous décrivons le système puis l'association de la photovoltaïque avec l'upqc.

V.2 Définition de l'énergie renouvelable

L'énergie renouvelable est une énergie provenant de ressources naturelles qui se régénèrent plus vite qu'elles ne sont utilisées. Par exemple, la lumière solaire et le vent constituent des sources qui se renouvellent en permanence. Il existe une multitude de sources d'énergie renouvelable dans notre environnement. Par contre, les ressources non renouvelables telles que le charbon, le pétrole et le gaz sont des ressources qui nécessitent la formation de centaines de millions d'années. Lorsqu'ils sont utilisés pour générer de l'énergie, les combustibles fossiles génèrent des rejets préjudiciables de gaz à effet de serre, tels que le dioxyde de carbone.

L'énergie renouvelable produit des émissions nettement plus faibles que la combustion de combustibles fossiles. Pour faire face au changement climatique, il est crucial de passer des combustibles fossiles, qui constituent actuellement la majorité des émissions, aux énergies renouvelables. Dans la majorité des pays, les énergies vertes sont maintenant moins onéreuses et créent trois fois plus d'emplois que les combustibles fossiles [107].

Parmi les énergies renouvelables nous citons : le solaire thermique et photovoltaïque, L'éolien, la biomasse, l'hydraulique.

V.2.1 L'énergie solaire

L'énergie solaire est l'une des ressources énergétiques renouvelables parmi les ressources énergétiques renouvelables, il offre une source propre pour la production d'électricité avec zéro émission de gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère [108][109].

L'énergie solaire accumule des quantités considérables en une minute, ce qui pourrait constituer une opportunité majeure pour la collecte d'énergie propre [110]. La terre reçoit environ $1,8 \times 10^{11}$ MW d'énergie solaire qui, par conséquent, peut servir à générer de l'énergie sans frais [111]. Les progrès dans le domaine de la science des matériaux et l'ingénierie pourraient améliorer la réception de l'énergie solaire et sa transmission aux usagers finaux [112][113].

Plusieurs méthodes sont employées pour produire et utiliser l'énergie solaire :

- **L'énergie solaire thermique** : c'est tout simplement la production de chaleur par le biais de panneaux sombres. Il est également possible de générer de la vapeur grâce à la chaleur solaire, puis de convertir cette dernière en électricité.
- **L'énergie solaire photovoltaïque** : qui cherche à produire de l'électricité directement à partir de la lumière par l'intermédiaire de panneaux solaires. De nombreux pays utilisent déjà ce type d'énergie, en particulier ceux où les ressources énergétiques traditionnelles comme les hydrocarbures ou le charbon ne sont pas disponibles.
- **L'énergie solaire passive** : C'est une autre approche d'utilisation de l'énergie solaire qui s'appuie sur l'exploitation directe de la lumière pour produire de la chaleur.

V.2.2 L'énergie éolienne

L'énergie éolienne découle du mouvement des masses d'air, qui est indirectement attribuable au rayonnement solaire de la Terre. En réchauffant certaines parties du globe et en refroidissant d'autres, une disparité de pression est générée et les masses d'air se déplacent constamment. Suite à une période prolongée de mépris pour cette énergie, bien qu'utilisée depuis les temps passés, elle connaît un développement sans précédent depuis environ trente ans, principalement grâce aux premiers chocs pétroliers [114]. Depuis une décennie, le secteur de l'énergie éolienne connaît une progression annuelle de 30%. La machine est constituée de trois pales, généralement transportées par un rotor et positionnées au sommet d'un mât vertical. On fixe cet ensemble grâce à une nacelle qui contient un générateur. Un moteur électrique oriente la partie supérieure pour qu'elle reste constamment exposée au vent. L'énergie cinétique du vent est convertie en énergie mécanique grâce aux pales. Les pales tournent entre 10 et 25 tours par minute sous la force du vent. La rapidité de rotation des pales est déterminée par la dimension de ces dernières. Plus les pales seront étendues, moins leur mouvement sera rapide [115].

V.2.3 Boimasse

La biomasse est l'une des formes d'énergie les plus disponibles, utilisée efficacement dans plusieurs applications, allant de la combustion conventionnelle [116][117] à l'utilisation

directe dans les piles à hydrogène pour générer de l'électricité [118][119]. Bien que la combustion des combustibles soit une méthode conventionnelle, ce n'est pas le meilleur choix pour obtenir la valeur énergétique contenue dans les diverses ressources de biomasse. La conversion de la biomasse en biocarburant, tel que le biodiesel [120][121] et le biochar [122][123], est une méthode prometteuse qui pourrait par conséquent être appliquée dans diverses applications.

V.2.4 L'hydraulique

L'hydraulique, qui occupe la première place mondiale en matière d'énergies renouvelables, se caractérise par son adaptabilité d'emploi, ses bénéfices pour l'environnement et l'économie. Tout comme les roues ancestrales stimulées par le mouvement d'un cours d'eau, les turbines des centrales hydrauliques fonctionnent lorsque la force de l'eau se déplace d'une position supérieure vers une position inférieure. Plus la chute d'eau et le débit augmentent, plus la production de puissance électrique sera importante. Ainsi, chaque installation hydraulique est conçue en fonction de la typologie des sites afin d'obtenir un rendement optimal [124]. En ce qui concerne l'énergie hydraulique, il est également important de souligner les ressources marémotrices liées à la houle et aux courants marins. De nombreuses recherches mondiales ont démontré la possibilité d'exploiter ces ressources. La Rance, la plus importante usine marémotrice du monde, possède une capacité de 240 MW [125].

V.3 Description du fonctionnement d'un système photovoltaïque solaire

Quand une cellule photovoltaïque est exposée au rayonnement solaire, la jonction P-N absorbe le photon, générant ainsi une variation de potentiel au travers de celle-ci. Les charges commencent à circuler, générant un courant photoélectrique appelé I_{PV} , en parallèle avec une diode à jonction P-N [126].

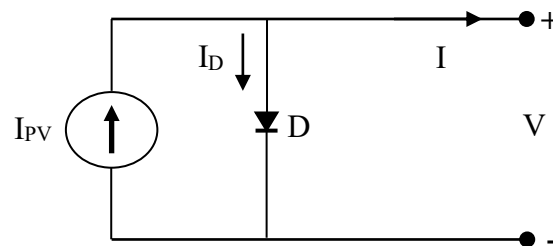


Figure 5.1: Circuit équivalent d'une cellule PV.

L'analyse des performances d'une cellule photovoltaïque démontre que la température de surface en fonctionnement est essentielle dans le processus de transformation de l'énergie photovoltaïque. La surchauffe du panneau photovoltaïque est causée par des températures ambiantes élevées et des températures de surface élevées, ce qui diminue considérablement

son efficacité [130]. La relation entre la puissance de sortie et la tension de sortie est appelée P-V, tandis que l'irradiance solaire E et la température du module T_m demeurent invariables. L'effet de la température sur l'efficacité électrique du panneau solaire peut être analysé en utilisant l'équation suivante :

$$\eta_{PV} = \eta_{TR} [1 - \beta_R (T_C - T_R) + \gamma \log_{10} I_{PV}] \quad (5.1)$$

où : η_{PV} est l'efficacité du module PV mesurée à la température de référence de la cellule ; T_R (25 °C). β_R est le coefficient de température pour l'efficacité de la cellule (typiquement 0,004–0,005/°C) [128]. I_{PV} est l'irradiation horaire moyenne incidente sur le module PV à la température de fonctionnement nominale NT.

T_C est la température du module PV, et γ est le coefficient d'intensité de radiation pour l'efficacité des cellules, qui est généralement supposé être nul [129][130]. Réduire l'équation à:

$$\eta_{PV} = \eta_{TR} [1 - \beta_R (T_C - T_R)] \quad (5.2)$$

En ajoutant et en soustrayant la température ambiante, T_A , aux deux termes de température respectivement, l'expression suivante est obtenue :

$$\eta_{PV} = \eta_{TR} \left[1 - 0.9\beta \left(\frac{I_{PV}}{I_{PV,NT}} \right) (T_{C,NT} - T_{A,NT}) - \beta(TA - TC) \right] \quad (5.3)$$

où : $T_{C,NT}$ (typiquement 45 °C) et $T_{A,NT}$ (typiquement 20 °C) sont respectivement les températures de la cellule et de l'environnement. Lors de l'utilisation de l'équation (5.3), il est clairement visible que lorsque $T_{A,NT}$ augmente, l'efficacité diminue.

V.4 Description de structure d'un système photovoltaïque solaire

Un système photovoltaïque solaire est un dispositif d'alimentation électrique qui exploite les rayons du soleil pour générer de l'énergie. Il est constitué d'un assemblage de divers éléments permettant de mettre en œuvre un système de travail, comme des panneaux solaires qui absorbent et transforment la lumière du soleil en électricité, un onduleur solaire qui transforme la sortie du courant continu en courant alternatif, ainsi que le montage, le câblage et d'autres accessoires électriques. Il est aussi équipé d'une batterie intégrée et peut être équipé d'un système de suivi solaire afin d'améliorer les performances globales du système [131].

Cet étage est supervisé par la technologie MPPT (Maximum Power Point Tracking) qui permet au système de maintenir sa puissance maximale en tirant le maximum de puissance en fonction de la température et du rayonnement [132].

La structure du système photovoltaïque solaire est illustrée sur la Figure 5.2.

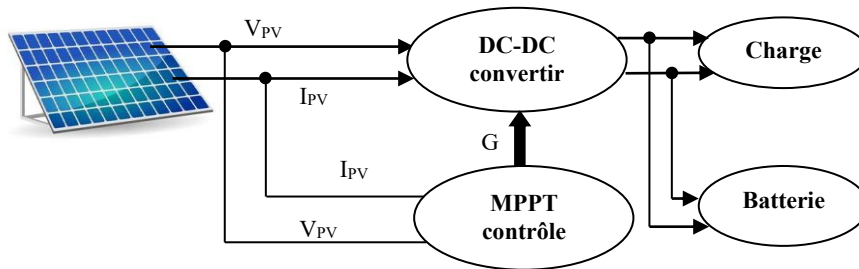


Figure 5.2: Installation du système photovoltaïque solaire.

V.4.1 Modélisation électrique d'une cellule photovoltaïque

La cellule solaire photovoltaïque est une composante minuscule du grand dispositif de transformation d'énergie solaire en énergie électrique. Quand le fil négatif et positif est relié à une charge, il crée un circuit électrique où des électrons circulent pour compléter le circuit. Le courant issu du photovoltaïque est connu sous le nom de courant photonique (I_{ph}). Dans une configuration basique à une seule diode, le photovoltaïque est réalisé en utilisant une source de photo-courant connectée à une diode en parallèle. Cette pièce présente un comportement électrique similaire à celui d'une jonction P-N. L'éclairement énergétique (G) produit un courant en fonction du rayonnement solaire qui s'écoule directement sur la surface [131][132]. La résistance série et shunt ne sont pas incluses dans le modèle PV simple, ce modèle simple peut être décrit en utilisant la théorie des diodes de Shockley.

Le photovoltaïque ne produit pas de courant constant, le modèle simple à une seule diode [133] est présenté dans la Figure 5.3.

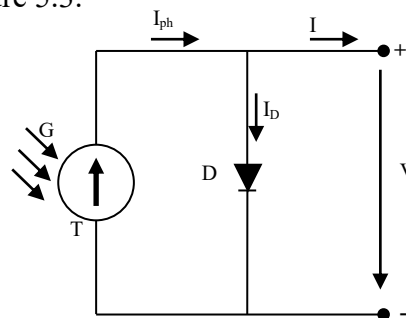


Figure 5.3: Modèle PV simple à une seule diode.

La représentation de ce modèle repose sur l'équation de la diode de Shockley [134]. Dans ce modèle, G correspond à l'irradiation, tandis que le courant de la diode est représenté par :

$$I_D = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (5.4)$$

La loi de Kirchhoff stipule que le courant total entrant et le courant total sortant sont toujours nuls. De ce fait, le courant produit par le PV est représenté par :

$$I = I_{ph} - I_D \quad (5.5)$$

Donc

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (5.6)$$

I_{ph} est le courant photonique, I_D est le courant de diode et I_0 est le courant de saturation sombre, n est l'idéalité de la diode facteur, q est la charge de l'électron, k est la constante de Boltzmann, T est la température de cellule de la jonction.

La caractérisation de la cellule photovoltaïque dépend grandement du courant de court-circuit (I_{SC}) et de la tension de circuit ouvert (V_{OC}). Quand la tension est nulle, I_{SC} équivaut au courant photonique (I_{ph}). Dès lors, $I_{SC} = I = I_{ph}$. La valeur de la production PV est donnée par le modèle simple. On ajoute une résistance série à un modèle PV basique. La figure 5.4 présente le modèle à quatre paramètres de la cellule photovoltaïque [135].

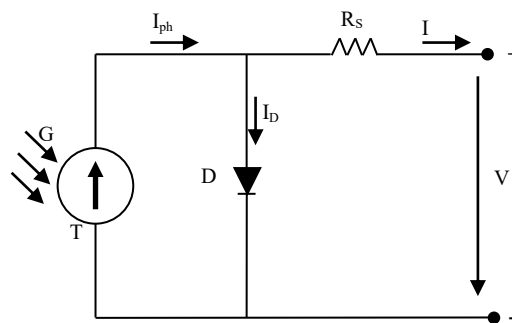


Figure 5.4: Modèle de la cellule PV à quatre paramètres.

