



République Algérienne Démocratique et Populaire
ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued
Faculté de Sciences et de La Technologies
Filière: Genie Electrique

Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de MASTER ACADEMIQUE

Thème

**Etude et implémentation d'un algorithme de contrôle d'un système photovoltaïque
par l'approche MVT.**

Domaine: Sciences et Technologie

Filière: Electrotechnique

Spécialité: Commande Electrique

Réalisé par: BAHRI Mohammed Abderrazzak

Devant le jury composé de:

ALLAG Abdelkarim	Université Echahid Hamma Lakhdar	President
Mohammed Idris Babaarbi	Université Echahid Hamma Lakhdar	Examinator
ALLAG Mariem	Université Echahid Hamma Lakhdar	Encadreur

2023-2024

Remerciement

Au nom d'Allah, le Tout Miséricordieux, le Très Miséricordieux.

Avant toute chose, louange à Allah le Très-Haut et Tout-Puissant qui m'a guidé et aidé à accomplir ce modeste travail. À Lui reviennent la louange et les remerciements pour Ses innombrables bienfaits.

J'exprime ensuite ma profonde gratitude et reconnaissance à mes chers parents qui ont été mon soutien et mon réconfort. Ils n'ont ménagé aucun effort pour m'épauler et m'encourager tout au long de ce parcours académique.

Qu'Allah les récompense pour moi de la meilleure des récompenses.

Je tiens également à remercier mes frères et sœurs qui m'ont comblé d'encouragements et de soutien moral, et qui ont été pour moi une source de réconfort dans les moments difficiles.

*J'adresse mes sincères remerciements à ma chère directrice de mémoire, Madame **Mariem Allag**, qui n'a cessé de me prodiguer ses précieux conseils et ses judicieuses orientations. Elle a été pour moi un guide et un soutien inestimable durant la préparation de ce mémoire.*

Abréviations

MPPT Maximum Power Point Tracking (Recherche de point de puissance maximale).

PV Photovoltaïque.

GPV Générateur photovoltaïque.

MPP Maximum Power (Point Le point de puissance maximale).

P&O Perturbation et Observation.

DC Direct Current (Courant Continu).

T-S Takagi-Sugeno.

NL Non-Linéaire.

LMI Linear matrix inequality (Inégalité Matricielle Linéaire).

MVT The Mean Value Theorem ou (théorème de la valeur moyenne).

Symboles

I_{pv}	: Courant engendré par la cellule
I_{ph}	: Photo-courant
I_d	: Courant qui passé dans la diode
I_s	: Courant de saturation de diode
V_{pv}	: Tension aux bornes de la cellule
K	: Constant de Boltzmann ($K = 1,38.10^{-23}J/K$)
q	: La charge de l'électron ($q = 1,602.10^{-19}C$)
T	: La température de la cellule en kelvin
n	: Facteur de non idéalité de la jonction
R_{sh}	: Résistance de shunt
R_s	: Résistance série
I_{cc}	: Courant de court-circuit
k_i	: Coefficient de la température du courant de court-circuit
E_g	: Energie de la bande de gap
V_{co}	: Tension du circuit ouvert
T_n	: Température de référence de la cellule
G	: Irradiation de soleil
K_o	: Gain de commande
C_1	: Condensateur d'entrée.
L	: Inductance.
$R_L; r_l$: Resistance interne.

Resumé

Un générateur photovoltaïque (PV) possède un point de fonctionnement optimal unique (MPP), qui varie avec l'éclairage et la température. Pour maintenir le panneau solaire au MPP et garantir un rendement élevé, nous développons un contrôle MVT robuste à base du théorème de la valeur moyenne et l'approche secteur non linéaire du système composé de générateur photovoltaïque, un convertisseur élévateur "Boost" et une charge ensuite, l'analyse de stabilité et de stabilisation du système PV, pour le bon fonctionnement en utilisant une fonction de Lyapunov quadratique et les outils d'inégalité matricielle linéaire (LMI). L'application de ces stratégies améliore la performance et la fiabilité des systèmes PV et donne des résultats très satisfaisants et assure la poursuite de la puissance maximale fournie par le GPV.

Mot de clé : système PV– MPPT - convertisseur DC/DC- contrôleur MVT-LMI

Abstract

A photovoltaic (PV) array has a single optimal operating point (MPP), which varies with lighting and temperature. To maintain the solar panel at MPP and guarantee high efficiency, we develop a robust MVT control based on the mean value theorem and the non-linear sector approach of the system composed of a photovoltaic generator, a "Boost" step-up converter and a load then, the stability and stabilization analysis of the PV system, for the correct operation using a quadratic Lyapunov function and linear matrix inequality (LMI) tools. The application of these strategies improves the performance and reliability of PV systems and given very satisfactory results and ensuring the continuation of the maximum power provided by the GPV.

Keyword: PV–MPPT system – DC/DC converter – MVT-LMI controller.

Liste de Matières

<i>Remerciement</i>	2
Abréviations	3
Symboles.....	4
Resumé.....	5
Abstract	5
Liste de Matières	6
Liste des figure	9
INTRODUCTION GENERALE.....	11
Chapitre 1 : Etude du système photovoltaïque	1
I.1 Introduction	1
I.2 La cellule photovoltaïque (composants et principe)	1
I.2.1 Description d'une cellule photovoltaïque.....	1
: I.2.2 Type des cellules solaires en Silicium.....	2
I.2.3 La différence entre les propriétés des cellules silicium	Error! Bookmark not defined.
I.2.4 L'effet photovoltaïque.....	3
I.3 Modélisation de cellule photovoltaïque	4
I.3.1 Circuits équivalents.....	4
I.3.2 Circuit équivalent (Modèle idéal - Prototype)	5
I.3.3 Circuit équivalent (Modèle réel)	6
I.4 Caractéristiques de la cellule solaire PV	8
: I.4.1 Tension en circuit ouvert (V_{oc})	8
I.4.2 Courant de court-circuit (I_{cc})	8
I.4.3 Facteur de forme (FF).....	9
I.4.4 Rendement de la cellule (η)	9
I.4.5 Point de puissance maximale	10
I.5 Simulation de cellule photovoltaïque.....	10
I.5.1 Caractéristiques le panneau solaire	10
: I.5.2 Résultats de caractéristiques de panneau solaire.....	11
I.5.3 Analyse les résultats	13
I.6 Influence d'irradiation et de la température sur caractéristique (I-V) et (P-V) des cellules PV ..	13
I.6.1 Description des expériences	13
I.6.2 Discussion.....	14

I.7 Associations des cellules PV	15
I.7.1 Association en série.....	15
: I.7.2 Association en parallèle.....	15
I.8 conclusion	16
Chapitre 2: Poursuite du point de puissance maximale.....	18
II.1 Introduction.....	18
II.2 Convertisseur DC / DC	18
II.2.1 Généralité sur l'hacheur	18
II.2.2 Normes de qualité du l'hacheur.....	19
II.2.3 Les types d'hacheur	19
II.2.3.a Hacheur abaisseur (ou Buck).....	20
II.2.3.b Hacheur élévateur (ou Boost)	21
II.2.3.c Hacheur abaisseur-élévateur (Buck-Boost)	22
II.2.4 Choix du convertisseur DC-DC.....	23
II.2.4.1 Séquences de fonctionnement (Boost)	23
II.2.4.2 Modèle moyen	25
II.2.4.3 Rapport cyclique	25
II.3 Principe de la recherche du point de puissance maximale.....	26
II.3.1 Commande MPPT.....	26
II.3.2 Méthodes indirectes (Méthodes Offline).....	26
: II.3.3 Méthodes directes (méthode Online)	26
II.3.4 Méthode P&O.....	27
II.3.5 Inconvénients de la méthode P&O	28
II.5 Simulations de contrôle de cellules solaires avec l'algorithme P&O.....	28
II.5.1 Caractéristiques du convertisseur Boost.....	28
: II.5.2 Commande PWM	29
II.5.3 Etude de méthode MPPT pour des conditions de fonctionnement standards du PV	30
II.6 Conclusion	33
Chapitre 3 : MPPT par contrôleur a base théorème de la valeur moyenne	36
III.1 Introduction.....	36
III.2 Synthèse d'un contrôleur par l'approche MVT.....	36
III.2.1 Position du problème	36
: III.2.2 Approche par secteur non linéaire.....	36
III.2.4 Théorème de la valeur moyenne MVT	37
III.2.4.1 MVT scalaire.....	37
III.2.4.2 MVT vectorielle	37

III.2.5 Contrôleur par l'approche MVT.....	39
III.2.6 Analyse de stabilité.....	39
III.3 Application de contrôleur MVT sur le système photovoltaïque	40
III.3.1 Le modèle mathématique du convertisseur Boost	40
III.3.2 stratégie de contrôle.....	40
III.3.2.1 le modèle augmenté du système	41
III.3.2.3 conception le contrôleur MVT	42
III.4 Simulation matlab	47
III.5 Conclusion	51
Conclusion Générale	52
Bibliographie	54

Liste des figure

Figure I. 1 Schéma des composants cellule photovoltaïque.	2
Figure I. 2 Type des cellules photovoltaïques de silicium.....	2
Figure I. 3 Semi-conducteur (Silicium) de type P et type N.....	4
Figure I. 4 Modèle idéal d'une cellule photovoltaïque	5
Figure I. 5 Modèle réel d'une cellule photovoltaïque	6
Figure I. 6 Schéma de simulation de la cellule photovoltaïque	12
Figure I. 7 Courbe de la caractéristique I-V de la cellule photovoltaïque dans les conditions standards	12
Figure I. 8 Courbe de la caractéristique P-V de la cellule photovoltaïque dans les conditions Standards $G = 1000w/m2/$ et $T = 25^{\circ}C$	13
Figure I. 9 Caractéristiques (I-V) et (P-V) sous l'influence de d'irradiation.....	14
Figure I. 10 Caractéristiques (I-V) et (P-V) sous l'influence de la température.....	14
Figure I. 11 Caractéristiques résultantes d'un groupement de N_s cellules en série	15
Figure I. 12 Caractéristiques résultant d'un groupement de N_p cellules en parallèle.	16
Figure II. 1 Schéma électrique d'un hacheur Buck.....	20
Figure II. 2 Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur buck	21
Figure II. 3 Schéma électrique d'un hacheur boost	21
Figure II. 4 Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur Boost.....	22
Figure II. 5 Schéma électrique d'un hacheur buck- boost	22
Figure II. 6 Chronogrammes de courant et de tension d'un hacheur buck-boost	23
Figure II. 7 Circuit équivalent quand l'interrupteur est fermé	24
Figure II. 8 Circuit équivalent quand l'interrupteur est ouvert.....	24
Figure II. 9 Principe de la méthode P&O sur courbe de La caractéristique P-V	27
Figure II. 10 Organigramme de la méthode P&O.....	28
Figure II. 11 Schéma de circuit du convertisseur DC/DC contrôlé par l'algorithme P&O.	29
.....	29
Figure II. 12 Signal généré par la technique PWM.....	29
Figure II. 13 Variation de la température et de l'irradiation.....	30
Figure II. 14 La puissance de sortie du convertisseur et la puissance du panneau PV variation de l'irradiance.....	30

Figure II. 15 Tension de sortie du convertisseur et la tension du panneau PV variation de l'irradiance	31
Figure II. 16 Courant de sortie du convertisseur et le courant du panneau PV variation de l'irradiance	31
Figure II. 17 La puissance de sortie du convertisseur et la puissance du panneau PV variation de la température.....	32
Figure II. 18 Tension de sortie du convertisseur et la tension du panneau PV variation de la température.....	33
Figure II. 19 Courant de sortie du convertisseur et le courant du panneau PV avec variation de la température	33
Figure III. 1 Module PV LC120-12P broncher convertisseur Boost	40
Figure III. 2 Stratégie de control	41
Figure III. 3 Schéma globale de la controlleur MVT en système photovoltaïque	47
Figure III. 4 Evolution de température et irradiation	48
Figure III. 5 Tension sortie et tension référence	48
Figure III. 6 Duty cycle de Boost convertisseur.....	49
Figure III. 7 Courant d'inductance et référence	49
Figure III. 8 Puissance de sortie et référence de PV.....	50
Tableau I. 1 Caractéristiques électriques du module photovoltaïque LC120-12P	11
Tableau II. 1 composants du convertisseur DC /DC	29

INTRODUCTION GENERALE

L'énergie solaire est devenue un acteur clé dans le paysage des énergies renouvelables, offrant une alternative durable et respectueuse de l'environnement aux combustibles fossiles. Alors que la demande mondiale d'énergie continue d'augmenter, l'accent est de plus en plus mis sur l'exploitation de l'énergie solaire pour atténuer les effets néfastes du changement climatique et réduire la dépendance à l'égard des sources d'énergie non renouvelables. Parmi les différentes technologies développées pour exploiter l'énergie solaire, les systèmes photovoltaïques (PV) se distinguent par leur capacité à convertir directement le rayonnement solaire en énergie électrique. Cependant, l'efficacité et la fiabilité des systèmes photovoltaïques sont souvent remises en question par la variabilité inhérente de l'énergie solaire, ce qui nécessite des stratégies de contrôle et une électronique de puissance sophistiquées pour optimiser leurs performances.

Les systèmes photovoltaïques convertissent la lumière du soleil en électricité à courant continu (CC) à l'aide de matériaux semi-conducteurs. L'efficacité de ce processus de conversion est influencée par plusieurs facteurs, notamment l'intensité de la lumière solaire, la température et les caractéristiques électriques des cellules photovoltaïques. Pour garantir que l'électricité produite est compatible avec les différentes charges et systèmes de stockage, les convertisseurs de puissance jouent un rôle crucial. Les convertisseurs Buck, qui abaissent la tension, et les convertisseurs élévateurs, qui augmentent la tension, font partie intégrante des systèmes photovoltaïques. Ces convertisseurs aident à adapter la puissance variable des panneaux photovoltaïques pour répondre aux exigences spécifiques de diverses applications.

L'un des défis fondamentaux des systèmes photovoltaïques consiste à maximiser la puissance de sortie malgré les conditions environnementales fluctuantes. C'est là qu'interviennent les algorithmes de suivi du point de puissance maximale (MPPT). Les techniques MPPT sont conçues pour ajuster en permanence le point de fonctionnement électrique des panneaux photovoltaïques afin de garantir qu'ils fonctionnent à leur point de puissance maximale (MPP), où le produit du courant et de la tension est maximisé. Parmi les différents algorithmes MPPT, Perturb and Observe (P&O) et Incremental Conductance (IncCond) sont les plus couramment utilisés. Ces algorithmes aident à optimiser dynamiquement l'extraction d'énergie des panneaux photovoltaïques, améliorant ainsi l'efficacité globale du système.

Bien que les algorithmes MPPT soient efficaces pour maximiser la puissance de sortie, ils doivent être complétés par des stratégies de contrôle avancées pour gérer les complexités et les non-linéarités des systèmes photovoltaïques. Les techniques de contrôle non linéaire telles que le contrôle en mode glissant, le back stepping la logique floue Takagi-Sugeno et le theoreme da la valeur moyenne MVT offrent des solutions robustes pour maintenir la stabilité et les performances du système dans diverses conditions.

Le contrôle en mode glissant (SMC) est une puissante technique de contrôle non linéaire qui dirige l'état du système vers une surface de glissement prédéfinie et l'y maintient. Cette méthode est particulièrement efficace pour traiter les caractéristiques non linéaires des systèmes photovoltaïques et offre une robustesse aux variations de paramètres et aux perturbations externes. Cependant, le SMC peut induire du broutage, un phénomène caractérisé par des oscillations à haute fréquence, qui peuvent être atténuées grâce à des techniques telles que le contrôle de la couche limite ou de l'hystérésis.

Le backstepping est une autre méthode de contrôle non linéaire qui conçoit des contrôleurs en stabilisant de manière récursive chaque sous-système du système global. Cette technique est bien adaptée aux systèmes photovoltaïques car elle permet une conception systématique du contrôleur, garantissant un contrôle et une stabilité précis. L'approche backstepping est particulièrement bénéfique pour gérer la dynamique complexe des convertisseurs de puissance utilisés dans les systèmes photovoltaïques.

Le théorème de la valeur moyenne combine la logique floue avec un modèle mathématique de l'erreur pour gérer les non-linéarités dans les systèmes photovoltaïques. Cette méthode consiste à créer un ensemble de modèles linéaires pour différents points de fonctionnement et à effectuer une transition en douceur entre eux. L'approche Takagi-Sugeno fournit une stratégie de contrôle robuste qui s'adapte aux conditions variables, garantissant des performances et une fiabilité optimales du système photovoltaïque.

L'intégration de ces stratégies de contrôle avancées avec des convertisseurs abaisseur et élévateur améliore considérablement les performances des systèmes photovoltaïques. La combinaison des algorithmes MPPT avec des techniques de contrôle non linéaire garantit que les panneaux photovoltaïques fonctionnent à leur point de puissance maximale tout en maintenant la stabilité et l'efficacité du système dans des conditions environnementales fluctuantes.

Les avantages de l'intégration de stratégies de contrôle avancées avec les convertisseurs de puissance dans les systèmes photovoltaïques sont multiples. Premièrement, il maximise l'énergie récupérée du rayonnement solaire, augmentant ainsi l'efficacité globale du système. Deuxièmement, il garantit un fonctionnement stable et fiable, même dans des conditions

d'ensoleillement et de température variables. Troisièmement, il prolonge la durée de vie des composants du système photovoltaïque en évitant les contraintes et l'usure excessives causées par des changements brusques des conditions de fonctionnement.

De plus, l'adoption de ces stratégies de contrôle avancées contribue de manière significative aux objectifs plus larges des solutions énergétiques durables. En optimisant les performances et la fiabilité des systèmes photovoltaïques, ces techniques contribuent à réduire les émissions de gaz à effet de serre et à promouvoir l'utilisation d'énergies propres. L'amélioration et l'innovation continues des stratégies de contrôle et de l'électronique de puissance sont essentielles pour répondre à la demande mondiale croissante d'énergie renouvelable et parvenir à la sécurité énergétique.

En conclusion, l'intégration de stratégies de contrôle avancées avec des convertisseurs abaisseur et élévateur est cruciale pour optimiser l'utilisation de l'énergie solaire dans les systèmes photovoltaïques. Des techniques telles que MPPT, le contrôle en mode glissant, le backstepping et la MVT fournissent des solutions robustes pour maximiser la puissance de sortie et garantir la stabilité du système dans diverses conditions. La poursuite de la recherche et du développement dans ce domaine conduira à des systèmes d'énergie solaire plus efficaces et plus fiables, contribuant ainsi de manière significative aux solutions énergétiques durables. L'avenir de l'énergie solaire repose sur ces stratégies de contrôle innovantes pour relever les défis posés par la variabilité des ressources solaires et la demande croissante d'énergies renouvelables.

Le travail développé dans cette thèse est structuré en trois chapitres :

Dans le premier chapitre, nous commençons par définir et décrire la structure générale des systèmes photovoltaïques (PV) et leurs principes de fonctionnement. Nous discutons également des principes de la conversion photovoltaïque, présentons la modélisation mathématique d'un système PV et concluons par une discussion sur les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ d'un panneau photovoltaïque, simulées à l'aide de Matlab.

Le 2^{ème} chapitre sera consacré à la modélisation du convertisseur DC/DC (Boost) et du GPV ainsi que leur principe de fonctionnement et nous montrerons ensuite l'influence de la température et l'éclairement sur le rendement du générateur photovoltaïque et on termine le chapitre par l'algorithme de recherche du point de puissance maximale (MPPT) en utilisant la commande P&O ces définition et expliqué son principe. En fin on simulera la commande MPPT avec l'algorithme P&O et le convertisseur Boot sous l'environnement Matlab

Dans le dernier chapitre est consacré à synthétiser une loi de commande à base MVT pour le système non linéaire, Nous commençons par la définition, de la théorème de la valeur

moyenne MVT pour l'erreur de contrôle et l'approche de secteur non linéaire, Nous modélisons ensuite notre module PV avec un convertisseur boost et le contrôleur MVT, nous étudions la stabilisation des systèmes PV et la synthèse d'une loi de contrôle par rétroaction d'état non linéaire de type retour d'état. Sur la base de la formulation LMI et en utilisant une fonction de Lyapunov quadratique, nous dérivons des conditions de stabilisation. Enfin, nous présentons les résultats de simulation du système photovoltaïque en boucle fermée pour démontrer l'efficacité de la stratégie de contrôle proposée.

