

UNIVERSITE KASDI MERBAH-OUARGLA
Faculté des Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication
Département d'Electronique et des Télécommunications



Mémoire du projet de fin d'étude
en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER PROFESSIONNEL

Domaine : Sciences et technologies
Filière : Electronique
Spécialité : Instrumentation et systèmes

Présenté par :

HIZI NADIR

DJABOREBBI TAKY-EDDINE

Thème :

**Etude comparative des commandes MPPT
pour les systèmes photovoltaïques**

Soutenu publiquement, le 13/06/2022, devant le jury composé de :

| | | | |
|---------------------------------------|-----|-----------|-------------|
| M ^r HAMZA AZZEDDINE | MCB | Président | UKM Ouargla |
| M ^r RACHEDI MOHAMED YACINE | MAA | Examineur | UKM Ouargla |
| M ^r MEHAOUCHI AZEDDINE | MAA | Encadreur | UKM Ouargla |

Année universitaire 2021/2022

Dédicace

*Nous présentons ce travail à nos parents qui ont donné leur vie pour nous pour leurs encouragements et leurs courages. Que Dieu les bénisse pour toujours et à toutes les familles **HIZI** et **DJABOREBBI** et à tous nos amis, collègues et tous ceux qui nous ont aidés à Réaliser ce travail.*

➤ **HIZI NADIR**

➤ **DJABOREBBI TAKY EDDINE**

Remerciement

Nous remercions Dieu Tout-Puissant qui nous a donné la force et la patience pour accomplir ce travail.

*La première personne que nous voudrions remercier est notre superviseur, **M^r MEHAOUCHI AZEDDINE**, pour les conseils, la confiance et la patience qui ont constitué une grande contribution sans laquelle ce travail n'aurait pas été possible. Il trouvera peut-être dans cette œuvre un hommage vivant à sa sublime personnalité.*

Nous remercions également les membres du jury d'avoir accepté de juger ce travail de master.

Enfin, nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à tous les professeurs qui nous ont enseigné et qui, par leurs compétences, nous ont soutenus dans la poursuite de nos études.

Nous remercions également tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Liste des Abréviations

| | |
|-------|--|
| PV | Photovoltaïque |
| MW | Mégawatts |
| ER | Energie Renouvelable |
| DC | Direct Current (courant continu) |
| DC-DC | Direct Current- Direct Current (courant continu - courant continu) |
| MPP | Maximum power point (point de puissance maximale) |
| MPPT | Maximum power point tracking (suiveur du point de puissance maximale). |
| PPM | Un Point de Puissance Maximale. |
| GRD | Gestionnaire de réseau de distribution. |
| GPV | Générateur photovoltaïque. |
| AM | Air Masse. |
| P&O | Perturbation et Observation. |
| FCC | Fraction de courant de Court-Circuit. |
| FCO | Fraction de la tension en Circuit ouvert |
| IC | Incrémental Conductance (Conductance Incrémentale). |
| FLC | Fuzzification logique floue. |
| IGBT | Insulated-gate bipolar transistor. |

Liste des symboles

| | | |
|------------|---|------------------|
| E_{ph} | L'énergie d'un photon | J |
| h | Constante de Planck | $J \cdot s^{-1}$ |
| C | Vitesse de la lumière | $m \cdot s^{-1}$ |
| λ | Longueur d'onde | m |
| R_s | Résistance série | Ω |
| R_{sh} | Résistance shunt | Ω |
| I_{cc} | Courant de court-circuit | A |
| I_{pv} | Courant fourni par la cellule PV | A |
| V_{pv} | Tension fourni par la cellule PV | V |
| R_{pv} | Résistance à la sortie du GPV | Ω |
| P_{pv} | Puissance de sortie du GPV | W |
| R_{opt} | Résistance de point de puissance maximale | Ω |
| V_{PV} | Tension photonique | V |
| V_{co} | Tension du circuit ouvert | V |
| N_s | Nombre des cellules en série | - |
| N_p | Nombre des cellules en parallèle | - |
| q | Charge d'électron | C |
| E_g | Énergie de gap | ev |
| K | Constante de Boltzmann | J/k |
| I_{ph} | Courant photonique | A |
| I_s | Courant de saturation | A |
| I | Courant de sortie d'une diode | A |
| I_D | Courant de diode | A |
| I_{sh} | Courant traverse la résistance shunt R_{sh} | A |
| k_i | Coefficient de température de court-circuit | A/K |
| ΔT | Différence de température | $^{\circ}C$ |
| ΔV | Dérivée de la tension du GPV | - |
| V_t | Tension thermique | V |
| V | Tension de panneau | A |
| T | Température de la cellule | K |
| T_n | Température de la cellule de référence | K |
| I_{sh} | Courant traverse la résistance shunt R_{sh} | A |

| | | |
|-----------|--|----------|
| V_{mpp} | Tension de point de puissance maximale | V |
| I_{mpp} | Courant de point de puissance maximale | A |
| V_{ref} | Tension de référence d'un panneau | V |
| R_{ch} | Résistance de la charge | Ω |
| I | Courant de source d'entrée Hacheur élévateur | A |
| V | Tension de source d'entrée Hacheur élévateur | V |
| d | Rapport cyclique | - |

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Chapitre 1 : Généralité sur les systèmes PV autonomes | |
| Figure (1.1) : Energie solaire photovoltaïque | 5 |
| Figure (1.2) : Structure basique d'une cellule solaire | 7 |
| Figure (1.3) : Systèmes PV autonomes | 8 |
| Figure (1.4) : Système connecté au réseau | 8 |
| Figure (1.5) : Système photovoltaïque hybride | 9 |
| Figure (1.6) : Schéma synoptique du système PV autonome | 10 |
| Figure (1.7) : Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque | 10 |
| Figure (1.8) : Schéma électrique du convertisseur survolteur | 12 |
| Chapitre 2 : Modélisation d'un système PV autonome et les commandes MPPT | |
| Figure (2.1) : Couplage direct entre un GPV et une charge résistive | 16 |
| Figure (2.2) : Points de fonctionnement d'un générateur PV en connexion directe, en fonction de la charge | 16 |
| Figure (2.3) : Schéma synoptique du système PV adapté par le convertisseur DC-DC | 17 |
| Figure (2.4) : Organigramme de l'algorithme perturber et observer | 20 |
| Figure (2.5) : Recherche du PPM par l'algorithme perturber et observer | 19 |
| Figure (2.6) : Partiel organigramme d'algorithme P&O variable | 21 |
| Figure (2.7) : Organigramme de l'algorithme de la conductance incrémentale | 22 |
| Figure (2.8) : Organigramme de l'algorithme fraction de la tension en circuit-ouvert | 23 |
| Figure (2.9) : Organigramme de l'algorithme de Fraction du Courant de court-circuit | 24 |
| Figure (2.10) : Structure de base de la commande floue | 25 |
| Chapitre 3 : Simulation du système PV autonome | |
| Figure (3.1) : Schéma synoptique du système PV étudié | 28 |
| Figure (3.2) : Schéma de simulation du système PV autonome | 30 |
| Figure (3.3) : Schéma block de la commande MPPT | 30 |

| | |
|---|----|
| Figure (3.4) : Schéma block de la commande MPPT deux capteur d'entrée (courant et tension), (P&O, P&O à variable, IC) | 31 |
| Figure (3.5) : Schéma block de la commande MPPT avec un seul capteur d'entée (tension), (FCO) | 31 |
| Figure (3.6) : Schéma block de la commande MPPT de FLC | 31 |
| Figure (3.7) : Résultats de simulation des puissances de sortie du système PV pour différentes commande MPPT à éclairment et température constantes (1000w/m et 25°C) | 32 |
| Figure (3.8) : Résultats de simulation des puissances de sortie du système PV pour différentes commandes MPPT à éclairment variable et température constante 25°C | 33 |
| Figure (3.9) : Résultats de simulation des puissances de sortie du système PV pour différentes commandes MPPT à éclairment et température variables | 33 |
| Figure (3.10) : Résultats de simulation des puissances de sortie du système PV pour différentes commandes MPPT à éclairment et température variables | 34 |

Liste des tableaux

| Chapitre 3 : Simulation du système PV autonome | |
|---|----|
| Tableau (3.1) : de vérité pour une commande logique floue | 26 |
| Tableau (3.2) : Caractéristiques électriques du module PV «SUNPOWER SPR-305-WHT-D » | 29 |
| Tableau (3.3) : Caractéristiques de l'hacheur survolteur | 29 |
| Tableau (3. 4) : Caractéristiques majeures des commandes MPPT étudiées | 35 |

Sommaire

| | |
|---|----|
| Introduction Générale | 1 |
| Chapitre 1 : Généralité sur les systèmes PV autonomes | |
| 1.1. Introduction | 4 |
| 1.2. Energie PV | 4 |
| 1.2.1. Historique PV | 4 |
| 1.2.2. Effet PV | 6 |
| 1.2.3. Cellule PV | 6 |
| 1.3. Type des systèmes PV | 7 |
| 1.4.1. Systèmes PV autonomes | 7 |
| 1.4.2. Systèmes PV connectés aux réseaux | 8 |
| 1.4.3. Systèmes PV hybrides | 9 |
| 1.4 Système PV autonome | 9 |
| 1.4.1 Générateur PV | 10 |
| 1.4.2 Hacheur survaleur | 11 |
| 1.5. Avantages et inconvénients d'une installation PV | 12 |
| 1.5.1. Avantages | 12 |
| 1.5.2. Inconvénients | 13 |
| 1.6. Conclusion | 13 |
| Chapitre 2 : Modélisation d'un système PV autonome et les commandes MPPT | |
| 2.1. Introduction | 15 |
| 2.2. Principe de la recherche du MPPT | 15 |
| 2.3. Classification des commandes MPPT | 17 |
| 2.3.1. Techniques conventionnelles | 18 |
| 2.3.2. Techniques avancées | 18 |
| 2.3.3. Techniques hybrides | 18 |
| 2.4. Commandes MPPT | 19 |
| 2.4.1. Algorithme Perturber et observer P&O | 19 |
| 2.4.2. Algorithme Perturber et observer P&O variable | 19 |
| 2.4.3. Algorithme Incrément de la conductance IC | 21 |
| 2.4.4. Algorithme Mesure d'une fraction de la tension en circuit ouvert (FCO) | 22 |

| | |
|---|----|
| 2.4.5. Algorithme Mesure d'une fraction de courant de court-circuit (FCC) | 23 |
| 2.4.6. Algorithme basée sur la logique floue FLC | 24 |
| • Fuzzification | 25 |
| • Inférence | 25 |
| • Défuzzification | 26 |
| 2.5. Conclusion | 26 |
| Chapitre 3 : Simulation du système PV autonome | |
| 3.1. Introduction | 28 |
| 3.2. Système PV autonome proposé | 28 |
| 3.3. Simulation du système PV autonome | 30 |
| • Eclairage et températures constantes | 32 |
| • Eclairage variable et température constante | 33 |
| • Eclairage constante et température variable | 33 |
| • Eclairage et températures variables | 34 |
| 3.2. Interprétation des résultats | 34 |
| 3.3. Conclusion | 36 |
| 3.4. Conclusion générale | 38 |
| Bibliographie | 41 |

Introduction générale

Introduction générale

Les énergies renouvelables sont une solution potentielle pour certains pays qui ont décidé de les utiliser à travers le monde. L'énergie renouvelable est une ressource naturelle qui se reconstitue assez rapidement pour ne pas s'épuiser. Ainsi, les exemples d'énergies renouvelables sont nombreux. En effet, les sources naturelles utilisées peuvent être assez différentes (photovoltaïque (PV), solaire, éolien, géothermique, hydraulique) et aujourd'hui les systèmes PV semblent être les plus adaptées, optimales et les plus performantes pour la production d'électricité propre.

Forts de ces exemples d'énergie renouvelable et des diverses ressources disponibles, les producteurs d'énergie du monde entier travaillent sur des technologies permettant de capter cette énergie plus efficacement. Ainsi, ils sont capables de le convertir en courant continu qui peut être transmis dans le réseau électrique. L'enjeu pour les producteurs d'énergies renouvelables est de préparer les équipements nécessaires à une production durable tout en respectant les coûts acceptables du secteur de l'énergie en général et du client final en particulier.