Le modèle mathématique à 4 paramètres donne les caractéristiques courant-tension de la cellule PV. Le courant total est donné par :

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{qV + qR_s I}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (5.7)$$

R_s est la résistance série interne dans le circuit équivalent PV. Pour rendre plus approximatif l'obtention de la sortie, il faut un modèle plus sophistiqué qui inclut une résistance série et parallèle.

On connaît le modèle PV à une seule diode à 5 paramètres, qui est le plus couramment employé pour simuler la cellule photovoltaïque. L'équivalent électrique de la cellule PV est ce modèle. Il présente un comportement similaire aux cellules solaires présentes dans un panneau photovoltaïque.

Le circuit équivalent PV intègre la résistance shunt et la résistance série en parallèle, ce qui crée un modèle à 5 paramètres de la cellule PV. La figure 1.20 présente le modèle à 5 paramètres de la cellule photovoltaïque [134].

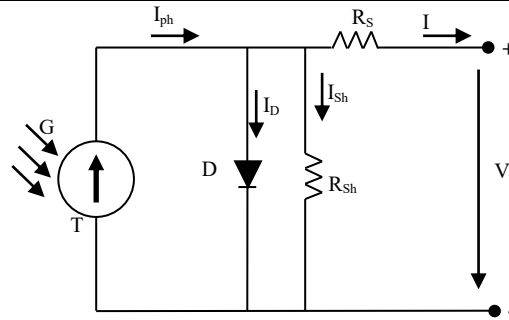


Figure 5.5: Modèle de la cellule PV à une seule diode à cinq paramètres.

I_{ph} Le courant photonique qui est la source de courant pour le circuit, une seule diode D qui a un courant I_D à travers elle, une résistance série R_S qui représente la résistance dans la cellule, la résistance R_{Sh} est en parallèle.

Le courant aux bornes de la résistance parallèle (I_{sh}) est donné par :

$$I_{sh} = \frac{V + I_{RS}}{R_{Sh}} \quad (5.8)$$

D'après la loi actuelle de Kirchhoff, le courant généré par le PV est donné par :

$$I = I_{ph} - I_D - I_{sh} \quad (5.9)$$

Une fois que toutes les valeurs ont été ajoutées, le courant total est calculé par :

$$I = I_{ph} - I_0 \left\{ \exp\left(\frac{q(V + IR_S)}{nkT}\right) - 1 \right\} - \left(\frac{V + IR_S}{R_{Sh}}\right) \quad (5.10)$$

Il y a la résistance parallèle et la résistance série. Ils sont employés dans diverses simulations. Il est envisageable d'ignorer leur perte dans la cellule si la résistance parallèle est beaucoup plus élevée que la résistance de charge et que la résistance série est beaucoup plus faible que la résistance de charge. Lorsque la perte est négligée, il est également possible d'ignorer les résistances parallèles et séries du modèle [131].

Par la suite, le courant total correspond à la différence entre le courant de la diode et le courant photonique, ce qui donne l'équation suivante (5.4).

Le modèle PV parfait ne nécessite ni résistance série ni parallèle. Le modèle PV présente des caractéristiques importantes distinctes en ce qui concerne le courant et la tension. Lorsque le courant est nul dans un circuit ouvert, la tension (V_{0C}) correspond à la tension. La sortie de puissance est aussi nulle.

Le court-circuit est caractérisé par le courant (I_{SC}), qui correspond à la situation où la tension est nulle et la production d'énergie est nulle. La puissance de sortie maximale du GPV est déterminée par le courant (I_{mp}) en fonction des conditions internes et environnementales.

La tension maximale de puissance (V_{mp}) correspond à la tension à laquelle le GPV fournit sa puissance maximale.

Il est crucial d'avoir un point de puissance maximale (MPP) lorsque le GPV offre le meilleur rendement. La valeur différente qui est associée aux paramètres environnementaux influence ce point [135].

V.4.2 Principe du suivi MPPT

Le régulateur de charge solaire a pour principale fonction de transférer efficacement l'énergie provenant d'un module photovoltaïque vers une batterie ou une charge. On identifie deux types distincts de contrôleurs solaires, chacun équipé d'une technologie propre : la recherche du point de puissance maximale (MPPT) et la modulation de largeur d'impulsion (PWM).

Les performances de ces appareils varient considérablement ; par exemple, le contrôleur de charge MPPT est cher par rapport au régulateur PWM [131].

La tâche du régulateur MPPT est plus efficace que celle du régulateur de charge solaire PWM. On peut le constater sur la Figure 5.6.

Le régulateur de charge PWM opère en instaurant un lien direct entre la batterie et le panneau solaire, alors que le régulateur de charge MPPT évalue la tension du panneau et la transforme en celle de la batterie [136].

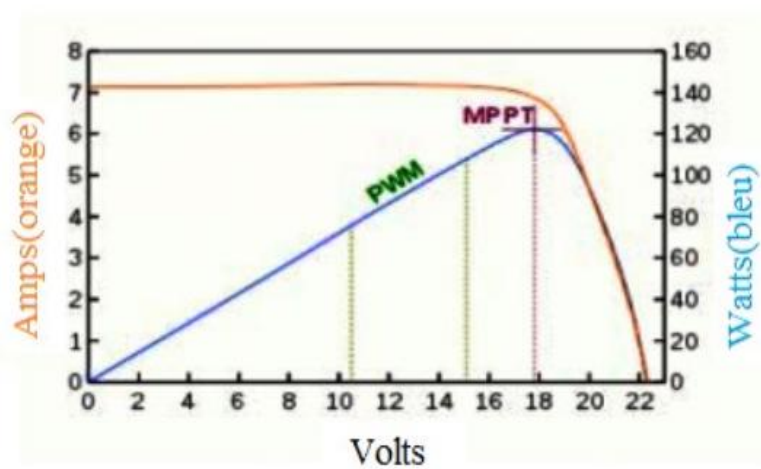


Figure 5.6: Graphique MPPT et PWM.

Le MPPT est un système qui transforme la puissance du courant continu DC pour garantir une correspondance optimale entre les performances de la tension du panneau solaire et celle du banc de batterie.

Ainsi, le contrôleur de charge MPPT réduit la tension élevée du panneau solaire vers la basse tension requise pour recharger une batterie. On peut le constater dans la Figure 5.7 [137].

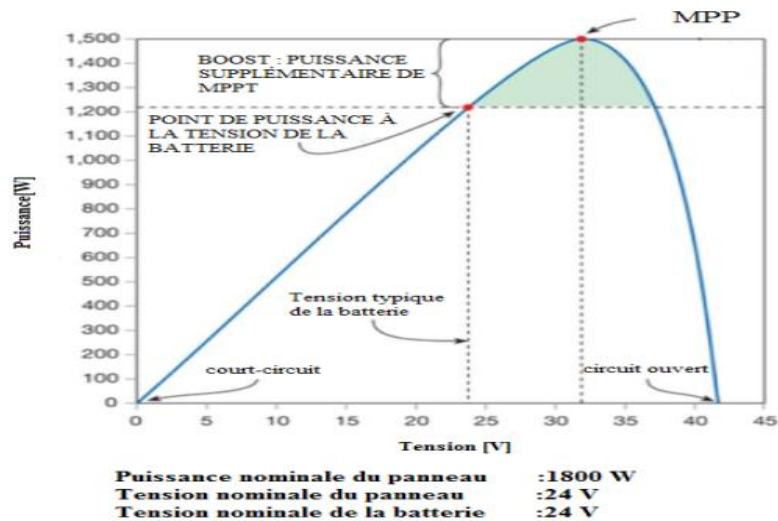


Figure 5.7: Performances MPPT entre le panneau solaire et la batterie.

V.4.3 Convertisseurs DC/DC

Afin d'obtenir la puissance maximale possible d'un module photovoltaïque, il est nécessaire de régler constamment la charge avec le générateur solaire. On peut effectuer cette adaptation en installant un convertisseur DC-DC, piloté par un dispositif de suivi MPPT (Maximum Power Point Tracking). On choisit sa structure de conversion selon la nature de la charge à alimenter, qu'il s'agisse d'un survolage ou d'un dévolage. Par exemple, si la source d'énergie est une batterie plomb-acide, les intervalles de tension pour la charge et la décharge permettront de déterminer le schéma le plus adapté [138].

V.4.4 Convertisseurs survolteur « boost »

Le convertisseur boost est un dispositif électronique de puissance très efficace dans lequel la tension d'entrée est augmentée sans utiliser de transformateur. Mais dans le processus d'élévation, la puissance totale d'entrée dans le système est maintenue fixe par rapport à celle de la sortie du système, ce qui est réalisé en réduisant le courant. Le processus de transfert d'énergie est réalisé par divers éléments tels que l'inducteur, l'interrupteur de puissance, la diode et le condensateur de filtrage [139]. Le DC DC boost est montré sur la figure 5.8.

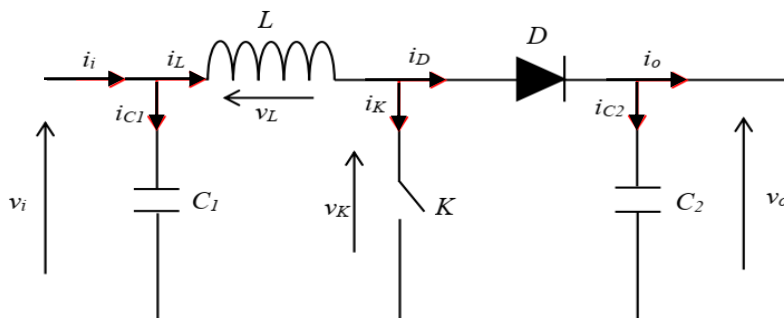
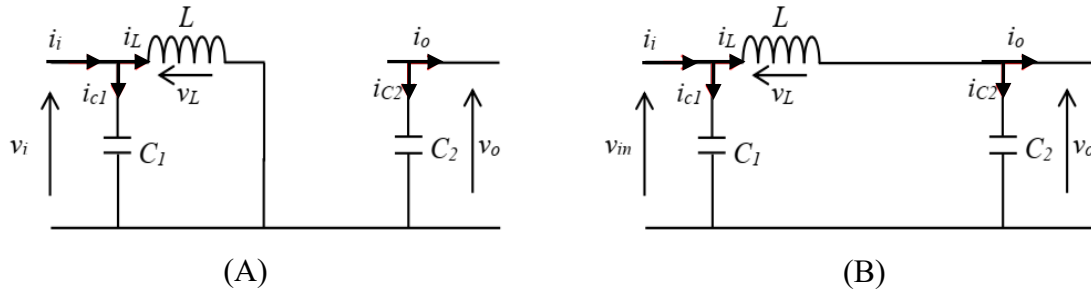


Figure 5.8 : principe de convertisseur survolteur (Boost).

Pour expliquer les fonctionnalités du survolteur en régime établi, il est nécessaire de présenter les diagrammes équivalents du circuit à chaque position de l'interrupteur K. La Figure 5.9 illustre les deux schémas équivalents du convertisseur élévateur pour les deux modes de fonctionnement [140].



(A) K fermé, (B) K ouvert

Figure 5.9 : Diagrammes de conversion équivalents pour le convertisseur boost.

En utilisant la loi de Kirchhoff sur les deux circuits équivalents du convertisseur amplificateur dans ses deux états de fonctionnement, nous obtenons les deux ensembles d'équations suivants :

Pour la première période DTs :

$$\begin{aligned}
 i_{c1}(t) &= C_1 \frac{dV_{in}(t)}{dt} = i_{in}(t) - i_L(t) \\
 i_{c2}(t) &= C_2 \frac{dV_{out}(t)}{dt} = -i_{out}(t) \\
 V_L(t) &= L \frac{di_L(t)}{dt} = -V_{in}(t)
 \end{aligned}
 \tag{5.11}$$

Pour la deuxième période (1-D) Ts :

$$\begin{aligned}
 i_{c1}(t) &= C_1 \frac{dV_{in}(t)}{dt} = i_{in}(t) - i_L(t) \\
 i_{c2}(t) &= C_2 \frac{dV_{out}(t)}{dt} = i_L(t) - i_{out}(t) \\
 V_L(t) &= L \frac{di_L(t)}{dt} = V_{in}(t) - V_{out}(t)
 \end{aligned}
 \tag{5.12}$$

D: le rapport cyclique ; Ts : la période ; $V_i=V_{in}=V_{pv}$; $V_o=V_{out}=V_{charge}$

Pour obtenir une représentation dynamique applicable sur toute la durée Ts, on se sert souvent de l'équation ci-dessous :

$$\left\langle \frac{dx}{dt} \right\rangle_{T_s} = \frac{dx}{dt} dT_s + \frac{dx}{dt(1-D)T_s} (1-D)T_s
 \tag{5.13}$$

Où $\langle dx/dt \rangle$ représente la valeur moyenne de la dérivée de x sur une période Ts, cette équation est valable si :

$dx/dtDTs$ est constants pour la période DTs

$dx/dt(1-D)Ts$ est constants pour la période $(1-D)Ts$.

