REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA

Faculté de **T**echnologie

Département du **G**énie **E**lectrique

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : ELECTROTECHNIQUE.

Spécialité : RESEAUX ELECTRIQUE.

Conception d'une commande MPPT optimale d'un système photovoltaïque connecté au réseau

---

Présentés par :

Daoud Abdelkrim

Amraoui Karim

Proposés et Dirigés par :

Amokrane Zouhir

Promotion 2022

Remerciements

Nous remercions tout d'abord, Allah qui nous a donné La force et le courage de terminer nos études et élaborer ce modeste travail.

Nous tenons à remercier toutes les personnes sans lesquelles ces années d'études n'auraient étés que le pâle reflet de celles que nous avons passées.

Nos sincères remerciements à notre encadreur Mr **Amokrane Zouhir** qui nous albien encadré et nousa encouragé tout au long de notre travail.

Nous tenons à remercier le doyen de notre faculté qui nous a assuré les meilleures conditions de travail.

Nous remercions également les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de juger notre travail.

Enfin nous remercions, tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin à l'élaboration de ce mémoire, ainsi que tous ceux qui ont participé à notre formation.

Daoud Abdelkrim et Amraoui KARIM

Dédicace

Avant tous, je remercie dieu le tout puissant de M'avoir donné le courage et la patience pour réaliser Ce travail malgré toutes les difficultés rencontrées.

Je dédie ce modeste travail :

A mes très chers parents, que dieu les garde et les Protège pour leurs soutien moral et financier, pour Leurs encouragements et les sacrifices qu'ils ont endurés.

A mes frères (Ahmed et Mohamed)

A ma Sœur

A mon binôme KARIM et toute la famille AMRAOUI.

Aux chers amis : REDHA, MOURAD, AMINE, AYMEN, BILAL, YAHYA, FATEH,ADEL.

A tous ce que j'aime et qui m'aiment.

A tous mes collègues d'études.

DAOUD ABDELKRIM.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail en premier lieu à mes parents qui m'ont soutenus pour me permettre de réaliser tous mes objectifs et qu'ils trouvent ici toute ma reconnaissance et ma gratitude.

A mon frère, et toute ma famille

A mon binôme ABD ELKRIM et toute la famille DAOUD.

A tous mes enseignants depuis le primaire jusqu'à maintenant surtout nos Enseignants du département génie électrique

A tous mes camarades et mes amis en particulier MOURAD, AMINE, ADEL, REDHA.

KARIM AMRAOUI

Sommaire

Introduction générale……..1

Chapitre I : Généralité Les Systèmes Photovoltaïques

I.1. Introduction……..3

I.2. Energie solaire……..3

I.2.1. Définition…… 3

I.2.2. Définition et Historique du photovoltaïque…… 3

1.2.3 Le système photovoltaïque…… .4

I.2.4. Installations photovoltaïques raccordées au réseau……..6

I.3. La cellule photovoltaïque…….7

I.3.1. Définition…… 7

I.3.2 Le principe de conversion photovoltaïque…… . 8

I.3.3. L'effet photovoltaïque…… 8

I.4. Générateur photovoltaïque……...9

I.4.1. Module photovoltaïque……9

I.4.2. Panneau photovoltaïque…….10

I.5. Constitution d'un module photovoltaïque…… 10

I.5.1. Association des Cellules Photovoltaïques en Série……10

I.5.2. Association des Cellules Photovoltaïques en parallèle……..11

I.6. Influence d'éclairement et de la température……12

I.6.1 Influence d'éclairement……..12

I.6.2 Influence de la température……12

I.7. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque……...13

I.7.1. Les Avantage……....13

I.7.2. Inconvénients et Limites……13

I.8.Conclusion……...13

Sommaire

Chapitre II : Les Convertisseurs Pour Les Systèmes Photovoltaïque

II.1 Introduction ……..15

II.2 Les convertisseurs électriques ……...15

II.2.1.Convertisseurs CC/CC……..16

II.2.2. Convertisseur CC/AC……..16

II.2.3 : Convertisseurs AC/CC……16

II.2.4. Convertisseurs AC/AC……17

II.3 Les convertisseurs DC/DC……18

II.3.1 Définition……..18

II.3.2 Type des hacheurs……18

II.3.3 Hacheur boost (survolteur)……18

II.3.4 Hacheur Buck……21

II.3.5 Hacheur buck-boost……..23

II.4 La commande MPPT……26

II.4.1 Définition……..26

II.4.2 Le principe de fonctionnement de MPPT d'un générateur PV……26

II.4.3 Gestion de la MPPT……..28

II.4.4 Les différentes techniques d MPPT……..29

II.4.5 La méthode P&O……..30

II.5 Les convertisseur DC/AC.....32

II.5.1 Définition……..32

II.5.2 Les Type de l'onduleur……32

II.5.3 Onduleur on pont (H) avec un convertisseur boost……...33

II.5.4 Stratégie de commande……34

II.6 avantages et inconvénients d'un onduleur multi niveau……....38

II.7 Conclusion……38

Sommaire

Chapitre III : Modalisation et simulation de système PV raccordé au réseau

III. Introduction……40

III.2. Vision sur le réseau électrique…….40

III.2.1. Niveaux de tensions des réseaux……..……..40

III.2.2. Les postes électriques……..……40

III.2.3. Les lignes électriques……..……41

III.3. Les centrales solaire ou photovoltaïque……..41

III.3.1. Classements des centrales photovoltaïques connectées au réseau…..……41

III.3.2. Exemples des centrales photovoltaïques……...……..41

III.4. Système photovoltaïque raccordé au réseau……42

III.4.1. Eléments constitutifs d'une installation PV connecté au réseau……...……..42

III.5. Modélisation et structuration d'un système PV raccordé au réseau……42

III.5.1. Structure d'un système photovoltaïque connecté au réseau……..……..42

III.5.2 Modélisation d'un générateur photovoltaïque……..……43

III.5.3.Simulation d'un générateur Photovoltaïque……..……...44

III.5.4.Modélisation du convertisseur boost……..…….45

III.5.5. Méthode de Perturbation et d'Observation (P&O)…….……...46

III.5.6 Interprétation des résultats…….…….47

III.6 L'onduleur triphasé à deux niveaux en pont H……....51

III.6.1Etage de commande de l'onduleur triphasé à deux niveaux en pont H…….53

III.7 Filtre LCL…….57

III.7.1 Résultats de simulation……..……...58

III.9 Simulation globale d'un système photovoltaïque connecté au réseau……..59

III.9.1 Résultats de simulation…….60

III.10 Conclusion……64

Liste Des Figures

Chapitre I : Généralité Les Systèmes Photovoltaïques

Figure (1.1) : Principe de l'énergie solaire photovoltaïque…….4

Figure (1.2) : Rayonnement solaire transmis à la terre……...5

Figure (1.3) : Chemins suivis par le rayonnement solaire …….6

Figure (1.4) : installation photovoltaïque raccordée au réseau…… ……..7

Figure (1.5) : représentation de la cellule photovoltaïque ……..…...7

Figure (1.6) : Structure basique d'une cellule solaire…….8

Figure (1.7) : l'effet photovoltaïque ……..9

Figure (1.8) : Configuration des cellules photovoltaïques……10

Figure (I.9) : Caractéristique courant tension de Ns cellule en série……...11

Figure (1.10) : Caractéristique courant tension de (Np) cellule en parallèle……11

Figure (1.11) : Evolution de la caractéristique (I-V) (P-V) en fonction de l'éclairement……12

Figure (1.12) : Evolution de la caractéristique (I-V) (P-V) en fonction de la température….12

Chapitre II : Les Convertisseurs Pour Les Systèmes Photovoltaïque

Figure (2.1): Différents types de convertisseurs statiques……15

Figure (2.2) : Convertisseur CC/CC…….16

Figure (2.3): Convertisseur CC/AC……..16

Figure (2.4) : Convertisseurs AC/CC……....17

Figure (2.5) : Convertisseurs AC/AC (Alternating Current; AC, et Direct Current : DC)..…17

Figure (2.6): schéma électrique d'un hacheur boost……..…19

Figure (2.6.a) : Schéma équivalent d'un convertisseur Boost……..20

Figure (2.6.b):Schéma équivalent d'un convertisseur Boost……21

Figure (2.7) : Schéma équivalent d'un convertisseur Buck……..22

Figure (2.7.a) : Schéma équivalent d'un convertisseur Buck (K fermé et D1 bloquée)……...23

Figure (2.7.b) : Schéma équivalent d'un convertisseur Buck (K ouvert et D1 fermée) ……..23

Figure (2.8) : Schéma électrique d'un convertisseur Buck-Boost……..……..24

Figure (2.8.a) : Schéma équivalent d'un convertisseur Buck-Boost (K fermé et D1 bloquée) ……..25

Figure (2.8.b) : Schéma équivalent d'un convertisseur Buck-Boost (K ouvert et D1 passante) ……..26

Figure (2.9) : Système photovoltaïque avec une commande MPPT…….27

Figure (2.10) : La caractéristique I-V, P-V et la trajectoire de PPM……27

Figure (2.11) : Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque……...28

Figure (2.12) : Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximale a) suite à une variation d'éclairement, b) suite à une variation de charge, c) suite à une variation de température……30

Figure (2.13) : Caractéristiques de fonctionnement de l'Algorithme P&O……..31

Figure (2.14) : Organigramme de l'algorithme MPPT de la perturbation & observation …...31

Figure (2.15) : Schéma de principe de la conversion Continu-Alternative (DC- AC)…….32

Figure (2.16) : Schéma fonctionnel d'un onduleur monophasé en pont H……..33

Figure (2.17) : Schéma de Principe d'un Onduleur Triphasé En Pont…….33

Figure (2.18) : onduleur on pont H avec un convertisseur boost……..33

Figure (2.19) : Contrôle indirect par MLI d'un bras d'onduleur……..34

Figure (2.20) : angles de commutation (α1, α2, α3, α4)……...35

Figure (2.21) : Contrôle indirect par MLI intersective classique sur une période Td……..35

Figure (2.22) : Contrôle indirect par MLI intersective classique……..36

Figure (2.23) : Contrôle indirect par MLI d'un onduleur monophasé deux niveaux……36

Figure (2.24) : Contrôle direct par hystérésis d'un bras d'onduleur…….37

Chapitre III : Modalisation et simulation de système PV raccordé au réseau

Figure (3.1) **:** Structure générale d'un système PV connecté au réseau……43

Figure (3.2): Circuit électrique d'une cellule……43

Figure (3.3**) :** Modèle Sim Power d'un générateur photovoltaïque……...44

Figure (3.4) **:** Modèle Simulink d'un générateur photovoltaïque……..45

Liste Des Tableau

Figure (3.5) **:** Influence de l'éclairement sur les Caractéristiques I(V) et P(V) à Tref= 25°C..……46

Figure (3.6) : Influence de la température sur les Caractéristiques I(V) et P(V) à irradiations =1000 (W/m2)……..…46

Figure (3.7). Schéma électrique du convertisseur boost……..47

Figure (3.8) **:** Valeurs de la tension et courant du hacheur boost……48

Figure (3.9) : Caractéristique de Ppv en fonction de la tension Vpv d'un panneau solaire…49

Figure (3.10) **:** Influence de l'irradiation sur la caractéristique Ppv= f(Vpv) avec optimisation par la P&O……50

Figure (3.11) **:** Allure de la puissance du PV sous les conditions STC (1000W/m², T=25°C)……50

Figure (3.12**) :** Allure de la tension du PV sous les conditions (1000W/m², Ta=25°C)……..51

Figure (3.13): Onduleur triphasé de tension à deux niveaux en pont……..52

Figure (3.14): Allure des tensions simple et composé pour l'onduleur triphasé à deux niveaux en Pont (charge résistive)……..52

Figure (3.15): Modes de fonctionnement de l'onduleur triphasé à deux niveaux en pont…..53

Figure (3.16) Transformation de Park ……54

Figure (3.17) Structure de la PLL……55

Figure (3.18) – Commande proportionnelle-intégrale PI……56

Figure (3.19) représente la tension et le courant à la sortie continue de l'onduleur……57

Figure (3.20) : Filtre L-C-L et composants……..58

Figure (3.21) : Représentation de la tension et le courant à la sortie continue de l'onduleur avec filtre LCL……..58

Figure (3.22) : Circuit global sous Matlab/Simulink……59

Figure (3.23) : Représentation de courant et la tension de phase du réseau électrique (Vdc=0, Iq=30)……60

Figure (3.24) : La valeur de THD (Vdc=0, Iq=30)……..60

Figure (3.25) : Représentation de courant et la tension de phase du réseau électrique (Vdc=0 Iq=15).....…...61

Figure (3.26) : La valeur de THD (Vdc=0, iq=15)……..61

Figure (3.27) : Représentation de courant et la tension de phase du réseau électrique (Vdc=300 Iq=0)……62

Figure (3.28) : La valeur de THD (Vdc=300, Iq=0)……62

Figure (3.29) : représentation de courant et la tension de phase du réseau électrique (Vdc=600, Iq=0)……63

Figure (3.30) : La valeur de THD (Vdc=600, Iq=0)……63

Liste Des Tableau

Chapitre III : Modalisation et simulation de système PV raccordé au réseau

Tableau 1 : Caractéristique du module PV a 25°C et 1000W/m……..45

Tableau 2 : paramètres de fonctionnement du convertisseur survolteur……...48

Tableau 3 : Les modes de perturbation de la méthode P&O……49

Liste des symboles

Ipv : Courant générer par la cellule photovoltaïque.

I : Le courant circulant dans la résistance Rs c'est aussi le courant Ipv.

Iph : Courant photonique.

ID : Le courant circulant dans la diode.

Ip : Le courant circulant dans la résistance Rp.

Iscn : Courant de court-circuit nominal de la cellule.

Ki: Coe cient de la température de la cellule.

Tmod : Température de fonctionnement de la cellule.

Tr : Température de référence [K].

G0 : Éclairement pour les STC (standard test condition).

G : Éclairement.

NOCT : la température nominale de fonctionnement de la cellule qui est donnée par le constructeur (Data-Sheet).

Is : Courant de saturation de la diode.

Icc : Le courant de court-circuit de la cellule.

Eg : Énergie de seuil. .

q : Charge électrique élémentaire (1,6 10−19C).

K: la constante de Boltzmann (1, 385410 − 23J/K).

Ns : nombre de cellule en série par module.

Ms : nombre de module en série.

Rs : Résistance série de la cellule.

Rp : Résistance shunt de la cellule.

Liste des abréviations

IGBT : Insulated Gâte Bipolar.

MOSFETS : Transistors à effet de champ d'oxyde de métal.

PV : Photovoltaïque.

GPV : Générateur Photovoltaïque.

MPPT : Maximum Power Point Tracking.

P&O : Perturbation et Observation.

DC : Courant Continu.

AC : Courant Alternatif.

MLI : Modulation de Largeur d'Impulsion.

PI : Régulateur Proportionnel Intégral.

DPC : Direct Power Control.

MPP : Maximum Power Point.

PWM : Pulse Wilde Modulation (Modulation à Largeur d'Impulsion).

EnR : Energie renouvelable.

BT : Basse tension.

HTA : Haute tension.

CPCR : Centrale Photovoltaïque Connecté au Réseau.

Introduction générale

Introduction générale :

Les énergies renouvelables se manifestent comme une solution potentielle à la réduction de la pollution. Parmi les moyens de production prometteurs (éolien, hydraulique…), le photovoltaïque (PV) apparaît aujourd'hui comme le plus approprié et le plus abouti à la production d'électricité d'origine renouvelable pour l'habitat. Ajoutons à cela la libéralisation du marché de l'électricité qui introduit des changements majeurs dans le domaine de l'énergie. La multiplication des producteurs indépendants et des productions décentralisées [1].

Par énergie renouvelable, on entend des énergies issues du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, de l'eau ou encore de la biomasse. La filière étudiée dans ce mémoire est l'énergie solaire photovoltaïque. L'énergie solaire photovoltaïque (PV) est en forte croissance depuis quelques années car c'est une source inépuisable, non polluante pour l'environnement, silencieuse et non dérangeante pour les riverains. Le développement rapide de l'énergie solaire est apparu progressivement sous forme d'installations de petites puissances raccordées au réseau à Basse Tension (BT) et de fermes solaires connectées directement au réseau à Moyenne Tension (HTA).

Or, jusqu'à présent les réseaux ont été conçus de manière à transporter l'électricité produite de façon concentrée dans des centrales de grande puissance et de la distribuer pour être consommée par des millions de consommateurs, particuliers ou entreprises. Cette décentralisation de la production liée aux EnR va donc demander de nouvelles fonctionnalités et induire une complexification du système. L'enjeu est de taille car s'il n'est pas relevé, il pourrait fortement gêner le développement des énergies renouvelables [2].

Et aujourd'hui, les systèmes photovoltaïques sont de plus en plus souvent raccordés au réseau électrique. Ils permettent à un ménage de produire une partie de son électricité de manière propre et d'injecter la production d'électricité excédentaire sur le réseau [2].

Dans le 1er Chapitre nous présentons la généralité sur système PV, en commencer par la cellule photovoltaïque, et le principe de fonctionnement de système PV, avec les applications et les caractéristiques électrique de système.

Dans le 2em Chapitre-nous présentons Les Convertisseurs Pour Les Systèmes Photovoltaïque avec les différents types d'utilisation avec les applications et les caractéristiques électrique de système.

Dans le 3ème Chapitre nous présentons la modélisation de système PV, un raccordement au réseau électrique, et en terminer le chapitre par La simulation de système PV raccordé au réseau électrique avec une interprétation des résultats, et en terminer les études par une conclusion générale.

CHAPITRE 1 : Généralité sur le système photovoltaïque

I.1. Introduction :

L'énergie solaire photovoltaïque c'est la transformation de la lumière du soleil en électricité. Cette conversion d'énergie s'effectue quand les cellules PV sont exposés à la lumière. Ce chapitre présente les systèmes photovoltaïques en générales. On commencera par un rappelle sur l'énergie solaire. Ensuite un rappelle sur la cellule photovoltaïque et le module photovoltaïque et le principe de la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique et nous montrerons ensuite l'influence de la température et l'éclairement sur le rendement aussi les avantages et les inconvénients. A la fin on termine par une conclusion.

I.2. Energie solaire :

I.2.1. Définition :

Le soleil est une source quasiment inépuisable d'énergie qui envoie à la surface de la terre un rayonnement qui représente chaque année environ 2 fois la consommation énergétique. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1 kilowatt crête par mètre carré (kWc/m^2) répartie sur tout le spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge. Les déserts de notre planète reçoivent en 6 heures plus d'énergie du soleil que n'en consomme l'humanité en une année. L'énergie solaire est produite et utilisée selon plusieurs procédés:

- **L'énergie solaire thermique:** qui consiste tout simplement à produire de la chaleur grâce à des panneaux sombres. On peut aussi produire avec de la vapeur à partir de la chaleur du soleil puis convertir la vapeur en électricité.
- **L'énergie solaire photovoltaïque:** qui consiste à produire directement de l'électricité à partir de la lumière à l'aide de panneaux solaires. Cette forme d'énergie est déjà exploitée dans de nombreux pays, surtout dans les pays ou les régions ne disposant pas de ressources énergétiques conventionnelles tels que les hydrocarbures ou le charbon [1].

I.2.2. Définition et Historique du photovoltaïque :

I.2.2.1. Définition photovoltaïque :

Le terme « photovoltaïque », souvent abrégé par les lettres PV, a été formé à partir des mots « photo », un mot grec signifiant lumière, et « Volta », le nom du physicien italien Alessandro Volta, qui a inventé la pile électrochimique en 1800. L'effet photovoltaïque, c'est la conversion directe de l'énergie solaire en électricité [2].

Les cellules solaires photovoltaïques sont des semi-conducteurs capables de convertir directement la lumière en électricité. Cette conversion, appelée effet photovoltaïque.

I.2.2.2.Histoire photovoltaïque:

L'effet photovoltaïque a été découvert par le physicien français Antoine Becquerel (1788 - 1878) en 1839. Le mot « photovoltaïque » vient du mot « photo » (du grec qui signifie « lumière ») et du mot « Volt » (nom du physicien Alessandro Volta qui a contribué de manière très importante à la recherche en électricité).

1.2.3 Le système photovoltaïque :

Le système photovoltaïque SPV est constitué par une source d'énergie, une interface de puissance (Convertisseurs statiques DC-DC et DC-AC avec un système de commande) et une charge. Le rôle principal du convertisseur statique est de faire une adaptation d'impédance de sorte que le générateur délivre le maximum d'énergie [3].

1.2.3.1 L'énergie solaire photovoltaïque :

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique (Figure .1.1). Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque [4].

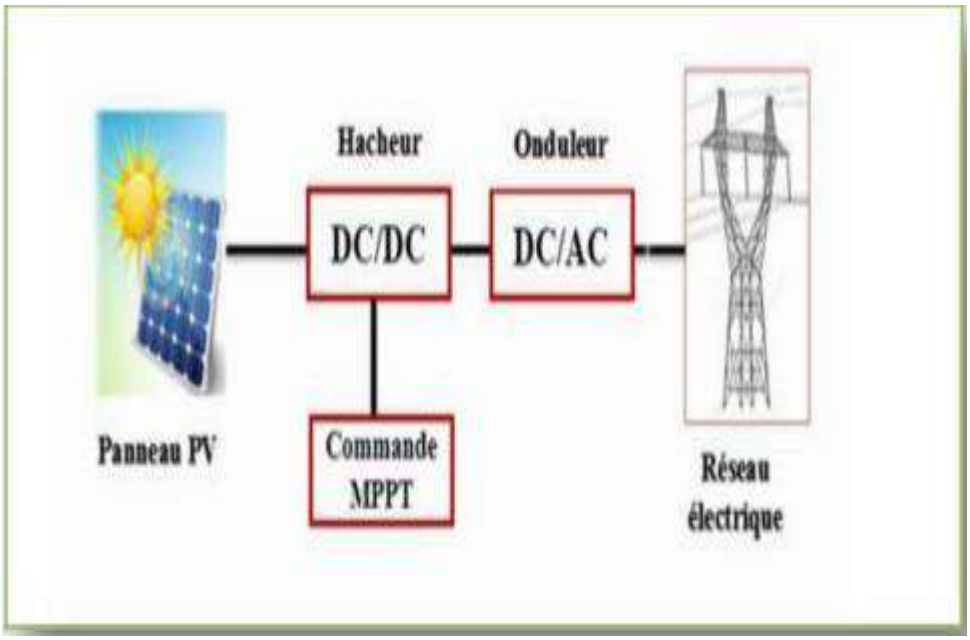


Figure (1.1) : Principe de l'énergie solaire photovoltaïque.

1.2.3.2 Rayonnement solaire :

Le soleil, notre plus grande source d'énergie, est une étoile située à une distance moyenne de 149 598 000 Km de la terre figure (1.2). Elle émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0,22 à 10 μm. Ce rayonnement est composé de grains de lumière appelés photons. L'énergie de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde λ par la relation suivante : [5]

$$Ep = h \times \frac{c}{\lambda} \quad \text{(I. 1)}$$

H : est la constante de Planck

c : est la vitesse de la lumière et λ sa longueur d'onde.

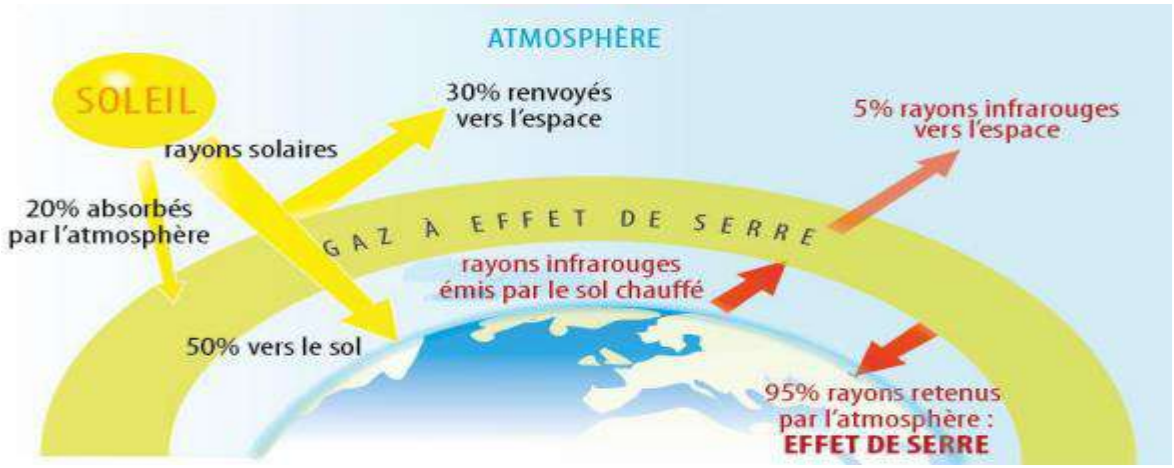


Figure (1.2) : Rayonnement solaire transmis à la terre [5].

- **Le rayonnement direct :** est reçu directement du Soleil, sans diffusion par l'atmosphère. Ses rayons sont parallèles entre eux, il forme donc des ombres et peut être concentré par des miroirs. Il peut être mesuré par un PYRHELIOMETRE.
- **Le rayonnement solaire réfléchi :** ou l'albédo du sol est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige).
- **Le rayonnement global :** est la somme de tous les rayonnements reçus, y compris le rayonnement réfléchi par le sol et les objets qui se trouvent à sa surface. Il est mesuré par un PYRANOMETRE ou un SOLARIMETRE sans écran. Les stations météorologiques généralement mesurer le rayonnement global horizontal par un PYRANOMETRE placé horizontalement à l'endroit requis. [5]

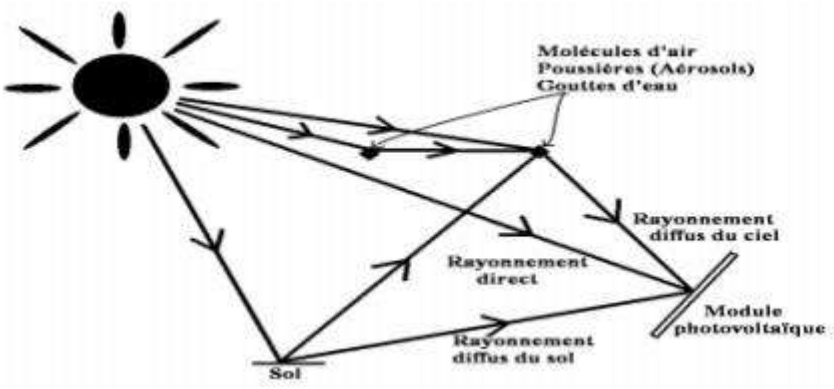


Figure (1.3) : Chemins suivis par le rayonnement solaire [5]

I.2.4. Installations photovoltaïques raccordées au réseau : [6]

Un tel système s'installe sur un site raccordé au réseau (Sonelgaz en Algérie). Généralement sur des habitations ou des entreprises qui souhaitent recourir à une forme d'énergie renouvelable et qui bénéficient d'un bon ensoleillement.

