

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE ÉLECTRONIQUE
N° : / MICRO



DOMAINE: SCIENCE ET TECHNOLOGIE
FILIERE : GENIE ELECTRIQUE
OPTION : ENERGIES RENOUVELABLES

**Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique**

**Par: ZEROUGUI Abdelkarim
GHERABI Nadji**

THEME

**Modélisation et simulation d'un système
photovoltaïque connecté au réseau électrique**

Soutenu le 26-06-2019

Soutenu devant le jury composé de:

Mr. SAIGAA Djamel	Université de M'sila	Président
Mr. DJAZIA Kamel	Université de M'sila	Encadreur
Mr. BENHAMADOUCHE Abdelouahab	Université de M'sila	Examineur

Année universitaire : 2018 /2019

Remerciements

Je remercie, en premier **ALLAH** qui m'a donné ce bien là pour que je vive ce jour, qu'il soit loué. **ALLAH** qui m'a donné la force et le courage pour que je puisse terminer ce travail.

Je tiens tout particulièrement à exprimer mes sincères remerciements à mon encadreur Docteur **Kamel DJAZIA**, pour m'avoir encadré pendant la réalisation de ce travail et surtout sa patience et les conseils avisés qu'il m'a prodigué, témoignant de ses qualités scientifiques et humaines.

Aussi, je tiens à exprimer mes professeurs Mrs **Oussama MOUSSA**, **Ali BOUZIDI** et **Oussama HERIZI** pour leurs aides, conseils précieux et leurs encouragements incessants durant la préparation de ce travail.

Je remercie tous les membres du jury qui ont jugé notre travail et pour l'intérêt qu'ils l'ont porté.

Je tiens à remercier les responsables et tout le personnel du département de génie électrique pour les facilités qu'ils m'ont accordé pour parfaire ce travail.

Un grand merci à tous les enseignants qui ont contribué à notre formation sans exception soit durant la formation de graduation ou de poste graduation.

Enfin, je remercie tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à ma formation et à l'élaboration de ce modeste.

Merci encore à tous

Bonne lecture!

Dédicaces

Tout d'abord, je tiens à dédier ce modeste travail :

*A mes très chers parents, mon père l'ingénieur **Rachid ZEROUGUI** l'homme qui m'a donnée le désir d'apprendre et le sens de l'effort en lui souhaitant le bonheur et la santé, et qu'il soit fier de moi*

*A ma très chère **maman**, ma fierté et mon bonheur à qui je souhaite une très longue vie avec sante et bonheur.*

*A mes très chères **Sœurs**, beaux-frères et leurs familles, Ma **fiancée**, mes grands-parents, oncles et tantes, ma belle-famille et toute la famille.*

Qu'ils trouvent tous ici ma pleine gratitude pour leur patience et leur soutien qui ne m'a jamais manqué.

A mon encadreur

A tous mes enseignants

A tous mes amis et collègues

A tous mes collègues de promotion et à tous ceux qui m'ont aidé, de prés ou de loin, à accomplir ce travail.

Dédicaces

*A mes très chers parents, mon père **Sahelli GHERABI**
l'homme qui m'a donné le désir d'apprendre et le sens de l'effort en
lui souhaitant le bonheur et la santé et qu'il soit fier de moi*

*A ma très chère **maman**, ma fierté et mon bonheur à qui je
souhaite une très longue vie avec sante et bonheur.*

A mes très chers frères, ma sœur et toute ma famille.

*Qu'ils trouvent tous ici ma pleine gratitude pour leur patience
et leur soutien qui ne m'a jamais manqué.*

A mon encadreur

A tous mes enseignants

A tous mes amis et collègues

*A tous mes collègues de promotion et à tous ceux qui m'ont
aidé, de près ou de loin, à accomplir ce travail.*

SOMMAIRE**LISTES DES FIGURES****LISTE DES TABLEAUX****INTRODUCTION GENERALE****Chapitre I : Généralité sur le système photovoltaïque**

1. Introduction	4
2. L'effet photovoltaïque	5
2.1 Conversion Photon-Electron	5
3. Systèmes photovoltaïque	6
3.1 Définition	6
3.2. Le rôle principal du convertisseur statique	6
3.3. Types d'un système solaire photovoltaïque	6
3.3.1. Système autonome	7
3.3.1.1. Système autonome sans batterie	7
3.3.1.2. Système autonome avec batterie	7
3.3.2. Système hybride	7
3.3.3. Système raccordé au réseau électrique	8
3.3.3.1. Injection de la totalité de la production	8
3.3.3.2. Injection du surplus de production	9
3.4. Système photovoltaïque étudié	9
3.5. Les éléments de captages d'un système PV raccordé au réseau électrique	10
3.5 .1. La cellule PV	10
3.5.1.1. Définition	11
3.5.2. Technologie photovoltaïque	11
3.5.2.1. Cellules de première génération	11
a) Cellule au silicium mono-cristallin	11
b) Cellule au silicium poly-cristallin	12
3.5.2.2. Cellules de deuxième génération	12
3.5.2.3. Cellules de troisième génération	13
3.5.3. Comparaison entre les différent types	13
3.5.4. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	14
3.5.5. Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque	16
3.5.5.1. Tension de circuit ouvert V_{co}	16
3.5.5.2. Courant de court-circuit I_{cc}	16
3.5.5.3. Puissance	16
3.5.5.4. Le rendement énergétique	17
3.5.5.5. Facteur de forme	17
3.5.6. Modélisation d'une cellule photovoltaïque	18
3.5.6.1. Modèle idéal	18
3.5.6.2. Modèle réel à une diode	19
3.6. Module photovoltaïque	20
3.6.1. Groupement série	20

3.6.2. Groupement parallèle	21
3.6.3. Conception d'un module	22
3.6.4. Protection des modules PV	23
3.6.4.1. Les diodes by-pass	24
3.6.4.2. Les diodes anti retour	25
3.7. Modèle du module photovoltaïque	25
3.8. Caractéristiques essentielles du module photovoltaïque	25
3.9. Influence de l'éclairement, la température et la résistance sur les courbes $I=f(V)$ et $P=f(V)$	27
3.9.1. Influence de l'éclairement sur la caractéristique $I=f(V)$ et $P=f(V)$	27
3.9.2. Influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$ et $P=f(V)$	29
3.9.3 Influence de la résistance série sur la caractéristique $I=f(V)$ et $P=f(V)$	30
3.10. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque	31
3.10.1. Avantages	31
3.10.2. Inconvénients	31
4-Conclusion	32

Chapitre 2 Les convertisseurs DC-DC et la Commande MPPT

1. Introduction	33
2. Hacheur Boost	33
2.1. Définition	33
2.2. Adaptation de la charge	35
2.3 Etude de l'hacheur Boost d'un système photovoltaïque	36
2.3.1 Représentation d'un hacheur Boost PV	36
2.3.2 Modélisation d'un hacheur Boost	37
3. Technique de commande de l'MPPT	40
3.1. Définition	40
3.2. Convertisseur Pour la poursuite du point de puissance maximum(MPPT)	41
3.3. Le principe de fonctionnement du MPPT d'un générateur PV	42
3.4. Différentes techniques d'MPPT	44
3.5. La méthode Perturbation et Observation P&O	45
3.5.1 Définition	45
3.5.2. Le fonctionnement de l'algorithme P&O	45
3.5.3. Avantages et inconvénients de P&O	46
a. Avantage	46
b. Inconvénients	46
4. Conclusion	46

Chapitre III L'onduleur et la commende MLI vectorielle

1. Introduction	47
2. Les convertisseurs DC-AC (Onduleurs)	47
2.1. Définition	47
2.2. Onduleur de tension à deux niveaux	48
2.2.1. Définition	48
2.2.2. Principe de fonctionnement	48
2.2.3. Structure générale	50
2.2.4. Modélisation de l'onduleur	51

2.2.4.1 Fonction de commutation	51
2.2.4.2. Tension de sortie	51
2.2.4.3 Représentation vectorielle	52
3. MLI vectorielle	54
3.1. Modulation vectorielle	54
3.2 Principe de la MLI vectorielle	55
3.3 Localisation du vecteur de référence	55
3.4. Calcul des temps de commutation	57
3.5. Génération des impulsions de commande	58
3.6. Schéma bloc de la MLI vectorielle	58
4. Conclusion	59

Chapitre VI Les résultats de simulation

1. Introduction	60
2. Simulation du générateur PV	60
3. Simulation de l'hacheur (boost) et la commande MPPT	62
3.1 Simulation de l'hacheur survolteur (boost)	62
3.2. Simulation de la méthode MPPT	63
3.3. Simulation du system GPV et le boost avec la commande MPPT	63
4. Simulation du system PV connecté au réseau électrique	64
4.1 Description du système à simuler	65
4.2 Résultats de simulations	66
5. conclusion	70

CONCLUSION GENERALE

Chapitre I : Généralité sur le système photovoltaïque

Figure (I.1) Exemple d'un système PV autonome sans batterie

Figure (I.2) Exemple d'un système PV hybride

Figure (I.3) Les deux types d'installations existantes pour l'injection de la production solaire

Figure (I.4) Cellule au Silicium Monocristallin

Figure (I.5) Cellule au Silicium Poly-cristallin

Figure (I.6) Cellule au Silicium amorphe (couche mince)

Figure (I.7) Constitution d'une cellule photovoltaïque (d'après source CEA)

Figure (I.8) Caractéristique puissance - tension & courant- tension de la cellule PV

Figure (I.9) Modèle simplifié d'une cellule PV.

Figure (I.10) Modèle réel à une diode d'une cellule PV.

Figure (I.11) Caractéristique résultante d'un groupement en série de N_{cs} cellules identiques.

Figure (I.12) Caractéristique résultante d'un groupement en parallèle de N_{cp} cellules identiques

Figure (I.13) : Schéma d'un module photovoltaïque

Figure (I.14) : Fonctionnement des diodes by-pass.

Figure (I.15) : Caractéristiques électriques d'un panneau photovoltaïque.

Figure (I.16) Influence de l'éclairement sur la caractéristique $I=f(V)$

Figure (I.17) L'influence de l'éclairement sur la caractéristique $P=f(V)$.

Figure (I.18) L'influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$

Figure (I.19) L'influence de la température sur la caractéristique $P=f(V)$

Figure (I.20) L'influence de la résistance sur la caractéristique $I=f(V)$ $P=f(V)$

Chapitre II Les convertisseurs DC-DC et la Commande MPPT

Figure (II.1) Schéma de principe d'un hacheur boost.

Figure (II.2) Génération d'une valeur de rapport cyclique α

Figure (II.3) Répartition de la caractéristique selon le fonctionnement du hacheur Boost

Figure (II.4) Formes typiques des ondes du convertisseur boost

Figure (II.5) schéma du surclassions du courant dans les deux cas

Figure (II.6) Schéma synoptique du système PV par une commande MPPT .

Figure (II.7) Fluctuation du PMM avec : a) Variation de l'éclairement et b) Variation de la charge

Figure (II.8) Chaîne de conversion photovoltaïque

Figure (II.9) Organigramme de l'algorithme Perturbation et Observation (*P&O*)

Chapitre III L'onduleur et la commande MLI vectorielle

Figure (III.1) Symbole de convertisseur Continu - Alternative (DC– AC)

Figure (III.2) Circuit de puissance d'un onduleur triphasé

Figure (III.3) Schéma de principe de la conversion Continu - Alternative (DC– AC)

Figure (III.4) Fonctionnement de l'onduleur dans le 1er demi-cycle

Figure (III.5) Fonctionnement de l'onduleur dans le 2^{ème} demi -cycle

Figure (III.6) Signal complet de l'onduleur

Figure (III.7) : Structure d'un onduleur de tension triphasé à deux niveaux.

Figure (III.8) : Diagramme vectoriel de l'onduleur à deux niveaux.

Figure (III.9) : Organigramme de calcul du secteur.

Figure (III.10) : Principe de génération des impulsions de commande par MLI vectorielle.

Figure (III.11) : Schéma bloc de la MLI vectorielle.

Chapitre VI Les résultats de simulation

Figure (VI.1) Le Schéma block de générateur PV en MATLAB-SIMULINK

Figure (VI .2) les caractéristiques électriques du module pour $G=1000\text{w}/\text{m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$

Figure (VI .3) Schéma bloc d'un convertisseur survolteur (boost)

Figure (VI.4) Résultats de simulation de la tension générée par le générateur photovoltaïque V_{PV} et e la tension de sortie du système V_{DC} pour $G=1000\text{W}/\text{m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$

Figure (VI.5) Schéma bloc de la commande MPPT « P&O »

Figure (VI.6) Schéma d'un système photovoltaïque avec la commande MPPT (P&O).

Figure (VI.7) puissance de GPV avec la commande MPPT

Figure (VI.8) Structure de contrôle générique d'un système PV connecté au réseau.

Figure (VI.9) : Tension du bus continu et sa référence

Figure (VI.10) : Courant de la première phase injecté par l'onduleur dans le réseau et la tension réduite de la première phase du PCC

Figure (VI.11) Courant de la première phase qui délivrée par la source et la tension réduite de la première phase

Figure (VI.12) Courant de la première phase et la tension réduite de la première phase qui est consommée par la charge

Figure (VI.13) Puissance active consommée par la charge, délivrée par la source et injectée par le système PV

Tableau I.1 Caractéristiques principales et performances des cellules photovoltaïques les plus importantes selon les données publiées par le NREL (National Renewable Energy Laboratory)

Tableau I.2 : Caractéristiques électriques du module PV BP SX 150s

Tableau III.1 Etats de l'onduleur et les coordonnées du vecteur v_i dans le plan (α, β) .

Tableau (VI.1) Caractéristiques électriques du GPV photovoltaïque Dans les conditions standards « STC »

Tableau (VI.2) : Paramètres du système à simuler

Listes des notations et abreviations notations

LISTES DES NOTATIONS ET ABREVIATIONSNOTATIONS

Les notations définies ci-dessous sont celles que nous utilisons le plus dans ce manuscrit :

S	La surface
E	L'éclairement
P_m	La puissance maximale
μ	Rendement
I_{ph}	Le courant photonique sous condition
V_t	La potentielle thermodynamique.
G	L'éclairement
q	Charge de l'électron
T_c	Température de la cellule (°C).
C	Une capacité
α	Rapport cyclique
V_s	Tension de sortie
I_s	Courant de sortie
R_{pv}	La résistance à la sortie du panneau
R_{ch}	Résistance de charge
U	Vecteur de commande.
η_{MPPT}	Rendement de mppt
η_{conv}	Rendement de convertisseur
η_{tot}	Rendement total

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Les systèmes photovoltaïques semblent bien s'imposer comme moyen de conversion de l'énergie photovoltaïque en énergie électrique. Un tel système se compose d'un champ de modules et d'un ensemble de composants qui adaptent l'électricité produite par les modules aux spécifications des récepteurs.

L'énergie photovoltaïque issue de la conversion de l'énergie solaire souffre d'un problème d'optimisation, dû aux caractéristiques électriques non linéaires (courant - tension) des cellules photovoltaïques, Ces caractéristiques dépendent essentiellement des conditions climatiques de rayonnement et de température.

L'extraction de la puissance maximale d'un ensemble de ces cellules dite Stratégie **MPPT** (Maximum Power Point Tracking) permet d'une manière efficace de résoudre ce problème d'optimisation.

Les installations **PV** domestiques raccordées aux réseaux électriques de distribution (applications de quelques kilowatts), qu'appelées les systèmes **PV** décentralisées, peuvent utiliser les onduleurs classiques à deux niveaux. on utilise la commande **MLI** vectorielle pour synchronisé la puissance de sortie de l'onduleur avec celle injectée au réseau.

Dans ce mémoire, on analyse la modélisation et la simulation d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique **GPV** en utilisant une commande vectorielle Pour décrire cela, ce mémoire est présenté en quatre chapitres :

- Dans le premier chapitre, on présente des généralités sur les systèmes photovoltaïques On présente le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule **PV** et ses paramètres. En suite on présente un rappel sur les générateurs **PV** et leurs performances.
- Dans le deuxième chapitre consacré pour l'étude de convertisseur **DC-DC**, utilisés dans les systèmes photovoltaïques. l'hacheur survolteur(**Boost**) . Ainsi, on décrit la commande **MPPT** des convertisseurs **DC-DC**.
- Dans la troisième chapitre on étudiera les convertisseurs **DC-AC**, leurs modélisations et ses principes de fonction. ainsi On présentera les stratégies de commande de l'onduleur précisément la **MLI** vectorielle.
- Dans le quatrième chapitre on présentera les résultats de simulation d'un système photovoltaïque Connecté au réseau électrique. Ce système comprend un générateur photovoltaïque, un convertisseur « **Boost** », une commande **MPPT** « perturbation et observation » et un onduleur triphasé à deux niveaux avec la commande **MLI** vectorielle, le réseau et la charge.

Le contrôle de la puissance, ainsi que la modélisation et la simulation ont été effectués sous le logiciel MATLAB/Simulink

Chapitre I

GENERALITES

Sur

Le Système Photovoltaïque

1. Introduction

Le soleil est une source énergétique quasiment illimitée, il pourrait couvrir plusieurs milliers de fois notre consommation globale d'énergie.

C'est pourquoi, l'homme cherche depuis long temps à mettre à profit cette énergie importante et diffusée sur l'ensemble de la planète, et il est arrivé à réaliser ce but par le moyen dit cellule photovoltaïque.

Cette énergie solaire est disponible en abondance sur toute la surface terrestre, et malgré une atténuation importante lorsqu'elle traverse l'atmosphère, la quantité qui reste est encore assez importante quand elle arrive au sol.

On peut ainsi compter sur 1000 w/m² crête dans les zones tempérées et jusqu'à 1400 W/m² lorsque l'atmosphère est faiblement polluée.

Pour comprendre le fonctionnement de cette énergie et en optimiser son utilisation, nous effectuons dans ce chapitre un bref rappel sur le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule photovoltaïque et ses performances ainsi que le générateur solaire photovoltaïque et leurs performances.

L'énergie photovoltaïque résulte de la transformation directe de la lumière du soleil en énergie électrique aux moyens des cellules généralement à base de silicium cristallin qui reste la filière la plus avancées sur le plan technologiques et industriel. Leur association en série/parallèle donne lieu à un module ou panneau photovoltaïque.

Dans ce premier chapitre, nous allons parler d'une manière générale des systèmes photovoltaïques(**PV**), les éléments de captage d'un système **PV** (source d'énergie **PV**) et leur modélisation et le générateur photovoltaïque(**GPV**) et ses performances.

Nous aborderons le domaine photovoltaïque dans sa généralité, nous rappellerons brièvement le principe de la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique reposant sur l'effet photoélectrique, c'est-à-dire sur la capacité des photons à créer des porteurs de charge (électrons et trous) dans un matériau. Après, nous développerons les caractéristiques des cellules photovoltaïques et leur modélisation afin de définir leurs modes de fonctionnement.

Enfin, nous étudierons leurs interconnexions et les éléments de sécurité à introduire lors de la réalisation d'un module ou d'un champ photovoltaïque.

2. L'effet photovoltaïque

Le terme « photovoltaïque » vient du Grec et qui signifie Lumière, il est composé de deux parties : « photos » (lumière) et du nom de famille du physicien italien Alessandro Volta (1754-1827) qui inventa la pile électrique en 1800 et donna son nom à l'unité de mesure de la tension électrique, le volt. le photovoltaïque signifie littérairement la « lumière électricité ».

Lorsqu'un matériau semi-conducteur est exposé à la lumière du soleil, les atomes exposés au rayonnement sont "bombardés" par les photons constituant la lumière; sous l'action de ce bombardement, les électrons des couches électroniques supérieures (appelés électrons des couches de valence) ont tendance à être "arrachés": Si l'électron revient à son état initial, l'agitation de l'électron se traduit par un échauffement du matériau.

L'énergie cinétique du photon est transformée en énergie thermique. Par contre, dans les cellules photovoltaïques, une partie des électrons ne revient pas à son état initial. Les électrons "arrachés" créent une tension électrique continue faible. Une partie de l'énergie cinétique des photons est ainsi directement transformée en énergie électrique: c'est l'effet photovoltaïque [1].

L'effet photovoltaïque constitue la conversion directe de l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique au moyen de cellules généralement à base de silicium. Pour obtenir une puissance suffisante, les cellules sont reliées entre elles et constituent le module solaire.

L'effet photovoltaïque, c'est-à-dire la production d'électricité directement de la lumière, fut observée la première fois, en 1839, par le physicien français Edmond Becquerel.

Toutefois, ce n'est qu'au cours des années 1950 que les chercheurs des laboratoires Bell, aux Etats-Unis, parvinrent à fabriquer la première cellule photovoltaïque, l'élément primaire d'un système photovoltaïque [02].

2.1 Conversion Photon-Electron

Albert Einstein à découvert, en travaillant sur l'effet photoélectrique, que le rayonnement solaire se compose de photons transportant l'énergie E_{ph} qui est donnée par l'équation suivante [03] :

$$E_{\text{ph}} = \frac{c \cdot h}{\lambda} \quad \text{I.1}$$

Où h est la constante de Planck, c la vitesse de la lumière et λ sa longueur d'onde. Ainsi, plus la longueur d'onde est courte, plus l'énergie du photon est grande.

Les physiciens du solide expriment généralement l'énergie E_{ph} des photons en électronvolts (eV) et l'observation dans l'espace en conditions **AM0** ont permis d'établir une relation directe entre l'énergie d'un photon exprimée en électronvolts et sa longueur d'onde exprimée en micromètres :

$$E_{\text{ph}} = \frac{1.2419}{\lambda(\mu\text{m})} \quad \text{I.2}$$

La transformation de l'énergie solaire en énergie électrique est basée sur les trois mécanismes suivant [03] :

- Absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif ;
- Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création des paires électrons/trous dans le matériau semi-conducteur ;
- Collecte des particules générées dans le dispositif.

3. Système photovoltaïque

3.1 Définition

Le système photovoltaïque est constitué par une source d'énergie (générateur photovoltaïque), une interface de puissance (les convertisseurs statique **DC-DC** et **DC-AC** avec un système de commande) et une charge.

3.2. Le rôle principal du convertisseur statique

Le convertisseur statique est de faire une adaptation d'impédance de sorte que le générateur délivre le maximum d'énergie.[04]

3.3. Types d'un système solaire photovoltaïque

Les systèmes photovoltaïques sont actuellement divisés en trois catégories : Autonome, hybride et raccordé au réseau électrique.

Chapitre I GENERALITES Sur le Système Photovoltaïque

3.3.1. Système autonome

Le rôle des systèmes autonomes est d'alimenter un ou plusieurs consommateurs situés dans une zone isolée du réseau électrique. Les systèmes photovoltaïques autonomes sont actuellement divisés en deux types :[05]

3.3.1.1. Système autonome sans batterie

Ce type de système ne requiert pas de stockage d'électricité, soit parce que la production d'énergie des cellules est suffisante sous un faible éclairage (exemple: calculatrice), soit que le temps de fonctionnement de la charge n'est pas critique (ex. : pompage photovoltaïque: le Réservoir d'eau sert de stockage).

3.3.1.2. Système autonome avec batterie

C'est le système photovoltaïque le plus commun. Le champ **PV** sert de chargeur pour la batterie. L'électricité peut alors être utilisée en tout temps. (Ex. l'éclairage d'une maison dans la nuit).

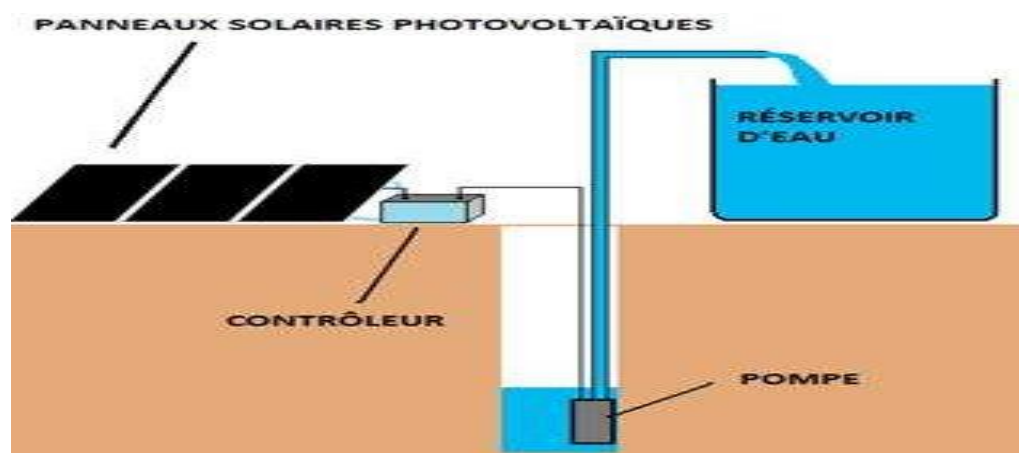


Figure (I.1) Exemple d'un système PV autonome sans batterie

3.3.2. Système hybride

Un système hybride à sources d'énergie renouvelables (**SHSER**) est un système électrique, comprenant plus d'une source d'énergie, parmi lesquelles une au moins est renouvelable.

Ce type de système s'applique particulièrement bien à des sites éloignés où il est important d'avoir de l'électricité à tout moment, où les coûts de transport de carburant sont élevés où il n'est pas encore rentable d'utiliser le système photovoltaïque seul avec les batteries.

Chapitre I GENERALITES Sur le Système Photovoltaïque

Ils sont souvent utilisés pour de très nombreuses applications d'intérêt sensible et stratégique comme les relais de télécommunication, les postes frontaliers, l'habitat isolé, etc., hors réseau d'électricité conventionnelle [02, 03].

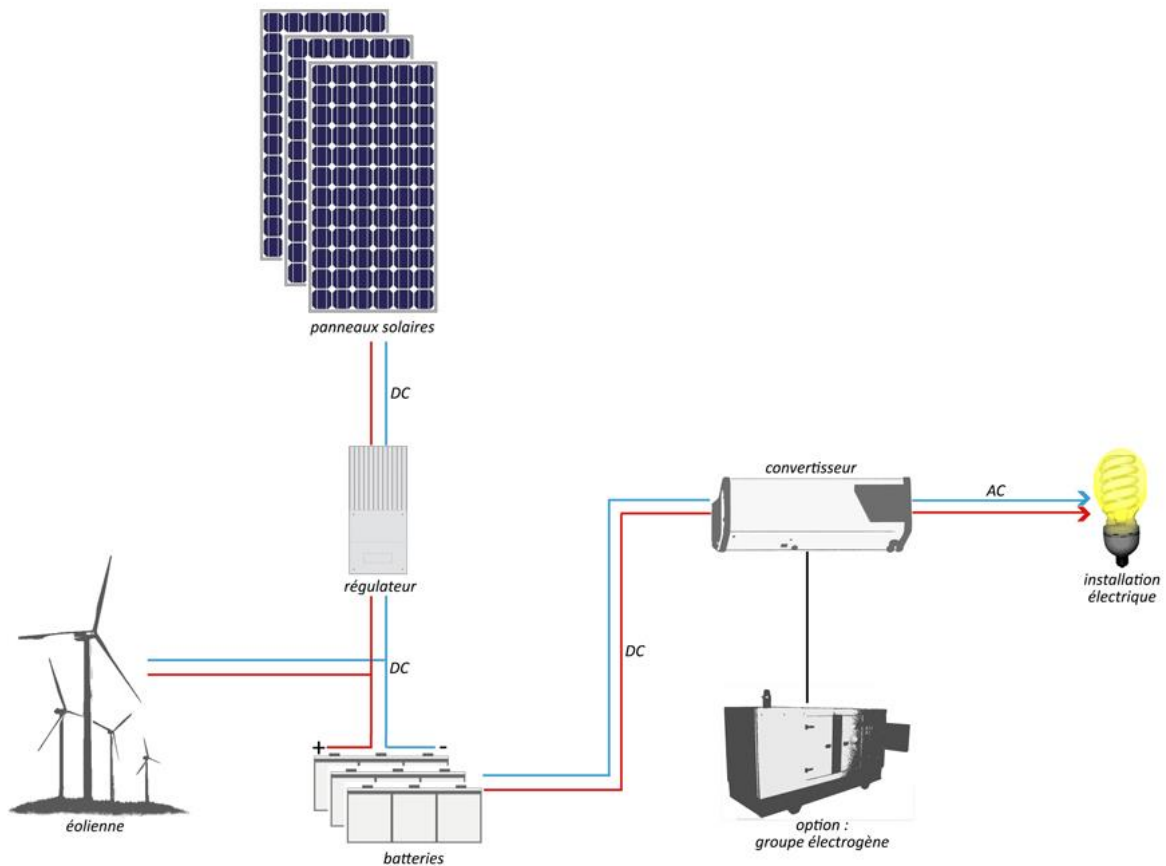


Figure (I.2) Exemple d'un système PV hybride

3.3.3. Système raccordé au réseau électrique

Le système photovoltaïque est couplé directement au réseau électrique à l'aide d'un convertisseur Courant Continu/Courant Alternatif (**DC-AC**). Étant donné que l'énergie est normalement emmagasinée dans le réseau même.