Le générateur PV possède une caractéristique Courant-Tension non linéaire, avec un point de fonctionnement unique permet l'extraction maximale de la puissance, varié en fonction de l'éclairement et la température. Pour que le point de fonctionnement du générateur PV soit au voisinage du point optimal (point de puissance maximale MPP), un étage d'adaptation doit être introduit entre le générateur PV et la charge. L'étage d'adaptation est un convertisseur de type continu-continu commandé par des algorithmes MPPT (Maximum Power Point Tracking), effectuent la poursuite du MPP.

L'objectif de ce travail est de comparer entre les différentes commandes MPPT à partir du générateur PV, pour une bonne exploitation, quelques soient les conditions météorologiques (température et éclairement). L'étude sera faite sur un système constitué d'un module PV de type « Sunpower SPR-305-WHT-D », d'un convertisseur DC-DC survolteur et d'une charge résistive. Nous allons considérer quelques techniques de poursuite du point de puissance maximale à savoir : algorithme perturber et observer conventionnelle et avec un pas variable, algorithme de la conductance incrémentale, algorithme de fraction de la tension en circuit ouvert, algorithme de fraction du courant de court-circuit et l'algorithme basé sur la logique floue.

Pour décrire cela, ce mémoire est présenté en trois chapitres :

Dans le premier chapitre, nous donnons des généralités sur l'énergie PV, l'effet PV, l'histoire PV, les types des systèmes PV. Ensuite, nous modélisons les différents éléments du système PV autonome, utilisé dans notre travail, tels que le générateur PV et le convertisseur survolteur. Nous évoquons les avantages et les inconvénients du photovoltaïque.

Dans le deuxième chapitre, nous aborderons le principe de la recherche du point de puissance maximale MPP. Ensuite, nous présentons une classification des différentes commandes MPPT trouvées dans la littérature. Puis, nous étudions certaines méthodes de recherche du point de puissance maximale, telles que l'algorithme P&O conventionnelle, l'algorithme P&O à un pas variable, l'algorithme de conduction incrémentale, l'algorithme de fraction de tension en circuit ouvert, l'algorithme de fraction de courant en court-circuit et l'algorithme basé sur une technique de l'intelligence artificielle ; c'est algorithme basé sur la logique floue.

Dans le troisième chapitre, nous étudierons la simulation du système PV autonome composé d'un module PV de type « Sunpower SPR-305-WHT-D », d'un convertisseur survolteur et d'une charge résistive. Puis, nous présenterons les résultats de simulation de quelques algorithmes MPPT étudiés dans le deuxième chapitre, pour les différentes conditions météorologiques (température et éclairement).

Enfin, nous terminerons par une conclusion générale concernant les résultats de ce travail.

Chapitre 1

Généralité sur les systèmes PV

Autonomes

Chapitre 1

Généralité sur les systèmes PV autonomes

1.1. Introduction

Ces dernières années, les énergies renouvelables ont commencé à jouer un rôle important dans la production d'électricité. Parmi ces nouvelles sources, l'énergie solaire photovoltaïque (PV) représente un bon exemple de l'énergie de demain, elle a commencé à être largement exploitée partout dans le monde. C'est une ressource illimitée, disponible partout, utilisable librement, silencieuse et respectueuse de l'environnement. L'énergie solaire PV convertit le rayonnement solaire en énergie électrique utile à l'aide de cellules solaires PV.

Dans ce chapitre, nous expliquerons le processus de conversion d'énergie par les cellules PV et nous fournirons des informations générales sur l'historique du PV. Ensuite, nous présentons les différents types des systèmes PV. Puis, nous modélisons les différents éléments constitutifs du système PV autonome, comme le générateur PV et le convertisseur survolteur. Nous aborderons également les avantages et les inconvénients du photovoltaïque.

1.2. Energie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire fait partie des nouvelles sources d'énergies renouvelables. Elle désigne l'énergie récupérée par des panneaux solaires pour la transformer en électricité. L'électricité PV est produite à partir d'une technologie permettant de convertir l'énergie solaire (photons) en énergie électrique. Cela se fait par l'intermédiaire de cellules PV, disposées la plupart du temps sur des panneaux PV. La figure (1.1) représente un champ PV composé des modules PV.

1.2.1. Historique du photovoltaïque

IL est important de citer les dates les plus importantes dans l'histoire du photovoltaïque qui noté 9 :



Figure (1.1) : Energie solaire photovoltaïque

1. En 1839, le physicien français Alexandre Edmond Becquerel découvre le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide, c'est l'effet photovoltaïque.
2. En 1875, Werner Von Siemens expose devant l'académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. Mais jusqu'à la Seconde Guerre Mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire.
3. En 1954, trois chercheurs américains, Chaplin, Pearson et Prince, mettent au point une cellule PV à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites.
4. En 1958, une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.
5. En 1973, la première maison alimentée par des cellules PV est construite à l'université de Delaware.
6. En 1983, la première voiture alimentée par énergie PV parcourt une distance de 4000km en Australie [1].
7. En les années 80, exploitation des systèmes PV pour l'électrification et le pompage d'eau dans les zones isolées.
8. En fin les années 90, exploitation du PV pour la production de l'électricité injectée au réseau dans plusieurs pays développés (Japon, Allemagne).
9. En les années 2000, une mise en place des politiques favorables pour le PV ; Réalisation des centrales PV ayant des puissances de dizaines de MW [2].

1.2.2. Effet photovoltaïque

Le terme « photovoltaïque » vient du Grec et qui signifie Lumière, il est composé de deux parties : « photos » (lumière) et du nom de famille du physicien italien (Alessandro Volta) qui inventa la pile électrique en 1800 et donna son nom à l'unité de mesure de la tension électrique, le volt.

Au cours de l'année 1839, Edmond Becquerel a découvert le phénomène d'une relation entre le soleil et les minéraux. Lorsqu'il a exposé à la lumière de ces métaux, il s'est produit de l'énergie électrique. La découverte n'a pas trouvé de réponse. Albert Einstein a prouvé que la lumière du soleil est un photon qui transporte des charges électriques lorsqu'il est exposé à certain photonique. L'énergie d'un photon est donnée par la relation suivante [2].

$$E = \frac{h C}{\lambda} \quad (1.1)$$

Où h est la constante de Planck ($6,63 \cdot 10^{-34} \text{J.S}$), λ est la longueur d'onde et C est la vitesse de la lumière. Donc, l'effet PV constitue la conversion directe de l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique au moyen de cellules généralement à base de silicium. Pour obtenir une puissance suffisante, les cellules sont reliées entre elles et constituent le module solaire.

1.2.3. Cellule photovoltaïque

La cellule PV ou encore photopile est le plus petit élément d'une installation PV. Elle est composée de matériaux semi-conducteurs et transforme directement l'énergie lumineuse en énergie électrique. Les cellules PV sont constituées :

- D'une fine couche semi-conductrice (matériau possédant une bande interdite, qui joue le rôle de barrière d'énergie que les électrons ne peuvent franchir sans une excitation extérieure, et dont il est possible de faire varier les propriétés électroniques) tel que le silicium, qui est un matériau présentant une conductivité électrique relativement bonne.
- D'une couche antireflet permettant une pénétration maximale des rayons solaires.
- D'une grille conductrice sur le dessus ou cathode et d'un métal conducteur sur le dessous ou anode.

Les plus récentes possèdent même une nouvelle combinaison de multicouches réfléchissants justes en dessous du semi-conducteur, permettant à la lumière de rebondir plus longtemps dans celui-ci pour améliorer le rendement.

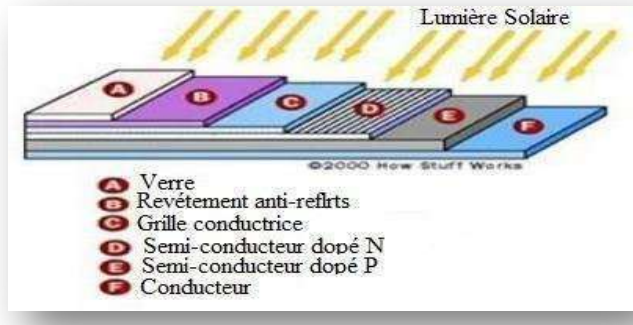


Figure (1.2) : Structure basique d'une cellule solaire

Une cellule PV est basée sur le phénomène physique appelé effet PV qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température et du vieillissement de la cellule [3].

1.3. Type des systèmes photovoltaïques

Les systèmes PV sont composés selon les exigences en trois types : autonome, raccordée au réseau et hybride.

1.3.1. Systèmes PV autonomes

Une installation photovoltaïque (PV) est dite autonome – ou isolée – quand elle n'est pas reliée à un réseau de distribution. Le système PV autonome permet de fournir du courant électrique à des endroits où il n'y a pas de réseau. Donc l'énergie produite est utilisée immédiatement (pompage, l'éclairage, etc....) ou stockée dans des batteries pour une utilisation différée. Pour ces applications il n'est pas toujours possible de mettre en place un réseau d'alimentation classique, soit à cause de contraintes techniques, soit pour des raisons économiques. Les performances des systèmes autonomes dépendent de l'état et de la qualité des batteries, c'est l'élément de base dans ces types des systèmes [5].

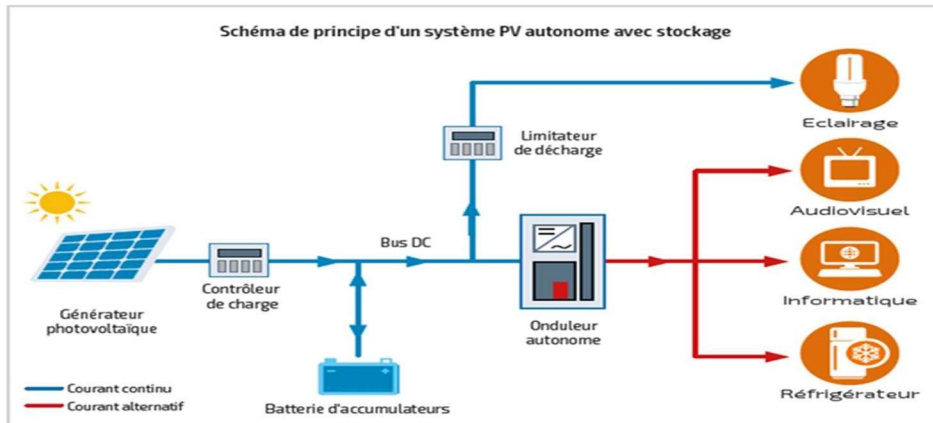


Figure (1.3) : Systèmes PV autonomes

1.3.2. Système connecté au réseau

Une installation PV peut être connectée en parallèle avec le réseau d'électricité. Les panneaux solaires sont connectés en série pour former des « strings », eux même reliés à un onduleur. La tâche de l'onduleur est de transformer le courant continu sortant des panneaux en courant alternatif. Chaque onduleur est choisi en fonction de la puissance des panneaux et peut accueillir un ou plusieurs strings. Si la consommation locale est supérieure à la production de l'installation PV, l'appoint est fourni par le réseau. Dans le cas contraire, l'énergie est fournie au réseau public et sert à alimenter les consommateurs reliés au réseau. Dans les systèmes raccordés au réseau, c'est l'onduleur qui remplace les batteries, dans ce cas c'est l'élément de base dans ces types des systèmes [5].

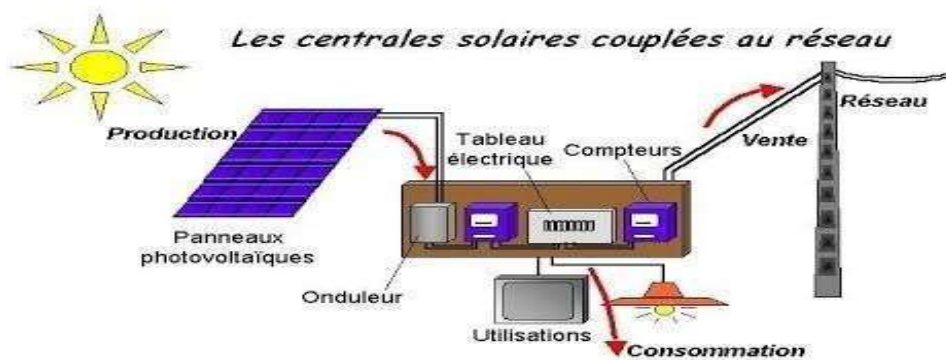


Figure (1.4) : Système connecté au réseau

1.3.3. Système hybride

Les systèmes hybrides reçoivent une partie de leur énergie d'une ou plusieurs sources supplémentaires, qui sont également indépendants des réseaux de distribution d'électricité. En pratique le générateur photovoltaïque est combiné à une éolienne ou à un groupe électrogène à combustible, ou aux deux à la fois avec des accumulateurs de stockage de l'énergie. Un tel système s'avère être destiné pour les applications qui nécessitent une alimentation continue d'une puissance assez élevée. Un système hybride photovoltaïque optimise l'utilisation combinée de plusieurs sources d'énergies renouvelables et/ou fossiles et des moyens de stockage associés [5].



