

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la technologie

Département Electromécanique

Mémoire

Présenté pour obtenir

LE DIPLOME DE MASTER

FILIERE : Automatique

Spécialité : Automatique et informatique industrielle

Par

➤ **MOUSSAOUI RANIA**

➤ **RADJAI MOUNA**

Intitulé

**COMMANDE AVANCEE PAR MODE GLISSANT DES SYSTEMES
PHOTOVOLTAIQUES**

Devant le Jury composé de :

Président : Saadi Sekhara

Encadreur : Ziyad Bouchama

Examineur 1 : Hichem Talhaoui

Examineur 2: Abdelfetah Khathir

Année Universitaire 2021/2022

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

Nous tenons à remercier Dieu le tout puissant de nous avoir donné le courage, la force et la volonté pour réaliser ce travail.

*Nous adressons aussi notre sincère sentiment de gratitude à notre promoteur le docteur **BOUCHAMA Ziyad** qui nous a guidé et orienté durant toute cette période.*

À l'ensemble des enseignants du département des sciences et de la technologie et plus particulièrement ceux de la spécialité automatique et informatique industrielle.

Nous tenons également à remercier toute personne ayant contribué de près ou de loin à la concrétisation de ce travail.

Nous espérons que ce mémoire servira d'exemple et de support pour les années à venir.

Enfin, un grand merci à ceux qui ont fait l'honneur de juger ce mémoire.

Dédicace

Je tiens tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant qui m'a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail, et je le dédie à :

A Ma mère, La plus forte, qui a tout sacrifié pour mon éducation, qui m'a entouré d'amour et d'affection, qui a fait tout pour ma réussite, qui m'a protégé et qui m'a aimé de tout son cœur, je suis là grâce à ces prières et son soutien.

A mon père, Ma source de motivation, force de d'encouragement qui m'a toujours soutenu, Merci pour tous les sacrifices et vos précieux conseils.

A mon grand-père que dieu te garde pour nous

A mes frères Abderrahmane et Ahmed

Merci pour votre disponibilité et votre présence

A mes chères tantes Sacia, Assia et Linda et ma cousine Imène qui m'ont vraiment soutenu,

A tous mes collègues,

A toutes mes amies et surtout Lylia, Dounia, Salima,

Et tous ceux qui sont chers pour moi,

Merci pour votre disponibilité et vos conseils J'espère que je serais à la hauteur de votre espérance.

Mouna

Dédicace

*Merci Allah (mon dieu) de m'avoir donné
la capacité d'écrire et de réfléchir, la force d'y
croire, et la patience.*

*Je dédie ce modeste travail à ceux qui m'ont
donné la vie, le symbole de tendresse, qui ont
sacrifié pour mon bonheur et ma réussite,*

*A mes parents, Que dieu les gardes et les
protège.*

A mes adorables soeurs et frères,

A mes amies.

A ma famille en générale.

A tous ceux qui me sont chères.

A tous ceux qui m'aiment.

A tous ceux que j'aime.

A la mémoire de mes grands pères

Je dédie ce travail.

MOUSSAOUI Rania

Résumé

Le recours aux énergies renouvelables et particulièrement au photovoltaïque peut-être une solution à la demande croissante de l'électricité. Cette issue ne pollue pas l'atmosphère, évite les risques du nucléaire et indépendante des énergies fossiles qui sont mal réparties et épuisables. Cependant, la conversion PV reste à ce jour non compétitif. Alors, l'optimisation du transfert d'énergie dans la chaîne de production est nécessaire. L'utilisation des convertisseurs statiques dotés de commande MPPT améliore le rendement de conversion sur une vaste plage d'applications. L'objectif de ce mémoire est de contribuer à l'optimisation d'une chaîne de conversion PV. Cette contribution concerne le développement d'une méthode MPPT basée sur une approche non linéaire appelée commande par mode glissant pour le transfert optimal de l'énergie depuis un générateur PV vers sa charge ;

Mots Clés : énergies renouvelables, systèmes photovoltaïque, MPPT, convertisseurs statiques, commande par mode glissant.

Abstract

Growing global energy demands the necessity for renewable energies, especially photovoltaic electricity, which is labelled as a clean alternative to nuclear electricity and fossil fuels that are harmful, poorly distributed, and exhaustible. The optimization of the energy transfer in the manufacturing line is essential as long as PV conversion remains non-competitive. The use of static converters with MPPT control improves conversion efficiency over a broad range of applications. The objective of this thesis is to contribute to the optimization of a PV conversion system. This contribution concerns the development of an MPPT technique primarily based on a non-linear strategy called sliding mode control for the most beneficial transfer of energy from a PV generator to its load.

Keywords: renewable energy, photovoltaic systems, MPPT, static converters, sliding mode control.

الملخص

إن الطلب المتزايد على الكهرباء، أصبح يماجس جميع الدول العالم. لذلك فإن الازدحام الطاقة متجددة خاصة الكهروضوئية تعد حلاً لهذا المشكل، لكونها غير ملوثة للبيئة، ونجذب الاستثمار النووي، كما أنها لا تعتمد على الوقود الأحفوري الفاسد، متجدد ومتوزع بطريقة عادلة، إلا أن التحول الكهروضوئي لا يزال بعيداً عن المنافسة لذلك فإن استخدام مثل لنحو الطاقة في سلسلة إنتاج أصبح من الضروري. وما يحسن مردود التحويل على نطاق واسع من التطبيقات وهو استخدام وحدات الثابتة مع وحدات التحكم ZX، ملاحظة نقطة استطاعة العظم. إذن فإن الهدف من هذه الدراسة هو المساهمة في تحسين سلسلة النحول الكهروضوئية ونمثلة هذه المساهمة في تطوير طريقة ملاحظة نقطة استطاعة العظم مثيرة على أساس خطي بد : التحكم في الوضع المعلق من أجل النقل المثلى للطاقة انطلاقاً من مولد كهروضوئي إلى حملته.

الكلمات المفتاحية: الطاقات المتجددة، أنظمة الكهروضوئية، جراز ملاحظة نقطة استطاعة العظم ، وحدات الساكنة، التحكم في الوضع المعلق.

Table des matières

Liste des symboles

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale.....01

Chapitre I: Généralités sur les systèmes photovoltaïques

Introduction	04
Energies renouvelables.....	04
Energie hydraulique (L'hydroélectricité)	05
Energie éolienne	06
Energie solaire	07
I.2.3.3. Le rayonnement solaire	07
Potentiel solaire dans le monde	08
Système photovoltaïque	09
Qu'est un système photovoltaïque?	09
Générateur PV	09
Effet photovoltaïque	10
Cellule PV	10
Structure physique.....	10
Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	11
Caractéristique électriques d'une cellule photovoltaïque	11
Module photovoltaïque	11
Modèle mathématique d'un module PV	12
Influence de l'éclairement et température sur le comportement du module PV	12
Influence de la température.....	12

Influence de l'éclairage.....	13
Effet de l'ombrage partiel sur le fonctionnement du module PV.....	13
Association des cellules photovoltaïques.....	15
Association en parallèle	15
Association en série	15
I.6.3 Association mixte (série parallèle)	16
Les avantages et les inconvénients des énergies d'un système photovoltaïque	17
Avantage	17
inconvénients.....	17
Conclusion.....	18

Chapitre II : Introduction à la commande par mode glissant

Introduction	20
Commande par mode glissant (SMC).....	20
Introduction.....	20
Présentation de la structure variable à régime glissant.....	21
Conception de la commande par mode glissant.....	23
Choix de la surface de glissement.....	23
Conditions d'existence de la convergence	25
Condition d'attractivité	25
Fonction de Lyapunov	26
Méthode de la commande équivalente.....	26
Commande de commutation	27
Commande par mode glissant d'un convertisseur DC-DC.....	28
Commande par mode glissant d'un convertisseur abaisseur	28
Synthèse de la loi de commande.....	28
Résultats de simulation.....	30
II.4. Conclusion.....	35

Chapitre III commande par mode glissant avancée d'un système PV

Introduction.....	37
-------------------	----

Principes de base de la technique de contrôle proposée	37
Conception de la commande MPPT par mode glissant	38
Conception du contrôleur PI	43
Résultats de simulation	44
Conclusion	57
CONCLUSION GENERAL	59

Liste des symboles

I_C : Courant de la capacité.

I_d : Courant de la diode.

I_L : Courant de l'inductance.

$I_{mpp} = I_m$: Courant d'un module PV au point de puissance maximale [A].

I_{ph} : Courant de photo-génération (A).

I_{PV} : Courant photovoltaïque.

I_{ref} : Courant de référence.

I_S : Courant de Saturation(A).

$I_{SC} = I_{CC}$: le courant de court-circuit.

I_{sh} : Le courant circulant dans la résistance R_{sh} (A).

n_1 : Facteur d'idéalité de la diode 1.

n_2 : Facteur d'idéalité de la diode 2.

N_p : Nombres des cellules en parallèle.

N_r : Nombres de cellules PVs raccordées en série.

N_s : Nombres des cellules en sérier.

R_p : Résistance shunt de la cellule PV.

R_s : Résistance série de la cellule PV.

V_L Tension aux bornes de l'inductance.

$V_{mpp} = V_m$: Tension d'un module PV au point de puissance maximale [V].

V_o : Tension de sortie du hacheur.

$V_{oc} = V_{co}$: Tension du circuit ouvert.

V_{PV} : La tension de sortie d'un panneau photovoltaïque.

V_{ref} : Tension de référence.

A : Ampère.

C : Capacité (F).

e: L'erreur.

L : Inductance(H).

q : Charge de l'électron (C).

R : Résistance(Ω).

T : Température de jonction (K).

V : Volt.

α : Rapport cyclique.

η : Rendement.

K: Constante de Boltzmann (JK-1).

σ : La constante de Stefan-Boltzmann.

φ : Latitude.

ψ : L'azimute.

Notations

DC= CC : Courant Continu.

GPV : Générateur photovoltaïque.

KWc: Kilo-Watt crête.

MOSFET ou IGBT : Interrupteur de puissance.

MPP : Point de Puissance Maximale 'Maximum Power Point'.

MPPT : Suivi du point maximal de puissance (Maximum Power Point Tracking).

P&O : Méthode de perturbation et d'observation.

PI : Proportionnel Intégral.

PPM : Point de puissance maximal.

PV: photovoltaïques.

PWM: Pulse Width Modulation.

SMC: Sliding Mode Control.

STC: Conditions de tests standard 'Standard Test Conditions'.

Liste des figures

<i>N° et titre de figure</i>	<i>Page</i>
CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES SYSTEMES PHOTOVOLTAIQUES	
Fig. I. 1 : Production mondiale d'électricité en 2012	5
Fig. I.2 : Énergie hydraulique.....	6
Fig.I.3: Energie Eolienne	6
Fig.I.4: Les trois composantes du rayonnement solaire global sur un plan incliné.....	8
Fig I.5: Part de l'énergie primaire provenant du solaire,2019	8
Fig I.6: Schéma synoptique d'un système PV connecté au réseau	9
Fig I.7: Structure d'une cellule PV.....	10
Fig I.8: Influence de la température sur la caractéristique	12
Fig.I.9: Influence de l'éclairement sur la caractéristique I-V et P-V d'une cellule solaire	13
Fig.I.10: Courbe de I(V) et P(V) d'un générateur PV de 100 Kw... ..	14
Fig.I.11 : Association des modules en parallèle	15
Fig.I.12: Caractéristiques I (V) pour l'association en parallèle	15
Fig.I.13: Association des modules en série.	16
Fig.I.14: Caractéristique I(V) pour l'association série	16
Fig. I.15: Association mixte des modules	16
CHAPITRE II : INTRODUCTION A LA COMMANDE PAR MODE GLISSANT	
Fig.II.1. Schéma de principe d'un système mono-variable commandé en position y par un algorithme à régime glissant.....	22
Fig. II.2.Exemple d'une surface de glissement	24
Fig. II.3 Evolution de la tension de sortie et de la tension de référence par SMC.....	29
Fig. II.4.Evolution du courant inducteur par SMC.....	29
Fig. II.5 Evolution de la tension de sortie pour variation de la référence.	30
Fig II.6 Evolution du courant de charge par SMC pour une variation de référence.....	30
Fig. II.7 Evolution de la tension de sortie pour variation de charge.....	31
Fig. II.8 Evolution du courant de charge pour variation de charge... ..	31
Fig. II.9 Evolution de la tension de sortie pour une variation de référence et de charge.....	32
Fig. II.10 Evolution du courant de charge pour une variation de référence et de charge... ..	32
Fig. II.11 Evolution du courant de l'inducteur pour une variation de référence et de charge... ..	33

CHAPITRE III : COMMANDE PAR MODE GLISSANT AVANCEE D'UN SYSTEME PHOTOVOLTAIQUES

Fig.III.1. Schéma du système basé sur la commande du courant du condensateur d'entrée...	36
Fig.III.2. Evolution de la puissance P_{PV} du panneau.....	44
Fig. III.3. Evolution de la tension V_{PV} du panneau	45
Fig.III.4. Evolution du courant I_{PV} du panneau.....	45
Fig.III.5. Evolution de la tension de sortie V_0	46
Fig.III.6. Evolution du rapport cyclique du convertisseur.	46
Fig.III.7. Evolution de la surface de glissement	47
Fig.III.8. Variation de l'éclairement en fonction du temps... ..	48
Fig.III.9. Caractéristiques du panneau PV... ..	48
Fig.III.10. Evolution de la puissance P_{PV} du panneau.....	49
Fig.III.11. Evolution de la tension V_{PV} du panneau	49
Fig.III.12. Evolution du courant I_{PV} du panneau	50
Fig. III.13. Evolution de la tension de sortie V_0	50
Fig.III.14. Evolution du rapport cyclique du convertisseur	51
Fig.III.15. Evolution de la surface de glissement	51
Fig.III.16. Variation de la température en fonction du temps	52
Fig.III.17. Caractéristiques du panneau PV	52
Fig. III.18. Evolution de la puissance P_{PV} du panneau.....	53
Fig.III.19. Evolution de la tension V_{PV} du panneau	53
Fig.III.20. Evolution du courant I_{PV} du panneau.....	54
Fig. III.21. Evolution de la tension de sortie V_0	54
Fig.III.22. Evolution du rapport cyclique du convertisseur	55
Fig.III.23. Evolution de la surface de glissement.	55

Liste des tableaux :

<i>N° et titre de tableau</i>	<i>Page</i>
CHAPITRE II : INTRODUCTION A LA COMMANDE PAR MODE GLISSANT	
Tableau III.1. Spécifications du système PV	43
Tableau III.2. Comparaison des performances d'approches étudiées	47

INTRODUCTION

GENERALE

Introduction générale

Les systèmes photovoltaïques (PV) sont l'un des outils appropriés pour produire de l'énergie électrique propre. Ces systèmes assurent une large gamme de puissance électrique qui est utilisée dans des applications autonomes et/ou transmise au réseau électrique [1-2]. Un système photovoltaïque typique est constitué généralement d'un générateur PV composé par une série des modules solaires et d'un convertisseur statique DC-DC pour transformer la puissance fournie par la source PV à la charge. Cette structure est caractérisée par une dynamique non linéaire qui change d'une manière significative avec des conditions de fonctionnement liées par exemple aux conditions climatiques à savoir le niveau d'éclairement, l'ombrage, la température...etc. Ces conditions rendent difficile de prévoir la tension et le courant pour garantir une production maximale de puissance [3][4].

Le point de fonctionnement dans lequel le générateur photovoltaïque fournit sa puissance maximale est appelé MPP (Point de Puissance Maximale) [4-5]. L'objectif principal de la stratégie de commande dans un système PV est d'assurer le fonctionnement du système autour de son MPP (Maximum Power Point Tracking- MPPT) quelles que soient les conditions d'environnement [3][6].

Dans la littérature, les algorithmes de recherche du MPPT les plus couramment utilisés sont la conductance incrémentale (IC) [4] et la perturbation et observation (P&O) [7]. D'autres types de contrôleurs ont été proposés dans la littérature pour améliorer le fonctionnement du système PV. Certains sont basés sur des lois adaptatives [3] et la théorie des modes glissants [8]. L'approche par mode glissant offre en particulier, stabilité et robustesse vis à vis des variations paramétriques, des incertitudes d'entrée et de charge, qui sont courants dans les systèmes photovoltaïques.

Les contrôleurs par mode glissant (SMC) sont plus simples à implémenter par rapport à d'autres types de contrôleurs non linéaires [9]. Par conséquent, certaines solutions basées sur cette approche ont été proposées pour fournir de bonnes performances dans l'atténuation des oscillations de la tension de sortie et pour assurer le suivi de la référence fournie par l'algorithme MPPT [10][11]. Cependant, ces solutions ne garantissent pas l'existence du mode glissant dans toute la plage de fonctionnement.

En plus, la conception rapportée des paramètres SMC n'est pas nécessairement liée aux exigences de l'algorithme MPPT, il est donc difficile de garantir le comportement souhaité du système PV complet [12][13].

L'objectif principal de ce travail réside dans la conception d'une commande SMC avancée qui prend en compte tous les éléments nécessaires pour assurer le fonctionnement souhaité du système PV, c'est-à-dire un contrôleur robuste pour suivre la référence fournie par un algorithme MPPT en présence de perturbations environnementales.

Dans ce mémoire, la procédure de conception et de mise en œuvre du contrôleur SMC, basée sur les exigences d'un algorithme P&O, pour suivre le MPP en présence de perturbations est étudiée. Les résultats de simulation font l'objet d'une étude comparative avec le contrôleur P&O développé auparavant faisant ressortir la prévalence des techniques suggérées.

CHAPITRE I

Généralités sur les systèmes photovoltaïques

Introduction :

Les systèmes des énergies renouvelables à savoir les systèmes photovoltaïques (PV) sont des outils appropriés pour produire d'énergie électrique propre. Ces systèmes assurent une large gamme de puissance électrique qui est utilisée dans des applications autonomes et/ou transmise au réseau électrique [14][15].

Dans ce chapitre, nous allons présenter l'origine des énergies renouvelables et ses sources, en suite celui du système photovoltaïque et son fonctionnement.

Energies renouvelables

Les énergies renouvelables, sont des énergies issues du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, de l'eau ou encore de la biomasse. A la différence des énergies fossiles, les énergies renouvelables sont des énergies à ressource illimitée. Les énergies renouvelables regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue.

Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont connu une forte croissance ces dernières années. D'ici vingt à trente ans, tout système énergétique durable sera basé sur l'utilisation rationnelle des sources traditionnelles et sur un recours accru aux énergies renouvelables. Naturellement décentralisées, il est intéressant de les mettre en œuvre sur les lieux de consommation en les transformant directement, soit en chaleur, soit en électricité, selon les besoins. La production d'électricité décentralisée à partir d'énergies renouvelables offre une plus grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant l'environnement. [16]

La production d'électricité renouvelable (incluant la production des centrales de pompage turbinage) a atteint 4 699,2 TWh en 2012 dans le monde, franchissant nettement le seuil des 20 % de la production d'électricité mondiale (20,8 %). Les combustibles fossiles demeurent le noyau dur de la production d'électricité mondiale avec plus des deux tiers du total (68,1 % en 2012). La Fig.I.1.a présente la production mondiale d'électricité en 2012 et la fig. I.1.b fait un zoom sur la production d'électricité mondiale d'origines renouvelables.

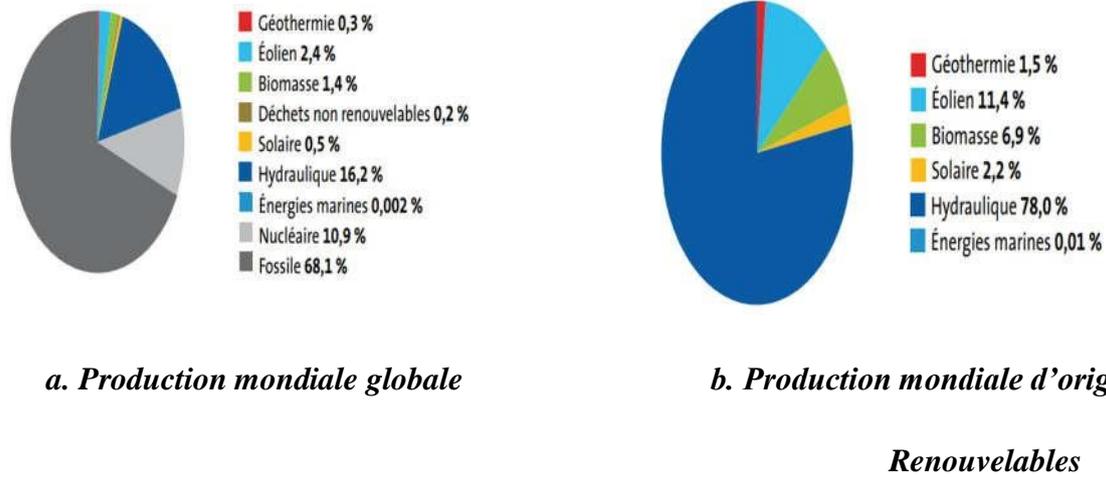


Fig. I. 1 : Production mondiale d'électricité en 2012.