La Figure (I.3) montre les deux types d'installations existantes pour l'injection de la production solaire: [05]

3.3.3.1. Injection de la totalité de la production

L'énergie produite par les modules est directement injectée sur le réseau électrique.

Les périodes d'injections sur le réseau correspondent aux périodes de production photovoltaïque.

3.3.3.2. Injection du surplus de production

L'énergie produite par les modules est directement consommée sur place par les charges. L'éventuel surplus de production par rapport à la consommation instantanée est injecté sur le réseau

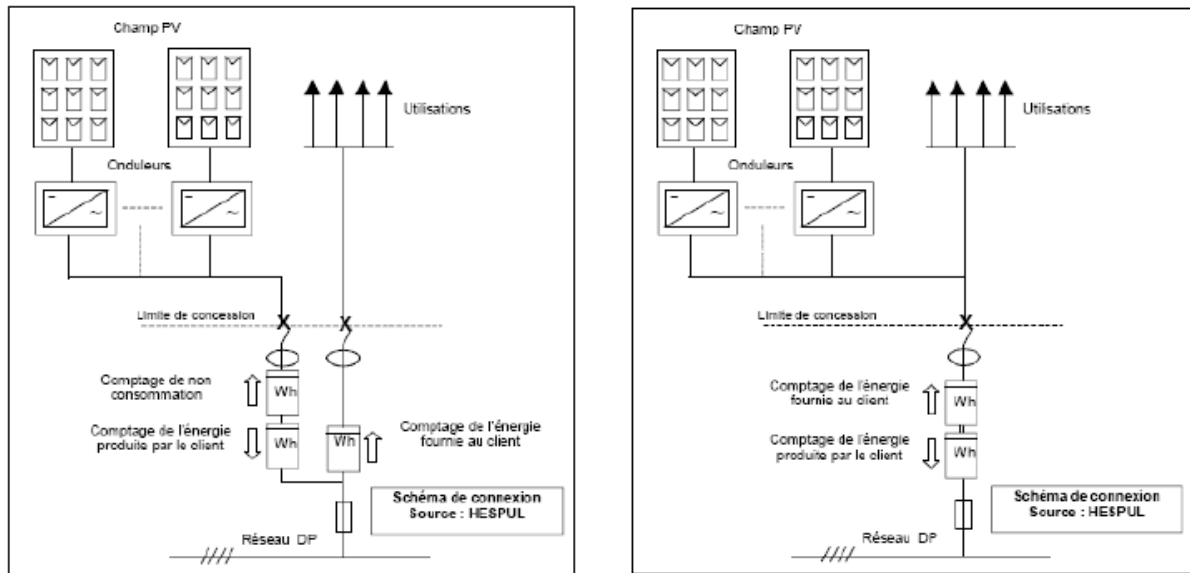


Figure (I.3) Les deux types d'installations existantes pour l'injection de la production solaire

3.4. Système photovoltaïque étudié

Bien que fondamental dans la chaîne que représente un système, le module photovoltaïque à lui seul ne peut pas grand-chose : pour répondre à un besoin défini, il faut en fait associer étroitement ces modules à un système complet correspondant à une application bien spécifique.

La figure (I.3) représente la configuration du système photovoltaïque raccordé au réseau électrique de distribution. Cette structure est constituée des éléments suivants :

- Un champ photovoltaïque produisant la puissance fournie ;
- Un hacheur survolteur et sa commande ;
- Un bus continu pour le stockage et le filtrage de l'énergie
- Un onduleur de tension triphasé et sa commande pour l'interconnexion avec le réseau

3.5. Les éléments de captages d'un système PV raccordé au réseau électrique

L'élément de base d'un système **PV** est la cellule **PV**. La puissance disponible aux bornes d'une cellule est très faible. Il est donc nécessaire d'associer en série et en parallèle de telles cellules pour obtenir des modules de puissance compatible avec le matériel usuel. Les modules sont ensuite connectés en série pour former une chaîne. Enfin, les chaînes sont connectées en parallèle pour former un générateur photovoltaïque.

3.5.1. La cellule PV

3.5.1.1. Définition

Les cellules photovoltaïques sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité par un processus appelé « effet photovoltaïque », a été découverte par **E. Becquerel** en 1839 [08].

Elles sont réalisées à l'aide de matériaux semi-conducteurs, c'est à dire ayant des propriétés intermédiaires entre les conducteurs et les isolants.

La structure la plus simple d'une cellule photovoltaïque comporte une jonction entre deux zones dopées différemment du même matériau (homo-jonction) ou entre deux matériaux différents (hétérojonction).

Le but de la structure photovoltaïque, c'est de créer un champ électrique interne.

La cellule solaire est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque.

Elle est basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière.

La tension générée peut varier entre **0.3V** et **0.7V** en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule et du vieillissement de la cellule.

Une cellule **PV** est réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée **P** (dopée au bore) et l'autre dopée **N** (dopée au phosphore) créant ainsi une jonction **PN** avec une barrière de potentiel (bande interdite).

Lorsque les photons sont absorbés par les semi-conducteur et son énergie supérieur ou égal à l'énergie de la bande interdite du matériau **E_g**, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction **PN** de telle sorte que les électrons de ce atome se libèrent et créent des électrons (**charges N**) et des trous (**charges P**).

Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches.

Chapitre I GENERALITES Sur le Système Photovoltaïque

Cette différence de potentiel crée un champ E qui draine les porteurs libres vers les contacts métalliques des régions **P** et **N**.

Il en résulte alors un courant électrique et une différence de potentiel dans la cellule **PV**.

3.5.2. Technologie photovoltaïque

Les cellules solaires sont classées en trois générations.

À l'heure actuelle il y a des recherches simultanées sur les trois générations.

3.5.2.1. Cellules de première génération

Elles sont basées sur une seule jonction **P-N** et utilisent généralement le silicium sous forme cristalline comme matériau semi-conducteur. Le silicium est fondu puis refroidi afin d'obtenir un cristal qui sera découpé en fines tranches (les wafers) pour obtenir la cellule photovoltaïque.

Cette méthode de production est très énergivore et donc très chère. Elle nécessite par ailleurs un silicium de grande pureté.

On différencie les cellules en silicium monocristallin et en silicium poly-cristallin [09].

c) Cellule au silicium mono-cristallin :

Pour ce genre d'applications technologiques, le silicium pur est obtenu à partir de la silice de quartz ou de sable par transformation chimique métallurgique. Le silicium a un rendement électrique et une durée de vie de l'ordre de deux fois celle du silicium amorphe, mais il est nettement plus cher. Est présentée sur la **Figure (I.4)**

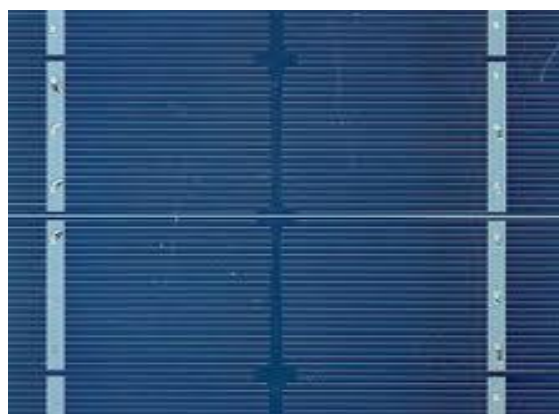


Figure (I.4) Cellule au Silicium Monocristallin

b) Cellule au silicium poly-cristallin :

Le silicium poly-cristallin est un matériau composé de cristaux juxtaposés obtenus par moulage. Ce matériau est moins coûteux (que le monocristallin). Les cellules carrées ou rectangulaires sont faciles à utiliser, est présentée sur la **Figure (I.5)**



Figure (I.5) Cellule au Silicium Poly-cristallin

3.5.2.2. Cellules de deuxième génération

Les couches minces constituent la seconde génération de technologie photovoltaïque.

Dans ce cas, le semi-conducteur est directement déposé par vaporisation sur un matériau support (du verre par exemple).

Le silicium amorphe (**a-Si**) (silicium non cristallisé de couleur gris foncé), le **CdTe** (Tellure de Cadmium) et le **CIGS** (Cuivre, Indium, Gallium et Sélénium) font notamment partie de cette génération.

La production de ce type de cellules est moins coûteuse que celle de la 1^{ère} génération puisqu'elles consomment moins de matériaux semi-conducteur et ne nécessitent pas de passer par l'étape de transformation en « wafers ».

Elles présentent l'avantage de fonctionner avec un éclairage faible, et d'être moins sensibles aux températures élevées que les cellules mono ou poly cristallines.

En revanche, leur rendement est faible, compris entre 5 et 10%, soit environ 16m² pour obtenir 1kWc [10].

Le silicium absorbe le rayonnement solaire jusqu'à 100 fois mieux qu'en état cristallin; les cellules sont constituées par des couches très minces est présentée sur la **Figure (I.6)**

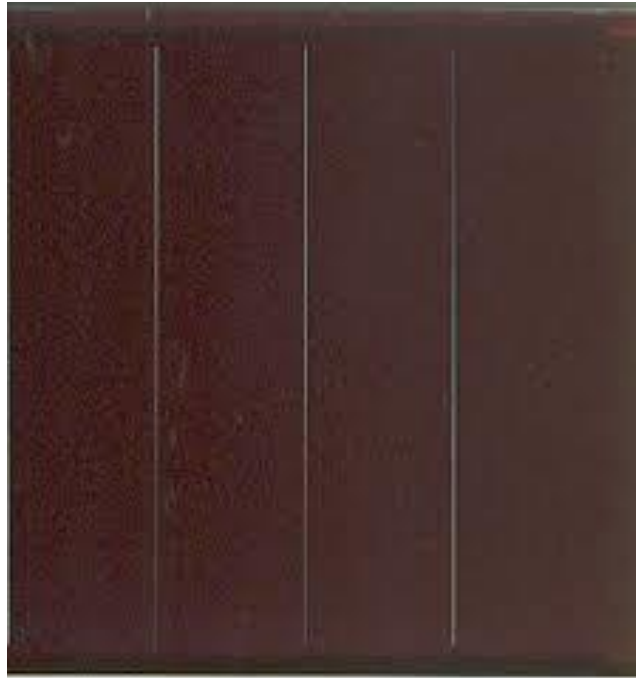


Figure (I.6) Cellule au Silicium amorphe (couche mince)

3.5.2.3. Cellules de troisième génération

La troisième génération vise à passer la limite maximale de rendement des cellules actuelles qui sont développées en ce moment en laboratoire, mais qui ne sont pas encore industrialisées.

Plusieurs concepts sont envisagés pour atteindre cet objectif [04] :

- Superposition de multiples cellules (utilisant des bandes d'énergie différentes) ;
- Cellules à concentration (permet d'utiliser des photons à basse énergie qui ne sont habituellement pas absorbés par la cellule) ;
- Cellules à électrons chauds produisant plus de paires d'électron/trou pour des énergies supérieures à la bande d'énergie ;
- Cellules organiques.

3.5.3. Comparaison entre les différents types

De nombreuses informations ont été fournies pour chaque cellule photovoltaïque, qu'elles soient de première, de deuxième ou de troisième génération.

Les plus intéressantes d'entre elles ont été rassemblées sous la forme d'un tableau, l'objectif étant de faciliter les comparaisons. Les rendements indiqués ont été vérifiés en 2015 [11].

Chapitre I GENERALITES Sur le Système Photovoltaïque

Types	Rendement en Labo (%)	Rendement commercial	Epaisseur (μm)	Niveau de développement
1^{er} generation				
Monocristallin	27.70	12-20	200-350	Production industrielle
Poly cristallin	20.80	11-15	200-350	Production industrielle
2^{eme} génération				
Silicium amorph	13.40	5-9	1	Production industrielle
CIGS	23.30	9-11	1-2	Production industrielle
CdTe	21.60	6-9	2-8	Production industrielle
3^{eme} génération				
Cellule organique	11.10	/	0.1	Au stade de la recherche
Cellule multi-jonctions (4j)	46.00	/	Non connue	Au stade de la recherche, Production exclusivement pour applications spatiales
Cellule de Grätzel	15.00	/	1	Au stade de la recherche

Tableau (I.1)

Caractéristiques principales et performances des cellules photovoltaïques les plus importantes selon les données publiées par le NREL (National Renewable Energy Laboratory) [11-12].

Chapitre I GENERALITES Sur le Système Photovoltaïque

3.5.4. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques exploitent l'effet photoélectrique pour produire du courant continu par absorption du rayonnement solaire.

Cet effet permet aux cellules de convertir directement l'énergie lumineuse des photons en électricité par le biais d'un matériau semi-conducteur transportant les charges électriques.

Le matériau semi-conducteur comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit d'électrons. Ces deux parties sont respectivement dites « dopées » de type **n** et de type **p**. Le dopage des cristaux de silicium consiste à leur ajouter d'autres atomes pour améliorer la conductivité du matériau. Un atome de silicium compte 4 électrons périphériques.

L'une des couches de la cellule est dopée avec des atomes de phosphore qui, eux, comptent 5 électrons (soit 1 de plus que le silicium). On parle de dopage de type **n** comme négatif, car les électrons (de charge négative) sont excédentaires. L'autre couche est dopée avec des atomes de bore qui ont 3 électrons (1 de moins que le silicium).

On parle de dopage de type **p** comme positif en raison du déficit d'électrons ainsi créé.

Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau **n** diffusent dans le matériau **p**

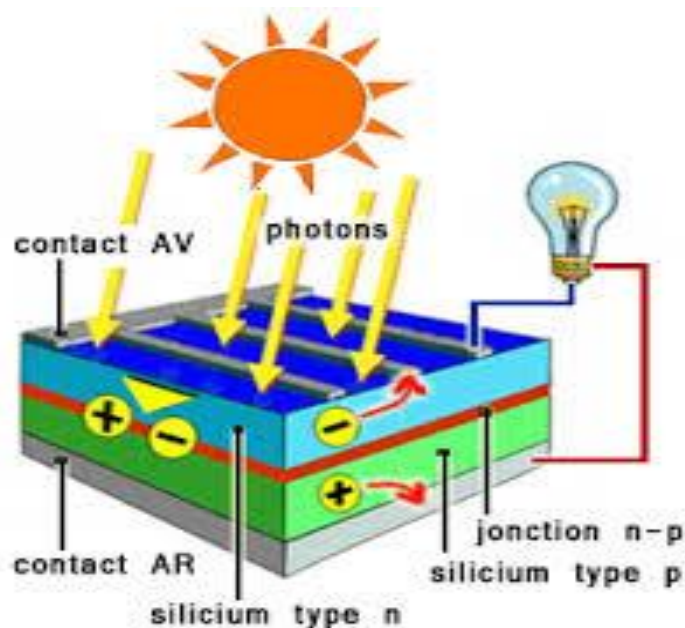


Figure (I.7) Constitution d'une cellule photovoltaïque (d'après source CEA)

Chapitre I GENERALITES Sur le Système Photovoltaïque

En traversant la cellule photovoltaïque, les photons arrachent des électrons aux atomes de silicium des deux couches **n** et **p**.

Les électrons libérés se déplacent alors dans toutes les directions. Après avoir quitté la couche **p**, les électrons empruntent ensuite un circuit pour retourner à la couche **n**.

Ce déplacement d'électrons n'est autre que de l'électricité.

3.5.5. Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque

3.5.5.1. Tension de circuit ouvert V_{co}

Si on place une cellule sous une source lumineuse constante, sans aucun récepteur à ses bornes, celle-ci va produire une tension continue d'environ 0.6V, appelée tension en circuit ouvert V_{co} (elle varie légèrement avec l'éclairement). Cette valeur correspond à la tension de coupure d'une diode, ce qui confirme le fait qu'on puisse assimiler une cellule solaire à une jonction **PN**. Pour obtenir une tension plus élevée à la sortie du module, il va falloir associer les cellules en série[13]

3.5.5.2. Courant de court-circuit I_{cc}

A l'inverse du cas précédent, si l'on place une cellule en court-circuit, elle va débiter un courant maximal à tension nulle. Ce courant est dit courant de court-circuit I_{cc} . De même que pour la tension, il faudra associer les cellules en parallèle pour augmenter significativement la valeur de l'intensité en sortie du module [13].

3.5.5.3. Puissance

Le but recherché par tous les utilisateurs de générateur photovoltaïque est que l'énergie produite soit la plus optimale possible.

La Figure (L.8) représente la caractéristique courant tension d'une cellule sous illumination ainsi qu'une courbe théorique de puissance constante (puissance = tension \times intensité).

Pour l'éclairement considéré, le point de puissance maximale **MPPT** représente le point où la puissance de la cellule est maximale. Ce point, est associé à une tension maximale V_{opt} et à une intensité maximale I_{opt} .

C'est cette puissance qui sera toujours recherchée par des régulateurs de charge afin d'optimiser la charge de la batterie et le fonctionnement du générateur.

Par ailleurs, lorsqu'il est question de puissance maximale dans les conditions normalisées d'ensoleillement, on parle alors de puissance crête, mesurée en watts-crête (**Wc**) [13].

3.5.5.4. Le rendement énergétique

Est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale produite **P_m** et la puissance du rayonnement solaire parvenant au module.

Soit (**S**) la surface du module et (**E**) l'éclairement, ce rendement a pour expression :

$$\mu = \frac{P_m}{E \cdot S} = \frac{V_{opt} \cdot I_{opt}}{E \cdot S} \quad \text{I.3}$$

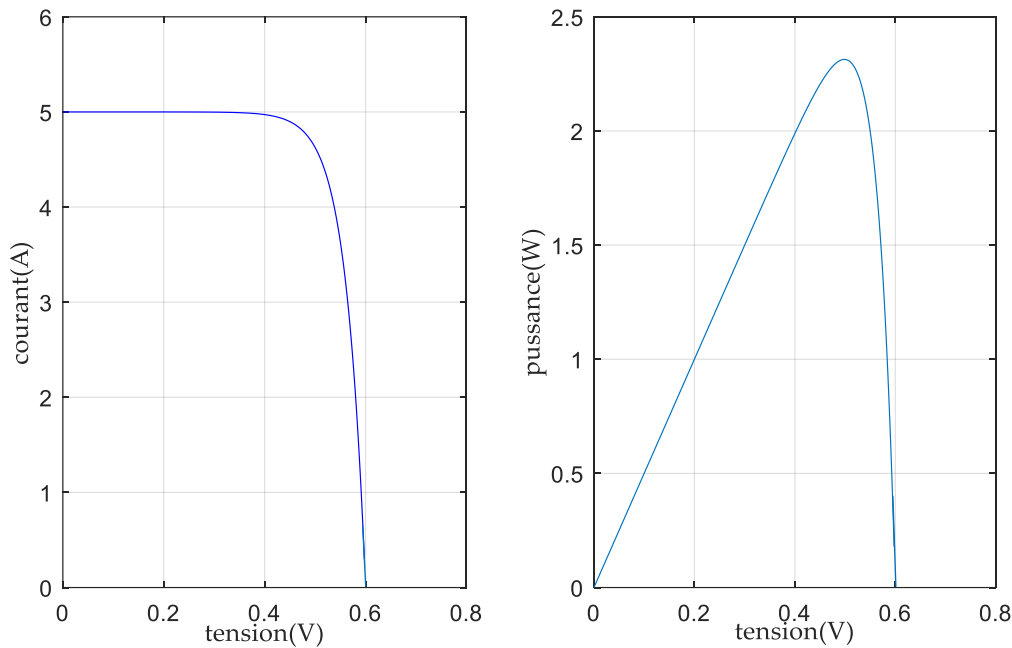


Figure (I.8) Caractéristique puissance - tension & courant- tension de la cellule PV

3.5.5.5. Facteur de forme

On appelle facteur de forme **FF**, dit aussi facteur de courbe ou facteur de remplissage (fill factor), le rapport entre la puissance maximum fournie par la cellule **P_{max} (I_{opt}, V_{opt})** et le produit du courant de court-circuit **I_{cc}** par la tension de circuit-ouvert **V_{co}** (c'est-à-dire la puissance maximale d'une cellule idéale).

Chapitre I GENERALITES Sur le Système Photovoltaïque

Le facteur de forme indique la qualité de la cellule ; plus il s'approche de l'unité plus la cellule est performante, Il est de l'ordre de 0.7 pour les cellules performantes ; et diminue avec la température.

Il traduit l'influence des pertes par les deux résistances parasites R_{ser} et R_{sh}

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} * V_{oc}} = \frac{I_{opt} * V_{opt}}{I_{cc} * V_{oc}} \quad I.4$$

3.5.6. Modélisation d'une cellule photovoltaïque

3.5.6.1. Modèle idéal

Une cellule photovoltaïque peut être décrite de manière simple comme une source idéale de courant qui produit un courant photonique I_{ph} proportionnel à la puissance lumineuse Incidente, en parallèle avec une diode qui correspond à l'aire de transition P-N de la cellule PV **figure (I.9)**.

Si l'on connecte une charge résistive aux bornes de la cellule photovoltaïque, cette dernière y débite une part de courant I_s et le reste, le courant I_D , dans la diode.

On a alors la relation :

$$I_s = I_{ph} - I_D \quad I.5$$

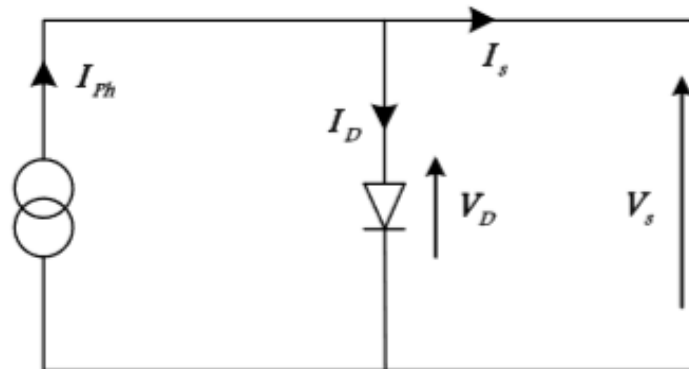


Figure (I.9) Modèle simplifié d'une cellule PV.

La diode étant un élément non linéaire, sa caractéristique I_D - V_D est donnée par la relation :

$$I_D = I_0 (e^{(V_D/nV_t)} - 1) \quad I.6$$

Où :

Chapitre I GENERALITES Sur le Système Photovoltaïque

I_0 : courant de saturation inverse de la diode ;

n : coefficients d'idéalité de la jonction PN ;

$V_T = kT/q$: potentiel thermique ;

k : constante de Boltzmann ($k=1.381 \times 10^{-23}$ J/K) ;

T : température effective de la cellule en Kelvin ;

q : charge d'électron ($q=1.6 \times 10^{-19}$ C).

Le courant débité est équivalent à :

$$I_s = I_{ph} - I_d = I_0 \left(e^{\frac{V_d}{n k T / q}} - 1 \right) \quad \text{I.7}$$

Ce modèle reste théorique et ne rend pas compte du comportement d'une cellule photovoltaïque dans des conditions réelles.

Toutefois, il reste valable sous certaines hypothèses (non prise en compte de perte de tension, courant de fuite, ...). Il existe d'autres modèles, certes théoriques, mais qui rendent plus fidèlement compte du comportement de la cellule photovoltaïque [14].

3.5.6.2. Modèle réel à une diode

Le modèle photovoltaïque précédent ne rendait pas compte de tous les phénomènes présents lors de la conversion d'énergie lumineuse. En effet, dans le cas réel, on observe une perte de tension en sortie ainsi que des courants de fuite.

On modélise donc cette perte de tension par une résistance en série R_s et les courants de fuite par une résistance en parallèle R_p (voir **figure (I.10)**).

C'est le modèle sur lequel s'appuient les constructeurs en donnant les caractéristiques techniques de leurs cellules solaires (data sheets) [14].

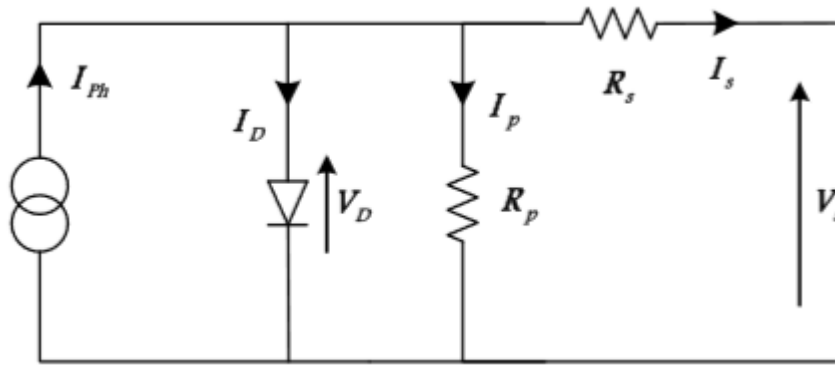


Figure (I.10) Modèle réel à une diode d'une cellule PV.

Dans ce cas on a :

$$I_s = I_{ph} - I_D - I_p = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{V_d}{n k T / q}} - 1 \right) - \frac{V_d}{R_p} \quad \text{I.8}$$

Et comme :

$$V_D = V_s + R_s I_s \quad \text{I.9}$$

La relation devient :

$$I_s = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{V_d}{n k T / q}} - 1 \right) - \frac{V_s + R_s I_s}{R_p} \quad \text{I.10}$$

3.6. Module photovoltaïque

Dans des conditions d'ensoleillement standard (1000W/m² ; 25°C ; AM1.5), la puissance maximale délivrée par une cellule en silicium de 150 cm² est d'environ 2.3 Wc sous une tension de 0.6V.

Une cellule photovoltaïque élémentaire constitue donc un générateur électrique de faible puissance insuffisante en tant que telle pour la plupart des applications domestiques ou industrielles. Les modules photovoltaïques sont, de ce fait réalisés par association, en série et/ou en parallèle, d'un grand nombre de cellules élémentaires.

3.6.1. Groupement série

Une association de N_c cellules en série permet d'augmenter la tension du module photovoltaïque.

Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule.