Figure (1.5) : Système photovoltaïque hybride

1.4. Système photovoltaïque autonome

Le système de production d'énergie PV autonome est un système de production d'énergie solaire PV autonome. Le dispositif PV est constitué d'un générateur, formé d'un ou plusieurs modules connectés en série ou en parallèle, un convertisseur de puissance de type continu-continu DC-DC commandé par une commande qui permet de poursuivre le point de puissance maximale MPP [6] et d'une charge continue qui utilise directement l'énergie générée. La figure (1.6) représente le schéma synoptique du système PV autonome.

Dans cette partie, nous modélisons les différents éléments constitutifs du système PV autonome utilisé dans notre travail, en particulier, le générateur PV et le convertisseur survolteur. Par contre, la commande MPPT est étudiée en détail en chapitre suivant.

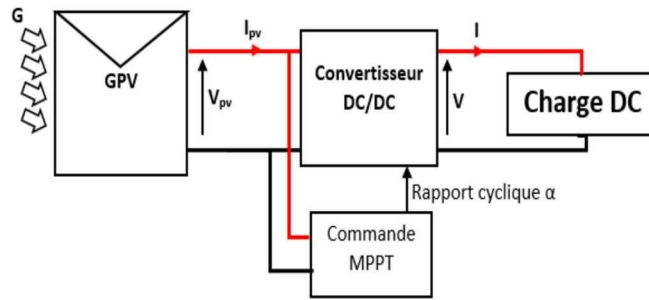


Figure (1.6) : Schéma synoptique du système PV autonome

1.4.1. Générateur photovoltaïque

Les cellules solaires sont généralement associées en série et en parallèle, puis encapsulées sous verre pour obtenir un module PV. Un générateur PV est constitué de modules interconnectés pour former une unité produisant une puissance continue élevée compatible avec le matériel électrique usuel. Les modules PV sont habituellement branchés en série-parallèle pour augmenter la tension et l'intensité à la sortie du générateur PV. Les modules interconnectés sont montés sur des supports métalliques et inclinés suivant l'angle désiré en fonction du lieu, cet ensemble est souvent désigné par champ de modules PV.

La figure (1.7) représente un circuit équivalent d'une cellule PV. Ce circuit introduit une source de courant et une diode en parallèle, ainsi que des résistances série R_s et parallèle (shunt) R_{sh} pour tenir compte des phénomènes dissipatifs au niveau de la cellule.

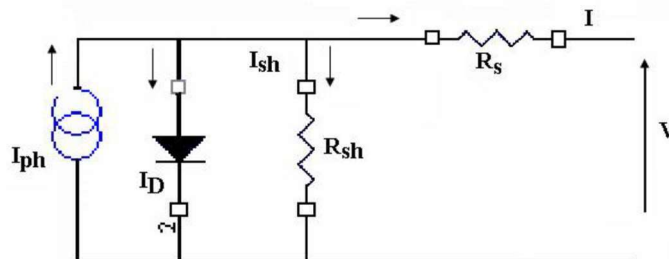


Figure (1.7) : Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque

La résistance série est la résistance interne de la cellule ; elle dépend principalement de la résistance de semi-conducteur utilisé, de la résistance de contacts des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles. La résistance parallèle rend compte des effets, tels que le courant de fuite par les bords de la cellule, elle est réduite du fait de la pénétration des impuretés métalliques dans la jonction (surtout si cette pénétration est profonde).

Ce circuit peut être utilisé aussi bien pour une cellule élémentaire, que pour un module ou un panneau constitué de plusieurs modules [1, 4, 5].

L'équation reliant le courant délivré par un module PV constitué par la mise en série de N_s cellules et la tension à ses bornes est donnée par :

$$I = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{V+IR_s}{V_t}} - 1 \right) - \frac{V+IR_s}{R_{sh}} \quad (1.2)$$

Où I est le courant fourni par la cellule lorsqu'elle fonctionne en générateur, V est la tension aux bornes de cette même cellule, I_{ph} est le photo-courant de la cellule dépendant de l'éclairement et de la température ou bien courant de court-circuit, I_0 est le courant de saturation inverse de la diode, n est le facteur d'idéalité de la diode ($1 < n < 3$), q est la charge de l'électron ($e=1,6 \cdot 10^{-19}C$), k est la constante de Boltzmann ($1,381 \cdot 10^{-23} J/K$), T est la température effective des cellules en Kelvin(K), R_{sh} est la résistance shunt caractérisant les courants de fuite de la jonction, R_{ser} est la résistance série représentant les diverses résistances de contacts et de connexions [7], $V_t = \frac{N_s n k T}{q}$ est la tension thermique.

1.4.2. Hacheur survolteur

Les hacheurs sont des convertisseurs du type continu-continu permettant de contrôler la puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé. Le hacheur se compose de condensateurs, d'inductance et de commutateurs. Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, c'est la raison pour laquelle on a de bons rendements dans les hacheurs.

Le convertisseur survolteur est un convertisseur DC-DC parallèle inséré entre le générateur PV et le reste de la chaîne de conversion ; son schéma électrique de base est celui de la figure (2.6) [8]. Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie supérieure. Il est caractérisé par son rapport cyclique d ($0 < d < 1$) avec lequel on peut exprimer les valeurs moyennes des grandeurs de sortie avec celles de l'entrée. Dans une étude en régime continu d'un convertisseur survolteur, le système d'équations du convertisseur est donné par [4] :

$$\begin{cases} Il = Is \\ Is = (1 - d)Il \\ V = (1 - d)V_s \end{cases} \quad (1.3)$$

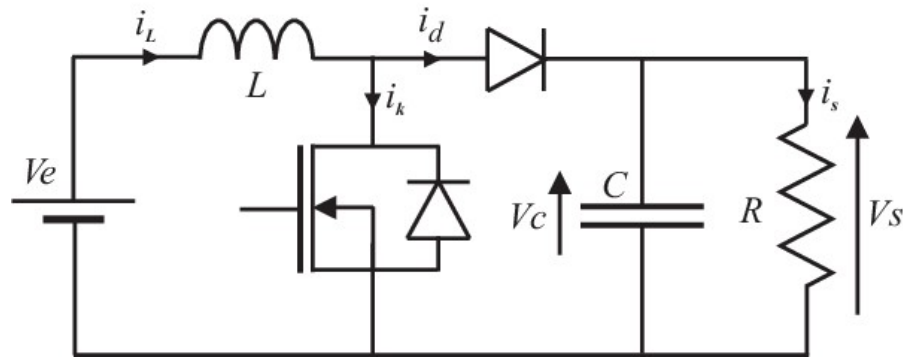


Figure (1.8) : Schéma électrique du convertisseur survolteur

Alors dans un convertisseur survolteur, les grandeurs électriques de sorties (V_s et I_s) sont liées à celles d'entrées (V_{pv} et I_{pv}) en fonction du rapport cyclique d du signal qui commande l'interrupteur du convertisseur par le système d'équations :

$$\begin{cases} V_s = \frac{V_e}{(1-d)} \\ Il = (1 - d)I_s \end{cases} \quad (1.4)$$

1.5. Avantages et inconvénients d'une installation PV

1.5.1. Avantage

- D'abord une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- Ensuite le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliWatt au Mégawatt.
- Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions [1].

- Les systèmes photovoltaïques sont extrêmement fiables.
- L'énergie photovoltaïque est particulièrement attractive pour les sites urbains, vu la petite taille des installations et leur fonctionnement silencieux.
- Elle est exploitable pratiquement partout, la lumière du soleil étant disponible dans le monde entier.
- L'équipement de production peut presque toujours être installé à proximité du lieu de consommation, évitant ainsi les pertes en ligne [5].

1.5.2. Inconvénient

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru. Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % (soit entre 10 et 15 MW/km^2 par an pour le BENELUX) avec une limite théorique pour une cellule de 28%. · Les générateurs photovoltaïques ne sont pas compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées [1].
- Le coût très élevé des investissements.
- Faible rendement de conversion.
- Dans le cas d'une installation photovoltaïques autonome, il faut inclure des batteries dont le coût reste très élevé [5].

1.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons expliqué le principe de l'effet PV et présenté l'élément de base du photovoltaïque ; c'est la cellule solaire. Nous avons rappelé l'histoire du PV, puis, présenté les différents types des systèmes PV, en particulier les systèmes autonomes. Nous avons modélisé le générateur PV et le convertisseur survolteur. Nous avons terminé par une synthèse des avantages et des inconvénients du photovoltaïque.

Dans le prochain chapitre, nous étudierons les différents algorithmes de poursuite du point de puissance maximale MPPT.

Chapitre 2

**Poursuite du point de puissance
maximale MPPT**

Chapitre 2

Poursuite du point de puissance maximale MPPT

2.1. Introduction

Dans un module PV, la variation du courant par rapport à la tension de sortie est non linéaire. Sur la caractéristique courant-tension du module, sous un éclairage uniforme et une température constante, un point de fonctionnement unique permet l'extraction maximale de la puissance. Alors, Dans un système de conversion d'énergie solaire PV, l'intégration d'une technique de contrôle MPPT est nécessaire [6]. Ce type de commande est souvent nommé dans la littérature « poursuite du point de puissance maximale » ou bien « Maximum Power Point Tracking » MPPT. Le principe de ces commandes est d'effectuer une recherche du point de puissance maximal MPP tout en assurant une parfaite adaptation entre le générateur et sa charge de façon à transférer le maximum de puissance.

Dans ce chapitre, nous rappelons tout d'abord le principe de la recherche du point de puissance maximale. Puis, nous donnons une classification des différentes commandes MPPT existantes dans la littérature. Par la suite, nous étudions quelques méthodes de recherche du point de puissance maximale, comme l'algorithme perturber et observer conventionnelle et avec un pas variable, l'algorithme de la conductance incrémentale, l'algorithme de fraction de la tension en circuit ouvert, l'algorithme de fraction du courant de court-circuit. Dans la dernière partie de ce chapitre, nous étudions une commande basée sur les techniques de l'intelligence artificielle ; l'algorithme basée sur la logique floue.

2.2. Principe de la recherche du MPP

La figure (2.1) représente le couplage direct entre un générateur PV et une charge résistive. Cette installation du couplage directe est aujourd'hui l'utilisation terrestre la plus répandue de l'énergie solaire en raison de sa simplicité, de sa fiabilité et de son faible coût. Dans cette installation, le point de fonctionnement du générateur PV dépend de l'impédance de la charge à laquelle il est connecté.

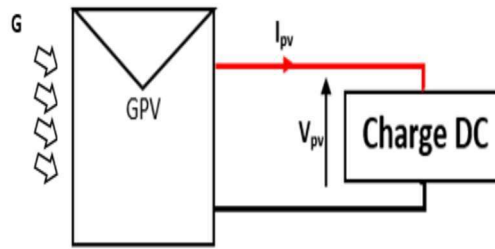


Figure (2.1) : Couplage direct entre un GPV et une charge résistive

Comme le schématise la figure (2.2), un générateur PV peut être connecté directement à trois types de charges [8] : source de tension continue, source de courant continue, une charge purement résistive. Les trois points de fonctionnement A, B, C correspondants peuvent fournir respectivement des puissances P_A , P_B et P_C qui diffèrent à la puissance maximale P_{MPP} du générateur PV.