L'électricité renouvelable provient de six sources distinctes. L'hydroélectricité (incluant les centrales de pompage-turbinage) est la première d'entre elles avec une contribution en 2012 de 78 %. L'énergie éolienne, qui depuis 2009 est devenue la deuxième source d'énergie renouvelable, représente désormais 11,4 % du total renouvelable. Elle devance la filière biomasse, qui rassemble la biomasse solide, la biomasse liquide, le biogaz et les déchets ménagers renouvelables (6,9 %). Suivent le solaire (2,2 %) qui rassemble les centrales photovoltaïques et les centrales solaires thermiques (héliodynamiques), la géothermie (1,5 %) et les énergies marines (0,01 %) qui restent une filière en phase de démonstration.[17]

Energie hydraulique (L'hydroélectricité)

L'énergie hydraulique est l'énergie fournie par le mouvement de l'eau, sous toutes ses formes : chutes d'eau, cours d'eau, courants marins, marée, vagues. Ce mouvement peut être utilisé directement, par exemple avec un moulin à eau, ou plus couramment être converti, par exemple en énergie électrique dans une centrale hydroélectrique. L'énergie hydraulique est en fait une énergie cinétique liée au déplacement de l'eau comme dans les courants marins, les cours d'eau, les marées, les vagues ou l'utilisation d'une énergie potentielle comme dans le cas des chutes d'eau et des barrages.[18]

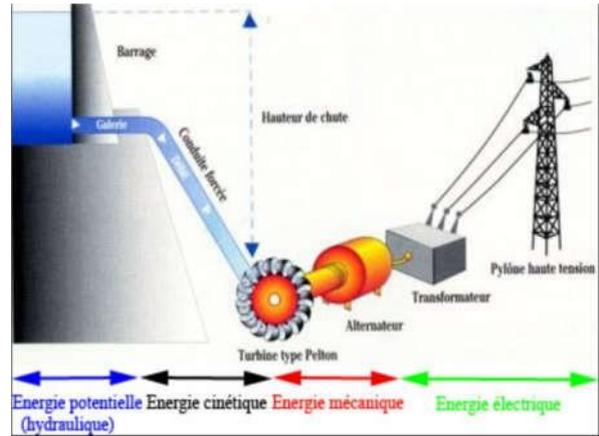


Fig. I.2 : Énergie hydraulique

Energie éolienne

Une éolienne (Fig.I.3) est un dispositif qui permet de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Cette énergie est ensuite transformée dans la plupart des cas en électricité. Les éoliennes fonctionnent pour des vitesses de vent généralement comprises entre 14 et 90 km / h, par l'intermédiaire d'un multiplicateur de vitesses. Le générateur transforme l'énergie mécanique en énergie électrique, directement injectée dans le réseau électrique. La quantité d'énergie produite par une éolienne dépend principalement de la vitesse du vent mais aussi de la surface balayée par les pales et de la densité de l'air. Selon Global Wind Energy Council (GWEC), la capacité mondiale installée à la fin de l'année 2011 est d'environ 238 gigawatts [16].



Fig . I.3 : Energie Eoliennes

Energie solaire

Le soleil est une source quasiment inépuisable d'énergie qui envoie à la surface de la terre. Un rayonnement qui représente chaque année environ 8400 fois la consommation énergétique.

Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1 kilowatt crête par mètre carré (KWC/m^2) répartie sur tout le spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge. Les déserts de notre planète reçoivent en 6 heures plus d'énergie du soleil que n'en consomme l'humanité en une année. L'énergie solaire est produite et utilisée selon plusieurs procédés:

a. Energie solaire thermique: qui consiste tout simplement à produire de la chaleur grâce à des panneaux sombres. On peut aussi produire avec de la vapeur à partir de la chaleur du soleil puis convertir la vapeur en électricité.

b. Energie solaire photovoltaïque: qui consiste à produire directement de l'électricité à partir de la lumière à l'aide de panneaux solaires. Cette forme d'énergie est déjà exploitée dans de nombreux pays, surtout dans les pays ou les régions ne disposant pas de ressources énergétiques conventionnelles tels que les hydrocarbures ou le charbon.[19]

I.2.3.3. Le rayonnement solaire:

La rotation et l'inclinaison de la terre provoquent une variation de l'énergie disponible en fonction de la latitude en un point donné. De plus, les nuages, le brouillard, les particules atmosphériques et les phénomènes météorologiques entraînent des variations quotidiennes qui augmentent, ou diminuent, le rayonnement solaire reçu par un système photovoltaïque.

On distingue pour cela :

a. Rayonnement direct: Les rayons du soleil atteignent le sol terrestre sans subir de modification de leur trajectoire initiale. Les rayons restent parallèles.

b. Le rayonnement diffus: En traversant l'atmosphère, les rayons du soleil rencontrent des obstacles tels que les nuages, la poussière, etc... Ces obstacles ont pour effet de rediriger les rayons du soleil parallèles (à l'origine) en une multitude de faisceaux dans toutes les directions.

c. Le rayonnement réfléchi: C'est le résultat de la réflexion des rayons lumineux sur une surface réfléchissante (par exemple, la neige en montagne). Cette réflexion dépend de l'albédo (pouvoir réfléchissant) de la surface concernée [20]

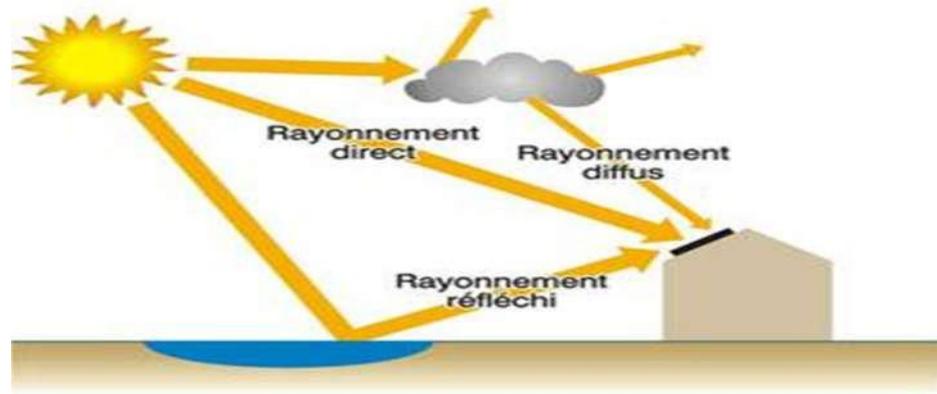


Fig.I.4: Les trois composantes du rayonnement solaire global sur un plan incliné.

I.3.Potentiel solaire dans le monde

La croissance mondiale du photovoltaïque est extrêmement dynamique et varie fortement selon les pays. À la fin de 2019, un montant cumulé de 629 GW d'énergie solaire était installé dans le monde.[21] Au début de 2020, le principal pays pour l'énergie solaire était la Chine avec 208 GW [22] représentant un tiers de la capacité solaire installée mondiale. En 2020, il y a au moins 37 pays dans le monde avec une capacité PV cumulée de plus d'un gigawatt. Les principaux installateurs de 2016 à 2019 étaient la Chine, les États-Unis et l'Inde.[23] La capacité solaire PV disponible au Honduras est maintenant suffisante pour fournir 12,5% de l'énergie électrique du pays tandis que l'Italie, l'Allemagne et la Grèce peuvent produire entre 7% et 8% de leur consommation électrique domestique respective.[24]

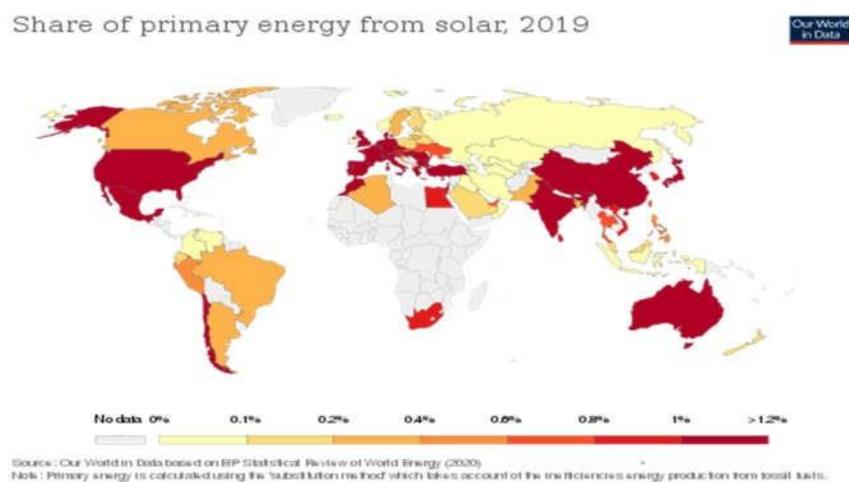


Fig.I.5: Part de l'énergie primaire provenant du solaire, 2019

Système photovoltaïque

Qu'est un système Photovoltaïque

Le générateur PV est un ensemble d'équipements connectés pour exploiter l'énergie PV afin de satisfaire les besoins en charge. En fonction de la puissance désirée, les panneaux peuvent être assemblés pour constituer un "champ PV". Relié au récepteur sans autre élément, le panneau solaire fonctionne "au fil du soleil", c'est-à-dire que la puissance électrique fournie au récepteur est fonction de la puissance d'ensoleillement. Mais, très souvent, les besoins en électricité ne correspondent pas aux heures d'ensoleillement, mais à d'autres moments qui nécessitent une intensité régulière (éclairage ou alimentation de réfrigérateurs, par exemple). On dote alors le système de batteries qui permettent de stocker l'électricité et de la rétablir en cas de nécessité. Un régulateur est alors essentiel pour parer aux problèmes de surcharges ou les décharges profondes de la batterie. Pour un certain nombre d'applications, le courant continu produit, par le générateur PV, est converti à l'aide d'un onduleur PV en courant alternatif. [25]

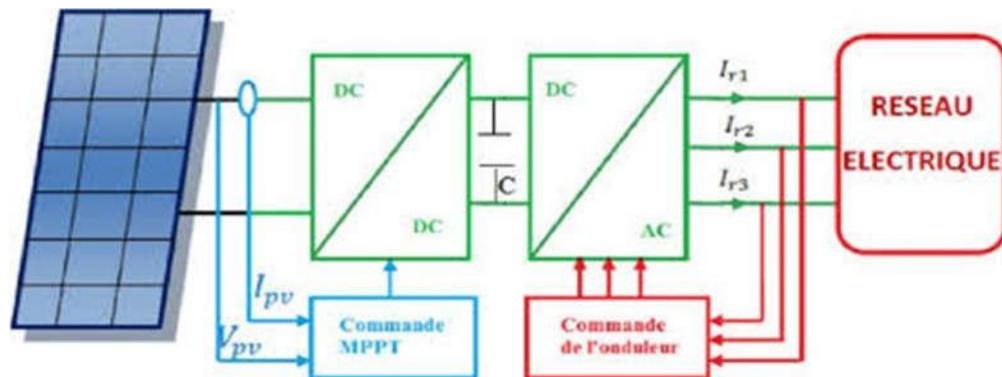


Fig. I.6: Schéma synoptique d'un système PV connecté au réseau.

Générateur PV

C'est un dispositif qui transforme l'énergie PV en électricité. Selon la puissance crête désirée, ce générateur PV est constitué d'un certain nombre de modules assemblés entre eux en série ou en parallèle. [26]

Effet photovoltaïque:

L'effet photovoltaïque a été découvert par Alexandre Edmond Becquerel en 1839. L'effet photovoltaïque est obtenu par absorption des photons dans un matériau semi-conducteur qui génère alors une tension électrique. Les cellules photovoltaïques produisent du courant continu à partir du rayonnement solaire, qui peut être utilisé pour alimenter un appareil ou recharger une batterie.[27].

Cellule PV

Structure physique:

La cellule est composée d'un matériau semi-conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique. Un semi-conducteur est un matériau dont la concentration en charges libres est très faible par rapport aux métaux. Pour qu'un électron lié à son atome (bande de valence) devienne libre dans un semi-conducteur et participe à la conduction du courant, il faut lui fournir une énergie minimum pour qu'il puisse atteindre les niveaux énergétiques supérieurs (bande de conduction).

La cellule la plus commune d'aujourd'hui est une cellule simple au silicium de jonction PN avec un rendement qui arrive jusqu'à environ 17% [28]. Ce matériau semi-conducteur comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p (Fig.I.7). Les contacts de la face éclairée de la cellule ont la structure d'une grille afin de n'occulter qu'une faible partie de la surface (5 à 10%). La face arrière peut être entièrement métallisée.

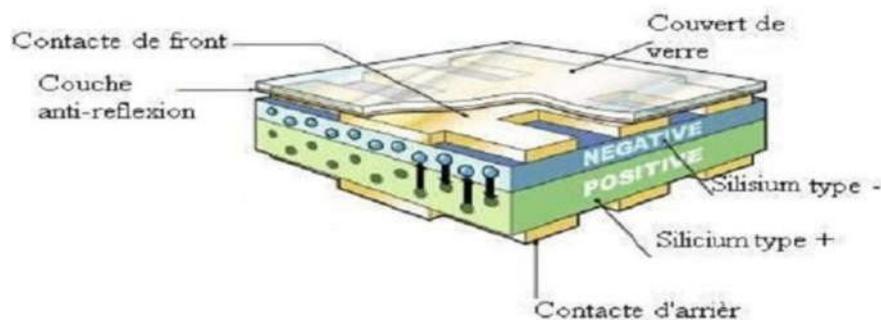


Fig. I.7: Structure d'une cellule PV

Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Lorsque cette cellule sera exposée au rayonnement, les photons créent des paires d'électron trou avec une énergie plus grande que la bande d'énergie du semi-conducteur. Ceci s'appelle l'effet photovoltaïque, a été découvert par Edmond Becquerel en 1889. Les porteurs de charge nouvellement créés dans la région d'épuisement sont séparés par le champ électrique existant. Ceci mène à une accumulation d'un potentiel de tension appelé photovoltage. Dès qu'une charge sera reliée à la cellule, cette tension causera un courant (appelé le photo-courant) qui circulera dans le circuit. [29]

Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque [26]

$$I(V) = I_{ph}(V) - I_{obsc}(V) \quad (I.1)$$

I_{ph} : Densité de courant photo-généré

I_{obsc} : Densité de courant d'obscurité.

V : la tension de cellule PV.

Dans le cas d'obscurité, $I(V)$ obéit à l'équation du courant de la diode Schottky suivante:

$$I_D(V) = I_s \times \left(\exp\left(\frac{q \times V}{n \times k \times T}\right) - 1 \right) \quad (I.2)$$

- I_D : courant de la diode Schottky.

$$I(V) = I_{ph} - I_s \times \left(\exp\left(\frac{q \times V}{n \times k \times T}\right) - 1 \right) \quad (I.3)$$

- I_s : Le courant de saturation de la diode.
- q : La charge élémentaire.
- k : Constante de Boltzmann.
- T : La température.
- n : Le paramètre intrinsèque de l'idéalité de la diode.

Module photovoltaïque

La cellule solaire de forme ronde ou carrée est l'élément de base d'un système photovoltaïque.

Un ensemble de cellules forme un module solaire, dans un module les cellules sont reliées électriquement entre elles et encapsulées, donc protégées contre les agents extérieurs. Plusieurs modules forment un string PV et plusieurs string PV forment un champ ou générateur PV 1, auxquels viennent s'ajouter des protections, un régulateur, un système de stockage de l'énergie (batterie), des appareils de contrôle et de mesure, un onduleur, etc. [30]

Modèle mathématique d'un module PV:

Le modèle mathématique, qui caractérise le panneau PV, est donné par l'équation suivante [26]:

$$I = I_{ph} - I_{S1} \times \left[e^{\left[\frac{q \times (V + N_s \times I \times R_s)}{\alpha_1 \times N_s \times k \times T} \right]} - 1 \right] - I_{S2} \times \left[e^{\left[\frac{q \times (V + N_s \times I \times R_s)}{\alpha_2 \times N_s \times k \times T} \right]} - 1 \right] - \frac{V + N_s \times I \times R_s}{N_s \times R_p} \quad (I.4)$$

N_s : Nombres de cellules PV_s raccordées en série

Influence de l'éclairement et température sur le comportement du module PV

Influence de la température

La température est un paramètre très important dans le comportement des cellules solaires puisqu'elles sont exposées au rayonnement solaire. La Fig.I.8 montre l'influence de la température, sur la caractéristique I(V) de la cellule solaire lorsque la température varie. On observe que l'augmentation de la température provoque une augmentation du courant du court-circuit (I_{CC}), on constate que la température influe négativement sur la tension de circuit ouvert. Quand la température augmente la tension de circuit ouvert diminue. Et par contre la puissance maximale du générateur subit une diminution lorsque la température augmente [31]

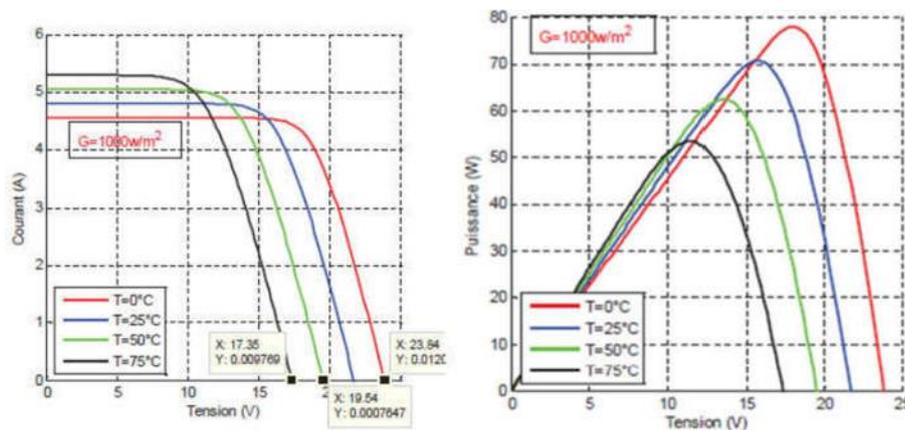


Fig. I.8: Influence de la température sur la caractéristique

Influence de l'éclairement :

L'éclairement est un paramètre très important parce qu'il a un effet spécial sur le rendement électrique. D'après la Fig.I.9; la caractéristique courant - tension d'une cellule photovoltaïque change avec l'éclairement pour une température donnée : quand l'éclairement augmente, la courbe se translate vers le haut et vers la droite. Le courant de court-circuit I_{SC} (ou I_{CC}) varie proportionnellement à l'éclairement. Dans un même temps, la tension de circuit ouvert V_{OC} ne varie que très peu, [31] comme le montre la Fig.I.9 :

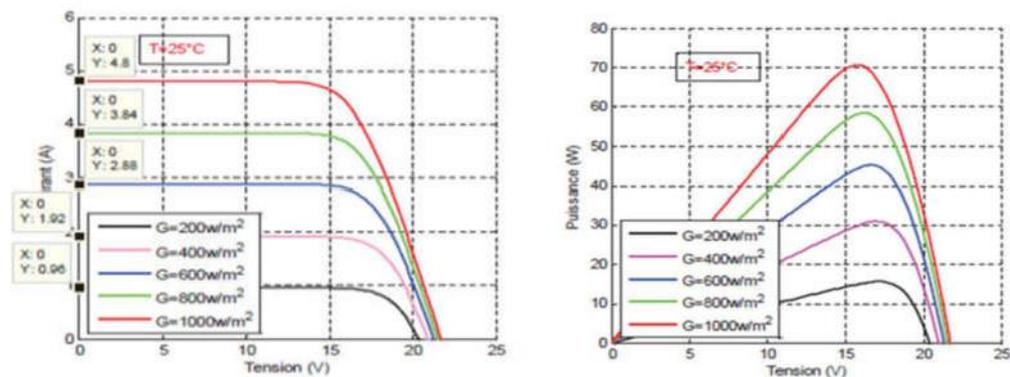


Fig. I.9 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique I-V et P-V d'une cellule solaire

Effet de l'ombrage partiel sur le fonctionnement du module PV

L'efficacité de la production l'énergie PV dépend essentiellement des conditions auxquelles est soumis le champ PV à savoir le rayonnement, la température et l'état de la surface de champ PV (salissure, détérioration). Ces facteurs influent directement sur son absorption photonique et affectent par conséquent la productivité des panneaux PV. Le phénomène d'ombrage partiel est un des problèmes qui nuisent au bon fonctionnement d'une centrale PV. L'ombrage partiel est une répartition non uniforme de l'éclairement qui est dû à plusieurs raisons (Fig.I.10). A cet effet, on distingue deux types d'ombrage:

- Ombrage lointain qui correspond à la disparition du soleil derrière la ligne d'horizon.
- Ombrage proche qui est souvent dû à des obstacles inévitables tels que : les lignes électriques, les arbres, les bâtiments voisins, la saleté.