L'équation résume les caractéristiques électriques d'une association série de N_c cellules.

$$V_{CO}^m = N_{CS} V_{CO} \quad I.11$$

$$I_{CC}^m = I_{CC} \quad I.12$$

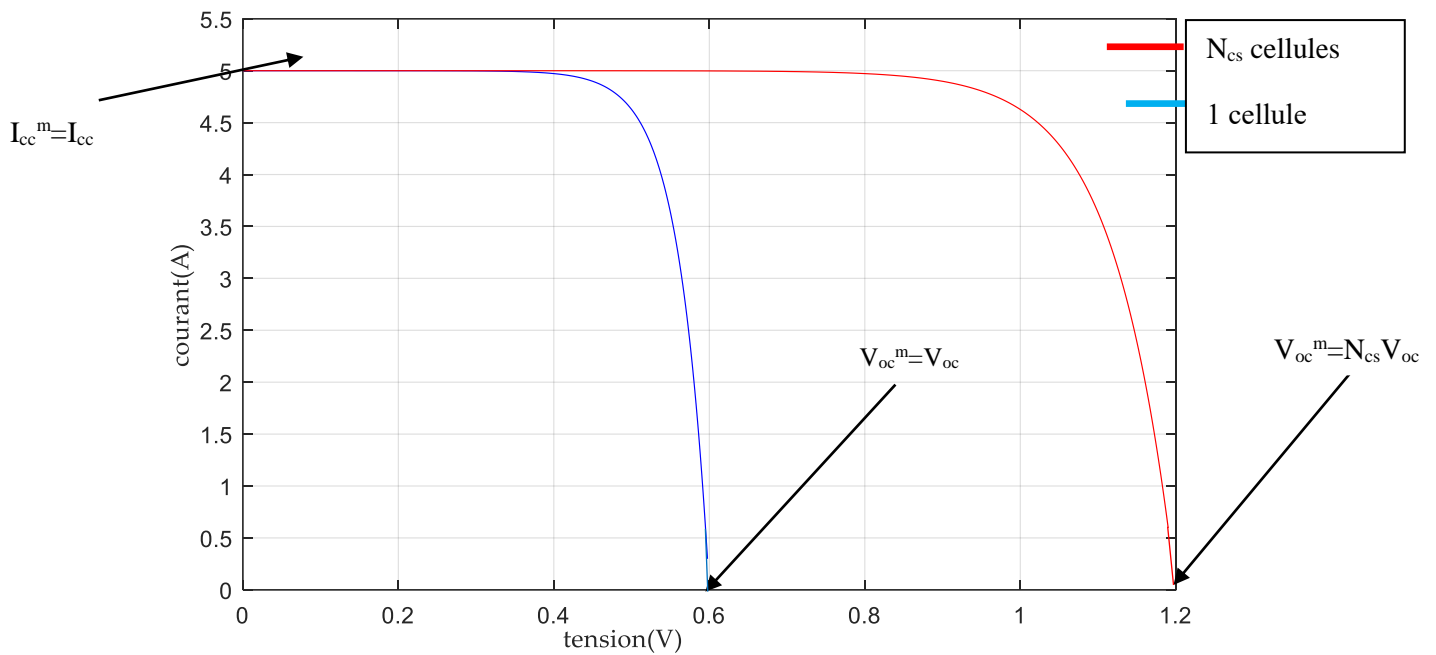


Figure (1.11) Caractéristique résultante d'un groupement en série de N_{cs} cellules identiques.

Ce système d'association est généralement le plus communément utilisé pour les modules photovoltaïques du commerce.

Comme la surface des cellules devient de plus en plus importante, le courant produit par une seule cellule augmente régulièrement au fur et à mesure de l'évolution technologique alors que sa tension reste toujours très faible. L'association série permet ainsi d'augmenter la tension de l'ensemble et donc d'accroître la puissance de l'ensemble. Les modules commerciaux constitués de cellules de première génération sont habituellement réalisés en associant 36/72 cellules en série ($V_{oc}^m = 21.6V/43.2V$).

Afin d'obtenir une tension optimale du panneau V_{mpp} proche de celle d'une tension de batterie de (12V/24V) [15].

3.6.2. Groupement parallèle

Les propriétés du groupement en parallèle des cellules sont duales de celles du groupement en série.

Chapitre I GENERALITES Sur le Système Photovoltaïque

Ainsi, dans un groupement de cellules connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants et sa tension donnée.

La caractéristique résultant d'une mise en parallèle de N_{cp} cellule PV identiques est présentée sur la Figure (I.12)

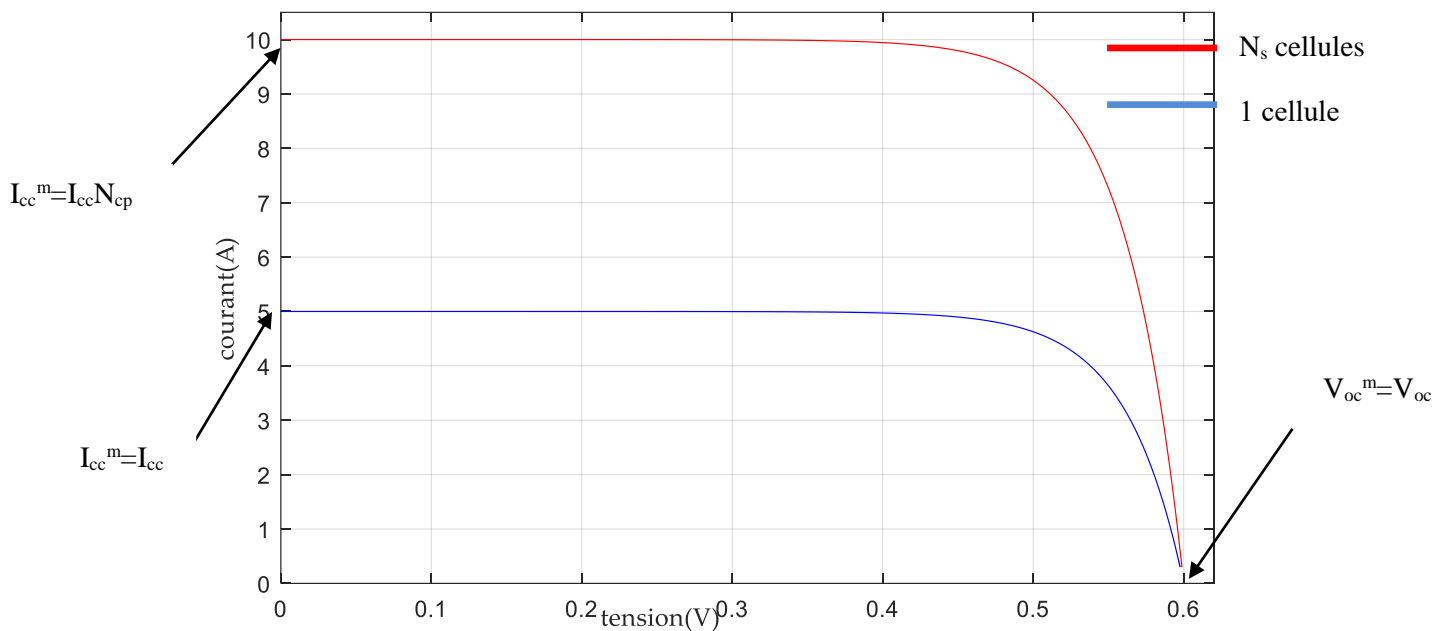


Figure (I.12) Caractéristique résultante d'un groupement en parallèle de N_{cp} cellules identiques

L'équation (I.14) résume les caractéristiques électriques d'une association parallèle de N_{cp} cellules.

$$V_{Co}^m = V_{Co} \quad I.13$$

$$I_{cc}^m = N_{cp} I_{cc} \quad I.14$$

3.6.3. Conception d'un module

Au sein d'un module PV les cellules

interconnectées sont rassemblées en blocs, généralement chacun de 18 cellules mise en série et un module PV est constitué de la mise en série de $N_{bs} = N_{cs}/18$ blocs et de N_{bp} blocs en parallèle. La conception d'un module PV repose encore aujourd'hui sur des raisons historiques. A l'origine, l'énergie solaire était réservée aux applications

Chapitre I GENERALITES Sur le Système Photovoltaïque

en sites isolés. La tension de fonctionnement de Ces installations était donc imposée par la tension des batteries utilisées pour stocker l'énergie. Ces systèmes fonctionnant avec des batteries au plomb, leurs tensions étaient de 12V,24 Vou8V [16]. Cette raison historique explique que la quasi-totalité des modules existants aujourd'hui aient encore une tension de sortie de 12 ou 24V.

La figure (I.13) montre la schématique classiquement adoptée pour un module PV élémentaire.

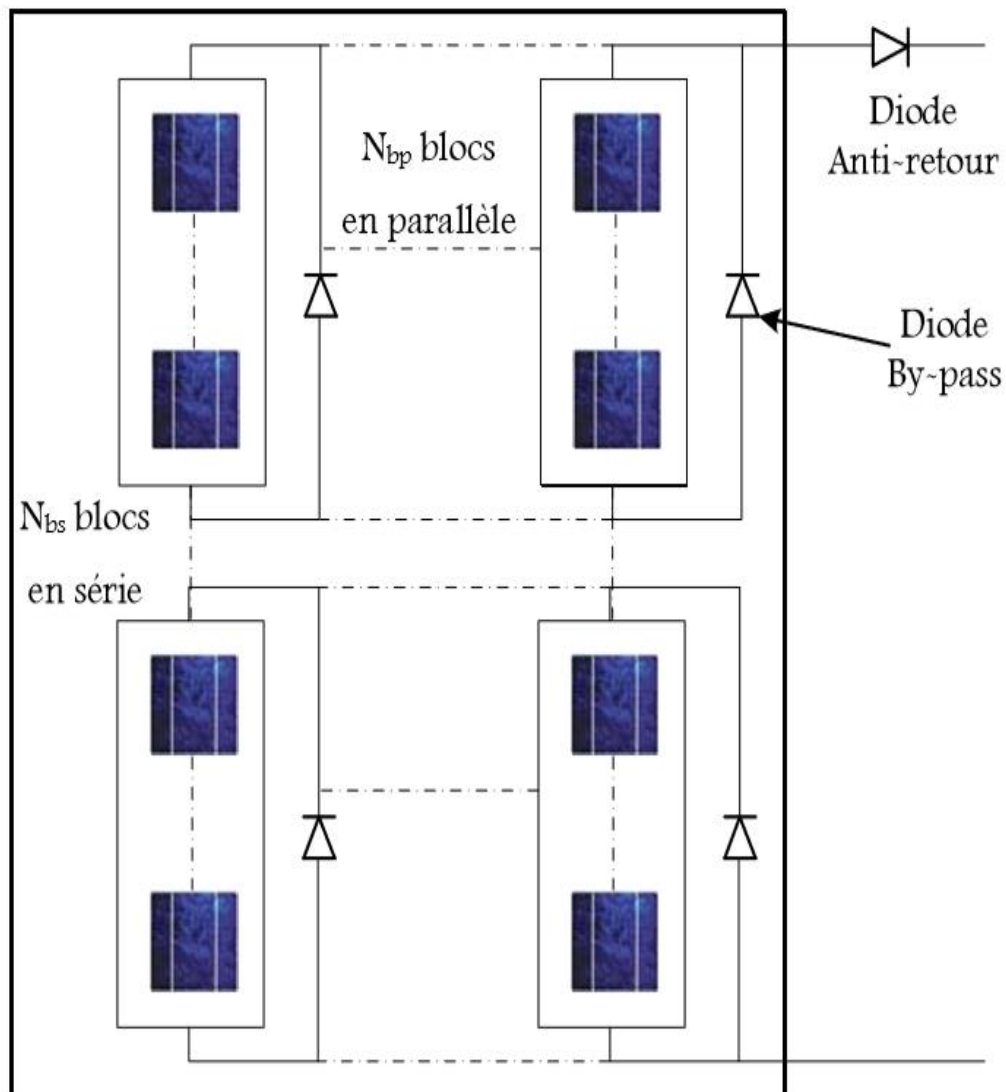


Figure (I.13) : Schéma d'un module photovoltaïque

3.6.4. Protection des modules PV

La conception d'un module photovoltaïque impose de s'assurer que les composants de ce dernier ne risquent pas d'être détruits au cours d'un fonctionnement dans les quadrants 2 et 4.

Dans ces zones les cellules PV fonctionnent en récepteurs et des risques de destructif existent. Pour se protéger de ces risques deux type de protection sont mis en place dans les installations photovoltaïques : la diode **by-pass** et la diode anti-retour comme le montre la figure(I.13).

3.6.4.1. Les diodes by-pass

Il est possible sous l'effet d'un ombrage ou de la température que toutes les cellules placées en série n'ont pas les mêmes caractéristiques, créant ainsi des déséquilibres. Lors d'un assemblage de cellules PV en série, il est nécessaire de mettre une diode de **by-pass** pour empêcher le fonctionnement dans la zone II (en inverse) d'une cellule ombrée et ainsi empêcher la destruction de celle-ci. Pour empêcher cette destruction, la tension inverse vue par la cellule ne doit pas dépasser V_{bo} (environ 12V, aussi appelé tension d'avalanche). Pour que cette condition soit vérifiée, une diode **by-pass** doit être mise en parallèle au maximum tous les 20 cellules pour les technologies silicium. Dans les faits, pour des raisons de simplicité de réalisation, une diode de **by-pass** est placée en parallèle de chaque groupe de 18 cellules constituant le module. Deux diodes de **by-pass** sont nécessaires pour un module 12V, 4 pour un 24V et ainsi de suite [15].

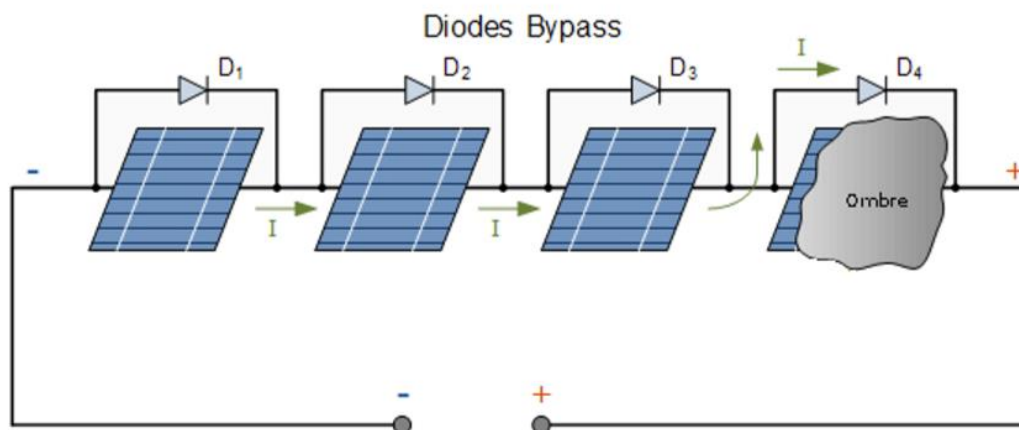


Figure (1.14) : Fonctionnement des diodes by-pass.

En temps normal, les diodes n'ont aucune action sur le fonctionnement du circuit. Lorsque le quatrième bloc des cellules se retrouve à l'ombre, la tension à ses bornes grimpe. Cette

tension grimpe aussi aux bornes de la diode **D4** qui se met à conduire le courant voir **la figure (1.14)**.

Le quatrième bloc est alors neutralisé mais les autres continuent à produire normalement. En résumé, **D4** permet de protéger le quatrième bloc de la surchauffe, tout en permettant aux autres blocs de continuer à produire normalement.

3.6.4.2. Les diodes anti retour

Une autre protection consiste à protéger le module photovoltaïque contre les courants négatifs qui pourraient être générés lors de différentes connexions en parallèle de plusieurs panneaux (lorsque le panneau devient récepteur plutôt que générateur).

Ainsi, une diode anti retour est mise en série avec chaque branche d'un module **PV**.

Le risque est que des chaînes de cellules fortement éclairées débitent dans des chaînes soumises à moins d'éclairage. Il est à souligner que la présence de cette diode **anti-retour** permet d'éviter tous les courants négatifs y compris provenant de la charge (comme une batterie par exemple fonctionnant tout le temps et pouvant débiter sur le générateur **PV** la nuit).

3.7. Modèle du module photovoltaïque

Le modèle du module photovoltaïque est obtenu en remplaçant chaque cellule dans **la figure (I.13)** par le schéma équivalent présenté dans la **Figure (I.9)** (en considérant le même éclairement et la même température pour toutes les cellules).

Dans le modèle mathématique du module **PV**, qui sera présenté par la suite, les paramètres du module ont été référencés par la lettre **m** et les paramètres de la cellule **PV** ont été référencés par la lettre **c**. Ainsi, le courant I_s^m , généré par le module **PV**, dans des conditions de fonctionnement arbitraires, peut être décrit par :

$$I_{sm} = I_{phm} - I_{0m} \left(e^{\left(\frac{V_{sm} + R_{sm} \cdot I_{sm}}{nkt} \right)} - 1 \right) \quad \text{I.15}$$

3.8. Caractéristiques essentielles du module photovoltaïque

Afin d'évaluer l'influence de la température, l'irradiation et la résistance série sur les caractéristiques du module photovoltaïque, des essais ont été menés sur le module **BP SX 150s** constitués de quatre blocs série soit 72 cellules.

Chapitre I GENERALITES Sur le Système Photovoltaïque

Leur environnement de fonctionnement traditionnel comprend la connexion de quatre diodes **by-pass** et d'une diode **anti-retour**.

La fiche technique de ce module indique les informations résumées dans le **tableau (I.2)** [17]

Caractéristiques Electriques	BP SX 150s
Puissance maximale (Pmpp)	150 W
Tension à la puissance maximale (Vmpp)	34.5 V
Courant à la puissance maximale (Impp)	4.35 A
Tension de circuit ouvert (Vco)	43.5V
Courant de court-circuit(Icc)	4.75A
Coefficient de température de Courant	(0.065±0.015) %/C°
Coefficient de température de Tension	(160 ±20) mV/C°
Coefficient de température de Puissance	(0.5±0.05) %/C°
NOCT	(47±2) C°

Tableau (I.2) : Caractéristiques électriques du module PV BP SX 150s

NOCT (Nominal Operating Cell Température), c'est la température du module dans les conditions de fonctionnement suivantes : la température ambiante de 20°C, irradiation solaire de 0.8 kW/m², et vitesse du vent de 1m/s.

La température du module est donnée donc par la formule empirique suivante [18] :

$$T_{cell} = T_{amb} + \left(\frac{NOCT-20}{800} \right) * G \quad I.16$$

La courbe de fonctionnement **I_s-V_s** d'un module de base est une courbe se déduisant de la courbe de fonctionnement d'une cellule élémentaire par changement d'échelle sur les deux axes, **figure (I.15)**.

Les performances d'un module photovoltaïque sont déterminées à partir de ces courbes. La connaissance du profil de ces courbes caractéristiques, pour une gamme d'éclairement la plus large possible, permet d'évaluer les puissances maximales délivrées ainsi que les rendements correspondants.

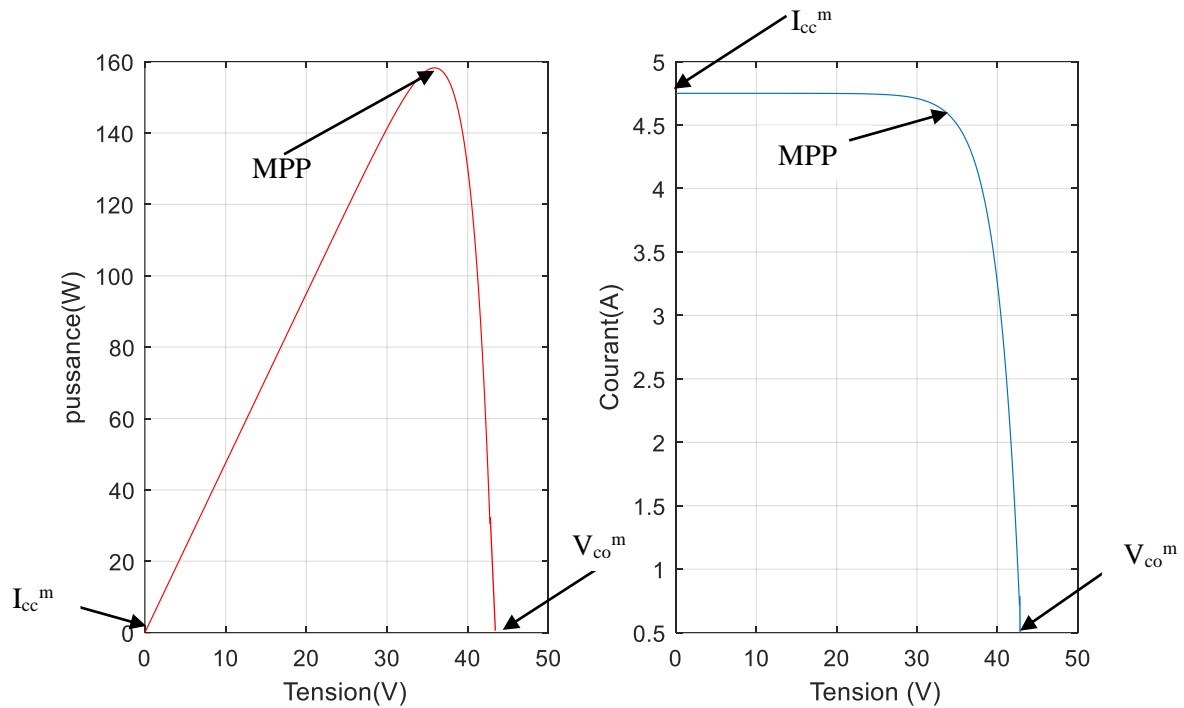


Figure (I.15) : Caractéristiques électriques d'un panneau photovoltaïque.

3.9. Influence de l'éclairement, la température et la résistance sur les courbes $I=f(V)$ et $P=f(V)$

3.9.1. Influence de l'éclairement sur la caractéristique $I=f(V)$ et $P=f(V)$

La Figure (I.16) montre l'influence de l'éclairement sur la caractéristique $I=f(V)$.

A une température constante, on constate que le courant subit une variation importante, mais par contre la tension varie légèrement; car le courant de court-circuit est une fonction linéaire de l'éclairement alors que la tension de circuit ouvert est une fonction logarithmique [19]

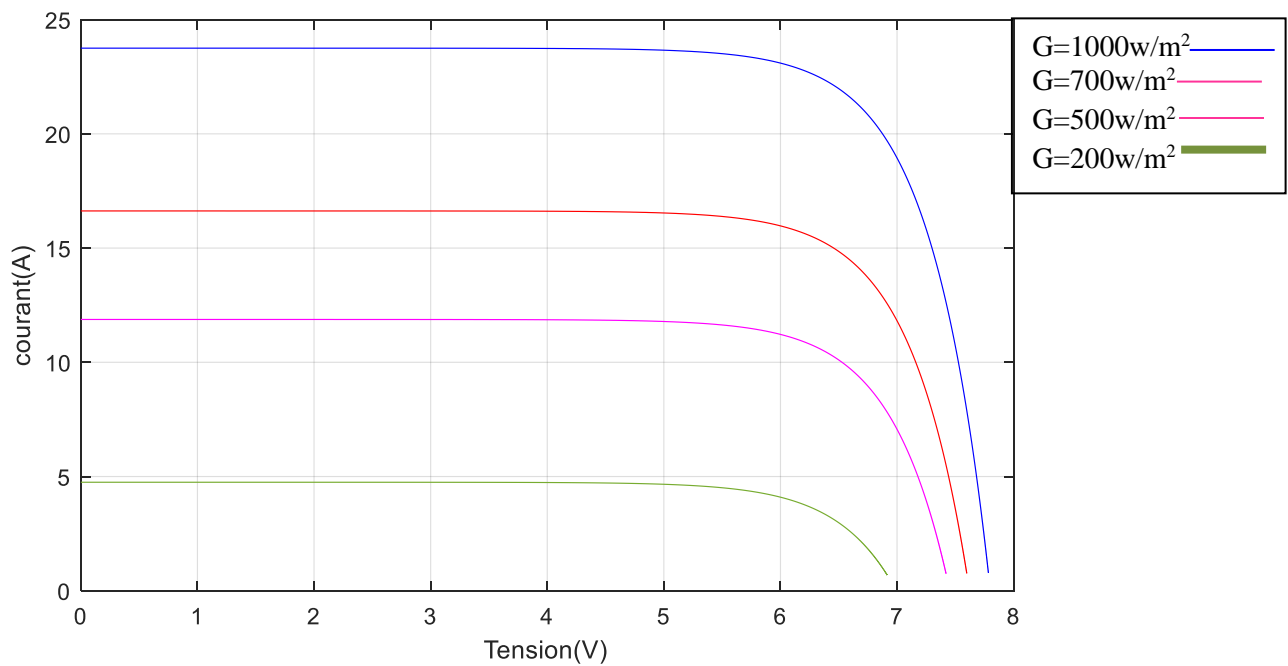


Figure (I.16) Influence de l'éclairement sur la caractéristique $I=f(V)$

La Figure (I.17) illustre la variation de la puissance délivrée par le générateur en fonction de la tension pour différentes valeurs d'éclairement, ce qui nous permet de déduire l'influence de l'éclairement sur la caractéristique $P(V)$.

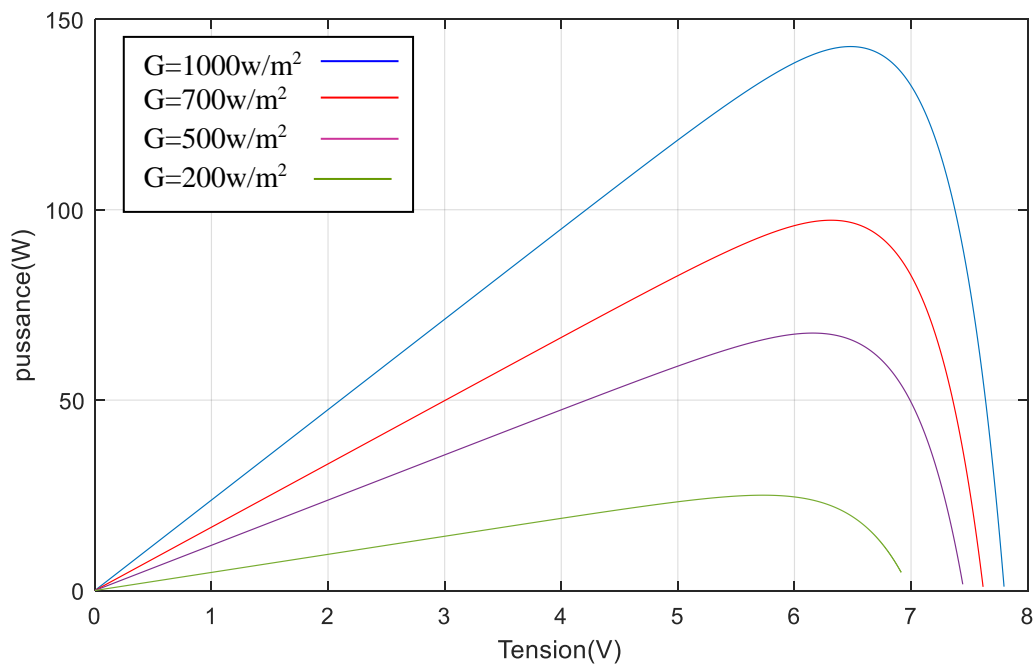


Figure (I.17) L'influence de l'éclairement sur la caractéristique $P=f(V)$.

3.9.2. Influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$ et $P=f(V)$

La Figure (I.18) montre l'influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$.

Il est essentiel de comprendre l'effet de changement de la température d'une cellule solaire sur la caractéristique $I=f(V)$. Le courant dépend de la température puisque le courant augmente légèrement à mesure que la température augmente, mais la température influence négativement sur la tension de circuit ouvert. Quand la température augmente la tension de circuit ouvert diminue. Par conséquent la puissance maximale du générateur subit une diminution [05].

