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 : Commande electrique

Application de l'onduleur à z-source

Au système photovoltaïque

Présentés par :

- ***Benkaid ali Islam***
- ***Boulala Sidahmed***

Proposés et Dirigés par :

Dr : Morsli Abdelkader

Mr : Benfatah Ahmed

Promotion 2022

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier tout premièrement Allah le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience, qu'il m'a donné du ranttoutes ces longues années .A l'issue de ce travail je tiens à adresser ma reconnaissance et mes remerciements à toutes les personnes qui ont contribué, chacune à leur manière, à l'accomplissement de cette thèse. Tout d'abord, je tiens à remercier mon directeur de thèse ***Dr. Morsli Abdelkader****,* ***Dr*** *à l'Université yahia fares de medea , pour avoir d'abord proposé ce thème, son encadrement, son suivi permanent, pour tous ses encouragements et discussions tout au longde ces années et ses précieux conseils.*

Je remercie mon encadreur ***Mr. Benfateh ahmed*** *pour les consei et son encadrement, son suivi .*

Je n'oublierai pas d'exprimer mes sincères remerciements à tout le personnel du département d'électrotechnique de medea et à tous mes collègues de commande electrique .

Finalement, je tiens à exprimer mes reconnaissances à tous mes

Amis et collègues pour le soutien moral et matériel…

Dédicace

Avant tout, je tien à remercies le bon dieu, et l'unique qui m'offre le courage .

et la volonté nécessaire pour affronter les différentes de la vie, ET je tien à remercie moi pour ce travaille .

Je dédie ce modeste travail A touts les membres famille grande et petit surtout ma mère(N.A) ,mon père(mohamed BK),ma sour et mon petit frère abdel basset.

A mon collègues boulala sidehmed .qui m'a accompagné pendent le long de cette période pour réaliser ce modeste travaille A tous mes professeurs à tous les niveaux d'étude.

A tout mes amis surtout omar,tarek ,sifou,younes,loka,mohamed,walid,cherif h.a ,ahmed,ismail,chrif,hicham,zaid ……etc

A mes amis et mes collègues du promotion 2022 « 2 éme Master Commande électrique ». a tout ceux qui m'ont aidé, de prés ou de loin, même qu'il soit un mot d'encouragement et de gentillesse a tout ceux que j'aime et qui m'aimenta tous ceux qui connaissent .

BENKAID ALI ISLAM

Table des matières :

Remercîments .....

Dédias .....

Tables des matière .....

Liste des figure .....

Liste des tableaux .....

résumé .....

Introduction général .....

Chapitre I : Généralité sur les système photovoltaïque 2

I.1. Introduction **:** 3

I.2. Système photovoltaïque 3

I.2.1. Effet photovoltaïque 3

I.2.2. Description de la cellule photovoltaïque 4

I.2.3. Circuit équivalent 5

I.2.4 Les différents types de cellules solaires 7

I.2.5. Association des cellules photovoltaïques 9

I.2.6. Module photovoltaïque 10

I.2.7. Générateur photovoltaïque 11

I.2.8 Protections d'un générateur photovoltaïque 11

I.3 Classification des systèmes photovoltaïques 12

I.3.1 Système raccordé au réseau 13

I.3.2 Système PV autonome 13

I.4 Avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque 14

I.4.1 Avantages 14

I.4.2 Inconvéniens 14

I.5 Conclusion 14

Chapitre II: les commandes MPPT 15

II.1 Introduction 16

II.2 La commande MPPT 16
II.2.1 Principe de fonctionnement 16
II.2.2 les type des commande MPPT 18
II.3 La commande MPPT étudiée (p&o et réseaux de neurones artificiels) 19
II.3.1 Perturbation Et Observation (P&O, Perturb And Observe) 19
II.3.2 Le principe de commande P&O 19
II.3.3 La technique MPPT de réseaux de neurones artificiels 20
II.3.4 Principe de commande réseaux de neurones artificiels 24
II.4 Conclusion 25
Chapitre III : Les convertisseurs statiques DC-DC et DC-AC 26
III.1 Introduction 27
III.2 Convertisseur DC-DC 27
III.2.1 Convertisseur Boost (hacheur survolteur) 27
III.3 Convertisseur DC-AC 30
III.3.1 Les onduleurs 30
III.3.1.1 Définitions des onduleurs 30
III.3.1.2 Intérêt des onduleurs 31
III.3.1.3 Topologie d'onduleur 32
III.3.1.4 Principe générale de fonctionnement 33
III.3.2 les convertisseurs Z-source 34
III.3.2.1 Généralité sur les convertisseurs Z-source 34
III.3.2.2 Topologie d'un onduleur triphasé à z-source 37
III.3.2.3 Principe de fonctionnement de l'onduleur z-source 38
III.3.3 Commande de l'onduleur Zsource 43
III.3.3.1 Les méthodes de survoltage 43
III.3.3.1. A. Simple Boost (MLI simple Boot Control SBC) 43
III.3.3.1. B. Maximum Boost Control 45
III.3.3.1 C. Constant maximum Boost 47

III.3.3.2 Commande MLI classique et MLI modifiée 48
III.3.3.2 A. MLI classique 48
III.3.3.2 B. L'état Shoot-Through 49
III.3.3.2 C. MLI modifiée 50
III.4 Conclusion 51
Chapitre IV : Résultats de simulation et interprétations 52
IV.1 Introduction 53
IV.2 Les résultats de Simulation 53
IV.2.1 Les résultats de Simulation de générateur photovoltaïque 53
IV.2.2 Les résultats de Simulation de générateur photovoltaïque avec La commande MPPT **:** 57
IV.2.2.1 Perturbation Et Observation (P&O, Perturbation And Observe) 57
IV.2.2.2 réseaux de neurones artificiels 61
IV.2.2.3 Comparaison entre les résultats de Perturbation Et Observation (P&O, Perturbation And Observe) et de réseaux de neurones artificiels 65
IV.2.3 le convertisseur DC-DC (le hacheur) 66
IV.2.4 Simulation de l'installation photovoltaïque et Z-source 67
IV.3 Conclusion 70

Liste des figure :

Chapitre I :

Figure I.1 : Structure d'une cellule PV 5

Figure I.2 : Schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à une diode…… ..6

Figure I.3 : Circuit model d'une cellule photovoltaïque idéale. 7

Figure. I.4 : Les cellules monocristallines 8

Figure. I.5 : Les cellules polycristallines..... 8

Figure.I.6: Les cellules amorphes..... 9

Figure .I.7: Association de cellules PV..... 10

Figure . I.8 : Module photovoltaïque 10

Figure I.9 : Schématisation d'un GPV élémentaire avec diodes by-pass et diode anti-retour 12

Figure I.10: Classification des systèmes photovoltaïques 12

Figure I.11: Systèmes photovoltaïque autonome..... 13

Chapitre II:

Figure II.1 : Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant un panneau photovoltaïque, un convertisseurBOOST, une commande MPPT et une charge. 17

Figure II.2 : Principe de la commande MPPT 18

Figure II.3 Recherche du PPM par la méthode (P&O) 20

Figure II.4. Organigramme de la méthode P&O. 21

Figure.II.5 . Exemple d'un réseau de neurones 23

FigureII.6: Représentation d'un neurone artificiel. 24

FigureII.7: Modèle de réseaux de neurone MLP pour identification de MPP 25

Chapitre III:

Figure.III.1 : présente la structure générale du convertisseur Z-source 27

Figure .III.2 : Circuit idéal d'un convertisseur Boost 28

Figure .III.3 : Schémas équivalents du hacheur survolteur..... 28

Figure .III.4 : schéma de principe de la conversion continu-Alternative (DC-AC). 30

Figure .III.5: Schéma de Conversion DC/AC et grandeur de sortie. 31

Figure .III.6: Onduleur à deux niveaux utilisant des transistors IGBT 32

Figure .III.7: Schéma d'un onduleur usuel à 2 niveaux 32

Figure .III.8 :Séquences de fonctionnement d'un bras de l'onduleur à deux niveaux 33

Figure .III.9 : Schéma de principe de la conversion Continu - Alternative (DC – AC). 34

Figure .III.10 : onduleur avec Z-source 35

Figure III.11 : La structure générale du convertisseur Z-source 36

Figure .III.12 : Onduleur triphasé ZS 37

Figure .III.13 : Topologie d'un onduleur triphasé à structure z-source. 37

Figure .III.14 : Structure de l'onduleur Z-source. 38

Figure .III.15 : Schéma équivalent du mode 1 41

Figure .III.16: Schéma équivalent du mode 2 42

Figure .III.17: Schéma équivalent du mode 3 42

Figure .III.18 : La commande Simple Boost 44

Figure .III.19 : La commande maximum boost. 46

Figure .III.20 : La commande constant Boost. 47

Figure .III.21: commande MLI conventionnelle 49

Figure .III.22: Commande MLI modifiée 51

Chapitre IV :

Figure IV.1 :le schéma d'un générateur photovoltaïque. 53

Figure IV.2 : Schéma bloc de la simulation du panneau solaire avec 36 cellules sous 1000W/m^2. 54

Figure IV. 3: Fonction de transfert de la batterie. 54

Figure IV.4: Le courant de PV 55

Figure IV.5: La puissance de PV 55

Figure IV.6 : La tension à la sortie de PV 56

Figure IV.7: Caractéristique I PV(V) dans les conditions standard. 56

Figure IV.8: Caractéristique P PV(V) dans les conditions standard. 57

Figure IV.9 : Schéma sous SIMULINK d'un générateur PV avec La commande MPPT (P&O, Perturb And Observe) 58

Figure IV.10 : Schéma sous SIMULINK de controleur P&O. 58

Figure IV.11: Le courant de pv avec commande mppt (P&O et hacheur boost)..... 59

Figure IV.12 : La tension de PV avec commande mppt (P&O). 60

Figure IV.13 : La puissance de PV avec commande mppt (P&O) 60

Figure IV.14 : Caractéristique P PV(V) dans les conditions standard de PV avec commande mppt (P&O). 61

Figure IV.16 : Schéma sous SIMULINK d'un générateur PV avec La commande MPPT (réseaux de neurones artificiels)..... 62

Figuire IV.17 : Le courant de PV avec commande mppt (réseaux de neurones artificiel . 62

Figuire IV.18 : La puissance de PV avec commande mppt (réseaux de neurones artificiels) 63

Figuire IV.19: La tension de PV avec commande mppt (réseaux de neurones artificiels). 63

Figure IV.20 : Caractéristique P PV(V) dans les conditions standard de PV avec commande mppt (réseaux de neurones artificiels)..... 64

Figure IV.21: Caractéristique I PV(V) dans les conditions standard de PV avec commande mppt (réseaux de neurones artificiels). 64

Figure IV.22 : Caractéristique P PV(V) dans les conditions standard de PV avec commande mppt (P&O, Perturbation And Observe et réseaux de neurones artificiels). 65

Figure IV.23 : zoom en Caractéristique P PV(V) dans les conditions standard de PV avec commande mppt (P&O, Perturbation And Observe et réseaux de neurones artificiels)..... 66

Figure IV.24: la tension a l'entré et la tension sortie de l'hacheur boost 66

Figure IV.25 : le schéma d'un générateur photovoltaïque avec onduleur z-source sous SIMILINK (matlab). 67

Figure IV.26 : Modulation..... 68

Figure IV.27 : Les commutateur (S1,S2,S3,S4,S5,S6) 68

Figure IV.28 : tension de la sortie z-source..... 69

Figure IV.29 : tension de la sortie de londuleur ligne-ligne 69

Figure IV.30 : La tension générale à la sortie de l'onduleur z-source avec filtre 70

Liste des tableau ;

Tableau III.1 : États possibles de l'onduleur usuel à 2 niveaux 33

TableauIII.2: Les états utilisés avec la commande Z-source 39

résumé :

Ce travail présente une étude d'un onduleur Z-source connecté à un générateur PV. Cet onduleur assure les deux fonctions d'un hacheur booster et d'un onduleur en un seul étage. En outre, une méthode de contrôle prédictif a été utilisée pour contrôler l'onduleur à Z-source par l'insertion d'un état de court-circuit avec le réseau à Z-source . De plus, le schéma de commande développé a intégré une commande MPPT perturbation et observation (P&O) ou commande réseaux de neurones artificiels pour obtenir un rendement optimal de la puissance du générateur photovoltaïque (GPV). Le système global est simulé à l'aide du logiciel MATLAB/Simulink afin d'évaluer le schéma de commande suggéré basé sur MPC. Les résultats des simulations obtenues montrent que le système photovoltaïque conne à l'aide de l'onduleur à Z-source commandé le schéma suggéré offre des bonnes performances selon les normes internationales .

Mots clés :

Photovoltaïque , convertisseur , MPPT, onduleur z-source , modulation de largeur d'implusion

Abstract :

This work presents a study of a Z-source inverter connected to a PV generator. This inverter performs the two functions of a booster chopper and an inverter in a single stage. Also, a predictive control method was used to control the Z-source inverter by inserting a short-circuit condition with the Z-source grid. In addition, the developed control scheme has integrated a disturbance and observation (P&O) MPPT control or artificial neural network control to obtain an optimal yield of the power of the photovoltaic generator (GPV). The overall system is simulated using MATLAB/Simulink software to evaluate the suggested control scheme based on MPC. The results of the simulations obtained show that the photovoltaic system connected using the Z-source inverter controlled the suggested scheme offers good performance according to international standards.

Key words :

Photovoltaic, converter, MPPT, z-source inverter, pulse width modulation

ملخص:

يقدم هذا العمل دراسة لمحول Z-source العاكس المتصل بمولد الكهروضوئية. يقوم هذا العاكس بوظيفتين للمروحية المعززة والعاكس في مرحلة واحدة. بالإضافة إلى ذلك ، تم استخدام طريقة تحكم تنبؤية للتحكم في العاكسZ-source عن طريق إدخال حالة ماس كهربائى مع شبكة .Z-source بالإضافة إلى ذلك ، قام مخطط التحكم المطور بدمج عنصر تحكم MPPTفي الاضطراب والمراقبة (P&O) أو التحكم في الشبكة العصبية الاصطناعية للحصول على العائد الأمثل من طاقة

المولد الكهروضوئي .(GPV) يتم محاكاة النظام العام باستخدام برنامج MATLAB / Simulink لتقييم مخطط التحكم المقترح بناءً على .MPC تظهر نتائج عمليات المحاكاة التي تم الحصول عليها أن النظام الكهروضوئي المتصل باستخدام عاكس Z-source يتحكم في المخطط المقترح ويقدم أداءً جيدًا وفقًا للمعايير الدولية.