Un générateur photovoltaïque connecté au réseau n'a pas besoin de stockage d'énergie et élimine donc le maillon le plus problématique (et le plus cher).

C'est en fait le réseau dans son ensemble qui sert de réservoir d'énergie.

Il y'a deux formes d'injection du courant photovoltaïque :

- Soit injecter la totalité de la production photovoltaïque au réseau.
- Soit injecter le surplus de la production photovoltaïque au réseau.

Deux compteurs d'énergie sont nécessaires :

Un compteur comptabilise l'énergie achetée au fournisseur d'énergie (consommation) et un autre compteur mesure l'énergie renvoyée sur le réseau électrique lorsque la production dépasse la consommation.

Un troisième compteur est ajouté dans le cas où l'énergie produite est injectée en intégralité dans le réseau (compteur de non-consommation).

Un onduleur pour la conversion du courant continu des panneaux en alternatif, et ce dernier doit être homologué par la compagnie d'électricité qui va recevoir ce courant. Afin de s'assurer sur sa qualité « sinusoïdale ».

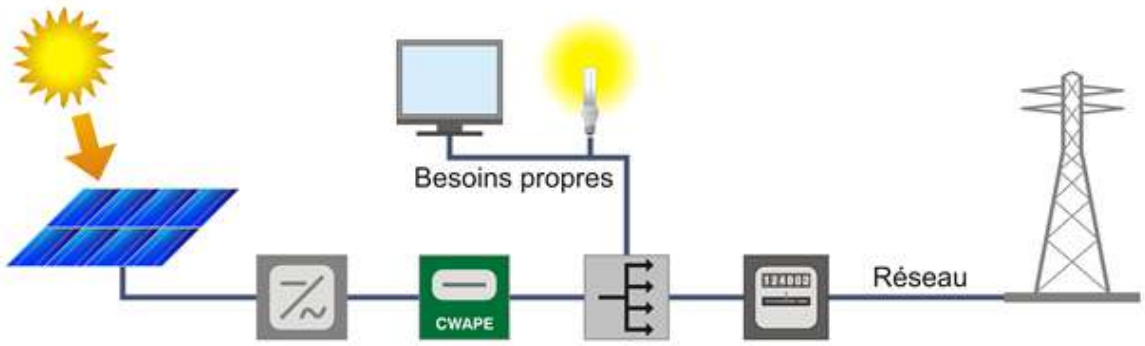


Figure (1.4) : installation photovoltaïque raccordée au réseau.

I.3. La cellule photovoltaïque :

I.3.1. Définition :

La cellule photovoltaïque est l'élément qui permet de convertir l'énergie solaire en énergie électrique figure (1.7). Un panneau solaire photovoltaïque peut être constitué de certains cellules photovoltaïques, Une cellule photovoltaïque (ou photopile) est un dispositif qui transforme l'énergie lumineuse en courant électrique. La cellule photovoltaïque est le composant électronique semi-conducteur qui compose un panneau solaire photovoltaïque et qui exposé à la lumière, produit de l'électricité. [7]

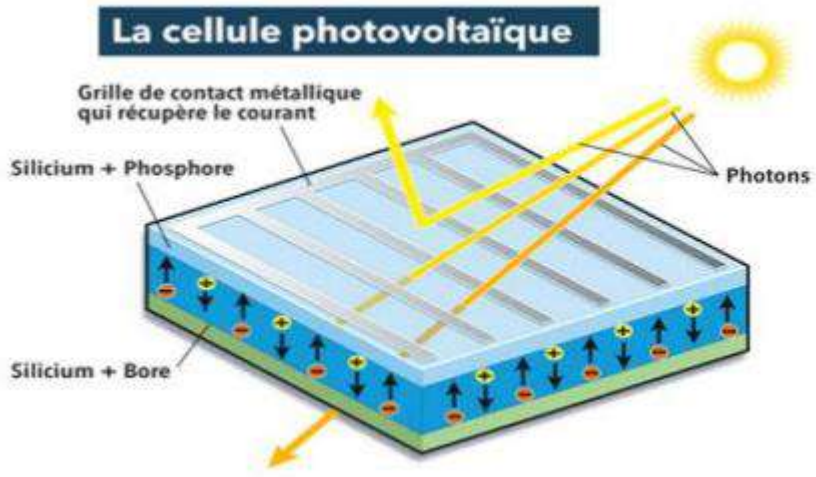


Figure (1.5) : représentation de la cellule photovoltaïque [7].

I.3.2 Le principe de conversion photovoltaïque :

La cellule photovoltaïque est composée d'un matériau semi-conducteur de la nature du silicium cristallin [9], qui absorbe l'´énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique (Figure .1.8) [8].

Les cellules photovoltaïques sont constituées [9]:

- D'une couche fine du semi-conductrice tel que le silicium, qui est un matériau présentant une conductivité électrique relativement bonne.

- D'une couche antirejet permettant une pénétration maximale des rayons solaires.

- D'une grille conductrice sur le dessus ou cathode et d'un métal conducteur sur le dessous ou anode.

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

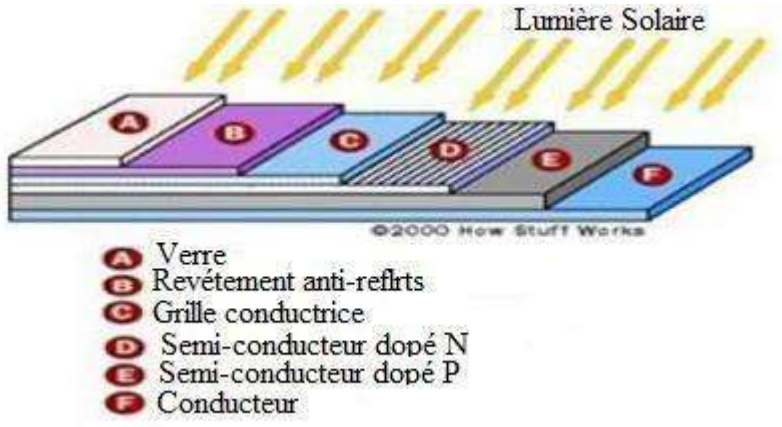


Figure (1.6) : Structure basique d'une cellule solaire.

I.3.3. L'effet photovoltaïque :

L'effet photovoltaïque est l'effet photoélectrique, caractérisé par la production d'un courant électrique entre deux parties de matériaux différents qui sont en contact et exposée à la lumière ou à un rayonnement électromagnétique générale. Figure (1.9).Cet effet photovoltaïque est le principe des cellules photovoltaïques et est donc essentielle pour la production de mendiante de l'électricité solaire 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 sont

décrochés. Les électrons " décrochés " 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. [10].

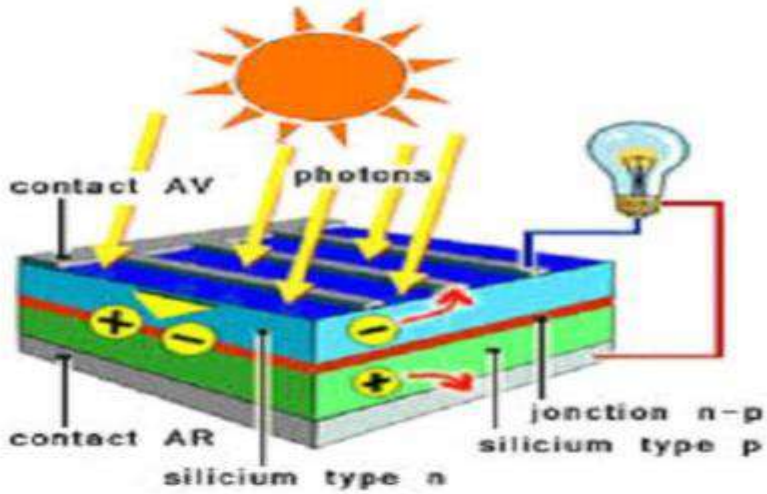


Figure (1.7) : l'effet photovoltaïque [10]

I.4. Générateur photovoltaïque :

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 chaine. Enfin, les chaines sont connectées en parallèle pour former un générateur photovoltaïque. Le nombre de modules dans chaque chaine est spécifié selon le besoin du niveau de tension du générateur.

I.4.1. Module photovoltaïque :

La cellule photovoltaïque élémentaire constitue un générateur de très faible puissance vis-à-vis des besoins de la plupart des applications domestiques ou industrielles. Une cellule élémentaire de quelques dizaines de centimètres carrés, délivre au maximum, quelques watts sous une tension inférieure au volt (tension de jonction PN). Pour produire plus de puissance, plusieurs cellules doivent être assemblées afin de créer un module ou un panneau photovoltaïque. En effet, les modules PV sont composés d'un ensemble de cellules mises en série, réalisant la conversion proprement dite de la lumière du soleil en électricité. Ils sont eux-mêmes associés en série et parallèle pour former un champ photovoltaïque d'une puissance crête définie selon des conditions spécifiques d'éclairement, de température et de

spectre solaire. La plupart des modules commercialisés sont constitués de deux à quatre réseaux de cellules en silicium cristallins connectés en série [11].

I.4.2. Panneau photovoltaïque :

Le panneau photovoltaïque (ou champ solaire) est constitué de modules connectés en série et en parallèle pour obtenir la puissance souhaitée. Chaque module est lui-même composé de cellules.



Figure (1.8) : Configuration des cellules photovoltaïques [12]

I.5. Constitution d'un module photovoltaïque :

Un module photovoltaïque est en général constitué de trois parties qui sont : Câblage des cellules photovoltaïque : les cellules sont connectées entre elle par un fin ruban métallique (cuivre étamé). Les cellules sont encapsulées sous vide entre deux films thermoplastiques transparents. • le plus souvent présence d'un cadre en aluminium avec un joint périphérique pour permettre la dilatation. [20]

I.5. 1. Association des Cellules Photovoltaïques en Série :

Une association de Ns cellules en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque et dons accroitre la puissance, figure (I.14). Les cellules sont alors traversées pour le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule, l'équation (I.7) et (I.8), résume les caractéristiques électriques d'une association de Ns cellules en séries. [20]

$$V_{coNS} = N_s * V_{co}$$

$$I_{cc} = I_{cc}$$

V_{coNS} : La somme des tensions en circuit ouvert de Ns cellules en série.

I_{ccNS} : Courant de court-circuit de Ns cellules en série.

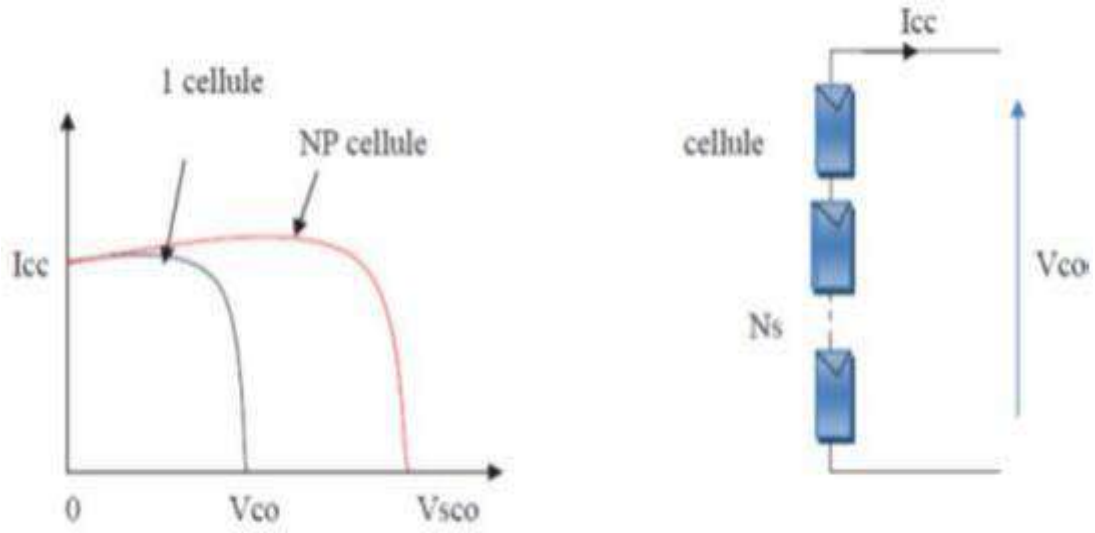


Figure (I.9) : Caractéristique courant tension de Ns cellule en série [20]

I.5.2. Association des Cellules Photovoltaïques en parallèle :

D'autre part une association parallèle de Np est possible et permet d'accroitre le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle les cellules ont soumis la même tension et la caractéristique résultant du groupement est obtenue par addition des courants [20]. Avec :

$$I_{ccNP} = NP * I_{sc}$$

$$V_{co} = V_{coNP}$$

I_{ccNP} : La somme des courants de cout circuit de (NP) cellule en parallèle.

V_{coNP} : Tension du circuit ouvert de (Np) cellules en parallèle.

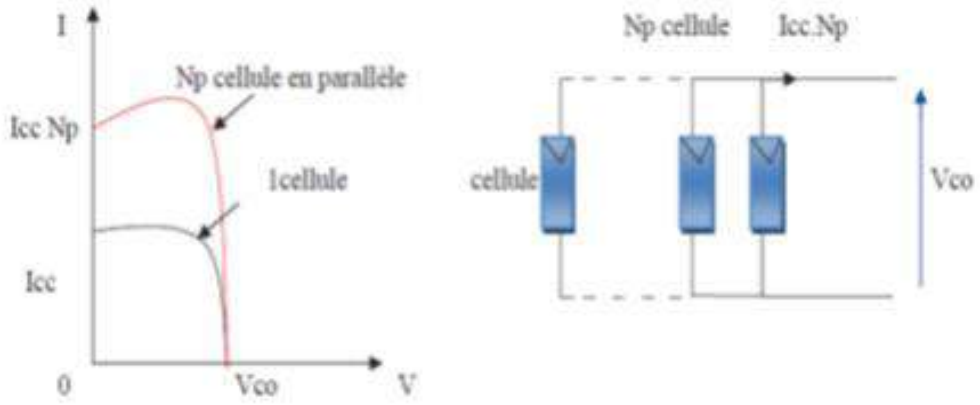


Figure (I.10) : Caractéristique courant tension de (Np) cellule en parallèle [20]

I.6. Influence d'éclairement et de la température :

I.6.1 Influence d'éclairement :

La figure (I.11) présente les caractéristiques I=f(V) et P=f(V) d'un module photovoltaïque pour différents ensoleillements à la température fixe. Comme on peut voir sur la figure, le courant du module est proportionnel à l'ensoleillement, tandis que la tension change légèrement avec l'ensoleillement [13].

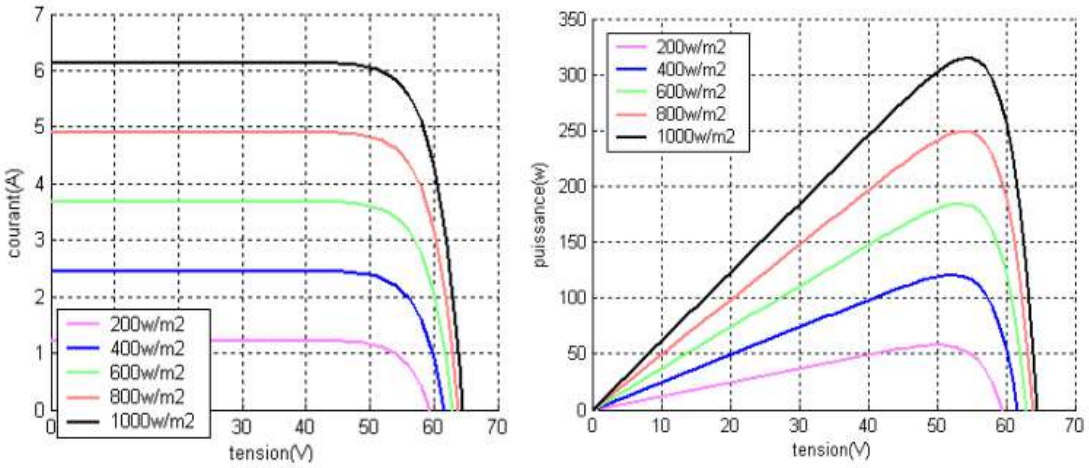


Figure (1.11) : Evolution de la caractéristique (I-V) (P-V) en fonction de l'éclairement [14]

I.6.2 Influence de la température :

On peut observer l'effet de la température sur la caractéristique I(V) .Comme le montre la figure (I.12), la température a un léger effet sur le courant, mais une augmentation de la température cause une diminution apparente sur la tension [13].

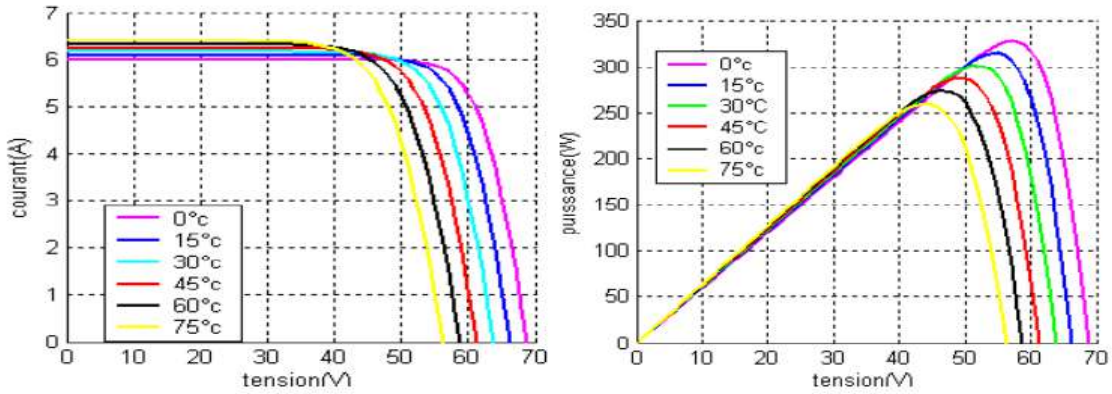


Figure (1.12) : Evolution de la caractéristique (I-V) (P-V) en fonction de la température [14]

I.7. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque :

I.7.1. Les Avantages [15] :

➢ Sa gratuité.

➢ Pas de pollution.

➢ Sa fiabilité et la longue vie de l'installation.

➢ Sa structure fixe.

➢ Son coup de maintenance bas.

➢ Sa flexibilité (dimensionnement selon les besoins, modularité).

➢ L'installation ne produit aucun bruit.

➢ Son potentiel illimité. 5% de la surface des déserts sucraient pour alimenter la planète entière.

I.7.2. Inconvénients et Limites [15] :

➢ Le coût élevé de l'installation.

➢ Le rendement relativement bas de l'effet photovoltaïque.

➢ La puissance est réduite lorsque les conditions climatiques sont défavorables (nuages).

➢ Le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire pour une installation autonome.

➢ Même si l'électricité produite par une installation photovoltaïque est sans pollution. La fabrication, l'installation et l'élimination des panneaux ont un impact sur l'environnement

I.8.Conclusion :

Ce chapitre nous a permis de donner une vue générale sur les systèmes photovoltaïques (un petit rappel sur la description des éléments d'un système photovoltaïque, aussi le module photovoltaïque et leurs performances. Ainsi que leurs avantages et inconvénients). Dans le chapitre 2, on présentera les différents convertisseurs DC-DC et leurs principes de

fonctionnement, la commande MPPT pour chercher le point où la puissance du générateur photovoltaïque maximale puis les convertisseurs DC/AC (onduleur monophasé, triphasé) et leurs commandes pour leur raccordement au réseau.

Chapitre II :
Les Convertisseurs Pour Les Systèmes Photovoltaïque

II.1 Introduction :

Après avoir étudié et cité les différents composants d'un générateur photovoltaïque dans le chapitre 1, nous passons maintenant à l'étude d'une chaine de conversion de puissance photovoltaïque.

Dans un système de conversion des énergies photovoltaïques, les convertisseurs sont utilisés pour bien adapter la source à la charge. Ces convertisseurs peuvent être en courant continu , comme dans le cas d'utilisation des MPPT pour une exploitation maximale de la puissance fournie par le générateur PV, ou en courant alternatif comme dans le cas d'utilisation des charges en courant alternatif.

On s'intéresse dans ce chapitre à l'étude des deux types de convertisseurs DC/DC et DC/AC.

II.2 Les convertisseurs électriques :

Les convertisseurs sont des appareils qui servent à transformer une tension continue fournie par des panneaux ou des batteries pour l'adapter à des récepteurs fonctionnant en une tension continue différente ou une autre alternative. L'étude du convertisseur est intéressante dans la mesure où il est utilisé dans la plupart des nouveaux types de sources de production d'énergie dispersée, et connectée au réseau (éolien, photovoltaïque, ou à pile à combustible…).

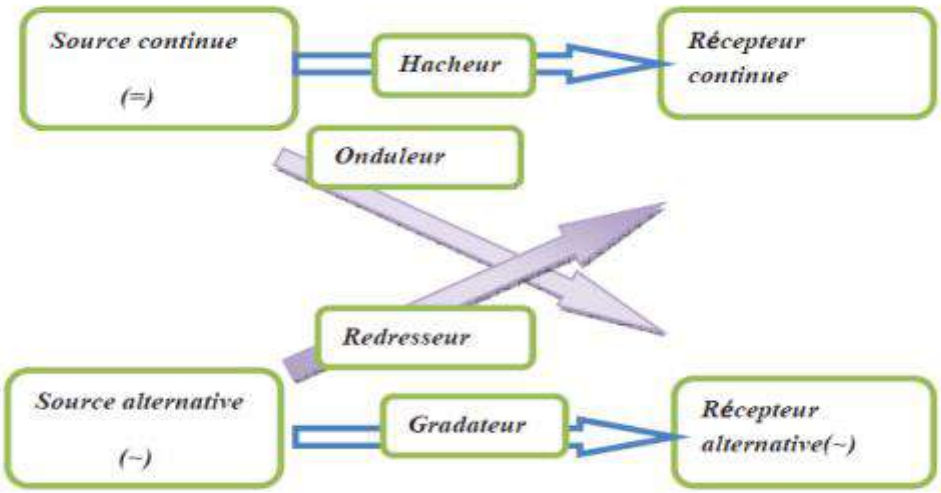


Figure (2.1): Différents types de convertisseurs statiques.

II.2.1.Convertisseurs CC/CC :

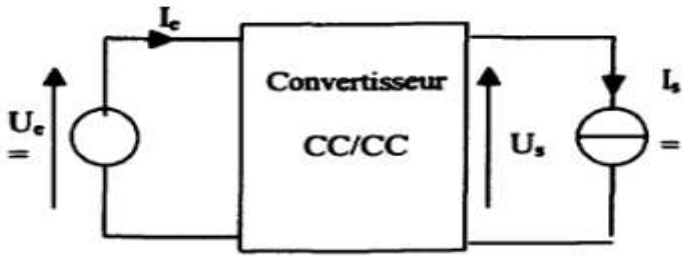


Figure (2.2) : Convertisseur CC/CC. [16]

Les convertisseurs CC/CC sont tels que nous pouvons les définir comme des:

➢ Sources de tension continue, unidirectionnelles ou bidirectionnelles en courant,

➢ sources de courant continu, unidirectionnelles ou bidirectionnelles en tension.

II.2.2. Convertisseur CC/AC :

Ces convertisseurs sont tels qu'on peut les définir tout en mettant en relation entre:

➢ Sources de tension continue, unidirectionnelle ou bidirectionnelle en courant,

➢ Sources de courant alternative. [17]



Figure (2.3): Convertisseur CC/AC.

II.2.3 : Convertisseurs AC/CC :

Tels que nous l'avons défini auparavant, ces convertisseurs mettent en relation:

➢ une source de tension alternative, avec

➢ une source de courant continu, unidirectionnelle ou bidirectionnelle en tension. [18]

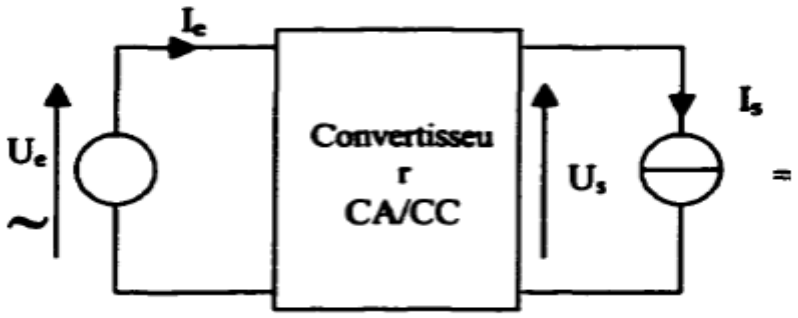


Figure (2.4) : Convertisseurs AC/CC

La source de tension alternative peut être monophasée; triphasée (ou hexaphasée). On est ainsi amené à définir l'indice de pulsation p :

➢ p = 2: tension monophasée,

➢ p = 3: tension triphasée.

➢ p = 6: tension hexaphasée.

II.2.4. Convertisseurs AC/AC :

Tel que nous les avons déjà définis. Ces convertisseurs mettent en relation :

➢ Une source de tension alternative, avec

➢ Une source de courant de même nature (alternative).

Les deux sources étant alternatives, chacune est définie par la fréquence de tension ou du courant qu'elles génèrent : fe pour la source Ue et fs pour Is. Ces deux fréquences peuvent être identiques (Fe = fs), mais ceci n'est qu'un cas particulier par rapport aux cas où ces deux fréquences sont différentes (fc ≠ fs).



Figure (2.5) : Convertisseurs AC/AC (Alternating Current; AC, et Direct Current : DC).

II.3 Les convertisseurs DC/DC :

II.3.1 Définition :

Le convertisseur DC/DC permet de relier le champ PV à un bus continu, auquel les diverses machines énergétiques du système sont reliées : la charge (l'utilisateur final), les autres sources d'énergie (pile à combustible, batteries, autres sources renouvelables) ou les périphériques. Il permet en outre de lisser les fluctuations de la tension des composants au niveau du bus commun. Un hacheur peut être réalisé à l'aide d'interrupteur électronique commandable à l'ouverture et à la fermeture tels que les thyristors GTO ou les transistors bipolaires ou à effet de champ à grille isolée fonctionnant en régime de commutation. Le principe d'un hacheur consiste à établir puis interrompre périodiquement la liaison source-charge à l'aide de l'interrupteur électronique. Celui-ci doit pouvoir être fermé ou ouvert à volonté afin d'avoir une tension de sortie continue réglable [19].

