

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A. MIRA –Bejaia.



Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique

Mémoire de Fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme de MASTER en Electromécanique
Option : Electromécanique

Commande directe de puissance dédiée au Filtrage Actif Associé à un système Photovoltaïque

Présenté par :

Melle BENSMAIL Rabha

Melle HADDAD Merissa

Encadré par :

Mme BELAID Sofia

Mr DJOUDI OUALID

Année universitaire : 2022 / 2023

Remerciement

Nous tenons tout d'abord à remercier **Dieu** le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce Modeste travail.

En second lieu, nous voudrions adresser toute nos gratitudee à notre promotrice, Madame **BELAID Sofia**, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses conseils judicieux, qui ont contribué à alimenter notre réflexion. Et aussi pour Monsieur **DJOUDI Oualid** pour ses efforts et sa patience et son soutien est inoubliable.

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury, pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Merci



Dédicaces

Je dédie cette humble mémoire à mes chers parents, qui ont été mes piliers, ma source de soutien et d'inspiration tout au long de mon parcours. Leur amour inconditionnel, leurs encouragements et leurs sacrifices ont été les fondations sur lesquelles j'ai pu construire mes rêves et atteindre mes objectifs. Leur présence a toujours été une source de réconfort et de motivation pour moi, et je suis profondément reconnaissante de les avoir à mes côtés.

À mon fiancé Amirouche ton soutien indéfectible et ta compréhension. Ta présence m'a apporté une stabilité et une inspiration constantes. Cette dédicace est un témoignage de ma gratitude pour tout ce que tu représentes pour moi.

À mon frère Hassan et mes sœurs Samia, Noura, Souad, Sabrina vous êtes ma famille et mes meilleurs amis. Votre soutien indéfectible, vos encouragements et votre amour inconditionnel m'ont poussée à donner le meilleur de moi-même. Vous êtes mes alliés dans les moments de joie comme dans les moments de difficulté, et je suis honorée de vous avoir à mes côtés. A mes nièces adorables Linda, Rana, Merieme et mes niveau Yanis, Abdallah, Adel, Ghiles, Wahib et Cherif. Cette dédicace est un hommage à notre lien familial précieux et à notre amour mutuel.

À mes chères copine Amel, Sarah, Massissilia, Lidia et ma chère cousine Nadjat votre présence dans ma vie a été une bénédiction. Votre amitié sincère, vos encouragements constants et votre soutien inconditionnel m'ont apporté de la joie et de la force. Vous avez été là pour moi à chaque étape, et je suis profondément reconnaissant(e) d'avoir des amies aussi merveilleuses et fidèles. Cette dédicace est un témoignage de notre amitié précieuse qui restera gravée dans mon cœur pour toujours.

A ma chère belle famille BEZTOUH. Je suis profondément honorée d'avoir une belle famille aussi aimante et attentionnée, et je suis infiniment reconnaissante pour tout ce que vous avez fait pour moi.

Bien sur a ma binôme Merissa, notre collaboration a été une véritable bénédiction tout au long de cette aventure académique. Ton engagement, ta volonté de travailler ensemble et ta passion pour l'apprentissage ont été des éléments clés de notre réussite commune. Je suis reconnaissante d'avoir eu la chance de t'avoir comme binôme.

Toute la promotion ELM 2022/2023 Aux personnes qui m'ont toujours aidé et encouragé, qui étaient toujours à mes côtés, et qui m'ont accompagné durant mon chemin d'études supérieures.

RABHA

Dédicace

A la femme qui a souffert sans me laisser souffrir, qui n'a jamais dit non à mes exigences et qui n'a épargné aucun effort pour me rendre heureuse : mon adorable mère, En ce jour où j'achève mon parcours universitaire, je tiens à te dédier ce mémoire avec une gratitude infinie. Depuis le tout début, tu as été mon plus grand soutien, ma source d'inspiration et ma force inébranlable.

A mon très cher père merci pour ton amour inconditionnel, ton soutien indéfectible et pour tes sacrifices. Votre confiance en moi m'a permis d'atteindre cette étape importante de ma vie académique. Je vous suis éternellement reconnaissante.

À ma chère sœur WISSAM, à mes adorables frères JIGUO et SALIM, merci pour vos encouragements, votre présence et pour les moments de détente bien mérités. Vos rires et vos soutiens m'ont aidé à garder le cap tout au long de cette aventure.

A mon Mari RIAD j'adresse cette dédicace avec toute ma reconnaissance éternelle. Ton soutien indéfectible restera à jamais gravé dans mon cœur, et je suis honorée de pouvoir partager cette réussite avec toi.

A mes très chers amis : KENZA, CELIA, LYDIA Vous avez été là à mes côtés, me rappelant que je n'étais pas seule dans cette aventure académique. Vos encouragements sincères, vos discussions inspirantes et nos échanges d'idées ont contribué à élargir mes horizons et à approfondir ma compréhension de mon domaine d'étude.

A ma binôme RABHA merci pour ta patience pour le moment qu'on a partagé ensemble. À toutes les personnes qui ont participé à mon étude en tant que participants ou répondants, votre contribution a été essentielle pour la réalisation de ce travail. Vos perspectives ont enrichi mes recherches et ont donné une valeur significative à mes résultats.

MERISSA

Table des matières

Liste des abréviations

Liste des tableaux

Liste des figures

Introduction générale 1

CHAPITRE I: Généralités sur le système photovoltaïque

I.1 Introduction 3

I.2 Energie solaire 3

I.3 Rayonnement solaire 3

I.3.1 Rayonnement direct 4

I.3.2 Rayonnement diffus 4

I.3.3 Rayonnement réfléchi 4

I.3.4 Rayonnement global 4

I.5 La cellule photovoltaïque 4

I.5.1 Type de cellule photovoltaïque 5

I.5.2 Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque 6

I.5.3 Association des cellules photovoltaïque 6

I.5.4 Caractéristique d'un panneau photovoltaïque 7

I.5.5 Paramètre d'une cellule photovoltaïque 7

I.6 Protection de panneau photovoltaïque 8

I.7 Avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques 9

I.7.1 Avantages 9

I.7.2 Inconvénients 9

I.8. Les convertisseurs statiques dans les installations PV 9

I.8.1 Convertisseur DC-DC (hacheur) 9

I.8.2 Convertisseur DC-AC (onduleur) 10

I.9 Optimisation de l'énergie photovoltaïque 10

I.10 Application de l'énergie photovoltaïque 10

I.10.1 Système autonome 10

I.10.2 Système hybride 11

I.10.3 Système raccordé au réseau 11

I.11 Qualité de l'énergie électrique envoyée au réseau 12

| | | |
|--|--|----|
| I.12 | Problématiques d’harmoniques | 13 |
| I.12.1 | Caractérisations d’harmoniques | 13 |
| I.12.2 | Types d’harmoniques | 15 |
| I.12.3 | Effets des harmoniques sur les réseaux électriques | 15 |
| I.12.4 | Norme d’harmoniques | 16 |
| I.12.5 | Solution pour amélioration de qualité d’énergie électrique | 17 |
| I.13 | Filtre actif | 18 |
| I.13.1 | Filtre actif parallèle | 18 |
| I.13.2 | Principe de fonctionnement de filtre actif | 18 |
| I.13.3 | Structure globale de filtre actif | 19 |
| I.13.4 | Les avantages et inconvénients de filtre actif | 20 |
| I.14 | Conclusion | 20 |
| CHAPITRE II: Modélisation du système photovoltaïque | | |
| II.1 | Introduction | 22 |
| II.2 | Présentation du système proposé pour l’étude | 22 |
| II.3 | Modèle électrique de générateur photovoltaïque : | 23 |
| II.3.2 | Caractéristique courant-tension et puissance–tension du module photovoltaïque | 25 |
| II.3.2.1 | Effet de l’ensoleillement et de la température sur la caractéristique I_{pv} (V_{pv}) | 25 |
| II.3.2.2 | Effet de l’ensoleillement et de la température sur la caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$ | 26 |
| II.4 | Modélisation du hacheur | 27 |
| II.5 | Modélisation du bus continu | 28 |
| II.6 | Modélisation du réseau | 29 |
| II.7 | Modélisation du convertisseur DC-AC (onduleur) | 29 |
| II.8 | La commande MPPT | 30 |
| II.8.1 | Algorithme de Perturbation et Observation (P&O) | 30 |
| II.8.1.1 | Avantages et inconvénients de la méthode P&O | 31 |
| II.8.2 | Contrôleur basé sur la logique floue | 31 |
| II.9 | Principe de la commande MPPT | 33 |
| II.10 | Résultat de simulation | 33 |
| II.12 | Conclusion | 34 |

CHAPITRE III: Commande DPC et simulation du système globale

| | |
|---|----|
| III.1 Introduction : | 36 |
| III.2 Etat de l'art sur la commande directe de puissance | 36 |
| III.3 Principe de la DPC et ses avantages | 36 |
| III.3.1 Calcul de la puissance active et réactive | 37 |
| III.3.1.1 Comparateur à hystérésis | 38 |
| III.3.2 Table de commutation | 39 |
| III.3.3 Choix du secteur | 39 |
| III.4 Résultats de simulation du système PV connecte au réseau | 40 |
| III.4.1. Le premier essai | 41 |
| III.4.2. Deuxième essai | 49 |
| III.5 Conclusion : | 54 |
| Conclusion générale | 55 |
| Références bibliographiques | |

Liste des abréviations

- AC : Courant alternatif.
- C : Capacité [F].
- D : Puissance déformante [vad].
- DC : Courant continu.
- E : Ensoleillement.
- f_p : Le facteur de puissance.
- FAP : Filtre actif parallèle.
- Gpv : Générateur photovoltaïque.
- $I_{s,a,b,c}$: Courants de source [A].
- I_{cc} : Courant de court-circuit [A].
- I_{ch} : Courants de la charge [A].
- I_f : Courant de filtre [A].
- I_{pv} : Courant photovoltaïque [A].
- I_d : Courant traversant la diode [A].
- I_{ph} : le photo-courant [A].
- $I_{pv,STC}$: Le courant sous les condition STC [A].
- I_{pv} : Courant photovoltaïque [A].
- I_{dc} : Courant de bus continu. [A].
- L : Inductance de la charge [H].
- L_s : Inductance du filtre côté réseau [H].
- MPP : le point maximum de puissance.
- P : Puissance active [W].
- P&O : Perturbation et Observation.
- P_{mpp} : Puissance maximale du panneau [W].
- PV : photovoltaïque.
- P_{pv} : Puissance photovoltaïque [W].
- P_{ch} : Puissance de la charge [W].
- Q : Puissance réactive [VAR].
- $Q_{rés}$: Puissance réactive de réseau [VAR].
- R : Résistance de la charge [Ω].
- R_s : Résistance du filtre côté réseau [Ω].

- R_f : Résistance du filtre actif [Ω].
- S : la puissance apparente [VA].
- Température(C°)
- THD : Taux de Distorsion harmonique totale.
- V : Tension(v).
- V_{ch} : Tension de la charge [V].
- V_{co} : Tension de circuit ouvert [V].
- V_{dc} : Tension du bus continu [V].
- V_{eff} : Tension efficace [V].
- V_m : Tension maximale [V].
- V_{pv} : Tension photovoltaïque [V].
- T_{STC} : la température sous les conditions STC [$^\circ C$].
- $V_{pv,mpp}$: Tension au point de puissance maximale [V].
- ΔT_c : Représente la variation de la température [$^\circ C$].
- ΔI_{pv} : Représente la variation du courant par rapport à l'éclairement et à la température [A].
- ΔV_{pv} : Représente la variation de la tension par rapport à l'éclairement et à la température [V].
- α_{sc} : Représente un coefficient de température, d'incrémentations du courant I_{sc} [$A/^\circ C$].
- β_{co} : Représente un coefficient de température, d'incrémentations de la tension V_{co} [$V/^\circ C$].

Introduction générale

La production d'énergie est un défi d'importance majeure pour les années à venir. En effet, les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ne cessent d'augmenter. Par ailleurs, les pays en voie de développement nécessitent de plus en plus d'énergie pour soutenir leur développement. Actuellement, une part importante de la production mondiale d'énergie provient de sources fossiles. La consommation de ces sources entraîne des émissions de gaz à effet de serre et contribue à l'augmentation de la pollution. De plus, une consommation excessive des ressources naturelles réduit de manière dangereuse pour les générations futures.

A ce sujet, Les énergies renouvelables, telle que l'énergie solaire photovoltaïque, éolienne ou hydraulique, se présentent comme des énergies inépuisables et facilement exploitables. Par exemple, en prenant en compte l'énergie soleil, une surface de 145000km² (4% de la surface des déserts arides) de panneaux photovoltaïques (PV) serai suffisante pour répondre à l'ensemble des besoins énergétiques mondiaux [CHE 18].

Dans le cadre de ce mémoire, notre étude se concentre sur l'énergie solaire, qui représente l'une des formes d'énergie renouvelable les plus abondantes et durables disponibles sur notre planète. Elle offre de nombreux avantages, notamment la réduction des émissions de gaz à effet de serre, la possibilité de parvenir à une indépendance énergétique et la capacité à être utilisée à grande échelle dans des zones éloignées des réseaux électriques traditionnels. C'est pour cela que les recherches scientifiques se développent en vue de généraliser, améliorer et optimiser l'exploitation des systèmes solaires.

Cette énergie est obtenue grâce à la conversion de la lumière solaire en électricité à l'aide de panneaux photovoltaïques, telle que cette technologie gagne en popularité en raison de sa capacité à produire de l'électricité propre et durable.

Cependant, les charges non linéaires se caractérisent par une consommation d'énergie qui n'est pas proportionnelle à la tension appliquée. Parmi ces charges comprennent on trouve les appareils électroniques tels que les téléviseurs, les réfrigérateurs, les systèmes de chauffage à découpage, les variateurs de vitesse, etc. Malheureusement, ces appareils génèrent des courants non sinusoïdaux et introduisent, ainsi des perturbations harmoniques. Ces distorsions peuvent entraîner des problèmes tels que des chutes de tension, des surchauffes, des interférences électromagnétiques et des dysfonctionnements des dispositifs de protection.

Dans notre mémoire abordions la problématique du contrôle d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique en présence de charges non linéaires.

Introduction générale

Dans le premier chapitre, nous abordons plusieurs notions fondamentales telles que le rayonnement solaire, les propriétés des semi-conducteurs utilisés dans les cellules photovoltaïques, ainsi que la problématique des harmoniques, y compris leurs types et leurs effets. Nous proposons également des recommandations visant à atténuer les perturbations et à éliminer leurs conséquences néfastes sur le réseau.

Le deuxième chapitre se concentrera sur la modélisation des composants individuels de notre système. Ces composants comprennent un générateur photovoltaïque, un hacheur élévateur contrôlé qui utilise un algorithme d'optimisation pour maximiser la puissance (MPPT) extraite du panneau photovoltaïque. Deux algorithmes seront utilisés, à savoir Perturbation et Observation (P&O) et logique floue (FLC). De plus, l'onduleur sera utilisé pour la conversion DC-AC et le filtre RL sera utilisé pour la connexion au réseau. Nous décrirons également l'effet des conditions climatiques changeantes sur les caractéristiques des panneaux photovoltaïques.

Le dernier chapitre présentera le contrôle direct de puissance appliqué au convertisseur DC/AC (onduleur) et une simulation du système photovoltaïque connecté au réseau. Les résultats obtenus seront présentés et accompagnés d'une explication très détaillée pour des variations de l'ensoleillement et de température. Ainsi que de la charge pour voir l'efficacité des filtres actifs parallèles sur la qualité de l'énergie du côté réseau.

Le présent travail se résume brièvement à travers une conclusion générale là où un balisage particulier des points essentiels, tout en parlant des éventuelles perspectives d'améliorations.

I.1 Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la conversion directe d'une partie de l'énergie lumineuse en électricité. La conversion de cette énergie se fait grâce aux cellules photovoltaïques, cela est basé sur un phénomène appelé effet photovoltaïque, qui consiste à générer une force électromotrice lorsque la cellule est exposée à la lumière. Aujourd'hui, grâce à sa fiabilité et à son concept respectueux de l'environnement, le photovoltaïque prend une place prépondérante.

Dans ce chapitre, nous examinerons en détail les problèmes de qualité de l'énergie associés aux systèmes photovoltaïques. Nous discuterons des principales sources de perturbations et des effets indésirables qui peuvent en résulter. De plus, nous présenterons des solutions et des techniques disponibles.

I.2 Energie solaire

C'est la plus abondante des énergies renouvelables. Cette énergie fait directement appelle à l'énergie issue du soleil car elle utilise le rayonnement solaire atteignant sur la terre.

Elle convertit directement le rayonnement lumineux (solaire ou autre) en électricité, la distance entre la terre au soleil environ 150 million de kilomètre et la vitesse de la lumière est d'un peu plus de 300000 Km/s et mettent donc environ 8 minute à nous parvenir [CHE 01].

I.3 Rayonnement solaire

Le soleil envoie de l'énergie sous forme de rayonnement électromagnétique, qui se compose de particules de lumière appelés photons, l'énergie de chaque photon est directement liée à sa longueur d'onde par la relation suivante [CHE 01] :

$$EP = h * c/\lambda \quad (\text{I.1})$$

h : la constante de Planck.

C : la vitesse de la lumière.

λ : longueur d'onde.

Il est compris dans une bande de longueurs d'ondes qui varient de 0,22 à 10 μm et se décompose approximativement sur 3 bande suivante [MUK 99].

- 9% dans la bande des ultraviolets (< 0.4 μm).
- 47% dans la bande visible (0.4 à 0.8 μm).
- 44% dans la bande des infrarouges (> 0.8 μm).

Etant diffusé en traversant l'atmosphère seul une fraction modifiée du rayonnement solaire parvient à la surface de la terre se composant de quatre types.

I.3.1 Rayonnement direct

Est le rayonnement solaire atteignant directement la surface terrestre depuis le solaire sans rencontrer d'obstacle.

I.3.2 Rayonnement diffus

C'est un rayonnement solaire indirect, induit par la dispersion de la lumière dans les nuages et les particules atmosphérique.

I.3.3 Rayonnement réfléchi

C'est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface [BOU 19].

I.3.4 Rayonnement global

Est désigné le rayonnement solaire sur une surface horizontale de la terre.

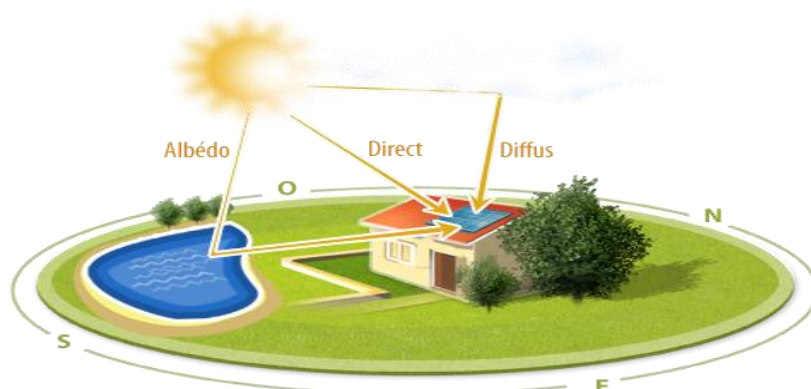


Figure (I.1) : Les différents composants du rayonnement solaire [LOU 08].

I.4 Système photovoltaïque

Le mot photovoltaïque est composé de deux mots : photo, qui signifie « lumière » et le nom de l'inventeur de la pile « Alessandro Volta » [BEN 12].

L'effet photovoltaïque est la conversion directe d'une partie de la lumière émise par le soleil (photons) sont convertis en électricité par une cellule photovoltaïque lorsque sa surface est exposée à la lumière, on l'appelle aussi cellule solaire.

I.5 La cellule photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques sont des composants optoélectronique qui transforment directement l'énergie lumineuse en énergie électrique.

Elles sont les plus petits éléments d’une installation photovoltaïque, sont réalisés à l’aide de matériaux semi-conducteur, qui ont des propriétés intermédiaires entre les conducteurs et les isolants [BEN 16].