كلمات مفتاحية :

كهروضوئية ، محول ، عاكس المصدر z ،تعديل عرض النبض .

LISTE DES ABREVIATIONS :

AC: Courant Alternatif

DC: Courant Continu

IGBT: Insulated Gate Bipolar Transistor

GPV: Générateur Photovoltaïque

SBC: Simple Boost

MBC: Maximum Boost Control

MCC: Maximum Constant Boost Control

MLI: Modulation de la Largeur d‟Impulsions

MPPT: Maximum Power Point Tracking

NOCT: Nominal Operating Cell Temperature

P&O: Perturbation et Observation

PV: Photovoltaïque

Liste des symboles :

S : Surface du module photovoltaïque (m^2).

Rp : Résistances parallèle shunt. (Ω)

Rsh: Résistance série (Ω).

Es : L'éclairement de référence (1000 W/m2).

T : La température de référence (298 °K).

α : Le coefficient de courant en fonction de température (A/°C).

Ns : Nombre de modules dans le panneau en série.

Np : Nombre de modules dans le panneau en parallèle.

Pmax : La puissance maximale produite PV (W).

Vmax : Tension qui correspond à la puissance maximale (V).

Imax: Courant qui correspond à la puissance maximale (A).

Ta : Température ambiante (C°)

Tc : Température de la cellule (C°)

R :résistance

Ts : période de commutation de l'hacheur(s)

D, α : rapport cyclique (s)

r : profondeur de modulation

b :indice d'amplification de l'étage continu

Vi : la tension à la sortie de convertisseur z-source(v)

VM ou Vs: la tension à la sortie de l'onduleur(v)

VL : la tension au borne de l'inductance (v)

VC : la tension au borne de capacité (v)

L : inductance

C : capacité

G : gain

Introduction Générale :

Introduction Générale :

De nos jours, le monde dépend fortement des sources d'énergie non renouvelables telles que le charbon, le pétrole et le gaz naturel. Parallèlement, la production d'énergie est un défi majeur dans les années à venir en raison des besoins énergétiques croissants, ce qui entraîne une augmentation de la pollution de l'environnement causée par les sources précédentes. Comme solution à cette crise, le monde a commencé à utiliser un autre type d'énergie appelée énergies renouvelables, par exemple l'énergie éolienne, l'énergie solaire et la biomasse. Parce qu'il se caractérise par des sources illimitées et n'affecte pas négativement l'environnement .

Parmi toutes les sources d'énergie renouvelables, l'énergie solaire photovoltaïque (PV) devient de plus en plus compétitive par rapport aux sources d'énergie conventionnelles. Où, l'énergie photovoltaïque connectée au réseau est l'une des sources d'énergie renouvelable les plus dynamiques et les plus prometteuses au monde .

Bien que le cœur d'un système PV soit la cellule PV (également connue sous le nom de générateur PV), l'électronique de puissance joue un rôle fondamental en tant que technologie habilitante pour un contrôle efficace du système PV et une interface pour transférer la puissance PV générée vers le réseau. Les fonctions de l'étage du convertisseur de puissance d'un système PV comprennent le suivi du point de puissance maximale (MPPT), la conversion de puissance DC-AC, la synchronisation du réseau, la conformité au code de réseau (qualité de la puissance), le contrôle de la puissance active et réactive .

Ce travail est organisé en quatre chapitres :

- Le premier chapitre est consacré aux systèmes PV,, ainsi qu'aux topologies d'interface électronique de puissance pour ces systèmes et aux objectifs de contrôle de ceux-ci.
- Dans le deuxième chapitre, une présentation générale des deux méthodes de poursuite du point de puissance maximale les plus répandues.
- Dans la troisième chapitre nous allons étudier le principe de fonctionnement de convertisseur Z-source et des quelques types convertisseurs DC-DC ,DC-AC, utilisés dans les systèmes photovoltaïques.
- le dernier chapitre Pour l'analyse et la discussion des résultats de sumilation

Enfin, une conclusion générale et des perspectives concluent ce travail.

Chapitre I : Généralité sur les système photovoltaïque

I.1. Introduction :

Tous les jours, le soleil fournit de l'énergie à la Terre. Les gants peuvent utiliser cette énergie gratuite grâce à une technologie appelée photovoltaïque, L'élément de base de cette technologie est la cellule solaire.

Une cellule solaire est un composant électronique qui génère un courant électrique lorsque on l'expose à la linière, (cet effet est appelé l'effet photovoltaïque) Le courant obtenu est un courant continu et la tension obtenue est de l'ordre de 0,5 V. Les cellules photovoltaïques sont constituées de semi-conducteurs à base de silicium (Si), de sulfure de cadmium (CdS) ou de tellurure de cadmium (CdTe).

Les modules ou panneaux photovoltaïques peuvent s'avérer une source d'énergie qui est sûre, fiable, sans entretien et non polluante pendant très longtemps. La majorité des modules sur le marché aujourd'hui sont pourvus de garanties de plus de 20 ans, et ils fonctionneront bien au-delà de cette période.

Des millions de systèmes ont été installés dans le monde entier, de puissances différentes allant d'une fraction d'un watt à plusieurs mégawatts. Pour de nombreuses applications, les systèmes solaires électriques sont non seulement rentables, mais ils peuvent aussi représenter l'option la moins coûteuse.

I.2. Système photovoltaïque :

I.2.1. Effet photovoltaïque :

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

Lorsqu'un matériau semi-conducteur est exposé à la lumière du soleil, les atomes exposés au rayonnement sont "bombardés" par les photons constituants la lumière; sous l'action de ce bombardement, les électrons des couches électroniques supérieures (appelés électrons des couches de valence) ont tendance à être "arrachés":

Si l'électron revient à son état initial, l'agitation de l'électron se traduit par un échauffement du matériau. L'énergie cinétique du photon est transformée en énergie thermique.

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

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

L'effet photovoltaïque, c'est-à-dire la production d'électricité directement de la lumière, fut observée la première fois, en 1839, par le physicien français Edmond Becquerel. Toute fois, ce n'est qu'au cours des années 1950 que les chercheurs des laboratoires Bell, aux Etats-Unis, parvinrent à fabriquer la première cellule photovoltaïque, l'élément primaire d'un système photovoltaïque [1].

I.2.2. Description de la cellule photovoltaïque :

On observe que la cellule photovoltaïque est fabriquée à partir de matériaux appelés semi-conducteur. Plus de 90% des cellules photovoltaïques sont en Silicium. De plus, cette cellule est composée de deux couches.

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

-d'une fine couche semi-conductrice (matériau possédant une bande interdite, qui joue le rôle de barrière d'énergie que les électrons ne peuvent franchir sans une excitation extérieure, et dont il est possible de faire varier les propriétés électroniques) tel que le silicium, qui est un matériau présentant une conductivité électrique relativement bonne.

-d'une couche antireflet permettant une pénétration maximale des rayons solaires.

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

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

La cellule photovoltaïque se compose comme ci-dessous :

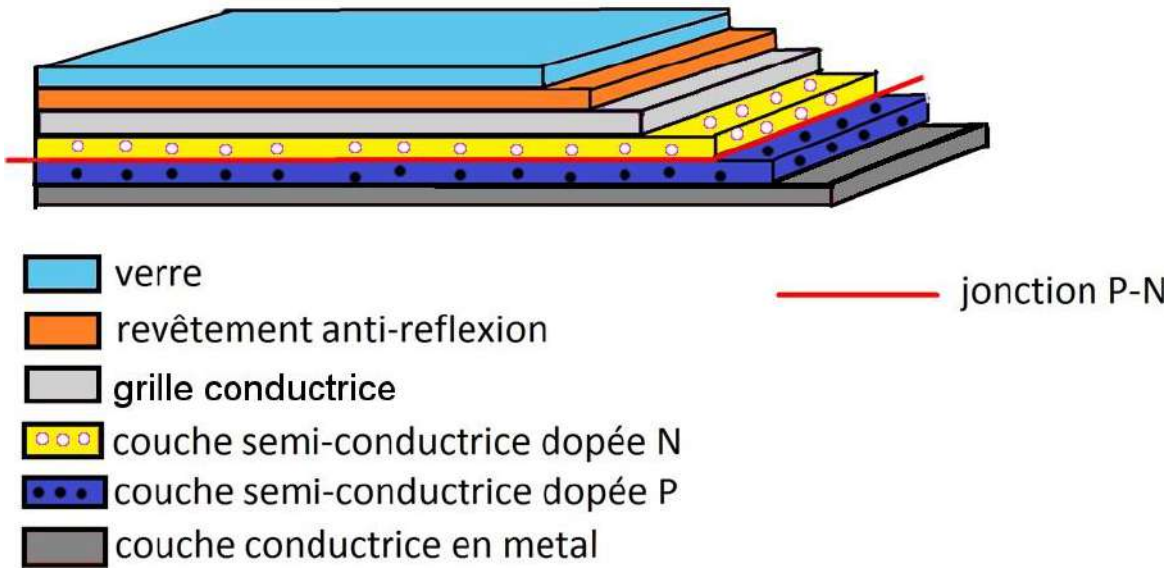


Figure I.1 : Structure d'une cellule PV

I.2.3. Circuit équivalent :

Le fonctionnement d'un module photovoltaïque est décrit par le modèle « standard » à une diode, pour une seule cellule PV, est généralisé à un module PV en le considérant comme un ensemble de cellules identiques branchées en série ou en parallèle Dans la littérature, une cellule photovoltaïque est souvent présentée comme un générateur de courant électrique dont le comportement est équivalent à une source de courant shuntée par une diode. Pour tenir compte des phénomènes physiques au niveau de la cellule, le modèle est complété par deux résistances Rs et en Rsh comme le montre le schéma équivalent de la figure (I.2)

la résistance série est la résistance interne de la cellule; elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles la résistance shunt est due à un courant de fuite au niveau de la jonction elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée.[2]

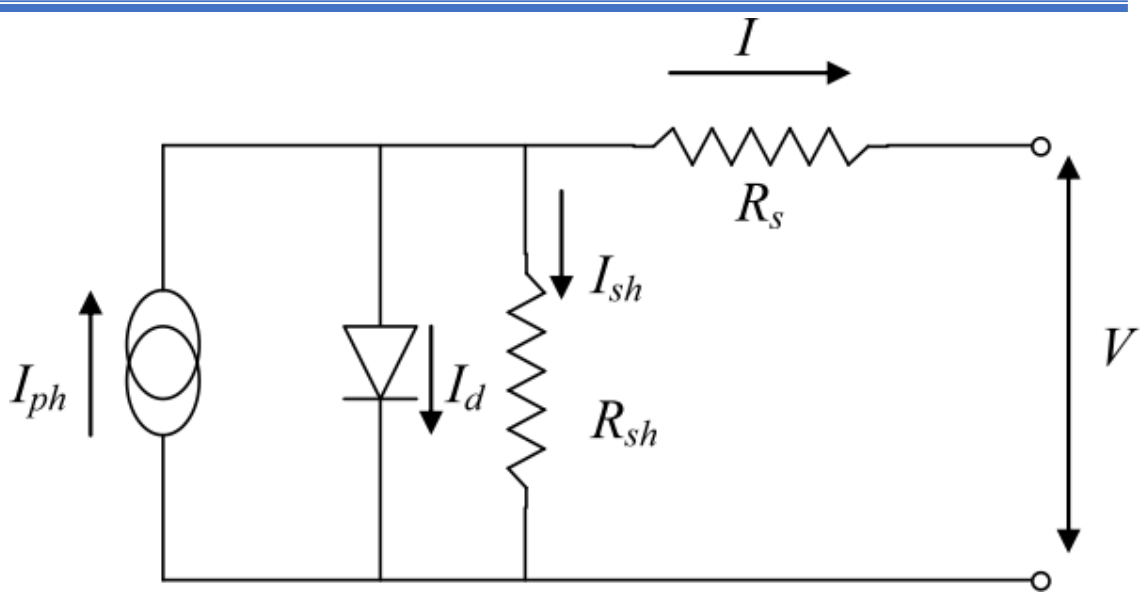


Figure I.2 : Schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à une diode.

La cellule photovoltaïque est un dispositif semiconducteur qui se comporte comme une source de courant lorsque conduit par un flux de rayonnement solaire du soleil. Le champ électrique existe en permanence dans les carrefours ou inhomogénéités dans les cellules solaires qui peuvent être qualifiées de silicium des dispositifs à semi-jonction. Une jonction de dispositif semi-conducteur silicium contient une jonction P-N similaire à celle d'une diode, mais dans une cellule solaire, il existe une plus grande surface. La caractéristique électrique d'une diode idéale, inspirée par le Shockley est donnée par l'équation (I.1), où le courant produit est appelé "courant d'obscurité" ID [51] :

$$ID = Is\left(e^{\frac{Vc.q}{k.Tck}} - 1\right) \quad \text{(I.1)}$$

où : ID : courant d'obscurité (A) ;

IS : courant de saturation de la diode (A) ;

VC : tension de la cellule (V) ;

q = 1.6 * 10-19 (Cb) ;

k = 1.38 * 10-23 (j/K) ;

TCK = température de la cellule (°K).

Le courant dans la cellule produit par l'irradiation solaire est appelée "photo courant" IPh. Sa valeur reste la même quelle que soit la tension externe et, par conséquent, il peut être mesuré par le courant de court-circuit (ICC = IPh).