II.3.2 Type des hacheurs :

Les convertisseurs DC-DC (ou hacheurs) sont utilisés dans les systèmes d'énergie solaire pour adapter la source continue à amplitude variable (panneau PV) à la charge qui demande en général une tension DC constante. Les trois configurations de base sont :

- Convertisseur survolteur hacheur survolteur (ou parallèle).
- Convertisseur dévolteur (ou série).
- Convertisseur dévolteur- survolteur hacheur série - parallèle. [19]

II.3.3 Hacheur boost (survolteur) :

Le convertisseur boost est connu par le nom d'élévateur de tension peut être représenté Par le circuit de la figure (II.6). C'est un convertisseur direct DC–DC. La source d'entrée est de type courant continu (inductance en série avec une source de tension) et la charge de sortie est de type tension continue (condensateur en parallèle avec la charge résistive). L'interrupteur K1 peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage). [20]

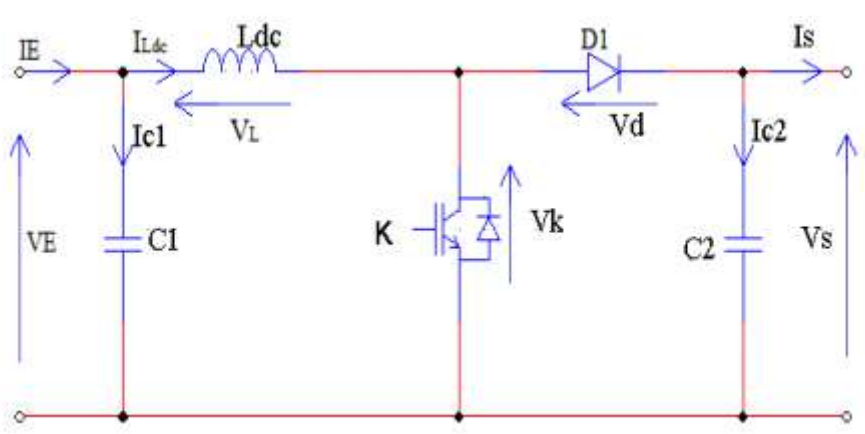


Figure (2.6): schéma électrique d'un hacheur boost

II.3.3.1 L'étude et principe de fonctionnement :

Ce convertisseur Boost fonctionne comme suit : lorsque l'interrupteur K est fermé, l'inductance se charge et le courant i (t), provenant du module solaire, augmente progressivement et ce durant t ϵ [0, DTs]. Quand K s'ouvre, la rupture du courant provoque une surtension d'où l'utilité de la diode qui protège K en empêchant le retour du courant. Le condensateur sert à lisser la tension de sortie. L'inductance L libère une énergie qui s'ajoute à celle de la source pour alimenter la charge via la diode D1 durant t ϵ [DTs, Ts]. Ou on peut écrire la relation entre la tension de sortie et celle d'entrée en fonction de ce rapport cyclique [21] :

$$V_S = \frac{V_E}{(1-D)} \qquad (II.1)$$

On constate que la tension de sortie du convertisseur ne dépend que de la tension d'entrée et du rapport cyclique D. Celui-ci étant toujours compris entre 0 et 1, le convertisseur est toujours élévateur de tension. [21]

Durant l'état passant, l'interrupteur K est fermé pour t ϵ [0, DT]. La tension aux bornes de la diode D1 est égale à $VD = VK - VS$. Comme l'interrupteur K est fermé, on a $VK = 0$, ce qui implique $VD = -VS$. La diode est donc bloquée puisque $VS > 0$. Dans ces conditions, on obtient alors le schéma équivalent de la figure (II.6.a) : [21]

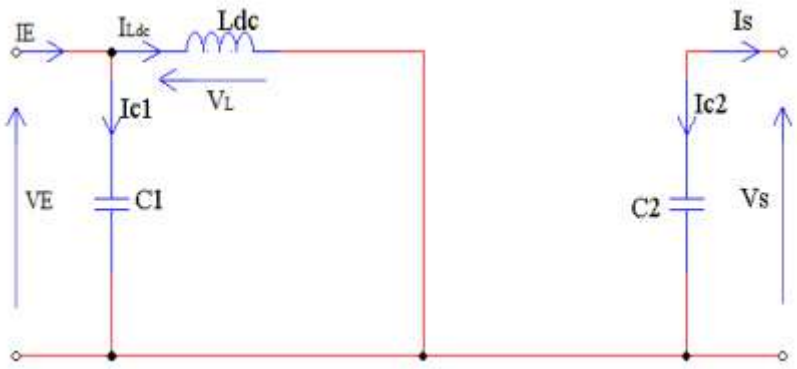


Figure (2.6.a) : Schéma équivalent d'un convertisseur Boost

La tension aux bornes de l'inductance et les relations des courants dans les condensateurs sont alors [22] :

$$V_L(t) = Ld_C \frac{dIL_{dC}(t)}{dt} = V_E(t) \qquad (II.2)$$

$$I_{C1}(t) = C_1 \frac{dV_E(t)}{dt} = I_E(t) - I_L(t) \qquad (II.3)$$

$$I_{C2}(t) = C_2 \frac{dV_S(t)}{dt} = -I_S(t) \qquad (II.4)$$

Durant l'état bloqué, l'interrupteur K est ouvert pour t ϵ [DT, T]. La diode D1 devient conductrice et on obtient alors le schéma équivalent de la figure (II.6.b) :

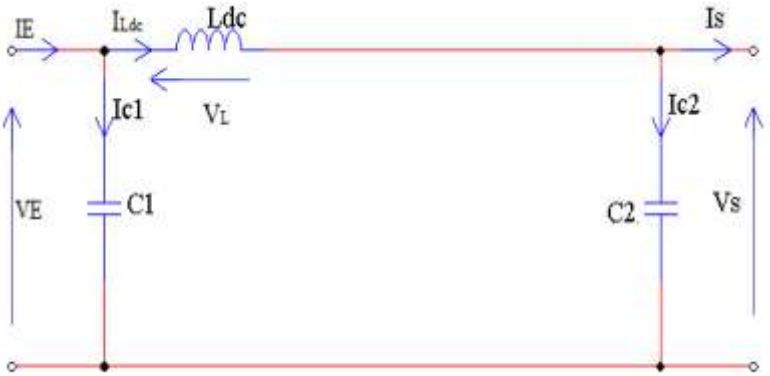


Figure (2.6.b): Schéma équivalent d'un convertisseur Boost

La tension aux bornes de l'inductance et les relations des courants dans les condensateurs sont [22] :

$$V_L(t) = L_{dc} \frac{dIL_{dc}}{dt} = V_E(t) - V_S(t) \qquad (II.5)$$

$$I_{C1}(t) = C_1 \frac{dV_E(t)}{dt} = I_E(t) - I_L(t) \qquad (II.6)$$

$$I_{C2}(t) = C_2 \frac{dV_S(t)}{dt} = I_L(t) - I_S(t) \qquad (II.7)$$

II.3.3.2 Avantage de convertisseur BOOST :

Malgré le rendement élevé du convertisseur buck dans les systèmes avec des sources de puissance conventionnelles, le convertisseur boost peut être plus approprié aux systèmes photovoltaïques avec le suiveur du point de puissance maximale (MPPT) puisque le convertisseur fonctionne au mode de courant continu extrayant autant de puissance que possible à partir des cellules solaires. Par conséquent le rendement énergétique du convertisseur boost peut être plus grand que le convertisseur buck. Le convertisseur boost est généralement employé pour obtenir une tension plus élevée de sortie, tandis que le convertisseur buck est employé pour abaisser la tension de sortie [20].

II.3.4 Hacheur Buck :

Le convertisseur buck est connu par le nom abaisseur de tension peut être représenté Par le circuit de la figure (2.7). Un convertisseur Buck, ou hacheur série, est un appareil qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible valeur. C'est un convertisseur direct DC-DC. La source d'entrée est de type tension continue et la charge de sortie continue de type source de courant. L'interrupteur K figure (2.7) peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage) [23].

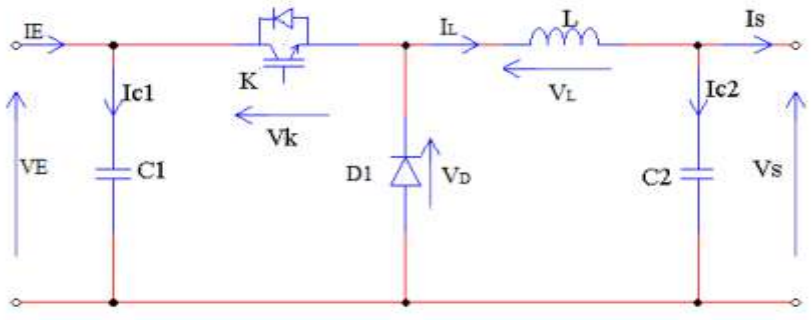


Figure (2.7) : Schéma équivalent d'un convertisseur Buck

II.3.4.1 L'étude et principe de fonctionnement :

L'interrupteur K1 est fermé pendant la fraction T de la période de découpage T. La source d'entrée fournit l'énergie à la charge R au travers de l'inductance Lors du blocage du transistor, la diode K2 assure la continuité du courant dans l'inductance. L'énergie emmagasinée dans cette inductance est alors déchargée dans le condensateur et la résistance de charge. En régime permanent, la Valeur moyenne de la tension aux bornes de l'inductance est nulle. La tension de sortie est donnée par la relation suivante :

$$V_S = D \times V_E$$

On constate que la tension de sortie du convertisseur ne dépend que de la tension d'entrée et du rapport cyclique D. Celui-ci étant toujours compris entre 0 et 1, le convertisseur est toujours abaisseur de tension. Cette étude se base sur la représentation des circuits équivalents des deux phases décrites dans le principe de fonctionnement et de tirer par la suite les relations mathématiques reliant la tension de sortie et celle d'entrée. La figure (II.7.a) montre le schéma du circuit équivalent d'un convertisseur dévolteur avec l'interrupteur K fermé pendant t ϵ [0, DT]. [20] [21]

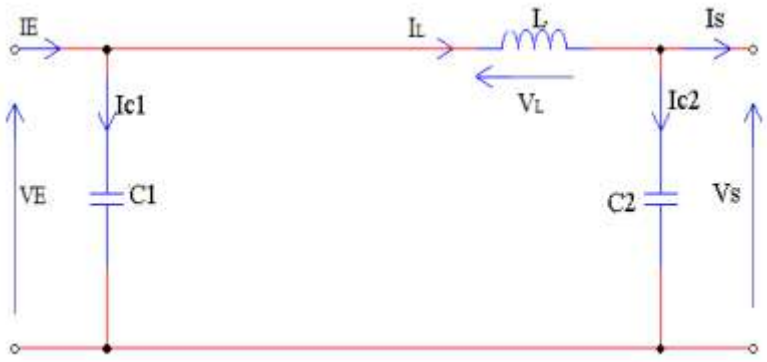


Figure (2.7.a) : Schéma équivalent d'un convertisseur Buck (K fermé et D1 bloquée

La tension aux bornes de l'inductance et les courants dans les condensateurs sont les suivants, en appliquant la loi de Kirchhoff sur le circuit de la figure (II.7.a) :

$$V_L(t) = L\frac{dI_L(t)}{dt} = V_E(t) - V_S(t) \qquad (II.8)$$

$$I_{C1}(t) = C_1\frac{dV_E(t)}{dt} = I_E(t) - V_S(t) \qquad (II.9)$$

$$I_{C2} = C_2\frac{dV_E(t)}{dt} = I_L(t) - I_S(t) \qquad (II.10)$$

La figure (II.7.b) montre le schéma du circuit équivalent d'un convertisseur dévolteur avec l'interrupteur K ouvert pendant t ϵ [DT, T], [20] [21].

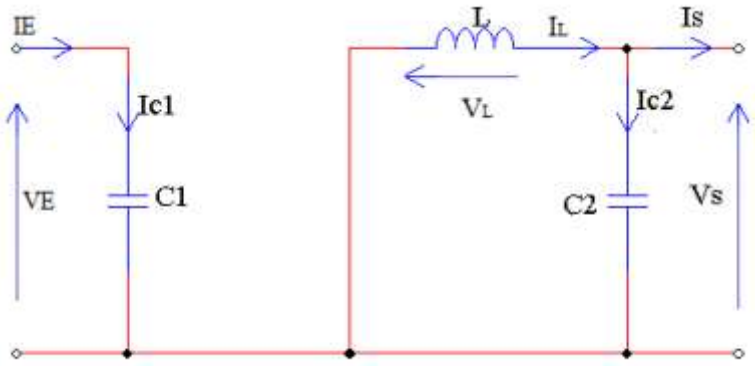


Figure (2.7.b) : Schéma équivalent d'un convertisseur Buck (K ouvert et D1 fermée)

La tension aux bornes de l'inductance et les courants dans les condensateurs sont les suivants, en appliquant la loi de Kirchhoff sur le circuit de la figure (II.7.b) :

$$V_L(t) = L\frac{dI_L}{dt} = -V_S(t) \qquad (II.11)$$

$$I_{C1}(t) = C_1\frac{dV_E(t)}{dt} = I_E(t) \qquad (II.12)$$

$$I_{C2}(t) = L\frac{dI_L(t)}{dt} = I_L(t) - I_E(t) \qquad (II.13)$$

II.3.5 Hacheur buck-boost :

Le convertisseur Buck-Boost, appelé aussi dévolteur-survolteur, représenté sur la figure (II.8) l'hacheur Buck-boost est un convertisseur indirect DC-DC à stockage inductif. La source d'entrée est de type tension continue (filtrage capacitif en parallèle avec une source de tension) et la charge de sortie continue de type source de tension (condensateur en parallèle avec la charge résistive). L'interrupteur K peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage) [23].

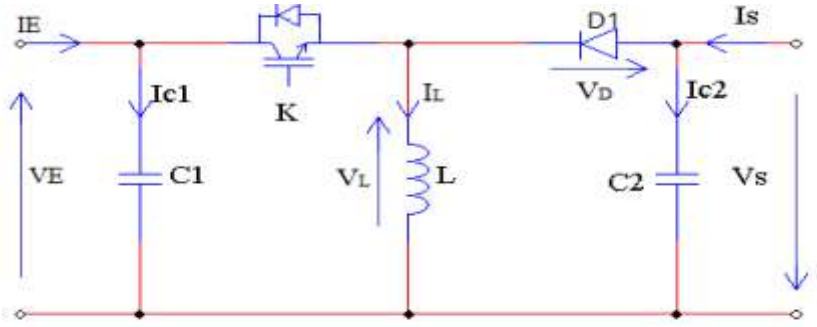


Figure (2.8) : Schéma électrique d'un convertisseur Buck-Boost

II.3.5.1 L'étude et principe de fonctionnement :

Cette structure de convertisseur permet d'obtenir des tensions négatives à partir de tension positive. Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée DT, le courant augmente linéairement. La tension est égale à Ve. À l'ouverture de K, la diode prend le relais et la tension VL est égale à – Vs. Par définition la tension moyenne aux bornes de l'inductance est nulle. Il en résulte que, [23] [24] :

$$\frac{V_S}{V_E} = \frac{1}{(1-D)}$$

Quand le rapport D>0.5 cyclique l'hacheur Buck-boost fonction comme un hacheur boost et si D<0.5 le rapport cyclique l'hacheur Buck-boost fonction comme un hacheur Buck. La commande de fermeture et ouverture de l'interrupteur K est réalisée par un signal de fréquence de découpage f. Pendant le temps de 0 à DT (D est le rapport cyclique), l'interrupteur K est fermé, l'inductance L emmagasine de l'énergie et le condensateur C2 restitue son énergie au récepteur. La diode D1 est bloquée. La figure (II.8.a) a montré le schéma du circuit équivalent d'un convertisseur Buck-Boost avec l'interrupteur K fermé pendant t ϵ [0, DT]. [23] [24] :

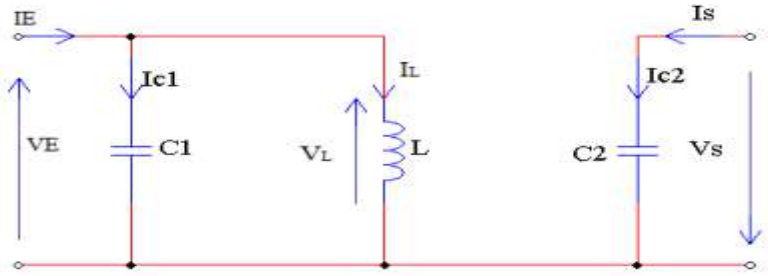


Figure (2.8.a) : Schéma équivalent d'un convertisseur Buck-Boost (K fermé et D1 bloquée)

La tension aux bornes de l'inductance et les courants dans les condensateurs sont les suivants, en appliquant la loi de Kirchhoff sur le circuit de la figure (II.8.a) [16] :

$$V_L(t) = L\frac{dI_L}{dt} = V_E(t) \qquad (II.14)$$

$$I_{C1}(t) = C_1\frac{dV_E(t)}{dt} = I_E(t) - I_L(t) \qquad (II.15)$$

$$I_{C2} = C_2\frac{dV_S(t)}{dt} = -I_S(t) \qquad (II.16)$$

Tandis que, pendant la période le temps de DT à T (D est le rapport cyclique), l'interrupteur K est ouvert et l'inductance L restitue l'énergie emmagasinée, la diode est passante, le courant IL diminue donc la tension VL devient négative et par conséquence VS. La figure (II.8.b) montre le schéma du circuit équivalent d'un convertisseur Buck-Boost avec l'interrupteur K ouvert pendant t ϵ [DT, T]. [21] [23]

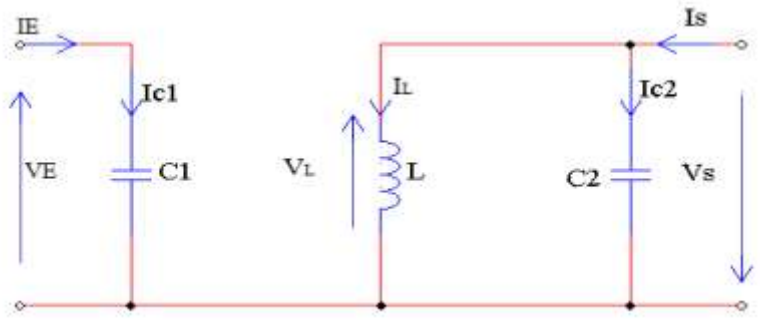


Figure (2.8.b) : Schéma équivalent d'un convertisseur Buck-Boost (K ouvert et D1 passante)

La tension aux bornes de l'inductance et les courants dans les condensateurs sont les suivants, en appliquant la loi de Kirchhoff sur le circuit de la figure (II.8.b) :

$$V_L(t) = L\frac{dL_L(t)}{dt} = V_S(t) \qquad (II.17)$$

$$I_{C1}(t) = C_1\frac{dV_E(t)}{dt} = I_E(t) \qquad (II.18)$$

$$I_{C2}(t) = C_2\frac{dV_S(t)}{dt} = I_L(t) - I_S(t) \qquad (II.19)$$

II.4 La commande MPPT :

II.4.1 Définition :

La poursuite du point maximum de la puissance (MPPT) est une partie essentielle dans les systèmes photovoltaïques. Plusieurs techniques sont développées depuis 1968 date de publication de la première loi de commande de ce type adaptées à une source d'énergie renouvelable de type PV. Ces techniques se différent entre eux par leur complexité, nombre de capteurs requis, la vitesse de convergence, coût, rendement et domaine d'application. [25]

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, quels que soient les conditions météorologiques (température et

l'éclairement), la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum (Vmpp, Impp). [25]

L'adaptation d'impédance est souvent sous forme d'un convertisseur DC – DC comme représenté sur la figure (II.9).

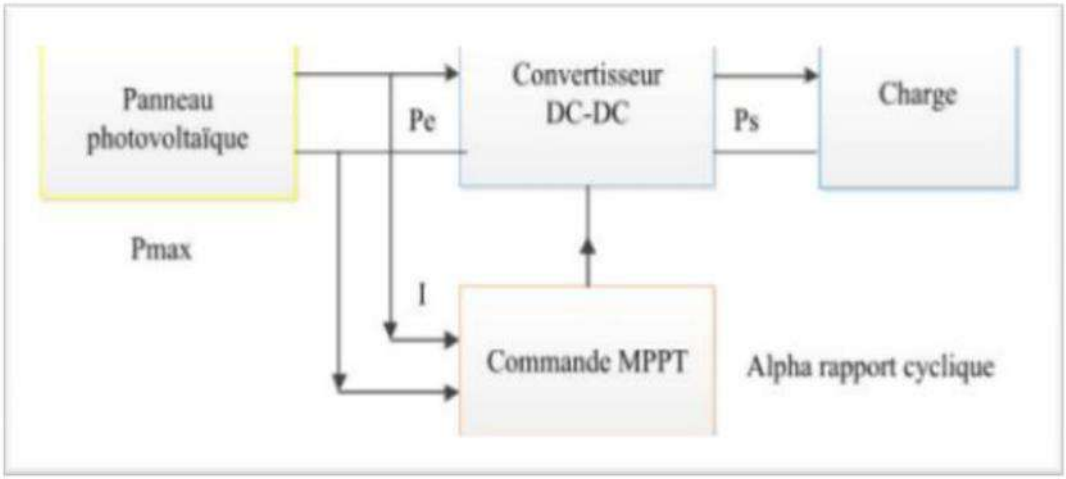


Figure (2.9) : Système photovoltaïque avec une commande MPPT

II.4.2 Le principe de fonctionnement de MPPT d'un générateur PV :

Un MPPT, de l'anglais « Maximum Power Point Tracking » est un principe permettant de suivre, comme son nom l'indique, le point de puissance maximale d'un générateur électrique non linéaire. En conséquence, pour un même éclairement, la puissance délivrée sera différente selon la charge. Un contrôleur MPPT permet donc de piloter le convertisseur statique reliant la charge (une batterie par exemple) et le panneau photovoltaïque de manière à fournir en permanence le maximum de puissance à la charge chaque instant. La figure (II.10) représente la trajectoire du point de puissance maximale produite par le générateur. [20].

Le principe de cette commande est d'effectuer une recherche du point de puissance maximal (PPM), en agissant sur le rapport cyclique D du convertisseur DC-DC, tout en assurant une parfaite adaptation entre le générateur PV et sa charge de façon à transférer le maximum de puissance délivrée par ce générateur PV. La puissance extraite du module est calculée à partir des mesures de courant Ipv et de tension Vpv du panneau et la multiplication de ces deux grandeurs.

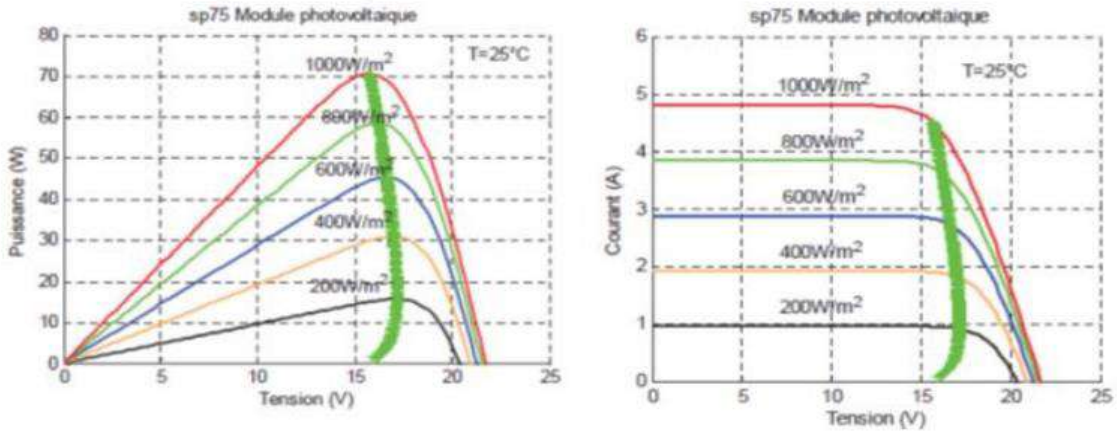


Figure (2.10) : La caractéristique I-V, P-V et la trajectoire de PPM [20].

La figure (II.11) présente le schéma de principe d'un module photovoltaïque doté d'un étage d'adaptation DC-DC entre le GPV et la charge de sortie. Cette structure correspond à un système plus communément appelé système autonome. Il permet le plus souvent d'alimenter une batterie servant de stocke l'énergie pour une charge qui ne supporte pas les fluctuations de tension. Cet étage d'adaptation dispose d'une commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) qui lui permet de rechercher le PPM que peut fournir un panneau solaire photovoltaïque. L'algorithme de recherche MPPT peut être plus ou moins complexe en fonction du type d'implantation choisi et des performances recherchées. Cependant au final, tous les algorithmes performants doivent jouer sur la variation du rapport cyclique du convertisseur dd puissance associate [20].

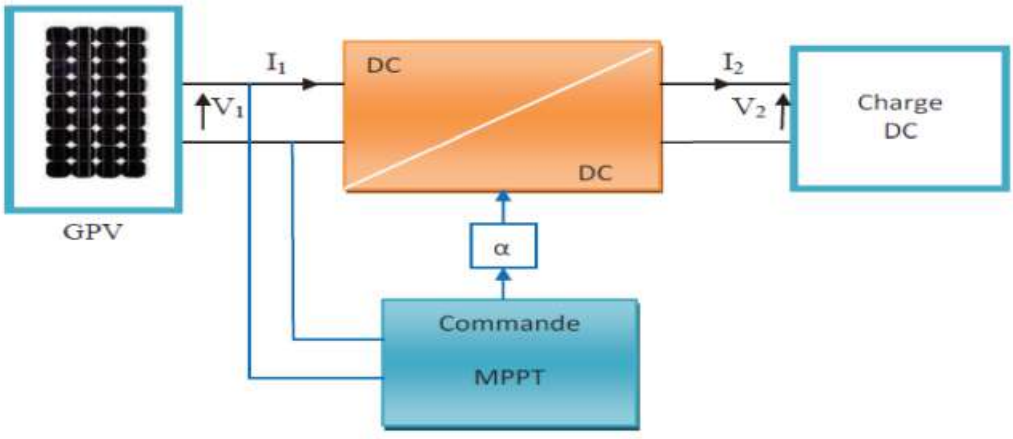


Figure (2.11) : Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque [20].

Pour assurer le fonctionnement d'un GPV a son point de puissance maximale (PPM), des contrôleurs MPPT sont utilisés, ces contrôleurs sont destinés à minimiser l'erreur entre la Puissance de fonctionnement et puissance maximale de référence variable en fonction des Conditions climatiques baser sur des méthodes optimales. [20].

