

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

BADJI MOKHTAR UNIVERSITY –ANNABA -
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR –ANNABA -



جامعة باجي مختار
- عنابة -

Année 2018

Faculté des Sciences de l'ingénieur
Département d'Electromécanique

THESE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de *DOCTORAT EN SCIENCES*

***Contribution à l'amélioration de la qualité de l'énergie
électrique par l'utilisation d'un filtre actif***

Option
Electromécanique

Par
BELAIDI RACHID

Directeur de Thèse : Pr. HADOUICHE Ali Professeur Université Badji Mokhtar Annaba

Président: Pr. LABAR Hocine Prof. Université Badji Mokhtar Annaba

Rapporteur: Pr. HADDOUCHE Ali Prof. Université Badji Mokhtar Annaba

Examineurs : Pr. CHENIKHER Salah Prof. Université de Tébessa

Dr. HADDAD Salim MCA Université de Skikda

Dr. KARA Mohamed MCA Université Tébessa

Dr. HAMAIDI Brahim MCA Université Badji Mokhtar Annaba

Remerciements

Je remercie Allah, le tout puissant, le miséricordieux, de m'avoir appris ce que j'ignorais, de m'avoir donné la santé et tout dont je necessitais pour l'accomplissement de cette thèse.

Aussi, je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon directeur de thèse Pr.HDDOUCHE Ali (Professeur à l'Université Badji Mokhtar Annaba) pour m'avoir confié et dirigé ce projet, qu'il trouve ici l'expression de mon respect et ma profonde reconnaissance.

Je le remercie pour ses encouragements, son indulgence, et sa sympathie tout au long des années de ce travail de thèse.

J'adresse également mes sincères remerciements à Pr.LABAR Hocine (Professeur à l'Université Badji Mokhtar–Annaba) d'avoir accepté de présider le jury de soutenance.

Egalement, je remercie Pr.CHENIKHER Salah (Professeur à l'Université de Tébessa), Dr.HADDAD Salim (Maître de conférence à l'Université de Skikda), Dr.KARA Mohamed (Maître de conférence à l'Université de Tébessa) et Dr.HAMAIDI Brahim (Maître de conférence à l'Université Badji Mokhtar Annaba) pour m'avoir fait l'honneur de participer au jury de soutenance et pour la pertinence de leurs remarques avisées, qui vont permettre l'amélioration de la qualité du manuscrit et l'essor vers de nouvelles perspectives.

En dernier lieu, j'aimerais adresser mes remerciements les plus chaleureux à ma femme et mes enfants Oumaima, Abderrahmane et Asmaa, mes amis Dr. SAOUDI Adel, Dr. BENDIB Douadi, Mr. RAHMANI Elhachemi, Dr. BOULOUMA Sabri et Mr. GUENDOUBE Halim et à tous les collègues et les amis qui m'ont accordé leur soutien tout au long de ce travail de thèse.

Résumé

Ces dernières années, l'utilisation croissante des dispositifs à base d'électronique de puissance a entraîné de plus en plus de perturbations au niveau des réseaux électriques. Ces perturbations sont la cause principale de la dégradation du niveau de la qualité de l'énergie électrique. Plusieurs solutions de dépollution des réseaux électriques ont déjà été proposées dans la littérature, dans le but, notamment, de compenser la pollution harmonique, la puissance réactive et le déséquilibre des charges.

Le travail présenté dans cette thèse est une contribution à l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique par l'utilisation d'un filtre actif parallèle. Nous y abordons les deux stratégies de commande les plus connues : la méthode de Puissance Réactive Instantanée et la méthode de Référentiel Synchrone. Un régulateur flou est proposé pour le contrôle de la tension du bus continu de l'onduleur afin d'améliorer la performance du filtre actif.

Un système basé sur l'association entre un générateur photovoltaïque et le filtre active parallèle a été développée dont les objectifs sont : l'injection de l'énergie générée par le système photovoltaïque dans le réseau public de distribution et la contribution à l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique par la compensation des perturbations générées par les charges non linéaires et déséquilibrés. Les travaux de recherche présentés dans cette thèse sont vérifiés par simulation à l'aide du logiciel Matlab/Simulink.

Mot clés : Qualité de l'énergie, Harmoniques, Puissance réactives, filtre actif parallèle, Système Photovoltaïques, MPPT.

Abstract

In recent years, the increasing use of power electronics-based devices has led to an increasing number of disruptions in power systems. These devices are nonlinear loads and responsible for degrading the power quality in the utility grid. In order to improve the power quality, various traditional passive filter and modern active filter have been developed, with the aim, in particular, of harmonic filtering, reactive power compensation for power factor correction, load balancing.

The work presented in this thesis is a contribution to the improvement of the power quality, by the use of a shunt active filter. We discuss the two most well-known control strategies: the Instantaneous Reactive Power theory and the synchronous reference frame theory. A fuzzy controller is provided for monitoring the DC bus voltage of the inverter to improve the performance of the active filter.

A system based on the association between a photovoltaic generator and the shunt active power filter has been developed, the objectives of which are: the injection of the energy generated by the photovoltaic system into the utility grid and the contribution to the improvement of the power quality by compensating for the disturbances generated by the non-linear and unbalanced loads. The research presented in this thesis is has been carried out using Matlab /Simulink software.

Key words: power quality, Harmonics, Reactive power, shunt active filter, Photovoltaic system, MPPT.

ملخص

في السنوات الأخيرة، أدى الاستخدام المتزايد للأجهزة القائمة على الإلكترونيات الكهربائية إلى زيادة عدد حالات الاضطرابات في أنظمة الطاقة. هذه الأخيرة هي السبب الرئيسي لتدهور مستوى جودة الطاقة الكهربائية.

لذلك، تم البدء بإجراء دراسة أولية عن نوعية الطاقة ومختلف الاضطرابات الكهربائية، مع تبرير وجود التوافقيات الناجمة عن الأحمال غير الخطية مع التطرق لمختلف التقنيات (التقليدية منها والحديثة) المستعملة للتخفيف من تأثير هذه التوافقيات. العمل المقدم في هذه الأطروحة هو المساهمة في تحسين نوعية الطاقة الكهربائية عن طريق استخدام مرشح نشط متوازي. وناقش استراتيجيتين لاستخراج التيارات المرجعية للاضطرابات الأكثر شهرة هما: الطريقة ب-ك والطريقة د-ك. استخدام المنطق الغامض يسهل تعديل المنظم ويسمح بالحصول على نوعية ترشيح جيدة.

يقترح الجمع بين مولد كهروضوئي ومرشح الطاقة النشط من أجل تلبية أفضل لمتطلبات نظام تصفية الطاقة النشطة وإثبات تكيفه مع أنظمة الطاقة المتجددة.

أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها عن طريق محاكاة النظام المقترح فعالية كبيرة للترشيح النشط في الأنظمة الكهروضوئية.

الكلمات المفتاحية: مرشح الطاقة النشط، الأنظمة الكهروضوئية، التوافقيات، نوعية الطاقة، تتبع نقطة الطاقة القصوى.

Liste des figures

Figure I.1 - Cas de creux de tension et coupure.	7
Figure I.2 - Cas de surtensions transitoires.	8
Figure I.3 - Variations et fluctuation de tensions.	8
Figure I.4 - Variation de fréquence.	9
Figure I.5 - Déséquilibre du système triphasé de tension.	9
Figure I.6 - Fondamentale et harmoniques dans un signal distordu.	10
Figure II.1 - Charge non linéaire	16
Figure II.2 - Charge linéaire	16
Figure II.3 Caractéristiques de quelques générateurs d'harmoniques.	18
Figure II.4 - Représentation des harmoniques, inters et infra harmoniques.	19
Figure II.5 - Spectre de l'harmonique	25
Figure II.6 - Diagramme de Fresnel des puissances.	27
Figure II.7 - Montage en série (a) ou en parallèle (b) des deux redresseurs.	29
Figure II.8 - Raccordement d'un filtre passif.	29
Figure II.9 - Filtre passif résonant.	30
Figure II.10 - Filtre passif amorti.	30
Figure II.11 - Principe de compensation du filtre à filtre parallèle.	32
Figure II.12 - Filtre actif série.	34
Figure II.13 - Combinaison des filtres actifs série et parallèle.	35
Figure II.14 - Filtre actif série et filtre passif parallèle.	37
Figure II.15 - filtre actif série connecte en série avec un filtre passif parallèle.	37
Figure II.16 - Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle.	37
Figure III.1 - Structure d'un filtre actif parallèle.	41
Figure III.2 - Filtre actif parallèle à structure de tension.	42
Figure III.3 - Filtre actif parallèle à structure de courant.	43
Figure III.4 - Les techniques d'identification des courants harmoniques.	46
Figure III.5 - Principe de séparation de la composante harmonique.	49
Figure III.6 - Schéma de principe de la méthode d'identification des puissances instantanées.	50
Figure III.7 - Schéma de principe de la méthode d-q.	52
Figure III.8 - Synoptique de la PLL classique.	53
Figure III.9 - Synoptique détaillé de la P.L.L classique.	53
Figure III.10 - Boucle de régulation de la tension continue.	55
Figure III.11 - Structure générale d'une commande floue.	56
Figure III.12 - Schéma de régulation des courants du filtre actif parallèle.	57
Figure III.13 - Principe de la commande des courants par hystérésis.	58
Figure III.14 - Commande par hystérésis.	59
Figure III.15 - Principe de commande des courants par MLI.	60
Figure III.16 - Commande par modulation de largeur d'impulsions.	60
Figure III.17 - Onduleur monophasé commandé par MLI sinus triangle.	61
Figure III.18 - Filtre actif parallèle à trois fils.	62
Figure III.19 - Onduleur à trois bras avec condensateur à point milieu.	63
Figure III.20 - Onduleur à quatre fils avec quatre bras.	63
Figure III.21 - Schéma synoptique d'un réseau triphasé.	64
Figure III.22 - Schéma synoptique d'un pont redresseur.	64
Figure III.23 - Présentation schématique d'un onduleur triphasé.	65
Figure III.24 - Représentation vectorielle des tensions générées par l'onduleur.	67
Figure IV.1 - Structure générale de filtre actif parallèle.	71
Figure IV.2 - Courants de source avant le filtrage.	73
Figure IV.3 - Courant de filtre (a) : méthode (p-q), (b) : méthode (d-q).	73
Figure IV.4 - Courants de filtre et de référence (a) : méthode (p-q), (b) : méthode (d-q).	73
Figure IV.5 - Courants de source après le filtrage (a) : méthode (p-q), (b) : méthode (d-q).	73

Figure IV. 6 - Tension et courant du réseau après le filtrage (a) : méthode (p-q), (b) : méthode (d-q).....	73
Figure IV. 7 - allure de la tension V_{dc} (a) : méthode (p-q), (b) : méthode (d-q).....	73
Figure IV. 8 - Analyse spectrale avec la méthode (p-q).....	74
Figure IV. 9 - Analyse spectrale avec la méthode (d-q).....	74
Figure IV. 10 - Schéma de principe d'un régulateur flou.....	76
Figure IV. 11 - Fonctions d'appartenance utilisées dans la fuzzification pour les entrées et la sortie.....	77
Figure IV. 12 - Courants de source avant le filtrage.....	77
Figure IV. 13 - Courant de référence.....	78
Figure IV. 14 - Courant de filtre.....	78
Figure IV. 15 - Courant de filtre et de référence.....	78
Figure IV. 16 - Zoom de courants de filtre et de référence.....	78
Figure IV. 17 - Courants de la source après le filtrage.....	78
Figure IV. 18 - Tension et courant du réseau après le filtrage.....	79
Figure IV. 19 - allure de la tension V_{dc}	79
Figure IV. 20 - Analyse spectrale avant et après le filtrage.....	79
Figure IV. 21 - Structure générale de filtre actif parallèle (avec PLL).....	80
Figure IV. 22 - Analyse temporelle de la PLL sous une tension déséquilibrée.....	81
Figure IV. 23 - Courant de source avant le filtrage.....	81
Figure IV. 24 - Courant de référence.....	81
Figure IV. 25 - Courant de filtre.....	81
Figure IV. 26 - Courant de source après le filtrage.....	81
Figure IV. 27 - allure de la tension V_{dc}	82
Figure IV. 28 - Tension et courant du réseau après le filtrage.....	82
Figure IV. 29 - Analyse spectrale avant et après le filtrage.....	82
Figure V. 1 - Schéma d'une cellule élémentaire.....	86
Figure V. 2 - Modèle électrique équivalent à une diode de la cellule photovoltaïque.....	87
Figure V. 3 - Modèle électrique équivalent à deux diodes de la cellule photovoltaïque.....	88
Figure V. 4 - Caractéristique résultante d'un groupement de ns cellules en série.....	90
Figure V. 5 - Caractéristique résultante d'un groupement de np cellules en parallèle.....	90
Figure V. 6 - GPV avec diodes by-pass et diode anti-retour.....	91
Figure V. 7 - Constitution d'un générateur photovoltaïque.....	92
Figure V. 8 - Caractéristique I-V et P-V d'un panneau photovoltaïque.....	92
Figure V. 9 - Caractéristique d'un panneau photovoltaïque pour différentes température.....	93
Figure V. 10 - Caractéristiques d'un panneau photovoltaïque pour différentes éclairément.....	93
Figure V. 11 - Repérage du point de fonctionnement à puissance maximale d'un panneau photovoltaïque.....	95
Figure V. 12 - Système PV autonome.....	96
Figure V. 13 - Système photovoltaïque connecte au réseau.....	96
Figure V. 14 - Convertisseur statique DC-DC utilisé comme adaptateur : générateur PV-charge.....	97
Figure V. 15 - Structure du convertisseur BOOST.....	97
Figure V. 16 - Circuit équivalent pour T_{on}	98
Figure V. 17 - Circuit équivalent pour T_{off}	98
Figure V. 18 - Caractéristique de fonctionnement de la méthode P&O.....	101
Figure V. 19 - Organigramme de la méthode P&O.....	102
Figure V. 20 - Configuration du GPV associé au filtre actif parallèle à trois fils.....	102
Figure V. 21 - Configuration du GPV associé au filtre actif parallèle à quatre fils.....	103
Figure V. 22 - Théorie p-q-0 sous Matlab / Simulink.....	105
Figure V. 23 - Structure de GPV associé au FAP à trois fils sous Matlab / Simulink.....	106
Figure V. 24 - Structure de GPV associé au FAP à quatre fils sous Matlab / Simulink.....	106
Figure V. 25 - (a) Rapport cyclique D (b) Tension du bus continue (V_{dc} (V)) et la tension de référence (V_{dc_ref} (V)).....	107
Figure V. 26 - (a) Courants de la source avant le filtrage, (b) courants de références, (c) courants de filtre, (d) courant de filtre et de référence, (e) courants de la source après le filtrage, (f) tension et courant du réseau après le filtrage.....	108
Figure V. 27 - Analyse spectrale avant et après le filtrage.....	108
Figure V. 28 - (a) Courants de la source avant le filtrage, (b) courants injectés, (c) courants de la source après le filtrage.....	110

Figure V. 29 - (a) Courants de référence, (b) courant de filtre et de référence (c) correction du facteur de puissance avec GPV-FAP.....	110
Figure V. 30 - (a) Courant du neutre avant le filtrage, (b) courant du neutre après le filtrage.	110
Figure V. 31 - Analyse spectrale avant et après le filtrage (phase a): (a) avec GPV-FAP, (b) sans GPV-FAP.	110
Figure V. 32 - Analyse spectrale avant et après le filtrage (phase b): (a) avec GPV-FAP, (b) sans GPV-FAP.....	110
Figure V. 33 - Analyse spectrale avant et après le filtrage (phase a): (a) avec GPV-FAP, (b) sans GPV-FAP.	111

Liste des tableaux

Tableau I. 1 - Les perturbations électriques, origines, conséquences et solutions [1, 3].....	11
Tableau II. 1- Comparaison entre le filtre actif d'harmoniques et un filtre passif.....	36
Tableau III. 1 - Tensions générées par l'onduleur.....	66
Tableau IV. 1- Paramètres de simulations du filtre actif parallèle.....	71
Tableau IV. 2 - Résultats comparatifs du THD.....	75
Tableau IV. 3 - Les règles du régulateur flou.	77
Tableau V. 1 - Comparaison des méthodes MPPT.....	100
Tableau V. 2 -Principe de l'algorithme P&O.....	101
Tableau V. 3 - Paramètres de simulations du GPV-FAP à trois fils.	105
Tableau V. 4 - Les paramètres du GPV-FAP à quatre fils.	106
Tableau V. 5 - Caractéristiques principales du module CS5P-220M.....	107
Tableau V. 6 – Valeurs de THD (%) avant et après le filtrage (phase abc).	111

Liste des symboles

FAP	Filtre Actif Parallèle
FAS	Filtre Actif Série
FAH	Filtre Actif Hybride
UPQC	Unified Power Quality Conditioner
VSI	Voltage-Source Inverter
FBH	Filtre Passe haut
FPB	Filtre Passe Bas
THD	Total Harmonic Distorsion
V_s	Tension de source
i_s	Courant de source
p	Puissance instantané active
q	Puissance instantané réactive
V_{dc}	Tension continue de l'onduleur
h	Rang de l'harmonique
i_f	Courant de filtre
i_{ch}	Courant de charge
i_{ref}	Courant de référence
R_f	Résistance de filtre de sortie
L_f	Inductance de filtre de sortie
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion
FFT	Fast Fourier Transform
PLL	Phase Locked Loop
PI	Proportional Integral
MOSFET	Metal Oxyde Semi-Conductor Field Effect Transistor
IGBT	Insolated Gate Bipolar Transistor
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
PWM	Pulse-Width Modulation
PCC	Point of common coupling
i_α, i_β	Composantes des courants de source dans le repère stationnaire $\alpha\beta$
i_d, i_q	Composantes des courants dans le repère tournant dq
$V_{dc_réf}$	Tension de référence du bus continu
d, q	Repère tournant de Park
α, β	Repère stationnaire
V_{ppm}	Tension du point de puissance maximale
$I_{m\ pp}$	Courant du point de puissance maximale
V_{oc}	Tension du circuit ouvert
I_{sc}	Courant de court-circuit
I_{ph}	Courant photovoltaïque (PV)
STC	Standard Test Conditions
k	Constante de Boltzmann
T	Température
G	Eclairement solaire
MPP	Maximum Power Point
MPPT	Maximum Power Point Tracker
PV	Photovoltaïque
GPV	Générateur Photovoltaïque
P&O	Perturb and Observe

Table des matières

<i>Introduction générale</i>	1
I. Notions sur la qualité de l'énergie électrique	4
<i>Introduction</i>	5
I.1 Qualité de l'énergie électrique	6
I.2 Perturbations et leurs origines	6
<i>I.2.1 Creux de tension</i>	6
<i>I.2.2 Surtensions</i>	7
<i>I.2.3 Variations et fluctuation de tensions</i>	8
<i>I.2.4 Variation de fréquence</i>	9
<i>I.2.5 Déséquilibre du système triphasé de tension</i>	9
<i>I.2.6 Les harmoniques</i>	9
I.3 Conclusion	12
II. Pollution harmonique: origines, conséquences et solutions	14
<i>Introduction</i>	15
II.1.Définitions	16
<i>II.1.1 Charges linéaires et non-linéaires</i>	16
<i>II.1.2 Génération des harmoniques</i>	16
<i>II.1.3 Conséquence des harmoniques</i>	19
II.2 Normes et recommandations	21
<i>II.2.1 Limites d'émission</i>	22
<i>II.2.2 Niveaux d'immunité</i>	22
<i>II.2.3 Niveaux de compatibilité</i>	22
<i>II.2.4 Niveaux de planification</i>	22
<i>II.2.5 Normes européennes sur la qualité des réseaux NF EN 50160</i>	23
<i>II.2.6 Normes Américain (USA) IEEE 519</i>	23
II.3 Caractéristiques des perturbations harmoniques	24
<i>II.3.1 Taux de distorsion harmonique</i>	24
<i>II.3.2 Range de l'harmonique</i>	25
<i>II.3.3 Spectre de l'harmonique</i>	25
II.4 Puissances des signaux non sinusoïdaux	25

II.4.1 Puissance active.....	26
II.4.2 Puissance réactive	26
II.4.2 Puissance apparente	26
II.4.3 Puissance déformante D	26
II.4.4 Facteur de puissance	27
II.5 Solutions de dépollution des réseaux électriques.....	27
II.5.1 Solutions traditionnelles de dépollution	27
II.5.2 Solutions de dépollution moderne	31
II.6 Le filtrage actif.....	31
II.6.1 Le filtre actif parallèle (F.A.P).....	32
II.6.2 Le filtre actif série (F.A.S)	34
II.6.3 La combinaison parallèle-série actifs (UPQC).....	35
II.6.4 Comparatif et choix des filtres actifs.....	35
II.6.5 Comparaison entre le filtre actif et un filtre passif	35
II.7 Filtre hybride (Combinaison hybride active et passive)	36
II.7.1 Le filtre actif série avec des filtres passifs parallèles.....	36
II.7.2 Le filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles	37
II.7.3 Le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle	37
II.8 Conclusion	38
III. Filtre actif parallèle : Structure et stratégies de commande.....	39
Introduction.....	40
III.1 Structure d'un filtre actif parallèle	41
III.2 Etude de la partie puissance du FAP	42
III.2.1 structures du filtre actif parallèle.....	42
III.2.2 Système de stockage d'énergie	44
III.2.3 Inductance de Couplage	45
III.3 Etude de la partie de commande	45
III.3.1 Méthode d'identification des courants perturbés	46
III.3.2 Théorie de la Puissance Réactive Instantanée (méthode $p-q$)	47
III.3.3 Méthode Référentiel Synchrones ($d-q$ théorie)	50
III.3.4 Le système à base de Boucle de verrouillage de phase PLL	52
III.3.5 Régulation de la tension continue	54
III.3.6 Régulation du courant du filtre actif parallèle	57
III.4 Topologies du filtre actif parallèle.....	61

III.4.1	<i>Filtre actif triphasé constitué d'un onduleur triphasé à trois fils</i>	61
III.4.2	<i>Filtre actif parallèle à quatre fils</i>	62
III.5	Modélisation de l'ensemble réseau, FAP et charge polluante	63
III.5.1	<i>Modélisation du réseau</i>	63
III.5.2	<i>Modélisation de la charge polluante</i>	64
III.5.2	<i>Modélisation du filtre actif parallèle</i>	64
III.6	Conclusion	68
IV.	Etude comparative entre les méthodes de commandes et régulations	69
	Introduction	70
IV.1	Milieu pollué et équilibré	72
IV.2.1	<i>Etude comparative entre les deux méthodes (p-q et d-q)</i>	72
IV.2.2	<i>Etude comparative entre un régulateur PI et un régulateur flou</i>	75
IV.2	Milieu pollué et déséquilibré	80
IV.3	Conclusions	82
V	Association d'un générateur photovoltaïque à un FAP	84
	Introduction	85
V.1	Principe de la conversion photovoltaïque	86
V.1.1	<i>Cellule photovoltaïque</i>	86
V.1.2	<i>Modélisation d'une cellule photovoltaïque</i>	87
V.2	Le générateur photovoltaïque (PV)	89
V.2.1	<i>Principe et constitution</i>	89
V.2.2	<i>Caractéristique I-V et P-V</i>	92
V.2.3	<i>Influence de la Température</i>	93
V.2.4	<i>Influence de l'Éclairement</i>	93
V.3.	Fonctionnement optimal d'un générateur photovoltaïque	94
V.4	Classification des systèmes photovoltaïques	95
V.4.1	<i>Les systèmes autonomes</i>	95
V.4.2	<i>Les systèmes connectés au réseau</i>	96
V.5	Étage d'Adaptation pour Générateur PV	97
V.5.1	<i>Convertisseur élévateur (BOOST)</i>	97
V.6.	Poursuite du point de puissance maximum (MPPT)	99
V.6.1	<i>Méthode 'perturbation et observation' P&O</i>	100
V.7	Association du générateur PV au filtre actif parallèle à trois fils	102

<i>V.8 Association du générateur PV au filtre actif parallèle à quatre fils</i>	102
<i>V.8.1 Identification des courants perturbés dans le système triphasé à quatre fils</i>	103
<i>V. 9 Résultats de simulation et discussion</i>	105
<i>V.10 Conclusion</i>	111
<i>Conclusion générale.....</i>	114
<i>Références bibliographiques.....</i>	117

Introduction générale

Introduction générale

Durant ces dernières décennies, les problèmes liés à la qualité de l'énergie électrique sont devenus une préoccupation vitale et un sujet stratégique majeur pour la plupart des centrales de production d'énergie électrique, le secteur industriel ainsi que le domaine de la Recherche et du Développement.

La plupart de ces problèmes sont dues au développement croissant des dispositifs à base d'électronique de puissance moderne utilisés dans diverses applications, telles que la commande électrique des moteurs, les alimentations de secours, le chauffage par induction électrique, les applications dédiées la traction électrique etc.

L'inconvénient de ces dispositifs est qu'ils se comportent comme des charges non linéaires et absorbent des courants non sinusoïdaux. La circulation de ces mêmes courants perturbés va également générer des harmoniques et consommer de l'énergie réactive. Ces harmoniques retournent dans le réseau électrique au point de couplage commun (PCC) et créent plusieurs effets néfastes dans le réseau de distribution tels que l'échauffement des conducteurs et des câbles électrique, la résonance, les pertes et les échauffements des lignes de transmission, les vibrations et le bruit dans les moteurs, la dégradation de la précision des appareils de mesure jusqu'à leur défaillances. Ainsi ces charges non linéaires sont à l'origine de nombreuses perturbations des équipements électriques, lesquelles peuvent aller d'un fort échauffement ou d'un arrêt soudain des machines tournantes jusqu'à la destruction totale de ces équipements.

Afin d'améliorer la qualité de l'énergie électrique, plusieurs solutions traditionnelles et modernes de dépollution des réseaux électriques ont déjà été proposées dans la littérature.

Les filtres passifs, utilisant des condensateurs, des inductances et/ou des résistances représentent une solution traditionnelle reconnue pour la compensation des harmoniques. Elle présente de nombreux avantages tels que la simplicité, la fiabilité et le faible coût. Cependant, dans les applications pratiques, elle présente de nombreux inconvénients tels que la compensation fixe, l'encombrement, la résonance parallèle et série avec les impédances du réseau électrique.

La croissance importante de la pollution harmonique a conduit les chercheurs à mettre au point des solutions modernes plus efficaces et plus flexibles capables de

répondre aux exigences ayant trait à la qualité de l'énergie électrique. Ce type de dispositifs est généralement désigné sous le terme de Filtres Actifs ou encore nommé par Filtres Actifs de Puissance. Ces filtres actifs modernes apportent des performances supérieures en termes de filtrage, des dimensions physiques réduites et une souplesse d'application accrue. Par rapport aux filtres passifs, les filtres actifs possèdent de nombreux avantages et fonctions tels que le filtrage harmonique, la compensation de la puissance réactive pour la correction du facteur de puissance, l'équilibrage de la charge etc.

Divers types de filtres actifs pour la dépollution des réseaux électriques ont déjà été proposées. Celles qui répondent le mieux aux contraintes industrielles d'aujourd'hui sont les filtres actifs parallèles, série et les combinaisons parallèle-série actifs (Unified Power Quality Conditioner UPQC).

Dans le cas où les courants de source sont non linéaires, le filtre actif parallèle de puissance (Shunt Actif Power Filter SAPF) est considéré comme la meilleure solution pour la réduction des courants harmoniques. Il est également plus avantageux lorsqu'une réponse rapide est nécessaire en présence de charges dynamiques. En outre, le filtre actif parallèle permet d'effectuer simultanément d'autres tâches telles que la compensation de la puissance réactive et du déséquilibre de la charge.

Le travail présenté dans cette thèse concerne particulièrement l'étude par simulation de l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique par l'utilisation d'un filtre actif parallèle. Ce filtre est destiné à compenser les courants harmoniques générés par une charge non linéaire, ainsi que la correction du facteur de puissance et le rétablissement de l'équilibre du système triphasé. De façon à atteindre ces objectifs de recherche, cette thèse est divisée en cinq chapitres :

Dans le premier chapitre nous présenterons les différentes perturbations en courant et en tension qui peuvent apparaître dans un réseau électrique basse tension. Nous exposerons leurs origines et nous discuterons des solutions existantes.

Le second chapitre sera consacré à la description de la pollution harmonique, leurs caractéristiques, les origines, les conséquences et les normes inhérentes. Ensuite, nous évoquerons les solutions traditionnelles (classiques) et modernes de dépollution avant de

faire un choix sur le filtre actif parallèle qui est notre sujet de discussion dans les prochains chapitres.

Au troisième chapitre, nous présenterons la structure générale du filtre actif parallèle, les différentes stratégies d'identification des courants perturbateurs et de la régulation de la tension du bus continu en vue d'optimiser les performances de compensation du filtre actif parallèle. Les deux méthodes les plus connues dans le domaine temporel, à savoir, la Puissance Réactive Instantanée (p-q) et la méthode de la Référence Synchronisée (d-q), seront discutées. Nous présenterons également la modélisation de l'ensemble réseau, charge polluante et filtre actif parallèle.

Dans la première partie du quatrième chapitre, nous évaluerons les performances du filtre actif parallèle dans un milieu pollué avec un régulateur PI pour le réglage de la tension du bus continu. Les deux méthodes d'identification (p-q et d-q) y seront appliquées. Nous évaluerons les performances du filtre une seconde fois en remplaçant le régulateur PI par un régulateur flou, et nous discuterons de l'avantage du régulateur flou par rapport au régulateur PI. Dans la deuxième partie, le système à base de la boucle à verrouillage de phase (phase-locked-loop PLL) sera intégré dans la méthode p-q afin de généraliser l'application de cette dernière dans le cas où la tension du réseau est déséquilibrée. Des simulations numériques seront effectuées à l'aide du logiciel MATLAB/Simulink.

Le cinquième chapitre est consacré à l'association d'un générateur photovoltaïque à un filtre actif parallèle. Dans un premier temps, nous présenterons le principe de fonctionnement et les caractéristiques des systèmes photovoltaïques. Les différentes techniques de poursuite du point de puissance maximale (MPPT) existantes dans la littérature y seront discutées.

Ensuite, nous étudierons par simulation un système basé sur l'association entre un générateur photovoltaïque (GPV) et un filtre actif parallèle. Le but étant d'intégrer les énergies renouvelables, notamment le photovoltaïque dans l'élimination des perturbations issues par les charges non linéaires et non équilibrés.

Chapitre I

Notions sur la qualité de l'énergie électrique

Introduction

L'objectif fondamental des réseaux électriques est de fournir aux clients de l'énergie électrique avec une parfaite continuité, sous forme de tensions parfaitement sinusoïdales, avec des valeurs d'amplitude et de fréquence préétablies (en fonction du point de raccordement). La qualité de l'énergie délivrée par le distributeur est affectée par de nombreux types de perturbations et les conséquences peuvent être intolérables. Tout écart à cet objectif qui dépasse le seuil établi dans les normes représente une perturbation qui peut être gênante pour le fonctionnement des charges connectées.

Afin d'éviter ces conséquences, il est indispensable de comprendre l'origine des perturbations et de chercher des solutions adéquates afin de les supprimer.

Dans ce chapitre nous commençons par la présentation des caractéristiques et les indices de la qualité de l'énergie électrique. Ensuite nous entamons l'étude des perturbations, les plus importantes, affectant le réseau électrique. Les origines, les conséquences de ces perturbations ainsi que leurs solutions seront détaillées par la suite.

I.1 Qualité de l'énergie électrique

Critères et définitions

L'énergie électrique est fournie sous forme de tension constituant un système sinusoïdal triphasé dont les paramètres caractéristiques sont les suivants :

- *la fréquence, (stabilité de la fréquence)*
- *l'amplitude des trois tensions, (valeurs efficaces dans les limites tolérées).*
- *la forme d'onde qui doit être sinusoïdale (absence de distorsions, de pics, de creux.)*
- *la symétrie du système triphasé, caractérisée par l'égalité des modules des trois tensions et de leurs déphasages relatifs.*
- *Facteur de puissance dans des limites tolérables.*

La mesure de ces paramètres permet de juger la qualité de la tension. Tout phénomène physique affectant une ou plusieurs de ces caractéristiques peut être considéré comme une perturbation. Une détérioration de l'un d'entre eux ou de plusieurs à la fois laisse supposer la présence d'une anomalie dans le réseau électrique. Afin de décrire certaines perturbations et de donner le niveau de conformité de l'énergie fournie, des normes ont déjà été établies [1-3].

I.2 Perturbations et leurs origines

Les perturbations électriques affectant l'un des paramètres cités précédemment peuvent se manifester par des phénomènes observés: creux de tension et coupures, sursensions temporaires ou transitoires, fluctuations lentes de la tension (Fliqué), variations de la fréquence, déséquilibres du système triphasé, harmoniques etc. [1, 3, 4].

I.2.1 Creux de tension

Un creux de tension est une chute brutale de l'amplitude de la tension. Il est caractérisé par sa profondeur (ΔU) et sa durée (Δt). La diminution de la tension à une valeur située entre 1 et 90 % de la tension nominale pendant une durée de $\frac{1}{2}$ période à 50 Hz soit 10 ms jusqu'à une minute. Par ailleurs, on peut noter qu'une coupure brève n'est qu'un cas particulier du creux de tension, sa profondeur est supérieure à 90 % et elle est caractérisée uniquement par sa durée (inférieure à 3 minutes)[2, 4].

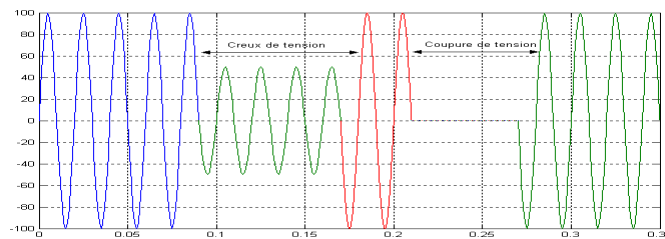


Figure I.1 - Cas de creux de tension et coupure.

Origine Creux de tension: Les principales causes des creux de tension sont les perturbations dues à l'exploitation des réseaux comme la mise sous tension de gros transformateurs, enclenchement des condensateurs, simple démarrage de gros moteurs...etc. Les creux de tension sont aussi produits par des court-circuités survenant dans le réseau général ou dans les installations de la clientèle. Leur durée peut aller de 10 ms à plusieurs secondes, en fonction de la localisation du court-circuit et du fonctionnement des organes de protection [1, 3].

Conséquences : Les creux de tension peuvent provoquer des perturbations sur les couples pour les machines tournantes, perturbation d'appareillage électronique, pannes intempestives, déclenchement d'équipements, lorsque leur profondeur et leur durée excèdent certaines limites (dépendant de la sensibilité particulière des charges). Les conséquences peuvent être extrêmement coûteuses (temps de redémarrage se chiffrant en heures, voire en jours ; pertes de données informatiques ; dégâts aux produits, voire aux équipements de production etc.).

I.2.2. Surtensions

Les surtensions correspondent à des augmentations de l'amplitude de la tension de 1,1 pu à 1,8 pu. Les surtensions sont moins fréquentes que les creux de tension et sont généralement dues à des court-circuités dans les systèmes à neutre isolé qui engendrent à la fois des creux de tension et des surtensions [2]. Toute tension appliquée à un équipement dont la valeur de crête sort des limites d'un gabarit défini par une norme ou une spécification est ne surtension (figure I.2).

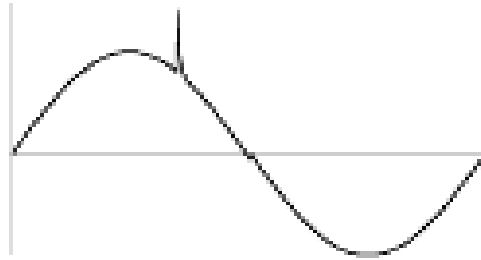


Figure I.2 - Cas de surtensions transitoires.

Origine surtensions

Les surtensions sont de trois natures :

- temporaires (à fréquence industrielle),
- de manœuvre,
- d'origine atmosphérique (foudre).

I.2.3. Variations et fluctuation de tensions

Les fluctuations de tension sont des variations périodiques ou erratiques de l'enveloppe de la tension (figure I.3). Ce sont des variations brutales de l'amplitude de la tension situées dans une bande de $\pm 10\%$ et se produisent sur un intervalle de temps de quelques centièmes de secondes [1, 3].

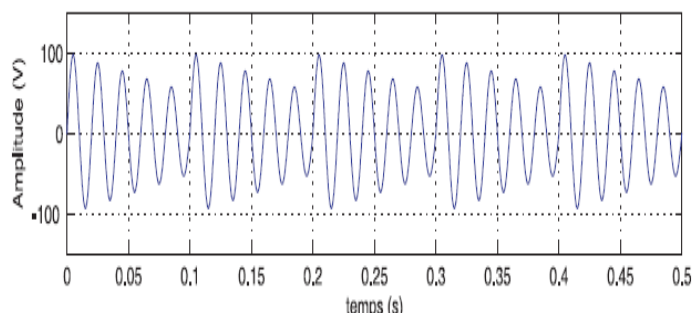


Figure I.3 - Variations et fluctuation de tensions.

Origine de la variation et fluctuation de tensions :

Les variations lentes de tension sont causées par la variation lente des charges connectées au réseau. Les fluctuations de tension sont principalement dues à des charges industrielles rapidement variables comme les machines à souder, les fours à arc, les laminoirs [4].

I.2.4 Variation de fréquence

Une variation sensible de la fréquence du réseau peut apparaître sur les réseaux des utilisateurs non interconnectés ou alimentés par une source thermique autonome (figure I.4.) Au niveau des réseaux de distribution ou de transport [2, 3]. (Cette variation de la fréquence est très rare) et n'est présente que lors de circonstances exceptionnelles, comme dans le cas de certains défauts graves sur le réseau. Dans des conditions normales d'exploitation, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle $50 \text{ Hz} \pm 1\%$.

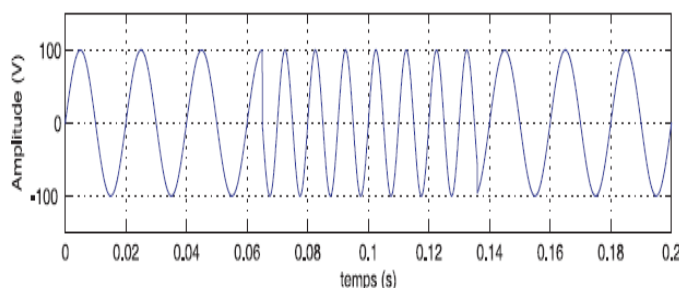


Figure I.4 - Variation de fréquence.

I.2.5 Déséquilibre du système triphasé de tension

Lorsque les trois tensions ne sont pas identiques en amplitude et/ou ne sont pas décalées d'un angle de 120° les unes par rapport aux autres, on parlera de déséquilibre du système triphasé (figure I.5) [1, 3].

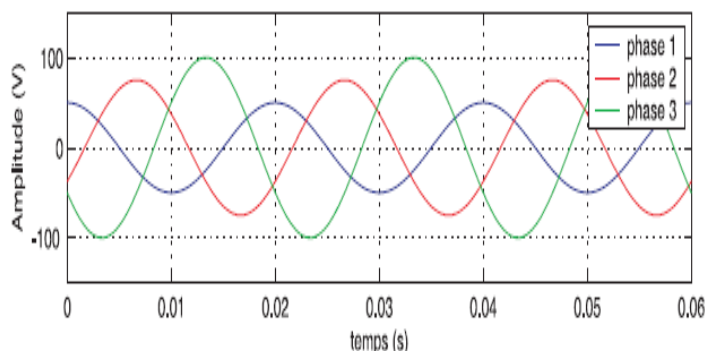


Figure I.5 - Déséquilibre du système triphasé de tension.