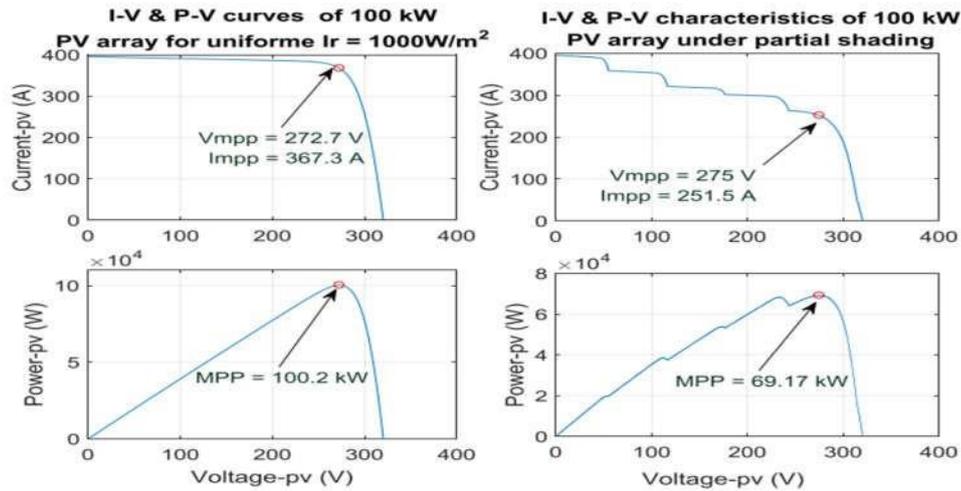


Fig. I.10 : Courbe de $I(V)$ et $P(V)$ d'un générateur PV de 100 Kw.

Ce phénomène indésirable affecte l'efficacité de la conversion et l'habilité à extraire le maximum de puissance disponible du champ PV en engendrant de multiples maxima locaux. L'ombrage perturbe aussi le fonctionnement des cellules PV causant ainsi deux problèmes :

- Le premier problème c'est celui de mis match qui est dû au fait que le courant total d'un champ PV est limité par le courant du module ombragé (de faible puissance) dans le cas où le courant I_{CC} du module ombragé est supérieur au I_{CC} des modules uniformément éclairés
- Le second problème est celui du point chaud (hot pot). Ce problème se produit quand le courant I_{CC} du module ombragé est inférieur au I_{CC} des modules uniformément éclairés donc le module ombragé se conduit comme un récepteur d'énergie reçu par les autres modules PV.

Ceci engendre, en plus de la déformation de la courbe I-V (Fig.I.10), l'échauffement de ce module par dissipation de cette énergie et si le point de fonctionnement du module ombragé atteint la tension de claquage, ce module sera détruit à cause de l'effet de l'avalanche.

Afin de concevoir un système PV performant, il est important de trouver une tension de fonctionnement optimale pour extraire le maximum de puissance PV, ce qui permet d'augmenter l'efficacité du générateur PV. Cependant, le générateur PV peut être partiellement ombragé comme le montre la Fig.I.10, ce qui force les modules PV à fonctionner avec plusieurs courants. D'où l'apparition de plusieurs points de puissances

maximales (MPP) locaux. Ce problème affecte la production de l'énergie PV et donc l'efficacité du système PV [26].

Association des cellules photovoltaïques:

Association en parallèle

Un module de 36 cellules en série est suffisant pour augmenter le courant, on peut assembler "n" modules en parallèle comme il est montré au figures I.11 et I.12. [32]

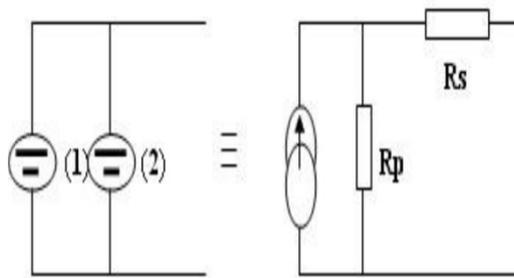


Fig.I.11 : Association des modules en parallèle [32].

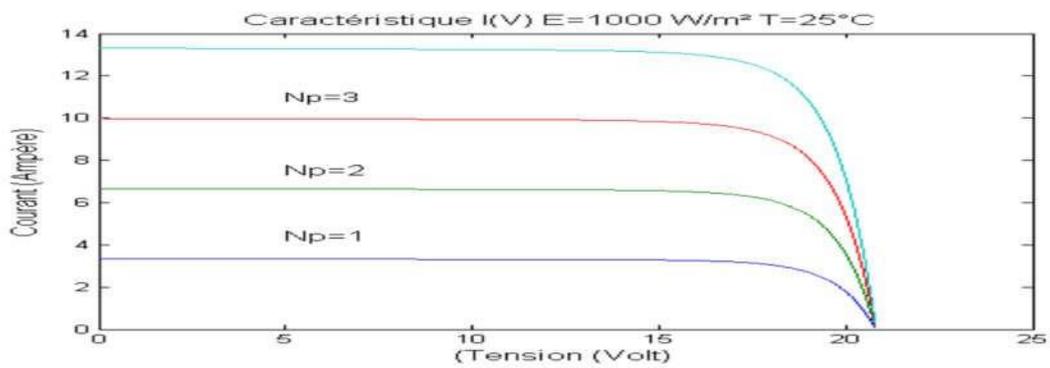


Fig.I.12: Caractéristiques I (V) pour l'association en parallèle [32].

Association en série

Un module de 36 cellules en série est suffisant, pour obtenir une augmentation de la tension. (Voir figures I.13. et I.14).

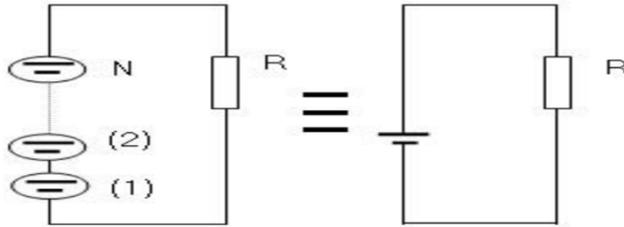


Fig.I.13: Association des modules en série.

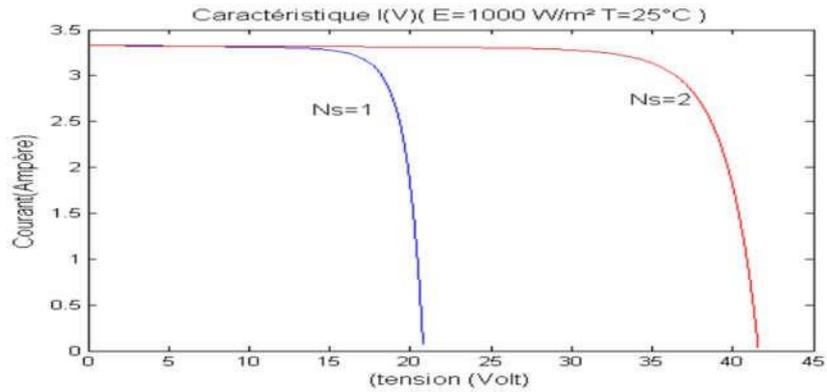


Fig.I.14: Caractéristique I(V) pour l'association série [32].

Association mixte (série parallèle)

Afin d’obtenir des puissances de quelques kW, sous une tension convenable, il est nécessaire d’associer les modules en panneaux et de monter les panneaux en rangées de panneaux série et parallèle pour former ce que l’on appelle un générateur photovoltaïque. Figures I.11 et I.13

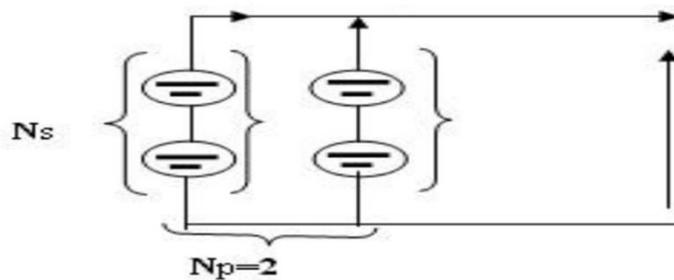


Fig. I.15: Association mixte des modules [32].

Les avantages et les inconvénients des énergies d'un système photovoltaïque

Avantages

La technologie photovoltaïque présente un grand nombre d'avantages.

- Les systèmes photovoltaïques possèdent une haute fiabilité et ils ne constituent pas de pièces mobiles qui les rendent particulièrement appropriées aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- Le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au Mégawatt.
- Le coût de fonctionnement des systèmes photovoltaïques est très faible vu les entretiens réduits et ils ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé.
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique, car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions [32].

Inconvénients

Le système photovoltaïque présente toutefois des inconvénients.

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est (la limite théorique pour une cellule) théorique pour une cellule au silicium cristallin est de 28%.
- Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs Diesel que pour des faibles demandes d'énergie en région isolée.
- Enfin, lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur photovoltaïque est accru.
- La fiabilité et les performances du système restent cependant équivalentes pour autant que la batterie et les composants de régulations associés soient judicieusement choisis. [32]

Conclusion:

Au cours de ce chapitre, nous avons pu définir des généralités sur la conversion photovoltaïque. Cette conversion, qui s'effectue au niveau de la cellule PV, consiste à transformer l'énergie solaire en une énergie électrique via l'effet photoélectrique. On a présenté ensuite la structure de la cellule PV et ses différents types d'association. Le modèle mathématique du générateur photovoltaïque est élaboré à travers le modèle de la cellule PV.

CHAPITRE II

INTRODUCTION A LA COMMANDE PAR MODE GLISSANT

Introduction :

La commande par mode glissant (Sliding Mode Control **SMC**) est un type de contrôle non linéaire, qui est relativement facile à implémenter lorsqu'elle est comparée à d'autres types de commandes non linéaires. De telles propriétés la rendent parfaitement adaptée pour être appliquée dans les systèmes non linéaires, y compris l'électronique de puissance [33][34]. Il a été démontré à plusieurs reprises que la commande **SMC** est une solution fiable pour améliorer les performances de contrôle des convertisseurs liés aux systèmes photovoltaïques [35][36].

Commande par mode glissant (SMC)**Introduction:**

La commande par mode glissant a été introduite initialement comme moyen de contrôle des systèmes à structure variable [37]. Les premiers cas d'application aux convertisseurs DC-DC ont été signalés en 1983 [38] et en 1985 [39].

Depuis lors, il y a eu un grand intérêt dans la communauté de recherche concernant son développement. Le principal avantage du contrôle **SMC** sur d'autres types de méthodes de contrôle non linéaires est sa facilité de mise en œuvre. Cela le rend bien adapté aux fins de régulation du courant DC-DC. Cependant, le principal problème associé à l'application du contrôle **SMC** est sa nature à fréquence variable, qui provoque des pertes de puissance excessives et des interférences électromagnétiques. Néanmoins, si ce problème est correctement géré, le contrôle **SMC** a un énorme potentiel dans les applications industrielles [40].

Le contrôle **SMC** est naturellement bien adapté au contrôle des systèmes à structure variable caractérisés par la commutation, les convertisseurs de puissance sont intrinsèquement des systèmes à structure variable. Il est donc approprié d'appliquer le contrôle **SMC** aux convertisseurs de puissance [40]. De plus, le contrôle **SMC** offre une excellente capacité de traitement des grands signaux, ce qui est important pour les convertisseurs DC-DC. Etant donné que la conception des contrôleurs de modulation de largeur d'impulsion (**PWM**) conventionnels est basée sur les petits signaux, les convertisseurs contrôlés fonctionnent de manière optimale uniquement pour des conditions spécifiques [41] et échouent souvent à fonctionner de façon satisfaisante avec de grandes variations paramétriques ou de charges [42-43-44]. En remplaçant les contrôleurs **PWM** linéaires par des contrôleurs **SMC** (non

linéaires), les convertisseurs de puissance peuvent obtenir une meilleure régulation et des performances dynamiques pour une plage de fonctionnement plus large.

Le principe de la commande par mode glissant est de contraindre l'état du système à atteindre une hyper surface donnée dans l'espace d'état et à y rester. Cette hyper surface divise l'espace d'état en deux (pour une commande mono variable, ou pour chaque composante du vecteur d'état pour une commande multi variable).

L'objectif est de forcer le système en question à atteindre l'état de référence. Une fois que les états du système atteignent la surface de glissement, ce dernier se trouve en régime glissant. Tant que les conditions du régime glissant restent assurées, les dynamiques du système sont insensibles aux perturbations extérieures et aux variations paramétriques.

Présentation de la structure variable à régime glissant [45]

Le concept d'algorithme à structure variable, à régime glissant et à commande discontinue peut s'énoncer ainsi (Fig.II.1) : on applique à l'entrée de l'actionneur une commande $u(t)$ fournie par un algorithme utilisant une fonction s (fréquemment linéaire) de la sortie $y(t)$ et de ses dérivées (ou de l'erreur en sortie $e = y - y_d$ et des dérivées de l'erreur), fonction appelé par abus de langage **surface**. La surface $s = 0$ peut être une droite ou une hyper surface selon l'ordre du système à commander, dans l'espace des phases de la sortie (ou l'espace des phases de l'erreur en sortie). La dynamique du système à commander est alors définie par $s = 0$ au lieu d'être définie par la transmittance entre la sortie $y(t)$ et l'entrée $u(t)$.

La commande comprend en général deux termes ($u = u_{eq} + u_c$) : un terme continu appelé commande équivalente $u_{eq}(t)$ correspondant au régime glissant idéal pour lequel non seulement le point de fonctionnement reste sur la surface mais aussi (pour lequel la dérivée de la fonction de la surface reste nulle) et un terme de commutation $u_c = -k \cdot \text{sign}(s)$ qui impose l'attractivité de la surface.

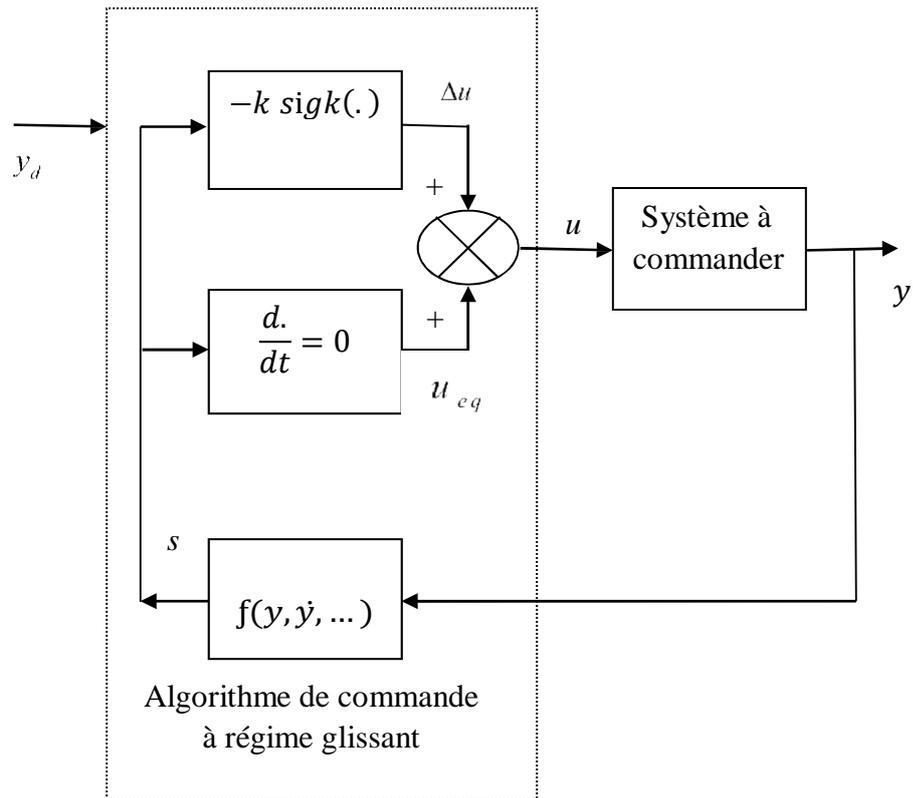


Fig.II.1. Schéma de principe d'un système mono-variable commandé en position y par un algorithme à régime glissant

Définition 1

Une surface $s = 0$ est attractive pour un domaine de convergence donné si toute trajectoire évoluant dans le domaine d'attraction est dirigée vers cette surface.

Définition 2

Une surface $s = 0$ est invariante si toute trajectoire débutant dans cette surface ou atteignant cette surface, ne peut en sortir et évolue donc sur cette surface.

Si l'état du système est du côté ε^+ de l'espace d'état (ou du côté ε^-), il rejoindra forcément la surface $s = 0$. Cette surface est donc appelée surface glissante et le mouvement sur cette surface est un mode glissant dont l'équation détermine la dynamique désirée du système.

Conception de la commande par mode glissant:

La conception des régulateurs par mode glissant prend en charge les problèmes de stabilité et réalise les performances désirées d'une façon systématique. La mise en œuvre de cette méthode de commande nécessite trois étapes:

- le choix de la surface.
- l'établissement des conditions d'existence.
- la détermination de la loi de commande.

Choix de la surface de glissement:

Le choix de la surface de glissement concerne non seulement le nombre nécessaire de ces surfaces mais également leurs formes. Ces deux facteurs dépendent simultanément de l'objectif visé et de l'application en question.

Soit un système défini par l'équation d'état non linéaire de la forme:

$$\begin{aligned} \dot{x}^{(n)} &= f(x) + g(x)u \\ y &= x \end{aligned} \quad (\text{II.1})$$

Où : $x^{(n)}$ est la $n^{\text{ième}}$ dérivée de x en fonction du temps, u la commande du système et $x = [x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)}]^T$ le vecteur d'état.

Dans l'équation (II.1), $f(x)$ et $g(x)$ ne sont pas connus mais la limite supérieure et le signe de $g(x)$ sont connus. Notre but est d'atteindre un état désiré $y_d = [y_d, \dot{y}_d, \dots, y_d^{(n-1)}]$ en présence des incertitudes du modèle sur $f(x)$ et $g(x)$. On définit le vecteur de l'erreur de poursuite comme $e = y - y_d = [e, \dot{e}, \dots, e^{(n-1)}]^T$. Une surface de glissement $s(t)$ variant en fonction du temps dans l'espace d'état \mathfrak{R}^n est donnée par: **[46]**

$$s(t) = \left(\frac{d}{dt} + \sigma \right)^{n-1} e \quad (\text{II.2})$$

Où σ est une constante strictement positive et $s(t)$ un scalaire.

Sachant que la condition initiale est donnée par $y_d(0) = y(0)$, le problème de poursuite de l'état désiré $x(t) = x_d(t)$ revient à maintenir les états du système sur la surface $s(t)$ pour tout $t \geq 0$.

La solution unique de $s(t) = 0$ est $e = 0$.

La commande u est choisie de telle sorte que l'existence du mode glissant est établie et que $s\dot{s} \leq 0$.

Un choix particulier est donné par l'équation (II.3):

$$\frac{1}{2} \frac{d}{dt} s^2(t) \leq -\eta |s(t)|, \quad \eta \geq 0 \quad (\text{II.3})$$

L'équation (II.3) [47] qui est appelée condition d'attraction, force les trajectoires d'état à se diriger vers la surface de glissement comme il est indiqué en Fig. II.2.

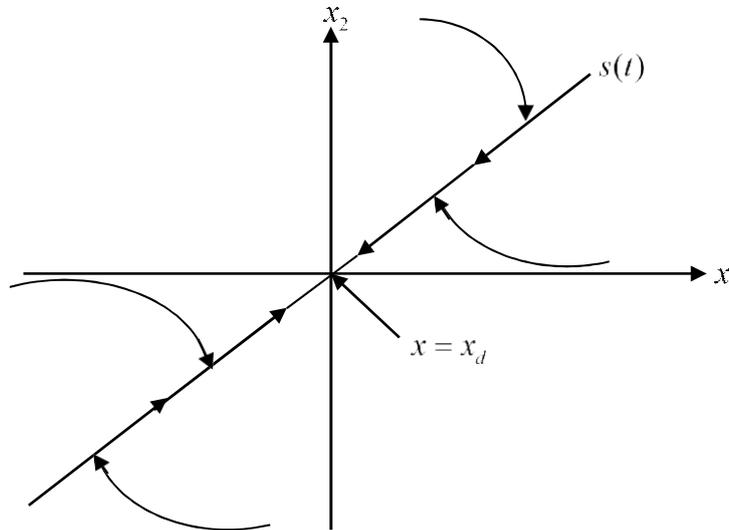


Fig. II.2.Exemple d'une surface de glissement

On assume que $s(0) \neq 0$ et on définit t_f comme étant le temps nécessaire à une trajectoire pour atteindre la surface s .

L'équation (II.3) peut être réécrite comme:

$$\frac{d}{dt} s(t) \leq -\eta \quad (\text{II.4})$$

En intégrant (II.4) de $t = 0$ à $t = t_f$ on obtient:

$$s(t_f) - s(0) \leq -\eta(t_f - 0) \quad (\text{II.5})$$

Vu que $s(t_f) = 0$, l'équation (II.5) deviendra:

$$t_f \leq s(0)/\eta. \quad (II.6)$$

t_f peut aussi être obtenu en considérant le cas où $s(0) \neq 0$, ce qui va nous mener à:

$$t_f \leq |s(0)|/\eta \quad (II.7)$$

L'équation (II.7) garantit que si les trajectoires sont à l'extérieur de $s(t)$, elles atteindront la surface de glissement dans un temps fini inférieur à $|s(0)|/\eta$. Lorsque la surface de glissement $s = 0$ est atteinte, l'erreur tend vers zéro ($x = x_d$) exponentiellement avec une constante de temps égale à $(n-1)/\sigma$.