II.4.3 Gestion de la MPPT :

La figure (II.12) illustre trois cas de perturbations. Suivant le type de perturbation, le point de fonctionnement bascule du point de puissance maximal PPM1 vers un nouveau point P1 de fonctionnement plus ou moins éloigné de l'optimum. Dans ce cas est pour une variation d'ensoleillement il suffit de réajuster la valeur du rapport cyclique pour converger vers le nouveau point de puissance maximum PPM2. Dans le cas b pour une variation de charge on peut également constater une modification du point de fonctionnement qui peut retrouver une nouvelle position optimale grâce à l'action d'une commande. Enfin dans le dernier cas c de variation de point de fonctionnement peut se produire lié aux variations de température de fonctionnement du GPV. Bien qu'il faut également agir au niveau de la commande [20].

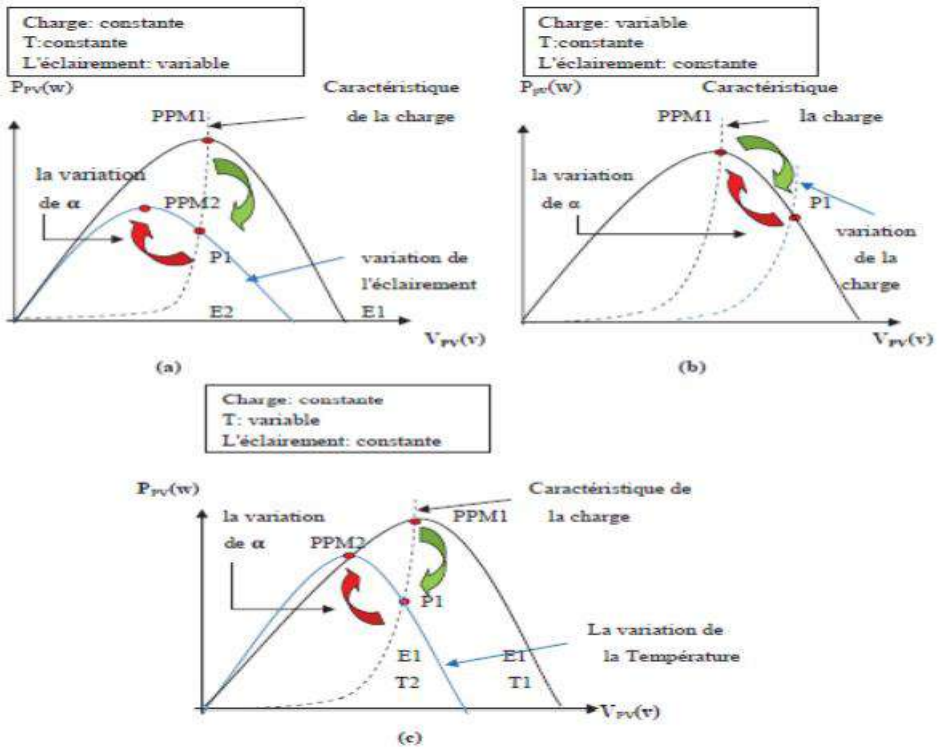


Figure (2.12) : Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximale a) suite à une variation d'éclairement, b) suite à une variation de charge, c) suite à une variation de température [20].

II.4.4 Les 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 [19] :

- 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. [19]

II.4.5 La méthode P&O :

II.4.5.1 Définition :

La méthode perturbation et observation « P&O », est la plus répandue dans le milieu industriel, car son algorithme est facile à implémenter. Ce processus fonctionne par une perturbation du système en augmentant ou en diminuant la tension de fonctionnement du module et observer son effet sur la puissance de sortie de la rangée. [22].

II.4.5.2 Le fonctionnement de l'algorithme P&O :

L'algorithme « P&O » est très utilisé dans la recherche du MPPT car il est plus simple et exige moins de paramètres à mesurer. Son fonctionnement est basé sur la perturbation du système par l'augmentation ou la diminution (incrémentation ou décrémentation) du courant/tension ou en agissant directement sur le convertisseur (DC-DC), et l'observation de l'impact de cette perturbation sur la puissance de sortie du module photovoltaïque, figure (II.13) [24].

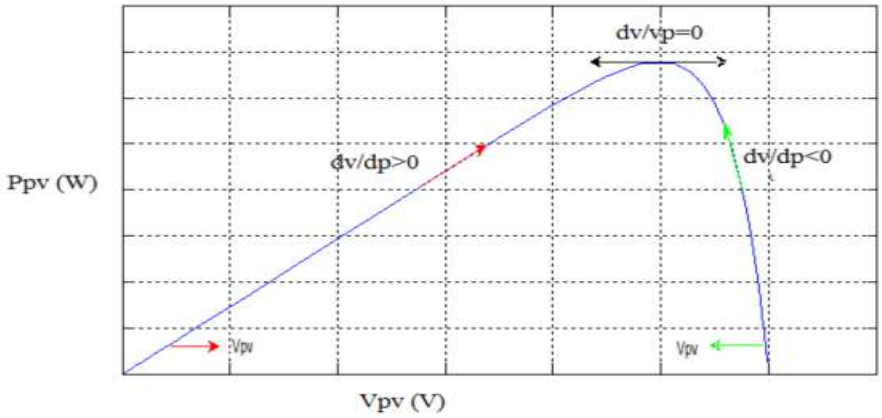


Figure (2.13) : Caractéristiques de fonctionnement de l'Algorithme P&O. [24]

Cette courbe montre que c'est la puissance augmente la perturbation va continuer dans le même sens sinon la perturbation sera inversée : [24]

dP> 0 perturbation dans le même sens.

dP< 0 perturbation dans le sens inverse.

La figure (II.14) montre l'organigramme de l'algorithme de la méthode 'P&O', tel qu'il doit être implémenté dans le microprocesseur de contrôle. D'après la figure (II.14), la tension et le courant V et I, sont mesurés pour calculer la puissance de sortie courante P (k) de la rangée. Cette valeur P (k) est comparée à la valeur P (k-1) de la dernière mesure. Si la puissance de sortie a augmenté, la perturbation continuera dans la même direction. Si la puissance a diminué depuis la dernière mesure, la perturbation de la tension de sortie sera renversée en direction opposée du dernier cycle. Avec cet algorithme, la tension de fonctionnement V est perturbée à chaque cycle du MPPT. Dès que le MPP sera atteint, V oscillera autour de la tension idéale Vmp de fonctionnement. Ceci cause une perte de puissance qui dépend de la largeur dupas d'une perturbation simple Cp. [22].

- Si Cp est grande, l'algorithme du MPPT répondra rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement, mais les pertes seront accrues dans les conditions stables ou légèrement changeantes.
- Si Cp est très petite, les pertes dans les conditions stables ou lentement changeantes Seront réduites, mais le système ne pourra plus suivre les changements rapides de la température ou de l'insolation. La valeur Cp idéale dépend du système. Elle doit être déterminée expérimentalement, [22].

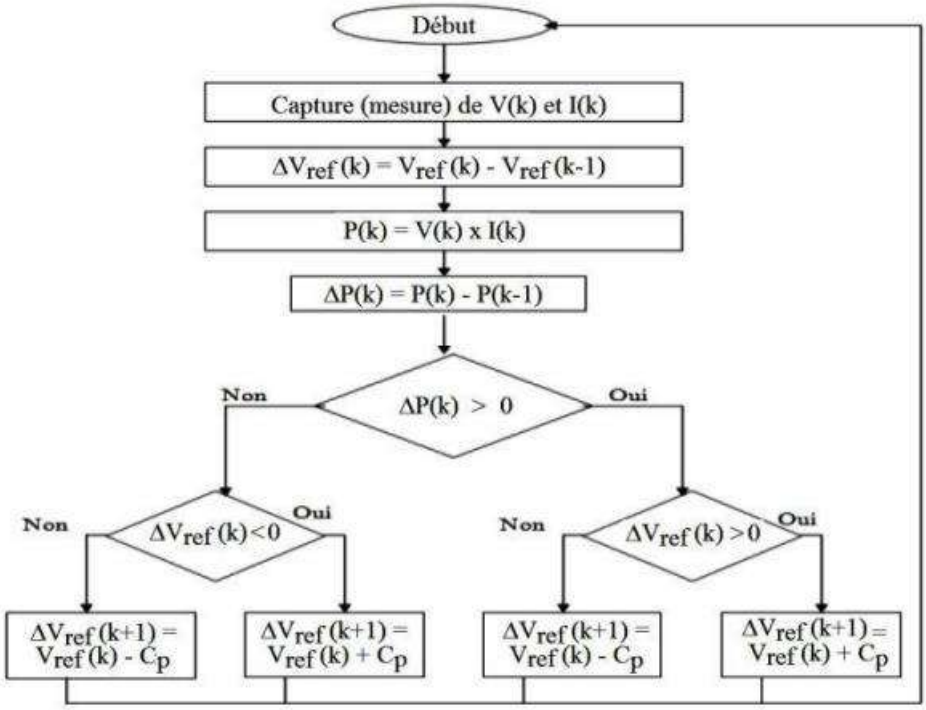


Figure (2.14) : Organigramme de l'algorithme MPPT de la perturbation & observation [22]

II.5 Les convertisseur DC/AC :

II.5.1 Définition :

C'est un convertisseur statique assurant la conversion d'énergie électrique de la forme continue (DC) à celle alternative (AC).

Cette conversion d'énergie est en fait satisfaite au moyen d'un dispositif de commande (Semi-conducteurs), permettant d'obtenir aux bornes du récepteur une tension alternative réglable en fréquence et en valeur efficace, en utilisant ainsi une séquence adéquate de commande. Fig. II.15 représente schéma de principe de l'onduleur. [27]

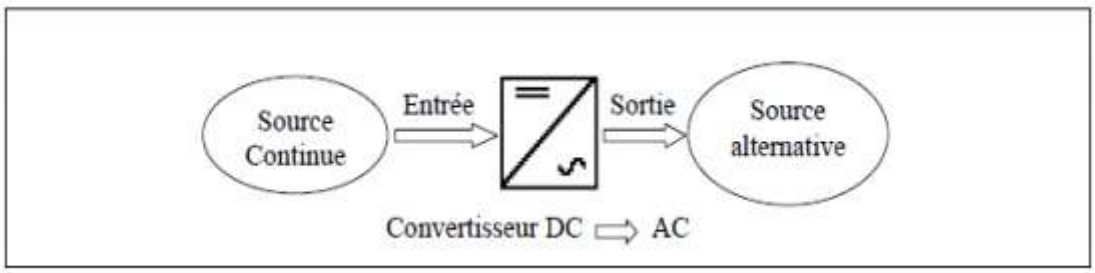


Figure (2.15) : Schéma de principe de la conversion Continu-Alternative (DC- AC).

II.5.2 Les Type de l'onduleur :

Un onduleur est un dispositif électronique assurant la conversion statique d'une tension/courant continu en tension /courant alternatif. Il est dit autonome s'il assure de lui-même sa fréquence et sa forme d'onde. Deux types d'onduleurs sont donc utilisés pour assurer une telle conversion [27].

- Onduleur Monophasé.
- Onduleur Triphasé.

II.5.2.1 Onduleur Monophasé

Ce type d'onduleur délivrant en sa sortie une tension alternative monophasée, est généralement destinée aux alimentations de secours. Deux classes d'onduleurs monophasés sont à distinguer, suivant leur topologie :

- Onduleur monophasé en demi-point.
- Onduleur monophasé en pont (Pont H) figure (II.16). [27].

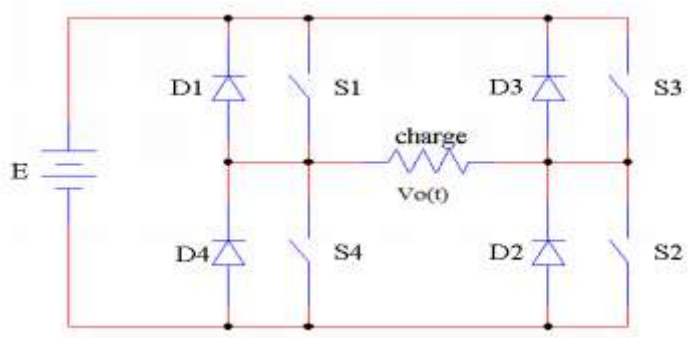


Figure (2.16) : Schéma fonctionnel d'un onduleur monophasé en pont H

II.5.2.2 Onduleur triphasé :

Ce type d'onduleur est généralement recommandé pour des applications de grande puissance. La structure de tel convertisseur se fait par l'association, en parallèle, de trois onduleurs monophasés en demi pont (ou en pont) donnant trois tensions de sortie déphasées de 120° degrés, l'une par rapport à l'autre. [27].

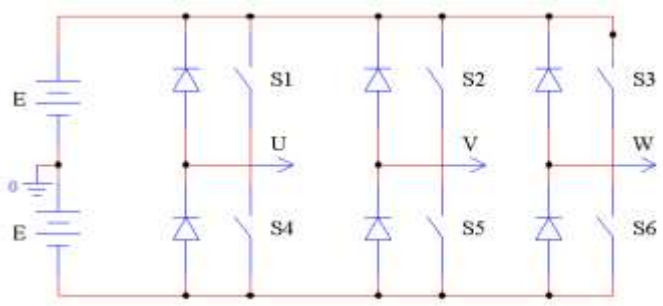


Figure (2.17) : Schéma de Principe d'un Onduleur Triphasé En Pont

La figure (II.17) illustre la topologie d'un onduleur triphasé à six interrupteurs de puissance. Le décalage entre les signaux de commande est de 60°, [28]

II.5.3 Onduleur on pont (H) avec un convertisseur boost :

II.5.3.1 Schéma de Principe:

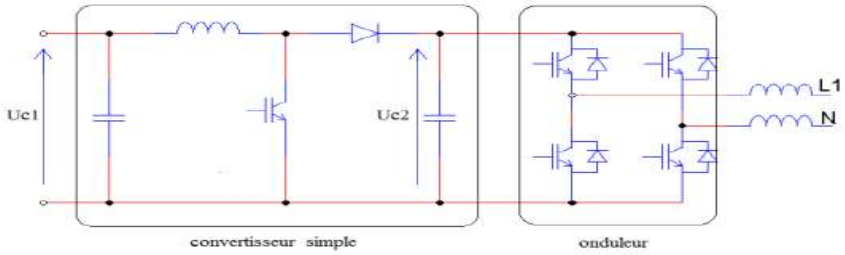


Figure (2.18) : onduleur on pont H avec un convertisseur boost

II.5.3.2 Principe de fonctionnement :

Les modules PV sont raccordés en entrée de l'onduleur via un filtre qui élimine les interférences électromagnétiques (filtre EMI - non représenté sur le schéma) Un hacheur survolteur (convertisseur Boost) amplifie la tension d'entrée. Un pont de IGBT convertit ensuite le courant continu (DC) fourni par le convertisseur DC/DC en courant alternatif (AC) en utilisant la technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI ou PWM en anglais) dont le fondamental est à la fréquence de 50 Hz. Un filtre élimine les harmoniques à hautes fréquences pour obtenir une onde sinusoïdale. [22]

II.5.4 Stratégie de commande :

L'objectif de la commande est de générer les ordres d'ouverture et de fermeture des interrupteurs de sorte que la tension créée par l'onduleur soit la plus proche de la tension de référence. Deux méthodes de commande peuvent être utilisées : [29]

- Contrôle indirect par MLI.

- Contrôle direct par hystérésis.

II.5.4.1 Contrôle indirect par MLI :

L'objectif de ce type de contrôle est d'obtenir une tension v en sortie de l'onduleur dont le fondamental est le plus proche possible de sa référence vréf. Cette tension de référence est la somme de la tension de référence aux bornes de l'inductance (vL réf) et de la f.e.m (compensation). L'identification de vL réf nécessite la présence d'un correcteur. Une linéarisation peut être appliquée. Elle consiste à linéariser la tension de référence en la divisant par la tension d'entrée (U/2). La structure de ce contrôle est fournie figure (II.19) pour le cas simple de l'onduleur monophasé deux niveaux. La nature des correcteurs de cette figure peut être de type linéaire : PI, IP, PID ou résonante, [30].

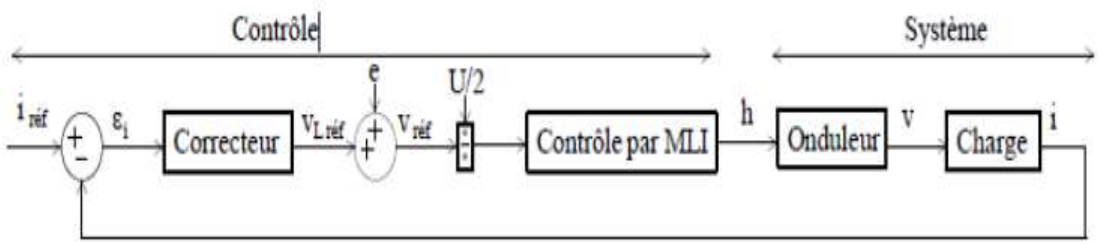


Figure (2.19) : Contrôle indirect par MLI d'un bras d'onduleur [30]

Deux méthodes connues pour construire la tension v et déterminer les instants de commutation du bras sont présentées ici.

- La première consiste à pré calculer le découpage d'une période électrique, d'où le nom de MLI calculée

- La seconde, à les fixer en temps réel et est qualifiée de MLI intersective ou vectorielle

II.5.4.1.a MLI calculée :

Pour calculer les angles de commutation d'un interrupteur, la décomposition du signal de sortie en série de Fourier est utilisée comme outil analytique pour trouver les instants de commutation. Les instants de commutations sont définis sur la figure (II.20) au travers des angles de commutation αk. Les angles suivants α1, soit α2, α3, et α4 de cette figure, se déduisent par symétrie par rapport à π/2 compte tenu de la symétrie de fonctionnement d'un onduleur en régime établi, [30].

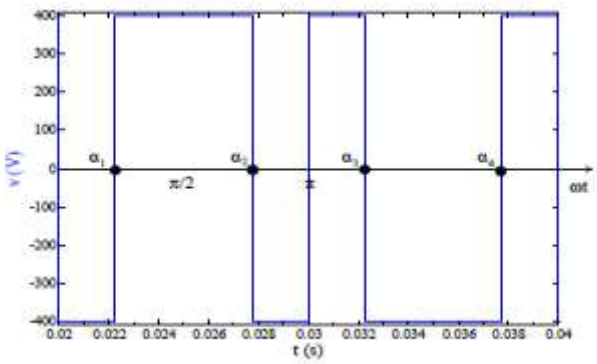


Figure (2.20) : angles de commutation (α1, α2, α3, α4) [30].

II.5.4.1.b MLI intersective :

L'objectif d'avoir le fondamental de la tension v de sortie le plus proche possible de la référence Vréf est réalisable en appliquant sur la charge une tension découpée. Le contrôle indirect par MLI intersective classique consiste à obtenir après modulation une tension en sortie égale en valeur moyenne sur une période de découpage (Td) à sa référence, équation (II.2) :

$$< V > Td = V_{réfereance}$$

Cette équation est illustrée sur une période de découpage figure (II.21) avec la fonction de commande h égale à 1 si la tension de référence est supérieure à la porteuse ou sinon -1.

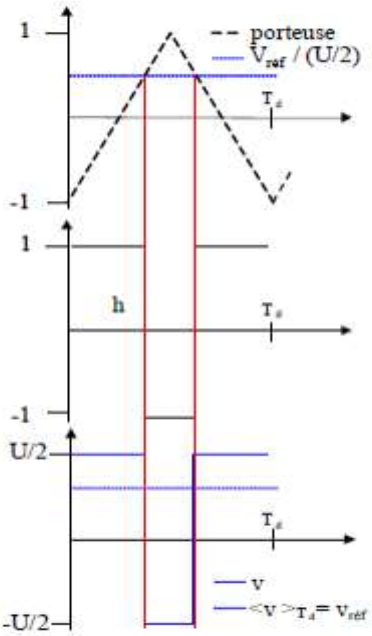


Figure (2.21) : Contrôle indirect par MLI intersective classique sur une période Td [30].

Pour avoir une qualité du courant de sortie correcte et conserver une taille du filtre en sortie du convertisseur raisonnable, il faut un certain nombre de commutations par période du signal de référence, c'est à dire un nombre suffisant d'intersections entre la porteuse et la tension de référence. Autrement dit, la fréquence de découpage doit donc être bien supérieure à celle de la référence. Par conséquent, dans ces conditions, la tension de référence peut être considérée quasi-constante sur une période de découpage. Sur une période d'un signal de référence sinusoïdal, v apparait donc comme une succession de paliers de tension assimilables au niveau de son fondamental à une tension sinusoïdale, figure (II.22). Ce principe s'étend à toute forme de référence alternative, tant que les conditions fréquentielles sont respectées, [30].

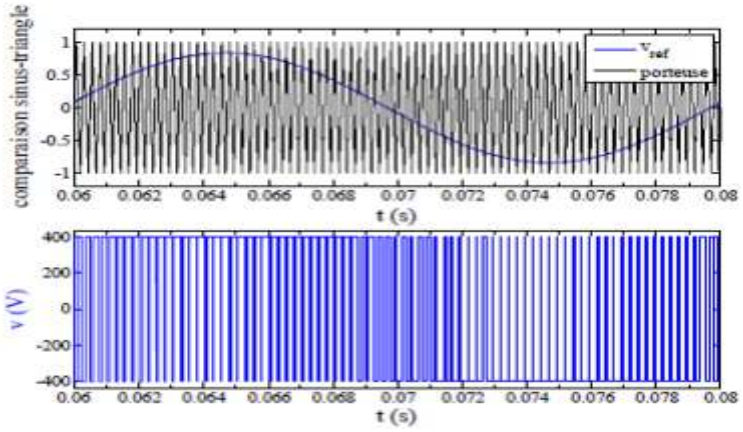


Figure (2.22) : Contrôle indirect par MLI intersective classique [30]

Le moyennage de la tension v correspond à la tension de référence Vréf. Le principe de cette modulation est schématisé figure (II.23) :

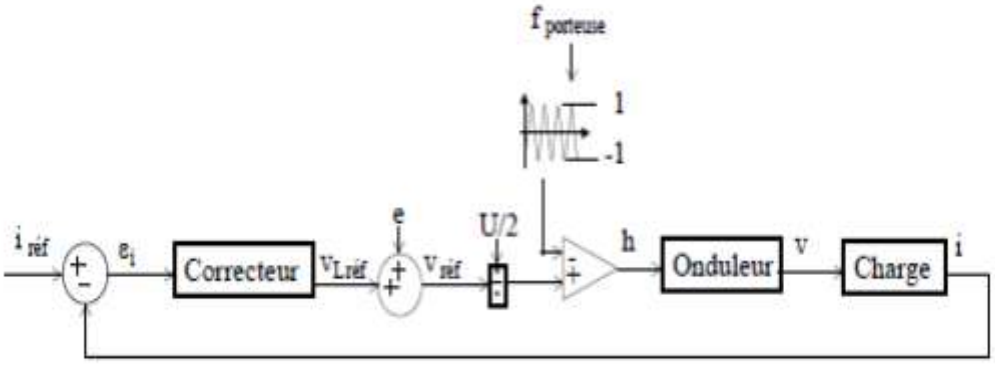


Figure (2.23) : Contrôle indirect par MLI d'un onduleur monophasé deux niveaux [30]

II.5.4.2 Contrôle direct par hystérésis :

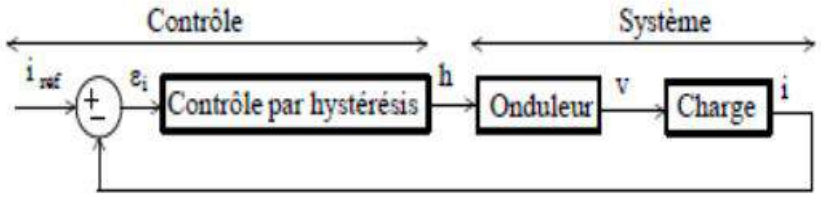


Figure (2.24) : Contrôle direct par hystérésis d'un bras d'onduleur [30]

L'objectif de cette commande est d'être capable, dès que i s'éloigne trop de iref, de le faire converger vers sa référence, autrement dit de faire converger l'erreur εi vers zéro. Pour préciser jusqu'à quelle valeur peut s'éloigner le courant de sa référence, une valeur est introduite (δ).si εi augment et atteint δ, i doit diminuer, et si εi atteint δ, i doit augmenter. Une commutation doit avoir lieu à l'instant où i franchit lune de ces bandes pour changer son sens de variation.

On parle alors de contrôle par hystérésis. Une bande centrée autour du courant de référence est donc créée, [30].

Le courant i d'un onduleur monophasé deux niveaux est régi par l'équation (II.20) différentielle du 1er ordre suivant :

$$v = ri + L\frac{di}{dt} + e \rightarrow i = \frac{v-e}{r}\left(1 - e^{-\frac{r}{L}t}\right) \; avec \; \tau = \frac{L}{r} \qquad (II.20)$$

Cette équation permet de déduire l'évolution du courant et par conséquent l'évolution de l'erreur entre deux commutations et de comprendre les règles à l'origine de cette stratégie de commande.

L'objectif d'un contrôle direct par hystérésis est de maitriser l'évolution du courant i. Ce contrôle doit être capable d'assurer le suivi de la référence du courant iref. Compte tenu de l'équation du courant (II.23), pour contrôler ce courant en garantissant sa convergence vers sa référence, il faut impérativement savoir maitriser la pente du courant selon les conditions de référence imposées. Ceci revient à savoir contrôler la dérivée de l'erreur du courant de phase εi. Ainsi la pente du courant réel doit toujours pouvoir être supérieure ou inférieure à la pente de la référence de courant selon la configuration de l'onduleur. Pour cela, il suffit d'être capable d'imposer une dérivée de l'erreur εi positive (ou négative) dès que cette erreur franchit sa bande supérieure (ou inférieure) équation (II.21).

$$\frac{d\varepsilon_i}{dt} = \frac{di_{ref}}{dt} - \frac{di}{dt} \qquad (II.21)$$

Or, savoir contrôler la pente du courant revient à savoir produire avec le convertisseur une tension suffisamment grande aux bornes de l'inductance équation (II.22) pour provoquer la croissance ou la décroissance nécessaire du courant et donc de l'erreur de courant à tout instant. Dans nos conditions de fonctionnement et en régime sinusoïdal :

$$i_{ref} = I_{max}\sin(wt) \rightarrow L\frac{di_{ref}}{dt} = wI_{max}\cos(t) = v - e \qquad (II.22)$$

II.6 avantages et inconvénients d'un onduleur multi niveau :

Les avantages d'un onduleur à N niveaux par rapport à la structure standard sont les suivants:

- La DTH (distorsion totale des harmoniques) est diminué et, si le nombre de niveaux est assez élevé il n'y a pas besoin de filtres.