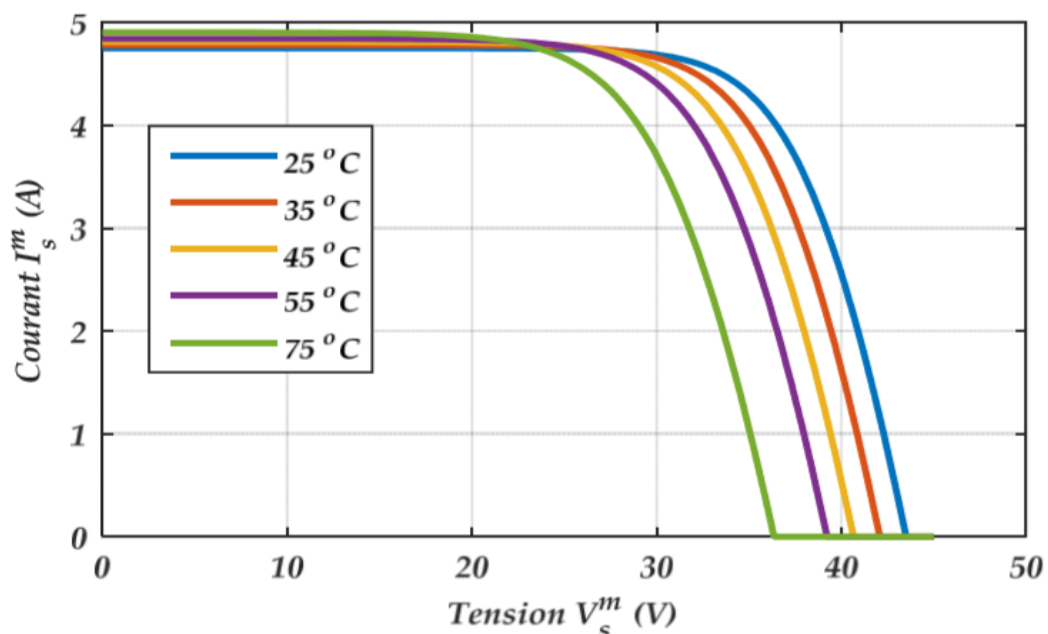


Figure (I.18) L'influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$

La Figure (I.19) illustre la variation de la puissance délivrée par le générateur en fonction de la tension pour différentes valeurs de la température, ce qui nous permet de déduire l'influence de la température sur la caractéristique $P=f(V)$ [20].

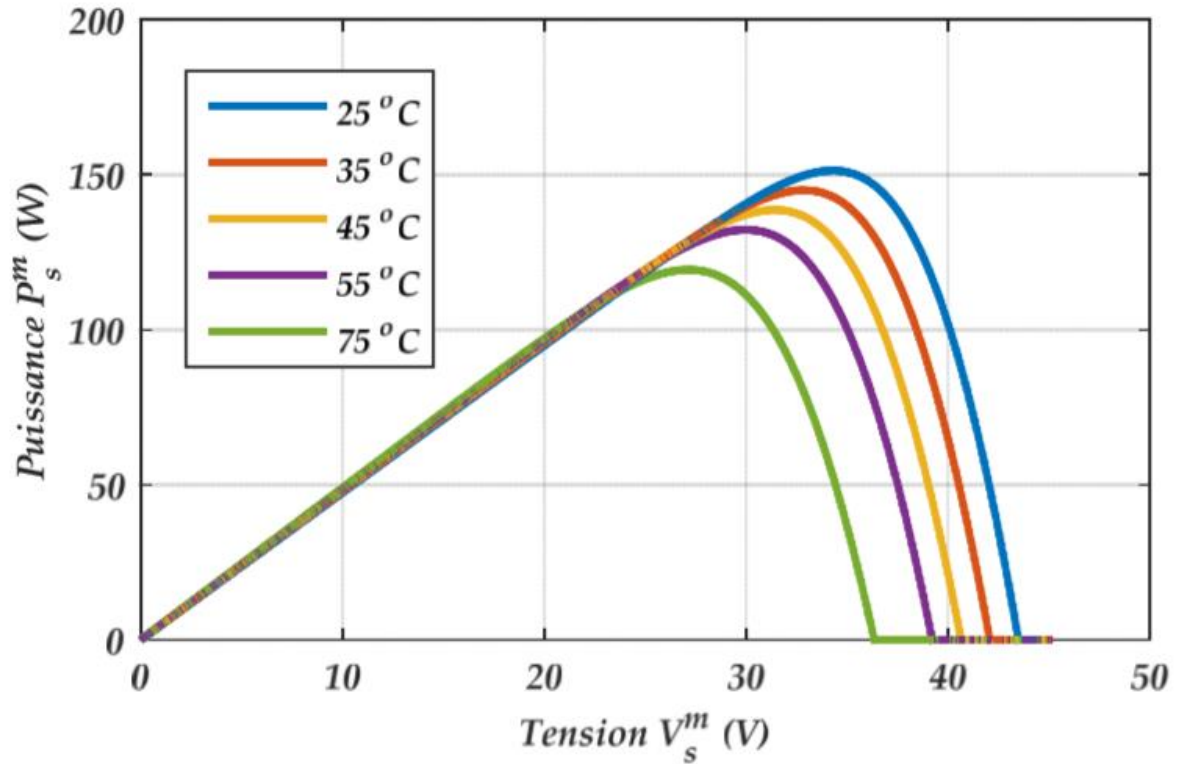


Figure (I.19) L'influence de la température sur la caractéristique $P=f(V)$

3.9.3 Influence de la résistance série sur la caractéristique $I=f(V)$ et $P=f(V)$

Les performances d'une cellule sont d'autant plus dégradées que R_s est grande, la figure I.20 montre l'influence de la résistance série sur la caractéristique $I=f(V)$ et $P=f(V)$. Cette influence se traduit par une diminution de la pente de la courbe $I=f(V)$ dans la zone où le module fonctionne comme une source de tension, à droit du point de puissance maximum, la chute de tension est liée au courant généré par le module.

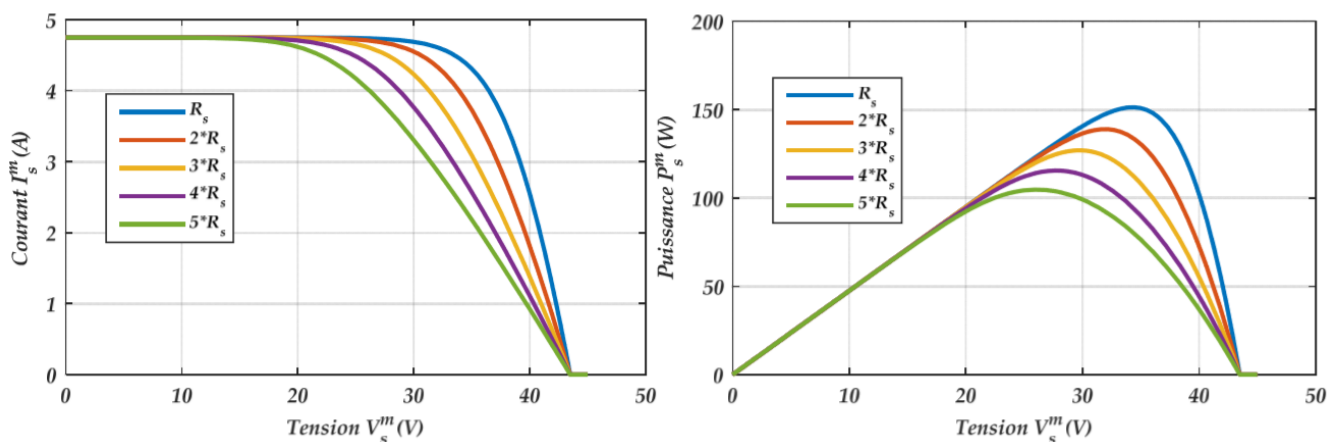


Figure (I.20) L'influence de la résistance sur la caractéristique $I=f(V)$ $P=f(V)$

3.10. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

3.10.1. Avantages [16, 21]

- Les installations photovoltaïques sont en général de haute fiabilité, peu sujettes à l'usure, elles demandent peu d'entretien puisqu'elles ne comportent pas de pièces mobiles ;
- Le montage des installations photovoltaïques est simple et les installations sont adaptables aux besoins de chaque projet, les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au Mégawatt ;
- L'énergie photovoltaïque peut être installée partout, même en ville ;
- Il s'agit d'une source d'énergie électrique totalement silencieuse ce qui n'est pas le cas, par exemple des installations éoliennes ;
- Il s'agit d'une source d'énergie inépuisable ;
- L'énergie photovoltaïque est une énergie propre et non-polluante qui ne dégage pas de gaz à effet de serre et ne génère pas de déchets ;
- Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.

3.10.2. Inconvénients [16, 21]

- La fabrication des panneaux solaires photovoltaïques relève de la haute technologie demandant énormément de recherche et développement et donc des investissements coûteux. Cela se traduit dans le prix de l'installation qui, aujourd'hui, reste chère
- Les rendements des panneaux photovoltaïques sont encore faibles et de l'ordre de 20 % (pour les meilleurs). L'énergie photovoltaïque convient donc mieux pour des projets à faible besoins, comme une maison unifamiliale, par exemple ;
- Dans le cas d'une installation photovoltaïque autonome qui ne renvoie pas son surplus d'électricité au réseau, il faut inclure des batteries dont le coût reste très élevé et le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes ;
- Le niveau de production d'électricité n'est pas stable et pas prévisible mais dépend du niveau d'ensoleillement. De plus, il n'y a aucune production d'électricité le soir et la nuit ;
- La durée de vie d'une installation photovoltaïque n'est pas éternelle mais de l'ordre de 20 à 30 ans. De plus, le rendement des cellules photovoltaïques diminue avec le temps

Chapitre I GENERALITES Sur le Système Photovoltaïque

qui passe. On parle en général pour les panneaux photovoltaïques, d'une perte de rendement de 1 % par an.

4-Conclusion

Ce chapitre nous a permis de donner un aperçu général sur les systèmes photovoltaïques. Dans la première partie on a donné une classification des systèmes solaire photovoltaïques avec une description de la cellule **PV** et son modèle mathématique précisément le modèle à deux diodes avec cinq paramètres. La seconde partie du chapitre est consacrée au générateur **PV** et l'influence de température et l'éclairement sur leur caractéristique $I=f(V)$ et $P=f(V)$.

Chapitre II

Les convertisseurs

DC-DC et

La Commande MPPT

1. Introduction

Comme on a vu dans le chapitre précédent, les caractéristiques d'un module solaire montrent bien que la puissance maximale générée dépend fortement de l'intensité des radiations ainsi que de la température ou la résistance. En plus de ces dépendances, le module solaire ne peut générer sa puissance maximale que pour une certaine tension et courant de fonctionnement, la position de ce point de fonctionnement dépendant à son tour de l'ensoleillement et de la température ainsi que de la charge.

Pour que le module fournisse sa puissance maximale disponible il faut une adaptation permanente de la charge avec le générateur photovoltaïque.

Cette adaptation pourra être réalisée par l'insertion d'un convertisseur **DC-DC** (hacheur) contrôlé par un mécanisme de poursuite «Maximum Power Point Tracking» (**MPPT**) [06].

Le but de ce chapitre est l'étude de types de convertisseur **DC-DC**, utilisé dans les systèmes photovoltaïques. Comme l'hacheur survolteur (**boost**). Ainsi, on décrit la commande **MPPT** des convertisseurs **DC-DC** utilisé dans notre travail.

On présente dans ce chapitre, quelques méthodes **MPPT** basées sur contre réaction de puissance, l'algorithme de méthode perturbation et observation.

2. Hacheur Boost

2.1. Définition

Les hacheurs présentent une partie essentielle dans le dispositif de commande d'un champ photovoltaïque. Ils permettent de délivrer une tension continue variable à partir d'une source de tension continue constante. Dans cette partie, nous allons à présent étudier le montage le plus couramment étudié pour élever une tension continue. Il s'agit du montage Boost bien connu sous le nom d'élévateur de tension abaisseur de courant.

Le schéma de principe d'un hacheur Boost est donné par **la figure (II.1)**

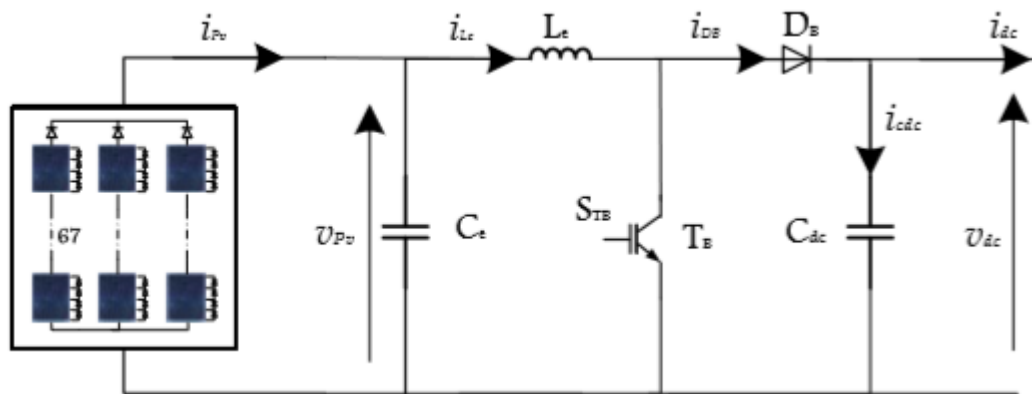


Figure (II.1) Schéma de principe d'un hacheur boost.

Ce nom est lié au fait que la tension moyenne de sortie V_{dc} est supérieure à celle de l'entrée V_{pv} . Cette structure demande un interrupteur commandé et en parallèle avec la source.

Le montage le plus simple consiste à mettre périodiquement en court-circuit la résistance R pendant une durée $t = \alpha t_f$ bien déterminée; cette mise en court-circuit est assurée par un hacheur branché en parallèle avec la résistance.

Ce hacheur comporte trois composants essentiels :

Une inductance L , une capacité C_{dc} et le transistor.

Pour un rapport cyclique « α » donné, et en régime de conduction continu, la tension moyenne et le courant à la sortie sont donnés par [22]

$$V_{dc} = \frac{1}{1-\alpha} V_{pv} \quad \text{II.1}$$

$$I_{dc} = (1 - \alpha) I_{dc} \quad \text{II.2}$$

α : est appelé rapport cyclique, et compris entre 0 et 1.

Le rapport cyclique α est généré par un comparateur déposé sur la technique MLI où il résulte de l'intersection de deux signaux, l'un triangulaire et l'autre prend une valeur de référence, varie d'après la tension cible de la sortie du hacheur V_{dc} .

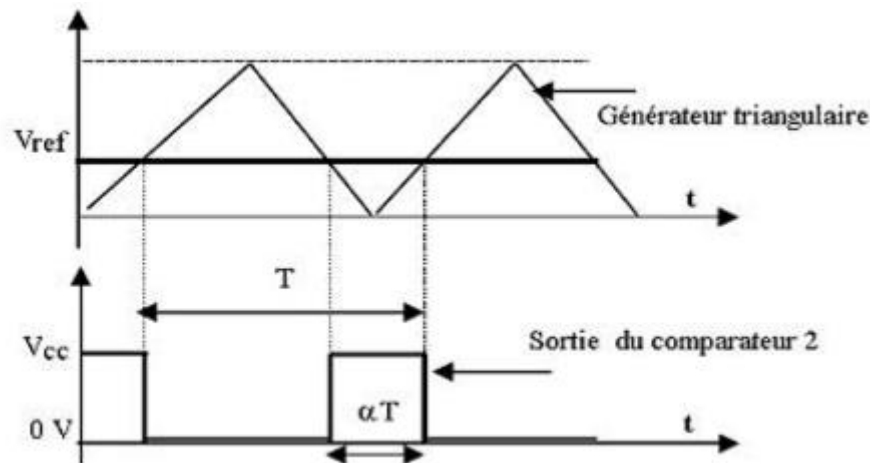


Figure (II.2) Génération d'une valeur de rapport cyclique α

Le calcul des composants L_e et C_{dc} se fait grâce aux expressions suivantes:

$$\Delta I_{ph} = \frac{V_{pv}}{L \cdot f_p} a \quad 2.3$$

$$\Delta V_{dc} = \frac{V_{pv} a}{R \cdot C \cdot f_p (1 - a)} \quad 2.4$$

f_p : représente la fréquence de porteuse utilisée.

Avec ΔI_{pv} , ΔV_{dc} , les oscillations du courant dans l'inductance et de la tension de sortie autour de leurs valeurs moyennes.

On s'aperçoit que le convertisseur Boost est le sujet de nombreuses réflexions et ressort le plus fréquemment dans la littérature pour une conversion **DC/DC**. En effet en prenant en compte les caractéristiques des différents convertisseurs **DC/DC**, le Boost, de part sa simplicité, son faible coût et son rendement élevé, est la structure retenue pour réaliser la plupart des convertisseurs **DC/DC** photovoltaïques.

Dans le cas où la puissance générée du générateur photovoltaïque est plus forte il faut intéresser à ce type d'hacheur pour augmenter la tension d'entrée de l'onduleur.

2.2. Adaptation de la charge

Ce type de convertisseur est destiné à adapter à chaque instant l'impédance apparente de la charge à l'impédance du champ PV correspondant au point de puissance maximal **Figure (II.3)**.

Ce système d'adaptation est couramment appelé **MPPT** (Maximum Power Point Tracking).

Dans la (Figure II.3), la zone (1) de la caractéristique courant-tension **I-V** est une zone de fonctionnement dans le mode « hacheur dévolteur » et l'MPPT est assurée pour toute résistance R_i comprise entre $[0, R_{opt}]$. Ceci s'inverse pour la zone (2) de la caractéristique courant-tension **I-V** qui présente la zone de fonctionnement dans le mode « hacheur survolteur » ou le fonctionnement du MPPT est assuré pour toute résistance R_i comprise entre $[R_{opt}, \infty]$.

Donc, un choix de convertisseur Boost pour une charge donnée est impératif et on peut utiliser ces types de convertisseur selon la configuration du circuit. Si il' y a une possibilité de fluctuation de la tension demandée par la charge au-dessous est au-dessus de celle débité par la source, un Hacheur Boost s'avère nécessaire.

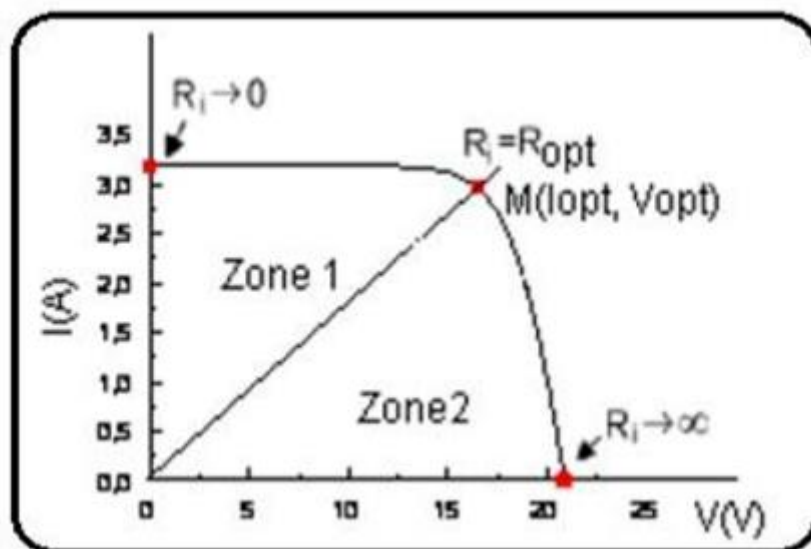


Figure (II.3) Répartition de la caractéristique selon le fonctionnement du hacheur Boost

2.3 Etude de l'hacheur Boost d'un système photovoltaïque

2.3.1 Représentation d'un hacheur Boost PV

La résistance à la sortie du panneau **PV** (R_{pv}) en fonction de α et R_{ch} :

$$R_{ch} = \frac{R_{pv}}{(1-\alpha)^2} \quad 2.5$$

Dans les conditions optimales et pour une charge R_{ch} égale la résistance de l'entrée R_{pv} , le rapport cyclique ($\alpha = 0$) Aussi, le rapport cyclique α s'écrit en fonction des résistances R_{pv} et R_{ch} :

$$\alpha = 1 - \sqrt{\frac{R_{pv}}{R_{ch}}} \quad 2.6$$

Puisque le rapport α est inférieur à 1 ($\alpha < 1$), le convertisseur ne joue le rôle d'un élévateur que si la charge R_{ch} remplit la condition suivante: $R_{ch} > R_{pv}$.

Les différents signaux des grandeurs de convertisseur boost sont illustrés dans la figure(II.4)

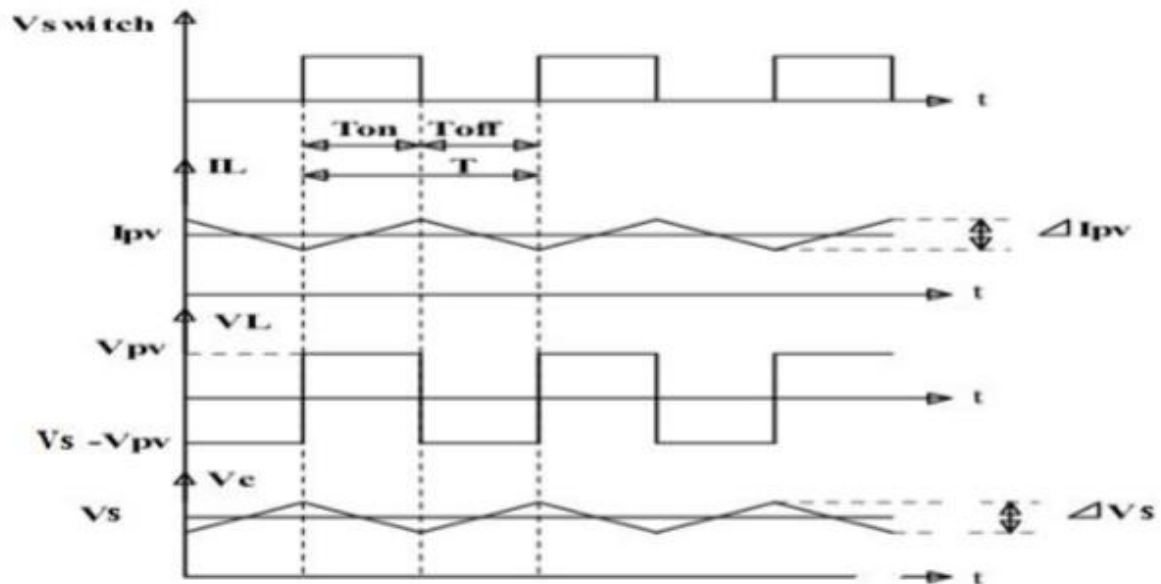


Figure (II.4) Formes typiques des ondes du convertisseur boost

2.3.2 Modélisation d'un hacheur Boost

La modélisation de ce convertisseur passe par l'analyse des différentes séquences de fonctionnement que nous supposons de durées fixées par la commande α .

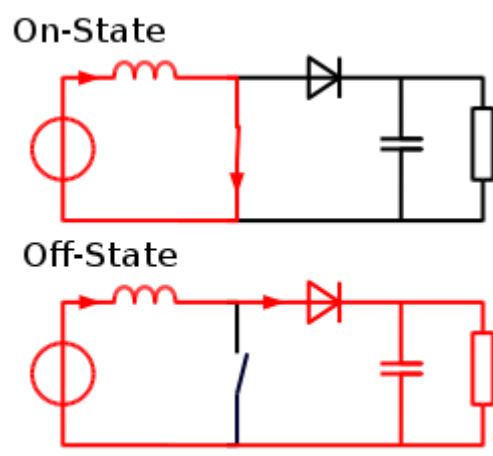


Figure (II.5) schéma du surclassons du courant dans les deux cas

Il apparaît deux séquences de fonctionnement selon l'état de l'interrupteur **S**, que nous pouvons représenter chacune par une équation différentielle.

Dans de tels systèmes, l'ordre d'équations d'états est égal au nombre des éléments de stockage (pour ce cas étudié l'ordre est de 2).

Dans le cas où le système considéré est linéaire, la représentation d'état se met sous la forme

$$\begin{cases} \dot{x} = A_x + B_u \\ y = C_x \end{cases} \quad 2.7$$

Où x : vecteur d'état : $x=[x_1, x_2]=[I_L, V_{dc}]$.

u : vecteur de commande.

A : matrice d'état.

B : matrice d'entrée.

y : le vecteur de sortie.

C : matrice de sortie.

➤ **Première séquence de conduction [0 à αT]:**

Lorsque **S** est fermé. Le comportement dynamique du circuit est donné par:

$$V_{pv} = L \frac{di_c}{dt} \quad \text{II.8}$$

$$x_1 = \frac{V_{pv}}{L} \quad \text{II.9}$$

$$V_{dc} = \frac{1}{c} \int i_c dt \quad \text{II.10}$$

$$\dot{x}_2 = \frac{1}{c} i_c \quad \text{II.11}$$

$$0 = c \frac{dV_{dc}}{dt} + I_{ch} \quad \text{II.12}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} V_{pv} \quad \text{II.13}$$

qui peut être écrit sous la forme:

$$\dot{x} = A_1 x + B_1 V_{pv} \quad \text{II.14}$$

$$V_{ch} = C_1 x \quad \text{II.15}$$

Avec : $C_1 = [0,1]$

➤ **Deuxième séquence de conduction: $[\alpha T$ à $T]$: Lorsque S est ouvert.**

$$L \frac{di_l}{dt} = V_{pv} - V_c \quad \text{II.14}$$

$$C \frac{dv_c}{dt} = i_L - \frac{V_c}{R} \quad \text{II.15}$$

$$\dot{x}_1 = \frac{1}{L} V_{pv} - \frac{1}{L} x_2 \quad \text{II.16}$$

$$\dot{x}_2 = \frac{1}{C} x_1 - \frac{1}{RC} x_2 \quad \text{II.17}$$

$$V_{pv} = L \frac{dL_l}{dt} + V_c \quad \text{II.18}$$

$$I_l = C \frac{dV_c}{dt} + I_{ch} \quad \text{II.19}$$

D'où :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} V_{pv} \quad \text{II.20}$$

Ce système peut être mis sous la forme :

$$\dot{x} = A_2 x + B_2 V_{pv} \quad \text{II.21}$$

$$V_{ch} = C_1 x \quad \text{II.22}$$

➤ **Model moyen**

A partir des équations (II.13) et (II.22), on peut déduire la forme moyenne et V_{ch} pour toute la période :

$$\dot{x}_1 = (A_1 x + B_1 V_{pv})a + (A_2 x + B_2 V_{pv})(1 - a) \quad \text{II.23}$$

$$V_{ch} = (C_1 a + C_1 (1 - a))x \quad \text{II.24}$$

Avec :

$$A = A_1 a + A_2 (1 - a) \quad \text{II.25}$$

$$B = B_1 a + B_2 (1 - a) \quad \text{II.26}$$

Où

A : matrice d'état

B: matrice de commande

En conclusion: le modèle moyen du hacheur survolteur est :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\frac{1-a}{L} x_2 + \frac{1}{L} u \\ \dot{x}_2 = \frac{1-a}{c} x_1 - \frac{1}{RC} x_2 \end{cases} \quad \text{II.27}$$

Ainsi le courant de la charge égale :

$$I_{ch} = \frac{1}{R} V_c = \frac{1}{R} x_2 \quad \text{II.28}$$

$$x_2 = R \cdot I_{ch} \quad \text{II.29}$$

Donc l'équation **II.27** sera comme suite :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\frac{1-a}{L} x_2 + \frac{1}{L} u \\ \dot{x}_2 = \frac{1-a}{c} x_1 - \frac{1}{C} I_{ch} \end{cases} \quad \text{II.30}$$

3. Technique de commande de la MPPT

3.1. Définition

Les générateurs photovoltaïques ont une production électrique aléatoire directement dépendante des conditions météorologiques. Ainsi, le dimensionnement et l'exploitation optimale de l'énergie produite par ces générateurs exige l'utilisation de méthodes de gestion appropriées.