I.5.1 Type de cellule photovoltaïque

Il existe différents types de cellules photovoltaïque chacun est caractérisé par son rendement et son cout et les plus importants sont les suivantes :

a. Les cellules à silicium monocristallin

Les cellules photovoltaïques en silicium monocristallin sont formées d’un seul cristal. Elles sont en général d’un bleu uniforme [HAL 17].

b. Les cellules à silicium poly cristallin

Elles sont constituées de plusieurs cristaux. La cellule à un aspect bleuté mosaïque (pas uniforme) [HAL 17].

c. Les cellules amorphes

Le silicium est utilisé en couche mince, il n’est pas cristallisé. Il est déposé sur une plaque de verre. Ce type de cellule on le trouve le plus souvent dans les petits produits de consommation (montre, calculatrice) [HAL 17].

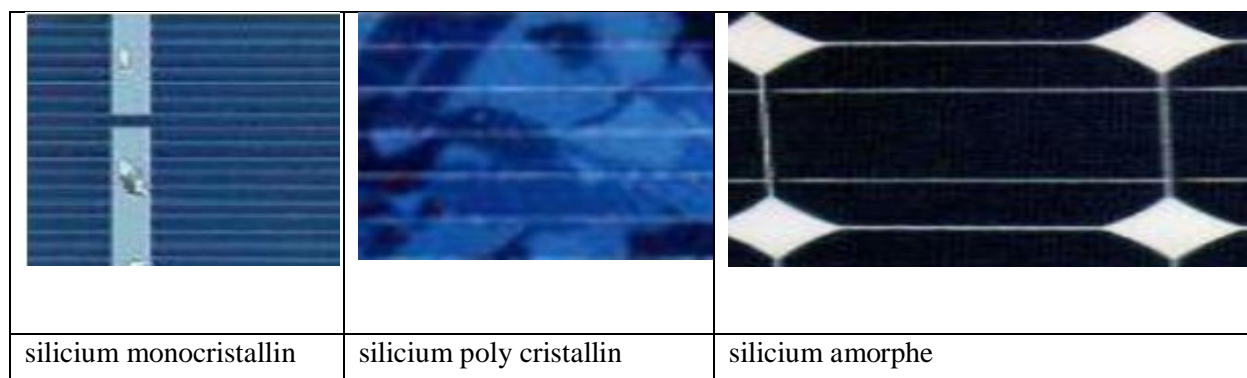


Figure (I.2) : Les différentes types des cellules photovoltaïques [DAH 17].

I.52 Le rendement des cellules photovoltaïques

Le tableau suivant représente les différents types de cellules photovoltaïques et leurs rendements.

Tableau (I.1) : Les différentes types de cellules et leurs rendements.

| Type | Rendement cellule (en labo) | Rendement cellule (commercial) |
|--------------------------|-----------------------------|--------------------------------|
| Silicium monocristallin | 25% | 16-20% |
| Silicium poly cristallin | 20% | 11-15% |
| Silicium amorphe | 13,40% | 5-9% |

I.5.3 Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est un dispositif semi-conducteur généralement composé de silicium. Elle est constituée de deux couches, l'une dopée positivement P et l'autre dopée négativement N, créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charge P). Cela crée une différence de potentiel. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule [ACP 06].

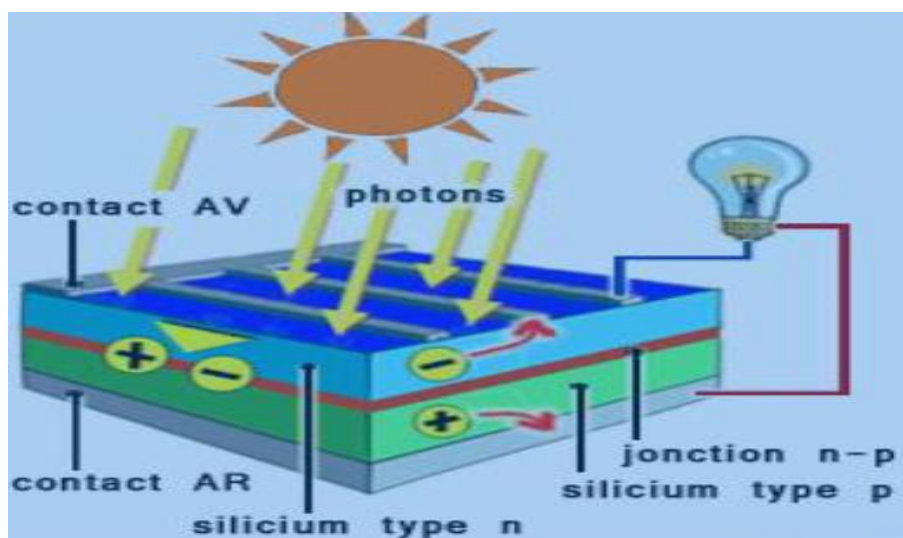


Figure (I.3) : Représentation en coupe d'une cellule photovoltaïque [BEN 06].

I.5.4 Association des cellules photovoltaïque

Une cellule individuelle, qui est l'unité de base d'un système photovoltaïque, ne produit qu'une très faible puissance électrique, typiquement de 1 à 3 W, avec une tension inférieure à d'un volt. Afin de générer une puissance plus élevée, les cellules sont assemblées pour former un module (ou panneau). Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension ainsi le courant de sortie et donc la puissance seront proportionnels à la surface du module.

Il est important de noter que l'assemblage en série ou en parallèle des cellules permet d'adapter la configuration du système photovoltaïque en fonction des besoins spécifiques de tension et de courant, afin de maximiser l'efficacité globale et de produire la puissance requise.

I.5.5 Caractéristique d'un panneau photovoltaïque

Les différents paramètres d'une cellule PV sont définis à partir de la caractéristique "courant-tension", comme la montre la figure ci-dessous.

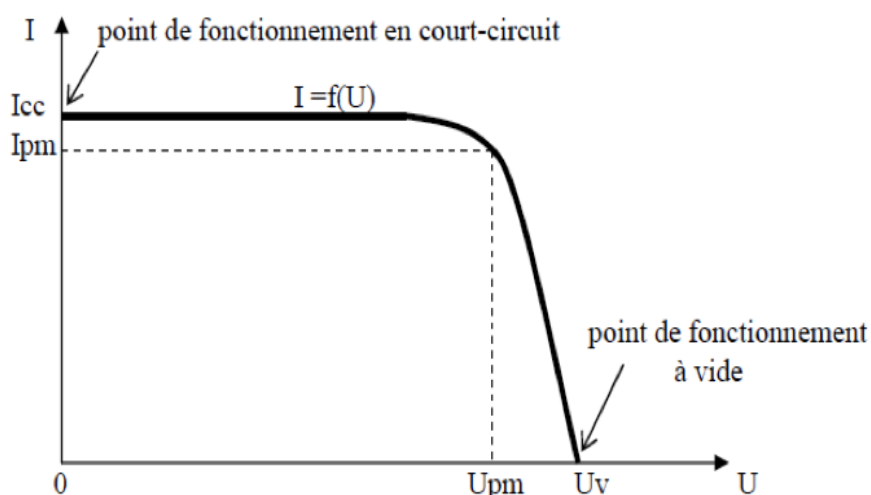


Figure (I.4): Courbe courant-tension d'une cellule photovoltaïque [GOU 12].

I.5.6 Paramètre d'une cellule photovoltaïque

a. Courant de court-circuit

C'est le courant qui traverse la cellule photovoltaïque lorsque celle-ci est en court-circuit, c'est-à-dire lorsque le pôle positif est relié au pôle négatif (la tension à ses bornes est nulle). Dans ce cas, la puissance fournie par la cellule ($P=U \times I$) est nulle [ZIA 22].

b. Tension de circuit ouvert

Il s'agit de la tension maximale « V_{co} » aux bornes de la cellule lorsque celle-ci est en circuit ouvert, les deux pôles sont isolés électriquement de tout autre circuit électrique (le courant la traversant est alors nul). Dans ce cas, la puissance fournie par la cellule ($P=U \times I$) est nulle [ZIA 22].

c. Facture de forme

Le facteur de forme dépend d'un ensemble de paramètres, il détermine la qualité électrique de la cellule photovoltaïque il est obtenu par l'équation suivant :

$$F_f = \frac{P_{mpp}}{V_{oc1} \times I_{cc1}} = \frac{V_{mpp} \times I_{mpp}}{V_{oc1} \times I_{cc1}} \quad (I.2)$$

I_m : Courant optimale.

V_{mpp} : tension optimale.

❖ **Rendement**

Le rendement (η) de conversion d'énergie est le rapport de la puissance générée et de la puissance du rayonnement solaire incident P_{inc} il est obtenu par l'équation suivant :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} = \frac{I_{opt} \times V_{opt}}{P_{inc}} \tag{I.3}$$

I.6 Protection de panneau photovoltaïque

Afin de garantir une durée de vie importante d'une installation photovoltaïque destinée à produire de l'énergie électrique sur de longues années, des protections électriques doivent être ajoutées aux modules commerciaux, afin d'éviter des pannes destructrices liées à l'association de cellules en séries et de panneaux en parallèles. Actuellement, deux types de protections classiques sont couramment utilisés dans les installations :

La diode anti-retour est utilisée pour empêcher tout courant négatif dans les GPV. Ce phénomène peut produire lorsque plusieurs modules sont connectés en parallèle, ou lorsqu'une charge en connexion directe peut basculer du mode récepteur au mode générateur, par exemple une batterie durant la nuit.

Les diodes by-pass sont utilisées pour isoler un sous-réseau de cellules lorsque l'éclairement solaire n'est pas homogène. Elles préviennent ainsi l'apparition de points chauds et la détérioration de ces cellules moins éclairées. Cependant, la mise en conduction de ces diodes affecte les caractéristiques de sortie du générateur, entraînant une perte partielle de la production d'énergie et la présence de deux points de puissance maximale.

Ces dispositifs de protection électrique sont indispensables pour préserver la performance et la durabilité de l'installation photovoltaïque, en évitant les dysfonctionnements et les dommages potentiels liés aux variations de conditions d'éclairage et de charge.

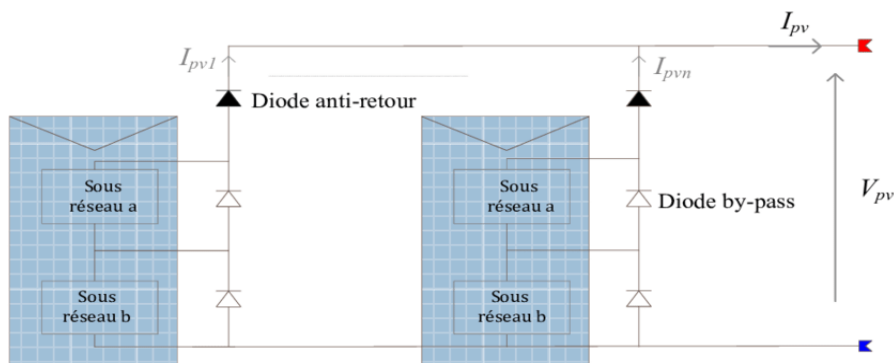


Figure (I.5) : Association sécurisée de deux modules PV en parallèles avec leurs diodes de protections.

I.7 Avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques

I.7.1 Avantages [BOU07].

Les avantages des systèmes photovoltaïques sont :

- La source d'énergie utilisée (le rayonnement solaire) est renouvelable et gratuite.
- Ils peuvent être des systèmes autonomes qui fonctionnent sûrement, avec entretien minimal.
- Ils peuvent être combinés avec d'autres sources d'énergie pour augmenter la fiabilité du système.
- Non polluant, silencieux et une longue durée de vie.
- Génère l'énergie requise de manière efficace.
- Réduit la fragilité aux pannes d'électricité.

I.7.2 Inconvénients

- L'énergie issue du générateur photovoltaïque est continue et de faible tension (inférieur à 30 V), ce qui nécessite une conversion via un onduleur.
- Le rendement réel d'un module photovoltaïque est de l'ordre de 10 à 15 %.
- Le coût des systèmes photovoltaïques est considérablement élevé.

Les installations PV domestiques nécessitent souvent un système d'appoint (batteries) tel que des batteries pour assurer l'alimentation en cas de faible ensoleillement ou coupure de courant.

I.8. Les convertisseurs statiques dans les installations PV

Les panneaux photovoltaïques fournissent une tension de type continu pour l'adapter à nos besoins, dans notre système on a utilisé deux sortes de convertisseurs : hacheur (DC-DC), onduleur (DC-AC).

I.8.1 Convertisseur DC-DC (hacheur)

C'est un convertisseur continu-continu est utilisé pour modifier la valeur de la tension d'une source de tension continu, en mettant en œuvre un ou plusieurs interrupteurs commandés. Ce type de convertisseur offre un rendement élevé [MEH 07].

Lorsque l'objectif est d'augmenter la tension disponible à partir d'une source continue (les panneaux solaires ou les batteries), on utilise un hacheur parallèle. Sa commande à l'amorçage et au blocage est basée sur un interrupteur commandé (IGBT, MOSFET, Bipolaire ...) [BOU 19].

En revanche, lorsqu'il est nécessaire d'obtenir une tension de sortie inférieure à celle de l'entrée, on utilise un hacheur série. Sa structure a besoin d'un interrupteur à amorçage et à blocage commandé (transistor bipolaire, IGBT ...) et une diode de roue libre [MEH 07].

I.8.2 Convertisseur DC-AC (onduleur)

La fonction principale de l'onduleur est de convertir le courant continu produit par le générateur solaire, en courant alternatif monophasé ou triphasé. Il existe types d'onduleurs DC/AC selon la qualité du signal de sortie :

- Onduleur à onde sinusoïdale modifiée.
- Onduleur à modulation de largeur d'impulsion (MLI) [ROY 98].

L'onduleur à modulation de largeur d'impulsion utilise des commutateurs électroniques rapides pour varier la largeur d'impulsion. Grâce à un filtre à la sortie, une onde sinusoïdale peut être reconstruite. Ces onduleurs relativement peu coûteux sont très efficaces, offrent un rendement élevé, atteignant près 90% à 95% [BOU 19].

I.9 Optimisation de l'énergie photovoltaïque

Afin d'obtenir la puissance d'un panneau solaire, un dispositif de suivi du point de puissance maximum (MPPT : Maximum Power Point Tracker) est utilisé pour régler les variations de la caractéristique courant tension [LAL 09]. Son objectif est de se positionner sur le point de puissance maximale de manière à le maintenir malgré les variations de températures et l'ensoleillement [ATT 19].

Parmi les différentes méthodes d'optimisation MPPT décrites dans la littérature on retrouve notamment les algorithmes Perturbation et Observation (P&O) ainsi que algorithmes basés sur la logique floue (FLC).

I.10 Application de l'énergie photovoltaïque

I.10.1 Système autonome

Ce type de systèmes est généralement utilisé dans les sites isolés où il n'y a pas d'accès au réseau électrique. Il est constitué d'un générateur photovoltaïque qui fournit l'énergie électrique nécessaire, un ensemble de batteries a pour rôle le stockage d'énergie car la consommation ne dépend pas des heures d'ensoleillement, un régulateur qui a le rôle de protéger les batteries contre les surcharges et les décharges profondes. De plus, ces installations comportent également selon le cas des interfaces de conversion continu-continu (charges fonctionnant en courant continu) et/ou continu alternatif (charges fonctionnant en courant alternatif) [ZER 19].

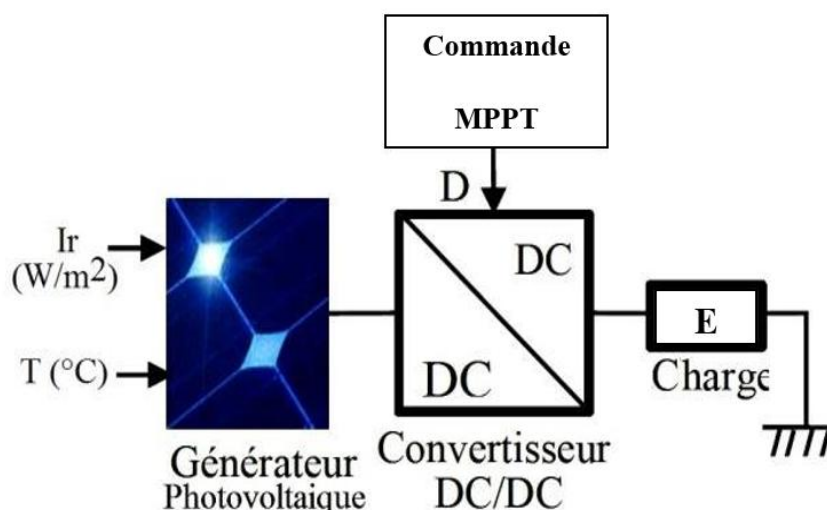


Figure (I.6) : Système autonome [AOU 18].

I.10.2 Système hybride

Le système hybride de production d'énergie, dans son concept le plus générale, combine et exploite plusieurs sources d'énergie facilement disponibles. Il consiste l'association de deux ou plusieurs technologies complémentaires afin d'augmenter la disponibilité de l'énergie. Par une meilleure disponibilité. Les sources d'énergie comme le soleil et le vent ne fournissent pas une puissance constante, mais leur combinaison peut permettre de parvenir à une production électrique plus continue. Dans nombreuses régions, les journées ensoleillées sont en généralement caractérisées par une faible activité éolienne, tandis que les vents forts sont observés plutôt lors de journées nuageuses ou la nuit [FER15].

I.10.3 Système raccordé au réseau

Dans ces systèmes photovoltaïques, le générateur PV est connecté au réseau électrique. Il est équipé de convertisseurs de puissance conçus pour adapter l'énergie produite par les panneaux solaires. Ces convertisseurs comprennent un hacheur avec une commande MPPT, un filtre, un onduleur et d'une commande électronique appropriée qui assurent l'adaptation de l'amplitude et de la fréquence par apport au réseau. La structure d'un système PV connecté au réseau est illustrée dans la figure (I.7).

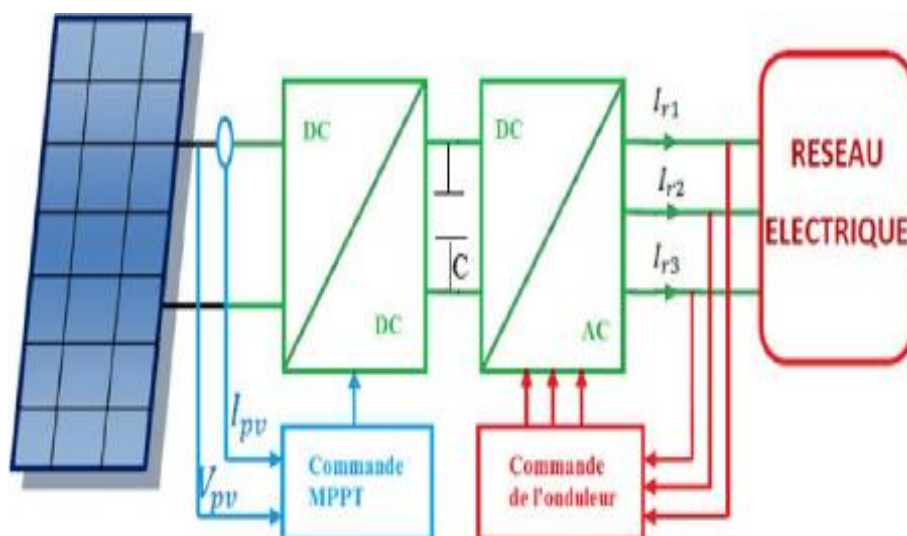


Figure (I.7) : Système raccordé au réseau.

L'avantage considérable de cette solution réside dans l'absence de batterie. L'énergie n'est plus stockée, mais injectée directement dans le réseau local qui alimente les maisons pendant nuit ou pendant les jours nuageux. Ainsi, toute l'énergie produite est utilisée. Un compteur tourne dans un sens pour mesurer la consommation, tandis qu'un autre dans sens opposé pour mesurer la production. Il est important de noter que ces systèmes ne servent pas de source d'alimentations de secours en cas de coupure du réseau, car ils ne disposent d'aucune réserve d'énergie. Dans notre étude, nous nous concentrons sur fonctionnement d'un système photovoltaïque connecté au réseau [BOU22].