Chapitre 1

Chapitre 1 : Etude du système photovoltaïque

I.1 Introduction

La technologie des cellules photovoltaïques est basée sur le phénomène de l'effet photoélectrique, découvert par le scientifique français **Alexandre Edmond Becquerel en 1839**. Ce phénomène unique permet de convertir directement les rayons du soleil en courant électrique continu. L'énergie solaire est une source renouvelable et inépuisable, qui peut être exploitée n'importe où à la surface de la Terre.

Cependant, la quantité d'électricité produite par les centrales photovoltaïques dépend fortement de conditions climatiques variables, notamment l'intensité du rayonnement solaire et les températures élevées.

Dans ce chapitre, nous examinerons d'abord le principe fondamental de la conversion de l'énergie solaire en électricité. Ensuite, nous expliquerons le modèle mathématique décrivant le comportement des cellules photovoltaïques. Enfin, nous simulerons, à l'aide du logiciel Matlab, le comportement dynamique d'une centrale solaire photovoltaïque, et étudierons les caractéristiques des courbes courant-tension ($V - I$) et puissance-tension ($P - V$) en fonction des variations d'ensoleillement et de température.

I.2 La cellule photovoltaïque (composants et principe)

I.2.1 Description d'une cellule photovoltaïque

Le terme « photovoltaïque » désigne le processus physique qui consiste à transformer l'énergie lumineuse en énergie électrique par le transfert de l'énergie des photons aux électrons d'un matériau. Le principe photovoltaïque a été découvert par le physicien français **A. Becquerel en 1839** et expliqué par **Albert Einstein** en 1905 (c'est pour cette explication qu'il a reçu le prix Nobel de Physique en 1921).

Le préfixe Photo vient du grec « **phos** » qui signifie lumière. « **Volt** » vient du patronyme d'**Alessandro Volta** (1745-1827), physicien qui a contribué aux recherches sur l'électricité. Photovoltaïque (PV) signifie donc littéralement électricité lumineuse.

Le matériau de base, utilisé dans la fabrication des cellules PV, est dans la plupart des cas le silicium. Cette technologie présente plus de 85% du marché mondial d'aujourd'hui, dont 29% pour le silicium monocristallin et 51% pour le silicium multicristallin. Selon le procédé de fabrication, on obtiendra des photopiles plus ou moins performantes, sous forme amorphe, polycristalline, ou mono cristalline. D'autres matériaux sont utilisables : Arséniure de Gallium (AsGa), Tellure de Cadmium (CdTe), Indium Gallium Phosphide (InGaP), et Cu (InGa)Se₂.

Le choix parmi ces différentes technologies dépend du prix et du rendement énergétique. Quelques rendements concernant les diverses photopiles existantes sont présentés ci-après.

[8,9]

Chapitre 1 : Etude du système photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque, appelée aussi photopile puisqu'elle génère un courant électrique continu à ses bornes, sous une tension électrique qui varie entre 0.4 volt à 0.6 volt et une puissance de 2 watts à 5 watt avec deux surfaces standard $156*156\text{ mm}^2$ et $125*125\text{ mm}^2$, cette dernière présente l'élément de base d'un système photovoltaïque.[1]

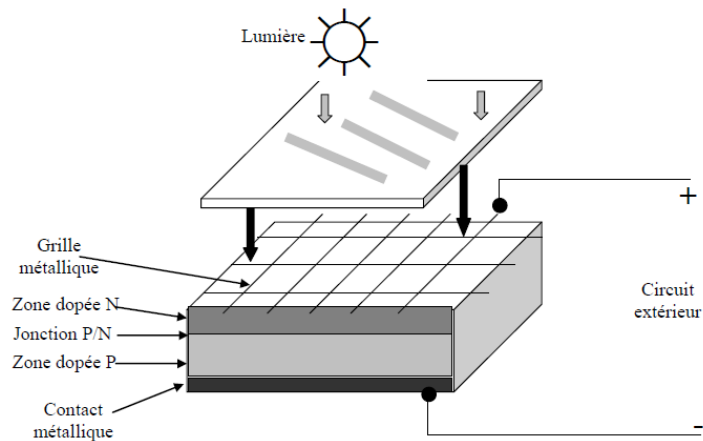


Figure I. 1 Schéma des composants cellule photovoltaïque.

I.2.2 Type des cellules solaires en Silicium :

Dans les cellules de silicium, il existe trois familles les plus courantes : cellule en silicium monocristallin, polycristallin et cellule en silicium amorphe, chaque type de cellules a un rendement et un coût, comme le montre la figure suivante :

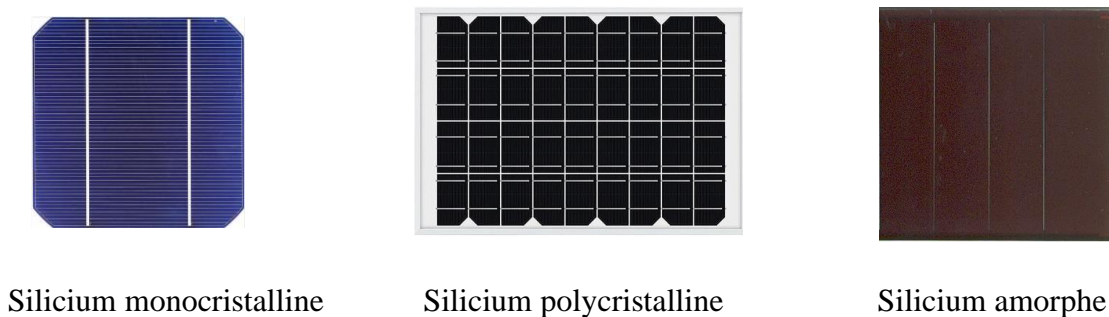


Figure I. 2 Type des cellules photovoltaïques de silicium.

Chapitre 1 : Etude du système photovoltaïque

I.2.3 La différence entre les propriétés des cellules silicium

1-La cellule monocristalline

Cette cellule se compose d'un cristal articulaire en deux couches. C'est la cellule qui a le meilleur rendement (12-16% ; jusqu'à 23% en laboratoire), la cellule qui s'approche du modèle théorique mais a également le coût le plus élevé, en raison de la fabrication complexe, a été déterminée par sa forme carrée avec 4 aspects.[1]

2-La cellule poly cristalline

La conception de la cellule multi cristallines étant la plus facile, elle est composée d'une accumulation de cristaux. Elles proviennent également du sciage de blocs de cristaux, mais ces blocs sont coulés, leur coût de fabrication est moins important, cependant leur rendement est plus faible : 11% - 14% (18% en laboratoire). Elle est identifiée par leur forme carrée.[1]

3-La cellule amorphe

Cette catégorie a un faible rendement (8% - 10% ; 13% en laboratoire), mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium déposé sur un support généralement flexible. Elle est utilisée couramment dans de petits produits de consommation tel que des calculatrices solaires ou encore des montres.[1]

I.2.4 L'effet photovoltaïque

La lumière solaire est composée de photons porteurs d'énergie correspondant à différentes longueurs d'onde dans le spectre solaire. Lorsqu'un photon heurte une cellule photovoltaïque, son énergie peut être transférée à un électron dans les matériaux semi-conducteurs de la cellule. Grâce à cette énergie supplémentaire, l'électron peut alors s'échapper de sa position normale dans l'atome, créant ainsi un "trou" qui devient une partie du courant électrique dans un circuit électrique. C'est ce qu'on appelle la paire électron-trou.

La cellule photovoltaïque forme une diode, composée de deux couches de matériaux semi-conducteurs dopés (avec du bore et du phosphore par exemple), de manière à ce que l'une

Chapitre 1 : Etude du système photovoltaïque

transporte les charges négatives et l'autre les charges positives. Cette configuration crée un champ électrique permanent à l'intérieur de la cellule.

Grâce à cet effet diode et lorsque la paire électron-trou est créée, les charges négatives sont séparées des charges positives. Cela crée ainsi une différence de potentiel entre les couches N et P de la cellule, appelée la jonction PN. Un courant électrique circule si une résistance (comme une ampoule par exemple) est placée entre ces connexions.

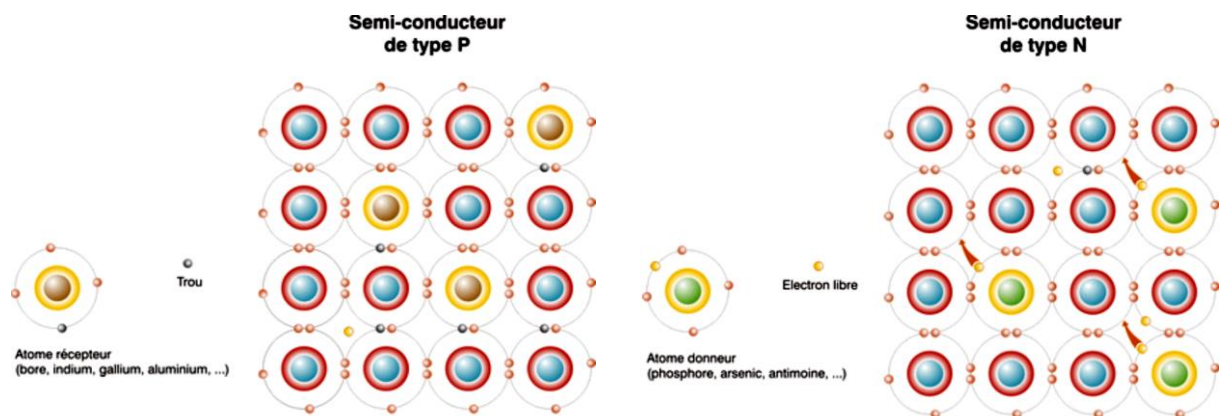


Figure I. 3 Semi-conducteur (Silicium) de type P et type N

I.3 Modélisation de cellule photovoltaïque

I.3.1 Circuits équivalents

Avant d'obtenir le modèle électrique actuel qui décrit la cellule solaire, les physiciens ont proposé des modèles pouvant décrire les phénomènes impliqués dans la cellule solaire.

L'un de ces modèles est le modèle de la cellule solaire simple, qui est le modèle le plus basique décrivant le processus de conversion de la lumière en courant électrique dans la cellule solaire. Ce modèle suppose l'existence d'une source de lumière indépendante et d'une seule résistance interne dans la cellule. Cependant, ce modèle ne prend pas en compte de nombreux facteurs importants qui influencent les performances réelles de la cellule solaire, tels que les réactions physiques et chimiques, ainsi que les effets non idéaux dans les structures électroniques de la cellule.

Au fil du temps, des modèles plus complexes de la cellule solaire ont été développés, prenant en compte des facteurs plus complexes tels que les réactions lumineuses, les effets de surface, l'élévation de température, les effets électrochimiques et les effets quantiques. Ces

Chapitre 1 : Etude du système photovoltaïque

modèles reposent sur un ensemble d'équations physiques et chimiques complexes pour décrire les différents processus qui se produisent dans la cellule solaire.

Ces modèles ont apporté les développements nécessaires pour comprendre et améliorer les performances des cellules solaires et pour les concevoir de manière plus efficace. Depuis lors, la recherche dans le domaine des cellules solaires a continué et des modèles plus complexes et précis ont été développés pour décrire les processus interdépendants dans cette technologie importante.

I.3.2 Circuit équivalent (Modèle idéal - Prototype)

Le modèle susmentionné (la source d'Alimentation est utilisé en parallèle Avec une chaîne et une chaîne de résistance) pour repérés la réaction de la cellule photovoltaïque pour qu'a diode est utilisée dans le modèle pour permettre le flux de courant dans un seul sens et protéger la cellule contre les courants inverses. Lorsque le courant généré par la cellule est inférieur au courant consommé, la diode agit comme un chemin de dérivation pour évacuer le courant excédentaire, La résistance série (R_s) est ajoutée au modèle pour représenter les pertes de puissance dues à la résistance interne de la cellule et aux résistances au niveau des contacts entre la cellule et les connexions externes. R_s est une résistance qui modélise ces pertes ohmiques. Le circuit équivalent est représenté par la figure I.4 :

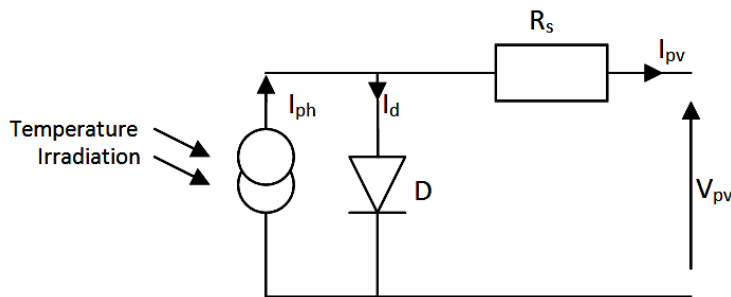


Figure I. 4 Modèle idéal d'une cellule photovoltaïque

Ce modèle électrique modélise la cellule par un générateur de courant idéal, selon la loi des nœuds, le courant résultant (I) est donné par :

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

Avec :

$$I_d = I_s \cdot \left[e^{\frac{q \cdot (V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s)}{n \cdot N_s \cdot K \cdot T}} - 1 \right] \quad (I.2)$$

Chapitre 1 : Etude du système photovoltaïque

I_{pv}	: Courant engendré par la cellule
I_{ph}	: Photo-courant
I_d	: Courant qui passé dans la diode
I_s	: Courant de saturation de diode
V_{pv}	: Tension aux bornes de la cellule
K	: Constant de Boltzmann ($K = ,38.10^{-23}J/K$)
q	: La charge de l'électron ($q = 1,602.10^{-19}C$)
T	: La température de la cellule en kelvin
n	: Facteur de non idéalité de la jonction

I.3.3 Circuit équivalent (Modèle réel)

Le modèle idéal ne reflète pas avec précision le comportement réel de la cellule. Le modèle réel prend en considération les phénomènes dissipatifs au niveau de la cellule et les pertes ohmiques du matériau. Le circuit équivalent est représenté par la figure 1.5

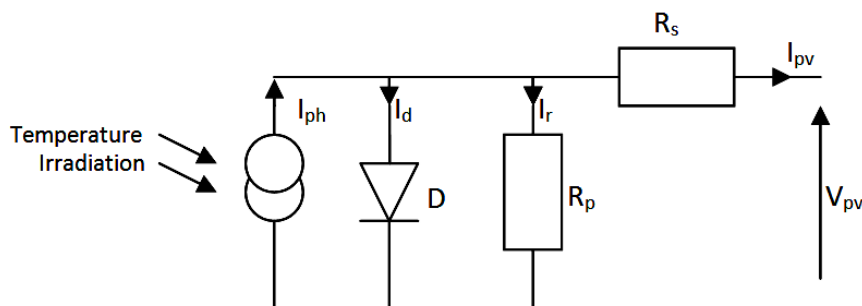


Figure I. 5 Modèle réel d'une cellule photovoltaïque

Le courant généré par ce modèle est donné par :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (I.3)$$

La relation " I_{ph} ", Photo-courant présenter comme suit :

$$I_{ph} = [I_{cc} + (k_i * (T - 298)) * (\frac{G}{1000})] \quad (I.4)$$

La relation " I_d ", Le courant passant dans la diode présenter comme suit :

Chapitre 1 : Etude du système photovoltaïque

$$I_d = I_s \cdot \left[e^{\frac{q \cdot (V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s)}{n \cdot N_s \cdot K \cdot T}} - 1 \right] \quad (I.5)$$

La relation " I_s ", Courant de saturation de diode présenter comme suit :

$$I_s = [I_{rs} * \left(\frac{T}{T_n}\right)^3 * \exp\left(\frac{q \cdot E_g}{n \cdot K} * \left(\frac{1}{T_n}\right) - \left(\frac{1}{T}\right)\right)] \quad (I.6)$$

Et la relation " I_{rs} ", présenter comme suit :

$$I_{rs} = \frac{\frac{I_{cc}}{V_{co}}}{\exp(N_s \cdot T \cdot K \cdot n) - 1} \quad (I.7)$$

Le courant qui passe dans la résistance shunt est donné par :

$$I_{sh} = \frac{V_{pv} + (R_s \cdot I_{pv})}{R_{sh}} \quad (I.8)$$

L'expression finale, qui décrit la caractéristique I-V et P-V de la cellule, est donnée comme suit :

$$I_{pv} = \left[I_{cc} + (k_i * (T - 298)) * \left(\frac{G}{1000}\right) \right] - \left(I_s \cdot \left[e^{\frac{q \cdot (V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s)}{n \cdot N_s \cdot K \cdot T}} - 1 \right] \right) - \left(\frac{V_{pv} + (R_s \cdot I_{pv})}{R_{sh}} \right) \quad (I.9)$$

- I_{pv} : Courant engendré par la cellule
- I_{ph} : Photo-courant
- I_d : Courant qui passé dans la diode
- I_s : Courant de saturation de diode
- V_{pv} : Tension aux bornes de la cellule
- K : Constant de Boltzmann ($K = 1,38.10^{-23}J/K$)
- q : La charge de l'électron ($q = 1,602.10^{-19}C$)
- T : La température de la cellule en kelvin
- n : Facteur de non idéalité de la jonction
- R_{sh} : Résistance de shunt

Chapitre 1 : Etude du système photovoltaïque

R_s	: Résistance série
I_{cc}	: Courant de court-circuit
k_i	: Coefficient de la température du courant de court-circuit
E_g	: Energie de la bande de gap
V_{co}	: Tension du circuit ouvert
T_n	: Température de référence de la cellule
G	: Irradiation de soleil

I.4 Caractéristiques de la cellule solaire PV

Les caractéristiques non linéaires courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V) de la cellule solaire qui présentent comment la cellule photovoltaïque réagit à toutes les charges possibles sous des conditions particulières d'ensoleillement et de la température.[14]

La caractéristique courant-tension d'un module est aisée à obtenir : il suffit de multiplier la tension d'une cellule par le nombre N_s de cellules en série, et le courant par le nombre N_p de cellules en parallèle.

Les paramètres fondamentaux liés à la cellule solaire sont :

- La tension en circuit ouvert (V_{oc}).
- Le courant de court-circuit (I_{cc}).
- Le facteur de forme (FF).
- Le rendement de la cellule solaire (η).
- Le point de la puissance maximale (PPM).