Ce courant varie de façon linéaire avec l'intensité du rayonnement solaire. Le courant est alors décrite comme la différence entre le courant d'obscurité et le photocourant. Si la

convention de signes de courant est inversée pour décrire le courant qui est produit par une cellule éclairée (IC), alors l'équation de la cellule peut être écrite comme indiqué en équation (I.2) :

$$Ic = Iph - Is\left(e^{\frac{Vc.q}{k.Tck}} - 1\right) \quad \text{(I.2)}$$

où : IC : courant de la cellule (A) ;

IPh : photocourant (A) ;

G : rayonnement solaire (W/m2) ;

TA : température ambiante (°C) ;

$I_I = I_I(G)$;

$V_C = V_C$ (G, TA).

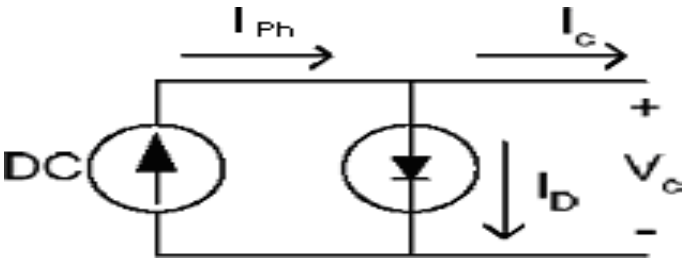


Figure I.3 : Circuit model d'une cellule photovoltaïque idéale [51].

I.2.4 Les différents types de cellules solaires :

Ils existent trois principaux types de cellules :

a) Les cellules monocristallines :

Ces cellules sont constituées de cristaux très purs obtenus par un contrôle strict et progressif du refroidissement du silicium [3]..

•**Rendement :** 12-19 % (On obtient ainsi une puissance de 120 à 190 Wc/m2)

•**Avantage :** Très bon rendement.

•**Inconvénients :** Coût élevé.

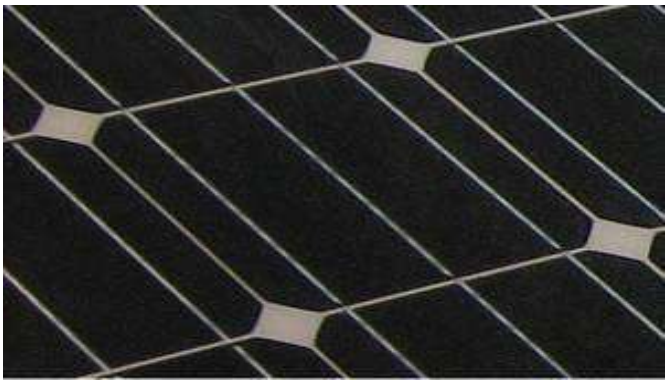


Figure. I.4 : Les cellules monocristallines

b) Les cellules polycristallines :

Le refroidissement du silicium en fusion est effectué dans des creusets parallélépipédiques à fond plat. Par cette technique, des cristaux orientés de manière irrégulière se forment. Cela donne l'aspect caractéristique de ces cellules bleutées présentant des motifs générés par les cristaux.

•**Rendement :** 11-15 % (On obtient ainsi une puissance de 110 à 150 Wc/m²) Ces cellules restent les plus utilisées du fait du rapport performance/prix plus intéressant que celui de leurs homologues monocristallins.

•**Avantage** : Rapport performance/prix.

•**Inconvénient** : Rendement faible sous éclairement réduit. [3].



Figure. I.5 : Les cellules polycristallines

c) Les cellules amorphes :

Avantage :

•Moins coûteux que la première génération puisqu'elle consomme moins de matériau semi-

conducteur.

•Moins polluant à la fabrication.

•Fonctionnent avec éclairement faible.

Inconvénients :

•Rendement global plus faible.

•Rendement moindre sous éclairement direct.

•Diminution de performance avec le temps plus importante. [3].



Figure.I.6: Les cellules amorphes

Il existe d'autres types de cellules "couches minces" : tellurure de cadmium (CdTe), le sélénium de cuivre indium (CIS),...Le CdTe présente de bonnes performances mais la toxicité du cadmium reste problématique pour sa production.

Les modules CIS atteignent, eux, un rendement de l'ordre de 17 % en laboratoire et jusqu'à 11 % pour les cellules commercialisées.

I.2.5. Association des cellules photovoltaïques :

La cellule photovoltaïque ou encore photopile est l'élément constitutif des modules photovoltaïques. Dans les conditions standard STC, la puissance maximale pour une cellule au silicium de 10 cm² serait d'environ 1.25 W. La cellule photovoltaïque élémentaire constitue donc un générateur électrique de très faible puissance insuffisant pour la plupart des applications domestiques ou industrielles. Les générateurs photovoltaïques sont, de ce fait, réalisés par association, en série et/ou en parallèle d'un grand nombre de cellules élémentaires Ces groupements sont appelés modules, puis panneaux. La figure I.6 illustre un exemple d'association de cellule PV afin d'obtenir un panneau photovoltaïque.

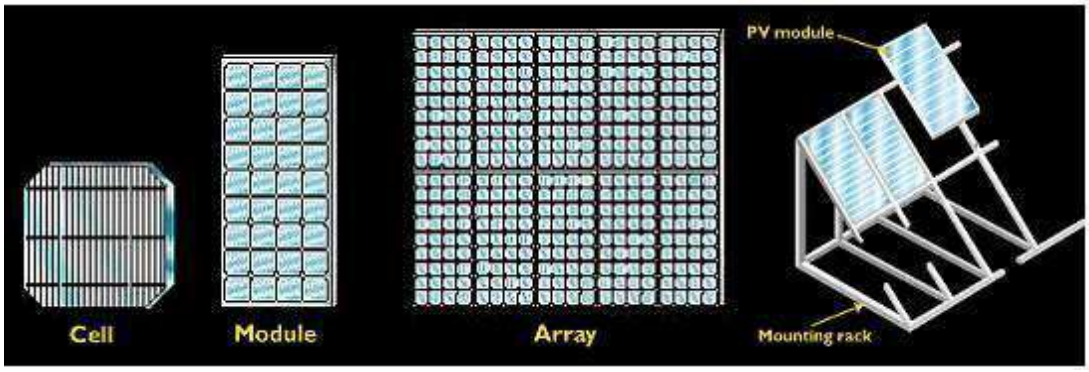


Figure .I.7: Association de cellules PV

Une cellule photovoltaïque (PV) fonctionne selon le phénomène physique appelé «effet photovoltaïque» établissant une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée dépend de plusieurs facteurs, elle peut aller de 0,3 V à 0,7 V en fonction du matériau utilisé, de sa disposition ainsi que de la température et du vieillissement de la cellule Si une cellule n'est pas connectée à un circuit extérieur elle présente une tension nommée tension de circuit ouvert (VOC) fortement dépendante de la température ambiante notée Ta. D'autre part, le courant maximal PV est atteint lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées. On parle alors de courant de court-circuit noté ICC dépendant fortement du niveau d'éclairement noté G [3].

I.2.6. Module photovoltaïque :

Le composant le plus crucial de toute installation PV est le module photovoltaïque, qui se compose de cellules solaires interconnectées. Ces modules sont raccordés entre eux pour former des champs de manière à pouvoir satisfaire différents niveaux de besoins en énergie. La figure I.7 représente un module photovoltaïque. Des modules de plus en plus puissant sont disponibles sur le marché, en particulier pour la connexion du réseau, mais il y'a tout de même une limite liée au poids et à la manipulation.[4]



Figure . I.8 : Module photovoltaïque.

I.2.7. Générateur photovoltaïque :

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière.

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 un volt .

Pour produire plus de puissance, plusieurs cellules doivent être assemblées afin de créer un module ou un champ photovoltaïque. La connexion en série des cellules permet d'augmenter facilement la tension de l'ensemble, tandis que la mise en parallèle permet d'accroitre le courant. Le câblage série/parallèle est donc utilisé pour obtenir globalement un générateur PV aux caractéristiques souhaitées [4].

I.2.8 Protections classiques d'un générateur photovoltaïque :

Lorsque nous concevons une installation photovoltaïque, nous devons assurer la protection électrique de cette installation afin d'augmenter sa durée de vie en évitant notamment des pannes destructrices liées à l'association des cellules et de leur fonctionnement en cas d'ombrage.

Pour cela, deux types de protections sont classiquement utilisés dans les installations actuelles [5] :

la protection en cas de connexion en parallèle de modules PV pour éviter les courants négatifs dans les GPV (diode anti-retour).

la protection lors de la mise en série de modules PV permettant de ne pas perdre la totalité de la chaîne (diode by-pass) et éviter les points chauds.

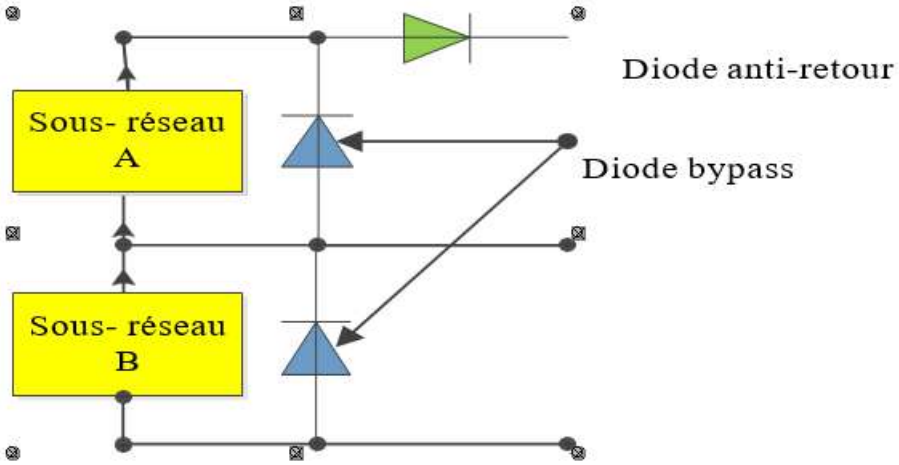


Figure I.9 : Schématisation d'un GPV élémentaire avec diodes by-pass et diode anti-retour [5].

I.3. Classification des systèmes photovoltaïques :

On appelle système photovoltaïque l'ensemble des composants nécessaires à l'alimentation d'une application en toute fiabilité [6]. Les systèmes PV peuvent être classifiés en deux grandes catégories: autonomes, et interconnectés (raccordés) au réseau. Ces catégories peuvent fonctionnellement être subdivisées comme suit (Figure. I.9) [7]:

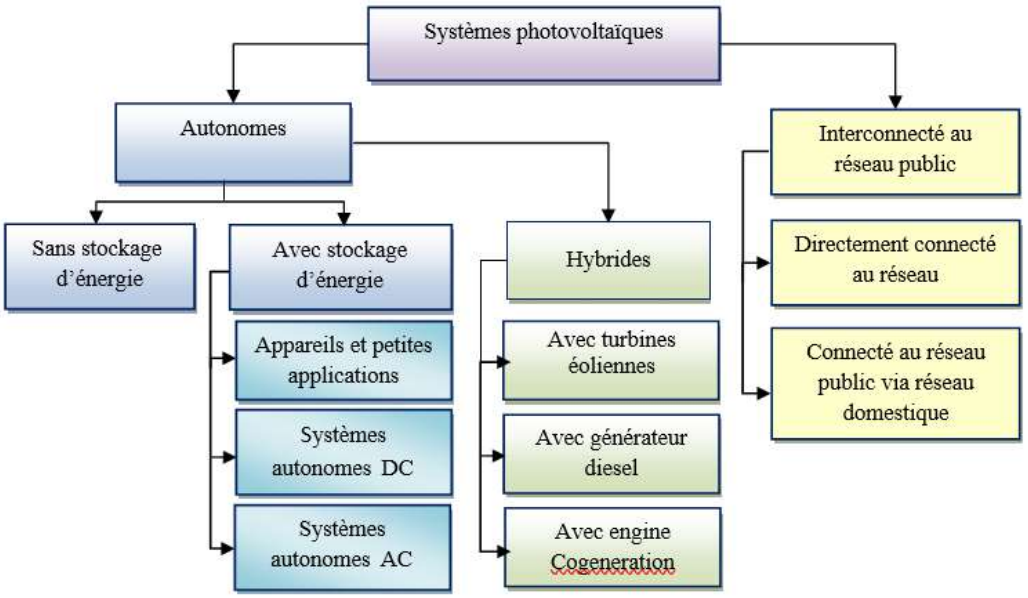


Figure. I.10 : Classification des systèmes photovoltaïques [7].

I.3.1 Systèmes PV raccordés au réseau :

Un tel système s'installe sur un site raccordé au réseau de distribution d'électricité (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.

L'énorme avantage de cette solution est l'absence de batterie. On ne stocke plus l'énergie, on l'injecte directement dans le réseau local ou national. Et ceci sans limite quantitative, donc toute l'énergie est récupérée. L'énorme avantage de cette solution, c'est que le réseau joue le rôle de « stockage illimité », et donc que toute l'énergie est récupérée. Il y a un compteur qui tourne dans un sens pour la consommation, et un autre dans l'autre sens pour la production. Mais il faut tout de même convertir le courant continu des panneaux en alternatif à travers un convertisseur DC-AC (onduleur), et celui-ci doit être homologué par la compagnie d'électricité qui va recevoir ce courant car il doit respecter des normes sur sa qualité « sinusoïdale » [6].

