



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique

Université Amar Telidji- Laghouat

FACULTE : Technologie

DEPARTEMENT : Electrotechnique

MEMOIRE DE MASTER

Présenté par : CHAHDANE Nidhal

DOMAINE : Sciences et Technologies

FILIERE : Electrotechnique

OPTION : Réseaux Electriques

Thème

**Filtrage des Perturbations Harmoniques Produites
par une Charge Non Linéaire Connectée
à un Réseau HT**

Jury de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	Qualité
ARIF Salem	Prof	Président
HADJADJ Abde Chafik	Prof	Examineur
OUI Atallah	M.C.A	Rapporteur

Promotion : 2021-2022



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique



Université Amar Thelidji- Laghouat

Faculté de Technologie
Département : Electrotechnique

AUTORISATION DE SOUTENANCE D'UN MEMOIRE DE MASTER

Nous, soussignés, OUAI Atallah, Rapporteur de l'étudiant : CHAHDANE Nidhal ayant traité un sujet de PFE-Master qui a pour titre : **Filtrage des Perturbations Harmoniques Produites par une Charge Non Linéaire Connectée à un réseau HT.**

Attestons que le concerné a mené à son terme le travail qui lui a été exigé. Le mémoire qu'il a rédigé a été lu et corrigé par nos soins.

Par conséquent, nous autorisons l'étudiant : CHAHDANE Nidhal à déposer son mémoire en vue de soutenir son PFE-Master devant un jury que désignera le département en concertation avec le responsable de master.

ملخص:

في السنوات الأخيرة، أدى تطوير الأنظمة القائمة على إلكترونيات الطاقة إلى زيادة ما يسمى بالأحمال غير الخطية التي ساهمت بشكل كبير في تقليل جودة الطاقة في الشبكات الكهربائية. لهذا الغرض، الهدف من هذا العمل هو ترشيح توافقيات تيارات حمل غير خطي متصل بشبكة كهربائية عن طريق ربط وظائف مرشح فعال متوازي. يتكون النظام المدروس من مجال من الألواح الشمسية، وموج جهد ثلاثي الأطوار متصل بالشبكة وحمل غير خطي يتكون من جسر مقوم ثنائي الصمام يغذي حمولة حثية (RL). تم استخدام مرشح التمرير المنخفض (LPF) في هذه الدراسة لتحديد توافقيات تيارات الحمل الغير خطي. بالإضافة إلى ذلك، تم اقتراح تحكم عن طريق التيار لتعويض التيارات التوافقية عند نقطة الاتصال وحقن الاستطاعة العظمى في الشبكة. النتائج المتحصلة عليها عن طريق المحاكاة أظهرت كفاءة وحسن أداء المرشح الفعال المتوازي من حيث تصفية تيار الشبكة وتحسين نوعية الطاقة.

الكلمات المفتاحية: الشبكة الكهربائية، مولد كهروضوئي، حمل غير خطي، توافقيات التيار، مرشح فعال متوازي، مرشح التمرير المنخفض، نوعية الطاقة، تعقب الاستطاعة العظمى.

Résumé :

Ces dernières années, le développement des systèmes à base d'électronique de puissance a conduit à une augmentation de charges dites non linéaires qui ont fortement contribué à la réduction de la qualité d'énergie dans les réseaux électriques. A cet effet, l'objectif de ce travail est le filtrage des courants harmoniques produits par une charge non linéaire connectée à un réseau électrique en associant les fonctionnalités d'un Filtre Actif Parallèle (FAP). Le système étudié est constitué d'un champ de panneaux solaires, un onduleur de tension triphasé raccordé au réseau et une charge non linéaire constituée par un pont redresseur à diodes alimentant une charge inductive (RL). Le Filtre Passe Bas (FPB) est utilisé dans cette étude pour identifier les harmoniques de courant de la charge non linéaire. De plus, une commande en courant est proposée pour compenser les courants harmoniques au point de raccordement tout en injectant de la puissance active maximale vers le réseau. Les résultats obtenus par simulation montrent l'efficacité et la performance du FAP en termes de dépollution du courant de réseau et d'amélioration de la qualité d'énergie.

Mots clés : Réseau électrique, Générateur photovoltaïque, Charge non linéaire, Harmoniques de courant, FAP, FPB, Qualité d'énergie, MPPT.

Abstract:

In recent years, the development of systems based on power electronics has led to an increase in so-called non-linear loads which have greatly contributed to the reduction of power quality in electrical grid. For this purpose, the objective of this work is the filtering of the harmonic currents produced by a nonlinear load connected to an electrical grid by associating the functionalities of a Parallel Active Filter (PAF). The studied system is composed of a field of solar panels, a three-phase voltage inverter connected to the grid and a non-linear load consisting of a diode bridge rectifier supplying an inductive load (RL). The Low Pass Filter (LPF) is used in this study to identify the current harmonics of the nonlinear load. In addition, a current control is proposed to compensate the harmonic currents at the connection point while injecting maximum active power into the grid. The results obtained by simulation show the efficiency and performance of the PAF in terms of grid current depollution and power quality improvement.

Keywords: Electrical grid, Photovoltaic generator, Nonlinear load, Current harmonics, PAF, LPF, Power quality, MPPT.

Remerciements

J'exprime ma profonde gratitude et mes remerciements les plus sincères à mon rapporteur Mr. OUAI Atallah, Maître de Conférences de l'Université de Laghouat pour son soutien, ses encouragements et précieux conseils.

J'exprime aussi ma profonde reconnaissance à Mr. ARIF Salem, Professeur de l'Université de Laghouat qui m'a fait l'honneur de présider le jury.

Je tiens aussi à exprimer mes remerciements et ma plus vive gratitude à Mr. HADJADJ Abde Chafik, Professeur de l'Université de Laghouat qui a accepté de juger mon travail.

Je tiens également à remercier tous les enseignants et tout le personnel du Département d'Electrotechnique.

Que tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail soient remerciés.

Dédicace

Je dédie ce mémoire, aux personnes qui me sont les plus chères : A mes parents qui m'ont énormément soutenu dans les moments les plus difficiles, partagé mes joies et mes peines, qui se sont toujours sacrifiés à mes dépends.

A mes frères et à ma sœur

A toute ma famille.

A mes amis et collègues.

Sommaire

Résumé

Remerciements

Dédicace

I. Liste des abréviations

II. Liste de tableaux

III. Liste des figures

Introduction Générale..... 1

Chapitre I: Différentes Types des Perturbations Electriques

I. Introduction 4

I.2 Notions sur les harmoniques de courant et les harmoniques de tension 5

I.2.1. Origine des harmoniques..... 5

I.2.2. Conséquences des harmoniques 5

I.3. Qualité de l'énergie électrique 6

I.4. Les charges non-linéaires dans les systèmes triphasés à trois et à quatre fils 7

I.5. Solutions pour améliorer la qualité et la gestion de l'énergie électrique 8

I.5.1. Solutions à base d'électronique de puissance..... 8

I.5.1.1. Alimentations sans interruption ASI..... 8

I.5.2. Filtrage actif 9

I.5.2.1. Filtre actif parallèle FAP 10

I.5.2.2. Le Filtre Actif Série FAS 10

I.5.2.3. Filtrage à structure Hybride 10

I.5.3. Redresseur à MLI (RMLI)..... 11

I.5.4. Applications des filtres actifs parallèles..... 12

I.5.5. Classement des filtres actifs parallèles 12

I.6. Réglementations et normes 13

I.6.1. La norme CEI 14

I.6.2. La norme IEEE..... 15

I.7. Conclusion.....	16
----------------------	----

Chapitre II : Stratégies d'Identification des Perturbation des Courants

II.1 Introduction	18
II.2 Description du système	18
II.3 Structure générale du filtre actif parallèle.....	20
II.3.1 Topologie générale	20
II.3.2 Etude de la partie puissance	21
II.3.2.1 Onduleur de tension	21
II.3.2.1.1 Structure générale	21
II.3.2.1.2 Tension fournie par l'onduleur.....	22
II.3.2.1.3 Représentation vectorielle	23
II.3.2.2 Système de stockage d'énergie.....	24
II.3.2.3 Filtre de sortie	25
II.3.2.3.1 Filtre du premier ordre.....	25
II.3.2.3.2 Filtre du troisième ordre.....	25
II.4 Méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées.....	28
II.5 Méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées modifiée.....	31
II.5.1 Principe du FMV	31
II.5.2 Extraction des courants harmoniques.....	32
II.6 Conclusion	34

Chapitre III : Généralités sur les Systèmes Photovoltaïques

III.1. Introduction.....	36
III.2. Rayonnement solaire	36
Rayonnement global	36
Rayonnement réfléchi.....	37
III.2.1. Spectre du rayonnement	37
III.3. Générateur photovoltaïque	38

III.4. Effet photovoltaïque.....	38
III.5. Différentes technologies des cellules photovoltaïques.....	39
III.6. Modélisation des cellules photovoltaïques	40
III.6.1. Modèle de base	40
III.6.2. Modèle idéal	41
III.6.3. Modèle avec pertes ohmiques (R_s model)	41
III.6.4. Modèle à une diode	42
III.7. Caractéristiques électriques photovoltaïques	43
III.8. Protections classiques d'un générateur photovoltaïque	43
III.9. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque	54
III.9.1. Inconvénients.....	54
III.9.2. Avantages	54
III.10. Conclusion.....	55

Chapitre IV : Résultats de Simulation et Discussions

IV.1 Introduction	57
IV.2 Commande et amélioration de la qualité d'énergie	57
IV.3 Simulations et discussions.....	57
IV.3.1 Caractéristiques globales du champ PV étudié.....	57
IV.3.2 Caractéristique de la charge non linéaire étudiée.....	58
IV.3.3 Méthode d'identification des harmoniques du courant	60
IV.3.4 Résultats de simulation et interprétation	60
IV.3.4.2 Cas du système étudié en présence de la charge non linéaire sans filtrage actif...	62
IV.3.4.3 Résultat de simulation en présence de la charge non linéaire avec filtrage actif ..	63
IV.4 Conclusion	64
Conclusion Générale.....	65
Références bibliographique	66
Annexe.....	69

I. Liste des abréviations

THD : **T**otal **H**armonica **D**istorsion (Taux de distorsion harmonique)

QEE : **Q**ualité de l'**E**nergie **E**lectrique.

CEM : **C**ompatibilité **é**lectromagnétique.

ASI : **A**limentations **S**ans **I**nterruption

APF : **A**ctive **P**ower **F**iltres (Filtre actif parallèle)

PLL : **P**hase **L**ocked **L**oop ou Boucle à Verrouillage de Phase.

PWM : **P**ulse **W**idth **M**odulation.

MLI : **M**odulation de **L**argeur d'**I**mpulsion.

IGBT : **I**nsulated **G**ate **B**ipolar **T**ransistor (transistor bipolaire à grille isolée)

FFT : **F**ast **F**ourier **T**ransform (transformée de Fourier rapide)

I_{S1}, i_{S2}, i_{S3} : Courants de réseau.

$I_{ch1}, i_{ch2}, i_{ch3}$: courants de charge

V_{s1}, V_{s2}, V_{s3} : Tension de réseau.

R_s, L_s : Impédance d'une phase de réseau

R_f, L_f : Impédance de la sortie du compensateur.

R_c, L_c : Inductance de lissage.

$p, \bar{p}, \tilde{p}$: Puissance active, puissance active continue, puissance active alternative

$q, \bar{q}, \tilde{q}$: Puissance réactive, puissance réactive continue, puissance réactive alternative

$p_0, \bar{p}_0, \tilde{p}_0$: Puissance homopolaire, puissance homopolaire continue, puissance homopolaire alternative.

T : Temps

F : Fréquence du fondamental.

Indices inférieurs

$\dots a, \dots b, \dots c$: Phases du système triphasé.

$\dots \alpha, \dots \beta$: Composantes alpha et beta.

$\dots h$: Ordre d'harmonique du courant et tension, composantes harmoniques.

$\dots m$: Amplitude.

$\dots ref$: Référence.

II. Liste de tableaux

Tableau I.1 Récapitulatif des méthodes de rejet des courants et des tension harmoniques ..	6
Tableau I.2 Classification de la CEI	15
Tableau I.3 Limites des tensions harmoniques selon IEEE-519	16
Tableau II.1 Représentation vectorielle des tensions générées par l'onduleur.....	23
Tableau III.1 Caractéristiques électriques du module photovoltaïque 1sth-215-pde	43

III. Liste des figures

Chapitre I : Différentes Types des Perturbations Electriques

Figure I.1: Schéma d'une ASI avec ses trois modes	9
Figure I.2: Schéma de principe du filtre actif parallèle	10
Figure I.3: Schéma de principe du filtrage actif série.....	10
Figure I.4: Filtrage à structure hybride actif et passif	11
Figure I.5: Schéma monophasé permettant l'absorption sinusoïdale	12

Chapitre II : Stratégies d'Identification des Perturbation des Courants

Figure II.1: Filtre actif parallèle	18
Figure II.2: Redresseur ayant une charge R-L.....	19
Figure II.3: Structure générale du FAP	21
Figure II.4: Onduleur de tension triphasé.....	21
Figure II.5: Représentation vectorielle des tensions générées par l'onduleur.....	23
Figure II.6: Schéma équivalent par phase du filtre de sortie du troisième ordre en T	26
Figure II.7: Diagramme de Bode de gain du filtre de sortie.....	27
Figure II.8: Schéma représentant le principe de séparation des puissances.....	30
Figure II.9: Schéma de principe de la méthode d'identification des puissances.....	31
Figure II.10: Schéma bloc du FMV.....	32
Figure II.11: Schéma de principe de la méthode d'identification des puissances.....	33

Chapitre III : Généralités sur les Systèmes Photovoltaïques

Figure III.1: Répartition spectrale du rayonnement solaire	37
Figure III.2: Composantes principales d'une chaîne photovoltaïque	38
Figure III.3: Coupe transversale d'une cellule PV [16].....	39
Figure III.4: Types des Cellules photovoltaïque.....	40
Figure III.5: Schéma d'application de l'effet photovoltaïque	40
Figure III.6: Circuit équivalent simplifié d'une cellule solaire	41
Figure III.7: Circuit équivalent d'une cellule solaire, modèle avec R_s	42

Figure III.8: Circuit équivalent d'une cellule solaire, modèle à une diode	42
Figure III.9: Schématisation d'un GPV élémentaire avec diodes.	44

Chapitre IV : Résultats de Simulation et Discussions

Figure IV.1: Schéma de système étudié	57
Figure IV.2: Caractéristiques courant-tension et puissance-tension $E_s=1000 \text{ W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$	58
Figure IV.3. Caractéristique de la charge non linéaire étudiée	59
(a) : Courant charge non linéaire	58
(b) : Courant harmonique i_{labc-h}	59
(c) : Courant harmonique i_{la-h}	59
(d) : Spectre harmonique du courant i_{la}	59
Figure IV.4 : Méthode d'identification des courants harmonique i_{ldh} , i_{lqh} de la charge non-linéaire	60
Figure IV.5 : Schéma de commande du système étudié.....	60
Figure IV.6. Résultat de simulation étudiée en absence de la charge non linéaire	61
(a) : Les tensions du réseau.....	61
(b) : Les courants du réseau.....	62
(c) : Courant du réseau (une seule phase).....	62
(d): Spectre du courant de réseau.....	62
Figure IV.7 : Les puissances active et réactive	62
Figure IV.8 : Résultat de Simulation étudié en présence de la charge non linéaire sans activation de l'opération du filtrage actif	63
(a) : Courant du réseau.....	63
(b) : Spectre du courant de réseau	63
Figure IV.9 : Résultat de simulation étudiée en présence de la charge non linéaire avec l'opération du filtrage actif.....	64
(a) : Courant du réseau.....	64
(b) : Spectre du courant de réseau	64

Introduction Générale

Une bonne qualité de l'onde est caractérisée par une onde parfaitement sinusoïdale avec une amplitude et une fréquence constante. Par contre, la prolifération des convertisseurs statiques se traduit par une augmentation de la pollution harmonique des réseaux [1], et davantage de consommation de la puissance réactive qui a pour conséquence immédiate de dégrader le facteur de puissance global du réseau [2].

La problématique des harmoniques dans le réseau électrique, également appelée pollution harmonique, n'est pas un phénomène nouveau. La distorsion harmonique est générée par les charges non linéaires connectées au réseau et qui absorbent des courants non sinusoïdaux. Ces harmoniques de courant vont à leur tour générer des tensions harmoniques aux différents points de connexion au réseau. C'est pour ces raisons que le filtrage des distorsions en courant et en tension est au centre des préoccupations actuelles à la fois des fournisseurs et des utilisateurs d'énergie électrique.

Les filtres passifs ont été traditionnellement utilisés pour atténuer la déformation due aux courants harmoniques dans les systèmes d'alimentation industriels, mais leurs performances dépendantes de l'impédance du système et du courant harmonique de la charge non linéaire, les rendent inefficaces sous certaines conditions et laissent des possibilités aux propagations des harmoniques dans le système d'alimentation.

Pour remédier à ces inconvénients, les filtres actifs parallèles (FAP) sont à ce jour les solutions avancées de dépollution les plus adéquates tant au niveau de la production que de la distribution. Leur réponse est instantanée et ils s'adaptent automatiquement aux évolutions des perturbations introduites par les charges du réseau électrique. Ils s'insèrent dans un réseau de distribution électrique sans imposer d'aménagement particulier.

Dans ce contexte, le présent mémoire a pour objet de filtrer les courants harmoniques présents sur le réseau électrique connecté à une charge non linéaire en utilisant un filtre actif parallèle. Le travail réalisé dans ce mémoire, est structuré en quatre chapitres :

Le premier chapitre présente les différentes sources de pollution des réseaux électriques, leurs conséquences sur le réseau et l'ensemble du matériel électrique.

Dans le second chapitre, on trouve la structure générale du filtre actif parallèle et les différentes méthodes d'identification des courants harmoniques générés par une charge non linéaire ainsi que les techniques de modulation, MLI et par hystérésis pour la commande l'onduleur.

Le troisième chapitre comprend une modélisation de la cellule solaire photovoltaïque, les différents éléments constituant une chaîne photovoltaïque, le convertisseur DC-DC et sa technique de commande assurant la poursuite du point de puissance maximale ainsi que les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque.

Dans le quatrième chapitre, on présentera les caractéristiques globales courant-tension et puissance-tension du champ photovoltaïque étudié. On discutera aussi via des résultats de simulation, les performances du filtre actif parallèle triphasé en termes d'atténuation des courants harmoniques de la charge non linéaire en question.