I.11 Qualité de l'énergie électrique envoyée au réseau

L'énergie électrique est principalement distribuée sous forme d'un système triphasé avec une tension sinusoïdale. Par conséquent, la qualité de l'énergie électrique est étroitement liée à la qualité de l'onde de tension, et la nature des charges connecté au système (linéaire ou non linéaire). Ainsi, la qualité de l'énergie électrique est souvent évaluée en fonction de la qualité de la tension.

Les paramètres caractéristiques de ce système sont les suivants :

- La fréquence.
- L'amplitude.
- La forme d'onde qui doit être sinusoïdale.

La symétrie du système triphasé est caractérisée par l'égalité des amplitudes des trois tensions et leurs déphasages relatifs. Tout phénomène physique affecte l'une ou plusieurs de

ces caractéristiques peut être considéré comme perturbation. Ainsi il est possible de distinguer plusieurs types de perturbation, notamment :

- Les altérations de l'onde de tension (harmonique, déséquilibre, flicker).
- Les baisses de tensions et coupures brèves, qui durent de quelques secondes.
- Les surtensions transitoires.

Dans ce qui suit, nous nous concentrons sur les perturbations causées par les harmoniques ainsi que leurs conséquences néfastes sur le réseau électrique.

La qualité de l'énergie est l'un des problèmes majeurs du système de production et de distribution de l'énergie électrique. Avec l'augmentation de l'utilisation des équipements électroniques de puissance, la qualité de l'énergie se dégrade. En raison des caractéristiques non linéaires de ces équipements, des harmoniques se produisent dans le système. Ces harmoniques provoquent divers problèmes, tels que : La distorsion du courant et de la tension, le mauvais facteur de puissance. Les harmonique d'ordre élève peuvent également causer des interférences dans les réseaux de communication voisins. Lorsqu'ils se propagent le long dans les lignes de transmissions vers la source, ils entraînent des pertes joules excessives dans les lignes, ainsi que du bruit ou de la vibration indésirable[SAB17].

I.12 Problématiques d'harmoniques

Les problèmes harmoniques deviennent très répandus avec l'augmentation des charges non linéaires connectées au réseau. Les charges non linéaires provoquent une distorsion de courant, qui à son tour provoque une distorsion de tension, ce qui peut entraîner un dysfonctionnement des équipements connectés au réseau. D'où l'importance d'éliminer ou de minimiser ces harmoniques.

I.12.1 Caractérisations d'harmoniques

L'impact harmonique est caractérisé par le taux de distorsion harmonique globale (THD).

C'est un indice important largement utilisé pour quantifier le contenu harmonique d'un signal distordu. Il mesure le degré de déformation du signal apporté par les harmoniques par rapport à une onde sinusoïdale. Le THD est défini comme la valeur efficace des harmoniques au-dessus

de la fondamentale, divisée par la valeur efficace de cette dernière. Le THD est défini pour les signaux de tension et de courant, respectivement, comme suit [OUC 17] :

$$THD_v(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \quad (I.4)$$

$$THD_i(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \quad (\text{I.5})$$

d. Le facteur de distorsion

Le facteur de distorsion (f_d) est défini comme le rapport entre le fondamental et le signal en valeur efficace. Elle est donnée par l'expression suivante :

$$f_d = \frac{I_1}{I_{eff}} \quad (\text{I.6})$$

Alors il est égal à l'unité lorsque le courant est purement sinusoïdal et diminue lorsque la distorsion apparaît.

e. Facteur de crête

Il est donné par l'expression suivante :

$$f_c = \frac{\text{valeur crête}}{\text{valeur eff}} \quad (\text{I.7})$$

Pour les ondes sinusoïdales, le facteur de crête égale 1,41. Il peut atteindre la valeur de 5 dans le cas d'ondes fortement déformées.

f. Facteur de puissance

Le rapport de puissance est donné par le rapport entre la puissance active P et la puissance apparente S, et donné par l'expression suivante :

$$f_p = \frac{P}{S} \quad (\text{I.8})$$

$$f_p = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (\text{I.9})$$

La puissance apparente S définie par :

$$S = V_{eff} \times I_{eff} \quad (\text{I.10})$$

$$S = V_{eff} \times \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} \quad (\text{I.11})$$

Les puissances active P et réactive Q peuvent être donnés par les relations suivantes :

$$P = 3 \times V \times I_1 \times \cos \theta_1 \quad (\text{I.12})$$

$$Q = 3 \times V \times I_1 \times \sin \theta_1 \quad (\text{I.13})$$

Dans le cas où il y a des harmoniques, une puissance supplémentaire appelée puissance déformée D apparaît. Cette puissance peut être donnée par la relation :

$$D = V_{eff} \times \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2} \quad (\text{I.14})$$

La puissance apparente S peut alors s'exprimer comme suit :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (\text{I.15})$$

Donc, Le facteur de puissance F p est exprimé par l'expression suivante :

$$f_p = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad (\text{I.16})$$

D'après l'équation. (I.16) on constate que le facteur de puissance est réduit en raison de la présence des harmoniques et de la consommation de puissance réactive [ATT 19].

I.12.2 Types d'harmoniques

En règle générale, on distingue les harmoniques de rangs pairs (2, 4, 6,8 ...etc), et les harmoniques de rangs impairs (3, 5,7 ...etc.) plus influentes, dans les réseaux industriels .Il existe aussi d'autre types d'harmoniques tel que :

➤ **Inter harmonique**

Ce sont des composantes sinusoïdales d'une grandeur qui n'est pas une fréquence multiple entière de celle du fondamental [TRA 18].

➤ **Infra harmonique**

Ce sont des composantes de fréquences inférieures à celle du fondamental [ZID 15].

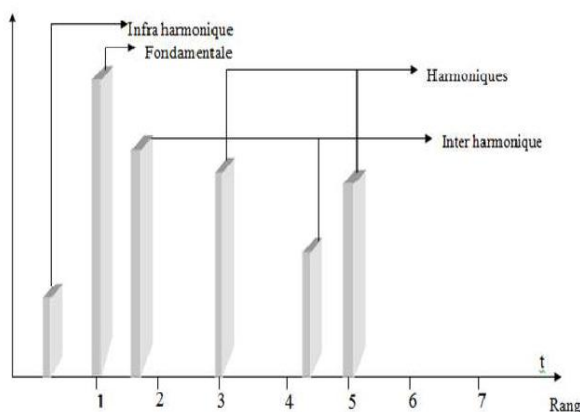


Figure (I.8) : Représentation spectrale d'un signal périodique [ZID 15].

I.12.3 Effets des harmoniques sur les réseaux électriques

- Pertes énergétiques qui provoquent dans les conducteurs et équipements des pertes supplémentaires par effet Joule.
- Surcoût d'abonnement, la présence de courants harmoniques nécessite d'augmenter le niveau de puissance souscrite, et le coût de l'abonnement. De plus, les distributeurs d'énergie auront de plus en plus tendance à pénaliser les producteurs d'harmoniques.
- Surdimensionnement des matériaux.
- Réduction de la vie des matériaux.
- Déclenchement intempestifs et arrêts de l'installation.
- Déformation de la tension de l'alimentation.

- Perturbation des charges sensible.

I.12.4 Norme des harmoniques

L'objectif des normes et des réglementations est de limiter les dysfonctionnements occasionnés par les harmoniques. Les deux principaux organismes de normalisation internationaux normalisation dans ce domaine sont la CEI (Commission Electrotechnique Internationale), et IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers). La CEI établit les niveaux des courants et des tensions harmoniques à ne pas dépasser à travers une série de normes de compatibilité électromagnétique (CEI 61000). Nous pouvons citer par exemple :

- La norme CEI 61000-2-2 qui définit les niveaux de compatibilité de tensions harmoniques sur les réseaux publics basse tension. Elle est représentée dans le tableau (I.2). Cette norme vise à protéger les équipements raccordés à un réseau basse tension déformé.
- La norme CEI 61000-3-2 fixe quant à elle la limitation des courants injectés dans le réseau public pour les équipements dont le courant par phase est inférieur à 16 A. elle est représentée dans le tableau (I.3).

Tableau (I.2) : Niveau de compatibilité pour les tensions harmoniques individuelles sur les réseaux électriques basse tension (norme CEI 61000-2-2) [KEN 20].

| Harmoniques impaires | | | | Harmoniques paires | |
|----------------------|--------------|---------------|----------|--------------------|----------|
| Non multiples de 3 | | Multiple de 3 | | Rangs | Taux (%) |
| Rangs | Taux (%) | Rangs | Taux (%) | | |
| 5 | 6 | | | | |
| 7 | 5 | | | 2 | 2 |
| 11 | 3.5 | 3 | 5 | 4 | 1 |
| 13 | 3 | 9 | 1.5 | 6 | 0.5 |
| 17 | 2 | 15 | 0.3 | 8 | 0.5 |
| 19 | 1.5 | 21 | 0.2 | 10 | 0.5 |
| 23 | 1.5 | >21 | 0.2 | 12 | 0.2 |
| 25 | 1.5 | | | >12 | 0.2 |
| >25 | 0.2+1.3*25/h | | | | |

Tableau (I.3): Limite des composantes harmoniques en courant (norme CEI 61000-3-2) [KEN 20].

| Harmoniques impaires | | Harmoniques paires | |
|----------------------|-------------|--------------------|------------|
| Rangs | Taux (%) | Rangs | Taux (%) |
| 3 | | | |
| 5 | 2.3 | 2 | 1.08 0.43 |
| 7 | 1.14 0.77 | 4 | |
| 9 | 0.40 | 6 | 0.3 |
| 11 | 0.33 0.21 | 8 ≤ h ≤ 40 | 0.23 * 8/h |
| 13 | 0.15 * 15/h | | |
| 15 ≤ h ≤ 39 | | | |

I.12.5 Solution pour amélioration de qualité d'énergie électrique

Pour diminuer les perturbations en tension ou en courant, il est possible d'agir à deux niveaux :

Du côté de la source, en filtrant la tension du réseau ou en améliorant le réseau de transport et celui de distribution.

Du côté du client en rendant le courant de ligne le plus sinusoïdal possible. Deux groupes de solutions de dépollution pour compenser toutes les perturbations peuvent être distingués les solutions traditionnelles et les solutions modernes.

a. Solution traditionnelle

Parmi Les moyens de dépollution traditionnels on peut noter les points suivants :

- Inductance anti-harmonique de protection des condensateurs.
- Utilisation une inductance de lissage des courants.
- Confinement des harmoniques.
- Utilisation de transformateurs à couplage approprié permettant de limiter la circulation des courants harmoniques. Augmentation de l'indice de modulation.

b. Solution moderne

Les filtres actifs et les redresseurs MLI sont proposés comme des solutions avancées pour améliorer la qualité de l'énergie électrique fournie aux consommateurs, même dans des conditions de fonctionnement perturbées. Ces solutions peuvent s'ajuster aux variations de charge et du réseau électrique sans nécessiter de modifications des installations du fournisseur d'énergie ou du consommateur.

I.13 Filtre actif

Le rôle classique de l'onduleur est d'alimenter une charge alternative à partir d'une source continue. Les harmoniques doivent être minimisés car seuls les fondamentaux assurent le transfert de la puissance utile. Cependant, cet onduleur peut être commandé de manière à générer que des courants ou des tensions harmoniques. Ces derniers peuvent être ensuite utilisés pour la dépollution du réseau. L'onduleur joue alors le rôle d'un filtre appelé filtre actif.

Le filtre actif peut être connecté au réseau soit en parallèle soit en série, suivant qu'il est conçu pour compenser les courants ou les tensions harmoniques. Puisque les convertisseurs statiques perturbent le réseau en injectant des courants harmoniques, les filtres actifs parallèles permettant de contrôler les courants semblent être plus adaptés à la compensation [JIA 2018].

I.13.1 Filtre actif parallèle

Le filtre actif parallèle injecte des courants harmoniques au réseau tels que la différence entre les courants à corriger et ceux injectés soit exempte des harmoniques que l'on veut éliminer. La figure (I.9) illustre ce principe.

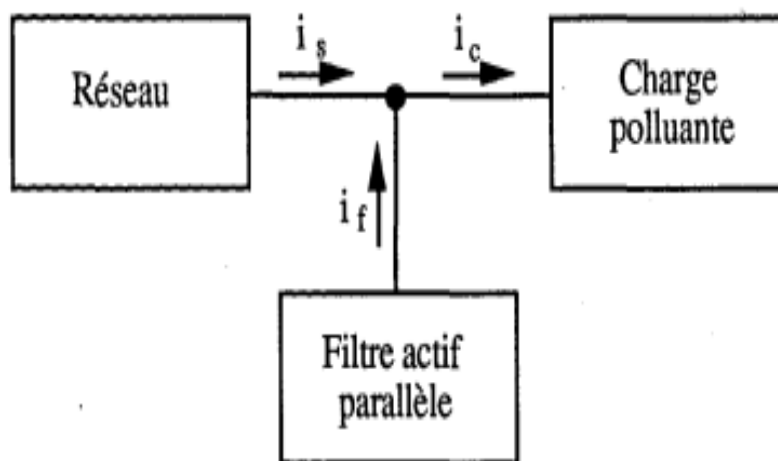


Figure (I.9) : Structure de filtre actif [JIA 2018].

I.13.2 Principe de fonctionnement de filtre actif

Ce filtre est généralement commandé comme un générateur de courant, il génère des courants harmoniques, en opposition de phase avec le réseau, afin que la somme avec le courant existant soit nulle. Ainsi, au niveau du réseau on obtient des courants sinusoïdaux. L'objectif est donc de supprimer tous les harmoniques de courants de la charge non linaire au point de raccordement. En pratique, il est difficile d'obtenir un courant de ligne parfaitement

sinusoïdal comme dans le cas idéal mais l'objectif est d'avoir un courant aussi plus proche possible de la sinusoïde. En général, le filtre actif parallèle est utilisé pour la dépollution du réseau. Sa caractéristique impédance totale vis-à-vis de la source et de la charge lui confère une bonne auto-adaptabilité avec des performances appréciables, comme le montre la figure (I.9) le principe du FAP [KIA 19].

I.13.3 Structure globale de filtre actif

Le filtre actif parallèle SAPF est une structure de tension connectée en parallèle au réseau, et comme illustré dans la figure (I.10).

Dans ce type de filtre le condensateur C_{dc} joue le rôle d'une source de tension continue. La tension à ses bornes V_{dc} est maintenue à une valeur quasi-constante. Il est essentiel que les fluctuations de cette tension soient faible pour deux raisons d'une part pour ne pas dépasser la limite en tension des semi-conducteurs et d'autre part pour ne pas dégrader la performance du filtre actif.

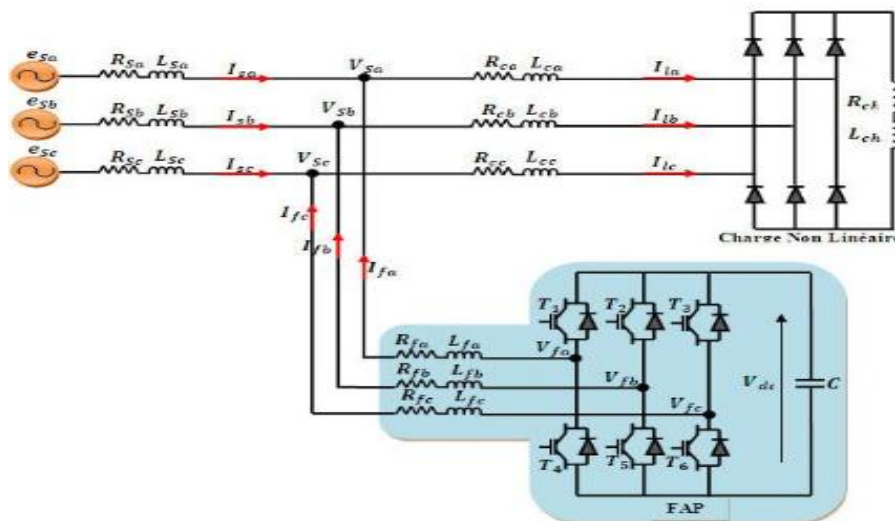


Figure (I.10) : La structure globale de filtre actif parallèle.

Le filtre qui se situe entre l'onduleur et le réseau est un filtre de premier ordre qui se compose en réalité d'une simple inductance avec des caractéristiques spécifiques au niveau de son circuit magnétique (introduction de noyaux en ferrites). Il remplit deux objectifs :

- Générer des courants harmoniques à partir de la différence de tensions entre la sortie du pont onduleur et le réseau. A ce titre, l'inductance L_f intervient dans la commande du courant du filtre.
- Réduire l'amplitude des créneaux de tension générés au point de raccordement au réseau (PCC).

Les interrupteurs utilisés dans le filtre sont bidirectionnels en courant. Ils sont constitués

Composants semi-conducteurs commandés à la fermeture et à l'ouverture (IGBT, thyristors GTO), en antiparallèle avec une diode. Dans ce cas également, l'onduleur de tension est raccordé entre deux types de sources :

La source de courant côté alternatif et source de tension côté continu.

La présence de ces deux types de sources impose les conditions suivantes :

- Un seul interrupteur d'un bras doit conduire pour éviter les court-circuit de la source de tension.
- Le courant de ligne doit toujours trouver un chemin libre d'où la mise en antiparallèle des diodes avec les interrupteurs afin d'éviter l'ouverture du circuit de la source de courant.

I.13.4 Les avantages et inconvénients de filtre actif

On cite quelques avantages et inconvénients

Avantages

- Le volume physique du filtre est plus réduit.
- La capacité de filtrage est supérieure.
- La flexibilité et adaptabilité sont très supérieures.

Inconvénients

- Leur coût élevé a limité leur implantation dans l'industrie.
- Une source auxiliaire.

I.14 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé plusieurs aspects généraux du système photovoltaïque. Tout d'abord, nous avons défini l'énergie solaire et le rayonnement solaire, qui sont indispensables pour que l'effet photovoltaïque se produise. Nous avons également examiné la cellule solaire, en présentant ses différents types, sa structure et le principe de fonctionnement de la jonction PN, ainsi que ses caractéristiques. Ensuite, nous avons discuté de la protection d'un panneau photovoltaïque et de l'optimisation de l'énergie photovoltaïque, tout en soulignant les avantages et les inconvénients du système PV. Pour conclure ce chapitre, nous avons effectué une classification des systèmes photovoltaïques, en détaillant les composantes de chaque type de système en fonction de leur application spécifique, ainsi que les problématiques liées aux harmoniques tout en utilisant un filtre actif parallèle.

II.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à l'étude et la modélisation d'un système photovoltaïque connecté.

Au réseau. La modélisation constitue une étape essentielle dans laquelle on peut introduire divers modèles afin d'évaluer les caractéristiques de chaque composant de l'installation ainsi que ses paramètres constitués. Dans le contexte d'un système photovoltaïque, l'objectif est de toujours travailler à proximité du point de puissance maximale (MPP).

Dans un premier lieu, nous développerons les modèles mathématiques des différents éléments de notre système, en décrivant en détail leur structure, leur fonctionnement ainsi que les équations électriques qui les régissent. Dans un second lieu, nous présenterons une méthode de recherche du point de puissance maximale (MPPT) basée sur la commande Perturbation et Observation (P&O).

L'objectif de ce chapitre est modéliser et simuler un système photovoltaïque connecté au réseau, comprenant un générateur photovoltaïque, un convertisseur DC-DC survolteur (boost), un onduleur et des filtres passifs.

II.2 Présentation du système proposé pour l'étude

Le système photovoltaïque est composé d'un groupe de panneaux photovoltaïques formant un GPV, il comprend également un hacheur élevé contrôlé par un algorithme d'optimisation pour maximiser la puissance extraite des panneaux. De plus, comprend un onduleur qui assure la conversion de courant continu en courant alternatif DC/AC, ainsi d'un filtre RL pour permettre la connexion au réseau.