I.3.2 Systèmes PV autonomes :

L'installation photovoltaïque autonome produit de l'électricité pour un bâtiment ou un autre consommateur qui n'est pas relie au réseau, La plupart de ces installation alimentent des sites éloignes de tout réseau public ou des instruments isoles (comme des relais de télécommunication bouée de signalisation maritime, signalisation autoroutière …). Pour une utilisation en courant continu, un régulateur électronique assure la charge d'une batterie d'accumulateurs (généralement 12V pour la petite installation), il permet d'arrêter la charge des batteries lorsque celles-ci sont complètement chargées et de couper le courant dans le circuit de consommation avant que les batteries ne soient complètement déchargées. Les batteries stockent l'énergie produit par le champ photovoltaïque pour la restituer à la demande, Les batteries les plus utilisées sont au plomb, en raison de leur faible cout et de la simplicité de leur mise en œuvre. [8]

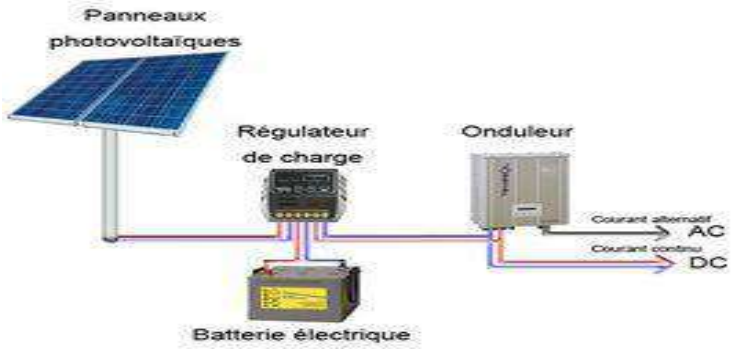


Figure. I.11: Systèmes photovoltaïque autonome

I.4. Avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque :

I.4.1 Avantages :

-Ressource gratuite et énorme potentiel réparti sur la terre

-Moyen décentralisé de production, autonomie

-Grande fiabilité et peu d'entretien(pas de pièces mobiles)

-Pas de pollution durant l'utilisation

-Grande souplesse de production, du Milliwatt au Mégawatt [9].

I.4.2 Inconvénients :

-La fabrication des panneaux photovoltaïques relèvent de la haute technologie demandant énormément de recherche et développement et donc des investissements coûteux.

-Les rendements des panneaux photovoltaïques sont encore faibles.

-Nécessite un système d'appoint (batteries) pour les installations domestiques.

-Le coût d'investissement sur une installation photovoltaïque est cher[42].

I.5 Conclusion :

Dans ce chapitre présente d'une manière générale les systèmes photovoltaïques et leurs composants .Et on a présenté est une modélisation détaillée et la simulation de la cellule PV et le module. Il est implémenté sous MATLAB /Environnement Simulink; le logiciel le plus utilisé par les chercheurs et les ingénieurs. Ce modèle est d'abord rédigé conformément à les principes fondamentaux des semi-conducteurs et de la cellule photovoltaïque et es Caractéristiques du générateur photovoltaïque GPV avec ses performances. Ainsi, l'influence de quelques paramètres sur ses caractéristiques. Ce qui permet d'introduire les méthodes de poursuite de point de puissance maximale(MPPT), chose qu'on va présenter dans le deuxième chapitre.

Chapitre II: les commandes MPPT

II.1 Introduction :

Les cellules photovoltaïques sont utilisées pour fournir de l'énergie dans de nombreuses applications électriques. Pour obtenir la puissance maximale du panneau solaire, l'algorithme de poursuite du point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking : MPPT) est utilisé pour contrôler les variations de la caractéristique courant-tension des cellules. A noter que la caractéristique d'une cellule est affectée par l'éclairement et la température.

Notre système doit donc pouvoir évoluer, rapidement et efficacement, en fonction des changements d'illuminations et variation du point de puissance maximale (Maximum Power Point : MPP) [18]. Une possibilité aurait été de fixer un point de fonctionnement, en abaissant la tension du panneau et dans un même temps en augmentant le courant. Or ceci n'est plus valable lorsque le point de puissance maximale change. Ainsi le système MPPT doit suivre le point de fonctionnement optimal du panneau [19].

Dans le domaine de la conversion d'énergie, la commande MPPT contrôle le convertisseur DC-DC assurant l'interface de puissance du générateur photovoltaïque et la charge. Cette commande permet au générateur d'énergie de fournir une puissance maximale [20].

Dans ce contexte plusieurs méthodes de poursuite et algorithmes ont été mises en application, chacune présente des avantages et des inconvénients. Ce chapitre donne une présentation générale des deux méthodes de poursuite du point de puissance maximale les plus répandues.

II.2 Commande MPPT :

La puissance électrique produite par un générateur photovoltaïque dépend fortement de l'ensoleillement et à un degré moindre de la température des cellules. Les panneaux photovoltaïques ne peuvent fournir une puissance maximale que pour une tension particulière et un courant bien déterminé. À cet effet, un dispositif de contrôle devra être intégré dans le circuit de commande de l'étage d'adaptation (convertisseur boost). Ce dernier doit être capable de faire fonctionner le panneau PV à sa puissance maximale [10].

Les GPV sont utilisés pour fournir de l'énergie à certaines applications électriques. Pour obtenir la puissance maximale du GPV, la technique MPPT (Maximum Power Point Tracking) est utilisée pour contrôler les variations des caractéristiques courant-tension (I-V) des cellules solaires [11].

Le principe de la MPPT est d'ajuster la tension (ou le courant) réels de fonctionnement du GPV de façon à ce que la puissance réelle s'approche le plus possible, de la valeur optimal pmax [12].

Le problème est l'obtention du MPP et l'adaptation de la tension du GPV à celle de la charge. La MPPT est donc utilisée pour les objectifs suivants :

•Forcer le système à fonctionner au voisinage du MPP malgré les changements de l'environnement.

•Fournir un bon rendement de conversion.

•Maintenir la poursuite dans une large gamme de variation des conditions de l'environnement.

•Fournir une interface en sortie compatible avec le besoin de chargement de la charge.

En Autre, le suivi du point MPP est essentiel pour la réussite de l'installation d'un système PV car il détermine la quantité maximale d'énergie qui peut être injectée dans le réseau ou bien utilisée directement dans les sites isolés par les convertisseurs photovoltaïques. Les algorithmes MPPT varient entre classique comme la technique perturbation et observation (P&O) jusqu'aux techniques intelligentes basées sur la logique floue et les réseaux neuronaux. Les algorithmes les plus utilisés dans la littérature sont présentés dans les paragraphes suivants.

II.2.1 Principe De La Commande MPPT :

Par définition, une commande MPPT, associée à un étage intermédiaire d'adaptation,

permet de faire fonctionner un GPV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quel que soit les conditions météorologiques (température et irradiation), la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum (VPPM et IPPM). La chaîne de conversion photovoltaïque sera optimisée à travers un convertisseur statique (CS) commandé par une MPPT [13]. Il peut être représenté par le schéma de la Figure II.1

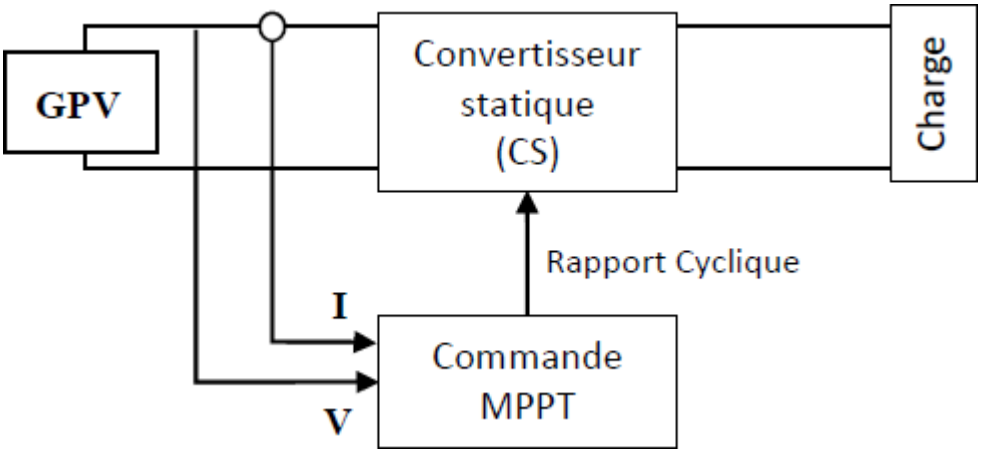


Figure II.1 : Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant un panneau photovoltaïque, un convertisseurBOOST, une commande MPPT et une charge.

La commande MPPT fait varier le rapport cyclique du convertisseur statique (CS), à l'aide d'un signal électrique approprié, pour tirer le maximum de puissance que le GPV peut fournir. L'algorithme MPPT peut être plus ou moins compliqué pour rechercher le MPP. En général, il est basé sur la variation du rapport cyclique du CS en fonction de l'évolution des paramètres d'entrée de ce dernier (I et V et par conséquent de la puissance du GPV) jusqu'à se placer sur le MPP. [14]

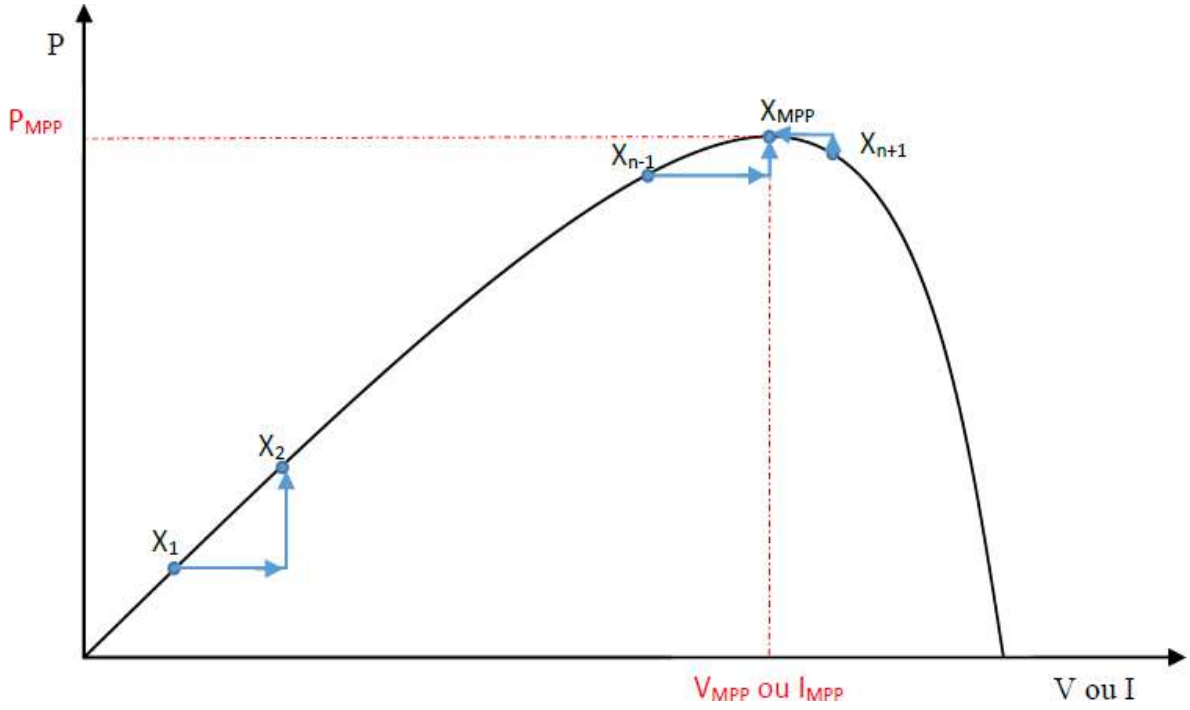


Figure II.2 : Principe de la commande MPPT

II.2.2 les types des Algorithmes des commande MPPT :

- Approche de la Tension Constante (CV, Constant Voltage)
- Approche Du Courant Constant (Constant Current)
- Perturbation Et Observation (P&O, Perturb And Observe)
- Conductance Incrémentale (IncCond, Incremental Conductance)
- La Commande MPPT Flou
- Les techniques MPPT de réseaux de neurones artificiels

Il existe dans la littérature d'autres algorithmes MPPT plus complexes qui font parfois appel àdes techniques nouvelles. On peut citer

- méthode de look-up table
- les algorithmes d'identification en temps réel du MPP

- Méthode de β
- l'algorithme de la capacité parasite (Parasitic Capacitance)
- La méthode de balayage du courant (Current Sweep)

II.3 La commande MPPT étudiée (p&o et réseaux de neurones artificiels) :

II.3.1 Perturbation Et Observation (P&O, Perturb And Observe) :

C'est l'algorithme de poursuite du PPM le plus utilisé, et comme son nom l'indique, il est basé sur la perturbation du système par l'augmentation ou la diminution de Vre$f$ ou en agissant directement sur le rapport cyclique du convertisseur DC-DC, puis l'observation de l'effet sur la puissance de sortie du panneau. Si la valeur de la puissance actuelle P(k) du panneau est supérieure à la valeur précédente P (k-1) alors on garde la même direction de la perturbation précédente sinon on inverse la perturbation du cycle précédent. La figure II.4 donne l'organigramme de cet algorithme.

II.3.2 Le principe de commande P&O :

Le principe de commande P&O consiste à provoquer une perturbation de faible valeur sur la tension VPV, ce qui engendre une variation de la puissance [40]. Figure II.3 montre qu'on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension Vpv engendre un accroissement de la puissance Ppv, cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM. Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le PPM. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique P(V), il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié

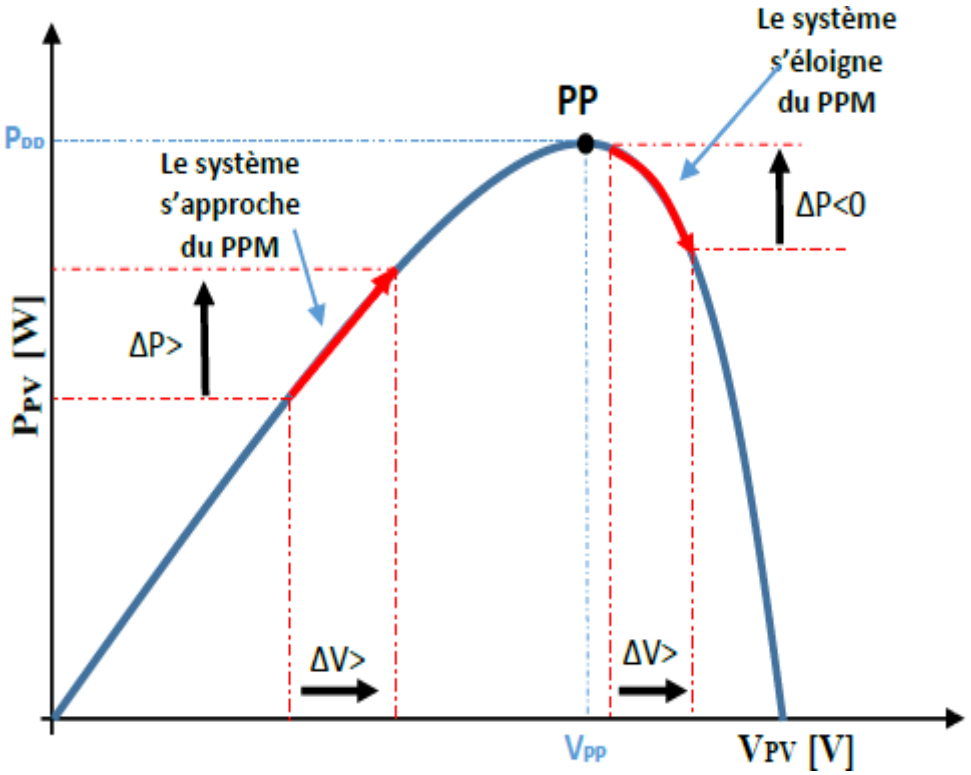


Figure II.3 : Recherche du PPM par la méthode (P&O)

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 du pas d'une perturbation simple.