Enfin, on termine par une conclusion générale qui résume l'ensemble des résultats obtenus et énumère quelques suggestions concernant les perspectives du présent travail.

Chapitre I

Différentes Types des Perturbations Electriques

I. Introduction

La multiplicité des dispositifs d'électronique de puissance au sein d'un même procédé exige une alimentation électrique de plus en plus performante en termes de continuité et de qualité. La notion de qualité du produit « électricité » est attachée au niveau de satisfaction de l'utilisateur. Les performances de ses équipements sont directement liées à la qualité de la tension d'alimentation [2]. Cette tension subit généralement beaucoup de perturbations de deux origines distinctes [1] :

- Les perturbations de tension causées par le passage, dans les réseaux électriques, des courants perturbateurs comme les courants harmoniques, déséquilibrés et réactifs, des tensions perturbatrices comme les tensions harmoniques et déséquilibrées et les creux de tension.

Afin d'éviter le dysfonctionnement, voire la destruction des composants du réseau électrique ou des récepteurs finaux, il est indispensable de comprendre l'origine des perturbations et de chercher les solutions adéquates pour les supprimer.

L'objectif de ce chapitre est de rappeler brièvement l'origine des phénomènes perturbateurs et leur impact sur les réseaux. Nous analyserons ensuite les structures usuelles d'électronique de puissance utilisées dans le cadre de l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique (QEE) et la conduite des réseaux.

I.2 Notions sur les harmoniques de courant et les harmoniques de tension

I.2.1. Origine des harmoniques

La prolifération des équipements électriques utilisant des convertisseurs statiques a entraîné ces dernières années une augmentation sensible du niveau de pollution harmonique des réseaux électriques. Ces équipements électriques sont considérés comme des charges non linéaires absorbant des courants harmoniques dont les fréquences sont des multiples entiers de la fréquence fondamentale, ou parfois à des fréquences quelconques. Le passage de ces courants harmoniques dans les impédances du réseau électrique peut entraîner des tensions harmoniques aux points de raccordement et alors polluer les consommateurs alimentés par le même réseau électrique. Les différents secteurs industriels concernés sont aussi bien du type secondaire (utilisation des gradateurs, des redresseurs, des variateurs de vitesse...), que du type tertiaire (informatique ou éclairage dans les bureaux, commerces...) ou domestique (téléviseurs, appareils électroménagers en grand nombre) [3].

I.2.2. Conséquences des harmoniques

De nombreux effets des harmoniques sur les installations et les équipements électriques peuvent être cités. Les effets les plus importants sont l'échauffement, les défauts de fonctionnement de certains équipements électriques et le risque d'excitation de résonance [3] :

- *L'échauffement* : Les pertes totales par *effet Joule* sont la somme de celles du fondamental et des harmoniques :

$$P_j = R.I^2 \quad (I.1)$$

Avec I le courant total, I_h le courant harmonique de rang h qui représente le fondamental pour $h=1$, et R la résistance traversée par le courant I .

Les harmoniques augmentent aussi les *pertes fer* (pertes par courants de Foucault et pertes par hystérésis). Ils prennent de l'importance dans les matériels utilisant les circuits magnétiques (moteurs, Transformateurs...).

Le vieillissement des isolants est souvent dû à une contrainte en tension consécutive à la présence de la tension harmonique, et donc à une augmentation locale du courant de fuite, ou encore à l'échauffement exagéré dans les conducteurs.

- *Les défauts de fonctionnements de certains équipements électriques* : En présence des harmoniques, la tension (ou le courant) peut changer plusieurs fois de signe dans une demi période ; par conséquent, tout appareil dont le fonctionnement est basé sur le passage par zéro des grandeurs électriques (appareils utilisant la tension comme référence) peut être perturbé.

- *L'interférence avec les réseaux de télécommunication* : Le couplage électromagnétique entre les réseaux électriques et de télécommunication peut induire dans ces derniers des bruits importants. Dans le cas de résonances, une partie des réseaux de télécommunication peut être rendue inutilisable.
- *Le risque d'excitation de résonance* : Les fréquences de résonance des circuits formés par des inductances du transformateur et des câbles sont normalement élevées. Ce n'est pas le cas lorsque des batteries de capacité sont raccordées au réseau pour relever le facteur de puissance ; les fréquences de résonance peuvent devenir assez faibles, et coïncider ainsi avec celles des harmoniques engendrés par les convertisseurs statiques. Dans ce cas, il y aura des phénomènes d'amplification d'harmoniques.

I.3. Qualité de l'énergie électrique

Énergie électrique est fournie sous forme de tension constituant un système sinusoïdal triphasé dont les paramètres caractéristiques sont les suivants [3] :

- La fréquence,
- L'amplitude des trois tensions,
- La forme d'onde,
- Le déséquilibre.

Mesure de ces paramètres permet de juger la qualité de la tension. 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 (TDH).

Tableau I.1 : récapitulatif des méthodes de rejet des courants et de la tension harmonique

Méthodes	Avantages	Inconvénients
Renforcement de la puissance de court-circuit	-Amélioration du TDH_u	-Pas d'amélioration de la forme du courant -Pas toujours réalisable -Pas d'adaptabilité
Filtrage passif	-Amélioration du TDH_i	-Risque de résonance -Pas d'adaptabilité
Filtrage actif série	-Amélioration du TDH_u -Adaptabilité aux variations de la charge et du réseau	-Pas d'amélioration de la forme du courant
Filtrage actif parallèle	-Amélioration du TDH_i -Adaptabilité aux variations de la charge et du réseau	

différents critères sont définis pour caractériser les perturbations. Le taux de distorsion harmonique et le facteur de puissance sont les plus employés pour quantifier respectivement les perturbations harmoniques et la consommation de puissance réactive.

Deux taux de distorsion harmonique sont distingués :

- le taux de distorsion harmonique en courant, noté : TDH_i
- le taux de distorsion harmonique en tension, noté : TDH_v

Le premier s'exprime sous la forme :

$$TDH = \sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} \left(\frac{I_{ck}}{I_{c1}} \right)^2} \quad (I.2)$$

Le TDH_i ne dépend que des valeurs efficaces du courant de charge. En revanche, le TDH_v est fonction des courants harmoniques, caractérisant la charge, et de l'impédance de court-circuit, imposée par le réseau :

$$TDH = \sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} \left(\frac{V_{ck}}{V_{c1}} \right)^2} \quad (I.3)$$

V_{c1} Désigne la valeur efficace de v_{c1} .

Le tableau I.1 propose un récapitulatif des techniques usuelles d'atténuation des tensions et des courants harmoniques. Seul le filtre actif parallèle compense les courants et donc les tensions harmoniques engendrées par une charge non linéaire tout en s'adaptant aux évolutions du récepteur. Cette adaptative est obtenue en analysant le courant de charge i_c , caractérisant les perturbations harmoniques.

I.4. Les charges non-linéaires dans les systèmes triphasés à trois et à quatre fils

Les redresseurs à diode et les redresseurs de thyristors sont les types les bien connus de charges non-linéaires. Ces dispositifs injectent une grande quantité d'harmoniques dans les systèmes d'alimentation. Les charges triphasées non-linéaires injectent principalement les harmoniques impairs de rang $(6k + 1)$. La séquence d'harmonique $(6k + 3)$ existerait si la charge était déséquilibrée.

Les charges non-linéaires monophasées injectent tous les harmoniques impairs avec les harmoniques multiples de 3 dominants. Les harmoniques $3k$ se rassemblent dans le fil de neutre et posent des problèmes de surchauffe excessifs dans les conducteurs neutres des transformateurs de distribution [4].

I.5. Solutions pour améliorer la qualité et la gestion de l'énergie électrique

Pour faire face aux perturbations, deux types de solutions sont proposées, traditionnelles et modernes [2]. Sans trop détailler les solutions traditionnelles, nous limiterons juste citer.

- Inductance anti harmonique de protection des condensateurs.
- Inductance de lissage des courants.
- Confinement des harmoniques.
- Augmentation de l'indice de modulation.
- Utilisation de filtres passifs : la méthode la plus simple pour réduire les harmoniques consiste à utiliser des éléments réactifs en l'occurrence des inductances et des condensateurs. Il existe deux classes de filtres passifs : le shunt résonant et le filtre amorti.

I.5.1. Solutions à base d'électronique de puissance

L'apparition de nouveaux composants semi-conducteurs, comme les thyristors **GTO** et les transistors **IGBT**, la maîtrise de leur mise en œuvre et l'existence de nouvelles méthodes de traitement numérique du signal, ont permis de développer des moyens modernes et efficaces contre les perturbations (harmonique, énergie réactive, coupure, fluctuation...). Parmi ces moyens modernes, on peut citer :

- Les Alimentations Sans Interruption -**ASI** (UPS Uninterruptible Power supplies)
- Le Filtrage actif parallèle et/ou séries (**APF** Active Power Filters)
- Le redresseur à MLI (**PWM** Rectifiers)

I.5.1.1. Alimentations sans interruption ASI

Le premier degré de protection contre les perturbations citées dans le **tableau I.2** est l'utilisation d'alimentation sans interruption (**ASI**). Son principe est de reproduire un système de tension alternatif assurant la continuité de l'alimentation de la charge, dont la permanence est en outre garantie par une batterie intégrée. Développé au début des années 60 pour protéger les grands centres informatiques, il est depuis devenu un objet d'usage courant (**Figure I.1**) [2].

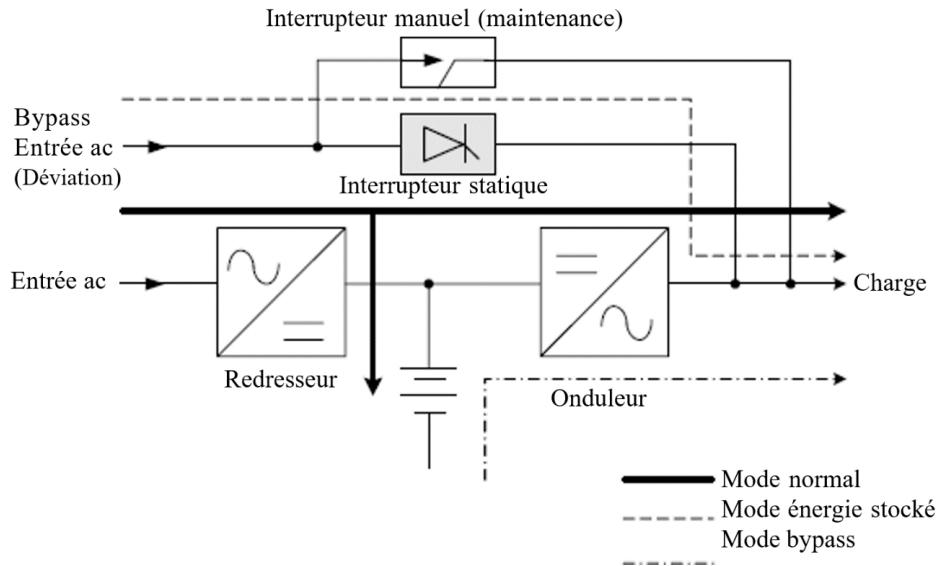


Figure I.1: Schéma d'une ASI avec ses trois modes

En fonction de la puissance nécessaire à l'installation et de la durée du creux de tension ou de la coupure, le choix se fait entre différents modes (mode courant ou tension).

I.5.2. Filtrage actif

Les filtres actifs sont formés de convertisseurs d'électronique de puissance (onduleur) associés à un dispositif de contrôle commande adapté. Ils sont assimilables à des sources de courant ou de tension qui éliminent directement les perturbations harmoniques en injectant sur le réseau des courants ou des tensions en opposition par rapport aux perturbations existantes [5].

I.5.2.1. Filtre actif parallèle FAP

Le filtre actif parallèle présenté par la figure I.2 consiste à neutraliser les harmoniques émis par la charge polluante. Généralement une analyse préalable de la charge permet d'identifier les perturbations et de les renvoyer en opposition de phase sur le réseau via l'onduleur. Le courant résultant côté source est sinusoïdal, voire en phase avec la tension au point de raccordement.

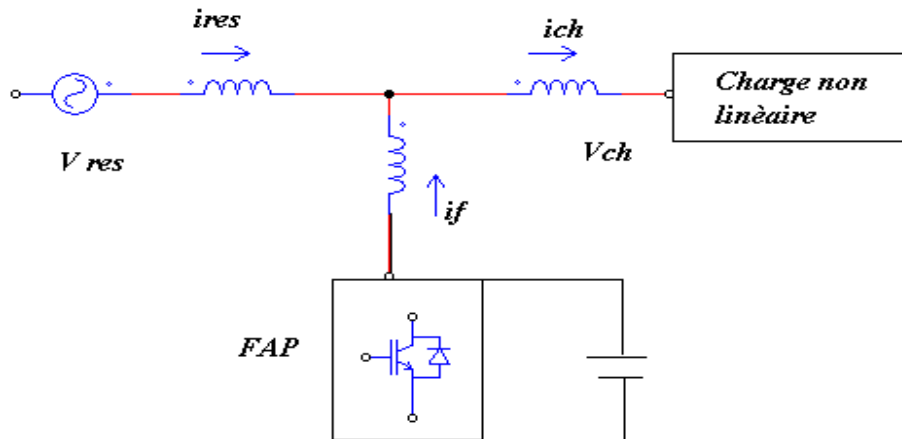


Figure I.2: Schéma de principe du filtre actif parallèle

I.5.2.2. Le Filtre Actif Série FAS

Le filtre actif série se comporte comme une source de tension qui s'oppose aux tensions perturbatrices (creux, déséquilibre, harmoniques) (Figure I.3) venant de la source et également à celles provoquées par la circulation des courants perturbateurs à travers l'impédance de réseau. Ainsi, la tension aux bornes de la charge à protéger est purement sinusoïdale.

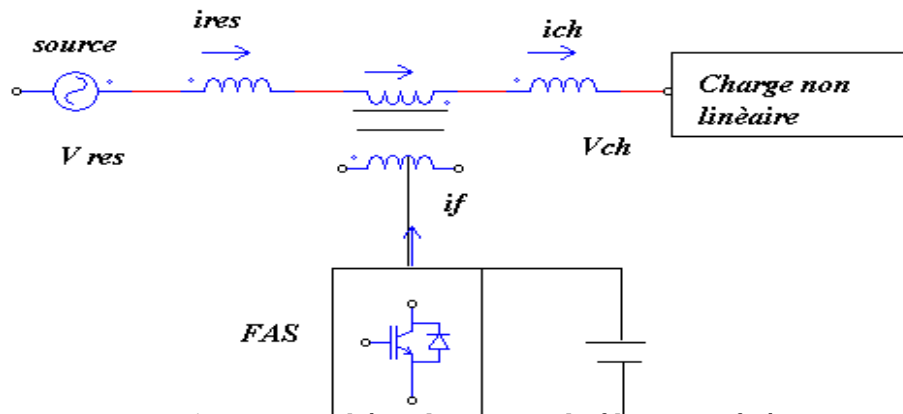


Figure I.3: Schéma de principe du filtrage actif série

I.5.2.3. Filtrage à structure Hybride

L'association de filtre(s) passif(s) avec un filtre actif constitue une combinaison fréquemment utilisée. Le filtre passif se charge d'éliminer les rangs les plus importants, libérant de la puissance sur le filtre actif pour contrer les autres rangs d'harmoniques.

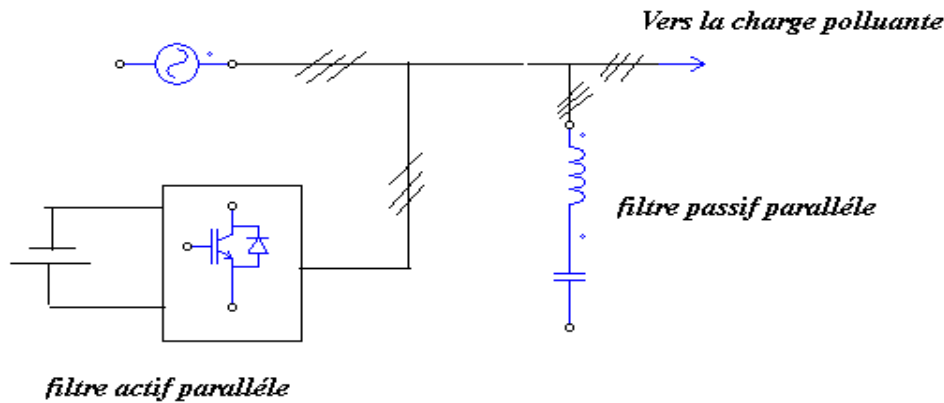


Figure I.4: Filtrage à structure hybride actif et passif

plusieurs structures ont été proposées. Les plus fréquemment utilisées sont :

- La structure hybride parallèle série
- La structure hybride série parallèle
- L'association parallèle des filtres passifs et du compensateur actif.

I.5.3. Redresseur à MLI (RMLI)

Le principe du redresseur à absorption sinusoïdale est représenté sur la **Figure.I.5**. Un circuit de régulation assure la commande du transistor de puissance fonctionnant en commutation. Les instants de commutations sont imposés de façon à obtenir un courant parfaitement sinusoïdal. De plus, la tension continue ne subit aucune altération. Notons que la structure la plus courante est réalisée à partir d'un pont redresseur monophasé.

Dans le cas d'un réseau triphasé, un seul paramètre (ouverture et fermeture du transistor) doit contrôler les trois courants du réseau. Ceci rend la commande très complexe et beaucoup moins performante. Pour cette configuration, on privilégie plutôt l'utilisation du redresseur à modulation de largeur d'impulsion (**RMLI**) [6]

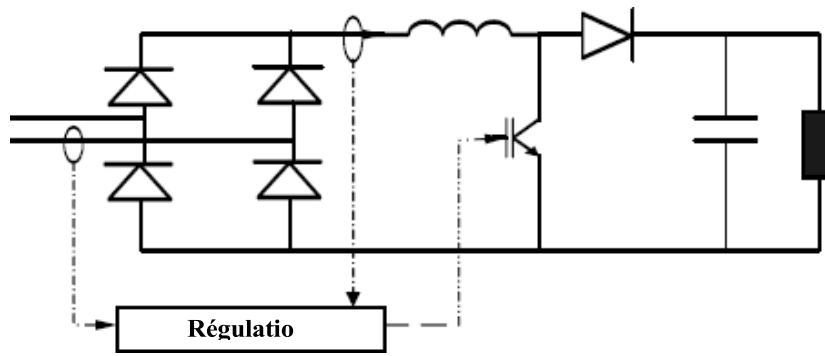


Figure I.5: Schéma monophasé permettant l'absorption sinusoïdale

I.5.4. Applications des filtres actifs parallèles

La principale charge polluante, le redresseur à diodes ou à thyristors, est très utilisée que cela soit pour alimenter des charges continues à partir du réseau ou comme un élément d'interfaçage au réseau dans une conversion à étage intermédiaire continu. De plus en plus de dispositifs de ce type se connectent au réseau électrique. De ce fait, les filtres actifs parallèles sont un champ d'utilisation naturel dans les applications de réseau, notamment dans les réseaux avec plusieurs charges polluantes et dans les réseaux à courant continu. Les filtres actifs sont également utilisés dans des applications industrielles, afin de dépolluer une zone avec plusieurs charges non linéaires (redresseurs, certains éclairages, etc.).