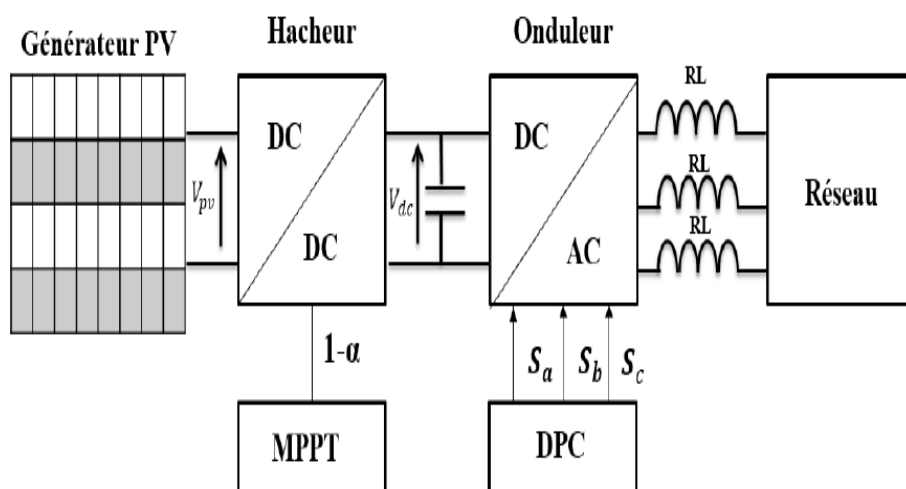


Figure (II.1) : Schéma simplifié du système photovoltaïque.

II.3 Modèle électrique de générateur photovoltaïque :

Il existe de nombreux modèles de générateur photovoltaïque qui sont différents entre eux par la procédure et le nombre de paramètres intervenant dans le calcul du courant et de la tension. Parmi ces modèles on trouve :

II.3.1 Modèle simplifié de la structure à une diode :

Un modèle électrique empirique simple, le plus proche du générateur photovoltaïque, Actuellement le plus utilisé en raison de la qualité des résultats obtenus, c'est le modèle à une diode et une résistance shunt [LAL 05]. Ce dernier comporte cinq paramètres (I_{ppm} , V_{mpp} , I_{cc} , V_{co} , R_s) qui tiennent compte de la variation du courant et de la tension du panneau photovoltaïque en fonction des conditions climatique [OUA 11].

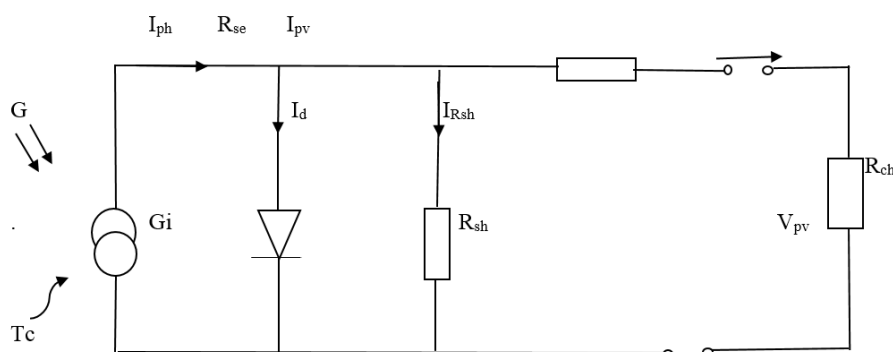


Figure (II.2) : Modèle simplifié à une diode d'une cellule solaire.

L'expression du courant du module photovoltaïque est donnée par :

$$I_{pv} = I_{cc} \left\{ 1 - K1 \left[e^{K2 V_{pv}^m} - 1 \right] \right\} \quad (II.1)$$

Où les coefficients K1 et K2 et m sont donnés par :

$$K1 = 0.01175 \quad (II.2)$$

$$K2 = \frac{K4}{V_{co}^m} \quad (II.3)$$

$$K3 = \ln \left[\frac{I_{sc}(1+K1) - I_{ppm}}{K1 I_{cc}} \right] \quad (II.4)$$

$$K4 = \ln \left[\frac{1+K1}{K1} \right] \quad (II.5)$$

$$m = \frac{\left[\frac{K3}{K4} \right]}{\left[\frac{V_{mpp}}{V_{co}} \right]} \quad (II.6)$$

Où :

I_{mpp} : Courant au point de puissance maximale appelé aussi courant optimum (I_{opt}).

V_{mpp} : Tension au point de puissance maximale appelé aussi tension optimale (V_{opt}).

I_{cc} : Courant en court-circuit.

V_{co} : Tension en circuit ouvert.

Les équations suivantes sont utilisées lorsque l'ensoleillement et la température varient, contrairement à l'équation (II.1) qui est applicable uniquement pour un niveau d'ensoleillement de 1000 W/m² et une température de 25 °C, correspondant aux conditions standards de fonctionnement.

$$\Delta T_c = T_c - T_{stc} \quad (II.7)$$

$$\Delta I = \alpha \left(\frac{G}{G_{stc}} \right) \Delta T_c + \left(\frac{G}{G_{stc}} - 1 \right) I_{cc, stc} \quad (II.8)$$

$$\Delta V = -\beta_{co} \Delta T_c - R_s \Delta I \quad (II.9)$$

Avec :

G_{stc} et G : Représentent respectivement, le niveau d'ensoleillement dans les conditions standards de fonctionnement et dans des conditions quelconques.

ΔG : Représentant la variation de l'insolation.

T_{stc} et T_c : Représentent respectivement, la température dans les conditions standards de fonctionnement et dans des conditions quelconques.

ΔT_c : Représente la variation de la température.

ΔI : Représente la variation du courant par rapport à l'ensoleillement et à la température.

ΔV : Représente la variation de la tension par rapport à l'insolation et à la température.

α_{cc} : Représente un coefficient d'incrément de courant I_{cc} quand la température de la surface augmente de un degré Celsius (A/°C) (sous les conditions standard de fonctionnement).

β_{co} : Représente un coefficient d'incrément de la tension V_{co} quand la température de la surface augmente de un degré Celsius (V/°C) (sous les conditions standard de fonctionnement).

Les nouvelles valeurs de la tension et du courant photovoltaïque sont donnés par :

$$V_{nouv} = V_{STC} + \Delta V \quad (II.10)$$

$$I_{nouv} = I_{STC} + \Delta I \quad (II.11)$$

Pour notre système, nous avons opté pour un modèle à cinq paramètres (I_{cc} , V_{co} , I_{mpp} , V_{mpp} et R_s). Les fabricants de panneaux photovoltaïques fournissent ces paramètres (I_{cc} , I_{mpp} , V_{co} , V_{mpp}) selon les conditions standards de fonctionnement (ensoleillement de 1000 W/m² et température de 25°C). Le tableau (II.1) présente les paramètres spécifiques du panneau photovoltaïque de type SIEMENS SM 110-24 qui seront utilisés lors de la simulation.

Tableau (II.1) : Paramètre du panneau photovoltaïque SIEMENS SM 110-24[BEL 15].

| Paramètre | Valeurs |
|--|------------|
| Puissance maximale du panneau P_{mpp} | 110 W |
| Courant au point de puissance maximale I_{mpp} | 3.15 A |
| Tension au point de puissance maximale V_{mpp} | 35 V |
| Courant de court-circuit I_{cc} | 3.45 A |
| Tension en circuit ouvert V_{co} | 43.5 V |
| Coefficient d'incrémentation du courant $I_{cc} (\alpha_{cc})$ | 1.4 mA/°C |
| Coefficient d'incrémentation de la tension $V_{co} (\beta_{co})$ | -152 mV/°C |

II.3.2 Caractéristique courant-tension et puissance–tension du module photovoltaïque

II.3.2.1 Effet de l'ensoleillement et de la température sur la caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$

La figure (II.3) représente l'effet de l'ensoleillement sur la caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$. On observe une augmentation du courant en fonction de l'augmentation de l'ensoleillement, tandis que la tension de circuit ouvert de la caractéristique ne semble pas être affectée lorsque la température reste constante.

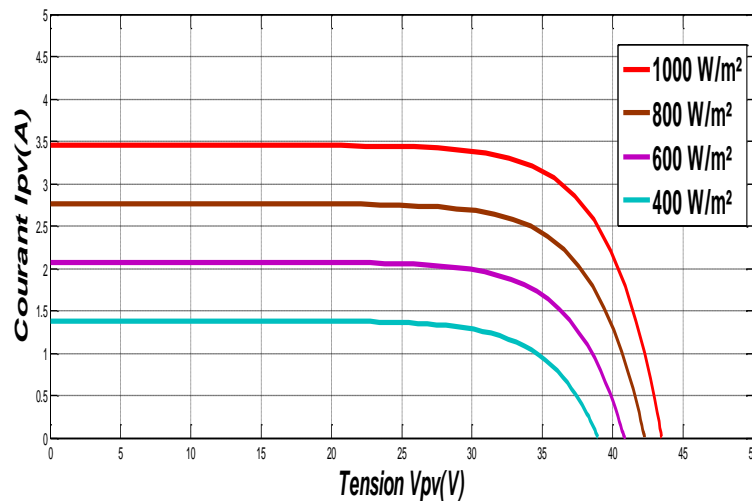


Figure (II.3) : Effet de l'ensoleillement sur caractéristique IPV (VPV)

La figure (II.4) représente l'effet de la température sur la caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$. Lorsque l'ensoleillement est constant et la température varie, on observe que le courant presque constant tandis que la tension augmente avec l'augmentation de la température.

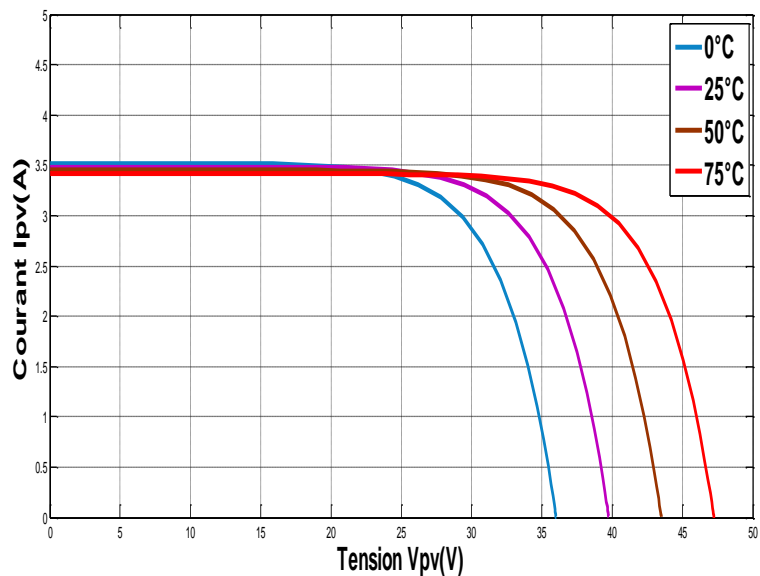


Figure (I.4) : Effet de la température sur la caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$.

II.3.2.2 Effet de l'ensoleillement et de la température sur la caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$

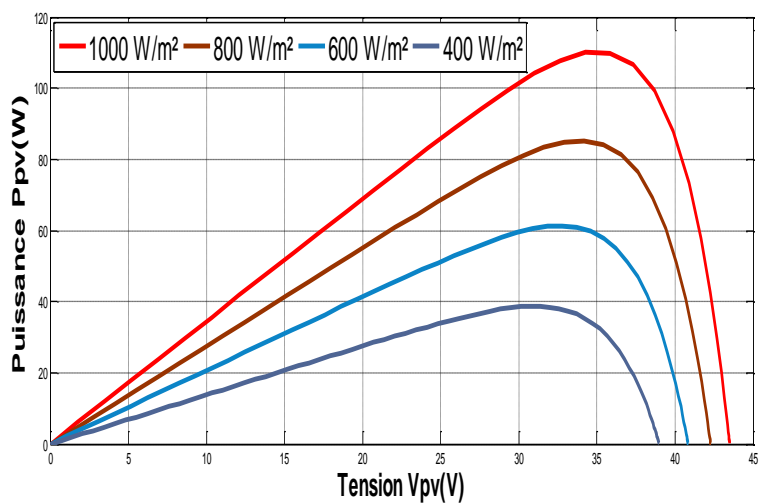


Figure (.5) : Effet de l'ensoleillement sur la caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$.

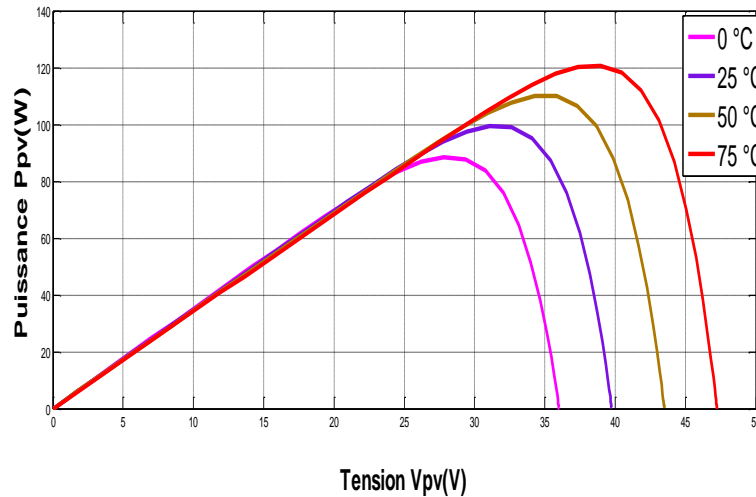


Figure (II.6) : Effet de la température sur la caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$.

Les figure (II.5) et (II.6) démontrent que la caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$ subit une modification significative en fonction des variations du niveau d’ensoleillement, tandis que les modifications restent légères avec la variation de la température. Cette différence est due au fait que l’intensité du courant photovoltaïque varie considérablement en fonction de l’irradiation, mais que la tension varie très peu. En revanche lorsque la température varie, la tension subit une modification importante.

II.4 Modélisation d’un hacheur

Les figure (II.5) et (II.6) démontrent que la caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$ subit une modification significative en fonction des variations du niveau d’ensoleillement, tandis que les modifications restent légères avec la variation de la température. Cette différence est due au fait que l’intensité du courant photovoltaïque varie considérablement en fonction de l’irradiation, mais que la tension varie très peu. En revanche lorsque la température varie, la tension subit une modification importante.

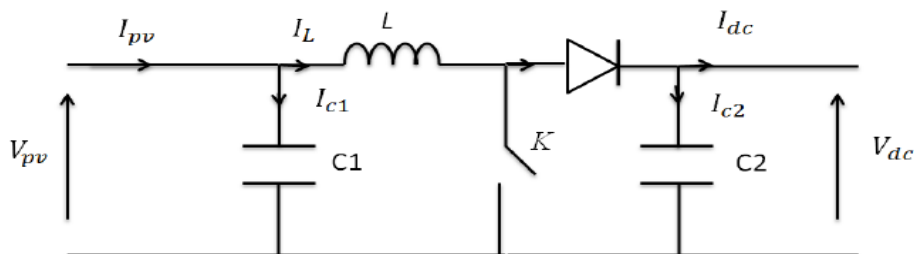


Figure (II.7) : Schéma de base d’un convertisseur Boost.

En appliquant les lois de Kirchhoff aux circuits équivalents du convertisseur survolteur, pour les deux phases de fonctionnement, on obtient :

- **Etape 01** : K est fermé

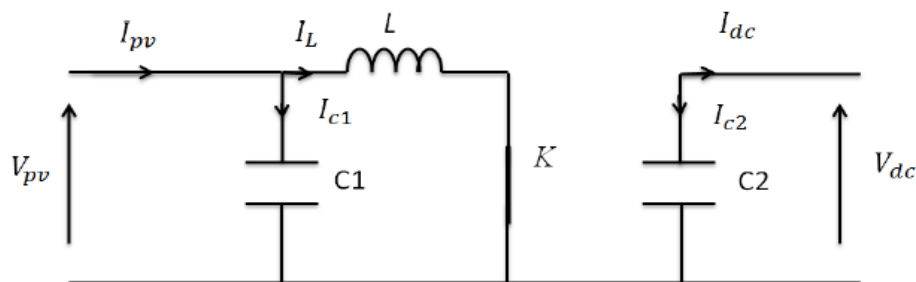


Figure (II.8) : Schéma équivalent du hacheur K fermé.

$$I_{c1}(t) = C_1 \left(\frac{dV_{pv}(t)}{dt} \right) = I_{pv}(t) - I_L(t) \quad (\text{II.17})$$

$$I_{c2}(t) = C_2 \left(\frac{dV_s(t)}{dt} \right) = -I_{dc}(t) \quad (\text{II.18})$$

$$V_L(t) = L \left(\frac{dI_L(t)}{dt} \right) = -V_{pv}(t) \quad (\text{II.19})$$

- **Etape 02** : K est ouvert

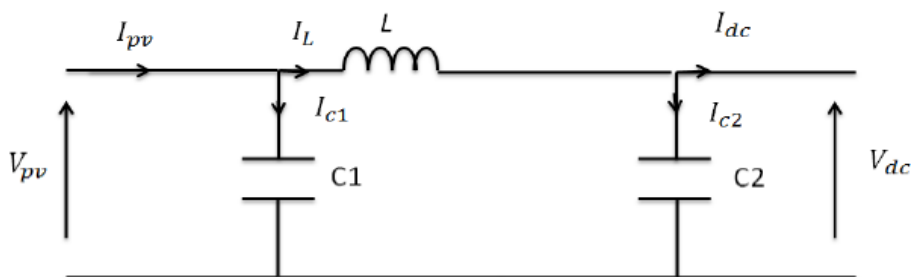


Figure (I.9) : Schéma équivalent du hacheur K ouvert.

$$I_{c1}(t) = C_1 \left(\frac{dV_{pv}(t)}{dt} \right) = I_{pv}(t) - I_L(t) \quad (\text{II.20})$$

$$I_{c2}(t) = C_2 \left(\frac{dV_s(t)}{dt} \right) = I_L(t) - I_s(t) \quad (\text{II.21})$$

$$V_L(t) = L \left(\frac{dI_L(t)}{dt} \right) = V_{pv}(t) - V_{dc}(t) \quad (\text{II.22})$$

II.5 Modélisation du bus continu

Le couplage entre le générateur photovoltaïque et l'onduleur est fait par l'intermédiaire d'un bus continu, qui est composé d'une capacité, qui a pour but le lissage de la tension. L'évolution de la tension du bus continu est obtenue à partir de l'intégration du courant capacitif :

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{1}{C_{dc}} i_c \quad (\text{II.23})$$

Avec :

i_c : le courant qui traverse le condensateur.

II.6 Modélisation du réseau

Notre réseau électrique est modélisé par les équations suivantes :

$$E_a = V_m \sin(\omega t) \quad (\text{II.24})$$

$$E_b = V_m \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (\text{II.25})$$

$$E_c = V_m \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \quad (\text{II.26})$$

$$V_m = \sqrt{2} \cdot V_{eff} \quad (\text{II.27})$$

Avec :

V_m : Tension maximale.

V_{eff} : Tension efficace.

II.7 Modélisation du convertisseur DC-AC (onduleur)

La fonction principale de l'onduleur est de convertir le courant continu produit par le générateur solaire en courant alternatif monophasé ou triphasé. C'est un dispositif électronique de puissance conçu pour générer des tensions et des courants alternatifs en utilisant une source d'énergie électrique de tension ou de fréquence différente. Il est accompli l'opération inverse d'un redresseur.

S_i est l'état de l'interrupteur K_i tel que :

$$S_i = 1 \text{ si } K_i \text{ fermé}$$

$$S_i = 0 \text{ si } K_i \text{ ouvert}$$

Les tensions simples sont déterminées par les fonctions logiques et sont exprimées de la manière suivante :

$$V_a = \frac{V_{dc}}{3} (2S_a - S_b - S_c) \quad (\text{II.28})$$

$$V_b = \frac{V_{dc}}{3} (2S_b - S_a - S_c) \quad (\text{II.29})$$

$$V_c = \frac{V_{dc}}{3} (2S_c - S_a - S_b) \quad (\text{II.30})$$

Et le courant à l'entrée de l'onduleur est donné par :

$$I_{ond} = S_a I_a + S_b I_b + S_c I_c \quad (\text{II.31})$$

Avec :

V_{dc} : Tension du bus continu.

S_a, S_b, S_c : Les fonctions logiques correspondant à l'état des interrupteurs de l'onduleur.

I_a, I_b, I_c : Les courants de sortie de l'onduleur.

I_{ond} : Courant de l'onduleur.