De même, l'amélioration du rendement du système photovoltaïque nécessite la maximisation de la puissance du générateur **PV** qui permet d'établir la commande adéquate en vue de tirer le maximum de puissance de ces générateurs. Par définition, une commande **MPPT**, associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un générateur **PV** de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quelque soient les conditions

météorologiques (température et irradiation), et quelle que soit la tension de la batterie, la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum [23].

3.2. Convertisseur Pour la poursuite du point de puissance maximum(MPPT)

Pour la maximisation de puissance de la source **PV**, en intercalant un quadripôle d'adaptation qui est un convertisseur d'énergie **DC-DC** entre la source **PV** et la charge et avec le contrôle rigoureux du rapport cyclique de ce dernier, Cette adaptation se réalise en cherchant de façon automatique le **PPM** du panneau **PV** et un suivi continu de la puissance maximale est assuré.

Ce type de convertisseur est destiné à adapter à chaque instant l'impédance apparente de la charge à l'impédance du champ **PV** correspondant au point de puissance maximal. Ce système d'adaptation est couramment appelé **MPPT** (maximum power point tracking).

Son rendement se situe entre 90 et 95% [24].

La Figure (II.6) représente le schéma synoptique du ce système **PV**.

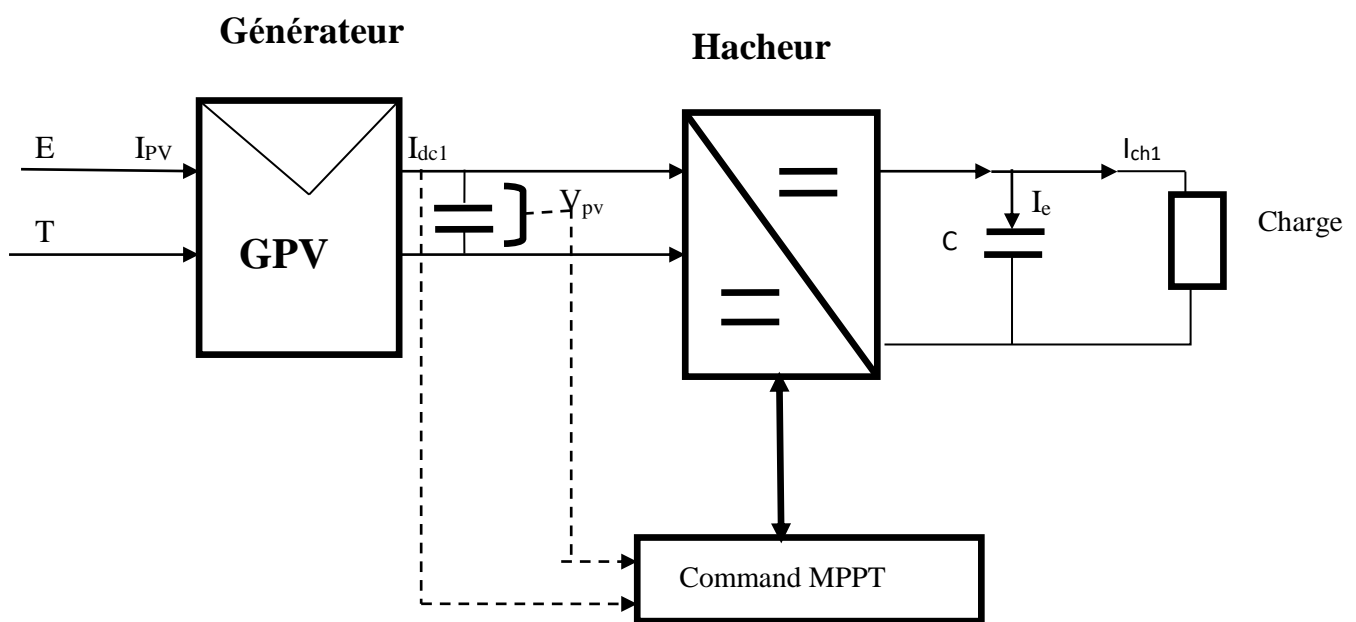


Figure (II.6) Schéma synoptique du système PV par une commande MPPT .

On utilise le convertisseur de type **DC/DC** dans la partie Contrôle du système photovoltaïque car il est facile à contrôler par leurs rapports cyclique en utilisant un signal **MLI**. Ici, on utilise le hacheur Boost comme interface de puissance à contrôler par le régulateur **MPPT**, afin d'adapter la tension de sortie du hacheur à la tension requise par la charge [25].

Du fait de la non linéarité de la caractéristique **I-V**, le circuit **MPPT** oblige le système à fonctionner en permanence sur le point à puissance maximale du générateur, une fois l'éclairement ou la température change.

Le hacheur capte alors la puissance électrique absorbée selon une période d'échantillonnage, et commence à incrémenter ou décrémente le rapport cyclique α pour annuler le gradient de la puissance **P** [26].

$$\frac{\delta p}{\delta \alpha} = 0 \tag{II.31}$$

En effet, ces dispositifs permettent aujourd'hui d'adapter et d'optimiser la production photovoltaïque par le biais de convertisseurs de puissance **DC-DC** insérés entre les modules photovoltaïques et l'entrée de l'onduleur. Généralement, ces étages disposent de commandes de gestion électrique plus ou moins complexes permettant d'adapter la tension **PV** à la tension d'entrée de l'onduleur [26].

3.3. Le principe de fonctionnement du MPPT d'un générateur PV

La commande **MPPT** permet de chercher le point de fonctionnement optimal du module photovoltaïque dans les conditions météorologiques variables.

Ceci est basé sur la variation automatique du rapport cyclique α du signal qui commande le convertisseur d'énergie, à une valeur adéquate de manière à maximiser la puissance à la sortie du module [27].

Comme le montre la **Figure (II.7)**, pour une puissance incidente **W1**, la puissance optimale transférée à la charge est obtenue pour un rapport cyclique α_{opt1} (point **PPM1**).

Si la puissance incidente change (**W2**), alors ce point de puissance maximale est le point **PPM2** et le point de fonctionnement du générateur **PV** est le point **Pf** (**Figure II.7a**).

Pour converger vers le nouveau point **PPM2**, il faut ajuster le rapport cyclique α à la valeur α_{opt2} .

Il en sera de même que lorsque la charge R_{ch} change (**Figure. II.7b**): Le point de puissance maximale dévie de sa position optimale (**PPM1**); pour converger vers ce **PPM1**, il faut agir sur le rapport cyclique(α).

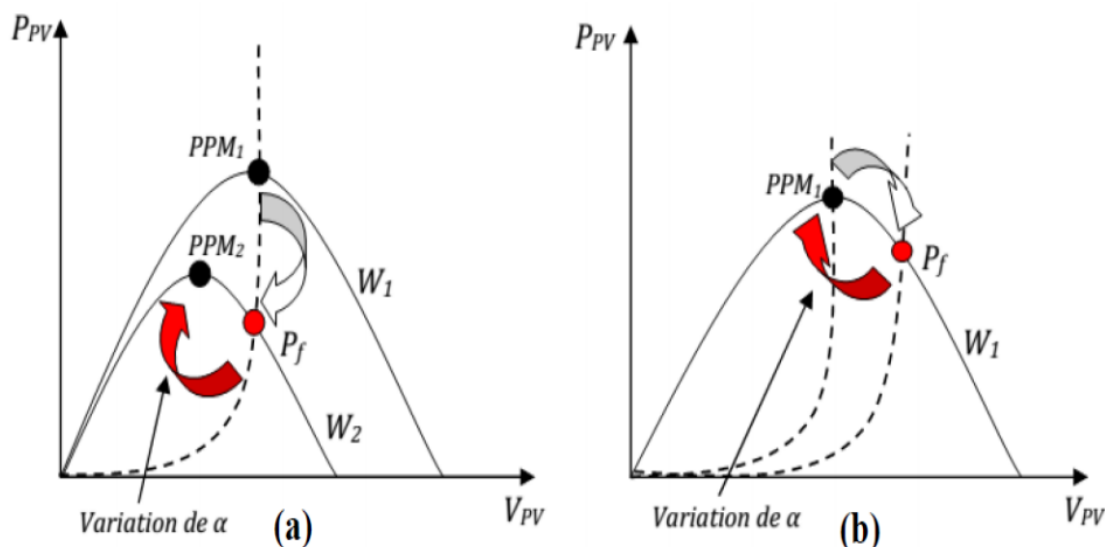


Figure (II.7) Fluctuation du PMM avec : a) Variation de l'éclairement et b) Variation de la charge

Pour savoir l'efficacité de la technique du **MPPT**, on définit le rendement **MPPT** (η_{MPPT})comme suit :

$$\eta_{MPPT} = \frac{P_{in}}{P_{max}} \tag{II.32}$$

Il donne le % de pertes de puissance d'un module **PV (PIN)**, qui correspond à l'entrée de l'étage d'adaptation, par rapport à la fourniture de la puissance maximale qu'il pourrait produire (**P_{MAX}**) [28].

Pour transférer la puissance électrique produite, le mode de transfert utilisé peut présenter plus ou moins un taux de pertes lié à sa constitution.

Nous définissons pour qualifier ces étages de conversion électrique et de transfert, le rendement de conversion d'un étage d'adaptation noté η_{conv} permettant d'évaluer les pertes liées à la conversion de puissance associée à l'étage d'adaptation.

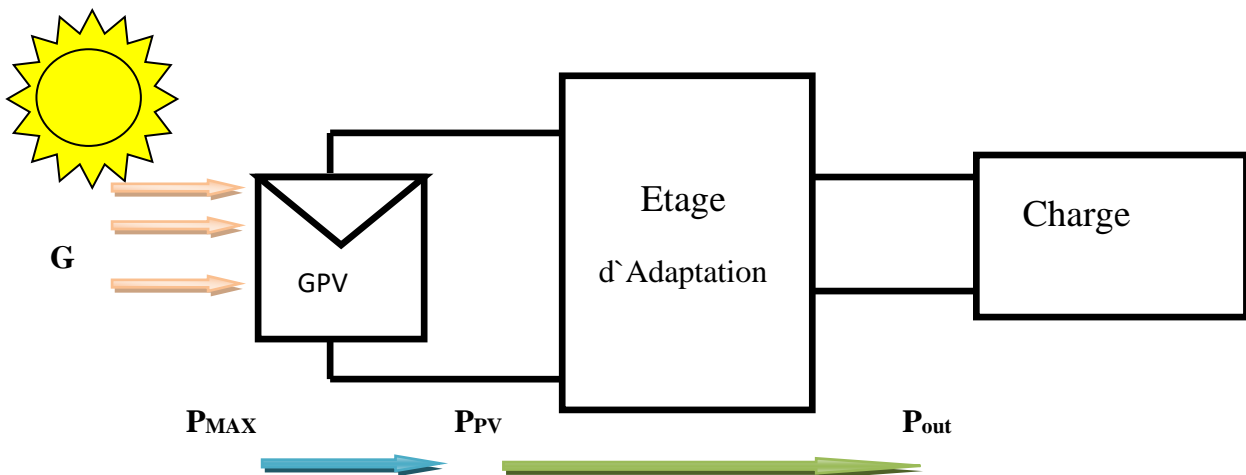


Figure (II.8) Chaîne de conversion photovoltaïque

Ce type de rendement dépend du temps et des conditions de fonctionnement.

Il est nécessaire, pour obtenir une grande précision sur cette grandeur, d'effectuer les mesures de courant et de tension en entrée et en sortie de l'étage au même instant garantissant ainsi la connaissance précise du transfert de puissance effectué à un instant donné.

$$\eta_{conv} = \frac{P_{out}}{P_{pv}} \quad \text{II.33}$$

Ce rendement traduit la capacité de la totalité d'une chaîne **PV** à produire plus ou moins de l'énergie électrique.

Cela permet également de comprendre la différence entre un rendement effectué en laboratoire sur des matériaux et des cellules **PV** sous température et irradiation contrôlées et le rendement réel des **GPV** installés fonctionnant en conditions réelles [28].

$$\eta_{tot} = \frac{P_{max}}{G.S} \cdot \frac{P_{pv}}{P_{max}} \cdot \frac{P_{out}}{P_{pv}} \quad \text{II.34}$$

Ce rendement traduit la capacité de la totalité d'une chaîne **PV** à produire plus ou moins de l'énergie électrique. Cela permet également de comprendre la différence entre un rendement effectué en laboratoire sur des matériaux et des cellules **PV** sous température et irradiation contrôlées et le rendement réel des **GPV** installés fonctionnant en conditions réelles [28].

3.4. Différentes techniques d'MPPT

Afin d'extraire Le maximum de puissance d'un panneau solaire, on peut raisonner Sur plusieurs et différentes méthodes, Certains des concepts sont très robustes et simples, tandis que d'autres approches exigent des dispositifs de logique très sophistiqués tels que des micro-processeurs combinés avec des circuits de puissance, de convertisseurs de commutation... Divers travaux sur des commandes assurant un fonctionnement de type **MPPT** apparaissent régulièrement depuis 1968, date de publication de la première loi de commande de ce type adaptée à une source d'énergie renouvelable de type **PV**. En littérature on trouve fréquemment les techniques de maximisation de puissance suivantes [29]:

- Perturbation et observation. (P&O).
- La méthode incrémentation de la conductance.
- Méthode de capacité parasite.

Chacune de ces techniques à ces propres avantages et inconvénients du point de vue simplicité, efficacité et robustesse.

Dans notre travail, on se limite à la méthode de Perturbation et observation (**P&O**), qui est très simple à implanter, et de bon rendement.

3.5. La méthode Perturbation et Observation P&O

3.5.1 Définition

C'est l'algorithme de poursuite du **PPM** le plus utilisé, et comme son nom l'indique il est basé sur la perturbation du système par l'augmentation ou la diminution de V_{ref} où en agissant directement sur le rapport cyclique du convertisseur **DC/DC**, puis l'observation de l'effet sur la puissance de sortie du panneau.

Si la valeur de la puissance actuelle **P(k)** du Panneau est supérieure à la valeur précédente **P(k-1)**, alors on garde la même direction de perturbation précédente sinon on inverse la perturbation du cycle précédent.

3.5.2. Le fonctionnement de l'algorithme P&O

La **Figure (II.9)** donne l'organigramme de cet algorithme [19].

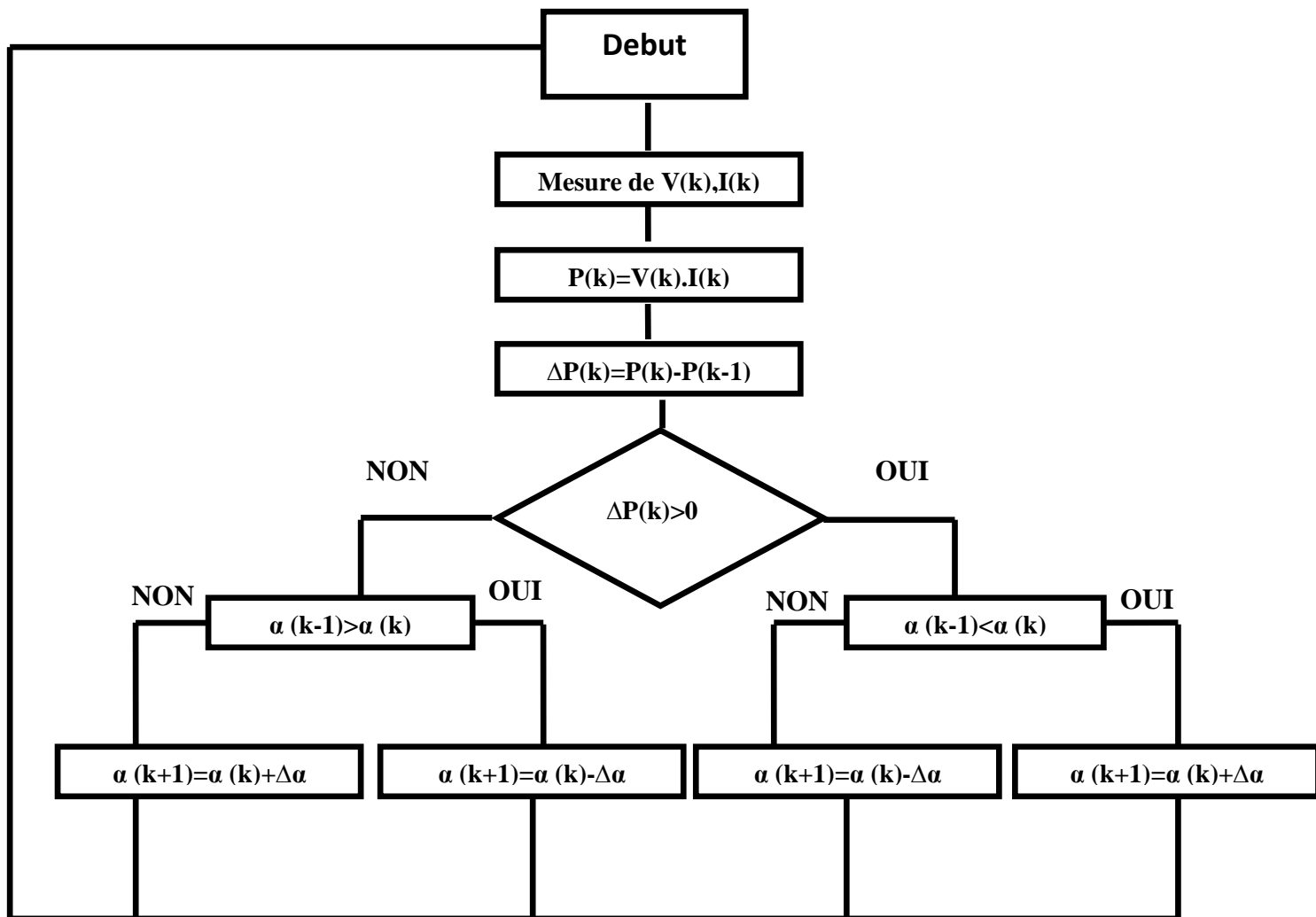


Figure (II.9) Organigramme de l’algorithme Perturbation et Observation (P&O)

D’abord la tension V et le courant I sont mesurés pour calculer la puissance (k) . Cette valeur $P(k)$ est comparée à la valeur de la puissance obtenue durant la dernière mesure $(k - 1)$.

1- Si la puissance fournie par le panneau a augmenté depuis la dernière mesure, l’incrémenter ou des incréments du rapport cyclique α continuera

Dans le même sens que lors du dernier cycle et ceci est fait par le test sur dV .

- Si $dV > 0$ cela veut dire qu’on a incrémenté V durant le dernier cycle c’est-à-dire

$$\alpha(k + 1) = \alpha(k) + \Delta\alpha \tag{2.35}$$

- Si $dV < 0$ cela veut dire qu’on a décrémenté V durant le dernier cycle c’est-à-dire qu’on va mettre:

$$\alpha(k + 1) = \alpha(k) - \Delta\alpha \tag{2.36}$$

Donc on termine dans le chemin où P continue à augmenter. Si la puissance fournie par le panneau a diminué de puis la dernière mesure, l’incrémenter ou la des incréments du

rapport cyclique α sera en sens inverse par rapport au dernier cycle et ceci est fait aussi par le test sur dv .

Avec cet algorithme la tension de fonctionnement V est perturbée avec chaque cycle [19].

3.5.3. Avantages et inconvénients de P&O

c. Avantage :

- Structure de régulation simple
- Nombre des paramètres mesures réduit

d. Inconvénients :

- Dépassement du point maximum optimal en cas de changement rapide des conditions atmosphériques [30].

4. Conclusion

Dans ce chapitre, on a exposé brièvement quelques topologies de base des convertisseurs continu-continu **boost**.

On a présenté aussi la commande **MPPT** des convertisseurs **DC-DC** pour rechercher le point où la puissance du générateur photovoltaïque est maximale, sous différentes conditions de fonctionnement. On a étudié la commande **MPPT** basées sur l'algorithme de perturbation et observation.

Chapitre III

L'onduleur et la commande

MLI vectorielle

1. Introduction

L'utilisation de convertisseurs statiques au sein des réseaux est de plus en plus répandue notamment pour connecter les sources de production décentralisées renouvelables.

Dans ce cadre, les onduleurs triphasés **MLI** à injection de courants sinusoïdaux et en phase avec le réseau électrique sont des convertisseurs couramment employés.

Dans la première partie de ce chapitre on étudiera les convertisseurs, leurs modélisations et ses principes de fonction.

Dans la deuxième partie On présentera les stratégies de commande de l'onduleur précisément la **MLI** vectorielle.

2. Les convertisseurs DC-AC (Onduleurs)

2.1. Définition

L'onduleur est un convertisseur continu/ alternatif (**DC-AC**), il permet d'obtenir une tension alternative (éventuellement réglable en fréquence et en amplitude) à partir d'une source de tension continue.

Son symbole est illustré dans **la Figure (III.1)**.

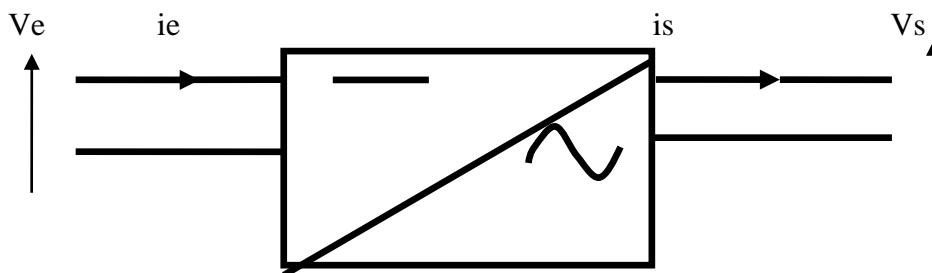


Figure (III.1) Symbole de convertisseur Continu - Alternative (DC- AC)

Les onduleurs sont basés sur une structure en pont en **H**, constituée le plus souvent d'interrupteurs électroniques tels que les **IGBT**, transistors de puissance ou thyristors. Par un jeu de commutations commandées de manière appropriée (généralement une modulation de largeur d'impulsion), on module la source afin d'obtenir un signal alternatif de fréquence désirée [31].

Chapitre III L'onduleur et la commande MLI vectorielle

2.2. Onduleur de tension à deux niveaux

2.2.1. Définition

L'onduleur triphasé dit deux niveaux est illustré par son circuit de puissance de **la Figure (III.2)**.

On doit distinguer d'une part les tensions de branche V_{AN} , V_{BN} , V_{CN} mesurées par rapport à la borne négative de la tension continue V_{pv} des panneaux photovoltaïques, d'autre part, il y a les tension de phases V_{An} , V_{Bn} et V_{Cn} mesurées par rapport à un point neutre flottant n . Des tensions simples on peut tirer facilement les tension composées V_{AB} , V_{BC} et V_{CA} [32].

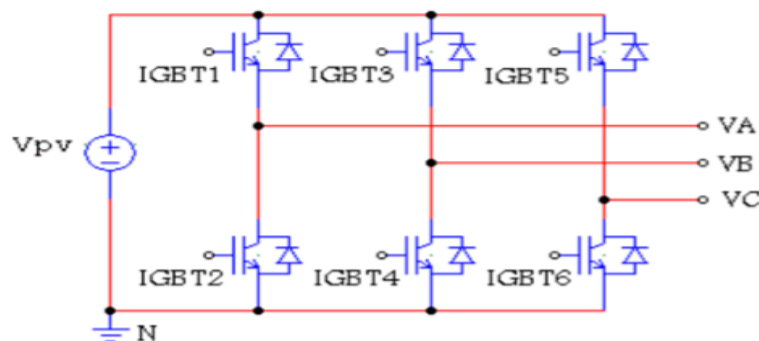


Figure (III.2) Circuit de puissance d'un onduleur triphasé

2.2.2. Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement d'un onduleur est basé sur l'électronique de commutation, on génère une onde de tension alternative à partir d'une tension continue comme le montre (**la Figure III.3**), on peut dire qu'il existe deux moyens pour réaliser cette conversion.

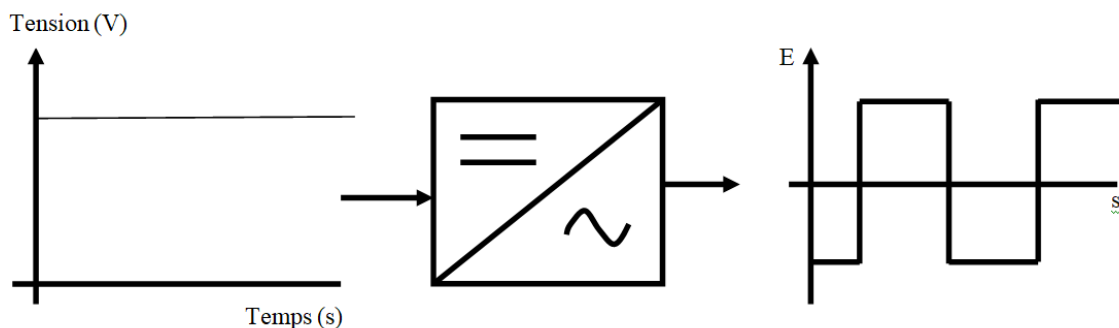


Figure (III.3) Schéma de principe de la conversion Continu - Alternative (DC- AC)

Chapitre III L'onduleur et la commande MLI vectorielle

L'utilisation directe d'une paire d'interrupteurs de base qui consiste à régler la fréquence et la durée des interconnexions de la source avec la sortie.

Il est donc plutôt temporel et débouche sur les techniques de modulation de largeur d'impulsion Contrôler l'amplitude soit de façon continue en créant une source réglable (ce qui suppose l'existence d'un autre étage de conversion), soit de façon discrète en disposant d'un nombre suffisant de sources[31].