En fin, le filtrage actif est également employé dans les applications tertiaires car les filtres actifs peuvent être intéressants dans les bâtiments commerciaux, hôpitaux, etc. dans lesquels il y a de nombreuses charges polluantes comme des ordinateurs, éclairage économique. Ces filtres actifs compensent les courants harmoniques, les courants réactifs et les déséquilibres des charges.

Les applications réseau, industrielles, tertiaires, domestiques et en télécommunications apparaissent comme des environnements particulièrement pollués par les harmoniques. Les filtres permettent une compensation globale des harmoniques, souvent jusqu'à l'harmonique 50.

I.5.5. Classement des filtres actifs parallèles

Il existe une grande variété de types de filtres actifs parallèles. Ils sont classés de différentes manières selon le nombre de phases, la technologie de l'onduleur et la topologie:

- Filtres actifs monophasés ou triphasés ;
- Filtres actifs avec ou sans neutre raccordé ;
- Filtres actifs basés sur l'onduleur de tension ou sur le commutateur de courant.

Même si les filtres actifs monophasés ont été largement étudiés dans la littérature, dans les applications industrielles, ce sont les filtres actifs triphasés qui sont les plus répandus (pour des applications de type variateurs ou redresseurs à dépolluer) du fait que les filtres monophasés sont normalement limités aux applications en basse puissance (les redresseurs des sources d'alimentation en continu), sauf dans le cas de la traction électrique. La deuxième classification se fait autour de la topologie utilisée, avec ou sans neutre raccordé. Les filtres actifs avec neutre raccordé ont été développés afin de pouvoir injecter et compenser les composantes homopolaires. Dans la littérature la plupart des filtres sont connectés sans neutre raccordé.

Toutefois, on trouve plusieurs filtres avec neutre raccordé : certains avec un onduleur trois bras et d'autres avec un onduleur à quatre bras ; en ce qui concerne la technologie de l'onduleur, les filtres actifs sont soit basés sur l'onduleur de tension avec un condensateur du côté continu et un filtre de raccordement inductif du côté réseau, soit sur un commutateur de courant avec une inductance du côté continu et un filtre de raccordement capacitif du côté réseau.

Actuellement, même si l'on trouve des articles basés sur le commutateur de courant, l'onduleur de tension est généralement préféré à cause de son meilleur rendement, de son moindre coût et de son volume plus réduit (si l'on compare le condensateur et l'inductance du côté continu).

Par ailleurs, les modules à IGBT disponibles actuellement sur le marché sont bien adaptés aux onduleurs de tension car en général une diode en antiparallèle est rajoutée pour chaque IGBT.

Le commutateur de courant a quant à lui besoin de mettre en série avec chaque IGBT une diode anti-retour. De plus, un aspect vient renforcer provisoirement le choix : le commutateur de courant ne peut pas être utilisé avec des topologies multi-niveaux classiques. En conséquence presque tous les filtres actifs qui sont sur le marché sont composés d'onduleurs de tension [7].

I.6. Réglementations et normes

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

: [8]

- 1- Niveaux de compatibilité harmonique en amont du point commun de raccordement.
- 2- Limites sur l'émission harmonique des équipements.
- 3- Guide pour la mesure des harmoniques

I.6.1. La norme CEI

Afin de faciliter la connaissance des normes pour chaque domaine, les normes CEI qui couvrent tous les domaines de l'électrotechnique sont numérotés et référencés comme par exemple CEI 61000 sur la compatibilité électromagnétique et CEI 60063 qui définit les séries de valeurs normalisées pour les résistances et condensateurs, etc. [10], [9].

Les normes internationales publiées par la CEI dans les domaines de l'électricité et de l'électronique ont pour objectifs de [10], [9] :

- Faciliter les échanges dans le monde en supprimant les barrières techniques;
- Assurer la qualité des produits ;
- Garantir l'interopérabilité des produits et des systèmes ;
- Contribuer à la sécurité lors de l'utilisation des produits ;
- Contribuer à la protection de l'environnement et à la qualité de vie.

Les membres de la Commission Electrotechnique Internationale ont regroupé ces équipements, selon différents critères, en quatre classes. Ces classes ainsi que leurs TDH limites sont présentés dans le tableau I.2 suivant [9] :

Tableau I.2 : Classification de la CEI des équipements dont la consommation ne dépassant pas 16 A [9]

Classe A	Équipements triphasés équilibrés Appareils électroménagers, excluant le matériel de la classe d'outils excluant les outils portatifs Gradateurs pour lampes à incandescence équipements audio Autres équipements qui n'appartiennent pas à B, C ou D
Classe B	Appareils portables Matériel de soudage électrique qui n'est pas du matériel professionnel
Classe C	Équipements d'éclairage
Classe D	Ordinateurs et moniteurs d'ordinateur, TVs

Remarque

Seuls les équipements qui consomment une puissance entre 75 et 600W appartiennent à la classe D.

D'autre part, les principales normes en matière de pollution harmonique basse tension sont définies au niveau international par la norme CEI 61000, à titre d'exemple : [8]

- CEI 61000-2-2
- CEI 61000-2-4
- CEI 61000-3-2
- CEI 61000-3-4
- CEI 61000-4-13

I.6.2. La norme IEEE

La norme IEEE est spécifique pour les États-Unis, IEEE-519 à titre d'exemple, définit des limites pour les tensions et courants harmoniques au point commun de raccordement (Pcc) pour assurer le bon fonctionnement des récepteurs dans d'autres sites. Les taux individuels maximaux des tensions harmoniques ainsi que le TDH à ne pas dépasser sont donnés dans le tableau suivant [8] :

Tableau I.3 : Limites des tensions harmoniques selon IEEE-519 [8]

Tension au jeu de barre	TDH maximal (%)
69 kV et moins	5.0
115 kV à 161 kV	2.5
Plus de 161kV	1.5

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

I.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents types de perturbations affectant l'onde de courant du réseau électrique. Comme nous avons pu le constater, les harmoniques ont des effets néfastes sur les équipements électriques. Ces effets peuvent aller des échauffements et de la dégradation du fonctionnement jusqu'à la destruction totale de ces équipements. Alors que pour éliminer ces effets, plusieurs solutions traditionnelles et modernes de dépollution ont été présentées. La solution classique à base de filtres passifs est souvent pénalisée en termes d'encombrement et de résonance, de plus elles ne peuvent pas s'adapter à l'évolution du réseau et aux charges polluantes. Contrairement, les filtres actifs ont un objet de s'adapter et dépolluer le réseau de tous types de perturbations.

Chapitre II

Stratégies d'identification des Perturbations des Courants

II.1 Introduction

La prolifération des perturbations électriques est due à un nombre croissant des charges non linéaires présentes dans les lignes électriques, tels que les équipements à base d'électronique de puissance, les ordinateurs personnels, les appareils à tubes fluorescents, etc. Le filtrage actif de puissance parallèle (FAP), dont il s'insère entre le réseau électrique et la charge non linéaire, est alors une solution moderne et efficace permettant de compenser ces courants harmoniques et l'énergie réactive. Cependant, les performances d'un filtre actif parallèle dépendent en grande partie de la topologie utilisée et de la dynamique des algorithmes d'extraction. Ainsi, dans ce chapitre nous allons présenter les commandes les plus efficaces pour contrôler ces courants harmoniques et l'énergie réactive, à savoir la méthode des puissances instantanées et la méthode du référentiel lié au synchronisme.

II.2 Description du système

En général, un réseau électrique simplifié avec filtre actif de puissance peut être représenté par un système utilisant une source de tension triphasée à trois fils, une charge non linéaire et un filtre actif parallèle à trois bras avec sa commande. La structure générale de ce système est représentée par la figure suivante :

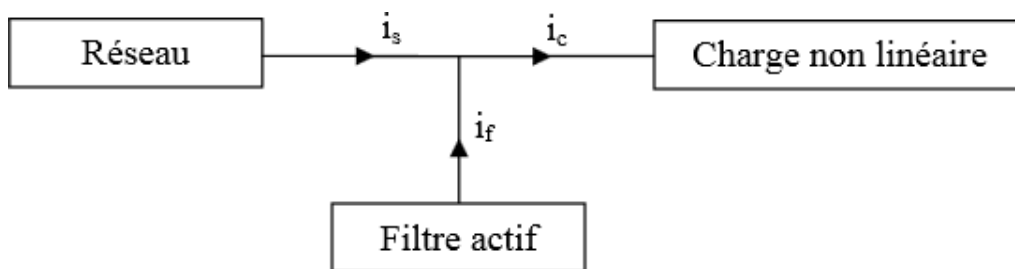


Figure. II.1. Filtre actif parallèle

des tensions simples équilibrées sans harmoniques sont données par :

$$V_1(t) = \sqrt{2}V_{eff} \sin(\omega t) \quad (\text{II.1})$$

$$V_2(t) = \sqrt{2}V_{eff} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \quad (\text{II.2})$$

$$V_3(t) = \sqrt{2}V_{eff} \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \quad (\text{II.3})$$

concernant la charge non linéaire, nous avons utilisé un pont redresseur triphasé à diode « pont de Graetz » associé à une charge inductive, comme le montre la figure suivante :

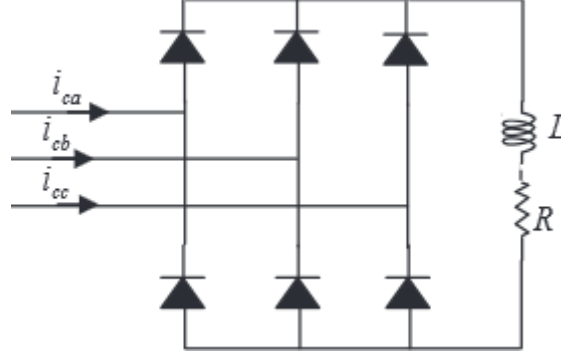


Figure. II.2. Redresseur ayant une charge R-L

on sait qu'une charge non linéaire produit des harmoniques et les transmet sur le réseau. Ces harmoniques en courant et/ou en tension côté alternatif peuvent avoir des répercussions néfastes sur le réseau d'alimentation, pour cela il est intéressant de savoir qu'elle type d'harmonique est produit par une charge non linéaire. L'expression générale du courant peut être donnée par les expressions suivantes :

$$I_c = I_{cf} + I_{ch}. \quad (\text{II.4})$$

$$I_{c1} = \sqrt{2} I \left(\sin(\omega t - \alpha) - \frac{1}{5} \sin(5\omega t - \alpha) - \frac{1}{7} \sin(7\omega t - \alpha) + \frac{1}{11} \sin(11\omega t - \alpha) + \frac{1}{13} \sin(13\omega t - \alpha) \dots \dots \right) \quad (\text{II.5})$$

$$I_{c2} = \sqrt{2} I \left(\sin\left(\omega t - \alpha - \frac{2\pi}{3}\right) - \frac{1}{5} \sin\left(5\omega t - \alpha - \frac{2\pi}{3}\right) - \frac{1}{7} \sin\left(7\omega t - \alpha - \frac{2\pi}{3}\right) + \frac{1}{11} \sin\left(11\omega t - \alpha - \frac{2\pi}{3}\right) + \frac{1}{13} \sin\left(13\omega t - \alpha - \frac{2\pi}{3}\right) \dots \dots \right) \quad (\text{II.6})$$

$$I_{c3} = \sqrt{2} I \left(\sin\left(\omega t - \alpha + \frac{2\pi}{3}\right) - \frac{1}{5} \sin\left(5\omega t - \alpha + \frac{2\pi}{3}\right) - \frac{1}{7} \sin\left(7\omega t - \alpha + \frac{2\pi}{3}\right) + \frac{1}{11} \sin\left(11\omega t - \alpha + \frac{2\pi}{3}\right) + \frac{1}{13} \sin\left(13\omega t - \alpha + \frac{2\pi}{3}\right) \dots \dots \right) \quad (\text{II.7})$$

Le filtre actif de puissance utilisé dans notre cas est connecté en parallèle avec le réseau électrique, il se compose essentiellement de deux parties, à savoir, la partie puissance qui est constituée d'un onduleur de tension ; d'un circuit de stockage d'énergie, souvent capacitif et d'un filtre à la sortie de l'onduleur et la partie commande qui est constituée de l'algorithme de détection de courant de référence et de la commande de l'onduleur.

II.3 Structure générale du filtre actif parallèle

II.3.1 Topologie générale

La **figure II.3** donne la structure générale du *FAP*, laquelle se présente sous la forme deux parties :

- La partie puissance et la partie contrôle-commande. La partie puissance est constituée :

d'un onduleur de tension à base d'interrupteurs de puissance, commandables à l'amorçage et au blocage (GTO, IGBT, ...etc.) avec des diodes en antiparallèle, d'un circuit de stockage d'énergie, souvent capacitif, d'un filtre de sortie.

- La partie contrôle-commande quant à elle est constituée :

de la méthode d'identification des courants perturbés, du système à base de PLL qui sera intégré dans la méthode d'identification des courants, 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 [11].

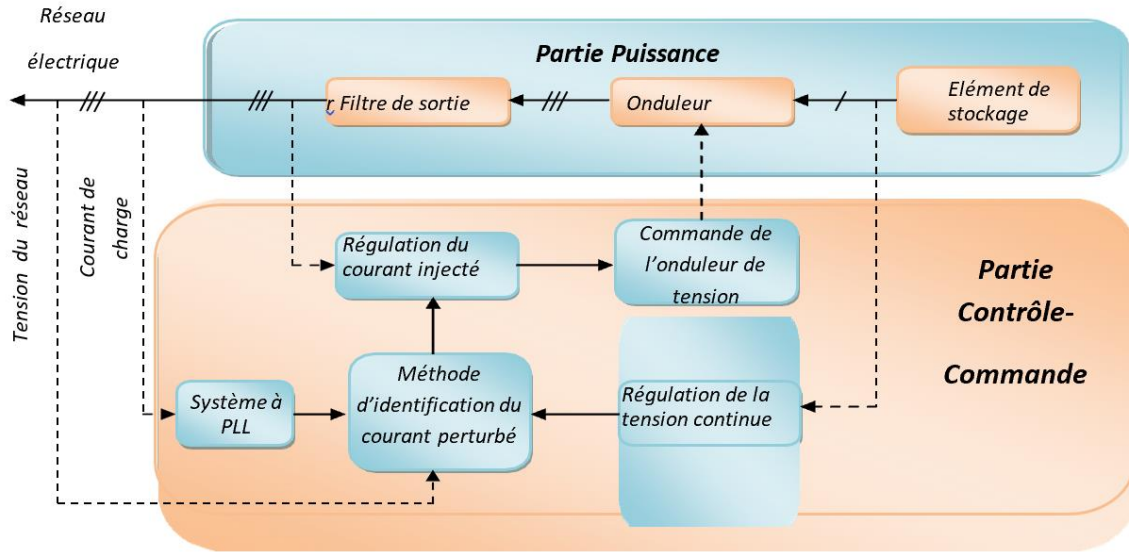


Figure II.3 Structure générale du FAP

II.3.2 Etude de la partie puissance

II.3.2.1 Onduleur de tension

II.3.2.1.1 Structure générale

La figure.II.4 présente un onduleur triphasé à structure de tension. Il se compose de trois bras à interrupteurs réversibles en courant, commandés à la fermeture et à l'ouverture, réalisés à partir de transistors (GTO ou IGBT) et de diodes en antiparallèle. Le stockage de l'énergie du côté continu se fait par l'intermédiaire d'un condensateur C_{dc} de tension V_{dc} . Le filtre de sortie est un filtre passif habituellement du premier ordre (L_f, R_f) employé pour relier l'onduleur de tension au réseau électrique.

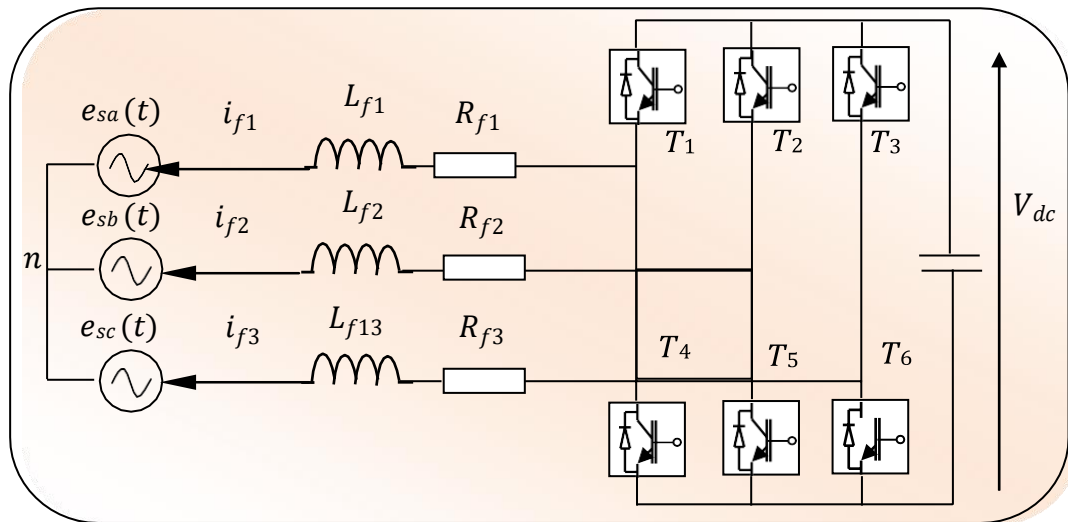


Figure II.4 Onduleur de tension triphasé.

structure du *FAP* ne permet pas la fermeture simultanée des semi-conducteurs d'un même bras sous peine de court-circuiter le condensateur de stockage. Par contre, ils peuvent être tous les deux ouverts (pendant un temps mort). La continuité des courants est alors assurée par la mise en conduction d'une des diodes d'un même bras.