I.4.1 Tension en circuit ouvert (V_{oc}) :

C'est la tension aux bornes de la cellule lorsqu'elle n'est pas connectée à une charge ou lorsqu'elle est connectée à une charge de résistance infinie. Sa valeur diminue avec la température et change peu avec l'irradiation. Elle est obtenue quand le courant de la cellule est nul. V à $(I=0) = V_{oc}$. [14]

$$V_{oc} = \frac{K.T}{q} \cdot \ln\left(\frac{I_{cc}}{I_s} + 1\right) \quad (I.10)$$

I.4.2 Courant de court-circuit (I_{cc})

C'est le courant fourni par la cellule solaire à un circuit d'impédance faible ou nul (fil métallique par exemple). C'est le plus grand courant que la cellule peut fournir. Celui-ci est en fonction de la surface éclairée, du spectre de rayonnement solaire et de la température. Ce

Chapitre 1 : Etude du système photovoltaïque

courant augmente linéairement avec l'intensité lumineuse de la cellule et il est obtenu quand la tension est nulle.

$$I (\text{à } V=0) = I_{cc}. [14]$$

$$I_{cc} = \frac{R_p}{R_s + R_p} \left[I_s \left[e^{\left(-\frac{qI_{pv} + R_s}{nKT} \right)} - 1 \right] I_{ph} \right] \quad (I.11)$$

I.4.3 Facteur de forme (FF)

On appelle facteur de forme FF le rapport entre la valeur maximale de la puissance pouvant être extraite ($V_m \cdot I_m$) de la photopile sous les conditions de mesures standardisées, et le produit ($V_{oc} \cdot I_{cc}$). [14]

Il est défini par la relation :

$$FF = \frac{P_m}{V_{oc} * I_{cc}} \quad \text{Avec} \quad P_m = V_m * I_m$$

donc :

$$FF = \frac{V_m * I_m}{V_{oc} * I_{cc}} \quad (I.13)$$

V_m , I_m : sont la tension et le courant correspondant au maximum de la puissance. Il représente donc l'écart entre la cellule réelle et une cellule pour laquelle $R_s = 0$ et $R_p = \infty$ (cellule idéale). Le facteur de forme diminue quand la température de la cellule augmente. Les Facteurs de forme typiques vont de 0,5 à 0,82. [14]

I.4.4 Rendement de la cellule (η)

Le rendement des cellules PV, désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport de la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente P_{in} . [14]

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} \quad (I.14)$$

Chapitre 1 : Etude du système photovoltaïque

Et à partir de l'équation (I.13) on à : $P_m = V_m * I_m = FF * V_{oc} * I_{cc}$

Alors :

$$\eta = \frac{FF * V_{oc} * I_{cc}}{P_{in}} \quad (I.15)$$

P_{in} : Puissance incidente [W] et elle est pris comme étant le produit de l'irradiation solaire de la lumière incidente mesurée en W/m^2 , avec la zone de surface (A_c) de la cellule solaire en m^2

$$P_{in} = G * A_c.$$

I.4.5 Point de puissance maximale

Un générateur photovoltaïque présente un point de puissance maximale, c'est à dire un couple courant-tension (I-V) dont la puissance associée $P = U.I$ est maximale. Ce couple (I-V) définit un point de fonctionnement appelé point de puissance maximale, noté (MPP) (abréviation anglaise de Maximum Power Point). Il est noté que le point de fonctionnement d'un générateur dépend de la température de l'éclairement et de la charge à ses bornes.

I.5 Simulation de cellule photovoltaïque

I.5.1 Caractéristiques le panneau solaire

Nous avons sélectionné le panneau solaire **LC120-12P** pour notre modélisation. Ce panneau est composé de 54 cellules monocristallines connectées en série, avec une puissance maximale de 200 W. Les conditions standard (STC : Standard Test Conditions) utilisées pour cette modélisation sont les suivantes : une irradiance solaire de $1000 W/m^2$ et une température de cellule de $25^\circ C$. Nous avons utilisé **MATLAB 2023a** comme outil de test et de simulation pour réaliser cette modélisation.

K	: Constant de Boltzmann	$1,38.10^{-23} J/K$
q	: La charge de l'électron	$1,602.10^{-19} C$
n	: Facteur de non idéalité de la diode (Junction PN)	0.78
R_{sh}	: Résistance de shunt	57.74Ω
R_s	: Résistance série	0.291Ω

Chapitre 1 : Etude du système photovoltaïque

k_t	: Coefficient de la température du courant de court-circuit	0.09
E_g	: Energie de la bande de gap	1.1
T_n	: Température de référence de la cellule	298 K ; 25 C°
G	: Irradiation de référence de soleil	1000 W/m ²
T	: La température de la cellule en kelvin	T
G	: Irradiation de soleil	G
P_n	: Puissance nominale	120 W
V_{pm}	: Tension à puissance maximale	17.1 V
I_{pm}	: Courant à puissance maximale	7 A
V_{co}	: Tension du circuit ouvert	21.8 V
I_{cc}	: Courant de court-circuit	7.7 A
N_s	: Nombre des cellules en série	36
N_p	: Nombre des cellules en parallèles	1

Tableau I. 1 Caractéristiques électriques du module photovoltaïque **LC120-12P**.

I.5.2 Résultats de caractéristiques de panneau solaire :

Pour analyser le fonctionnement du panneau solaire sélectionné, nous avons effectué une série de simulations basées sur les équations de modélisation précédentes. Nous avons cherché à déterminer les caractéristiques I-V (courant-tension) et P-V (puissance-tension) du générateur photovoltaïque. Les résultats obtenus sont présentés dans les chiffres suivants :

Chapitre 1 : Etude du système photovoltaïque

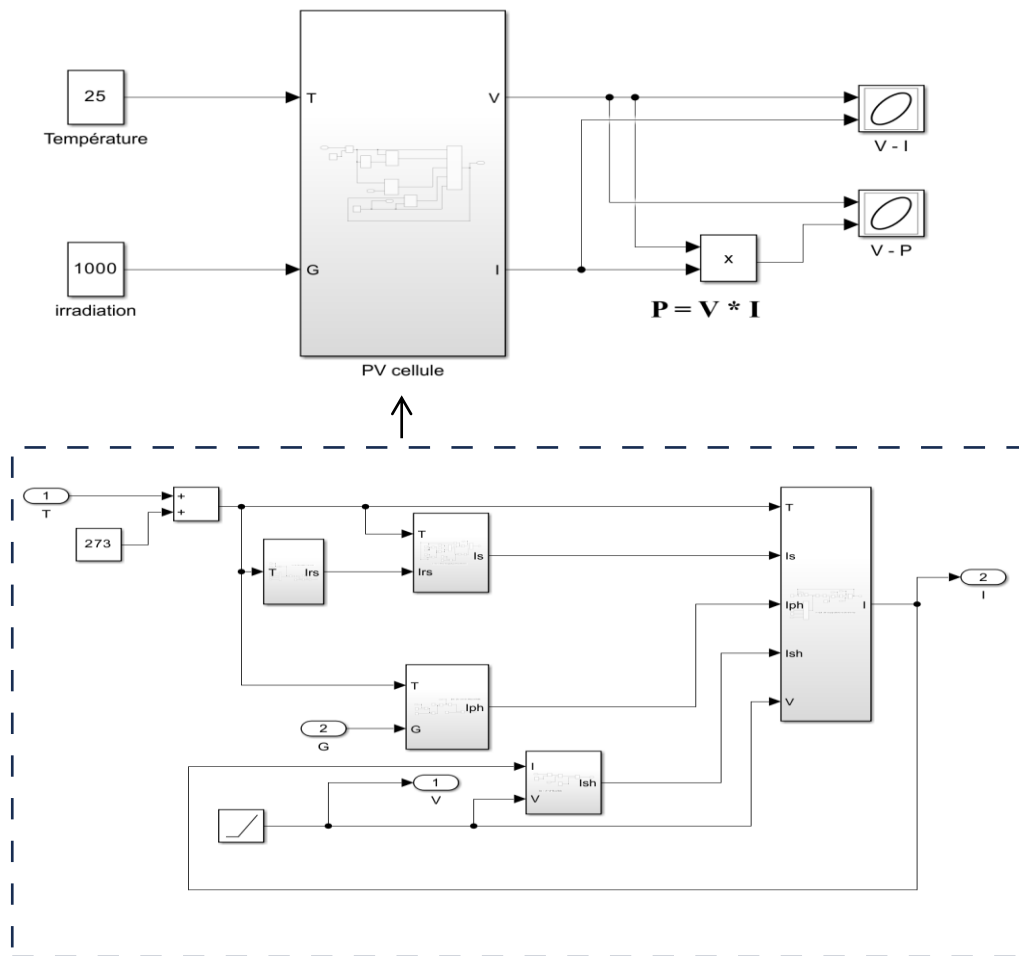


Figure I. 6 Schéma de simulation de la cellule photovoltaïque

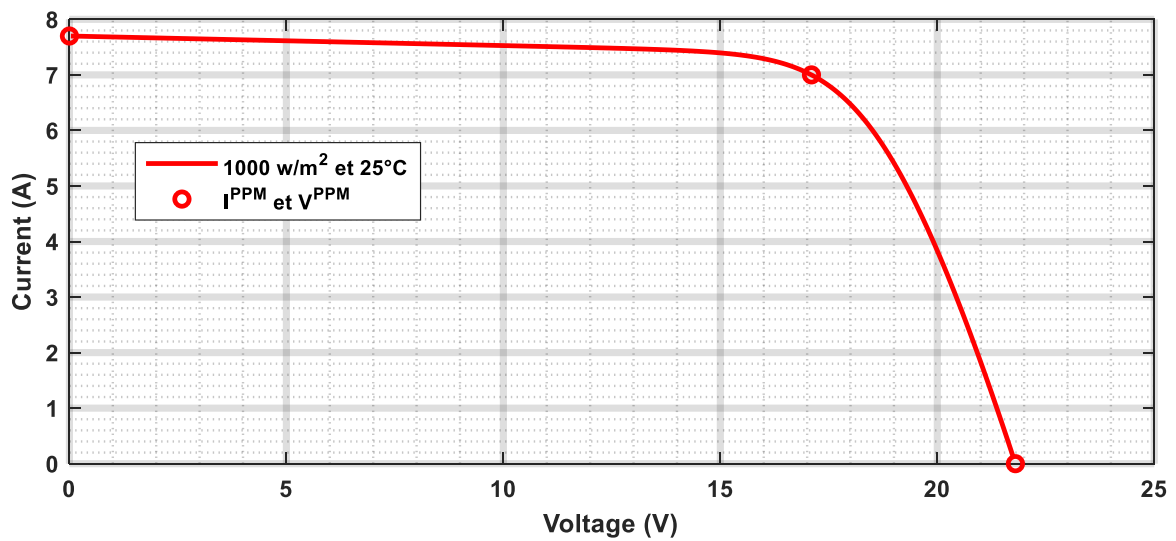


Figure I. 7 Courbe de la caractéristique I-V de la cellule photovoltaïque dans les conditions standards

Chapitre 1 : Etude du système photovoltaïque

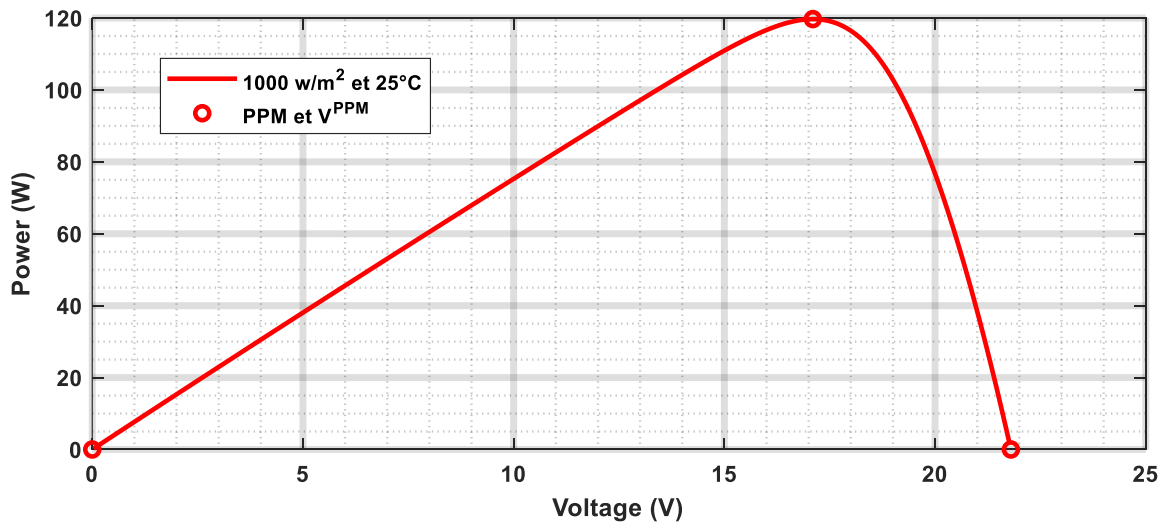


Figure I. 8 Courbe de la caractéristique P-V de la cellule photovoltaïque dans les conditions Standards $G = 1000\text{w}/\text{m}^2/$ et $T = 25^\circ\text{C}$.

I.5.3 Analyse les résultats

La figure (I.7) présente l'évolution du courant générée du module en fonction de la tension à température et éclairement fixe. On note que le courant reste constant jusqu'à $V=25\text{V}$ puis il diminue rapidement jusqu'à son annulation.[2]

La figure (I.8) présente l'évolution de la puissance générée du module en fonction de la tension à température et éclairement fixe. On remarque que la puissance augmente linéairement jusqu'à la valeur maximal (200W) puis diminue rapidement.[2]

I.6 Influence d'irradiation et de la température sur caractéristique (I-V) et (P-V) des cellules PV

I.6.1 Description des expériences

Afin de montrer l'influence de changement des conditions météorologiques sur le fonctionnement du GPV, on a fixé la température à 25°C , et varié l'éclairement entre 200 et $1000\text{ w}/\text{m}^2$, dans un premier temps. Dans un second temps, l'éclairement est fixé à $1000\text{ w}/\text{m}^2$, et la température est variée entre 25 et 100°C .

La figure I.9 et I.10 montre les courbes (I-V) et (P-V) :

Chapitre 1 : Etude du système photovoltaïque

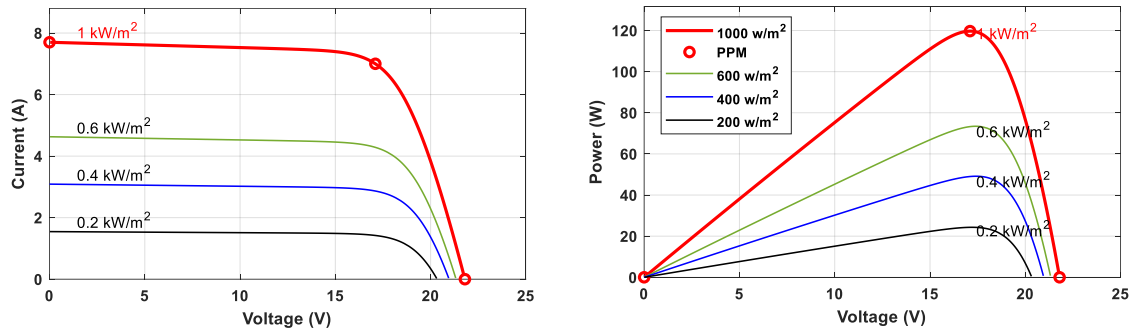


Figure I. 9 Caractéristiques (I-V) et (P-V) sous l'influence de d'irradiation

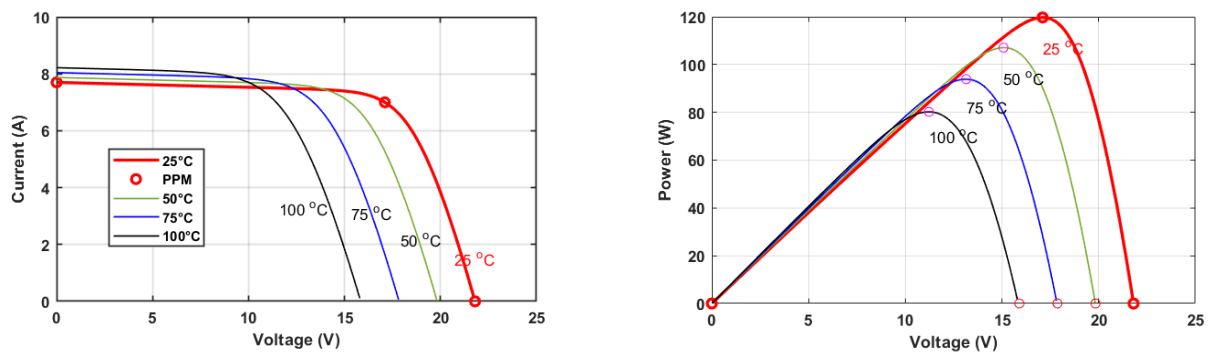


Figure I. 10 Caractéristiques (I-V) et (P-V) sous l'influence de la température

I.6.2 Discussion

En effet la température est un facteur important dans le comportement des panneaux photovoltaïques à cause de leurs expositions au soleil, celle-ci peut avoir des degrés élevés surtout à midi, par conséquent cette augmentation va légèrement augmenter le courant de court-circuit et va diminuer significativement la tension en circuit ouvert comme on peut le voir sur la figure I.10 et donc on en déduit que la température n'influence pas sur le courant mais plutôt sur la tension (la tension diminue quand la température augmente) ce qui impose la diminution de la puissance extractible.

D'après la figure I.9 on constate que la variation de l'ensoleillement influence beaucoup sur le courant de court-circuit mais la tension de circuit ouvert reste presque constante. On peut dire alors que le courant de court-circuit est directement proportionnel à l'intensité du rayonnement, tandis que la tension du circuit ouvert change légèrement avec l'ensoleillement et donc :

- La puissance maximale du module PV est pratiquement proportionnelle à l'ensoleillement et inversement à la température.
- Les points de puissance maximale se situent à peu près à la même tension.

Chapitre 1 : Etude du système photovoltaïque

I.7 Associations des cellules PV

I.7.1 Association en série

Une association de N_s cellules en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque (GPV). Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule, Figure I.11. L'équation (I.10) résume les caractéristiques électriques d'une association série de n_s cellules.[3]

$$[I_{CC} = I_{CC_{N_s}}] \quad \text{avec} \quad [V_{CO_{N_s}} = N_s * V_{CO}] \quad (I.16)$$

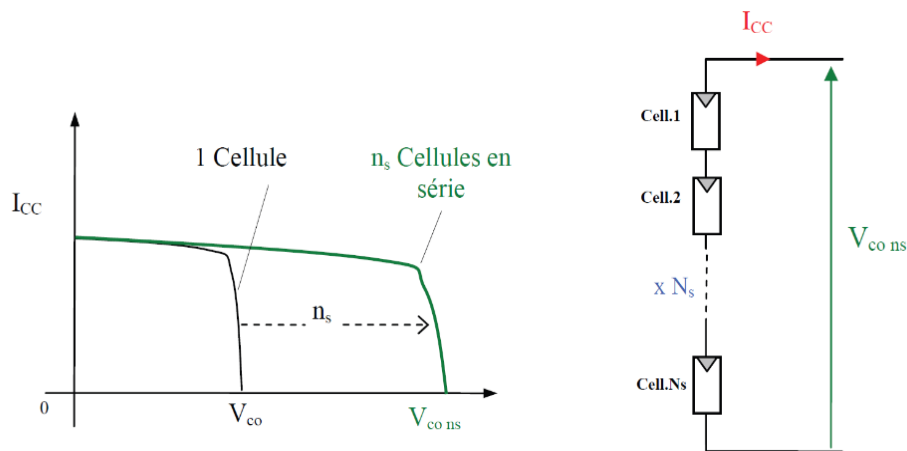


Figure I. 11 Caractéristiques résultantes d'un groupement de N_s cellules en série

I.7.2 Association en parallèle :

D'autre part, une association parallèle de N_p cellules est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultant du groupement est obtenue par addition des courants, Figure I.12. L'équation (I.11) résume à son tour les caractéristiques électriques d'une association parallèle de N_p cellules. [3]

$$[I_{CC} = N_p * I_{CC_{N_s}}] \quad \text{avec} \quad [V_{CO_{N_p}} = V_{CO}] \quad (I.17)$$

Chapitre 1 : Etude du système photovoltaïque

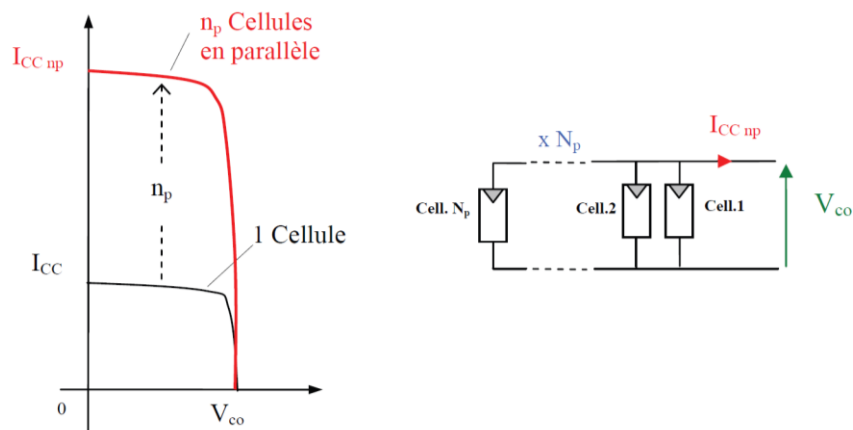


Figure I. 12 Caractéristiques résultant d'un groupement de N_p cellules en parallèle.