I.2.6 Les harmoniques

Les harmoniques sont des signaux de fréquence multiple de la fréquence industrielle. Ils sont générés par des charges dites non-linéaires. Certains appareils ne présentent pas une impédance constante durant la durée de l'alternance de la sinusoïde de tension à 50 Hz. Ils absorbent alors un courant non sinusoïdal qui se propage dans le

réseau électrique. Une tension ou un courant déformé par rapport à la sinusoïde de référence peut être décomposé en une somme de signaux sinusoïdaux de fréquence multiples (figure I.6) à celle du fondamental [1, 5-7]. Les premiers rangs harmoniques tel que (5, 7) ont des amplitudes élevées, d'où l'importance des courants injectés, raison pour laquelle il faut limiter ces harmoniques dans les normes [3, 6]. L'amplitude de l'harmonique de rang (h) du côté de la source est donnée par :

$$I_h = I_1 / h$$

h : harmonique d'ordre h

I_1 : amplitude du courant fondamentale

I_h : amplitude de l'harmonique de rang (h)

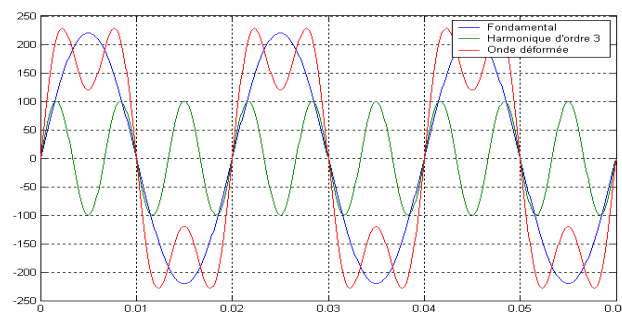


Figure I. 6 - Fondamentale et harmoniques dans un signal distordu.

L'amplitude de rang 1 est appelée la composante fondamentale du signal électrique périodique. L'harmonique d'ordre zéro correspond à la composante directe du signal, l'amplitude de chaque harmonique est inversement proportionnelle à son ordre.

L'inter harmonique : Sont des composantes sinusoïdales, qui ne sont pas à des fréquences multiples de celle du fondamental. Elles sont dues à des variations périodiques ou aléatoires de la puissance absorbée par différents récepteurs tels que fours à arc, machines à souder et convertisseurs de fréquences (variateurs de vitesse, cycloconvertisseurs) [1, 3, 7-9]. Le spectre peut être discret ou continu et variable de façon aléatoire (four à arc) ou intermittente (machines à souder).

L'origine des harmoniques Dans la plupart des cas, les harmoniques présentes sur les réseaux électriques sont générées par des charges non linéaires, tels que les convertisseurs statiques, l'éclairage (par lampes à décharge et tubes fluorescents), les fours à arc etc.

Les différentes perturbations dans les réseaux électriques, leurs origines et solution pour améliorer la qualité d'énergie électrique sont résumées dans le Tableau I.1.

Tableau I. 1 - Les perturbations électriques, origines, conséquences et solutions [1, 3].

<i>Type de perturbation</i>	<i>origine</i>	<i>conséquences</i>	<i>Exemples de solutions (équipement spécifiques et modifications)</i>
Variations et fluctuations de tension	Variations importantes de charges (machines à souder, fours à arc)	Fluctuation de la luminosité des lampes (papillotement ou Flicker).	Compensateur électromécanique d'énergie réactive, compensateur automatique en temps réel compensateur électronique série, régulateur en charge.
Creux de tension	Court-circuit, commutation de charges de forte puissance (démarrage moteur etc.)	Perturbation ou arrêt du procédé: pertes de données, données erronées, ouverture de contacteurs, verrouillage de variateurs de vitesse, ralentissement ou décrochage de moteurs, extinction de lampes à décharge.	ASI, compensateur automatique en temps réel, Régulateur électronique dynamique de tension, démarreur progressif, compensateur électronique série Augmenter la puissance de court-circuit (Pcc). Modifier la sélectivité des protections.
Coupures	Court-circuit, surcharges, maintenance, déclenchement intempestif.		ASI, permutation mécanique de sources, permutation statique de sources, groupe à temps zéro, disjoncteur shunt, téléconduite
Harmoniques	Charges non linéaires (variateurs de vitesse, fours à arc, machines à souder, lampes à décharge, tubes fluorescents etc.)	Surcharges (du conducteur de neutre, des sources...), Déclenchements intempestifs, vieillissement accéléré, dégradation du rendement énergétique, perte de productivité.	Self anti-harmonique, filtre passif ou actif, filtre hybride, inductance de ligne. Augmenter la Pcc. Confiner les charges polluantes. Déclasser les équipements.
Interharmonique	Charges fluctuantes (fours à arc, machines à souder...), convertisseur de fréquence.	Perturbation des signaux de tarification, papillotement (flicker).	Réactance série.
Surtensions transitoires	Manceuvre d'appareillages, foudre.	Verrouillage de variateurs de vitesse, déclenchements intempestifs, destruction d'appareillage, incendies, pertes d'exploitation.	Parafoudre, parasurtenseur, enclenchement synchronisé, résistance de préinsertion, self de choc, compensateur automatique statique.
Déséquilibre	Charges déséquilibrées (charges monophasées de forte puissance).	Couples moteurs inverses (vibrations) et surchauffement des machines asynchrones.	Equilibrer les charges. - Compensateur électronique shunt, régulateur électronique dynamique de tension. - Augmenter la Pcc.

I.3 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les différentes perturbations pouvant affecter la qualité de l'énergie (Q.E.E) dans un réseau électrique. Cette dernière est caractérisée par les indices suivants : la fréquence, l'amplitude des trois tensions, la forme d'onde et la symétrie du système triphasé. Parmi les perturbations majeures et déprécient la Q.E.E, on cite : la variation de la fréquence, la fluctuation de tension, le creux de tension et coupures, déséquilibre du système triphasé.

L'un des phénomènes les plus influents sur la qualité de l'énergie électrique est le phénomène des harmoniques généré par les charges non linéaires. Dans le but de contribuer à l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique, qui doit être conforme aux nouvelles contraintes normatives, nous étudierons dans le chapitre suivant la pollution harmonique du réseau électrique et leurs solutions traditionnelles et modernes.

Chapitre II
*Pollution harmonique: origines,
conséquences et solutions*

Introduction

L'utilisation croissante des convertisseurs statiques dans les systèmes électriques a entraîné de plus en plus de problèmes liés aux perturbations ou distorsions harmoniques des réseaux électriques. L'inconvénient de ces dispositifs est qu'ils se comportent comme des charges non linéaires et absorbent des courants non sinusoïdaux. Ces courants périodiques mais non sinusoïdaux circulent au travers des impédances des réseaux et donnent naissance à des tensions non sinusoïdales et des déséquilibres qui viennent se superposer à la tension fondamentale (à 50 Hz) au point de raccordement. Ils peuvent générer aussi une consommation de puissance réactive. Ces perturbations ont des conséquences préjudiciables sur le bon fonctionnement des appareils électriques et ont des effets à la fois instantanés et à long terme. Il est donc important pour une installation donnée de savoir définir, analyser et quantifier les harmoniques.

Dans ce chapitre, des notions élémentaires d'analyse harmonique, les origines et les conséquences de la pollution harmonique sont d'abord exposés. Ensuite, les différentes solutions traditionnelles et modernes de compensation des harmoniques proposées dans la littérature sont présentées. Nous allons introduire les principales structures, proposées dans la littérature, à savoir les filtres actifs parallèle, série, combiné parallèle-série et les structures hybrides actif-passif. Nous adopterons alors la compensation active la plus adéquate.

II.1. Définitions

Dans la plupart des cas, les harmoniques de tensions ou de courants présentes sur les réseaux électriques proviennent de l'utilisation des charges non linéaires, telles que les convertisseurs statiques [10, 11]. Les structures de ces convertisseurs sont valables en monophasé ou en triphasé et fonctionnent dans des gammes de puissance très grandes, de quelques VA à plusieurs MVA. Ces dispositifs polluants sont classés en fonction des puissances et donc du niveau de perturbations qu'ils entraînent [10, 11].

II.1.1 Charges linéaires et non-linéaires

Une charge est dite linéaire (figure II.1) si, alimentée par une tension sinusoïdale, elle consomme un courant sinusoïdal. Cependant, le courant et la tension peuvent être déphasés. Une charge est dite non-linéaire (figure II.2) lorsque la relation entre la tension et le courant n'est plus linéaire. Un tel récepteur alimenté par une tension sinusoïdale, consomme un courant non-sinusoïdal [1].

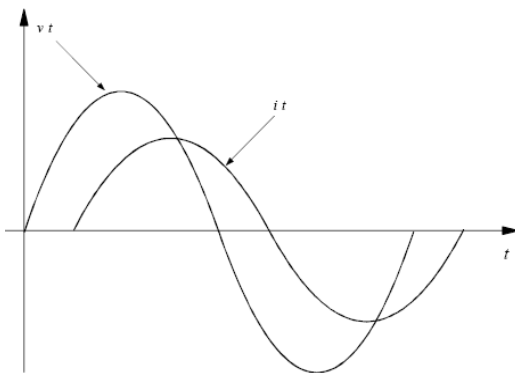


Figure II. 2 - Charge linéaire

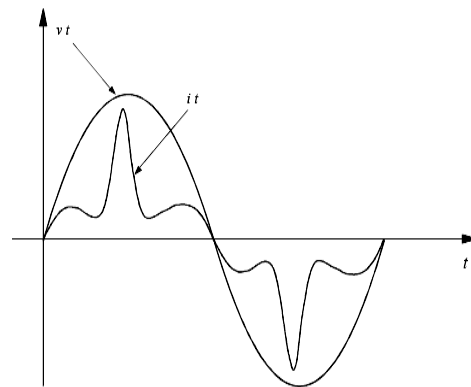


Figure II. 1 - Charge non linéaire

II.1.2 Génération des harmoniques

Les harmoniques présents sur le réseau électrique de distribution proviennent majoritairement des charges non linéaires qui génèrent des courants harmoniques. Ces charges non linéaires représentent de nombreux équipements industriels et domestiques et se répartissent dans de nombreux secteurs industriels. Ces appareils possèdent en entrée un système de conversion d'énergie sous une forme donnée en une autre forme en adéquation avec l'utilisation voulue. C'est des convertisseurs statiques qui sont mis en œuvre et qui peuvent être répertoriés en quatre familles:

- ✓ Convertisseurs AC-DC, cela représente l'ensemble des redresseurs,
- ✓ Convertisseurs DC-DC, hacheurs et alimentations à découpage,
- ✓ Convertisseurs DC-AC, onduleurs de tension ou de courant,
- ✓ Convertisseurs AC-AC, gradateurs, convertisseurs de fréquences.

Les structures de ces convertisseurs sont valables en monophasé ou en triphasé et fonctionnent dans des gammes de puissance très grandes, de quelques VA à plusieurs MVA. Ces dispositifs polluants sont classés en fonction des puissances et donc du niveau de perturbations qu'ils entraînent. Ainsi, les charges industrielles arrivent logiquement en première position et il est possible de recenser les applications suivantes :

- ✓ Systèmes utilisant des redresseurs à diodes ou à thyristors tels que les variateurs de vitesse des moteurs électriques (à courant continu, asynchrones, synchrones), les fours à induction, les chargeurs de batterie, les électrolyseurs, etc.
- ✓ Les récepteurs utilisant l'arc électrique : fours à arc ou soudure à arc,
- ✓ Les variateurs de lumières à base de gradateurs,
- ✓ Les ballasts électroniques : lampes fluorescentes, à décharge ou à vapeur métallique (sodium, mercure),

Pour les charges électrodomestiques les plus couramment rencontrées sont :

- ✓ Téléviseurs et éléments périphériques,
- ✓ Micro-informatique,
- ✓ Four à micro-ondes,
- ✓ Aspirateurs,
- ✓ Robots ménagers.

Pour l'ensemble de ces charges polluantes, un critère supplémentaire est à prendre en compte, c'est le facteur d'utilisation. En effet, la quantification du taux d'harmonique dépend de la durée et de la simultanéité du fonctionnement de ces charges non linéaires. Certaines tranches horaires entraînent donc des 'pics' de pollution durant lesquels les taux d'harmoniques globaux tendent à dépasser les niveaux acceptables définis par les normes en vigueur ou les recommandations [10]. La figure II.3 illustre les caractéristiques de quelques générateurs d'harmoniques.

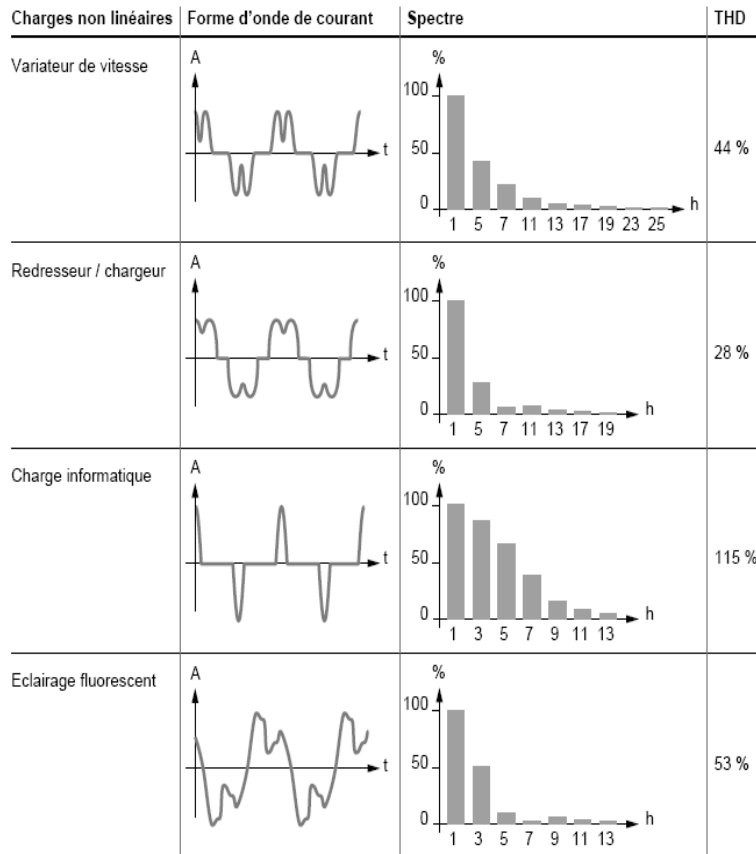


Figure II. 3 Caractéristiques de quelques générateurs d'harmoniques.

Il est à noter qu'il existe aussi des perturbations sur des rangs harmoniques non multiple entier du fondamental. Ces derniers se dénomment inter ou infra harmoniques.

Les interharmoniques sont des composantes sinusoïdales qui ne sont pas des fréquences entières de celle du fondamental.

Les infraharmoniques sont des composantes qui sont à des fréquences inférieures à celle du fondamental. Ces deux catégories de perturbations sont dues à des variations périodiques et aléatoires de la puissance absorbée par certains appareils (commande par train d'ondes, ...). La figure II.4 illustre cette répartition.

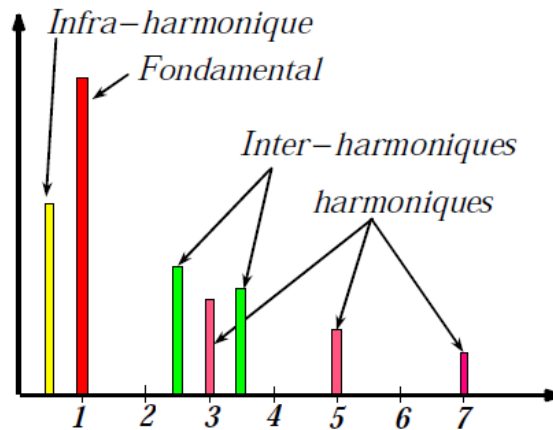


Figure II. 4 - Représentation des harmoniques, inters et infra harmoniques.

II.1.3 Conséquence des harmoniques

Les courants harmoniques se propagent dans le réseau électrique, déforme l'allure du courant de la source et polluent les consommateurs alimentés par ce même réseau. Ils peuvent occasionner des incidents au niveau de l'appareillage du client et donner lieu à des surcoûts de production d'énergie importants. On peut classer les effets engendrés par les harmoniques en deux type : les effets instantanés et les effets à terme [3].

II.1.3.a Effets instantanés

Les effets instantanés apparaissent immédiatement dans certains appareillages.

- **Défauts de fonctionnement de certains équipements électriques** : En présence d'harmoniques, la tension et le courant peuvent changer plusieurs fois de signe dans une demi-période. Les appareils dont le fonctionnement est basé sur le passage à zéro des grandeurs électriques peuvent être affectés.
- **Troubles fonctionnels des micro-ordinateurs** : Les effets sur ces équipements peuvent se manifester par la dégradation de la qualité de l'image et par des couples pulsatoires des moteurs d'entraînement de disque.
- **Erreurs dans les appareils de mesure** : Certains appareils de mesure et les compteurs d'énergie à induction présentent des dégradations de mesure et des erreurs de lecture supplémentaires en présence d'harmoniques.
- **Vibrations et bruits** : Les courants harmoniques génèrent également des vibrations et des bruits acoustiques, principalement dans les appareils électromagnétiques (transformateurs, inductances et machine tournantes)[1].

II.1.3.b Effets à terme

Ils se manifestent après une exposition plus ou moins longue à la perturbation harmonique. L'effet à terme le plus important est de nature thermique, il se traduit par l'échauffement.

Il conduit à une fatigue prématurée du matériel, des lignes et amènent un d'écassement des équipements.

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

Echauffement des condensateurs : L'échauffement est causé par les pertes dues au phénomène d'hystérésis dans le diélectrique. Les condensateurs sont donc sensibles aux surcharges, qu'elles soient dues à une tension fondamentale trop élevée ou à la présence d'harmoniques. Ces échauffements peuvent conduire au claquage.

-Echauffement du aux pertes supplémentaires des machines et des transformateurs : Echauffement cause par les pertes dans le stator des machines et principalement dans leurs circuits rétorques (cages, amortisseurs, circuits magnétiques) à cause des différences importantes de vitesse entre les champs tournants inducteurs harmoniques et le rotor. Les harmoniques génèrent aussi des pertes supplémentaires dans les transformateurs, par effet Joule dans les enroulements, accentuées par l'effet de peau et des pertes par hystérésis et courants de Foucault dans les circuits magnétiques.

Tableau II. 1 - Les principaux effets des harmoniques.

<i>matériels</i>	<i>Géantes liées à la pollution harmonique</i>
Alternateurs	Pertes supplémentaires dans les enroulements statoriques et principalement dans les amortisseurs (a cause Ih).
Lignes	Pertes ohmiques supplémentaires
Transformateurs	Pertes (ohmique-fer) et échauffements supplémentaires. Vibrations mécaniques. Nuisances sonores.
Disjoncteurs	Déclenchements intempestifs (dépassements des valeurs crêtes de la tension...).
Câbles	Pertes diélectriques et ohmiques supplémentaires (particulièrement dans le neutre en cas de présence d'harmonique 3).
Moteurs	Pertes et échauffements supplémentaires. Réduction des possibilités d'utilisation à pleine charge. Couple pulsatoire (vibrations, fatigue mécanique). Nuisances sonores.
Circuit de protection divers à la clientèle	Risque de déclenchement impératifs attribués aux DT et à des particularités des circuits alimentés
Lampe à décharge pour l'éclairage appareils médicaux	Risque de vacillement ; Perturbation par surs tension en valeur de crête liée aux DT
Ordinateurs. Electronique de Puissance	Troubles fonctionnelles liés à la distorsion de tension
Condensateurs de puissance	Echauffement, vieillissement prématuré (claquage), résonance.

II.2 Normes et recommandations

L'objectif des normes et des réglementations est de limiter les dysfonctionnements occasionnés par les harmoniques. Les deux principaux organismes de normalisation internationaux dans ce domaine sont la CEI (Comité Electrotechnique Internationale) et IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers).

Afin de pouvoir garantir un niveau de qualité suffisant à l'ensemble des utilisateurs, les distributeurs sont amenés à fixer ou à faire fixer des limites aux perturbations engendrées par certains utilisateurs. Pour cela, il s'agit de définir :

- D'une part, un taux de distorsion maximum permettant un fonctionnement correct de la plupart des utilisations (niveau de compatibilité).
- D'autre part, un taux de perturbations maximum pour chacun des utilisateurs, afin que les effets cumulés des différentes perturbations produites, permettent la compatibilité de

fonctionnement entre tous les matériaux raccordés sur le même réseau. Tous doivent fonctionner correctement.

Par conséquent, si cette compatibilité est nécessaire entre abonnés, elle l'est également à l'intérieur des installations des abonnés eux-mêmes (tertiaire ou industriel). L'utilisateur final est tributaire du niveau de perturbations induites par les matériels qu'il installe. C'est pourquoi, il est important que les fabricants affichent clairement quels sont les niveaux de perturbations engendrées par leurs produits.

Des normes doivent, donc, fixer les niveaux de perturbations harmoniques acceptables, pour les réseaux et pour les pollueurs afin de limiter, préventivement, les dysfonctionnements occasionnés par les harmoniques. Ces normes sont appliquées suivant 4 règles :

II.2.1 Limites d'émission

Elles sont fixées soit par installation, soit par appareil. Ces limites garantissent le maintien, en tout point, des niveaux de compatibilité.

II.2.2 Niveaux d'immunité

Ils permettent de garantir à l'utilisateur un fonctionnement de l'équipement sur un réseau perturbé dans certaines limites.

II.2.3 Niveaux de compatibilité

Ils sont, généralement, des taux de tension harmonique à ne pas dépasser en tout point du réseau. Le maintien de ces niveaux garantit un fonctionnement correct de tous les appareils.

II.2.4 Niveaux de planification

Ils représentent des seuils de perturbations décidés par un gestionnaire de réseau, tel que le niveau de compatibilité qu'il ne soit pas dépassé.

Par exemple, la norme CEI 1000-2-2 pour les équipements raccordés à un réseau basse tension permet de garantir à l'utilisateur un fonctionnement de l'équipement sur un réseau perturbé dans certaines limites.

II.2.5 Normes européennes sur la qualité des réseaux NF EN 50160

Elles définissent les principales caractéristiques de la tension fournie au point de livraison du client pour un réseau public basse tension, et en particulier les niveaux de compatibilité électromagnétiques des tensions harmoniques. Elle caractérise la qualité de la tension fournie par le réseau public de distribution basse tension dans des conditions normales l'exploitation. Ces critères de perturbation de l'énergie apportée par le réseau et constatable au poste de livraison du client concernent quatre familles :

- ✓ la fréquence,
- ✓ l'amplitude ou le niveau de tension,
- ✓ la forme d'onde,
- ✓ la symétrie des tensions triphasées.

Par la suite ces familles peuvent se décliner en plusieurs critères élémentaires tels que :

- creux de tension,
- diminution de la valeur efficace,
- surtension impulsionnelle ou transitoire,
- fluctuation rapide de tension ou flicker,
- déséquilibre du système triphasé,
- harmoniques,
- variation de fréquence.

II.2.6 Normes Américain (USA) IEEE 519

L'IEEE définit les exigences et recommandations pratiques pour le contrôle des harmoniques dans les systèmes électriques de puissance. Cette norme s'applique aussi bien aux fournisseurs qu'aux utilisateurs et couvrent toutes les plages de puissance. Dans ce standard, les limites sont données par rapport au quotient des courants de court-circuit au point de raccordement du réseau et du courant de charge fondamental. La norme IEEE 519-1992 recommande notamment une distorsion harmonique totale de tension inférieure à 5% pour les systèmes de moins de 69 KV et une distorsion harmonique individuelle de tension inférieure à 3%.

II.3 Caractéristiques des perturbations harmoniques

La perturbation harmonique est généralement caractérisée par le taux de distorsion harmonique (THD) défini pour la tension ou le courant. Ce critère est le plus souvent employé pour quantifier le contenu harmonique d'un signal distordu. Il mesure également le degré de déformation du signal apporté par les harmoniques par rapport à une onde sinusoïdale. Il va de soi que la répartition spectrale complète généralement l'information sur le THD en indiquant le rang des harmoniques dominants. Pour chiffrer la consommation de puissance réactive le facteur de puissance (FP) est généralement utilisé. Le courant absorbé par une charge non linéaire (convertisseur statique) n'est pas sinusoïdal, mais sa valeur moyenne sur chaque phase est souvent nulle. Dans ce cas, la décomposition en série de Fourier du courant donne :

$$i(t) = \sqrt{2}I_1 \sin(\omega t + \alpha_1) + \sum_{h=2}^{\infty} \sqrt{2}I_h \sin(h\omega t + \alpha_h)$$

Avec : I_1, I_h : valeur efficace du courant fondamental et du courant harmonique de rang h ,
 α_1, α_h : déphasage du courant fondamental et du courant harmonique de rang h ,
 ω : pulsation fondamentale du réseau.

II.3.1 Taux de distorsion harmonique

Le taux individuel d'harmonique est défini comme le rapport (en %) de l'amplitude de l'harmonique au rang h ramenée à celle du fondamental :

$$T_h = 100 \frac{Y_h}{Y_1} (\%)$$

La notion la plus couramment usitée est le taux global de distorsion harmonique THD (Total Harmonic Distorsion) pour caractériser le taux de déformation d'une onde électrique. Le THD est le rapport entre la valeur efficace des harmoniques à celle du fondamental (norme IEC 61000-2-2). Le taux de distorsion caractérise le niveau de pollution du réseau.

Le taux de distorsion harmonique de ce courant est donné par l'expression :

$$THDi = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \frac{I_h^2}{I_1^2}}$$

- Le taux de distorsion harmonique de tension :

$$THD_v = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \frac{V_h^2}{V_1^2}}$$

Dans la plupart des applications, il suffit de considérer les harmoniques entre le rang 2 et 25, même si pour la norme EN 50160 l'analyse des données doit s'effectuer jusqu'au rang 50.

II.3.2 Range de l'harmonique

C'est le rapport de sa fréquence f_h à celle du industrielle f_1 (50 ou 60 Hz) :

$$h = f_h / f_1 \quad (h : \text{le rang de l'harmonique})$$

Par principe, le fondamental f_1 a le rang 1.

II.3.3 Spectre de l'harmonique

C'est l'histogramme donnant l'amplitude de chaque harmonique en fonction du rang.

La figure II.5 illustre cette répartition.

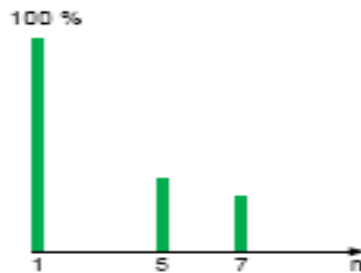


Figure II. 5 - Spectre de l'harmonique

II.4 Puissances des signaux non sinusoïdaux

Les notions de puissance définies pour les signaux sinusoïdaux ne sont pas valables pour les signaux non sinusoïdaux. Pour une charge non linéaire triphasé, alimentée par une source de tension $v(t)$ et parcourue par un courant $i(t)$, dont les expressions s'écrivent respectivement :

$$v(t) = \sum_{h=1}^{\infty} V_h \sqrt{2} \sin(h\omega t)$$

$$i(t) = \sum_{h=1}^{\infty} I_h \sqrt{2} \sin(h\omega t - \alpha_h)$$

II.4.1 Puissance active

Le calcul de la puissance instantanée comporte des produits de fonctions sinusoïdales de fréquences différentes:

$$P(t) = 3 \cdot v(t) \cdot i(t)$$

Par contre, seules les composantes de même fréquence contribuent à l'élaboration de la puissance moyenne ou puissance active P effectivement consommée et exprimée en Watt:

$$P = 3 \cdot \sum_{h=1}^{\infty} V_h \cdot I_h \cdot \cos \varphi_h$$

II.4.2 Puissance réactive

La puissance réactive est définie comme la somme pondérée des réactions associées à chaque rang harmonique, à la différence de la puissance active. Elle s'exprime en volt Ampère Réactif (VAR) :

$$Q = 3 \cdot \sum_{h=1}^{\infty} V_h \cdot I_h \cdot \sin \varphi_h$$

II.4.2 Puissance apparente

En présence des harmoniques la puissance apparente (s'exprime en Volt Ampère (VA)) est définie par la formule suivante :

$$S = m \cdot \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_h^2} \cdot \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2}$$

La puissance apparente S est composée de trois parties : active P , réactive Q et déformante D . Son expression est donnée par l'équation suivante :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} .$$

II.4.3 Puissance déformante D

La puissance déformante D exprimée en Volt Ampère Déformant (VAD) et peut s'écrire sous la forme :

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2}$$

II.4.4 Facteur de puissance

Le facteur de puissance pour un signal sinusoïdal est donné par le rapport entre la puissance active P et la puissance apparente S . Dans le cas où il y a des harmoniques, une puissance supplémentaire appelée la puissance déformante (D), donnée par la relation :

$$D = 3.V_1 \cdot \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}$$

Le facteur de puissance (F.P) devient :

$$F.P = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} = \cos \varphi_1 \cdot \cos \gamma$$

Le diagramme de Fresnel de la figure II.6. On voit bien que les harmoniques affectent aussi le facteur de puissance.

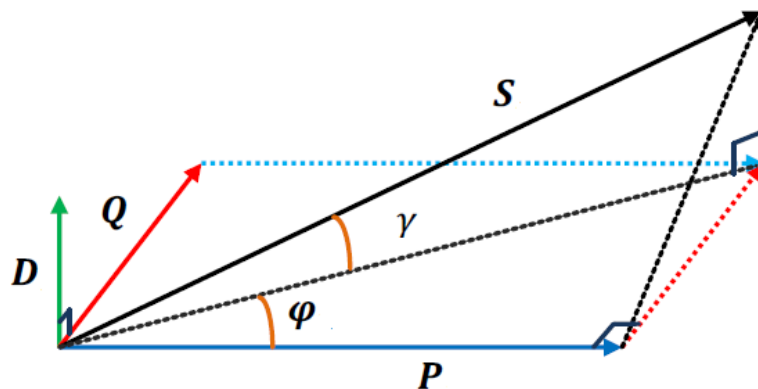


Figure II. 6 - Diagramme de Fresnel des puissances.

II.5 Solutions de dépollution des réseaux électriques

II.5.1 Solutions traditionnelles de dépollution

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

II.5.1.1 Ajout d'une inductance de lissage du courant

L'ajout d'inductances de lissage en amont des dispositifs polluants est une solution communément utilisée afin d'atténuer les harmoniques de rangs élevés puisque leurs impédances augmentent avec la fréquence. Ces inductances réduisent donc la

distorsion de la tension au point de raccordement mais induisent un coût supplémentaire. De plus, elles doivent être dimensionnées pour le courant nominal circulant en ligne.

II.5.1.2 Transformateurs à couplage spécial

L'utilisation de transformateurs primaire étoile (sans neutre) et à secondaire ZIG-ZAG est une solution intéressante.

Cette solution empêche la propagation des courants harmoniques de rang 3 et de leurs multiples. Il s'agit d'une solution centralisée pour un ensemble de charges monophasées.

Elle n'a cependant aucun effet sur les autres rangs d'harmoniques (H5, H7, etc.).

II.5.1.3 Installation d'inductances anti-harmoniques

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

II.5.1.4 Utilisation du redresseur dodécaphasé

Le principe consiste à utiliser un transformateur à deux secondaires délivrant des tensions décalées de 30° entre elles, chacun de ces secondaires alimentant un redresseur en pont de Graëtz qui réalise un redressement hémiphase.

Les redresseurs doivent fournir des courants continus identiques afin que les courants alternatifs qu'ils prélèvent sur les secondaires des transformateurs aient les mêmes valeurs. Dans ces conditions, il y a une recombinaison des courants harmoniques, générés par chacun des redresseurs au primaire du transformateur et le calcul montre que les harmoniques de rang $6k \pm 1$ avec k impair sont éliminés.

C'est le cas en particulier pour les harmoniques 5 et 7 dont les amplitudes théoriques sont les plus importantes. Les harmoniques 11 et 13 sont conservés tandis que les harmoniques 17 et 19 sont éliminés. Les harmoniques restants sont donc de rang $12k \pm 1$ avec k entier naturel. Les deux redresseurs peuvent être connectés en série ou en parallèle comme montré sur la figure II.5.

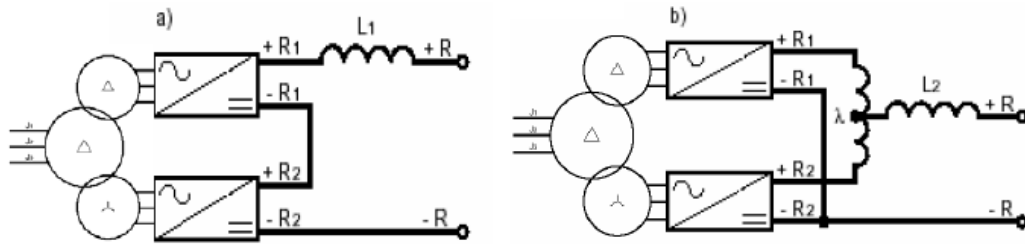


Figure II. 7 - Montage en série (a) ou en parallèle (b) des deux redresseurs.

II.5.1.6 les Filtres passif

Le filtrage consiste à placer en parallèle sur le réseau d'alimentation une impédance de valeur très faible autour de la fréquence à filtrer et suffisamment importante à la fréquence fondamentale du réseau. Un filtre passif est constitué d'éléments passifs tels que des inductances, des condensateurs et des résistances, qui forment une impédance dont la valeur varie en fonction de la fréquence. On connecte alors le filtre passif en parallèle avec le réseau comme le montre la Figure II. 8 de manière à absorber un harmonique de courant donné. Si on veut par exemple éliminer le courant harmonique de rang 5, on dimensionne alors les éléments passifs de manière à ce que l'impédance équivalente du filtre soit la plus petite possible à la fréquence $5 \cdot f_1$ (*fondamental*), le courant circulera alors dans l'impédance la plus faible, c'est à dire dans le filtre passif et donc plus dans l'impédance de court-circuit du réseau. Parmi les dispositifs de filtrage les plus répandus, on distingue le filtre passif résonnant et le filtre passif amorti ou passe-haut.

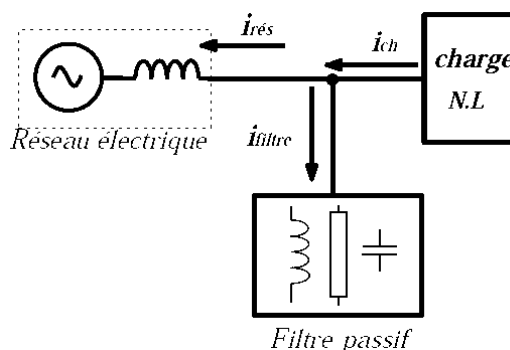


Figure II. 8 - Raccordement d'un filtre passif.

II.5.1.6.1 Filtre passif résonnant

C'est un filtre sélectif constitué d'une résistance, d'un condensateur et d'une bobine en série, comme décrit sur la figure II.9.

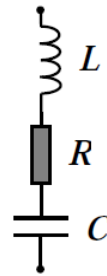


Figure II. 9 - Filtre passif résonant.

Le rang d'accord 'h' correspond au multiple de la fréquence nominale du réseau. La

pulsation de résonance du filtre est : $\omega_a = 2\pi.f_a = 1/\sqrt{LC}$

II.5.1.6.2 Filtre passif amorti

C'est un filtre passe haut constitué d'une inductance en parallèle avec une résistance, le tout en série avec un condensateur comme décrit sur la figure II.10.

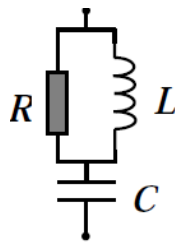


Figure II. 10 - Filtre passif amorti.

II.5.1.7 Inconvénients des filtres passifs

Le filtrage passif est intéressant par le principe mais il a d'importants inconvénients :

La variation de l'impédance de la source influe considérablement sur les caractéristiques de filtrages. La résonance parallèle entre le filtre passif et la source produit des amplifications de courants harmoniques du côté de la source à des fréquences spécifiques. Le fonctionnement en parallèle de plusieurs filtres passifs accordés sur un rang théoriquement égal, entraîne la circulation de courants harmoniques très importants qui provoquent rapidement leur destruction. La présence d'un filtre harmonique raccordé à un réseau d'un niveau de tension donné nécessite de déconnecter tous les condensateurs raccordés au même réseau sous peine de destruction.

II.5.2 Solutions de dépollution moderne

Les inconvénients inhérents des solutions traditionnelles de dépollution ont conduit à concevoir d'autres solutions modernes avec une nouvelle structure plus flexible et efficace. L'apparition de nouveaux composants semi-conducteurs, comme les thyristors GTO et les transistors IGBT, a permis d'envisager de nouvelles solutions de compensation des perturbations des réseaux électriques. Les filtres actifs constituent une alternative intéressante aux solutions classiques. Flexibles car auto-adaptatifs, ils viennent s'ajouter à des structures déjà existantes de convertisseurs. Ils peuvent également être utilisés comme complément aux solutions traditionnelles de dépollution. Le rôle d'un filtre actif est de compenser en temps réel les perturbations, en tout ou en partie, présentes dans les réseaux électriques.

II.6 Le filtrage actif

Le filtrage actif est un dispositif qui exploite au moins un convertisseur statique pour satisfaire la fonction de dépollution harmonique. Les premiers principes de fonctionnement des filtres actifs parallèles ont été présentés dans la littérature dès le début des années 1970 par H. Sasaki [12]. Les recherches sur les moyens de mitigation des harmoniques par l'utilisation des filtres actifs se sont multipliées dans la littérature depuis que L. Gyugyi (1976) a initié les premières structures [13]. Durant les trente dernières années et jusqu'à présent, de nouvelles approches du point de vue structure, contrôle et analyse des filtres actifs sont publiées [1, 14-31]. Il existe un grand nombre de topologies de filtres actifs. Ces filtres peuvent être monophasés ou triphasés. Ces derniers peuvent à leur tour être à trois fils ou à quatre fils lorsque le courant du fil neutre cause un problème. Ce vocable générique regroupe donc en fait une multitude de systèmes, qui se différencient par : [13]

- ✓ le nombre de convertisseurs utilisés, et leur mode d'association,
- ✓ leur type (source de tension, source de courant),
- ✓ les lois de régulation globales (compensation en courant ou en tension),
- ✓ l'association éventuelle avec des composants passifs.

II.6.1 Le filtre actif parallèle (F.A.P)

II.6.1.1 Principe de fonctionnement

Pour diminuer l'impact de ces harmoniques sur le système d'alimentation, le filtre actif (FAP) est connecté en parallèle sur le réseau au point de raccordement commun (PCC), comme le montre la figure II.11. Il injecte dans le réseau électrique au PCC des courants perturbateurs égaux à ceux absorbés par la charge polluante, mais en opposition de phase. Le courant côté réseau redevient alors sinusoïdal. Ainsi l'objectif du *filtre actif parallèle (F.A.P)* consiste à empêcher les courants perturbateurs (harmoniques, réactifs et déséquilibrés), produits par des charges polluantes, de circuler à travers l'impédance du réseau, située en amont du point de connexion du filtre actif [30, 32-34].