On obtient le modèle approximé du convertisseur survolteur en appliquant la relation (5.13) aux systèmes d'équations (5.11) et (5.12).

$$\begin{aligned}
 i_L(t) &= i_{in}(t) - C_1 \frac{dV_{in}(t)}{dt} \\
 i_{out}(t) &= (1-D)i_L - C_2 \frac{dV_{in}(t)}{dt} \\
 V_{in}(t) &= L \frac{di_L(t)}{dt} = (1-D)V_{out}
 \end{aligned}
 \tag{5.14}$$

En éliminant les dérivées des variables dynamiques et en remplaçant ces signaux par leurs valeurs moyennes, le système d'équations est transformé en un système d'équations en régime permanent.:

$$\begin{aligned}
 i_{out}(t) &= (1-D)i_L \\
 i_L(t) &= i_{in}(t) \\
 V_{in}(t) &= (1-D)V_{out}
 \end{aligned}
 \tag{5.15}$$

Le rapport de conversion peut être explicité comme le ratio entre la tension de sortie et la tension d'entrée comme suit :

$$M = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{1-D}
 \tag{5.16}$$

Ainsi, le convertisseur boost fonctionne effectivement comme un élévateur de tension, comme le montre la Figure (5.10).

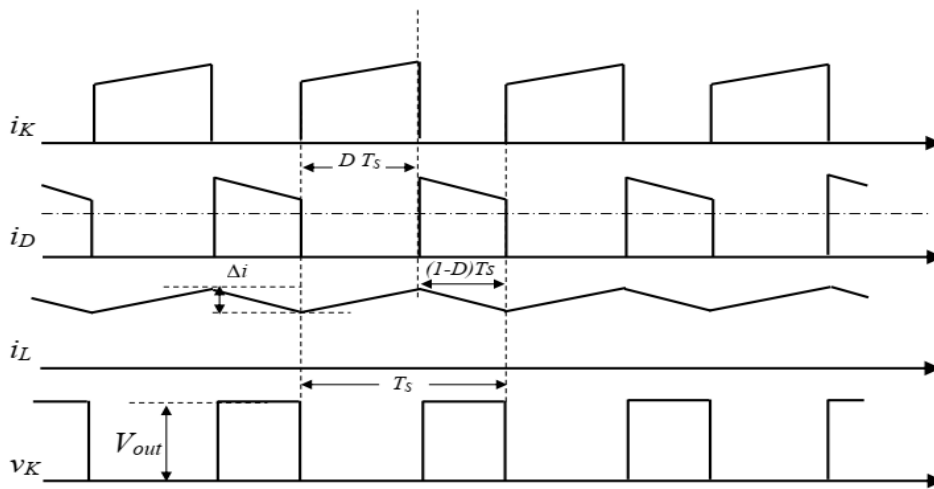


Figure 5.10 : Formes d'ondes tension et courant.

V.5 Configuration et conception du système pour la simulation numérique

La structure du PV-UPQC est montrée dans la Fig.1. Le PV-UPQC est conçu pour un le système présenté dans le chapitre 04 à savoir : une alimentation triphasée, un compensateur

en parallèle et d'un compensateur en série connectés à un bus DC commun. Le compensateur parallèle est connecté du côté de la charge. Le compensateur en série fonctionne en mode de contrôle de la tension et compense les creux/hauts de tension du réseau. Les compensateurs parallèle et série sont intégrés au réseau via des impédances d'interface. Un transformateur d'injection en série est utilisé pour injecter la tension générée par le compensateur en série dans le réseau. La charge utilisée est une charge non linéaire. Pour le système photovoltaïque solaire est directement intégré au lien CC de l'UPQC par 2 configurations :

- La 1ère configuration : le système est intégré au lien de CC à travers un convertisseur boost, voir figure 5.11.
- Le 2ème configuration : le système est intégré au lien de CC à travers une capacité et sans convertisseur boost avec une boucle de réglage pour la tension V_{dc} , voir figure 5.12.

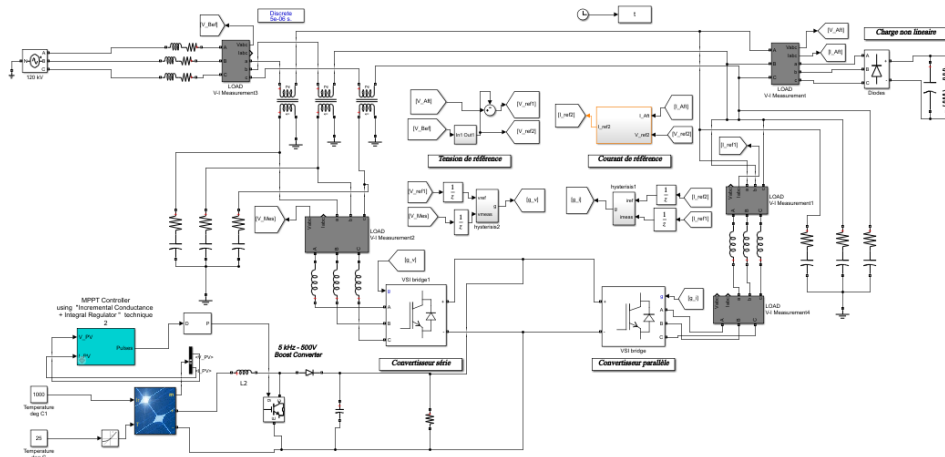


Figure 5.11 :1ère configuration de la structure du PV-UPQC.

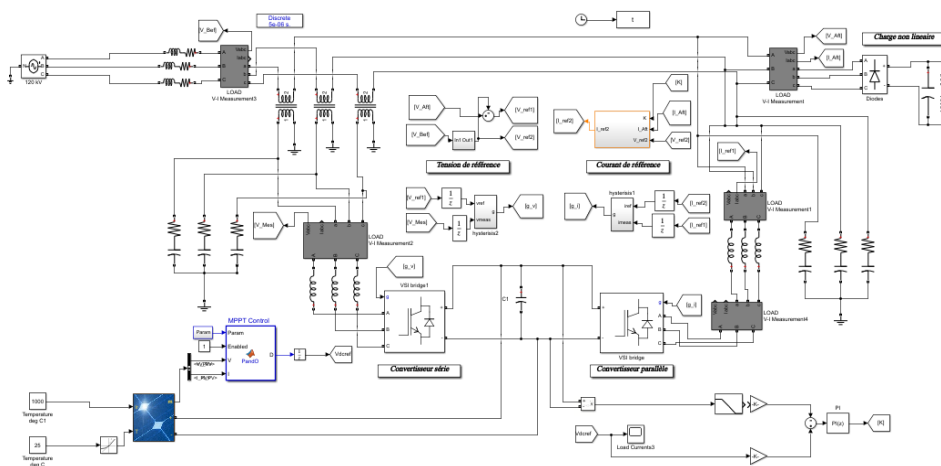


Figure 5.11 :2ème configuration de la structure du PV-UPQC.

Les paramètres des deux configurations sont affichés sur les tableaux 5.1 et 5.2.

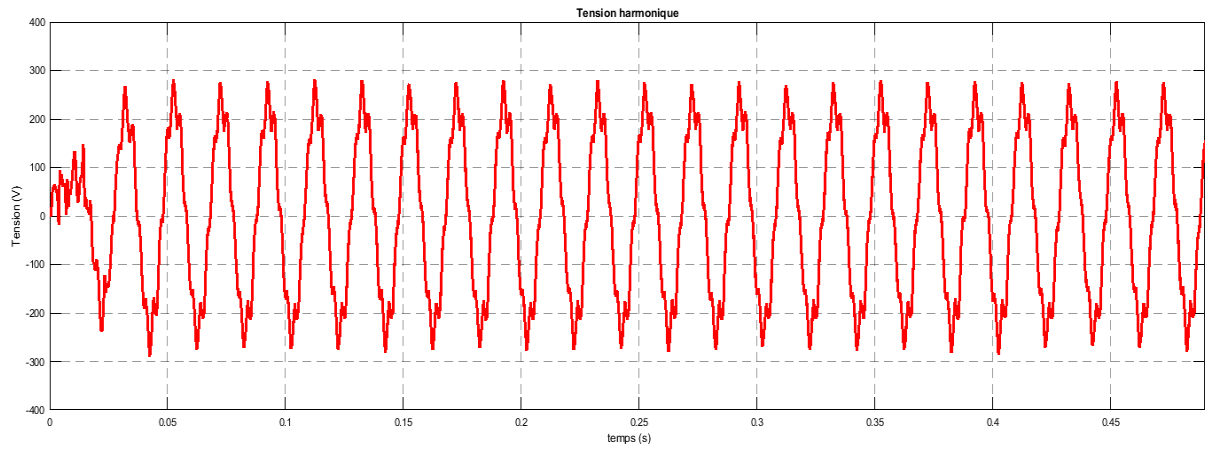
TABLE.5.1 Paramètres de système pour la 1^{ère} configuration.

Paramètre		Valeur
Cellule PV	Puissance max	200.112 W
	Tension à circuit ouvert Voc	32.9 V
	Tension à la puissance maximale Vmp	26.4 V
	Coefficient de température de Voc	-0.36099 %deg.C
	Cellules par module	54 Ncell
	Courant de court-circuit Isc	8.21A
	Courant à la puissance maximale : Imp	7.58A
	Coefficient de température de Isc	0.102 %deg.C
	Courant généré par la lumière IL	8.2311 A
	Courant de saturation de la diode I0	3.0465e-10 A
	Facteur d'idéalité du diode	0.98858
	Résistance shunt Rsh	126.9934 Ω
	Résistance serier Rs	0.32653 Ω
Nbr de cellule	Cellules en séries	26
	Cellules en parallèles	06
Boost convertisseur	Resistance de boost	29 Ω
	Inductance de boost	90e-6 H
	Capacité de boost	0.24μF
Température ambient		25°
L'irradiante solaire		1000

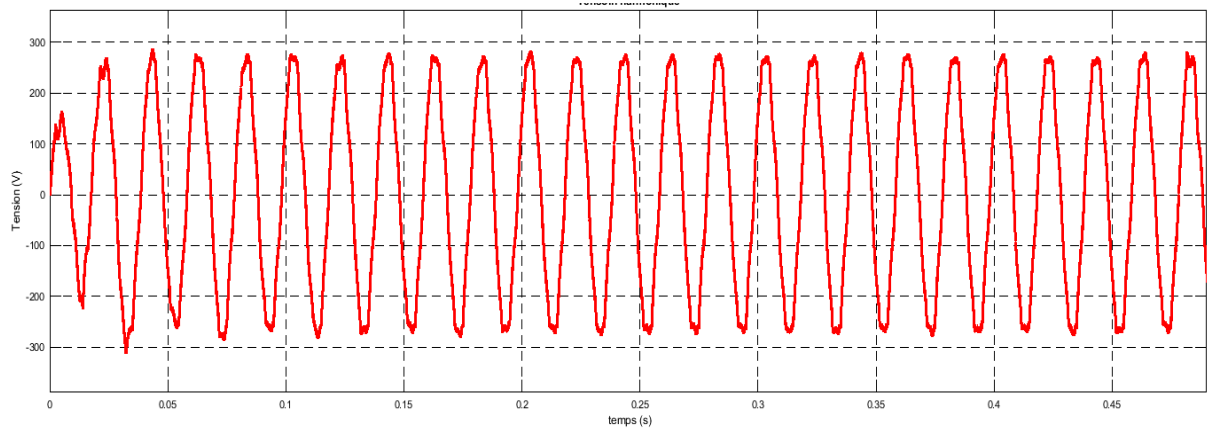
TABLE.5.2 Paramètres de système pour la 2^{ème} configuration.

Paramètres		Valeur
Cellule PV	Puissance max	200.112 W
	Tension à circuit ouvert Voc	32.9 V
	Tension à la puissance maximale Vmp	26.4 V
	Coefficient de température de Voc	-0.36099 % deg.C
	Cellules par module	54 Ncell
	Courant de court-circuit Isc	8.21A
	Courant à la puissance maximale : Imp	7.58A
	Coefficient de température d'Isc	0.102 %deg.C
	Courant généré par la lumière IL	8.2311 A
	Courant de saturation de la diode I0	3.0465e-10 A
	Facteur d'idéalité du diode	0.98858
	Résistance shunt Rsh	126.9934 Ω
	Résistance serier Rs	0.32653 Ω
Nbr de cellule	Cellules en séries	21
	Cellules en parallèles	06
Température ambient		25°
L'irradiante solaire		1000
Capacité C _{dc}		6668e-6 F
Kp		10
Ki		12

Avant l'installation du PV-UPQC, il est évident sur les figures 4.12 et 4.13 que la charge non linéaire a un impact sur la tension et le courant de source en termes de déformation sinusoïdale. De plus, les figures 4.14 et 4.15 montrent clairement que les taux de distorsion harmonique THD de tension et de courant de source sont 23,95% et 18,73%, ce qui est très éloigné des normes CEI 61000 et IEEE 519-1992 qui exigent une valeur de THD inférieure à 5%. Donc l'objectif est de diminuer les taux de distorsion d'harmonique.

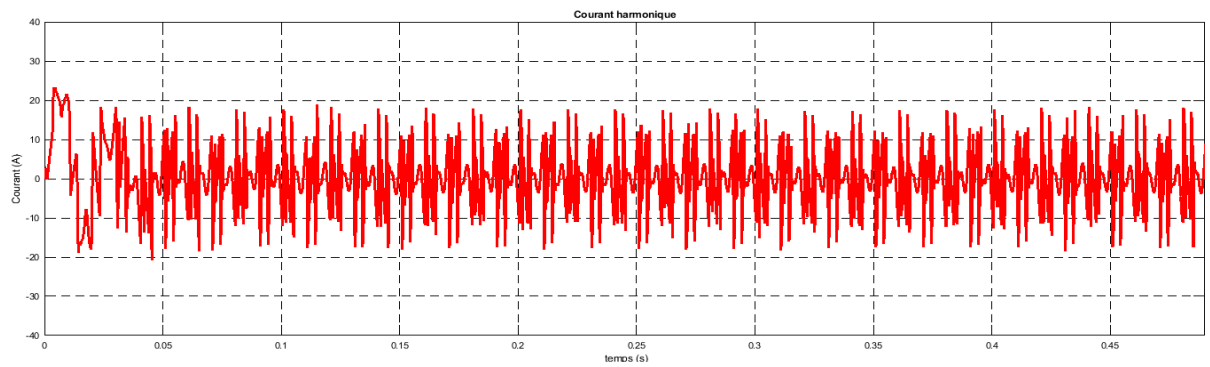


a) 1^{ère} configuration.