•***Si*** la largeur du pas est grande, l'algorithme MPPT répondra rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement, mais les pertes seront accrues dans les conditions stables ou lentement changeantes [15].

•***Si*** la largeur du pas 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.

L'inconvénient de la méthode P&O est lorsqu'une augmentation brutale de l'ensoleillement est produite on aura une augmentation de la puissance du panneau, l'algorithme précédent réagit comme si cette augmentation est produite par l'effet de perturbation précédente, alors il continue dans la même direction qui est une mauvaise direction, ce qu'il éloigne du vrai point de puissance maximale.

Ce processus continu jusqu'à la stabilité de l'ensoleillement où il revient au vrai point de puissance maximale. Ceci cause un retard de réponse lors des changements soudains des

conditions de fonctionnement et des pertes de puissance [16].

•Si la largeur du pas est grande, l'algorithme du MPPT répondra rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement, mais les pertes seront accrues relativement aux conditions stables ou lentement changeantes.

•Si la largeur du pas est très petite les pertes dans les conditions de stabilité ou lentement changeantes seront réduites, mais le système ne pourra plus suivre les changements rapides de la température ou de l'insolation.

La valeur pour la largeur idéale du pas ΔD dépend du système, elle doit être déterminée expérimentalement.

Le diagramme de l'algorithme de cette méthode est représenté sur la figure 3.15. Cette méthode fournit un algorithme simple à la mise en œuvre [17].

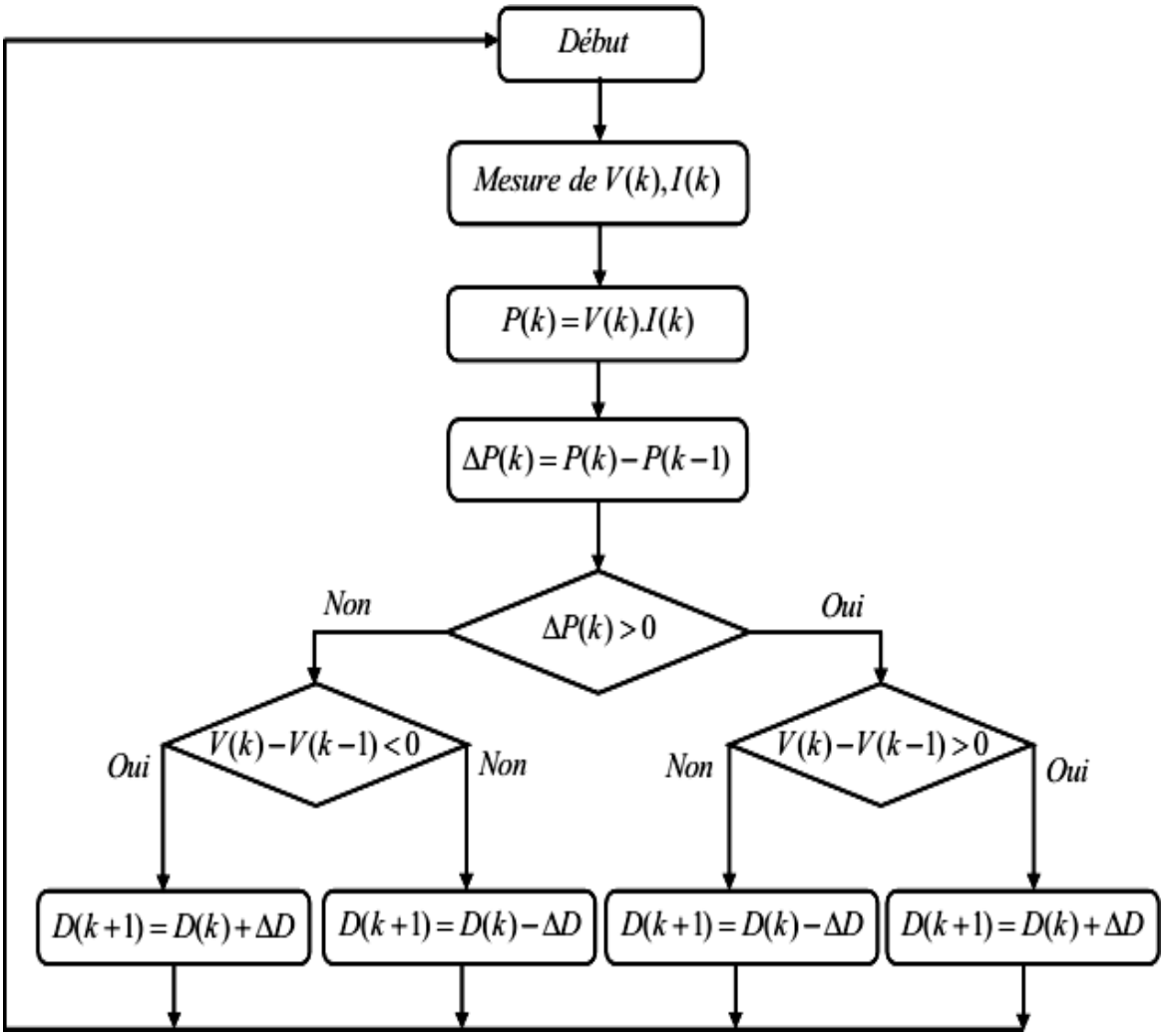


Figure II.4 : Organigramme de la méthode P&O.

On peut conclure les cas possibles d'après la figure 3.15 comme suit :

•**Si** $\Delta P = 0$, la tension pour l'échantillon suivant $V(k+1)$ ne sera pas modifiée puisque le système fonctionne au MPP;

•**Si** $\Delta P > 0$ et $\Delta V > 0$ $V(k)$ est sur la gauche du MPP et le $V(k+1)$

sera situé sur un point avec une valeur de tension plus élevée de façon à atteindre le MPP.

•**Si** $\Delta P > 0$ et $\Delta V < 0$ $V(k)$ est sur la droite du MPP et le $V(k+1)$ sera situé sur un point avec une valeur de tension inférieure de manière à atteindre le MPP.

•**Si** $\Delta P < 0$ et $\Delta V > 0$ $V(k)$ est sur la droite du MPP et le $V(k+1)$ sera situé sur un point avec une valeur de tension inférieure de manière à atteindre le MPP.

•**Si** $\Delta P < 0$ **et** $\Delta V < 0$ est sur la gauche du MPP et le $V(k+1)$ sera situé sur un point avec une valeur de tension plus élevée de façon à atteindre le MPP.

II.3.3 Les techniques MPPT de réseaux de neurones artificiels :

La technique de réseaux de neurones est, elle aussi, de plus en plus utilisée, car elle offre une grande alternative pour résoudre des problèmes complexes. Ces dernières années, l'utilisation de cette méthode dans divers domaines d'application ne cesse d'augmenter car elle fonctionne à partir d'une boite noire qui n'exige pas d'informations détaillées sur le fonctionnement du système. Elle établit des relations entre les variables d'entrée et de sortie en analysant les précédentes données mémorisées. Un autre avantage est qu'elle peut traiter des problèmes d'une grande complexité grâce à des paramètres interdépendants.

Les réseaux de neurones sont composés généralement de trois couches différenciées, nommées :

- Couche d'entrée (Input layer),
- Couche cachée (Hidden layer),
- Couche de sortie (Output layer).

Comme le montre la (figureII.5).

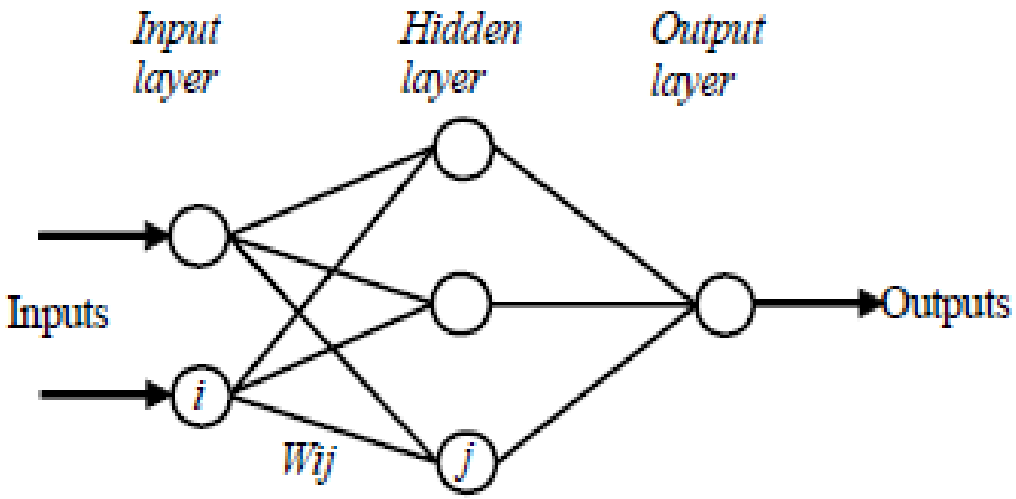


Figure.II.5 : Exemple d'un réseau de neurones

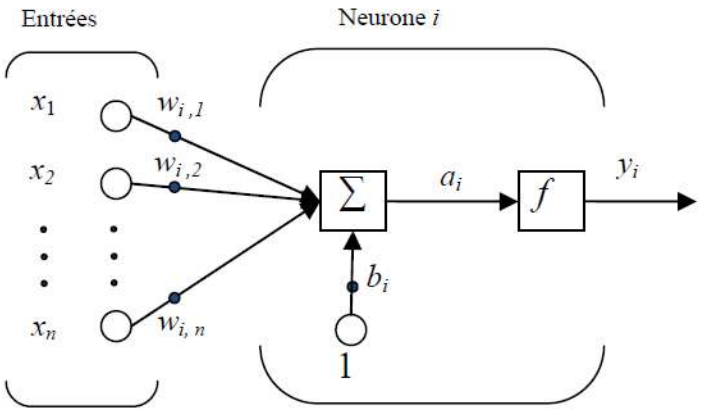
Le nombre de nœuds au niveau des différentes couches est variable en fonction du degré D'apprentissage souhaité et de la précision de la commande souhaitée. Pour une commande MPPT, les variables d'entrées peuvent donc être les paramètres caractéristiques d'un GPV (VOC, ICC) associées ou non à des données atmosphériques comme la température. Ou plusieurs signaux de référence comprenant au moins le rapport cyclique permettant de commander le CS pour fonctionner le plus souvent possible au PPM. La qualité de la recherche du PPM dépend essentiellement de l'algorithme utilisé dans la couche cachée et de la construction proprement dite du réseau. Ainsi, L'importance entre deux nœuds de la valeur du poids choisi Wij est à prendre en compte. Pour identifier avec précision les différents PPM.

Éventuels, les poids Wij doivent être initialement déterminés avec le plus de soin possible à travers des procédures d'apprentissage laborieuses et spécifiques à chaque GPV, chaque site D'implantation et chaque type de charge. De plus, cet apprentissage doit être révisé régulièrement (typiquement chaque mois) pour mettre à jour les relations entre les entrées et les sorties du réseau. Ce qui rend cette commande fastidieuse en entretien et en maintenance.

Bien qu'il existe une grande quantité de ces commandes MPPT dans la littérature, nous ne connaissons pas d'application industrielle les utilisant. [41].

II.3.4 Principe de commande réseaux de neurones artificiels :

En général, un neurone formel (figureII.6) est un élément de traitement possédant n entrées x1, x2,…, xn (qui sont les entrées externes ou les sorties des autres neurones) et une seule sortie. Son traitement consiste à affecter à sa sortie yi le résultat d'une fonction de seuillage f (dite aussi la fonction d'activation).



figureII.6: Représentation d'un neurone artificiel.

$$yi = f(ai) = f\left(\left[\sum_{j=1}^{n} Wij * xj\right] + bi\right)$$

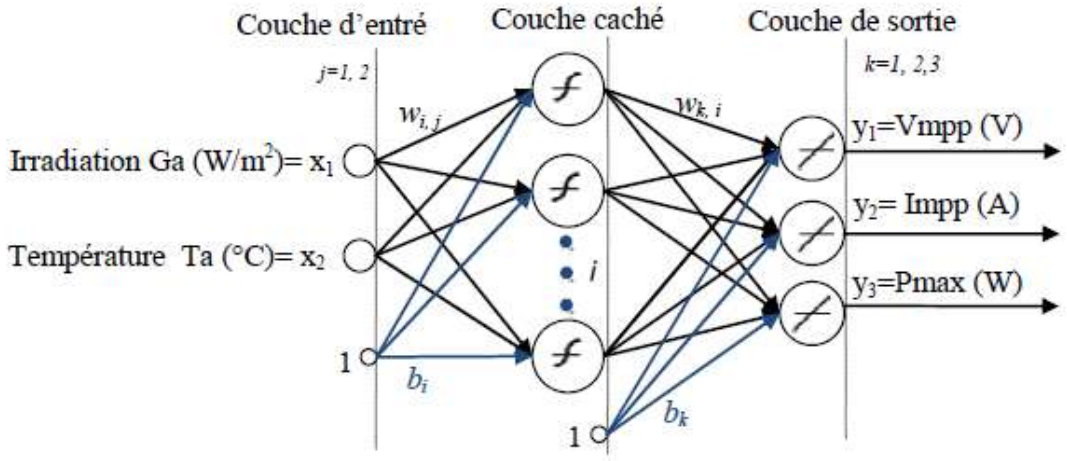
Où ai : est l'état d'activation du neurone, f : est la fonction d'activation du neurone, bi : le biais (représentant le seuil interne du neurone). Les paramètres wij reliant les entrées aux neurones sont appelés poids synaptiques ou tout simplement poids.