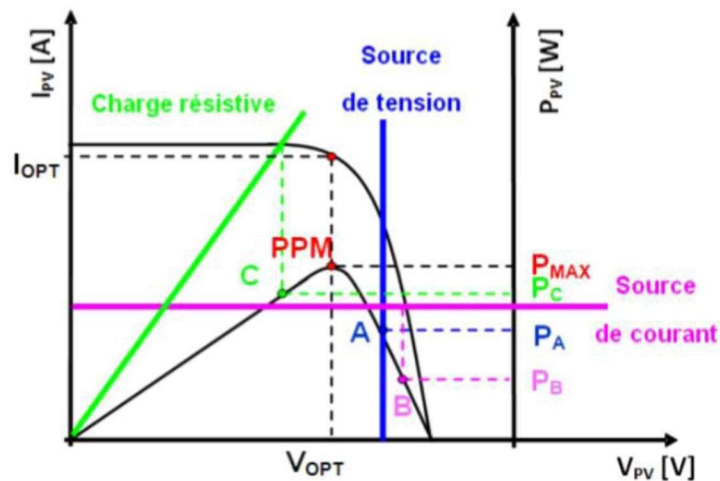


Figure (2.2) : Points de fonctionnement d'un générateur PV en connexion directe, en fonction de la charge

Ainsi, le principal inconvénient de cette installation est qu'elle ne fournit aucun type de réglage opérationnel. Il n'y a également aucune garantie que la meilleure puissance disponible aux bornes du générateur PV sera fournie à la charge. D'autre part, certains types de charges nécessitent une tension et un courant alternatifs.

Pour résoudre ce problème et afin d'extraire, à chaque instant, le maximum de puissance disponible aux bornes du générateur PV et de la transférer à la charge, un étage d'adaptation est utilisé. Cet étage joue le rôle d'interface entre les deux éléments et qui assure, à travers une action de contrôle, le transfert du maximum de puissance fournie par le générateur [9].

En générale, L'étage d'adaptation utilisé en PV est un convertisseur de puissance de type DC-DC commandé par une commande MPPT qui permet de poursuite le point de puissance maximale MPP [2], comme illustre la figure (2.3). Ainsi, quel que soit les conditions météorologiques (température et irradiation), la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximal.

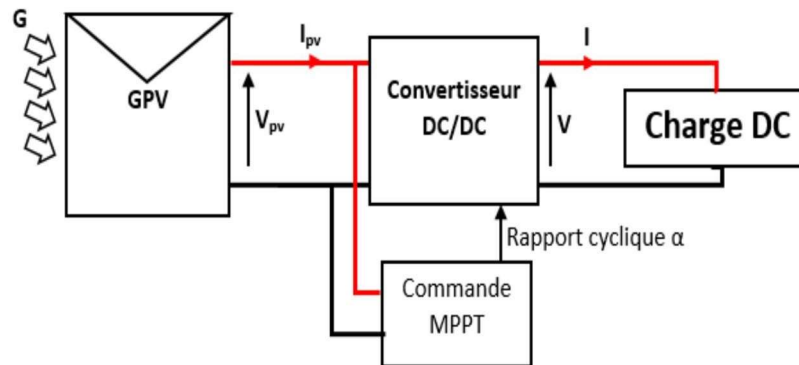


Figure (2.3) : Schéma synoptique du système PV adapté par le convertisseur DC-DC

La commande MPPT fait varier le rapport cyclique du convertisseur statique, à l'aide d'un signal électrique approprié, pour tirer le maximum de puissance que le générateur PV peut fournir. L'algorithme MPPT peut être plus ou moins compliqué pour rechercher le MPP. En général, il est basé sur la variation du rapport cyclique du convertisseur DC-DC en fonction de l'évolution des paramètres d'entrée de ce dernier, le courant, la tension et par conséquent de la puissance du générateur PV, jusqu'à se placer sur le MPP [2].

2.3. Classification des commandes MPPT

Les commandes MPPT peuvent classifier d'une manière générale selon le type d'implémentation électronique : analogique, numérique ou mixte. Il est cependant plus intéressant de les classifier selon le type de recherche qu'elles effectuent et selon les paramètres d'entrée de la commande MPPT. Nous pouvons classifier ces techniques selon [10] :

2.3.1. Techniques conventionnelles

Il existe des techniques MPPT conventionnelles standards, telles que perturbation et observation et conductance incrémentale, qui sont largement utilisées depuis les premières installations PV. Ces techniques sont relativement peu coûteuses et reposent sur des algorithmes très simples. Elles peuvent être définies parmi les meilleures solutions pour suivre le point de puissance maximale dans des conditions d'éclairement constantes et uniformes. Cependant, ces techniques n'assurent plus de bonnes performances durant les changements atmosphériques brusques, ce qui a conduit les chercheurs à proposer des améliorations au cours des dernières décennies, comme P&O adaptative et conductance incrémentale modifiée [10].

2.3.2. Techniques avancées

Les performances des techniques conventionnelles standards ont été évoluées à l'aide des améliorations effectuées, cependant, leur utilisation pour des applications nécessitant la précision et la rapidité reste limitée. Dernièrement, les techniques MPPT avancées sont devenue le centre d'intérêt d'un nombre important de recherches afin d'améliorer considérablement les performances de la poursuite du point de puissance maximale. Ces techniques avancées peuvent être classées en trois sous-catégories en tant que techniques basées sur l'intelligence artificielle tels que le réseau de neurone artificiel et le contrôle par logique floue, l'approche méta-heuristique tels que l'algorithme génétique, l'optimisation des essaims de particules, les méthodes de recherche aléatoire, l'optimisation des colonies de fourmis, et le contrôle non linéaire tels que le contrôle en mode glissant, le contrôle prédictif, méthode directe de Lapugnoy et un contrôle PID discret non linéaire [10].

2.3.3. Techniques hybrides

Les techniques MPPT hybrides ont été récemment proposées dans la littérature, afin d'améliorer la précision de poursuite et atteindre des rendements encore plus élevés sous les différents changements atmosphériques. Ces techniques ont montré de meilleures performances par rapport aux autres techniques. Les techniques MPPT hybrides peuvent être classée en trois principales catégories ; deux techniques conventionnelles, deux techniques avancées, et une technique conventionnelle et une avancée [10].

2.4. Commandes MPPT

Plusieurs algorithmes de recherche du point de puissance maximale existent dans la littérature. Dans cette partie, nous étudions quelques méthodes comme l'algorithme perturber et observer, l'algorithme perturber et observer avec un pas variable, l'algorithme d'incrément de la conductance, l'algorithme de fraction de la tension en circuit ouvert, l'algorithme de fraction du courant de court-circuit et l'algorithme basée sur la logique floue.

2.4.1. Algorithme perturber et observer

La méthode P&O est généralement la plus utilisée en raison de sa simplicité et sa facilité de réalisation. Cet Algorithme, dit P&O à pas fixe, utilisée comme entrée les valeurs de tension et de courant du générateur PV, et comme sortie la valeur de rapport cyclique. Le principe de cet algorithme est de calculer la puissance fournie par le générateur PV $P(k)$, en multipliant ces deux variables, puis, est comparée avec la puissance précédente calculée $P(k-1)$ ce qui permet de déterminer si la dérivée de puissance est positive ou négative, comme le montre la figure (2.4). Si la dérivée est positive, le point de fonctionnement se rapproche du PPM et la variation du rapport cyclique est maintenue dans le même sens. Au contraire si la dérivée est négative, le sens de la recherche doit alors être inversé pour se diriger vers le PPM, comme illustre l'organigramme de cet algorithme figure (2.5).

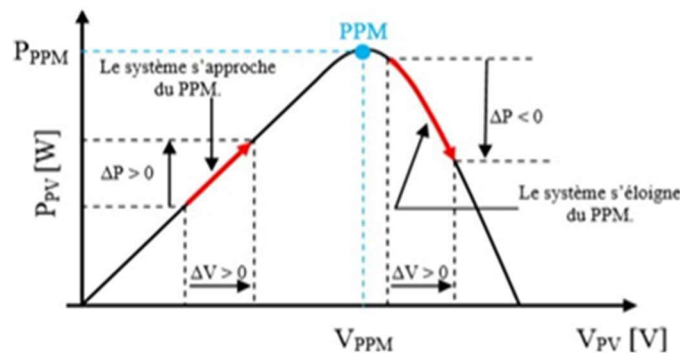


Figure (2.4) : Recherche du PPM par l'algorithme perturber et observer

2.4.2. Algorithme perturber et observer à pas variable

Le choix de pas ($d\alpha$) d'algorithme perturber et observer P&O influe sur l'oscillation autour le point de puissance maximal et le temps de convergence d'algorithme vers ce point. Pour cela, on trouve des algorithmes P&O avec pas variable entre deux ou plusieurs valeurs afin de faire une combinaison adéquate entre la précision et la rapidité, l'un de ces algorithmes est celle proposé par Elyaquouti et al [11]. Dans cet algorithme, le pas est varié entre deux

valeurs C_1 et C_2 selon la comparaison entre la valeur absolue de variation de puissance et une certaine valeur. Si la variation de la puissance est inférieure à un certain seuil Val , alors on utilise la perturbation du pas C_1 . Dans le cas contraire, on utilise la perturbation du pas C_2 , comme illustre dans le partiel organigramme (figure (2.6)).

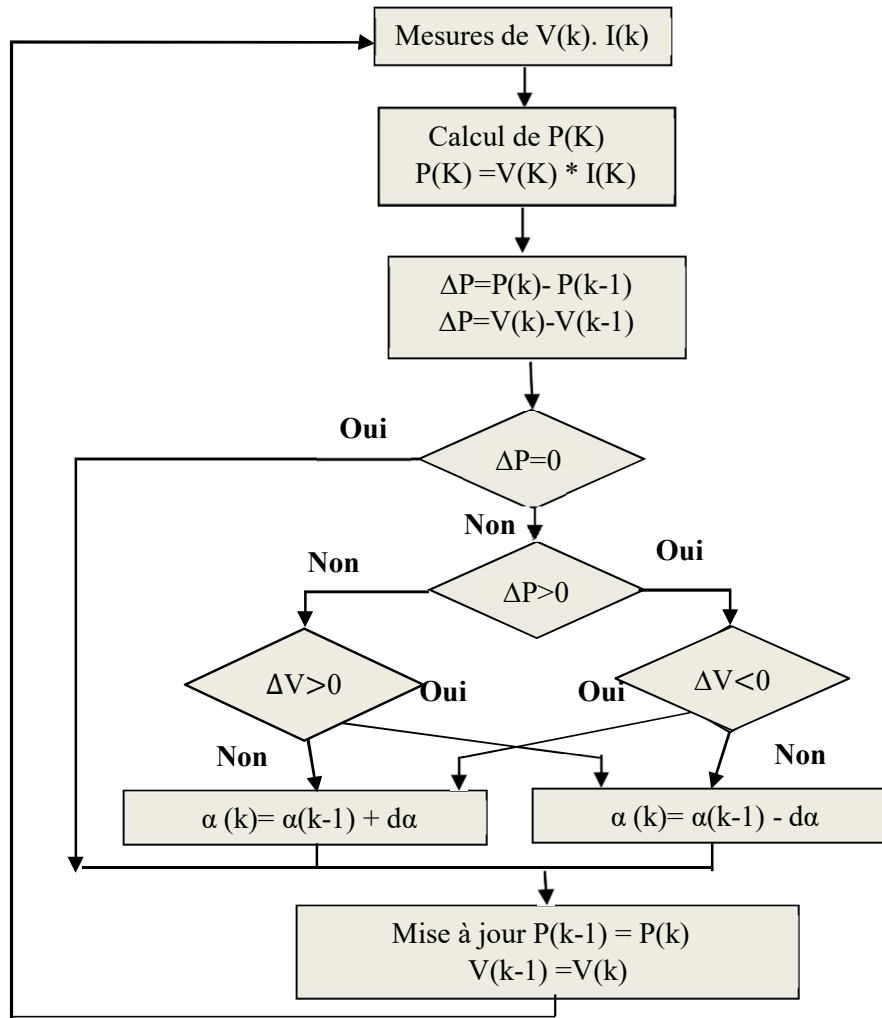


Figure (2.5) : Organigramme de l'algorithme perturber et observer

Un autre algorithme P&O avec pas variable basé sur le changement de la valeur de pas dans chaque itération selon la variation de puissance et de tension suivant l'équation :

$$d\alpha(K) = d\alpha_{\text{fixe}} * \frac{dP}{dV} \quad (2.1)$$

La différence entre les deux algorithmes précédant est le nombre des valeurs qui peut le pas prendre. Dans le premier algorithme, le pas peut prendre deux valeurs uniquement, mais dans le deuxième algorithme le pas peut prendre plusieurs valeurs [12].