Quand **S1 - S2** sont fermés (**ON**) et **S3-S4** sont ouverts (**OFF**) pour $0 < t < T/2$ on obtient une alternance positif $U(t) = V_{DC}$ comme la montre (**la Figure III.4**) ci-dessous

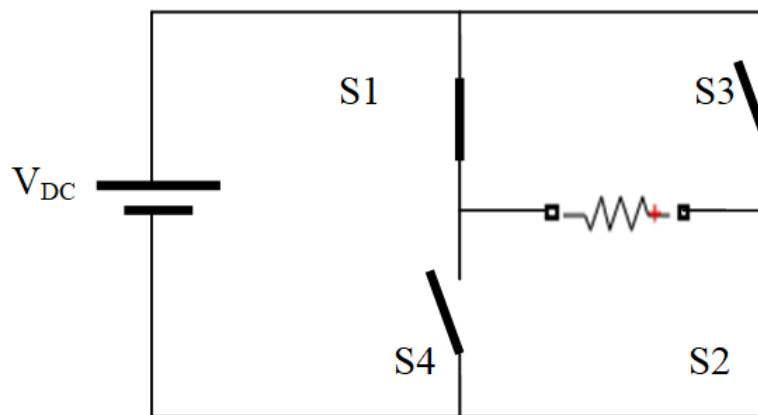


Figure (III.4) Fonctionnement de l'onduleur dans le 1er demi-cycle

Quand **S1 - S2** sont ouverts (**OFF**) et **S3-S4** sont fermés (**ON**) pour $T/2 < t < T$ on obtient une alternance négative $U(t) = -V_{DC}$ comme la montre (**la Figure III.5**)

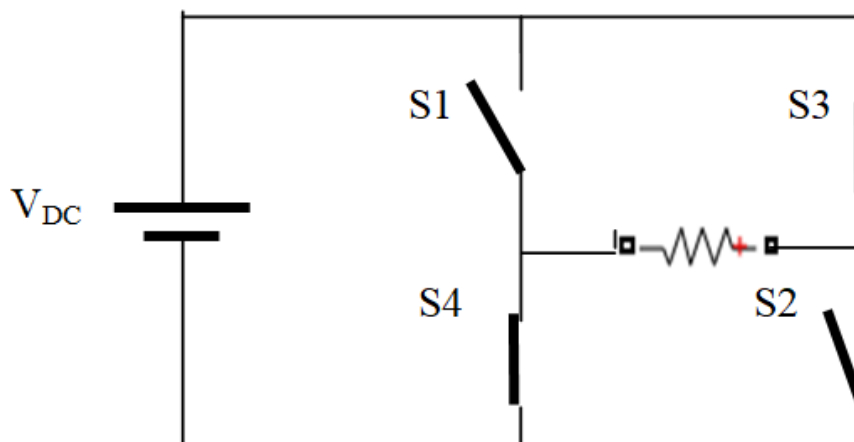


Figure (III.5) Fonctionnement de l'onduleur dans le 2^{ème} demi-cycle

Chapitre III L'onduleur et la commande MLI vectorielle

Le signal résultant sur la période complète est présenté sur (la Figure III.6)

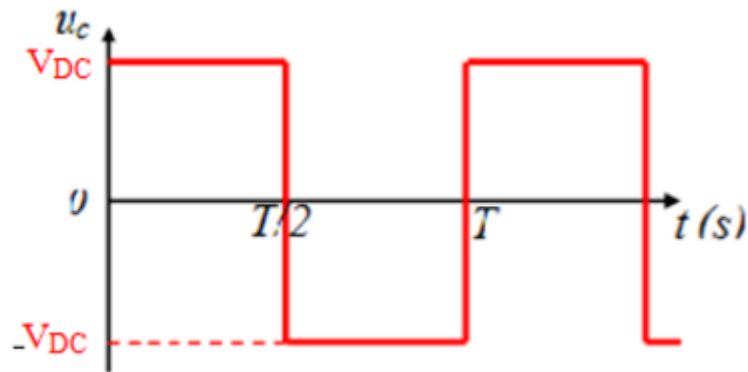


Figure (III.6) Signal complet de l'onduleur

2.2.3. Structure générale

La structure générale d'un onduleur de tension à deux niveaux est représentée dans (la figure III.7).

L'onduleur est composé de trois bras chacun comportant deux interrupteurs bidirectionnels et entièrement commandables à l'ouverture et à la fermeture.

Dans ce travail on a utilisé des IGBTs misent en antiparallèle avec des diodes pour assurer la circulation bidirectionnelle du courant.

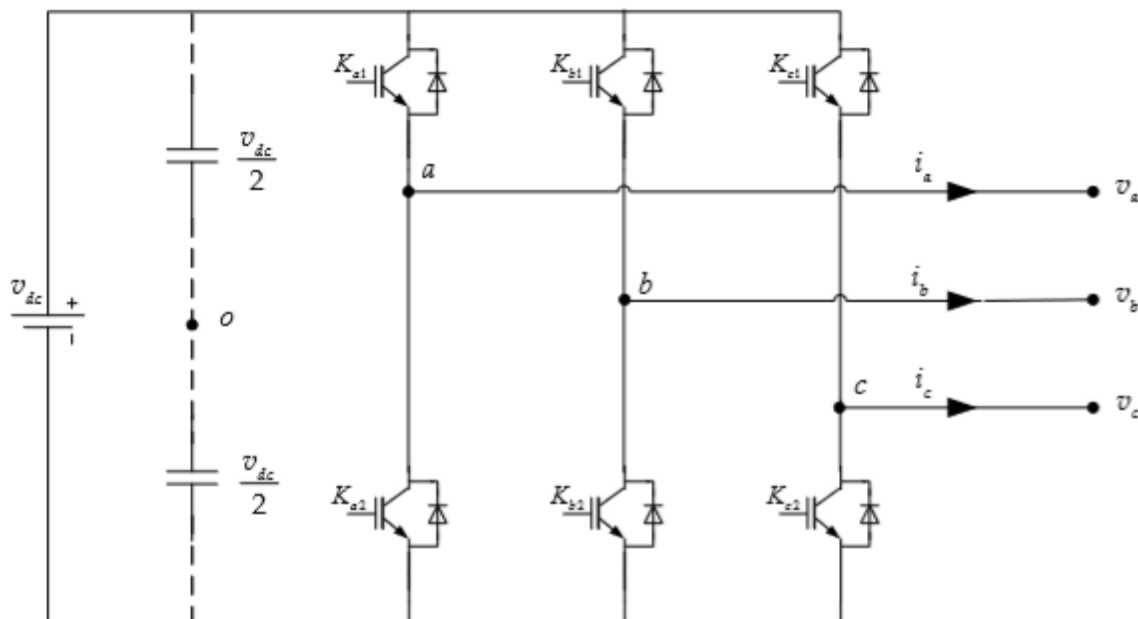


Figure (III.7) : Structure d'un onduleur de tension triphasé à deux niveaux.

Chapitre III L'onduleur et la commande MLI vectorielle

2.2.4. Modélisation de l'onduleur

Pour simplifier l'étude on crée un point milieu \mathbf{o} par deux condensateurs fictives chacune prend la moitié de la tension continue \mathbf{V}_{dc} .

2.2.4.1 Fonction de commutation

Les commutations établies par les interrupteurs, supposés idéaux, sont décrites par une fonction de connexion. Cette dernière décrit leurs états ouvert ou fermé.

Chaque interrupteur \mathbf{K}_{xi} est associé à une fonction de connexion \mathbf{S}_{xi} , tel que :

$$\mathbf{S}_{xi}=1 \text{ si } \mathbf{K}_{xi}\text{ferme et } \mathbf{S}_{xi}=0 \text{ si } \mathbf{K}_{xi}\text{ouvert} \quad \text{III.1}$$

Avec $\mathbf{x}=\mathbf{a},\mathbf{b},\mathbf{c}$: Indicateur de phase; $\mathbf{i}=1, 2$: Numéro de l'interrupteur du bras \mathbf{x}

Sachant que la fermeture où l'ouverture simultanée des deux interrupteurs du même bras conduit au risque de destruction du condensateur et des composants semi-conducteurs soit par sur intensité soit par sur tension, il est indispensable de réaliser une commande complémentaire entre les deux interrupteurs \mathbf{K}_{x1} et \mathbf{K}_{x2} [34].

Ce qui conduit à la relation logique suivante :

$$\mathbf{S}_{x2} = \bar{\mathbf{S}}_{x2} = 1 - \mathbf{S}_{x1} \quad \text{III.2}$$

2.2.4.2. Tension de sortie

L'onduleur de tension à deux niveaux délivre deux niveaux de tensions($\mathbf{V}_{dc}/2$) ou ($-\mathbf{V}_{dc}/2$) suivant la fonction de connexion comme illustré dans l'équation suivante

$$\mathbf{v}_{xo} = \frac{\mathbf{v}_{dc}}{2} (2\mathbf{S}_{x1} - 1) \quad \text{III.3}$$

Avec \mathbf{V}_{xo} c'est la tension simple entre la phase \mathbf{x} et le point milieu \mathbf{o} .

Les tensions composées entre phases \mathbf{V}_{xy} deviennent donc :

$$\mathbf{v}_{xy} = \mathbf{v}_{xo} - \mathbf{v}_{yo} = \mathbf{v}_{dc}(\mathbf{S}_{x1} - \mathbf{S}_{y1}) \quad \text{III.4}$$

Avec $\mathbf{y} \neq \mathbf{x} = \mathbf{a},\mathbf{b},\mathbf{c}$: Indicateurs de phases.

Les grandeurs que l'on souhaite contrôler grâce à l'onduleur sont les tensions simples côté charge ($\mathbf{v}_a, \mathbf{v}_b$ et \mathbf{v}_c).

Pour une charge triphasée équilibrée, ces tensions vérifient la relation suivante :

Chapitre III L'onduleur et la commande MLI vectorielle

$$v_a + v_b + v_c = 0 \quad \text{III.5}$$

Les tensions phases-neutre sont données, en fonction des tensions composées et des tensions phasespoint milieu, par :

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} v_{ab} - v_{ca} \\ v_{bc} - v_{ab} \\ v_{ca} - v_{bc} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ao} \\ v_{bo} \\ v_{co} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} v_{dc} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{a1} \\ S_{b1} \\ S_{c1} \end{bmatrix} \quad \text{III.6}$$

La forme complexe de la tension de sortie est donnée par :

$$v = v_a e^{i0} + v_b e^{-j2\pi/3} + v_c e^{j2\pi/3} \quad \text{III.7}$$

Après avoir transformé le système triphasé dans un système biphasé par la transformation de Concordia, on peut représenter le vecteur v dans un espace à deux dimensions (α, β) par :

$$v = v_\alpha + jv_\beta \quad \text{III.8}$$

Où v_α et v_β sont les projections du vecteur v dans le système fixe (α, β) données par :

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} v_{dc} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{a1} \\ S_{b1} \\ S_{c1} \end{bmatrix} \quad \text{III.9}$$

2.2.4.3 Représentation vectorielle

Le tableau III.1 représente les différents états de l'onduleur et les coordonnées du vecteur de tension de sortie v_i correspondant à chaque état dans le repère (α, β) .

S_{a1}	S_{b1}	S_{c1}	v_i^α	v_i^β	v_i
0	0	0	0	0	v_0
1	0	0	$\sqrt{2/3}v_{dc}$	0	v_1
1	1	0	$\sqrt{1/6}v_{dc}$	$\sqrt{1/2}v_{dc}$	v_2
0	1	0	$-\sqrt{1/6}v_{dc}$	$\sqrt{1/2}v_{dc}$	v_3
0	1	1	$-\sqrt{2/3}v_{dc}$	0	v_4
0	0	1	$-\sqrt{1/6}v_{dc}$	$-\sqrt{1/2}v_{dc}$	v_5
1	0	1	$\sqrt{1/6}v_{dc}$	$-\sqrt{1/2}v_{dc}$	v_6
1	1	1	0	0	v_7

Tableau (III.1) Etats de l'onduleur et les coordonnées du vecteur v_i dans le plan (α, β) .

Comme on peut le voir, les combinaisons (111) et (000) donnent toujours des vecteurs nuls.

Chapitre III L'onduleur et la commande MLI vectorielle

La figure(III.8) montre la représentation dans le plan complexe des six vecteurs non nuls, qui peuvent être générés par l'onduleur, et qui forment le diagramme vectoriel de l'onduleur à deux niveaux ou l'hexagone de commutation [34].

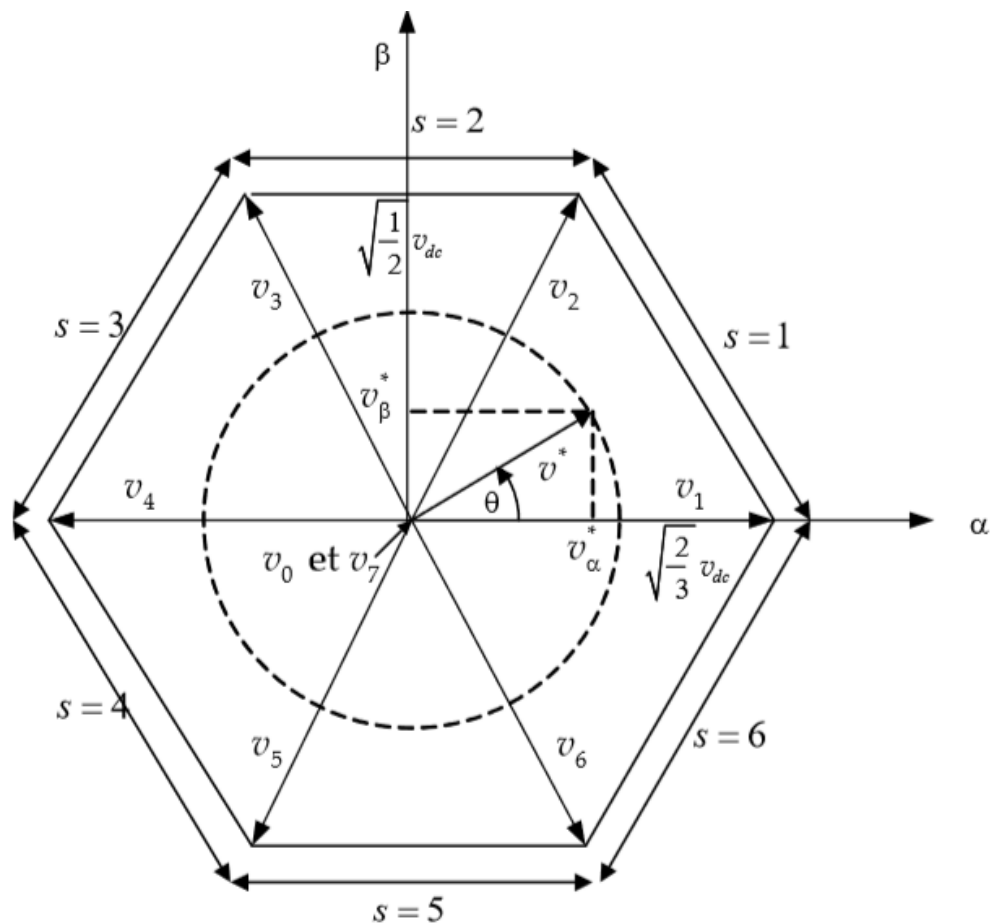


Figure (III.8) : Diagramme vectoriel de l'onduleur à deux niveaux.

L'objectif de la commande de l'onduleur est de rendre les tensions de sortie v_a , v_b et v_c aussi proches que possible des trois tensions de référence sinusoïdales v_a^* , v_b^* et v_c^* .

Comme il est illustré dans la Figure(III.9), ces vecteurs peuvent être représentés dans le plan (α, β) par un seul vecteur de référence d'amplitude v_m^* constante et égale à l'amplitude souhaitée des tensions simples, et tournant autour du centre de l'hexagone avec une vitesse angulaire $w=d\theta/dt$ constante correspondante à la pulsation électrique souhaitée.

Ce vecteur est défini par :

$$v^* = v_m^* e^{i\theta} \quad \text{III.10}$$

Si on attribué au vecteur de référence v^* uniquement les huit positions discrètes de la figure (III.8), la tension de sortie sera riche en harmoniques. Afin de réduire le taux d'harmoniques

Chapitre III L'onduleur et la commande MLI vectorielle

de la tension de sortie résultante de la forme non circulaire de cet hexagone, on impose au vecteur v^* de se positionner à l'intérieur du cercle délimité par l'hexagone.

Ainsi, le module maximal admissible du vecteur v^* est :

$$v_{max}^* = v_{dc} \sqrt{\frac{2}{3}} \cos\left(\frac{\pi}{6}\right) = \frac{v_{dc}}{\sqrt{2}} \quad \text{III.11}$$

L'équation (III.10) devient :

$$v^* = m \frac{v_{dc}}{\sqrt{2}} e^{i\theta} \quad \text{III.12}$$

Avec

m : le taux de modulation qui a une valeur entre 0 et 1

et θ : la position angulaire du vecteur calculée comme suit :

$$\begin{cases} \theta = \arctg\left(\frac{v_\beta}{v_\alpha}\right) \\ m = \frac{v_m^* \sqrt{2}}{v_{dc}} \end{cases} \quad \text{III.13}$$

3. M.L.I VECTORIELLE

3.1. Modulation vectorielle

Les techniques de modulations permettent de générer un signal quantifié, image du signal de référence.

Le signal de référence à l'entrée du modulateur est l'image du signal qu'il faudrait idéalement appliquer au dispositif à contrôler pour obtenir l'effet désiré.

Le signal généré à la sortie du modulateur (le signal modulé) est l'image du signal le plus proche que l'onduleur est capable d'imposer à l'aide des niveaux dont il dispose.

La modulation de largeurs d'impulsions est largement utilisée dans la commande des onduleurs.

On rencontre plusieurs stratégies de ce type de commande, telles que la modulation triangle-sinusoïdale, la modulation par hystérésis, et au milieu des années quatre-vingt, la modulation vectorielle (Space Vector Modulation : SVM) a été proposée par [35].

Chapitre III L'onduleur et la commande MLI vectorielle

Cette dernière offre des avantages significatifs par rapport à la MLI naturelle et à échantillonnage régulier du point de vue performances de simplicité d'implantation et un rapport de transfert maximal.

3.2 Principe de la MLI vectorielle

Le principe de la MLI vectorielle consiste à projeter le vecteur de tension de référence v^* désiré sur les deux axes du plan (α, β) .

Ces projections sont utilisées dans le calcul des temps de commutations désirées de deux états non nuls de l'onduleur.

Si on désigne par t_i et t_{i+1} les deux temps de commutation en question, leur somme doit être forcément inférieure à la période de commutation de l'onduleur T_h .

Pour maintenir la fréquence de commutation constante, un état nul de l'onduleur est appliqué durant le reste de la période T_h .

Afin de connaître dans quel secteur se trouve le vecteur de tension v^* , une série de tests sur v_α et v_β assure la localisation de celui-ci.

A l'intérieur d'une période de commutation de l'onduleur, il existe différentes stratégies d'application des vecteurs assurant l'obtention de la tension désirée.

Afin de réduire les harmoniques, il est préférable de générer des tensions centrées sur la période de commutation de l'onduleur.

Dans les cas où le système de commande exige des tensions supérieures à la valeur maximum de l'algorithme MLI vectorielle, il sera nécessaire de développer un mécanisme de limitation des tensions de sortie [34].

3.3 Localisation du vecteur de référence

L'hexagone de commutation peut être divisé en six secteurs, chaque secteur étant formé d'un triangle dont les sommets sont le point milieu, et les fins des deux vecteurs consécutifs (v_i et v_{i+1}).

Ces secteurs sont déterminés par l'une des méthodes suivantes :

Chapitre III L'onduleur et la commande MLI vectorielle

1. À partir des coordonnées v_α^* et v_β^* , on déduit dans quel secteur (s) se situe le vecteur v^* en utilisant les équations de ses deux côtés.

La figure (II.13) représente l'organigramme illustrant les étapes de cette méthode.

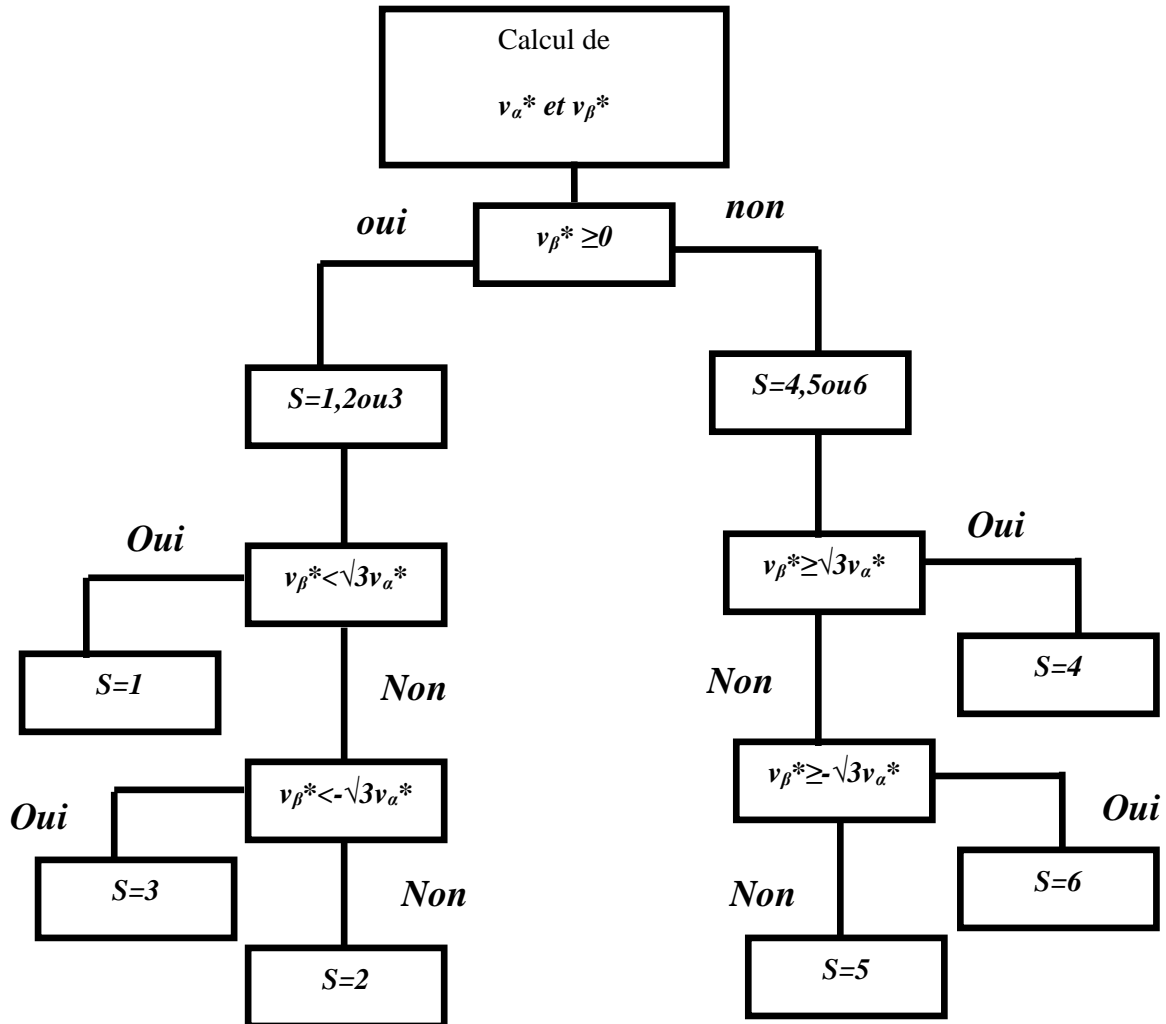


Figure (III.9) : Organigramme de calcul du secteur.

2. À partir de l'angle θ du vecteur v^* on peut déduire le secteur où il se trouve selon la relation

$$s = \text{int} \left(\frac{3\theta}{\pi} + 1 \right) \quad \text{III.14}$$

Avec int : fonction qui calcule la partie entière d'un nombre réel.

On peut aussi déduire la position de la vectrice tension à partir de la valeur de l'angle θ tout en respectant est conditions suivantes :

$$s = \begin{cases} 1 & si & \theta \in [0, \frac{\pi}{3}] \\ 2 & si & \theta \in [\frac{\pi}{3}, \frac{2\pi}{3}] \\ 3 & si & \theta \in [\frac{2\pi}{3}, \pi] \\ 4 & si & \theta \in [\pi, \frac{4\pi}{3}] \\ 5 & si & \theta \in [\frac{4\pi}{3}, \frac{5\pi}{3}] \\ 6 & si & \theta \in [\frac{5\pi}{3}, 2\pi] \end{cases} \quad \text{III.15}$$

3.4. Calcul des temps de commutation

Dans le cas général, l'onduleur n'est pas capable de générer directement le vecteur \mathbf{v}^* , car il ne peut prendre que les huit états discrets illustrés précédemment.

On doit donc construire \mathbf{v}^* à l'aide d'une combinaison des vecteurs nuls (\mathbf{v}_0 ou \mathbf{v}_7) et des deux vecteurs adjacents \mathbf{v}_i et \mathbf{v}_{i+1} du secteur qui contient le vecteur de référence ($\mathbf{s}=\mathbf{i}$).

Ces vecteurs sont appliqués individuellement pendant certaines durées t_0 , t_i et t_{i+1} de sorte que le vecteur \mathbf{v}^* soit égale à la valeur moyenne de ces vecteurs pendant une période de découpage :

$$\frac{1}{T_k} \int_t^{t+t_i} \mathbf{v}^* dt = \mathbf{1}/T_k [\int_{t+t_i}^{t+t_i+t_{i+1}} \mathbf{v}_{i+1} dt + \int_{t+t_i+t_{i+1}}^{t+T_k} \mathbf{v}_0 dt] \quad \text{III.16}$$

Puisque le période de découpage T_h est très faible, la valeur moyenne de tension \mathbf{v}^* peut être considérée comme constante.

Et puisque les vecteurs \mathbf{v}_i et \mathbf{v}_{i+1} sont des vecteurs fixes, l'équation (III.16) devient :

$$T_k \mathbf{v}^* = t_0 \mathbf{v}_0 + t_i \mathbf{v}_i + t_{i+1} \mathbf{v}_{i+1} \quad \text{III.17}$$

A noter que :

$$t_0 = T_k - t_i - t_{i+1} \quad \text{III.18}$$

Par comparaison des parties réelles et imaginaires des deux membres de (III.17) on obtient :

$$\begin{cases} T_k \mathbf{v}_\alpha^* = t_0 \mathbf{v}_0^\alpha + t_i \mathbf{v}_i^\alpha + t_{i+1} \mathbf{v}_{i+1}^\alpha \\ T_k \mathbf{v}_\beta^* = t_0 \mathbf{v}_0^\beta + t_i \mathbf{v}_i^\beta + t_{i+1} \mathbf{v}_{i+1}^\beta \end{cases} \quad \text{III.19}$$

Connaissons les valeurs des coordonnées des vecteurs de sortie $\mathbf{v}_{i\alpha}$ et $\mathbf{v}_{i\beta}$ (Tableau III.1).

On peut calculer les temps de commutation t_0 , t_i et t_{i+1} en fonction des coordonnées du vecteur de référence par la résolution du système d'équations (III.18) et (III.19).

$$\begin{bmatrix} t_o \\ t_i \\ t_{i+1} \end{bmatrix} = T_k \begin{bmatrix} v_\alpha^* \\ v_\beta^* \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_0^\alpha & v_i^\alpha & v_{i+1}^\alpha \\ v_0^\beta & v_i^\beta & v_{i+1}^\beta \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \quad \text{III.20}$$

3.5. Génération des impulsions de commande

L'application de vecteurs d'états durant une période de découpage doit tenir en compte de deux critères [36] :

- a. Minimisation des harmoniques, par la génération d'une tension de sortie la plus proche que possible de la tension de référence, par l'application du vecteur d'état v_i pendant une durée t_i , le vecteur v_{i+1} pendant une durée t_{i+1} et le vecteur nul pendant le reste de la période.

On applique v_0 aux extrémités de la période de découpage et v_7 au centre de cette période.

- b. Minimisation des pertes dans les interrupteurs par la réduction du nombre de commutation de chaque interrupteur, par l'application du vecteur actif d'indice impair avant l'application du vecteur actif d'indice pair pendant la demi période de découpage et inversement durant l'autre demi période.

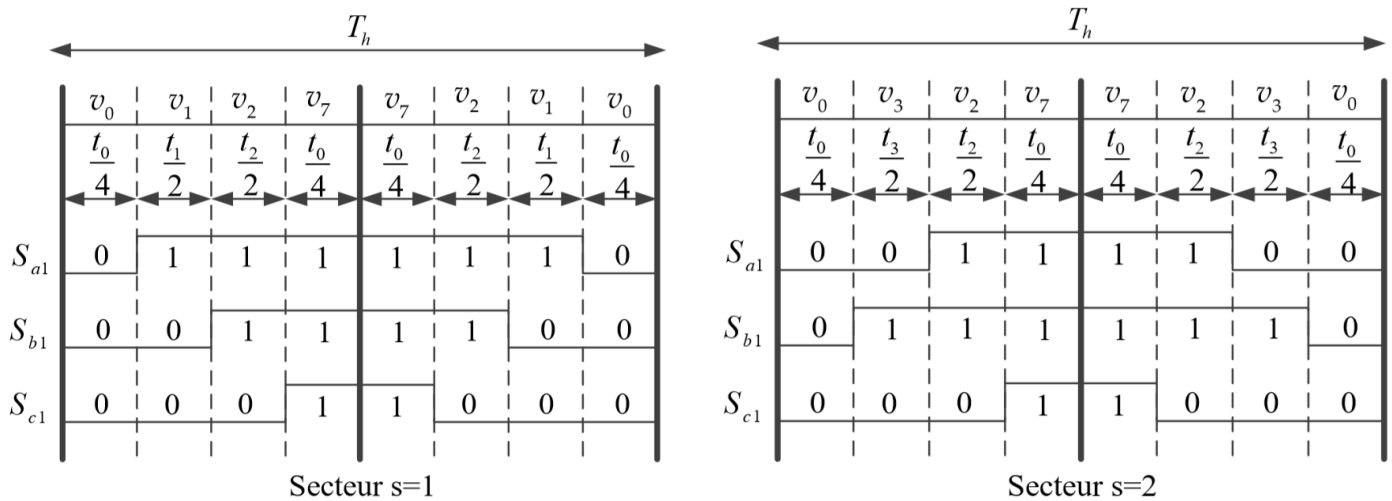


Figure (III.10) : Principe de génération des impulsions de commande par MLI vectorielle.