Les Perceptrons Multicouches (MLP) sont les réseaux de neurones les plus connus. Un perceptron est un réseau deneurones artificiel du type feedforward, c'est à dire à propagation directe. Dans notre cas, pour modéliser un générateur photovoltaïque (MSX60), nous proposons un réseau MLP à trois couches (comme montré sur la figureII.7):

• La première est celle des entrées (l'irradiation Ga et la Température Ta).

• La deuxième est dite couche cachée (ou couche intermédiaire) et constitue le coeur du réseau de neurones. Ses fonctions d'activation sont du type sigmoïde (tansig).

• La troisième, constituée ici par trois neurones (Vmpp,Impp,Pmax), est la couche de sortie. Ses fonctions d'activation sont du type linéaire (purelin) [44].



figureII.7: Modèle de réseaux de neurone MLP pour identification de MPP.

II.4 Conclusion :

Dans ce cette chapitre, nous avons entamé la partie la plus importante et la plus délicate de cette étude. Il s'agit de présenter le principe de la recherche du point de puissance maximale tout en donnant les différentes types des commandes MPPT. Nous avons détaillé les méthodes MPPT rencontrées (Perturbation Et Observation (P&O, Perturb And Observe) ,et Les techniques MPPT de réseaux de neurones artificiels). L'existence de plusieurs types de commandes MPPT montre que ce domaine de recherche est en perpétuel évolution et qu'il est difficile de trouver une ou plusieurs solutions universelles.

Chapitre III : Les convertisseurs statiques DC-DC et DC-AC

III.1 Introduction :

Le but de cette partie est l'étude des quelques types convertisseurs DC-DC ,DC-AC, utilisés dans les systèmes photovoltaïques.

Les convertisseurs DC/AC de types onduleurs à source impédante , sont apparus dans la littérature scientifique dans les années 2000 à travers les travaux du Professeur Fang Zheng Peng publies dans l'article de congres [21] paru en 2002. A l'origine de ces convertisseurs apparait l'onduleur à Z-source représente en figure (III.1).

L'onduleur Z-source a été récemment introduit [22], la terminologie Z-source (Source d'Impédante) étant liée au remplacement du bus continu classique de l'onduleur par un étage continu L C hybride croisé. Son intérêt est de pouvoir obtenir une tension alternative de sortie d'onduleur plus importante qu'avec un onduleur classique, soit un effet "boost naturel". Cette modification est liée à la possibilité d'introduire des phases de court-circuit des bras de l'onduleur, en superposition avec la commande classique de l'onduleur MLI. La source continue d'entrée ne doit pas être réversible et la commande de l'onduleur est légèrement modifiée [23].

Dans ce chapitre nous allons étudier le principe de fonctionnement de convertisseur Z-source en passant l'état « Shoot-Through » et développer le modèle mathématique du convertisseur Z-source en extrayant les équations régissant le système.

Dans le but de préciser le rôle principal du convertisseur Z-source est d'amplifier la tension d'entrée est basés sur le rapport de l'état de « Shoot-Through » durant toute la période de commutation [23].

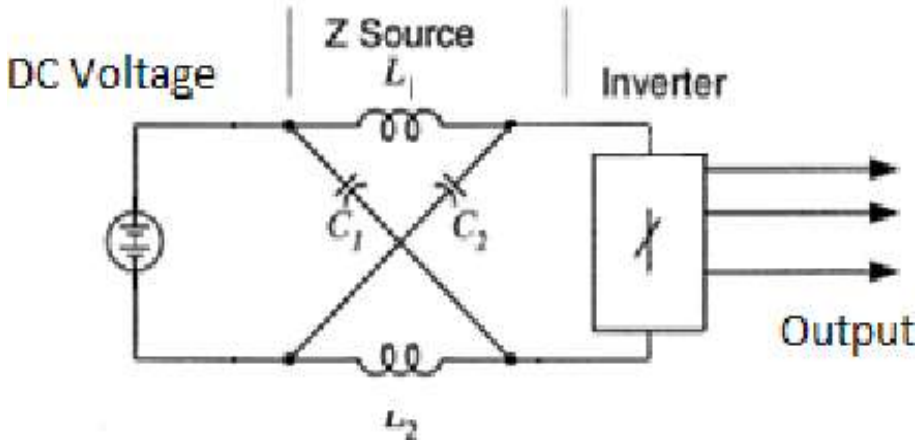


Figure .III.1 : présente la structure générale du convertisseur Z-source

III.2 Convertisseur DC-DC :

Les hacheurs sont des convertisseurs du type continu-continu permettant de contrôler la puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande

souplesse et un rendement élevé [52].

Il existe plusieurs types des convertisseurs DC-DC. Parmi les quels, on présente le principe de convertisseur survolteur (boost), utilisés fréquemment dans les systèmes photovoltaïques pour générer les tensions et les courants souhaités ainsi que pour l'adaptation des panneaux solaires avec les déférentes charges.

III.2.1 Convertisseur Boost (hacheur survolteur) :

Le convertisseur survolteur, connu aussi sous le nom de « boost » ou hacheur parallèle ; son schéma de principe de base est celui de la figure (III.2). Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie supérieure [52].

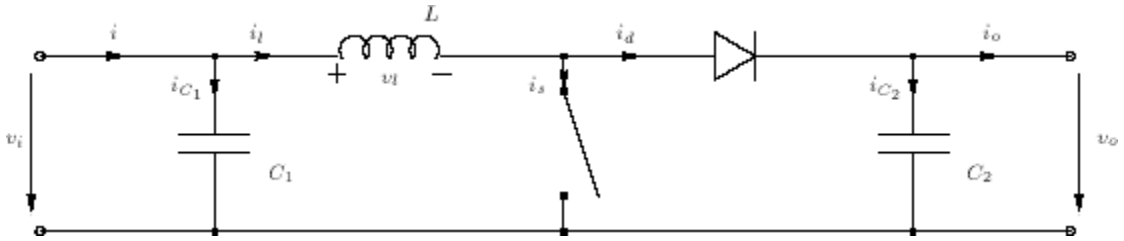


Figure .III.2 : Circuit idéal d'un convertisseur Boost .

Comme pour le convertisseur dévolteur, l'application des lois de Kirchhoff sur les circuits équivalents du convertisseur survolteur (Figure .III.3) des deux phases de fonctionnement donne [52] :

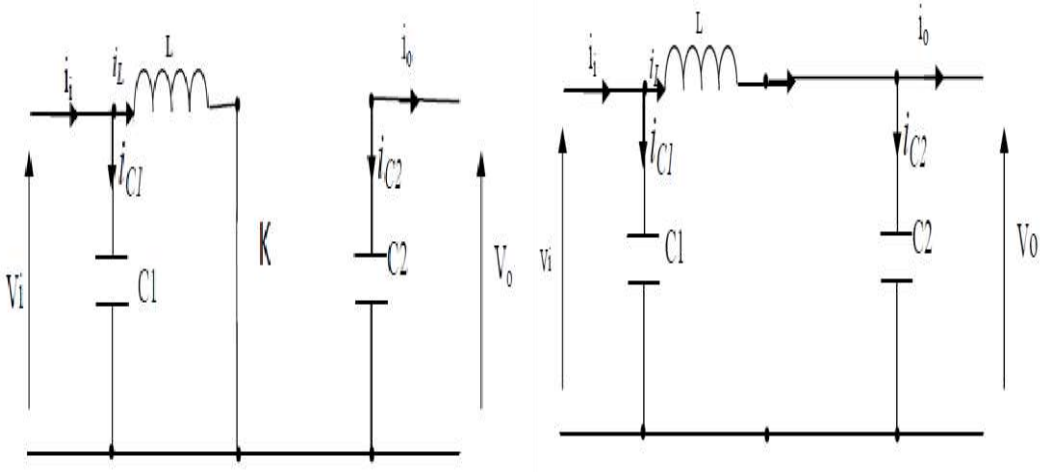


Figure .III.3 : Schémas équivalents du hacheur survolteur,

(a) : K fermé, (b) : ouvert

Pour la première période d.Ts :

$$ic(t) = C1\frac{dvi(t)}{dt} = i(t) - il(t)$$

$$ic2(t) = C2\frac{dv0(t)}{dt} = -i0(t) \qquad \text{(III.1)}$$

$$v1(t) = L\frac{dil(t)}{dt} = vi(t)$$

Pour la deuxième période (1-d)T_s

$$ic(t) = C1\frac{dvi(t)}{dt} = i(t) - il(t)$$

$$ic2(t) = C2\frac{dvo(t)}{dt} = il(t) - io(t) \qquad \text{(III.2)}$$

$$v1(t) = L\frac{dil(t)}{dt} = vi(t) - vo(t)$$

Pour trouver une représentation dynamique valable pour tout la période Ts,on utilise généralement l'expression suivante [52] :

$$\left(\frac{dx}{dt}\right)Ts = \frac{dx}{dtDTs}dTs + \frac{dx}{dt(1-D)Ts}(1-d)Ts \qquad \text{(III.3)}$$

En appliquant la relation (III.3) sur les systèmes d'équations (III.1) et (III.2), Commepour le convertisseur dévolteur, on trouve le modèle approximé du convertisseur survolteur [29] :

$$\begin{cases} i_L = i_i - C_1\dfrac{dV_i(t)}{dt} \\ i_o = (1-d)i_L - C_2\dfrac{dV_i(t)}{dt} \\ V_i = L\dfrac{di_L}{dt} + (1-d)V_o \end{cases}$$

Le régime continu est obtenu en éliminant les dérivées des variables dynamique et en remplacant ces signaux par leurs moyennes.le systéme devient :

On peut ainsi tirer le rapport de conversion, qui représente le rapport de La tension de sortie sur la tension d'entrée :

$M(\alpha)=U_{dc}/U_{pv}=1/1-d$

On peut déterminer les modes de fonctionnement du hacheur Boost grace à cette derniéere expression .

III.3 Convertisseur DC-DC :

III.3.1 Onduleur :

Les conversions DC/AC consiste à générer une ou plusieurs tensions(s) alternative(s), le plus souvent sinusoïdale à partir d'une tension continue. Ceci permet principalement d'alimenter des appareils adaptés aux tensions réseaux à partir de batteries ou de tensions redressées, ou encore de piloter, par variation de fréquence, un moteur AC à vitesse variable. Les circuits qui réalisent ces opération sont appelés « onduleur » [24].

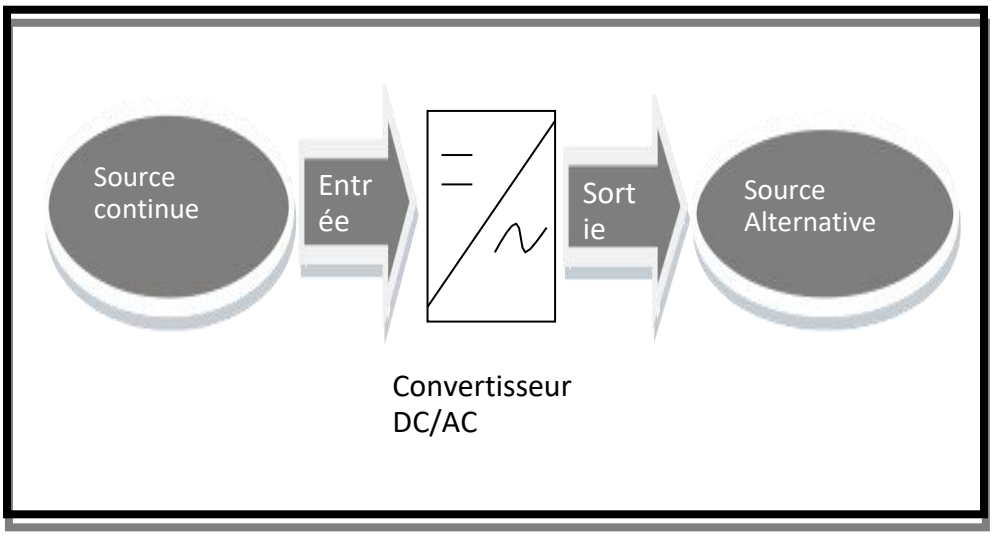


Figure .III.4 : schéma de principe de la conversion continu-Alternative (DC-AC).

III.3.1.1 Définitions des onduleurs :

Un onduleur est un dispositif permettant de transformer en alternatif une énergie électrique de type continue. Ils sont utilisés en électrotechnique pour :

•Soit fournir des tensions ou courants alternatifs de fréquence et amplitudes variables.

•Soit fournir une ou des tensions alternatives de fréquence et d'amplitude fixes [24].

En fait, cette conversion d'énergie st satisfaite au moyen d'un dispositif de commande (semi-conducteurs). Il permet d'obtenir aux bornes du récepteur une tension alternative réglable en fréquence et en valeur efficace, en utilisant ainsi une séquence adéquate de commande [25], On distingue les onduleurs de tension et les onduleurs de courant, en fonction de la source d'entrée continue : source de tension ou source de courant.