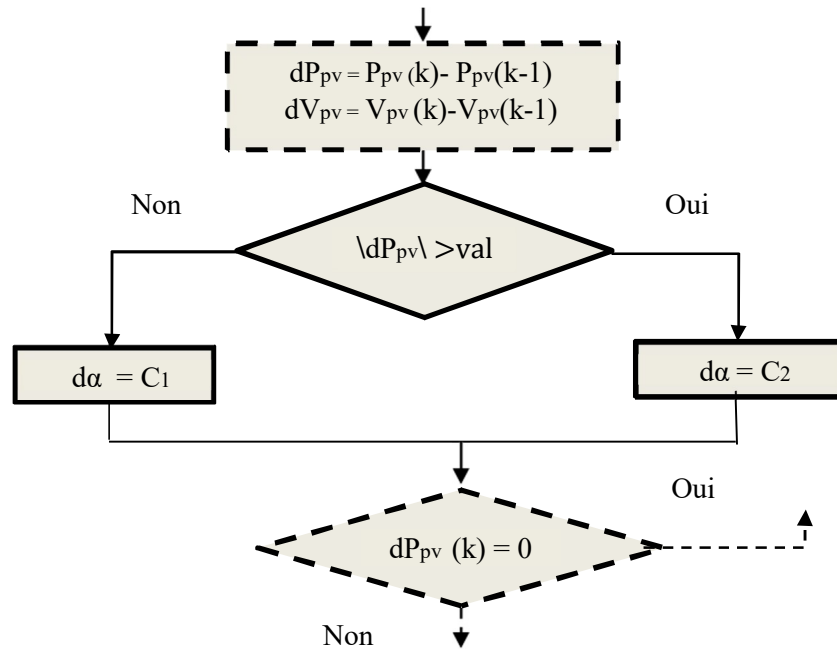


Figure (2.6) : Partiel organigramme d'algorithme P&O variable

2.4.3. Algorithme d'incrément de la conductance

L'algorithme de l'incrément de conductance (IC) est une technique MPPT classique qui utilise deux sondes pour mesurer la tension et le courant de fonctionnement du module PV. Le principe de cet algorithme est basé sur la connaissance de la valeur de la conductance $G = I/V$ et l'incrément de la conductance $\Delta G = \Delta I/\Delta V$ pour en déduire la position du point de fonctionnement par rapport le point de puissance maximale MPP.

- Si l'incrément de conductance ΔG est supérieur à l'opposé de la conductance $-G$, on diminue le rapport cyclique.
- Si l'incrément de conductance ΔG est inférieur à l'opposé de la conductance $-G$, on augmente le rapport cyclique.

Ce processus est répété jusqu'à atteindre le MPP [13], ou la dérivée de la puissance est égale à zéro comme indiqué dans l'Equation :

$$\frac{dP}{dV} = 0 \quad (2.2)$$

Cette équation peut être réécrite comme suit :

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(VI)}{dV} = I \frac{dV}{dV} + V \frac{dI}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \quad (2.3)$$

Ce qui implique que :

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \tag{2.4}$$

Selon cet algorithme, la fonction centrale utilise les conditions suivantes pour accéder au point de puissance maximale MPP :

$$\begin{cases} \frac{dP}{dV} > 0 & \text{si } \frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V} \\ \frac{dP}{dV} = 0 & \text{si } \frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \\ \frac{dP}{dV} < 0 & \text{si } \frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V} \end{cases} \tag{2.5}$$

La figure (2.7) représente l'organigramme de l'algorithme de la conductance incrémentale.

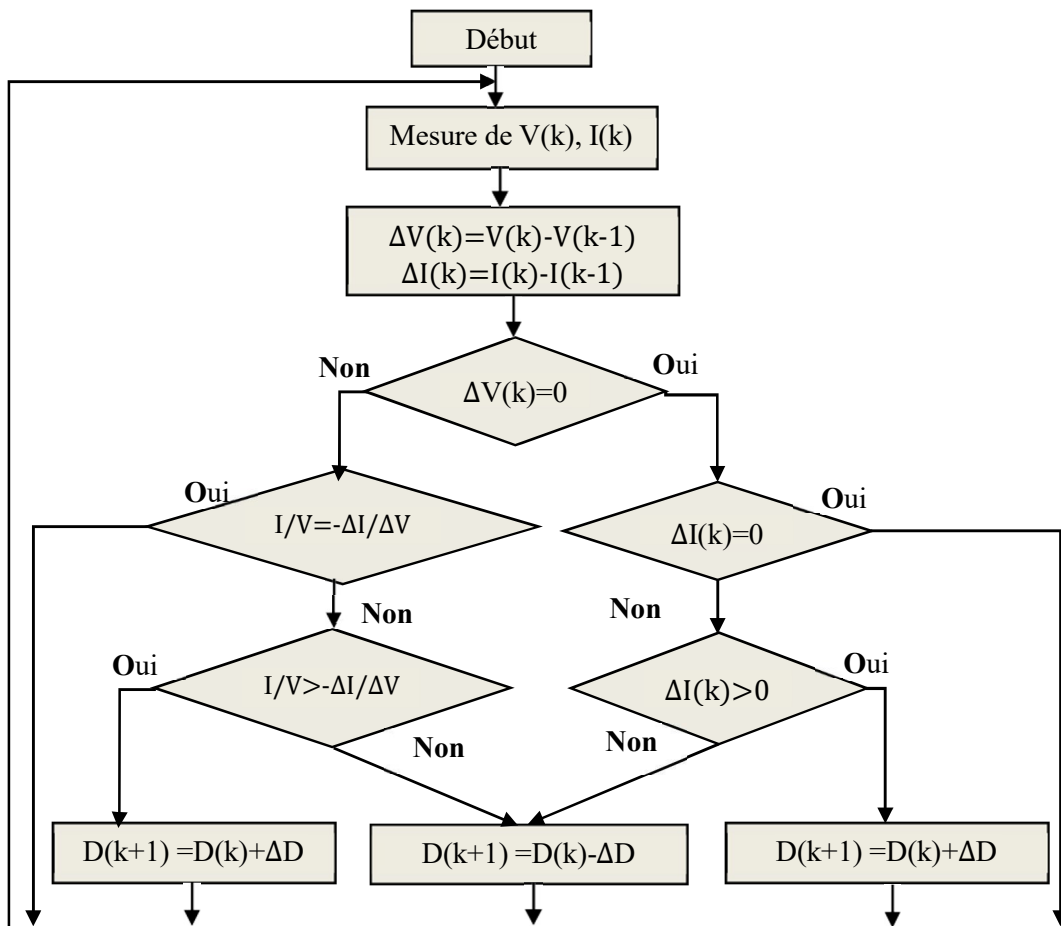


Figure (2.7) : Organigramme de l'algorithme de la conductance incrémentale

2.4.4. Algorithme de fraction de la tension en circuit ouvert

L'algorithme de mesure d'une fraction de la tension en circuit ouvert (FCO) de recherche du PPM est consistée à comparer la tension du module PV avec une tension de référence qui correspond à la tension optimale V_{op} . L'erreur de tension est alors utilisée pour ajuster le rapport cyclique du convertisseur.

La tension de référence est obtenue à partir de la connaissance de la relation linéaire existante entre la tension optimale V_{op} et la tension en circuit ouvert V_{co} d'un module PV, donnée par [13] :

$$V_{op} = K_v * V_{oc} \quad (2.6)$$

Où K_v est un facteur de tension qui varie entre 0,73 et 0,8 selon les caractéristiques de la cellule PV [13]. Pour déduire la tension optimale, on doit mesurer la tension du circuit ouvert V_{co} . Par conséquent, en ajustant la tension du panneau à la tension optimale calculée, le point de fonctionnement du panneau est maintenu proche du point de puissance optimal. Ce processus permet de cycler sur le rapport cyclique pour atteindre la tension optimale.

L'inconvénient majeur de cette technique réside dans la nécessité d'effectuer la mesure de V_{co} de temps en temps et l'obligation de déconnecter la charge du PV durant cette mesure impliquant une perte de transfert de puissance à chaque mesure. L'organigramme de l'algorithme fraction de la tension en circuit ouvert est représenté par la figure (2.8).

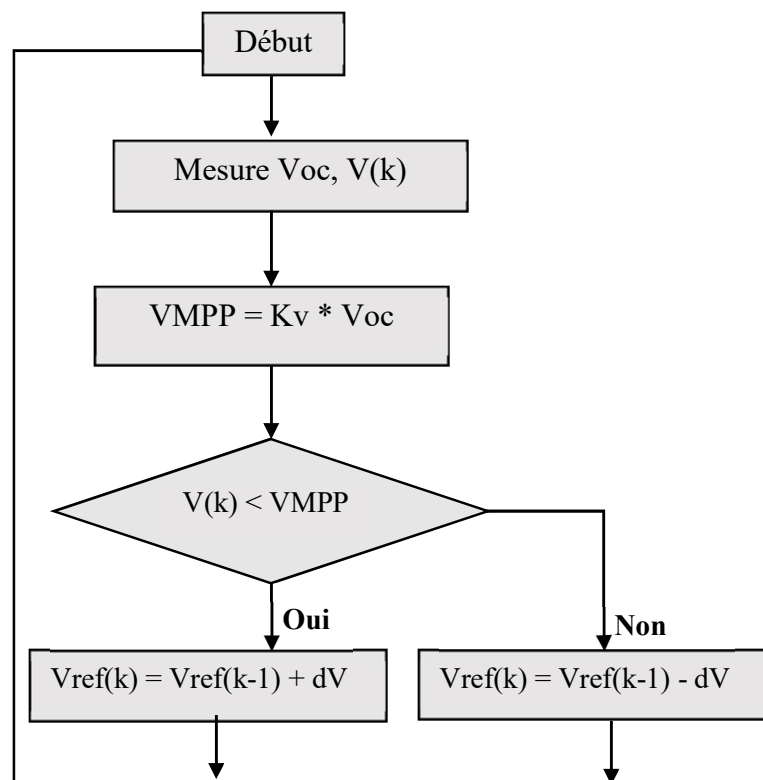


Figure (2.8) : Organigramme de l'algorithme fraction de la tension en circuit ouvert

2.4.5. Algorithme de fraction du courant de court-circuit

La technique de mesure d'une fraction de courant de court-circuit (FCC) est basée sur la relation linéaire entre le courant de court-circuit et le courant optimal donné par l'équation suivante :

$$I_{op} = K_i * I_{CC} \quad (2.7)$$

Où K_i est un facteur de courant dépendant des caractéristiques de la cellule PV et qui varie entre 0.85 et 0.92. En effet, le point de puissance maximale PPM est obtenue en amenant le courant du module PV au courant optimal. Par conséquent, on change le rapport cyclique jusqu'à ce que le générateur PV atteigne la valeur optimale [14]. L'équation (2.7) montre que le courant optimale peut être déterminé par une mesure du courant de court-circuit. La mesure de I_{CC} implique une perte de transfert de puissance dû à la mise en court-circuit du générateur PV. Cependant, cette méthode peut s'avérer plus précise que la précédente car la température n'influence pas trop sur ce coefficient. La figure (2.9) représente l'organigramme de l'algorithme de mesure d'une fraction de courant de court-circuit.