En pratique, nous commandons les deux semi-conducteurs d'un même bras de façon complémentaire : la conduction de l'un entraîne le blocage de l'autre. En réalité, le mode, où les semi-conducteurs d'un même bras sont tous les deux fermés, n'existe que durant les commutations. D'éviter un court-circuit à cause du délai de blocage des interrupteurs, il faut insérer sur un même bras, un temps d'attente, également appelé *temps mort*, entre la commande de blocage d'un interrupteur et la commande d'amorçage de l'autre [11]. Avec l'hypothèse des commutations instantanées, ce mode de fonctionnement ne sera pas pris en compte et par conséquent, aucun risque de court-circuiter le condensateur n'est à craindre.

II.3.2.1.2 Tension fournie par l'onduleur

L'ouverture et la fermeture des interrupteurs de l'onduleur de la **figure.II.4** dépendent de l'état des signaux de commande (S_1, S_2, S_3), comme défini ci-dessous :

$$S_1 = \begin{cases} 1 & T1 \text{ fermé et } T4 \text{ ouvert} \\ 0 & T1 \text{ ouvert et } T4 \text{ fermé} \end{cases} \quad (\text{II.8})$$

$$S_2 = \begin{cases} 1 & T2 \text{ fermé et } T5 \text{ ouvert} \\ 0 & T2 \text{ ouvert et } T5 \text{ fermé} \end{cases}$$

$$S_3 = \begin{cases} 1 & T3 \text{ fermé et } T6 \text{ ouvert} \\ 0 & T3 \text{ ouvert et } T6 \text{ fermé} \end{cases}$$

Ainsi, on pourra exprimer huit cas possibles de tension de sortie du filtre actif V_f (par rapport au neutre n de la source), comme le montre Tableau II.1 [11].

II.3.2.1.3 Représentation vectorielle

Dans le plan biphasé (α, β) , en considérant $\vec{V}_f$ vecteur correspondant aux tensions de l'onduleur, les huit cas possibles du vecteur $\vec{V}_f$ sont donnés par la Figure II.5.

Tableau II.1 Tensions générées par l'onduleur.

N° du cas	S3	S2	S1	Vf3	Vf2	Vf1
0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	1	$-V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	$2V_{dc}/3$
2	0	1	0	$-V_{dc}/3$	$2V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$
3	0	1	1	$-2V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$
4	1	0	0	$2V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$
5	1	0	1	$V_{dc}/3$	$-2V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$
6	1	1	0	$V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$	$-2V_{dc}/3$
7	1	1	1	0	0	0

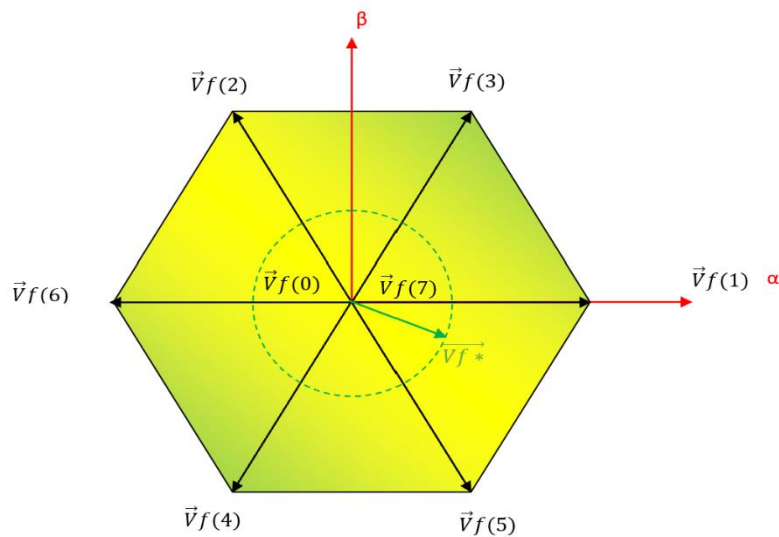


Figure II.5 Représentation vectorielle des tensions générées par l'onduleur.

Où $\overrightarrow{Vf^*}$ 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 montré dans **la Figure II.5** [11].

II.3.2.2 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 qui joue le rôle d'une source de tension continue V_{dc} , comme le montre **la Figure II.4**. Le choix des paramètres du système de stockage (V_{dc} et C_{dc}) se répercute sur la dynamique et la qualité de compensation du FAP. En effet, une tension V_{dc} élevée améliore la dynamique du filtre actif. De plus, les ondulations de la tension continuent 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 FAP. Ces fluctuations sont d'autant plus importantes que l'amplitude du courant du filtre est grande et que sa fréquence est faible. 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 FAP pendant une demi-période de la pulsation de puissance liée aux deux premiers harmoniques (5 et 7 pour un pont redresseur de Graetz) [7,56]. En choisissant un taux d'ondulation acceptable (ϵ), généralement de l'ordre de 5% de V_{dc} , nous pouvons calculer la capacité C_{dc} à partir de la relation suivante :

$$C_{dc} = \frac{V_s \sqrt{I_5^2 + I_7^2 - 2I_5 I_7 \cos(5\alpha - 7\alpha)}}{2\omega \epsilon V_{dc}^2} \quad (\text{II.9})$$

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 (Cf. *Tableau II.1* et *Figure II.5*) 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 [11] :

$$C_{dc} = \frac{I_h}{\epsilon V_{dc} \omega_h} \quad (\text{II.10})$$

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

II.3.2.3 Filtre de sortie

Le filtre de sortie est un filtre passif utilisé pour relier l'onduleur de tension au réseau électrique. Le filtre de sortie est dimensionné pour satisfaire les deux critères suivants:

- Assurer la dynamique du courant :

$$\frac{d}{dt} \vec{I}_{h_ch} = \frac{d}{dt} \vec{I}_{inj} \quad (II.11)$$

Avec I_{h_ch} le courant harmonique de la charge et I_{inj} le courant du filtre actif.

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

Deux types du filtre de sortie peuvent être employés : un filtre de sortie du premier ordre et un filtre de sortie du troisième ordre.

II.3.2.3.1 Filtre du premier ordre

Ce type de filtre est le plus utilisé dans la littérature [55-57]. Il est composé d'une inductance L_f de résistance interne R_f , comme le montre la **Figure II.4**. Un filtre de ce type ne permet pas de satisfaire simultanément les deux critères de dimensionnement du filtre de sortie. En effet, seule une valeur relativement faible de L_f peut réaliser une bonne dynamique du filtre actif en satisfaisant l'égalité (II.11). Malheureusement, une valeur faible de L_f permet à la majorité des composantes dues aux commutations de se retrouver côté réseau et par conséquent d'affecter les installations et les équipements électriques. Inversement, une valeur relativement élevée de L_f va empêcher ces composantes de se propager sur le réseau électrique mais affectera la dynamique du filtre actif et dégradera alors la qualité de compensation.

Le bon dimensionnement du filtre de sortie du premier ordre dépendra donc du compromis à trouver entre la dynamique et l'efficacité du FAP. Ce compromis est très difficile à fixer sans l'emploi d'un filtre passif auxiliaire installé à la sortie de l'onduleur ou en amont du côté réseau [59-60]. Cependant, ce filtre auxiliaire peut causer des effets secondaires non désirés comme la résonance avec d'autres éléments passifs installés sur le réseau électrique. De leurs éléments passifs.

II.3.2.3.2 Filtre du troisième ordre

Nous proposons ici d'étudier le cas d'un filtre de sortie du troisième ordre afin

d'échapper aux problèmes évoqués dans le cas du filtre de sortie du premier ordre [7,61-62]. Ce filtre de sortie, souvent appelé *filtre en T*, se compose de deux inductances (L_{f1} , L_{f2}) de résistances internes respectives (R_{f1} , R_{f2}) et d'une capacité C_f . Dans ce travail, une petite résistance d'amortissement R_f a été ajoutée en série avec la capacité C_f comme le montre la **Figure II.6** [11].

Ce type de filtre et grâce au degré de liberté supplémentaire, fourni par la capacité C_f , peut assurer les deux critères de dimensionnement du filtre de sortie que nous avons évoqués précédemment.

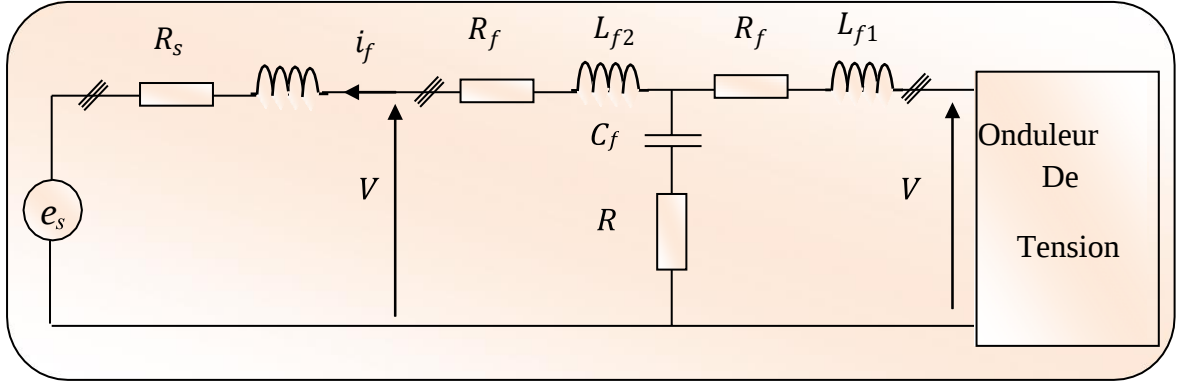


Figure II.6 Schéma équivalent par phase du filtre de sortie du troisième ordre
équations qui modélisent le filtre de sortie sont :

$$I_{inj}(s) = \frac{B_1(s)}{A(s)} V_f(s) + \frac{B_2(s)}{A(s)} e_s(s) \quad (\text{II.12})$$

Avec V_f la tension de sortie de l'onduleur, $B_1(s)/A(s)$ la fonction de transfert du filtre de sortie Correspondant au système d'origine et $B_2(s)/A(s)$ la fonction de transfert correspondant au modèle de Perturbation. Ces perturbations sont causées par la tension du réseau électrique $e(s)$ que l'on considère désormais égale à la tension de raccordement V_s pour les réseaux électriques de forte puissance de court-circuit.

$$\begin{cases} A(s) = a_1 s^3 + a_2 s^2 + a_3 s + a_4 \\ B_1(s) = b_{11} s + b_{12} \\ B_2(s) = -(b_{21} s^2 + b_{22} s + b_{23}) \end{cases} \quad (\text{II.13})$$

Avec

$$\left\{ \begin{array}{l} a_1 = (L_s + L_{f2})L_{f1}C_f \\ a_2 = ((L_s + L_{f2})R_{f1}C_f + (R_s + R_{f2})L_{f1}C_f + (L_{f1} + L_s + L_{f2})R_fC_f) \\ a_3 = ((L_s + L_{f2}) + L_{f1} + (R_s + R_{f2})R_{f1}C_f + (R_{f1} + R_s + R_{f2})R_fC_f) \\ a_4 = (R_{f1} + R_s + R_{f2}) \\ b_{11} = R_fC_f \\ b_{12} = 1 \\ b_{21} = L_{f1}C_f \\ b_{22} = (R_f + R_{f1})C_f \\ b_{23} = 1 \end{array} \right. \quad (\text{II.14})$$

Des relations (II.12), (II.13) et (II.14), si nous négligeons toutes les résistances, nous pouvons établir la relation suivante, valable aux fréquences supérieures à 50 Hz :

$$\frac{B_1}{A}(s) \approx \frac{1}{(L_{f1}L_{f2}C_f)s^3 + (L_{f1} + L_{f2})s} \quad (\text{II.15})$$

La fréquence de résonance f_{cp} du système d'origine est donnée par la relation (II.16) :

$$f_{cp} \approx \frac{1}{2\pi \sqrt{\frac{(L_{f1}L_{f2})C_f}{L_{f1} + L_{f2}}}} \quad (\text{II.16})$$

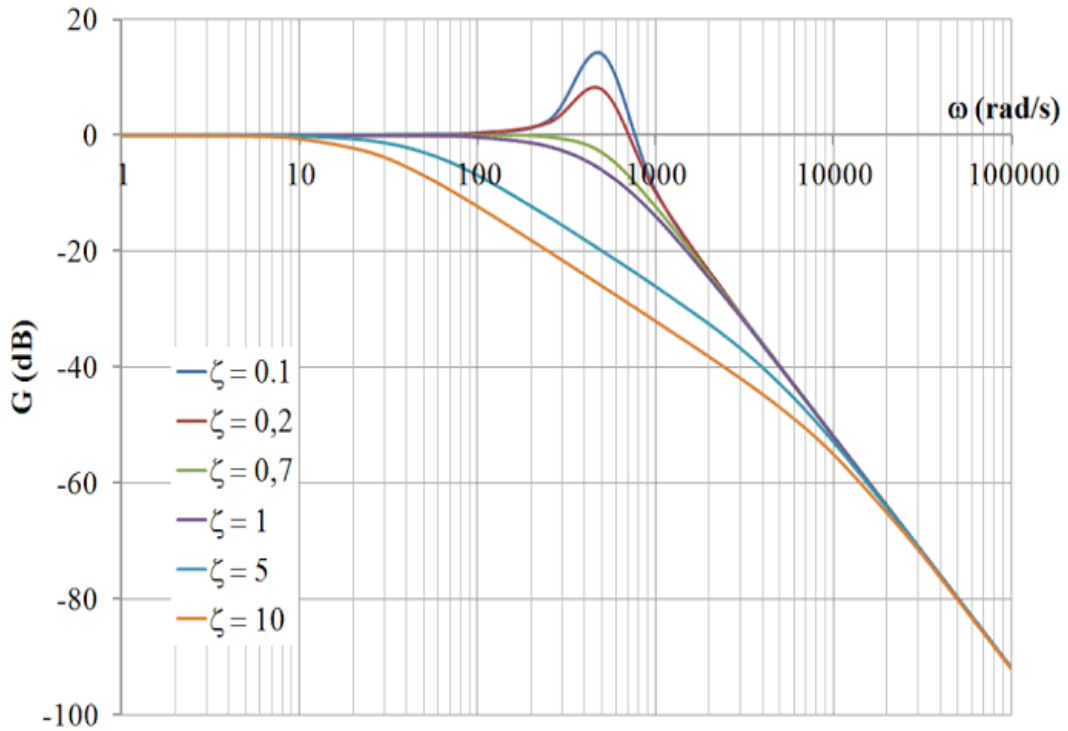


Figure II.7 Diagramme de Bode de gain du filtre de sortie

Filtre de sortie en T a été dimensionné pour rejeter les composantes dues à la fréquence de commutation de l'onduleur, lesquelles ont été fixées à 12 kHz pour correspondre à un cas d'application. Ainsi, un rejet de -50 dB est obtenu pour une fréquence de coupure de 1900 Hz.

Ce choix a permis de bien atténuer les composantes à hautes fréquences, comme le montre le diagramme du gain du filtre de sortie en fonction de la fréquence de la **Figure II**

II.4 Méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées

Méthode des puissances active et réactive instantanées p-q : l'extraction des harmoniques est réalisée à partir de la puissance instantanée calculée en repère fixe, en utilisant la transformée de Concordia [12], [13]. Ainsi, les puissances sont décomposées en une composante continue, liée au fondamental, et en une composante alternative, liée aux harmoniques, qui peuvent être séparées en utilisant un filtre passe-haut [14].

Le principe de cette méthode classique est maintenant succinctement décrit. Notons respectivement par $(, \beta)$ et (i_α, i_β) les composantes associées aux tensions s_k ($k = a, b, c$) et aux courants i_{ck} . La transformation de Concordia permet d'écrire, les deux relations suivantes [11] :

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & \sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.17})$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & \sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \\ i_{cc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.18})$$

Les puissances réelle et imaginaire instantanées, notées respectivement p et q , sont définies par la relation matricielle suivante [9] :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_\alpha & V_\beta \\ -V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{II.19})$$

En remplaçant les tensions et les courants diphasés par leur homologue triphasé, nous obtenons :

$$p = V_\alpha \cdot i_\alpha + V_\beta \cdot i_\beta = V_{sa} \cdot i_{ca} + V_{sb} \cdot i_{cb} + V_{sc} \cdot i_{cc} \quad (\text{II.20})$$

de même, pour la puissance imaginaire on a :

$$q = V_\alpha \cdot i_\beta - V_\beta \cdot i_\alpha = \frac{1}{\sqrt{3}} [(V_{sc} - V_{sb})i_{ca} + (V_{sa} - V_{sc})i_{cb} + (V_{sb} - V_{sa})i_{cc}] \quad (\text{II.21})$$

composantes des puissances réelle et imaginaire instantanées s'expriment comme la somme d'une composante continue et d'une composante alternative, ce qui nous d'écrire [15] :

$$\begin{cases} p = \bar{p} + \tilde{p} \\ q = \bar{q} + \tilde{q} \end{cases} \quad (\text{II.22})$$

Où :

$\bar{p}, \bar{q}$ Sont les composantes continues de p et q ;

$\tilde{p}, \tilde{q}$ Sont les composantes alternatives de p et q .

L'inverse de l'équation (II.19) des puissances active et réactive permet d'établir la relations (II.23) des courants i_α et i_β :

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (\text{II.23})$$

En considérant les équations (II.22) et (II.23), nous pouvons séparer le courant dans le repère (α, β) en trois composantes, active et réactive à la fréquence fondamentale et somme des harmoniques. Ceci conduit à :

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \left\{ \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{p} \\ \bar{q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \right\} \quad (\text{II.24})$$

Maintenant, si on souhaite également compenser la puissance réactive, ainsi que les courants harmoniques générés par les charges non linéaires, le signal de référence du *filtre actif Parallèle* doit inclure $\tilde{p}$, $\bar{q}$ et $\tilde{q}$. Dans ce cas, les courants de référence sont calculés par :

$$\begin{bmatrix} i_{ref\alpha} \\ i_{ref\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} V_\alpha & V_\beta \\ V_\beta & -V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \bar{q} + \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (\text{II.25})$$

Les courants triphasés sont obtenus à partir des courants diphasés $i_{ref\alpha}$ et $i_{ref\beta}$ par la transformation inverse de Concordia. Ces courants représentent les perturbations et deviennent les courants de référence qui sont à injecter en opposition de phase sur le réseau électrique pour éliminer les harmoniques [12].

$$\begin{bmatrix} i_{refa} \\ i_{refb} \\ i_{refc} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ref\alpha} \\ i_{ref\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{II.26})$$

évident, d'après la relation (II.24), que pour identifier une des trois composantes, par exemple les courants harmoniques, les parties alternatives des puissances réelles et imaginaires doivent être séparées des parties continues. Cette séparation peut être réalisée en utilisant deux filtres, le premier pour isoler la partie p de la puissance active instantanée, le second pour isoler la partie q de la puissance réactive instantanée, comme le présente la **Figure II.8**.