- Pour la même tenue en tension, le stresse DV/DT sur les interrupteurs principaux est diminué.

- La tenue en tension est plus élevée que pour la structure standard, ce qui peut résulter en une élimination du transformateur élévateur entre la sortie de l'onduleur et le réseau.

- L'augmentation de tenue en tension peut être effectuée en augmentant le nombre de niveaux et, on peut éviter la connexion en série d'interrupteurs du même niveau.

- Chaque interrupteur commute deux fois par cycle, ce qui diminue les pertes considérablement.

L'inconvénient majeur des structures multi niveaux réside dans la complexité de la construction (le nombre de composantes est très élevé) ce qui résulte en une difficulté de contrôle (par exemple pour un onduleur a cinq niveaux, triphasé, il faut contrôler 12 interrupteurs). Le deuxième problème est le déséquilibre des tensions des condensateurs coté continu.

II.7 Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre les différents types des convertisseurs DC/DC et DC/AC reliant les générateurs PV avec les charges. Les premiers convertisseurs on a étudié les différents types des hacheurs utilise dans les systèmes photovoltaïques, aussi la commande MPPT qui pilot le convertisseur pour fournie le GPV la puissance maximale. Pour les seconds

convertisseurs, on a donné les différents types des onduleurs utilisés dans les systèmes PV et la stratégie de commande pour le raccordement aux réseaux électriques.

La modélisation et simulation du système (générateur photovoltaïque, onduleur) qu'on va présenter dans le chapitre suivant.

Chapitre III : Modélisation et simulation d’un système photovoltaïque

III. Introduction :

Dans ce chapitre, nous avons simulé sous l'environnement MATLAB /SIMULINK tous les équipements présenterons du système énergétique photovoltaïque PV connecté au réseau de distribution, on espère toujours travailler au voisinage du point de puissance maximale MPP. Nous allons aussi présenter un système de gestion, qui a pour but de contrôler l'énergie et la puissance produite par les panneaux photovoltaïques.

Pour ce faire, nous simulons d'abord une variété de convertisseurs DC-DC et DC-AC pour déterminer celui qui produit le plus d'énergie, insérons les deux convertisseurs dans le système PV, puis simulons les différentes parties du système solaire connecté au réseau centrale électrique, et enfin simuler l'ensemble du système PV connecté au réseau à l'aide de l'algorithme MPPT. Nous donnons les résultats de la simulation de la chaîne du système PV. Avec un pas de calcul de 10-4 secondes, toutes les activités de simulation sont réalisées dans MATLAB/SIMULINK.

III.2. Vision sur le réseau électrique :

III.2.1. Niveaux de tensions des réseaux :

Les réseaux électriques sont hiérarchisés : D'une façon générale, la plupart des pays mettent en œuvre :

- Un réseau de transport THT 220 …….. 800 KV.
- Un réseau de répartition HTB 60 ……...170 KV.
- Un réseau de distribution HTA 1 …….. 50 KV.
- Un réseau de livraison de l'abonné BTA 400/230 V.

Cette hiérarchie c'est-à-dire, les niveaux de tensions utilisés varient considérablement d'un pays à l'autre en fonction des paramètres liés à l'histoire électrotechnique du pays, ses ressources énergétiques, sa surface et finalement des critères technico-économiques [31].

III.2.2. Les postes électriques :

Il existe plusieurs types de postes électriques :

- Postes de sortie de centrale.
- Postes d'interconnexion.

- Postes élévateurs.
- Postes de distribution [31].

III.2.3. Les lignes électriques :

Nous distinguons quatre types de lignes :

- Ligne de distribution à basse tension.
- Ligne de distribution à moyenne tension.
- Ligne de transport à haute tension.
- Ligne de transport à très haute tension [31].

III.3. Les centrales solaire ou photovoltaïque :

Une centrale solaire photovoltaïque est un dispositif technique de production d'électricité par des modules solaires photovoltaïques (PV) reliés entre eux (série et parallèle) et utilise des onduleurs pour être raccordée au réseau.

Les centrales solaires sont de plus en plus puissantes (plus de 100 MWc en 2012), contrairement aux systèmes solaires photovoltaïques autonomes destinés à l'alimentation en électricité de bâtiments ou d'installations isolées (autoconsommation) dont la puissance dépasse rarement 100 KWc [32]

III.3.1. Classements des centrales photovoltaïques connectées au réseau :

Selon leurs tailles les CPCR peuvent être classifiés de la façon suivante :

- Centrales de petite taille (Pw =1 à 10KW).
- Centrales de taille moyenne (Pw = 10 à 100 KW).
- Centrales de grandes tailles (Pw >= 500 KW)

III.3.2. Exemples des centrales photovoltaïques :

-Mini centrale photovoltaïque pilote connecté réseau de 2.28 KWc installée à l'URAER, Ghardaïa :

Cette centrale photovoltaïque pilote connectée au réseau, d'une puissance totale de 2.28 KWc, assure l'injection totale de l'énergie produite dans le réseau interne de l'URAER, depuis son inauguration le 14/10/2014.

Elle est constituée de 18 modules de silicium amorphe (couche mince), de 110 Wc chacun, montés en 9 branches de deux modules en séries, l'onduleur sunny boy SMA 3000 TL à deux entrées de 150 V, 15 A et une sortie monophasée sinusoïdale de 220 V 50Hz [34].

III.4. Système photovoltaïque raccordé au réseau :

Dans ce système, l'ensemble de l'installation est connectée au réseau de distribution après une adaptation des paramètres. L'énergie produite est soit consommée sur place par l'usager et le surplus est injecté sur le réseau, où bien injectée en totalité dans le réseau électrique sans limite. Ces dernières centrales peuvent être conçu avec ou sans stockage [36]

III.4.1. Eléments constitutifs d'une installation PV connecté au réseau :

Elle est constituée de trois éléments essentiels [37] :

- Les panneaux photovoltaïques
- Un compteur d'énergie (en fait, en général, deux compteurs dans le cas des installations décentralisées).
- Un onduleur synchrone qui transforme le courant pour qu'il soit compatible avec les caractéristiques du réseau. C'est "l'interface" entre l'installation et la compagnie d'électricité.
- Accessoires.

III.5. Modélisation et structuration d'un système PV raccordé au réseau

III.5.1. Structure d'un système photovoltaïque connecté au réseau

La figure (3.1) représente la configuration du système photovoltaïque raccordé au réseau électrique de distribution. Le générateur photovoltaïque est relié à un convertisseur DC/DC qui est associé à une capacité à son entré et qui assure le suivi du point de fonctionnement optimal (PPM). L'ensemble est connecté au réseau électrique par l'intermédiaire d'un convertisseur DC/AC (onduleur) commandé par une stratégie qui permet de synchroniser la source photovoltaïque avec le réseau.

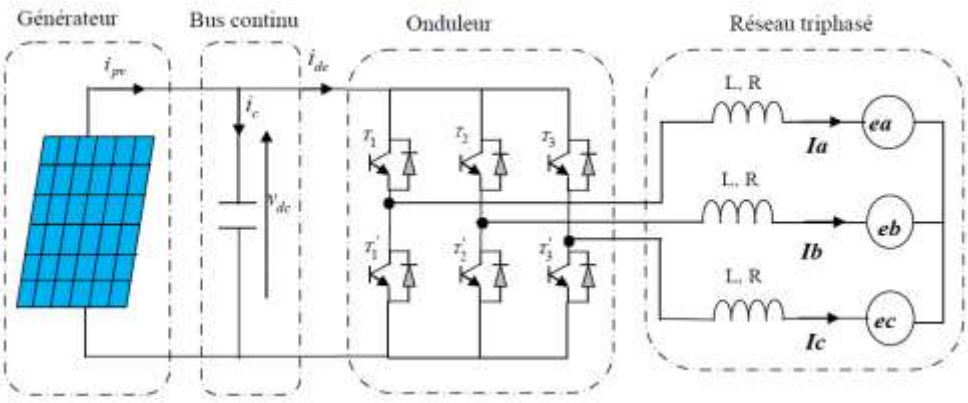


Figure (3.1) : Structure générale d'un système PV connecté au réseau.

III.5.2 Modélisation d'un générateur photovoltaïque :

Le générateur photovoltaïque est l'élément principal (source) d'un système de production d'énergie photovoltaïque. Un générateur photovoltaïque a un comportement équivalent à une source de courant shuntée par une diode.

Plusieurs modèles mathématiques sont développés pour présenter son comportement non linéaire. Dans ce chapitre, l'étude porte sur le modèle à 5 paramètres.

Le schéma (3.2) établit par Schrockley pour une seule cellule PV représente le modèle standard à une seule diode d'un générateur PV et généralisé à un module PV en le considérant comme un ensemble de cellules identiques branchées en série-parallèle

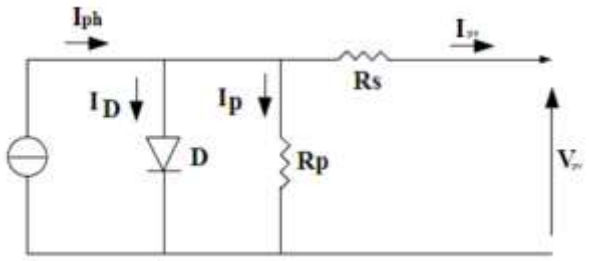


Figure (3.2): Circuit électrique d'une cellule

En appliquant la loi des nœuds de Kirchhoff, on déduit l'équation caractéristique suivante [37] et [38] :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_D - I_p \qquad (III.1)$$

Les courants Iph, ID et Ip sont exprimés par les relations :

$$I_{ph} = (I_{scn} + k_i(T_{mod} - T_r)\,)\,\frac{G}{G_0} \qquad (III.2)$$

$$T_{mod} = G * \frac{NOCT-20}{800} + T_r \qquad (III.3)$$

$$I_0 = I_{0C} * (\frac{T_{mod}}{T_r})^3 \left(exp^{\frac{q.E_q}{A.K}\left(\frac{1}{T_r}-\frac{1}{T_{mod}}\right)} \right) \qquad (III.4)$$

$$I_D = I_0 \left[exp^{\frac{V}{N_S M_S}+(R_S*I)*\left(\frac{q}{A+K+T_{mod}}\right)-1} \right] \qquad (III.5)$$

$$I_p = \frac{V}{N_S * M_S} + \frac{R_S I}{R_p} \qquad (III.6)$$

En remplaçant les équations (1.2), (1.5) et (1.6) dans l'équation (1.1), on obtient :

$$I_{pv} = (I_{scn} + K_i(T_{mod}\text{-}T_r))\,\frac{G}{G_0} - I_s \left[exp^{\frac{V}{N_S - M_S}+(R_S I)\left(\frac{q}{AKT_{mod}}\right)-1} \right] - \left(\frac{V}{N_S M_S} + \frac{R_S I}{R_p}\right) \qquad (III.7)$$

III.5.3.Simulation d'un générateur Photovoltaïque :

Pour simuler en vue d'analyser et d'interpréter le fonctionnement d'un générateur photovoltaïque, on a programmé l'équation du modèle avec Matlab Simulink. On obtient sur la base du module mathématique de la cellule photovoltaïque à cinq (5) paramètres, le schéma bloc Simulink représente dans la figure (3.3).

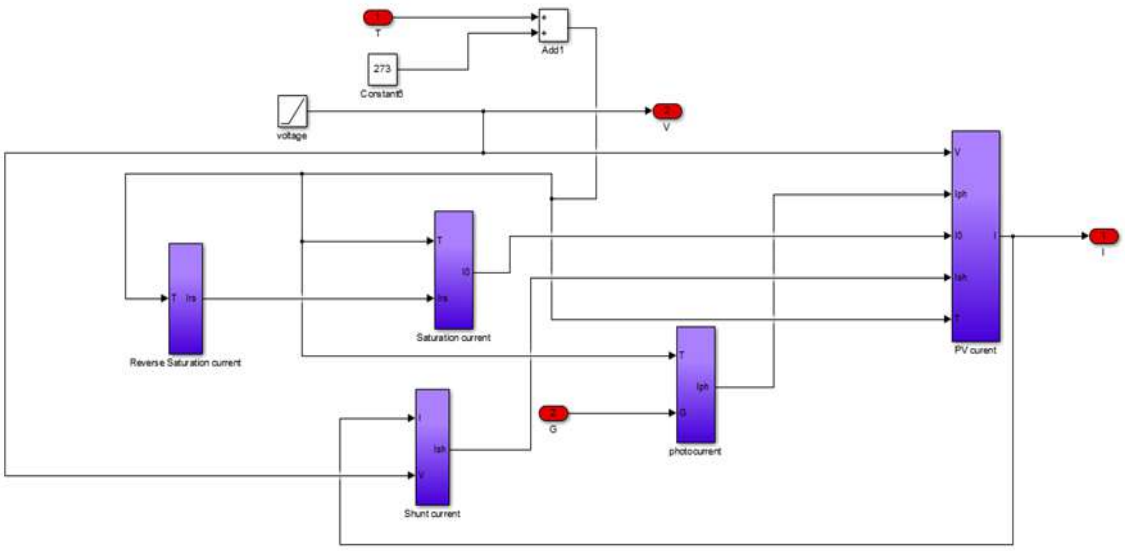


Figure (3.3) : Modèle Sim Power d'un générateur photovoltaïque

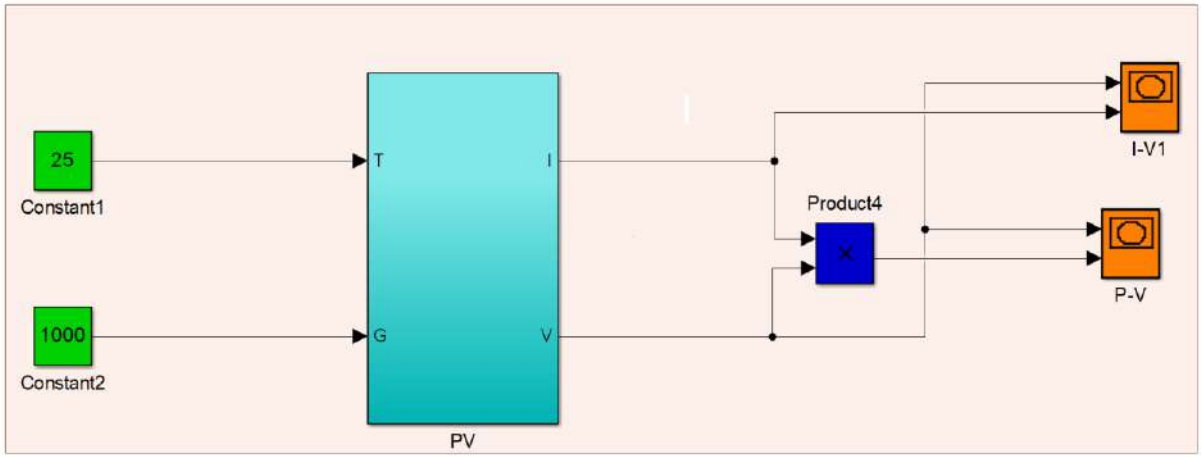


Figure (3.4) : Modèle Simulink d'un générateur photovoltaïque

Les caractéristiques utilisées pour le module PV sont données par le Tableau 1 :

P_{max}	213.15 W
I_{max}	7.35 A
V_{max}	29 V
V_{mod}	24 V
V_{oc}	36.3 V
I_{sc}	7.84 A
K_v	-360.99 mV/℃
K_i	10.2 mA/℃
$Ncell$	60
N_s	10
N_p	47

Tableau 1 : Caractéristique du module PV a 25°C et 1000W/m

Modélisation du panneau solaire sous l'environnement Matlab/ Simulink :

Le modèle donne la possibilité de connaitre le comportement du module photovoltaïque pour différents valeurs d'irradiation G

Les courbes de la figure (3.5) ont été tracées pour quatre valeurs différentes de G avec une température constance de 25°C : 250W/m2, 500W/m2, 750W/m2 et 1000W/m2.

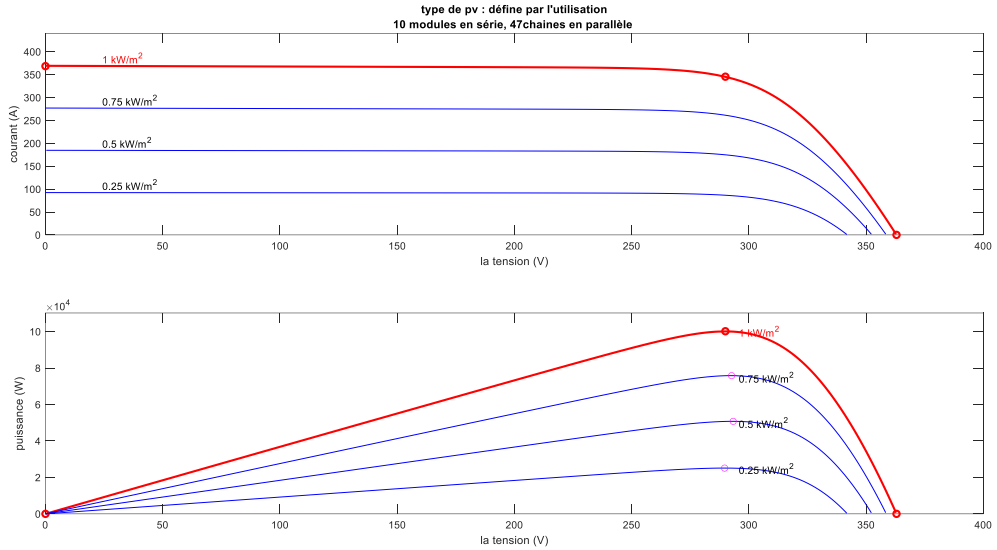


Figure (3.5) : Influence de l'éclairement sur les Caractéristiques I(V) et P(V) à Tref= 25°C.

Les courbes de la figure (3.6) ont été tracées pour quatre valeurs différentes de G avec une irradiation constance de 1000 (W/m2) : 25°C, 50°C, 75°C et 100°C.

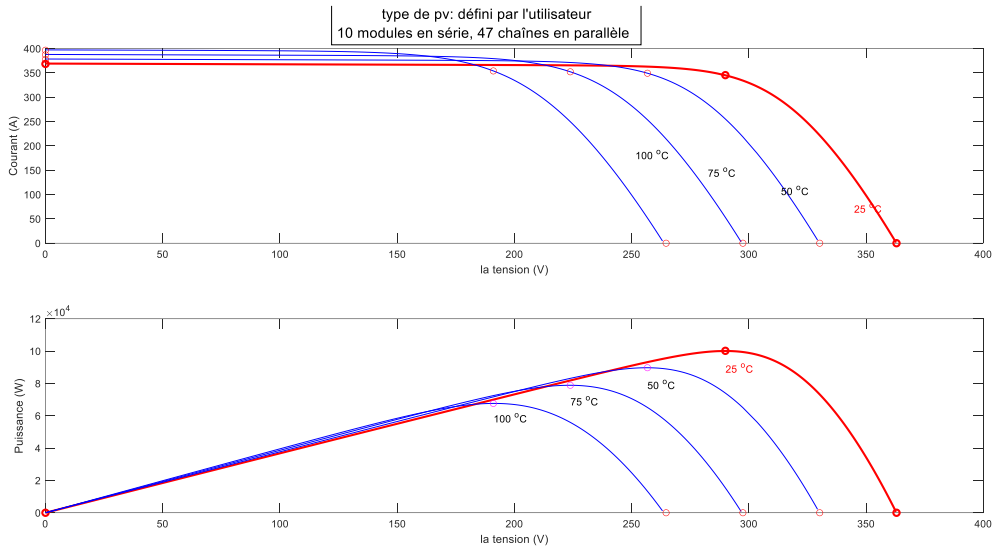


Figure (3.6) : Influence de la température sur les Caractéristiques I(V) et P(V) à irradiations =1000 (W/m2)

A partir des courbes précédentes on constate que le courant produit par la cellule Iph et la puissance est pratiquement proportionnelle à l'éclairement et la température solaire G.

Un panneau solaire donne des caractéristiques I(V) et P(V) présentées sur la figure 5 et 6, et ces courbes mettent en évidence un point où la puissance absorbée par la charge est

maximale, ce point est appelé point de puissance maximale, PPM. Cette puissance se dégrade en fonction de l'ensoleillement et la température. La charge impose également sa propre caractéristique qui est en général différente du PPM.

III.5.4.Modélisation du convertisseur boost :

Le convertisseur boost est également connu sous le nom de convertisseur step-up. Il est généralement utilisé dans la conversion d'une tension d'entrée basse en une tension de sortie haute [39]-[40].

Il compose d'une source de tension d'entrée continue VE, d'une inductance L, d'un interrupteur T, d'une diode, et deux condensateurs C1 et C2.

La Figure (3.7) montre le schéma électrique du convertisseur boost.

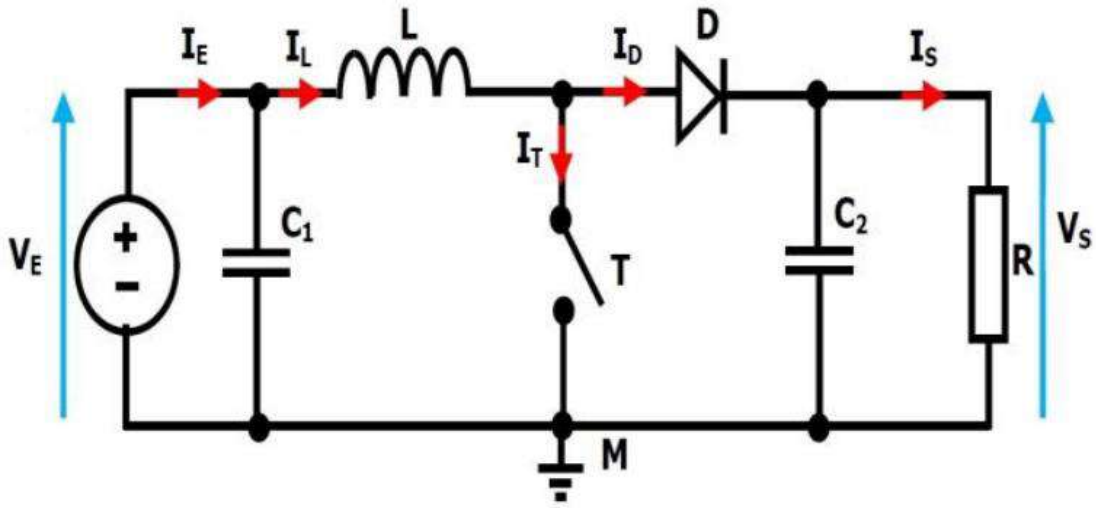


Figure (3.7). Schéma électrique du convertisseur boost.

Conception d'un convertisseur boost :

$$L_{limite} = \frac{(1-D)^2.D.V_s^2}{2.f_{switch}.P} \qquad (III.8)$$

$$D = 1 - \frac{V_{sortie}}{V_{entrée}} \qquad (III.9)$$

$$C_{min} = \frac{D.P}{V_s^2.\%_{ondulation}.f_{switch}} \qquad (III.10)$$

Inductance de filtre pour onduleur L_f:

$$L_f = \frac{0{,}1U^2}{2\pi f P_a} \qquad (III.11)$$

La relation entre la tension d'entrée VE et de sortie VS du convertisseur est donnée par l'équation (12) .

$$Vs = \frac{VE}{1-D} \quad \text{(III.12)}$$

Les équations (8) et (9) donnent respectivement l'expression de la capacité et de l'inductance du filtre.

$$C = \frac{DVo}{fsR\Delta V} \quad \text{(III.13)}$$

$$L = \frac{VaD}{fs\Delta I} \quad \text{(III.14)}$$

Les paramètres de conception d'un hacheur boost sont enregistrés dans le tableau 2 [40].

Paramètres	Symbole	La valeur
fréquence de commutation	F	10kHz
Inductance	L	1.45e-3H
Capacité d'entrée	C1	1000e-6F
Capacité de sortie	C2	3227e-6F
Résistance	R	1e-3Ω

Tableau 2 : paramètres de fonctionnement du convertisseur survolteur

Résultats de simulation :

Ces résultats montrent la tension et le courant d'hacheur boost. le hacheur boost effectue correctement son rôle.

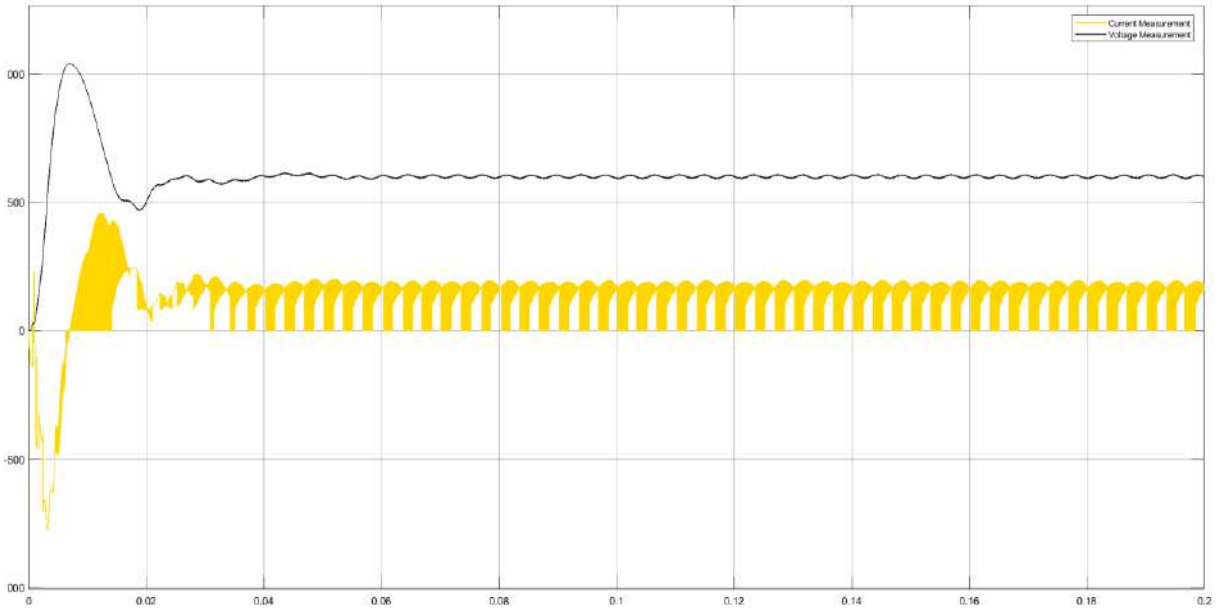


Figure (3.8) : Valeurs de la tension et courant du hacheur boost.