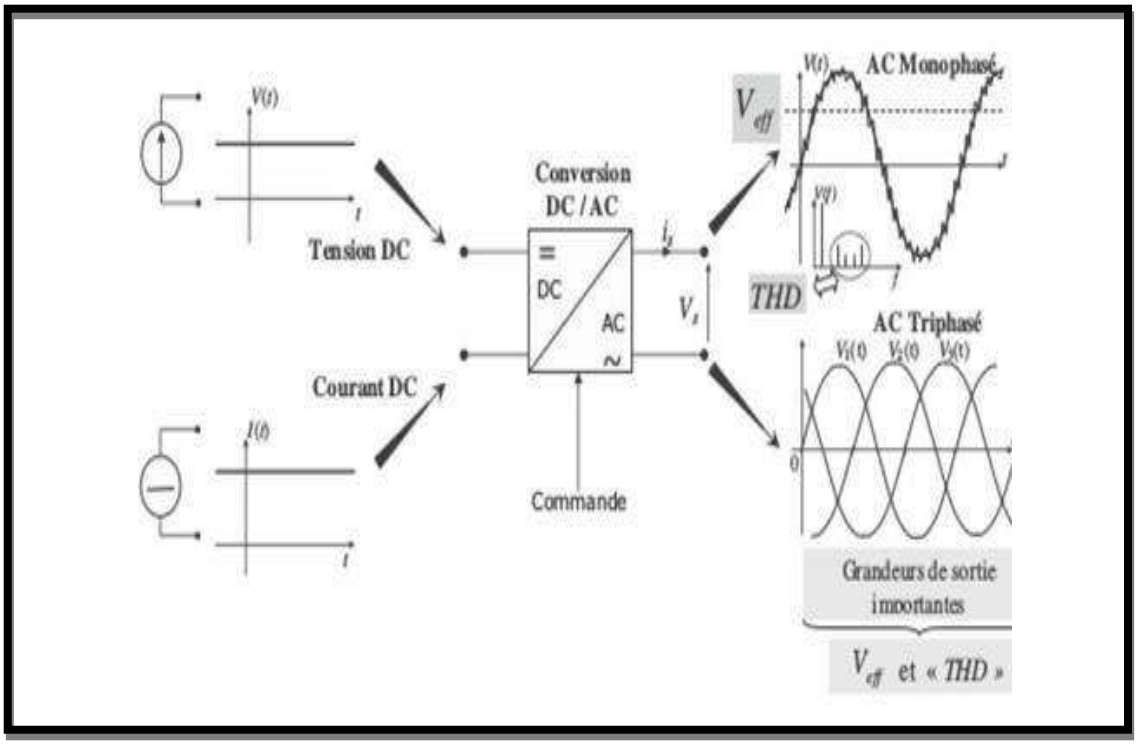


Figure .III.5 : Schéma de Conversion DC/AC et grandeur de sortie.

III.3.1.2 Intérêt des onduleurs :

Un convertisseur DC/AC (onduleur) est essentiellement utilisé pour fournir une tension ou un courant alternatif afin d'assurer l'alimentation en énergie des charges critiques (micro-ordinateur, station de télécommunication,.) pendant la coupure du réseau électrique ou une alimentation permanente pour les systèmes autonomes (centrales photovoltaïques, engins aérospatiaux,…) [26].

Les onduleurs ont une structure en pont constituée le plus souvent d'interrupteurs électroniques tels que les transistors MOSFET(BT) ou des IGBT(HT).

Les trois principaux éléments qui constituent un onduleur sont les suivants:

- Source de tension continue (par exemple: batterie, centrales photovoltaïques)
- Convertisseur DC/AC

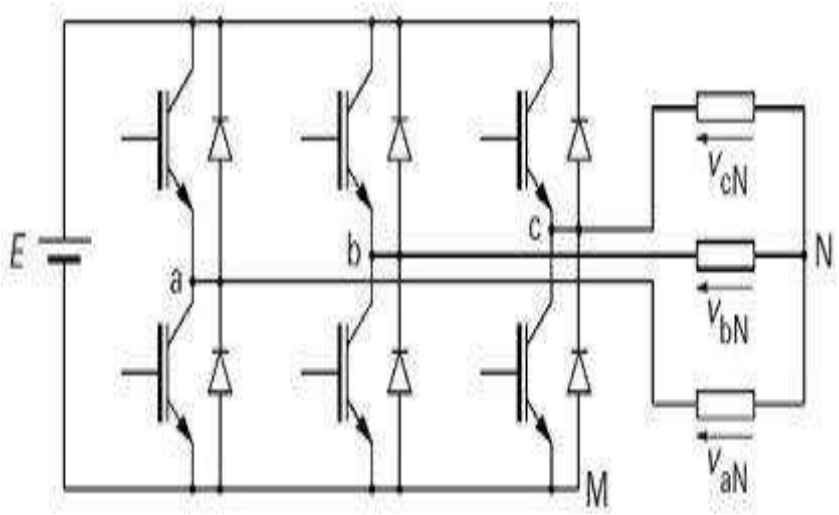


Figure .III.6 : Onduleur à deux niveaux utilisant des transistors IGBT

III.3.1.3 Topologie d'onduleur :

L'onduleur classique à deux niveaux de tension est représenté sur la figure .III.7 **.**Il est constitué de trois bras de commutation à transistors. Chaque bras composé de deux cellules comportant chacune une diode et un transistor qui travaillent en commutation forcée. Tous ces éléments sont considérés comme des interrupteurs idéaux. En mode commandable, le bras d'onduleur est un commutateur à deux positions qui permet d'obtenir à la sortie deux niveaux de tension [27], [28].

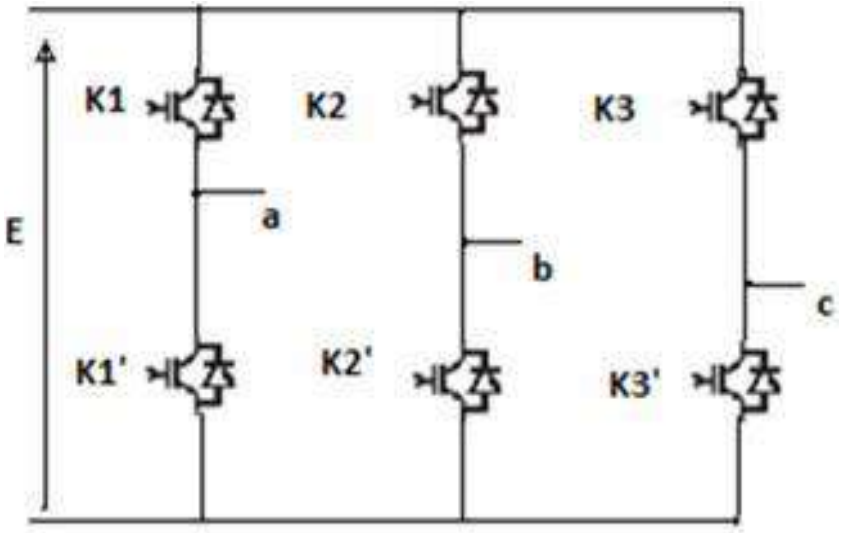


Figure .III.7: Schéma d'un onduleur usuel à 2 niveaux

Pour un convertisseur à 2-niveaux de tensions. Nous avons deux séquences de fonctionnement possible permettant de générer les deux-niveaux de tensions:

Séquences 1 : Génération du niveau maximum **:**

Dans ce cas, l'interrupteur K1 est passant et K1' est bloqué comme le montre la figure (.III.6). La tension de sortie Va est: Va = +E. La tension inverse appliquée à l'interrupteur K1' vaut: VK1' = +E.

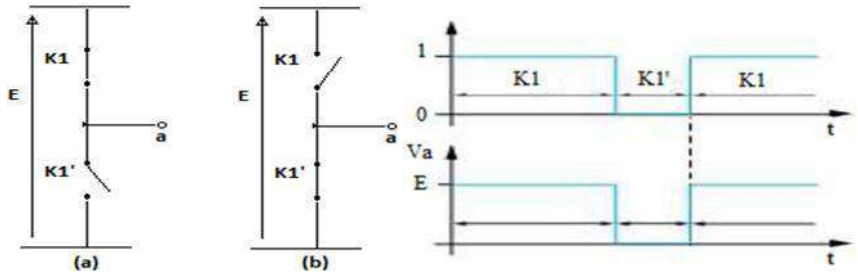


Figure .III.8 : Séquences de fonctionnement d'un bras de l'onduleur à deux niveaux

Séquences 2 : Génération du niveau minimum

Dans ce cas, l'interrupteur K1 est bloqué et K1' est passant comme le montre la figure (III.8). La tension de sortie Va est: Va = 0 La tension inverse appliquée à l'interrupteur K1 vaut: VK1 = +E.

Les 2 états ou séquences de commutation possibles sont résumés au tableau (III.1).

K1	**K1'**	**Va**
1	0	**E**
0	1	**0**

Tableau III.1 : États possibles de l'onduleur usuel à 2 niveaux

III.3.4Principe générale de fonctionnement :

Le principe de fonctionnement d'un onduleur est basé sur l'électronique de commutation, ce qui génère une onde de tension alternative à partir d'une tension continue comme le montre la Figure (III.9). [31]

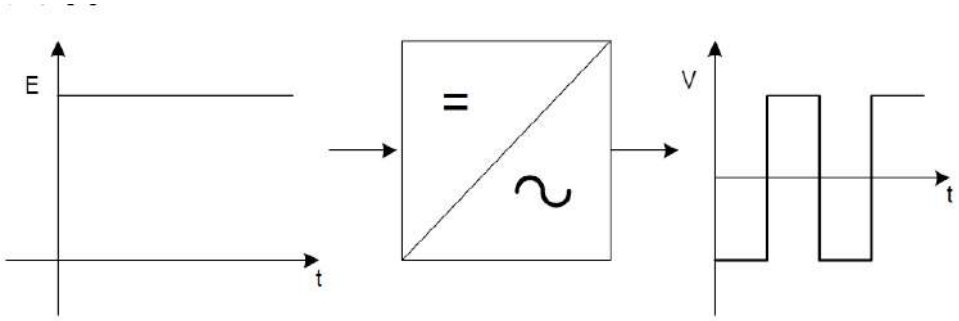


Figure .III.9 : Schéma de principe de la conversion Continu - Alternative (DC – AC).

III.3.2 les convertisseurs Z-source :

III .3.2.1 Généralité sur les convertisseurs Z-source :

Combustible et les éoliennes génèrent Ces dernières années, les systèmes de production décentralisée ont attiré plus d'attention du fait qu'ils ont une taille réduite, une structure modulaire, ainsi que de grands bénéfices écologiques dû à leur faible émission. Suite à leurs natures, les sources décentralisées dédiées à la production de l'énergie électrique moyennant des sources des énergies renouvelables telles que les sources photovoltaïques, les piles à une tension continuent variable.

En effet, la tension du générateur photovoltaïque varie avec la température et la radiation, la tension fournie par la pile chute fortement avec le courant, tandis que la tension du générateur éolien varie avec la vitesse du vent. Cependant, l'onduleur de tension traditionnel couplé au réseau ne peut fonctionner correctement en présence de faibles tensions continues et exige souvent le recours à un convertisseur dc-dc supplémentaire généralement de type boost. Dans cette situation deux commandes distinctes sont indispensables. L'une pour agrandir la tension continue et l'autre pour commander l'onduleur. Récemment, l'onduleur élévateur (convertisseur z-source) a été présenté dans la littérature comme une alternative compétitive à surmonter la limitation en tension de l'onduleur traditionnel. Le réseau Z-Source est symétrique, Il utilise une combinaison de deux inductances et deux condensateurs, connecté en forme de X. Ce sont des éléments de stockage d'énergie et de filtrage. Comme la fréquence de commutation est beaucoup plus élevée que celle de la source, les inductances et les condensateurs devraient être faibles [35].

Les travaux mènes se concentrent justement sur les convertisseurs de puissance au sein des systèmes embarques. Elle évalue la possibilité de remplacer une structure associant un convertisseur DC/DC et un onduleur DC/AC par une topologie d'onduleur DC/AC qui est

apparue il y a une dizaine d'année. Cette structure, nommée par son inventeur onduleur à source impédante, est de type DC/AC. Elle permet non seulement de convertir un signal continu en un signal alternatif mais possède également la fonction élévatrice lui permettant d'élever la tension de la source à un niveau supérieur [36].

Les convertisseurs DC/AC de types onduleurs à source impédante, sont apparus dans la littérature scientifique dans les années 2000 a travers les travaux du Professeur Fang Zheng Peng publies dans l'article de congres [37] paru en 2002.

A l'origine de ces convertisseurs apparait l'onduleur à Z-source représente en Figure (III.10) dans un système de traction électrique. Contrairement à l'association de convertisseurs DC/DC boost et d'onduleur de, l'onduleur a Z-source présente la particularité de pouvoir utiliser les interrupteurs de l'onduleur pour élever la tension du bus continu VDC. Le convertisseur est en effet muni d'un réseau impedante de type LC dispose en "X", autorisant la fermeture simultanée des interrupteurs haut et bas d'un même bras d'onduleur pour accomplir sa fonction d'élévation de la tension VDC. Ces états particuliers de l'onduleur seront dorénavant qualifiés d'états de court- circuit de bras d'onduleur et simplement notés court-circuités en italique. Ils permettent de faire commuter la diode D en mode de fonctionnement moteur (ou l'interrupteur K dans le mode de fonctionnement réversible).[37]

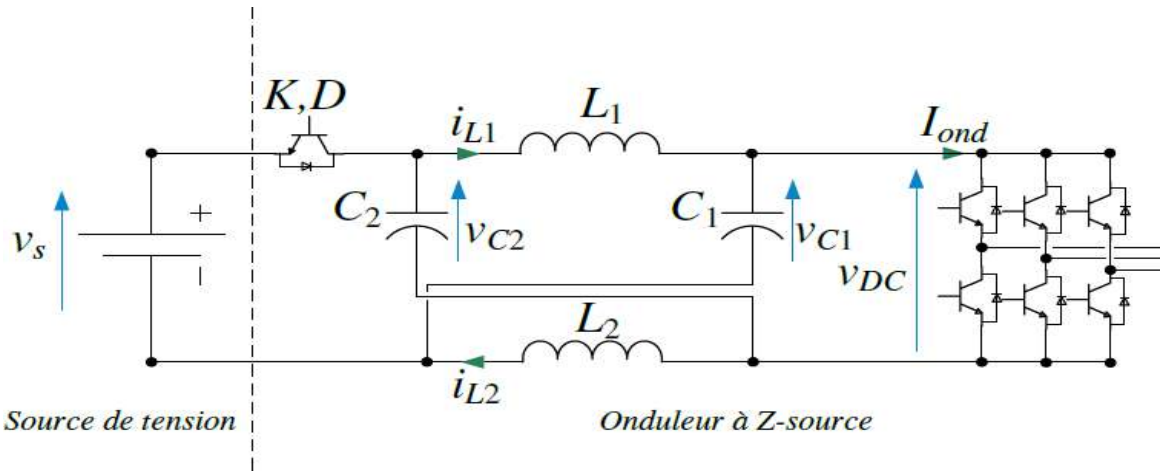


Figure .III.10 : onduleur avec Z-source

Le convertisseur Z-source ou le convertisseur source impédante a été proposé en 2002 comme déjà cité, ce qui est considéré comme un convertisseur Buck-Boost, convertisseur Buck ou comme un convertisseur Boost. La recherche généralement traite l'onduleur Z-source présenté sur la figure (III.11), ce qui est un convertisseur DC-AC permet d'adapter la tension VDC à une installation proposée en insérant dans le schéma de MLI des courts-circuits de bras onduleur. Cela permet la commutation de la diode D1 ou de l'interrupteur associée faisant

intervenir un rapport cyclique D comme variable de commande. Il est alors possible d'exprimer la caractéristique statique de conversion VDC/V0 (VDC est la tension d'entrée et V0 est la tension de sortie de l'onduleur Z-source) en considérant les deux modes de fonctionnement du convertisseur, et qui dépend de l'état de court-circuit ou non de l'onduleur [37].