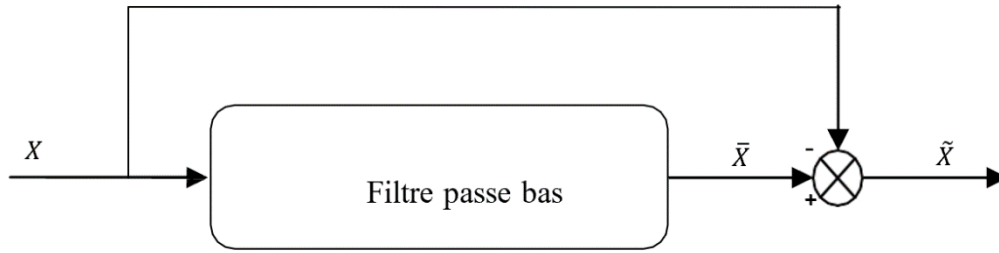


Figure. II.8 : Schéma représentant le principe de séparation des puissances.

donne l'expression générale d'un filtre passe -bas du deuxième ordre :

$$F_{pb}(s) = \frac{\omega_0^2}{s^2 + 2\varepsilon_0\omega_0s + \omega_0^2} \quad (\text{II.27})$$

Avec:

- $\omega_0^2 = 2\pi f_0$; f_0 est la fréquence de coupure du filtre ;
- s : l'opérateur de Laplace ;
- ε_0 : Déphasement.

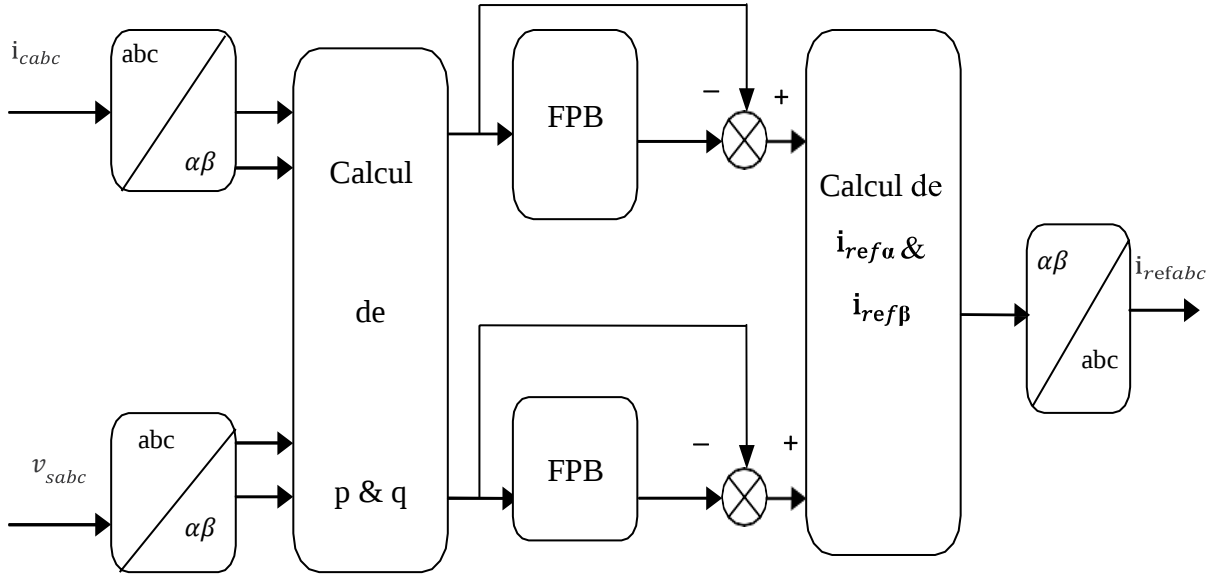


Figure. II.9 : Schéma de principe de la méthode d'identification des puissances instantanées.

suivant la fonction que nous donnons au filtre actif de puissance, nous pouvons compenser soit les harmoniques de courant et l'énergie réactive ou uniquement l'un des deux [15].

II.5 Méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées modifiée

II.5.1 Principe du FMV

Son principe de base s'appuie sur les travaux de Song Hong-Scok. Il est basé directement sur l'extraction de la composante fondamentale des signaux d'entrée (tension ou courant), suivant les axes (α, β) [16]. La fonction de transfert de ce filtre est alors la suivante :

$$H(s) = \frac{\hat{x}_{\alpha\beta}(s)}{x_{\alpha\beta}(s)} = K \frac{(s+k) + j\omega_c}{(s+k)^2 + j\omega_c^2} \quad (\text{II.28})$$

Où ω_c est défini par :

$$\omega_c = \varepsilon \cdot n \cdot \omega_f \quad (\text{II.29})$$

Avec :

- ω_c : la pulsation de coupure du filtre ;
- ω_f : la pulsation de la composante fondamentale du signal d'entrée ;
- n : le rang de la composante du signal à filtrer ;

- s : une constante égale à ± 1 (composante directe ($\varepsilon=1$) ou inverse ($\varepsilon=-1$)) ;
- K : une constante positive ;
- $x_{\alpha\beta}(s)$: les signaux d'entrée du *FMV* (tension ou courant) ;
- $\hat{x}_{\alpha\beta}(s)$: les signaux de sortie du *FMV*.

L'équation (II.28) et après un court développement, nous pouvons établir les deux expressions suivantes :

$$\hat{x}_{\alpha}(s) = \frac{k(s+k)}{(s+k)^2 + j\omega_c^2} x_{\alpha}(s) - \frac{k\omega_c}{(s+k)^2 + j\omega_c^2} x_{\beta}(s) \quad (\text{II.30})$$

$$\hat{x}_{\beta}(s) = \frac{k\omega_c}{(s+k)^2 + j\omega_c^2} x_{\alpha}(s) - \frac{k\omega_c}{(s+k)^2 + j\omega_c^2} x_{\beta}(s) \quad (\text{II.31})$$

Équations (II.30) et (II.31) peuvent également être exprimées sous la forme :

$$\hat{x}_{\alpha}(s) = \frac{k}{s} [x_{\alpha}(s) - \hat{x}_{\alpha}(s)] - \frac{\omega_c}{s} \hat{x}_{\beta}(s) \quad (\text{II.32})$$

$$\hat{x}_{\beta}(s) = \frac{k}{s} [x_{\beta}(s) - \hat{x}_{\beta}(s)] - \frac{\omega_c}{s} \hat{x}_{\alpha}(s) \quad (\text{II.33})$$

Figure II.10 présente le schéma bloc du filtre multi-variable.

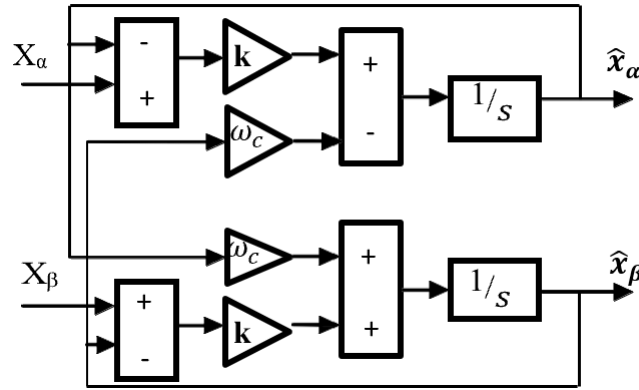


Figure. II.10 : Schéma bloc du *FMV*.

II.5.2 Extraction des courants harmoniques

Contrairement aux filtres passe bas, les filtres multi-variables offrent la possibilité d'extraire d'une manière précise les courants harmoniques dans le repère (α, β) .

La Figure II.11 présente le schéma modifié de l'identification des courants de référence par la méthode des puissances instantanées en employant des *FMVs*.

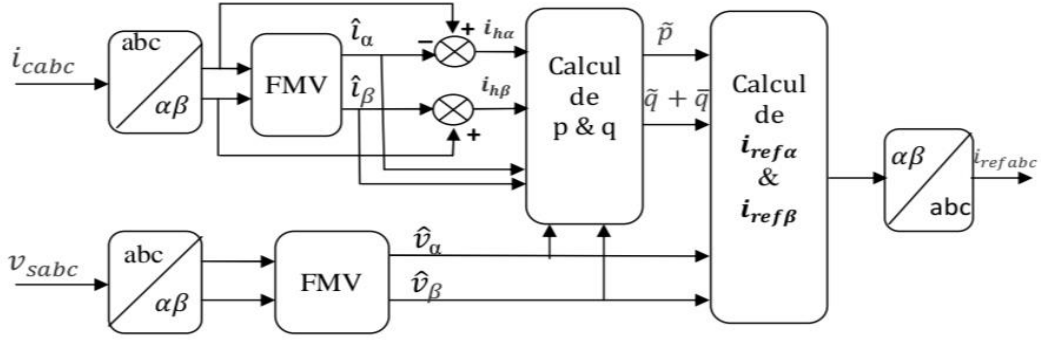


Figure. II.11 : Schéma de principe de la méthode d'identification des puissances instantanées modifiée.

quant aux courants diphasés d'axes (α, β) , ils peuvent être définis comme la somme d'une composante fondamentale et d'une composante harmonique :

$$\begin{cases} i_\alpha = \hat{i}_\alpha + i_{h\alpha} \\ i_\beta = \hat{i}_\beta + i_{h\beta} \end{cases} \quad (\text{II.34})$$

Après isolation des composantes fondamentales en tension notées $\hat{v}_{\alpha\beta}$, et des courants harmoniques $i_{h\alpha\beta}$, nous pouvons alors calculer les composantes alternatives des puissances réelle $\tilde{p}$ et imaginaire $\tilde{q}$ instantanées par :

$$\begin{bmatrix} \tilde{p} \\ -\tilde{q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{v}_\alpha & \hat{v}_\beta \\ -\hat{v}_\beta & \hat{v}_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{h\alpha} \\ i_{h\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{II.35})$$

Avec $i_{h\alpha}$ et $i_{h\beta}$ définis par :

$$i_{h\alpha} = (i_{\alpha d} - \hat{i}_{\alpha d})(i_{\alpha inv} - \hat{i}_{\alpha inv}) \quad (\text{II.36})$$

$$i_{h\beta} = (i_{\beta d} - \hat{i}_{\beta d})(i_{\beta inv} - \hat{i}_{\beta inv}) \quad (\text{II.37})$$

composante fondamentale de la puissance réactive instantanée est définie par :

$$\bar{q} = \hat{v}_\beta \hat{i}_\alpha - \hat{v}_\alpha \hat{i}_\beta \quad (\text{II.38})$$

après avoir ajouté à la composante alternative de la puissance active instantanée, la puissance active p_{dc} nécessaire à la régulation de la tension continue v_{dc} , les courants de référence selon les axes (α, β) sont calculés par :

$$i_{ref\alpha} = \frac{\hat{v}_\alpha}{\hat{v}_\alpha^2 + \hat{v}_\beta^2} (\tilde{q} - p_{dc}) + \frac{\hat{v}_\beta}{\hat{v}_\alpha^2 + \hat{v}_\beta^2} (\tilde{q} - \bar{q}) \quad (\text{II.39})$$

$$i_{ref\beta} = \frac{\hat{v}_\beta}{\hat{v}_\alpha^2 + \hat{v}_\beta^2} (\tilde{q} - p_{dc}) + \frac{\hat{v}_\alpha}{\hat{v}_\alpha^2 + \hat{v}_\beta^2} (\tilde{q} - \bar{q}) \quad (\text{II.40})$$

les équations (II.35) et (II.38) dans les équations (II.39) et (II.40), nous

obtenons :

$$i_{ref\alpha} = i_{h\alpha} + i_{q\alpha} + i_{c\alpha} \quad (\text{II.41})$$

$$i_{ref\beta} = i_{h\beta} + i_{q\beta} + i_{c\beta} \quad (\text{II.42})$$

Où $i_{q\alpha}$, $i_{q\beta}$, $i_{c\alpha}$ et $i_{c\beta}$ sont définis par :

$$\begin{bmatrix} i_{h\alpha} \\ i_{h\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\hat{v}_\alpha^2 + \hat{v}_\beta^2} \begin{bmatrix} 0 & -\hat{v}_\beta \\ 0 & \hat{v}_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ -\bar{q} \end{bmatrix} \quad (\text{II.43})$$

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\hat{v}_\alpha^2 + \hat{v}_\beta^2} \begin{bmatrix} \hat{v}_\alpha & 0 \\ \hat{v}_\beta & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{dc} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.44})$$

courants de référence obtenus à partir des équations (II.41) et (II.42) contiennent trois termes

- Le premier terme correspond aux composantes harmoniques, directes et inverses ;
- Le deuxième terme est le courant réactif destiné à compenser la puissance réactive ;
- Le troisième terme est le courant actif destiné à maintenir la tension v_{dc} égale à sa valeur de référence v_{dcref} .

la transformation de Concordia inverse, les équations (II.41) et (II.42), permettent de déduire les trois courants de référence [15].

II.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées pour l'identification des courants harmoniques. La tension appliquée dans la méthode d'identification est une tension triphasée fournie par le réseau. La tension du réseau doit être saine (sinusoïdale et équilibrée), pour que la méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées soit applicable.

Dans sa forme classique, ne permet pas d'un courant harmonique d'un rang particulier. Etant donné que la tension du réseau est souvent déséquilibrée et/ou déformée et afin de généraliser l'application de cette méthode pour l'adopter à tout type de tension, nous proposons une méthode d'extraction des courants harmoniques basée sur l'utilisation d'un filtre à la sortie de l'onduleur et la partie commande qui est constituée de l'algorithme de détection de courant de référence et de la commande de l'onduleur.

Chapitre III

Généralités sur les Systèmes Photovoltaïques

III.1. Introduction

Le soleil fournit à la terre une énergie énorme (10 000 fois l'énergie nécessaire) sous forme de lumière. Mais le problème est que la forme sous laquelle nous la recevons n'est pas nécessairement la forme sous laquelle elle est disponible. Par conséquent, nous devons utiliser le processus de conversion. Par exemple, les cellules solaires photovoltaïques convertissent l'énergie lumineuse du soleil en électricité. L'épuisement des sources d'énergie traditionnelles (pétrole, etc.), dû à l'utilisation accrue des sources d'énergie conventionnelles (pétrole, etc.) et la forte hausse des prix du pétrole, font que la recherche sur les énergies renouvelables sera critique dans les années à venir. L'énergie solaire est une importante source d'énergie renouvelable qui peut remplacer d'autres sources d'énergie traditionnelles pour répondre aux énormes besoins énergétiques mondiaux. À venir.

L'électricité solaire est une importante source d'énergie renouvelable qui pourrait être une alternative aux autres sources classiques afin de satisfaire les larges besoins d'énergie dans le futur. Cette énergie trouve tout son avantage dans des applications de petite et moyenne consommation dans des régions isolées et loin des lignes de distribution électrique.

Dans le cadre de notre étude, nous nous sommes concentrés sur la production d'électricité à partir de l'énergie photovoltaïque. Dans ce chapitre nous détaillons les éléments ayant trait à cette ressource et sa transformation en énergie électrique.

III.2. Rayonnement solaire

Le rayonnement émis par le soleil est constitué d'ondes électromagnétiques dont certaines atteignent constamment la limite supérieure de l'atmosphère terrestre. En raison de la température de surface du soleil (environ 5800 K), ce rayonnement électromagnétique est dans la gamme de longueur d'onde de la lumière visible (entre 0,4 et 0,75 μm) et Proche infrarouge (plus de 0,75 et jusqu'à environ 4 μm). L'énergie qu'il transporte Rayonnement, moyenné sur un an et sur l'ensemble de la calotte Atmosphérique, correspondant à un éclairage de 340 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$. Le bilan énergétique montre que sur cette quantité d'éclairage que le soleil apporte au système Terre plus atmosphère, environ 100 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ sont réfléchis dans l'espace; seul le reste est absorbé, un tiers par l'atmosphère, et les deux tiers par l'atmosphère absorbée par La surface de la terre [17].

Le rayonnement solaire se conçoit en deux parties :

Rayonnement global

Le rayonnement global est la somme de tous les rayonnements reçus (rayonnement direct, diffus et albedo).

Rayonnement réfléchi

C'est la partie inutile des rayonnements solaires qu'il diffuse par les obstacles atmosphériques.

III.2.1. Spectre du rayonnement

Le spectre solaire est la distribution spectrale en fonction de la longueur d'onde ou la fréquence est représentée sur la figure ci-dessous. L'énergie de chaque photon est liée à la fréquence ν où :

A : la longueur d'onde λ , elle est calculée par :

$$E = h \cdot \nu = h \cdot c / \lambda$$

h : est la constante de Planck.

c : Vitesse de propagation.