Les résultats de simulation du convertisseur boost représentent respectivement par la tension et le courant de sortie en fonction de temps. Ces résultats confirme le rôle du hacheur boost à élever la tension à une tension supérieur 601 V et le courant a un courant supérieur 163.3 A.

III.5.5. Méthode de Perturbation et d'Observation (P&O) :

La méthode de perturbation et d'observation est généralement la plus utilisée en raison de sa simplicité et sa facilité de réalisation. Cette méthode repose sur la perturbation (une augmentation ou une diminution) avec une constante (C) de la tension des panneaux Vpv, puis la puissance est comparée à celle obtenue avant perturbation. Précisément, si la puissance aux bornes des panneaux est augmentée à cause de la perturbation, la perturbation suivante est faite dans la même direction. Réciproquement, si la puissance diminue, la nouvelle perturbation est réalisée dans le sens opposé [22], [24].

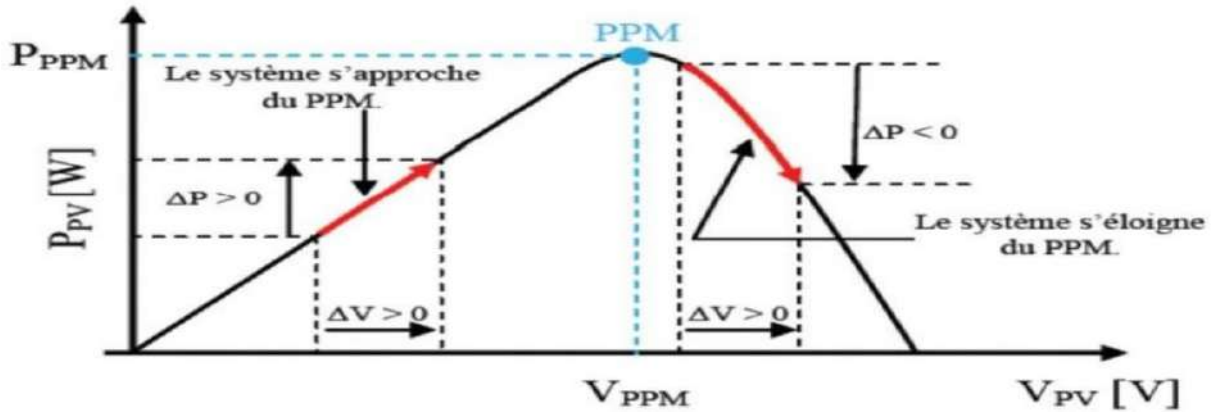


Figure (3.9) : Caractéristique de Ppv en fonction de la tension Vpv d'un panneau solaire.

Le tableau III.1 résume le principe de fonctionnement de la méthode perturbation et observation

Perturbation	Variation de la puissance	Perturbation suivante
Positive	Positive	Positive
Positive	Négative	Négative
Négative	Positive	Négative
Négative	Négative	Positive

Tableau 3 Les modes de perturbation de la méthode P&O

Après avoir réalisé le système photovoltaïque avec la commande MPPT basée sur la méthode de perturbation et observation (P&O) on aura les résultats suivant dans la figure (3.10) de l'influence de l'ensoleillement sur la puissance Ppv en fonction de la tension Vpv.

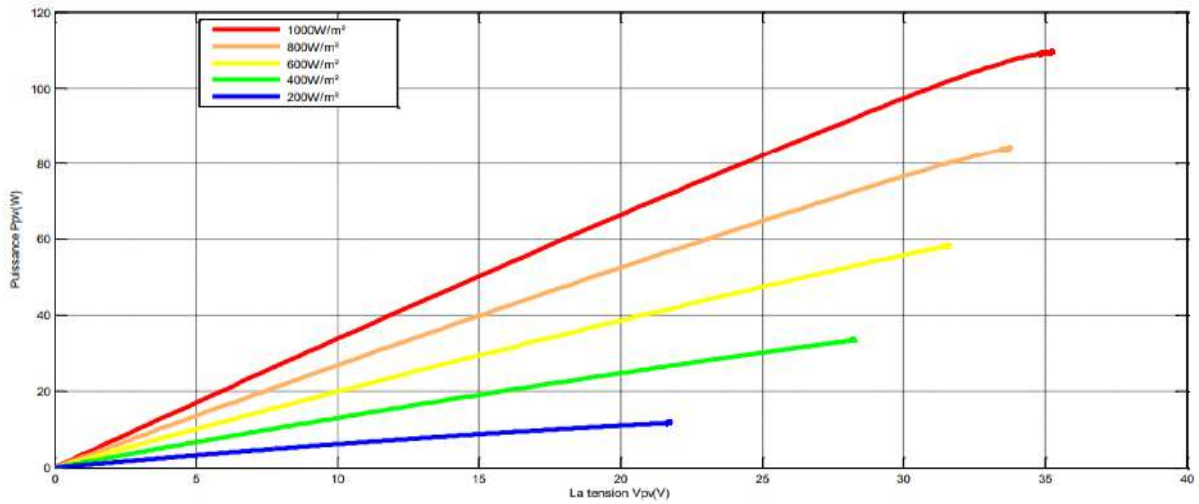


Figure (3.10) : Influence de l'irradiation sur la caractéristique Ppv= f(Vpv) avec optimisation par la P&O

Dans les figures suivantes on observe la puissance et la tension de notre générateur qui seront constantes au fil du temps grâce a l'algorithme de la P&O qu'on a introduit dans notre bloc de simulation

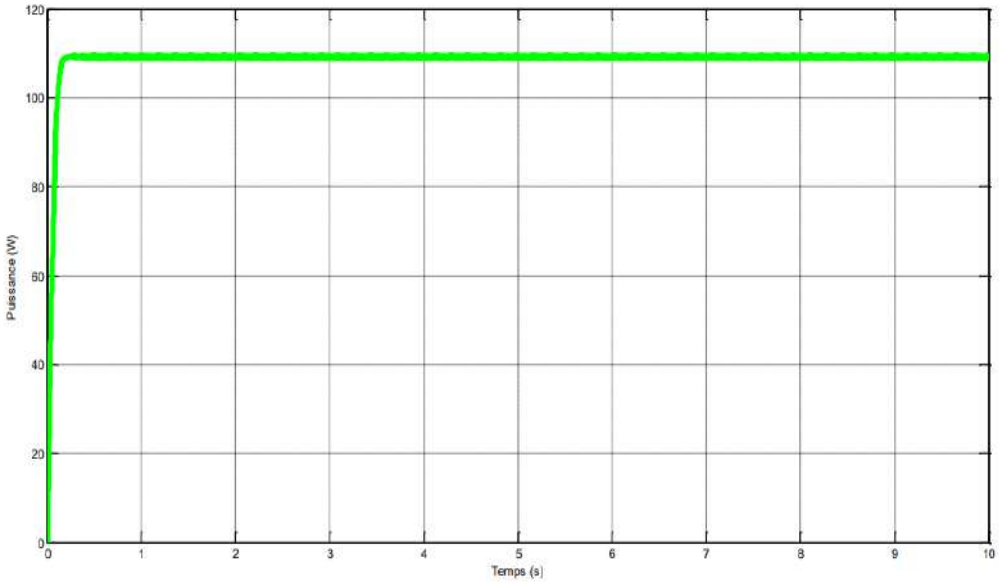


Figure (3.11) : Allure de la puissance du PV sous les conditions STC (1000W/m², T=25°C)

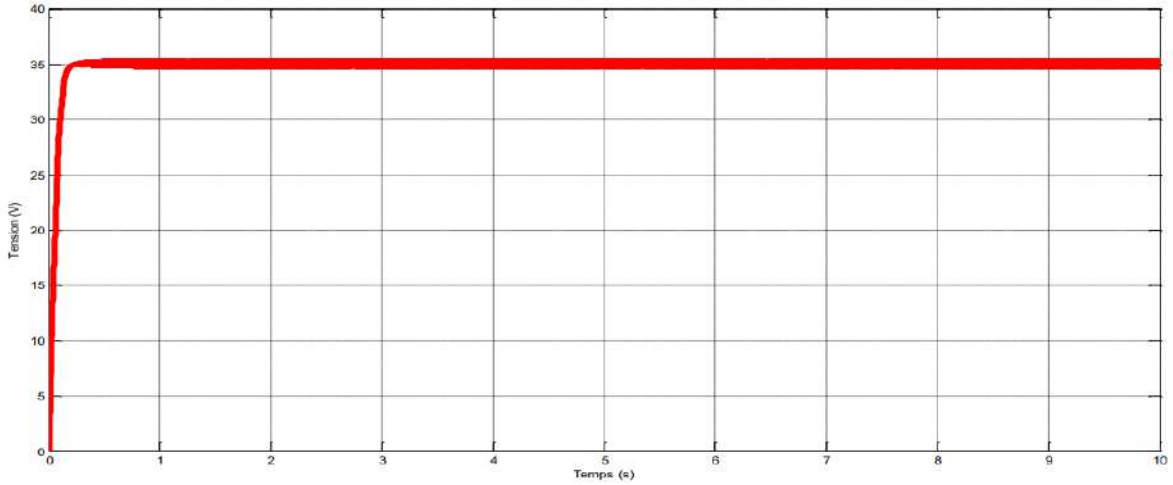


Figure (3.12) : Allure de la tension du PV sous les conditions (1000W/m², Ta=25°C)

III.5.6 Interprétation des résultats :

D'après les résultats de simulations qu'on à obtenu ;

- Quand le point de puissance maximale est atteint, la commande MPPT maintien le point de fonctionnement a ce dernier (Figure 3.11).

- On remarque dans la figure (3.12) que la tension et la puissance convergente vers le point de fonctionnement maximal, et elle les maintient pondant tout le temps de fonctionnement.

- On remarque aussi que les allures obtenues par la méthode de perturbation et d'observation (P&O) présentent des oscillations, qui sont dû à la perturbation continue de la tension de fonctionnement.

III.6 L'onduleur triphasé à deux niveaux en pont H :

L'onduleur triphasé à deux niveaux est constitué de 3 cellules de commutation comportant deux interrupteurs commendable à l'ouverture et à la fermeture et de deux diodes branchées en antiparallèle de ces interrupteurs permettant la bidirectionnalité du courant.

Le montage est constitué d'une source de tension continue E réversible en courant. La charge est généralement une machine à champ tournant et, de ce fait, se comporte comme une source triphasée de courants alternatifs (éventuellement supposés sinusoïdaux). Pour raison de démonstration de principe de fonctionnement on utilise une charge résistive triphasé équilibré.

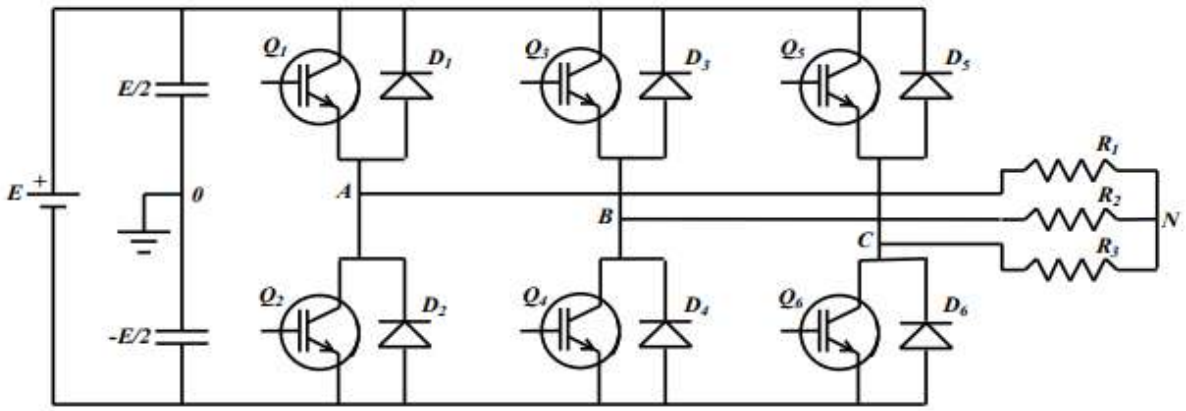


Figure (3.13): Onduleur triphasé de tension à deux niveaux en pont.

Trois transistors sont en conduction à chaque instant. Deux transistors d'un même bras ($Q1$ et $Q2$ par exemple) sont amorcés à 180° de décalage. Les transistors du bras voisin sont amorcés à 120° de décalage. Cette stratégie de commande s'appelle commande en plein onde 180°. Les allures de tension sont montrées sur la Figure (3.14)

Comme la tension composée a été obtenue avec un angle de phase de 120° , alors ni la troisième harmonique ni ses multiples ne sont mesurés dans ces tensions. C'est une caractéristique importante pour les systèmes triphasés, car le déplacement de l'angle de phase naturel entre les phases permet d'éliminer les harmoniques.

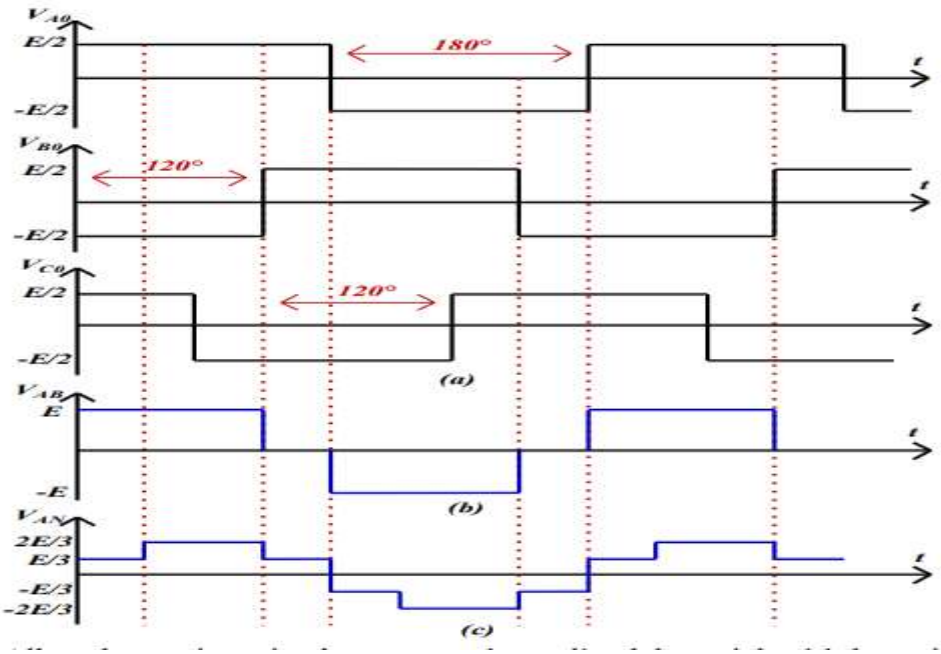


Figure (3.14): Allure des tensions simple et composé pour l'onduleur triphasé à deux niveaux en Pont (charge résistive).

On peut voir à partir de la Figure (3.14) qu'il existe six modes de fonctionnement. Ces modes sont mis en évidence à la Figure (3.15) (a),(f). En plus de ces six modes de fonctionnement, il existe deux autres modes de fonctionnement qui appliquent une tension nulle aux charges. Ce sont les configurations à roue libre présentées dans la Figure (3.15) (g) et Figure (3.15) (h), où trois interrupteurs inférieurs ou supérieurs sont actionnés en même temps.

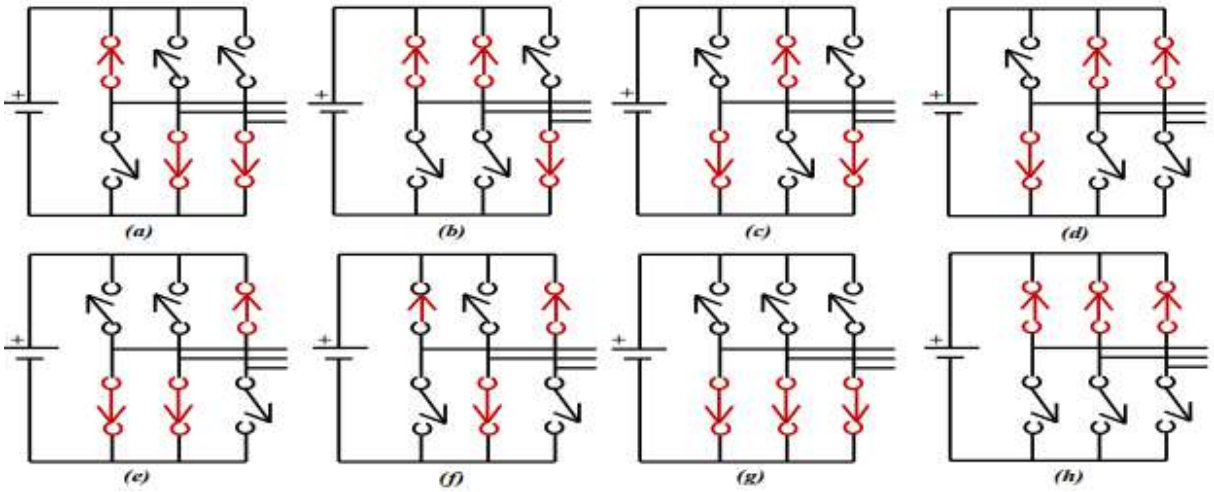


Figure (3.15): Modes de fonctionnement de l'onduleur triphasé à deux niveaux en pont.

III.6.1Etage de commande de l'onduleur triphasé à deux niveaux en pont H :

III.6.1.1Transformation de Park :

La transformation de Park, est souvent appelée transformation à deux axes. Physiquement, l'application de cette transformation à la correspond à une transformation des trois bobines (statorique) à deux bobines équivalentes reprenant les mêmes considérations ou aspects en termes de f.m.m de flux, de couple ou du moins une image qui leur sera parfaitement proportionnelle.

A partir du repère de la (fig. 3.16) on ajoute un autre repère, ce référentiel est caractérise par un système d'axe (d q) tournant à la vitesse $w_s = \frac{d\theta_s}{dt}$; par rapport au stator, ce repère est souvent appelé repère de Park .On peut définir une matrice de passage du repère $(\alpha, \beta, 0)$ au repère (d, q, 0).Cette matrice est définie comme suit :

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \\ X_0 \end{bmatrix} \qquad \text{(III.15).}$$

La transformation de Park est la transformation unique permettant le passage direct du système triphasé au système diphasé tournant, cette transformation notée [P], elle est définie par :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}}\begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta-\frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta-\frac{4\pi}{3}) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta-\frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta-\frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad \text{(III.16).}$$

On définit, de la même façon la matrice inverse $[P]^{-1}$permettant le passage du repère diphasé au repère triphasé.

$$[P]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}}\begin{bmatrix} cos\theta & -\sin\theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta-\frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta-\frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta-\frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta-\frac{4\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad \text{(III.17).}$$

On remarque que P^{-1}=P^{-T} , ainsi cette transformation est orthogonale.

Le passage des variable $X_{a,b,c}$ aux variables $X_{d,q}$et inversement s'écrit sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_0 \end{bmatrix} = [P(\theta)]\begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad \text{(III.18).}$$

$$\begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} = [P(\theta)]^{-1}\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_0 \end{bmatrix} \quad \text{(III.19).}$$

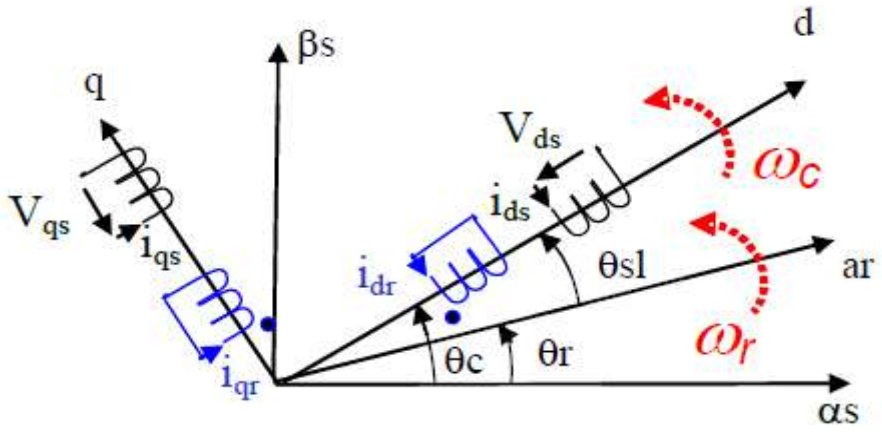


Figure (3.16) Transformation de Park

III.6.1.2Boucle à verrouillage de phase (PLL)

La synchronisation de système PV avec le réseau électrique revient à l'identification précise des propriétés de la tension de grille, qui sont l'amplitude, le déphasage et la fréquence de la composante fondamentale de la tension, afin d'ajuster l'oscillateur interne du contrôleur de l'onduleur selon la dynamique oscillatoire imposée par le réseau [49,64]. Parmi les techniques proposées dans la littérature, il y a la boucle à verrouillage de phase (Phase-Locked Loop (PLL)) qui est une technique de synchronisation très efficace à mettre en œuvre dans les onduleurs de puissance raccordés à un réseau qui peut subir des perturbations transitoires [41,42].

La PLL permet d'asservir la phase et la fréquence instantanée de sortie sur celles d'entrée. Selon la Fig. (3.17), la PLL se compose principalement des blocs suivants :

1. Comparateur de phase (Phase Fréquence Detector (PFD)).
2. Filtre
3. Oscillateur contrôlé en tension (Voltage Controlled Oscillator (VCO)).
4. Diviseur de fréquence.

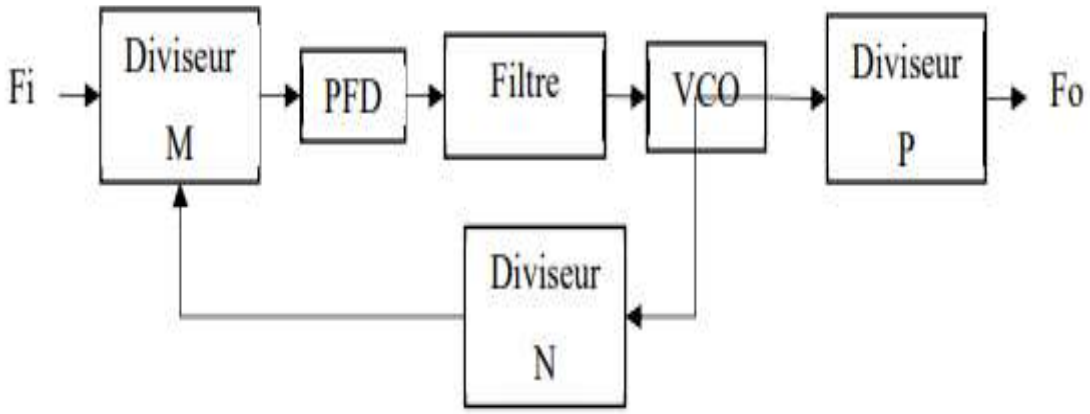


Figure (3.17) Structure de la PLL.

La relation entre la fréquence d'entrée Fi et la fréquence de sortie Fo de la PLL est donnée par :

$$F_0 = F_i \frac{N}{M.P} \qquad (III.20)$$

N : Rang de division de la fréquence de sortie du VCO qui représente le pas de fréquence.

M : Rang de division de la fréquence d'entrée Fi pour avoir le pas.

P : Rang de division de la sortie du VCO pour avoir Fo.

III.6.1.3 Correcteur proportionnel – intégrale (PI) [43]

L'action proportionnelle est une fonction qui fait varier le signal de sortie du régulateur proportionnellement à l'écart entre la mesure et la consigne. Le correcteur intégral est fréquemment combiné au correcteur proportionnel pour améliorer le régime permanent et le régime transitoire. Cette combinaison est appelée correcteur proportionnel-intégral.

Le coefficient de proportionnalité, appelé gain du régulateur, est obtenu par le réglage du paramètre du régulateur.

L'équation dans le domaine temporel de ce correcteur est écrite par l'expression :

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \qquad \text{(III.21)}$$

Où e(t), u(t),K_p et K_i et désignent respectivement l'erreur à l'instant t, la commande générée et les gains du correcteur.

La fonction de transfert du contrôleur correspondante est donnée par :

$$C(p) = K_p + \frac{K_i}{p} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i p}\right) \qquad \text{(III.22)}$$

Avec : $T_i = \frac{K_p}{K_I}$

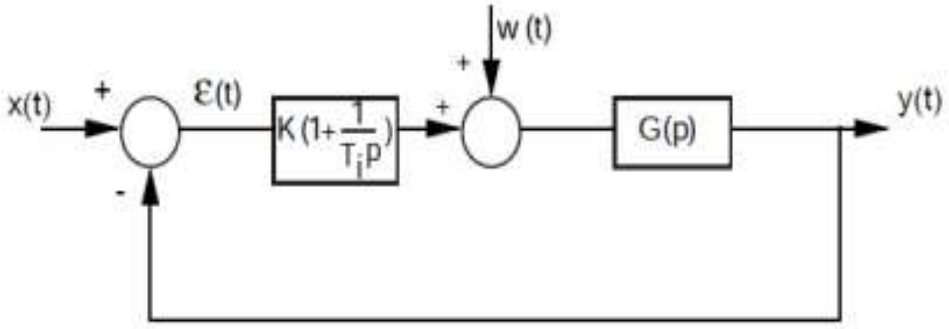


Figure (3.18) – Commande proportionnelle-intégrale PI

L'introduction d'un correcteur PI permet d'améliorer la précision et de rejeter les perturbations de type échelon. Par contre, ce type de correcteur possède certaines limitations sur l'amélioration de la rapidité et peut même introduire une instabilité du système en boucle fermée [44].

III.6.2 Résultats de simulation :

Dans cette partie, nous proposons une simulation d'un onduleur triphasé commandé par la MLI.