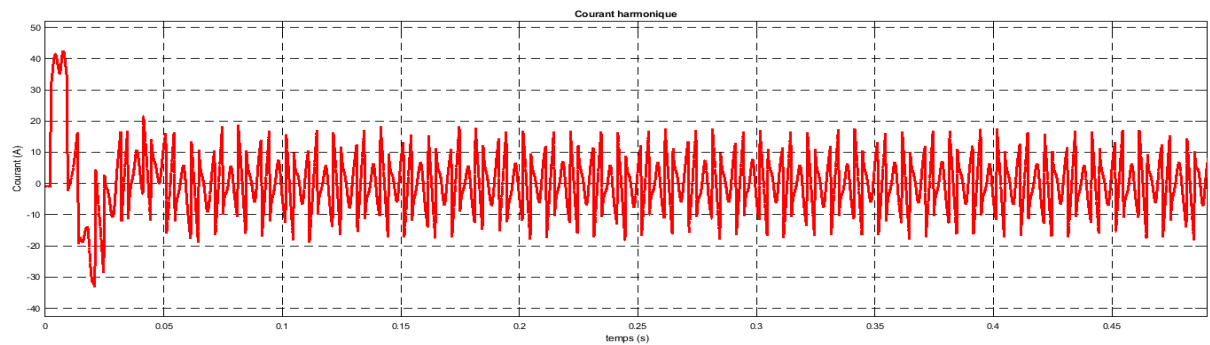


b) 2^{ème} configuration.

Figure 5.12: Allure de tension harmonique identifié.



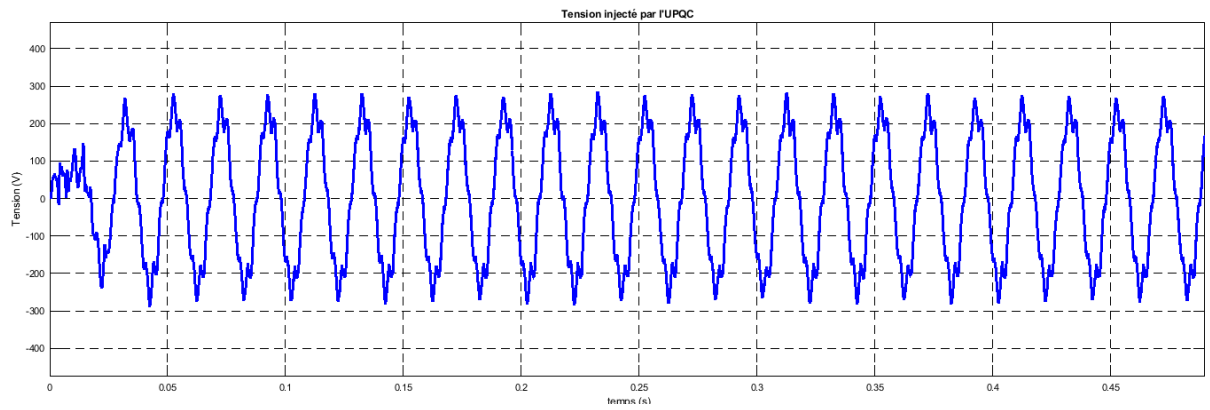
a) 1^{ère} configuration.



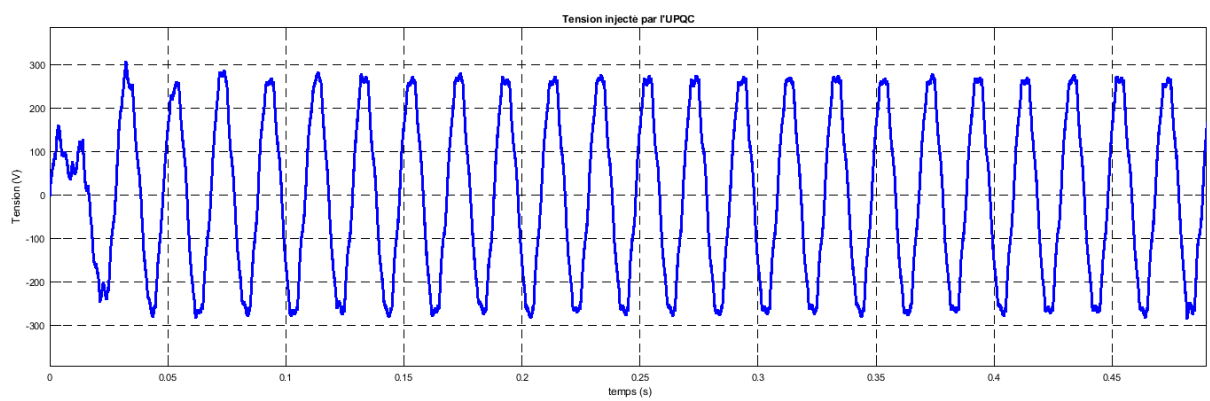
b) 2^{ème} configuration.

Figure 5.13: Allure de courant harmonique

Les figures 5.12 & 5.13 illustrent la tension et le courant harmonique identifiés nécessaires pour purifier le réseau, ces derniers présentant une forme non sinusoïdale.

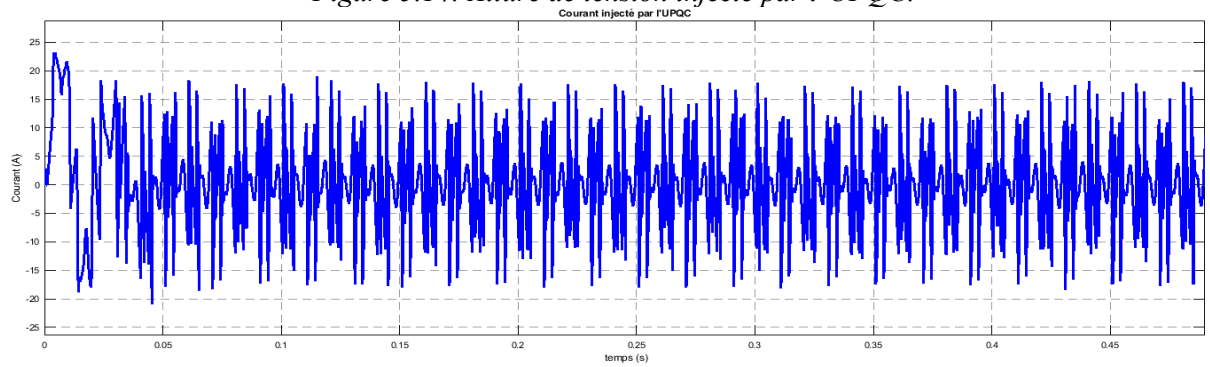


a) 1^{ère} configuration.

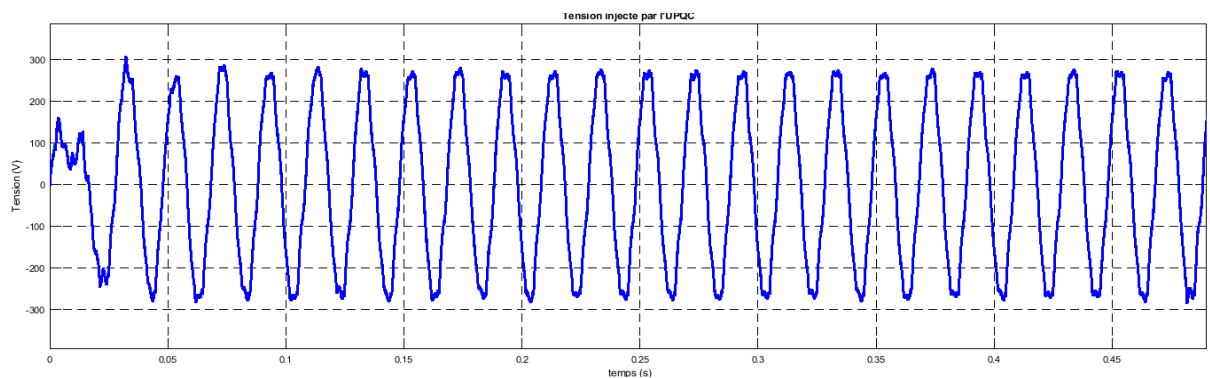


b) 2^{ème} configuration.

Figure 5.14: Allure de tension injecté par l'UPQC.



a) 1^{ère} configuration.



b) 2^{ème} configuration.

Figure 5.15: Allure de courant injecté par l'UPQC.

Les Figures 5.14 & 5.15 démontrent la tension et le courant que l'UPQC injecte dans le réseau. Il est possible de constater que la forme de cette tension et ce courant est quasiment identique à celle des figures 5.12 & 5.13.

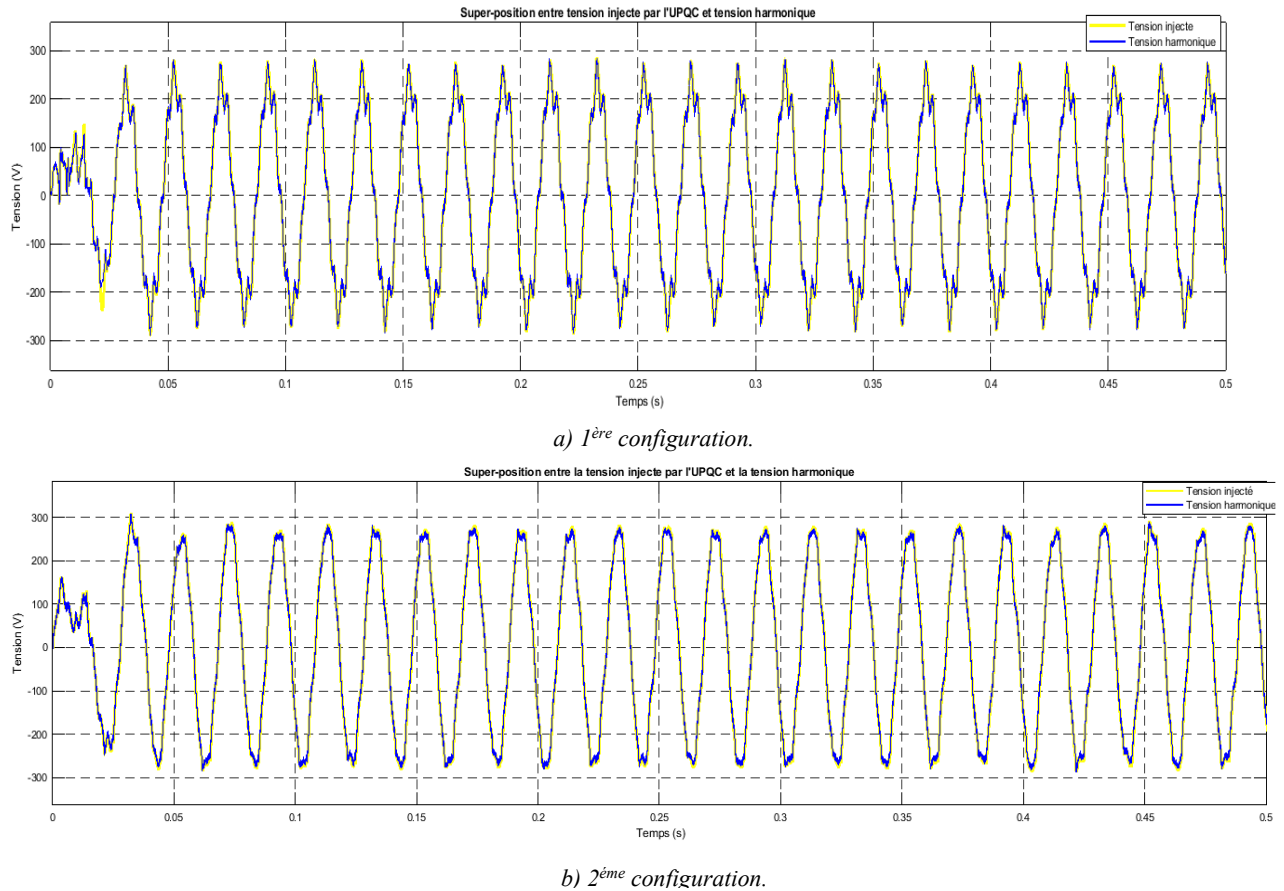
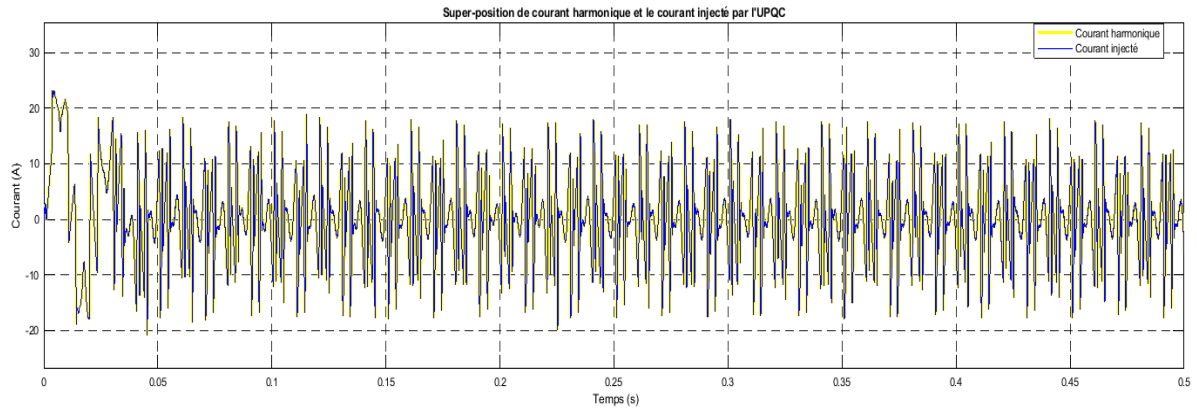