II.8 La commande MPPT

La commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) est un système utilisé dans les installations solaires photovoltaïques pour optimiser la production d'énergie électrique. Elle permet de rechercher le point de fonctionnement optimal du générateur PV qui dépend des conditions météorologiques, afin de maximiser continuellement la puissance à la sortie du panneau PV [TAR 18]. Le principe de cette commande est basé sur la variation automatique du rapport cyclique α en l'amenant à la valeur optimale pour maximiser la puissance délivrée par le panneau PV.

Au fil des années plusieurs types d'algorithmes de commande MPPT ont été développés afin de déterminer le point de puissance maximum. Pour notre étude, Nous avons utilisé deux algorithmes :

- Algorithme de Perturbation et Observation (P&O).
- Algorithme à Base de la Logique Floue.

II.8.1 Algorithme de Perturbation et Observation (P&O)

C'est la méthode la plus utilisée du fait de sa simplicité, cet algorithme perturbe la tension du panneau photovoltaïque et ajuste le rapport cyclique α pour optimiser la puissance fournie. Après chaque perturbation, la puissance est mesurée et comparée à celle de l'instant précédent ($n-1$). Si la puissance augmente, cela signifie que l'on se rapproche du point de puissance maximale (PPM) et le rapport cyclique α est ajusté en conséquence. Cependant, si la puissance diminue, cela indique que l'on s'éloigne du PPM et il faut alors inverser le sens de l'ajustement du rapport cyclique α .

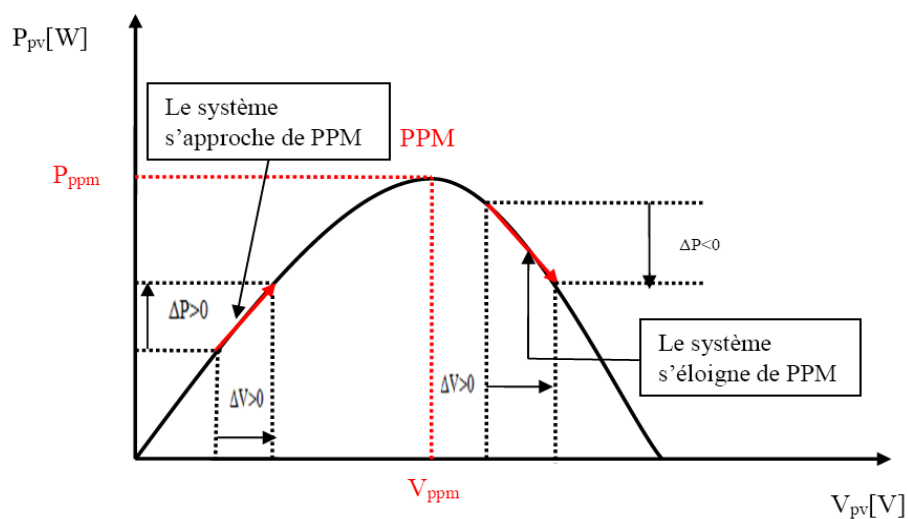


Figure (II.10) : Caractéristiques de fonctionnement de la méthode P&O.

La figure (II.11) donne l’organigramme de l’algorithme de la P&O où l’évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation.

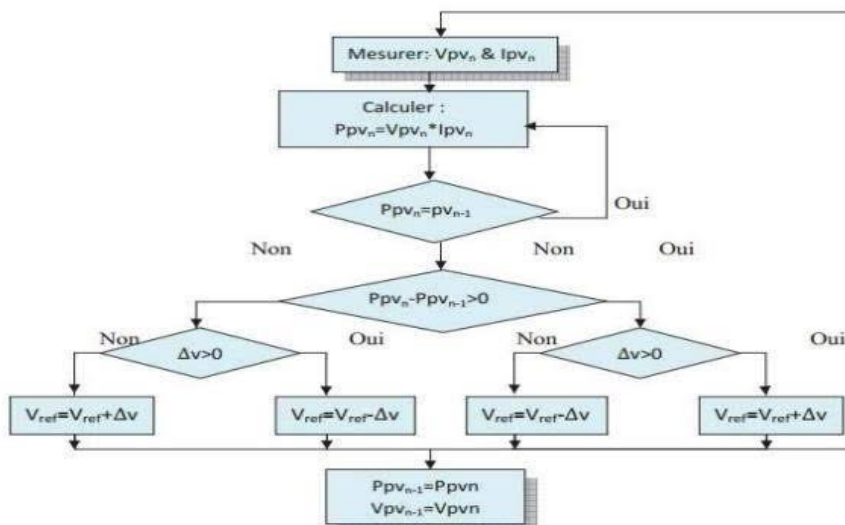


Figure (II.11) : Organigramme de la méthode Perturbation et Observation.

II.8.1.1 Avantages et inconvénients de la méthode P&O

Avantages

- Nombre des paramètres mesurés réduits.
- Structure de régulation simple.

Inconvénients

- Dépassement du point maximum optimal en cas de changement rapide des conditions atmosphériques.

II.8.2 Contrôleur basée sur la logique floue

La commande basée sur la logique floue est utilisée dans les systèmes de poursuite du point de puissance maximale (MPPT). L'avantage de cette commande est sa robustesse et le fait de qu'elle ne nécessite pas une connaissance précise du modèle mathématique du système. Le dispositif MPPT flou, basé sur la mesure de la variation de la puissance photovoltaïque (ΔP_{pv}) et de la tension photovoltaïque (ΔV_{pv}), permet de déterminer une variation ($\Delta V_{pv \text{ ref}}$) de la consigne de tension photovoltaïque ($V_{pv \text{ ref}}$) selon les équations suivantes [ATT 19] :

$$\Delta P_{pv} = P_{pv}[K] - P_{pv}[K - 1]$$

(II.32)

$$\Delta P_{pv} = V_{pv}[K] - V_{pv}[K - 1]$$

(II.33)

$$V_{pv,ref}[K] = V_{pv}[K - 1] + \Delta P_{pv,ref}[K] \tag{II.34}$$

La figure (II.12) illustre la structure du contrôleur utilisant la logique floue dans le système photovoltaïque. Son objectif est de réguler la tension du générateur photovoltaïque (V_{pv}) de manière à suivre la tension photovoltaïque de référence ($V_{pv,ref}$), obtenu à la sortie du contrôleur flou (FLC). La sortie du régulateur de tension est utilisée pour calculer le rapport cyclique du convertisseur DC/DC. Pour s'adapter, les entrées et sorties du contrôleur MPPT flou sont représentées par (ΔP_{pv} , ΔV_{pv} , et $\Delta V_{pv,ref}$), et les ajustements sont effectués dans le tableau (III) ainsi que dans les fonctions d'appartenance des variables d'entrée. Les gains adaptatifs $K1$, $K2$ et $K3$ sont également pris en compte.

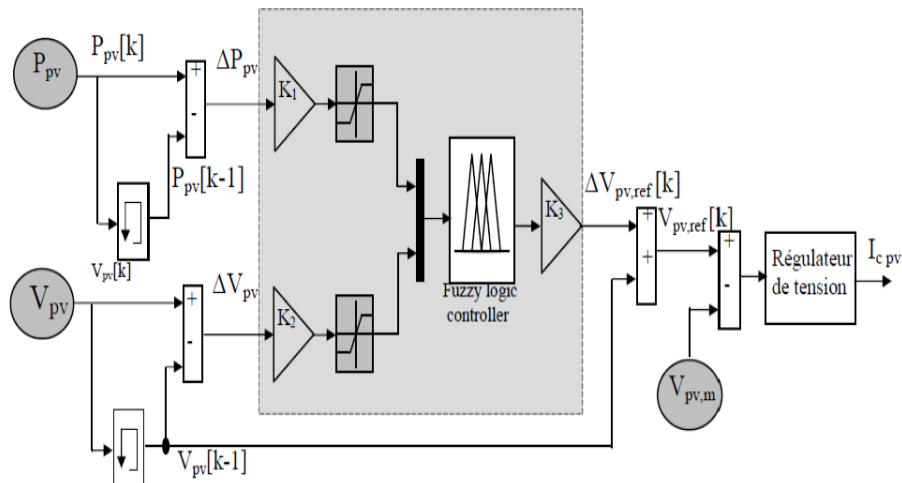


Figure (II.12) : Structure du contrôleur MPPT flou appliqué au système photovoltaïque.

L'algorithme basé sur la logique floue fonctionne en trois étapes distinctes. Tout d'abord, la fuzzification convertit les variables physiques d'entrée en ensembles flous, associant à ces grandeurs des variables linguistiques telles que NG (Négative Grand), NM (Négative Moyen), NP (Négative Petit), Z (Zéro), PP (Positive Petit), PM (Positive Moyen) et PG (Positive Grand). Ensuite, lors de l'étape d'inférence, des décisions sont prises en établissant des relations logiques entre les entrées et la sortie, tout en définissant les règles d'appartenance correspondantes. Un tableau de règles d'inférence (Tableau (II.2)) est ensuite utilisé pour faciliter ce processus. Enfin, lors de la défuzzification, le sous-ensemble flou de sortie est converti en une valeur numérique.

Tableau (II.2) : Tableau de règles d'inférence [ATT 18].

| ΔP_{pv} \ ΔV_{pv} | NG | NM | NP | Z | PP | PM | PG |
|-----------------------------------|----|----|----|---|----|----|----|
| NG | PG | PG | PM | Z | NM | NG | NG |
| NM | PG | PM | PP | Z | NP | NM | NG |
| NP | PM | PP | PP | Z | NP | NP | NM |
| Z | NG | NM | NP | Z | PP | PM | PG |
| PP | NM | NP | NP | Z | PP | PP | PM |
| PM | NG | NM | NP | Z | PP | PM | PG |
| PG | NG | NG | NM | Z | PM | PG | PG |

II.9 Principe de la commande MPPT

De nombreuses méthodes de poursuite du point de puissance maximale (MPPT) ont été développées pour permettre au système d'extraire le maximum de puissance du générateur photovoltaïque. Le principe de ces méthodes est de déplacer le point de fonctionnement en augmentant la tension de sortie V_{pv} lorsque le rapport de variation de la puissance par rapport à la tension d'entrée (dP_{pv}/dV_{pv}) est positif, ou en diminuant la tension de sortie V_{pv} lorsque dP_{pv}/dV_{pv} est négatif. Que ce soit en régime transitoire ou en régime permanent, ces commandes doivent estimer et comparer la puissance actuelle avec celle de l'instant précédent. En résumé, le principe de la commande MPPT consiste à ajuster en temps réel la tension de sortie des panneaux solaires pour maximiser la production d'énergie électrique en maintenant le panneau solaire à son point de puissance maximale (MPP).

II.10 Résultat de simulation

Afin de démontrer la robustesse du contrôleur flou (FLC), nous l'avons comparé dans les mêmes conditions de fonctionnement par rapport à la méthode (P&O) appliquée au système photovoltaïque.

Nous pouvons observer la puissance du générateur photovoltaïque (P_{pv}) pour les deux méthodes de contrôle MPPT, à savoir la méthode de perturbation et observation (P&O) ainsi

que le contrôleur basé sur la logique floue (FLC). Une observation importante est que le FLC présente une réponse plus rapide, atteignant sa valeur optimale en 0.1s, tandis que la méthode P&O nécessite plus de temps, soit 0.2s, pour extraire le point de puissance maximale. De plus, la méthode P&O présente des oscillations autour du point de fonctionnement en régime permanent. En utilisant le contrôleur flou, non seulement le temps de convergence pour extraire le PPM est réduit, mais les fluctuations de puissance en régime établi sont également réduites, comme clairement illustré dans les figures (II.13).

La méthode de contrôle de logique floue (FLC) démontre d'excellents résultats, avec le système photovoltaïque qui fonctionne en permanence à son point de puissance maximale. Elle présente une réponse rapide et stable, se démarquant ainsi de la méthode de poursuite du point de puissance maximale (P&O). L'étude de ce système photovoltaïque met en évidence sa capacité à fournir la puissance maximale disponible (MPPT) afin de maintenir une alimentation constante et de réguler la tension aux bornes, même en présence de fluctuations des conditions environnementales.

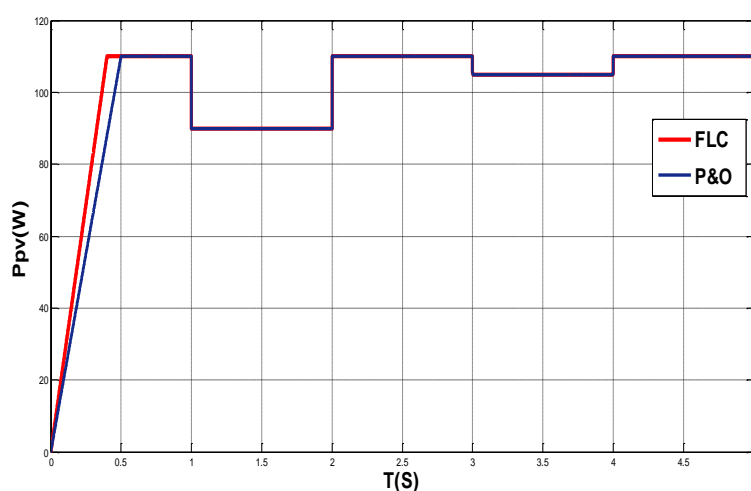


Figure (II.13) : Allure comparative entre P&O et FLC.

II.12 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la modélisation de différentes composantes de système générateur photovoltaïque, filtre RL (côté réseau et côté convertisseur), bus continue, convertisseur DC/DC et convertisseur DC/AC.

Nous concluons que l'influence de l'éclairement et la température sur le module photovoltaïque régressent d'une manière contractive lors de la variation en instantané de la température et de l'ensoleillement. Ainsi on a parlé sur les deux commandes pour maximiser la puissance dans le panneau.

Nous concluons que l'influence de l'éclairement et la température sur le module photovoltaïque régressent d'une manière contractive lors de la variation en instantané de la température et de l'ensoleillement. Ainsi on a parlé sur les deux commandes pour maximiser la puissance dans le panneau perturbation observation P&O et la logique floue FLC, on a conclu que la méthode de la logique floue est plus robuste.

Cette étape de modélisation de notre système est une étape essentielle, elle va nous permettre d'étudier la commande de ce système dans le prochain chapitre. La commande directe de puissance (DPC) classique sera présentés dans le prochain chapitre.

III.1 Introduction :

Au cours du chapitre précédent, nous avons abordée la modélisation de différentes parties du système photovoltaïque connecté au réseau.

Dans ce présente chapitre, nous nous penchons sur la commande directe de puissance (DPC), qui repose sur l'utilisation d'une table de commutation. Cette dernière est tirée de l'analyse des variations des puissances actives et réactives instantanées, ce qui permet un contrôle simultané et précis de ces paramètres. Nous examinons une table de commutation composée de douze (12) secteurs.

A la fin, nous présenterons les résultats de simulation, accompagnés d'interprétations détaillées.

III.2 Etat de l'art sur la commande directe de puissance

Le principe de la DPC a été proposé pour la première fois en 1986 par TAKAHASHI et NOGUCHI T [TAK 86], et a été développé plus tard pour plusieurs applications. La première application développée était le contrôle d'une machine électrique et la structure de contrôle était connue sous le nom de Commande directe de Couple DTC. Dans ce cas, le flux statique et le couple électromagnétique de la machine sont commandés sans aucun bloc de modulation [HER 06] [AFE 16].

Se basant sur la technique DTC, une autre alternative appelée la DPC a été proposée par NOGUCHI TOMIKI TAKAHAHI [NOG 98] Pour une application de commande des redresseurs connectés au réseau. Dans ce cas, les grandeurs contrôlées sont les puissances active et réactive instantanées [HER 06] [AFE 16].

La DPC permet d'éliminer la boucle de régulation en courant et l'élément de modulation en sélectionnant La DPC permet dont les états de commutation de l'onduleur à partir d'une table basée sur l'erreur instantanée entre les valeurs de référence et les mesures ou estimations des puissances active et réactive, ainsi que la position angulaire du vecteur de tension de source. Cette stratégie de commande permet généralement de réguler la tension du bus continu pour le contrôle de la puissance active et d'obtenir un fonctionnement à facteur de puissance unitaire en imposant une puissance réactive nulle [OUC 17].

III.3 Principe de la DPC et ses avantages

Le but de la DPC est de contrôler directement les puissances actives et réactives dans un onduleur de tension. Elle consiste à sélectionner un vecteur de commande d'après une table de commutation appliquée au pont triphasé, comme illustré sur la figure (III.1). Cette dernière est

Chapitre III : Commande DPC et simulation du système globale.

fondée sur l'erreur numérisée S_p , S_Q qui sont limitées par une bande d'hystérésis, ainsi que sur la position angulaire de la tension au point de raccordement de la charge au réseau.

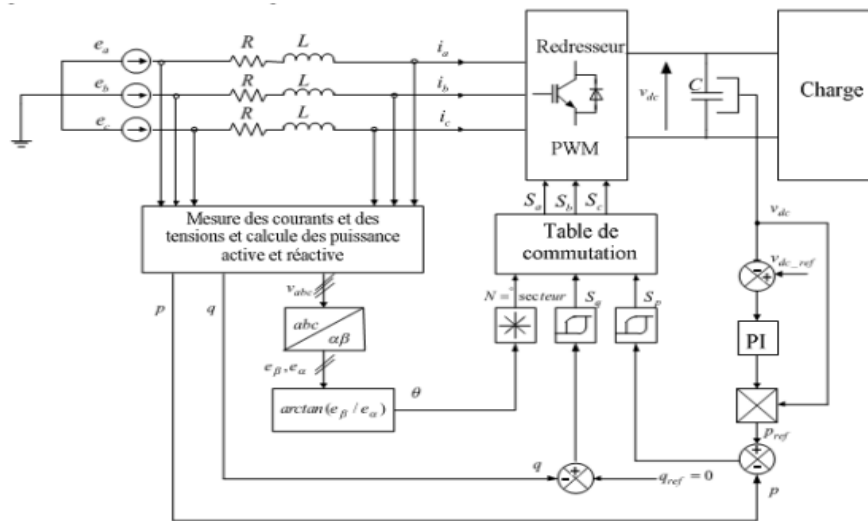


Figure (III.1) : Configuration générale de la commande DPC.

Le plan (α, β) est divisé en douze secteurs pour déterminer le secteur de travail. La puissance active de référence est calculée à partir de la sortie du régulateur de tension du bus continu V_{dc} tandis que la référence de la puissance réactive est mise à zéro pour assurer un facteur de puissance unitaire.

Les avantages de DPC sont les suivants :

- Réduction des coûts, la commande DPC permet d'utiliser des composants électroniques moins coûteux.
- Robustesse de la commande DPC est moins sensible aux variations de la charge.
- Haute dynamique.
- Commande de puissance active et réactive découplée.

III.3.1 Calcul de la puissance active et réactive [BAN 22]

Pour étudier la stratégie de contrôle directe de puissance DPC, la théorie des puissances instantanées est utilisée pour calculer les valeurs instantanées des puissances active et réactive. Les valeurs instantanées des tensions triphasées noté « e_a, e_b, e_c » et des courants triphasés notées « i_a, i_b, i_c ».

Après la transformation de Concordia, on obtient les tensions e_α, e_β et les courants i_α, i_β sous le système de coordonnées stationnaires biphasés $\alpha\beta$.

Il est connu que le calcul de la puissance active « P » est un produit scalaire entre les tensions et les courants, alors que la puissance réactive « Q » peut être calculée par un produit vectoriel entre eux :

$$P = V_{\alpha}i_{\alpha} + V_{\beta}i_{\beta}$$

(III.1)

$$Q = -V_{\alpha}i_{\beta} + V_{\beta}i_{\alpha}$$

(III.2)

L'erreur de la puissance active ΔP est la différence entre la valeur de la puissance active désirée P_{ref} et la valeur réelle de la puissance active P_{mes} :

$$\Delta P = P_{ref} - P_{mes}$$

(III.3)

L'erreur de la puissance réactive ΔQ est liée à la différence entre la valeur de puissance réactive désirée Q_{ref} et à la valeur de puissance réactive réelle Q_{mes} :

$$\Delta Q = Q_{ref} - Q_{mes}$$

(III.4)

III.3.1.1 Comparateur à hystérésis

L'idée principale de la commande directe de puissance est de maintenir les puissances active et réactive instantanées dans une bande désirée. Ce contrôle est basé sur deux comparateurs à hystérésis qui comparent les valeurs de références et estimées des puissances actives et réactives.