Conditions d'existence de la convergence:

Ce sont des critères qui permettent aux différentes dynamiques du système de converger vers la surface de glissement indépendamment des perturbations externes. Il existe deux considérations pour assurer le mode de convergence.

Condition d'attractivité[48]:

Cette condition permet de donner à la surface de glissement une dynamique de convergence vers zéro. Elle est exprimée par:

$$\begin{aligned} \dot{s}(x) &\leq 0 \quad \text{si } s(x) > 0 \\ \dot{s}(x) &\geq 0 \quad \text{si } s(x) < 0 \end{aligned} \quad (II.8)$$

Elle peut donc être formulée comme:

$$\dot{s}(x)s(x) \leq 0 \quad (II.9)$$

L'inégalité (II.9) est appelée condition d'attractivité. Elle est globale mais elle n'est pas suffisante pour assurer une convergence en temps fini vers la surface de glissement.

Pour assurer une convergence de $s(x,t)$ vers 0 en un temps fini, une condition plus forte doit être respectée. Dans le cas des modes glissants classiques, on utilise généralement la condition d'attractivité non-linéaire dite condition de 5-attractivité.

$$s(x)\dot{s}(x) \leq -\eta|s(x)| \quad (II.10)$$

Fonction de Lyapunov

La fonction de Lyapunov est une fonction scalaire positive $V(x)$ qui est fonction des variables d'état du système. La loi de commande est choisie telle que la dérivée de la fonction de Lyapunov $\dot{V}(x)$ soit négative. L'idée est de choisir une fonction scalaire $s(x)$ pour garantir l'attraction de la variable à contrôler vers sa valeur de référence puis définir une fonction de Lyapunov comme suit:

$$V(x) = \frac{1}{2} s^T(x) s(x) \quad (\text{II.11})$$

On voit d'après l'équation (II.11) que le carré de la distance entre un point donné du plan de phase et la surface de glissement diminue tout le temps, contraignant la trajectoire du système à se diriger vers la surface à partir des deux côtés de cette dernière. Cette condition suppose un régime glissant idéal ou la fréquence de commutation est infinie [48].

La fonction de Lyapunov est définie positive de manière évidente et sa dérivée est:

$$\dot{V}(x) = s(x) \dot{s}(x) \quad (\text{II.12})$$

Pour que la fonction $V(x)$ puisse décroître, il suffit d'assurer que sa dérivée soit négative. Ceci n'est vérifié que si la condition (II.9) est vérifiée.

Méthode de la commande équivalente [49].

Cette méthode consiste à admettre qu'en mode de glissement tout se passe comme si le système était piloté par une commande u_{eq} , dite commande équivalente qui permet de maintenir l'état du système sur la surface $s = 0$.

a) Synthèse de la loi de commande

Une fois la commande équivalente déterminée, la dynamique du système peut être décrite par la substitution de u_{eq} dans l'équation d'état. En se basant sur la méthode d'Utkin, le calcul de la commande équivalente s'effectue en prenant en considération les conditions d'invariance suivantes :

$$\begin{cases} s(x) = 0 \\ \dot{s}(x) = 0 \end{cases} \quad (\text{II.13})$$

Prenons l'exemple d'un système non-linéaire avec une seule entrée, représenté par l'équation d'état suivante:

$$\dot{x} = f(x, t) + g(x, t).u \quad (II.14)$$

L'existence du mode glissant implique que:

$$\dot{s}(x, t) = \frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial s}{\partial x} \cdot \frac{\partial x}{\partial t} = 0 \quad (II.15)$$

En remplaçant (II.14) dans (II.15), on trouve :

$$\frac{\partial s}{\partial t} \cdot \dot{x} = \frac{\partial s}{\partial t} (f(x, t) + g(x, t).u_{eq}) = 0 \quad (II.16)$$

En supposant que $\frac{\partial s}{\partial t} (g(x, t))$ est inversible, on a :

$$u_{eq} = \left[\frac{\partial s}{\partial t} (g(x, t)) \right]^{-1} \cdot \frac{\partial s}{\partial t} (f(x, t)) \quad (II.17)$$

Par conséquent, on peut déterminer le mouvement sur la surface de glissement pour tout instant :

$$\dot{x} = \left[\begin{array}{c} \left[\frac{\partial s}{\partial t} \quad \right]^{-1} \frac{\partial s}{\partial t} \\ \left[\text{I} - g(x, t) \left[\frac{\partial s}{\partial t} g(x, t) \right] \right] \frac{\partial s}{\partial t} \end{array} \right] f(x, t) \quad (II.18)$$

Il est remarquable de constater que les dynamiques du système en mode glissant sont d'ordre inférieur au système original. Cette réduction d'ordre est aisément explicable par le nombre de variables d'état contraintes par la relation $s(x) = 0$.

Commande de commutation

En général, l'élaboration de la commande en utilisant cette approche est simple et directe. Cependant, comme nous l'avons vu plus haut, la mise en œuvre directe de cette loi de commande entraîne la commutation des systèmes à très haute fréquence donnant un effet de vibration indésirable dans le système [50][51][37]. Cela la rend inapte pour certaines applications qui considèrent ceci comme un bruit à haute fréquence indésirable. La commande discontinue ou de commutation qui permet de garantir la condition d'attractivité, et qui est

responsable du glissement peut prendre plusieurs formes. La forme la plus simple est celle d'un relais.

$$u_c = \mathfrak{s}(x) = -k \text{sign}(s(x)) \quad (\text{II.19})$$

où k est une constante positive.

$$u_c(t) = \begin{cases} k & \text{si } s(x,t) > 0 \\ 0 & \text{si } s(x,t) = 0 \\ -k & \text{si } s(x,t) < 0 \end{cases}$$

II.3 Commande par mode glissant d'un convertisseur DC-DC

II.3.1. Commande par mode glissant d'un convertisseur abaisseur

Les équations dynamiques d'un convertisseur abaisseur s'écrivent comme:

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L} (u V_m - V_o) \\ \frac{dV_o}{dt} = \frac{1}{C} \left(i_L - \frac{V_o}{R} \right) \end{cases} \quad (\text{II.20})$$

Synthèse de la loi de commande

On choisit la surface de glissement suivante:

$$s(t) = \sigma e + \dot{e} \quad (\text{II.21})$$

Avec le coefficient de glissement $\sigma > 0$

Définissons l'erreur de tension à la sortie du convertisseur e et sa dérivée comme:

$$\begin{cases} e = V_{ref} - V_o \\ \dot{e} = -\dot{V}_o \end{cases} \quad (\text{II.22})$$

où V_{ref} , et V_o représentent respectivement la tension de sortie désirée, et la tension de sortie actuelle.

En considérant le modèle du convertisseur abaisseur donné dans (II.20), la surface de glissement peut être exprimée par [52][53]:

$$s(t) = -\frac{1}{C}i_L + \begin{pmatrix} 1 & -\sigma \\ RC & \end{pmatrix} V_o + \sigma V_{ref} \quad (II.23)$$

et sa dérivée est donnée par:

$$\dot{s}(t) = \begin{pmatrix} \frac{1-\sigma}{RC^2} \\ \end{pmatrix} i_L - \begin{pmatrix} \frac{L-\sigma}{R^2C^2L} \\ \end{pmatrix} V_o - \begin{pmatrix} V_{in} \\ LC \end{pmatrix} \quad (II.24)$$

Le signal de commande u est constitué de deux composants: u_c et u_{eq} .

L'existence du mode glissant implique que $s=0$, donc la commande équivalente peut être calculée comme:

$$u_{eq} = \alpha_1 i_L - \alpha_2 V_o \quad (II.25)$$

où

$$\alpha_1 = \frac{L-\sigma}{RCV_{in}}$$

$$\alpha_2 = \frac{L-\sigma}{R^2CV_{in}}$$

Considérons la fonction de Lyapunov définie par:

$$V = \frac{1}{2} s^2 \quad (II.26)$$

Pour assurer la stabilité du système et rendre la surface de glissement attractive, la dérivée temporelle de V doit être définie négative. Cette condition mène à:

$$s\dot{s} = s \begin{pmatrix} -\frac{V_{in}}{LC} u_c \end{pmatrix} \quad (II.27)$$

Pour satisfaire cette condition, la commande de commutation u_c est définie comme:

$$u_c = k \text{sign}(s) \quad (II.28)$$

Un convertisseur abaisseur est utilisé pour illustrer ce type de commande.

Résultats de simulation

Les résultats de simulation sont donnés pour un convertisseur abaisseur présentant des éléments parasites dont les paramètres ont été choisis comme suit:

$$L = 1mH, C = 1mF, R = 10\Omega, R_m = 1.8\Omega, R_C = 13m\Omega, V_{in} = 12V, V_{ref} = 5V, V_d = 0.82V.$$

a) Fonctionnement nominal avec une référence constante de 5 volts

On remarque qu'il y a un bon suivi de la tension de référence, malgré une petite erreur en régime dynamique comme il est montré dans les figures II.3 et II.4.

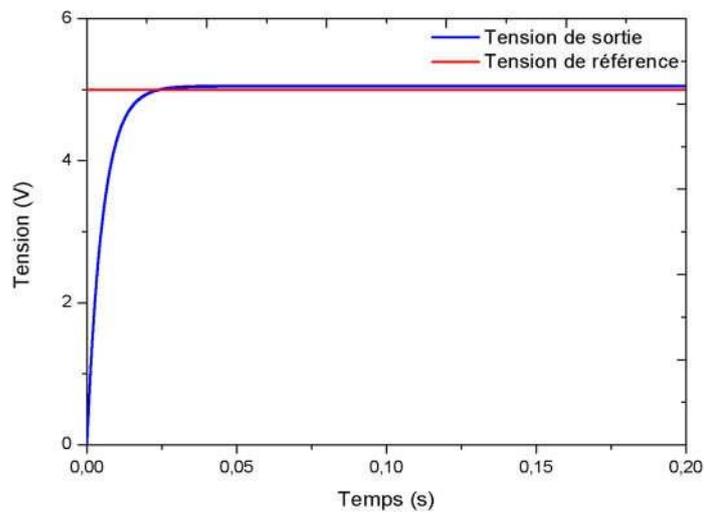


Fig. II.3 Evolution de la tension de sortie et de la tension de référence par SMC

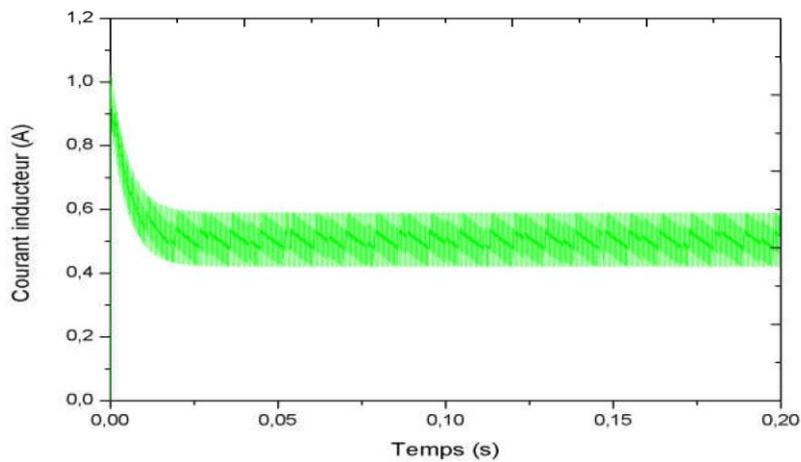


Fig. II.4. Evolution du courant inducteur par SMC

b) Variation alternée de la tension de référence de 16 à 12 volts

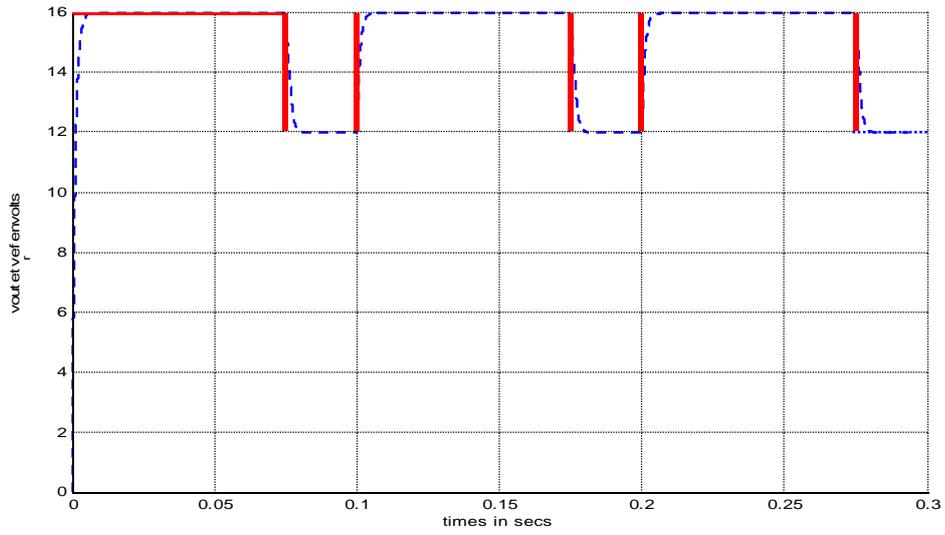


Fig. II.5 Evolution de la tension de sortie pour variation de la référence.

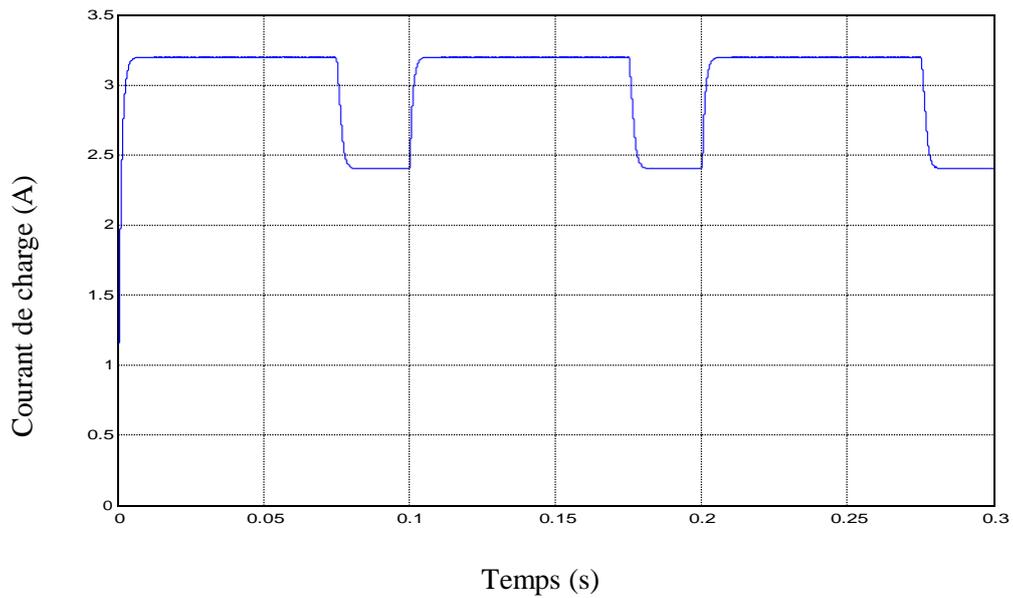


Fig. II.6 Evolution du courant de charge par SMC pour une variation de référence.

c) Variation alternée de la charge de 10 à 16 ohms pour une tension de référence de 5 volts.

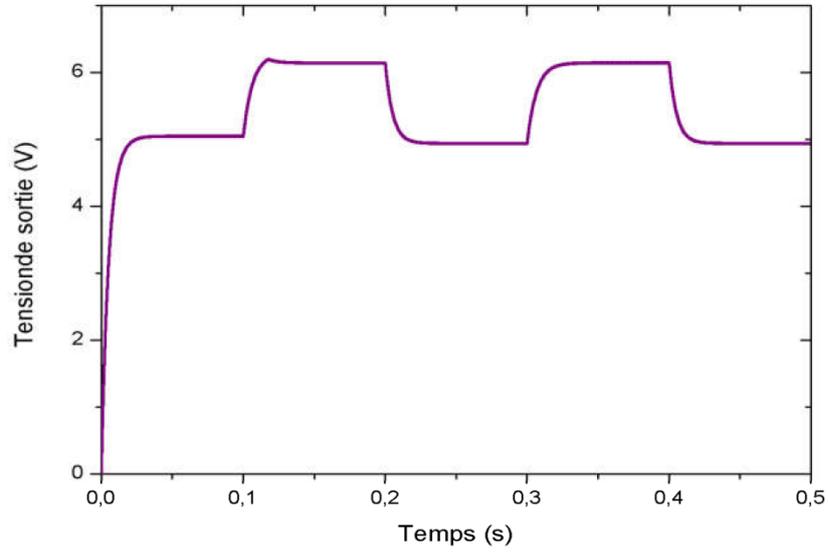


Fig. II.7 Evolution de la tension de sortie pour variation de charge.

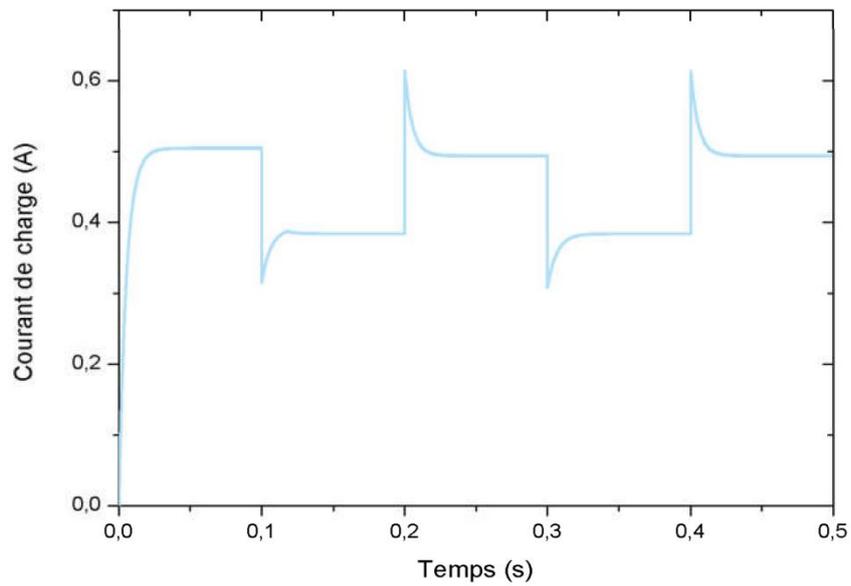


Fig. II.8 Evolution du courant de charge pour variation de charge.

d) Variation alternée de la tension de référence de 14 à 10 à 14 à 10 volts et variation de charge entre 5 et 2.5 ohms.