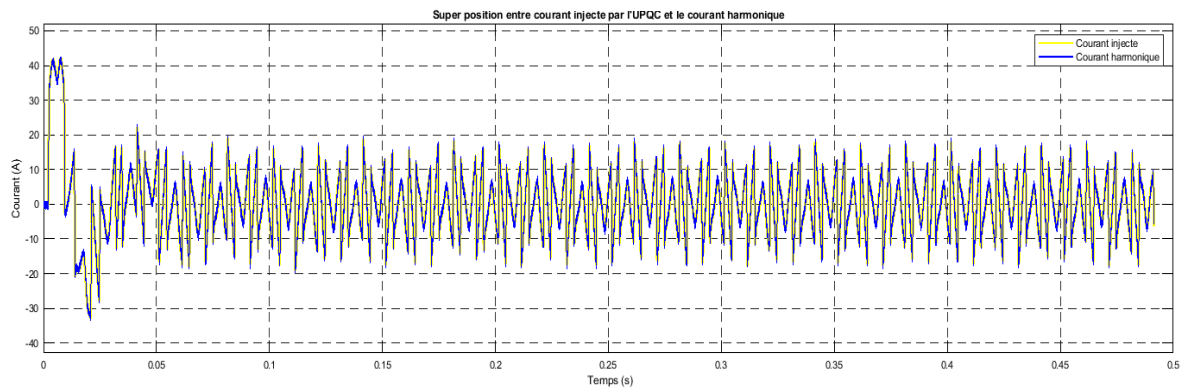
Figure 5.16: Super position entre tension injectée et tension harmonique.

Afin de vérifier le bon fonctionnement du système PV-UPQC, la Figure 5.16 présente la superposition de la tension compensatrice injectée par le filtre actif série et de la composante harmonique de la tension du réseau. On observe que les deux signaux présentent une forte similitude en amplitude et en forme d'onde, ce qui confirme la bonne identification des perturbations par le système. Cette correspondance montre que la tension générée par le filtre actif série reproduit correctement la composante harmonique à compenser, permettant ainsi une atténuation efficace des distorsions de tension et une amélioration de la qualité de l'énergie.

De la même manière, la Figure 5.17 présente la superposition entre le courant harmonique et le courant compensateur généré par le filtre actif parallèle. La forte similitude en amplitude et en forme d'onde confirme la bonne identification des perturbations et la génération correcte du courant de compensation. Cette correspondance met en évidence l'efficacité du système PV-UPQC dans l'atténuation des distorsions du courant et l'amélioration de la qualité de l'énergie

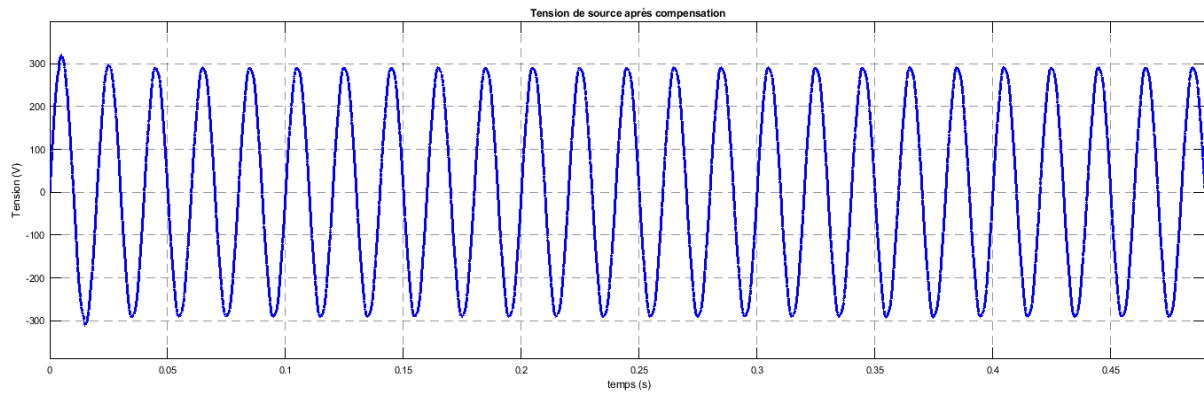


a) 1^{ère} configuration.

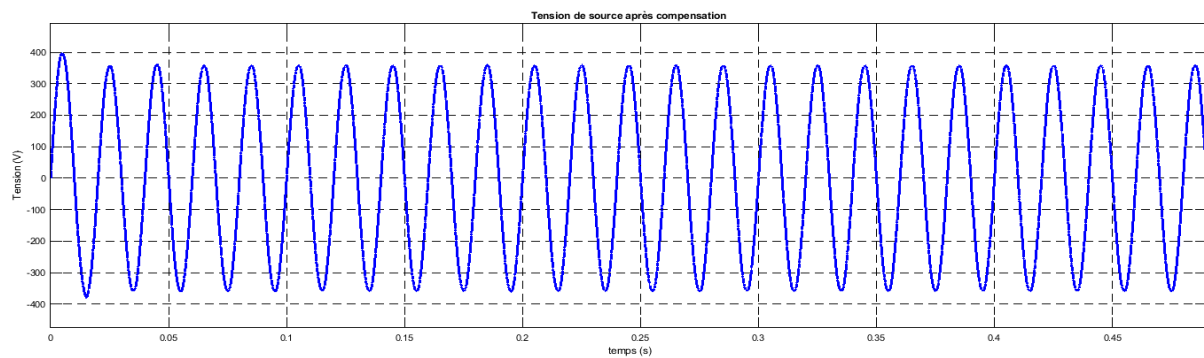


b) 2^{ème} configuration.

Figure 5.17: Super position entre courant injecté et courant harmonique.

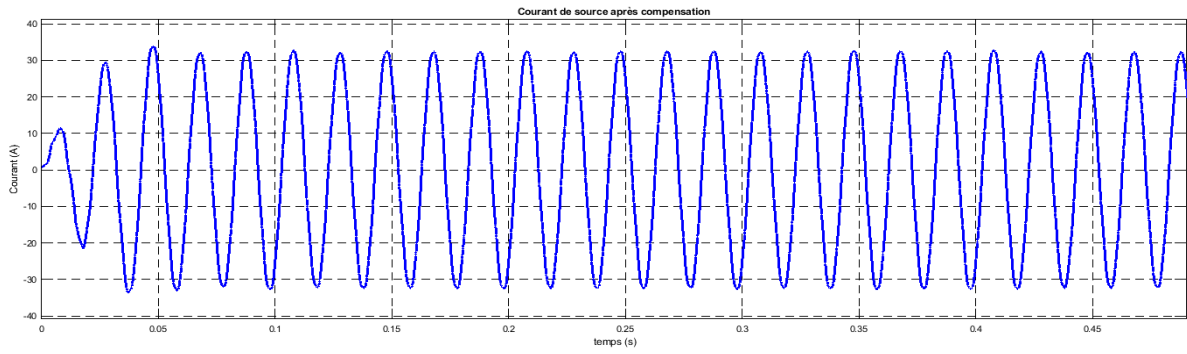


a) 1^{ère} configuration.

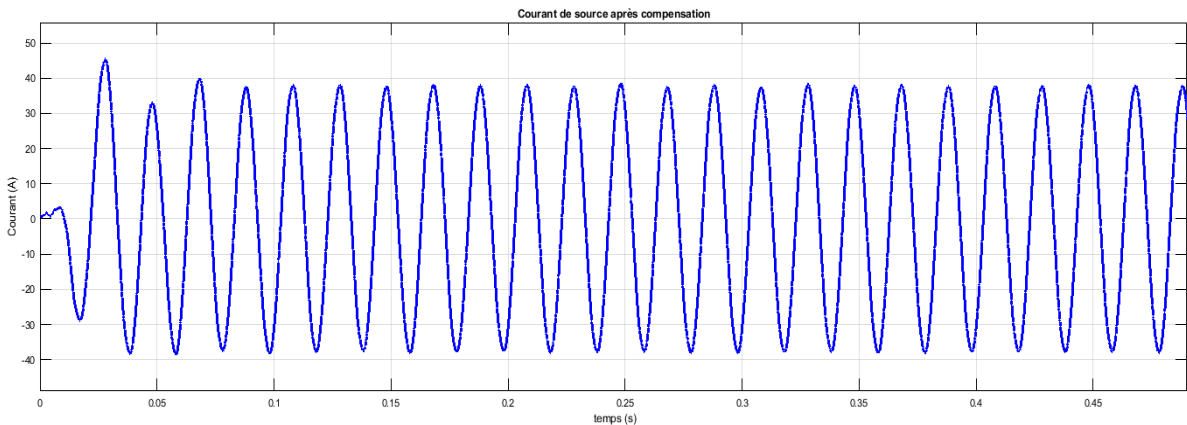


b) 2^{ème} configuration.

Figure 5.18: Allure de tension de source après compensation.



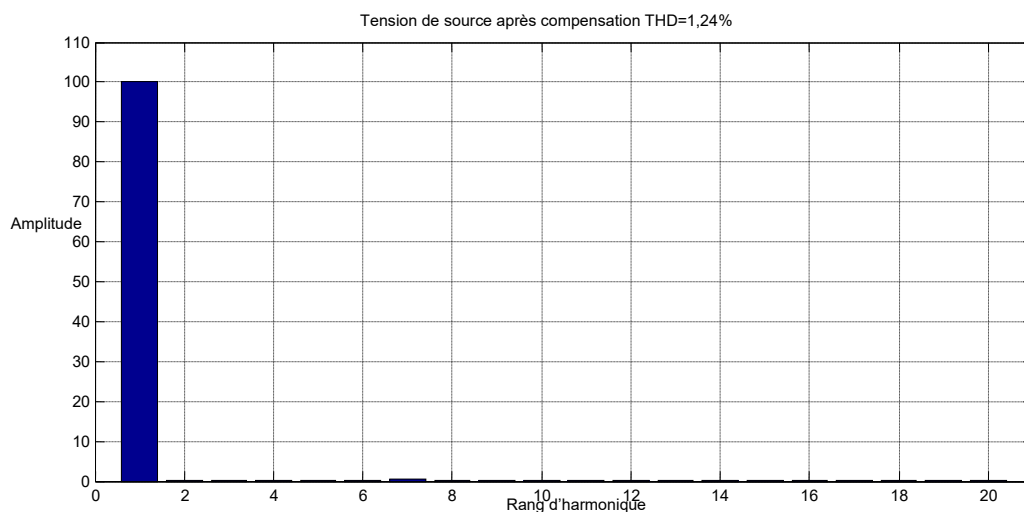
a) 1^{ère} configuration.



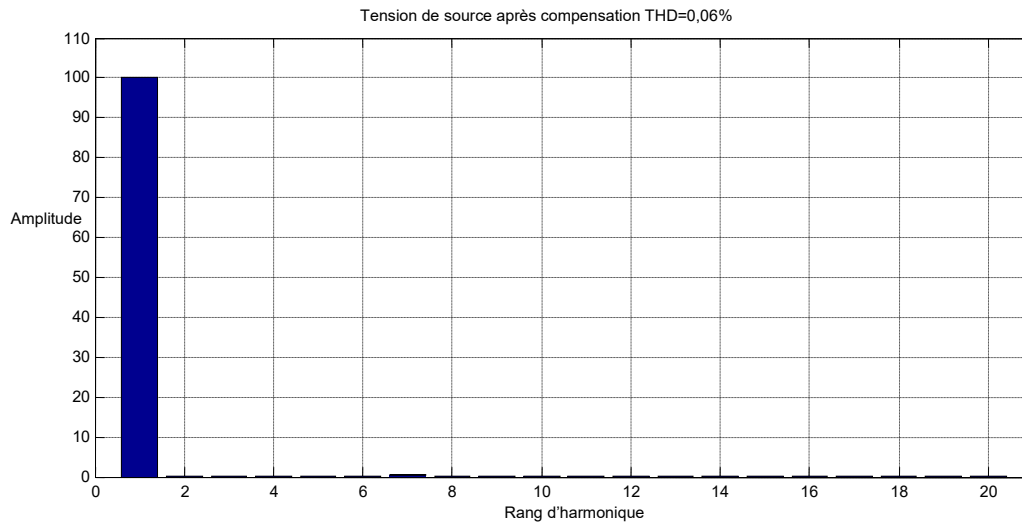
b) 2^{ème} configuration.

Figure 5.19: Allure de courant de source après compensation.

Dès que l'UPQC a introduit la tension et le courant de référence reproduits dans le réseau, ce dernier est désormais sinusoïdal sans aucune perturbation. L'obtention de la nature sinusoïdale de la tension et du courant de source indique que si notre unité électrique capable d'injecter une tension et un courant conformes à sa référence, nous obtiendrons une tension et un courant sinusoïdaux. Les figures 5.18 & 5.19 présentent la tension et le courant de source après compensation.