I.8 conclusion

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la conversion du soleil en électricité dans des matériaux semi-conducteurs tels que du silicium, qui est disponible par 28% de la croûte (grains de sable) recouverts d'une fine couche métallique. Ces substances sensibles à la lumière ont une caractéristique de l'émission de leur électronique sous l'influence de l'énergie externe, qui est l'effet photo. L'énergie passe à travers des photons (composants légers) qui entrent en collision avec les électrons et les relâchent, provoquant un courant électrique.

En ce qui concerne la simulation des travaux de l'unité d'énergie solaire dans diverses conditions climatiques, nous avons choisi le modèle simple de la cellule, qui représente un grand intérêt en termes de facilité et de simplicité dans l'application en fonction des caractéristiques techniques fournies par l'usine, et nous nous sommes pu conclure que les conditions climatiques, en particulier le rayonnement et la température solaires, affectent clairement l'impact sur les performances de l'unité d'énergie solaire.

Ensuite, nous avons présenté deux types de connexions de cellules et leur rôle dans l'augmentation de la tension et du courant.

Chapitre 2

Chapitre 2: Poursuite du point de puissance maximale

II.1 Introduction

L'électricité produite par les panneaux photovoltaïques dépend en grande partie de l'ensoleillement et, dans une moindre mesure, de la température des cellules. Ces deux variables influencent le comportement du système et présentent des fluctuations journalières et saisonnières. Pour ces raisons, les panneaux photovoltaïques ne peuvent délivrer une puissance maximale qu'à une tension spécifique et un courant déterminé ; ce fonctionnement à puissance maximale dépend de la charge à ses bornes ; A cet effet, et en fonction du type de charge, un dispositif de contrôle doit être intégré dans le circuit de commande du convertisseur. Ce dernier doit être capable de faire fonctionner les panneaux photovoltaïques à puissance maximale. La méthode de suivi appelée MPPT (Maximum Power Point Tracking) repose sur l'utilisation d'un algorithme qui recherche la valeur maximale de la courbe de puissance d'un panneau photovoltaïque. Contrairement au contrôle de tension fixe, le suiveur ne se base pas sur une valeur de référence prédéterminée, mais recherche la valeur de référence pour obtenir une puissance maximale sur la caractéristique courant-tension. Notez que le suiveur joue un rôle très important

car il maximise le rendement et minimise le coût. Dans ce chapitre, nous présentons le convertisseur boost utilisé dans ce travail.

Ensuite, nous avons proposé quelques méthodes MPPT, telles que l'algorithme, la méthode de perturbation et la méthode d'observation.

II.2 Convertisseur DC / DC

II.2.1 Généralité sur l'hacheur

L'hacheur est un convertisseur continu\continu permettant de convertir une énergie à un niveau donné de tension (ou de courant) en une énergie continue à un autre niveau de tension (ou de courant). Son utilisation s'avère nécessaire pour stocker l'énergie photovoltaïque dans des batteries, ou pour alimenter une charge continue. [5]

Ils sont souvent utilisés comme une interface d'adaptation qui assure la poursuite du point de puissance maximale selon des stratégies de contrôle spécifiques. [6]

Les panneaux solaires et la charge peuvent être soit de nature capacitive (source de tension), soit de nature inductive (source de courant). La charge peut être de nature résistive aussi. [6]

Chapitre 2 : Poursuite du point de puissance maximale

II.2.2 Normes de qualité du hacheur

La fonction essentielle d'un convertisseur de puissance est double : d'une part adapter la forme de l'énergie aux besoins d'une charge (typiquement en transformant une tension en une tension continue et/ou en modifiant le niveau de la tension) et d'autre part stabiliser ce flux d'énergie en filtrant autant que possible les fluctuations de la source.

Dans le principe, assurer ces deux fonctions n'est pas excessivement complexe : fabriquer une alimentation élémentaire demande un nombre de composants relativement réduit.

Mais l'utilisateur privé ou professionnel a beaucoup d'autres exigences. Idéalement, un convertisseur doit en effet :

- Délivrer une ou souvent plusieurs tensions parfaitement continues, éventuellement ajustables et stables quel que soit le courant demandé.
- Posséder un rendement élevé.
- Présenter un niveau de sécurité élevé, notamment en répondant aux normes d'isolation entre l'utilisateur et le réseau.
- Posséder une fiabilité élevée relativement à la durée de vie de l'application, en ce compris la résistance aux contraintes de l'environnement (vibrations, température, humidité, etc.).
- Ne pas être une source de perturbations pour le réseau électrique amont ou les équipements environnants ni être trop sensible aux perturbations émanant de ceux-ci (compatibilité électromagnétique).
- Être la plus petite et le plus léger possible.
- Et bien entendu être de préférence peu coûteuse ...

II.2.3 Les types d'hacheur

Nous traitons dans cette partie des convertisseurs unidirectionnels en courant et en tension. Cela implique que la fluence d'énergie ne peut se faire, au sein du convertisseur, que dans un seul sens. Cela revient également à considérer [7] :

- Des sources de tension non réversibles, unidirectionnelles en courant.
- Des sources de courant non réversibles, unidirectionnelles en tension.

Cela conduit à l'étude des convertisseurs DC-DC les plus simples qui puissent être. Dans ce cadre, on distingue trois familles de convertisseurs statiques (ou hacheurs).

- Hacheur abaisseur (ou Buck).
- Hacheur élévateur (ou Boost).

Chapitre 2 : Poursuite du point de puissance maximale

- Hacheur abaisseur-élevateur (Buck-Boost).

II.2.3.a Hacheur abaisseur (ou Buck)

C'est un convertisseur direct DC-DC. La source d'entrée est de type tension continue et la charge de sortie continue de type source de courant. L'interrupteur K figure (II.12) peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage). [10]

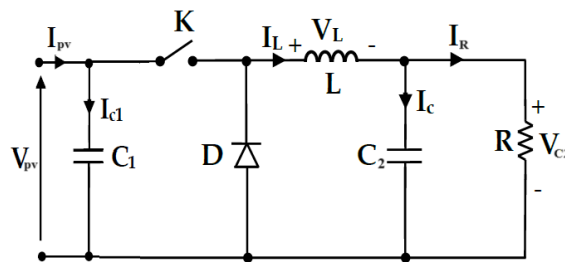


Figure II. 1 Schéma électrique d'un hacheur Buck

Fonctionnement :

Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée αT , la tension V_{pv} appliquée aux bornes de la diode est l'interrupteur est commandé à la fréquence de découpage $f_e = \frac{1}{T}$.

La source V_{pv} fournit de l'énergie à la charge et à l'inductance. Pendant le temps $t \in [\mu T, T]$ l'interrupteur s'ouvre et l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre D . La tension à ses bornes est donc nulle. [11]

Les chronogrammes (tracés dans le cas idéal) de la figure(II.13) sont tracés dans le cas d'une conduction continue, c'est-à-dire que le courant ne repasse jamais par zéro. Pour calculer la relation entre la tension d'entrée et celle de sortie, on exprime que la tension moyenne aux bornes de l'inductance est nulle. [11]

$$V_c = \mu \cdot V_{pv}$$

Chapitre 2 : Poursuite du point de puissance maximale

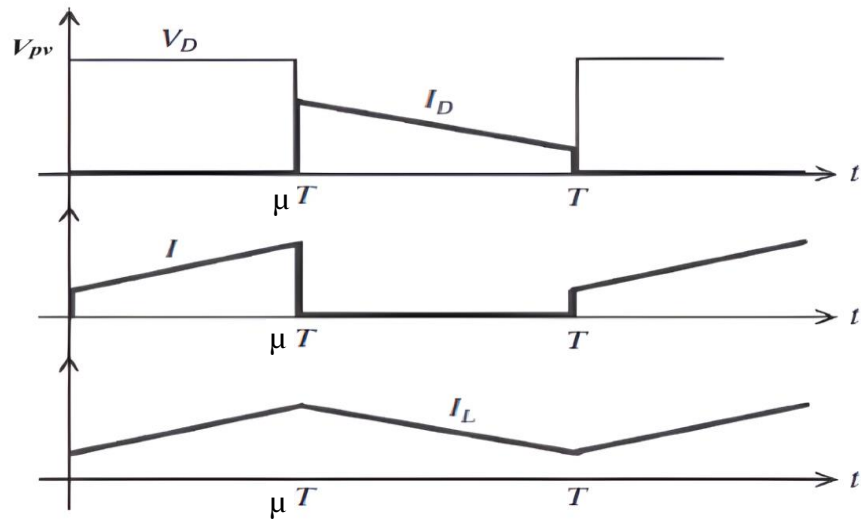


Figure II. 2 Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur buck

II.2.3.b Hacheur élévateur (ou Boost)

C'est un convertisseur direct DC-DC. La source d'entrée est de type courant continu (inductance en série avec une source de tension) et la charge de sortie est de type tension continue (condensateur en parallèle avec la charge résistive). L'interrupteur K figure(II.14) peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage).[10]

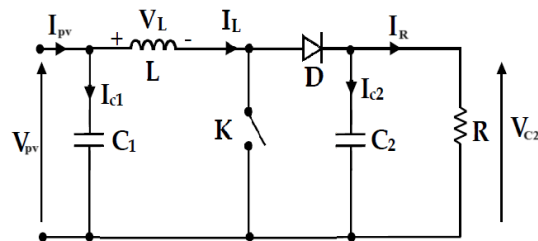


Figure II. 3 Schéma électrique d'un hacheur boost

Fonctionnement

Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée αT , le courant dans l'inductance croît linéairement. La tension aux bornes de K est nulle. Pendant le temps $t \in [\mu T, T]$ l'interrupteur s'ouvre et l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre D.

On a alors $V_k = V_c$ en écrivant que la tension aux bornes de l'inductance est nulle, on arrive à :[11]

Chapitre 2 : Poursuite du point de puissance maximale

$$(1 - \mu) \cdot V_c = V_{pv}$$

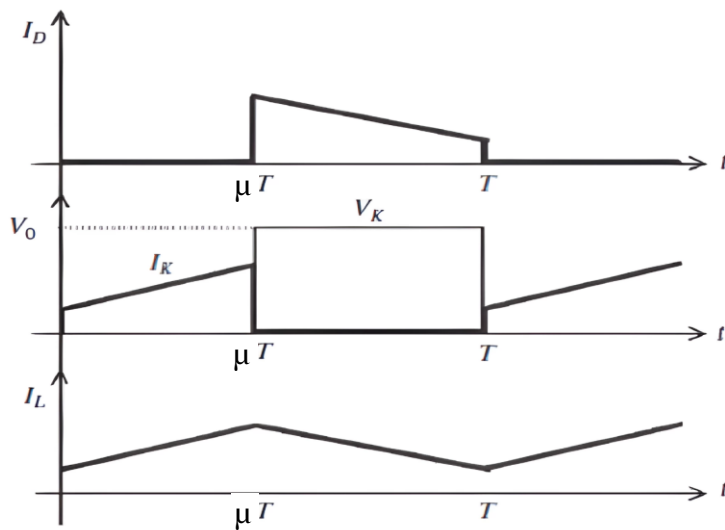


Figure II. 4 Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur Boost

II.2.3.c Hacheur abaisseur-élevateur (Buck-Boost)

Le hacheur buck-boost est un convertisseur indirect DC-DC à stockage inductif. La source d'entrée est de type tension continue (filtrage capacitif en parallèle avec une source de tension) et la charge de sortie continue de type source de tension (condensateur en parallèle avec la charge résistive). L'interrupteur K figure(II.16) peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage). [10]

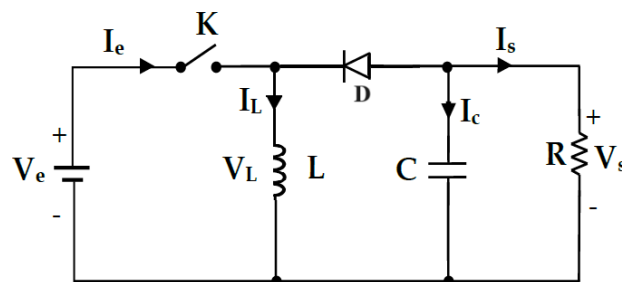


Figure II. 5 Schéma électrique d'un hacheur buck- boost

Fonctionnement

Cette structure de convertisseur permet d'obtenir des tensions négatives à partir de tension positive. Le schéma de principe est présenté figure (II.17) Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée αT , le courant augmente linéairement. La tension est égale à V_{pv} .

À l'ouverture de K, la diode prend le relais et la tension V_L est égale à V_c Par définition la tension moyenne aux bornes de l'inductance est nulle, Il en résulte que [11] :

Chapitre 2 : Poursuite du point de puissance maximale

$$V_{pv} \cdot \mu \cdot T = (1 - \mu)T \cdot V_c$$

Quand le rapport cyclique α 0.5 l'hacheur buck-boost fonction comme un hacheur boost et si le rapport cyclique α 0.5 l'hacheur buck-boost fonction comme un hacheur buck.

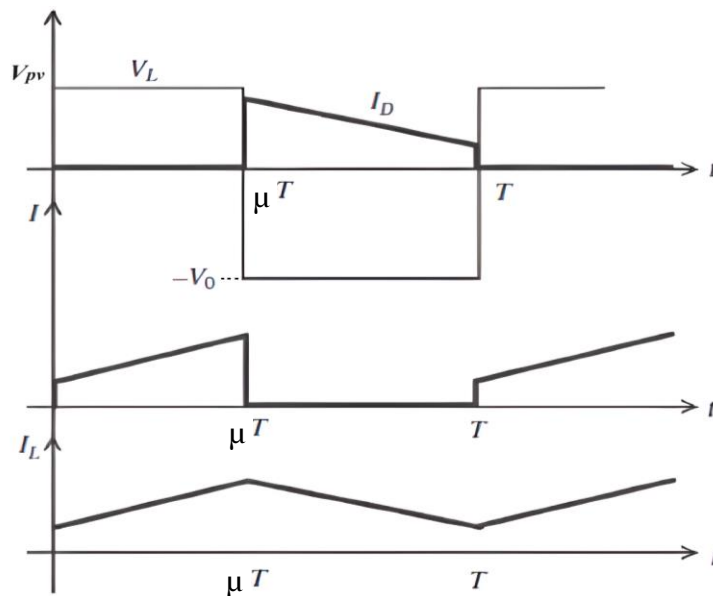


Figure II. 6 Chronogrammes de courant et de tension d'un hacheur buck-boost

II.2.4 Choix du convertisseur DC-DC

Le générateur PV fournit une tension faible que nous devant adapter à la tension nominale de la charge, ce qui sera réalisé par l'hacheur élévateur. Ceci est la condition sur le choix du convertisseur. En plus, il est essentiel que le rendement soit maintenu élevé pour éviter la dissipation de la puissance et pour éviter les échauffements excessifs dans les composants électroniques. Pour cette raison toute la conversion de puissance échangée doit être réalisée autour des composants de stockage d'énergie (inductance et condensateurs) et les commutateurs. Les commutateurs de puissance utilisés dépendent du niveau de la puissance à convertir ou à commander.

Le convertisseur Boost est le plus adapter pour ce type de conversion, car il a une structure simple, et un gain en tension plus élevé que les autres pour un rapport cyclique donné. Pour cette raison nous allons utiliser dans notre système un hacheur élévateur (Boost).

II.2.4.1 Séquences de fonctionnement (Boost)

A. Première séquence $[0 \rightarrow \mu T a]$:

Pendant la durée $0 - \mu T a$, l'interrupteur est fermé, le courant dans l'inductance augmente progressivement et l'énergie va se stocker sous forme magnétique.

Chapitre 2 : Poursuite du point de puissance maximale

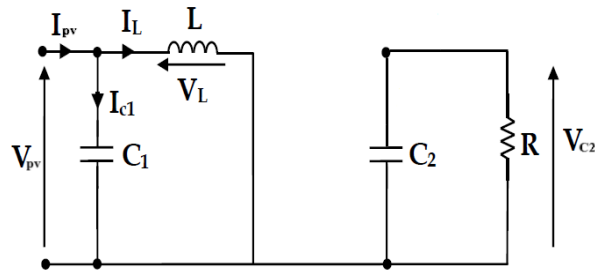


Figure II. 7 Circuit équivalent quand l'interrupteur est fermé

L'application des lois de Kirchhoff donne les équations suivantes :

$$C1 \frac{dV_{pv}}{dt} = I_{pv} - I_L \rightarrow V'_{pv} = \frac{1}{C1} (I_{pv} - I_L) \quad (\text{II.1})$$

$$L \frac{dI_L}{dt} = V_{pv} \rightarrow I'_L = \frac{1}{L} V_{pv}$$

$$C2 \frac{dV_{pv}}{dt} = -\frac{V_{C2}}{R} \rightarrow V'_{C2} = -\frac{1}{R.C2} V_{C2}$$

B. Deuxième séquence [$\mu Td \rightarrow Td$] :

Durant cette séquence, l'interrupteur s'ouvre, l'énergie emmagasinée dans l'inductance est déchargée dans la charge et dans le condensateur et la diode assure la continuité du courant dans l'inductance.

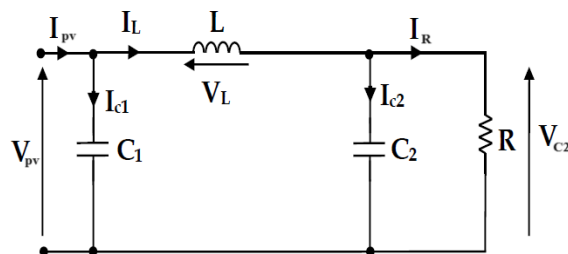


Figure II. 8 Circuit équivalent quand l'interrupteur est ouvert.