Les régulateurs à hystérésis produisent des sorties sous forme de variable booléennes S_p et S_Q , lorsque la variable contrôlée (P et Q) augmente, ces variables prennent la valeur "1", et lorsque la variable contrôlée diminue, elles prennent la valeur "0".

Pour la puissance active :

- $S_p = 1$ si $\Delta P > HP$
- $S_p = 0$ si $\Delta P < HP$

Et pour la puissance réactive peut écrire :

- $S_Q = 1$ si $\Delta Q > HQ$.
- $S_Q = 0$ si $\Delta Q < HQ$.

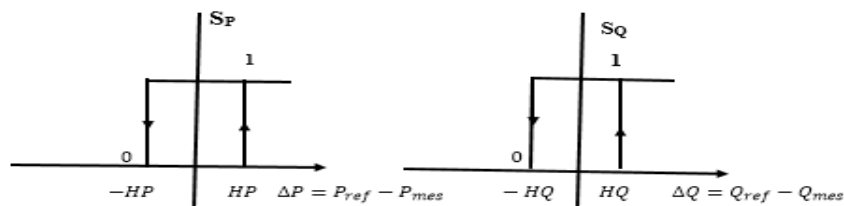


Figure (III.2) : Caractéristiques des régulateurs à hystérésis à deux niveaux.

III.3.2 Table de commutation

La table de commutation joue un rôle primordial dans la commande directe de puissance. Elle permet de sélectionner le vecteur de tension approprié dans l'onduleur pour afin d'ajuster les puissances active et réactive instantanées à leur valeur désirée. Cette sélection se fait en fonction de la position du vecteur de tension de la source ainsi que des erreurs de puissances active et réactive. Dans cette étude, nous utilisons la table de commutation de douze secteur afin d'assurer une minimisation optimale de l'erreur de puissance.

En utilisant cette table de commutation, les états de commutation optimaux du convertisseur peuvent être sélectionnés de manière unique à chaque instant spécifique selon la combinaison des signaux d'entrée numérisés, comme il est montré sur le tableau (III.1) :

Tableau (III.1) : Table de commutation de la DPC à 12 secteurs [CHA 10].

| S_p | S_q | S_1 | S_2 | S_3 | S_4 | S_5 | S_6 | S_7 | S_8 | S_9 | S_{10} | S_{11} | S_{12} |
|-------|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1 | 0 | V6 101 | V7 111 | V1 100 | V0 000 | V2 110 | V7 111 | V3 010 | V0 000 | V4 011 | V7 111 | V5 001 | V0 000 |
| 1 | 1 | V7 111 | V7 111 | V0 000 | V0 000 | V7 111 | V7 111 | V0 000 | V0 000 | V7 111 | V7 111 | V0 000 | V0 000 |
| 0 | 0 | V6 101 | V1 100 | V1 100 | V2 110 | V2 110 | V3 010 | V3 010 | V4 011 | V4 011 | V5 001 | V5 001 | V6 101 |
| 0 | 1 | V1 100 | V2 110 | V2 110 | V3 010 | V3 010 | V4 011 | V4 011 | V5 001 | V5 001 | V6 101 | V6 101 | V1 100 |

III.3.3 Choix du secteur

L'influence de chaque vecteur de contrôle appliqué par le FAP sur les puissances active et réactive dépend fortement de la position réelle du vecteur de la tension de source. Ainsi, le tableau de commutation utilise comme entrées les signaux issus des deux contrôleurs à hystérésis (S_p et S_q) et la position du vecteur de la tension de source.

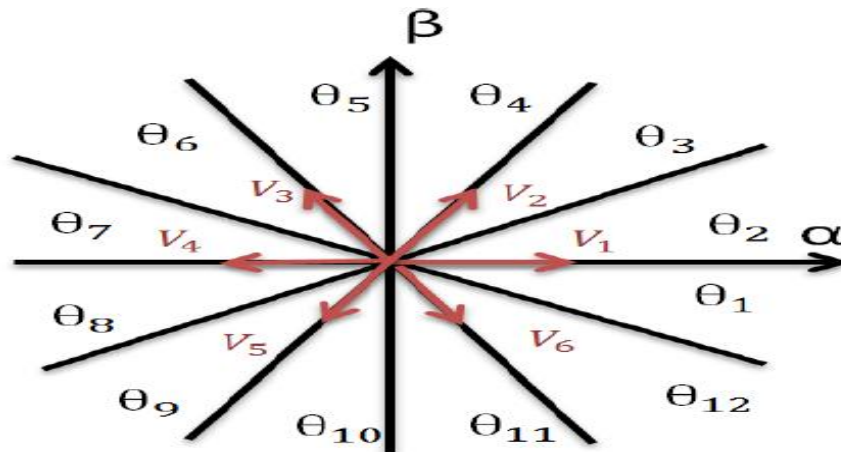


Figure (III.3) : Représentation du vecteur de la tension dans le plan (α, β) divisé en douze (12) secteurs.

Selon l'angle du vecteur de la tension de source référencé sur l'axe α , le secteur dans lequel le vecteur est localisé et sélectionner, comme illustré dans la figure (III.3). L'angle est calculé à l'aide de la fonction trigonométrique inverse, basée sur les composantes du vecteur de tension dans le repère (α, β) , comme indiquée par l'équation suivante :

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{V_{\beta}}{V_{\alpha}} \right)$$

(III.5)

En comparant l'angle θ avec les bornes de chacun des douze secteurs définis par la formule suivante, il est possible de déterminer le numéro du secteur où se trouve le vecteur des tensions.

$$(K - 2) \left(\frac{\pi}{6} \right) \leq \theta \leq (K - 1) \left(\frac{\pi}{6} \right) \quad [K=1,2,3,\dots,12] \quad \text{(III.6)}$$

III.4 Résultats de simulation du système PV connecte au réseau

Le système étudié se compose d'un générateur photovoltaïque de 20 panneaux identiques de 110W chacun, connecté au réseau à travers un onduleur de tension triphasé. Le réseau électrique alimente un récepteur non linéaire constitué par un redresseur PD3 ayant pour charge une résistance en série avec une inductance.

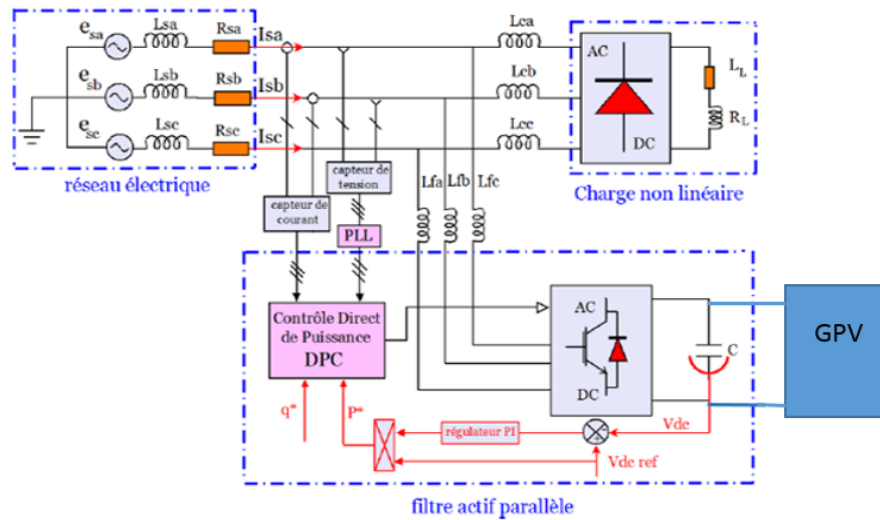


Figure (III.4) : schéma global de simulation d'un système photovoltaïque connecté au réseau.

III.4.1. Le premier essai

Pour tester la robustesse de la commande DPC et l'algorithme de recherche du point de puissance maximum (MPPT) appliqués, un profil d'ensoleillement et de température représentés sur les figures (III.5 et III.6), balayant les différents modes de fonctionnement de système étudié, est appliqué. Les simulations sont réalisées sous Matlab/Power Sim.

La figure (III.7) décrit les variations de la puissance du générateur photovoltaïque, l'algorithme MPPT flou a permis l'extraction de la puissance maximale disponible même lors de variation des conditions météorologique. Le courant photovoltaïque possède une allure similaire à celle de la puissance P_{pv} .

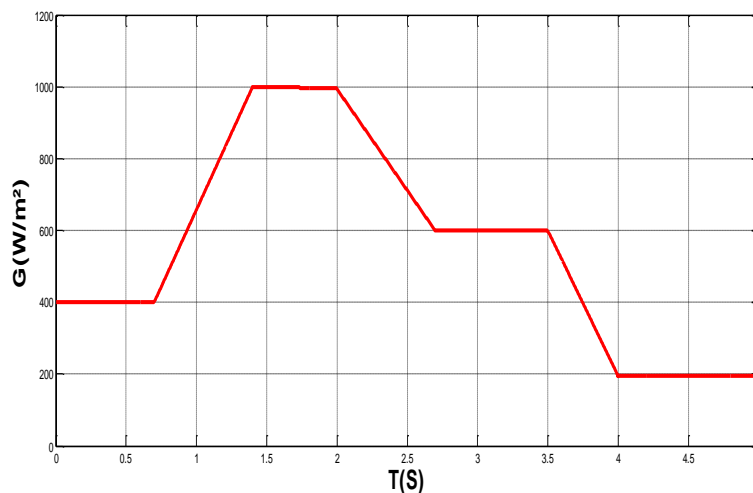


Figure (III.5) : Allure de l'ensoleillement.

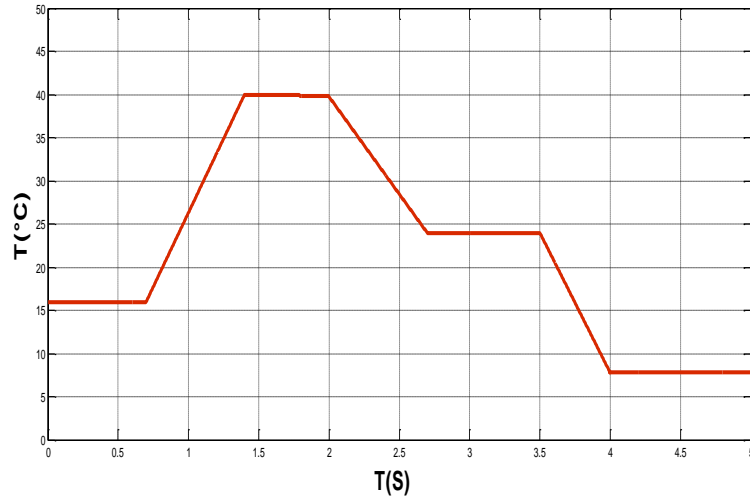


Figure (III.6) : Allure de la température.

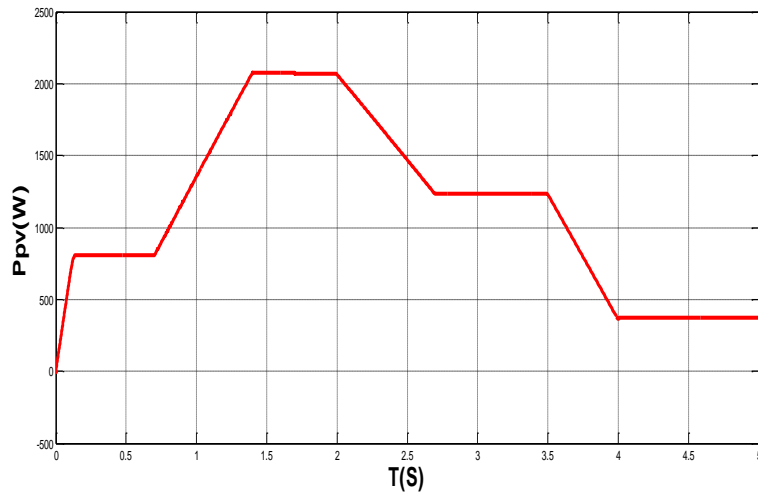


Figure (III.7) : Allure de puissance en sortie de GPV.

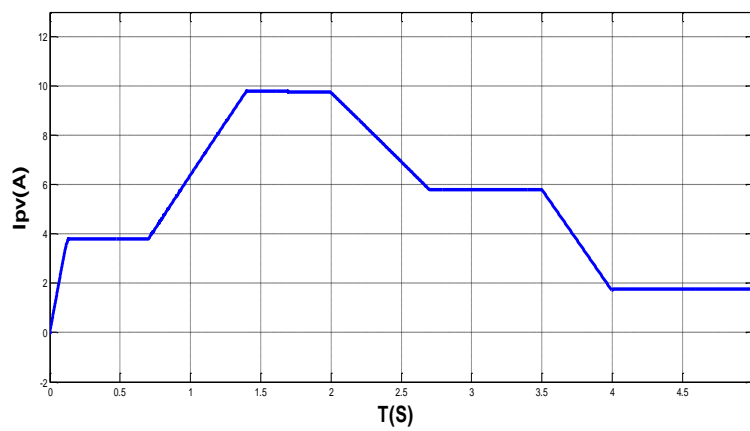


Figure (III.8) : Allure de courant en sortie de GPV.

Chapitre III : Commande DPC et simulation du système globale.

Nous observons dans les figures (III.7), (III.8) que les variations de puissance et du courant à la sortie du générateur photovoltaïque (GPV) sont en accord avec le profil d'ensoleillement et de température.

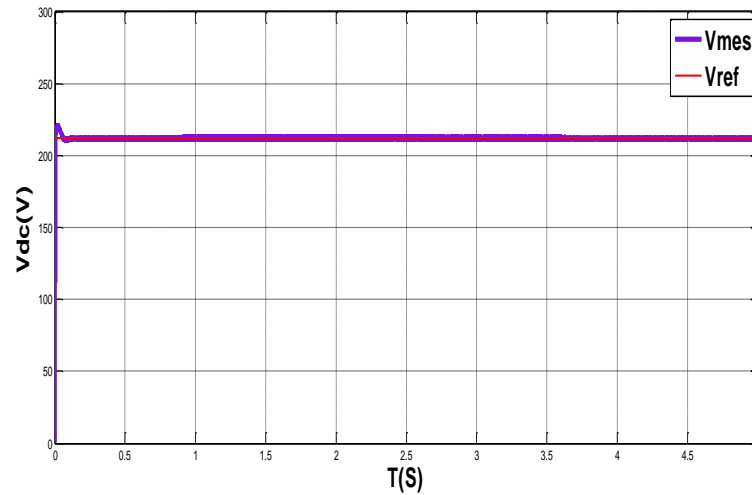


Figure (III.9) : Allure de la tension de bus contenu V_{dc} .

La figure (III.9) représente l'allure de la tension du bus continu, on voit bien qu'elle est bien régulée et suit sa valeur de référence.

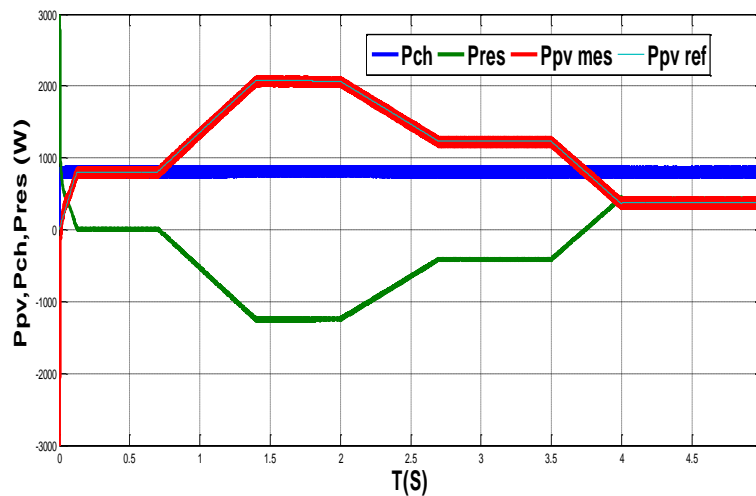


Figure (III.10) : Allure des différentes puissances (photovoltaïque, réseau et charge).

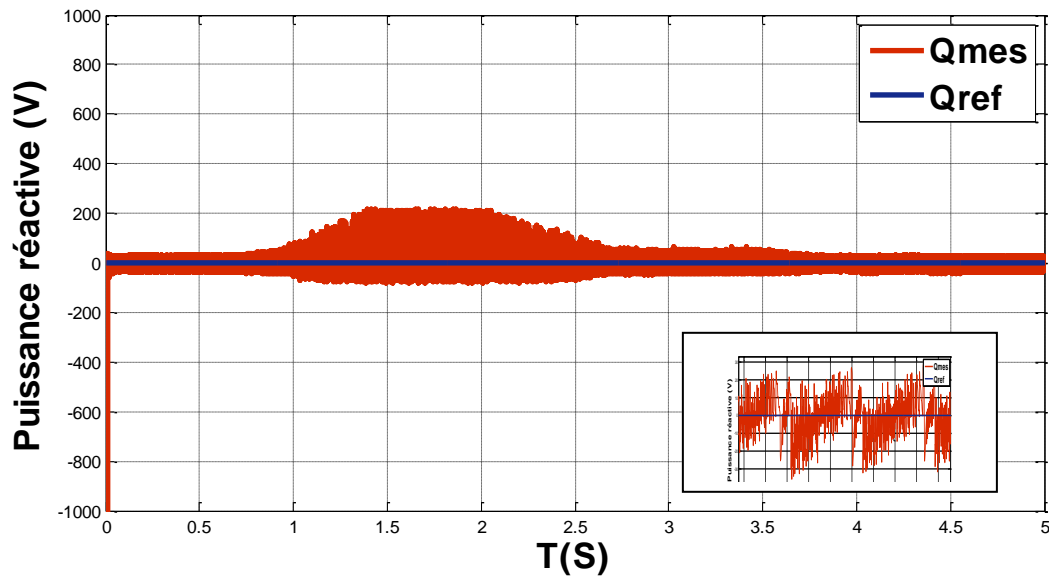


Figure (III.11) : Allure de la puissance réactive du réseau.

La figure (III.10) représente les allures des puissances, photovoltaïque, charge et réseau. La puissance active du réseau suit la trajectoire imposée par la commande, entre $[t=0.13s \text{ à } t=0.7s]$, le générateur photovoltaïque fournit toute la puissance à la charge, donc la puissance du réseau est nulle. A partir de $[t=0.7s \text{ à } t=3.7s]$, le générateur photovoltaïque injecte de l'énergie vers la charge polluante et le réseau en même temps. Entre $[t=3.7s \text{ à } t=5s]$, les deux sources (générateur photovoltaïque et réseau) assurent simultanément la génération de la puissance. La puissance réactive du réseau est nulle présentée sur la Figure (III.11), c'est le filtre actif qui fournit la puissance réactive à la charge.

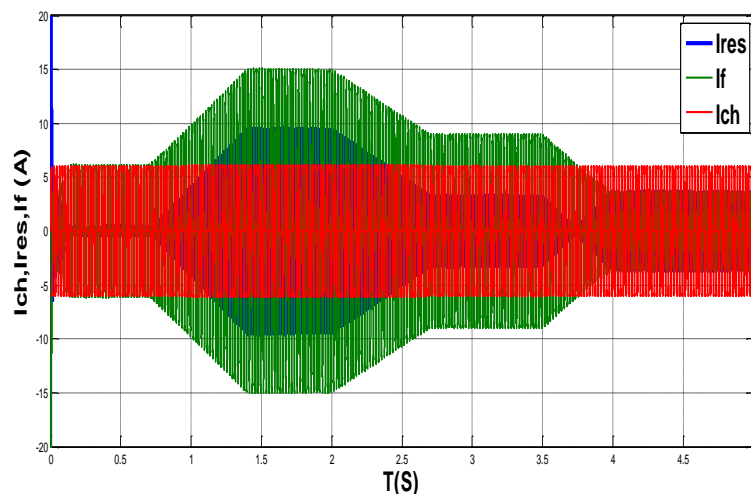


Figure (III.12) : Allure globale des différents courants (photovoltaïque, réseau et charge).