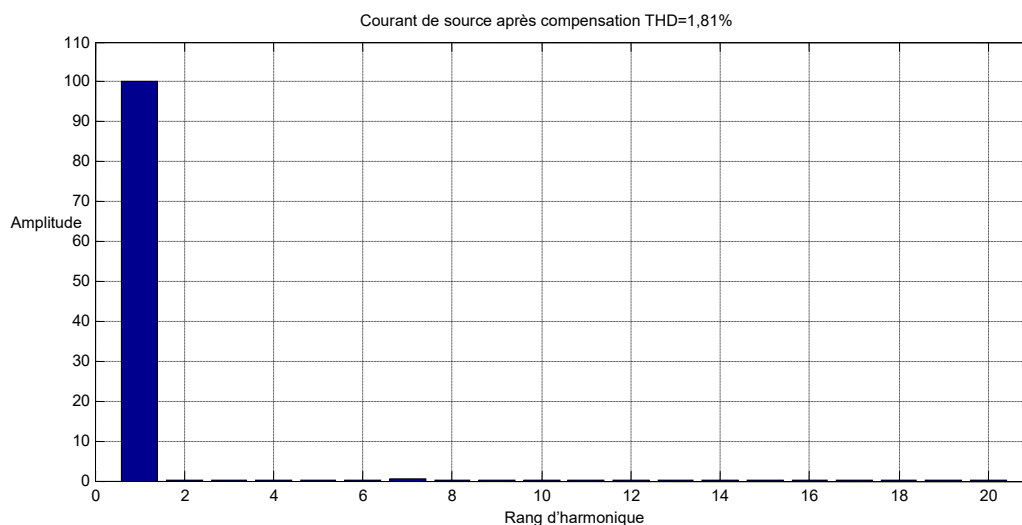
a) 1^{ère} configuration.



b) 2^{ème} configuration.

Figure 5.20: Spectre harmonique de la tension source après compensation.

L'analyse spectrale de la tension et du courant de la source est présentée dans les Figures 5.20 et 5.21. Ces spectres montrent que les composantes harmoniques ne sont pas totalement éliminées, mais efficacement atténuées grâce à l'action du système PV-UPQC. Après compensation, une amélioration significative de la qualité de l'énergie est observée. En effet, le taux de distorsion harmonique de la tension (THD) a été réduit de 19,56 % à 1,24 % pour la première configuration et à seulement 0,06 % pour la deuxième configuration. De même, le THD du courant est passé de 18,75 % à 1,81 % pour la première configuration et à 2,08 % pour la deuxième configuration. Ces résultats confirment l'efficacité du système proposé dans la réduction des distorsions harmoniques et démontrent que les performances obtenues respectent les limites recommandées par la norme IEEE 519, garantissant ainsi une amélioration notable de la qualité de l'énergie électrique.



a) 1^{ère} configuration.

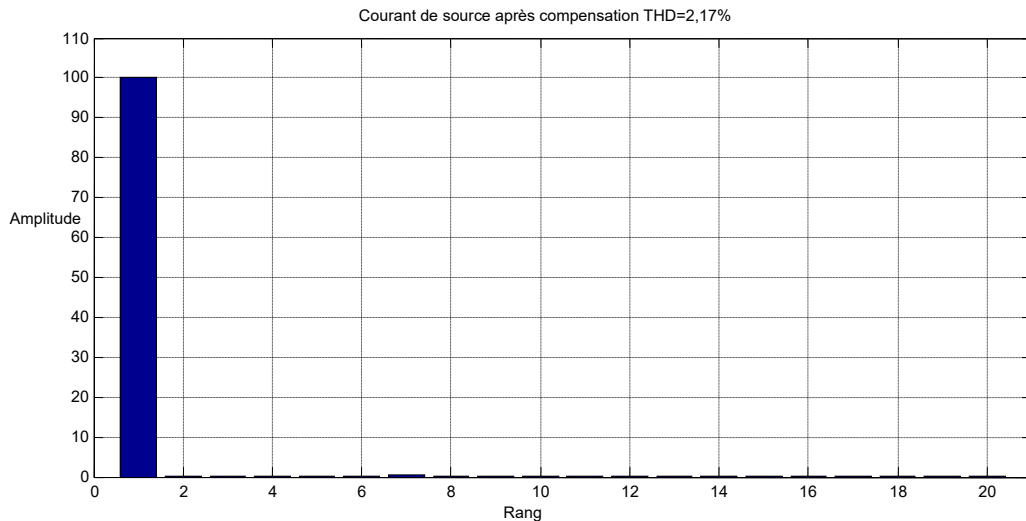


Figure 5.21: Spectre harmonique du courant source après compensation.

V.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la définition de l'énergie renouvelable et les différentes sources de cette énergie, puis nous avons exposé le système photovoltaïque et ses composants en commençant par la modélisation électrique d'une cellule photovoltaïque, puis par le principe du suivi MPPT et enfin par le convertisseur Boost. La 2^e partie de ce chapitre a été consacrée à l'association de systèmes photovoltaïques à un UPQC afin de procéder à la compensation d'un système alimentant une charge non linéaire.

Deux configurations de l'association PV-UPQC ont été présentées, l'une à travers le convertisseur boost et l'autre par une capacité en présence d'une boucle de régulation et d'un nombre de cellules en série plus bas. Les résultats sont très concluants. Ce qui démontre la performance de la compensation à travers un UPQC.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Les enjeux liés à la qualité de l'énergie électrique attirent de plus en plus l'attention et se transforment en un véritable défi pour les usagers d'électricité. Les problèmes de creux et de surtension, ainsi que la production d'harmoniques, se multiplient dans le système de distribution. Ces défis sont le résultat de l'usage grandissant des charges non linéaires, telles que les électroniques de puissance modernes et les équipements contrôlés par ordinateur. Ces difficultés peuvent potentiellement causer des dommages aux équipements sensibles et entraîner des pertes coûteuses pour les réseaux électriques. La mauvaise qualité de l'alimentation électrique engendre des problèmes dans les installations électriques et provoque un comportement inhabituel des charges. Plusieurs dispositifs électroniques, responsables de la demande croissante de puissance réactive, produisent des charges déséquilibrées et des tensions fluctuantes. Ces problèmes peuvent être résolus en partie par des filtres passifs. Néanmoins, ce genre de filtre n'est pas en mesure d'éviter le problème des fluctuations imprévisibles des formes d'onde, de la tension de charge et du courant de source. Afin d'assurer le respect des normes de qualité énergétique, différents modèles de filtres actifs de puissance (FAP) sont actuellement couramment employés. Dans cette thèse, on a examiné et analysé le conditionneur de qualité unifié dans le but d'optimiser la qualité de l'énergie et confirmé son efficacité. L'UPQC représente un filtre de puissance actif hybride avancé qui se sert d'un APF en série pour supprimer les problèmes de tension comme les creux/sursauts de tension, les variations et les déséquilibres, tandis qu'un APF en parallèle est utilisé pour minimiser les harmoniques dans les harmoniques de courant.

De ce fait, le 1^{er} chapitre a été consacré à la définition de la qualité de l'énergie ainsi qu'aux solutions existantes pour faire face aux différentes perturbations qui peuvent affecter la qualité de l'énergie.

Pour le 2^e chapitre, on a développé une parité de l'UPQC, à savoir filtre actif série, par la présentation de sa structure générale et les différentes stratégies de contrôle.

Dans la première partie du troisième chapitre, on a présenté une description générale du filtre actif parallèle, à travers une étude détaillée de la partie puissance et de la partie commande. Dans la deuxième partie, nous avons abordé les différentes techniques d'identification des courants harmoniques appliqués au filtre actif parallèle.

La quatrième a été orientée vers l'étude du UPQC. La partie première est dédiée au principe de fonctionnement de l'UPQC ainsi qu'aux trois classifications possibles pour l'UPQC, à

savoir : classification en fonction du système d'alimentation, classification en fonction du convertisseur, classification UPQC en fonction de la configuration ; pour la partie suivante, les résultats de simulation de compensation d'un réseau sont très concluants. Dans le chapitre suivant, nous avons examiné en détail le système photovoltaïque, allant de la source solaire ; modélisation d'une cellule photovoltaïque jusqu'au principe du suivi MPPT, et en terminant par le convertisseur boost présentes dans le système.

Puis nous avons procédé à l'association PV-UPQC, en deux modes de configuration : à travers le convertisseur boost et à travers une capacité en présence d'une boucle de régulation ; Les résultats ont démontré l'efficacité des deux configurations en matière d'amélioration de la qualité de l'énergie. Toutefois, la deuxième configuration s'est révélée plus avantageuse du point de vue économique, avec une réduction d'environ 23 % du nombre de cellules photovoltaïques en série, tout en conservant des performances comparables.

À partir des résultats obtenus dans ce travail, plusieurs perspectives de recherche peuvent être envisagées. Une première perspective concerne la validation expérimentale du système PV-UPQC sur un banc d'essai afin de confirmer les performances observées en simulation. Une deuxième perspective porte sur l'intégration de systèmes de stockage d'énergie, tels que les batteries ou les supercondensateurs, afin d'améliorer la gestion de l'énergie et la stabilité du bus continu. Une troisième perspective consiste à étudier le comportement du système sous des conditions sévères, notamment les variations rapides d'irradiation, l'ombrage partiel ou les défauts du réseau. Enfin, l'extension du système PV-UPQC vers les micro-réseaux et les réseaux intelligents, associée à l'utilisation de stratégies de commande avancées, constitue une voie prometteuse pour renforcer la robustesse et améliorer les performances globales du système.

En conclusion, ce travail a permis d'approfondir l'étude de la qualité de l'énergie électrique et de démontrer l'efficacité de l'association PV-UPQC comme solution performante pour l'amélioration simultanée de la qualité de l'énergie et l'intégration des sources d'énergie renouvelable dans les réseaux électriques modernes.

Bibliographie

- [1]. V.K.Sood, « *HVDC and FACTS Controllers-Applications of static converters in power systems* », Boston, MA: Kluwer, 2004.
- [2]. M.S. Koor; M. Machmoum, « *Simplified Analogical Control of a Unified Power Quality Conditioner* », IEEE 36th Power Electronics Specialists Conference, Jun.16, 2005.
- [3]. IEEE Recommended practices and requirements for Harmonic control in electrical power systems, IEEE Standard 519-1992, 1992.
- [4]. IEEE Standard for interconnecting Distributed resources with electric power systems, IEEE Standard 1549-2003, 2003.
- [5]. A.Ghosh and G.Ledwich, « *Power Quality Enhancement using custom power devices* », Boston, MA: Kluwer, 2002.
- [6]. N.G.Jayanti, M.Basu, M.F.Conlon and K.Gaughan, « *Optimising the rating of the UPQC for applying to the fault ride through enhancement of wind generation* », in Proc. 41st Int. Univ. Power Eng. Conf. Sep 6-8,2006, pp 123-127.
- [7]. Ardjoun, S. A. E. M., Denai, M., & Abid, M. « *Robustification du contrôle des éoliennes pour une meilleure intégration dans un réseau déséquilibré* ». In 2019 Algerian Large Electrical Network Conference 2019, May (pp. 77-82). Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)
- [8]. G. Abad, J. López, M. A. Rodríguez, L. Marroyo, G. Iwanski. « *Introduction to a wind energy generation system, in Doubly Fed Induction Machine* ». Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2011, pp. 1–85
- [9]. T. R. Ayodele, A. Jimoh, J. L. Munda, A. J. Tehile. « *Challenges of grid integration of wind power on power system grid integrity: a review* ». International journal of Ren. Ener. Res. (IJRER), 2, 4, pp. 618-626 (2012).
- [10]. Bayo, A. H. « *Voltage fluctuations and flicker* ». Handbook of power quality, pp 135-162. 2008.
- [11]. J. Kotturu, « *Investigation on power quality improvement using UPQC* », A Thesis of Doctor of philodophy, Indian Institute of technology roorkee, February, 2019.
- [12]. J. Arrillaga & N.R. Watson. « *POWER SYSTEM HARMONICS* », University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, John Wiley & Sons, 2003.
- [13]. A. Arora, « *Solutions innovatrices pour l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique* », Revue Qualité De L'énergie Electrique ABB 3/1998.
- [14]. A. Baggini « *Handbook of power quality* », John Wiley & Sons, 2008.
- [15]. D. Ogheneovo Johnson, H. Kabiru Alani, « *Issues of Power Quality in Electrical Systems* », International Journal of Energy and Power Engineering, vol 5, N°4, pp148-154,2016.
- [16]. M.M. Abdusalam, « *Structures et stratégies de commande des filtres actifs parallèle et hybride avec validations expérimentales* », Thèse Doctorat. Université Nancy-I 2008.
- [17]. M.A.E. Alali, « *Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension* », Thèse Doctorat. Université Strasbourg I 2002.