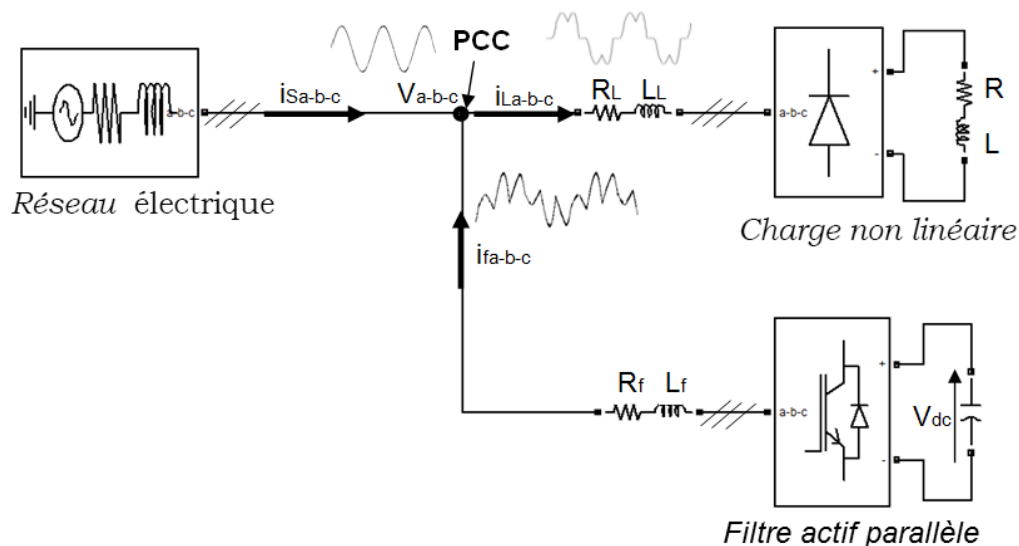


Figure II. 11 - Principe de compensation du filtre à filtre parallèle.

$$\mathbf{i}_{ch} = \mathbf{i}_s + \mathbf{i}_{\text{harmonique}}$$

$$\mathbf{i}_f = \mathbf{i}_{\text{harmonique}}$$

$$\mathbf{i}_{ch} = \mathbf{i}_s + \mathbf{i}_f$$

Il existe deux configurations possibles pour l'onduleur de tension dédié au filtrage actif ; avec ou sans distribution du fil neutre. Dans le cas de fil neutre distribué, on parle alors de filtre à quatre fils, ceci autorisera la circulation de courants homopolaires, par conséquent, cette configuration est intéressante pour le cas où nous avons besoin de compenser les composantes homopolaires.

II.6.1.2 Mise en œuvre(F.A.P)

Les premiers principes de fonctionnement des *filtres actifs parallèles* ont été présentés dans la littérature dès le début des années 1970. En 1976, une première famille de *filtre actif parallèle* a été conçue à partir d'onduleurs à transistors de puissance commandés en MLI. Ces premiers dispositifs de puissance étaient alors proposés pour la seule compensation des courants harmoniques. Cependant, à cette époque, il était encore difficile de concevoir ce type de système pour des applications industrielles. En effet, dans ces années là, il était presque impossible de trouver, sur le marché, des interrupteurs de puissance capables de fonctionner aux fréquences de commutation et aux niveaux de puissance exigés par la réalité industrielle.

Cette barrière technologique sera franchie, dès 1977, lors de la conception d'un premier prototype de *filtre actif parallèle* à base de thyristors à commutations naturelles pour la compensation de courant harmonique. Cependant, l'application des onduleurs à base de thyristor a tout de suite posé le problème de la génération non désirée de composantes injectées sur le réseau à la fréquence de commutation. La même raison a également empêché l'utilisation de compensateurs statiques parallèles à thyristors, lesquels avaient été conçus pour la compensation conjointe de la puissance réactive et des courants déséquilibrés.

Au cours des années 1980, des progrès importants dans le domaine des semi-conducteurs ont permis de développer de nouveaux composants de puissance associant hautes fréquences de commutation et fortes puissances. Profitant de ces avancées, et de l'avènement des interrupteurs de puissance du type GTO et IGBT, de nombreux onduleurs de puissance, commandés en MLI, ont pu être conçus en vue de répondre aux contraintes industrielles de conception des *filtres actifs parallèles* [1, 3, 11].

Ainsi, ces derniers ont commencé à être commercialisés et installés à travers le monde, et plus spécialement dans les pays les plus industrialisés comme le Japon. Ces premiers prototypes ne compensaient alors que les perturbations harmoniques de courant. Suite à ces premiers développements, d'autres types de *filtre actif parallèle* ont pu être réalisés pour compenser à la fois la puissance réactive, et/ou les harmoniques et les déséquilibres de courant. Actuellement, les filtres actifs parallèles sont essentiellement installés par les consommateurs industriels. L'évolution future de ces dispositifs de puissance pourrait

autoriser le fournisseur d'énergie à prendre un rôle plus important, en lui permettant de les installer lui-même. Cette approche permettrait d'amortir la propagation des harmoniques causées par la résonance, laquelle peut être observée entre les inductances du réseau et les batteries de condensateur installées pour améliorer le facteur de puissance. De même, des *filtres actifs parallèles* installés par le fournisseur auraient aussi pour objectif de réduire la distorsion harmonique de tension en amont, côté réseau électrique [1, 3].

II.6.2 Le filtre actif série (F.A.S)

II.6.2.1 Principe de fonctionnement

Le filtre actif série se comporte dans ce cas, comme le montre la figure II.12, comme une source de tension qui s'oppose aux tensions perturbatrices (creux, déséquilibre, harmonique) venant de la source et également à celles provoquées par la circulation des courants perturbateurs à travers l'impédance du réseau. Ainsi la tension aux bornes de la charge à protéger est purement sinusoïdale [1, 10, 11].

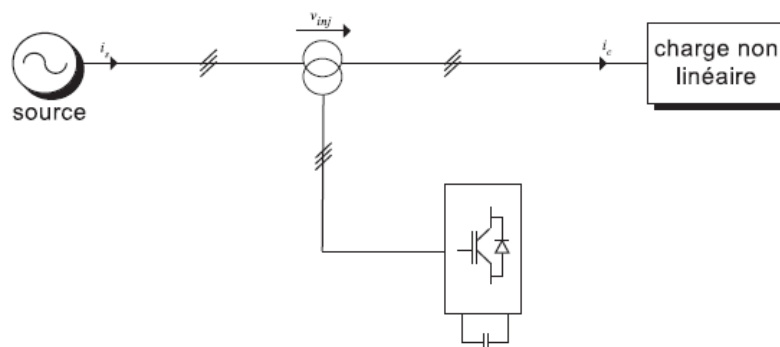


Figure II. 12 - Filtre actif série.

II.6.2.2 Mise en œuvre(F.A.S)

Le *filtre actif Série (F.A.S)* est une solution adaptée à la compensation des tensions perturbatrices, harmoniques, déséquilibrées et des creux de tension. Ces perturbations trouvent généralement leurs origines dans le réseau lui-même mais peuvent parfois être provoquées par les charges elles-mêmes. En 1976, une famille de *filtres actifs séries* avec des onduleurs à transistors contrôlés en MLI a été présentée [1, 11].

Un compensateur statique pour le rééquilibrage de la tension du réseau électrique a été proposé en 1985. La génération, par l'onduleur à thyristors, des composantes non désirées, ayant une faible fréquence de commutation, a découragé l'avancement pratique

de cette solution. En 1990, un compensateur de tension à base d'onduleur de tension triphasé a été proposé pour compenser le déséquilibre de tension de réseau électrique. Depuis, beaucoup de travaux ont été consacrés à l'amélioration de la qualité de compensation du déséquilibre de la tension du réseau. D'autres articles ont introduit le problème des creux de tension et solution de compensation par le compensateur actif série [3, 11].

II.6.3 La combinaison parallèle-série actifs (UPQC)

La *combinaison parallèle-série actifs*, aussi appelée *Unified Power Quality Conditioner (UPQC)*, résulte de l'association des deux *filtres actifs parallèle et série*, comme le montre la figure II.13. Profitant des avantages des deux filtres actifs, l'*UPQC* assure un courant et une tension sinusoïdaux du réseau électrique à partir d'un courant et d'une tension perturbés de celui-ci [1, 3, 11, 35-41].

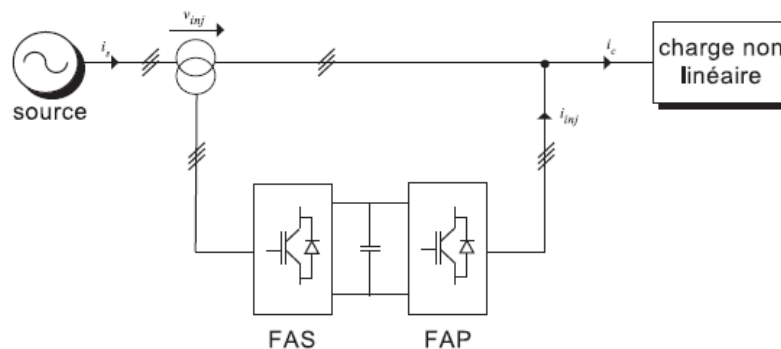


Figure II. 13 - Combinaison des filtres actifs série et parallèle.

II.6.4 Comparatif et choix des filtres actifs

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

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

La combinaison parallèle-série actifs (UPQC) est la solution universelle pour compenser toutes les perturbations en courant et en tension.

II.6.5 Comparaison entre le filtre actif et un filtre passif

Le **Tableau II.1** montre la comparaison entre le filtre actif d'harmoniques et le filtre passif.

Tableau II. 1- Comparaison entre le filtre actif d'harmoniques et un filtre passif.

	Filtre passif	Filtre actif
Action sur les courants harmoniques	Nécessite un filtre pour chaque fréquence (encombrant)	Agit simultanément sur plusieurs fréquences
Influence d'une variation de fréquence	Efficacité réduite	Aucune conséquence
Influence d'une modification de l'impédance	Risque de résonance	Aucune conséquence
Influence d'une augmentation de courant	Risque de surcharge et de détérioration	Aucun risque de surcharge, mais efficacité diminuée
Ajout de matériel (augmentation de charge)	Nécessite des modifications sur le filtre, dans certains cas	Aucun problème si $I_{\text{conditionneur}} > I_{\text{harmoniques-de-charge}}$
Action sur les harmoniques suivant leur ordre	Très difficile	Possible, grâce au paramétrage
Modification de la fréquence fondamentale	Modification impossible	Possible, grâce à la reconfiguration
Encombrement	Important	Faible
Poids	Important	Faible

II.7 Filtre hybride (Combinaison hybride active et passive)

Afin de réduire le dimensionnement et par conséquent le prix des filtres actifs, l'association de filtres actifs de faible puissance à des filtres passifs peut être une solution. Dans ce cas, les filtres passifs ont pour rôle d'éliminer les harmoniques prépondérants permettant de réduire le dimensionnement des filtres actifs qui ne compensent que le reste des perturbations. Plusieurs configurations ont été présentées dans la littérature les plus étudiées étant [1, 3, 11, 42-46] :

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

II.7.1 Le filtre actif série avec des filtres passifs parallèles

Le rôle du filtre actif série dans ce cas est d'empêcher les courants harmoniques de circuler vers le réseau et de les obliger à passer par les filtres passifs raccordés à leurs fréquences comme le montre la figure II.14.

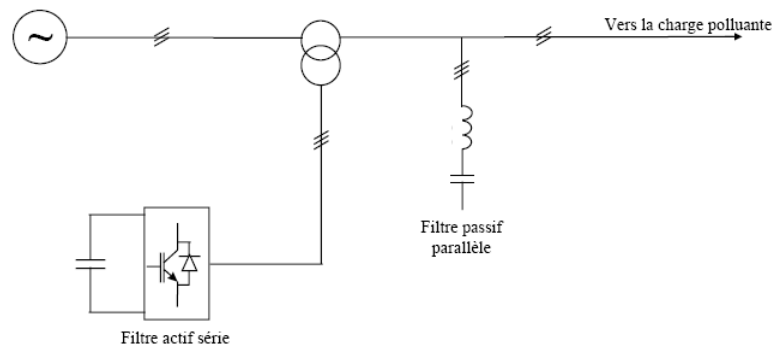


Figure II. 14 - Filtre actif série et filtre passif parallèle.

II.7.2 Le filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles

Le principe de fonctionnement de cette configuration, présentée en figure II.15, est la même que la précédente avec l'avantage de réduire encore le dimensionnement du *filtre actif série* car le courant qui le traverse est plus faible. De plus, le *filtre actif série* est à l'abri d'un éventuel court-circuit de la charge [1, 3, 11].

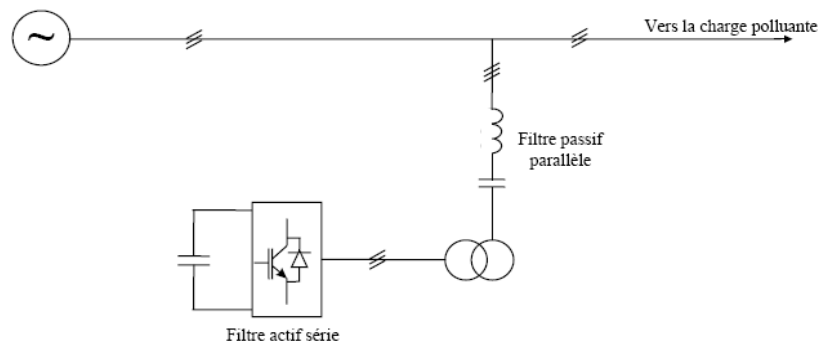


Figure II. 15 - filtre actif série connecte en série avec un filtre passif parallèle.

II.7.3 Le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle

Le rôle du *filtre actif parallèle* dans cette configuration, montrée en figure II.16, est la compensation des courants harmoniques basses fréquences émis par la charge polluante. Le filtre passif accordé sur une fréquence élevée, élimine les harmoniques hautes fréquences y compris ceux créés par le filtre actif parallèle. Ce type de filtrage a déjà été appliqué à la compensation des courants harmoniques émis par un cycloconvertisseur de forte puissance [1, 3, 11].

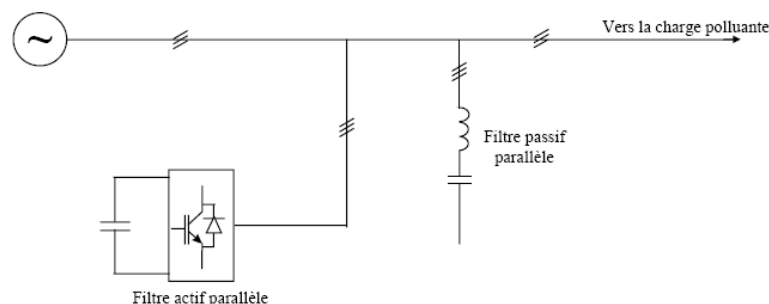


Figure II. 16 - Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle.

II.8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons fait une étude détaillée sur les harmoniques, leurs caractéristiques, sources, conséquences et effets néfastes qui peuvent aller des échauffements et de la dégradation du fonctionnement jusqu'à la destruction de ces équipements. On y a présenté plusieurs solutions traditionnelles qui, avec l'évolution des réseaux électriques et des charges, n'offrent pas de performances satisfaisantes. Les filtres passifs sont souvent pénalisés pour cause d'encombrement et de résonance.

Nous avons présenté des solutions modernes de dépollution telles que les filtres actifs parallèles et séries, et leur combinaison ainsi que les filtres hybrides. Nous avons évoqué leur rôle dans la compensation de tous les types de perturbation susceptible d'apparaître dans un réseau électrique basse tension.

Le filtre actif parallèle (FAP) peut être installé pour compenser toutes les perturbations de courant comme les harmoniques, le déséquilibre et la puissance réactive. Le filtre actif série peut être installé pour compenser toutes les perturbations de tension comme les harmoniques et les creux de tension. La combinaison parallèle-série actifs est la solution universelle pour compenser toutes les perturbations en courant et en tension. C'est ainsi que, dans l'objectif d'améliorer la qualité de l'énergie électrique qui doit être conforme aux nouvelles contraintes normatives, nous nous intéresserons dans la suite de cette thèse au filtrage actif parallèle.

Chapitre III

Filtre actif parallèle : Structure et stratégies de commande

Introduction

Les filtres actifs représentent un moyen efficace pour la compensation des harmoniques générés par des charges non linéaires. Ils compensent les perturbations dues à une charge non linéaire en réinjectant en opposition de phase sur le réseau les harmoniques et le réactif du courant consommé par la charge afin que le réseau n'ait plus qu'à fournir un courant sinusoïdal en phase avec la tension. Les performances du filtre actif parallèle, et notamment la diminution du taux de distorsion totale du courant de source et l'amélioration du facteur de puissance, sont liées aux performances de la génération des références de courants harmoniques et dépendent aussi de la stratégie de commande adoptée. Cependant, un dispositif de filtrage actif est caractérisé par plusieurs éléments qui influencent ensemble la performance du filtrage.

L'identification du courant perturbé est une étape essentielle dans le processus de commande des filtres actifs. De nos jours, les objectifs de recherche concernent toujours l'amélioration de ces méthodes afin d'obtenir de meilleurs résultats. Plusieurs méthodes d'identification des courants de référence ont été développées depuis la mise en place des premiers filtres actifs afin de générer les signaux de référence servant à la commande du filtre actif.

Dans ce chapitre nous étudierons la structure générale du filtre actif parallèle, laquelle a été divisée en deux parties : la partie puissance et la partie contrôle-commande.

Dans la partie puissance, nous introduirons les principaux blocs de cette structure, à savoir l'onduleur de tension et l'élément de stockage d'énergie. Dans la partie contrôle-commande, nous aborderons les principaux blocs, soit l'identification des courants perturbés, la régulation de la tension continue et du courant du filtre actif parallèle.

III.1 Structure d'un filtre actif parallèle

La structure des filtres actifs se compose essentiellement de deux blocs: la *partie puissance* et la *partie contrôle-commande* comme le montre la figure III.1.

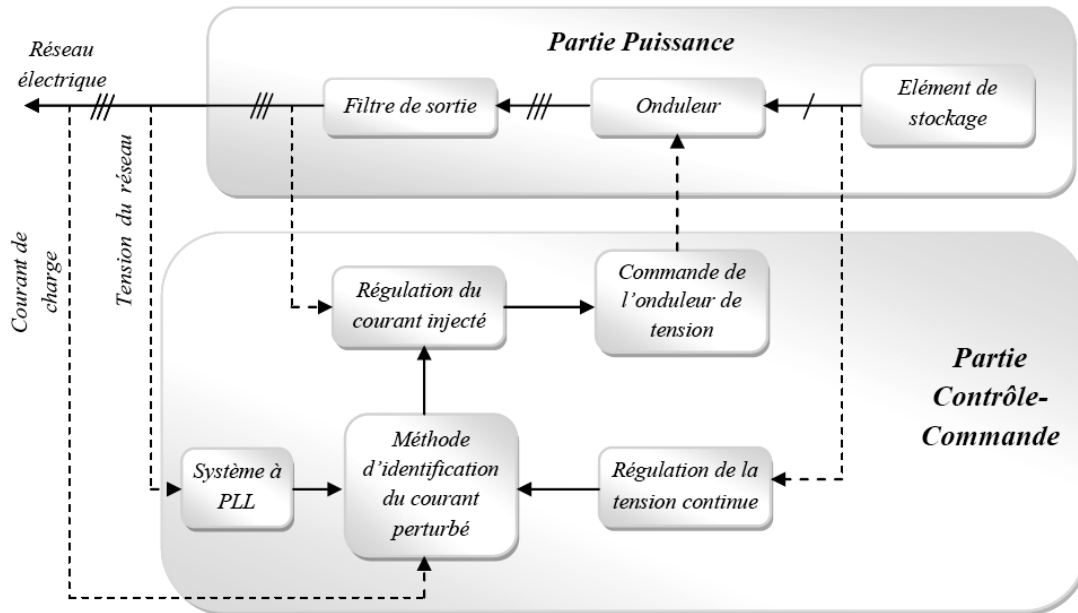


Figure III. 1 -Structure d'un filtre actif parallèle.

a) Partie puissance du FAP

La partie puissance du FAP est constituée :

- d'un onduleur à base d'interrupteurs de puissance, commandables à l'ouverture et à la fermeture (GTO, IGBT, MOSFET, etc....) avec des diodes en antiparallèle.
- d'un circuit de stockage d'énergie.
- d'un filtre de sortie.

b) Partie commande du FAP

La partie commande du FAP est constituée :

- de la méthode d'identification des courants perturbés.
- de la régulation de la tension continue appliquée aux éléments de stockage d'énergie.
- de la régulation du courant injecté sur le réseau à partir de l'onduleur de tension.
- de la commande de l'onduleur de tension.

III.2 Etude de la partie puissance du FAP

III.2.1 structures du filtre actif parallèle

Il existe deux structures du FAP, la structure courant et la structure tension.

III.2.1.1 Structure tension

L'onduleur de tension connecté en parallèle au réseau est illustré par la figure III.2. La capacité C_f joue le rôle d'une source de tension continue. La tension à ses bornes V doit être positive et maintenue quasiment constante. Ses fluctuations doivent être faibles d'une part pour ne pas dépasser la limite en tension des semi-conducteurs constituant les interrupteurs, d'autre part pour ne pas dégrader les performances du filtre actif.

L'onduleur de tension est relié au réseau par l'intermédiaire d'un filtre du premier ordre constitué d'une inductance L_f . Deux rôles sont dévolus à ce filtre: d'une part transformer les variations de tension V_f en variations de courant, d'autre part filtrer les fréquences de commutation des bras d'onduleur. Les interrupteurs de l'onduleur sont réversibles en courant. Ils sont constitués de semi-conducteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture en antiparallèle avec une diode.

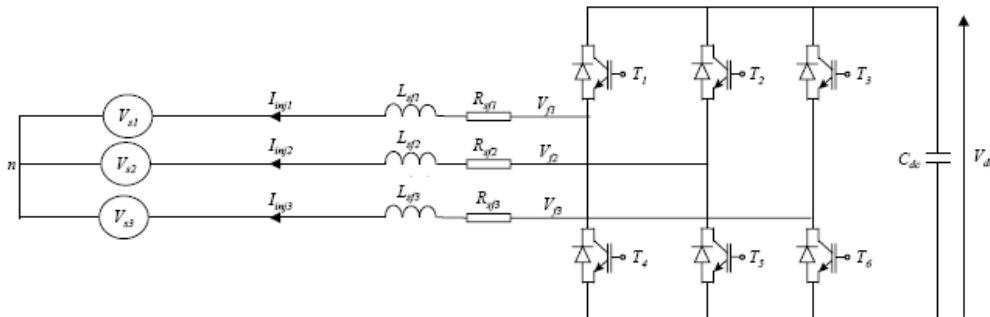


Figure III. 2 - Filtre actif parallèle à structure de tension.

III.2.1.2 Structure courant

La figure III.3 représente le schéma de principe d'un onduleur de courant [1, 10]. L'inductance joue le rôle d'une source de courant continu. Le courant i_L traversant cette inductance est maintenu quasiment constant pour ne pas dégrader les performances du filtre actif.

L'onduleur de courant est relié au réseau par l'intermédiaire d'un filtre passe-bas du second ordre constitué d'une inductance L_f et d'une capacité C_f . Ainsi le courant i_f du

le filtre actif est égal au courant délivré par l'onduleur filtré par le filtre LC dont la fréquence propre est :

$$\frac{1}{2\pi\sqrt{L_f C_f}}$$

La bande passante du filtre actif est donc essentiellement imposée par le choix de L_f et de C_f . Ceux-ci peuvent être dimensionnés de manière à atténuer la fréquence de commutation des interrupteurs de l'onduleur. Les interrupteurs sont unidirectionnels. Ils sont formés par des transistors commandés à l'ouverture et à la fermeture. Ceux-ci ne pouvant supporter de tension inverse, ils nécessitent une diode en série [1, 10].

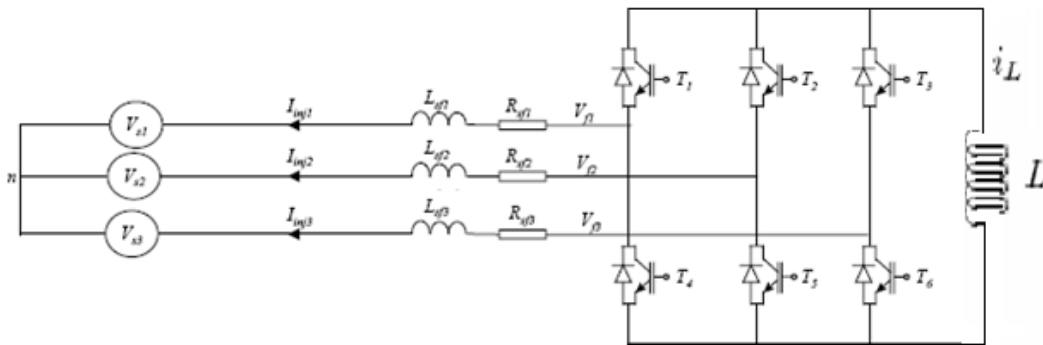


Figure III. 3 - Filtre actif parallèle à structure de courant.

III.2.1.3 Comparaison des deux structures

Dimensionnement des circuits de stockage : Pour les faibles puissances, le stockage de l'énergie dans un condensateur (structure tension) est plus efficace et moins coûteux. En revanche, pour les fortes puissances une inductance (structure courant) est plus adaptée.

Protection contre les surtensions et surintensités : Les interrupteurs constituant un onduleur de tension doivent être protégés contre les surintensités tandis qu'un onduleur de courant nécessite une protection contre les surtensions. Cette dernière est plus complexe à réaliser technologiquement.

Ainsi, pour des installations de faible ou de moyenne puissance, la structure tension semble mieux adaptée et plus simple à réaliser [1, 3, 10]. Par conséquent, nous avons retenu cette structure par la suite.

III.2.2 Système de stockage d'énergie

Le stockage de l'énergie du côté continu se fait souvent par un système de stockage capacitif représenté par un condensateur C_{dc} qui joue le rôle d'une source de tension continue V_{dc} . Le choix des paramètres du système de stockage (V_{dc} et C_{dc}) se répercute sur la dynamique et sur la qualité de compensation du filtre actif parallèle. En effet, une tension V_{dc} élevée améliore la dynamique du filtre actif. De plus, les ondulations de la tension continue V_{dc} , causées par les courants engendrés par le filtre actif et limitées par le choix de C_{dc} , peuvent dégrader la qualité de compensation du *filtre actif parallèle*. Ces fluctuations sont d'autant plus importantes que l'amplitude du courant du filtre est grande et que sa fréquence est faible [10]. Pour cette raison, nous pouvons estimer que seuls les premiers harmoniques sont pris en compte dans le choix des paramètres du système de stockage. Pour démontrer ceci, deux méthodes peuvent être utilisées :

- *La première* méthode se base sur le calcul de l'énergie fournie par le filtre actif pendant une demi-période de la pulsation de puissance liée aux deux premiers harmoniques (5 et 7 pour un pont redresseur de Graetz). En choisissant un taux d'ondulation acceptable, généralement de l'ordre de 5% de V_{dc} , nous pouvons calculer la capacité C_{dc} à partir de la relation suivante :

$$C_{dc} = \frac{V_s \cdot \sqrt{I_5^2 + I_7^2 - 2I_5 I_7 \cos(5\alpha - 7\alpha)}}{2\omega \cdot \varepsilon \cdot V_{dc}^2} \quad (\text{III.1})$$

Avec V_s la tension simple du réseau, I_h le courant harmonique du rang h et α l'angle d'allumage des thyristors du pont Graetz.

Puisque l'augmentation de la valeur de la tension continue améliore la commandabilité du filtre actif et sachant que le choix de cette tension se répercute en grande partie sur le choix des interrupteurs, la tension continue V_{dc} doit être choisie comme la plus grande tension respectant les contraintes des interrupteurs.

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

$$C_{dc} = \frac{I_h}{\varepsilon \cdot V_{dc} \cdot \omega} \quad (\text{III.2})$$

Avec ε_h , la pulsation la plus faible des harmoniques à compenser.

III.2.3 Inductance de Couplage

Afin de connecter l'onduleur de tension en parallèle avec le réseau et lui faire remplir le rôle de source de courant, il est nécessaire de disposer entre les deux un filtre de raccordement ou dit de sortie de nature inductive. La fonction de ce filtre permet d'une part de convertir le compensateur en un dipôle de courant du point de vue du réseau, et d'autre part à limiter la dynamique du courant, de façon à le rendre plus facile à contrôler. Dans la plupart des cas, Le filtre utilisé en sortie de l'onduleur est une inductance qui s'appelle inductance de couplage ou inductance de lissage. Cette inductance est un paramètre important parce qu'avec une fréquence de commutation élevée, il faut régler le niveau d'ondulation du courant de compensation à injecter. Pour un filtrage performant, les interrupteurs du convertisseur doivent être commandés parfaitement. Le contrôle de la forme d'onde du courant est limité par la fréquence de commutation du convertisseur et aussi par la tension disponible de l'inductance. Pour une fréquence de commutation élevée et une faible puissance, l'inductance doit suffisamment être faible pour être capable de suivre la vitesse de changement du courant de compensation. D'autre part, pour une puissance et une fréquence de commutation faibles, l'inductance doit être de grande valeur pour ralentir la vitesse de changement du courant de compensation. Cette inductance est dimensionnée pour satisfaire la garantie de la dynamique du courant de compensation et empêcher les composantes dues aux commutations de se propager sur le réseau électrique [10, 47].

III.3 Etude de la partie de commande

La stratégie de commande se base sur la détection des courants perturbateurs dans le domaine temporel. Trois possibilités d'identification des courants perturbateurs ont déjà été proposées.

- ✓ *Identification à partir de la détection du courant de la charge polluante,*
- ✓ *Identification à partir de la détection du courant de la source,*
- ✓ *Identification à partir de la détection de la tension de la source.*

La première méthode est la plus appropriée au filtre actif parallèle installé par le consommateur pour compenser les courants perturbateurs causés par ses charges polluantes.

III.3.1 Méthode d'identification des courants perturbés

L'identification du courant polluant est une étape essentielle dans le processus de commande des filtres actifs. Plusieurs méthodes d'identification des courants de référence ont été développées dans la littérature, afin de générer les signaux de référence servant à la commande du filtre actif. Ces méthodes se classifient en deux groupes selon le domaine temporel ou fréquentiel. La figure III.4 illustre les différentes techniques d'identification des courants de références.

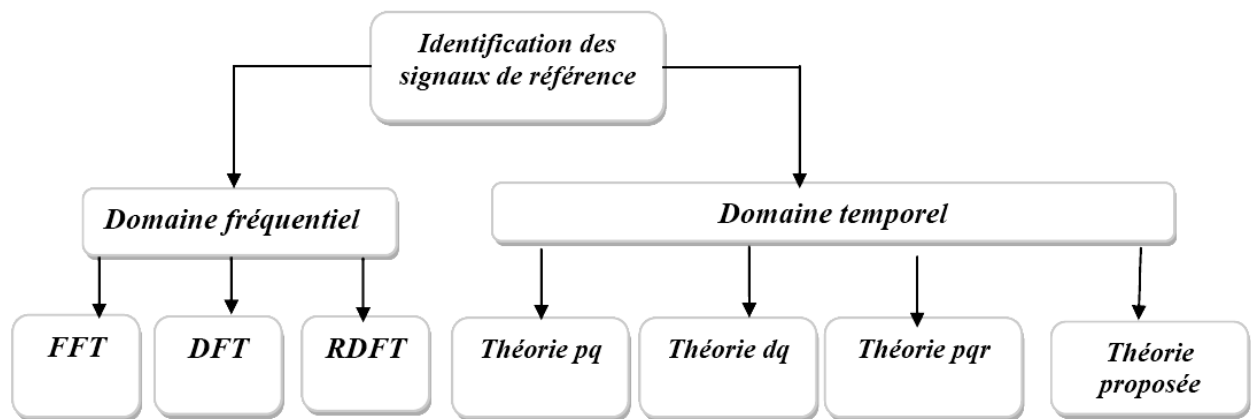


Figure III. 4 - Les techniques d'identification des courants harmoniques.

III.3.1.1 Identification dans le domaine fréquentiel

Les méthodes du domaine fréquentiel telles que la transformation de Fourier discrète (DFT), la transformée rapide (FFT) et la Transformée de Fourier discrète récursive (DFTR) utilisent l'analyse de Fourier pour identifier les harmoniques de courant. Ces méthodes sont bien adaptées aux charges où le contenu harmonique varie lentement. Par ailleurs, elles ont l'avantage d'identifier les harmoniques individuellement. Elles permettent donc une compensation sélective. Néanmoins, les inconvénients les plus importants de ces méthodes sont des résultats moyens en régime transitoire et un volume de calcul et une allocation de mémoire considérables [1, 10, 47, 48].

III.3.1.1 Identification dans le domaine temporel

Les méthodes de contrôle dans le domaine temporel sont basées sur la comparaison instantanée des signaux de compensation harmonique de référence, sous

forme de tension ou de courant, aux signaux harmoniques réels. Le principe est de maintenir la tension ou le courant instantané de référence proche du signal réel avec une tolérance raisonnable. Le plus grand défi de cette approche est sans doute l'élimination de la composante fondamentale pour générer des signaux harmoniques référence [1, 10, 11]. Les méthodes les plus connues dans le domaine temporel sont : la méthode de la Puissance Réactive Instantanée (p-q) et la méthode de la Référence Synchrone (d-q).

III.3.2 Théorie de la Puissance Réactive Instantanée (méthode p-q)

En 1983, Akagi et al, ont proposé la théorie généralisée de la Puissance Réactive Instantanée en circuits triphasés (également connu comme la théorie (p-q)). Elle est basée sur les valeurs instantanées dans les systèmes d'alimentation triphasés [3, 10, 18, 19, 49]. Cette méthode exploite la transformation de Concordia des tensions simples et des courants de charge non linéaire, afin de calculer les puissances instantanées réelle et imaginaire.

Cette méthode exploite la transformation (α - β) pour obtenir les puissances réelles et imaginaires. Notons par (V_α, V_β) et (I_α, I_β) les composantes orthogonales du repère (α - β) associées respectivement aux tensions de raccordement du filtre actif parallèle (V_s) et aux courants absorbés par les charges polluantes ($I_{ch1, 2,3}$).

Les tensions par la relation suivante:

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

Et les courants par la relation :

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ch1} \\ I_{ch2} \\ I_{ch3} \end{bmatrix} \quad (\text{III.4})$$

Les composantes indicées (0) représentent les séquences homopolaires du système de courant et de tension triphasé.

La puissance active instantanée $P(t)$, est définie par la relation suivante:

$$P(t) = V_{s1} I_{s1} + V_{s2} I_{s2} + V_{s3} I_{s3} = P(t) + P_0(t)$$

$$P(t) = V_{\alpha} I_{\alpha} + V_{\beta} I_{\beta} \quad (\text{III.5})$$

$$P_0(t) = V_0 I_0$$

Avec :

$P(t)$ la puissance réelle instantanée,

$P_0(t)$ la puissance homopolaire instantanée,

L'avantage de la transformation α - β est la séparation des séquences homopolaires du système triphasé de courant ou de tension. De la même manière, la puissance imaginaire instantanée peut s'écrire sous la forme suivante :

$$q(t) = -\frac{1}{\sqrt{3}} [(V_{s1} - V_{s2})I_{s3} + (V_{s2} - V_{s3})I_{s1} + (V_{s3} - V_{s1})I_{s2}] = V_{\alpha} I_{\beta} - V_{\beta} I_{\alpha} \quad (\text{III.6})$$

A partir des relations (4.4) et (4.5), nous pouvons établir la relation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} P \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & V_{s\beta} \\ -V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{\alpha} \\ I_{\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{III.7})$$

Dans le cas général, chacune des puissances p et q comporte une partie continue (composante fondamentale) et une partie alternative (composantes harmoniques), ce qui nous permet d'écrire l'expression ci-dessous :

$$\begin{cases} P = \bar{P} + \tilde{P} \\ q = \bar{q} + \tilde{q} \end{cases} \quad (\text{III.8})$$

Avec :

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

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

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

Pour l'extraction de puissance alternative (composante perturbatrice) on utilise un filtre passe bas avec une boucle de retour ou d'un filtre passe haut comme le présente la figure III.5.

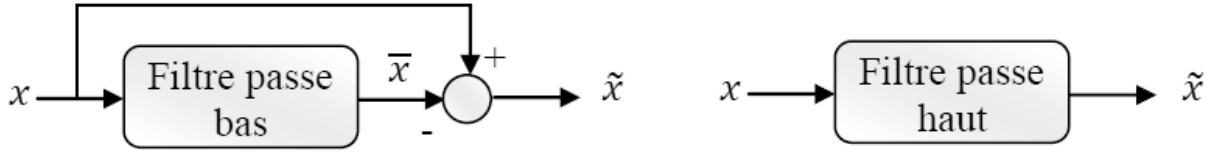


Figure III. 5 - Principe de séparation de la composante harmonique.

L'ordre de ce filtre passe-bas définit la dynamique et l'efficacité de la méthode d'identification. En inversant la relation (III.7), nous pouvons déterminer les courants dans le repère α - β comme le montre l'équation:

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{V_{s\alpha}^2 + V_{s\beta}^2} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ q \end{bmatrix} \quad (\text{III.9})$$

En considérant les équations (III.7) et (III.9) nous pouvons décomposer le courant dans le repère $(\alpha$ - $\beta)$ en trois composantes, active et réactive à la fréquence fondamentale et les harmoniques. Ceci conduit à:

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{P} \\ 0 \end{bmatrix}}_{\text{Courant actif}} + \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{q} \end{bmatrix}}_{\text{courant réactif}} + \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{P} \\ \tilde{q} \end{bmatrix}}_{\text{courant harmoniques}} \quad (\text{III.10})$$

Avec $V_{s\alpha}^2 + V_{s\beta}^2$ supposé constant dans l'hypothèse d'une tension sinusoïdale équilibrée du réseau électrique.

Cette expression montre que l'identification des différentes composantes du courant dans le repère $(\alpha$ - $\beta)$ revient à séparer les termes continus des puissances réelles et imaginaires instantanées. Les courants perturbateurs triphasés qui représentent les courants identifiés, dits courants de références (I_{ref}), sont calculés à partir de la transformation $(\alpha$ - $\beta)$ inverse donnée par la relation:

$$\begin{bmatrix} I_{ref1} \\ I_{ref2} \\ I_{ref3} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{III.11})$$

Avec I_{α} , I_{β} courants perturbateurs calculés dans le repère α - β à partir des courants réactifs et harmoniques de la relation (III.10)

Finally, the identification algorithm that we have defined can be represented by the synopsis of Figure III.6. For the sake of simplification, we will describe the matrices of the relations (II.2 and II.3), after having removed the homopolar components.

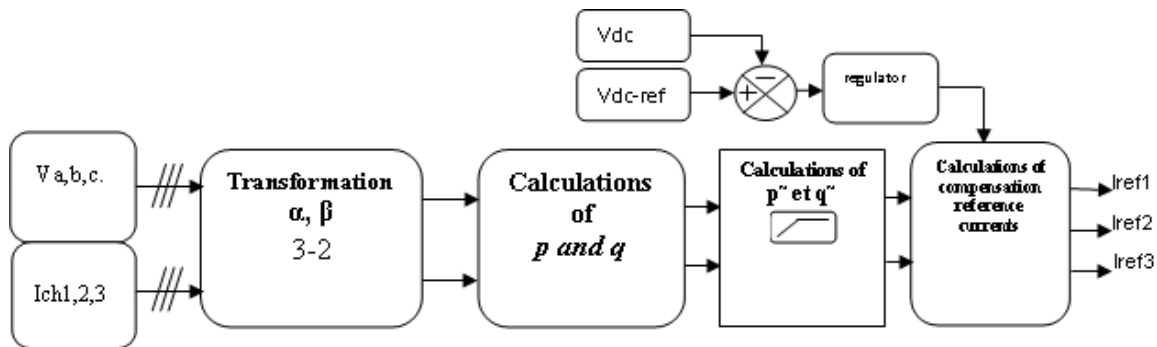


Figure III. 6 - Schéma de principe de la méthode d'identification des puissances instantanées.