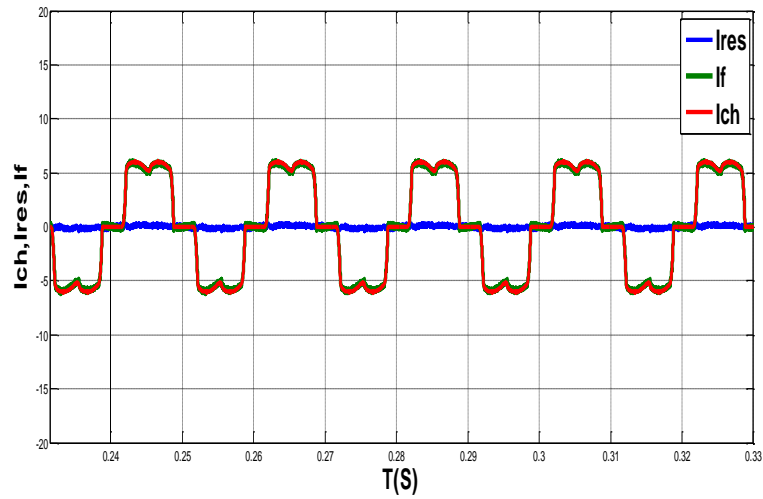


Figure (III.13) : Zoom (1) sur l'allure des courants.

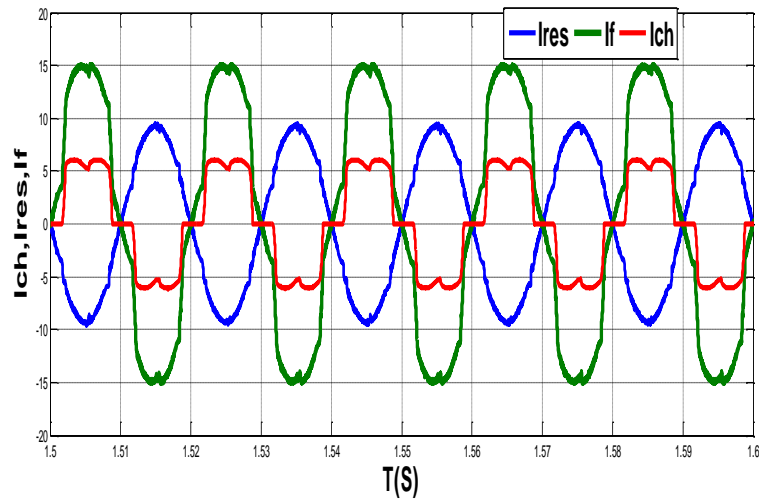


Figure (III.14) : Zoom (2) sur l'allure des courants.

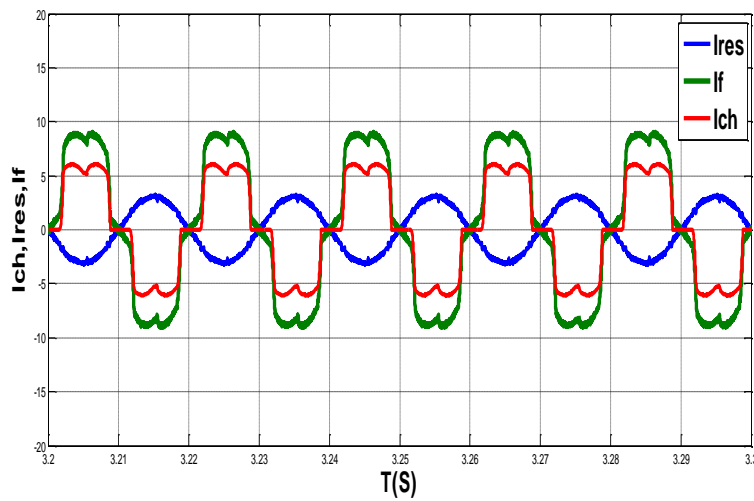


Figure (III.15) : Zoom (3) sur l'allure des courants.

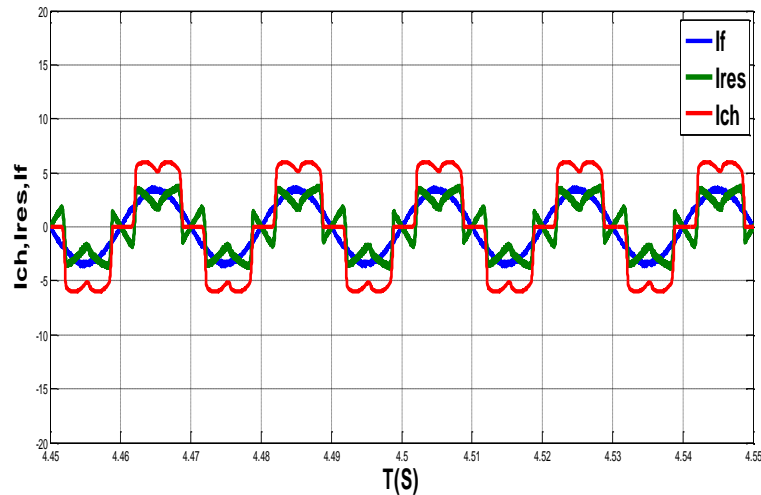


Figure (III.16) : Zoom (4) sur l'allure des courants.

L'analyse de la figure (III.13) montre que le courant du générateur photovoltaïque (GPV) est égal au courant de la charge non linéaire, et le courant du réseau (I_{res}) est nul. Cela confirme que le GPV fournit toute sa puissance à la charge non linéaire sans aucune contribution du réseau.

La variation de l'amplitude du courant traduit le niveau de puissance qui transite côté réseau. Le courant de source reste quasi sinusoïdal mais en opposition de phase par rapport au courant de la charge polluante et de la tension réseau. Ce déphasage prouve que le réseau reçoit bien de la puissance active issue de la source photovoltaïque après soustraction de la valeur consommée par la charge. Le courant du filtre actif vient compenser les courants harmoniques induits par la charge non linéaire. Dans l'intervalle $[t=0.7s \text{ à } t=3.7s]$, le générateur photovoltaïque constitue la source dominante ($P_{pv} > P_{ch}$), le courant du filtre actif contient l'information de la compensation harmonique et de l'injection du courant photovoltaïque.

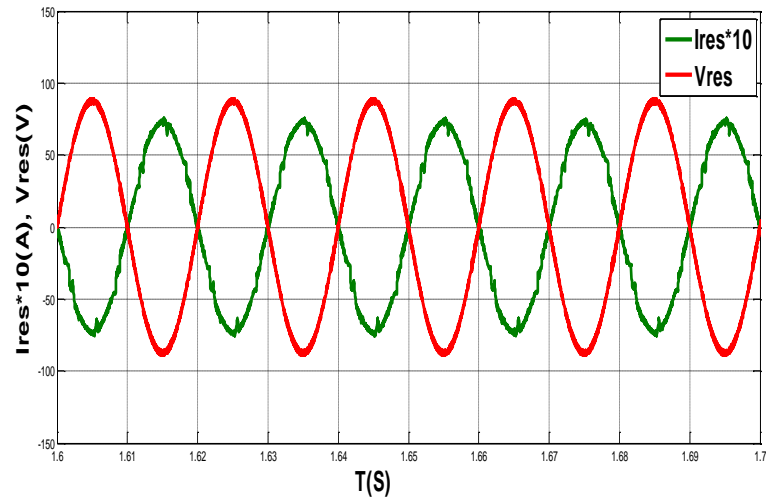


Figure (III.17) : Zoom (1) sur l'allure de la tension et du courant du réseau.

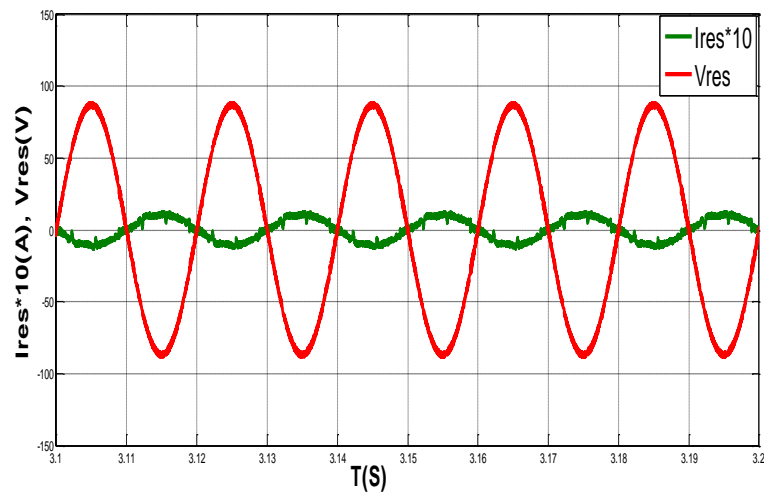


Figure (III.18) : zoom (2) sur l'allure de la tension et du courant du réseau.

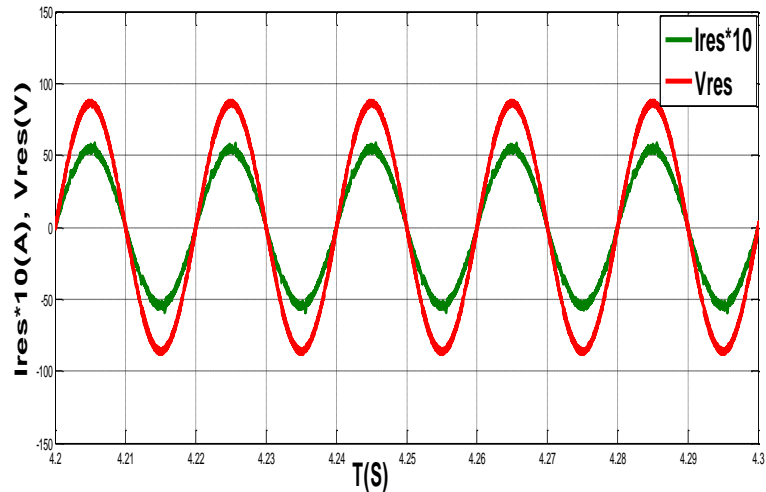


Figure (III.19) : zoom (3) sur l'allure de tension et du courant.

Les figures (III.17) et (III.19) déterminent l'évolution du courant de source qui est quasi sinusoïdal et en opposition de phase avec la tension réseau. Il se comporte comme un récepteur lorsque le courant est en opposition de phase (figures (III.14) et (III.15)). Il devient générateur si le courant et la tension sont en phase (figure III.16).

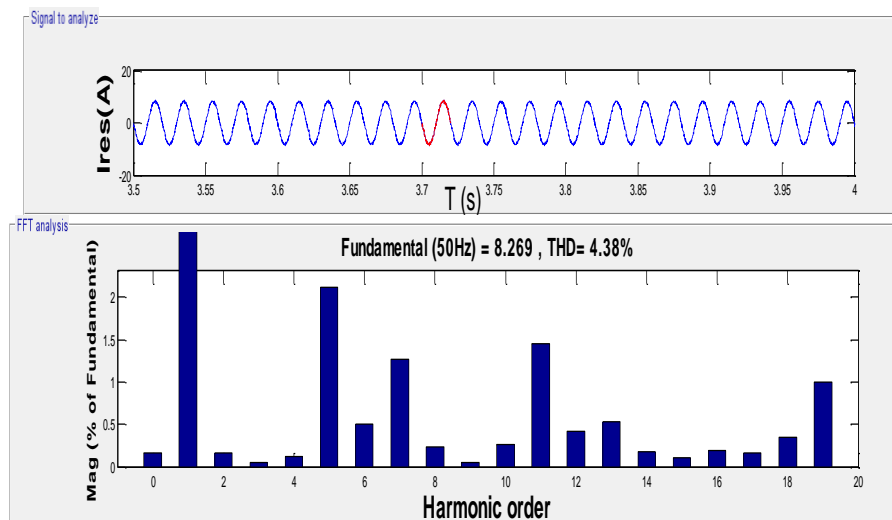


Figure (III.20) : Zoom (1) sur spectre d'harmonique du courant du réseau.

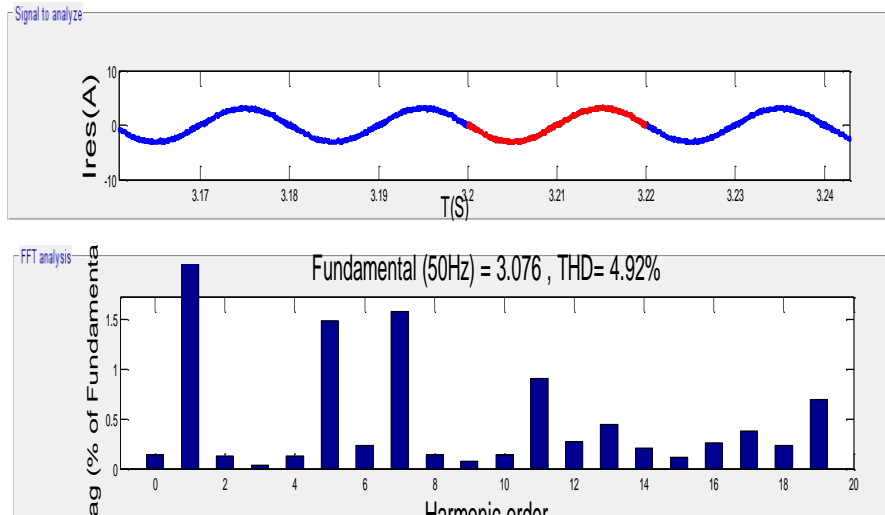


Figure (III.21) : Zoom (2) sur spectre d'harmonique du courant du réseau.

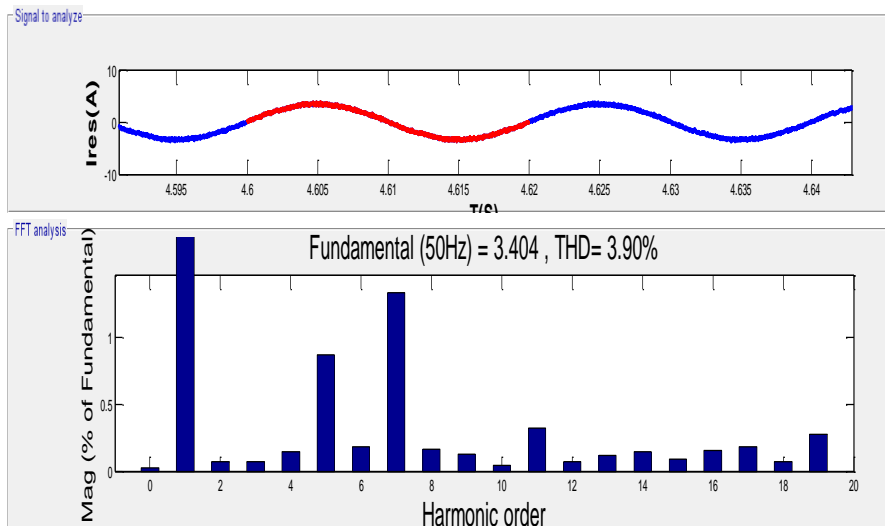


Figure (III.22) : Zoom (3) sur spectre d'harmonique du courant du réseau.

En analysant les trois échantillons, nous pouvons remarquer que la période de $[t=1.5s$ à $t=1.8s]$, présente le plus faible taux de distorsion harmonique total (THD), qui égale à 4.51%. Cette période correspond à un ensoleillement plus élevé ($G=1000$ W/m²) par rapport aux autres intervalles $[t=3s$ à $t=3.5s]$ et $[t=4s$ à $t=5s]$, où ensoleillement est moins intense.

III.4.2. Deuxième essai

Dans ce deuxième essai, nous effectuons une variation de charge RL de PD3 passe de 25Ω à 75Ω à $t=1s$, tout en maintenant les conditions de STC pour la température et l'ensoleillement constants (1000 W/m², 25 °C).

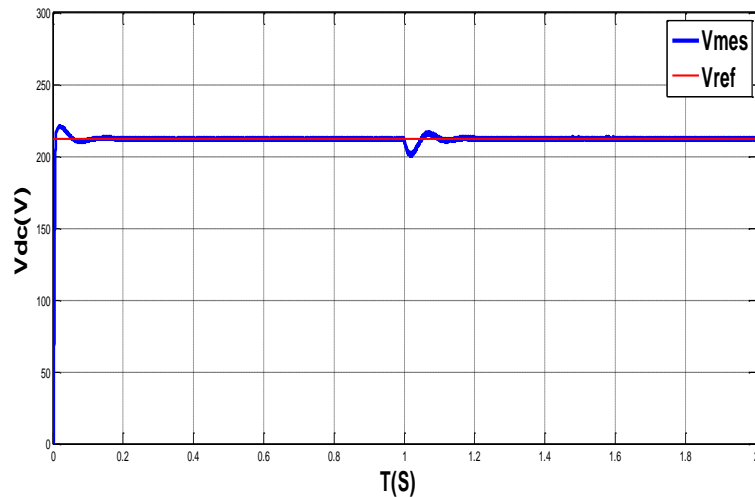


Figure (III.23) : Allure de la tension de bus continue V_{dc} avec la variation de la charge.

La Figure (III.23), représente l’allure de tension du bus continu V_{dc} , avec une variation de la charge. On peut remarquer que la tension mesurée suit d’une manière cohérente la tension de référence jusqu’à ce qu’un certain niveau de variation de charge soit atteint, où l’on observe une légère perturbation. Puis, la tension retrouve son état stable.

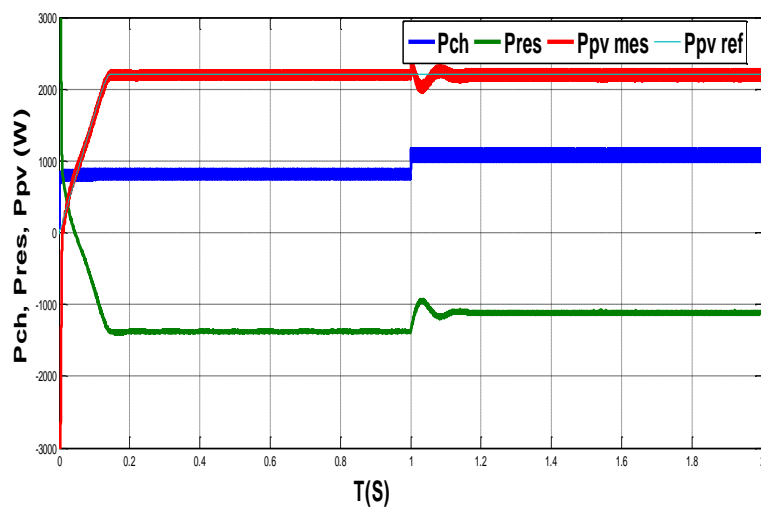


Figure (III.24) : Allure des puissances du générateur photovoltaïque, réseau et charge avec une variation de la charge.

La figure (III.24) représente les profils des puissances, photovoltaïque, réseau et réseau. Le générateur PV fournit une puissance constante qui sera consommée par la charge et le réseau. A partir de $t=1s$, la charge augmente, ce qui entraîne une diminution de la puissance envoyée au réseau par rapport à la valeur précédente. Cela démontre que le réseau reçoit de la puissance active provenant de la source photovoltaïque une fois la valeur consommée par la charge soustraite.

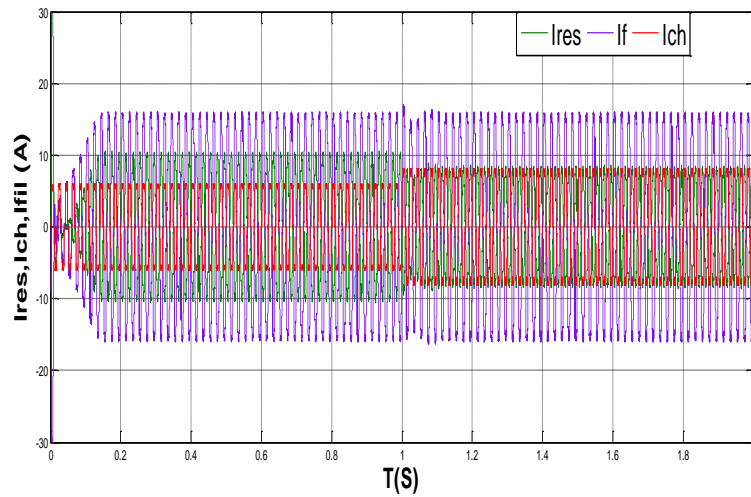


Figure (III.25) : Allure globale des courants pour une variation de la charge.