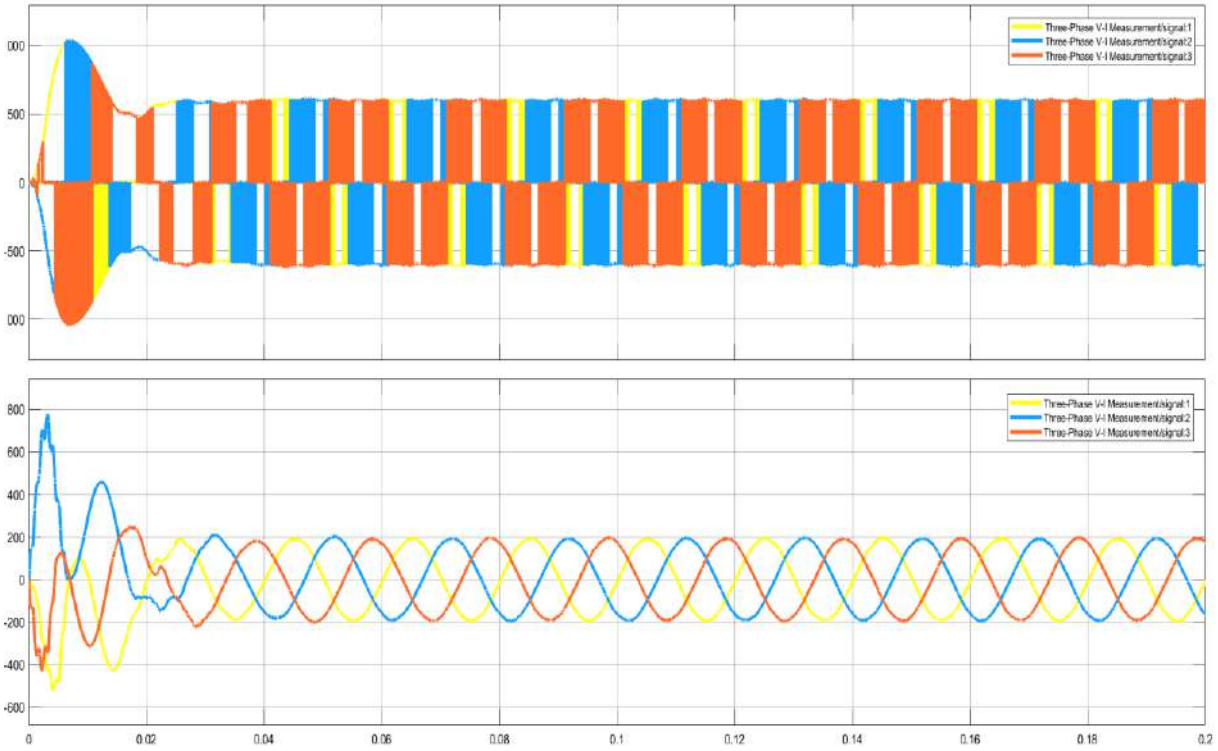


Figure (3.19) représente la tension et le courant à la sortie continue de l'onduleur

- **Interprétation**

La figure (3.19) représente la tension à la sortie continue de l'onduleur, le courant de phase et les deux courants de réseau. On remarque que la tension à l'entré continu de l'onduleur a une forme sinusoïdale,

III.7 Filtre LCL :

La fonction principale du filtre LCL est de réduire les harmoniques d'ordre élevé du côté de la sortie. Cependant, une mauvaise conception peut entraîner une augmentation de la distorsion. Par conséquent, le filtre doit être conçu correctement et raisonnablement.

L'approche de l'analyse et de l'estimation du filtre L-C-L avec une résistance d'amortissement, comme le montre la figure 4, a été discutée dans le document suivant. Les formules simplifiées pour estimer les paramètres du filtre ont été stipulées dans ces littératures. La même approche sera utilisée dans cette étude pour déterminer l'inductance côté

onduleur Li, l'inductance côté réseau Lg la capacité du filtre Cf et la résistance à l'amortissement Rd.

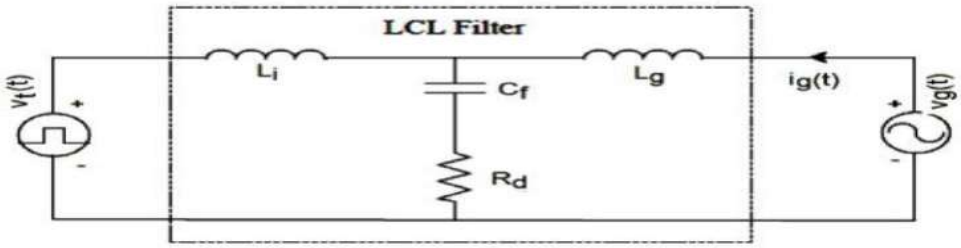


Figure (3.20) : Filtre L-C-L et composants

Procédure de conception du filtre :

Plusieurs caractéristiques doivent être prises en compte lors de la conception d'un filtre LCL, telles que l'ondulation du courant, la dimension du filtre et l'atténuation de l'ondulation de commutation. Les exigences en matière de puissance réactive peuvent provoquer une résonance du condensateur interagissant avec le réseau.

III.7.1 Résultats de simulation :

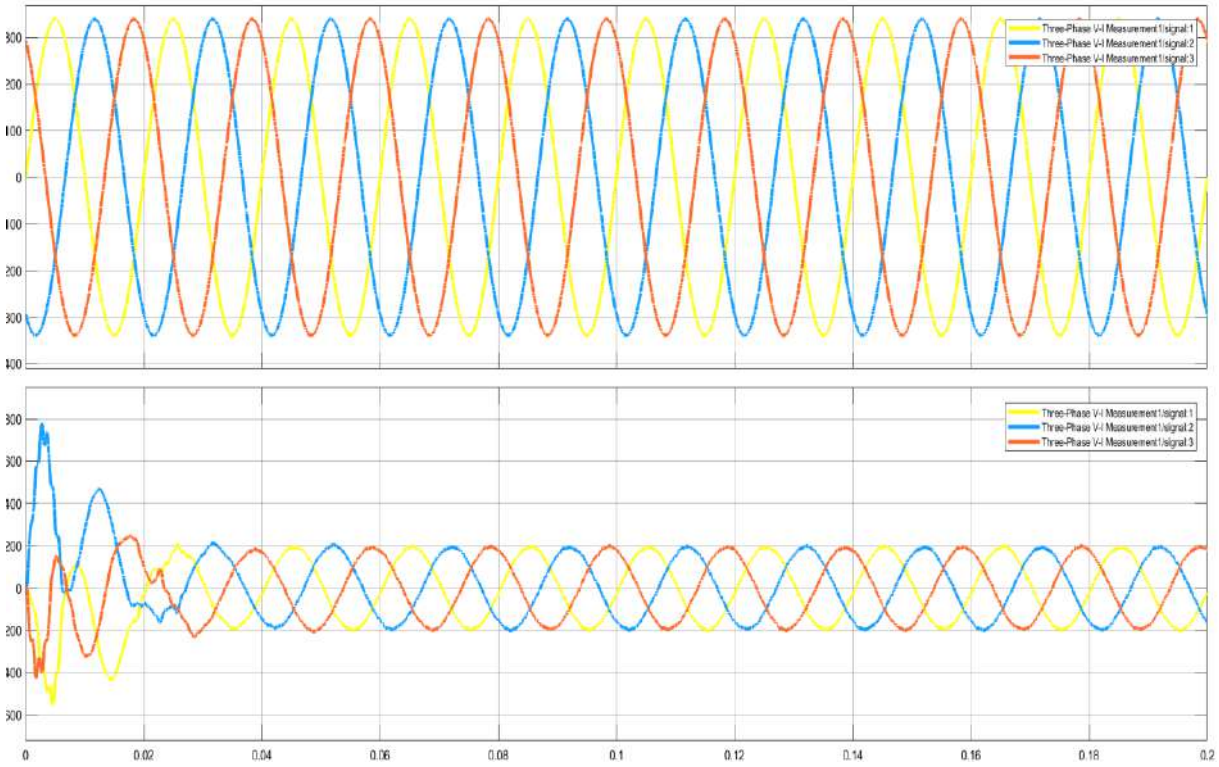


Figure (3.21) : Représentation de la tension et le courant à la sortie continue de l'onduleur avec filtre LCL

- **Interprétation**

On remarque que les résultats de la simulation de l'onduleur se sont améliorés lors de l'ajout Une filtre LCL. L'utilisation d'un filtre LCL a pour but d'améliorer la tension et le courant qui s'ajoutent au réseau électrique.

III.9 Simulation globale d'un système photovoltaïque connecté au réseau :

La figure (3.22). Est le schéma global de simulation de la connexion au réseau électrique que nous avons utilisé sous Matlab/Simulink.

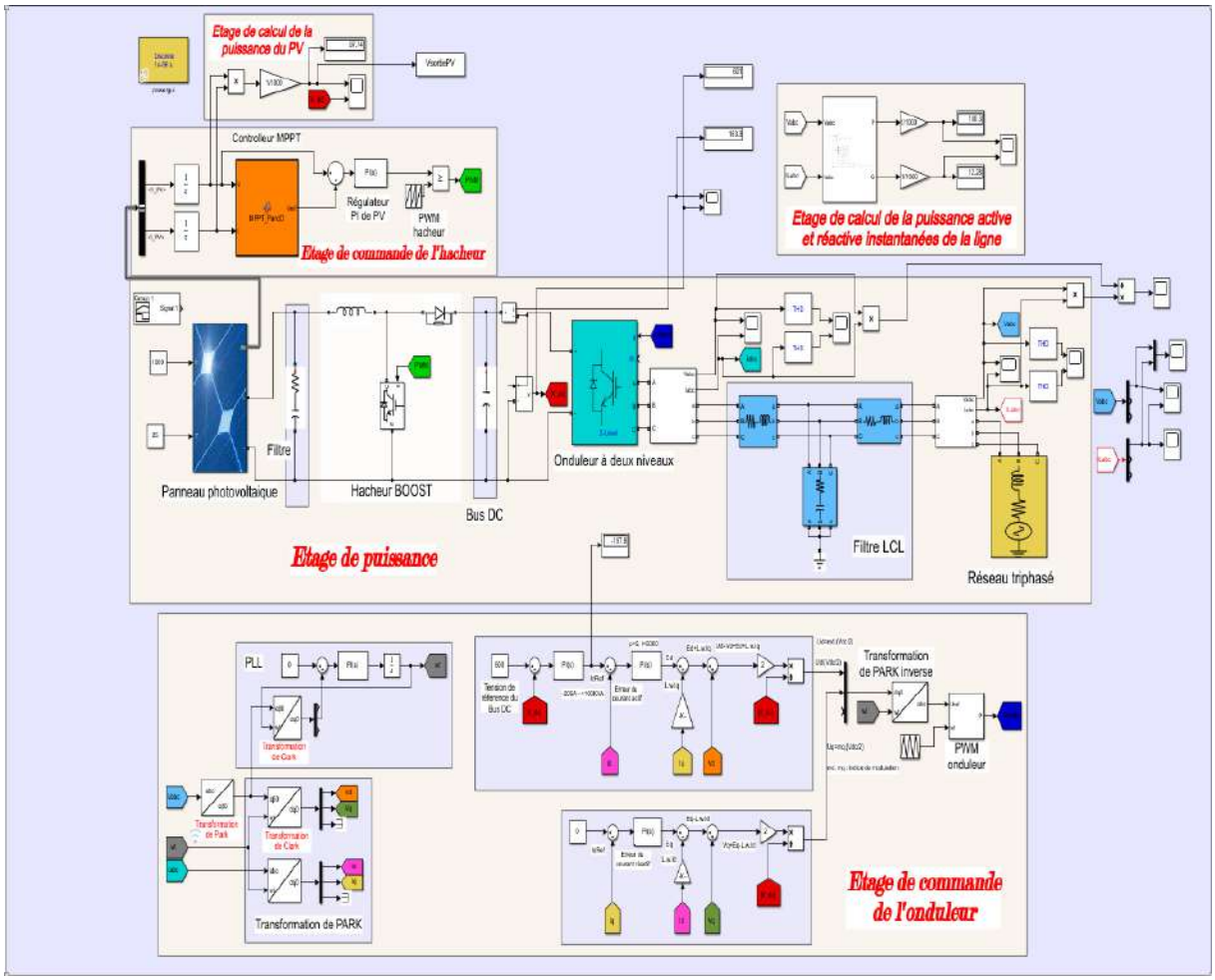


Figure (3.22) : Circuit global sous Matlab/Simulink

III.9.1 Résultats de simulation :

1er Essai :

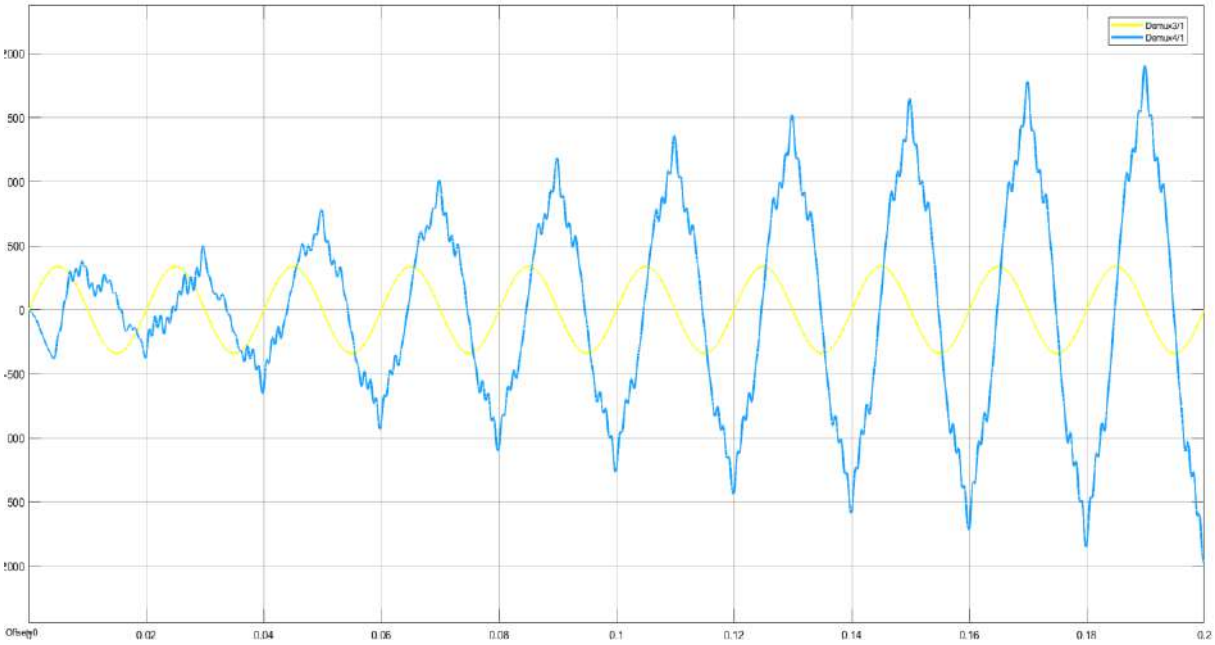


Figure (3.23) : Représentation de courant et la tension de phase du réseau électrique (Vdc=0, Iq=30)

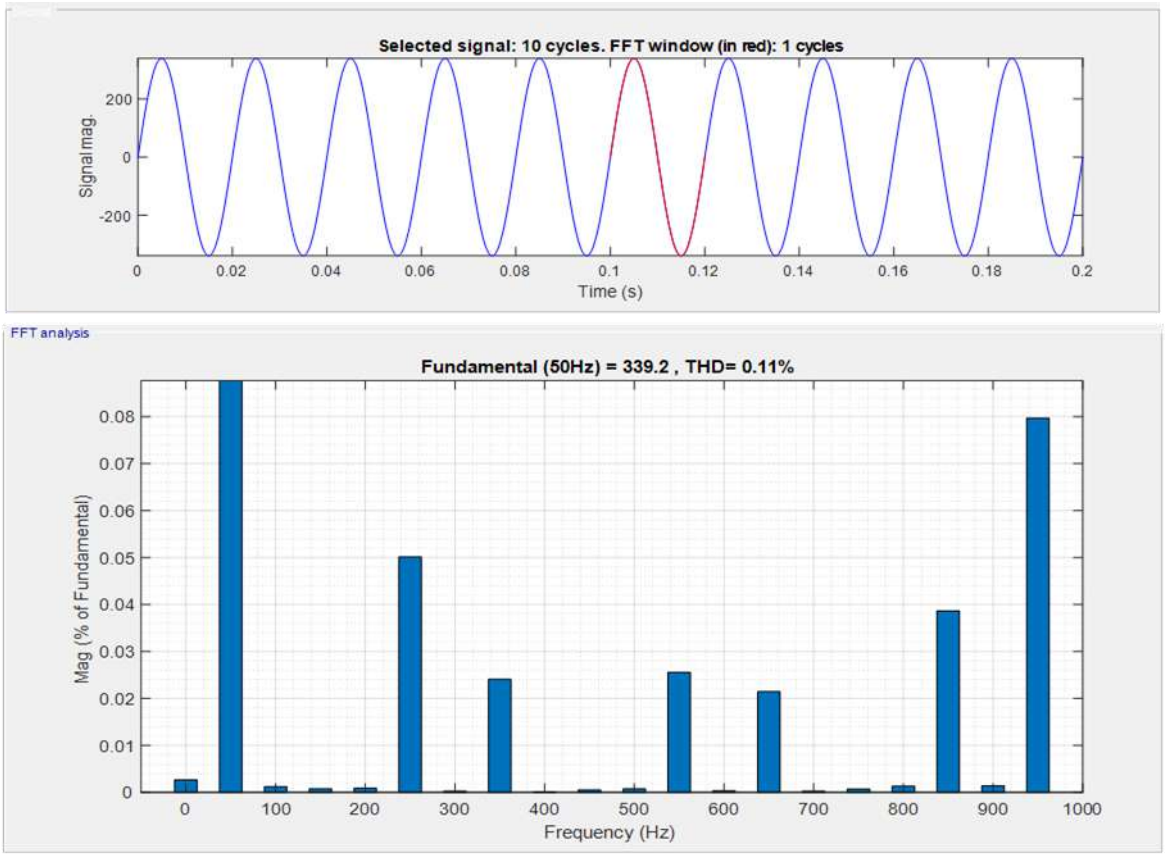


Figure (3.24) : La valeur de THD (Vdc=0, Iq=30)

Nous remarquons sur la Figure (3.23) avec les caractéristiques suivantes (Vdc=0, Iq=30) que le signal résultant des ondes déformées de la tension sinusoïdale, ce phénomène se nomme la distorsion en tension, et à partir de là, nous avons marque la valeur de THD qui est égale 0.11% relevé à partir de figure (3.24).

2ème Essai :

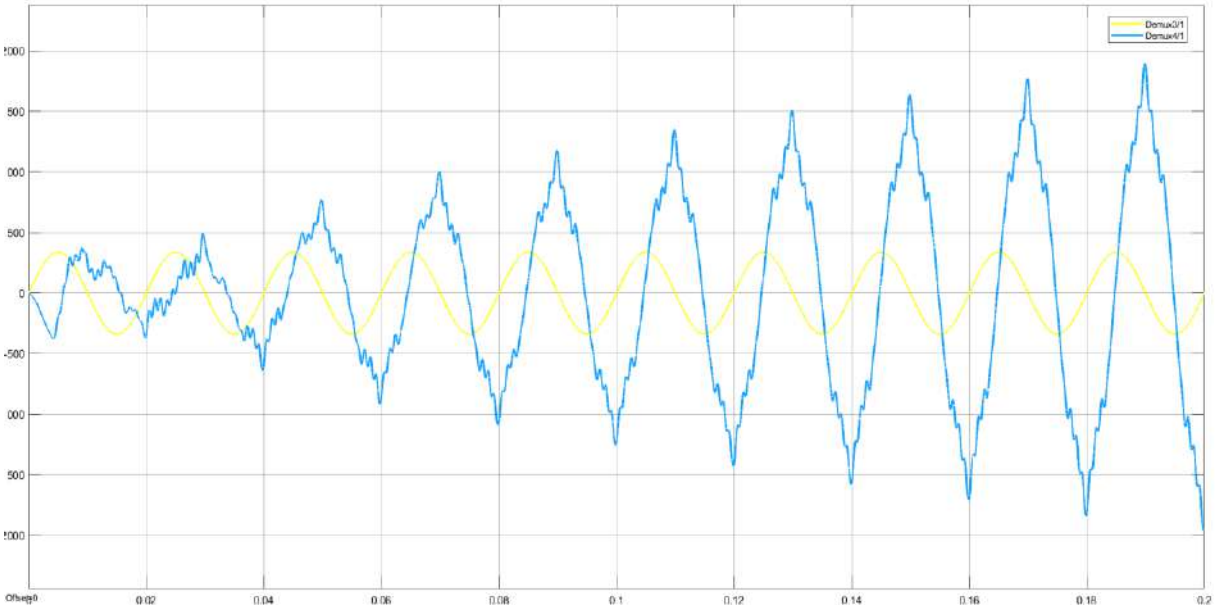


Figure (3.25) : Représentation de courant et la tension de phase du réseau électrique (Vdc=0 Iq=15)

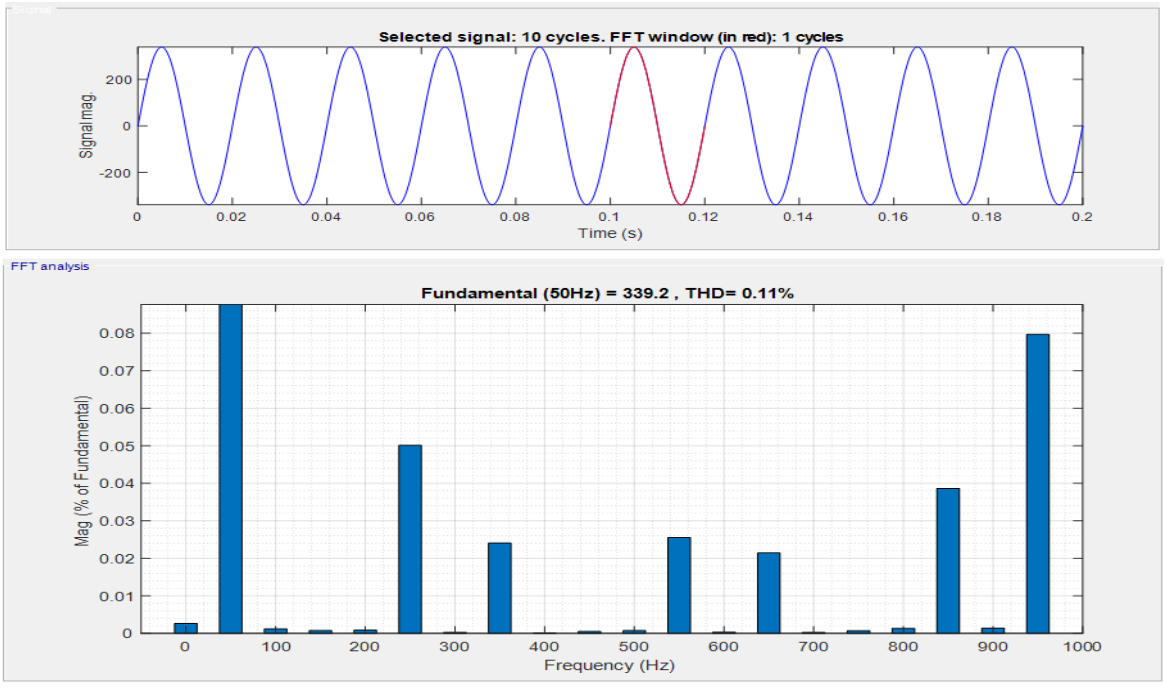


Figure (3.26) : La valeur de THD (Vdc=0, iq=15)

Nous remarquons sur la Figure (3.25) avec les caractéristiques suivantes (Vdc=0, Iq=15) que le signal résultant des ondes déformées de la tension sinusoïdale, et à partir de là, nous avons marque la valeur de THD qui est égale 0.11% relevé a partir de figure (3.26).

3ème Essai :

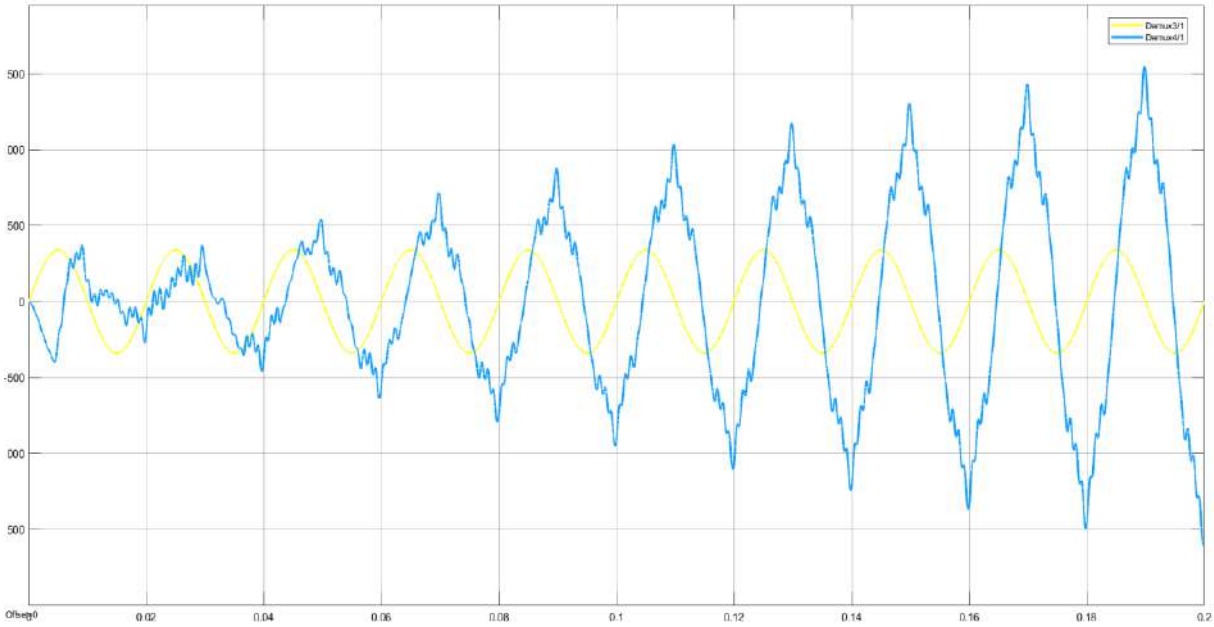


Figure (3.27) : Représentation de courant et la tension de phase du réseau électrique (Vdc=300 Iq=0)

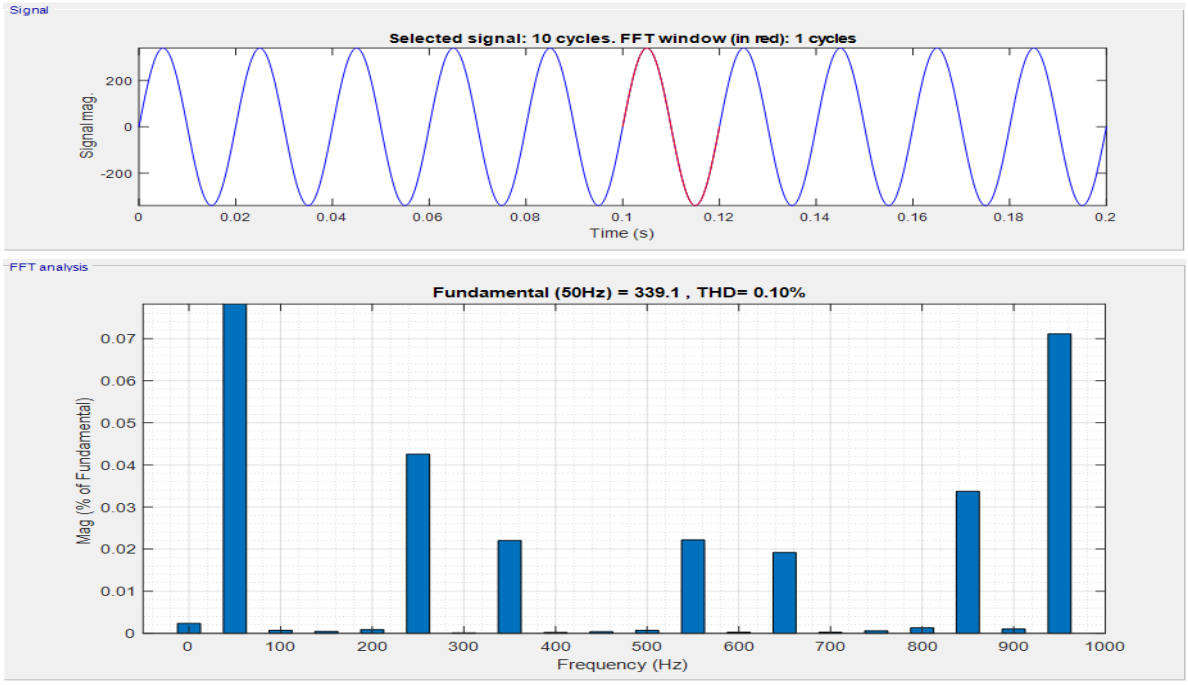


Figure (3.28) : La valeur de THD (Vdc=300, Iq=0)

Nous remarquons sur la Figure (3.27) avec les caractéristiques suivantes (Vdc=300, Iq=0) que le signal résultant des ondes déformées de la tension sinusoïdale nous avons marque la valeur de THD qui est égale 0.10% relevé à partir de figure (3.28).