This method requires that the network voltage must be healthy (sinusoidal and balanced), otherwise it is not applicable[1]. Since the network voltage is often perturbed and/or distorted, and in order to generalize the application of this identification method that we have adopted to all types of voltage, the use of the phase-locked loop (PLL) is indispensable for the synthesis of the three sinusoidal reference currents.

III.3.3 Méthode Référentiel Synchronique (d-q théorie)

This method is based on Park's transformation and is essentially based on the calculation of the fundamental pulsation obtained by a phase-locked loop, more known under the Anglo-Saxon name PLL (Phase Locked Loop). It has the advantage of being insensitive to network voltage perturbations. In this method, the reference currents are obtained directly from the load currents. However, a transformation from the α - β plane to the d - q reference frame (created by a PLL) synchronized with the network voltages is indispensable. The advantage of this method is that the reference currents are obtained directly from the load currents, without taking into account the network voltages. This is an important advantage since the generation of the currents

de compensation ne sera affectée ni par les distorsions, ni par les déséquilibres présents dans les tensions de source, renforçant ainsi la robustesse et la performance de la compensation [7, 38, 50, 51].

L'expression des courants de charge polluante dans le plan (α - β) à partir de leurs expressions dans le système triphasé (abc) est donnée par la transformation de Concordia

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{La} \\ i_{Lb} \\ i_{Lc} \end{bmatrix} \quad (\text{III.12})$$

Les courant i_d et i_q sont calculés en utilisant la transformation (α - β) \rightarrow (d - q) :

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{III.13})$$

Avec θ est la position angulaire de la tension fondamental du réseau estimée par la PLL.

Les courants i_d et i_q peuvent être décomposés en une composante continue (DC) liée au fondamentale et une composante alternative (AC) liée aux harmoniques.

$$i_d = \bar{i}_d + \tilde{i}_d \quad (\text{III.14})$$

$$i_q = \bar{i}_q + \tilde{i}_q \quad (\text{III.15})$$

La composante continue de l'axe d est filtrée à l'aide d'un filtre passe-haut. Maintenant, la sortie du filtre passe-haut sera pur composante alternative. La partie de l'axe AC et le courant d l'ensemble de q axe sont utilisés pour l'élimination des harmoniques et compensation de puissance réactive.

Les courants de référence ($i_{ref\alpha}$ et $i_{ref\beta}$) sont déterminés par la transformation inverse du Park.

$$\begin{bmatrix} i_{ref\alpha} \\ i_{ref\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{i}_d \\ \tilde{i}_q \end{bmatrix} \quad (\text{III.16})$$

Enfin, Les courants de référence dans le système triphasé (abc) sont donnés par la transformation inverse de Concordia :

$$\begin{bmatrix} i_{refa} \\ i_{refb} \\ i_{refc} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ref\alpha} \\ i_{ref\beta} \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (\text{III.17})$$

La figure III.7 représente l'algorithme d'identification de la méthode $d-q$.

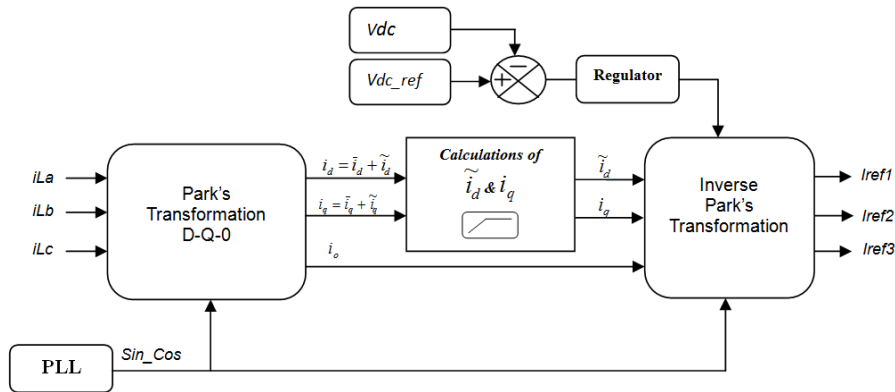


Figure III. 7 - Schéma de principe de la méthode $d-q$.

III.3.4 Le système à base de Boucle de verrouillage de phase PLL

Dans les systèmes connectés au réseau, la boucle de verrouillage de phase PLL (phase-locked loop) est un circuit utilisé fréquemment pour la commande de l'électronique de puissance, comme dans les filtres actifs de puissance. Son rôle principal dans les applications électroniques est d'identifier la fréquence ou la position angulaire d'un signal périodique, pour générer un autre signal synchronisé avec le dernier. Cependant, de nombreuses applications de puissance nécessitent une phase d'un signal sinusoïdal idéal verrouillé sur les tensions de fonctionnement. Puisque les tensions de service public ne sont pas toujours sinusoïdales et équilibrées. La PLL est utilisée pour extraire la composante fondamentale. La forme de base de la PLL est représentée sur la figure III.8, contenant un détecteur de phase PD (transformation des coordonnées), un correcteur (filtre passe bas) et un oscillateur commandé en tension VCO (intégrateur) [10].

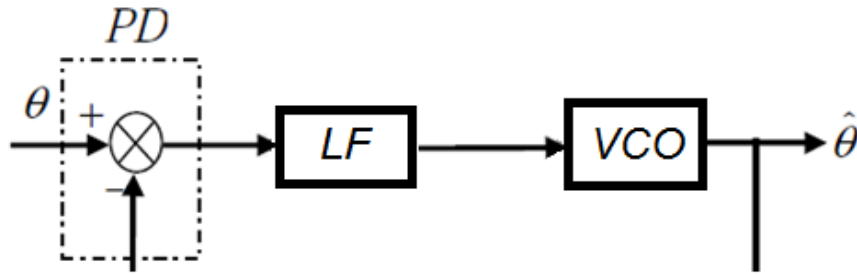


Figure III. 8 - Synoptique de la PLL classique.

III.3.4.1 Principe de fonctionnement de PLL

Le système à base de PLL, employé ici, permet d'extraire la phase de la composante directe de tension qui est nécessaire pour l'identification des courants perturbateurs. Son fonctionnement se base sur la transformation de Park dans le repère (d,q) .

A partir de la figure III.9, les tensions V_{S123} , mesurées au point de raccordement du filtre actif parallèle, subissent dans un premier temps la transformation $(\alpha\beta)$. Les tensions ainsi obtenues sont exprimées dans le repère de Park par une rotation $P(-\theta)$. L'angle de cette rotation, issu de l'intégration de l'estimation de la pulsation déterminée par le régulateur, représente l'angle de la composante directe de tension [3, 10, 52].

Nous souhaitons que l'angle de rotation estimé soit égal à l'angle réel de la tension directe. Cela peut être réalisé en choisissant la valeur de V_{d-ref} qui satisfait cette condition.

La PLL sera verrouillée lorsque l'angle estimé sera égal à la tension directe ($\hat{\theta}_d = \theta_d$).

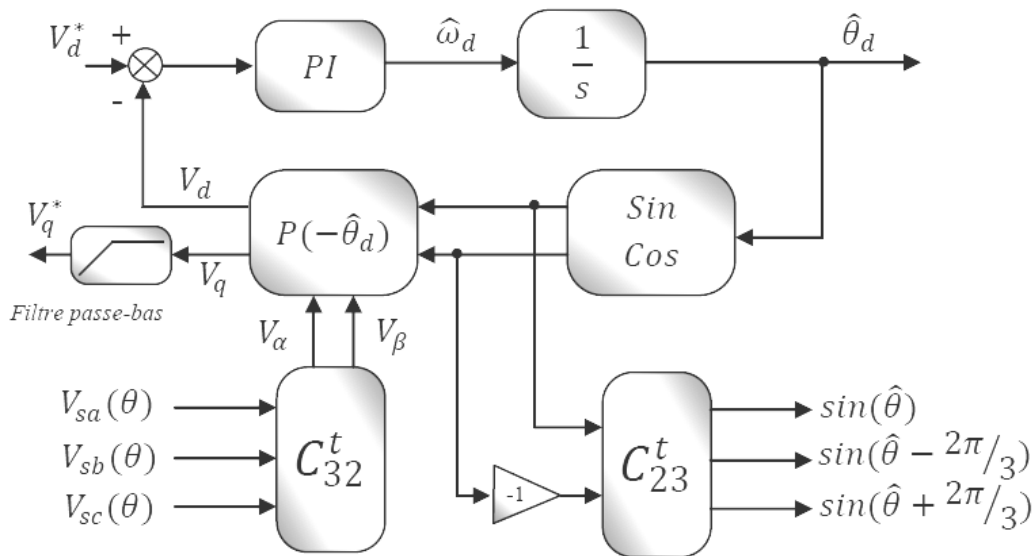


Figure III. 9 - Synoptique détaillé de la P.L.L classique.

Une fois les courants de références obtenus, l'étape suivante consiste à étudier les méthodes de contrôle de ce dispositif. Celles-ci permettent de contrôler le filtre actif afin qu'il génère des courants qui suivent au mieux leurs références.

III.3.5 Régulation de la tension continue

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

- Maintenir cette tension à un niveau fixe tout en assurant une compensation des pertes dans le filtre actif ;
- Limiter ses variations en régime dynamique afin de ne pas détériorer les performances du filtre actif.

La tension moyenne V_{dc} aux bornes du condensateur doit être maintenue à une valeur fixe. Les pertes dans le filtre actif (interrupteurs et filtre de sortie) sont la principale cause susceptible de modifier cette tension. La régulation de la tension continue aux bornes du condensateur de stockage d'énergie doit se faire par l'adjonction des courants fondamentaux actifs dans les courants de référence.

La sortie du régulateur P_c s'ajoute, à un signe près, à la puissance active perturbatrice et donne lieu à un courant fondamental actif corrigeant ainsi V_{dc} . La puissance représente la puissance active nécessaire pour maintenir la tension V_{dc} égale à la valeur de la tension de référence souhaitée (V_{dc-ref}).

En négligeant les pertes de commutations dans l'onduleur ainsi que l'énergie stockée dans l'inductance du filtre de sortie, la relation entre la puissance absorbée par le filtre actif et la tension aux bornes du condensateur peut s'écrire sous la forme suivante :

$$P_c = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} C_{dc} \cdot V_{dc}^2 \right) \quad (\text{III.18})$$

Notons que la relation est non linéaire. Pour des faibles variations de la tension V_{dc} autour de sa référence V_{dc-ref} , elle peut être linéarisée à travers les relations suivantes :

$$P_c = C_{dc} \cdot V_{dc-ref} \frac{d}{dt} (V_{dc}) \quad (\text{III.19})$$

$$\Rightarrow V_{dc}(s) = \frac{P_c(s)}{V_{dc-ref} \cdot C_{dc} \cdot s} \quad (III.20)$$

A partir de la relation (III.20), et en prenant en compte le régulateur proportionnel (K_c), la boucle de régulation de la tension continue peut être représentée par le schéma de la figure III.10. Le choix du paramètre K_c aura pour objectif d'obtenir un temps de réponse minimal afin de ne pas nuire à la dynamique du filtre actif [1, 10].

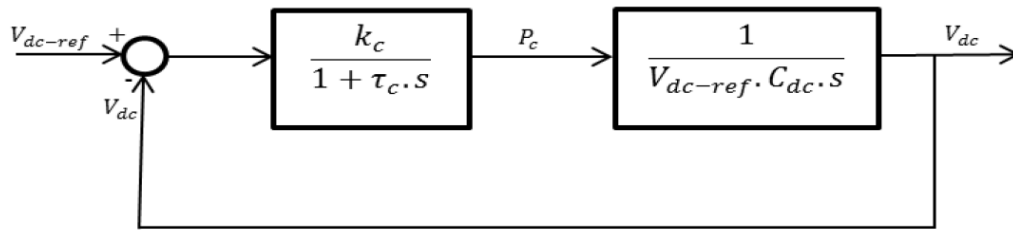


Figure III. 10 - Boucle de régulation de la tension continue.

III.3.5.1 Régulateur Proportionnel-Intégral PI

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

III.3.5.2 Régulateur flou

Du point de vue historique, les prémisses de la logique floue, visant à traiter la notion d'incertitude, datent des années 30. Il faudra cependant attendre que Zadeh introduise le concept de sous-ensembles flous, en 1965, pour assister aux premières grandes avancées dans le domaine. Par la suite, en 1974, Mamdani introduisait la commande floue pour la régulation de processus industriel. Enfin, dans les années 80, la commande floue connaît un essor considérable au Japon, notamment grâce aux travaux de Sugeno pour se répandre ensuite dans le monde entier [47, 52, 53]. Elle trouve

notamment sa place dans le domaine de la commande pour une large gamme de systèmes et plus généralement en génie Electrique.

L'un des principaux intérêts de ces commandes à base de logique floue consiste à pouvoir faire relativement passer simplement par l'intermédiaire de règles linguistiques, l'expertise que l'on peut avoir du processus vers le contrôleur. Il est ainsi possible de transformer le savoir de l'expert en règles simples que le contrôleur peut mettre en œuvre. Une facilité d'implantation des solutions pour des problèmes complexes est alors associée à une robustesse vis-à-vis des incertitudes et la possibilité d'intégration du savoir de l'expert. La structure d'une commande floue représentée sur la figure III.11 peut être décomposée en trois grands modules.

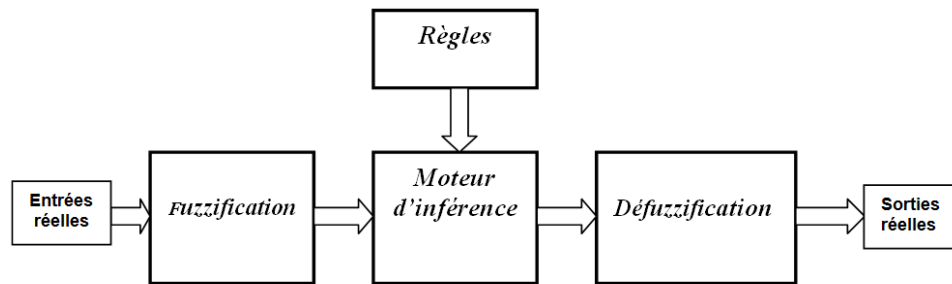


Figure III. 11 - Structure générale d'une commande floue.

Le premier de ces modules traite les entrées du système : c'est la fuzzification. Il permet d'associer à chacune des entrées réelles, par le biais de fonctions d'appartenances, un degré d'appartenance pour chacun des sous-ensembles flous définis sur l'ensemble du discours. Le deuxième module est constitué du moteur d'inférence et de la base de règles. Celle-ci est constituée de règles de type: «Si..., Alors...» et va permettre de passer des degrés d'appartenance des grandeurs d'entrées aux degrés d'appartenance aux sous-ensembles flous de la grandeur de commande. Le moteur d'inférence, lui, va permettre de générer une conclusion à partir des entrées et des règles actives. Il calcule alors les degrés d'appartenance aux sous-ensembles flous correspondant à la commande du système. Enfin, le dernier module, l'interface de défuzzification, va permettre de transformer les degrés d'appartenance des sous-ensembles flous de commande en grandeur numérique. C'est la transformation inverse du module de fuzzification.

III.3.6 Régulation du courant du filtre actif parallèle

Nous pouvons écrire la relation suivante caractérisant le courant du filtre actif i_f :

$$L_f \cdot \frac{d}{dt} i_f = V_f - V_s \quad (\text{III.21})$$

Notons par Δi_f la différence entre le courant de référence et le courant mesuré à partir de la relation suivant :

$$\Delta i_f = i_{ref} - i_f \quad (\text{III.22})$$

A partir des équations (III.24) et (III.25), nous obtenons l'expression ci-dessous :

$$L_f \cdot \frac{d}{dt} \Delta i_f = \left(V_s + L_f \frac{d}{dt} i_{ref} \right) - V_f \quad (\text{III.23})$$

Le premier terme de la partie droite de la relation (III.5) peut être défini comme tension de référence (V_{f-ref}), ce qui nous donne l'expression suivante :

$$V_{f-ref} = V_s + L_f \frac{d}{dt} i_{ref} \quad (\text{III.24})$$

L'écart entre V_{f-ref} et V_f produit alors une erreur sur le courant. Selon la relation (III.27), la tension de référence est composée de deux termes à fréquences différentes.

Le premier représente la tension du réseau V_s directement mesurable. Le second est égal à la chute de tension aux bornes de l'inductance L_f , lorsque celle-ci est traversée par un courant égal à celui de référence. Ce terme doit être élaboré par un régulateur de courant, comme le montre la figure III.12.

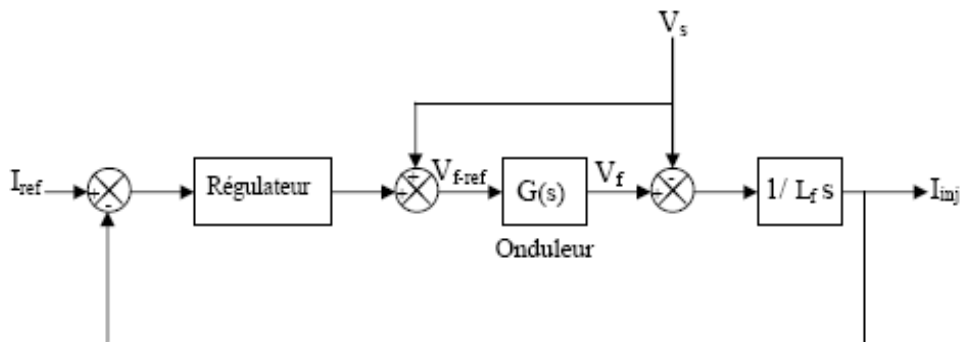


Figure III. 12 - Schéma de régulation des courants du filtre actif parallèle.

Dans ce schéma, $G(s)$ représente l'onduleur qui peut être modélisé par la relation suivante :

$$\begin{cases} G(s) = K \frac{1}{1 + \tau s} \\ K = \frac{V_{dc}}{2V_p} \end{cases} \quad (\text{III.25})$$

Avec :

V_{dc} la tension du côté continu de l'onduleur,

V_p l'amplitude de la porteuse triangulaire et (τ) représentant le retard causé par le calcul des courants perturbateurs.

Le régulateur doit satisfaire les objectifs généraux de la régulation ainsi les contraintes liées au rejet des perturbations [1, 3].

III.3.7 La commande de l'onduleur

Le but de la commande de l'onduleur est de permettre la meilleure reproduction des courants perturbés de référence, à travers les ordres de commande appliqués aux drivers interrupteurs de puissance [54]. Les deux principales familles de commande des convertisseurs statiques sont :

- ✓ la commande par hystérésis,
- ✓ la commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI).

III.3.6.1 Commande par hystérésis

La commande par hystérésis (comme le montre la figure III.13.), appelée aussi commande en tout ou rien, est une commande non linéaire qui utilise l'erreur existant entre le courant de référence et le courant produit par l'onduleur, cette erreur est comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis.

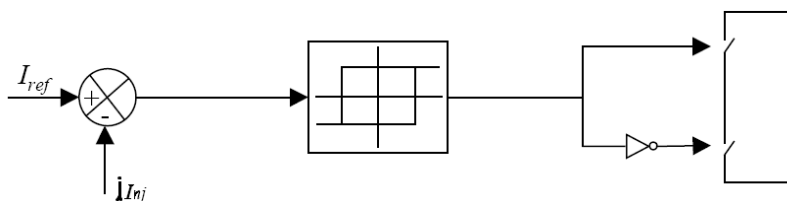


Figure III. 13 - Principe de la commande des courants par hystérésis.

Dès que l'erreur atteint la bande inférieure ou supérieure (Figure III.14), un ordre de commande est envoyé de manière à rester à l'intérieur de la bande. La simplicité est le principal avantage de cette technique. En revanche, les commutations évoluent librement à l'intérieur de la bande d'hystérésis, on ne peut pas maîtriser correctement le spectre haute fréquence dû aux fréquences de commutations.

Cette technique de commande fait partie des commandes non-linéaires parce qu'elle fonctionne en tout ou rien. Elle est bien connue et présente de nombreux avantages au niveau de la robustesse et de la simplicité de mise en œuvre. Elle possède un temps de réponse rapide en régime dynamique, une stabilité et une précision satisfaisante et de plus limite automatiquement le courant [50, 51, 55, 56]. Le seul paramètre de régulation dans cette commande est la largeur de la bande d'hystérésis qui détermine l'erreur sur les courants et la fréquence de commutation.

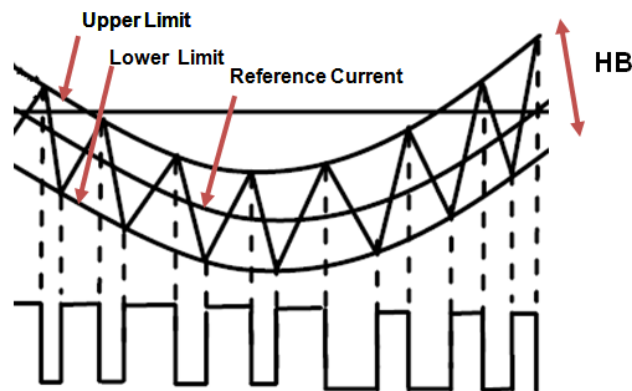


Figure III. 14 - Commande par hystérésis.

Ce problème peut être résolu par une autre stratégie de commande qui peut être proposé à savoir la commande par hystérésis modulée. Mais dans cette stratégie de commande, il est difficile de définir la largeur de la bande de l'hystérésis [1, 3]

III.3.6.2 Commande par modulation de largeur d'impulsion

Afin de contourner les problèmes précédents, nous introduirons une deuxième famille de commande de l'onduleur : la *commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI)*. La technique de commande par MLI résout le problème de la maîtrise de la fréquence de commutation en fonctionnant avec une fréquence fixe facile à filtrer en aval de l'onduleur. La plus simple et la plus connue des modulations de largeur

d'impulsion est sans doute la MLI à échantillonnage naturel, dite *MLI intersective*. Cette technique de commande met en œuvre d'abord un régulateur qui détermine la tension de référence de l'onduleur (modulatrice) à partir de l'écart entre le courant mesuré et sa référence. Cette dernière est ensuite comparée avec un signal triangulaire (porteuse à fréquence élevée fixant la fréquence de commutation)[48]. La sortie du comparateur fournit l'ordre de commande des interrupteurs. Le schéma de principe est donné par la figure III.15 [11, 42-46].

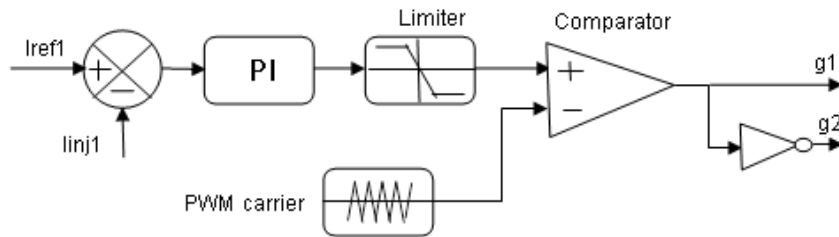


Figure III. 15 - Principe de commande des courants par MLI.

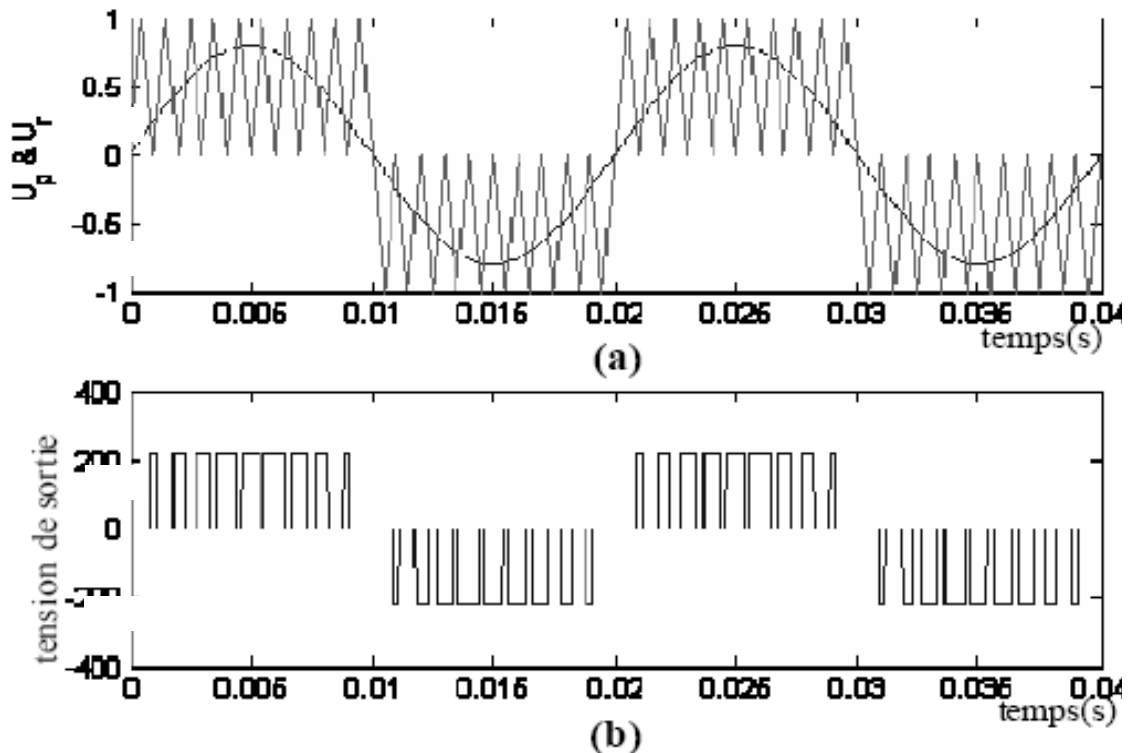


Figure III. 16 - Commande par modulation de largeur d'impulsions
(a) signal de référence et de porteuse, (b) tension de sortie.

D'autres techniques de MLI existent également dans la littérature comme la MLI à échantillonnage régulier où on peut distinguer deux méthodes :

- La MLI à échantillonnage régulier symétrique où la référence est échantillonnée à chaque période de la porteuse.
- La MLI à échantillonnage régulier asymétrique où la référence est échantillonnée à la demi-période de la porteuse.

Plus récemment, nous avons vu apparaître une technique de commande, dite commande à modulation vectorielle. Cette dernière diffère des techniques présentées précédemment par le fait qu'elle ne s'appuie pas sur des modulations appliquées à chacun des interrupteurs.

III.3.6.2.1 Principe de la commande MLI sinus triangle

Le signal de commande des interrupteurs est généré à partir de la comparaison du signal de référence sinusoïdal de fréquence $f_r = 1/T_r$ et du signal de modulation triangulaire ou porteuse de fréquence $f_p = 1/T_p$ (figure III.17).

Deux paramètres principaux caractérisent la commande à MLI:

- L'indice de modulation : $m = f_p / f_r$, avec $m \gg 1$.
- Le coefficient de réglage : $r = V_{rmax} / V_{pmax}$, Généralement r est compris entre 0 et 1.

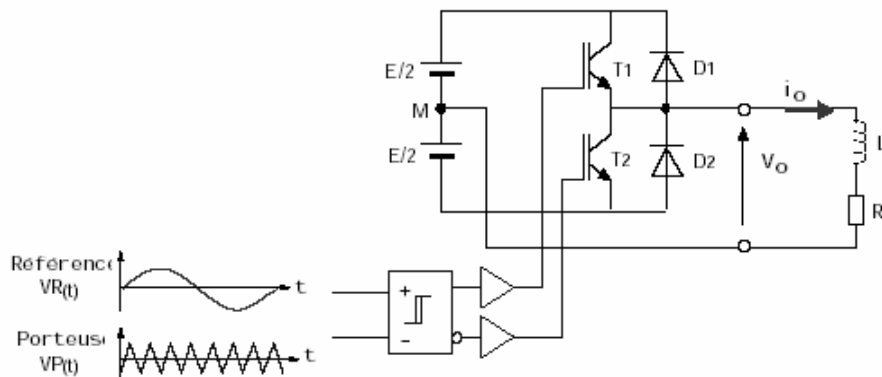


Figure III. 17 - Onduleur monophasé commandé par MLI sinus triangle.

III.4 Topologies du filtre actif parallèle

Il existe différentes topologies de filtres actifs parallèles triphasés. Ces filtres peuvent être à trois fils ou à quatre fils (lorsque le courant du fil neutre cause un problème). Ces derniers peuvent à leur tour être à trois bras ou à quatre bras.

III.4.1 Filtre actif triphasé constitué d'un onduleur triphasé à trois fils

La figure III.18 illustre la configuration la plus connue du filtre actif parallèle à trois fils. Les trois bras de l'onduleur sont formés par six interrupteurs bidirectionnels en

courant, qui sont des composants semi-conducteurs commandés à la fermeture et à l'ouverture comportant une diode en antiparallèle [44, 57, 58].

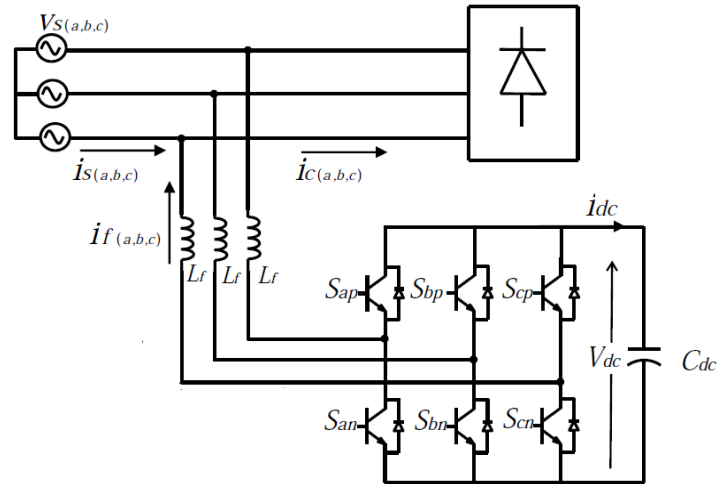


Figure III. 18 - Filtre actif parallèle à trois fils.

III.4.2 Filtre actif parallèle à quatre fils

Dans le cas d'un système triphasé où fil de neutre est distribué, on parle alors de filtre à quatre fils [7, 24, 30, 34, 59-63]. Cela autorisera la circulation de courants homopolaires. Par conséquent, cette configuration est intéressante pour le cas où nous avons besoin de compenser les composantes homopolaires [62, 64-66].

III.4.2.1 Filtre actif parallèle à quatre fils avec un condensateur à point milieu

Dans cette topologie, l'onduleur est constitué de six interrupteurs qui forment les trois bras. Un quatrième bras est constitué de deux condensateurs dont le point milieu est relié au neutre du réseau électrique, comme l'illustre la figure III.19. Cette topologie est employée pour des puissances réduites car le courant du neutre traverse les condensateurs [62, 67].

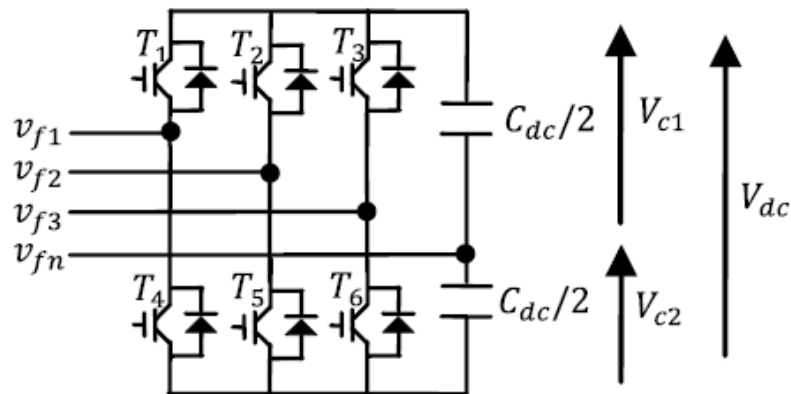


Figure III. 19 - Onduleur à trois bras avec condensateur à point milieu.

III.4.2.2 Filtre actif parallèle à quatre bras

Dans cette topologie, l'onduleur comporte quatre bras constitués de huit interrupteurs, comme l'illustre la figure III.20. Cette configuration a été proposée afin d'éviter le recours à un élément de stockage à point milieu comme celle de la configuration précédente, et aussi le quatrième bras est utilisé pour stabiliser et contrôler le courant du neutre du filtre actif parallèle [7, 33, 65, 68].

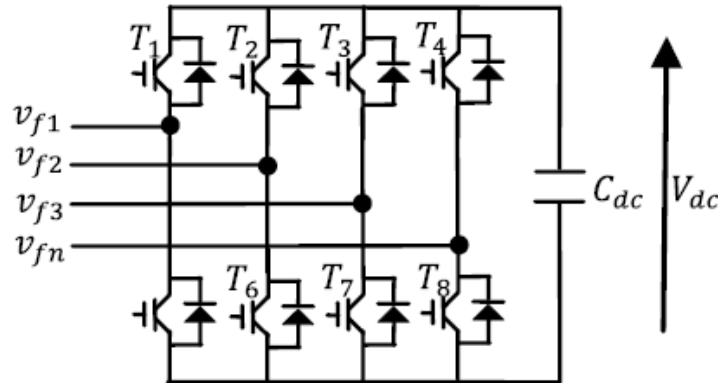


Figure III. 20 - Onduleur à quatre fils avec quatre bras.

III.5 Modélisation de l'ensemble réseau, FAP et charge polluante

La modélisation d'un système revient à trouver les équations mathématiques qui décrivent son fonctionnement [1, 3, 10].

III.5.1 Modélisation du réseau

Le réseau est assimilable à une source de tension sinusoïdale en série avec une impédance, dite de court-circuit, d'où la représentation du réseau par un système de F.e.m. triphasées équilibrée en série avec une impédance. Z_s : est une impédance dite de court-circuit.

$$Z_s = R_s + jL_s$$

Il y a lieu de noter que le réseau est parfait (impédance négligeable) et le courant parfaitement lissé du côté continu.

$$\begin{bmatrix} e1 \\ e2 \\ e3 \end{bmatrix} = \sqrt{2} \cdot E \cdot \begin{bmatrix} \sin(\omega t) \\ \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (\text{III.26})$$

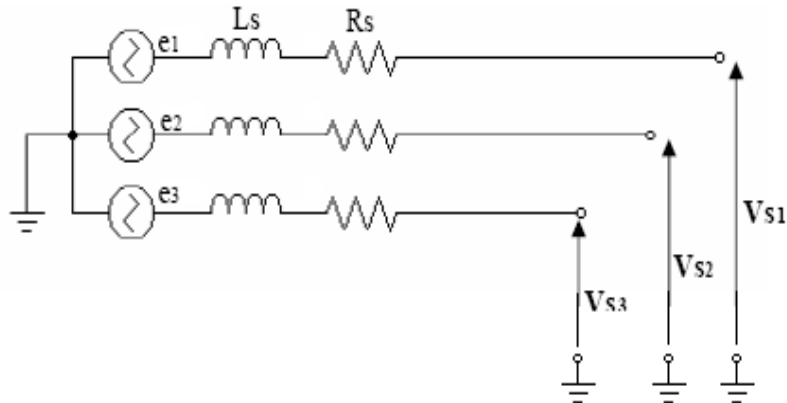


Figure III. 21 - Schéma synoptique d'un réseau triphasé.

III.5.2 Modélisation de la charge polluante

Pour tester le filtre actif on a opté pour une charge polluante qui est un pont redresseur triphasé, représenté sur la figure III.22 ce dernier génère des harmoniques de courants de l'ordre $6k \pm 1$. Cette charge est modélisée comme étant sources de courants parfaites les (semi-conducteurs sont considérés parfaits).

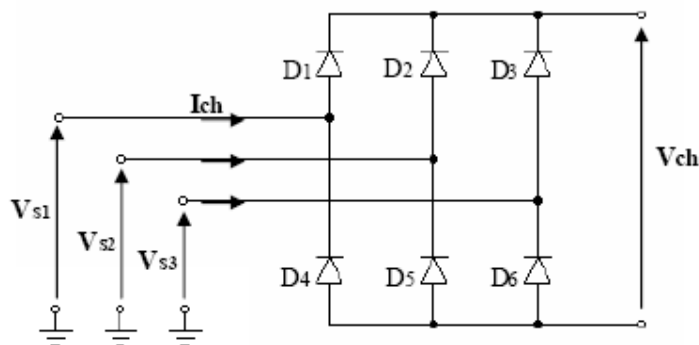


Figure III. 22 - Schéma synoptique d'un pont redresseur.

III.5.2 Modélisation du filtre actif parallèle

Dans notre étude on a choisi un onduleur de tension commandé en courant (figure III.23), ce dernier est constitué de trois bras dont chacun est constitué de deux cellules, chaque cellule contient un interrupteur bicommandable (IGBT), aux bornes duquel est monté une diode en antiparallèle, la cellule ainsi définie forme un interrupteur bidirectionnel.

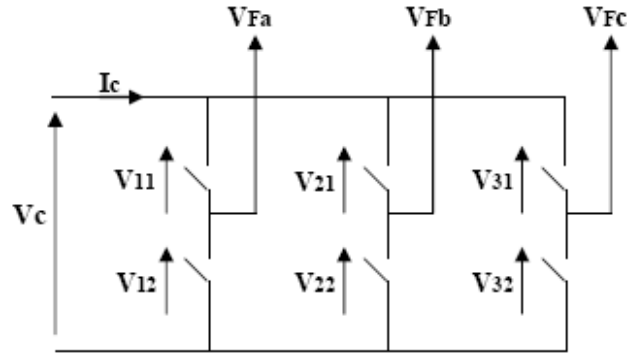


Figure III. 23 - Présentation schématique d'un onduleur triphasé.

d) Fonction de connections :

On associe à chaque interrupteur une fonction \$F_{ij}\$ dite de connexion, tel que :

$$F_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si l'interrupteur est ouvert} \\ 0 & \text{si l'interrupteur est fermé} \end{cases}$$

Soit \$i=1, 2, 3\$

\$j=1, 2\$

D'où

$$\begin{cases} i_{ij} = F_{ij} \cdot i_c \\ V_{ij} = (1 - F_{ij}) V_c \end{cases}$$

Tel que \$ij\$ représente le courant que traverse l'interrupteur \$kij\$ et \$V_{ij}\$ la tension aux bornes de ce dernier.

e) Fonctions de conversions composées

Soit \$V_{Fab}\$, \$V_{Fbc}\$, \$V_{Fca}\$ les tensions composées délivrées par l'onduleur.

$$\begin{cases} V_{Fab} = V_{21} - V_{11} \\ V_{Fbc} = V_{31} - V_{21} \\ V_{Fca} = V_{11} - V_{31} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} V_{Fab} = (F_{11} - F_{21}) V_c \\ V_{Fbc} = (F_{21} - F_{31}) V_c \\ V_{Fca} = (F_{31} - F_{11}) V_c \end{cases} \quad (\text{III.27})$$

D'où

$$\begin{bmatrix} V_{Fab} \\ V_{Fbc} \\ V_{Fca} \end{bmatrix} = V_c \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_{11} \\ F_{21} \\ F_{31} \end{bmatrix} = V_c \cdot \begin{bmatrix} F_{ab} \\ F_{bc} \\ F_{ca} \end{bmatrix} \quad (\text{III.28})$$

Les fonctions de conversions composées sont :

$$\begin{cases} F_{ab} = F_{11} - F_{21} \\ F_{bc} = F_{21} - F_{31} \\ F_{ca} = F_{31} - F_{11} \end{cases} \quad (\text{III.29})$$

F) Fonctions de conversions simples:

Dans l'hypothèse que les tensions simples VF_a , VF_b , VF_c forment un système triphasé équilibré on a :

$$\begin{bmatrix} V_{Fa} \\ V_{Fb} \\ V_{Fc} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{Fab} \\ V_{Fbc} \\ V_{Fca} \end{bmatrix} \quad (\text{III.30})$$

D'où

$$\begin{bmatrix} V_{Fa} \\ V_{Fb} \\ V_{Fc} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} V_C \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{11} \\ F_{21} \\ F_{31} \end{bmatrix} = V_C \begin{bmatrix} F_a \\ F_b \\ F_c \end{bmatrix} \quad (\text{III.31})$$

Les fonctions de conversion simples s'écrivent alors :

$$\begin{cases} F_a = \frac{1}{3} \cdot (2F_{11} - F_{21} - F_{31}) \\ F_b = \frac{1}{3} \cdot (F_{11} - 2F_{21} - F_{31}) \\ F_c = \frac{1}{3} \cdot (F_{11} - F_{21} - 2F_{31}) \end{cases} \quad (\text{III.32})$$

g) Représentation vectorielle des tensions fournies par l'onduleur :

Dans le plan biphasé (α, β) en considérant VF(k) le vecteur correspondant aux tensions de l'onduleur, les huit cas possibles du vecteur VF(k) sont donnés par le tableau III.1 et la figure III.24.