Chapitre 2 : Poursuite du point de puissance maximale

L'application des lois de Kirchhoff donne les équations suivantes :

$$C1 \frac{dV_{pv}}{dt} = I_{pv} - I_L \rightarrow V_{pv} = \frac{1}{C1} (I_{pv} - I_L)$$

$$L \frac{dI_L}{dt} = V_{pv} - V_{C2} \rightarrow I'_L = \frac{1}{L} (V_{pv} - V_{C2}) \quad (\text{II.2})$$

$$C2 \frac{dV_{pv}}{dt} = I_L - \frac{V_{pv}}{R} \rightarrow V'_{pv} = \frac{1}{C2} I_L - \frac{1}{RC2} V_{C2}$$

II.2.4.2 Modèle moyen

Le modèle moyen est donné par les équations suivantes :

$$\begin{aligned} \dot{V}_{pv} &= \frac{1}{C1} \cdot I_{pv} - \frac{1}{C1} \cdot I_L \\ \dot{I}_L &= \frac{1}{L} \cdot V_{pv} - \frac{1-\mu}{L} \cdot V_{C2} \\ \dot{V}_{C2} &= \frac{1-\mu}{C2} I_L - \frac{1}{R_L C2} V_{C2} \end{aligned} \quad (\text{II.3})$$

II.2.4.3 Rapport cyclique

Au mode de conduction continue :

$$V_L = L \frac{dI_L}{dt} \quad (\text{II.4})$$

A l'état passante, $V_L = V_{pv}$, l'évolution du courant de l'inductance dans le circuit est donnée par :

$$\Delta I_{Lon} = \int_0^{\mu T} \frac{V_L}{L} dt = \frac{V_{pv} \cdot \mu T}{L} \quad (\text{II.5})$$

A l'état bloqué $L \frac{dI_L}{dt} = V_{pv} - V_{C2}$, l'évolution du courant de l'inductance dans le circuit est donnée par :

$$\Delta I_{Loft} = \int_0^{\mu T} \frac{V_L}{L} dt = \int_{\mu T}^T \frac{(V_{pv} - V_{C2})}{L} dt = \frac{(V_{pv} - V_{C2})(1-\mu)T}{L} \quad (\text{II.6})$$

En régime permanent :

$$\Delta I_{Lon} + \Delta I_{Loft} = 0$$

$$\frac{V_{pv} \cdot \mu T}{L} + \frac{(V_{pv} - V_{C2})(1-\mu)T}{L} = 0 \quad (\text{II.7})$$

Chapitre 2 : Poursuite du point de puissance maximale

$$V_{pv} = (1 - \mu) \cdot V_{C2} \rightarrow V_{C2} = \frac{1}{1-\mu} V_{pv}$$

Avec $0 \leq \mu \leq 1$, la tension de sortie est toujours supérieure ou égale à la tension d'entrée.

II.3 Principe de la recherche du point de puissance maximale

II.3.1 Commande MPPT

Dans les systèmes électriques, y compris les sources d'alimentation et les charges. Il est très important d'utiliser des techniques d'optimisation pour trouver le point de fonctionnement optimal. En termes de photovoltaïque, le point de fonctionnement optimal permet au GPV de fournir une puissance maximale, qui dépend fortement de facteurs tels que la lumière du soleil et la température ambiante. Pour garantir un fonctionnement à puissance maximale en fonction des changements d'ensoleillement et de température, le principe de contrôle MPPT a été introduit. Ces dernières années, plusieurs méthodes ont été développées pour réaliser le contrôle MPPT. Ces méthodes se divisent en deux variantes : les méthodes directes et les méthodes indirectes.

II.3.2 Méthodes indirectes (Méthodes Offline)

Les méthodes indirectes sont basées sur la connaissance de la caractéristique non linéaire du générateur photovoltaïque, qui n'est pas disponible avec précision. Ces méthodes ont besoin aussi de mesurer l'ensoleillement et la température du générateur photovoltaïque, puis consulter la courbe de puissance pour avoir le courant (ou la tension) de fonctionnement optimal(e) correspondant(e). Ensuite, le courant (ou la tension) mesuré(e) du générateur est comparé(e) aux valeurs optimales stockées dans le système de commande selon des conditions atmosphériques mesurées. Après, la commande est effectuée pour atteindre la valeur optimale de la puissance [12].

Parmi ces méthodes, on peut citer :

- La méthode d'ajustement de courbe,
- La méthode « look-up table »,
- La méthode de la tension de circuit ouvert du générateur,
- La méthode de court-circuit

II.3.3 Méthodes directes (méthode Online) :

L'approche directe est un algorithme itératif qui recherche la valeur optimale de V_{pv} afin que le GPV fournisse une puissance maximale. L'avantage de ces algorithmes est qu'aucune connaissance préalable des caractéristiques des panneaux photovoltaïques n'est requise. Il

Chapitre 2 : Poursuite du point de puissance maximale

existe de nombreux algorithmes MPPT dans la littérature, tels que : la méthode de perturbation et d'observation (P&O), la méthode d'incrément d'inductance (Inc-Cond), la méthode d'escalade, etc.

Dans notre travail on se limite à la méthode de perturbation et observation (P&O) qui est très simple à implanter et de bon rendement. Pour une meilleure compréhension de cette commande, nous rappelons brièvement son principe dans le paragraphe suivant

II.3.4 Méthode P&O

La méthode P&O est généralement la plus utilisée en raison de sa simplicité et sa facilité de réalisation. Comme son nom l'indique, cette méthode fonctionne en observant la variation de la puissance à la sortie du panneau photovoltaïque. Sur la figure (II.9) on voit que si la tension de fonctionnement varie dans une direction donnée ce qui implique que la puissance augmente ($\Delta P > 0$), la variation doit alors se déplacer vers le point de fonctionnement (PPM). L'algorithme P&O continuera à observer la variation de la tension dans la même direction.

Par contre, si la puissance diminue ($\Delta P < 0$), alors la variation est éloignée du point de fonctionnement du PPM. L'algorithme inversera alors la direction de la variation suivante.

Cet algorithme est résumé sur la figure (II.9) et l'organigramme descriptif est donné par la figure (II.10). Le processus est répété périodiquement jusqu'à ce que le PPM soit atteint. Le système oscille alors autour du PPM, ce qui provoque des pertes de puissance.

L'oscillation peut être minimisée en diminuant la taille de la variation. Cependant, une taille de variation trop petite ralentit considérablement la poursuite du PPM. Il existe alors un compromis entre précision et rapidité.[13]

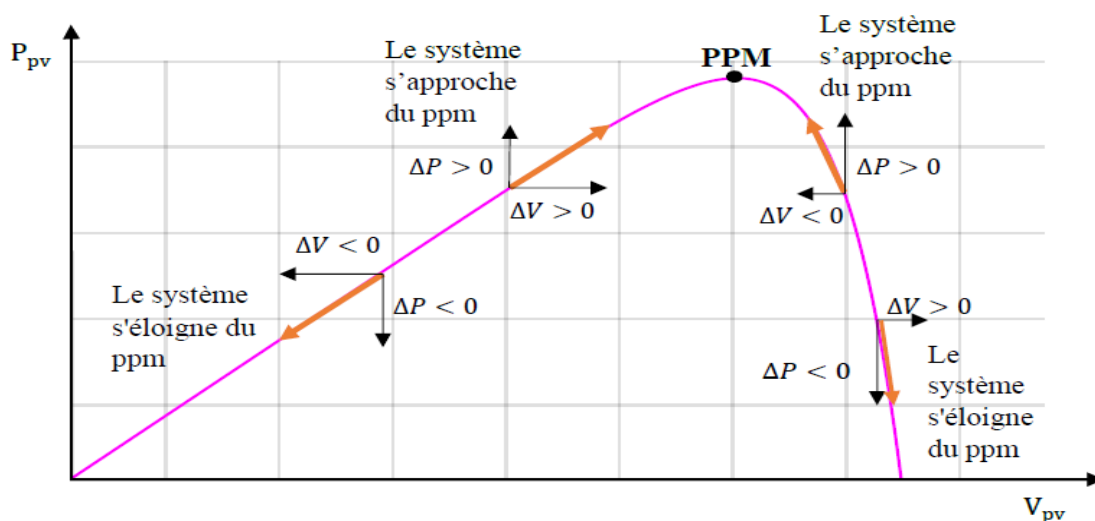


Figure II. 9 Principe de la méthode P&O sur courbe de La caractéristique P-V

Chapitre 2 : Poursuite du point de puissance maximale

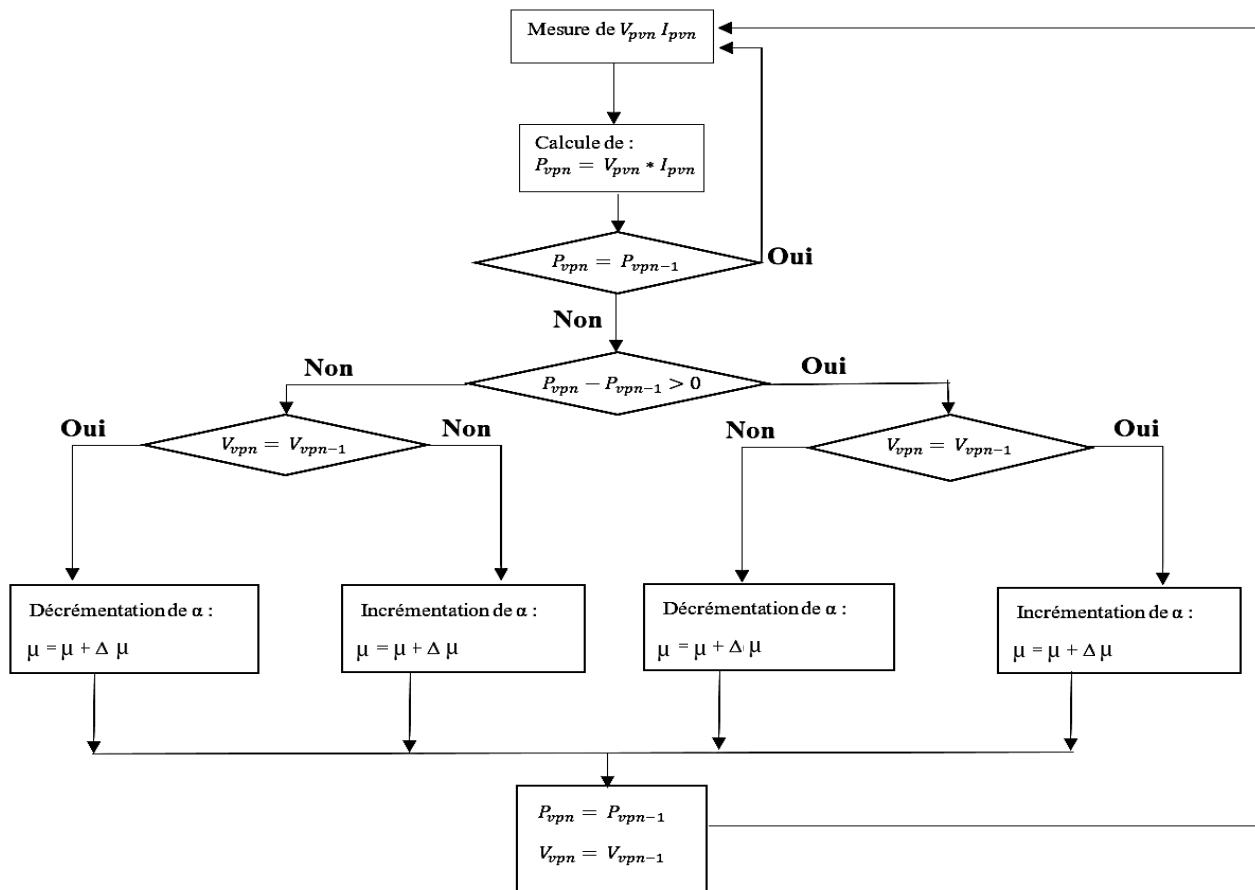


Figure II. 10 Organigramme de la méthode P&O.

II.3.5 Inconvénients de la méthode P&O

L'algorithme P&O présente les deux inconvénients suivants :

❖ Lors de changements brusques d'irradiation, l'algorithme s'éloigne

Temporairement hors PPM et peut-être définitivement hors de contrôle.

❖ Les oscillations autour du PPM représentent une autre lacune de l'algorithme P&O. Minimiser la taille du pas incrémentiel (ΔV) peut être une solution pour réduire ces oscillations. Mais cette solution a ralenti la poursuite du PPM. Il faut donc trouver un compromis entre précision et rapidité.

II.5 Simulations de contrôle de cellules solaires avec l'algorithme P&O

II.5.1 Caractéristiques du convertisseur Boost

Le convertisseur DC/DC est utilisé pour transmettre la puissance du panneau solaire du côté de la charge, garantissant ainsi la puissance maximale transmise. Cet ajustement est réalisé par modulation de la largeur d'impulsion (PWM). Le dispositif de commutation est un

Chapitre 2 : Poursuite du point de puissance maximale

MOSFET ou IGBT. La puissance maximale est atteinte en utilisant un algorithme MPPT qui ajuste le rapport cyclique du convertisseur.

Les valeurs des composants du convertisseur choisis sont données par le tableau II.1

Composant	C1 (μF)	C2(μF)	L(mHz)	R charge (Ω)
Valeur	500	100	10	20

Tableau II. 1 composants du convertisseur DC /DC

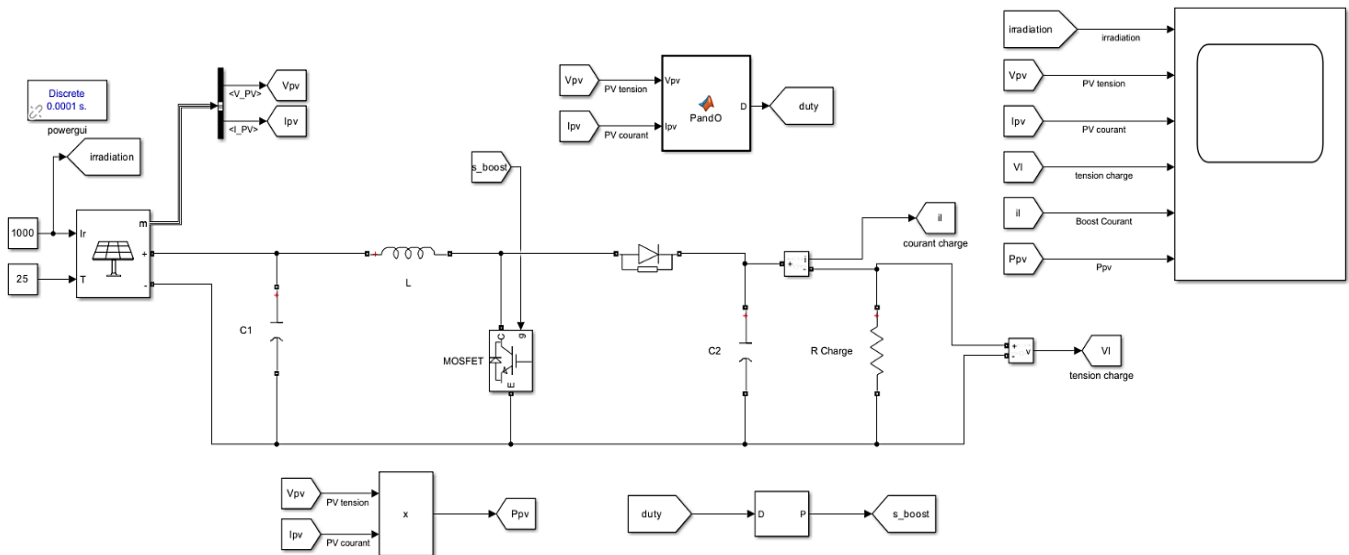


Figure II. 11 Schéma de circuit du convertisseur DC/DC contrôlé par l'algorithme P&O.

II.5.2 Commande PWM :

La commutation MOSFET est contrôlée par la technologie de modulation de largeur d'impulsion. Le signal u généré par la technique de contrôle PWM est obtenu en comparant le rapport cyclique α à un signal triangulaire $S_{fauconr}$ d'amplitude 1 et de période T . L'expression du signal de commande est donnée par l'équation (II.8) :

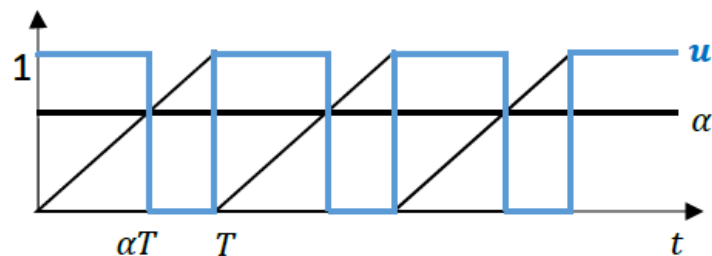


Figure II. 12 Signal généré par la technique PWM.

$$u = \begin{cases} 1 & \text{si } \alpha > Tr \\ 0 & \text{si } \alpha < Tr \end{cases} \quad (\text{II.18})$$

Chapitre 2 : Poursuite du point de puissance maximale

II.5.3 Etude de méthode MPPT pour des conditions de fonctionnement standards du PV

Les simulations du système, par algorithme P&O, ont été réalisées en deux étapes :

- en fonction de la variation de la température (Figure II.13a) l'irradiation fixée à 1000 W/m².
- en fonction de la variation de l'irradiation (Figure II.13b), la température étant égale à 25°C.

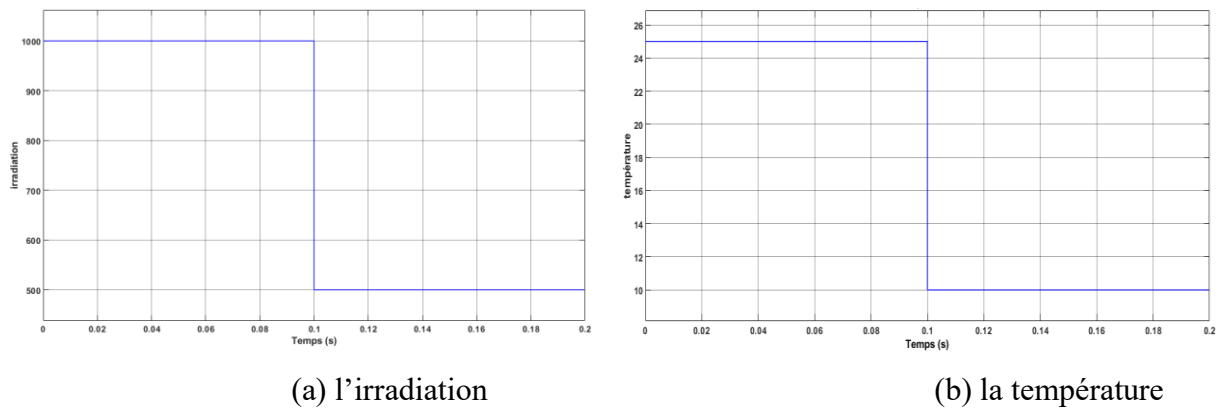


Figure II. 13 Variation de la température et de l'irradiation

Ces deux étapes visent à étudier le comportement de différents contrôles MPPT dans différentes conditions de température et d'irradiation. En pratique, ces deux grandeurs ne changent pas de manière brutale, mais le but de la simulation est de tester la robustesse du contrôle.

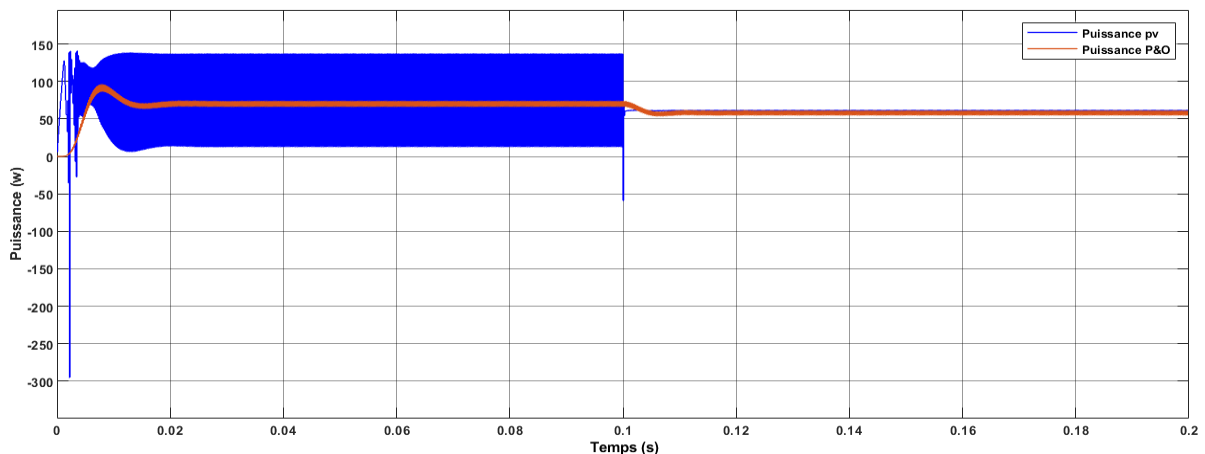


Figure II. 14 La puissance de sortie du convertisseur et la puissance du panneau PV variation de l'irradiance

Chapitre 2 : Poursuite du point de puissance maximale

La figure(II.14) représente la puissance de sortie du convertisseur et la puissance générée par le panneau PV. On note une légère diminution de l'amplitude de la puissance entre la source et la charge et présence d'oscillation due à la source.