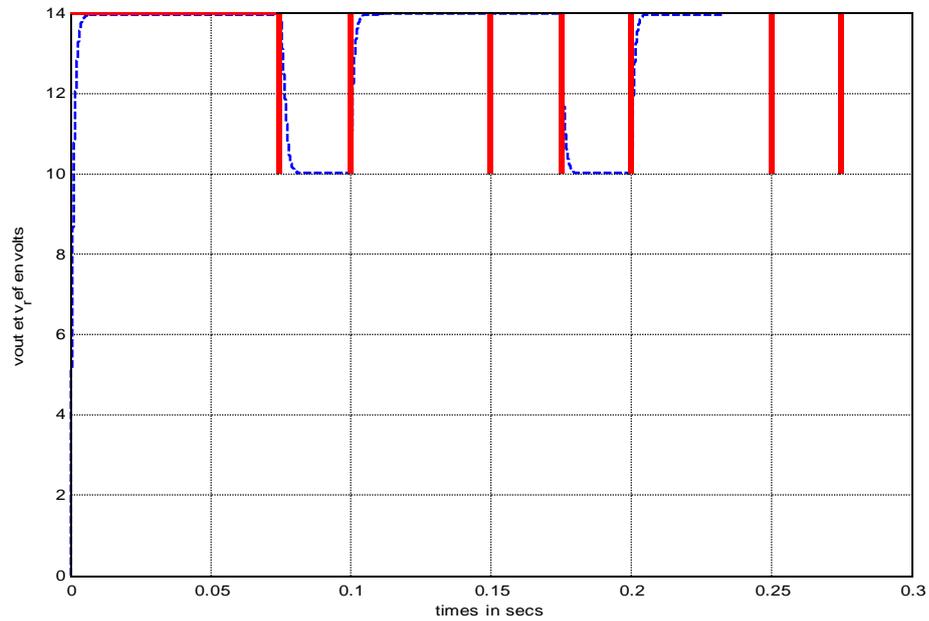


Fig. II.9 Evolution de la tension de sortie pour une variation de référence et de charge

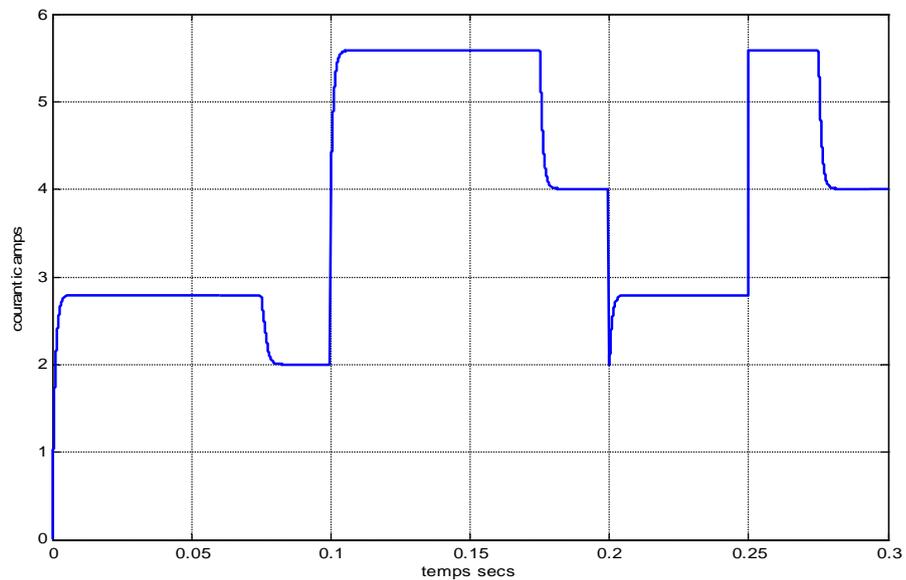


Fig. II.10 Evolution du courant de charge pour une variation de référence et de charge

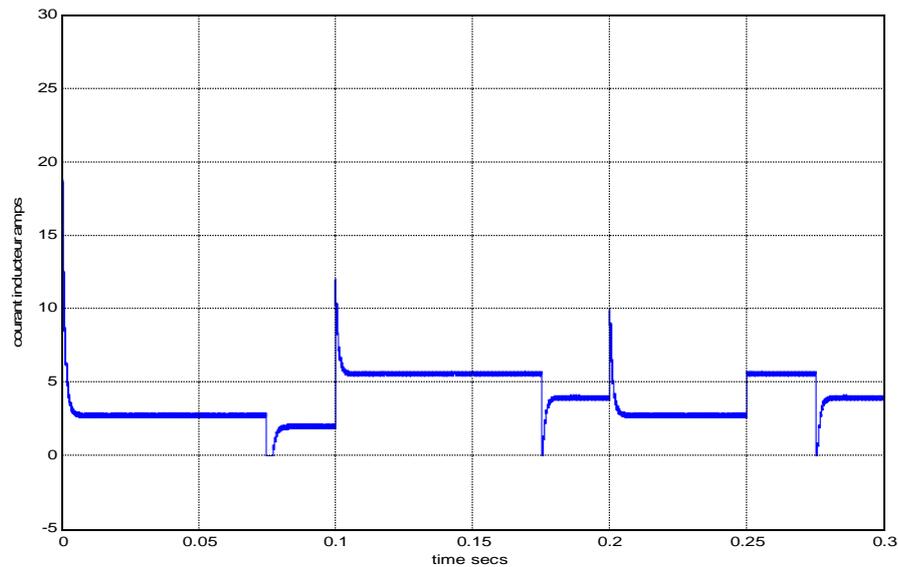


Fig. II.11 Evolution du courant de l'inducteur pour une variation de référence et de charge

Différents scénarios ont été utilisés pour tester la robustesse de la commande par mode glissant classique et les résultats de simulation sont illustrés dans les figures Fig. II.5 et Fig. II.6. On peut y observer une bonne poursuite du signal de référence qui varie de 16 à 12 à 16 à 12 volts par la tension de sortie. Le courant de charge du convertisseur abaisseur par commande **SMC** avec variation de la tension de référence de 16 à 12 à 16 à 12 volts est montré en Fig.II.6.

Un autre test est réalisé dans le but d'évaluer les performances en robustesse en faisant varier de façon alternée la tension de référence de 14 à 10 à 14 à 10 volts simultanément avec une variation de charge entre 5 et 2.5ohms.

Les figures Fig. II.9 à Fig. II.11 illustrent un bon suivi et ce malgré les conditions de test extrêmes utilisées, à savoir une variation de référence ayant lieu simultanément avec une variation de charge.

II.4. Conclusion

Pour répondre aux défis présentés par le contrôle des convertisseurs DC-DC, on a opté la technique de commande robuste: la commande par mode glissant. Dans ce chapitre alors nous avons présenté la commande par mode glissant introduite comme moyen de contrôle des systèmes à structure.

Le choix de la surface, l'établissement des conditions d'existence et la détermination de la loi de commande ont fait l'objet de ce chapitre.

CHAPITRE III

COMMANDE PAR MODE GLISSANT AVANCEE D'UN SYSTEME PHOTOVOLTAIQUES

Introduction

Ce chapitre présente une procédure améliorée de la conception d'un contrôleur par mode glissant (Commande par mode glissant avancée SMCA) pour un système photovoltaïque (PV), qui force la tension PV à suivre une référence fournie par un algorithme MPPT externe et atténue les perturbations causées par les changements climatiques. Le contrôleur proposé présente des avantages par rapport aux solutions existantes qui reposent essentiellement sur la conception des contrôleurs linéaires conviennent au point fixe.

Principes de base de la technique de contrôle proposée

La solution proposée dans ce mémoire réside dans l'application d'une approche avancée de la technique par mode glissant pour stabiliser le système PV tout en atténuant les oscillations provoquées au niveau de la tension de sortie [54][55].

Le schéma présenté sur la fig.III.1 est utilisé pour mettre en œuvre la surface de glissement, où la tension de référence V_{ref} est fournie par un contrôleur P&O.

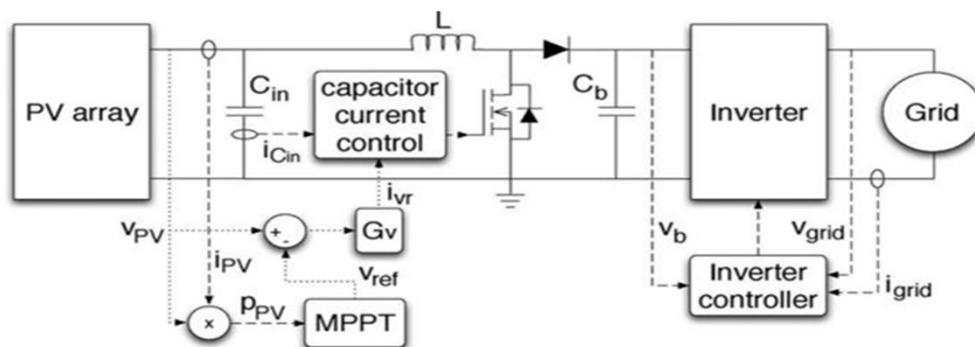


Fig.III.1. Schéma du système basé sur la commande du courant du condensateur d'entrée.

Le rôle du condensateur d'entrée C_{in} est d'atténuer l'ondulation de commutation affectant le courant d'induction, de sorte que le contrôle du courant PV est obtenu en agissant sur le courant d'inductance moyen. En appliquant la loi du courant de Kirchhoff au nœud du circuit reliant le panneau photovoltaïque, l'inductance d'entrée (L) du convertisseur et le condensateur C_{in} :

$$i_{PV} = i_{cin} + i_L \quad (III.1)$$

Ensuite, le courant de référence inductive i_{Lref} est donné par

$$i_{Lref} = i_{pV} + i_{vr} \quad (III.2)$$

Où i_{pV} est le courant PV réel et i_{vr} est la sortie du compensateur $G_{v1}(s)$. En utilisant (III.1) et (III.2), la simplification suivante est donc possible.

$$i_{Lref} = i_{Cin} + i_L + i_{vr} \quad (III.3)$$

$$e_i = i_{Cin} + i_L + i_{vr} - i_L \quad (III.4)$$

$$e_i = i_{Cin} + i_{vr} \quad (III.5)$$

Où l'objectif de contrôle $i_{Lref} = i_L$ conduit à $e_i = 0$, de sorte qu'il est équivalent à:

$$i_{Cin} = -i_{vr} \quad (III.6)$$

Le boucle de contrôle interne vise maintenant à réguler le courant de capacité d'entrée $i_{Cin} = 0$, comme montre la Fig.III.1, $u(t)$ dépend seulement de la valeur instantanée d' i_{Cin} par conséquent, un seul capteur de courant est nécessaire pour la mise en œuvre pratique

Conception de la commande MPPT par mode glissant

La conception des régulateurs par mode glissant prend en charge les performances désirées d'une façon systématique, la mise en œuvre de cette méthode de commande nécessite de remplir trois conditions : existence, attractivité et convergence [56]. Dans cette application, la surface de glissement est donnée en (III.7)

$$\psi = -i_{Cin} - i_{vr} \quad (III.7)$$

Il est défini de manière à atteindre l'objectif du contrôleur satisfaisant la condition de l'équation (III.6). La condition d'existence garantit que le signal de commande u soit présent dans la dérivée de la fonction de commutation [57].

$$\psi = 0 \quad (III.8)$$

$$\frac{d\psi}{dt} = 0 \quad (III.9)$$

À partir de la première condition (III.8), et en tenant compte de l'équation caractéristique du condensateur d'entrée

$$i_{Cin} = C_{in} \cdot \frac{dv_{VP}}{dt} \quad (III.10)$$

La condition suivante est obtenue

$$\frac{dv_{pv}}{dt} = - \frac{i_{vr}}{C_{in}} \quad (III.11)$$

En mode glissant (III.11) la relation entre la tension PV et le courant de référence de sorte permet de concevoir la compensation de tension.

À partir de la deuxième condition de mode glissant (III.9) en considérant que

$$i_{Cin} = i_{pv} - i_L$$

On obtient

$$\frac{d\psi}{dt} = \frac{di_L}{dt} - \frac{di_{pv}}{dt} - \frac{di_{vr}}{dt} = 0 \quad (III.12)$$

En négligeant les résistances série et parallèle du panneau PV, à savoir $R_s = 0$ et $R_{sh} = \infty$ le courant PV peut être approché par l'expression

$$i_{pv} = i_{sc} - I_R \cdot e^{\alpha \cdot v_{pv}} \quad (III.13)$$

i_{sc} le courant de court-circuit pour un niveau d'irradiation donné, qui est approximativement proportionnel à l'éclairement énergétique $i_{sc} = k_s \cdot S$ [58]. Dans les conditions de fonctionnement normalisé et en utilisant la valeur de αI , qui est donnée dans toute fiche technique d'un module PV. Ce courant est exprimé la sensibilité du courant de court-circuit par rapport à la température [58]

$$i_{sc} = i_{sc,STC} \cdot \frac{S}{S_{STC}} \cdot \left(1 + \alpha_I \cdot \left(T_{pv} - T_{PV,STC} \right) \right) \quad (III.14)$$

La conductance différentielle G est exprimée comme suit :

$$\left. \begin{aligned} \frac{di}{dt} &= -G \cdot \frac{dv_{pv}}{dt} + \frac{di_{sc}}{dt} \\ G &= a \cdot I_R \cdot e^{a \cdot v_{pv}} \end{aligned} \right\} \quad (III.15)$$

En conséquence, la condition d'existence en mode glissant peut être ainsi réécrite comme

$$\frac{di_L}{dt} + G \cdot \frac{dv_{pv}}{dt} - \frac{di_{sc}}{dt} - \frac{di_{vr}}{dt} = 0 \quad (III.16)$$

En outre, le modèle classique de convertisseur est donné par la relation suivante :

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{v_{pv}}{L} - \frac{v_b \cdot (1-u)}{L} \quad (III.17)$$

Où V_b est la tension de sortie du convertisseur dc/dc. La valeur $u = 1$ est utilisée dans l'état fermé du MOSFET ON et la valeur $u = 0$ dans l'état ouvert de MOSFET.

Étant donné que $\Psi = 0$ est requis, en tenant compte (III.1) et (III.6), si $\Psi < 0$, ou $i_{Cin} > i_{vr}$, alors le courant d'inducteur i_L doit être augmenté afin de diminuer i_{Cin} , de sorte que de (III.17) $u = 1$ est requis. D'autre part, si $\Psi > 0$, ou $i_{Cin} < i_{vr}$, alors le courant d'induction doit être réduit pour augmenter i_{Cin} , de sorte que de (III.17) $u = 0$ est nécessaire. Enfin, il est [59]

$$u = 1 \text{ Si } \Psi < 0 \quad (III.18)$$

$$u = 0 \text{ Si } \Psi > 0 \quad (III.19)$$

Afin d'obtenir les contraintes qui doivent être remplies pour assurer le fonctionnement en mode glissant, la technique de la commande équivalente [60] peut être utilisée. De (III.11) et (III.17), l'équation de la commande équivalente est obtenue:

$$\frac{V_{PV}}{L} - \frac{V_b \cdot (1-U_{eq})}{L} + G \cdot \frac{dv}{dt} - \frac{di_{sc}}{dt} - \frac{di_{vr}}{dt} = 0 \quad (III.20)$$

En déduisant que le point d'équilibre est défini par $\{i_{PV} = i_L, i_{vr} = 0\}$. L'éclairage énergétique, $\frac{di_{vr}}{dt}$ et $\frac{ds}{dt} = \left(\frac{1}{k_s} \right) \left(\frac{di_{sc}}{dt} \right)$, assurant le fonctionnement en mode glissant. Les deux variations, qui

affectent le niveau d'éclairement énergétique et le signal de référence, ne se produisent pas en même temps. Par conséquent, les limites qui sont déterminées au moyen de l'analyse qui suit sont les l'analyse qui suit sont les variations maximales admises sur l'éclairement énergétique et le signal de référence.

Ainsi, en mettant $\frac{di_{vr}}{dt} = 0$ dans (III.20), l'effet des variations i_{sc} assurant que $0 < u_{\acute{e}q} < 1$ conduit à l'inégalité

$$0 < \frac{V_{pv} - L \frac{di_{sc}}{dt}}{vb} < 1 \quad (III.21)$$

de sorte que les deux inégalités suivantes assurent que la commande en mode glissant du convertisseur est préservée

$$v_{pv} - L \frac{di_{sc}}{dt} > 0 \quad (III.22)$$

$$V_{pv} - L \frac{di_{sc}}{dt} < vb \quad (III.23)$$

Enfin, on obtient la contrainte à respecter sur la pente de l' i_{sc} pour garantir le bon fonctionnement en mode glissant obtenu

$$\frac{v_{pv} - vb}{L} < \frac{di_{sc}}{dt} < \frac{v_{pv}}{L} \quad (III.24)$$

En raison de la proportionnalité entre i_{sc} et l'éclairement énergétique S, la condition (III.24) peut être traduite en une contrainte pour la variation maximale de l'éclairement énergétique que la technique MPPT est capable de suivre

$$\frac{v_{pv} - v_b}{L.K_s} < \frac{ds}{dt} < \frac{v_{pv}}{L.k_s} \quad (III.25)$$

L'inégalité (III.25) révèle que la variation maximale de l'éclairement énergétique qui peut être suivie sans perte de la commande à mode glissant est limitée par les dérivées du courant de l'inducteur dans les états de fonctionnement du MOSFET. Cela signifie que la valeur de l'inductance L doit être correctement conçue afin de suivre le profil et les variations de

l'irradiante attendues en fonction des applications spécifiques. Par exemple, les centrales photovoltaïques stationnaires seront soumises à des variations d'irradiante lentes, alors que dans les applications PV dédiées à la mobilité durable, il faut suivre les variations rapides de l'irradiante.

En fixant $\frac{di_{sc}}{dt} = 0$ dans (III.20), l'effet des variations sur i_{vr} peut être pris en compte, de sorte

que la contrainte suivante $\frac{di_{vr}}{dt}$ est obtenue:

$$\frac{v_{pv} - v_b}{L} \square \frac{di_{vr}}{dt} > \frac{v_{pv}}{L} \quad (III.26)$$

Ce qui montre à nouveau que la valeur maximale de la pente i_{vr} qui peut être suivie sans manquer la commande en mode glissant. Dans ce cas, le contrôleur de tension peut être conçu pour satisfaire cette contrainte dynamique. Il convient de noter que, en raison de la symétrie de l'expression(III.20), les contraintes (III.25) et (III.26) présentent les mêmes limites.

Lorsque les deux conditions (III.24) et (III.26) sont remplies, le convertisseur est en mode glissant, et par conséquent la dynamique du système est donnée par (III.11). La fonction de transfert $G_{v/i}(s)$ entre la tension du condensateur d'entrée, c'est-à-dire la tension PV, v_{Cin} et la référence de courant i_{vr} fournie est donnée par :

$$G_{\frac{v}{i}}(s) = -\frac{1}{C_m S} \quad (III.27)$$

Cette expression permet de souligner l'une des principales caractéristiques de la technique de contrôle proposée. En effet, il est à noter que la fonction de transfert (III.27) ne dépend d'aucun PV paramètres du générateur, de sorte que l'approche de contrôle peut avoir les mêmes performances quel que soit le type/la taille du tableau PV connecté aux bornes d'entrée du convertisseur dc/dc. Cette fonction n'est pas réalisée par des approches de contrôle classiques [61].

Conception du contrôleur PI

La fonction G_v (Fig.III.1) est un compensateur PI traditionnel. En prenant en compte la fonction de transfert PI $G_v(s)$ donnée en (III.28) et l'erreur de tension $E_v(s)$ défini en (III.29) qui compense le signe négatif apparaissant en (III.27). La fonction de transfert en boucle fermée $T(s)$ du système peut être exprimée en (III.30)

$$G_v(s) = k_p + \frac{k_i}{s} \quad (III.28)$$

$$E_v(s) = -(V_{ref}(s) - V_{Cin}(s)) \quad (III.29)$$

$$T(s) = \frac{V_{pv}(s)}{V_{ref}(s)} = \frac{k_p s + k_i}{C s^2 + k_p s + k_i} \quad (III.30)$$

La fonction de transfert $T(s)$ en (III.30) est conçue par la comptabilité pour une relation classique entre le temps de stabilisation T_s de la tension en boucle fermée et la période de commutation minimale T_{sw} .

La structure $T(s)$ donne les relations suivantes :

$$k_p = 2C_{in}\zeta\omega_n \quad (III.31)$$

$$k_i = C_{in}\omega_n^2 \quad (III.32)$$

Il faut souligner que le contrôleur PI conçu permet pour répondre à toutes les performances souhaitées. Un contrôleur proportionnel pur plus simple peut être utilisé, l'erreur étant compensée par l'opération MPPT.

Résultats de simulation

Le système photovoltaïque PV est modélisé et mis en œuvre dans le logiciel Matlab/Simulink afin d'évaluer et de comparer les performances de l'algorithme proposé SMCA par rapport à l'algorithme conventionnel P&O.

Une étude comparative avec des paramètres de simulation strictement identiques est menée. Le système PV est constitué d'un générateur PV de type BP585, d'un convertisseur élévateur DC-DC, d'une charge et du bloc de contrôle MPPT. Les paramètres du module PV BP585 sont présentés dans le tableau III.1. La tension d'entrée du convertisseur DC-DC est réglée sur 18V, la valeur de l'inductance est égale à 22.5mH, le condensateur d'entrée à 132 μ F, le condensateur de sortie à 66 μ F et la charge résistive de sortie à 12 Ω .

Tableau III.1.Spécifications du système

Paramètres	Valeurs numériques
Puissance maximale P_{\max} (W)	84.96
Tension à la puissance maximale V_{MPP} (V)	18
Courant à la puissance maximale I_{MPP} (A)	4.72
Tension du circuit ouvert V_{CO} (V)	22.1
Courant de court-circuit I_{SC} (A)	5
Coefficient de température de V_{CO} (% / deg.C)	-0.8
Coefficient de température de I_{CC} (% / deg.C)	0.00065

Plusieurs simulations ont été réalisées en tenant compte des variations des conditions climatiques à savoir l'éclairement et la température. Les résultats obtenus sont présentés pour une durée de 1 seconde. Chaque figure présente une comparaison des caractéristiques du système PV régit par les approches SMCA et P&O. Un zoom est fait dans deux endroits, le premier au démarrage du profil pour illustrer le temps de réponse et le deuxième pour montrer les oscillations autour du MPP.

Cas 1 : Conditions climatiques standards

Dans ce cas, les paramètres de simulation (la température T et l'éclairement S) sont maintenus constants $T = 25^{\circ}C$ et $S = 1000 W/m^2$.

Les figures III.2-III.7 montrent les résultats de simulation de la puissance P_{PV} , du courant I_{PV} , de la tension V_{PV} , de la tension de sortie V_0 du convertisseur, du rapport cyclique (signal de commande) de la commande P&O ainsi que de la surface de glissement de la commande SMCA.