Tableau III. 1 - Tensions générées par l'onduleur.

K	0	1	2	3	4	5	6	7
Mod(V _f)	0	$\sqrt{\frac{2}{3}} V_{dc}$	$\sqrt{\frac{2}{3}} V_{dc}$	$\sqrt{\frac{2}{3}} V_{dc}$	$\sqrt{\frac{2}{3}} V_{dc}$	$\sqrt{\frac{2}{3}} V_{dc}$	$\sqrt{\frac{2}{3}} V_{dc}$	0
Arg(V _f)		0	$\pi/3$	$2\pi/3$	π	$4\pi/3$	$5\pi/3$	

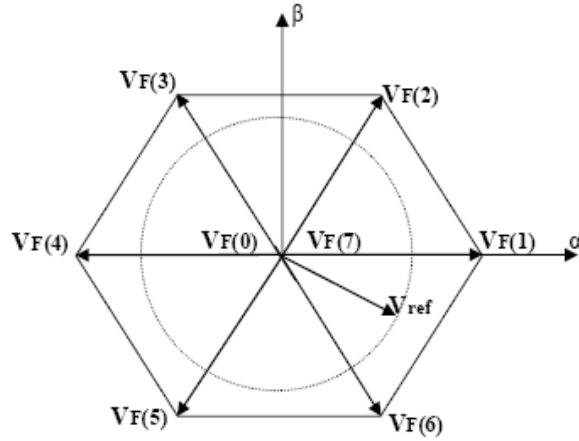


Figure III. 24 - Représentation vectorielle des tensions générées par l'onduleur.

Où V_{ref} représente la tension de référence que doit produire l'onduleur pour pouvoir créer les courants perturbateurs identifiés. Ceci signifie que l'onduleur n'est capable de fournir des tensions égales aux tensions de référence que si le vecteur formé par ces derniers reste à l'intérieur de l'hexagone de la figure III.24.

L'onduleur est lié au réseau par un filtre inductif L_f , parce que deux sources de tensions ne peuvent être directement connecter, d'où :

$$\begin{bmatrix} V_{Fa} \\ V_{Fb} \\ V_{Fc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{s1} \\ V_{s2} \\ V_{s3} \end{bmatrix} + R_f \cdot \begin{bmatrix} I_{Fa} \\ I_{Fb} \\ I_{Fc} \end{bmatrix} + L_f \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{Fa} \\ I_{Fb} \\ I_{Fc} \end{bmatrix} \quad (\text{III.33})$$

$$\begin{bmatrix} V_{s1} \\ V_{s2} \\ V_{s3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} - R_{CC} \cdot \begin{bmatrix} I_{s1} \\ I_{s2} \\ I_{s3} \end{bmatrix} - L_{CC} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{s1} \\ I_{s2} \\ I_{s3} \end{bmatrix} \quad (\text{III.34})$$

Avec :

$$\begin{bmatrix} V_{s1} \\ V_{s2} \\ V_{s3} \end{bmatrix} \text{ Tension aux points de raccordement.}$$

$$\begin{bmatrix} I_{Fa} \\ I_{Fb} \\ I_{Fc} \end{bmatrix} \text{ Courants délivrés par l'onduleur.}$$

$$\begin{bmatrix} I_{s1} \\ I_{s2} \\ I_{s3} \end{bmatrix} \text{ Courant fournis par le réseau.}$$

III.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exposé la plupart des éléments constituant la structure du filtre actif parallèle. Cette structure a été partagée en deux parties à savoir la partie puissance et la partie contrôle-commande. Les éléments nécessaires constituant la partie puissance du FAP sont : l'onduleur triphasé, l'élément de stockage de l'énergie et l'inductance de lissage. Pour la partie commande, nous avons montré dans un premier temps, comment détecter les harmoniques et calculer les courants de référence par deux méthodes d'identification: la méthode de Puissance Réactive Instantanée (méthode p-q) et la méthode de Référentiel Synchrone (méthode d-q). Nous avons également présenté la régulation de la tension du bus continu, d'abord par un régulateur proportionnel-intégral PI classique, puis par un régulateur intelligent flou.

Dans un second temps, nous avons présenté le principe de la commande par hystérésis et par MLI, couramment utilisées dans les applications des filtres actifs pour la génération des signaux de commande. Nous avons aussi détaillé la modélisation de l'ensemble réseau, filtre actif et charge polluante. Dans le chapitre suivant nous appliquerons ce filtre dans un milieu perturbé.

Chapitre IV
Etude comparative entre les
méthodes de commandes et
régulations

Introduction

Afin de compenser les courants harmoniques générés par les charges polluantes connectées aux réseaux électriques, de nombreux travaux de recherche sur le filtrage actif parallèle (FAP), ont été faites. Le principe du FAP est d'injecter des courants harmoniques dans le réseau, ayant la même amplitude mais en opposition de phase avec les courants harmoniques engendrés par la charge non-linéaire.

La performance du filtre actif parallèle notamment la compensation des courants harmoniques et de la puissance réactive sont certes liées aux performances de la génération des courants de références harmoniques, de la régulation de la tension du bus continu ainsi que de la stratégie de commande de l'onduleur de tension.

Dans ce chapitre, en premier lieu, nous étudierons le filtre actif parallèle dans un milieu pollué pour voir les possibilités de compensation des courants harmoniques et de la puissance réactive. Les deux méthodes d'identification de courant de référence seront appliquées: la méthode de Puissance Réactive Instantanée (méthode p-q) et la méthode de Référentiel Synchronique (méthode d-q). Ainsi nous montrons clairement l'avantage du régulateur flou par rapport au régulateur PI pour le réglage de la tension du bus continu. En second lieu, nous montrons l'avantage de la Boucle à Verrouillage de Phase (PLL) dans le cas où la tension est déséquilibrée. La simulation sera effectuée à l'aide du logiciel MATLAB/Simulink.

La figure IV.1 présente l'ensemble de la structure du *filtre actif parallèle* et de son environnement fonctionnel, lequel se compose de (tableau V.1) :

- un réseau électrique triphasé à trois fils représenté par les grandeurs (e_s, R_s, L_s) ,
- un pont redresseur triphasé alimentant une charge (R_{ch}, C_{ch}) .
- un *FAP* avec un filtre de sortie de premier ordre représenté par (R_f, L_f)
- un condensateur de stockage qui joue le rôle d'une source de tension continue V_{dc}
- block de contrôle et commande de FAP.

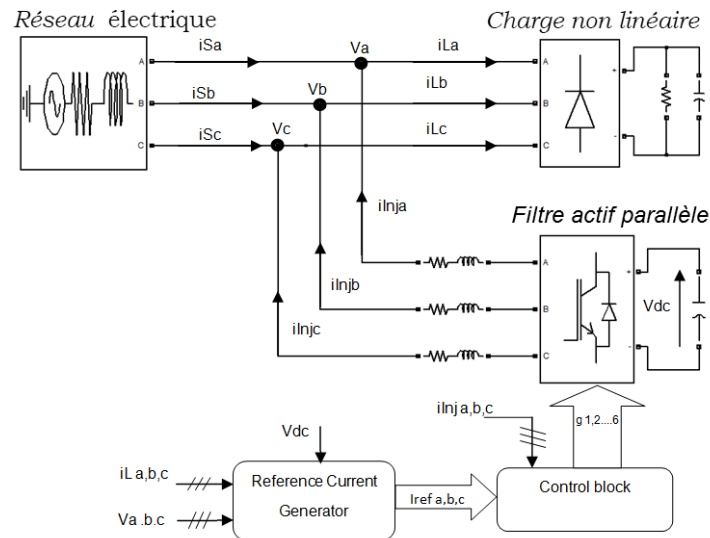


Figure IV. 1 - Structure générale de filtre actif parallèle.

Tableau IV. 1- Paramètres de simulations du filtre actif parallèle.

Réseau électrique	
$V_s = 220 \text{ V}$, $f = 50 \text{ Hz}$, ($R_s = 0.5 \text{ m}\Omega$, $L_s = 15 \text{ }\mu\text{H}$)	
Charge polluante Puissance	
Charge non linéaire	$R_{ch} = 0.75 \text{ }\Omega$, $C_{ch} = 400 \text{ }\mu\text{F}$
Pont de Graetz	$R_C = 0.0146 \text{ }\Omega$, $L_C = 0.00015 \text{ H}$
Filtre actif parallèle	
Tension continue V_{c-dc}	850 V
Capacité du condensateur C_{dc}	4.4 mF
Résistance et inductance L_f , R_f	5 m Ω , 180 μH

Pour résoudre les problèmes causés par les charges non linéaires en compensant les courants harmoniques et la puissance réactive, nous étudierons le FAP dans les milieux suivants :

1- Milieu pollué et équilibré

- comparaison entre les deux méthodes d'identification de courant de référence : la méthode de Puissance Réactive Instantanée (méthode p-q) et la méthode de Référentiel Synchronique (méthode d-q). Pour le bus continu on utilise le régulateur PI.
- application d'un régulateur intelligent basé sur un système à logique floue pour la régulation de la tension du bus continu du FAP.

2- Milieu pollué et déséquilibré

Application d'une Boucle à Verrouillage de Phase (PLL) dans le cas où les tensions sont déséquilibrées et perturbées.

Les programmes de simulation développés ont été effectués en utilisant le logiciel Matlab/Simulink qui permet de visualiser sur un intervalle de temps donné l'évolution des courants et des tensions dans les différentes branches du circuit.

IV.1 Milieu pollué et équilibré

Les puissances réelles et imaginaires étudiées dans ce cas sont données comme suit :

$$\begin{cases} P = \bar{P} + \tilde{P} \\ q = \bar{q} + \tilde{q} \end{cases}$$

Afin d'isoler la puissance active continue (\bar{P}) par l'utilisation d'un filtre passe bas avec un soustracteur, on étudie la compensation du courant harmonique et de la puissance réactive consommés par une charge non linéaire (RC).

IV.2.1 Etude comparative entre les deux méthodes (p-q et d-q)

Dans cette partie on va présenter les résultats de simulation du filtre actif parallèle à base d'un onduleur de tension deux niveaux, avec une étude comparative entre les deux méthodes d'identification des courants harmoniques: la méthode de la Puissance Réactive Instantanée (p-q) et la méthode de la Référence Synchronisée (d-q). On utilise un régulateur Proportionnel-Intégral PI pour la régulation de la tension du bus continu du FAP.

Résultats de simulation

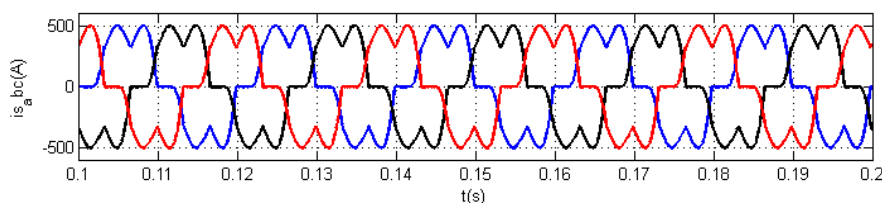


Figure IV. 2 - Courants de source avant le filtrage.

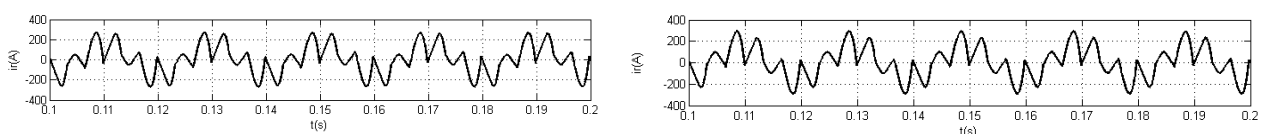


Figure IV. Courant de référence (a) : méthode (p-q), (b) : méthode (d-q)

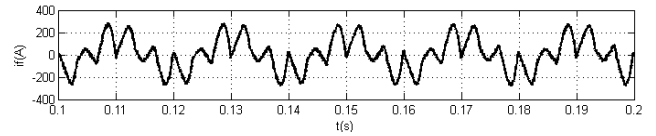
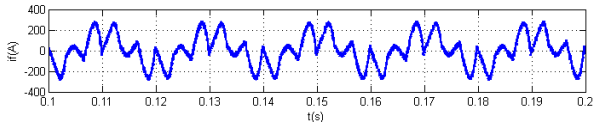


Figure IV. 3 - Courant de filtre (a) : méthode (p-q), (b) : méthode (d-q).

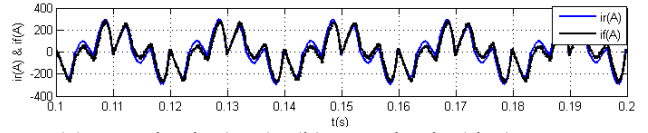
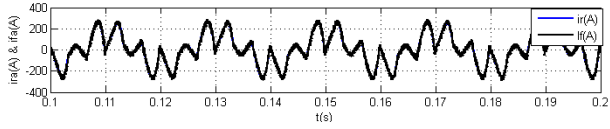


Figure IV. 4 - Courants de filtre et de référence (a) : méthode (p-q), (b) : méthode (d-q).

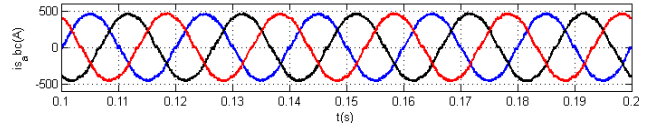
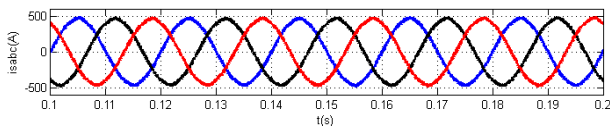


Figure IV. 5 - Courants de source après le filtrage (a) : méthode (p-q), (b) : méthode (d-q).

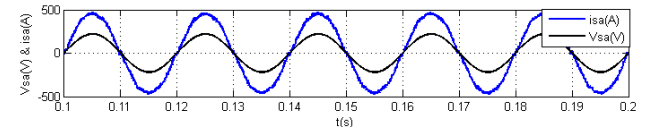
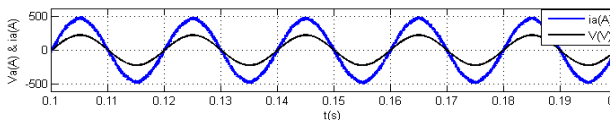


Figure IV. 6 - Tension et courant du réseau après le filtrage (a) : méthode (p-q), (b) : méthode (d-q).

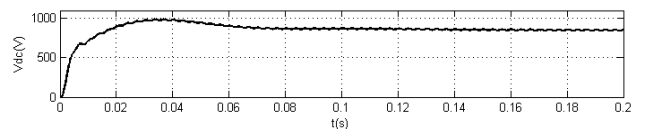
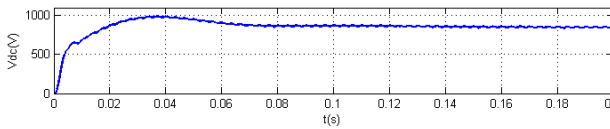


Figure IV. 7 - allure de la tension V_{dc} (a) : méthode (p-q), (b) : méthode (d-q).

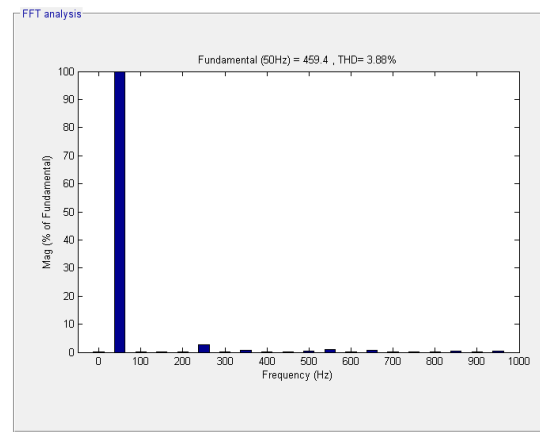
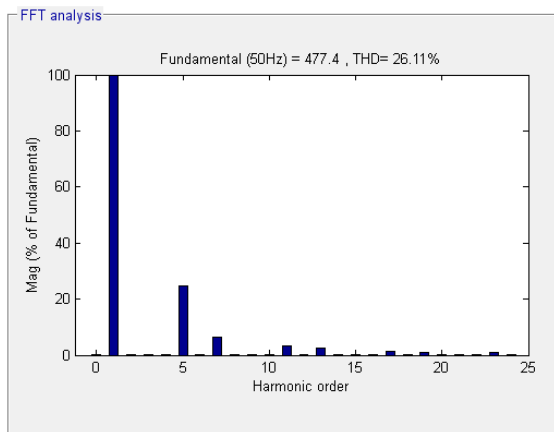


Figure IV. 8 - Analyse spectrale avec la méthode (p-q).

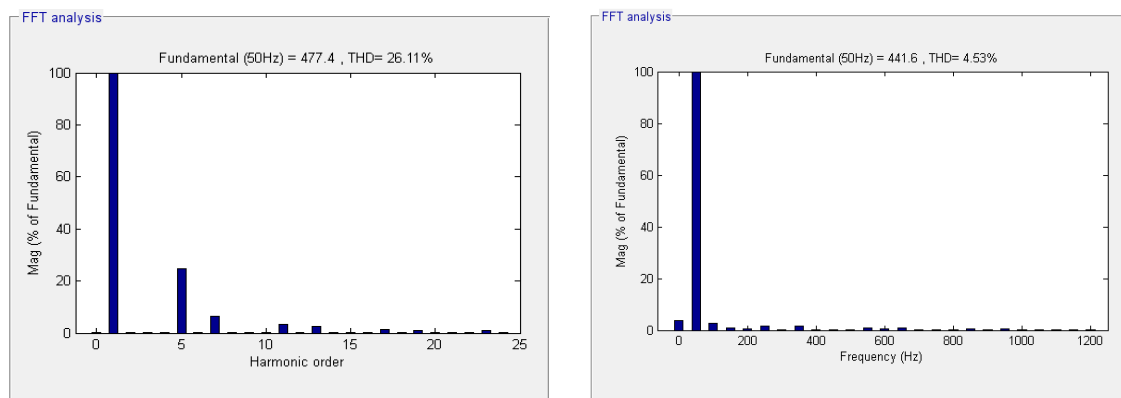


Figure IV. 9 - Analyse spectrale avec la méthode (d-q).

Les résultats de simulation obtenus pour la compensation de courant et de la puissance réactive dans le cas où le réseau pollué et équilibré sont illustrés sur les figures IV.2 - IV.9.

Avant le branchement du FAP, la charge non linéaire absorbe un courant non sinusoïdal et le courant de la source sont déformés. Il n'est pas synchronisé avec la tension correspondante, comme le montre la figure IV.2. Le FAP contrôlé par le régulateur PI est injecté de courant (i_f , figure IV.4) au PCC identique au courant de référence estimé (i_{ref}) comme indiqué sur la figure IV.3, mais en opposition de phase.

Le suivi de la trajectoire FAP de courant injecté i_f et de courant de référence i_{ref} est obtenu avec une erreur quasi-nulle pour la méthode p-q (figure IV.5.a). Par contre, avec la méthode d-q, le suivi de la trajectoire de ces courants n'est pas parfait (figure IV.5.b).

Le FAP a imposé des courants de source de forme d'onde purement sinusoïdale (figure IV.6). Comme on peut l'observer, les courants de source sont sinusoïdaux. De plus, le courant obtenu et la tension de source sont en phase comme illustré sur la figure IV.7. La figure IV.8 montre les résultats de simulation de la tension du condensateur côté continu qui est presque constante avec une faible ondulation. On remarque aussi que la boucle de régulation du bus continu (V_{dc}) arrive à poursuivre sa référence de tension avec le régulateur PI de manière relativement lente (80ms). On constate que lors de l'application du régulateur PI, la tension V_{dc} passe par un régime transitoire avec un dépassement plus important par un temps de montée plus rapide.

Les figures IV.9 et IV.10 montrent les analyses spectrales de courants de source triphasée avant et après le branchement de FAP. Les résultats obtenus dans le tableau V.1 montrent l'efficacité et les bonnes performances du filtre actif parallèle qui a réduit le

THD à une valeur inférieure à 5% correspondant aux recommandations et normes internationales avec les deux méthodes d'identification du courant de référence: la méthode p-q et la méthode d-q. Cela prouve la bonne qualité du filtrage. La méthode p-q présente de meilleurs résultats que ceux de la méthode d-q. Le tableau V.2 présente les différents résultats de simulation du le filtre actif pour les deux méthodes (p-q, d-q).

Tableau IV. 2 -- Résultats comparatifs du THD.

Méthode d'identification	THD (%) coté charge	THD (%) coté source Commande hystérésis	THD (%) coté source Commande MLI
Méthode p-q	26.11	3.88	4.12
Méthode d-q	26.11	4.53	4.75

IV.2.2 Etude comparative entre un régulateur PI et un régulateur flou

Dans notre travail, le principe de la régulation de la tension du bus continu du FAP par un régulateur flou est le même que celui du régulateur PI, mais cette fois-ci, l'erreur ($V_{dc-ref} - V_{dc}$) et sa variation sont appliquées à un régulateur intelligent basé sur un système à logique floue pour obtenir l'amplitude des courants de référence [26, 31, 56, 69, 70]. La figure IV.11 montre le schéma du régulateur flou pour la régulation de la tension du bus continu du FAP.

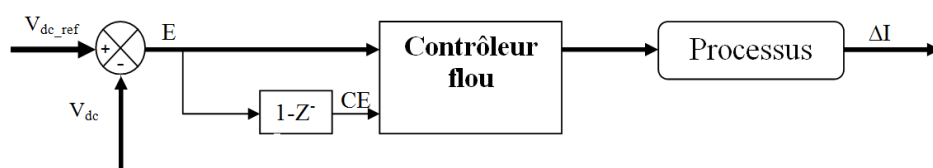


Figure IV. 10 - Schéma de principe d'un régulateur flou.

Le régulateur flou permet la régulation de la tension du bus continu et générer l'amplitude des courants de référence. L'erreur de la tension du bus continu et sa variation sont utilisées comme des entrées du processus flou. Ces deux grandeurs d'entrée (E pour l'erreur et CE pour la variation de l'erreur) sont discrétisées avec une période d'échantillonnage T_e et normalisées à l'aide des gains de normalisation. L'erreur de réglage de la tension du bus continu est définie par l'écart :

$$E(n) = V_{dc_ref} - V_{dc} \quad (IV.1)$$

La variation incrémentale de l'erreur de réglage est définie par :

$$\Delta E(n) = E(n) - E(n-1) \quad (IV.2)$$

La sortie du régulateur flou est considérée comme la variation de l'amplitude des courants de référence $\Delta I_{max}(n)$. L'amplitude des courants de référence pour le $n^{\text{ième}}$ échantillon n est obtenue en additionnant l'amplitude $I_{max}(n-1)$ avec la variation $\Delta I_{max}(n)$ comme le montre l'équation suivante :

$$I_{max}(n) = I_{max}(n-1) + \Delta I_{max}(n) \quad (IV.3)$$

Les caractéristiques principales de ce régulateur flou sont les suivantes :

- Sept ensembles flous pour $e(n)$, $de(n)$, $\Delta I_{sm}(n)$;
- Les fonctions d'appartenance sont triangulaires ;
- Pour la fuzzification, nous utilisons l'univers de discours continu ;
- Pour l'implication, nous utilisons l'opérateur minimum de Mamdani ;
- Pour la défuzzification, nous utilisons la méthode du centre de gravité (centroïde).

La structure interne du régulateur flou utilisé est montrée sur la figure 2.9

Tableau IV. 3 - Les règles du régulateur flou.

E ΔE	NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL
NL	NL	NL	NL	NL	NM	NS	ZE
NM	NL	NL	NL	NM	NS	ZE	PS
NS	NL	NL	NM	NS	ZE	PS	PM
ZE	NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL
PS	NM	NS	ZE	PS	PM	PL	PL
PM	NS	ZE	PS	PM	PL	PL	PL
PL	NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL

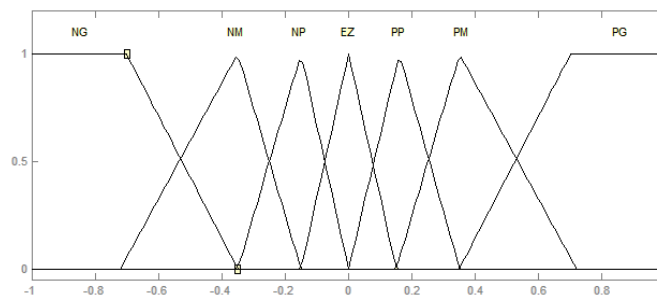


Figure IV. 11 - Fonctions d'appartenance utilisées dans la fuzzification pour les entrées et la sortie.

Résultat de simulation

Dans cette partie on va présenter les résultats de simulation avec la comparaison entre les deux régulateurs de tension du bus continu: le régulateur PI et un régulateur intelligent basé sur un système à logique floue. Avec la méthode de la Puissance Réactive Instantanée (p-q) pour l'identification des courants harmoniques.

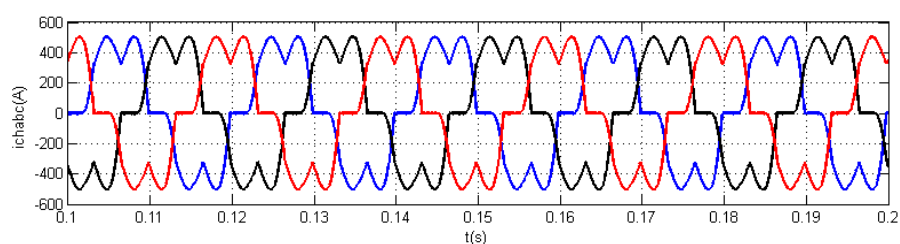


Figure IV. 12 - Courants de source avant le filtrage.

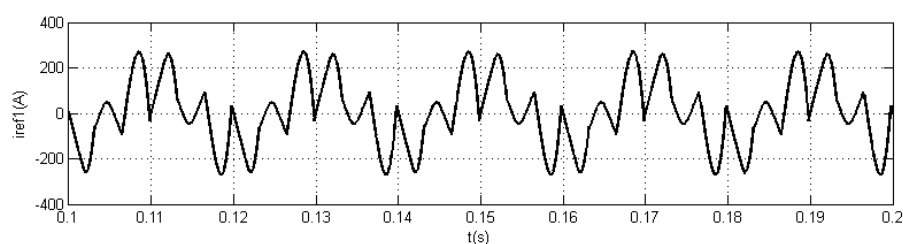


Figure IV. 13 - Courant de référence.

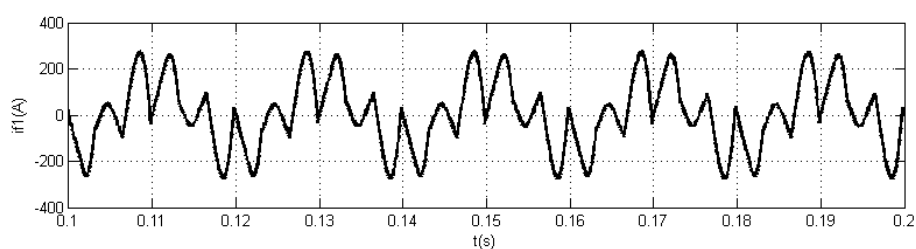


Figure IV. 14 - Courant de filtre.

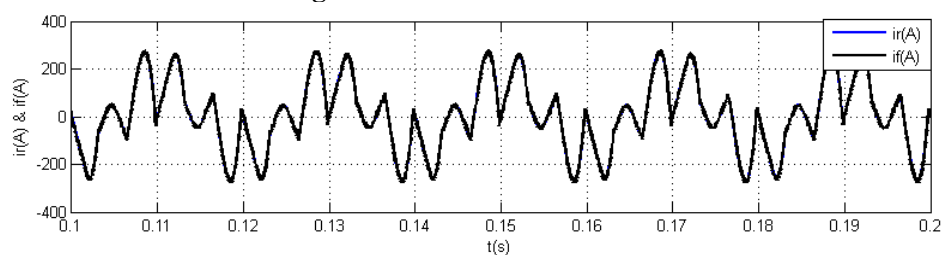


Figure IV. 15 - Courant de filtre et de référence.

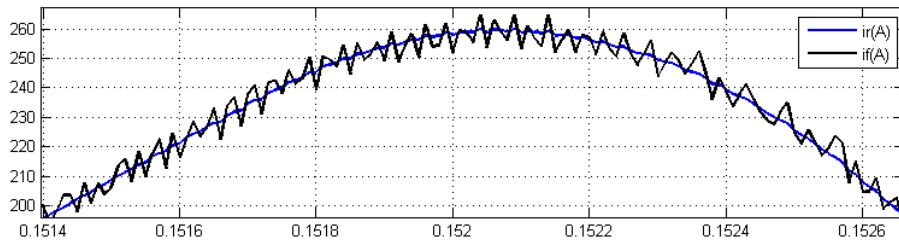


Figure IV. 16 – Zoom de courants de filtre et de référence.

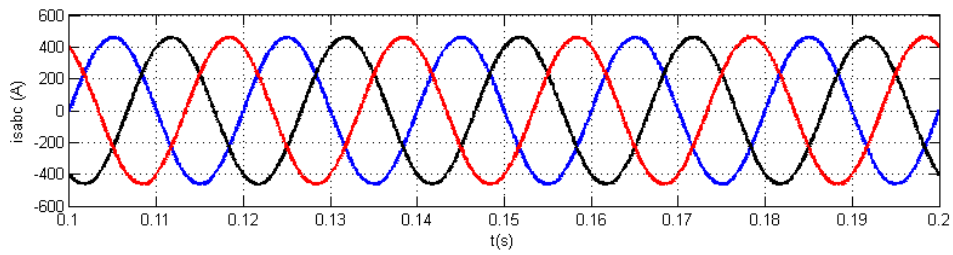


Figure IV. 17- Courants de la source après le filtrage

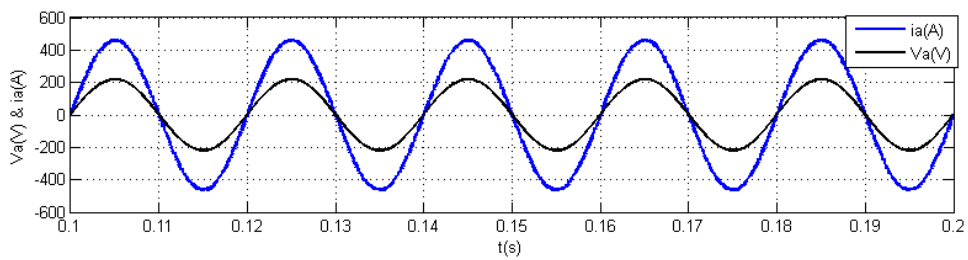


Figure IV. 18 -Tension et courant du réseau après le filtrage.

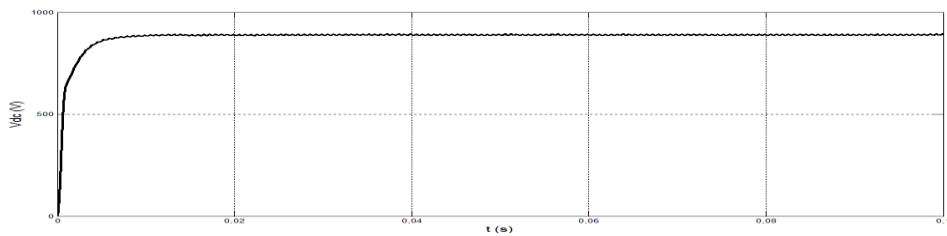


Figure IV. 19 - allure de la tension Vdc.

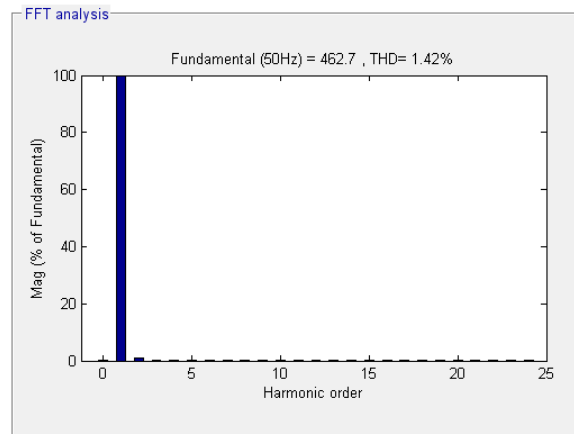
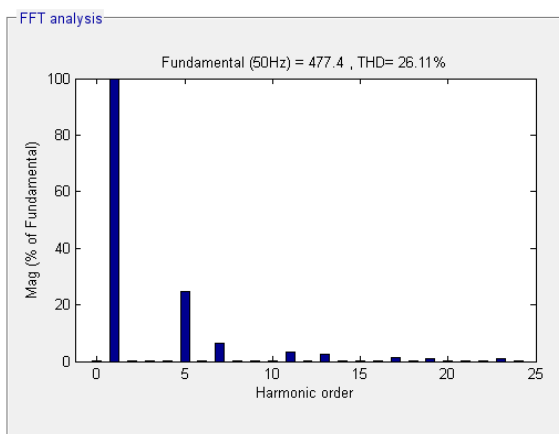


Figure IV. 20- Analyse spectrale avant et après le filtrage.

Le FAP contrôlé par le régulateur flou injecte un courant (i_f) comme indiqué sur la figure IV.15. La figure IV.18 montre que la forme d'onde du courant de source devient purement sinusoïdale après filtrage.

Ces résultats montrent que le régulateur flou est plus performant par rapport au régulateur PI. En effet, il corrige la trajectoire de la tension V_{dc} en un temps très court (0.02 ms), tout en garantissant une bonne stabilité et précision (figure IV.20).

On peut affirmer que le régulateur flou assure un THD du courant de source meilleure à celui du régulateur PI. De plus, le régulateur flou est plus rapide que le régulateur PI dans les régimes transitoires.

IV.2 Milieu pollué et déséquilibré

C'est le cas le plus défavorable pour le réseau. La méthode p-q exige que la tension du réseau doit être saine (sinusoïdale et équilibrée), sinon elle n'est pas applicable. Puisque la tension du réseau est souvent perturbée et/ou déformée, et afin de généraliser l'application de cette méthode d'identification que nous avons adoptée à tout type de tension, l'utilisation de la boucle à verrouillage de phase (phase-locked-loop PLL) est indispensable pour la synthèse des trois sinus unitaires.

Afin de valider le fonctionnement du filtre actif parallèle sous une tension perturbée du réseau électrique, on étudie le cas d'un réseau déséquilibré: $V_{s1}=0.8V_s$, $V_{s2}=V_s$ et $V_{s3}=1.1V_s$ avec $V_s=220V$. Fréquence du système $f = 50\text{ Hz}$; Impédance de source $R_s = 0,25\text{ m}\Omega$, $L_s = 19,4\text{ }\mu\text{H}$; Impédance du filtre $R_f = 5\text{ m}\Omega$, $L_f = 150\text{ }\mu\text{H}$; Condensateur de tension continue ($V_{dc_ref} = 850\text{ V}$) ($C_{dc} = 4,4\text{ mF}$) et charge non linéaire (100 KVA).

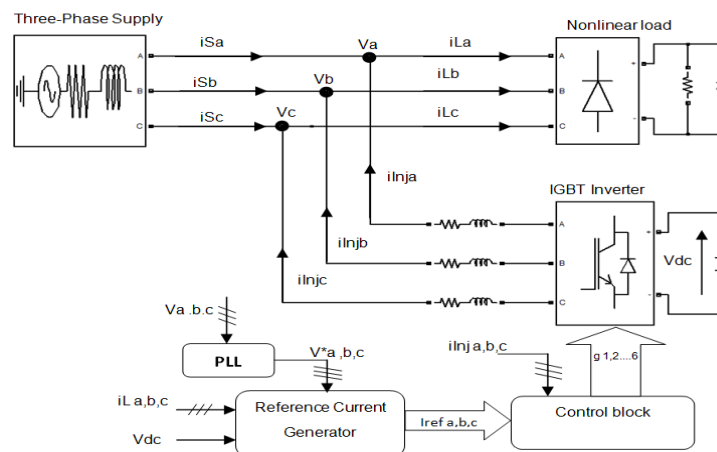


Figure IV. 21 - Structure générale de filtre actif parallèle (avec PLL).

Résultat de simulation

Les figures IV.22.a et IV.22.b 3 et 4 montrent respectivement les résultats de simulation obtenus pour la tension du réseau électrique (V_{s_abc}) et la composante directe de tension (V_{d_abc}). Cette dernière confirme la précision de l'extraction, de la composante directe de la tension (V_d) par la PLL. Le figure IV.26 montre la compensation de courant harmonique sous une tension déséquilibrée.

Les résultats de la simulation montrent que le courant obtenu après filtrage et les formes d'onde de tension sont en phase. De plus, le THD actuel est réduit de 26,54% à 2,27% ce qui confirme la bonne qualité de filtrage des courants harmoniques et une compensation parfaite de la puissance réactive ce qui améliore la qualité de l'énergie. Nous concluons que la méthode p-q avec PLL donne de meilleurs résultats dans milieu pollué et déséquilibré.