3.6. Schéma bloc de la MLI vectorielle

Si on veut résumer la méthode de calcul de la MLI vectorielle, on peut énumérer les points suivants :

1. A partir des tensions de référence v_a^* , v_b^* et v_c^* on déduit les composantes du vecteur référence v_α^* et v_β^* dans le repère de (α, β) ;

Chapitre III L'onduleur et la commande MLI vectorielle

2. Calcul du numéro du secteur s où se situe le vecteur de référence ;
3. Calcul des temps (t_0 , t_i et t_{i+1}) d'application des vecteurs (v_0 , v_i et v_{i+1}) ;
4. Génération des impulsions de commandent des interrupteurs.

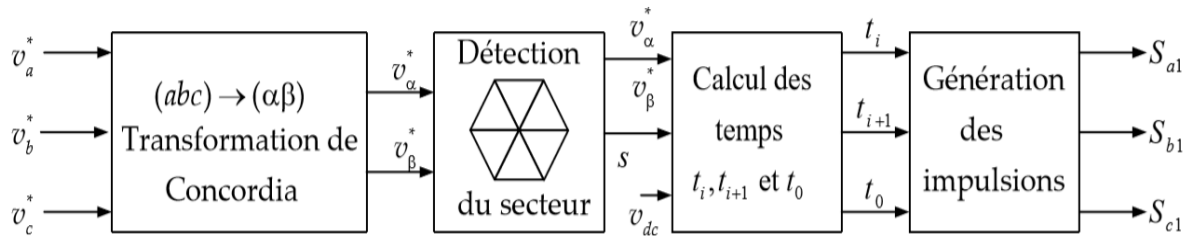


Figure (III.11) : Schéma bloc de la MLI vectorielle.

4. Conclusion

Dans ce chapitre on a fait une brève description des onduleurs triphasés et la modélisation de leur commande.

Au but de synchroniser la tension de sortie de l'onduleur avec celle du réseau, la commande **MLI** vectorielle a été présentée.

Chapitre IV

Les résultats de simulation

1. Introduction

Dans ce chapitre, on présentera les résultats de simulation d'un système photovoltaïque Connecté au réseau électrique.

Ce système comprend un générateur photovoltaïque, un convertisseur survolteur « **boost** », une commande **MPPT** « perturbation et observation » et un onduleur triphasé à deux niveaux avec la commande **MLI** vectorielle.

Le contrôle de la puissance, ainsi que la modélisation et la simulation ont été effectués sous le logiciel **MATLAB/Simulink**.

2. Simulation du générateur PV

Dans ce travail nous avons simulé un **GPV** qui comporte 9 modules monté on série et chaque module comporte 51 cellules solaires de silicium monocristallin connectées en série.

Les caractéristiques électriques du panneau Photovoltaïque en conditions de test standards sont représentées dans le **Tableau (VI.1)**.

Grandeurs	Valeurs
Eclairement standard G	1000W/m ²
Température standard T	25°C
Puissance crête maximale, P_m .	190.02W
Tension optimal, V_{opt} .	24.3 V
Courant optimal, I_{opt} .	7.82A
Tension de circuit ouvert, V_{oc}	30.6V
Courant de court-circuit, I_{sc} .	8.6A
Nombre des cellules en séries	51
Nombre des branches parallèles	2

Tableau (VI.1) Caractéristiques électriques du panneau photovoltaïque dans les conditions standards « **STC** »

La Figure ci-dessous présente le bloc du **GPV** dans l'environnement **Matlab-Simulink**.

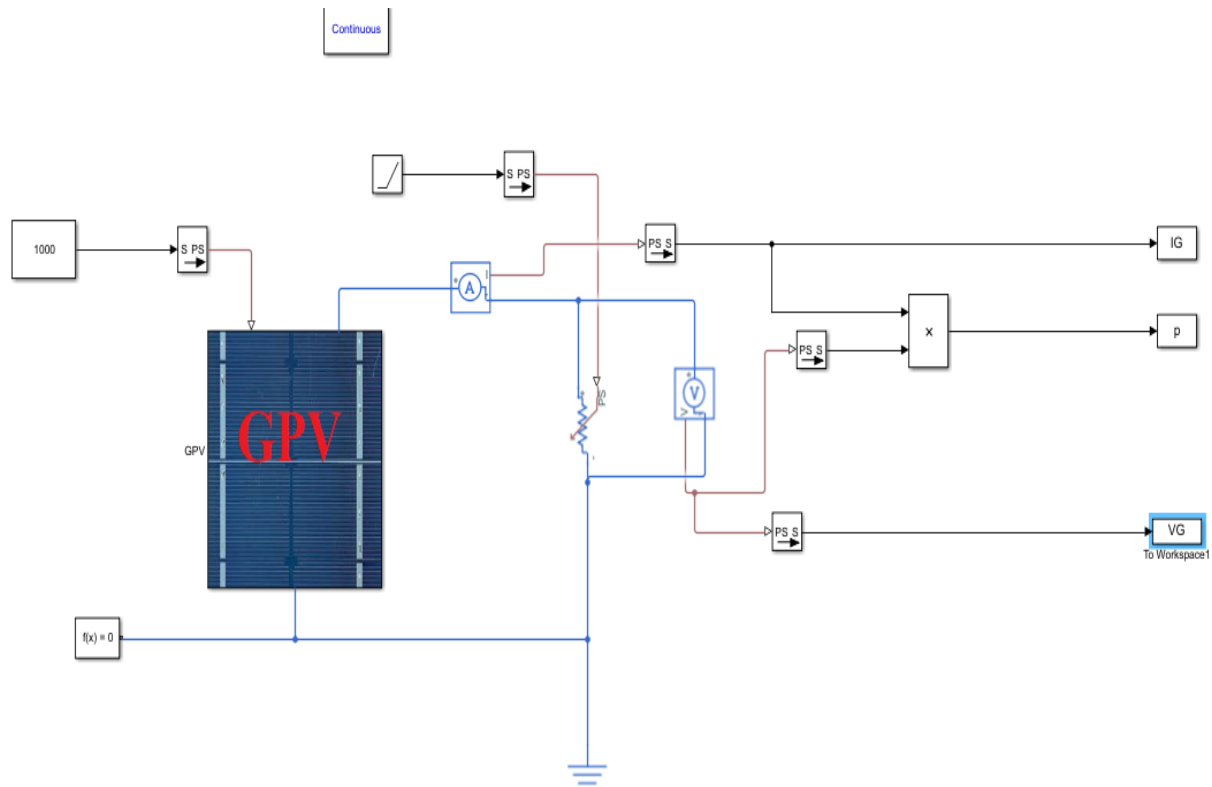


Figure (VI.1) Le Schéma block de générateur PV en MATLAB-SIMULINK

La figures (VI.2) montrent les caractéristiques électriques du GPV après simulation avec MATLAB / SIMULINK pour $G=1000\text{w /m}^2$ et pour une température de 25°C .

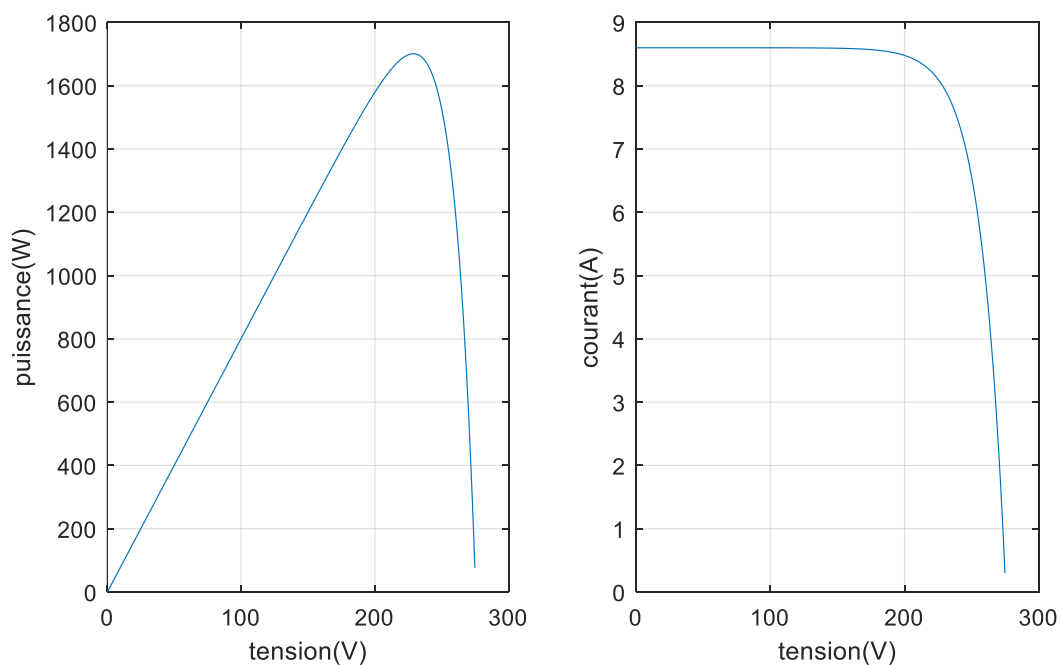


Figure (VI .2)les caractéristiques électriques du GPV pour $G=1000\text{w /m}^2$ et $T =25^\circ\text{C}$

3. Simulation de l'hacheur (boost) et la commande MPPT

3.1 Simulation de l'hacheur survolteur (boost)

La Figure (VI.3) représente le schéma bloc d'un convertisseur survolteur (boost)

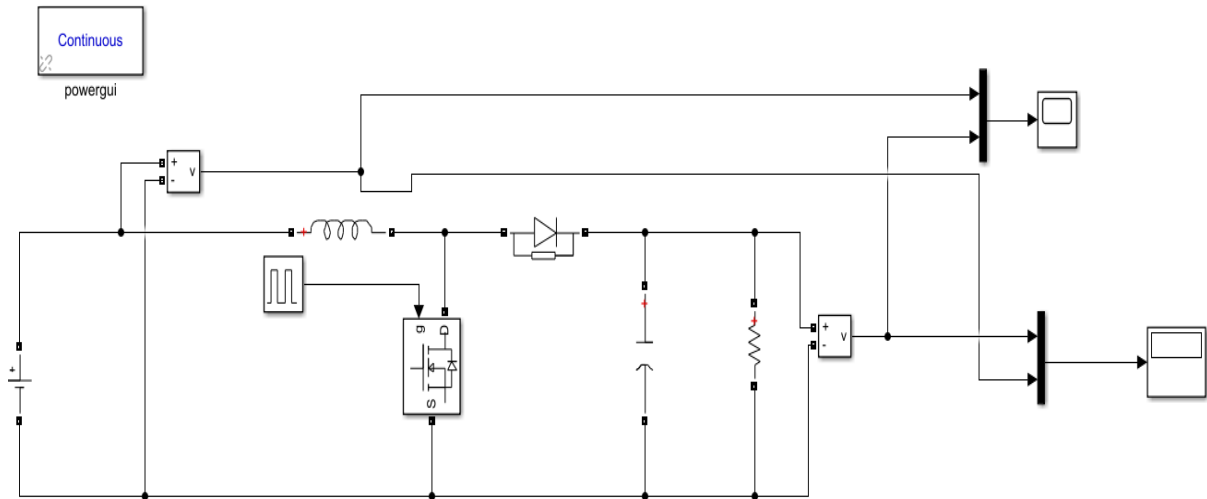


Figure (IV .3) Schéma bloc d'un convertisseur survolteur (Boost)

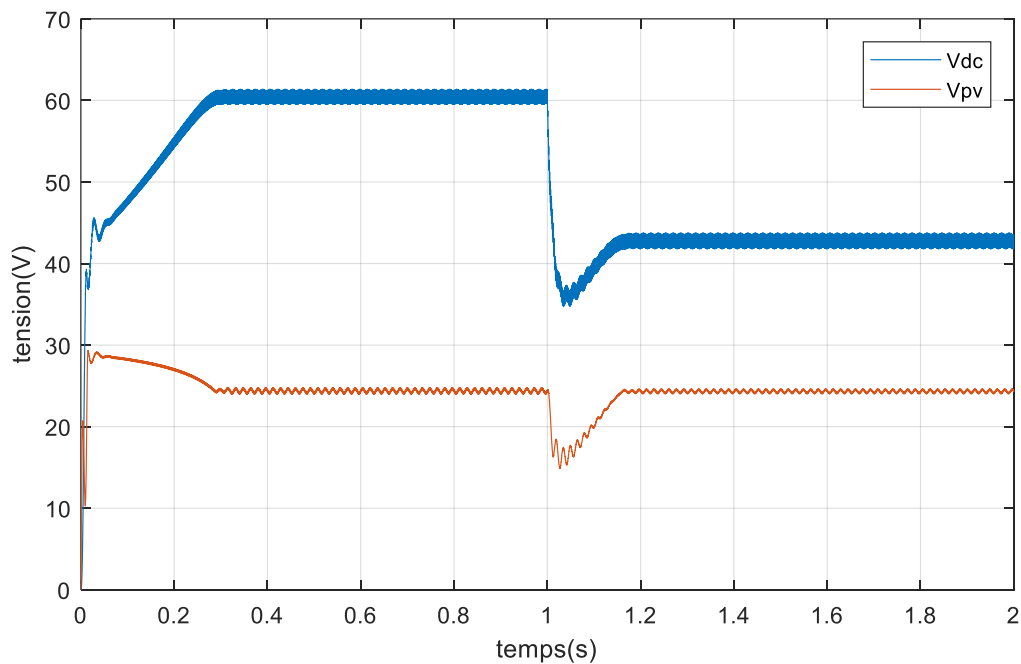


Figure (VI.4) Résultats de simulation de la tension générée par le générateur photovoltaïque V_{PV} et e la tension de sortie du système V_{dc} pour $G=1000W/m^2$ et $T=25^{\circ}C$

On remarque que Le convertisseur **Boost** fournit une tension à sa sortie supérieure à celle fournie par le générateur photovoltaïque.

3.2. Simulation de la méthode MPPT

La Figure (VI.5) illustre le bloc schématique de SIMULINK de la commande de poursuite MPPT.

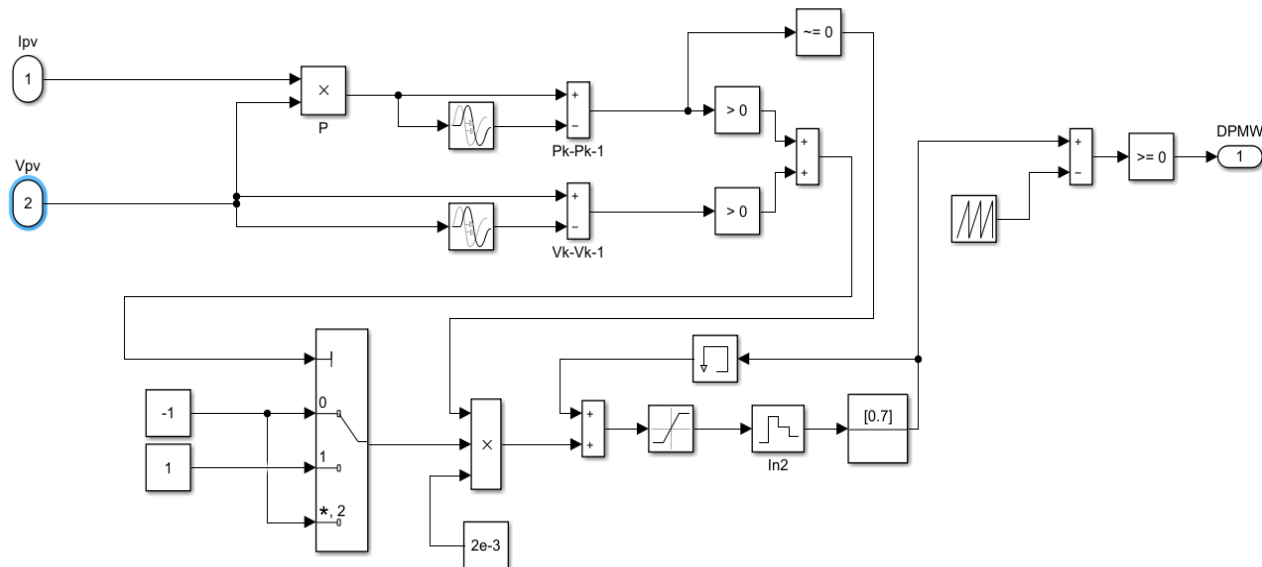


Figure (VI.5) Schéma bloc de la commande MPPT « P&O »

3.3. Simulation du system GPV -CONVERTISSEUR Boost - commande MPPT

La Figure (VI.6) illustre le bloc schématique de SIMULINK du système photovoltaïque adapté par la commande MPPT « perturbation et observation »:

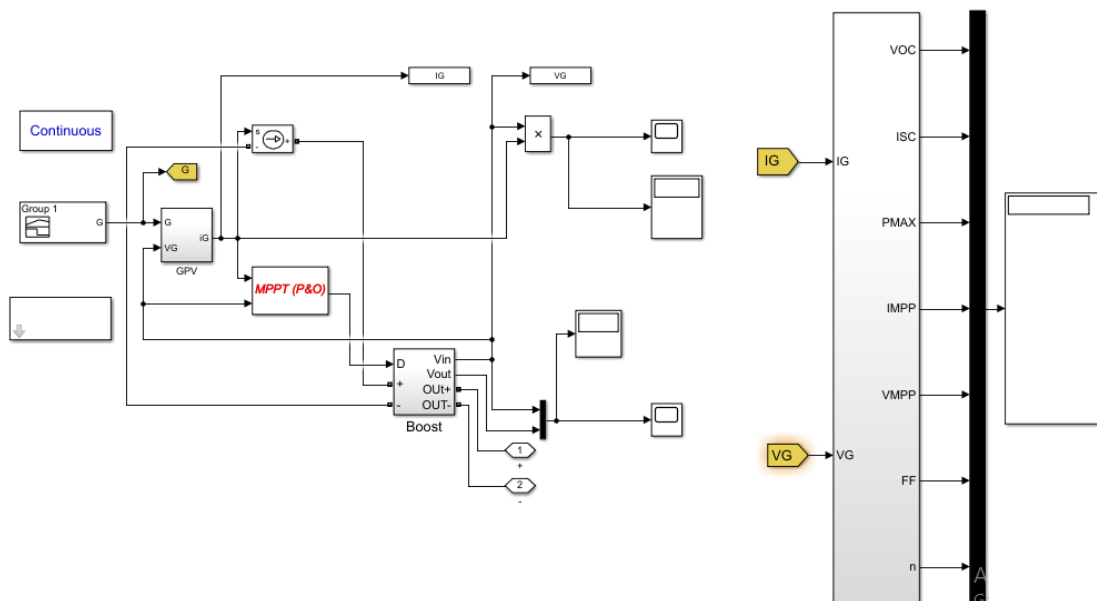
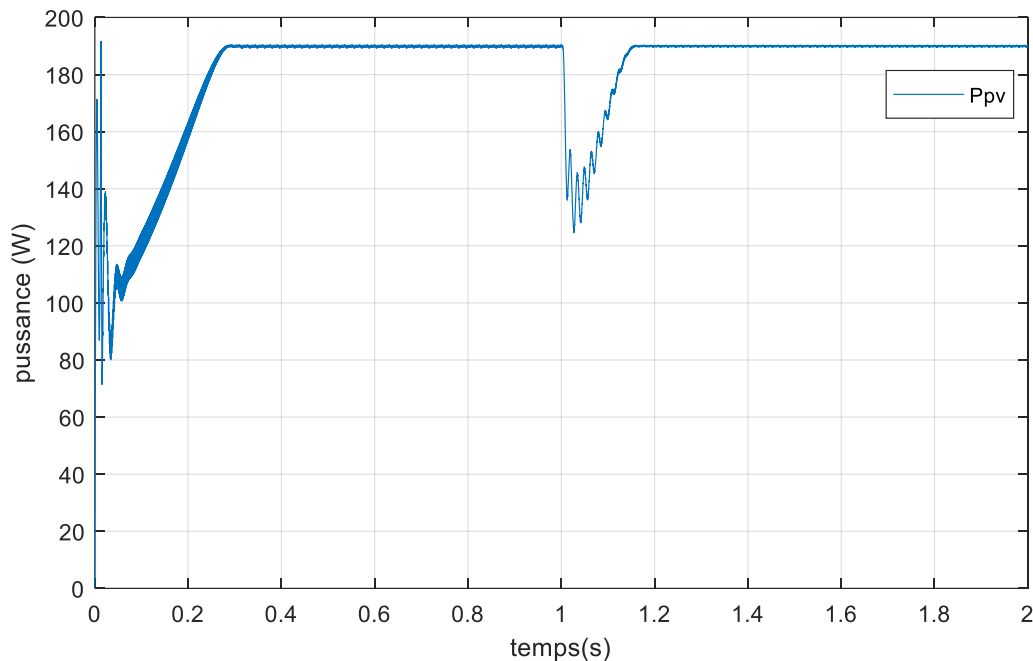


Figure (VI.6) Schéma d'un système photovoltaïque avec la commande MPPT (P&O).

On effectue la simulation du système dans les conditions standards (1000 W/m^2 , 25° C) pour extraire la puissance optimale de notre système. Donc la tension du panneau PV après l'utilisation de la technique de recherche de l'MPPT représente la puissance de GPV.

La figure VI.10 donne la valeur de la puissance GPV « P_{PV} »



La figure (VI.7) puissance de P_{PV} avec la commande MPPT

Pour bien présenter le fonctionnement de la commande MPPT on va augmenter la résistance de la charge (R à $2 \cdot R$) à l'instant $t=1$ s, d'après ces résultats on peut conclure que notre système est efficace et l'algorithme du MPPT est bien fonctionnel.

4. Simulation du système PV connecté au réseau électrique

La structure de commande du système PV à base d'onduleur de tension est montrée dans la figure (IV. 8).

L'objectif est d'obtenir un système de courants sinusoïdaux équilibrés et en phase avec la tension, ceci implique que la puissance réactive générée doit être nulle.

La structure de contrôle générique d'un système PV connecté au réseau est constituée de deux boucles de régulation imbriquées: une boucle externe pour le contrôle de la tension du bus continu et une boucle interne de contrôle des courants direct et quadrature.

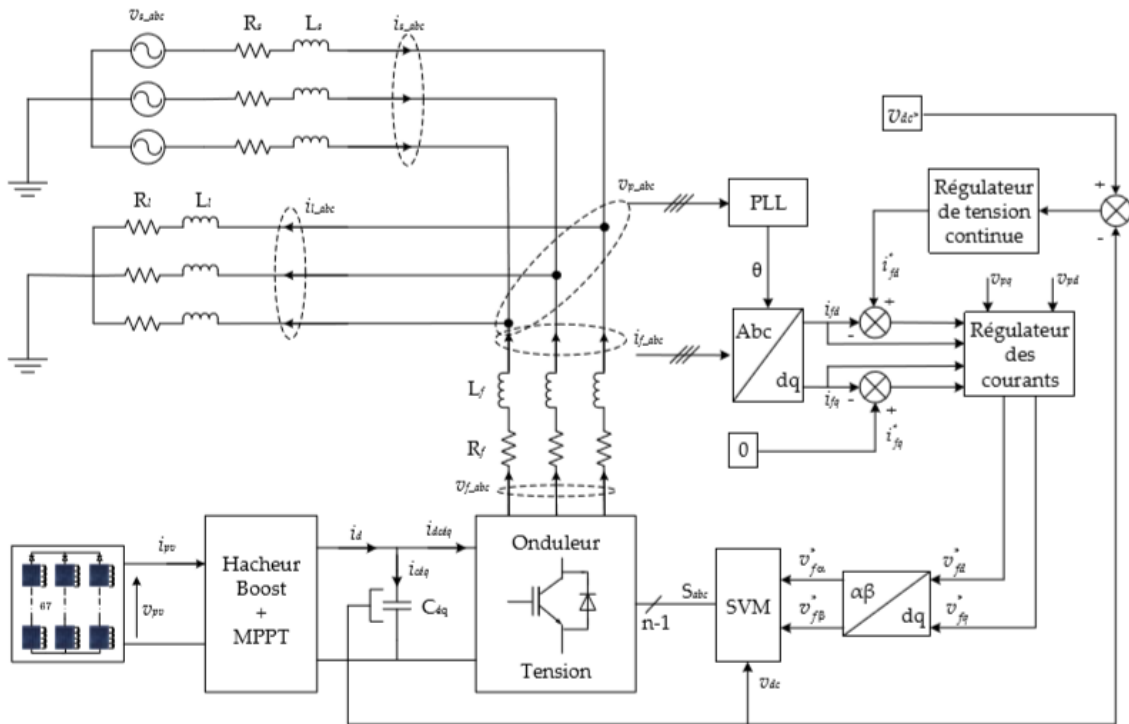


Figure (VI.8) Structure de contrôle générique d'un système PV connecté au réseau.

4.1 Description du système à simuler

Pour vérifier la validité du système **PV** proposé, on a utilisé un champ photovoltaïque connecté à un réseau de distribution de 220V, un hacheur **boost** commandé en **MPPT** de type **(P&O)** et un onduleur triphasé à deux niveaux commandé en SVM.

On a utilisé aussi une charge variable pour évaluer le comportement du système étudié. Les paramètres du système sont donnés par le **tableau (VI.2)**

Eff	220v	fs	50Hz
Ls	2,6μH	Rs	3mΩ
Ll	0.3mH	Rl	10mΩ
Lf	3mH	Rf	10mΩ
Ld	2mH	Rd	9Ω
Vdc	600V	Cdc	5mF

Tableau (VI.2) Paramètres du système à simuler

Afin de bien étudier le comportement de notre système face aux changements climatiques et de charge, on a soumis le système photovoltaïque aux variations suivantes :

- Au début, le système alimente la charge (L1) aux conditions standards de température et de l'ensoleillement ;

- À $t = 0.7s$, on change l'irradiation de 1000 W/m^2 à 100 W/m^2 puis on revient de 1000 W/m^2 à $t = 1s$ sous la température standard ($25 \text{ }^\circ\text{C}$) ;
- À $t = 1.2s$, on charge de plus la ligne par la charge (L2) ;
- À $t = 1.5s$, la charge (L2) est déconnectée.

4.2 Résultats de simulations

A partir de courbe de la figure (VI.9), il paraît très clair que le régulateur de la tension continue à prouver son efficacité dans le maintien d'une tension constante aux bornes du bus continu.

La figure (VI.9) prouve l'efficacité des contrôleurs PI utilisées où la tension bus continué Suit leur référence avec un faible dépassement et une erreur statique nulle en régime permanent.

Cette dernière montre que ces tensions sont maintenues équilibrées par l'algorithme de stabilisation associé à la SVM.

A noter que l'absence de cet algorithme provoque un déséquilibre entre les deux tensions qui peut détruire les composants de puissance ou les condensateurs eux-mêmes.