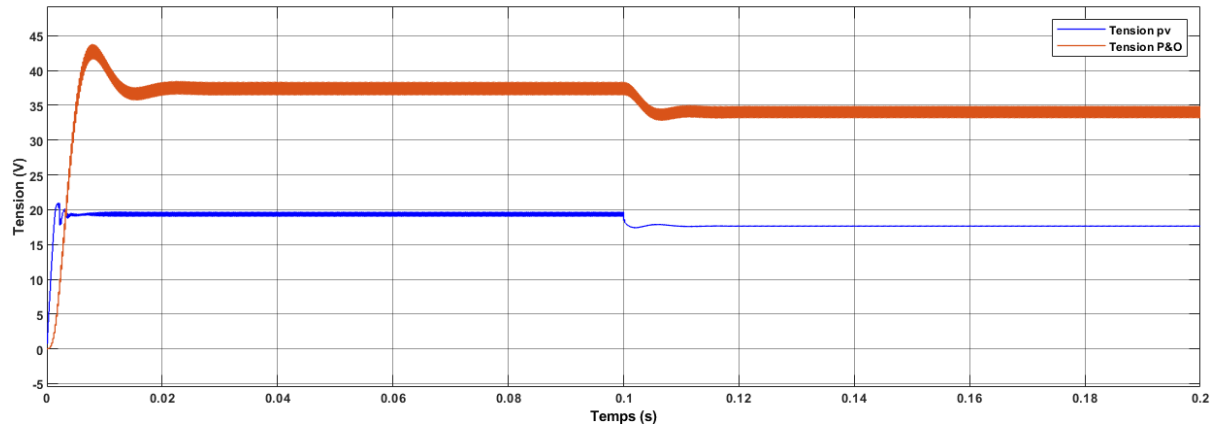


Figure II. 15 Tension de sortie du convertisseur et la tension du panneau PV variation de l'irradiance

La figure (II.15) présente l'évolution de la tension sortie du convertisseur (algorithme P&O) et la tension générée par le panneau PV de la température constante. Nous notons que la valeur de la tension de charge est supérieure à la valeur de la source, avec de légères oscillations, en fonction de la capacité de la charge.

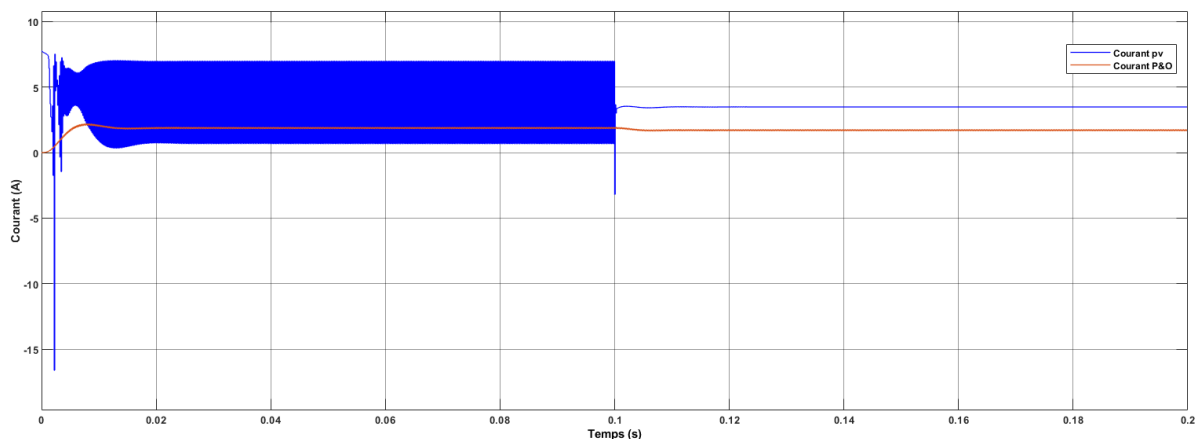


Figure II. 16 Courant de sortie du convertisseur et le courant du panneau PV variation de l'irradiance

La figure (II.16) montre l'évolution du courant de sortie du transformateur (algorithme P&O) et du courant du panneau PV de la température constante. On note la présence

Chapitre 2 : Poursuite du point de puissance maximale

d'oscillations au courant de la source et la stabilité du courant de charge, ce qui indique le filtrage des courants aléatoires (harmonique, ... etc.). Par convertisseur DC/DC.

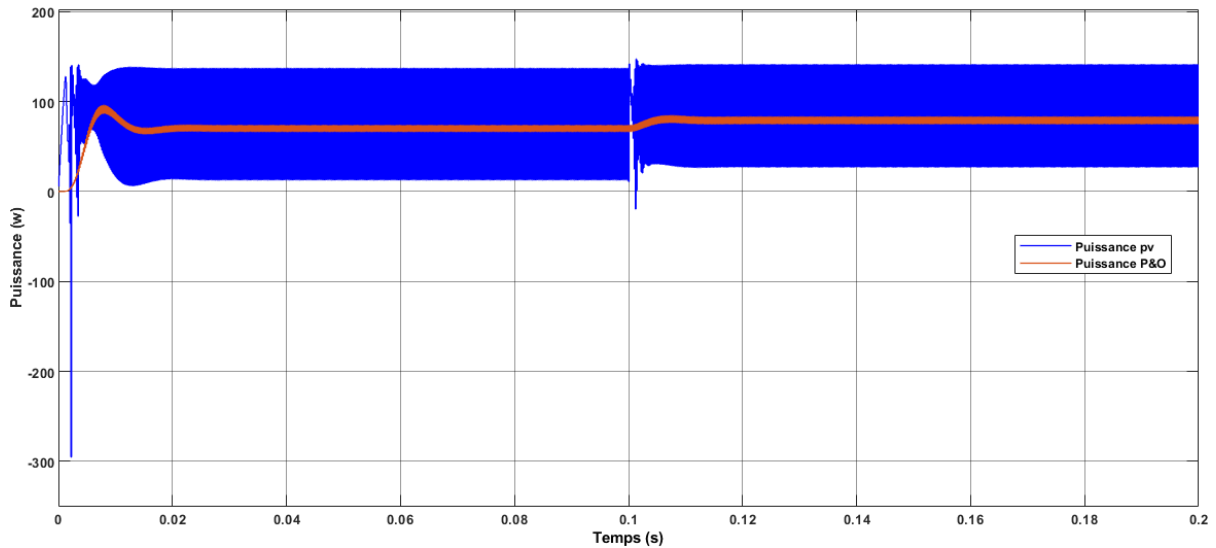
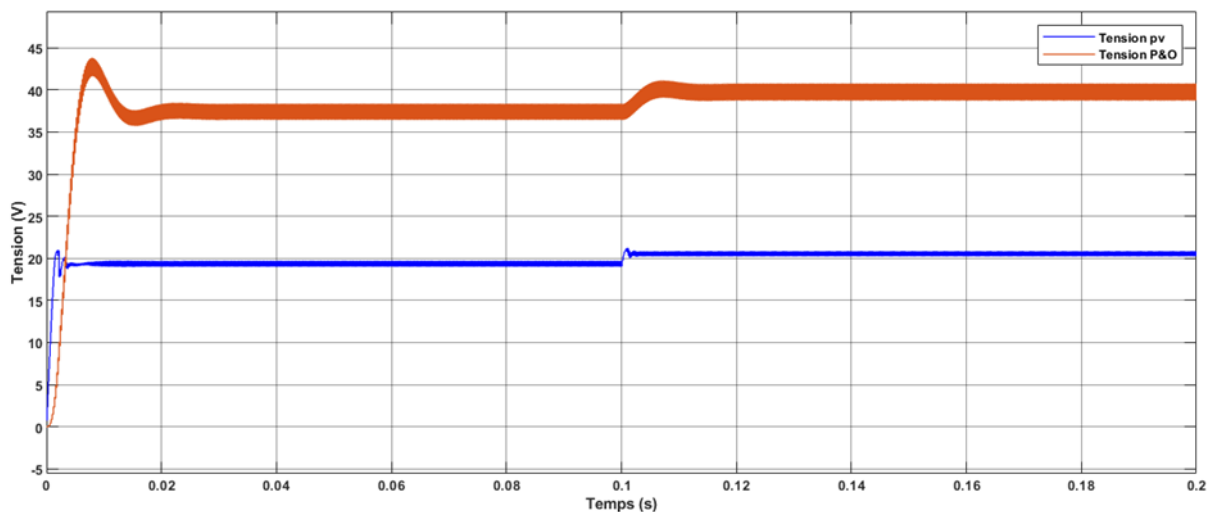


Figure II. 17 La puissance de sortie du convertisseur et la puissance du panneau PV variation de la température

La figure(II.17) représente la puissance de sortie du convertisseur et la puissance générée par le panneau PV pour un éclairement constante .On note la présence de grandes oscillations au puissance de la source et la stabilité de puissance de charge, indiquant le filtrage des courants aléatoires (harmoniques ..etc). Par convertisseur DC/DC.



Chapitre 2 : Poursuite du point de puissance maximale

Figure II. 18 Tension de sortie du convertisseur et la tension du panneau PV variation de la température

La figure (II.18) montre l'évolution du tension de sortie du transformateur (algorithme P&O) et du tension du panneau PV pour un éclairage constante . Nous notons que la valeur de la tension de charge est supérieure à la valeur de la source, avec de légères oscillations, en fonction de la capacité de la charge.

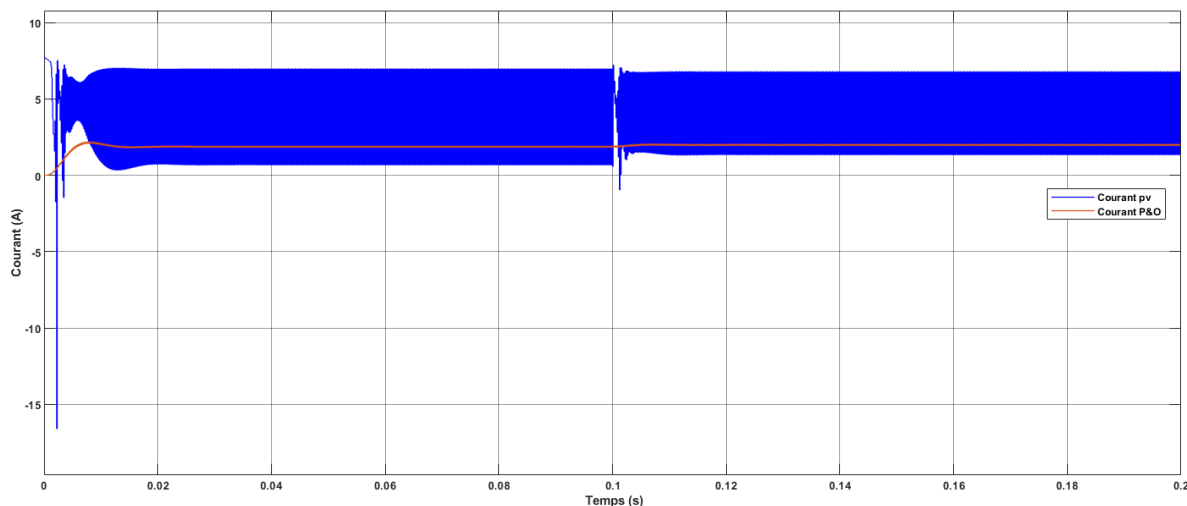


Figure II. 19 Courant de sortie du convertisseur et le courant du panneau PV avec variation de la température

La figure (II.19) montre l'évolution du courant de sortie du transformateur (algorithme P&O) et du courant du panneau PV pour un éclairage constante .On note la présence de grandes oscillations au courant de la source et la stabilité du courant de charge, indiquant le filtrage des courants aléatoires (harmoniques, etc.). Par convertisseur DC/DC.

II.6 Conclusion

La première partie de ce chapitre est consacrée à certains types de convertisseurs DC-DC utilisés dans les systèmes photovoltaïques. Pour adapter l'alimentation photovoltaïque à une charge caractérisée par une tension continue nominale, un hacheur boost (appelé boost) est utilisé.

Dans la deuxième partie de ce chapitre nous avons étudié le contrôle MPPT, ses principes, quelques méthodes de mise en œuvre, en particulier nous avons développé une méthode appelée perturbation et observation (P&O), ce contrôle numérique MPPT utilise directement la tension et le courant du panneau photovoltaïque pour trouver le point de fonctionnement

Chapitre 2 : Poursuite du point de puissance maximale

correspondant à Puissance maximum. Nous appliquons ensuite le contrôle MPPT sélectionné à un système photovoltaïque qui combine panneau photovoltaïque-hacheur-charge pour réguler les changements de température. Les résultats de la simulation montrent un fonctionnement satisfaisant malgré des oscillations plus faibles dans la tension générée, ainsi que dans les niveaux de puissance et de charge.

Chapitre 3

Chapitre 3 : MPPT par contrôleur a base théorème de la valeur moyenne

III.1 Introduction

Ce chapitre est consacré au développement de différentes méthodes de conception d'un contrôleur pour les systèmes non linéaires par une méthode qui repose sur l'utilisation du théorème de la valeur moyenne ainsi que la méthode de transformation par secteurs non linéaires pour trouver le optimal point à puissance maximal .

III.2 Synthèse d'un contrôleur par l'approche MVT

Cette section aborde la conception d'un contrôleur a gain constant pour un Système non linéaire.

III.2.1 Position du problème

Soit le système non linéaire décrit par la forme suivante :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A_0x(t) + f(x(t)) + B_0u(t) + D_vv(t) \\ y(t) = C_0x(t) \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

On considère la commande par le retour d'état classique q définit par :

$$u(t) = -K_0(x(t) - x_c(t)) \quad (\text{III.2})$$

Telle que l'erreur de commande :

$$e_c(t) = x(t) - x_c(t) \quad (\text{III.3})$$

On peut écrire l'équation dynamique de l'erreur de contrôle sous la forme :

$$\dot{e}_c(t) = \dot{x}(t) - \dot{x}_c(t) \quad (\text{III.4})$$

Pour comprendre la méthode, nous commençons par des signaux pas à pas (Nous prenons un cas de régulation, car $x_c(t)$ est un signal pas à pas, donc $\dot{x}_c(t) = 0$, puis de peut s'écrire comme :

$$\dot{e}_c(t) = (A_0 - B_0K_0)e_c(t) + f(x(t)) - f(x_c(t)) \quad (\text{III.5})$$

Ainsi, l'objectif est de déterminer la matrice de gain K_0 telle que le système non linéaire (III.5) devienne asymptotiquement stable.

III.2.2 Approche par secteur non linéaire :

Une approche systématique de découpage en secteurs non linéaires repose sur le lemme suivant:

Lemme 4.1 [Morère 2001]

Soit $f(x(t)):R \rightarrow R$ une fonction bornée, il existe toujours deux fonctions $w_1(x(t))$ et $w_2(x(t))$ ainsi que, deux scalaires α et β tels que :

$$f(x(t)) = \alpha \times w_1(x(t)) + \beta \times w_2(x(t)) \quad (\text{III.6})$$

Avec:

$$w_1(x(t)) + w_2(x(t)) = 1, w_1(x(t)) \geq 0 \text{ et } w_2(x(t)) \geq 0 \quad (\text{III.7})$$

▪ Preuve :

Sous l'hypothèse que la fonction $f(x(t))$ est bornée telle que $\alpha \leq f(x(t)) \leq \beta$, il est possible d'écrire : $f(x(t)) = \alpha \times w_1(x(t)) + \beta \times w_2(x(t))$ (III.8)

Avec:

$$\alpha = \max(f(x(t))), \quad \beta = \min(f(x(t))), \quad w_1(x(t)) = \frac{f(x(t)) - \beta}{\alpha - \beta} \quad \text{et} \quad w_2(x(t)) = \frac{\alpha - f(x(t))}{\alpha - \beta}$$

III.2.4 Théorème de la valeur moyenne MVT

Dans cette section nous présentons l'approche des accroissements finis (Differential Mean Value Theorem "DMVT") pour les fonctions scalaires et vectorielles. Ceci permet Ensuite d'écrire la dynamique non linéaire de l'erreur de commande sous forme d'un système Linéaire à Paramètres Variant (LPV), qui sera utilisé dans la phase suivante.

III.2.4.1 MVT scalaire

Considérons $f(x)$ une fonction continue sur $[a, b]$ et différentiable sur (a, b) . Il existe des nombres $c \in (a, b)$ tels que : [16]

$$f(a) - f(b) = \left. \frac{df}{dx} \right|_{x=c} \times (a - b) \quad (\text{III.9})$$

L'équation (4.8) peut être réécrite sous la forme

$$f(a) - f(b) = \left(\delta_1 \left. \frac{df}{dx} \right|_{x=c_1} + \delta_2 \left. \frac{df}{dx} \right|_{x=c_2} \right) \times (a - b) \quad (\text{III.10})$$

$$\delta_1, \delta_2 > 0, \quad \delta_1 + \delta_2 = 1$$

Ou $c_1, c_2 \in (a, b)$ et δ_1, δ_2 sont des paramètres qui dépendent de la valeur a et b .