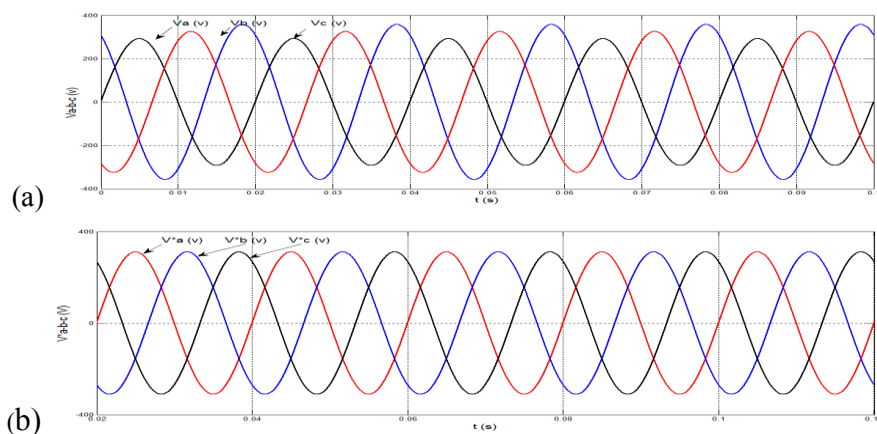


Figure IV. 22 - Analyse temporelle de la PLL sous une tension déséquilibrée.

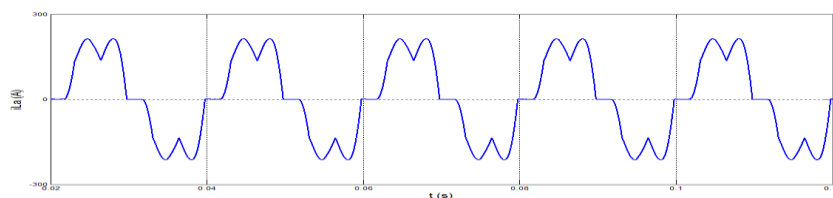


Figure IV. 23- Courant de source avant le filtrage.

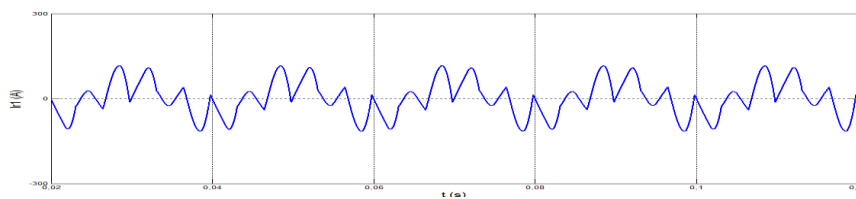


Figure IV. 24 - Courant de référence

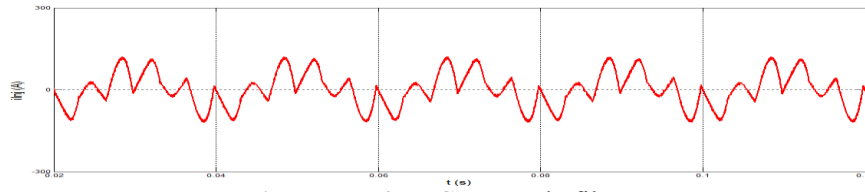


Figure IV. 25 - Courant de filtre.

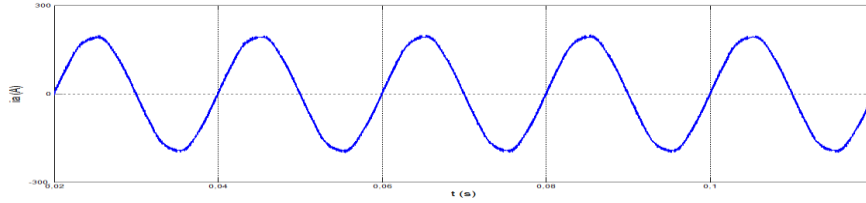


Figure IV. 26 - Courant de source après le filtrage.

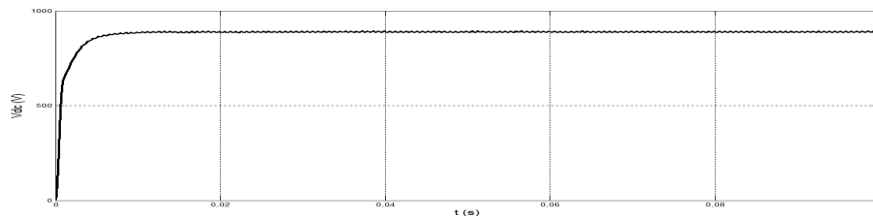


Figure IV. 27 - allure de la tension Vdc.

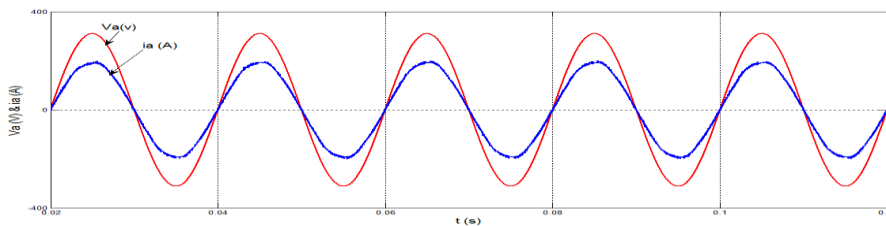


Figure IV. 28 - Tension et courant du réseau après le filtrage.

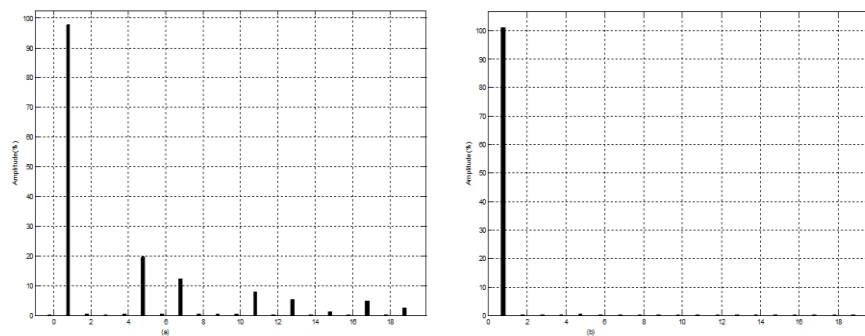


Figure IV. 29 - Analyse spectrale avant et après le filtrage.

IV.3 Conclusions

Dans ce chapitre, nous avons vérifié notre étude par des simulations numériques pour montrer la contribution du filtre actif parallèle dans l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique.

En premier lieu, une étude comparative des deux méthodes d'identification des courants de références (p-q et d-q) a montré que ces deux méthodes offrent de bons résultats mais que la méthode p-q est meilleure. Pour la régulation de la tension de bus continue le régulateur flou proposé possède une meilleure réponse dynamique et une plus grande robustesse par rapport au régulateur PI classique. La méthode p-q avec PLL donne de bons résultats dans un milieu pollué et déséquilibré.

Les analyses temporelles et spectrales des courants avant et après compensation montrent l'intérêt de l'utilisation du FAP dans la compensation des courants harmoniques et de la puissance réactive. Ces résultats montrent la bonne performance du filtre actif parallèle pour la compensation des courants harmoniques et de la puissance réactive causés par les charges linéaires. La fiabilité du filtre actif parallèle a été démontré et ce, même dans un système déséquilibré.

En conclusion, tous les résultats de simulation obtenus sont très satisfaisants et montrent le bon fonctionnement, l'efficacité et la robustesse du FAP.

Dans le chapitre suivant, nous associerons un système photovoltaïque à un FAP pour l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique.

Chapitre V

Association d'un générateur photovoltaïque à un FAP

Introduction

De nos jours, le pétrole constitue l'énergie fossile la plus exploitée dans les secteurs industriels et domestiques, cependant les ressources en pétrole sont limitées et deviennent de plus en plus rare, alors que les demandes énergétiques mondiales sont en perpétuelle évolution. Il est estimé que les réserves mondiales de pétrole seront épuisées dans un avenir proche, pour cette raison il s'avère nécessaire de trouver d'autres ressources d'énergies alternatives, économiques et non polluantes, vu que la protection de l'environnement est devenue un point crucial. Beaucoup de recherches scientifiques ont été menées dans ce sens, dans le domaine des énergies renouvelables, telles que la production d'électricité solaire et éolienne.

L'énergie solaire captée à l'aide de panneaux photovoltaïques représente une alternative énergétique viable pour la production d'électricité puisque cette dernière est une source renouvelable, à la fois propre, illimitée et avec un niveau de risque très réduit. Son potentiel est très important à l'échelle du besoin de l'activité humaine, il est aussi très largement réparti sur l'ensemble du globe ce qui lui confère un intérêt partagé par tous. Avec la diminution du prix des modules photovoltaïques (PV) et l'augmentation du prix des énergies fossiles, l'exploitation de cette ressource avec des systèmes de génération PV devient viable et rentable [9, 71, 72]. Il existe une multitude d'applications photovoltaïques, telles que l'électrification des sites isolés, les installations dans les bâtiments ou le raccordement direct au réseau d'électricité conventionnel. Etant donné que l'éclairement varie d'une manière instantanée, pour rendre maximale la puissance fournie par un générateur photovoltaïque, il est nécessaire de le faire fonctionner dans les conditions optimums, en effectuant une poursuite en temps réel du point de puissance crête.

Dans ce chapitre nous proposons un système basé sur l'association entre un générateur photovoltaïque (GPV) qui a pour but l'injection de l'énergie généré par le système photovoltaïque dans le réseau électrique et le filtre active parallèle (FAP) pour éliminer les perturbations issues par les charges non linéaires et non équilibrés.

Dans la première partie de ce chapitre, nous présenterons le principe de fonctionnement et la caractéristique des systèmes photovoltaïques. Nous présenterons également les

différentes techniques de poursuite du point de puissance maximale (MPPT) existantes dans la littérature.

Dans la deuxième partie, nous étudierons l'association d'un générateur photovoltaïque à un filtre actif parallèle que l'on va raccorder au réseau. Les deux topologies de filtre actif parallèle triphasé qui seront utilisés sont : le FAP à trois fils et le FAP à quatre fils.

V.1 Principe de la conversion photovoltaïque

V.1.1 Cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est assimilable à une diode photosensible, son fonctionnement repose sur les propriétés des matériaux semi-conducteurs. La cellule photovoltaïque permet la conversion directe de l'énergie lumineuse en énergie électrique, c'est l'effet photovoltaïque. Une cellule est constituée de deux couches minces de semi-conducteurs de type N et P, pour la couche N, c'est un apport d'électrons périphériques et pour la couche P c'est un déficit d'électrons. Les deux couches présentent ainsi une différence de potentiel. L'énergie des photons lumineux captés par les électrons périphériques (couche N), leur permet de franchir la barrière de potentiel et d'engendrer un courant électrique continu. Pour effectuer la collecte de ce courant, des électrodes sont déposées par sérigraphie sur les deux couches de semi-conducteur (figure V.1). L'électrode supérieure est une grille permettant le passage des rayons lumineux. Une couche antireflet est ensuite déposée sur cette électrode afin d'accroître la quantité de lumière absorbée [73].

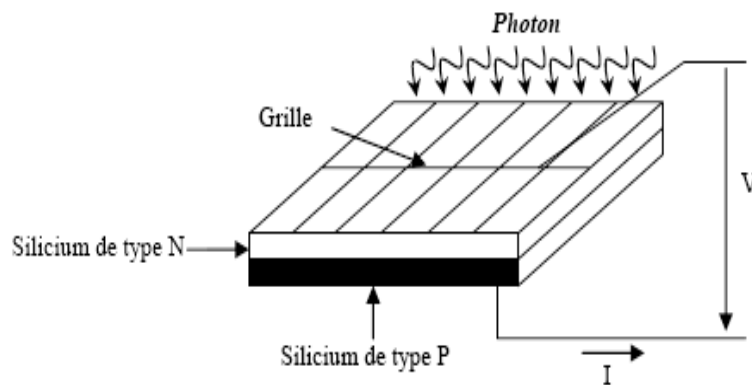


Figure V. 1 - Schéma d'une cellule élémentaire

Industriellement les matériaux les plus utilisés sont à base de silicium. Le rendement énergétique atteint industriellement est de 13 à 14 % pour les cellules à base de silicium monocristallin, 11 à 12 % avec du silicium polycristallin et enfin 7 à 8% pour le silicium amorphe en films minces.

V.1.2 Modélisation d'une cellule photovoltaïque

Pour développer un modèle équivalent d'une cellule photovoltaïque, il est nécessaire de faire un choix judicieux des circuits électriques qui le constituent et de comprendre la configuration physique et les caractéristiques électriques des éléments de la cellule. Pour cela, plusieurs modèles mathématiques sont développés pour représenter le comportement non linéaire des jonctions des semi-conducteurs. Dans la suite nous présentons deux modèles d'une cellule photovoltaïque, à savoir le modèle à deux diodes et le modèle à une diode.

V.1.2.1 Modèle à une diode

Le modèle à une diode (figure V.2) est le plus classique, il fait intervenir un générateur de courant pour la modélisation du photo-courant généré par le flux lumineux incident, une diode pour les représenter les phénomènes de polarisation de la cellule et deux résistances (série et shunt) pour modéliser les pertes [74-79].

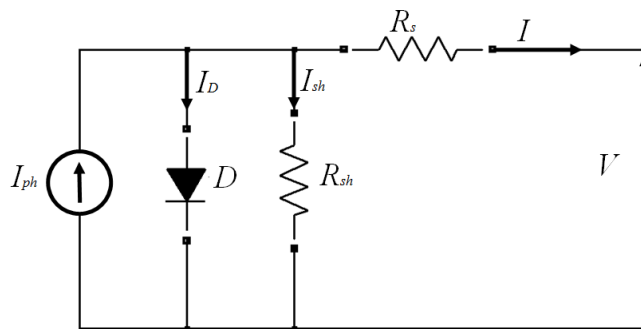


Figure V. 2 - Modèle électrique équivalent à une diode de la cellule photovoltaïque.

L'expression mathématique de la caractéristique I-V de ce modèle est donnée par :

$$I = I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{q(V+IR_s)}{nKT}} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (V.1)$$

V.1.2.2 Modèle à deux diodes

Le modèle électrique le plus proche du comportement réel d'un générateur photovoltaïque, est le modèle à deux diodes (figure V.3) avec des facteurs de forme différents et des lois de comportement différents vis-à-vis la température [80].

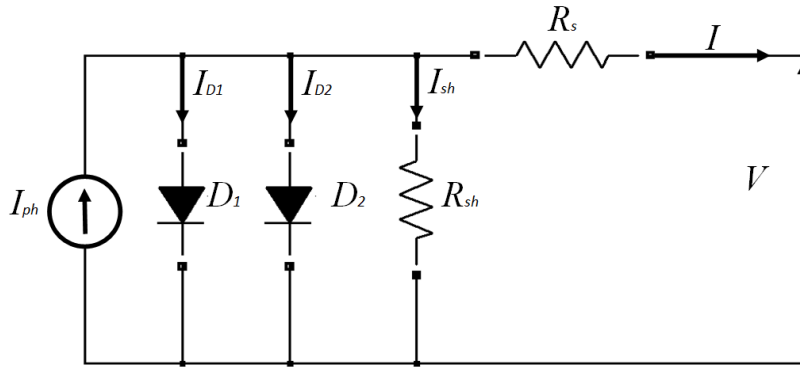


Figure V. 3 - Modèle électrique équivalent à deux diodes de la cellule photovoltaïque.

Le comportement en régime statique est décrit par l'équation électrique suivante :

$$I = I_{ph} - I_{D1} - I_{D2} - I_{sh} \quad (V.2)$$

$$I = I_{ph} - I_{s1} \left(e^{\frac{q(V+IR_s)}{n_1KT}} - 1 \right) - I_{s2} \left(e^{\frac{q(V+IR_s)}{n_2KT}} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (V.3)$$

Avec :

I_{ph} : Courant photo-généré par la cellule photovoltaïque sous éclairage donné (A),

I_{s1} et I_{s2} Courants de saturation de la diode ou courants à l'obscurité (A),

R_s : Résistance série représentant les diverses résistances des contacts et de connexions.

R_{sh} : Résistance parallèle ou shunt (Ω), elle prend en compte plusieurs effets tels que le courant de fuite de la jonction.

n_1 et n_2 : Coefficients d'idéalité de la cellule photovoltaïque

K : Constante de Boltzmann ($1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K)

T : Température absolue (K)

Pour un éclairage et une température donnés, les paramètres peuvent être déterminés à partir de plusieurs données, qui sont la tension à circuit ouvert V_{OC} , le

courant de court-circuit I_{SC} , la tension et le courant au point de maximum de puissance V_m et I_m , ainsi que les deux résistances série et shunt R_S et R_{Sh} .

V.1.2.3 Rendement d'une cellule photovoltaïque

Le rendement d'une cellule est le rapport entre la puissance maximale disponible et la puissance du rayonnement incident, il est donné par :

$$\eta = \frac{P_m}{P_i} = \frac{I_m \cdot V_m}{G \cdot S}$$

P_i : Puissance incidente sur la surface de la cellule photovoltaïque (W)

G : Eclairement global incident sur la cellule photovoltaïque (W/m²),

S : Surface totale de la cellule photovoltaïque (m²).

V.2 Le générateur photovoltaïque (PV)

V.2.1 Principe et constitution

Dans des conditions d'ensoleillement standard (1000W/m² ; 25°C), la puissance maximale délivrée par une cellule silicium de 150 cm² est d'environ 2.3 W sous une tension de 0.5V. Cette faible puissance est insuffisante pour la plupart des applications domestiques ou industrielles. Dans un groupement de n_s cellules en série, la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule, alors que le courant traversant les cellules reste le même (figure V.4).

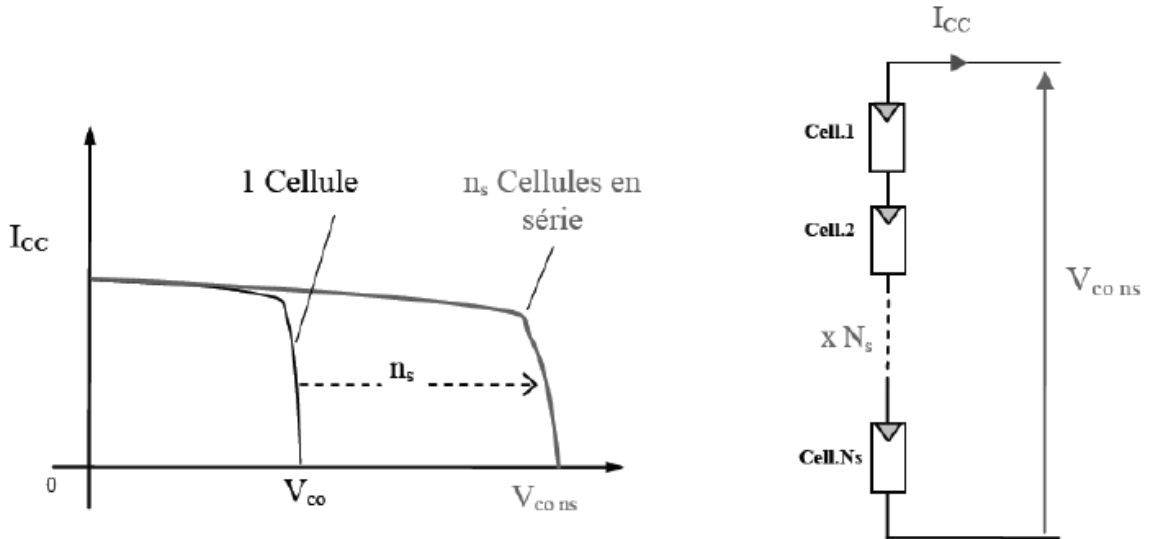


Figure V. 4 -Caractéristique résultante d'un groupement de ns cellules en série.

Dans le cas d'un groupement de n_p cellules en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par l'addition des courants (figure V.5).

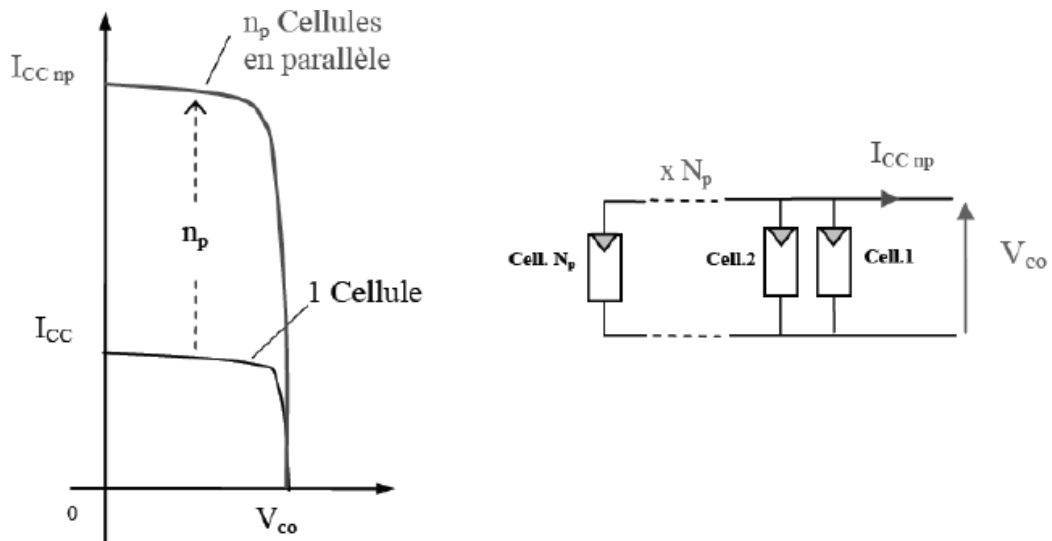


Figure V. 5 - Caractéristique résultante d'un groupement de np cellules en parallèle.

Les deux types de groupement sont en effet possibles et souvent utilisés, afin d'obtenir en sortie des valeurs de tension et intensité souhaitées. Ainsi, pour n_s cellules en série, constituants n_p branches elles-mêmes en parallèle, la puissance disponible en sortie du générateur PV est donnée par : $P_{PV} = n_s * V_{PV} * n_p * I_{PV}$.

La protection d'un module PV est assurée par l'ajout d'une diode anti-retour, montée en série pour éviter les courants inverses, et une diode branchée en parallèle dite diode by-pass, qui n'intervient qu'en cas de déséquilibre d'un ensemble de cellules afin de limiter la tension inverse aux bornes de cet ensemble et minimiser la perte de production associée.

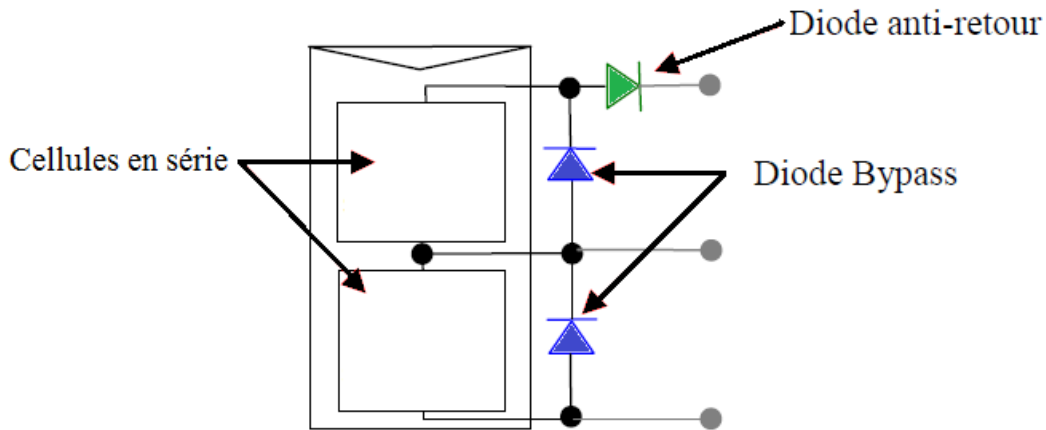


Figure V. 6 - GPV avec diodes by-pass et diode anti-retour.

Si l'on désire réaliser un générateur PV ayant un courant de sortie plus intense, on peut soit faire appel à des cellules PV de plus grande surface et de meilleur rendement, soit associer en parallèle plusieurs modules PV de caractéristiques similaires. Pour qu'un générateur PV ainsi reconstitué puisse fonctionner de façon optimale, il faut que les ($n_s * n_p$) cellules se comportent toutes de façon identique. Elles doivent pour cela être issues de la même technologie, du même lot de fabrication et qu'elles soient soumises aux mêmes conditions de fonctionnement (éclairage, température, vieillissement et inclinaison).

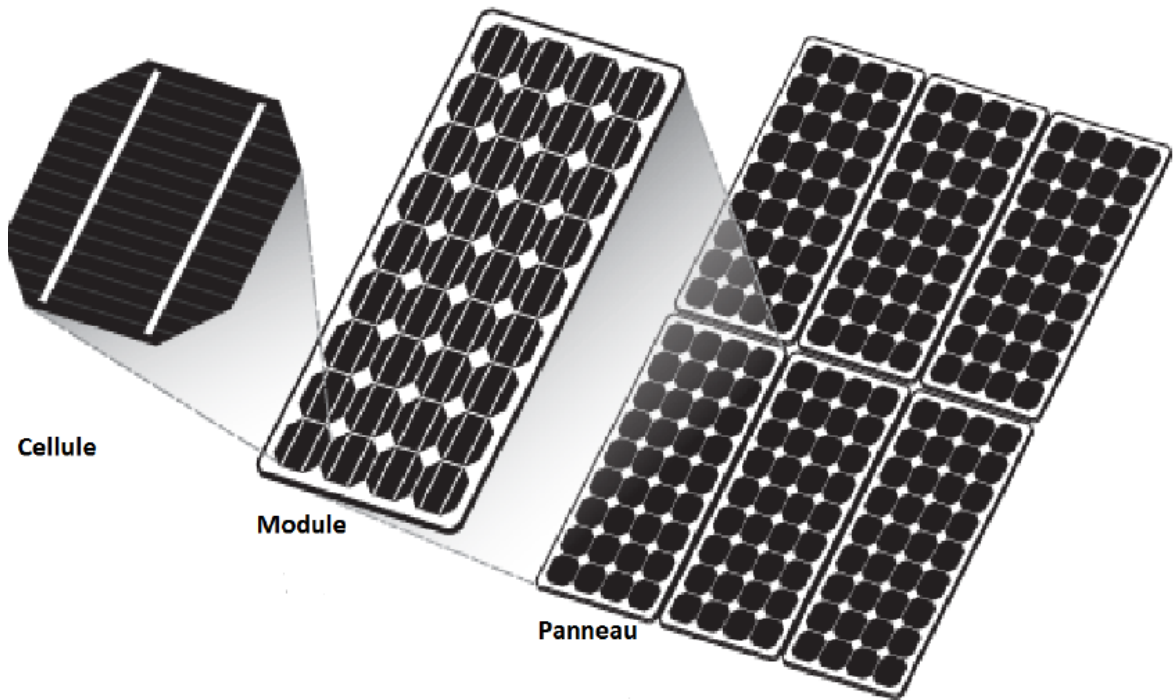


Figure V. 7 - Constitution d'un générateur photovoltaïque.

V.2.2 Caractéristique I-V et P-V

La figure ci-dessous représente les courbes $I-V$ et $P-V$ d'un panneau photovoltaïque typique dans les conditions standards (STC, c'est-à-dire l'ensoleillement $G = 1000 \text{ W/m}^2$ et température $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$). La puissance générée par un panneau photovoltaïque est donnée par le produit : $P = V \cdot I$.

La puissance maximale (P_{max}) est obtenue lorsque : $dP/dV = 0$.

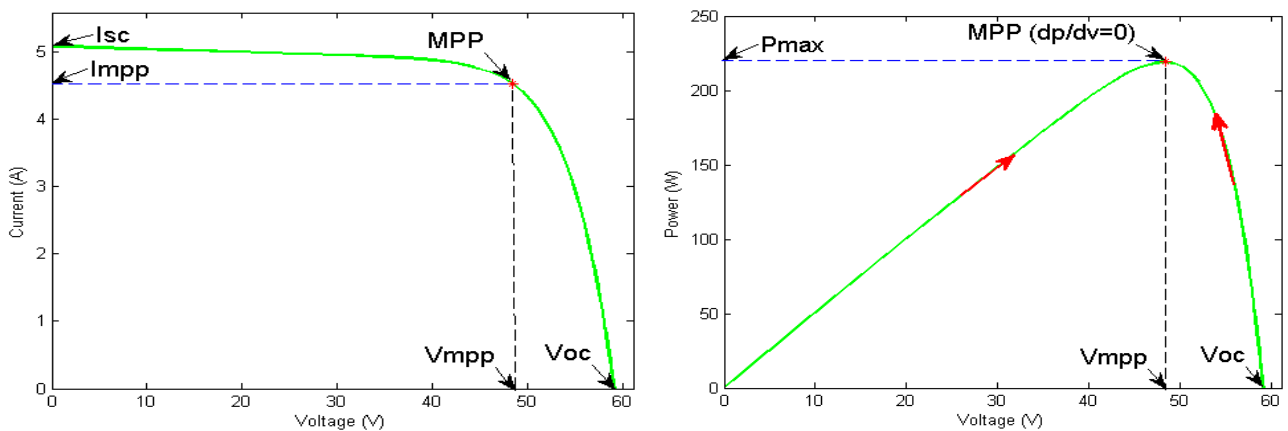


Figure V. 8 - Caractéristique I-V et P-V d'un panneau photovoltaïque.

V.2.3 Influence de la Température

La figure V.9 montre un abaque de courbes courant-tension, pour différents niveaux de températures de fonctionnement d'une cellule PV.

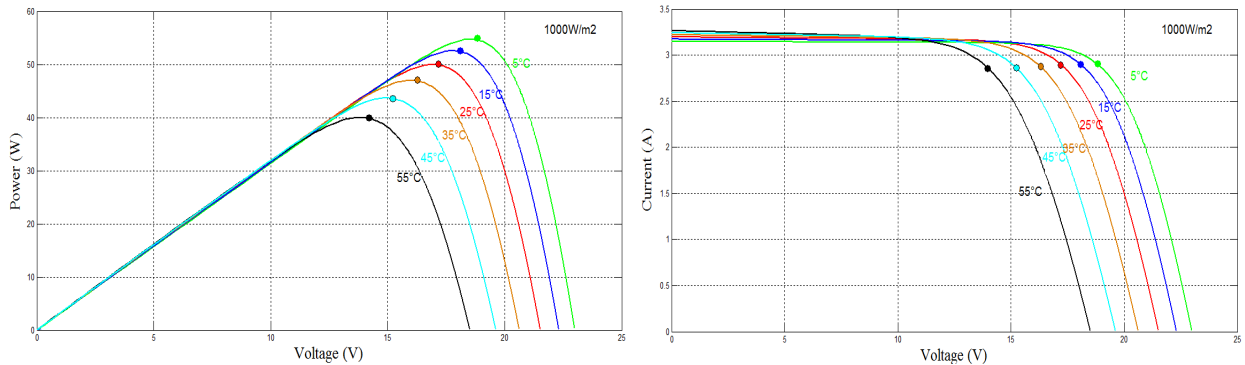


Figure V. 9 - Caractéristique d'un panneau photovoltaïque pour différentes température.

On constate que la température a une influence négligeable sur la valeur du courant de court-circuit. Par contre, la tension en circuit ouvert baisse considérablement lorsque la température augmente, par conséquent la puissance extractible diminue. Lors du dimensionnement d'une installation PV, la variation de la température du site sera impérativement à prendre en compte. Il est important de connaître que la puissance du panneau diminue d'environ 0,5% par degré d'augmentation de la température de la cellule au-dessus de 25 °C.

V.2.4 Influence de l'Éclairement

La figure V.10 représente un abaque de courbes pour différents niveaux de rayonnement.

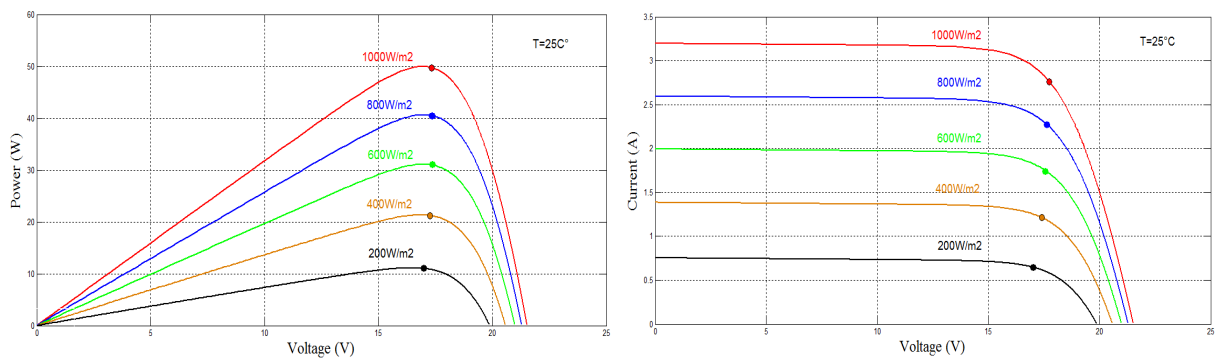


Figure V. 10 - Caractéristiques d'un panneau photovoltaïque pour différents éclaircements.

On voit bien que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, elle reste quasiment identique même à faible éclairement.

Les conditions atmosphériques standards, internationalement adoptées, pour mesurer la réponse d'un module photovoltaïque, correspondent à une intensité rayonnante de 1000 W/m^2 et une température ambiante de $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

V.3.Fonctionnement optimal d'un générateur photovoltaïque

La conception d'un système photovoltaïque optimisé est par nature difficile. En effet, du côté source, la puissance électrique produite par un générateur photovoltaïque varie fortement en fonction de l'intensité de l'éclairement et du niveau de température, elle dépend aussi de l'état de vieillissement global du système. Du côté charge, que ce soit de nature continue (DC), ou alternative (AC), comme c'est le cas du réseau électrique, chacune a son propre comportement dynamique qui peut être aléatoire. Pour que le générateur fonctionne le plus souvent possible dans son régime optimal, la solution communément adoptée est alors d'introduire un convertisseur statique qui jouera le rôle d'adaptateur source-charge.

Dans des conditions de fonctionnements données, c'est au point de puissance maximale de la caractéristique puissance en fonction de la tension, représentée à la figure (II.7) que l'on exploite au mieux la puissance crête installée. Nous pouvons voir également l'évolution de la puissance optimale, terme traduisant le caractère relatif aux conditions d'éclairement et de température de la puissance fournie.

Pour assurer le fonctionnement d'un générateur photovoltaïque à son point de puissance maximal (PPM), des contrôleurs MPPT sont souvent utilisés, ils sont destinés à minimiser l'erreur entre la puissance de fonctionnement courante et la puissance maximale de référence variable en fonction des conditions climatiques.

La puissance électrique fournie par un générateur PV est facilement calculable à partir du produit tension-courant. Par contre, la détermination de la puissance maximale de référence est plus délicate vue que cette dernière varie avec les conditions climatiques (éclairement, température), de plus elle est non stationnaire dans le temps et elle est

caractérisée par une fonction non-linéaire, ce qui rend le fonctionnement à puissance maximale plus difficile à réaliser.

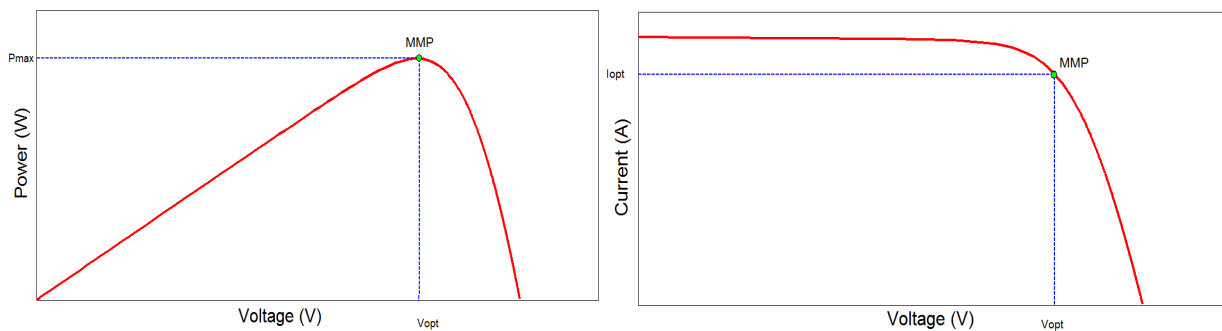


Figure V. 11- Repérage du point de fonctionnement à puissance maximale d'un panneau photovoltaïque.

V.4 Classification des systèmes photovoltaïques

En général, les systèmes PV sont classés en deux groupes : Les systèmes PV autonomes (hors réseau) et les systèmes connectés au réseau :

V.4.1 Les systèmes autonomes

Les systèmes autonomes sont généralement mis en œuvre dans les zones rurales et éloignées. Ils sont habituellement supportés par des systèmes de stockage (par exemple des batteries) afin de satisfaire la charge à des moments où l'éclairage solaire n'est pas suffisant pour que le PV puisse couvrir tout le besoin.

Ce type est particulièrement approprié pour les zones éloignées où les besoins énergétiques de base sont limités. Les systèmes autonomes se composent principalement d'un générateur PV, d'un banc de batterie pour le stockage et d'un ensemble de convertisseurs statiques DC-DC et DC- AC (figure V.12).

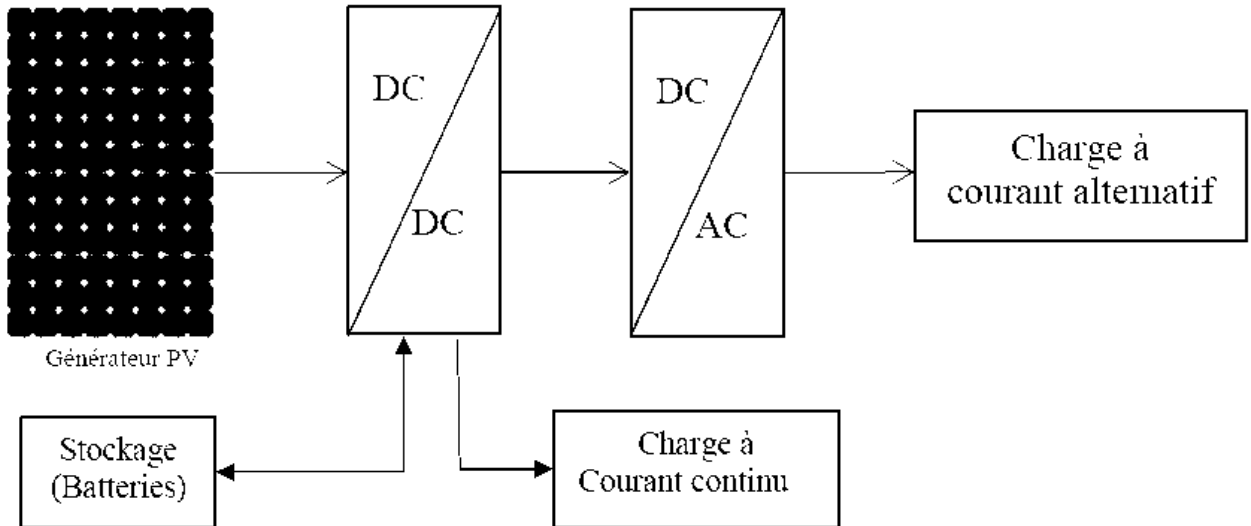


Figure V. 12 - Système PV autonome.

V.4.2 Les systèmes connectés au réseau

Les systèmes connectés au réseau sont des systèmes photovoltaïques connectés aux nœuds de distribution et lui fournissent de l'électricité. La connexion se fait via un onduleur qui convertit le courant continu en courant alternatif et assure également la synchronisation avec le réseau en tension et en fréquence. Ces systèmes peuvent être connectés directement au réseau public ou au réseau de la maison (Smart home) (figure V.13).