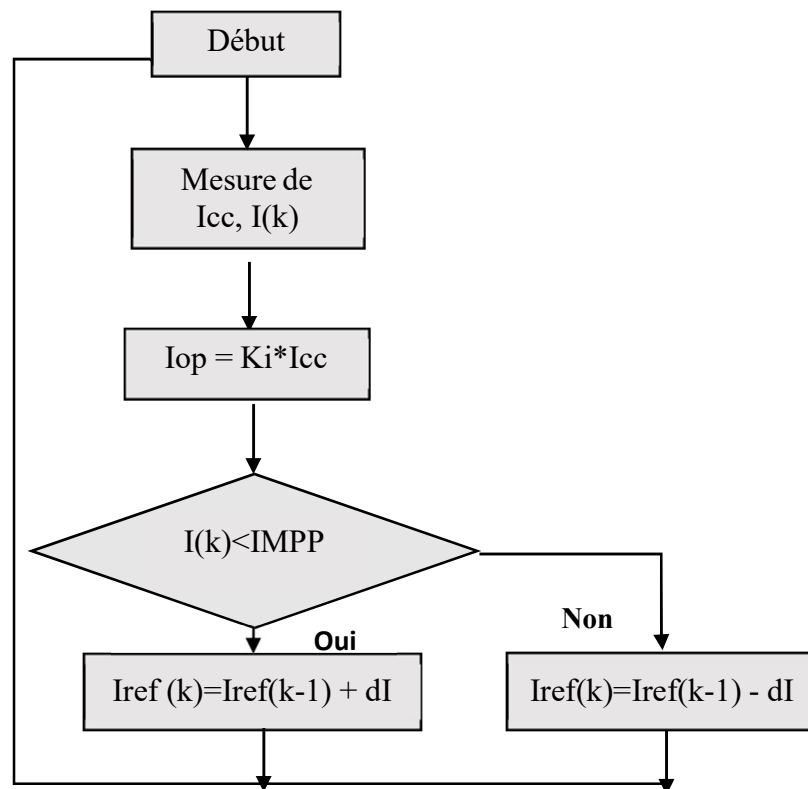


Figure (2.9) : Organigramme de l'algorithme de Fraction du Courant de court-circuit

2.4.6. Algorithme basée sur la logique floue

La commande basée sur la logique floue FLC est utilisée dans les systèmes de poursuite du point à maximum de puissance, cette commande offre l'avantage d'être une commande robuste

et qui ne nécessite pas la connaissance exacte du modèle mathématique du système. De plus, elles peuvent traiter des non linéarités. Cette commande est basée sur deux variables d'entrées qui sont l'erreur E et le changement d'erreur ΔE et une variable de sortie $\Delta\alpha$ (variation du rapport cyclique). La valeur de la variable de sortie, qui pilote le convertisseur statique pour rechercher le PPM, est déterminée à l'aide d'une table de vérité et de l'évolution des paramètres d'entrée. Le fonctionnement de cet algorithme se fait en trois étapes :

- La fuzzification permet la conversion des variables physiques d'entrée en ensembles flous. Durant cette étape, les variables d'entrées numériques sont converties en variable linguistique pouvant prendre les cinq valeurs suivantes : NB (Négative Big), NS (Négative Small), ZE (Zéro), PS (Positive Small), PB (Positive Big). Par l'utilisation de la structure de base de la commande logique floue. Comme le montre la structure de base de la commande logique floue illustrée par la figure (2.10).

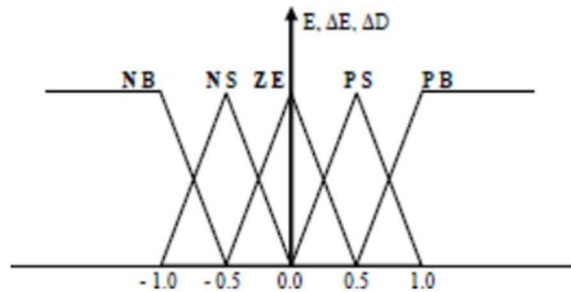


Figure (2. 10): Structure de base de la commande floue

Les paramètres d'entrées E et ΔE sont liées aux équations suivantes :

$$E = \frac{P(K) - P(K-1)}{V(K) - V(K-1)} \quad (2.8)$$

$$\Delta E = E(K) - E(K - 1) \quad (2.9)$$

- L'inférence : Dans l'étape d'inférence, on prend des décisions à partir des variables d'entrées E et ΔE sur la variable de sortie $\Delta\alpha$ à l'aide de tableau de règles d'inférence (tableau (2.1)) [13]. En effet, on établit des relations logiques entre les entrées et la sortie tout en définissant les règles d'appartenance. Par la suite, on dresse le tableau de règles d'inférence. Comme exemple du tableau (2.1), si les variables d'entrée E et ΔE , ont comme valeur PB et ZE correspondant à un point de fonctionnement très éloigné du PPM, d'après la table de vérité la valeur donnée à la variable de sortie ΔD est PB, ce qui implique une forte variation positive du rapport cyclique pour atteindre le PPM.

Tableau (2.1) : de vérité pour une commande logique floue

| $E \backslash \Delta E$ | NB | NS | ZE | PS | PB |
|-------------------------|----|----|----|----|----|
| NB | ZE | ZE | NB | NB | NB |
| NS | ZE | ZE | NS | NS | NS |
| NE | NS | ZE | ZE | ZE | PS |
| PS | PS | PS | PS | ZE | ZE |
| PB | PB | PB | PB | ZE | ZE |

- La défuzzification : Cette étape ne s'applique qu'à la variable de sortie $\Delta\alpha$. Durant cette étape, $\Delta\alpha$ sera convertir d'une variable linguistique à une variable numérique afin de pouvoir piloter le convertisseur de puissance pour atteindre le PPM.

Cette commande présente les meilleures performances en termes de précision et de rapidité de recouvrement de PPM. Mais l'inconvénient de cette commande est que sa précision est liée à la complexité de la table de vérité employée donc la nécessité du choix obligatoire d'un microcontrôleur ayant une grande capacité de calculs cela entraîne obligatoirement une consommation énergétique non négligeable liée au microprocesseur ainsi qu'un surcoût [12].

2.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le principe de la recherche du point de puissance maximale. Nous avons classifié les différents algorithmes de recherche du point de puissance maximale MPPT existants dans la littérature. Ensuite, nous avons étudié quelques commandes MPPT, comme l'algorithme perturber et observer avec un pas fixe et variable, l'algorithme de la conductance incrémentale, l'algorithme de fraction de la tension en circuit ouvert, l'algorithme de fraction du courant de court-circuit. Enfin, Nous avons étudié une commande basée sur la logique floue.

Dans le chapitre suivant, nous aurons étudié l'effet de l'éclairement et de la température sur une installation photovoltaïque autonome.

Chapitre 0 3

Simulation du système PV autonome

Chapitre 3

Simulation du système PV autonome

3.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à l'étude comparative par simulation entre les différents algorithmes de poursuite du point de puissance maximale, détaillées dans le chapitre précédent.

3.2. Système PV autonome proposé

La figure (3.1) représente le schéma synoptique du système PV autonome étudié alimente une charge résistive.

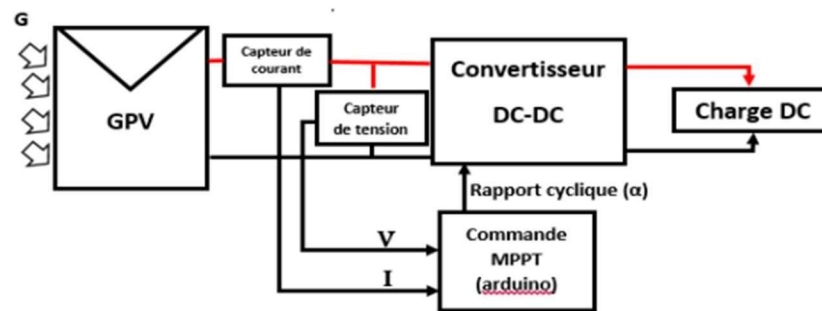


Figure (3.1) : Schéma synoptique du système PV étudié

Ce système PV autonome contient les éléments suivants un générateur PV de puissance crête 305.226W, un convertisseur survolteur commandé par MPPT (voir la figure (3.1)). Ce système PV autonome contient :

Ce système PV autonome contient les éléments suivants :

- Un module PV de type « Sunpower SPR-305-WHT-D », comme générateur PV, fournit une puissance maximale 305.226 W sous éclairement 1000W/m^2 et température de 25°C . Ce module PV sélectionné pour la simulation contient 96 cellules PV polycristallines en silicium. Il fournit une puissance nominale maximale de 305.226W sous une tension de 54,7V et un courant de 5,58A. Les propriétés physiques et électriques de ce module PV sont présentées dans le tableau (3.2).

Tableau (3.2) : Caractéristiques électriques du module PV
« SUNPOWER SPR-305-WHT-D »

| Caractéristiques électriques | Valeurs |
|--|-----------|
| Puissance maximale | 305.226 W |
| Tension à puissance maximale (Vmp) | 54.7 V |
| Courant à puissance maximale (Imp) | 5.58 A |
| Tension en circuit ouvert (Voc) | 64.2 V |
| Courant de court-circuit (Isc) | 5.96 A |
| Nombre total de cellules en série (Ns) | 96 |

- Un hacheur de type survolteur utilisé pour donner des valeurs de tension de sortie supérieur à celle d'entrée. Cet hacheur est caractérisé par les paramètres groupés dans le tableau (3.3)

Tableau (3.3) : Caractéristiques de le hacheur survolteur

| Caractéristiques | Valeurs |
|---------------------|------------------------|
| Capacité d'entrée | 250 10 ⁻⁶ F |
| Capacité de branche | 47 10 ⁻⁶ F |
| L'inductance | 0.5 10 ⁻³ H |
| Résistance | 20 Ohms |

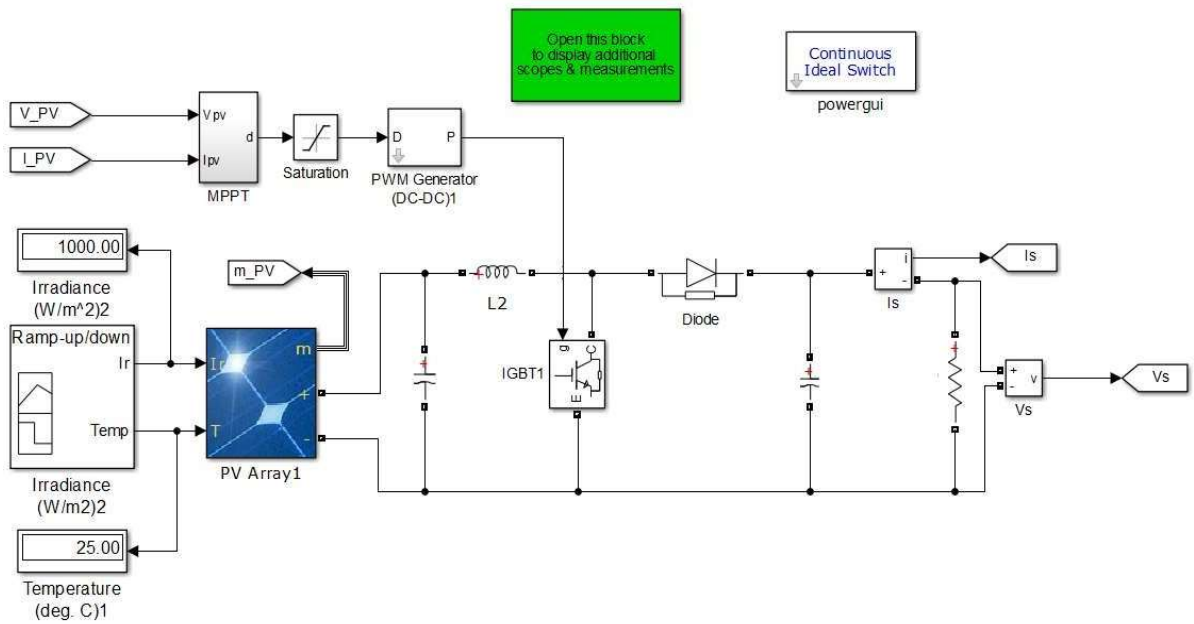
- Calculer la résistance requise selon la relation suivante :

$$R_c = \frac{P_{max}}{I_{mp}} = \frac{305,226}{5.58} = 9,80\Omega \quad (3.1)$$

- Une commande MPPT utilisé pour forcer le convertisseur survolteur de travailler à la puissance maximale, comme l'algorithme perturber et observer conventionnelle et avec un pas variable, l'algorithme de la conductance incrémentale, l'algorithme de fraction de la tension en circuit ouvert, l'algorithme de fraction du courant de court-circuit et l'algorithme basée sur la logique floue.