III.2.4.2 MVT vectorielle

Considérons $f(x)$ une fonction continue sur $[a, b]$ et différentiable sur l'enveloppe convexe d'un ensemble (a, b) de gradient continu de Lipchitz ∇f . Il existe des nombre $c \in (a, b)$ [21]

Chapitre 3 : MPPT par contrôleur a base théorème de la valeur moyenne

$$f(a) - f(b) = \nabla f(c) \times (a - b) \quad (\text{III.11})$$

Cependant, nous ne pouvons pas utiliser directement le théorème de la valeur moyenne de l'équation (III.10), car il s'agit d'un paramètre variable qui change continuellement avec les valeurs de a et b. Ainsi $\nabla f(c)$ est une matrice inconnue et changeante. Nous devons modifier le théorème de la valeur moyenne avant de pouvoir l'utiliser

$$f(a) - f(b) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \frac{\partial f_n}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} [(a - b)] \quad (\text{III.12})$$

En utilisant les transformations par secteur non linéaire pour chaque non linéarité $\frac{\partial f_i(c)}{\partial x_j}$ peut être représenté par :

$$f \frac{\partial f_i}{\partial x_j}(c) = \delta_{ij}^{max} \frac{\partial f_i}{\partial x_j}(\gamma) + \delta_{ij}^{min} \frac{\partial f_i}{\partial x_j}(\varepsilon) \quad (\text{III.13})$$

$$\delta_{ij}^{max}, \delta_{ij}^{min} > 0, \quad \delta_{ij}^{max} + \delta_{ij}^{min} = 1$$

Les valeurs de $\frac{\partial f_i}{\partial x_j}(\gamma)$ et $\frac{\partial f_i}{\partial x_j}(\varepsilon)$ doivent être choisies comme suit afin de satisfaire

Lemme 1

$$\frac{\partial f_i}{\partial x_j}(\gamma) = h_{ij}^{max} \geq \max\left(\frac{\partial f_i}{\partial x_j}\right), \quad (\text{III.14})$$

$$\text{et } \frac{\partial f_i}{\partial x_j}(\varepsilon) = h_{ij}^{min} \leq \min\left(\frac{\partial f_i}{\partial x_j}\right)$$

Alors l' équation (III.12) on peut écrire comme suit

$$\frac{\partial f_i}{\partial x_j}(c) = \delta_{ij}^{max} h_{ij}^{max} + \delta_{ij}^{min} h_{ij}^{min} \quad (\text{III.15})$$

$$\delta_{ij}^{max}, \delta_{ij}^{min} > 0, \quad \delta_{ij}^{max} + \delta_{ij}^{min} = 1$$

$$\begin{aligned}
 f(a) - f(b) = & \\
 & \begin{bmatrix} \delta_{11}^{max} h_{11}^{max} & \delta_{12}^{max} h_{12}^{max} & \dots & \delta_{1n}^{max} h_{1n}^{max} \\ \delta_{21}^{max} h_{21}^{max} & \delta_{22}^{max} h_{22}^{max} & \dots & \delta_{2n}^{max} h_{2n}^{max} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \delta_{n1}^{max} h_{n1}^{max} & \delta_{n2}^{max} h_{n2}^{max} & \dots & \delta_{nn}^{max} h_{nn}^{max} \end{bmatrix} [(a - b)] + \\
 & \begin{bmatrix} \delta_{11}^{min} h_{11}^{min} & \delta_{12}^{min} h_{12}^{min} & \dots & \delta_{1n}^{min} h_{1n}^{min} \\ \delta_{21}^{min} h_{21}^{min} & \delta_{22}^{min} h_{22}^{min} & \dots & \delta_{2n}^{min} h_{2n}^{min} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \delta_{n1}^{min} h_{n1}^{min} & \delta_{n2}^{min} h_{n2}^{min} & \dots & \delta_{nn}^{min} h_{nn}^{min} \end{bmatrix} [(a - b)]
 \end{aligned} \tag{III.16}$$

Finalement l'équation (III.12) réécrit comme suit :

$$f(a) - f(b) = \left(\sum_{i=1}^{2n \times n} h_i \tilde{A}_i \right) (a - b) \tag{III.17}$$

III.2.5 Contrôleur par l'approche MVT

L'erreur de poursuite est donnée par si l'on néglige la perturbation incluant les principaux signaux de forçage (commande d'entrée)

$$\dot{e}_c = (A_0 - B_0 K_0) e_c + f(x(t)) - f(x_c(t)) \tag{III.18}$$

En introduisant les approches non linéaires MVT et secteur non linéaire sur la partie $f(x(t)) - f(x_c(t))$ la dynamique de l'erreur devient :

$$\dot{e}_c = \sum_{i=1}^{2n \times n} h_i(\xi) (A_0 - B_0 K_0 + n \times n \times \bar{\bar{A}}_i) e_c \tag{III.19}$$

III.2.6 Analyse de stabilité

dans cette sous-section, et afin d'obtenir le gain du contrôleur, la stabilité est étudiée par la fonction quadratique de Lyapunov donnée comme suit : [17]

$$V(e_c(t)) = e_c^T(t) P e_c(t) \tag{III.20}$$

La stabilité est vérifiée lorsque la dérivée de la fonction Lyapunov (III.19) est inférieure à Zéro

$$\dot{V}(e_c(t)) \leq 0 \tag{III.21}$$

L'erreur d'estimation d'état converge asymptotiquement vers zéro s'il existe une matrice $P = P^T > 0$ telle que les LMI suivantes à vérifier

$$A_0 P + P A_0^T + n \times n \times \bar{\bar{A}}_i P + n \times n \times P \bar{\bar{A}}_i^T - B_0 Y - B_0^T Y^T + \alpha P < 0 \tag{III.22}$$

Où α est le coefficient dépend inversement du temps de réponse de l'erreur de suivi Et $i = (1, 2, \dots, 2n)$

Chapitre 3 : MPPT par contrôleur à base théorème de la valeur moyenne

Ensuite, le gain du contrôleur peut être facilement obtenu en résolvant les LMI (III.21), le gain du contrôleur est calculé comme suit :

$$K_0 = YP^{-1} \quad (III.23)$$

III.3 Application de contrôleur MVT sur le système photovoltaïque

III.3.1 Le modèle mathématique du convertisseur Boost

$$\begin{aligned} \dot{V}_{pv} &= \frac{1}{C_1} \cdot I_{pv} - \frac{1}{C_1} \cdot I_L \\ \dot{I}_L &= \frac{1}{L} \cdot V_{pv} - \frac{R_L}{L} \cdot I_L - \frac{1-\mu}{L} \cdot V_{C2} \\ \dot{V}_{C2} &= \frac{1-\mu}{C_2} I_L - \frac{1}{R_L C_2} V_{C2} \end{aligned} \quad (III.24)$$

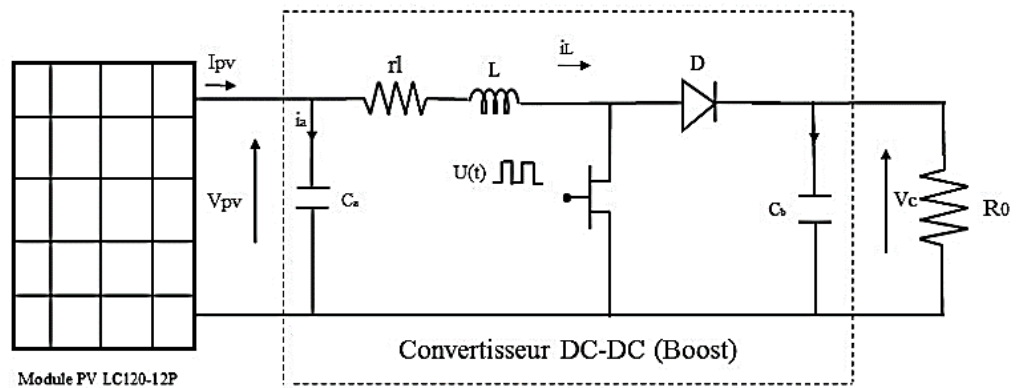


Figure III. 1 Module PV LC120-12P broncher convertisseur Boost

III.3.2 stratégie de contrôle

La stratégie de contrôle que nous proposons et donnée par la figure III.2 ,se compose en trois bloc le modèle de référent . le contrôleur MVT et le système Photovoltaïque convertisseur boost)

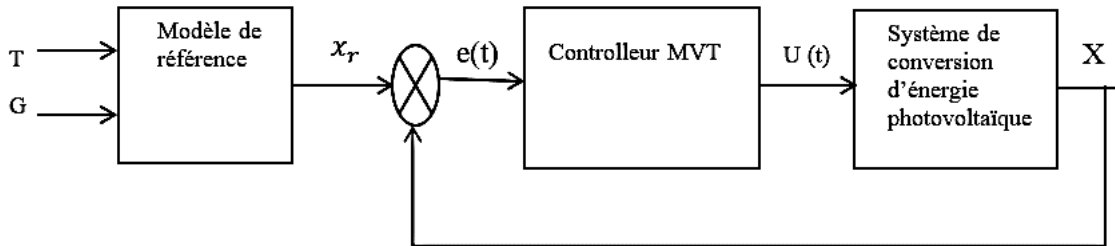


Figure III. 2 Stratégie de control

III.3.2.1 le modèle augmenté du système

Nous transformons le modèle moyenne d'écrit par l'équation (III.24) En un modèle augmenté, une nouvelle variable d'état doit être ajoutée au vecteur d'état c-à- d

Un intégrateur est ajouté avant l'entrée réelle μ ($\dot{\mu} = u$)

Donc on peut réécrit le modèle augmenté sous la forme suivante :

$$X' = A(x) \cdot x(t) + B \cdot U + D_v I_{pv}(t)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{pv} \\ \dot{I}_L \\ \dot{V}_{C2} \\ \dot{\mu} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{C_1} & 0 & 0 \\ \frac{1}{L} & -\frac{R}{L} & -\frac{1-\mu}{L} & \frac{VC_2}{L} \\ 0 & \frac{1-\mu}{C_2} & \frac{1}{R_L} & \frac{I_L}{C_2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot X + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \cdot U + \begin{bmatrix} \frac{1}{C_1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot I_{pv} \quad (III.25)$$

ou $x(t) = [V_{pv} \ I_L \ V_{C2} \ \mu]^T$ est le vecteur d'état , $A(x, t)$ est la matrice d'état et B est la matrice d'entrée ,

III.3.2.2 le modèle de référence

La puissance maximal produite par le panneau , également la correspondante optimale tension $V_{pv \ opt}$ et optimal courant $I_{pv \ opt}$ dépend de la température T et de l'irradiation G .

Le modèle référence écrit par :

$$\dot{x}_r = A_r x_r(t) + E I_{pvopt}(t) \quad (\text{III.26})$$

Le dernier modèle est équivalent à :

$$A_r x_r(t) + r(t)$$

Avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} A_r = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{C_1} & 0 & 0 \\ \frac{1}{L} & \frac{-R}{L} & -\frac{1-\mu}{L} & \frac{VC_2}{L} \\ 0 & \frac{1-\mu}{C_2} & -\frac{1}{C_2.R_L} & \frac{I_L}{C_2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ r(t) = \begin{bmatrix} I_{pvopt} \\ C_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \text{ et } U_{opt} = \sqrt{\frac{V_{pvopt}}{RI_{pvopt}}} \end{array} \right. \quad (\text{III.27})$$

III.3.2.3 conception le contrôleur MVT

L'objectif est la synthèse du gain K_0 permettant d'assurer la stabilité de la boucle fermée et, par conséquent, de garantir la convergence de l'erreur de suivi tout en atténuant l'influence des perturbations externes. Pour cela, on propose un régulateur est donnée par :

$$u(t) = -K_0(x(t) - x_c(t)) \quad (\text{III.28})$$

Et la dynamique de l'erreue

$$\dot{e}_c(t) = (A_0 - B_0 K_0) e_c(t) + f(x(t)) - f(x_c(t)) \quad (\text{III.29})$$

On applique MVT

$$\dot{e}_c(t) = (A_0 - B_0 K_0 + \nabla f) e_c(t) \quad (\text{III.30})$$

Pour la conception de contrôleur par l'approche MVT, on doit suivre les étapes suivantes :

ON applique l'approche MVT pour Cherchons le gradient de $f(x)$:

Chapitre 3 : MPPT par contrôleur a base théorème de la valeur moyenne

Nous avons le modèle augmenté pour l'équation de convertisseur et Un intégrateur sous la forme suivante :

$$\dot{X} = A(x) \cdot x(t) + B \cdot U + D_v I_{pv}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{pv} \\ \dot{I}_L \\ \dot{V}_{C2} \\ \dot{\mu} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{C_1} & 0 & 0 \\ \frac{1}{L} & -\frac{R_L}{L} & -\frac{1}{L} & \frac{1}{L} V_{C2} \\ 0 & \frac{1}{C_2} & -\frac{1}{R} & \frac{1}{C_2} I_L \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot x + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \cdot U + \begin{bmatrix} \frac{1}{C_1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot I_{pv} \quad (III.31)$$

Pour trouver le dynamique de l'erreur $\dot{e}_c(t)$, Nous Avons la forme de l'erreur la commande $e_c(t)$:

$$e_c(t) = x(t) - x_c(t) \quad (III.32)$$

Alors , l'équation dynamique de l'erreur de contrôle sous la forme :

$$\dot{e}_c(t) = \dot{x}(t) - \dot{x}_c(t) \quad (III.33)$$

En compensant la forme $\dot{x}(t)$ pour le modèle augmenté et la forme $\dot{x}_c(t)$ pour le modèle de référence On trouve la relation de $\dot{e}_c(t)$ comme suit :

$$\dot{e}_c(t) = (A_0 - B_0 K_0) * e(t) + f(x(t)) - f(x_c(t)) \quad (III.34)$$

Actuellement, nous appliquerons de ce type la théorème de la valeur moyenne MVT vectorielle On trouve la relation comme suit :

$$\dot{e}_c(t) = (A_0 - B_0 K_0 + \nabla F) * e_c(t) \quad (III.35)$$

La matrice de gradient continu de Lipchitz ∇F donne comme suit :

$$\nabla F = \begin{bmatrix} 0 & \frac{-1}{C_1} & 0 & 0 \\ \frac{1}{L} & \frac{-R_L}{L} & \frac{(1-\mu)}{L} & \frac{1}{L} V_{C2} \\ 0 & \frac{(1-\mu)}{C_2} & -\frac{1}{RC_2} & \frac{1}{C_2} I_L \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (III.36)$$

Le vecteur $[V_{pv} \ I_L \ V_{C2} \ \mu]^T$ est en effet représente les valeurs de vecteur $[X_1 \ X_2 \ X_3 \ X_4]^T$ Nous allons donc extraire des valeurs $J(X_i)$ de gradient ∇F pour que :

$$J(X_1) = 0 ; J(X_2) = \frac{1}{C_2} I_L ; J(X_3) = \frac{1}{L} V_{C2} ; J(X_4) = \begin{cases} \frac{(1-\mu)}{L} \\ \frac{(1-\mu)}{C_2} \end{cases} ; \quad (III.37)$$

Nous appliquons la secteur non linéaire dans la forme $\dot{e}_c(t)$ Pour avoir une relation comme suit :

Chapitre 3 : MPPT par contrôleur a base théorème de la valeur moyenne

$$\dot{e}_c(t) = [(A_0 + A_1 \cdot x_1 + A_2 \cdot x_2 + A_3 \cdot x_3 + A_4 \cdot x_4) - B_0 k_0] e_c(t) \quad (\text{II.38})$$

Nous compensons les valeurs des matrices A_i et B_i dans la relation $\dot{e}_c(t)$ comme suit :

$$\dot{e}_c(t) = \left[\left(\begin{bmatrix} 0 & \frac{-1}{C_1} & 0 & 0 \\ \frac{1}{L} & \frac{-R_L}{L} & \frac{1}{L} & \frac{1}{L} \\ 0 & \frac{1}{C_2} & -\frac{1}{RC_2} & \frac{1}{C_2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot x_1 + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot x_2 + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot x_3 + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot x_4 \right) - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} k_0 \right] e_c(t) \quad (\text{III.39})$$

Nous avons compensé X_i valeurs à l'intérieur de la forme $\dot{e}_c(t)$ afin que $X_i = (h_{i \max} * M_i + h_{i \min} * m_i)$ et $(h_{i \max} = h_{i \text{ individuels}})$ $(h_{i \min} = h_{i \text{ matrimoniaux}})$ Comme suit :

$$\dot{e}_c(t) = [(A_0 + A_1 * h_1 * M_1 + A_1 * h_2 * m_1 + A_2 * h_3 * M_2 + A_2 * h_4 * m_2 + A_3 * h_5 * M_3 + A_3 * h_6 * m_3 + A_4 * h_7 * M_4 + A_4 * h_8 * m_4) - B_0 k_0] e_c(t) \quad (\text{III.40})$$

Les valeurs M_i représentent les valeurs grandes de A_i de sorte qu'on leur attribue la relation suivante :

$$M_i = J(X_{i \max}) \quad (\text{III.41})$$

Les valeurs m_i représentent les valeurs les petites de A_i de sorte qu'on leur attribue la relation suivante :

$$m_i = J(X_{i \min}) \quad (\text{III.42})$$

Une relation de h_i doit être établie comme suit :

$$h_i = \frac{M_i - J(X_i)}{M_i - m_i} \quad (\text{III.43})$$

i : valeurs appartiennent au groupe de nombres individuels.

Une relation de h_i doit être établie comme suit :

$$h_i = \frac{J(X_i) - m_i}{M_i - m_i} \quad (\text{III.44})$$

i : valeurs appartiennent au groupe de nombres matrimoniaux.

Chapitre 3 : MPPT par contrôleur a base théorème de la valeur moyenne

Nous avons compensé \mathcal{A}_i valeurs à l'intérieur de la forme $\dot{e}_c(t)$ afin que $\mathcal{A}_i = [A_i * (M_i + m_i)]$
Comme suit :

$$\dot{e}_c(t) = [(A_0 + \mathcal{A}_1 \cdot h_1 + \mathcal{A}_2 \cdot h_2 + \mathcal{A}_3 \cdot h_3 + \mathcal{A}_4 \cdot h_4 + \mathcal{A}_5 * h_5 + \mathcal{A}_6 * h_6 + \mathcal{A}_7 * h_7 + \mathcal{A}_8 * h_8) - B_0 k_0] e_c(t) \quad (\text{III.45})$$

La dernière relation de $\dot{e}_c(t)$ est donnée comme suit :

$$\dot{e}_c(t) = \left(A_0 - B_0 K_0 + \sum_{i=1}^8 h_i * \mathcal{A}_i \right) e_c(t) \quad (\text{III.46})$$

$$\dot{e}_c(t) = \sum_{i=1}^8 h_i \left(\frac{A_0 - B_0 K_0}{4} + \mathcal{A}_i \right) e_c(t) \quad (\text{III.47})$$

Nous numerous

$$\mathbb{A}_i = \left(\frac{A_0 - B_0 K_0}{4} + \mathcal{A}_i \right) \quad (\text{III.48})$$

Pour $e_c(t) \rightarrow 0$; $e_c < 0$, on utilise fonction quadratique de Lyapunov dans lequel :

$$V(e_c(t)) = e_c^T(t) P e_c(t)$$

La stabilité de lyapunov:

Pour le $\dot{V}(e_c) \leq 0$ en utilisée méthode **IML** pour calcule les valeurs de gain Ko

$$\begin{aligned} \dot{V}(e_c) &= \dot{e}_c^T * P + P * \dot{e}_c + \alpha P \leq 0 \\ \dot{V}(e_c) &= [(A_0 - B_0 K_0 + 4 * \mathcal{A}_i)^T * P + P * (A_0 - B_0 K_0 + 4 * \mathcal{A}_i) + 4 * \alpha P] \leq 0 \end{aligned} \quad (\text{III.49})$$

$$\dot{V}(e_c) = [(A_0 - B_0K_0 + 4 * \mathcal{A}_1)^T * P + P * (A_0 - B_0K_0 + 4 * \mathcal{A}_1) + 4 * \alpha P] \leq 0$$

$$\dot{V}(e_c) = [(A_0 - B_0K_0 + 4 * \mathcal{A}_2)^T * P + P * (A_0 - B_0K_0 + 4 * \mathcal{A}_2) + 4 * \alpha P] \leq 0$$

$$\dot{V}(e_c) = [(A_0 - B_0K_0 + 4 * \mathcal{A}_3)^T * P + P * (A_0 - B_0K_0 + 4 * \mathcal{A}_3) + 4 * \alpha P] \leq 0 \quad (\text{III.50})$$

$$\dot{V}(e_c) = [(A_0 - B_0K_0 + 4 * \mathcal{A}_4)^T * P + P * (A_0 - B_0K_0 + 4 * \mathcal{A}_4) + 4 * \alpha P] \leq 0$$

$$\dot{V}(e_c) = [(A_0 - B_0K_0 + 4 * \mathcal{A}_5)^T * P + P * (A_0 - B_0K_0 + 4 * \mathcal{A}_5) + 4 * \alpha P] \leq 0$$

$$\dot{V}(e_c) = [(A_0 - B_0K_0 + 4 * \mathcal{A}_6)^T * P + P * (A_0 - B_0K_0 + 4 * \mathcal{A}_6) + 4 * \alpha P] \leq 0$$

$$\dot{V}(e_c) = [(A_0 - B_0K_0 + 4 * \mathcal{A}_7)^T * P + P * (A_0 - B_0K_0 + 4 * \mathcal{A}_7) + 4 * \alpha P] \leq 0$$

$$\dot{V}(e_c) = [(A_0 - B_0K_0 + 4 * \mathcal{A}_8)^T * P + P * (A_0 - B_0K_0 + 4 * \mathcal{A}_8) + 4 * \alpha P] \leq 0$$

Alors le gain de controleur MVT calculé par le programme Yalmip:

$$K_0 = [32,01 \quad 12,58 \quad -8,02 \quad 152,8]$$

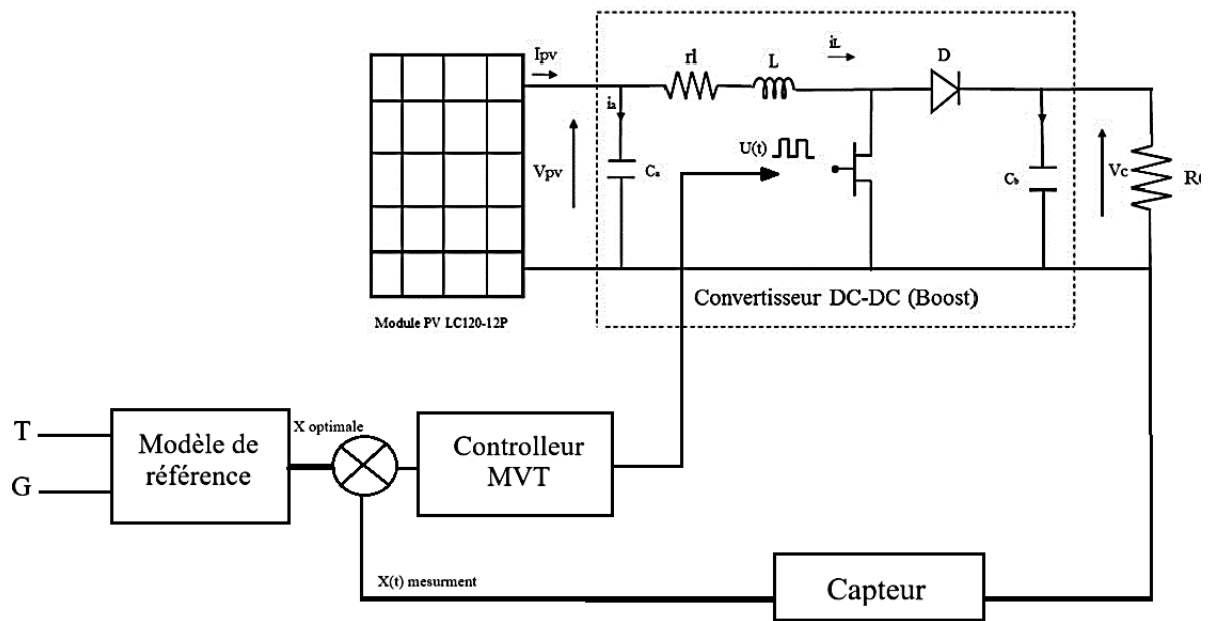


Figure III. 3 Schéma globale de la contrôleur MVT en système photovoltaïque

III.4 Simulation matlab

La conception de la loi de contrôle proposée est mise en œuvre à travers un test de simulation illustratif sous l'environnement MATLAB/Simulink. Le contrôle robuste basé sur MVT est appliqué à un système Photovoltaïque et convertisseur Boost dont ses paramètres sont mentionnés en le tableau . La loi de contrôle MVT proposée a été testée dans les résultats de simulation comme présenté dans la figure.