4ème Essai :

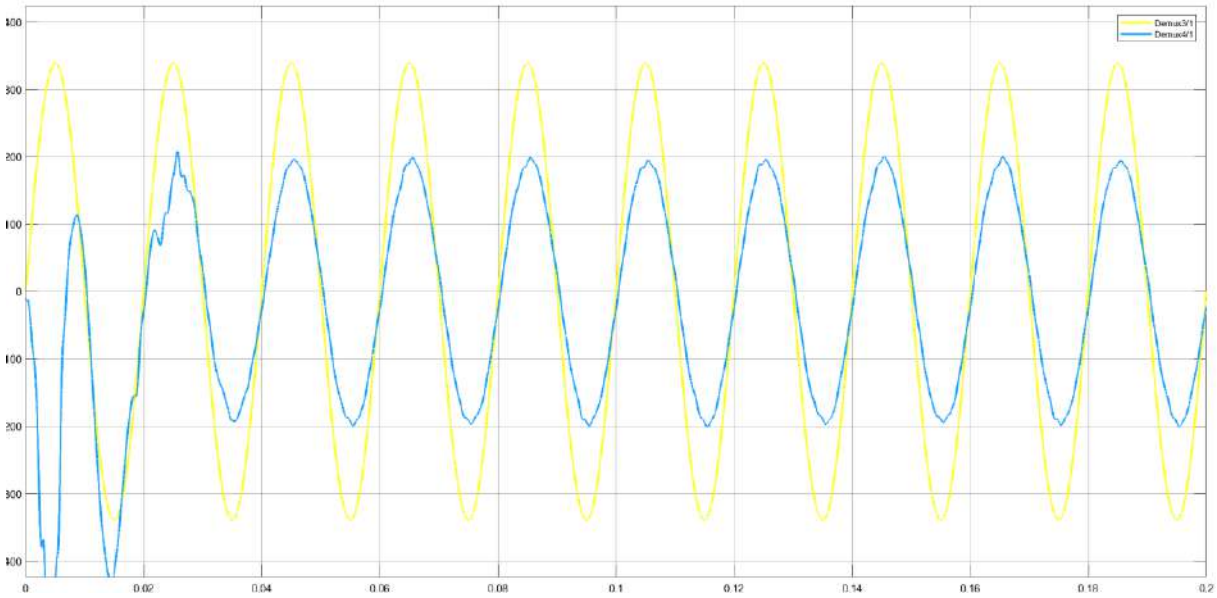


Figure (3.29) : représentation de courant et la tension de phase du réseau électrique (Vdc=600, Iq=0)

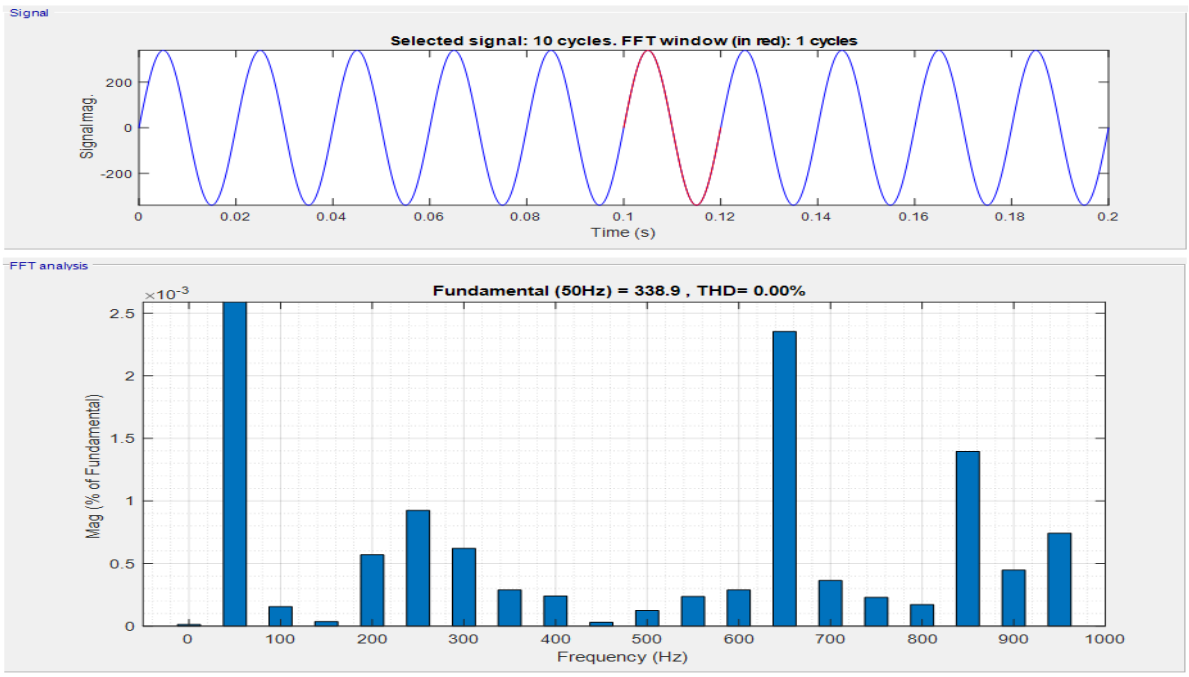


Figure (30) : La valeur de THD (Vdc=600, Iq=0)

On remarque que le THD est égale à 0 dans les caractéristiques suivant (Vdc=600 et Iq=0), Lorsque le THD est égal à zéro, on peut conclure qu'il n'y a pas d'harmoniques sur le réseau.

- **Interprétation**

Après l'analyse des résultats de quatre expériences, nous avons découvert que le taux de distorsion [THD] est corrélé à la tension 'vdc' mais pas au courant 'Iq'. La modification de la valeur de 'vdc' entraîne la modification du taux de distorsion [THD].

III.10 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons simulé toutes les étapes du système Photovoltaïque connecté au réseau électrique, tel que le générateur photovoltaïque, le hacheur commandé pour la recherche du point de puissance maximale par la méthode P&O et l'onduleur commandé par MLI pour raccordée au réseau électrique**.**

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif du travail présenté dans ce mémoire est d'étudier l'application de la commande linéarisant pour piloter un système photovoltaïque connecté au réseau ayant un seul étage de conversion continu/alternatif. Le but c'était de contrôler le point de puissance maximale et la puissance réactive.

Nous avons débuté ce travail par la présentation des notions sur l'énergie solaire et des généralités sur les systèmes photovoltaïques. Nous avons présenté aussi les éléments principaux constituants un système photovoltaïque. Nous avons étudié en simulation sous Matlab les caractéristiques puissance-tension et courant-tension d'un générateur photovoltaïque sous les conditions atmosphériques standards et lors d'une variation de ces conditions (ensoleillement et température).

Le second chapitre est consacré à l'étude du comportement d'un générateur photovoltaïque associé à un convertisseur DC-DC. Nous avons exposé aussi les différentes classifications des commandes MPPT qui adapte le panneau PV à la charge. Ensuite nous avons étudié en simulation l'association d'un générateur PV avec un convertisseur DC/DC de type Boost commandé par trois techniques à savoir : la méthode MPPT basée sur l'algorithme MPPT basé sur la méthode de perturbation et observation (P&O) et la commande MPPT à base d'un régulateur PI.

Le troisième chapitre est consacré à l'étude de la modélisation du système photovoltaïque connecté au réseau électrique et les principaux modules constituants ce type des systèmes. Nous avons présenté aussi les types des systèmes PV connecté au réseau (sans stockage et avec batterie de stockage). Puis, on a exposé aussi les différentes architectures des onduleurs (central, chaines, intégré au panneau PV). Nous avons simulé également le comportement de la cascade sans commande. Dans le dernier chapitre nous avons utilisé la commande linéarisant pour piloter un système PV connecté au réseau électrique via un onduleur triphasé, et ceci, pour assurer la poursuite du point de puissance maximal et la commande de la puissance réactive. Comme perspectives pour ce travail, on propose :

- L'étude expérimentale de l'association présentée dans ce travail du mémoire.
- Utilisation des techniques de contrôle MPPT à base d'intelligence artificielle.
- Proposer une variante de cette structure de commande à base d'un observateur.

Annexe

Annexe

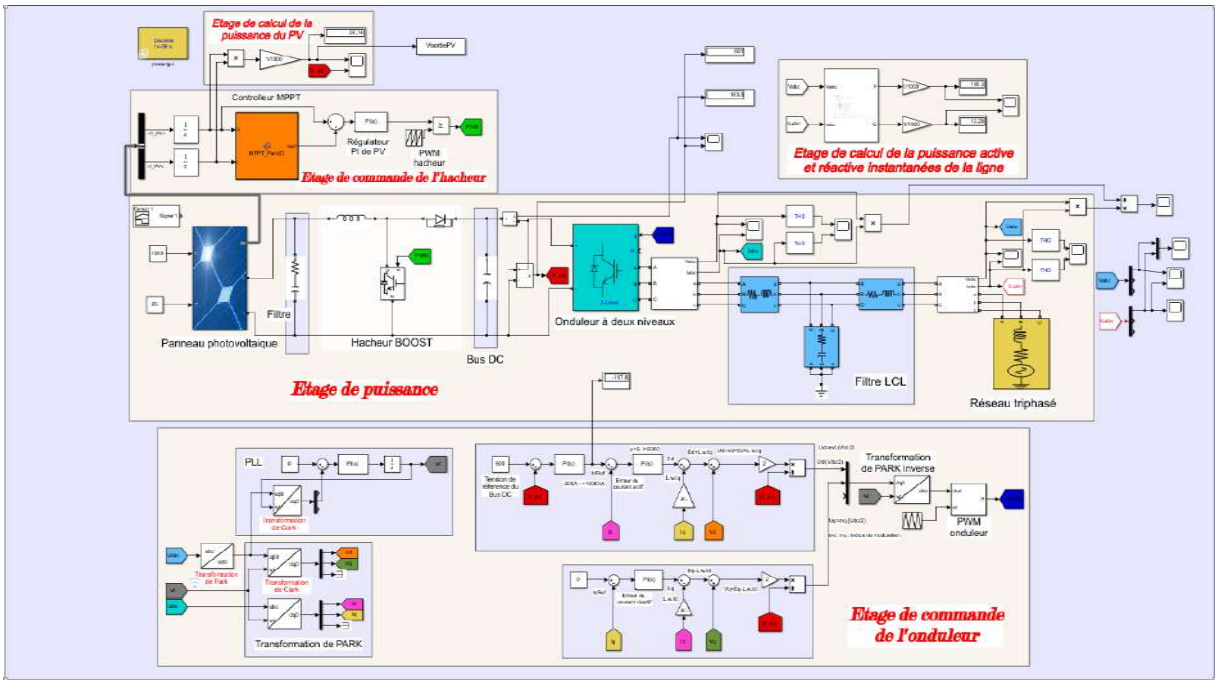


Figure Circuit global dans cette étude sous Matlab/Simulink.

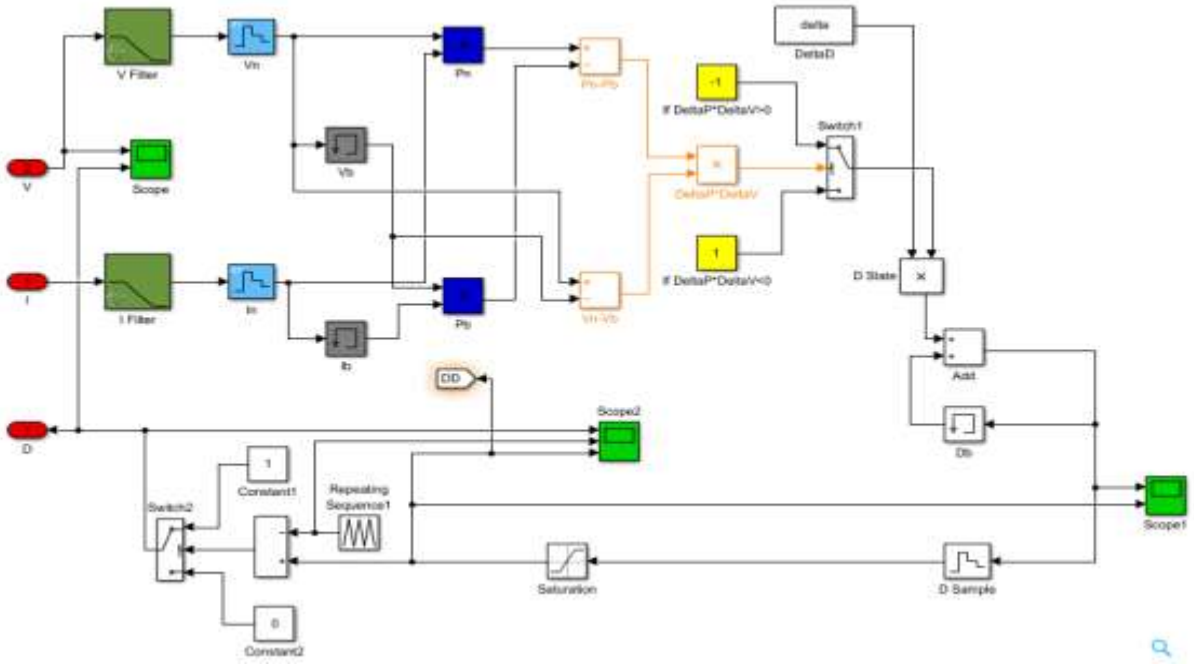


Figure : Schéma de l'algorithme P & O sous Matlab/Simulink.

```
function Vref = MPPT_PandO (V,I)
Vrefmax = 363;
Vrefmini = 0;
Vrefinit = 300;
deltaVref = 1;
persistent Vold Pold Vrefold;
DataType = 'double';
if isempty(Vold)
    Vold = 0;
    Pold = 0;
    Vrefold = Vrefinit;
end
P=V*I;
dV= V - Vold;
dP= P - Pold;
if dP ~= 0
    if dP < 0
        if dV < 0
            Vref = Vrefold + deltaVref;
        else
            Vref = Vrefold - deltaVref;
        end
    else
        if dV < 0
            Vref = Vrefold - deltaVref;
        else
            Vref = Vrefold + deltaVref;
        end
    end

else Vref = Vrefold;
end

if Vref >= Vrefmax | Vref <= Vrefmini
    Vref = Vrefold;
end
 Vrefold = Vref;
 Vold = V;
 Pold = P;
```

Figure : Programme de Contrôleur MPPT sous Matlab

Références

Références

[1] Belakehal Soltane, "Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Énergies Renouvelables," Thèse de Doctorat, université de Constantine, 10/06/2010.

[2] DEBILI Narimene, « Etude et optimisation en environnement Matlab/Simulink d'un système de pompage photovoltaïque », Mémoire de Magister en Electronique, Option: Matériaux et nanoélectronique, Université des Frères Mentouri Constantine, 2014.

[3] Hamida Chohraoui & Ratiba Hadbi. « Modélisation Et Simulation d'un Système Photovoltaïque. Connecté Au Réseau » Master En ´Electrotechnique Option: Commande Des Machines Electriques Université E Abou Bekr Belkaïd Tlemcen, Faculté De Technologie. 2016

[4] HADJERAS Mouloud & KHALES Aissa. « Etude Et Dimensionnement D'un Convertisseur Dédié Aux Systèmes Photovoltaïques » Mémoire De MASTER, Domaine : Sciences Et Technologies, Filière : Génie Electrique, Spécialité : Réseaux Electriques. Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou. 2017.

[5]:Kahlaoui Imed - Chouia Mohamed – Thème « Simulation de couplage d'un moteur asynchrone avec un onduleur multi-niveaux alimenté par un générateur photovoltaïque. »2016.

[6] : M. BOUKLI-HACENE Omar. Conception et réalisation d'un générateur photovoltaïque muni d'un convertisseur MPPT pour une meilleure gestion énergétique. Mémoire de magister. Université ABOU BAKR BELKAID de Tlemcen, 2011.

[7] : site web http://outilssolaires.com

[8] A. R. F. Hananou. Etude et simulation d'un panneau solaire raccordé au réseau avec périphérique déstockage. Mémoire présente pour l'obtention du diplôme de Master académique, Université Kasdi Merbah, Ouargla-Algérie, Faculté des Sciences Appliquées, 2012.

[9] Salima Alem-Boudjemline, « Réalisation et caractérisation des cellules Photovoltaïques Plastiques», thèse de doctorat Spécialité : Physique, Ecole Doctorale d'Angers, université d'Angers, 2004.

[10] : Formation 2011 : Installation & maintenance des systèmes photovoltaïque.

[11] Mechalikh M N et Hamada C E, "Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau, " Université Kasdi Merbah de Ouargla, 2013.

[12] Belaid Lalouni Sofia, "Cours Energie Solaire Photovoltaïque," Université A. MIRA de BEJAIA, Année universitaire 2014/2015.

[13] Narimen Debili, « Etude et optimisation en environnement Matlab/Simulink d'un système de pompage photovoltaïque », mémoire de magister, université Constantine 1, 2015

[14] Assia Zardoudi, Rachid Chenni, « Etude de l'influence des défirent paramètres sur un module photovoltaïque », science et technologie A_N°41, juin 2015,49-54, université Constantine 1, 2015.

[15] Zerguine Bilal, «Modélisation d'un système de production électrique par la cellule photovoltaïque », mémoire de magister, Université Badji Mokhtar, Annaba, 2010.

[16] T arik. Ouahidi conception et simulation d'une source D'alimentation constituée d'un pré régulateur et d'un Onduleur monophasé de puissance 1kva. École de technologie supérieure université du Québec.2002

[17] Caceres, R. O. Barbi, 1. (1999). A Boost DC-AC Converter: Analysés. Design and Expérimentation. IEEE Transactions on power Electronics, 14(1), 134 -141.

[18] Canesin, C.A. Barbi. I. (1999). A Novel Single-Phase ZCS-PWM High PowerFactor Boost Rectifier. IEEE Transactions on Power Electronics, 14(4). 629- 635.

[19] : Aboub Hania –master en électrotechnique –thème « commande d'un onduleur 9 niveaux destiné aux fortes puissances photovoltaïque » université el oued 28/06/2014.

[20] : Ben Sadik Othmane, djaloud Fathi -master –thème « étude et optimisation d'un système photovoltaïque » université Ouargla Le 27/06/ 2012.

[21] : K. DERBAL et H. DJELTI- Master Académique –thème « Les panneaux photovoltaïques ».

[22] : N Aouchiche M S Ait Cheikh A. Malek-Revue des énergies renouvable-théme « Poursuite du point de puissance maximale d'un système photovoltaïque par les méthodes de l'incrémentation de conductance et la perturbation & observation » Le 30/09/2013.

[23] : Mchalikh hamada-master académique-thème « modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau ». Le 25/06/2013.

[24] : belkhier Yousef et ait mahdi M. Amine –mémoire master-thème « modélisation st Simulation d'un système photovoltaïque » université Bejaïa 2016/2017

[25] M.S.Fateh. Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique. Mémoire de Magister, Université FERHAT ABBAS DE SETIF, 2011.

[27] : Hanano Fatiha- Rouabah Aicha- master académique-thème « modélisation et simulation d'un système photovoltaïque » Le 09/06/2014.

[28] : B. Gaiddon (HESPUL), T. TranQuoc (IDEA) TMC Le(IDEA) Seddik Bacha(G2Elab) Duvauchelle (EDF), thème « Typologie des onduleurs pour systèmes photovoltaïque » Décembre 2010

[29] : Chebana Abdelkrim Master thème « Contrôle d'un système photovoltaïque connecte aux réseaux » université Mohamed khider Biskra le 03-06-2014

[30] : Sophie FERNANDEZ thèse présentée pour obtenir le grade de DOCTEUR de l'université de Lille 1 « Comparaison des performances électriques d'un onduleur triphasé deux niveaux à commandes directes et indirectes connecté au réseau » le 11 Octobre 2013

[31] A. Gamni, « Etude et simulation d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique (étude de cas réseau d'Adrar)», Mémoire de Master, Université d'Adrar, 2012.

[32] https://fr.wikipedia.org/wiki/Centrale_solaire_photovolta%C3%AFque

[33] L. Abbassen, «Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque», Mémoire de Magister, Université de Tizi Ouzou, 2011.

[34] L.Zaghba, «Etude et Commande Adaptative par les Techniques Intelligentes Des Systèmes Non linéaires Application aux Systèmes Photovoltaïques», Thèse de doctorat, Université de Biskra, 2017.

[35] F. Boutlilis, «Modélisation et simulation des sources de production décentralisée Application à l'intégration d'un générateur PV à stockage dans un réseau électrique», Thèse de doctorat, Université de Mostaganem, 2017/2018.

[36] N. Tkouti, «Optimisation des systèmes photovoltaïque connectes au réseau par la logique floue», Mémoire de Magister, Université de Biskra, 2003/2004

[37] https://www.nouvelr-energie.com/installation-panneau-solaire/rendement/

[38] S. Maloufs, «Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique avec une commande vectorielle», Mémoire de Master, Université de M'SILA, 2016.

[39] T. A. B. Raj, R. Ramesh (2014) Modelling and analysis of parallel converter for photovoltic applications, Journal of Theoretical and Applied Information Technology, ISSN: 1992-8645, E-ISSN: 1817-3195, Vol. 62 No.2, pp. 309-316.

[40]A.Kalirasu, S. S. Dash (2010) Simulation of Closed Loop Controlled Boost Converter for Solar Installation, Serbian Journal of electrical engineering, Doi : 10.2298/SJEE1001121K, Vol. 7, No.1, pp. 121-130.

[41] Minh TC. Couplage Onduleurs Photovoltaïques et Réseau, aspects contrôle / commande et rejet de perturbations. Thèse de doctorat. Université de Grenoble, 2012.

[42] Thibault R. Contrôle de l'énergie injectée dans un réseau électrique par un convertisseur triphasé utilisant un régulateur basé sur un modèle interne sinusoïdal. Université du Québec. Septembre, 2006.

[43] Boukhris M. Regulation de vitesse d"une machine asynchrone, Université de Kasdi Merbah OURAGLA, Master en Electrotechnique (2014)

[44] Vrancic DYR. Anti-windup and conditionnel Transfer for PID controller Conference Antiwindup and conditionnel Transfer for PID controller vol. Vol .A. p. pp 183-

Résumé :

Les convertisseurs électriques sont utilisés dans plusieurs domaines et jouent un rôle primordial dans les applications photovoltaïques. Ce travail constitue une étude sur les convertisseurs utilisé dans la plupart des systèmes photovoltaïques (PV) qu'ils sont raccordés au réseau électrique. Nous avons effectué une étude générale du générateur photovoltaïque et de son fonctionnement à sa puissance maximale en utilisant un hacheur boost commandé par un algorithme MPPT de type P&O et le régulateur PI, le but étant d'améliorer le rendement en puissance du système PV. On va essayer de raccorder se system avec un réseau par un onduleur triphasée a deux niveau (en pont H) commandé par MLI.

Mots clé : Photovoltaïques, Hacheur, MPPT, Onduleur, Réseau électrique

الملخص :

تستخدم محولات الطاقة في العديد من المجالات وتلعب دورا هاما في مجال الكهروضوئية. هدا العمل هو دراسة عن المحولات المستخدمة في معظم الأنظمة الكهروضوئية (PV)وهي متصلة بشبكة الطاقة الكهربائية. ولقد اجرينا دراسة عامة للمولد الكهروضوئي و عمله عند اقصى قدر من الطاقة باستخدام المطبر تتحكم فيه خوارزمية(MPPT) نقطة الاستطاعة القصوى لتوليد الكهربائي من نوع تشويش و ملاحظةO&P و منظم PI (و الهدف هو تحسين كفاءة الطاقة للأنظمة الكهروضوئية .سنحاول ربط هدا النظام بشبكة التوتر المنخفض وذلك بواسطة مموج يتحكم به التباطؤ .

الكلمات الدالة: مولد كهروضوئي، المطبر، خوارزمية نقطة الاستطاعة القصوى لتوليد الكهربائي, الشبكة الكهربائية

Abstract :

The power converters are used in many areas and play an important role in photovoltaic applications. This work is a study of the converters used in most of the photovoltaic (PV) systems that are connected to the grid. We conducted a comprehensive study of the photovoltaic generator and its operation at maximum power using a boost chopper controlled by an MPPT algorithm, type P&O, the goal is to improve the power efficiency of the PV system. We will try to connect to network system with a two-level phase inverter controlled by MLI.

Key words: Photovoltaic, Chopper, MPPT, Inverter, Electrical network