- [18]. J. Arrillaga & N.R. Watson, « *Power system harmonics* », University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, John Wiley & Sons, 2003.
- [19]. S.A. Tadjer, « *Etude d'un système de compensation d'harmonique en utilisant un générateur photovoltaïque 'GPV'* », Mémoire de Magister. Université de Boumerdes 2008.
- [20]. F.Z. Peng, G.J. Su, and G. Farquaharson, « *A series LC filter for harmonic compensation of ac drives* », Power Electronics Specialists Conference, PESC 99. 30th annual IEEE, Vol. 1, pp. 213-218, 1999.
- [21]. R. Sanae, « *Etudes de Méthodes de Filtrage des Harmoniques dans les Réseaux Électriques de Distribution* », Génie électrique, Université du Québec à Trois Rivières (UQTR), 2002.
- [22]. C. Collornbet & J. S. J. M. Lupin, « *Perturbations Harmoniques dans les réseaux pollués et leur traitement* », Cahier Technique 152, Schneider Electric, Septembre 1999.
- [23]. M. Gerin, « *Harmoniques et Transformateurs* », Technical Report vol. T6, Schneider Electric, Février 2004.
- [24]. J.R. Macedo Jr, J.W. Resende, M.I Samesima, « *Shunt tuned filtre on LV side of distribution systems: design and performance* », in : 11 th International conference on harmonics and Quality of Power, pp 94-99, September 12-15, 2004.
- [25]. N.H. Mendalek, « *Qualité de l'onde électrique et moyens de mitigation* », Thèse doctorat, Ecole de technologie supérieure, Université du Québec 2003.
- [26]. Z.P. Fang, « *Application issues of active power filters* », IEEE Industry Applications Magazine., Vol. 4, pp. 21-30, Sept.-Oct. 1998.
- [27]. O.B. Amadou, A.O. Barry, « *Analyse des filtres actifs par la méthode de la compensation par impédances harmoniques* », Partie II, Rapport n° Ireq-2000-111c, juin 2000.
- [28]. M. El-Habrouk, M.k. Al-haddad, A. Chandra, « *A Review of active filters for power quality improvement* », IEEE Trans, on Ind, Electronics, Vol.46, No.5, October 1999.
- [29]. G. H. Choe, M.H. Park, « *A new injection method for AC harmonie élimination by active power filter* », IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol.35, N°1, pp. 141-147, February 1988.
- [30]. H. Fujita and H. Akagi, « *The Unified Power Quality Conditioner : The Integration of Series - and Shunt- Active Filter* », IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 13, No. 2, March 1998.
- [31]. M. Magraoul, « *Validation de techniques de commande d'un filtre actif parallèle* », Mémoire comme exigence partielle à l'obtention de la maîtrise en génie électrique. Université du Québec 2007.
- [32]. S. Rechka, « *Etude de méthodes de filtrage des harmoniques dans les réseaux électriques de distribution* », Mémoire comme exigence partielle pour l'obtention d'un diplôme de maître en sciences appliquées en génie électrique. Université du Québec à Trois-Rivières 2002.
- [33]. T. Deflandre & P. Murras, « *Les harmoniques sur les réseaux électriques* », Paris: Eyrolles, 1998.
- [34]. N. Mendalek, « *Compensation active dans un réseau triphasé* », Mémoire de maîtrise, l'École de technologie supérieure, 1997.

- [35]. C. Fetha, « *Analyse et amélioration de l'indice de la non-symétrie de tension dans la qualité de l'énergie électrique* », Thèse Doctorat. Université de Batna 2006.
- [36]. A.J. Visser, T. Mouton, J.H.R. Enslin, « *Directed-coupled cascaded multilevel sag compensator* » IEEE 31st annual power electronics specialists conference, 18-23 June 2000 Galway, Ireland.
- [37]. G. Alarcon, C. Nunez, V. Cardenas, M. Olivier, « *Design and implementation of a 3-phase series active filter to compensate voltage disturbance* » CIEP-2000, pp. 93-98, Acapulco, Mexico, October 2000.
- [38]. M.A.E. Alali, « *Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension* », Thèse Doctorat. Université Strasbourg I 2002.
- [39]. A. Campos, G. Joos, P. Ziogas, J. Lindsay, « *Analysis and design of a series voltage compensator for three-phase unbalanced sources* », IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol.39, N°2, P. 159-167, April 1992.
- [40]. J. W. Dixon, G. Venegas, L. Moran, « *A series active power filter based on sinusoidal current-controlled voltage-source inverter* », IEEE Transaction on Industrial Electronics, vol. 44, NO. 5, PP. 612-620, October 1997.
- [41]. R. Tounsi, « *Développement d'un contrôle commande pour un compensateur série de creux de tension. Validation par simulation du fonctionnement avec des charges industrielles* » Thèse doctora de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, 30 Octobre 1999.
- [42]. L.A. Moràn, I. Pastorini, J. Dixon, R. Wallace, « *A fault protection scheme for series active power filters* », IEEE Trans. on power electronics, vol.14, N°5, P. 928-938, September 1999.
- [43]. F.Mekri, « *Commande robuste des conditionneurs actifs de puissance* », Thèse de Doctorat en génie électrique, Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes, (France) 2007
- [44]. Ab Hamadi., S. Rahmani, K. Al-Haddad, « *A new hybrid series active filter configuration to compensate voltage sag, swell, voltage and harmonics and reactive power* », IEEE, International Symposium on Industry Electronics (ISIE), 2009, July 5-8, Seoul, Korea, pp.286–291.
- [45]. S.Chennai, M.T Benchouia, « *A simplified control scheme for three-phase three-level (NPC) series active filter to compensate all voltage perturbations* », Acta Electrotechnica et Informatica, AEI, ISSN 1338-3957, Vol.11(2011) No.4, pp.52-59.
- [46]. A. Sannino, J. Svensson, « *A series connected voltage source converter for voltage sag mitigation using vector control and a filter compensation algorithm* », 35th IAS annual meeting of the 2000 IEEE Industry Applications Conference, 8-12October 2000 Rome, Italy, pp.2476-2481.

- [47]. N. Hamouda, K. E. Hemsas, H. Benalla, « *Etude comparative des techniques de filtrage actif sélectif par référentiel synchrone de Park d-q et approche FMV* », Mediterranean Journal of Modeling and Simulation, Vol 01, pp: 089-098, 2014.
- [48]. S. Othman, « *Modélisation et commande à base d'une représentation par réseau de Pétri d'un filtre actif parallèle avec un onduleur multicellulaire série* », Thèse de Doctorat, École Nationale Française Supérieure de l'Électronique et de ses Applications, 2021.
- [49]. M. Magraoul, « *Validation de techniques de commande d'un filtre actif parallèle* », mémoire comme exigence partielle à l'obtention de la maîtrise en génie électrique, école de technologie supérieure, université du Québec, 2007.
- [50]. S. Beaulieu « *Etude et mise au point d'un filtre actif d'harmoniques en vue d'améliorer la qualité de l'alimentation électrique* », Mémoire présente comme exigence partielle de la maîtrise en ingénierie. Université du Québec a Chicoutimi 2007.
- [51]. S. Karimi, « *Continuité de service des convertisseurs triphasés de puissance et prototypage "FPGA in the loop": application au filtre actif parallèle* », Thèse Doctorat. Université Nancy-I 2009.
- [52]. N. Hamouda , H. Benalla , B. Babes, « *Impact Majeur du Condensateur de Filtrage sur la Qualité d'un Filtre Actif Parallèle Contrôlé par l'Approche d'un FMV* », International conference on electrical engineering CIGE 2013.
- [53]. D. G. Holmes and A. T. Lipo, « *Pulse Width Modulation for Power Converters: Principles and Practice* », Wiley-Blackwell, Hoboken, NJ, October 2003.
- [54]. M. Boudjedaimi, P. Wira, D. Ould Abdeslam, S. Djennoune, J.P. Urban, « *Commande d'un onduleur avec des approches neuromimétiques pour la compensation des courants harmoniques dans les réseaux électriques* », International Conference on Electrical Engineering and Its Applications (ICEEA'2008), Sidi Bel-Abbes, Algeria, May 20-21, 2008.
- [55]. A. Bouarfa, « *Méthodes de commande par allocation de convertisseurs statiques polyphasés, multi-niveaux De la modélisation à la mise en œuvre temps-réel* », Thèse Doctorat, l'Université Toulouse 3 Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier), 2017.
- [56]. S. FERNANDEZ , « *Comparaison des performances électriques d'un onduleur triphasé deux niveaux à commandes directes et indirectes connecté au réseau* », Thèse Doctorat, Université de Lille 1, 2013.
- [57]. F. B. Youssef, L. Sbita, « *Sensors fault diagnosis and fault tolerant control for grid connected PV system* International Journal of Hydrogen Energy, vol 42, pp 8962- 8971, 2017.
- [58]. M. Derbeli, L. Sbita, M. Farhat, O. Barambones, « *Proton exchange membrane fuel cell—A smart drive algorithm* », In 2017 International Conference on Green Energy Conversion Systems (GECS) pp: 1-5, IEEE, 2017.

- [59]. A. Flah, L. Sbita, , « *A novel IMC controller based on bacterial foraging optimization algorithm applied to a high speed range PMSM drive* », Applied Intelligence, Vol 38, N°1, pp : 114-129, 2013.
- [60]. H. Djeghloud, « *Filtrage actif de puissance* », Thèse doctorat. Université de Constantine 2007.
- [61]. L. A. Morán, J. Dixon, & R. R. Wallace, « *A three-phase active power filter operating with fixed switching frequency for reactive power and current harmonic compensation* », IEEE Transactions on Industrial Electronics, pp.402-408, Vol.42, No.4, August 1995.
- [62]. L. Asiminoaei, F. Blaabjerg, S. Hansen, « *Evaluation of Harmonic Detection Methods for Active Power Filter Applications* », Conference APEC'05, vol. 1, pp. 635-641, Mars 2005.
- [63]. H. Akagi, A. Nabae, « *The p-q theory in their-phase systems under non sinusoidal condition* », ETEP, Vol. 3, N°. 1, Jan/Feb. 1993.
- [64]. H. Akagi, « *Control strategy and site selection of a shunt active filter for damping of harmonic propagation in power distribution systems* », IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.12, N°.1, pp: 354-363. 1997.
- [65]. M. Aredes, « *Active Power Line Conditioners* », Thèse de l'Université Technique de Berlin, 1996.
- [66]. S. Bhattacharya, T. M. Frank, D. M. Divan, B. Banerjee, « *Active Filter System Implementation* », IEEE Industry Application Magazine, 1998.
- [67]. K-L. Areerak and K-N. Areerak « *The comparison study of harmonic detection methods for shunt active power filters* », World Academy of Science, Engineering And Technology, Vol.46, 2010.
- [68]. A.L.D. Bermeo, « *Commandes avancées des systèmes dédiés à l'amélioration de la qualité de l'énergie : de la basse tension à la montée en tension* », Thèse Doctorat. Institut National Polytechnique de Grenoble 2006.
- [69]. M. Ucar, E. Ozdemir « *Control of a 3-phase 4-leg active power filter under non ideal mains voltage condition* », Electric Power Systems Research, pp.58-73, Vol.78, 2008.
- [70]. R. Kadam, K.A. Mulani, V.B Waghmare « *Voltage distortion at distribution side reduced by modified UPQC* », 3rd International Conference for Convergence in Technology (I2CT), Pune, India, pp.1-4, 2018.
- [71]. R.A. Wanjari, V.B Savakhande, M.A Chewale, P.R. Sonawane, R.M. Khobragade « *A review on UPQC for power quality enhancement in distribution system* », International Conference on Current Trends Towards Converging Technologies (ICCTCT), 2018.
- [72]. B. R. Lin, C. L. Huang « *Implementation of a shunt-series compensator for nonlinear and voltage sensitive load* », Proc. Power Electron. Motion Control Conf, pp. 1–5 Aug. 14–16, 2006.
- [73]. Y. Kolhatkar, S. Das « *Experimental investigation of a single-phase UPQC with minimum VA loading* », IEEE Trans. Power Del., vol. 22,no. 1, pp. 371–380, Jan. 2007.
- [74]. R. Rajasree, S. Premalatha « *Unified power quality conditioner (UPQC) control using feed forward (FF)/ feedback (FB) controller* », Proc. Int. Conf. Comput, Commun. Electr. Technol. Conf, pp. 364–369, Mar. 18–19,2011.

- [75]. V. Khadkikar, A. Chandra, A. O. Barry, T. D. Nguyen « *Power quality enhancement utilising single-phase unified power quality conditioner: Digital signal processor-based experimental validation* », *IET Power Electron.*, vol. 4, no. 3, pp. 323–331, Mar. 2011.
- [76]. A. Nasiri, A. Emadi « *Different topologies for single-phase unified power quality conditioners* », in Proc. 38th Int. Appl. Soc. Annu. Meet. Ind. Appl. Conf., pp. 976–981, Oct. 12–16, 2003.
- [77]. P. E. Melín, J. R. Espinoza, J. A. Muñoz, C. R. Baier, E. E. Espinosa « *Decoupled control of a unified power quality conditioner based on a current source topology for fast AC mains disturbance compensation* », Proc. IEEE Int Conf. Ind. Technol, pp. 730–736 Mar. 14–17, 2010.
- [78]. W. C. Lee, D. M. Lee, T. K. Lee « *New control scheme for a unified power quality compensator-Q with minimum active power injection* », *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 25, no. 2, pp. 1068–1076, Apr. 2010.
- [79]. M. Yun, W. Lee, I. Suh, and D. Hyun « *A new control scheme of unified power quality compensator-Q with minimum power injection* », Proc.30th Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc, pp. 51–56, Nov. 2–6, 2004.
- [80]. V. Khadkikar, A. Chandra « *A novel control approach for unified power quality conditioner Q without active power injection for voltage sag compensation* », Proc. IEEE Int. Conf. Ind. Technol, pp. 779–784, Dec. 15–16,2006.
- [81]. X. Zhao, C. Zhang, X. Guo, X. Chai, D. Jia, C. Shi, T. Wei « *Novel power flow analysis method based on impedance matching for UPQC with grid voltage fluctuations and unbalanced loads* », *IET Power Electronics*, 13(19): pp 4417-4427, 2020.
- [82]. V. Khadkikar, A. Chandra « *UPQC-S: A novel concept of simultaneous voltage sag/swell and load reactive power compensations utilizing series inverter of UPQC* », *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 26, no. 9,pp. 2414–2425, Sep. 2011.
- [83]. F. Wu and S. Pei « *Analysis and research of control strategy and signal detection based on UPQC* », in Proc. 2nd Int. Workshop Intell. Syst. Appl, pp. 1–4 May 22–23, 2010.
- [84]. K. Senthilnathan, I. Annapoorani « *Implementation of unified power quality conditioner (UPQC) based on current source converters for distribution grid and performance monitoring through LabVIEW Simulation Interface Toolkit server: a cyber physical model* », *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 10, no. 11, pp. 2622-2630, Aug. 2016.
- [85]. B.S. Mohammed, K.R. Rao, R. Ibrahim, N. Perumal « *Performance evaluation of R-UPQC and LUPQC based on a novel voltage detection algorithm* », *IEEE Symposium on Industrial Electronics and Applications*, Bandung, Indonesia, pp. 167-172, 2012.
- [86]. N. Patnaik, A.K. Panda « *Performance analysis of a 3 phase 4 wire UPQC system based on PAC based SRF controller with real time digital simulation* », *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 74: pp. 212-221, 2016.