On a choisi les variables comme suite :

$$\begin{cases} V_{c,min} = 0 \\ V_{c,max} = 50 \end{cases}$$

$$\begin{cases} I_{L,min} = 0.1 \\ I_{L,max} = 0.8 \end{cases}$$

$$\begin{cases} V_{pv,min} = 0 \\ V_{pv,max} = 21.8 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \mu_{min} = 0 \\ \mu_{max} = 1 \end{cases}$$

Paramètre	Symbole	Valeur
Condensateur d'entrée	C_1	$500\mu F$
Condensateur de sortie	C_2	$100\mu F$
Inductance	L	$10mH$

Chapitre 3 : MPPT par contrôleur a base théorème de la valeur moyenne

Résistance interne	$R_L, (r_l)$	0.01 Ω
Résistance	R	20 Ω

Tableau III. 1 composants du convertisseur DC /DC

Résolution des inégalités LMI par Yalmip sous l'environnement du logiciel Matlab. permet d'obtenir le gain K_0 du contrôleur MVT

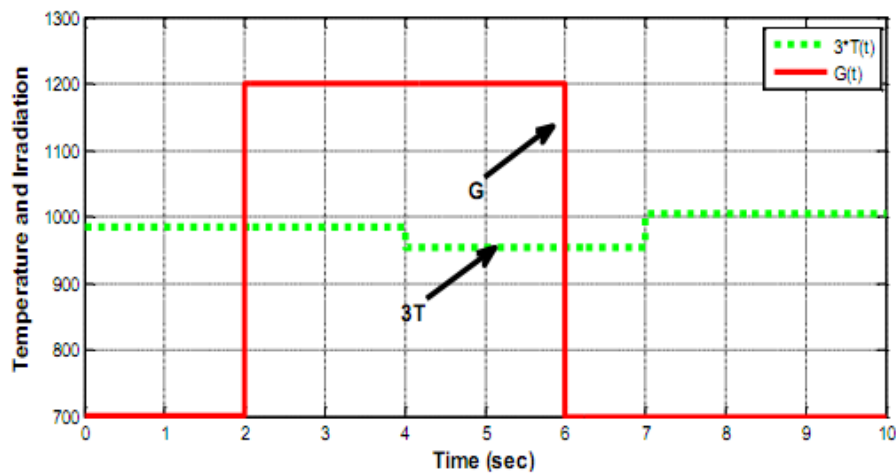


Figure III. 4 Evolution de température et irradiation

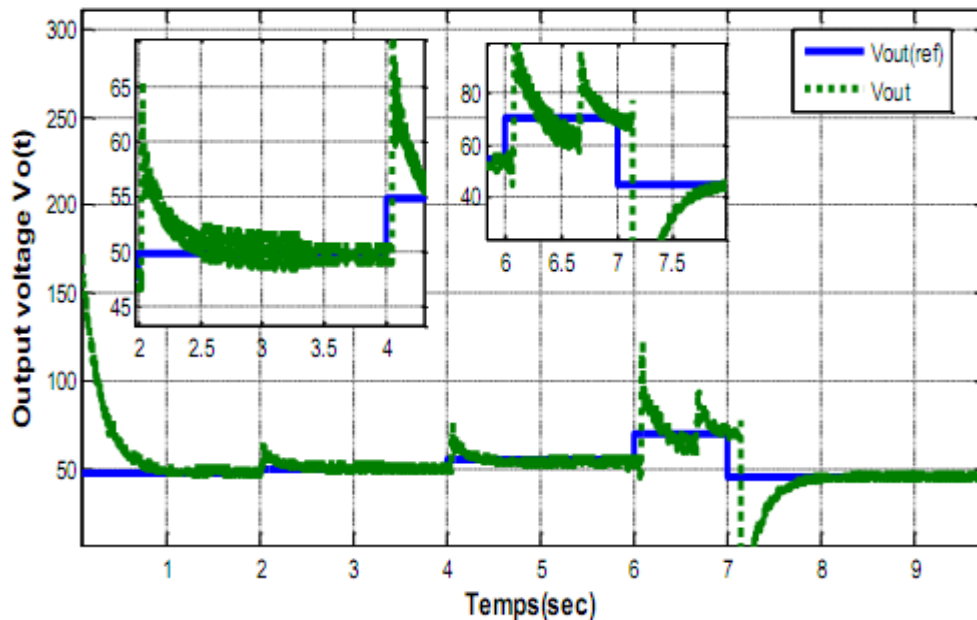


Figure III. 5 Tension sortie et tension référence

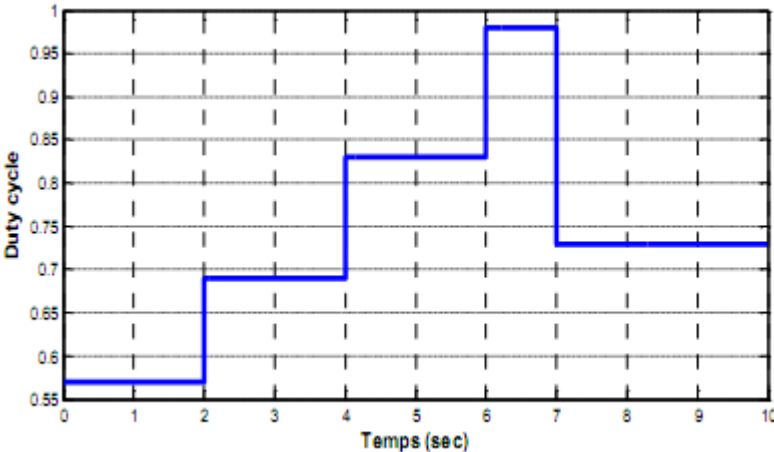


Figure III. 6 Duty cycle de Boost convertisseur

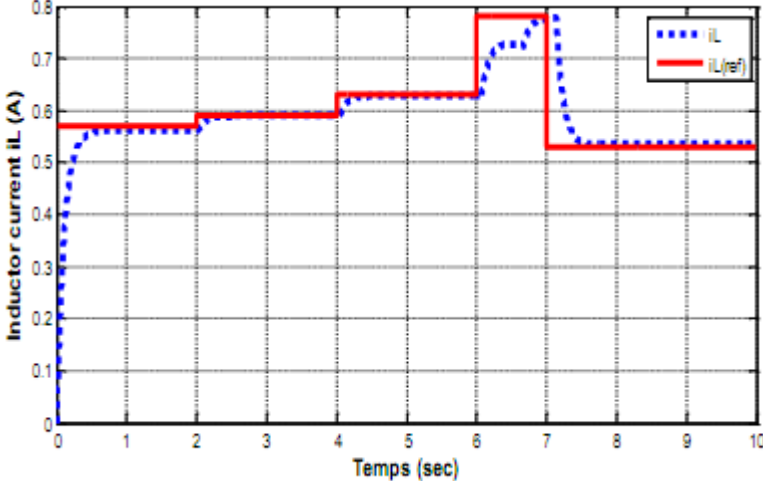


Figure III. 7 Courant d'inductance et référence

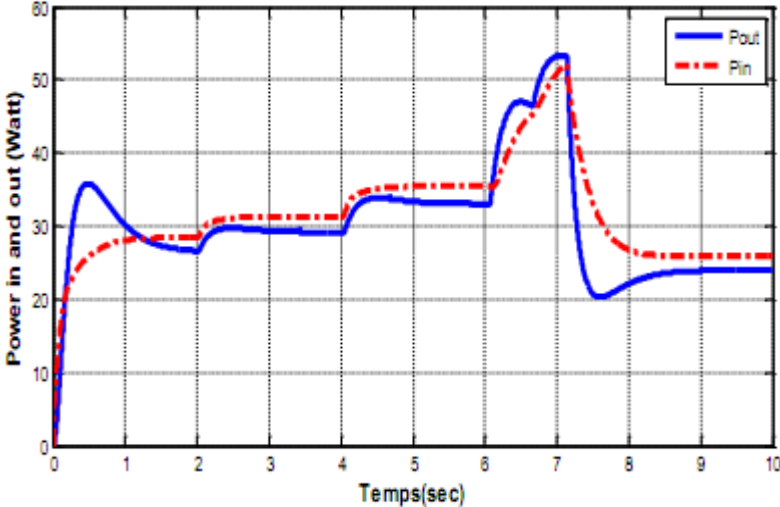


Figure III. 8 Puissance de sortie et référence de PV

III.5 Conclusion

Nous présentons un contrôleur MVT robuste pour un maximum suivi des points d'alimentation (MPP) des systèmes photovoltaïques obtenu à partir du chercheur ou du générateur de référence.

Le concept du contrôleur MVT est conçu pour le système PV combiné et le boost DC/DC convertisseur avec une nouvelle stratégie d'algorithme basée sur le MVT et l'approche de non-linéarité secteur non linéaire qui est effectué pour suivre les états optimaux générés du chercheur accomplissant le résultat souhaité qui est le gradient de la puissance par rapport à la tension qui devrait être nul. Sur la base de la nouvelle représentation du modèle, conditions de stabilisation du système en boucle fermée

Qui est formulé et résolu en termes de linéaire inégalités matricielles MLI.

Les résultats de la simulation montrent que le projet proposé L'algorithme suit rapidement le fonctionnement optimal point malgré de brusques variations de température et Irradiation avec des erreurs mineures. L'obtenu les résultats de la simulation montrent que le projet proposé Le contrôleur est capable de suivre le MPP rapidement convergence même dans des conditions climatiques changeantes

Conditions. Les prochains travaux porteront sur validation expérimentale de ces approches et nous prenons en considération toutes les limitations et contraintes pour réduire les erreurs et des réponses rapides aux perturbations ou aux références souhaitées générées par le chercheur.

Conclusion Générale

Un générateur photovoltaïque (PV) possède un point de fonctionnement optimal unique appelé point de puissance maximale (MPP). Ce point varie en fonction de l'éclairage et de la température. Le générateur photovoltaïque présente également une caractéristique I-V non linéaire. Pour maintenir le fonctionnement du panneau solaire au MPP et garantir un rendement élevé, il est crucial de contrôler en permanence le générateur photovoltaïque via une étape d'adaptation. Les travaux présentés dans ce manuscrit visaient à développer une méthode de contrôle robuste pour assurer le bon fonctionnement du système PV.

Les méthodologies discutées dans cette thèse sont principalement basées sur l'approche MVT, dédiée au développement de conditions de stabilisation pour les systèmes non linéaires. Pour établir ces méthodes, nous avons utilisé la fonction quadratique de Lyapunov, les outils d'inégalité matricielle linéaire (LMI) pour minimiser l'effet de diverses perturbations.

Notre étude peut être organisée en deux parties principales. Dans la première partie, nous avons fourni les équations mathématiques du modèle non linéaire d'un système PV. Dans notre travail, nous avons étudié la modélisation & simulation de la chaîne photovoltaïque composée de générateurs photovoltaïques et d'étages d'adaptation (convertisseur DC/DC), une charge DC (résistance) et un étage de contrôle. Convertisseur de variateur (dans ce cas la commande MPPT classique est utilisée pour la première fois commandes P&O, nous avons montré un système d'énergie renouvelable. Particulièrement intéressé par les systèmes photovoltaïques, qui sont principalement composés de Générateur photovoltaïque (GPV) et convertisseur élévateur DC-DC. Modèle électrique en La diode unique de GPV décrite par le modèle mathématique est étudiée. De même Modèle électrique et équation mathématique du

Convertisseur Boost expliqué. Effectuer différentes simulations dans l'environnement Matlab/Simulink. Mettre en évidence l'impact des changements de conditions climatiques (éclairage et Température) sur le MPP avec la puissance de fonctionnement du système la plus faible.

Les commandes MPPT, qu'elles soient classiques (P&O) sont autorisées. Une meilleure connexion entre le générateur photovoltaïque (GPV) et la charge, cela force Toujours fonctionner au point de puissance maximum

. La deuxième partie s'est concentrée sur l'analyse de stabilité et de stabilisation du système photovoltaïque. En employant une fonction de Lyapunov quadratique candidate, nous avons synthétisé une loi de contrôle MVT robuste à pour assurer le suivi de trajectoire souhaité. Nous

avons établi et résolu les conditions de stabilisation sous forme de LMI, donnant des résultats très satisfaisants.

L'application des théorèmes et méthodes de contrôle mentionnés dans cette thèse nous permet de conclure ce qui suit :

Avantages de l'approche LMI : L'approche LMI offre des avantages significatifs dans la conception de lois de contrôle pour les systèmes non linéaires décrits par les modèles flous T-S. Les LMI fournissent un moyen systématique et efficace en termes de calcul pour dériver des lois de contrôle qui garantissent la stabilité et les performances. Cette approche est particulièrement bénéfique pour gérer les non-linéarités et les incertitudes inhérentes aux systèmes photovoltaïques.

Efficacité des approches Lyapunov: Les approches proposées, telles que la fonction Lyapunov sont efficaces pour développer des conditions de stabilisation pour les systèmes non linéaires sous la forme de LMI. Ces méthodes contribuent à atténuer les effets des perturbations et à garantir la robustesse du système de contrôle. L'utilisation d'une fonction quadratique de Lyapunov fournit une base théorique solide pour analyser la stabilité du système photovoltaïque, Grâce à l'application rigoureuse de ces stratégies de contrôle avancées, nous avons démontré leur utilité pratique pour améliorer les performances et la fiabilité des systèmes photovoltaïques. L'approche multimodèle, combinée à une conception de contrôle basée sur LMI et à des techniques de stabilisation robustes, fournit une solution complète pour optimiser l'utilisation de l'énergie solaire.

En résumé, les résultats de cette recherche soulignent l'importance d'intégrer des méthodes de contrôle sophistiquées à l'électronique de puissance pour maximiser l'efficacité des systèmes photovoltaïques. En tirant parti des atouts des modèles Takagi-Sugeno, des outils LMI et des théories de contrôle robustes, nous pouvons réaliser des améliorations significatives dans le fonctionnement et la stabilité des systèmes d'énergie solaire. Cette recherche contribue aux efforts en cours visant à développer des technologies d'énergie renouvelable plus efficaces et plus fiables, soutenant ainsi la transition mondiale vers des sources d'énergie durables.

Bibliographie

- [1] **Mr. Saad Saoud Merwan** . Optimisation de la gestion de l'énergie photovoltaïque utilisée dans une zone Agricole . UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA . 2017
- [2] ZENAKHI Asma . Etude par simulation du fonctionnement d'un système photovoltaïque menu d'une commande MPPT . Université Abou BekrBelkaïd – Tlemcen
- [3] Stéphane Petibon. Nouvelles architectures distribuées de gestion et conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques. Micro et nanotechnologies/Microélectronique. Université Paul Sabatier- Toulouse III, 2009. Français.
- [4] Mr. OUARI Mondher et Mr. ZINE Yakoub . Étude des commandes MPPT d'un système Photovoltaïque. École nationale polytechnique . 2020
- [5] M.Chaabene. Cour Gestion énergétique des panneaux photovoltaïque, UNIVERSITE DE SFAX, 2008.
- [6] KH. Ayache. Modélisation et simulation d'un générateur photovoltaïque couplé à un réseau électrique. Mémoire de Magister, Université Mohamed Chérif Messaâdia de Souk-Ahras, 2014.
- [7] Philippe Barrade. L'électronique de puissance méthodologie et convertisseurs élémentaires. Press polytechnique et universitaires, 1ère édition, 2006.
- [8] O. Gergaud, "Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur", Thèse de Doctorat de l'ENS de Cachan (France), 09 décembre 2002.
- [9] A. B. Arostegi, "New Optimized Electrical Architectures of Photovoltaic Generators with High Conversion Efficiency", Thèse Doctorat de l'Université Toulouse 3 Paul Sabatier, France, 2013, pp. 167.
- [10] Lequeu Thierry, "Cours d'électronique de puissance", IUT GEII 2ième année, Option EEP, 2005.
- [11] Bogdan Grabowski, Christian Ripoll, " Aide-mémoire Électronique", Dunod, 5e édition, 2008.
- [12] R. Shubhobrata, B. Ranjit Kumer et M. Maitra, Singapore, Block Backstepping Design of Nonlinear State Feedback Control Law for Underactuated Mechanical systems, Springer, 2016
- [13] Trishan Esham, Student Member, IEEE, and Patrick L. Chapman, Senior member, IEEE. Comparison of Photovoltaic array maximum power point tracking techniques Techniques", IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION, 2006.

- [14] E. Parbaile, "Contribution à l'optimisation des techniques de dépôts sous vide de cellules solaires organiques," Ph.D. dissertation, Limoges, 2009.
- [15] O. Zeghib, A. Allag, M. Allag, and B. Hamidani, "A robust extended H_∞ observer based on the mean value theorem designed for induction motor drives," *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, February 08 2019.
- [16] O. Zeghib, A. Allag, M. Allag, and B. Hamidani, "An Extended MVT Observer Designed for Induction Motor Drive," *Mediterranean Journal of Measurement and Control*, vol. 13, pp. 805-811, 2017.
- [17] G. Phanomchoeng, "State, parameter, and unknown input estimation problems in active automotive safety applications," 2011.