Le spectre du rayonnement extraterrestre correspond à peu près à l'émission de l'objet Noir à 5800°K. Courbe standard, compilée à partir des données collectées par les satellites appelés AM0. Sa distribution d'énergie est divisée en [18]:

- Ultraviolet UV $0.20 < \lambda < 0.38 \mu\text{m}$ 6.4%
- Visible $0.38 < \lambda < 0.78 \mu\text{m}$ 48.0%
- Infrarouge IR $0.78 < \lambda < 10 \mu\text{m}$ 45.6%

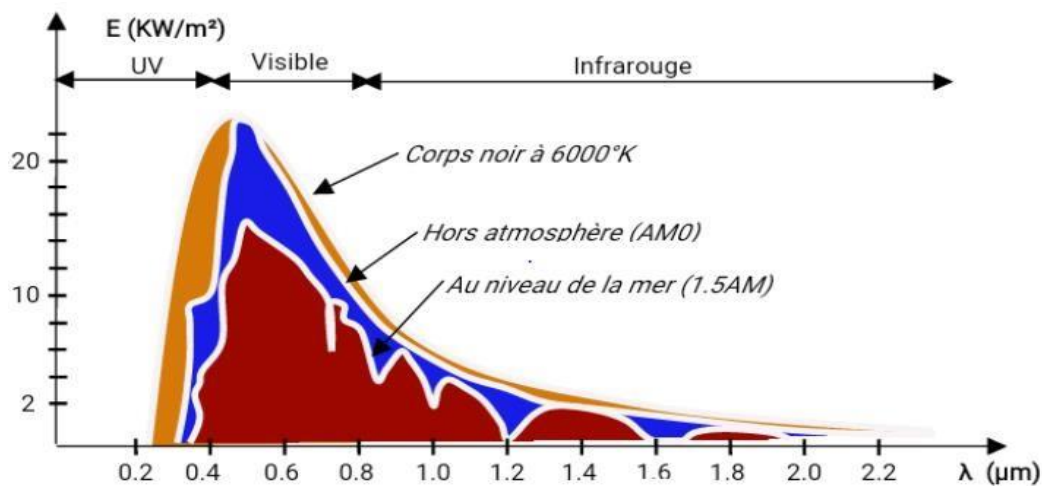


Figure III.1: Répartition spectrale du rayonnement solaire

III.3. Générateur photovoltaïque

Le générateur photovoltaïque est un ensemble d'équipements mis en place pour exploiter l'énergie photovoltaïque afin de satisfaire les besoins en charge. En fonction de la puissance désirée, les modules peuvent être assemblés en panneaux pour constituer un "champ photovoltaïque". Relié au récepteur sans autre élément, le panneau solaire fonctionne "au fil du soleil", c'est-à-dire que la puissance électrique fournie au récepteur est fonction de la puissance d'ensoleillement. Elle est donc à son maximum lorsque le soleil est au zénith et nulle à la nuit [19].

Mais, très souvent, les besoins en électricité ne correspondent pas aux heures d'ensoleillement et nécessitent une intensité régulière (éclairage ou alimentation de réfrigérateurs, par exemple). On équipe alors le système de batteries d'accumulateurs qui permettent de stocker l'électricité et de la restituer en temps voulu [19].

Un régulateur est alors indispensable pour protéger les batteries contre les surcharges ou les décharges profondes nocives à sa durée de vie. Pour un certain nombre d'applications, le courant continu produit, par le générateur photovoltaïque, est convertit à l'aide d'un onduleur en courant alternatif.

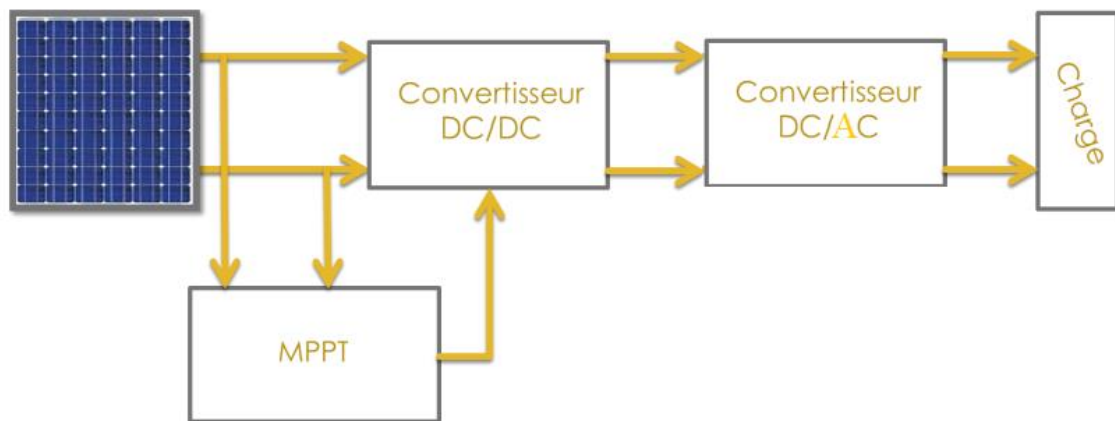


Figure III .2 : Composantes principales d'une chaîne photovoltaïque

III.4. Effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque dont le terme souvent abrégé par les lettres P et V est un phénomène physique propres à certains matériaux communément appelés les semi-conducteurs (souvent le silicium). Il est composé à partir de 3 étapes qui se résument en l'absorption de lumière par le matériau de la cellule P.V. Le transfert d'énergie des photons vers les charges électriques et finalement la collecte de charge. La puissance du champ photovoltaïque est directement proportionnelle aux nombres de cellules employées dans une installation.

Seulement, une exposition au rayonnement homogène de l' e_0 . L'ensemble de la surface est exigé pour une meilleure rentabilité. Pailleurs, l'obtention de puissance maximale peut être assurée par observation des 3 critères : l'orientation, l'inclinaison et la température. Cette dernière doit être maintenue à un niveau minimal au sein du dispositif par une ventilation important.

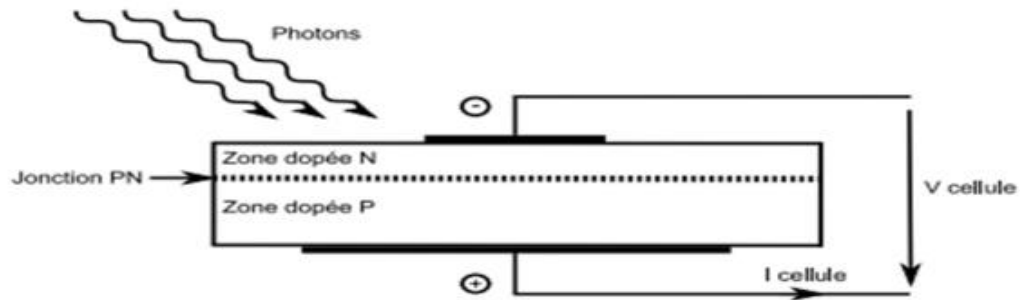


Figure III.3: Coupe transversale d'une cellule PV [20].

III.5. Différentes technologies des cellules photovoltaïques

Les cellules photovoltaïques sont constituées de semi-conducteurs à base de silicium (Si), de germanium (Ge), de sélénium (Se), de sulfure de cadmium (C_{ds}), de tellure de cadmium (C_dTe) ou d'arséniure de gallium (G_aA_s). Le silicium est actuellement le matériau le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques, car il est très abondant dans la nature. On le trouve dans la nature sous forme de pierre de silice. La silice est un composé chimique (dioxyde de silicium) et un minéral de formule SiO_2 . Il est le principal constituant des roches sédimentaires détritiques (sables, grès) [21].

Les différents types de cellules PV existants sont [22] [23] :

- Cellules en silicium monocristallin sont gris bleuté ou noir d'un aspect uniforme, rendement de 13 à 17% (Figure III.4-a) ;
- Cellules en silicium polycristallin sont bleues d'un aspect mosaïque, rendement de 11 à 15%, (Figure III.4-b) ;
- Cellule en silicium amorphe sont de rendement de 6 à 10%, (Figure III.4-c).

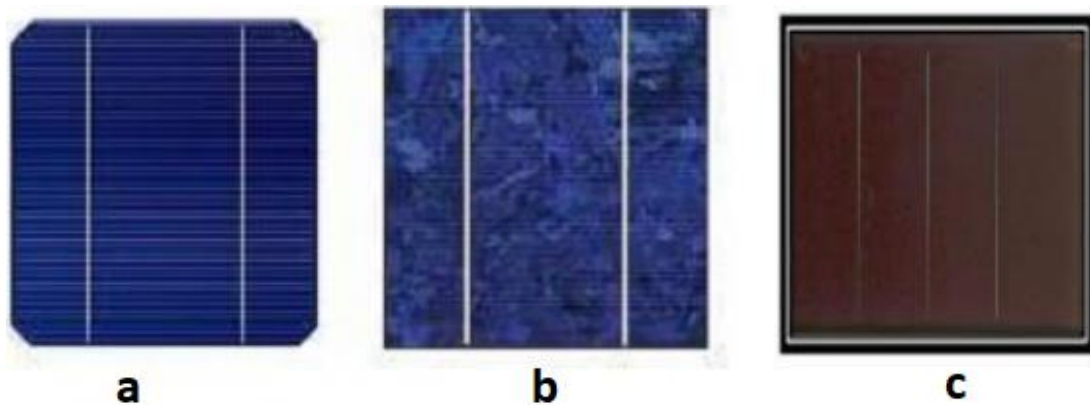


Figure III.4: Types des Cellules photovoltaïques : (a) monocristallin, (b) polycristallin, (c) amorphe

III.6. Modélisation des cellules photovoltaïques

La modélisation des cellules photovoltaïques implique nécessairement des choix judicieux Circuit équivalent. Afin de développer un circuit équivalent de cellule photovoltaïque précis, il est nécessaire de Connaître la configuration physique des éléments de la cellule et les propriétés électriques de chaque élément, plus ou moins en détail. Sur la base de cette idée, plusieurs modèles mathématiques ont été développés pour représenter le comportement fortement non linéaire, qui découle du comportement des jonctions semi-conductrices qui sous-tendent sa réalisation. Ces modèles diffèrent par le nombre de procédures mathématiques et de paramètres impliqués dans le calcul des tensions et courants des modules photovoltaïques. [24].

III.6.1. Modèle de base

Le principe de l'effet photovoltaïque n'est autre que celui d'une diode, ainsi lorsque l'on éclaire la jonction PN, la cellule étant chargée par une résistance, on observe l'apparition d'un courant " I " traversant une charge R_{ch} , et une tension " V " au borne de cette charge

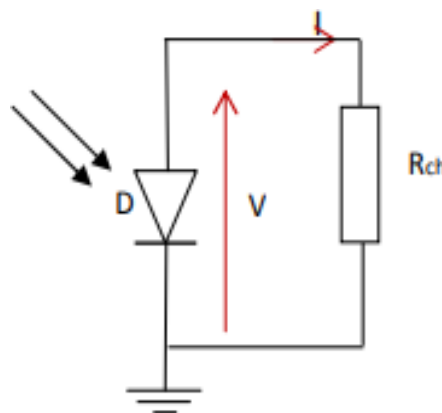


Figure III.5: Schéma d'application de l'effet photovoltaïque [25].

III.6.2. Modèle idéal

C'est le modèle le plus simple pour représenter une cellule solaire car il ne considère que le phénomène de diffusion (Figure III.6). Le circuit équivalent simplifié de la cellule solaire est Il se compose d'une diode et d'une source de courant en parallèle. La source actuelle Une photo courante I_{ph} est générée, qui est proportionnel à l'éclairement solaire E . L'équation III-2 courant-tension pour le circuit équivalent simplifié est régie par la loi de Kirchhoff (première loi de Kirchhoff : entrée et sortie d'un point est égal à zéro) :

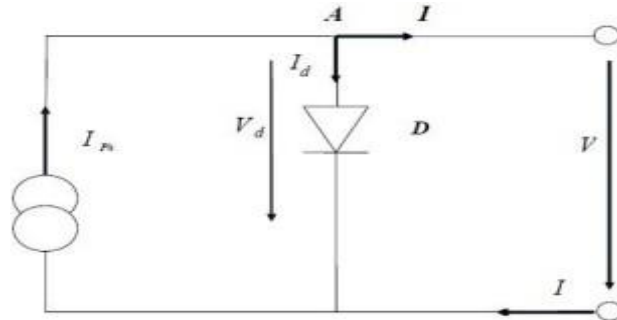


Figure III.6 : Circuit équivalent simplifié d'une cellule solaire

$$I = I_{ph} - I_d \quad (III.1)$$

Avec :

$$I_d = I_s \left(e^{\frac{v}{m \cdot v_t}} - 1 \right), \quad v_t = \frac{k \cdot T}{q} \quad (III.2)$$

Donc l'équation du courant délivré par une cellule photovoltaïque est décrite comme :

$$I = I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{v}{m \cdot v_t}} - 1 \right) \quad (III.3)$$

Avec :

I_{ph} : Photo courant

I_d : Courant de diode.

I_s : Courant inverse de saturation de la diode

m : Facteur d'idéalité de la diode, $m = 1 \dots 5$.

v_t : Tension thermique.

k : La constante de Boltzmann ($1.38 \cdot 10^{-23}$ Joules/Kelvin).

q : La charge d'un électron = $1,6 \cdot 10^{-19} C$

III.6.3. Modèle avec pertes ohmiques (R_s model)

Le deuxième modèle prend en compte la résistivité du matériau et en raison de Le niveau de contact, qui représente mieux le comportement électrique de la cellule que le modèle idéal. Ces pertes sont représentées par la résistance série R_s dans le circuit équivalent illustré ce qui suit :

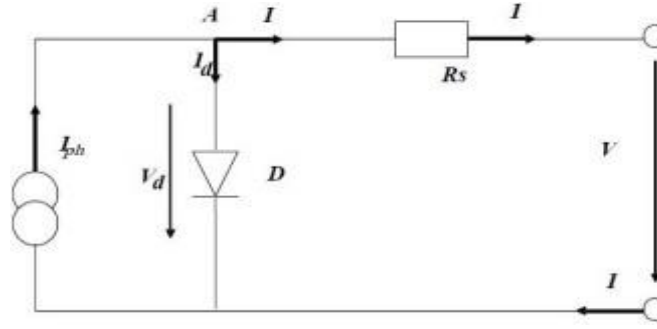


Figure III.7: Circuit équivalent d'une cellule solaire, modèle avec R_s [26].

Après analyse du circuit, l'équation courant tension est donnée comme :

$$I = I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{v+I.R_s}{m.v_t}} - 1 \right) \quad (\text{III.4})$$

Avec :

R_s : Résistance série qui tient compte des pertes en tension dues aux contacts externes.

III.6.4. Modèle à une diode

C'est le modèle sur lequel les fabricants s'appuient pour fournir les caractéristiques techniques des cellules solaires (data Sheets). Il est également considéré comme satisfaisant et même comme une référence pour les fabricants pour classer les modules solaires. Il prend en compte non seulement la perte de tension représentée par la résistance série R_s , mais également la fuite de courant représentée par la résistance parallèle R_p (voir figure 8).

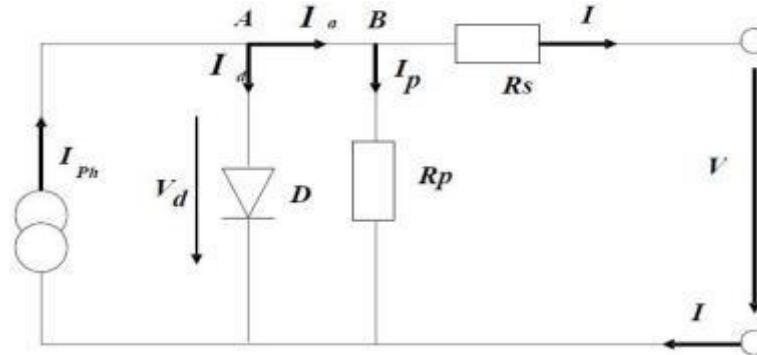


Figure III.8: Circuit équivalent d'une cellule solaire, modèle à une diode [27].

Remarque : La résistance parallèle R_p est en générale très élevée, et lorsqu'elle est trop faible, la cellule solaire ne donnera plus de tension sous faible éclairement.

$$I = I_{ph} - I_d - I_p \quad (\text{III.5})$$

$$I_d = I_s \left(e^{\frac{v+I.R_s}{m.v_t}} - 1 \right) \quad (\text{III.6})$$

$$I_p = \frac{V_d}{R_p} = \frac{V+I.R_s}{R_p} \quad (\text{III.7})$$

$$I = I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{v+I.R_s}{m.v_t}} - 1 \right) - \frac{V+I.R_s}{R_p} \quad (\text{III.8})$$

Avec :

R_p : Résistance parallèle simulant les pertes en courant de la cellule solaire.

l'équation (III.8) en termes de I et V n'est pas tellement facile à résoudre comparativement à l'équation du circuit équivalent simplifié. Par conséquent une méthode numérique (Newton-Raphson) doit être appliquée.

III.7. Caractéristiques électriques photovoltaïques

Pour réaliser cette simulation, nous avons choisi un groupe des modules photovoltaïques 1sth-215-pde Solaire. La série 1sth Solaire fournit une puissance photovoltaïque rentable destinée à un usage général par exploitation directe des charges à courant continu, ou des charges à courant alternatif sur les systèmes munis d'onduleur [28]. Le générateur choisi est composé de 8 modules connectés en série et 7 modules connectés en parallèle. Les caractéristiques électriques de module photovoltaïque sont données

III.1. Caractéristiques électriques du module photovoltaïque 1sth-215-pde

PV model	1STH-215-P
Short circuit current (Isc)	7.84 A
Open circuit voltage (Voc)	36.3 V
Maximum Voltage (Vmpp)	29 V
Maximum current (Impp)	7.35 A
Maximum power (Pmpp)	213.15 W
Number of cells in series (Ns)	60
Temperature coefficient of Isc	-0.3609%/°C
Temperature coefficient Voc	0.102%/°C
Diode ideality factor (A)	0.98117
Series resistance (Rs)	0.39383Ω
Shunt resistance (Rsh)	313.3991Ω

III.8. Protections classiques d'un générateur photovoltaïque

Lorsque nous concevons une installation photovoltaïque, nous devons assurer la protection électrique de cette installation afin d'augmenter sa durée de vie en évitant notamment des pannes destructrices liées à l'association des cellules et de leur fonctionnement en cas d'ombrage. Pour cela, deux types de protections sont classiquement utilisés dans les installations actuelles [29] :

- ❖ La protection en cas de connexion en parallèle de modules PV pour éviter les courants négatifs dans les GPV (diode anti-retour).
- ❖ La protection lors de la mise en série de modules PV permettant de ne pas perdre la totalité de la chaîne (diode by-pass) et éviter les points chauds.

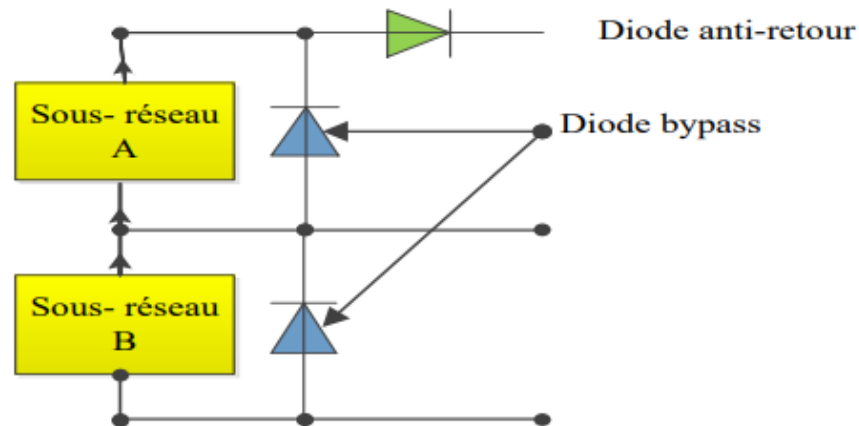


Figure III.9: Schématisation d'un GPV élémentaire avec diodes by-pass et diode anti-retour [29].