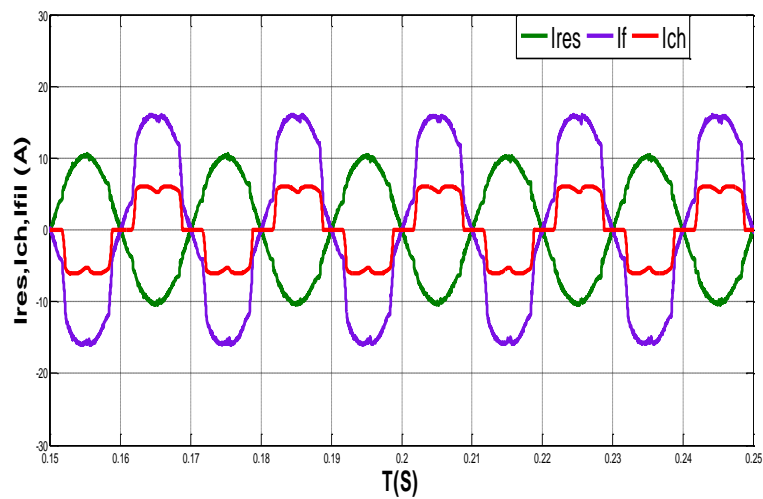


Figure (III.26) : Zoom (1) sur l'allure des différents courants.

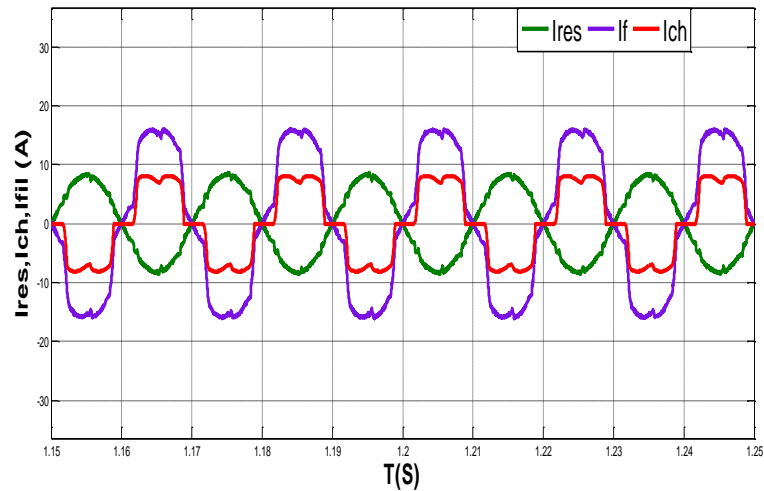


Figure (III.27) : Zoom (2) sur l'allure des différents courants.

Ces figures (III.26) et (III.27) représentent les allures des courants du réseau, du générateur panneau photovoltaïque et de la charge. On observe que le courant du réseau est quasi-sinusoïdale et qu'il est en opposition de phase avec le courant de la charge. Ce qui prouve que le réseau consomme de la puissance fournie par le générateur (mode récepteur).

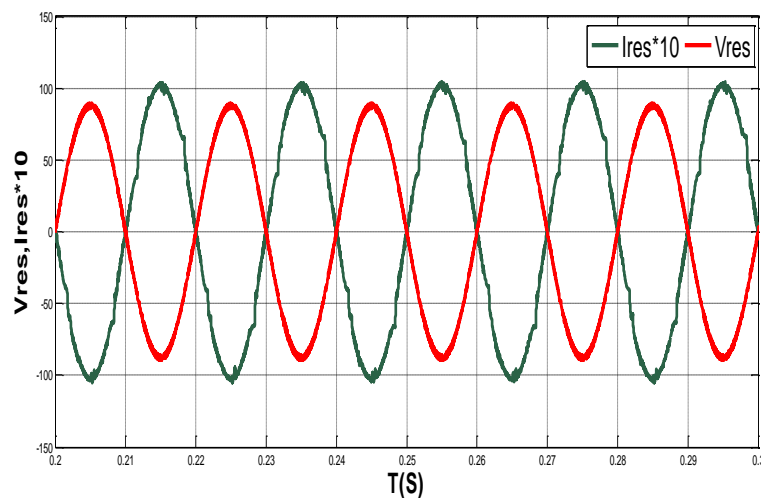


Figure (III.28) : Zoom (1) sur l'allure du courant et de la tension de phase avant la variation de la charge.

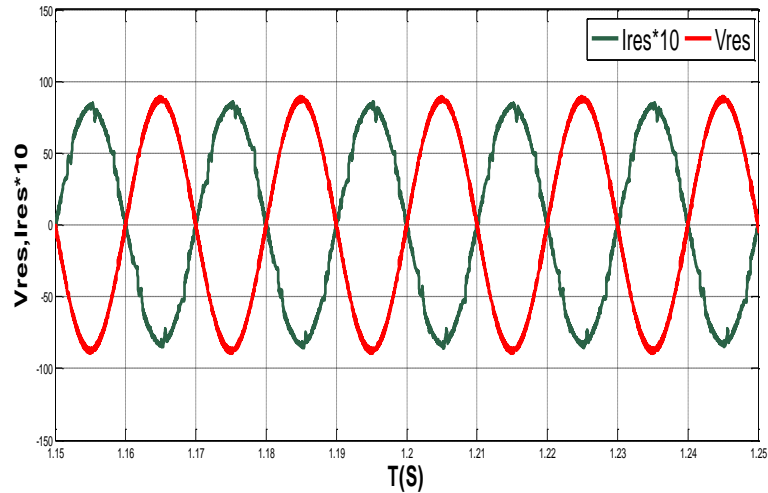


Figure (III.29) : Zoom (2) sur l'allure du courant et de la tension de phase après la variation de la charge.

Les figure (III.28) et (III.29) évoquent les allures des tensions et des courants pour une variation de la charge qui à $t=1s$, on observe que la valeur du courant du réseau I_{res} diminue après cette variation, suite à l'appel d'un courant plus important par la charge se qui confirme une diminuation de la puissance envoyée au réseau.

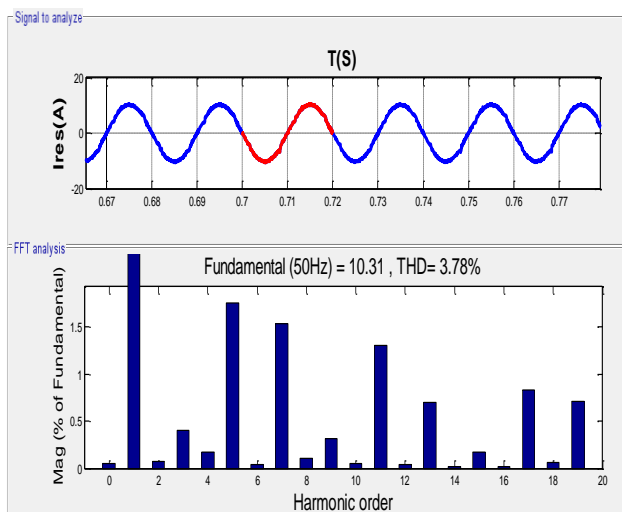


Figure (III.30) : Zoom (1) sur spectre d'harmonique du courant du réseau.

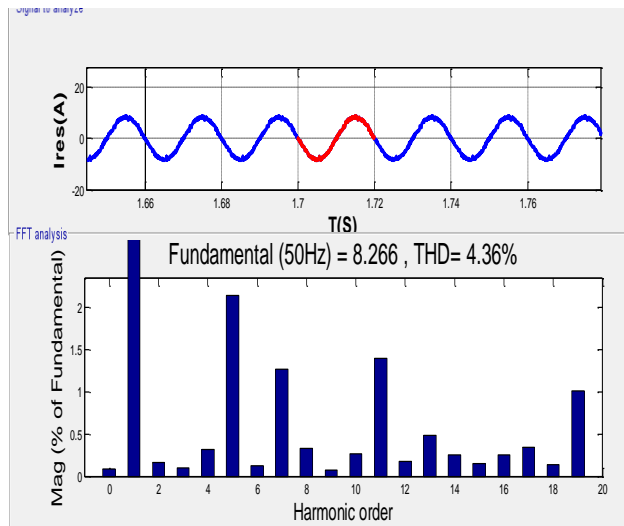


Figure (III.31) : Zoom (2) sur spectre d'harmonique du courant du réseau.

D'après les figures (III.30), (III.31) nous observons que le taux de distorsion harmonique total THD du courant de réseau I_{res} est de l'ordre 3.78 % avant la variation de la charge. après la variation, le THD du courant de réseau I_{res} augmente et atteint 4.36%, ce qui démontre l'influence de la variation de la charge non linéaire, mais reste toujours inférieur à la norme (La norme CEI 61000-2-2) qui est de 5%.

III.6 Conclusion :

En conclusion, nous avons exploré dans ce chapitre la commande directe de puissance (DPC) dans le contexte des systèmes photovoltaïques. Nous avons examiné l'utilisation d'une table de commutation basée sur l'analyse des variations des puissances actives et réactives instantanées pour permettre un contrôle précis et simultané de ces paramètres.

Les résultats de simulation obtenus ont été présentés et accompagnés d'interprétations détaillées. Deux essais ont été réalisés pour évaluer les performances de la DPC dans différents scénarios.

Conclusion générale

En conclusion, ce mémoire a porté sur le contrôle direct de puissance dédié au filtre actif associé à un générateur photovoltaïque. Nous avons étudié en détail le fonctionnement du système photovoltaïque, ainsi que le rôle du filtre actif.

Le premier chapitre est consacré aux généralités sur les systèmes photovoltaïques (PV), il nous a permis d'explorer les différents aspects de cette technologie prometteuse. Nous avons abordé l'importance de l'énergie solaire qui est une source d'énergie renouvelable inépuisable, ainsi que les principes de base de la conversion de la lumière du soleil en électricité à travers les cellules photovoltaïques.

Nous avons également discuté de l'association de cellules photovoltaïques pour former des modules et des panneaux solaires. Nous avons souligné l'importance de la protection des panneaux solaires contre les conditions environnementales défavorables, telles que les intempéries et les surtensions, afin de garantir leur durabilité et leur performance optimale.

En examinant les avantages et les inconvénients des systèmes photovoltaïques nous avons également souligné certains défis, notamment la problématique des harmoniques, qui peuvent entraîner des perturbations dans le réseau électrique et perturbations dans le réseau électrique.

Enfin, nous avons présenté certaines solutions potentielles pour atténuer les problèmes d'harmoniques, telles que l'utilisation de filtre actif.

Dans ce mémoire, nous avons examiné la méthode du point de puissance maximale (MPPT) utilisée dans les systèmes photovoltaïques. Nous avons étudié l'influence des paramètres méthodologiques sur l'efficacité de cette méthode. En particulier, nous avons utilisé deux algorithmes de MPPT, à savoir le MPPT flou et le Perturbation et Observe (P&O).

En utilisant le MPPT flou, nous avons pu optimiser la puissance extraite des panneaux solaires en ajustant la tension de fonctionnement pour atteindre le point de puissance maximale. Cette approche a montré de bons résultats en termes de suivi précis du point de puissance maximale, même en présence de variations d'ensoleillement et de température.

Dans le dernier chapitre, nous avons étudié le contrôle direct de puissance (DPC) appliqué à un système photovoltaïque (PV) en combinaison avec un filtre actif. Nous avons réalisé des simulations pour évaluer les performances de ce système. Les résultats obtenus ont démontré l'efficacité de la DPC pour le contrôle de la puissance côté réseau maximiser la puissance extraite des panneaux solaires. L'utilisation du filtre actif nous a permis de réduire

Conclusion générale

les distorsions harmoniques et d'améliorer la qualité de l'énergie du réseau électrique ou la charge est non linéaire. Les simulations ont également mis en évidence la capacité du système à maintenir une régulation précise de la puissance active et réactive. Ces résultats prometteurs soulignent le potentiel du contrôle direct de puissance associé à un filtre actif pour améliorer les performances des systèmes photovoltaïques.

En perspective, il serait intéressant de reprendre le travail en vue de son amélioration par l'emploi d'autres techniques avancées la commande directe du puissance et filtre actif parallèle.

A l'avenir, Ce domaine de recherche prometteur mérite d'être approfondi afin de contribuer au développement de solutions plus durables et performantes pour la production d'énergie solaire.

Références bibliographique

Références Bibliographiques

- [ACP 06] : ANGEL CID PASTOR. « Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques ». Ecole Doctorale : GEET, Laboratoire d'Analyse et d'Architectures des Systèmes (LAAS-CNRS), Toulouse 2006.
- [ADN 20]: ADNAN J. Cours énergie solaire photovoltaïque. Université de Libanaise 2020.
- [AFE16] : AFEGHOUL H. « Approche avancée du filtrage actif et du contrôle de puissances dans les installations photovoltaïques interconnectées au réseau ». Mémoire de master. Université de msila 2016.
- [AOU 20] : AOUCHICHE N. « Conception d'une commande MPPT optimale à base d'intelligence artificielle d'un système PV ». Centre de développement des énergies renouvelable. CDERBP 62, route de l'observation Bouzaréah Algérie. 2020.
- [ARA 17] : ARAB S. TOUDART D. « Etude d'un système photovoltaïque » Université de Tizi Ouzou. Mémoire soutenu publiquement 2017.
- [ATT 19] : ATTIA F. BELOUI A. « Amélioration de la qualité d'énergie d'un système photovoltaïque connecté au réseau ». Mémoire de master. Université de Bejaia 2019.
- [BEL 15] : Dr. BELAID LALOUNI S. « Cours énergie solaire Photovoltaïque ». Université de Bejaia, <http://elearning.univ-bejaia.dz/> , 2015.
- [BEN 06] : BENAHMED BENABDALLAH. N. « Propriétés physique des semi-conducteurs (Si monocristallin et Ge) et simulation des cellules à base de Si ». Thèse de Magister. Université de Tlemcen 2006.
- [BEN 12] : BENSACI W. « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT ». Mémoire de master 2012.
- [BEN 16] : BEN SERRADJ C. BAHMED I. « Contrôle de la puissance d'un système photovoltaïque connecté au réseau ». Mémoire de master. Université de Bejaia 2016.
- [BOU 19] : BOUCHEFFA H. ARKOUB N « Contrôle direct du couple appliqué à un système de pompage photovoltaïque ». Mémoire de master. Université de Bejaia 2019.
- [BOU 22] : BOUGUESBA A. KECHEHA B. MADJOURI N et REHOUMA H. « Simulation d'un système photovoltaïque connecte au réseau ». Mémoire de master 2022.
- [CHA 10] : CHAOUI. A. « Filtrage actif triphasé pour charges non linéaires » ; Thèse de doctorat. Université de Sétif 2010.
- [CHE15] : CHELLI Z. « Amélioration de la qualité de l'énergie électrique par un filtre actif d'harmonique ». Mémoire de master 2015.
- [CHE 18] : CHERIFI F. GRIM N. « Dimensionnement d'une système photovoltaïque autonome ». Mémoire de Master. UNI-Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou 2018.

Références bibliographique

- [FER 15] : **FERRAH BILLEL** « Etude d'un système Hybride (photovoltaïque –éolien) ». Mémoire de master 2015.
- [GOU 12] : **GOURMAND J.** Le photovoltaïque aujourd'hui et demain (panneau photovoltaïque). Iut en ligne. L'université Numérique France, <https://public.iutenligne.net> . 2012.
- [HAL 17] : **HALOUANE. A.** « Modélisation du transfert radiatif dans les strates supérieures d'un module photovoltaïque ». Mémoire de Master. Université de Boumerdes 2017.
- [HEN 09] : **HENNOUS C.** « Dimensionnement et installation d'un système photovoltaïque (Application à la F.G.E. I) UMMTO ». Mémoire de master 2009.
- [HER 06] : **HEREDIA Bermeo A.L.** « Commandes avancées des systèmes dédiés à l'amélioration de la qualité de l'énergie de la basse tension à la montée en tension ». Thèse de doctorat en Sciences, Institut national polytechnique de Grenoble, France, 2006.
- [IKH 15] : **IKHLAS H et BOUTCHICHE I.** « Étude et simulation un filtre active parallèle dans un réseau triphasé intégrant une éolienne ». Mémoire fin étude université Tlemcen 2015.
- [JIA 2018] : **JIANHONG X.** « Filtrage actif parallèle des harmoniques des réseaux de distribution d'électricité ». Institut National Polytechnique de Lorraine 2018.
- [LAL 05] : **LALOUNI. S.** « Optimisation de la qualité d'énergie électrique dans le cas d'un chargeur de batteries ». Mémoire de Magister en génie électrique. Université de Bejaïa 2005.
- [LAL 09] : **LALOUNI. S.** « Etude commande et simulation d'une chaine Hybride (photovoltaïque-éolienne) De production d'énergie électrique ». Thèse de doctorat de l'université de Bejaïa, 2009.
- [LOU 08] : **LOUAZENE. M.L.** « étude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque sur le site d'Ouargla ». Mémoire de magister. Université de Batna 2008.
- [KEN 20] : **KENOUCHE A. KOURICHI I.** « Etude d'un filtre actif parallèle». Mémoire fin d'étude 2020.
- [MEH 07] : **B. MEHIMMEDETSI.** « l'application du formalisme Bond Graph à une chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque », Mémoire de Magister. Université de Mentourie de Constantine 2007.
- [MUK 99] : **MUKUN. R.P.** « Wind and solar power system ». Edition CRC Press. New York 1999.
- [NOG 98]: **NOGUCHI T. TOMIKI H. KONDO S. TAKAHASHI.** « Direct Power Control of PWM converter without power-source voltage sensors ». IEEE Transactions on Industrial Application. Vol. 34 pp. 473-479, 1998.

Références bibliographique

- [OUA 11] : **OUADFEL.Y . LAMARA.L.** « Etude et optimisation d'un système photovoltaïque ». Mémoire d'ingénieur d'état en électronique. Université Bejaia 2011.
- [OUC 17] : **OUCHEN. S.** « Contribution à la commande directe de puissance dédiée au filtrage actif, associé à une source photovoltaïque ». Thèse de Doctorat 2017.
- [OUL 08]: **OULD. A M et al.** « Revue des Energies Renouvelables». Vol. 11 N°3 473 483, 2008.
- [ROB 07] : **Robyns B. François F. Degobert et J. P. Hautier.** « Commande vectorielle de la machine asynchrone, désensibilisation et optimisation par la logique floue ». Editions Technip, France, Juillet 2007.
- [ROY 98] : **Royer J. Djiako E. Schiller Et B. Sada** « Le Pompage Photovoltaïque ». Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens IEPF/Université d'Ottawa/EIER/CREPA, 1998.
- [SAL 11] : **SALAMA. F.** « Modélisation d'un système multi générateur photovoltaïque inter connecté au réseau électrique ». Mémoire magister, Université de Sétif 2011.
- [TAR 18] : **TARGANT L et KHALEF S** « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique ». Mémoire de master. Université de Tizi Ouazou 2018.
- [TAK 86]: **TAKAHASHI I. NOGUCHI T.** « A new Quick-response and High-Efficiency Control Strategy of an Induction Motor ». IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-22, No. 5, pp. 820-827, 1986.
- [TRA 18] : **TRABELSI Ala din S. MOULDI.** « Effets des harmoniques générées par les systèmes photovoltaïques sur le réseau de distribution électrique ». Mémoire de fin d'étude. UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA 2017/2018.
- [ZER 19] : **ZERKOUT A BENAOUA A.** « Dimensionnement optimal d'un système autonome hybride PV-Diesel-Batterie ». Mémoire de master 2019.
- [ZIA 22] : **ZIANI A.** « Étude d'une machine asynchrone à double étoile dédiée au pompage photovoltaïque ». Mémoire de master. Université de Bejaia 2022.
- [ZID 15] : **ZIDANE A. ZELLOUMA S.** « Compensation des harmoniques et de la puissance réactive à l'aide du filtre actif parallèle». Thèse de magister en Electrotechnique Présenté à la faculté de Technologie UNI-Echahid Hamma Lakhder d'El-Oued Juin 2015.