- [87]. S.S. Bhosale, Y.N. Bhosale, U.M. Chavan, S.A. Malvekar « *Power quality improvement by using UPQC: A review* », International Conference on Control, Power, Communication and Computing Technologies (ICCPCT), Kannur, India, pp. 375-380, 2018.
- [88]. A. K. Jindal, A. Ghosh, and A. Joshi « *Interline unified power quality conditioner* », IEEE Trans. Power Del., vol. 22, no. 1, pp. 364–372, Jan. 2007.
- [89]. M. Shahparasti, A. H. Rajaei, A. Yazdian and M. Mohamadian « *Interline unified power quality conditioner based on single stage nine switch inverter* », in Proc. 3rd Power Electronics and Drive Systems Technology (PEDSTC), pp. 319-323, 2012.
- [90]. P. Li, , Q. Bai, G. Li « *Coordinated control strategy for UPQC and its verification* », IEEE Power Engineering Society General Meeting, Montreal, 2006.
- [91]. S. K. Pappula, S. Malaji « *Harmonic mitigation in multi feeder using multi converter-unified power quality conditioning system* », 8th IEEE India International Conference on Power Electronics (IICPE), Jaipur, India, pp. 1-6, 2018.
- [92]. H. R. Mohammadi, A.Y. Varjani, H. Mokhtari « *Multiconverter unified power-quality conditioning system: MC-UPQC* », IEEE Transactions on Power Delivery, 24(3): 1679-1686, 2009.
- [93]. J. A. Munoz, R. R. Espinoza, L. A. Moran, C. R. Baier « *Design of a modular UPQC configuration integrating a components economical analysis* », IEEE Trans. Power Del., vol. 24, no. 4, pp. 1763–1772, Oct. 2009.
- [94]. I. Rubilar, J. Espinoza, J. Munoz, and L. Moran « *DC link voltage unbalance control in three phase UPQCs based on NPC topologies* », 42nd Ind. Appl. Soc. Annu. Meet. Ind. Appl. Conf, pp. 597–602, Nov. 5–8, 2007.
- [95]. B. Han, B. Bae, S. Baek, and G. Jang « *New configuration of UPQC for medium voltage application* », IEEE Trans. Power Del., vol. 21, no. 3, pp. 1438–1444, Jul. 2006.
- [96]. N. Farokhnia, S. H. Fathi, and H. R. Toodeji « *Voltage sag and unbalance mitigation in distribution systems using multi-level UPQC* », in Proc. Power Quality Conf, pp. 1–5, Sep. 14–15, 2010.
- [97]. L.B.G. Campanhol, S.A.O. da Silva, , A.A. de Oliveira, , V.D .Bacon « *Single-stage three-phase grid-tied PV system with universal filtering capability applied to DG systems and AC microgrids* », IEEE Transactions on Power Electronics, 32(12): pp 9131-9142, 2017.
- [98]. S. Devassy, B. Singh, « *Design and performance analysis of three-phase solar PV integrated UPQC* », IEEE Transactions on Industry Applications, 54(1): pp 73-81, 2017.
- [99]. M.A. Mansor, K. Hasan, M.M. Othman, S.Z.B. Noor, M. Musirin « *Construction and performance investigation of three-phase solar PV and battery energy storage system integrated UPQC* », IEEE Access, 8: pp 103511-103538, (2020).

- [100]. D.P. Simatupang, J. Choi « *PV source inverter with voltage compensation for weak grid based on UPQC configuration* », IEEE 18th International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC), Budapest, Hungary, pp. 421-427, 2018.
- [101]. J. Wang, K. Sun, H. Wu, J. Zhu, Y. Xing, Y. Li « *Hybrid connected unified power quality conditioner integrating distributed generation with reduced power capacity and enhanced conversion efficiency* », IEEE Transactions on Industrial Electronics, 68(12): pp 12340-12352, 2020.
- [102]. D. Nekkar, Z. Chelli « *An Investigation into Harmonic Compensation using UPQC* », PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY, ISSN 0033-2097, R. 100 NR 9/2024.
- [103]. GR. Timilsina, L. Kurdgelashvili, PA. Narbel « *Solar energy: markets, economics and policies* », Renew Sustain Energy Rev 2012;16:449–65.
- [104]. J Hu, X Wang, W Chen, Y Yin, Y Li « *OPV-PCM-ETFE foils in use for public buildings: electrical performance and thermal characteristics* », Journal of Building Engineering 71 (2023): 106427.
- [105]. X. Guo, Y. Dong, D. Ren « *CO2 emission reduction effect of photovoltaic industry through 2060 in China* », Energy 269 (2023): 126692.
- [106]. Ogunidipe, B. Olorunshogo, C.O. Azubuike, A.A. Sanni « *Recent advances in solar photovoltaic technologies: Efficiency, materials, and applications* », GSC Advanced Research and Reviews 20.1 (2024): 159-175.
- [107]. E. McFarland « *Solar energy: setting the economic bar from the top-down* », Energy Environ Sci 2014;7:846–54
- [108]. United Nations, climate action « *What is renewable energy?* ».
- [109]. T. Wilberforce, A. Baroutaji, Z. El Hassan, J. Thompson, B. Soudan, and A. G. Olabi « *Prospects and challenges of concentrated solar photovoltaics and enhanced geothermal energy technologies* », Sci. Total Environ., vol. 659, pp. 851–861, Apr. 2019.
- [110]. D. Kodirov, O. Tursunov, Y. Zhou, G. Li, Q. Yu « *Study on the Assessment of Solar Energy Potential for Production of Electricity: A Case Study of Uzbekistan* », Clean Energy (2025): zkae110.
- [111]. K. Osmani, A. Haddad, T. Lemenand, B. Castanier, and M. Ramadan « *A review on maintenance strategies for PV systems* », Sci. Total Environ., vol. 746, p. 141753, Dec. 2020.
- [112]. D. Kumar, H. Kumar, SB. Ingole, S. Kumari, Y. Gori, AP. Srivastava, AK. Khan « *Advanced Materials for High-Efficiency Solar Cells: A Comprehensive Exploration in Material Science* », E3S Web of Conferences. Vol. 511. EDP Sciences, 2024.
- [113]. A. Ashok, JP. Singh, A. Kumar, N. Bhagat « *Bridging current and future innovations to unlock the potential of multifunctional materials for sustainable energy applications* », Materials Advances 6.11 (2025): 3386-3415.

- [114]. H. Wojtaszek, P.F. Borowski, M. Handschke, I. Miciuła, A. Stecyk, A. Bielawa, S Ozdyk « *Wind Energy in Transition: Development, Socio-Economic Impacts, and Policy Challenges in Europe* », *Energies* 18.11 (2025): 2811.
- [115]. A. Dani, M. Benlamlah, Z. Mekrini, M. El Mrabet « *Wind energy conversion technologies and control strategies: A review* », *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)* 14.1 (2024): 140-154.
- [116]. D. Mignogna, M. Szabó, P. Ceci, P. Avino « *Biomass energy and biofuels: perspective, potentials, and challenges in the energy transition* », *Sustainability* 16.16 (2024): 7036.
- [117]. B. Balopi, M. Moyo, J. Gorimbo, X. Liu « *Biomass-to-electricity conversion technologies: a review* », *Waste Disposal & Sustainable Energy* (2025): 1-29.
- [118]. M. Xu, C. Sheng « *Modeling the Process and Properties of Ash Formation during Pulverized Biomass Combustion* », *Energies* 2022, 15, 4417
- [119]. A. Banerjee, R.K. Calay, M. Mustafa « *Review on Material and Design of Anode for Microbial Fuel Cell* », *Energies* 2022, 15, 2283.
- [120]. P. Chowdhury, N.A. Mahi, R. Yeassin, NUR. Chowdhury, O. Farrok « *Biomass to biofuel: Impacts and mitigation of environmental, health, and socioeconomic challenges* », *Energy Conversion and Management: X* 25 (2025): 100889.
- [121]. T.A. Rizal, M. Khairil, H. Husin, F. Nasution, H. Umar « *The Experimental Study of Pangium Edule Biodiesel in a High-Speed Diesel Generator for Biopower Electricity* », *Energies* 2022, 15, 5405.
- [122]. N. Yang, X. Deng, B. Liu, L. Li, Y. Li, P. Li, M. Tang, L. Wu « *Combustion Performance and Emission Characteristics of Marine Engine Burning with Different Biodiesel* », *Energies* 2022, 15, 5177.
- [123]. H.H. Sait, A. Hussain, M. Bassyouni, I. Ali, R. Kanthasamy, B.V. Ayodele, Y. Elhenawy « *Hydrogen-Rich Syngas and Biochar Production by Non-Catalytic Valorization of Date Palm Seeds* », *Energies* 2022, 15, 2727.
- [124]. S. Singhania « *Hydropower Integration into Renewable Energy Systems: Technological Advances and Economic Considerations* », *Indian Journal of Renewable Energy* 1.1 (2024): 11-15.
- [125]. J. Cao, J. Liu, X. Liu, C. Zeng, H. Hu, Y. Luo « *A Review of Marine Renewable Energy Utilization Technology and Its Integration with Aquaculture* », *Energies* 18.9 (2025): 2343.
- [126]. N. Yahyaoui, S. Mansouri, A.G. Al-Sehemi, A. Dere « *Electrical characterization of silicon PV-cell: modeling* », *Applied Physics A* 130.6 (2024): 379.
- [127]. L.M. Shaker, A.A. Al-Amiery, M.M. Hanoon « *Examining the influence of thermal effects on solar cells: a comprehensive review* », *Sustainable Energy Research* 11.1 (2024): 6.
- [128]. J.A. Duffie, W.A. « *Beckman Solar engineering of thermal processes* », New York: John Wiley & Sons; 2013.

- [129]. T. Hove « *A method of predicting long-term average performance of photovoltaic systems* », *Renew Energy* 2000;21:207–29.
- [130]. M. Siegel, S. Klein, W. Beckman « *A simplified method for estimating the monthly average performance of photovoltaic systems* », *Sol Energy* 1981;26:413–8.
- [131]. D. Zhang, A. Allagui « *Fundamentals and performance of solar photovoltaic systems* », *Design and Performance Optimization of Renewable Energy Systems*. Academic Press, 2021. 117-129.
- [132]. Y. Lahiouel « *Conception d'un système de supervision d'une installation photovoltaïque dédié à la détection et à la localisation des défauts à l'aide de techniques intelligentes* », Thèse Doctorat en Sciences Université Ferhat Abbas – SETIF 1- SETIF 2024.
- [133]. A.A. Djalab, M.M. Rezaoui, L. Mazouz, A. Teta, and N. Sabri « *Robust method for diagnosis and detection of faults in photovoltaic systems using artificial neural networks* », *Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science*, 2020.
- [134]. JY. Park, SJ. Choi « *A novel simulation model for PV panels based on datasheet parameter tuning* », *Solar Energy* 145 (2017): 90-98.
- [135]. W.Shockley, and H.Queisser « *Detailed balance limit of efficiency of P-N junction solar cells* », *Journal of Applied Physics*, Vol. 32, No. 3, March 1961.
- [136]. OA. Lawal, SO. Hammed, AB. Owodey « *Comparative analysis of the efficiency of MPPT and PWM solar photovoltaic charge controllers* », *Journal of* (2025): 32-43.
- [137]. Li, Xingshuo, et al « *Comprehensive studies on operational principles for maximum power point tracking in photovoltaic systems* », *IEEE Access* 7 (2019): 121407-121420.
- [138]. S. Zaidi, B. Meliani, R .Bouddou, SM. Belhadj « *Comparative study of different types of DC/DC converters for PV systems using RBF neural network-based MPPT algorithm* », *Journal of Renewable Energies* (2024): 13-31.
- [139]. CH. Lin, MS. Khan, J. Ahmad, HD. Liu, TC. Hsiao « *Design and analysis of novel high-gain boost converter for renewable energy systems (RES)* », *IEEE Access* 12 (2024): 24262-24273.
- [140]. P. Arjyadhara , P. Bhagabat « *A Simplified Design and Modeling of Boost Converter for Photovoltaic Sytème* », *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)* Vol. 8, No. 1, February 2018, pp. 141-149.