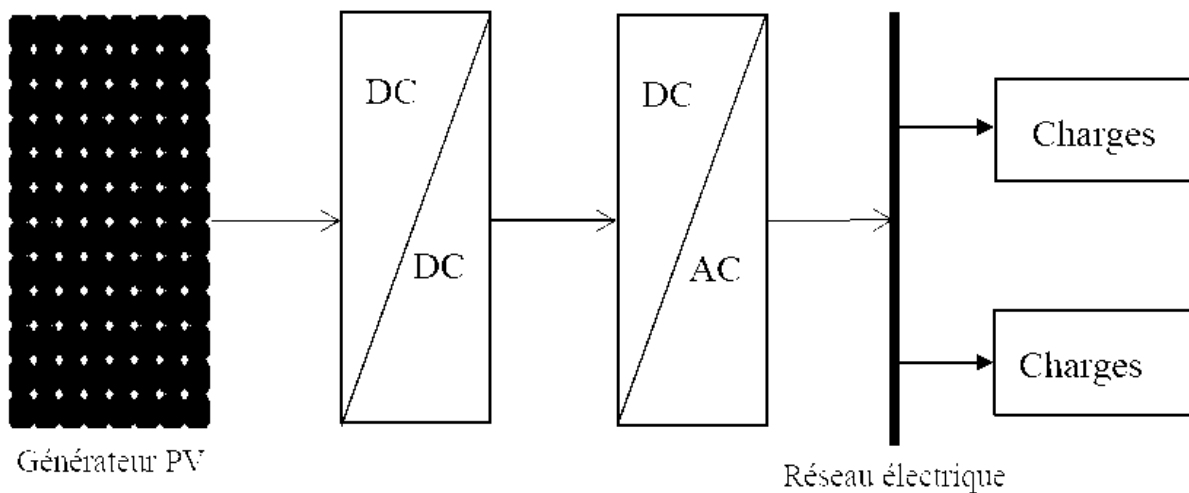


Figure V. 13 - Système photovoltaïque connecte au réseau.

V.5 Étape d'Adaptation pour Générateur PV

V.5.1 Convertisseur élévateur (BOOST)

Considérons l'exemple de la figure V.14 correspondant à un convertisseur DC-DC élévateur (boost) de tension. Ce type de convertisseur peut être utilisé comme un adaptateur source-charge, lorsque la charge a besoin d'une tension supérieure à celle délivrée par le générateur PV.

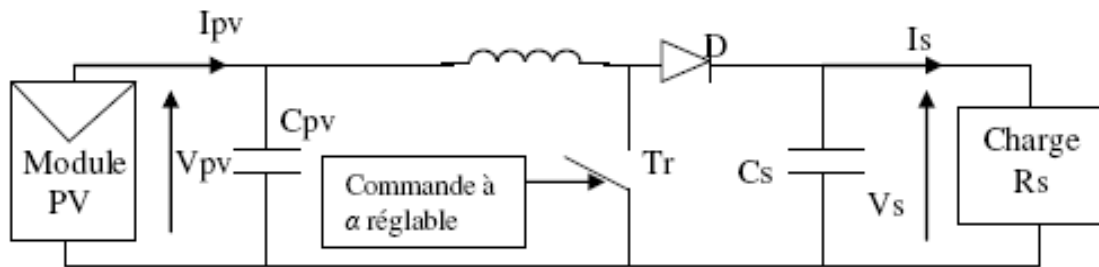


Figure V. 14 - Convertisseur statique DC-DC utilisé comme adaptateur : générateur PV-charge.

L'adaptation entre la source et la charge est réalisée par la variation du rapport cyclique D . En effet, si nous supposons que le hacheur fonctionne en conduction continue et si nous considérons que le rendement de ce dernier est de 100%, alors les relations électriques entre les grandeurs d'entrées du convertisseur (correspondant à I_{PV} et V_{PV} du générateur) et celles de sorties (I_s et V_s) ne dépendent que du rapport cyclique D .

Le convertisseur peut alors travailler selon deux modes de fonctionnement dépendant de sa capacité de stockage d'énergie et de la période de commutation.

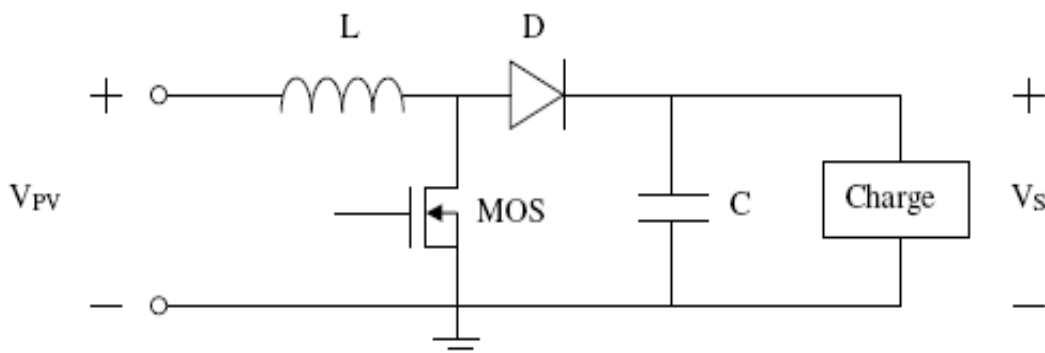


Figure V. 15 - Structure du convertisseur BOOST.

Ces deux modes de fonctionnement sont :

- Mode continu : dans ce cas, l'énergie emmagasinée dans l'inductance L est transférée partiellement et donc le courant dans celle-ci ne s'annule pas.

- Mode discontinu : dans ce cas, au contraire, l'énergie emmagasinée dans l'inductance L est totalement transférée et donc le courant dans celle-ci s'annule.

En mode de conduction continu, le fonctionnement du convertisseur DC-DC correspond à deux circuits équivalents associés à l'intervalle de commutation (T_{on} , T_{off}). L'intervalle de conduction T_{on} débute quand on ferme le transistor de puissance MOS à l'instant $t = 0$ (figure V.15), le courant d'entrée qui s'élève, traverse l'inductance L et le transistor saturé.

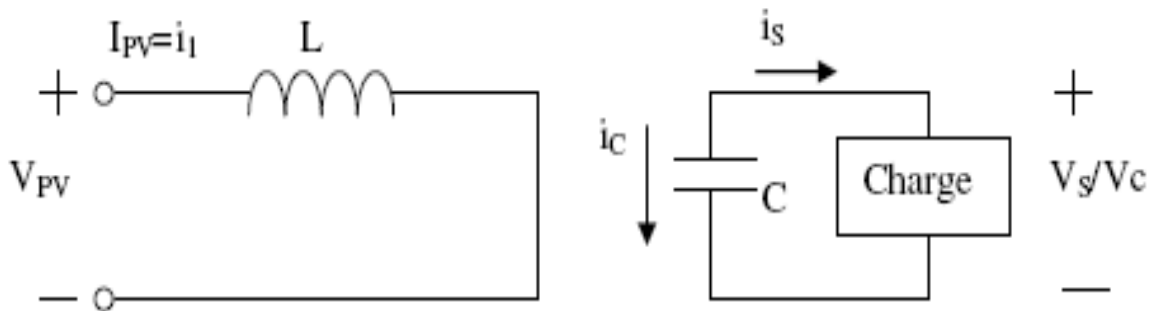


Figure V. 16 - Circuit équivalent pour T_{on} .

L'intervalle de blocage T_{off} débute quand on ouvre le transistor à l'instant $t = t_1$ (figure V.17), le courant qui traverse l'inductance L diminue, vu que l'énergie emmagasinée dans la self est transférée à la charge.

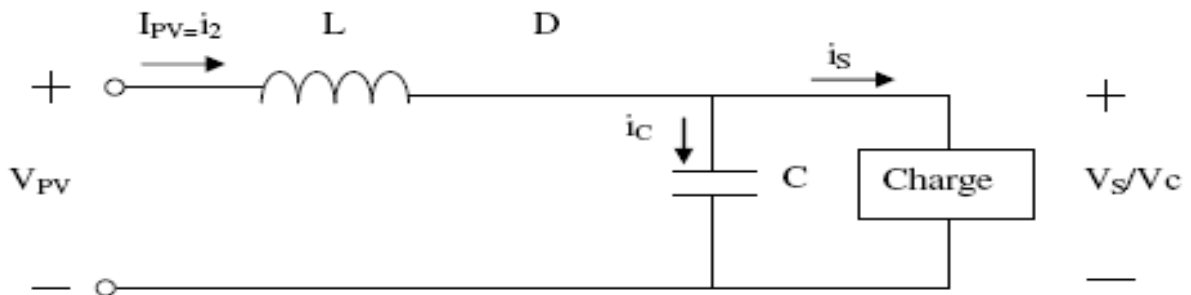


Figure V. 17 - Circuit équivalent pour T_{off} .

La puissance maximale qui correspond au point de fonctionnement optimal, est déterminée pour différentes l'éclairément des rayons solaires et différents niveaux de température. On utilise un convertisseur électrique DC/DC dans la partie contrôle du système photovoltaïque, en vue d'effectuer la poursuite du point de puissance maximale (MPPT), grâce à un contrôle automatique du rapport cyclique D , et cela en générant un signal MLI. On a opté pour le hacheur (boost) comme interface de puissance, contrôlé

par le régulateur MPPT, afin d'adapter la tension de sortie du hacheur à la tension requise par la charge.

A partir de cette règle et selon le type de contrôleur, on peut raisonner sur plusieurs et différentes méthodes, afin d'extraire le maximum de puissance d'un panneau solaire. Certains de ces concepts sont très robustes et simples, tandis que d'autres approches exigent des dispositifs de logique très sophistiqués tels que des microprocesseurs combinés avec des circuits de puissance, des convertisseurs de commutation etc.

V.6. Poursuite du point de puissance maximum (MPPT)

Dans la littérature, plusieurs travaux de recherche ont traité diverses techniques de contrôle MPPT. Ces commandes sont sélectionnées en fonction de leurs besoins (coût, complexité, précision, vitesse de convergence) [81]. Les méthodes Perturb and Observe (P&O) [82-85], Conductance Incrémentale (IC) [84, 86], Hill Climbing (HC) [84, 87] sont les plus populaires car elles ont l'avantage d'une implémentation facile [75, 76, 88, 89]. Ils sont largement utilisés dans de nombreuses applications pour : Chargeurs des batteries, la connexion au réseau etc. Le principe de ces méthodes consiste à perturber le système avec une tension/rapport cyclique et vérifier son comportement. De plus, il existe d'autres méthodes plus simples, dites indirectes, telles que les méthodes du courant de court-circuit [90], de la tension de circuit ouvert [90], qui sont utilisés pour des applications à faible coût, tels que l'éclairage public. Ces méthodes souffrent des problèmes remarquables sous des variations soudaines d'éclairement, menant à d'autres algorithmes MPPT intelligents d'être proposés comme des alternatives, en termes de précision et de rapidité. De nos jours, plusieurs méthodes de suivi du point de puissance maximale (MPPT) basées sur l'intelligence artificielle, telle que la logique floue (FLC) [75, 91], les réseaux de neurone (ANN) [76, 91, 92], les algorithmes génétiques (AG) [77, 91, 93-95].

Les méthodes d'intelligence artificielle et conventionnelles ont leurs avantages et leurs inconvénients. Les techniques conventionnelles ont leur mise en œuvre facile, alors qu'elles montrent une réponse lente durant le changement rapide de températures et les changements d'éclairement, ce qui entraîne la divergence du point de puissance maximale. D'autre part, les méthodes d'intelligence artificielle montrent une réponse très

rapide et précise pour des changements instantanés de température et d'éclairement via les règles de décision appropriées. Les inconvénients majeurs de ces dernières résident dans leur mise en œuvre plus complexe, nécessitant un effort de calcul notable, et un processeur très rapide. Le grand nombre de méthodes proposées peut rendre difficile la détermination de la meilleure technique à adopter lors de la mise en œuvre dans un système photovoltaïque. Les méthodes varient en complexité, le nombre de capteurs requis, l'implémentation numérique ou analogique, la vitesse de convergence, la capacité de suivi et la rentabilité. Le tableau I.4 donne une comparaison entre les différents types de commande MPPT [75, 76, 81, 96, 97].

Tableau V. 1 - Comparaison des méthodes MPPT.

MPPT	Dépendance au système	Vrai MPPT	Types de circuits	Réglage périodique	Vitesse de convergence	Complexité d'implémentation	Capteurs
P&O	Non	Oui	Digital/ Analogique	Non	Varie	Faible	V et I
Conductance Incrémentale	Non	Oui	Digital	Non	Varie	Moyen	V et I
Hill-Climbing	Non	Oui	Digital/ Analogique	Non	Varie	Faible	V et I
Fraction de Voc	Oui	Non	Digital/ Analogique	Oui	Moyen	Moyen	V
Fraction de Icc	Oui	Non	Digital/ Analogique	Oui	Moyen	Moyen	I
PSO	Non	Oui	Digital	Non	Élevé	Elevée	V et I
Logique Floue	Oui	Oui	Digital	Oui	Élevé	Élevée	V et I
Réseaux de Neurones	Oui	Oui	Digital	Oui	Élevé	Élevée	V et I
Slide control	Non	Oui	Digital	Non	Élevé	Moyen	V et I

V.6.1 Méthode 'perturbation et observation' P&O

L'algorithme de perturbation et observation (communément désignée par P&O) est l'algorithme de poursuite le plus utilisé dans la littérature et surtout dans la pratique en raison de sa facilité de mise en œuvre. Cet algorithme a pour objectif de faire fonctionner le système à sa puissance maximale par l'incrémental ou décrémental de la tension du point de fonctionnement et l'observation de l'effet de cette perturbation sur la puissance débitée par le GPV. Selon cette observation, l'algorithme décide sur

l'acte à faire pendant la prochaine itération. Quatre cas de situation pour P&O sont envisagés par la figure V.18 et récapitulés dans le Tableau V.2.

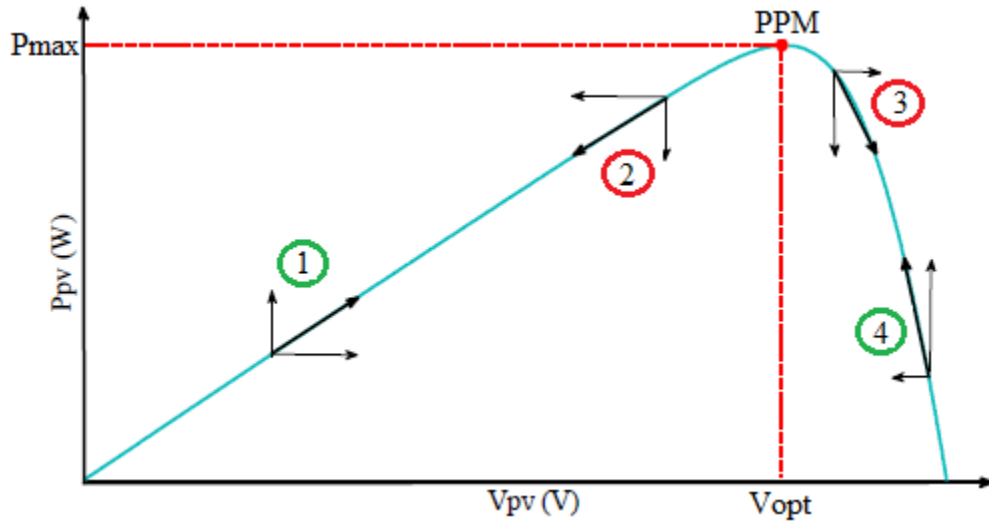


Figure V. 18 - Caractéristique de fonctionnement de la méthode P&O.

Tableau V. 2 -Principe de l'algorithme P&O.

Cas N°	ΔV	ΔP	$\Delta P/\Delta V$	Sens de la poursuite	Action de contrôle
1	+	+	+	Bon	Incrémenter $V(n) = V(n-1) + C$
2	-	-	+	Mauvais	Incrémenter $V(n) = V(n-1) + C$
3	+	-	-	Mauvais	Décrémenter $V(n) = V(n-1) - C$
4	-	+	-	Bon	Décrémenter $V(n) = V(n-1) - C$

L'algorithme P&O (Figure V.19) a comme avantage la précision et la rapidité de réaction. Il permet de déterminer le point de puissance maximale pour un ensoleillement et une température ou un niveau de dégradation des caractéristiques. Le problème avec cet algorithme est:

- ✓ l'oscillation autour du PPM dans les conditions de fonctionnement normales.
- ✓ la mauvaise convergence de l'algorithme dans le cas des variations brusques de la température et/ou de l'ensoleillement.

Il faut noter que ces oscillations peuvent être réduites si on fixe un faible pas d'incrémentement mais au détriment du temps de convergence. Alors, un compromis doit être fait entre précision et rapidité lors du choix de ce pas de mise à jour.

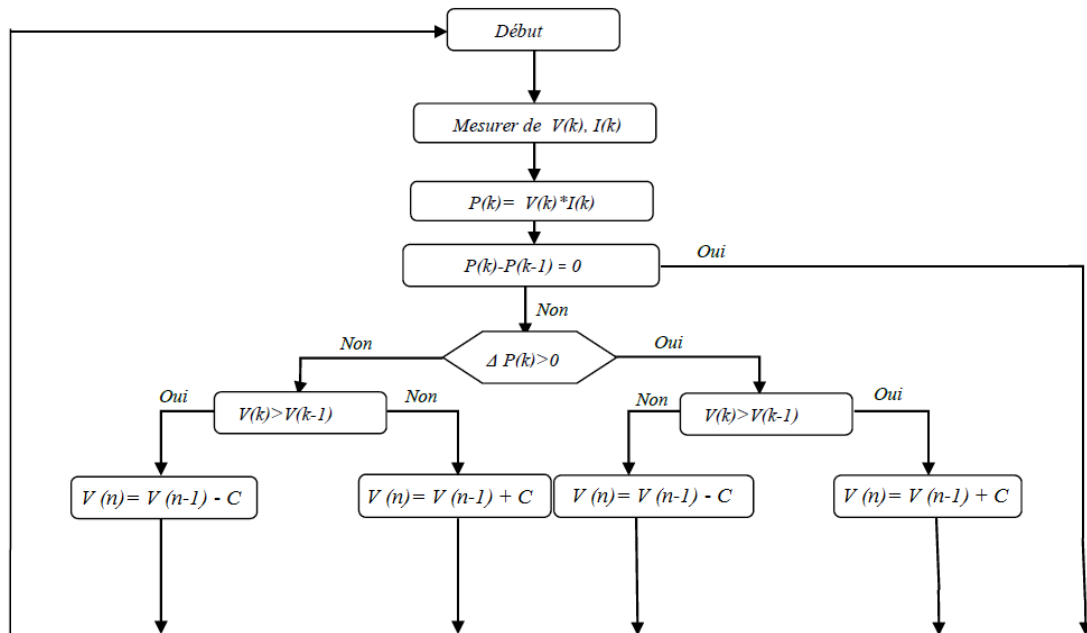


Figure V. 19 - Organigramme de la méthode P&O.

V.7 Association du générateur PV au filtre actif parallèle à trois fils

La figure 5 représente l'ensemble de la structure de l'association du générateur photovoltaïque (GPV) au filtre actif parallèle (FAP) à trois fils et son environnement fonctionnel.

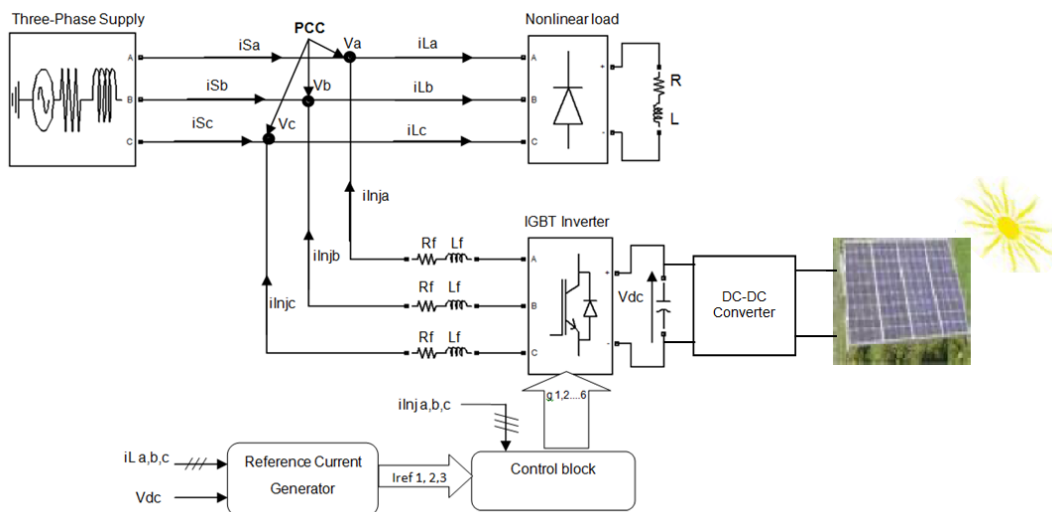


Figure V. 20 - Configuration du GPV associé au filtre actif parallèle à trois fils.

V.8 Association du générateur PV au filtre actif parallèle à quatre fils

La figure V.21 présente la structure générale de l'association du générateur photovoltaïque (GPV) au filtre actif parallèle à quatre fils.

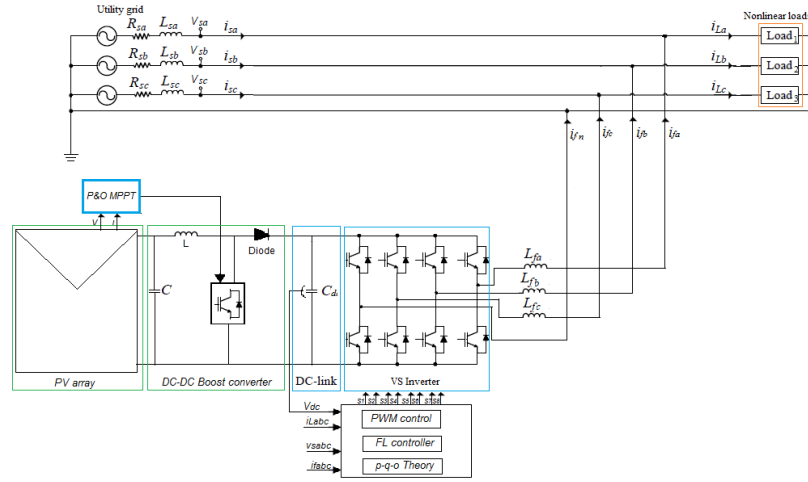


Figure V. 21 - Configuration du GPV associé au filtre actif parallèle à quatre fils.

V.8.1 Identification des courants perturbés dans le système triphasé à quatre fils

La méthode de la Puissance Réactive Instantanée a été introduite par le professeur Akagi [18] pour le système triphasé à trois fils et donne de bons résultats. Cette théorie a été généralisée par la suite pour le système triphasé à quatre fils, y compris la tension de séquence nulle et le courant de séquence nulle [7, 59, 98]. Les concepts de puissance dans les deux systèmes ne sont pas les mêmes, tout comme les concepts pour la compensation. Cela est lié la présence de la composante homopolaire de puissance dans les réseaux à 4 fils où le courant et la tension homopolaires ne sont pas nuls en cas de réseau déséquilibré. Les tensions et les courants instantanées triphasées subissent une transformation des coordonnées (a-b-c) en coordonnées (α - β -0) comme suit:

$$\begin{bmatrix} v_{\alpha} \\ v_{\beta} \\ v_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} \quad (V.4)$$

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \\ i_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{La} \\ i_{Lb} \\ i_{Lc} \end{bmatrix} \quad (V.5)$$

La puissance réelle instantanée p_α , la puissance imaginaire q_β et la puissance réelle de la séquence zéro p_0 dans les coordonnées $(\alpha\text{-}\beta\text{-}0)$ sont définies comme suit:

$$\begin{bmatrix} p_\alpha \\ p_\beta \\ p_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta & 0 \\ -v_\beta & v_\alpha & 0 \\ 0 & 0 & v_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (\text{V.6})$$

La puissance instantanée p_α et p_β comprend des valeurs DC et AC correspondant respectivement à la composante fondamentale et harmonique;

$$\begin{bmatrix} p_\alpha \\ p_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{p}_\alpha & \tilde{p}_\alpha \\ \bar{p}_\beta & \tilde{p}_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{V.7})$$

La valeur DC de la puissance instantanée p_α est extraite à l'aide d'un filtre passe-bas. Ensuite, les courants de référence dans les coordonnées $\alpha\text{-}\beta\text{-}0$ sont définis par l'équation suivante:

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha_ref} \\ i_{\beta_ref} \\ i_{0_ref} \end{bmatrix} = \frac{1}{v_0 v_\alpha + v_0 v_\beta} \begin{bmatrix} v_0 v_\alpha & -v_0 v_\beta & 0 \\ v_0 v_\beta & v_0 v_\alpha & 0 \\ 0 & 0 & v_\alpha^2 + v_\beta^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p}_\alpha \\ p_\beta \\ p_0 \end{bmatrix} \quad (\text{V.8})$$

Ensuite, les courants de référence dans les coordonnées a-b-c peuvent être obtenus comme suit:

$$\begin{bmatrix} i_{fa_ref} \\ i_{fb_ref} \\ i_{fc_ref} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha_ref} \\ i_{\beta_ref} \\ i_{0_ref} \end{bmatrix} \quad (\text{V.9})$$

Le courant neutre est égal à:

$$i_n = i_{fa_ref} + i_{fb_ref} + i_{fc_ref} \quad (\text{V.10})$$

La figure. V.2 montre le schéma fonctionnel Simulink de la théorie p-q-0.

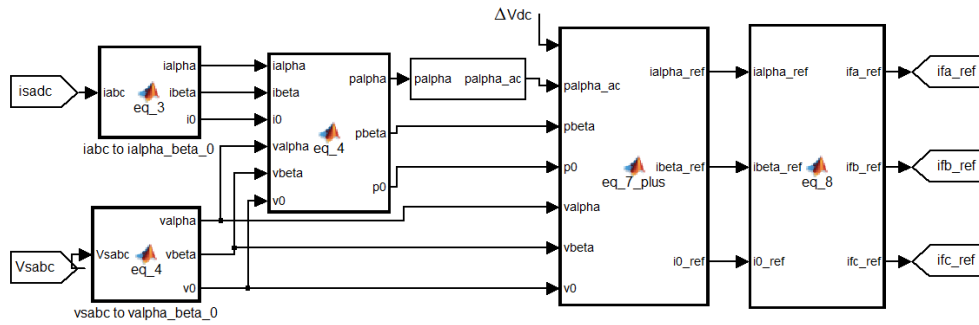


Figure V. 22 - Théorie p-q-0 sous Matlab / Simulink.

V. 9 Résultats de simulation et discussion

Afin de vérifier les performances du système GPV-FAP proposé, des simulations numériques à l'aide du logiciel MATLAB/Simulink ont été développées.

Le tableau V.3 présente les paramètres de simulations du système GPV-FAP à trois fils. Le système se compose d'un générateur photovoltaïque, d'un convertisseur DC/DC (élevateur) connecté à un régulateur MPPT (P&O), d'un onduleur de tension (VSI) triphasé à trois fils muni d'un bloc de contrôle, d'un réseau électrique triphasé et d'une charge non linéaire (figure V.23).

Tableau V. 3 - Paramètres de simulations du GPV-FAP à trois fils.

<i>Réseau électrique</i>	
$V_s = 220 \text{ V}$, $f = 50 \text{ HZ}$, ($R_s = 0.5 \text{ m}\Omega$, $L_s = 19 \text{ }\mu\text{H}$)	
<i>Charge polluante Puissance</i>	
Charge non linéaire	$R_{ch} = 2 \text{ }\Omega$, $C_{ch} = 4 \text{ mF}$
<i>Filtre actif parallèle</i>	
Tension continue V_{c-dc}	750 V
Capacité du condensateur C_{dc}	4 mF
Inductance L_f	0.3 mH

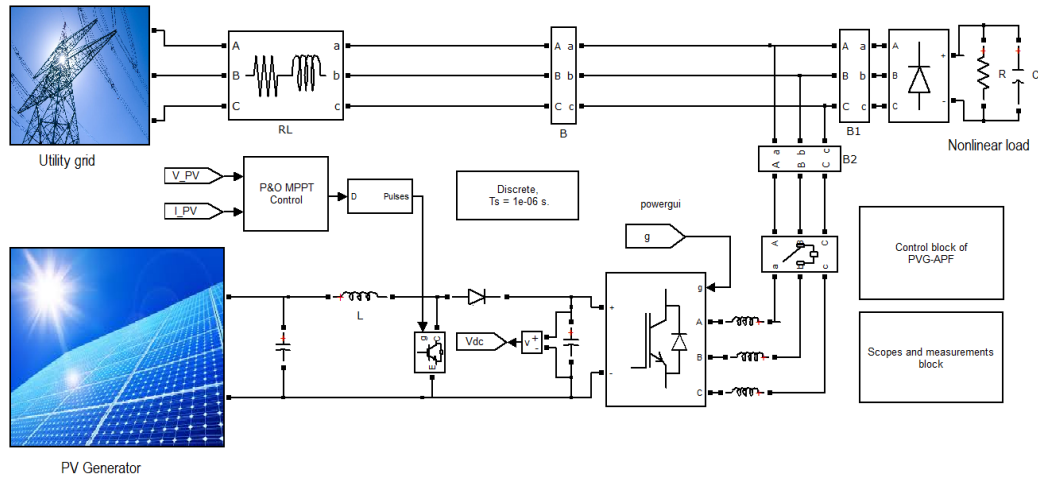


Figure V. 23 - Structure de GPV associé au FAP à trois fils sous Matlab / Simulink.

Le système du FAP à quatre fils est le même que celui à trois fils, à la différence près que l'onduleur de tension est ici à quatre fils et que le système alimente trois charges non linéaires et déséquilibrées (figure V.24). Le tableau V.4 présente les paramètres de simulations du système GPV-FAP proposé.

Tableau V. 4 - Les paramètres du GPV-FAP à quatre fils.

<i>Paramètres</i>		<i>Valeurs</i>
<i>Réseau électrique</i>	<i>Voltage rms, frequency</i>	220 V, 50 Hz
	<i>Line impedance (R_s, L_s)</i>	0.5 mΩ, 0.19μH
<i>Filtre actif parallèle</i>	<i>Inductance L_f</i>	0.3 mH
<i>Condensateur DC</i>	<i>Capacité C_{dc}</i>	4 mF
<i>Tension continue</i>	<i>V_{dc}</i>	750 V
<i>Charges non linéaires non équilibrées</i>	<i>Charge₁ (R₁, L₁)</i>	3.8 Ω, 0.011 H
	<i>Charge₂ (R₂, L₂)</i>	3 Ω, 0.098H
	<i>Charge₃ (R₃, L₃)</i>	3.4 Ω, 0.010 H

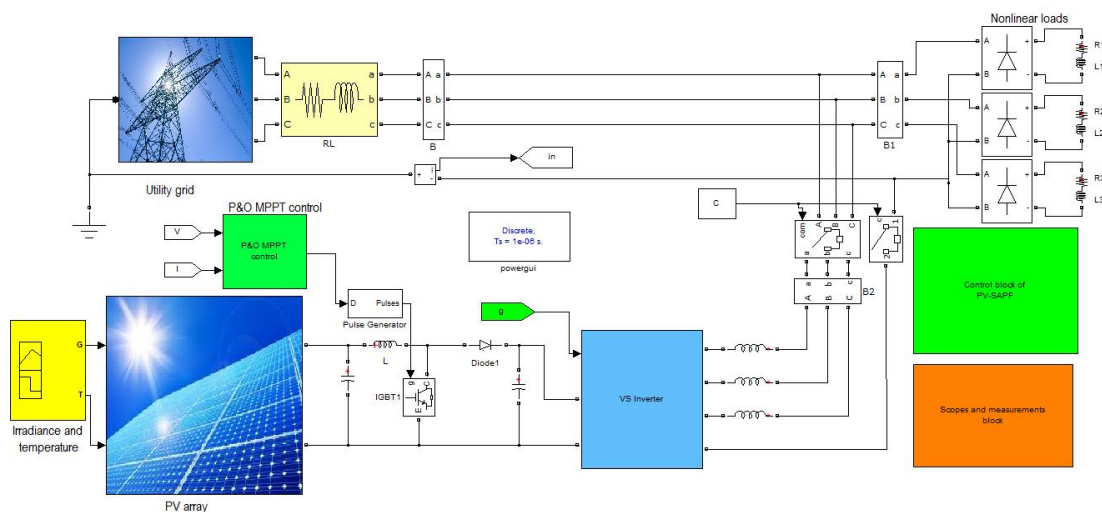


Figure V. 24 - Structure de GPV associé au FAP à quatre fils sous Matlab / Simulink.

Pour le générateur photovoltaïque, le module PV Canadian Solar CS5P-220M a été choisi pour la simulation. Le module se compose de 96 cellules polycristallines en série; Il fournit une puissance maximale de 220 W et une tension optimale de 48,32 V aux STC. Les paramètres utilisés pour le système GPV-FAP proposé sont présentés dans le tableau V.5.

Tableau V. 5 - Caractéristiques principales du module CS5P-220M.

caractéristiques électrique	Symboles	Valeurs
Puissance maximale aux conditions STC	P_{max}	219.72 W
Tension au PPM	V_{ppm}	48.315 V
Courant au PPM	I_{ppm}	4.5475 A
Tension du circuit ouvert	V_{oc}	59.261 V
Courant de court-circuit	I_{sc}	5.0926 A
Coefficient de température pour I_{sc}	α_{sc}	5.532 m A/°C
Coefficient de température pour V_{oc}	β_{oc}	-0.1110 V/°C

Résultat de simulation

La figure. V.25.a montre le rapport cyclique qu'est initialisé à la valeur $D = 0.7$. La figure V.25.b montre la tension du bus continu (V_{dc}) et sa référence (V_{dc_ref}). On peut observer que l'algorithme P & O trouve rapidement le PPM attendu dans un très court laps de temps, et qu'il réussit à ajuster très rapidement le rapport cyclique D . On peut observer aussi de faibles oscillations autour du point de fonctionnement en régime permanent. Ces résultats montrent que la technique P & O fonctionne très bien avec une efficacité élevée (jusqu'à 94%). Ces résultats confirment que le système fonctionne très efficacement car le signal V_{dc} suit avec précision le signal de référence V_{dc_ref} .

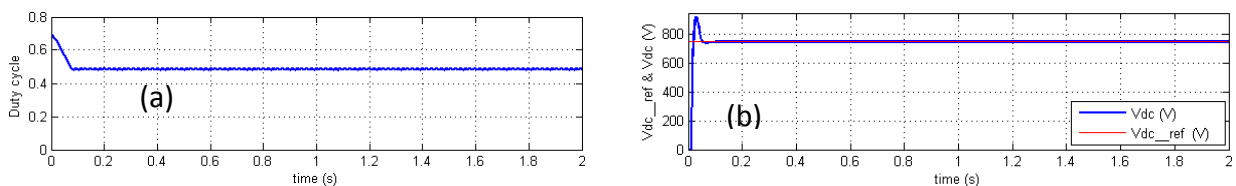


Figure V. 25 - (a) Rapport cyclique D (b) Tension du bus continue (V_{dc} (V)) et sa tension de référence (V_{dc_ref} (V)).

Dans le cas du FAP à trois fils

Les résultats de la simulation pour le GPV-FAP effectuant la compensation du courant et prenant en compte la charge présentée dans le tableau V.3 sont illustrés dans les figures V.26 et V.27. Avant le branchement le FAP, la charge non linéaire absorbe de

courant non sinusoïdal et les courants de source triphasés sont déformés et non synchronisés à leurs tensions correspondantes (figure V.26.a.). Le système GPV-FAP injecte au PCC des courants identiques aux courants de référence estimés (figure V.26.b), mais en opposition de phase comme montre la figure V.26.c. Le suivi de la trajectoire du courant de référence par le courant injecté s'effectue avec une erreur approximativement nulle (figure V.26.d).

Le GPV-FAP impose des courants de source de formes d'onde sinusoïdales (figure V.26.e). Comme on peut l'observer, les courants de source sont équilibrés. En outre, les courants obtenus sont synchronisés aux tensions correspondantes comme illustré dans la figure V.26.f. Avec un faible taux de distorsion harmonique (THD<5%) comme le montre dans la figure V.27.

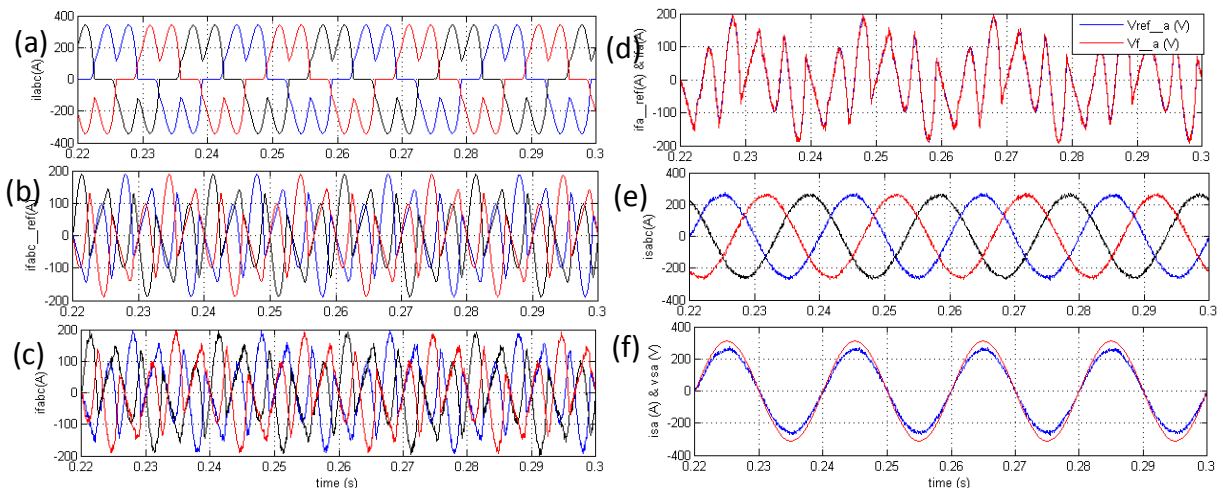


Figure V. 26 - (a) Courants de la source avant le filtrage, (b) courants de références, (c) courants de filtre, (d) courant de filtre et de référence, (e) courants de la source après le filtrage, (f) tension et courant du réseau après le filtrage.

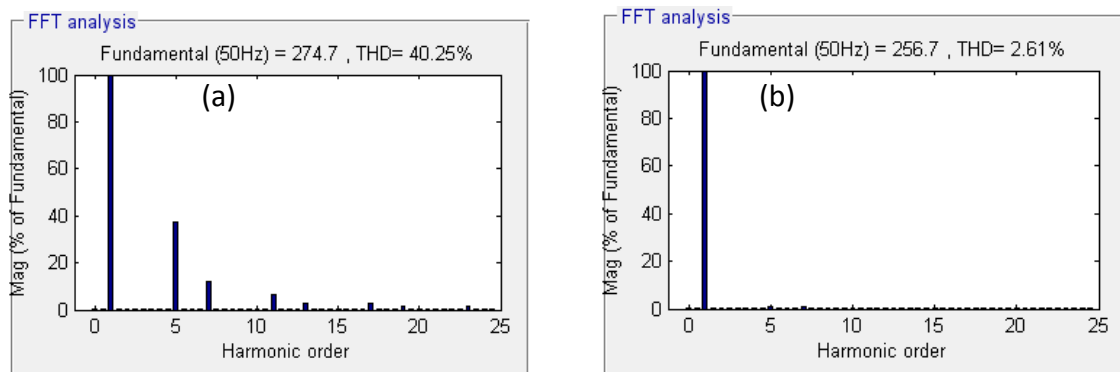


Figure V. 27 - Analyse spectrale avant et après le filtrage.