III.9. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

III.9.1. Inconvénients

La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.

Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % avec une limite théorique pour une cellule de 28%. Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs Par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.

Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru.

III.9.2. Avantages

D'abord une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.

Ensuite le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au Mégawatt.

Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.

La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.

III.10. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fait une étude superficielle sur l'énergie solaire photovoltaïque, où nous avons brièvement discuté défini la cellule photovoltaïque dans quelques titres, similaires à ses types, le principe de son travail. Et nous avons également mentionné les caractéristiques des modules photovoltaïques et les paramètres essentiels caractérisant les cellules photovoltaïques. Enfin, nous avons modélisé un générateur photovoltaïque (GPV) en préparation du chapitre suivant, qui est la modélisation de la chaîne de conversion photovoltaïque

Chapitre IV

Résultats de Simulation et Discussions

IV.1 Introduction

En raison de l'intégration de charges non linéaires dans le réseau, le rôle principal d'un système photovoltaïque est non seulement de capter le maximum d'énergie solaire, mais également de contribuer à l'amélioration de la qualité de l'énergie (filtrage des harmoniques).

Dans ce chapitre, nous nous intéressons tout d'abord à la commande des puissances active et réactive injectées par un système photovoltaïque au réseau électrique via un onduleur de tension à MLI. Ensuite, une stratégie de filtrage actif est proposée pour améliorer la qualité d'énergie du réseau électrique. Cette tâche est réalisée à l'aide d'un FAP qui permet de compenser les harmoniques générés par une charge non linéaire.

IV.2 Commande et amélioration de la qualité d'énergie

Le schéma du système étudié est illustré par la figure (IV.1). Il est composé d'un champ PV de 100 kW, d'un onduleur PWM triphasé couplé au réseau électrique et d'une charge non linéaire de 50 kW, connectée à ce même réseau au Point de Connexion au Réseau (PCR).

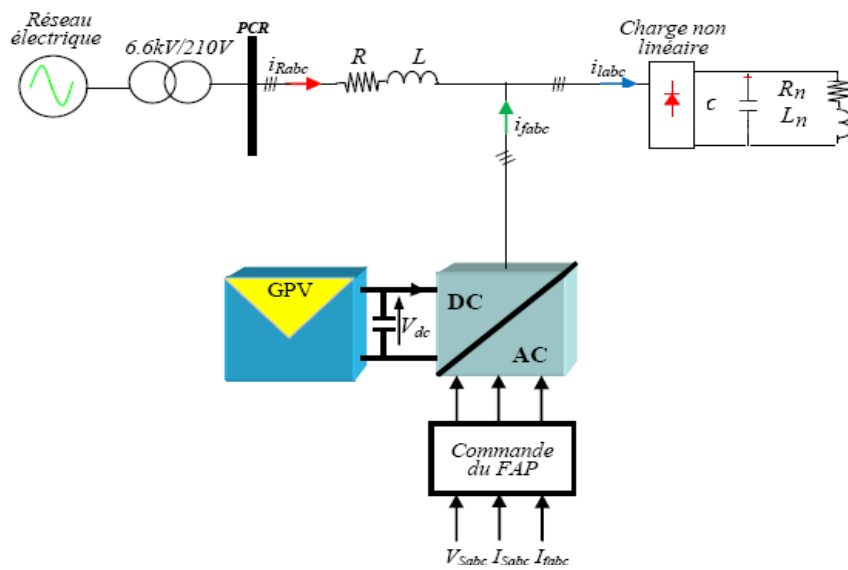


Figure IV.1 Schéma du système

IV.3 Simulations et discussions

IV.3.1 Caractéristiques globales du champ PV étudié

Le champ photovoltaïque simulé est constitué de 50 branches parallèles de 20 modules en série chacune. La Figure IV.2 montre les caractéristiques courant-tension et puissance-tension du champ photovoltaïque étudié fonctionnant dans des conditions standard de température (25 °C) et d'éclairement (1000 W/m²).

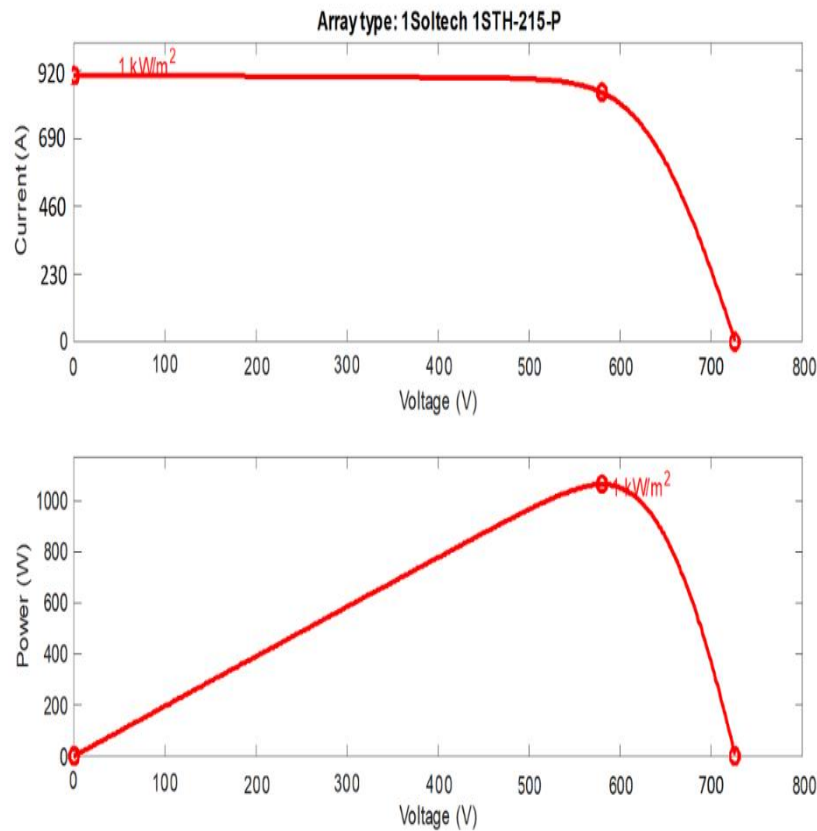
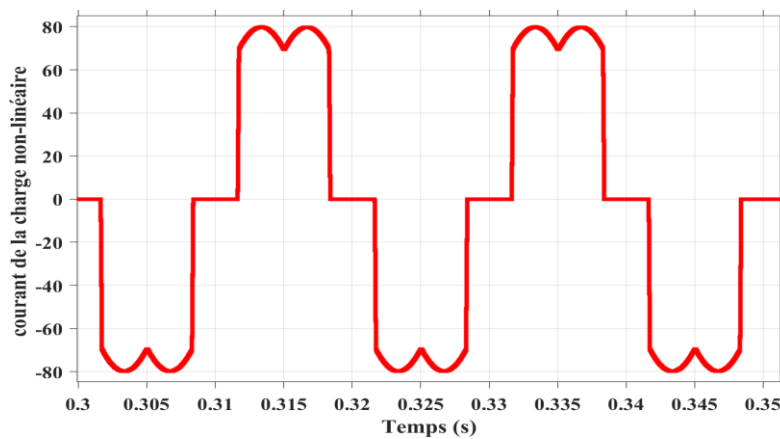


Figure IV.2: Caractéristiques courant-tension et puissance-tension $E_s=1000 \text{ W/m}$ et $T=25^\circ \text{C}$.

IV.3.2 Caractéristique de la charge non linéaire étudiée

Par définition, une charge linéaire absorbe un courant sinusoïdal lorsqu'elle est soumise à une tension sinusoïdale. En effet, le courant absorbé par cette charge est constitué d'une composante fondamentale et d'une composante harmonique à identifier, voir figure (IV.3). Dans ces conditions, le taux de distorsion du courant harmonique de la charge non linéaire est ($\text{THD}=30,65\%$).



(a)

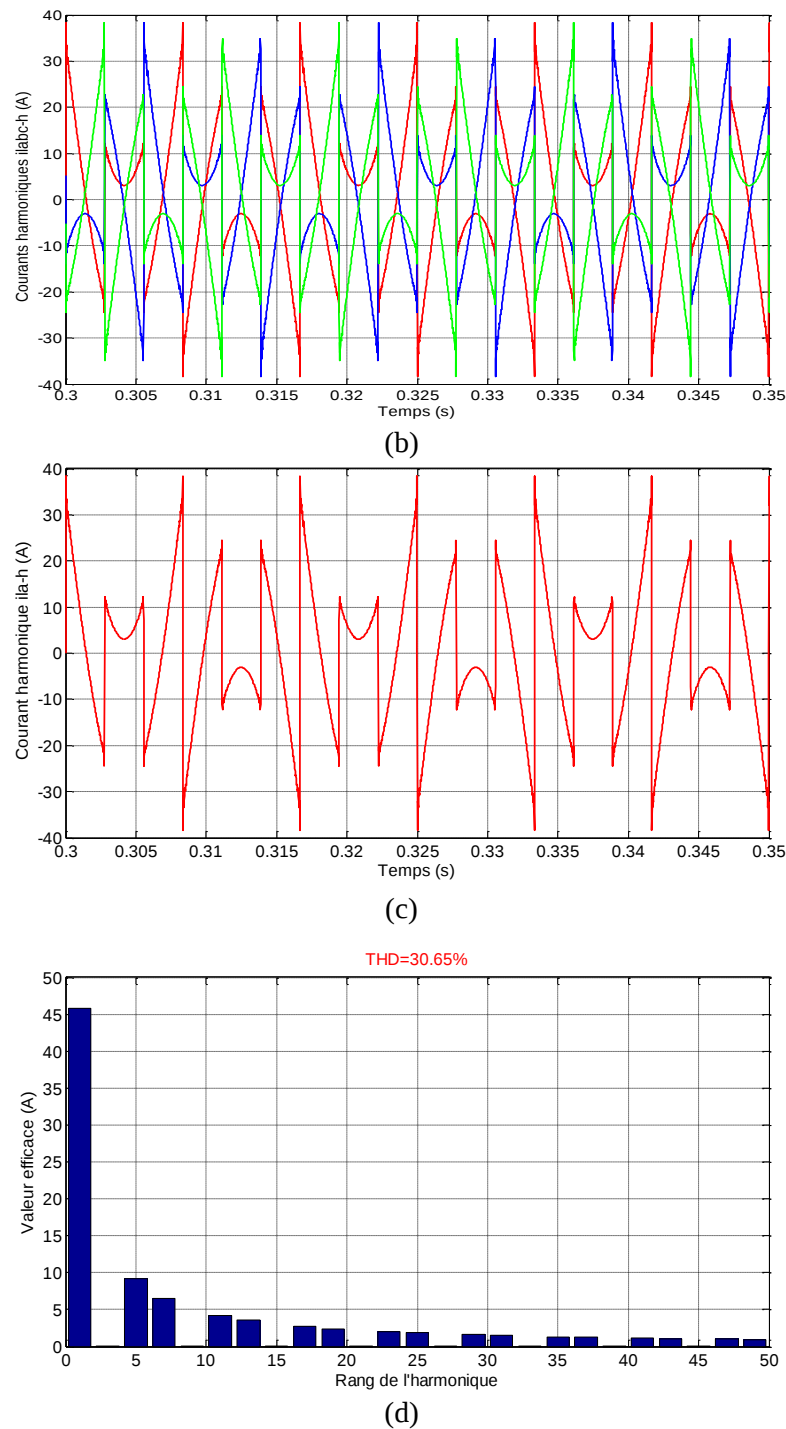


Figure IV.3. Caractéristique de la charge non linéaire connectée au réseau :

- (a) : Courant de charge non linéaire i_{la}
- (b) : Courant harmonique i_{labc-h}
- (c) : Courant harmonique i_{la-h}
- (d) : Spectre harmonique du courant i_{la}

IV.3.3 Méthode d'identification des harmoniques du courant

Vue sa simplicité et son efficacité, le Filtre Passe Bas (FPB) a été utilisé dans cette étude pour identifier les harmoniques de courant de la charge non linéaire.

Alors, les composantes i_{ldh} et i_{lqh} des courants harmoniques de la charge non linéaire, exprimées dans le repère (dq) sont extraits à l'aide d'un FPB, comme l'illustre la figure (IV.4). Pour effectuer le filtrage actif, ces courants harmoniques identifiés (i_{ldh} , i_{lqh}) doivent être ajoutés aux courants de référence (i_{dref} , i_{qref}) avec un signe moins à l'entrée des régulateurs de courants (voir figure IV.5).

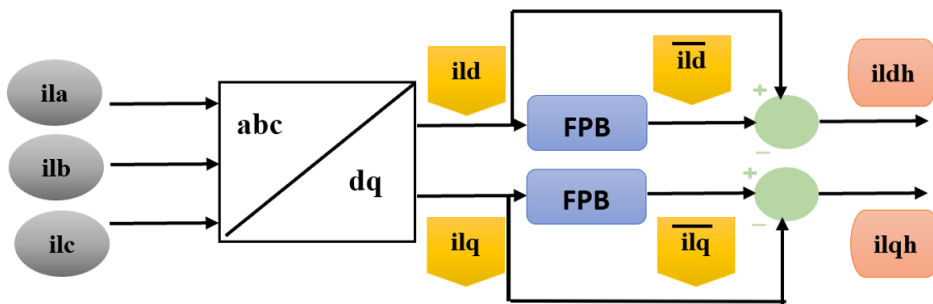


Figure IV.4 : Méthode de l'extraction des courants harmoniques d'une charge non linéaire

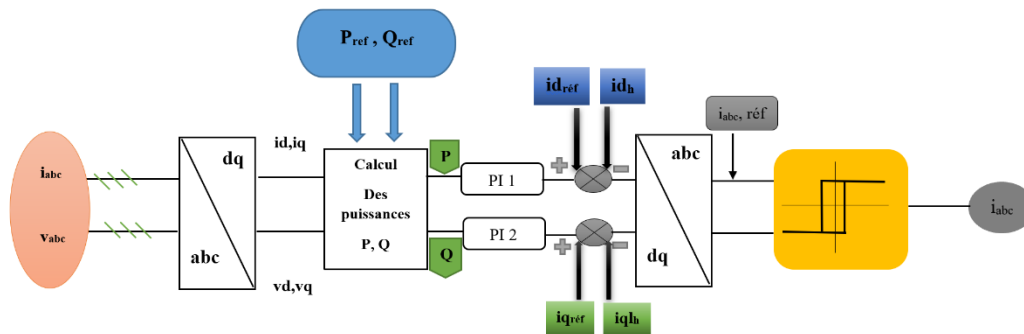


Figure IV.5 : Schéma de commande du système étudié

IV.3.4 Résultats de simulation et interprétation

Dans cette section, nous allons présenter et discuter les résultats de simulation d'un système photovoltaïque de 100 kW connecté au réseau électrique munie d'une stratégie de filtrage (FAP) et fonctionnant en mode MPPT dans des conditions standard de température (25 °C) et d'éclairement (1000 W/m²). Nous allons montrer via ces résultats de simulation la performance de la stratégie de filtrage en termes d'atténuation des harmoniques de la charge non linéaire, et d'amélioration du TDH du courant injecté au réseau.

IV.3.4.1 Cas du système étudié en absence de la charge non linéaire

Dans ce cas, nous avons choisi une référence de puissance active égale à la puissance maximale convertie aux pertes de la ligne prés, et une puissance réactive de référence nulle comme l'illustre la figure (IV.6). En absence de la charge non linéaire, les résultats de simulation sont présentés par la figure (IV.7). Nous remarquons que l'allure du courant injecté au réseau est pratiquement sinusoïdale (voir figure IV.7.c). En effet, le spectre harmonique de ce même courant, comme indiqué sur la figure (IV.7.d), est d'un TDH faible de 2.27%.