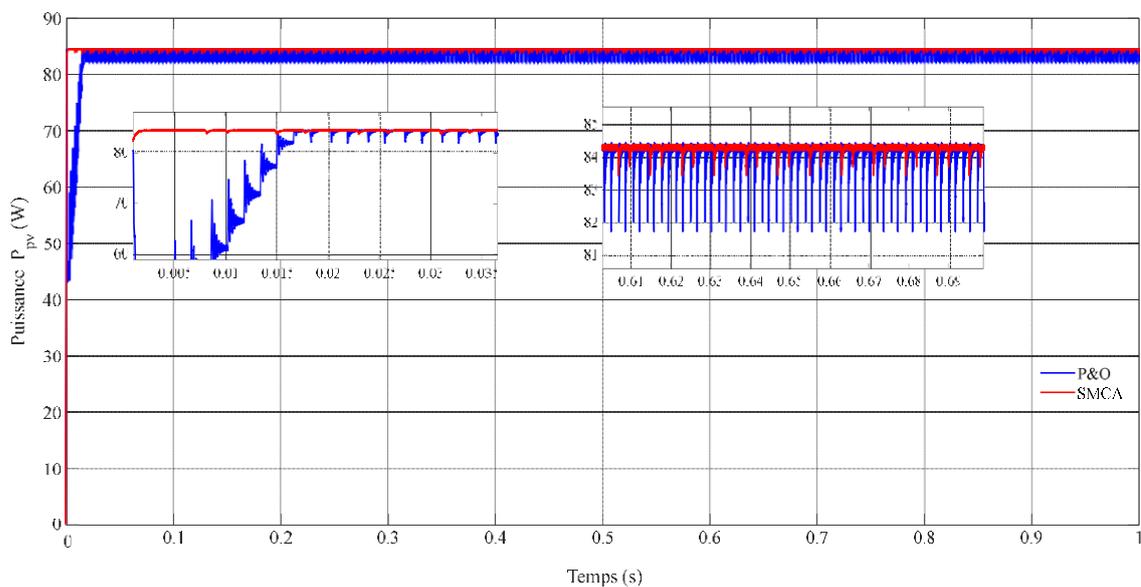


Fig.III.2. Evolution de la puissance P_{PV} du panneau

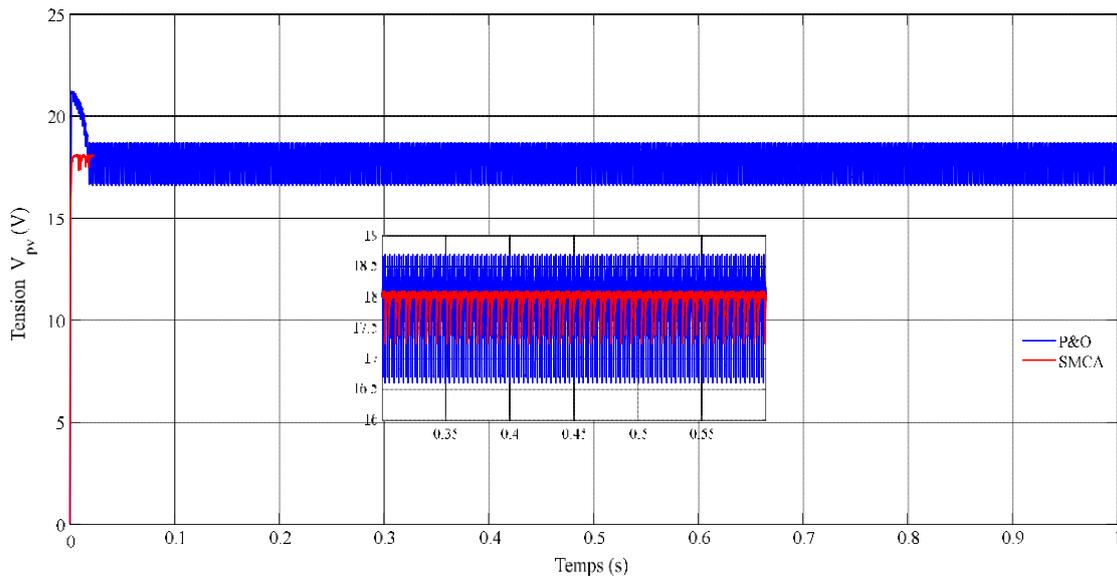


Fig. III.3. Evolution de la tension V_{pv} du panneau

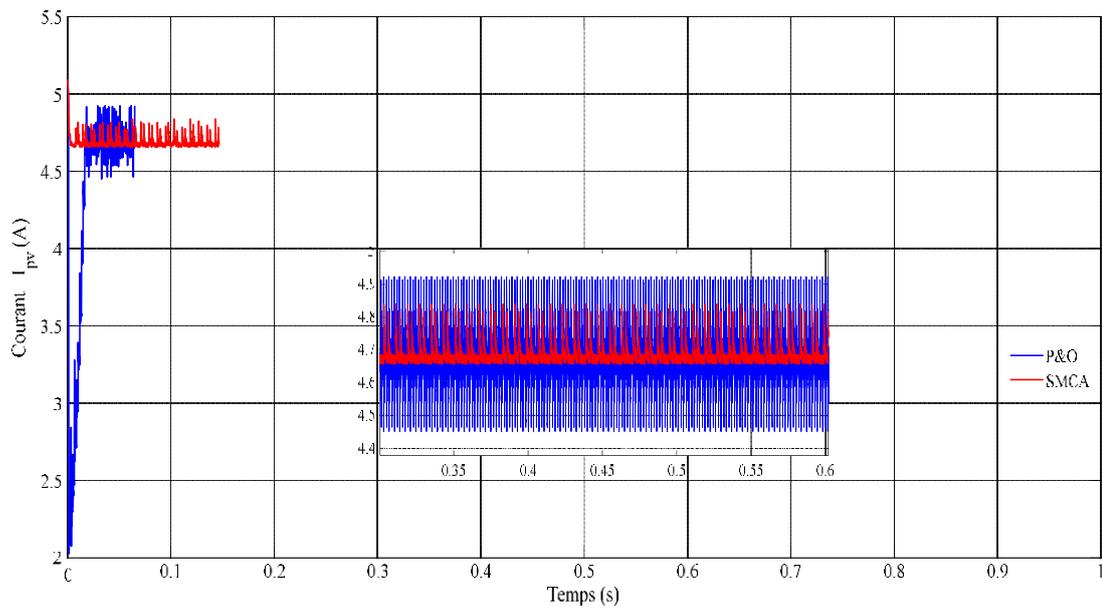


Fig.III.4. Evolution du courant I_{pv} du panneau

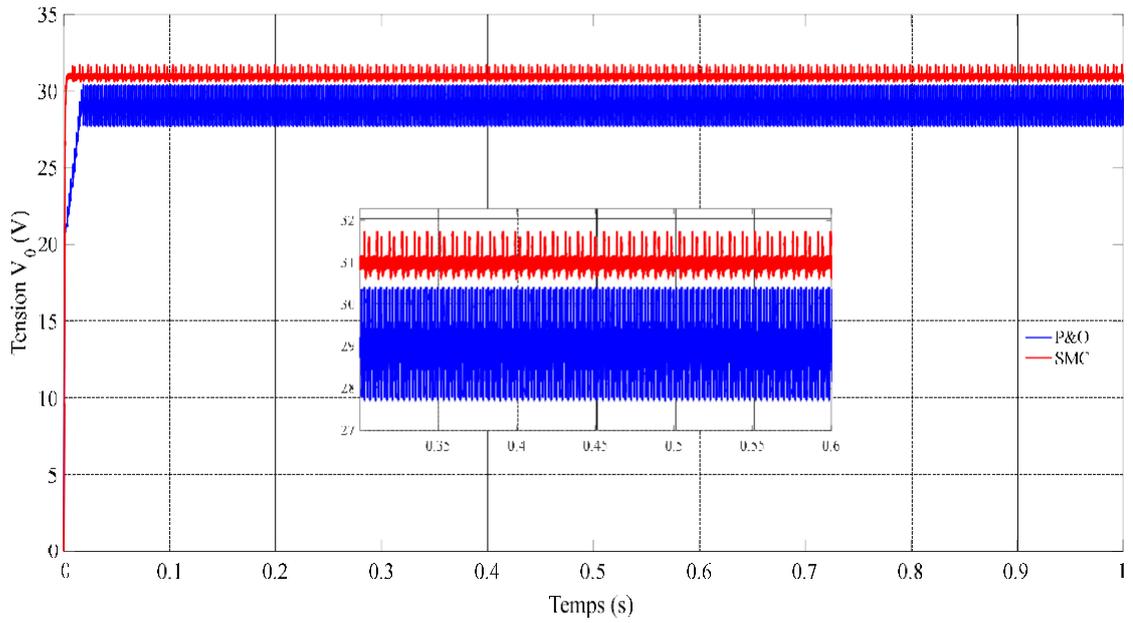


Fig.III.5. Evolution de la tension de sortie V_0

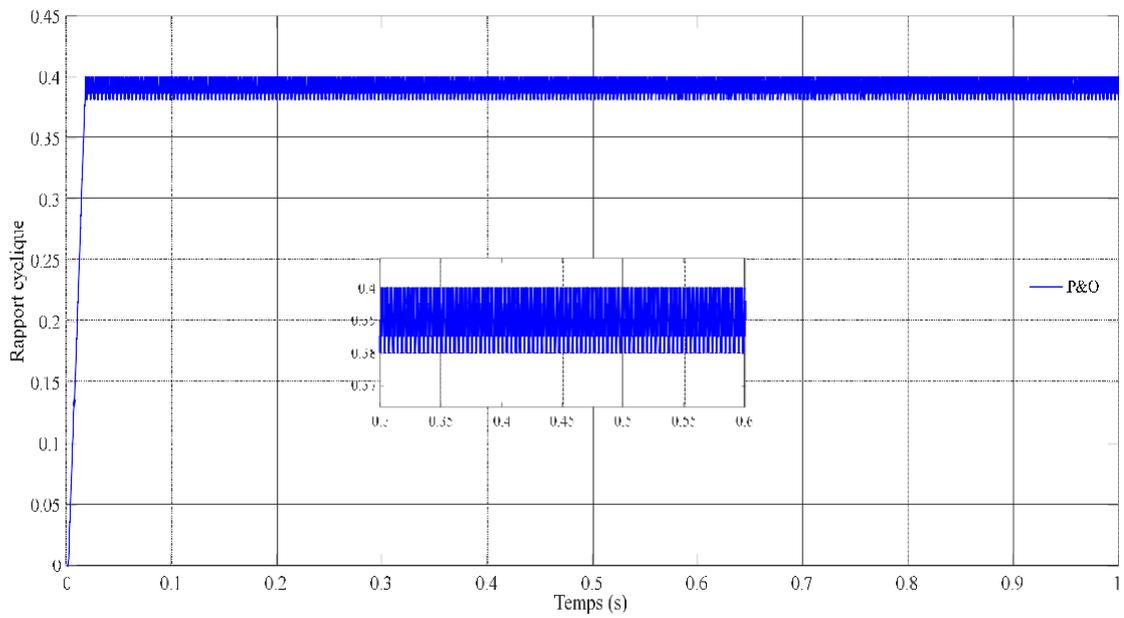


Fig.III.6. Evolution du rapport cyclique du convertisseur.

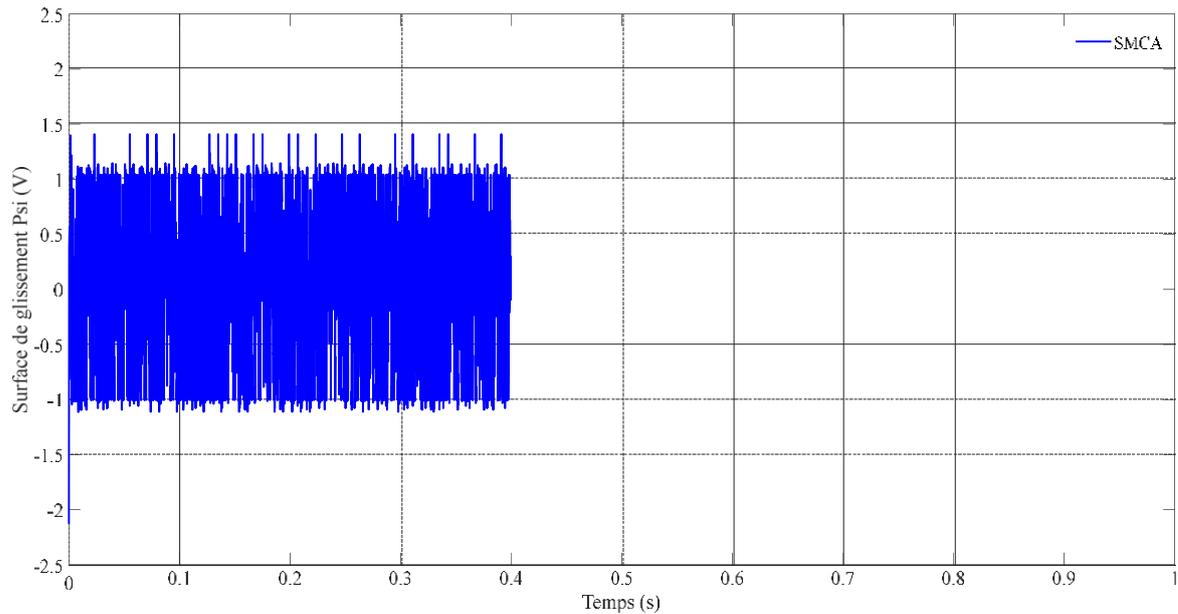


Fig.III.7. Evolution de la surface de glissement

D'après ces résultats, on constate que les deux approches utilisées (P&O et SMCA) sont en mesure de suivre correctement le MPP. En plus, le SMCA fournit un temps de réponse le plus court (2 ms).

La technique P&O présente cependant un comportement dynamique caractérisé par d'importantes oscillations qui ont un effet négatif sur le fonctionnement du système PV (qui se traduit physiquement par une perte de puissance). Ces oscillations dépendent fortement du pas de perturbation. En effet lorsque ce dernier diminue (augmente), le système PV devient lent (rapide) et l'amplitude des oscillations diminue (augmente).

Tableau III.2. Comparaison des performances d'approches étudiées

Algorithme	SMCA	P&O
Temps de réponse (s)	0.002	0.0175
Rendement (%)	99.14	98.53
Oscillation (W)	0.943	2.703

L'objectif de la section suivante est de faire varier les deux paramètres influant sur les chaînes de conversion PV, à savoir les conditions climatiques S et T . Pour chaque test, on garde constant un paramètre et on varie le deuxième par un changement brusque.

Cas 2 : Eclairement variable

Afin de voir l'effet d'une variation de l'éclairement, un profil de référence est appliqué tout en fixant la température à 25°C. Ce profil est illustré sur la figure suivante :

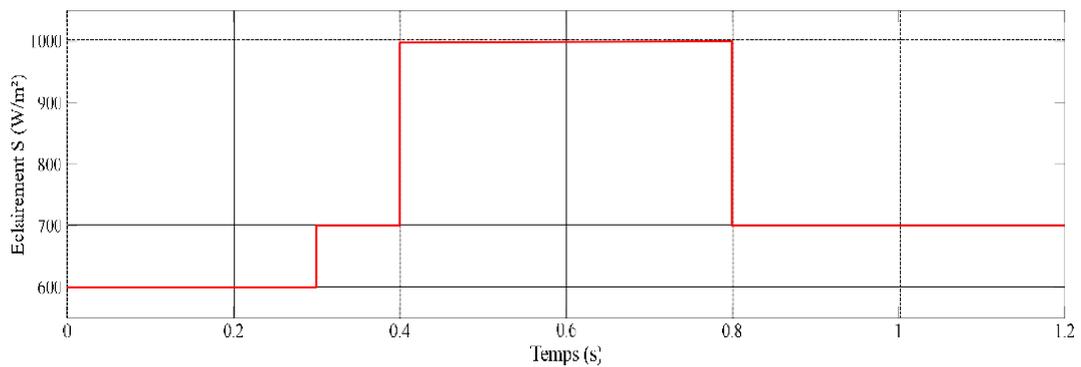


Fig.III.8. Variation de l'éclairement en fonction du temps

Dans ces conditions, les caractéristiques du système PV sont montrées sur la figure suivante :

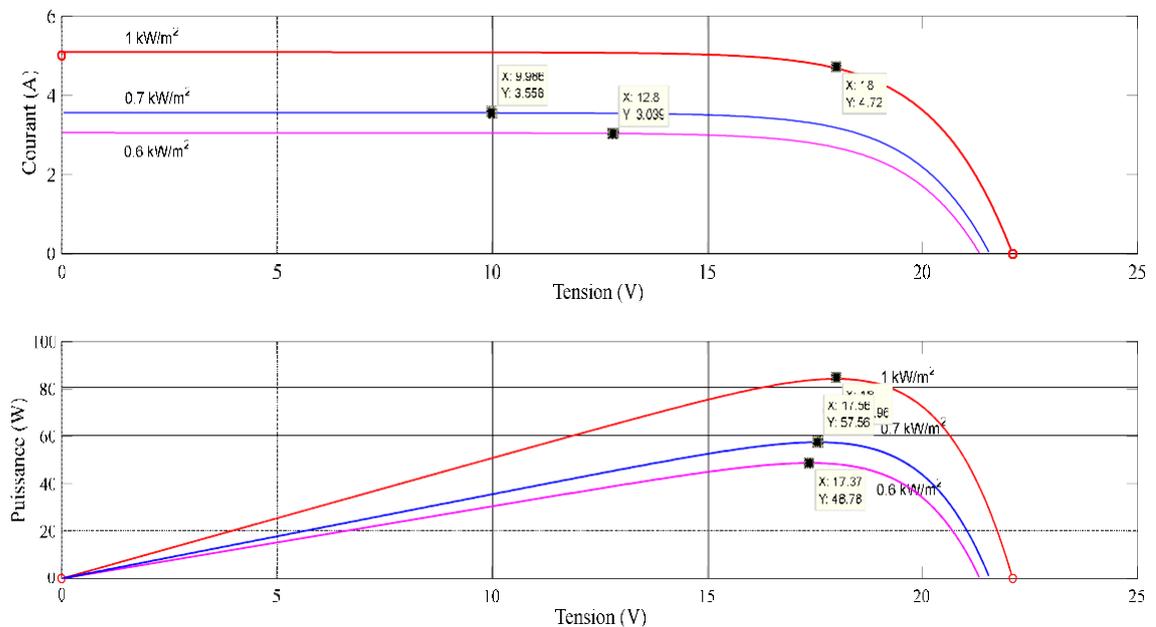


Fig.III.9. Caractéristiques du panneau PV

Les résultats de simulation correspondants sont illustrés sur les figures III.10-III.15. On constate qu'au démarrage du profil, le SMCA traque le PPM avant le P&O d'une durée d'environ 12 ms. De plus, à chaque variation, l'approche P&O présente une perte d'énergie par rapport au SMCA et en régime établi, oscille autour du PPM entre 74.5W et 84W.