3.3. Simulation du système PV autonome

Dans cette partie pour vérifier le bon fonctionnement du système PV autonome utilisant les différentes commandes MPPT, nous utilisons le système PV avec une variation dans la température et/ou l'éclairement. Dans ce qui suit, on trace les résultats de simulation des puissances de sorties du systèmes PV en fonction de l'éclairement et la température. La figure (3.2) représente le schéma de simulation du système PV autonome.



La figure (3.2) : représente le schéma block de la commande MPPT.

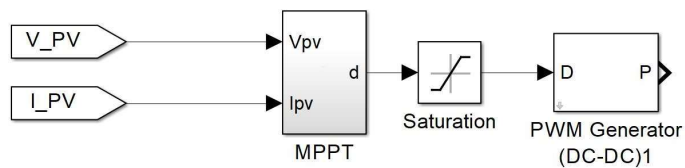


Figure (3.3) : schéma block de la commande MPPT

Les schémas blocks de ces commandes suivant nombres des capteurs d'entrée utilisés sont représentés sur les figures (3.4), (3.5) et (3.6).

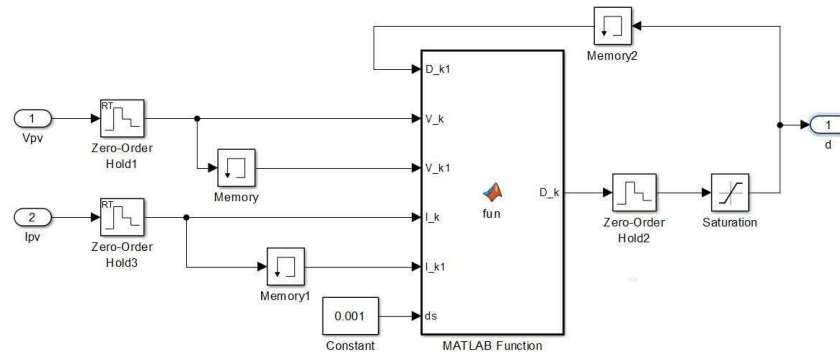


Figure (3.4) : Schéma block de la commande MPPT avec deux capteur d'entrée (courant et tension), (P&O, P&O à pas variable, IC)

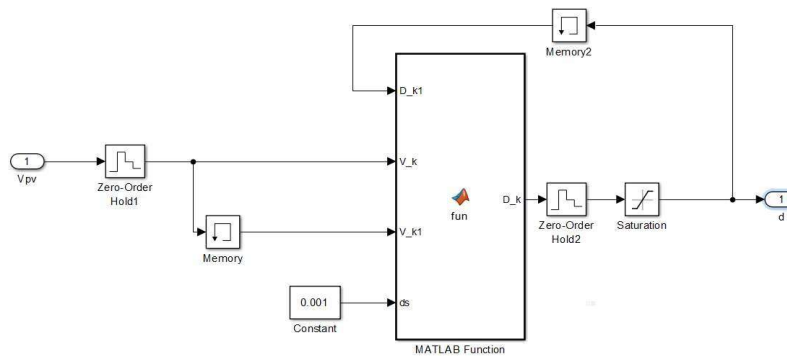


Figure (3.5) : Schéma block de la commande MPPT avec un seul capteur d'entrée (tension), (FCO)

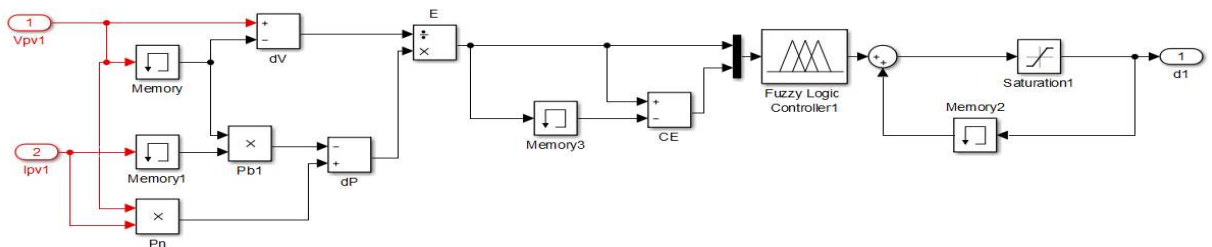


Figure (3.6) : Schéma block de la commande MPPT de FLC

Les résultats de simulation des différentes commandes MPPT utilisés dans ce travail avec pour différents éclairement et température sont représentés sur les figures (3.7) jusqu'à figure (3.10). Ces résultats représentent l'éclairement, la température et la puissance de sortie de chaque commande. La figure (3.7) représente les résultats de simulation des puissances de sortie pour un éclairement constat de 1000w/m^2 et température constante de 25°C .

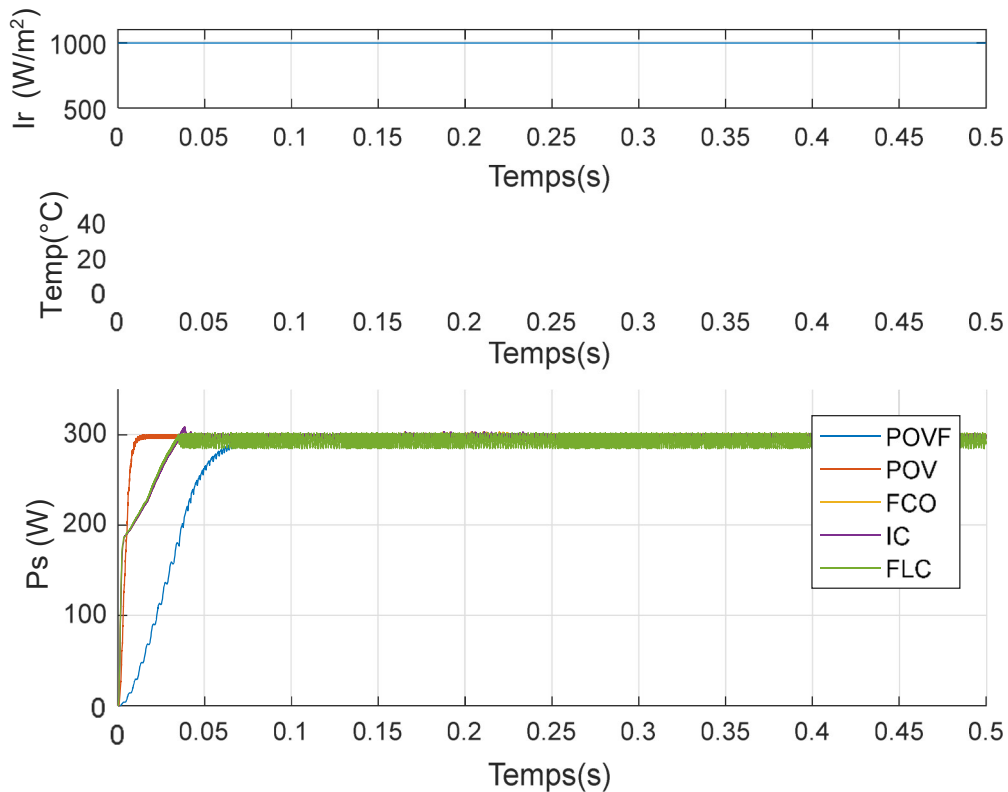


Figure (3.7) : Résultats de simulation des puissances de sortie du système PV pour différentes commandes MPPT à éclairement et température constants (1000W/m^2 et 25°C)

Les résultats de simulation des puissances de sortie du système PV pour différentes commandes MPPT à éclairement variable et température constante de 25°C sont représenté par la figure (3.8). Par contre, la figure (3.9) représente les résultats de simulation des puissances de sortie du système PV pour différentes commandes MPPT pour un éclairement constat de 1000w/m^2 et température variable.

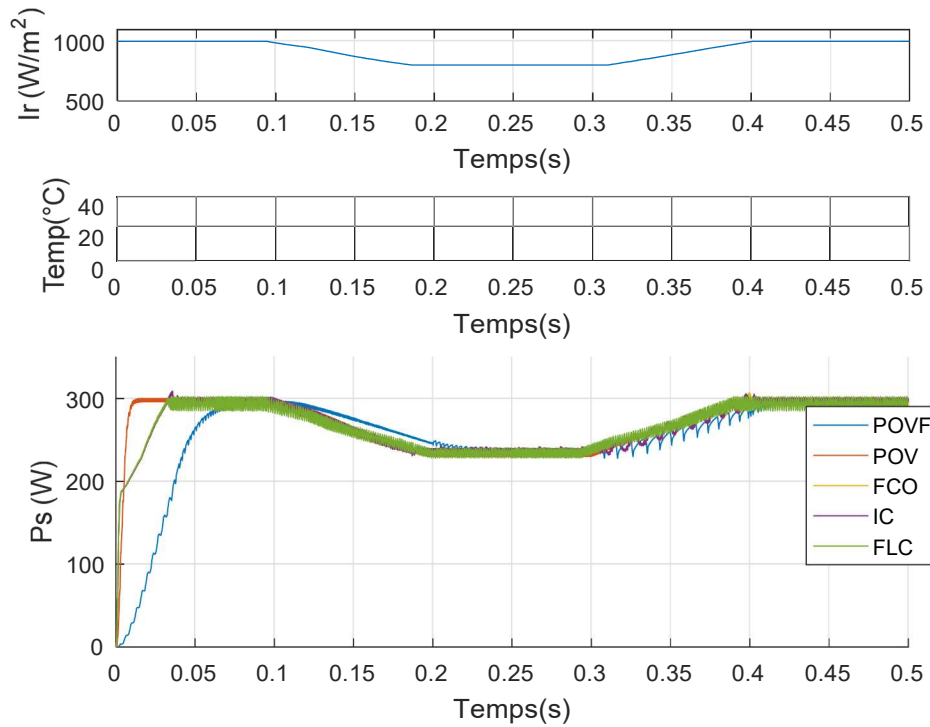


Figure (3.8) : Résultats de simulation des puissances de sortie du système PV pour différentes commandes MPPT à éclairement variable et température constante 25°C

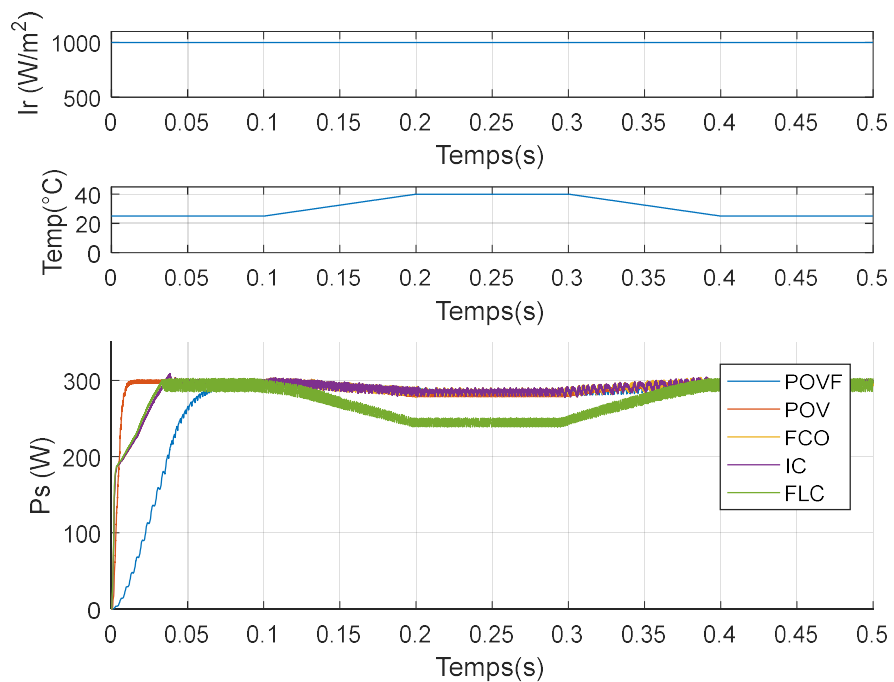


Figure (3.9) : Résultats de simulation des puissances de sortie du système PV pour Différentes commandes MPPT à éclairement constant 1000w/m² et température variable

La figure (3.10) représente les résultats de simulation des puissances de sortie du système PV pour différentes commandes MPPT à éclairement et température variables.