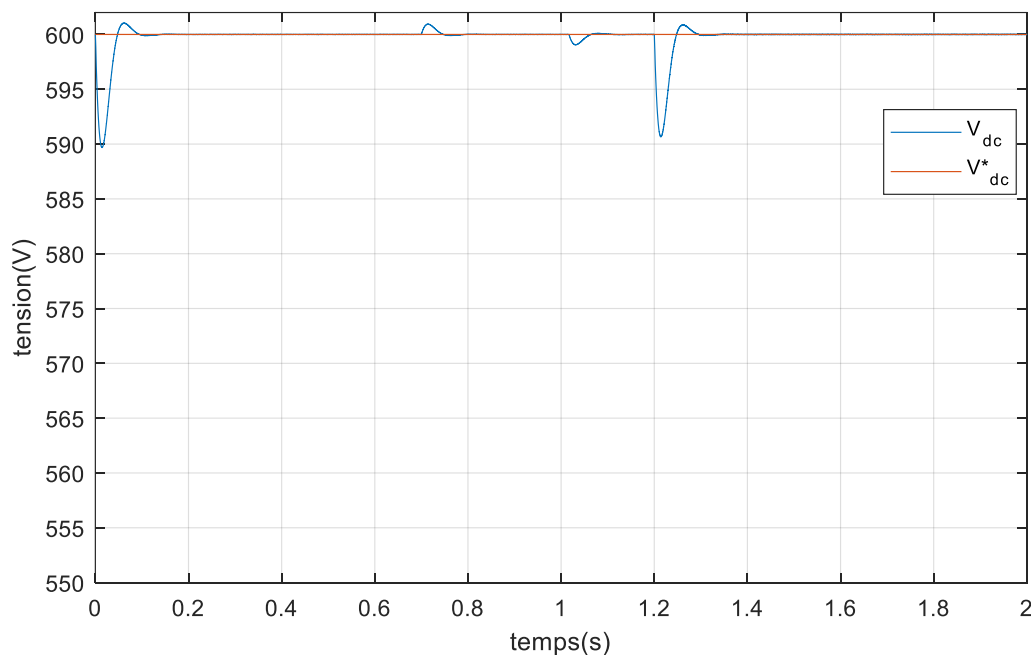


Figure (VI.9) Tension du bus continu et sa référence

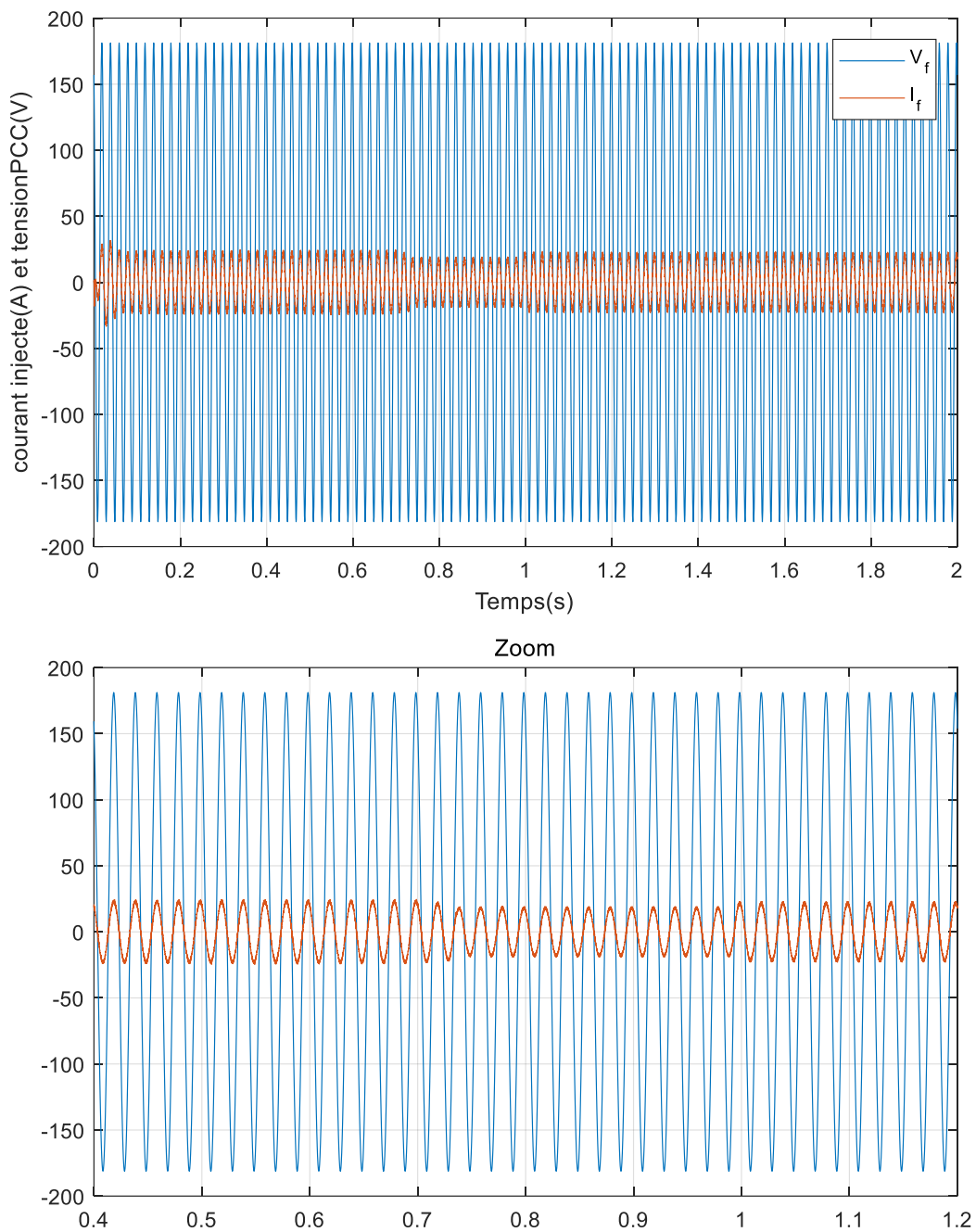


Figure (VI.10) Courant de la première phase injecté par l'onduleur dans le réseau et la tension réduite de la première phase du PCC

Le courant réactif est toujours nul afin d'assurer un fonctionnement à facteur de puissance unitaire côté onduleur, cela est plus claire dans la figure (VI.10) où le courant est en phase avec la tension correspondante quel que soit les changements climatiques ou de la charge.

Les figures (VI.11) et (VI.12) représentent successivement les courants et les tensions de la première phase de la charge et du réseau électrique quel que soit les changements climatiques ou de la charge.

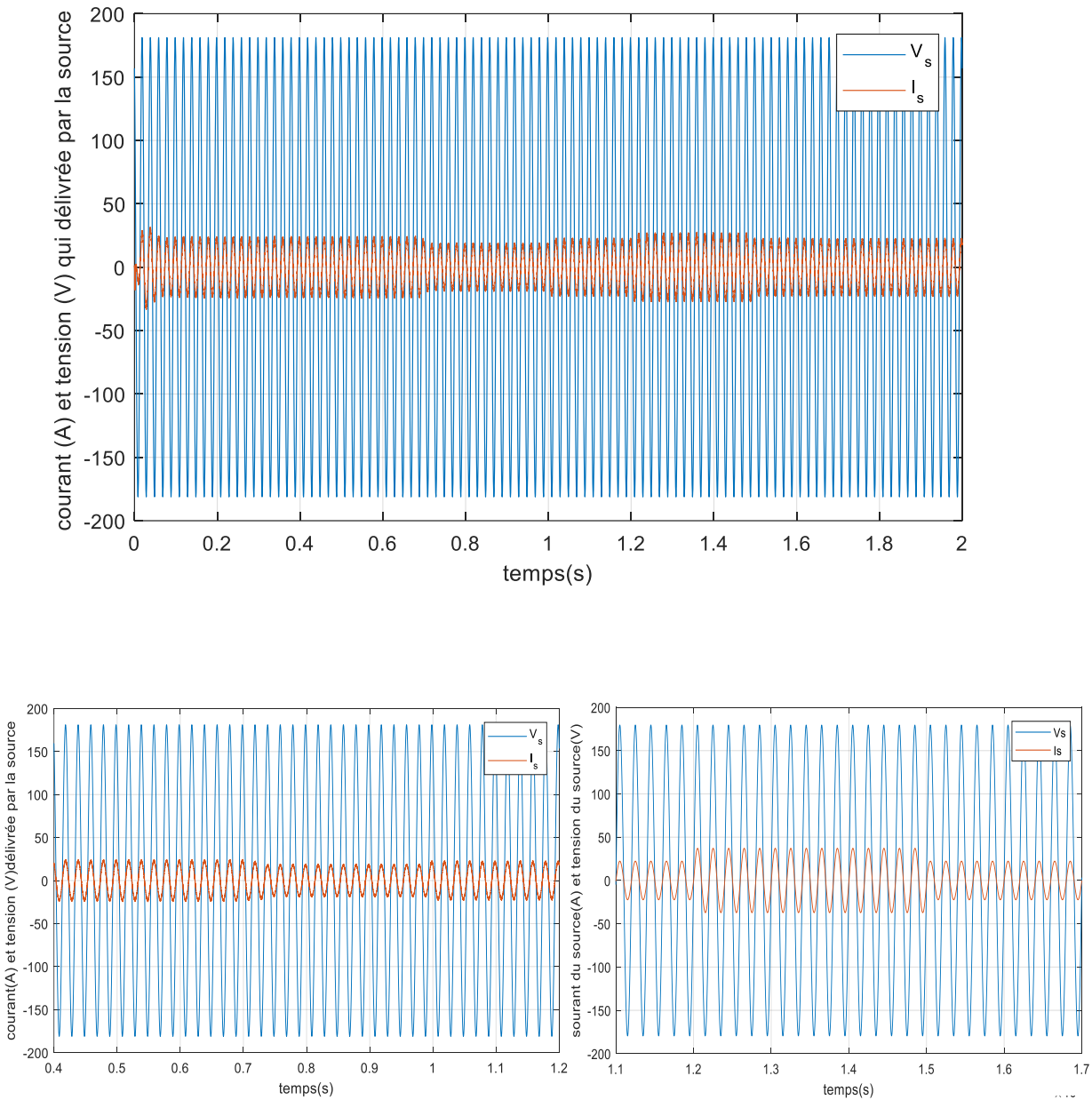


Figure (VI.11) Courant de la première phase qui délivrée par la source et la tension réduite de la première phase

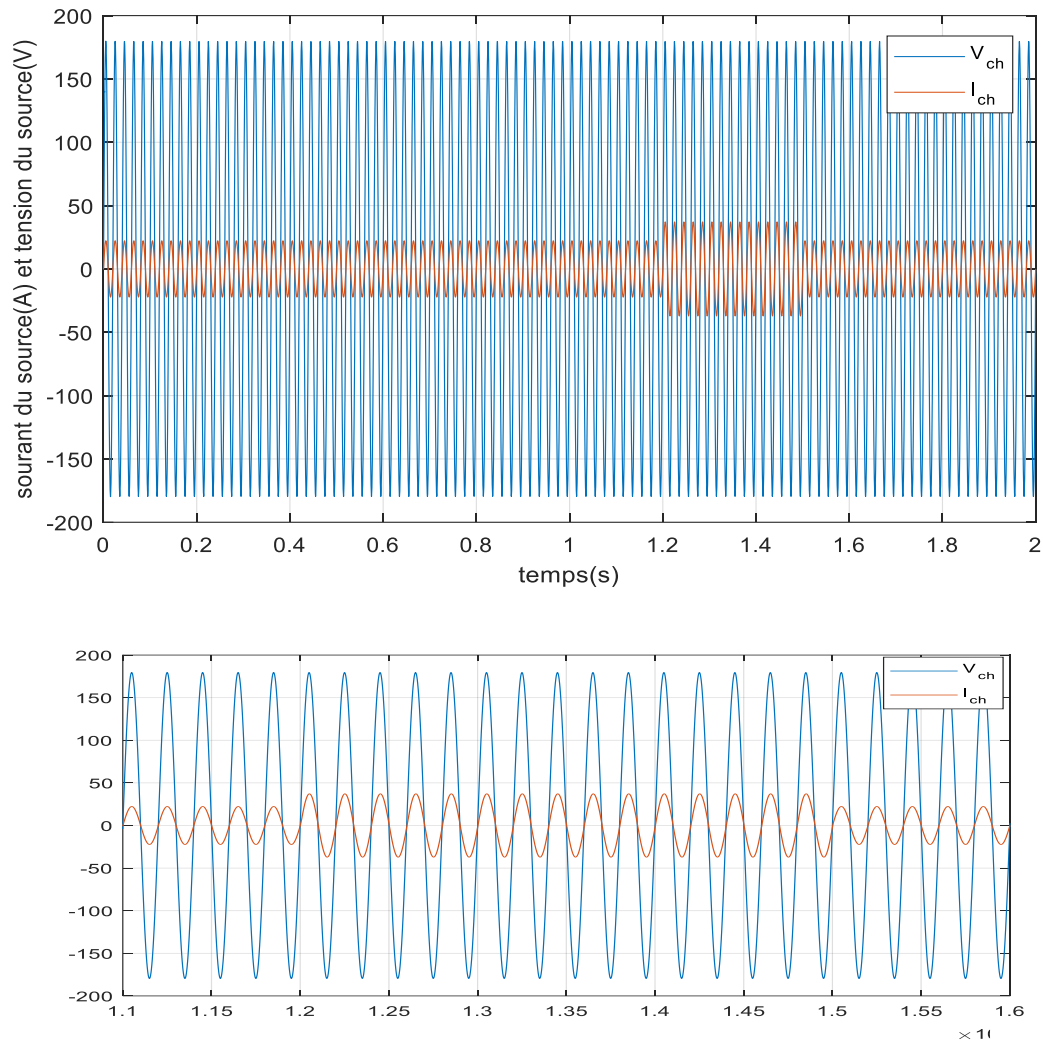


Figure (VI.12) Courant de la première phase et la tension réduite de la première phase qui est consommée par la charge

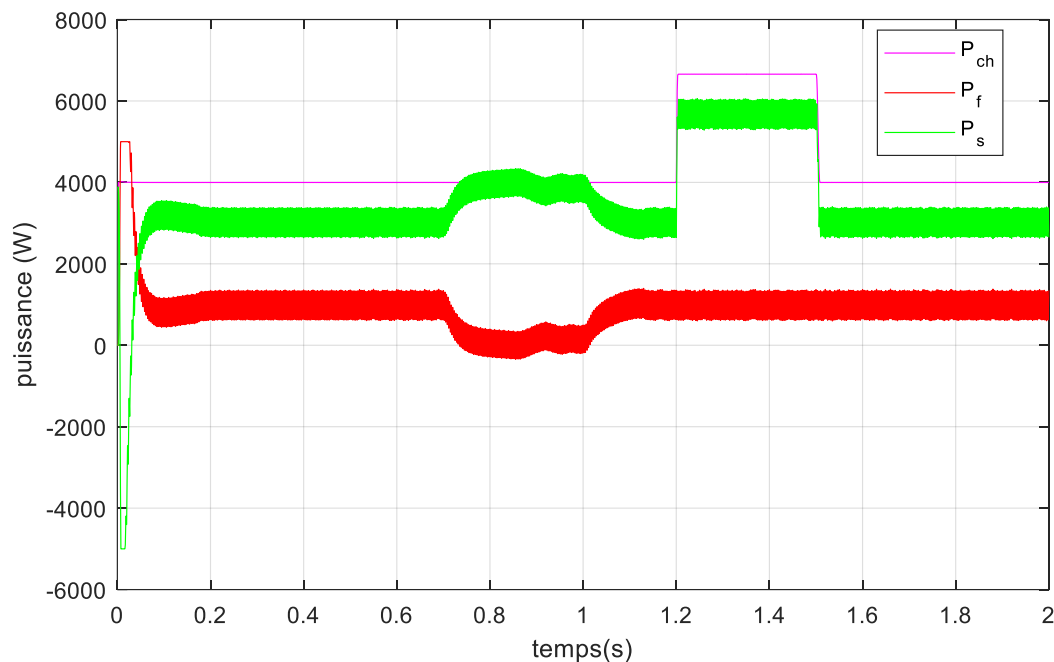


Figure (VI.13) : Puissance active consommée par la charge, délivrée par la source et injectée par le système PV

P_f : Puissance active injectée par le système PV

P_s : Puissance active délivrée par la source

P_{ch} : Puissance active consommée par la charge

D'après la figure (VI.13), on constate bien nettement que la puissance consommée par la charge est égale à la somme des puissances produite par le champ PV et celle fournie par le réseau, autrement dit la charge est alimentée des deux côtés.

Le couplage d'une deuxième charge L2 dans le réseau provoque un grand appel de la puissance active. Toute fois, la puissance du champ PV reste constante et c'est le réseau qui va délivrer le reste de cette demande de puissance.

5. Conclusions

Dans ce chapitre on a présenté les différents composants du système photovoltaïque étudié, sous l'environnement Matlab/Simulink.

D'après les résultats obtenus de la simulation, Dans le système complet PV-Boost-Onduleur-Réseau-Charge on a remarqué :

La répartition de la charge entre le réseau et la PV est correcte, en confiant au PV la charge égale à sa puissance maxi et au réseau toutes les variations de la demande de la charge.

Une diminution de la puissance produite par la PV en cas de diminution de l'éclairement est compensée par le réseau.

À une augmentation de la charge, le réseau augmente sa puissance si la production optimale du PV est atteinte, pour éviter une surcharge de la PV.

La puissance de la PV est maintenue optimale.

CONCLUSION GENERALE

Le but de ce projet est l'étude, la modélisation et la simulation d'un système Photovoltaïque connecté au réseau électrique conventionnel pour injecter de la puissance réelle produite par le GPV en utilisant une commande **MLI** vectorielle.

Ce travail s'inscrit dans le cadre d'une activité de recherche sur les énergies renouvelables et ce mémoire est le résultat d'un ensemble de simulations en vue de l'interconnexion d'un système photovoltaïque au réseau électrique. Il m'a permis d'appliquer les connaissances acquises durant mes études antérieures et de m'initier à divers montages et outils logiciels de la spécialité de technologie des systèmes PV.

C'est assurément un cheminement de recherche très intéressant qui requiert la maîtrise et l'implication dans les domaines suivants :

La simulation sur ordinateur : Matlab/SIMULINK.

L'électronique de puissance : commande de hacheurs et d'onduleurs.

L'automatique : stabilité de la synchronisation avec le réseau électrique.

D'après les résultats obtenus de la simulation, on a remarqué :

- L'effet de la variation de l'éclairement et de la température sur le fonctionnement du système.

- La robustesse et la fiabilité du convertisseur Boost et la commande MPPT.

-les avantages de la commande MLI vectorielle.

Cette étude suggère la poursuite future des simulations de la connexion du photovoltaïque en parallèle avec le réseau devant des situations autres telles que des défauts propres au réseau.

L'évolution des capacités de production photovoltaïque passe par le développement des performances des panneaux solaires surtout en termes de puissances et de sa réduction en face de l'élévation de température, d'une part et par le choix de l'évacuation de l'énergie sur des réseaux puissants avec marche en parallèle avec des sources conventionnelles.

L'handicap de cout de production du photovoltaïque est surmontable bientôt, car cette énergie est encore jeune, une évolution importante, dans les années prochaines est certaine et prometteuse.

Bibliographie

- [01] B. Flèche, D. Delagnes, « Energie solaire photovoltaïque », STI ELT, juin 2007, www.itismajo.it/fff/.../Energie_solaire_photovoltaique.pdf, consulté janv. 2014
- [02] F. Chekired, « Etude et implémentation d'une commande MPPT neuro-floue sur FPGA », mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2008.
- [03] Anne LABOURET, Michel VILLOZ, “Energie solaire photovoltaïque”, 2ème édition, Edition Dunod, le Moniteur, juin 2006.
- [04] F. Chekider, «étude et implémentation d’une commande MPPT neuro-floue sur FPGA », mémoire magister en électronique, université de Jijel, 2008.
- [05] D.Morales, «Maximum Power Point Tracking Algorithms for Photovoltaic Applications», mémoire master en électronique, Technologie, Université de Aalto Finlande, 2010.
- [06] F. Kandouli, « Modélisation et commande des machines électriques », Juillet 2007,
- [07] S. Bellakehal, «Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables», thèse de Doctorat, Université de Constantine, Algérie, 2010
- [08] S. M. Ait-Cheikh, «Etude, Investigation et conception d’algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques», Thèse de Doctorat d’état, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2007.
- [09] Djamil REKIOUA, Ernest MATAGNE, “Optimization of photovoltaic power systems: Modelization, Simulation and Control”, Green Energy and Technology, Springer, 2012.
- [10] Anne LABOURET, Michel VILLOZ, “Energie solaire photovoltaïque”, 2ème édition, Edition Dunod, le Moniteur, juin 2006.
- [11] Best research-cell efficiencies, NREL (National Renewable Energy Laboratory), 2015
- [12] M. A. GREEN, K. EMERY, Y. HISHIKAWA, W. WARTA and E. D. DUNLOP, “Solar cell efficiency tables (Version 45)”, Wiley Online Library: Progress In Photovoltaics: Research And Applications, 2015, pp. 1-9.
- [13] S. BARKATI, L. BAGHLI, E. BERKOUK and M. S. BOUCHERIT, “Harmonic elimination in diode-clamped multilevel inverter using evolutionary algorithms”, Electric Power Systems Research, Elsevier, Vol. 78, Issue. 10, October 2010, pp 1736-1746.
- [14] Djamel BELLALA, “Contribution à l’Optimisation des Systèmes de Conversion d’Energie. Application aux Systèmes Photovoltaïques”, Thèse de doctorat, Université de Batna, 2009.
-

[15] Stéphane VIGHETTI, "Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau : Choix et dimensionnement des étages de conversion", Thèse de doctorat, Université de Grenoble, septembre 2010.

[16]

Kamelia HELALI, "Modélisation D'une Cellule Photovoltaïque: Etude Comparative", Mémoire de magister, Université de Tizi-Ouzou, Juin 2012.

[17] SX 150s module datasheet, BP Solar.

[18] M.C. Alonso GARCIA, J. L. BALENZATEGUI, "Estimation of photovoltaic module yearly temperature and performance based on Nominal Operation Cell Temperature calculations", Renewable Energy, Elsevier, Vol. 29, Issue. 12, October 2004, pp 1997-2010.

[19]: M. Hatti, « Contrôleur Flou pour la Poursuite du Point de Puissance Maximum d'un Système Photovoltaïque », JCGE'08, Lyon, 2008.

[20] : A. Betka, A. Moussi, « Rendement maximisé d'un moteur asynchrone alimenté par une source photovoltaïque », LarhyssJournal, ISSN 1112-3680, pp. 151-162 Laboratoire de Recherche en Hydraulique Souterraine et de Surface, 2003.

[21] Jacques BOUCHIROL, "Le photovoltaïque intégré au bâtiment", INES (Institut Nationale de l'Energie Solaire), Novembre 2012.

[22] E. BIANCONI, J. CALVENTE, R. GIRAL, E. MAMARELIS, G. PETRONE, C. A. RAMOSPAJA, G. SPAGNUOLO and M. VITELLI, "fast current-based MPPT technique employing sliding mode control", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 60, No. 3, Mars 2013, pp. 1168-1178.

[23] W. Boucheritte, « Convertisseurs multi niveaux dans les systèmes PV Connectés au réseau », Mémoire de Magister en Electrotechnique, Université Mohamed Khider , Biskra, 2013.

[24] Belhadj Mohammed, « Modélisation d'un Système de captage photovoltaïque autonome », Mémoire de Magister en Microélectronique –Photovoltaïque, Centre Universitaire de Bechar, 2008.

[25] M. Hatti, « Contrôleur Flou pour la Poursuite du Point de Puissance Maximum d'un Système Photovoltaïque », JCGE'08, Lyon, 2008.

[26] A. Betka, A. Moussi, « Rendement maximisé d'un moteur asynchrone alimenté par une source photovoltaïque », LarhyssJournal, ISSN 1112-3680, pp. 151-162 Laboratoire de Recherche en Hydraulique Souterraine et de Surface, 2003.

[27] K. Kassmi, M. Hamdaoui et F. Olivié, « Conception et modélisation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT analogique », Revue des Energies Renouvelables Vol. 10 N°4 (2007).

- [28] M. Dariga, «Réalisation d'un système de conversion et de gestion de l'énergie d'un système photovoltaïque pour l'alimentation des réseaux de capteurs sans fil autonomes pour l'application aéronautique», Thèse Doctorat de l'Université de Toulouse, 2011.
- [29] V. SALAS, E. OLIÍS, A. BARRADO, A. LAZÀRO, "Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems", Solar Energy Materials & Solar Cells, Elsevier, Vol. 90, Issue. 11, July 2006, pp. 1555-1578.
- [30] H. BOUZERIA, Modélisation et commande d'une chaîne de conversion photovoltaïque, DOCTORAT 3ème cycle LMD en Électrotechnique, Université de Batna, 2016.
- [31] K. Merabet , «commande MU d'un onduleur triphasé basée la dispersion de la tension triphasée »,Mémoire de Magister en Génie Electrique ,Université du Québec ,2011.
- [32] :A. Bouzid et M.Mazizi ,« Dimensionnement d'un système photovoltaïque pour l'alimentation d'une ferme Étude de l'onduleur triphasé lié à cette application », mémoire d'Ingénieur d'état en Electrotechnique, Mohamed Boudiaf d'Oran,2008
- [33]O. BOUAKAZ, "Contribution à l'analyse des onduleurs multiniveaux, fonctionnement symétrique et asymétrique", Mémoire de Magister, Université de Batna, 2005.
- [34] Djaafer LALILI, "MLI vectorielle et commande non linéaire du bus continu des onduleurs multiniveaux. Application à la conduite de la machine asynchrone", Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure Polytechnique, Alger, Avril 2009.
- [35] H. W. Van Der BROECK, H. C. SKUDELNY and G. V. STANKE, "Analysis and Realization of a Pulse Width Modulation Based on Voltage Space Vectors", IEEE Transactions On Industrial Applications, Vol. 24, No. 1, January/February 1988, pp. 142-150.
- [36] P. F. SEIXAS, M. A. S. MENDES, P. D. GARCIA, and A. M. N. LIMA, "An Algebraic PWM Method for Three-level Voltage Source Inverter", Industry Applications Conference, Conference Record of the 2000 IEEE, Rome, Italy, Vol. 4, October2000, pp. 2177-2184.
-

Résumé

Ce travail a pour but la modélisation, la commande d'un système photovoltaïque connecté au réseau via un convertisseur DC-DC de type Boost et un onduleur de tension.

On a fait une modélisation du champ PV, du hacheur et de l'onduleur à deux niveaux, puis on a étudié la commande du hacheur Boost par les techniques de MPPT et de l'onduleur par la SVM. Le contrôle de notre système a été réalisé en premier lieu en utilisant une commande linéaire classique de type PI.

Mots-clés : Système PV, MPPT, SVM, Onduleur

Abstract

The aims of this work are modeling, control of a grid connected solar photovoltaic via a boost chopper and an inverter.

We modeled the PV field, the chopper and inverter, and then we studied the control of the boost chopper by MPPT techniques and inverter by SVM. The control of our system has been realized firstly using a PI controller.

Keywords: PV System, MPPT, SVM, inverter

ملخص

DC- أهداف هذا العمل هي النمذجة والتحكم في شبكة الطاقة الشمسية الموصولة بشبكة الكهربائية عبر المموج و المحول DC.

قمنا بنمذجة حقل PV محول DC-DC والمموج ذو مستويين , ثم درسنا التحكم في محول DC-DC بواسطة تقنيات MPPT والمموج بواسطة SVM, ثم قمنا باستخدام وحدة تحكم PI

كلمات البحث: نظام PV, MPPT, SVM, العاكس