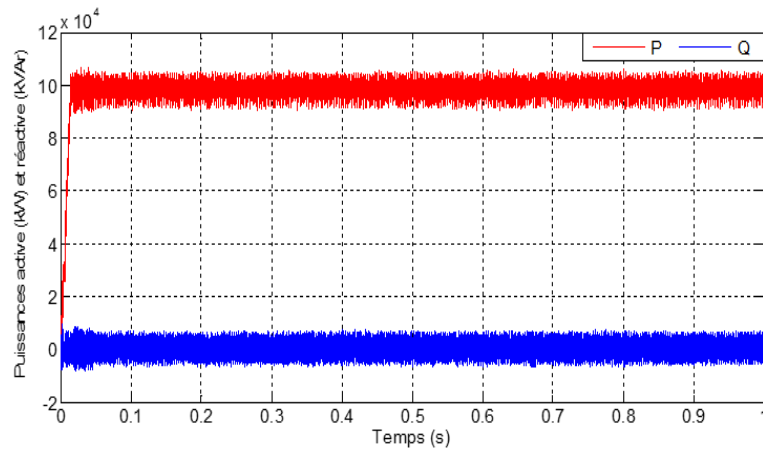
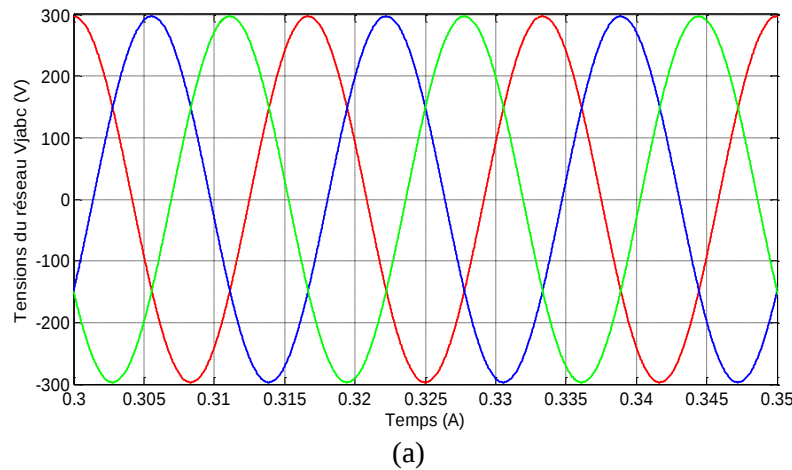


Figure IV.6 : Les puissances active et réactive injectées au réseau



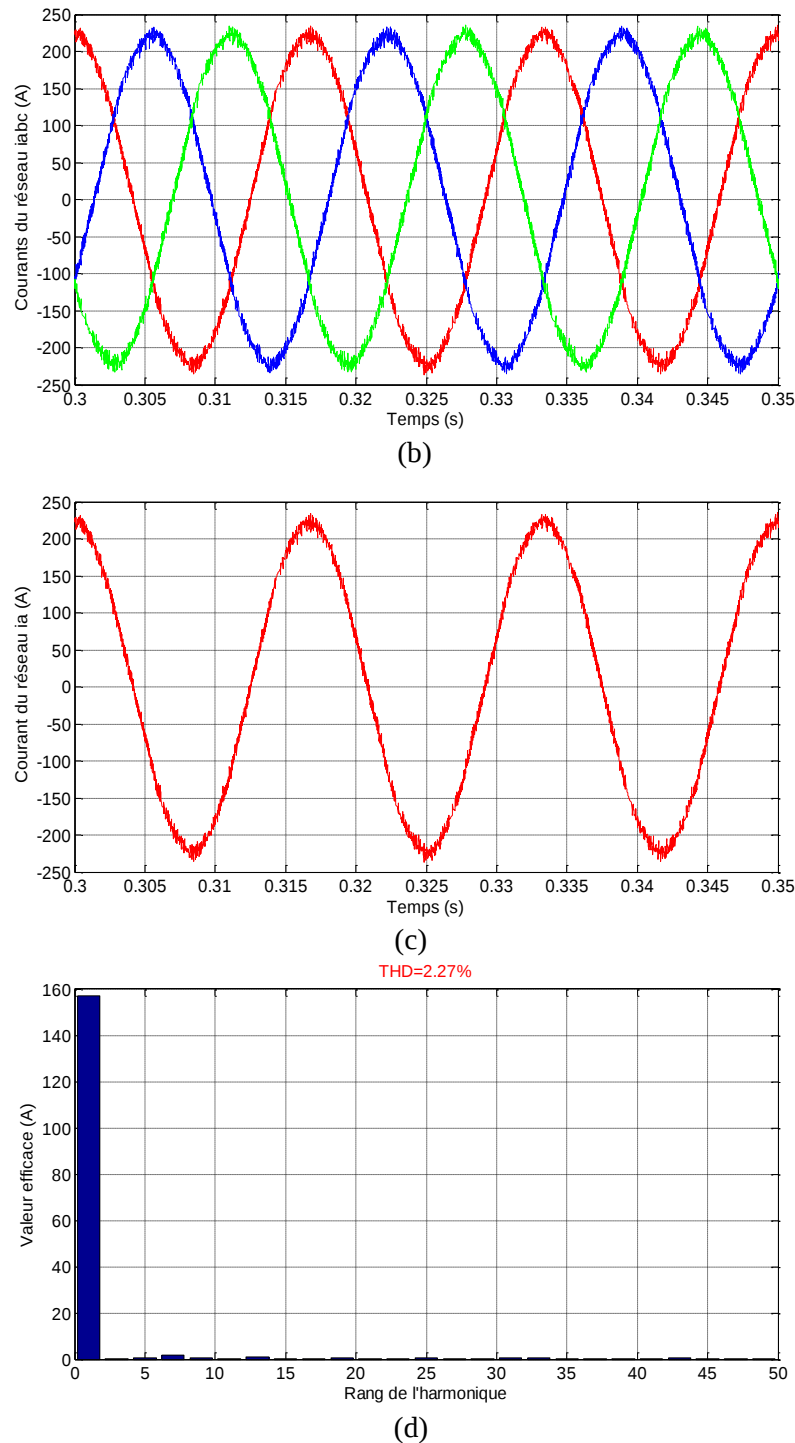


Figure IV.7 : Résultats de simulation du système étudié en absence de la charge non linéaire

(a) : Les tensions du réseau

(b) : Les courants du réseau

(c) : Courant du réseau (une seule phase)

(d) : Spectre du courant de réseau

IV.3.4.2 Cas du système étudié en présence de la charge non linéaire sans filtrage actif

Pour étudier cette situation, une charge non linéaire (R_n , L_n) d'une puissance de 50 kW est couplée directement au PCR. Elle est donc alimentée par le réseau et absorbe un courant illustré par la figure (IV.3). Dans ce cas, la figure (IV.8.a) représente l'allure

déformée du courant de réseau qui n'est pas parfaitement sinusoïdale, ceci est dû à la présence de la charge non linéaire. En effet, le TDH du courant injecté par l'onduleur au réseau sans opération de filtrage (absence de filtrage actif) est trop élevé, il est de 8.41%, comme l'indique la figure (IV.8.b).

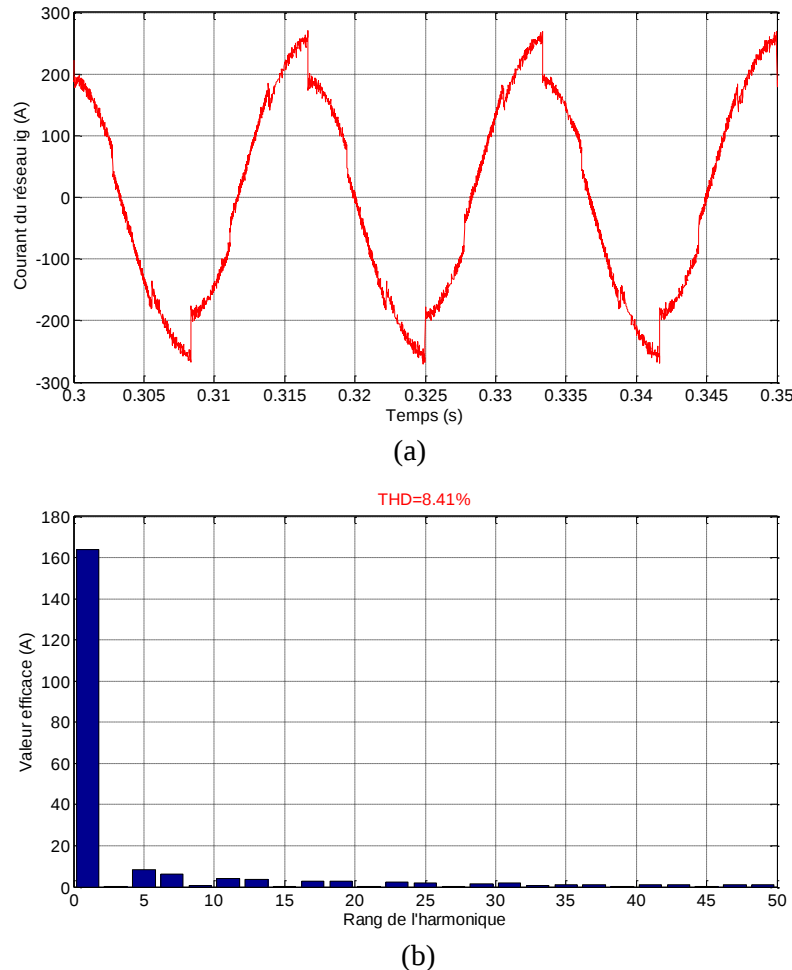


Figure IV.8 : Résultats de simulation du système étudié en présence de la charge non linéaire sans filtrage actif

(a) : Courant du réseau

(b) : Spectre de courant du réseau

IV.3.4.3 Résultat de simulation en présence de la charge non linéaire avec filtrage actif

Afin d'évaluer la performance de l'association du FAP, en termes de filtrage actif, des simulations ont été effectuées sur le système étudié dans les mêmes conditions de fonctionnement précédentes. L'objectif principal est de filtrer les harmoniques des courants de la charge non linéaire qui provoque un TDH de 8.41% sur le courant injecté par l'onduleur au réseau. D'après les figures (IV.9.a et b), les harmoniques de la charge non linéaire sont compensés convenablement par l'opération de filtrage actif. En effet, le TDH du courant de réseau a été réduit de 8.41% à 4.39 %, qui vérifié la limite définie par la norme standard IEEE 519 qui est de 5%. Dans ce cas, les valeurs efficaces du 5ème et 7ème harmoniques

ont été réduites de 8.39 A à 2.16 A et de 6.06 A à 2.62 A respectivement. Ceci montre clairement l'apport de ce filtrage actif en termes d'amélioration de la qualité d'énergie injectée au réseau.

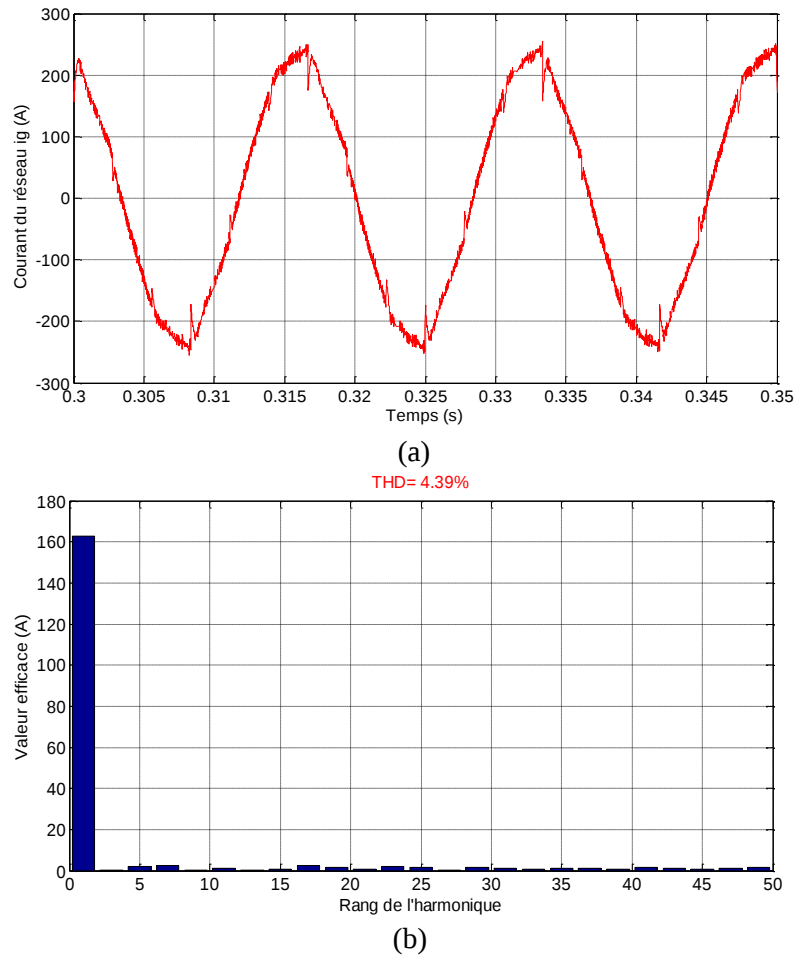


Figure IV.9 : Résultat de simulation étudiée en présence de la charge non linéaire avec l'opération du filtrage actif
 (a) : Courant du réseau
 (b) : Spectre du courant de réseau

IV.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons traité l'amélioration de la qualité d'énergie de ce système du étudié via un FAP des harmoniques de courant générés par une charge non linéaire.

Les résultats de simulation ont montré la bonne performance de ce filtre en termes de compensation des harmoniques de basses fréquences. Ceci nous a permis de réduire le TDH du courant injecté au réseau pour respecter la norme concernant les limites requises pour l'interconnexion.

Conclusion Générale

Dans ce mémoire filtrages des harmoniques, nous sommes intéressés principalement à la contribution d'un système photovoltaïque à l'amélioration de la qualité d'énergie (filtrage actif des courants harmoniques présents sur le réseau électrique) par le biais d'un filtre actif parallèle.

Le système PV étudié est un champ de 100 kW connecté à un réseau électrique de haute tension (6.6 kV). Pour ce faire, nous avons structuré le contenu du mémoire en quatre chapitres.

Dans les premiers chapitres, nous avons présenté les différentes sources de pollution des réseaux électriques, leurs conséquences sur le réseau et l'ensemble du matériel électrique ainsi que les différentes méthodes de dépollution proposées dans littérature et la partie commande qui consiste d'abord en l'identification des courants harmoniques générés par la charge non linéaire ainsi que les techniques de modulation, MLI et par hystérésis pour la commande l'onduleur.

L'essentiel du travail, qui a été accompli dans ce mémoire, est donné dans le dernier chapitre, où différents cas de fonctionnement d'un champ photovoltaïque connecté à un réseau électrique ou connecté à une charge non linéaire connectée à ce même réseau via un onduleur de tension triphasé à MLI ont été discutés. Pour identifier les harmoniques des courants de la charge non linéaire, un filtre passe bas a été utilisé.

De plus, nous avons proposé une procédure de filtrage des harmoniques de courant de la charge non linéaire en se basant sur un filtre actif shunt assuré par l'onduleur lui-même. Ce chapitre a été clôturé par quelques résultats de simulation montrant l'efficacité de ce type de filtrage en termes de dépollution du courant de réseau et d'amélioration de la qualité d'énergie, notamment dans le cas de l'injection de la puissance maximale au réseau.

En perspective, il serait intéressant de reprendre le travail en vue de son amélioration par l'emploi d'autres techniques d'identification et de filtrage et de comparer les différentes méthodes. Il serait également très intéressant d'implémenter ses procédures de filtrage.

RÉFÉRENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] M.A.E. Alali « Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension » Thèse de l'Université Louis Pasteur – Strasbourg I, 12 Septembre 2002.
- [2] Y. ABDELLI « Etude et Commande De Convertisseurs Statiques Multifonctions en Vue de L'amélioration de la Qualité de L'énergie électrique » Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes, 22 Juin 2005.
- [3] I. AMIMOUR La machine synchrone comme compensateur d'harmonique, 2008.
- [4] A. Unsal « A DSP Controlled Resonant Active Filter for Current Harmonic Mitigation in Three-Phase Power Systems » Oregon State University Ph.D. Thesis, 2000.
- [5] T. BENSLIMANE, « Commande numérique d'un filtre actif parallèle autonome » mémoire de magister de l'école militaire poly technique 2004.
- [6] T. GHENNAM « Etude et Réalisation d'un Compensateur Actif de Puissance Commandé par DSP. » mémoire de magister de l'école militaire poly technique 2004.
- [7] Fateh Karim and Soumia Kerrouche, "Three-phase active power filter based on fuzzy logic," International Journal of Sciences and Techniques, Vol. 3, No.1, July 2009, pp. 942-955.
- [8] M.C. Benhabib, « Contribution à l'étude des différentes topologies et commandes des filtres actifs parallèles à structures tension », UHP - Nancy I, Thèse de Doctorat, 2004.
- [9] H. Salem, « Commande d'un Filtre Actif Parallèle à 4 bras par des techniques avancées », Université de Biskra, Mémoire de Magister, 2015.
- [10] M.M. Abdouslam, « Structures et stratégies de commande des filtres parallèles et hybrides avec validations expérimentales. », UHP – Nancy I, Thèse de Doctorat, 2008.
- [11] M.A.E. Alali, Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension, Thèse de doctorat de l'Université Louis Pasteur Strasbourg, France, (2002).
- [12] Allai Mohamed Alaa Edin, "Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques", Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur ULP, 2002.

- [13] H. Akagi, Y. Kanazawa and A. Nabae, "Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuits", in Proceeding International Power Electronics Conference. Tokyo, Japan, pp. 1375-1386, 1983.
- [14] Chennai Salim, "Etude, modélisation et commande des filtres actifs : Apport des Techniques de l'intelligence artificielle", Thèse Doctorat, Université Mohamed Khider Biskra, 2013.
- [15] Mesbahi Nadir, "Contribution à l'étude des performances des onduleurs multiniveaux sur les réseaux de distribution", Thèse de Doctorat, Université Badji Mokhtar Annaba, 2014.
- [16] M.C. Benhabib, "Contribution à l'étude des différentes topologies et commandes des filtres actifs parallèles à structure tension ", Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, Décembre 2004.
- [17] José Miguel Navarro « Cellules Photovoltaïques Organiques Transparentes Dans Le Visible ». Thèse de doctorat. Université Toulouse III - Paul Sabatier, 2008.
- [18] Mihi Sana « comparaison par simulation numérique entre les caractéristiques électriques d'une cellule solaire en Si et une autre en Si intégrée sur un substrat en Gas », Thèse de Magister, université de Biskra, 2012.
- [19] S. Masoum et al., Microprocessor-controlled new class of optimal battery chargers for photovoltaic application, Vol. 19, September 2004.
- [20] B. Flèche, D. Délignes, « Energie solaire photovoltaïque.doc », juin 2007.
- [21] B. Flèche, D. Délignes, « Energie solaire photovoltaïque », STI ELT, juin 2007, www.itismajo.it/fff/.../Energie_solaire_photovoltaique.pdf, consulté janv. 2014.
- [22] David Sanz Morales, «Maximum Power Point Tracking Algorithms for Photovoltaic Applications», Faculty of Electronics, Communications and Automation, Thesis submitted for examination for the degree of Master of Science in Technology, Aalto University, Finland, 2010.
- [23] F. Guessoumi, Saadi A « Commande de panneau solaire à l'aide d'une carte à pic », Mémoire ingénieur, université de Biskra, 2010.
- [24] MEZIANI Zahra, « *MODELISATION DE MODULES PHOTOVOLTAIQUES* », Mémoire de Magister, UNIVERSITE DE BATNA, 2012.
- [25] A. Saadi, "Etude comparative entre les techniques d'optimisation des systèmes de pompage photovoltaïque," Université de Biskra Mémoire de Magister, 2000.
- [26] A. Mokhtar - H. Melloul, « Etude d'un système de pompage photovoltaïque », Thèse de Master II, Universitaire Belhadj Bouchaïb d'Ain-Temouchent, 2017.

- [27] MEZIANI Zahra, « *MODELISATION DE MODULES PHOTOVOLTAIQUES* », Mémoire de Magister, UNIVERSITE DE BATNA, 2012.
- [28] Boucler Hacene Omar « Modélisation et commande d'un système de stockage photovoltaïque », Mémoire de Magister, Energies Renouvelables, Université Abou-Bakr Belkaid, Tlemcen., 2010/2011.
- [29] A.C. Pastor, "Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques," Institut National de Science Appliquée de Toulouse Thèse de doctorat.

Annexe

Le schéma block d'un réseau électrique connecté d'une charge non linéaire