Dans le cas du FAP à quatre fils

Les résultats de la simulation pour le GPV-FAP effectuant la compensation du courant et prenant en compte les trois charges présentées dans le tableau V.4 sont illustrés dans les figures V.28 à V.33. Sans GPV-FAP, les trois charges non linéaires absorbent des courants non sinusoïdaux et les courants de source triphasés sont déformés, déséquilibrés et non synchronisés à leurs tensions correspondantes (figure V.28.a).

Le système GPV-FAP injecte au PCC des courants identiques aux courants de référence estimés (i_{ref_abc} , voir la figure V.29.a), mais en opposition de phase (figure V.28.b). Le suivi de la trajectoire du courant de référence par le courant injecté s'effectue avec une erreur approximativement nulle (figure V.29.b). Le GPV-FAP impose des courants de formes d'onde sinusoïdaux (figure V.28.c). Comme on peut l'observer, les courants de la source sont équilibrés. En outre, les courants obtenus sont synchronisés aux tensions correspondantes comme illustré dans la figure V.29.c.

Avant le branchement le GPV-FAP à quatre fils la forme du courant de neutre a une valeur maximale de 75 A (figure V.30.a). Après avoir raccordé le GPV-FAP, le courant du neutre de source est réduit à quasiment zéro (figure V.30.b).

Les figures V.31-33 montrent les analyses spectrales de courantes de la source (i_{sa} , i_{sb} , i_{sc}). Les THD sont donnés dans le tableau V.6. On peut observer que ces valeurs de THD avant le branchement du GPV-FAP sont très élevées et inacceptables. Après avoir utilisé le GPV-FAP, les THD sont réduits dans la limite spécifiée par la norme IEEE 519-1922. Les résultats confirment la bonne qualité de filtrage du FAP proposé, la compensation parfaite de la puissance réactive pour la correction du facteur de puissance, ainsi que la réduction du courant de neutre pour l'équilibrage de charge.

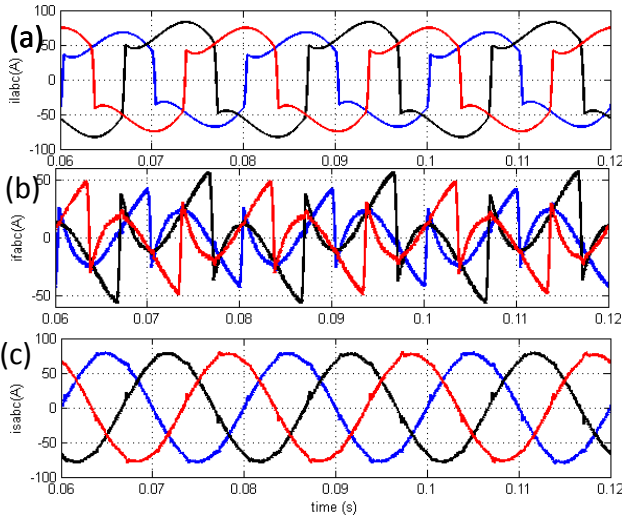


Figure V. 28 - (a) Courants de la source avant le filtrage, (b) courants injectés, (c) courants de la source après le filtrage.

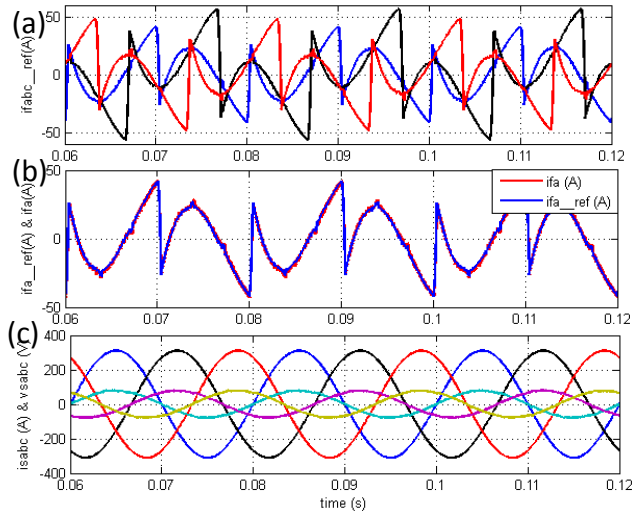


Figure V. 29 - (a) Courants de référence, (b) courant de filtre et de référence (c) correction du facteur de puissance avec GPV-FAP.

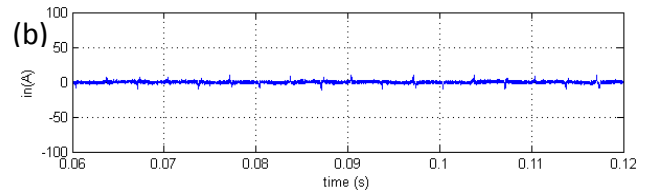
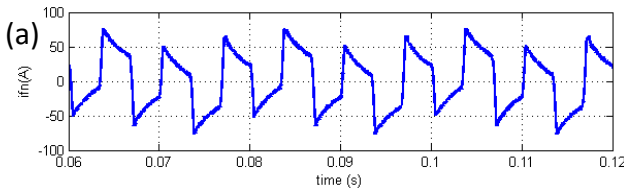


Figure V. 30 - (a) Courant du neutre avant le filtrage, (b) courant du neutre après le filtrage.

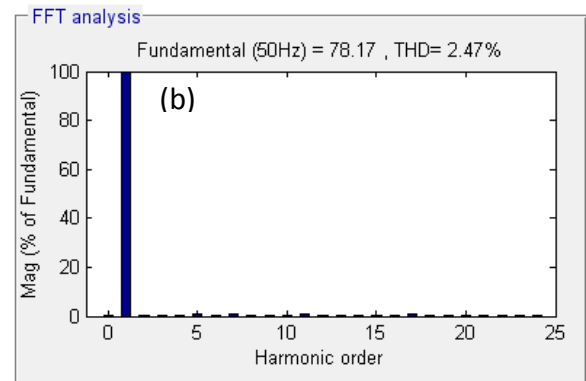
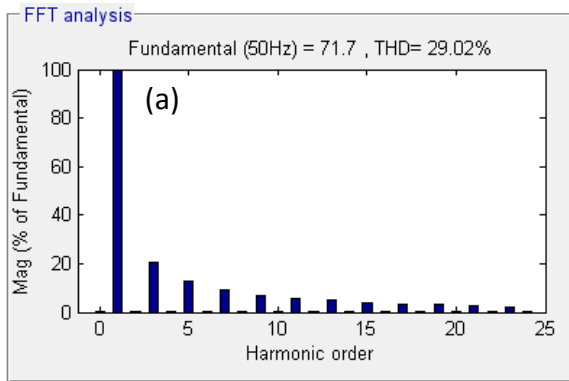


Figure V. 31 - Analyse spectrale avant et après le filtrage (phase a): (a) avec GPV-FAP, (b) sans GPV-FAP.

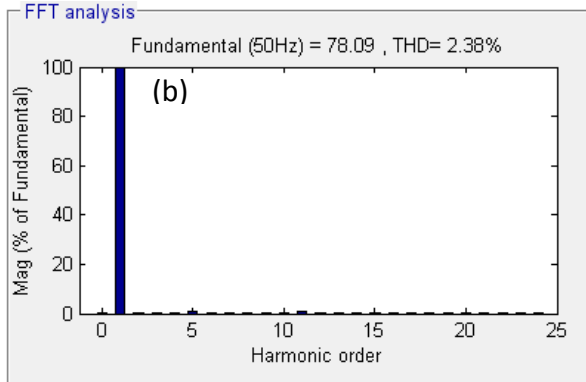
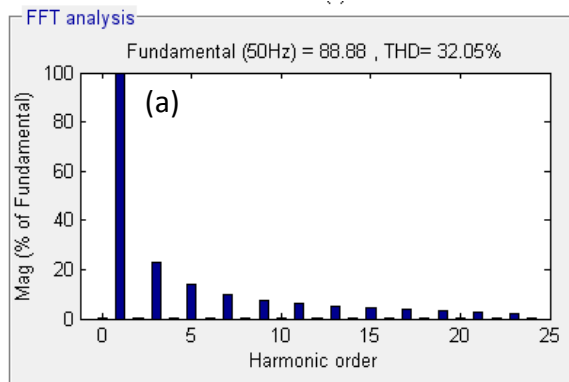


Figure V. 32 - Analyse spectrale avant et après le filtrage (phase b): (a) avec GPV-FAP, (b) sans GPV-FAP.

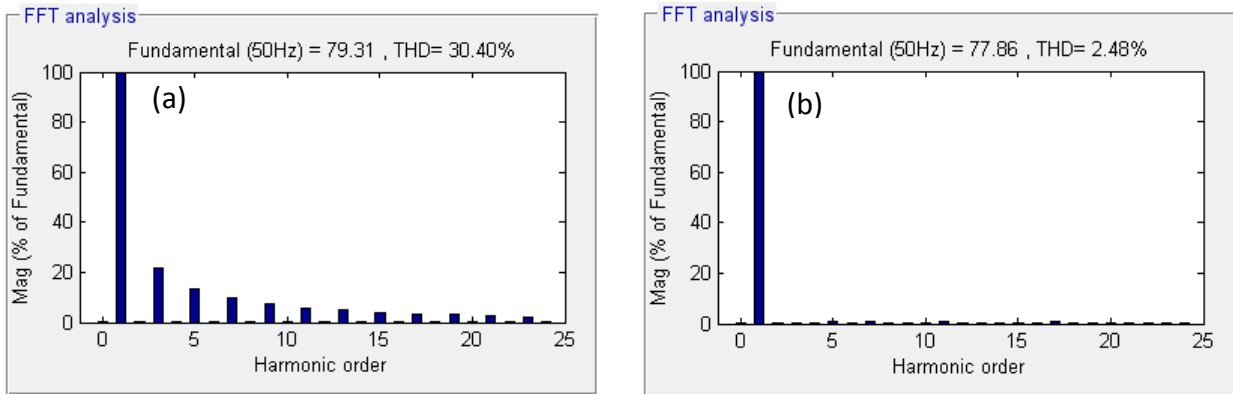


Figure V. 33 - Analyse spectrale avant et après le filtrage (phase a): (a) avec GPV-FAP, (b) sans GPV-FAP.

Tableau V. 6 – Valeurs de THD (%) avant et après le filtrage (phase abc).

Phases	THD% before filtering	THD after filtering
Phase a	29.02%	2.47%
Phase b	32.05%	2.38%
Phase c	30.40%	2.48%

V.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé un système basé sur l'association d'un générateur photovoltaïque (GPV) à un filtre actif parallèle (FAP) pour améliorer la qualité de l'énergie électrique. Les objectifs de système proposé (GPV-FAP) sont :

- 1- l'injection de l'énergie générée par le système photovoltaïque dans le réseau électrique,
- 2- l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique par la compensation des courants harmoniques, la correction du facteur de puissance ainsi que la réduction du courant de neutre pour l'équilibrage de la charge.

La théorie p-q-0 est utilisée pour identifier le courant de référence pour un FAP à quatre fils en présence d'une charge non linéaire et déséquilibrée.

Afin d'augmenter l'efficacité du système photovoltaïque et d'extraire la puissance photovoltaïque maximale dans des conditions atmosphériques variables, une technique de poursuite du point à puissance maximale (MPPT) de type Perturb & Observe (P & O) est implémentée dans le convertisseur DC/DC (élevateur).

La simulation du système proposé a été effectuée sous Matlab/Simulink. Les résultats obtenus montrent que les courants de la source ont une forme d'onde sinusoïdale avec des faibles THD dans la limite spécifiée par la norme l'IEEE 519-1922. En outre, ces courants sont équilibrés et synchronisés aux tensions correspondantes. Les résultats

confirment la bonne qualité de filtrage des courants harmoniques, la compensation parfaite de la puissance réactive pour la correction du facteur de puissance et la réduction du courant de neutre pour l'équilibrage de charge. Ces résultats confirment l'efficacité du GPV-FAP proposé pour l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le travail présenté dans cette thèse s'est porté sur la contribution à l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique par l'utilisation d'un filtre actif. Dans un premier temps, après un aperçu sur les différentes perturbations affectant la qualité de l'énergie électrique telles que les harmoniques et leurs effets sur le réseau électrique, nous avons présenté les solutions traditionnelles pour les réduire avec les nombreuses inconvénients qu'elles occasionnent. Le filtrage actif est une solution moderne aux problèmes de perturbations du réseau électrique. Le filtre actif parallèle (FAP) peut être installé pour compenser les perturbations de courant comme les harmoniques, le déséquilibre et la puissance réactive. Le filtre actif série peut être installé pour compenser toutes les perturbations de tension comme les harmoniques et les creux de tension. La combinaison parallèle-série est la solution universelle pour compenser les perturbations en courant et en tension.

Dans un deuxième temps, nous nous sommes concentrés sur le filtre actif parallèle dans la résolution du problème de pollution harmonique. Pour identifier les courants perturbateurs, la méthode de Puissance Réactive Instantanée (p-q) et la méthode de la Référence Synchronique (d-q) sont discutées. Nous avons choisi la première méthode qui donne de bons résultats en statique et en dynamique. Le système à base de PLL est intégré dans la méthode p-q afin de généraliser l'application de cette dernière dans le cas où la tension du réseau est déséquilibrée. Deux types de régulateurs ont été utilisés pour le réglage de la tension du bus continu du FAP triphasé, à savoir le régulateur PI classique et le régulateur flou. Le régulateur flou proposé possède une meilleure réponse dynamique et une plus grande robustesse par rapport au régulateur PI classique.

Nous avons ensuite élargi notre étude dans ce domaine en nous consacrant au développement d'un système basé sur l'association d'un générateur photovoltaïque (GPV) à un filtre actif parallèle (FAP).

Les objectifs du système proposé (GPV-FAP) sont :

1- l'injection de l'énergie générée par le système photovoltaïque dans le réseau électrique,

2- l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique par la compensation des courants harmoniques, la correction du facteur de puissance ainsi que la réduction du courant de neutre pour l'équilibrage de la charge.

La simulation numérique du système proposé a été effectuée à l'aide du logiciel MATLAB/Simulink.

Les analyses temporelles et spectrales avant et après filtrage ont montré l'efficacité et les bonnes performances du filtre actif parallèle alimenté par le générateur photovoltaïque. Les résultats de simulation montrent que le filtre actif parallèle compense efficacement les courants déséquilibrés et la puissance réactive. Ils montrent également que les courants de la source obtenus ont une forme d'onde sinusoïdale avec des THD faibles (inférieures à 5%) dans la limite spécifiée dans l'IEEE 519-1922. En outre, ces courants sont équilibrés et synchronisés avec leurs tensions correspondantes, ce qui conduit à une amélioration de la qualité de l'énergie. Les résultats confirment la bonne qualité de filtrage des courants harmoniques, la compensation parfaite de la puissance réactive pour la correction du facteur de puissance et la réduction du courant neutre pour l'équilibre des charges. Ces résultats confirment l'efficacité du GPV-FAP proposé pour l'amélioration de la qualité de l'énergie.

Comme perspectives, nous espérons que notre contribution pourra être élargie à une implémentation en temps réel en association à un système photovoltaïque, ainsi qu'à la généralisation des techniques de commande développées dans ce travail sur d'autres types de filtre actif, notamment : les filtres actifs parallèles multi-niveaux et les combinaisons parallèles-séries (UPQC).

Publications & Communications

Publications

- 1- **Rachid Belaidi**, Ali Haddouche, "Three-phase four-Wire Active Power Filter fed by PV System using Fuzzy MPPT Controller", in *Electrotehnica, Electronica, Automatica (EEA)*, 2017, vol. 65, no. 3, pp. 17-25, ISSN 1582-5175.
- 2- **Rachid Belaidi**, Ali Haddouche, "A multi-function grid-connected PV system based on fuzzy logic controller for power quality improvement", in *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY Vol 2017, No 10*, pp. 118-122, ISSN 0033-2097.
- 3- **Rachid Belaidi**, A. Haddouche, D. Ghribi, and M. M. Larafi, "A Three-Phase Grid-Connected PV System Based on SAPF for Power Quality Improvement," *TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, vol. 15, 2017.
- 4- **Rachid Belaidi**, A. Haddouche, and H. Guendouz, "Fuzzy logic controller based three-phase shunt active power filter for compensating harmonics and reactive power under unbalanced mains voltages," *Energy Procedia*, vol. 18, pp. 560-570, 2012.
- 5- **Rachid Belaidi**, A. Haddouche, M. Fathi, M. M. Larafi, and A. Chikouche, "Improvement of the electrical energy quality using a Shunt Active Filter supplied by a photovoltaic generator," *Energy Procedia*, vol. 6, pp. 522-530, 2011.

Communications

- 1- **Rachid Belaidi**, A. Haddouche, M. Fathi, M. M. Larafi, and G. M. Kaci, "Performance of grid-connected PV system based on SAPF for power quality improvement," in *Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), 2016 International*, 2016, pp. 542-545.
- 2- **Rachid Belaidi**, M. Fathi, M. M. Larafi, G. M. Kaci, and A. Haddouche, "Power quality improvement based on shunt active power filter connected to a photovoltaic array," in *2015 3rd International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*, 2015, pp. 1-6.
- 3- **Rachid Belaidi**, A.Haddouche, M.Hatti, M. Mghezzi Larafi "SHUNT ACTIVE POWER FILTER CONNECTED TO A PHOTOVOLTAIC ARRAY FOR COMPENSATING HARMONICS AND REACTIVE POWER SIMULTANEOUSLY". IV IEEE International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives Istanbul, Turquie du 13 au 17 Mai 2013.
- 4- **Rachid Belaidi**, A.Haddouche, M.Fathi, M. Mghezzi Larafi. "Three phase PV inverter-based active power filter "13th International Conference on Clean Energy 2014 08-12 juin 2014, Istanbul, Turkey.
- 5- **Rachid Belaidi**, A. Haddouche, A. Chikouche, M.Fathi, and Z. Smara "Three-Phase Shunt Active Power Filter Connected To A Photovoltaic Array" 6th International Gren Energy Conference (IGEC-06) Eskisehir, Turkey, from June5 to 9, 2011.
- 6- **Rachid Belaidi**, A.Haddouche, M.Mghezzi Larafi, M.Hatti "Protection Des Onduleurs Dans Un Systeme Photovoltaique" séminaire national sur la sécurité industrielle SNSIND12, déroulé le 10-11 Décembre 2012 à l'université Badji Mokhtar Annaba.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] M. A. E. Alali, "Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension:(Automatisation des systèmes de puissance électriques)," Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur (Strasbourg), 2002.
- [2] S. Haddad, "gestion de la qualite d'énergie électrique dans un reseau de transmission," Thèse de doctorat en sciences, Université Badj Mokhtar Annaba, 2010.
- [3] R. Belaidi, "Amélioration de la qualité d'énergie électrique par l'utilisation de filtre actif parallèle," Mémoire de Magister, Université Badji Mokhtar de Annaba, 2008.
- [4] T. MAHNI, "Etude et Conception d'un Filtre Actif Parallèle Triphasé à Quatre Fils en vue de sa Commande par des Méthodes d'Intelligence Artificielle," Université Mohamed Khider-Biskra, 2017.
- [5] K. Abdelhamid, "Correction du facteur de puissance à l'entrée d'un convertisseur AC_DC," Université Ferhat Abbas de Sétif 1, 2012.
- [6] Z. Laid, "Filtrage actif parallele des harmoniques du courant genere par un pont redresseur triphase non commande," Université Badji Mokhtar de Annaba, 2006.
- [7] M. Benhabib and S. Saadate, "New control approach for four-wire active power filter based on the use of synchronous reference frame," *Electric Power Systems Research*, vol. 73, pp. 353-362, 2005.
- [8] A. Chaoui, "Filtrage actif triphasé pour charges non linéaires," Poitiers, 2010.
- [9] B. Boukezata, A. Chaoui, J.-P. Gaubert, and M. Hachemi, "Système solaire photovoltaïque connecté au réseau électrique et associé à un filtre actif parallèle," in *Symposium de Génie Électrique 2014*, 2014.
- [10] A. Chaoui, "Filtrage actif triphasé pour charges non linéaires," Thèse dedoctorat en sciences, Université Ferhat Abbas Sétif (UFAS), Algérie, 2010.
- [11] M. Sarra, "contribution a l'étude des filtres actifs hybrides," Thèse de doctorat en sciences, Université Ferhat Abbas de Sétif 2012.
- [12] H. Sasaki and T. Machida, "A new method to eliminate AC harmonic currents by magnetic flux compensation-considerations on basic design," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, pp. 2009-2019, 1971.
- [13] L. Gyugyi, "Active ac power filters," in *IEEE/IAS Annual Meeting, 1976*, 1976.
- [14] S. Madishetti, B. Singh, and G. Bhuvaneswari, "Three-Level NPC-Inverter-Based SVM-VCIMD With Feedforward Active PFC Rectifier for Enhanced AC Mains Power Quality," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 52, pp. 1865-1873, 2016.
- [15] D. Barater, C. Concari, G. Buticchi, E. Gurpinar, D. De, and A. Castellazzi, "Performance Evaluation of a Three-Level ANPC Photovoltaic Grid-Connected Inverter With 650-V SiC Devices and Optimized PWM," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 52, pp. 2475-2485, 2016.
- [16] V. SHRAVANI, C. V. S. RAO, and D. SUMANTH, "POWER QUALITY IMPROVEMENT WITH IMPROVED ACTIVE POWER FILTER," *POWER*, vol. 5, 2016.
- [17] B. Sangeetha and K. Geetha, "Performance of multilevel shunt active filter for smart grid applications," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 63, pp. 927-932, 2014.
- [18] H. Akagi, Y. Kanazawa, and A. Nabae, "Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuits," in *IPEC*, 1983, pp. 1375-1386.

- [19] H. Akagi, Y. Kanazawa, and A. Nabae, "Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components," *Industry Applications, IEEE Transactions on*, pp. 625-630, 1984.
- [20] S. Luo and Z. Hou, "An adaptive detecting method for harmonic and reactive currents," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 42, pp. 85-89, 1995.
- [21] F. Z. Peng and J.-S. Lai, "Generalized instantaneous reactive power theory for three-phase power systems," *IEEE transactions on instrumentation and measurement*, vol. 45, pp. 293-297, 1996.
- [22] H. Fujita and H. Akagi, "The unified power quality conditioner: the integration of series and shunt-active filters," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 13, pp. 315-322, 1998.
- [23] V. Soares, P. Verdelho, and G. D. Marques, "An instantaneous active and reactive current component method for active filters," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 15, pp. 660-669, 2000.
- [24] J. Pinto, R. G. Pregitzer, L. F. Monteiro, and J. L. Afonso, "3-phase 4-wire shunt active power filter with renewable energy interface," 2007.
- [25] E. Pashajavid and M. T. Bina, "Zero-sequence component and Harmonic Compensation in Four-wire Systems under Non-ideal Waveforms," *Przełąd Elektrotechniczny*, vol. 85, pp. 58-64, 2009.
- [26] S. Saad and L. Zellouma, "Fuzzy logic controller for three-level shunt active filter compensating harmonics and reactive power," *Electric Power Systems Research*, vol. 79, pp. 1337-1341, 2009.
- [27] H. Patel and V. Agarwal, "Investigations into the performance of photovoltaics-based active filter configurations and their control schemes under uniform and non-uniform radiation conditions," *Renewable Power Generation, IET*, vol. 4, pp. 12-22, 2010.
- [28] S. Mikkili and A. Panda, "Real-time implementation of PI and fuzzy logic controllers based shunt active filter control strategies for power quality improvement," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 43, pp. 1114-1126, 2012.
- [29] D. Suresh and S. P. Singh, "Type-2 Fuzzy Logic Controlled Three-level Shunt Active Power Filter for Power Quality Improvement," *Electric Power Components and Systems*, pp. 1-10, 2016.
- [30] R. Belaidi, A. Haddouche, D. Ghribi, and M. M. Larafi, "A Three-Phase Grid-Connected PV System Based on SAPF for Power Quality Improvement," *TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, vol. 15, 2017.
- [31] Patjoshi, "Power quality enhancement using fuzzy sliding mode based pulse width modulation control strategy for unified power quality conditioner," *Electrical Power and Energy Systems* vol. 84, pp. 153-167, 2017.
- [32] R. Belaidi, A. Haddouche, M. Fathi, M. M. Larafi, and G. M. Kaci, "Performance of grid-connected PV system based on SAPF for power quality improvement," in *Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), 2016 International*, 2016, pp. 542-545.
- [33] A. Chebabhi, M. Fellah, and M. Benkhoris, "Control of the Three Phase Four-wire Four-leg SAPF using 3D-SVM based on the Two Methods of Reference Signals Generating CV and SRF in the dqo-axes," *Journal of Electrical Engineering*, vol. 1, pp. 32-39, 2015.
- [34] A. Chebabhi, M. Fellah, A. Kessal, and M. Benkhoris, "Comparative study of reference currents and DC bus voltage control for Three-Phase Four-Wire Four-Leg SAPF to

- compensate harmonics and reactive power with 3D SVM," *ISA transactions*, vol. 57, pp. 360-372, 2015.
- [35] M. S. Babu and S. Rajasekhar, "ANFIS Based UPQC for Power Quality Improvement," 2015.
- [36] M. Kesler and E. Ozdemir, "Synchronous-reference-frame-based control method for UPQC under unbalanced and distorted load conditions," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, pp. 3967-3975, 2011.
- [37] A. S. Kumar, S. Rajasekar, and P. A.-D.-V. Raj, "Power Quality Profile Enhancement of Utility Connected Microgrid System Using ANFIS-UPQC," *Procedia Technology*, vol. 21, pp. 112-119, 2015.
- [38] N. Patnaik and 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*, vol. 74, pp. 212-221, 2016.
- [39] R. Saravanan and P. Manoharan, "MULTILEVEL INVERTER BASED UPQC FOR POWER QUALITY IMPROVEMENT," *Int J Adv Engg Tech/Vol. VII/Issue I/Jan.-March*, vol. 611, p. 617, 2016.
- [40] S. Sindhu, M. Sindhu, and T. Nambiar, "An Exponential Composition Algorithm Based UPQC for Power Quality Enhancement," *Procedia Technology*, vol. 21, pp. 415-422, 2015.
- [41] K. Srikanth, T. K. Mohan, and P. Vishnuvardhan, "Improvement of power quality for microgrid using fuzzy based UPQC controller," in *Electrical, Electronics, Signals, Communication and Optimization (EESCO), 2015 International Conference on*, 2015, pp. 1-6.
- [42] V. Madhaiyan and V. Subramaniam, "Experimental verification of photovoltaic-based three-phase four-wire series hybrid active power filter," *Electric Power Components and Systems*, vol. 42, pp. 1356-1370, 2014.
- [43] B. Mariappan, B. Fernandes, and M. Ramamoorthy, "A novel single-stage solar inverter using hybrid active filter with power quality improvement," in *Industrial Electronics Society, IECON 2014-40th Annual Conference of the IEEE*, 2014, pp. 5443-5449.
- [44] M. Sahithullah and A. Senthil Kumar, "A hybrid control strategy to control active filter and improve the PQ of non-linear load," *Australian Journal of Electrical and Electronics Engineering*, pp. 1-13, 2016.
- [45] M. Vijayakumar and S. Vijayan, "Design and implementation of PV-based three-phase four-wire series hybrid active power filter for power quality improvement," *Sadhana*, vol. 39, pp. 859-877, 2014.
- [46] J.-C. Wu, H.-L. Jou, K.-D. Wu, and H.-H. Hsiao, "Three-phase four-wire hybrid power filter using a smaller power converter," *Electric Power Systems Research*, vol. 87, pp. 13-21, 2012.
- [47] H. Djeghèoud, "Filtrage actif de puissance," Thèse de doctorat en sciences, Université Mentouri Constantine, Algérie, 12 Décembre 2007.
- [48] R. Belaidi, A. Haddouche, M. Fathi, M. M. Larafi, and A. Chikouche, "Improvement of the electrical energy quality using a Shunt Active Filter supplied by a photovoltaic generator," *Energy Procedia*, vol. 6, pp. 522-530, 2011.
- [49] H. Akagi and R. Kondo, "A transformerless hybrid active filter using a three-level pulsewidth modulation (PWM) converter for a medium-voltage motor drive," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 25, pp. 1365-1374, 2010.
- [50] R. Belaidi, M. Fathi, M. M. Larafi, G. M. Kaci, and A. Haddouche, "Power quality improvement based on shunt active power filter connected to a photovoltaic array," in *2015 3rd International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*, 2015, pp. 1-6.

- [51] K. Bhattacharjee, "Harmonic mitigation by SRF theory based active power filter using adaptive hysteresis control," in *Power and Energy Systems Conference: Towards Sustainable Energy, 2014*, 2014, pp. 1-6.
- [52] N. BELHAOUCHET, "Fonctionnement à Fréquence de Commutation Constante des Convertisseurs de Puissance en Utilisant des Techniques de Commande Avancées Application: Amélioration de la Qualité de l'Energie," 2014.
- [53] J. Faucher, "Les plans d'expériences pour le réglage de commandes à base de logique floue" Thèse de docteur, Institut National Polytechnique de Toulouse (INPT), Toulouse, 2006.
- [54] M. M. Abdusalam, "Structures et stratégies de commande des filtres actifs parallèle et hybride avec validations expérimentales ", Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, 2008.
- [55] H. Jajarmi, A. Mohamed, and H. Shareef, "Adaptive interval type2 fuzzy hysteresis-band current-controlled active power filter for power quality improvement," *Przeegląd Elektrotechniczny*, vol. 90, 2014.
- [56] R. Belaidi, A. Haddouche, and H. Guendouz, "Fuzzy logic controller based three-phase shunt active power filter for compensating harmonics and reactive power under unbalanced mains voltages," *Energy Procedia*, vol. 18, pp. 560-570, 2012.
- [57] J. Sarker and S. Goswami, "Optimal Location of Unified Power Quality Conditioner in Distribution System for Power Quality Improvement," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 83, pp. 309-324, 2016.
- [58] F. G. Montoya, A. García-Cruz, M. G. Montoya, and F. Manzano-Agugliaro, "Power quality techniques research worldwide: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 54, pp. 846-856, 2016.
- [59] M. Aredes, J. Hafner, and K. Heumann, "Three-phase four-wire shunt active filter control strategies," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 12, pp. 311-318, 1997.
- [60] A. Chebabhi, M. K. Fellah, A. Kessal, and M. F. Benkhoris, "A new balancing three level three dimensional space vector modulation strategy for three level neutral point clamped four leg inverter based shunt active power filter controlling by nonlinear back stepping controllers," *ISA transactions*, 2016.
- [61] A. A. Chihab, H. Ouadi, F. Giri, and T. Ahmed-Ali, "Adaptive non-linear control of three-phase four-wire Shunt active power filters for unbalanced and non-linear loads," in *19th IFAC World Congress, Cape Town, South Africa*, 2014.
- [62] H. Kim and H. Akagi, "The instantaneous power theory on the rotating pqr reference frames," in *Power Electronics and Drive Systems, 1999. PEDS'99. Proceedings of the IEEE 1999 International Conference on*, 1999, pp. 422-427.
- [63] G. Tsengenes and G. Adamidis, "Investigation of the behavior of a three phase grid-connected photovoltaic system to control active and reactive power," *Electric Power Systems Research*, vol. 81, pp. 177-184, 2011.
- [64] M. B. Delghavi and A. Yazdani, "Islanded-mode control of electronically coupled distributed-resource units under unbalanced and nonlinear load conditions," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 26, pp. 661-673, 2011.
- [65] S. Hosseini, S. Danyali, A. Y. Goharrizi, and M. Sarhangzadeh, "Three-phase four-wire grid-connected PV power supply with accurate MPPT for unbalanced nonlinear load compensation," in *2009 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2009, pp. 1099-1104.
- [66] M. Ucar and E. Ozdemir, "Control of a 3-phase 4-leg active power filter under non-ideal mains voltage condition," *Electric Power Systems Research*, vol. 78, pp. 58-73, 2008.

- [67] M. I. M. Montero, E. R. Cadaval, and F. B. González, "Comparison of control strategies for shunt active power filters in three-phase four-wire systems," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 22, pp. 229-236, 2007.
- [68] A. Ghamri, T. Mahni, M. Benchouia, K. Srairi, and A. Golea, "Comparative Study between Different Controllers used in Three-phase Four-wire Shunt Active Filter," *Energy Procedia*, vol. 74, pp. 807-816, 2015.
- [69] S. K. Jain, P. Agarwal, and H. Gupta, "A Dedicated Microcontroller based Fuzzy Controlled Shunt Active Power Filter," *Intelligent Automation & Soft Computing*, vol. 11, pp. 33-46, 2005.
- [70] A. Chebabhi, M.-K. Fellah, A. Kessal, and M.-F. Benkhoris, "Fuzzy logic controllers for three levels shunt active power filter compensated by three-levels stabilizing Space Vector Modulation to Fixed Switching Frequency and switching losses under balanced and unbalanced load," *The Mediterranean Journal of Measurement and Control*, vol. 11, pp. 357-366, 2015.
- [71] Z. Zeng, H. Yang, R. Zhao, and C. Cheng, "Topologies and control strategies of multi-functional grid-connected inverters for power quality enhancement: A comprehensive review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 24, pp. 223-270, 2013.
- [72] A. R. Reisi, M. H. Moradi, and H. Showkati, "Combined photovoltaic and unified power quality controller to improve power quality," *Solar Energy*, vol. 88, pp. 154-162, 2013.
- [73] T. Salmi, M. Bouzguenda, A. Gastli, and A. Masmoudi, "Matlab/simulink based modeling of photovoltaic cell," *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, vol. 2, pp. 213-218, 2012.
- [74] A. Mahdi, W. Tang, and Q. Wu, "Improvement of a MPPT algorithm for PV systems and its experimental validation," in *Proceedings of International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ). Granada, Spain, 2010*, pp. 1-6.
- [75] B. Bendib, H. Belmili, and F. Krim, "A survey of the most used MPPT methods: Conventional and advanced algorithms applied for photovoltaic systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 45, pp. 637-648, 2015.
- [76] F. Chekired, A. Mellit, S. Kalogirou, and C. Larbes, "Intelligent maximum power point trackers for photovoltaic applications using FPGA chip: a comparative study," *Solar Energy*, vol. 101, pp. 83-99, 2014.
- [77] S. Kasa, P. Ramanathan, S. Ramasamy, and D. Kothari, "Effective grid interfaced renewable sources with power quality improvement using dynamic active power filter," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 82, pp. 150-160, 2016.
- [78] S. Lalouni and D. Rekioua, "Modeling and simulation of a photovoltaic system using fuzzy logic controller," in *Developments in eSystems Engineering (DESE), 2009 Second International Conference on*, 2009, pp. 23-28.
- [79] N. Mebarki, T. Rekioua, Z. Mokrani, and D. Rekioua, "Supervisor control for stand-alone photovoltaic/hydrogen/battery bank system to supply energy to an electric vehicle," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 40, pp. 13777-13788, 2015.
- [80] H. Boumaaraf, A. Talha, and O. Bouhali, "A three-phase NPC grid-connected inverter for photovoltaic applications using neural network MPPT," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 49, pp. 1171-1179, 2015.
- [81] T. ESRAM and P. L. Chapman, "Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques," *IEEE Transactions on Energy Conversion EC*, vol. 22, p. 439, 2007.
- [82] S. S. Mohammed, D. Devaraj, and T. I. Ahamed, "A novel hybrid Maximum Power Point Tracking Technique using Perturb & Observe algorithm and Learning Automata for solar PV system," *Energy*, vol. 112, pp. 1096-1106, 2016.

- [83] A. A. Elbaset, H. Ali, M. Abd-El Sattar, and M. Khaled, "Implementation of a modified perturb and observe maximum power point tracking algorithm for photovoltaic system using an embedded microcontroller," *IET Renewable Power Generation*, vol. 10, pp. 551-560, 2016.
- [84] H. Rezk and A. M. Eltamaly, "A comprehensive comparison of different MPPT techniques for photovoltaic systems," *Solar Energy*, vol. 112, pp. 1-11, 2015.
- [85] K. Ishaque, Z. Salam, and G. Lauss, "The performance of perturb and observe and incremental conductance maximum power point tracking method under dynamic weather conditions," *Applied Energy*, vol. 119, pp. 228-236, 2014.
- [86] A. Safari and S. Mekhilef, "Simulation and hardware implementation of incremental conductance MPPT with direct control method using cuk converter," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, pp. 1154-1161, 2011.
- [87] T. Shimizu, O. Hashimoto, and G. Kimura, "A novel high-performance utility-interactive photovoltaic inverter system," *IEEE transactions on power electronics*, vol. 18, pp. 704-711, 2003.
- [88] B. Bendib, F. Krim, H. Belmili, M. Almi, and S. Boulouma, "Advanced Fuzzy MPPT Controller for a stand-alone PV system," *Energy Procedia*, vol. 50, pp. 383-392, 2014.
- [89] F. Chekired, "Etude et implémentation d'une commande MPPT neuro-floue sur FPGA," Ecole nationale supérieure polytechnique, 2008.
- [90] Z. Salam, J. Ahmed, and B. S. Merugu, "The application of soft computing methods for MPPT of PV system: A technological and status review," *Applied Energy*, vol. 107, pp. 135-148, 2013.
- [91] A. Mellit and S. A. Kalogirou, "MPPT-based artificial intelligence techniques for photovoltaic systems and its implementation into field programmable gate array chips: Review of current status and future perspectives," *Energy*, vol. 70, pp. 1-21, 2014.
- [92] L. M. Elobaid, A. K. Abdelsalam, and E. E. Zakzouk, "Artificial neural network-based photovoltaic maximum power point tracking techniques: a survey," *Renewable Power Generation, IET*, vol. 9, pp. 1043-1063, 2015.
- [93] C. Larbes, S. A. Cheikh, T. Obeidi, and A. Zerguerras, "Genetic algorithms optimized fuzzy logic control for the maximum power point tracking in photovoltaic system," *Renewable Energy*, vol. 34, pp. 2093-2100, 2009.
- [94] A. Messai, A. Mellit, A. Guessoum, and S. Kalogirou, "Maximum power point tracking using a GA optimized fuzzy logic controller and its FPGA implementation," *Solar Energy*, vol. 85, pp. 265-277, 2011.
- [95] Y. Shaiek, M. B. Smida, A. Sakly, and M. F. Mimouni, "Comparison between conventional methods and GA approach for maximum power point tracking of shaded solar PV generators," *Solar Energy*, vol. 90, pp. 107-122, 2013.
- [96] Y. Bouzelata, E. Kurt, N. Altın, and R. Chenni, "Design and simulation of a solar supplied multifunctional active power filter and a comparative study on the current-detection algorithms," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 43, pp. 1114-1126, 2015.
- [97] A. R. Reisi, M. H. Moradi, and S. Jamasb, "Classification and comparison of maximum power point tracking techniques for photovoltaic system: a review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 19, pp. 433-443, 2013.
- [98] H. Akagi, E. H. Watanabe, and M. Aredes, *Instantaneous power theory and applications to power conditioning* vol. 31: John Wiley & Sons, 2007.