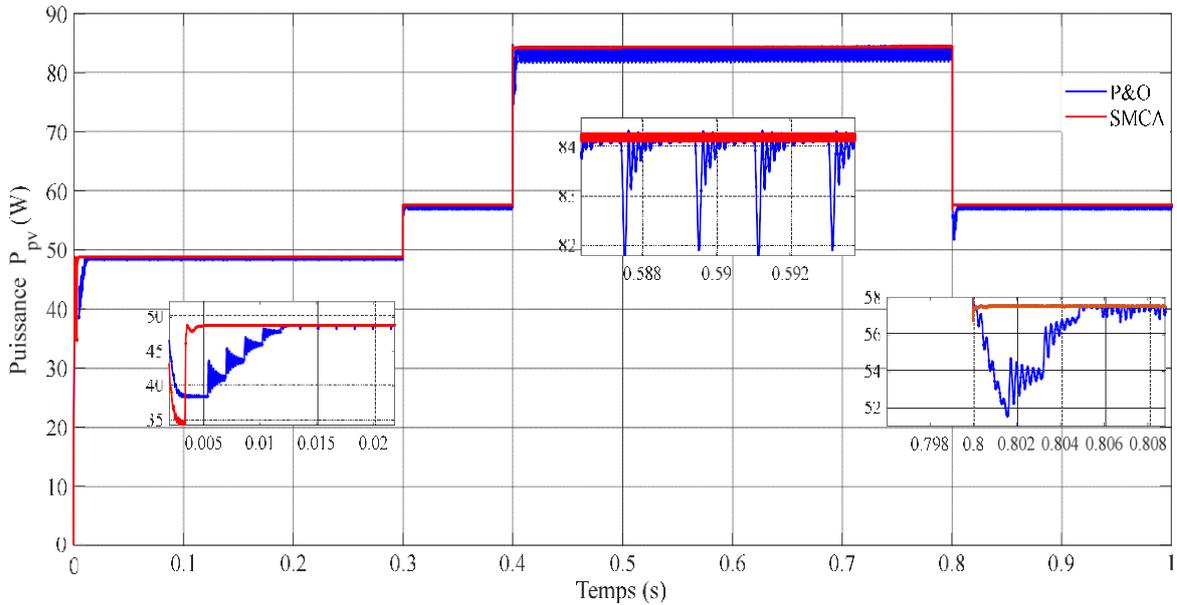


Fig.III.10. Evolution de la puissance P_{PV} du panneau

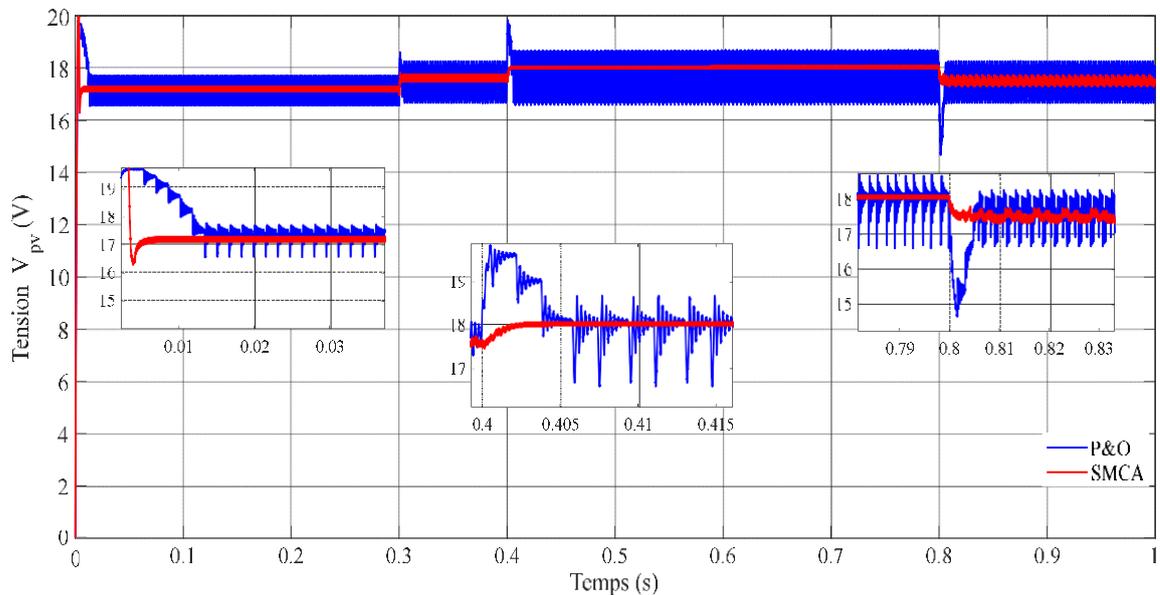


Fig.III.11. Evolution de la tension V_{PV} du panneau

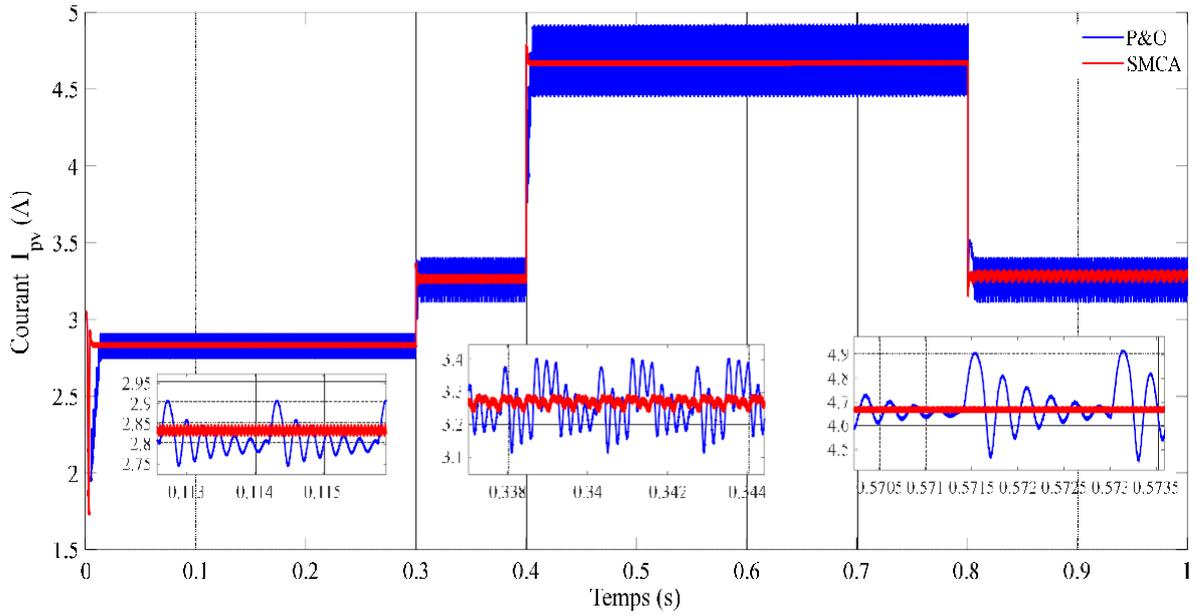


Fig.III.12. Evolution du courant I_{pv} du panneau

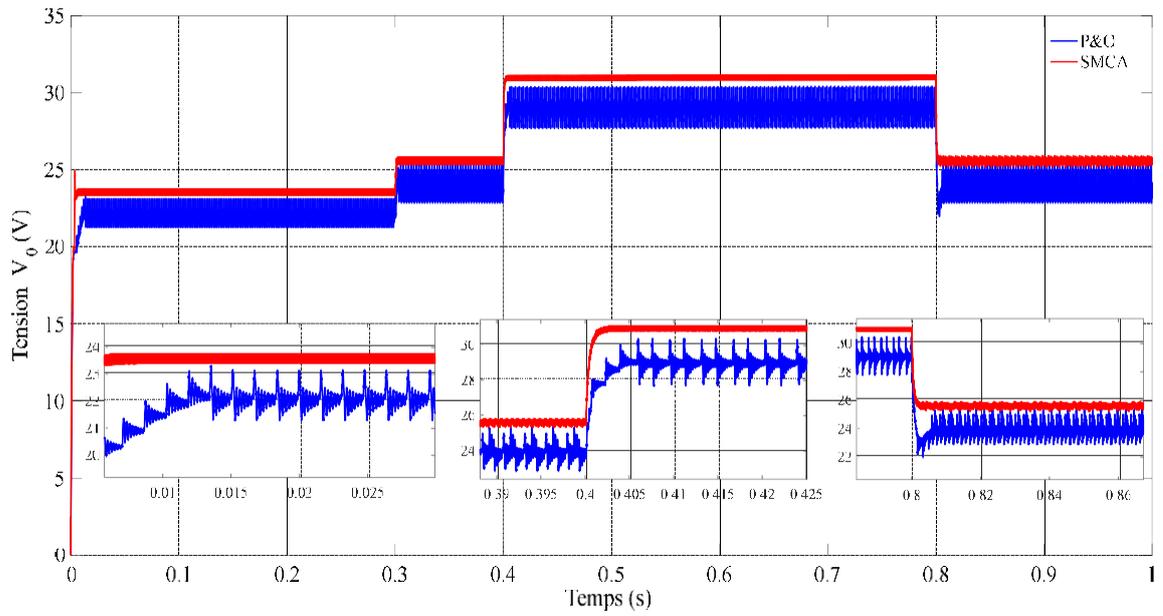


Fig. III.13. Evolution de la tension de sortie V_0

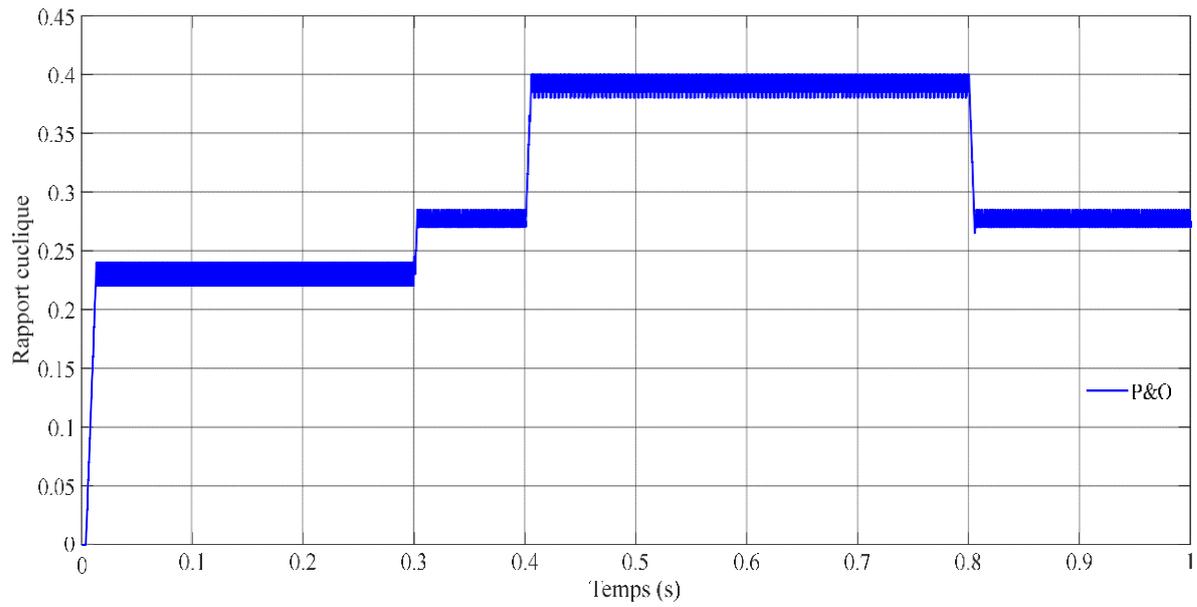


Fig.III.14. Evolution du rapport cyclique du convertisseur

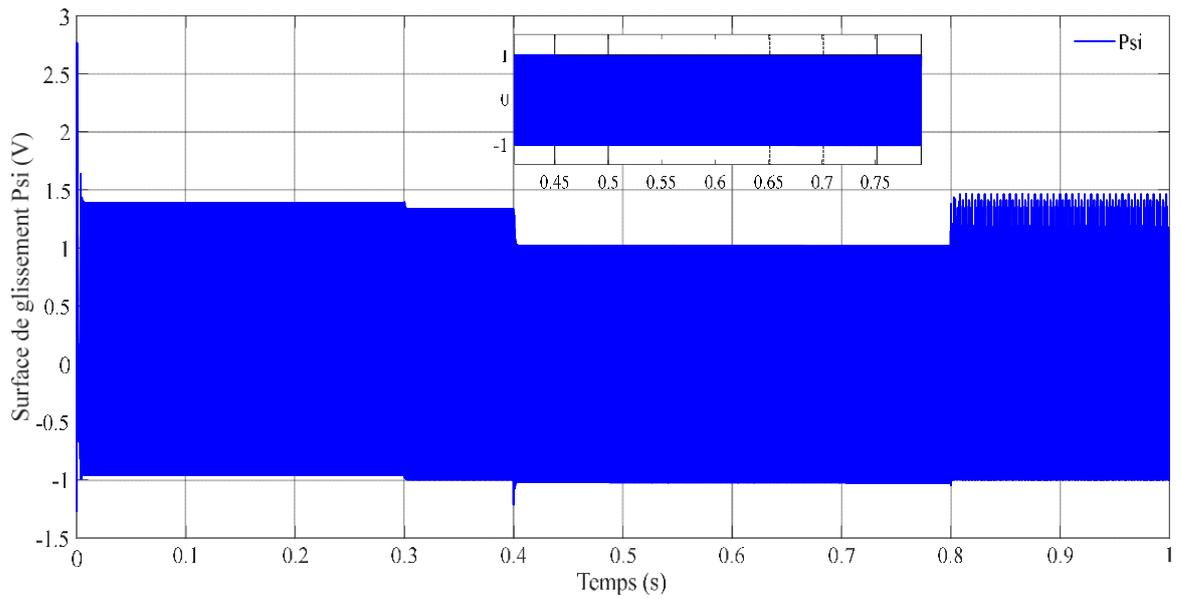


Fig.III.15. Evolution de la surface de glissement

Cas 3 : Température variable

Un autre facteur qui influence la caractéristique du générateur PV est la température T . On maintient le niveau de l'éclairement à une valeur constante (1000 W/ m^2) et on fait varier la température selon la figure suivante :

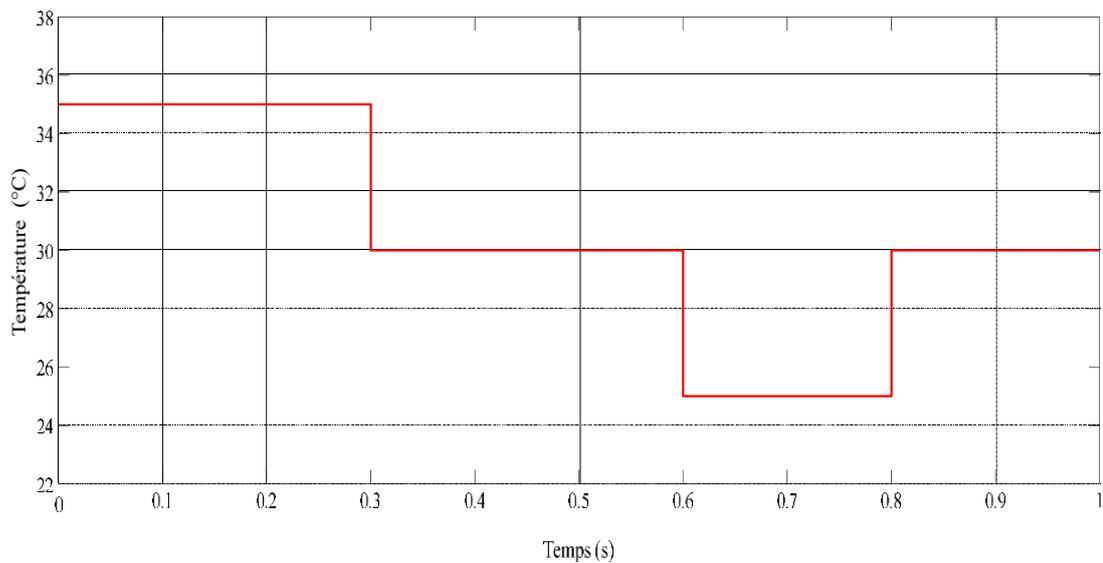


Fig.III.16. Variation de la température en fonction du temps

Les caractéristiques du système PV dans ces conditions sont montrées sur la figure suivante :

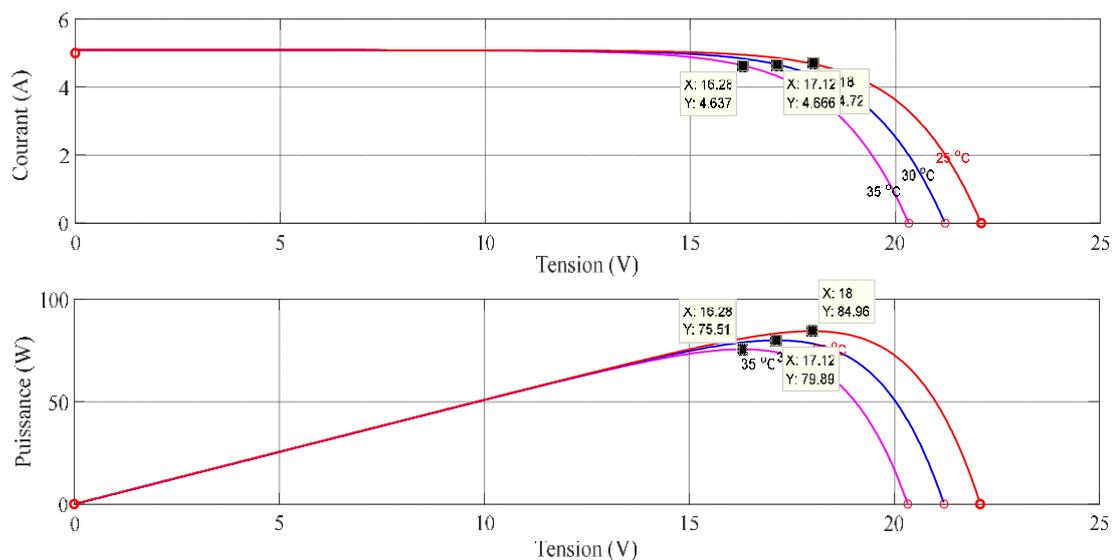


Fig.III.17. Caractéristiques du panneau PV

Les résultats de simulation sont représentés sur les figures III.18- III.22.