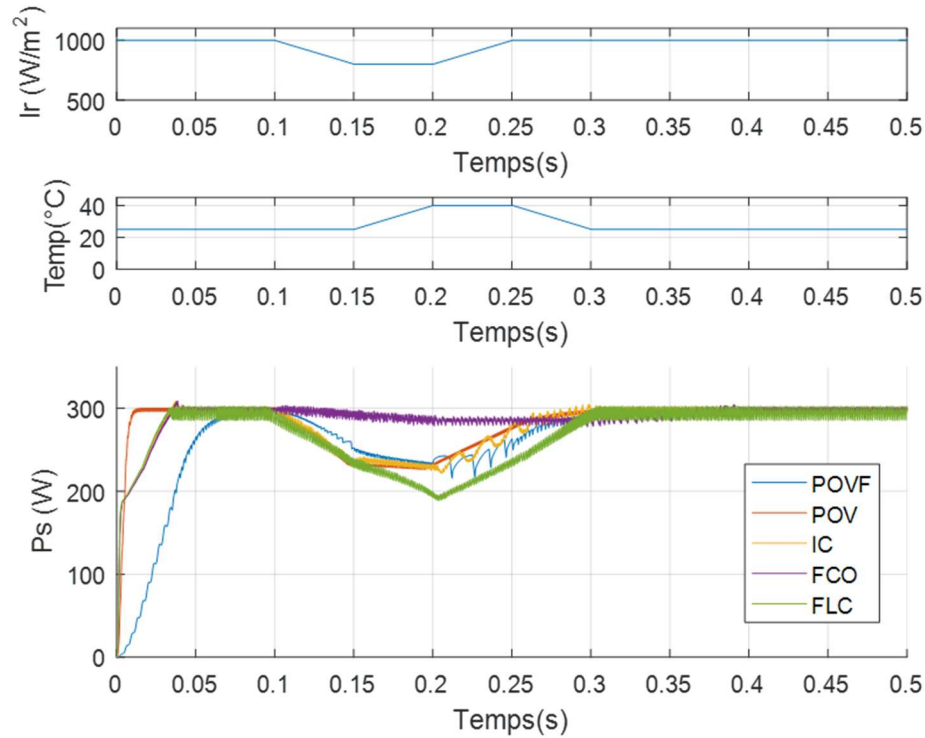


Figure (3.10) : Résultats de simulation des puissances de sortie du système PV pour différentes commandes MPPT à éclairement et température variables

3.4. Interprétation des résultats

D'après les résultats de simulation, nous citons les remarques suivantes :

- L'algorithme P&O est un algorithme classique et simple. En général, cet algorithme est fortement dépendant des conditions initiales et présente quelques problèmes d'oscillations autour du MPP, et son mauvais comportement après un changement soudain d'éclairement pour que la température n'a pas un grand effet.
- L'algorithme IC semble une amélioration de l'algorithme P&O. En effet, il se comporte mieux lors d'un changement rapide des conditions météorologiques. Cependant, c'est un algorithme plus compliqué que le précédent.

- L'algorithme basé sur la mesure de la fraction de tension en circuit ouvert (FCO) est très simple et facile à mettre en œuvre. Le principal inconvénient est la perte d'énergie et l'arrêt du transfert d'énergie lors de la mesure de grandeurs Voc.
- Par rapport à l'algorithme P&O, l'algorithme P&O à un pas variable est un algorithme qui utilise deux capteurs, en plus, il est rapide et stable, mais son inconvénient est son mauvais comportement après un changement brusque d'éclairement.
- L'algorithme basé sur la logique floue FLC est stable et rapide. Cependant, son revers est son mauvais comportement face au changement climatique, que ce soit en éclairement ou en température.
- Les algorithmes P&O et IC et la logique floue FLC à pas variable sont puissants, rapides et très efficaces. En fait, il fonctionne presque au point optimal sans oscillations.

Le tableau (3.3) résume les principales spécifications des différents algorithmes MPPT précédemment étudiés. Nous avons évalué et comparé ces algorithmes en termes de connaissance technique des paramètres du panneau PV, complexité, rapidité et précision.

Tableau (3.4) : Caractéristiques majeures des commandes MPPT étudiés

| MPPT Technique | P&O | P&O (pas Variable) | IC | FCO | FLC |
|--|--------------------|--------------------|--------------------|---------|--------------------|
| η MPPT (%) | 99,87% | 99,69% | 99,19% | 95,46% | 94,54% |
| Connaissance technologique du GPV nécessaire | Non | Non | Non | Oui | Non |
| Vitesse de convergence | Moyenne | Très rapide | Rapide | Rapide | Rapide |
| Complexité | Basse | Moyenne | Moyenne | Basse | Moyenne |
| Type de capteur | Tension Courant | Tension Courant | Tension Courant | Tension | Tension Courant |

3.5. Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté une étude comparative par simulation entre les différents algorithmes de poursuite du point de puissance maximale et l'influence de l'éclairement et la température. Les différentes commandes MPPT utilisés sont l'algorithme perturber et observer conventionnelle et avec un pas variable, l'algorithme de la conductance incrémentale, l'algorithme de fraction de la tension en circuit ouvert, l'algorithme de fraction du courant de court-circuit et l'algorithme basée sur la logique floue. Cette comparaison est faite en termes de connaissance technique des paramètres du panneau PV, complexité, rapidité et précision.

D'après les résultats de simulation, on remarque que ses méthodes MPPT faites leurs rôles de forcer le convertisseur survolteur de travailler à la puissance maximale. On a observé aussi que la diminution de l'éclairement implique une diminution de la puissance PV produite, par contre une légère diminution à l'augmentation de la température.

Conclusion générale

Conclusion générale

A la fin de notre mémoire, nous avons présenté une étude comparative de modélisation de système photovoltaïque autonome pour étudier l'effet des conditions climatiques, d'éclairage et de température, sur les performances du générateur photovoltaïque ainsi que sur le système photovoltaïque autonome.

Dans la première partie, nous avons expliqué le principe de l'effet photovoltaïque et introduit l'élément de base des cellules photovoltaïques ; C'est la cellule solaire. Nous nous sommes souvenus de l'histoire du PV, puis avons introduit différents types de systèmes PV, principalement des systèmes autonomes. Nous avons modélisé le générateur photovoltaïque et le convertisseur élévateur. Nous avons terminé par un résumé des avantages et des inconvénients des cellules photovoltaïques.

Dans la deuxième partie, nous avons introduit le principe de recherche du maximum de power point. Nous avons catégorisé les différents algorithmes de recherche maximale MPPT trouvés dans la littérature. Ensuite, nous avons étudié certaines commandes MPPT, telles que l'algorithme de perturbation et d'observation à pas constant et variable, l'algorithme de conduction incrémentale, l'algorithme de fraction de tension en circuit ouvert et l'algorithme de fraction de courant de court-circuit. Enfin, nous avons étudié quelque chose qui basé sur la logique floue.

A partir des résultats de simulation obtenus, on peut dire :

- Les performances d'un générateur photovoltaïque sont fortement influencées par les conditions climatiques, notamment le rayonnement et la température. Cette performance s'améliore avec l'augmentation de la lumière et la diminution de la température.
- La commande MPPT est assuré l'augmentation maximale de la livraison du point de puissance. Ensuite, il est transmet la puissance maximale à utiliser.
- La puissance maximale produite par le générateur photovoltaïque autonome est entièrement fournie. D'autre part, la puissance du contrôleur MPPT est consommée.

Ces résultats intéressants montrent l'effet de l'éclairage et de la température sur les performances du générateur photovoltaïque. Ainsi, l'effet de ces conditions climatiques sur l'injection d'énergie PV.

En perspective, nous proposons de développer notre système photovoltaïque autonome en utilisant des onduleurs DC-AC. Ainsi, l'utilisation de techniques d'intelligence artificielle telles que la logique floue, les réseaux de neurones artificiels et les réseaux de neurones flous pour contrôler les commutateurs.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] A. Amrani et R. Ben Glia, « Modélisation et Optimisation d'un système photovoltaïque interconnecté au réseau électrique », Mémoire de master, Université Echahid Hama Lakhder, d'El-Oued, 2017.
- [2] B. Ghedeir et M. Sayah-Lembarek, « Gestion d'énergie d'un système photovoltaïque », Mémoire de master, Université Kasdi Merbah, Ouargla, 2018.
- [3] A. Pastor « Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques ». Thèse de Docteur. Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, 2006.
- [4] M. Bentabba, « L'influence des paramètres du générateur PV sur le système PV connecté au réseau électrique », Mémoire de master, Université de Kasdi Merbah, Ouargla, 2021.
- [5] S. Hammadou et S. Rezzak, « Commande linéarisante appliquée aux Systèmes PV connecté au réseau », Université de Jijel, 2020.
- [6] T. Touama et N. Hafidi, « Commande d'un MPPT avec un convertisseur DC/DC pour un système photovoltaïque », Mémoire de master, Université de Mohamed Boudiaf -M'silla, 2019.
- [7] S. Petibon, « Nouvelles Architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques », Thèse de doctorat, Université de Toulouse, Janvier 2009.
- [8] C. Cabal, « Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque », Thèse Doctorat, Université de Toulouse, 2008.
- [9] N. Debili, « Etude et optimisation en environnement Matlab/Simulink d'un système de pompage Photovoltaïque », Mémoire de magister, Université de Constantine, 2015.
- [10] H. Doubabi, « Contribution à l'amélioration de l'efficacité d'une chaîne de conversion photovoltaïque », thèse de doctorat, Université de Reims, France, soutenu le 7/7/2021.
- [11] M. Elyaqouti, S. Hakim, S. Farhat, L. Bouhouch, A. Ihlal, « Implementation in ARDUINO of MPPT using variable step size P&O algorithm in PV installations », International Journal of power Electronics and drive system, March 2017. Vol. 8, No. 1, March 2017, pp. 434~443.
- [12] I. Boulhares et H. Kadiri, « Etude comparative des performances de différentes commandes MPPT », Mémoire de master, Université Ahmed Draïa -Adrar,2020.
- [13] N. Aouchiche, « Conception d'une commande MPPT optimale à base d'intelligence artificielle d'un système photovoltaïque », Thèse Doctorat, Université Bourgogne Comté, 2020.
- [14] M. Belmeliani et Y. Wahiba, « Modélisation d'un système photovoltaïque relié au réseau : Contrôle des puissances active et réactive », Mémoire de master, Université Mustapha Stambouli De Mascara, 2018.

Résumé

Ce travail présente une étude de commande, modélisation et simulation des systèmes PV autonomes. L'objectif de ce travail est de comparer entre les différentes commandes MPPT, qui sont assurés la poursuite du point de puissance maximale. Cette comparaison est basée sur le rendement, la complexité, la convergence, les types de capteurs et l'influences de l'éclairement et de la température sur les systèmes PV autonomes. Des résultats de simulation sont présentés pour valider cette comparaison des différentes commandes MPPT.

Mots clés : Générateur PV, survolteur, MPPT, Système PV autonome, conditions climatiques.

المخلص

يقدم هذا العمل دراسة التحكم والنمذجة والمحاكاة للأنظمة الكهروضوئية المستقلة. الهدف من هذا العمل هو المقارنة بين أوامر MPPT المختلفة، والتي تضمن السعي وراء أقصى نقطة طاقة. تعتمد هذه المقارنة على الإنتاجية والتعقيد والتقارب وأنواع المستشعرات وتأثيرات الإشعاع الضوئي ودرجة الحرارة على الأنظمة الكهروضوئية المستقلة. يتم تقديم نتائج المحاكاة للتحقق من صحة هذه المقارنة لأوامر MPPT المختلفة.

الكلمات المفتاحية: مولد كهروضوئي ، محول معزز ، MPPT ، نظام كهروضوئي مستقل ، ظروف مناخية.

Abstract

This work presents a study of control, modeling and simulation of stand-alone PV systems. The objective of this work is to compare between the different MPPT algorithms, which are ensured the tracking of the maximum power point. This comparison is based on efficiency, complexity, speed of convergence, sensor types, and irradiance and temperature influences on stand-alone PV systems. Simulation results are presented to validate this comparison of the different MPPT controls.

Keywords: PV generator, Boost, MPPT, Stand-alone PV system, Climatic conditions.