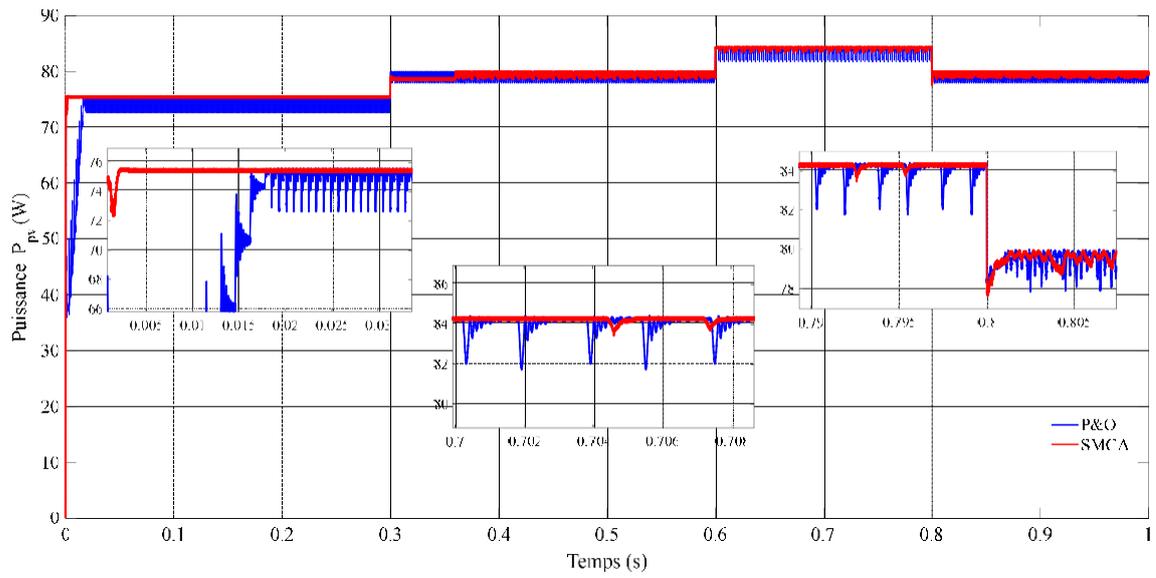


Fig. III.18. Evolution de la puissance P_{PV} du panneau

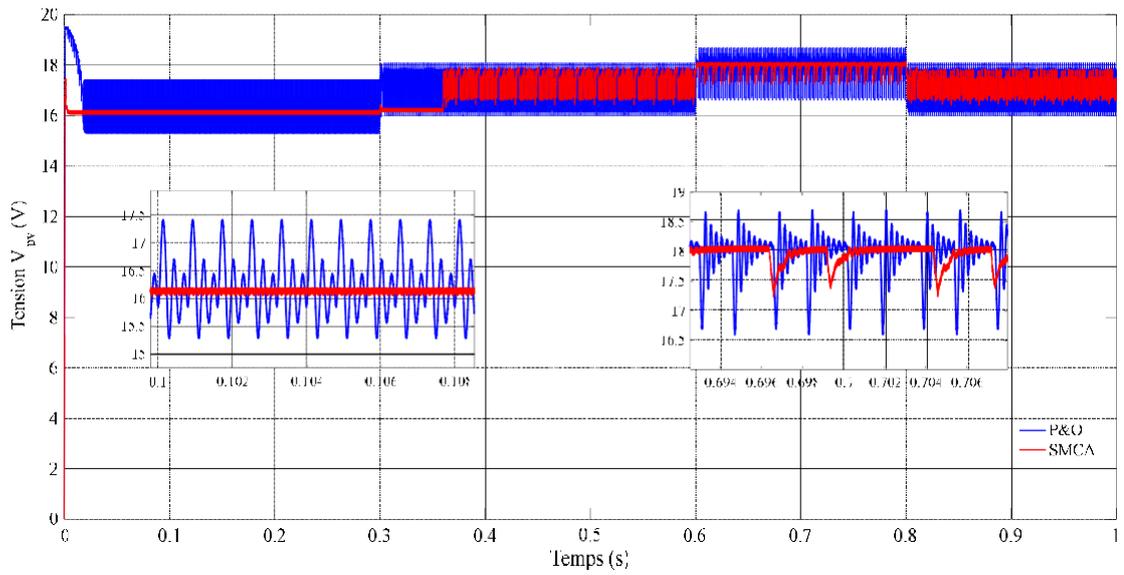


Fig.III.19. Evolution de la tension V_{PV} du panneau

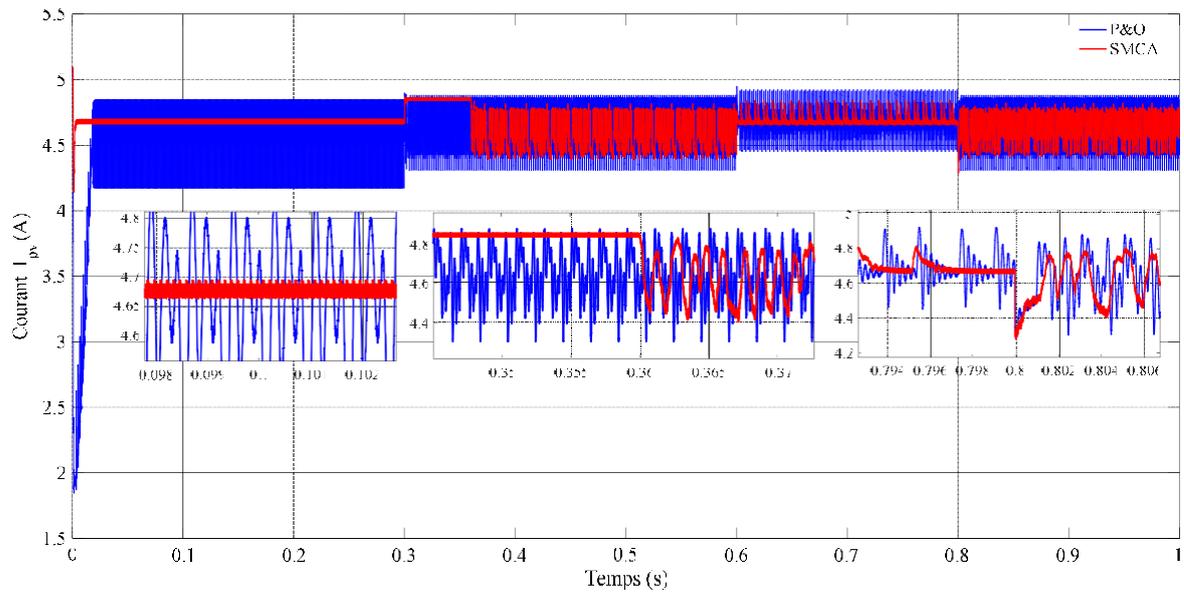


Fig.III.20. Evolution du courant I_{PV} du panneau

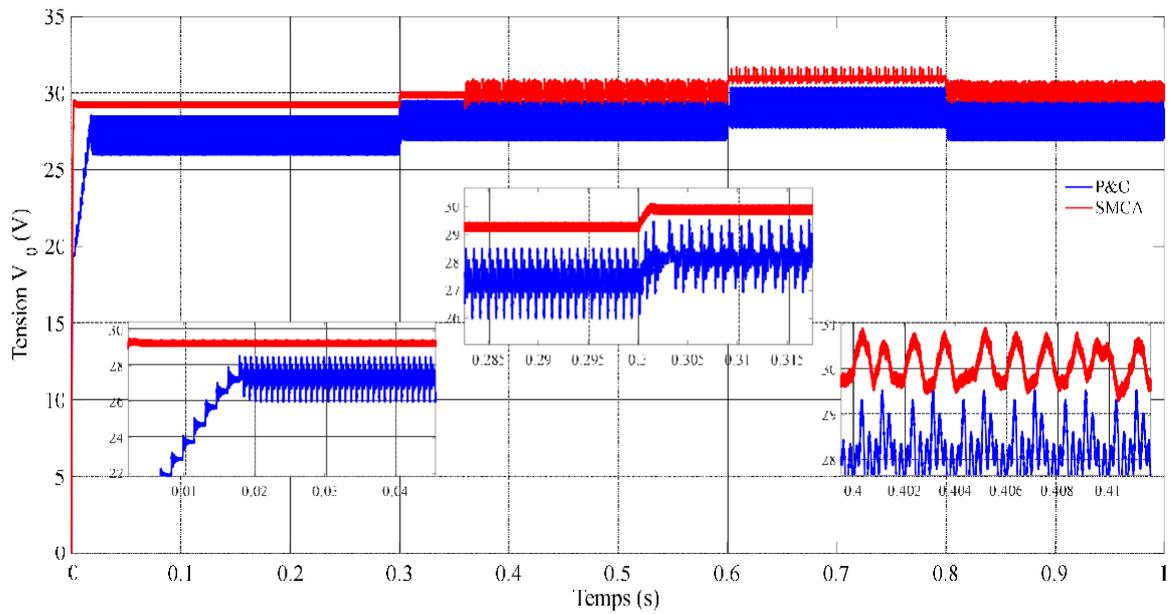


Fig. III.21. Evolution de la tension de sortie V_0

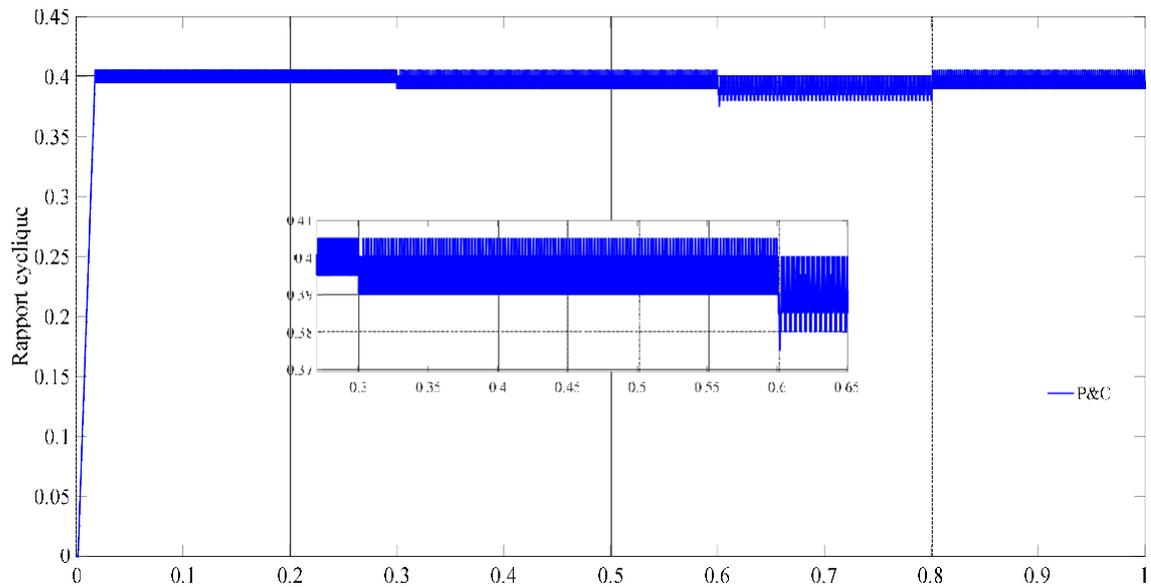


Fig.III.22. Evolution du rapport cyclique du convertisseur

On peut noter que les temps de réponses sont presque les mêmes que ceux de la simulation précédente pour les deux approches. Ils sont d'environ 2 ms et 17.5ms. Lors du régime transitoire, on remarque que la trajectoire du PPM obtenue en appliquant la commande SMCA est meilleure que celle obtenue avec le P&O. En régime permanent, le P&O oscille autour du PPM entre 81.75W et 84.45W.

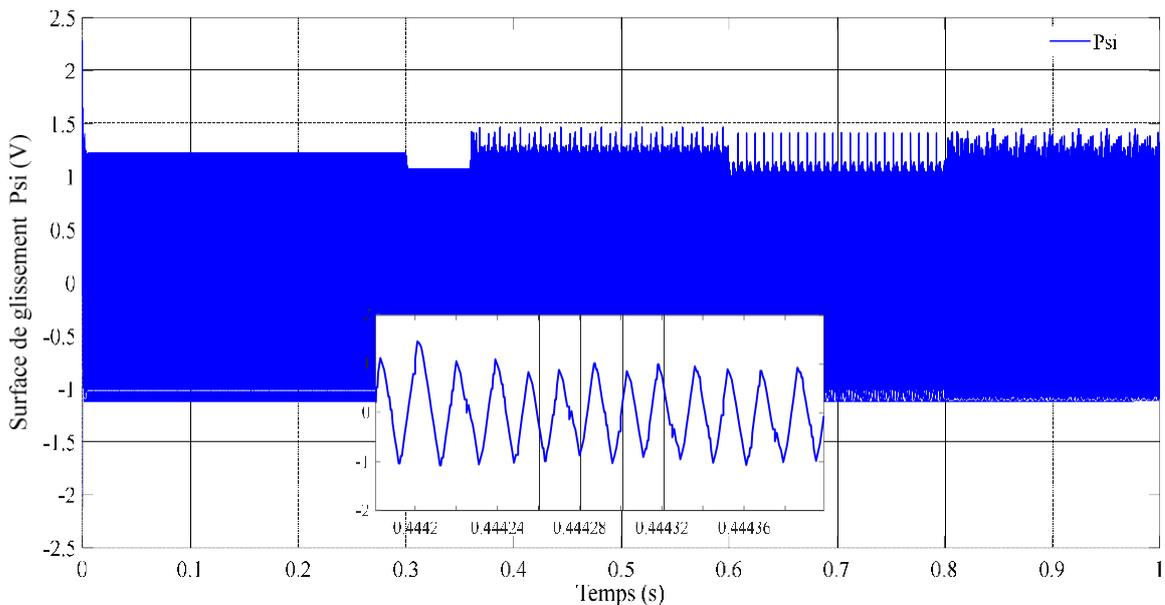


Fig.III.23. Evolution de la surface de glissement.

Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons présenté l'application de la commande MPPT basée sur le mode glissant sur le système photovoltaïque que nous étudions. Comparant avec la méthode P&O, cette commande est très robuste et permet au système de rejoindre son PPM rapidement même face aux changements rapides de l'éclairement.

Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE:

Le travail présenté dans ce mémoire a porté sur la modélisation et la commande d'un système photovoltaïque qui est utilisé pour fournir une puissance électrique propre à travers un convertisseur DC-DC élévateur.

On a proposé une procédure avancée pour la désignation d'une commande MPPT basée sur le mode glissant destinée aux systèmes photovoltaïques. Cette commande permet d'assurer un fonctionnement au PPM et une robustesse vis-à-vis des variations de l'éclairement et de la température et pour atténuer les oscillations provoquées au niveau de la tension de sortie du convertisseur.

Les résultats de simulation ont permis de mettre en évidence les performances et la robustesse de la loi de commande proposée.

Comme perspectives, nous souhaitons valider les commandes utilisées par une implémentation expérimentale tout en essayant de les appliquer aux autres types de convertisseurs DC-DC.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques :

- [1] E. Koutroulis, K. Kalaitzakis, and N. Voulgaris, "Development of a microcontroller-based, photovoltaic maximum power point tracking control system," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 16, no. 1, 2001.S.
- [2] B. Yang, W. Li, Y. Zhao, and X. He, "Design and analysis of a grid-connected photovoltaic power system," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 25, no. 4, 2010.
- [3] R. Khanna, Q. Zhang, W. Stanchina, G. Reed, and Z.-H. Mao, "Maximum power point tracking using model reference adaptive control," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, no. 3, pp. 1490–1499, 2014.
- [4] C. Konstantopoulos and E. KOUTROULIS, "Global maximum power point tracking of flexible photovoltaic modules," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, no. 6, pp. 2817–2828, 2014.
- [5] N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo, and M. Vitelli, "Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 20, no. 4, pp. 963–973, 2005.
- [6] T. ESRAM, J. Kimball, P. Krein, P. Chapman, and P. Midya, "Dynamic maximum power point tracking of photovoltaic arrays using ripple correlation control," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 21, no. 5, 200 .
- [7] R. Mastromauro, M. Liserre, and A. Dell'Aquila, "Control issues in single-stage photovoltaic systems: Mppt, current and voltage control," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 8, no. 2, pp. 241-254,2012.
- [8] T. ESRAM and P. L. Chapman, "Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking Techniques," *IEEE Transactions on energy conversion*, vol. 22, no. 2, pp. 439–449, 2007.
- [9] S.-C. Tan, Y. Lai, and C. Tse, "General design issues of slidingmode controllers in dc-dc converters," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 3, pp. 1160–1174, 2008.
- [10] S. Tan, Y. M. Lai, and C. K. Tse, "General design issues of sliding-mode controllers in dc-dc converters," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 3, pp. 1160–1174, 2008.
- [11] Y. Levron and D. Shmilovitz,"Maximum power point tracking employing sliding mode control," *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 60, no. 3, 2013.
- [12] N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo, and M. Vitelli, "A technique for improving p&o mppt performances of double-stage gridconnected photovoltaic systems," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 11, pp. 4473–4482, 2009.

- [13] Ait-cheikh, « Étude, investigation et conception d’algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques », Thèse de Doctorat, École Nationale Polytechnique, Alger 2007.
- [14] T. Eswam and P. L. Chapman, “Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques,” IEEE Transactions on energy conversion, vol. 22, no. 2, pp. 439–449, 2007.
- [15] J. Chavarria, D. Biel, F. Guinjoan, C. Meza, and J. Negroni, “Energy-balance control of pv cascaded multilevel grid-connected inverters under level-shifted and phase-shifted pwms,” IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 60, no. 1, pp. 98–111, 2013.
- [16] BALLOUTI ADEL, Modélisation et Simulation Comportementale des Systèmes à Energie Renouvelable par VHDL-AMS, thèse de Doctorat, Faculté de Technologie, Département d’électronique, Université Ferhat Abbas-Sétif, pp04-pp06.
- [17]<http://www.energies-renouvelables.org/observ-er/html/inventaire/pdf/15e-inventaire-Chap01-Fr.pdf>.
- [18] https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_hydraulique.
- [19] S.Belakehal, "Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées. aux Energies Renouvelables", thèse de Doctorat, université de Constantine, 2010.
- [20] M. Gapderou, "Atlas Solaire de L’Alg’", Tome, 2, OPU 1983.
- [21] a b Aperçu 2016 des marchés photovoltaïques mondiaux, Agence internationale de l’énergie, 2017.
- [22] «Perspective du marché mondial de l’énergiesolaire2015-2019» www.solarpowereurope.org ;Solar Power Europe (SPE), anciennement EPIA-European photovoltaic Industry Association Archivé de l’original (PDF) le 9 juin 2015 Récupéré le 9 juin 2015.
- [23] un b «Instantané de la PV mondiale 1992-2014» (PDF).iea-pvps.org. Agence internationale de l’énergie - Programme de systèmes d’énergie photovoltaïque. 30 mars 2015. Archivé de l’original le 30 mars 2015.
- [24] CSP est tombé par le bord du chemin - mais peut revenir grand d’ici 2020" CleanTechnica . 27 février 2014.
- [25] DJERIOU SALIM, Simulation d’un système photovoltaïque alimentant une machine asynchrone, mémoire de master, Faculté de Technologie, Département Électrotechnique, Université Ferhat Abbas-Sétif, pp 03,2011.
- [26] Nedjma Aouchiche, Conception d’une commande MPPT optimale à base d’intelligence artificielle d’un système photovoltaïque, thèse de Doctorat, Faculté de Technologie, Département Électrotechnique, Université Bourgogne Franche-Comté, Français .NNT 2020UBFCA001, pp 06, p 09, pp14, pp16,2020.

[27]<https://www.ef4.be/fr/pv/composants-dun-systeme/effet-photovoltaque.html>

[28] H.J. Möller. *Semiconductors for Solar Cells*. Artech House, Inc, Norwood, MA, 1993.

[29] BOUZEGANE Mhenna,GAOUAOUI Ferhat, Alimentation d'un moteur à courant continu par une source photovoltaïque, mémoire de master, Faculté Génie Electrique Et D'informatique, Département d'Automatique, université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou ,2018.

[30] BOUZAGHOU Sedik, BERRIAN Djaber, Développement des modèles mathématiques d'un générateur photovoltaïque défectueux, mémoire de master, Faculté Electronique et Informatique, Département Électrotechnique, Université des Sciences et de la Technologie, université Houari Boumediene, pp 07 ,2015.

[31] Djedid Meriem, Etude expérimentale de l'influence de la température et l'éclairément sur le rendement d'une cellule PV, mémoire de master, Faculté des Sciences exacte et science de la nature et de vie, Département des Sciences de la matière, université Larbi Ben m'hidi Oum El Bouaghi, pp 48, pp49, 2019.

[32] Mebarki Naoual, Etude de dimensionnement d'une installation photovoltaïque indépendante, Faculté Génie mécanique, D'département Sciences et Techniques, Université Mohamed El Bachir El Ibrahimy - Bordj Bou Arreridj, pp 12, pp 27 ,2012 .

[33]M.N. Marwali, J.W. Jung, and A.Keyhani, "Control of distributed generation systems--Part II: load sharing control", IEEE Trans. Power Electron., vol. 19, no. 6, pp. 1551-1561, 2004.

[34] F.-J. Lin, C.-K.Chang, and P.-K. Huang, "FPGA-based adaptive back-stepping sliding-mode control for linear induction motor drive", IEEE Trans. Power Electron., vol. 22, no. 4, pp. 1223-1231, 2007.

[35] B.J. Cardoso, A.F. Moreira, B.R. Menezes, and P.C. Cortizo, "Analysis of switching frequency reduction methods applied to sliding mode controlled DC-DC converters", IEEE Appl. Power Electron. Conf. Expo (APEC), pp. 403-410, 1992.

[36] S.C. Tan, Y.M. Lai, and C.K. Tse, "A unified approach to the design of PWM based sliding mode voltage controller for basic DC-DC converters in continuous conduction mode", IEEE Trans. Circuits Syst. I, vol. 53, no. 8, pp. 1816-1827, 2006.

[37] V. Utkin, J. Guldner, and J. X. Shi, *Sliding Mode Control in Electromechanical Systems*, London, U.K.: Taylor& Francis, 1999.

[38] F. Bilalovic, O. Music, and A. Sabanovic, "Buck converter regulator operating in the sliding mode", Proceedings of Seventh International Conference on Power Conversion, pp. 331-340, 1983.

[39] R. Venkataramanan, A. Sabanovic, and S. Cuk, "Sliding mode control of DC-to-DC converters", Proceedings of IEEE Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentations, pp. 251-258, 1985.

- [40] S.C Tan, Y.M Lai, and C.K Tse, *Sliding Mode Control of Switching Power Converters Techniques and Implementation*, CRC Press Taylor& Francis Group, 2012.
- [41] R. D. Middlebrook and S. Cuk, "A general unified approach to modeling switching power converter stages", *IEEE Power Electronics Specialists Conference Record*, pp. 18–34, 1976.
- [42] A.J. Forsyth and S.V. Mollow, "Modelling and Control of DC-DC Converters", *IEE Power Engineering Journal*, vol.12, pp. 229-236, 1998.
- [43] J.G. Kassakian, M.F. Schlecht, and G.C. Verghese, *Principles of Power Electronics*, Reading, MA: Addison-Wesley, 1992.
- [44] D. M. Mitchell, *DC-DC Switching Regulator Analysis*, New York, McGraw Hill, 1998.
- [45] P. Lopez, and A.S. Nouri, *Théorie élémentaire et pratique de la commande par les régimes glissants*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2006.
- [46] H. Asada and J. J. Slotine, *Robot Analysis and Control*, J. Wiley, New York, 1986.
- [47] J.J.E. Slotine, and W. Li, *Applied nonlinear control*, Prentice Hall, N.J., 1991.
- [48] V. I. Utkin, "Variable Structure Systems with Sliding Modes", *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 22, no. 2, pp. 212–222, 1977.
- [49] V.I. Utkin, and H. Lee, "Chattering problem in Sliding Modes Control Systems", pp. 346-350, *Alghero Italy*, 2007.
- [50] S. C. Tan, Y. M. Lai, M. K. H. Cheung, and C. K. Tse, "On the practical design of a sliding mode voltage controlled buck converter", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 20, no. 2, pp. 425–437, 2005.
- [51] S.C. Tan, Y.M. Lai, C.K. Tse, and M.K.H. Cheung, "A fixed-frequency pulse-width-modulation based quasi-sliding mode controller for buck converters", *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 20, no. 6, pp. 1379-1392, 2005.
- [52] S.C. Tan, Y.M. Lai, and C.K. Tse, "An evaluation of the practicality of sliding mode controllers in DC-DC Converters and their general design issues", *Proceedings of the IEEE Power Electronics Specialists Conference*, pp.187-193, 2006.
- [53] K. Ben Saad, A. Sahbani, and M. Benrejeb, "Design procedure and implementation of a robust Fuzzy Sliding Mode Controller for buck converters", *International Review of Automatic Control*, vol. 1, no. 3, pp. 303-310, 2008.
- [54] S.-C. Tan, Y. Lai, and C. Tse, "General design issues of sliding-mode controllers in dc-dc converters," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 3, pp. 1160–1174, Mar. 2008.
- [55] Q. Li and P. Wolfs, "A review of the single phase photovoltaic module integrated converter topologies with three different dc link configurations," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 23, no. 3, 2008.

- [56] H. Sira-Ramirez, "Sliding motions in bilinear switched networks.," IEEE transactions on circuits and systems, vol. CAS-34, no. 8, pp. 919–933, 1987.
- [57] S. Concepcion Huerta, P. Alou, J. Oliver, O. Garcia, J. Cobos, and A. Abou-Alfotouh, "Nonlinear control for dc/dc converters based on hysteresis of the cOUT current with a frequency loop to operate at constant frequency," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 58, no. 3, pp. 1036–1043, Mar. 2011.
- [58] U. Eicker, Solar Technologies for Buildings. Hoboken, NJ: Wiley, 2003.
- [59] V. Utkin, J. Gulder, and J. Shi, Sliding Mode Control in Electro-Mechanical Systems, 2nd ed. Boca Raton, FL: CRC, 2009.
- [60] H. Sira-Ramirez, "Sliding motions in bilinear switched networks," IEEE Trans. Circuits Syst., vol. CAS-34, no. 8, pp. 919–933, Aug. 1987.
- [61] N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo, and M. Vitelli, "Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method," IEEE Trans. Power Electron., vol. 20, no. 4, pp. 963–973, Jul. 2005