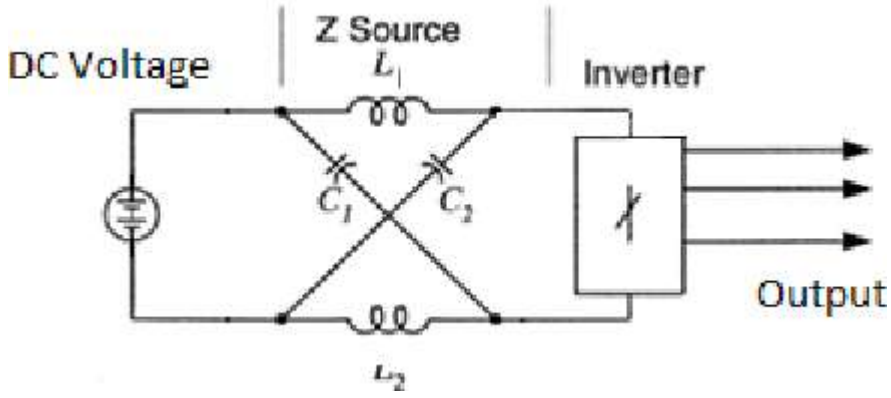


Figure .III.11 : La structure générale du convertisseur Z-source

Le convertisseur Z-source est une nouvelle topologie qui dépasse les obstacles et les limites conceptuelles des convertisseurs traditionnels de tension et courant.

Une caractéristique unique des convertisseurs « z-source » est l'état « Shoot- Through » par lequel les deux interrupteurs à semi conducteurs de la même branche de phase peuvent être activés simultanément. Par conséquent, aucun temps mort n'est nécessaire et la distorsion de sortie est fortement réduite et donc la fiabilité est considérablement améliorée. Cette fonctionnalité n'est pas disponible dans les sources de tension et de courant traditionnelles [38].

Les convertisseurs à structure Z-source sont utilisées dans plusieurs types de conversion tel que DC-DC, DC-AC et AC-AC [37].

Toutes les topologies des convertisseurs Z-source proposées sont conçues pour les systèmes photovoltaïques, contrôlées par des schémas de commutation à savoir, La ″ sinusoïdal PWM″, ″ space vector PWM ″ et ″simple boost PMW″ [39].

L'onduleur Z-source est un convertisseur constitué par l'association d'un onduleur classique avec un réseau d'impédance, le circuit électrique est représenté dans la figure (III.12)

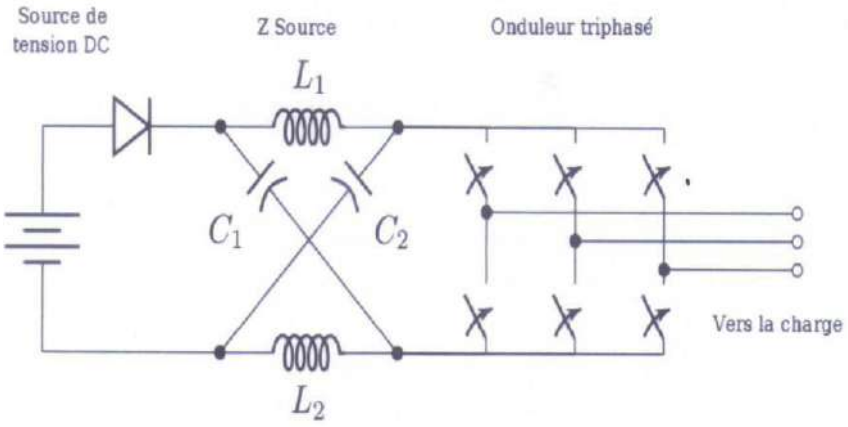


Figure .III.12 : Onduleur triphasé ZS

III.3.2.2 Topologie d'un onduleur triphasé à z-source :

La topologie d'un onduleur de tension triphasé à structure z-source est donnée dans la Figure (III.13), cet onduleur est constitué d'un circuit principal qui regroupe les trois (03) cellules de commutation, connecté à la source de tension continue par l'intermédiaire d'un réseau d'impédance et une diode de protection. Cette dernière empêche la décharge de deux condensateurs dans la source de tension continue [34].

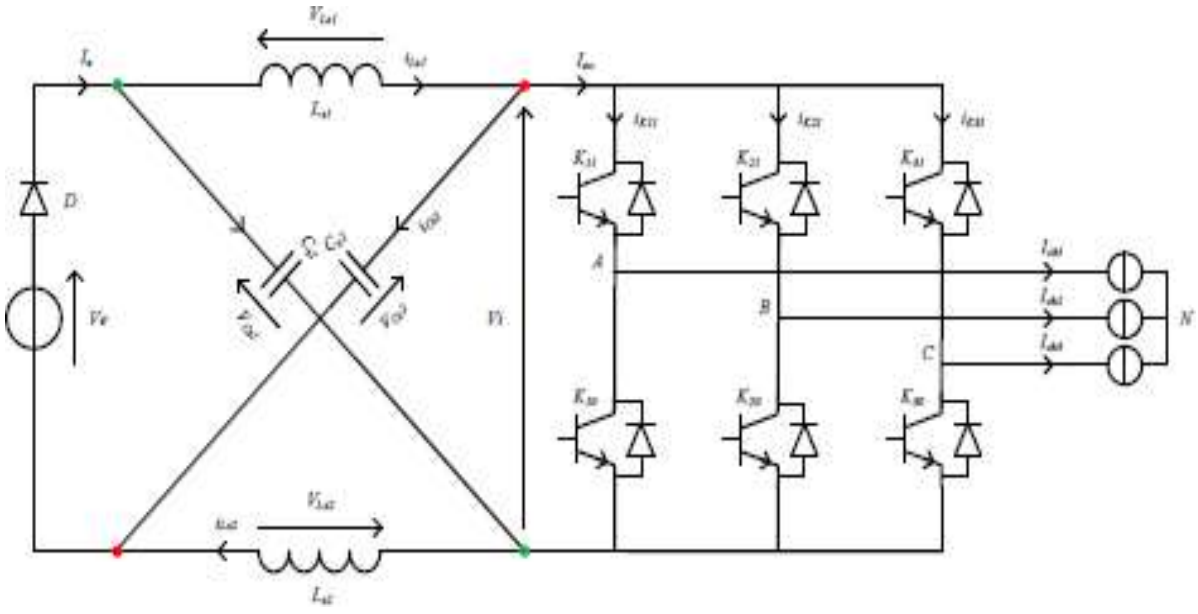


Figure .III.13 : Topologie d'un onduleur triphasé à structure z-source.

Chaque bras (cellule de commutation) est formé de deux interrupteurs réversibles en courant dont le fonctionnement est complémentaire pendant le transfert de l'énergie entre les deux sources.

L'insertion dudit réseau offre la possibilité d'amorcer simultanément les deux (02) interrupteurs de même cellule (bras), qui est strictement interdit dans les onduleurs conventionnels de tension. Cette possibilité engendre un nouvel état qui est reconnue par son appellation « état de court-circuit du bras » et en anglais« Shoot Through Stat ».

Cet état ne peut être inséré que dans la durée de court-circuit de la charge (l'état zéro de convertisseur).

Le réseau d'impédance représente à la fois, une source d'énergie et un filtre pour le convertisseur, tel que l'inductance sert à limiter les ondulations du courant pendant l'état du court-circuit, tandis que le condensateur est destiné à absorber ces ondulations et maintenir la tension constante et ce, dans le but de fournir une tension sinusoïdale à la sortie.

III .3.2.3 Principe de fonctionnement de l'onduleur z-source :

On définit vi la tension d'entrée de l'onduleur (figure.III.14), VMmax la valeur crête du fondamental de la tension simple de sortie de l'onduleur, vimax la valeur crête de la tension d'entrée de l'onduleur.

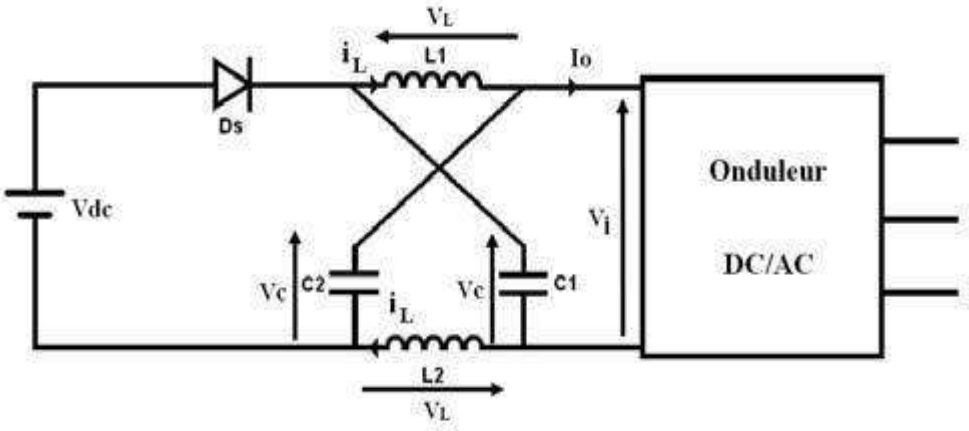


Figure .III.14 : Structure de l'onduleur Z-source.

r, la profondeur de modulation est définie par :

$$r = \frac{2\,VMmax}{\mathrm{V}\,i\ \mathrm{max}} \qquad \text{(III.4)}$$

b, amplification de l'étage continu est définie par :

$$b = \frac{\mathrm{V}i\ max}{\mathrm{VDC}} \qquad \text{(III.5)}$$

B, amplification globale du système est définie par :

$$B = \mathrm{rb} = \frac{2VMmax}{\mathrm{VDC}} \qquad \text{(III.6)}$$

L'étage continu de l'onduleur Z-source est une structure symétrique avec deux capacités nommée C1 et C2 de valeur C et deux inductances L1 et L2 de valeur L. Nous pouvons en déduire que les tensions aux bornes de capacités C1 et C2 sont identiques (notées VC) ainsi que les courants dans les bobines (notés iL).

L'onduleur Z-source est un onduleur capable de régler les tensions de sortie grâce à sa profondeur de modulation m (comme dans un onduleur classique), mais aussi par modification de la tension d'entrée vi par réglage des durées de court-circuités de bras de l'onduleur. Ces court-circuités sont effectués pendant les phases de roue libre sur la charge triphasée de l'onduleur Les états de l'onduleur vus par la charge restent inchangés. Ainsi, la charge est insensible aux courts-circuits faits sur l'étage continu Z-source.

L'amplification maximale b est obtenue lorsqu'on court-circuité le plus longtemps possible l'étage continu de l'onduleur. Cette durée dépend de la durée des vecteurs nuls, donc de la profondeur de modulation m.

Le fonctionnement du dispositif est lié aux comportements des éléments non linéaires entourant l'étage continu Z-source :

- l'état de la diode Ds : passante ou bloquée
- l'état de l'onduleur : roue libre,
- L'état actif (échange de puissance entre l'étage continu et la charge), court-circuité des bras de l'onduleur.

Le tableau (III.2) montre les différentes configurations réellement présentes avec les commandes classiques.

Etat de la diode Ds	Onduleur en roue libre	Onduleur actif	Z-source court-circuité
Passante	OUI	OUI	NON
Bloquée	NON	NON	OUI

TableauIII.2: Les états utilisés avec la commande Z-source

En effet, le fonctionnement normal du montage ne permet pas la présence des 6 combinaisons au niveau du Z-source [33]:

- Si les bras de l'onduleur sont court-circuités, la diode est nécessairementbloquée (lié au

mode élévateur du montage).

- Si l'onduleur est actif (échange de puissance entre l'étage continu et lacharge), alors la diode Ds est passante.

- Si l'onduleur est en roue libre, Ds est normalement passante, ceci étant lié auchoix de la fréquence de découpage de l'onduleur et aux valeurs usuelles de L et C.

On a deux états principaux :

- **Shoot-Through :** le circuit ZS est en court-circuit
- **État actif:** le réseau d'impédances ZS voit la charge à travers l'onduleur

On fait les suppositions suivantes :

$L1 = L2 = L$

$C1 = C2 = C$

On aura donc un circuit symétrique :

$V_{C1} = V_{C2} = V_C$

$i_{L1} = i_{L2} = i_L$

Avec :

• V_{dc}, V_c, V_L *et* V_i *:* représentent respectivement les tensions de la source continue, du condensateur, de l'inductance et de la sortie du ZSC.

• i_L, i_g, i_0, i_c : sont respectivement les courants de charge et de la source et les courants passant par l'inductance et le condensateur.

♦ **Mode 1 -** Ds passante et onduleur actif :

Durant cet état l'onduleur peut être représenté comme une source de courant vu del'étage continu Z-source (figure .III.15).

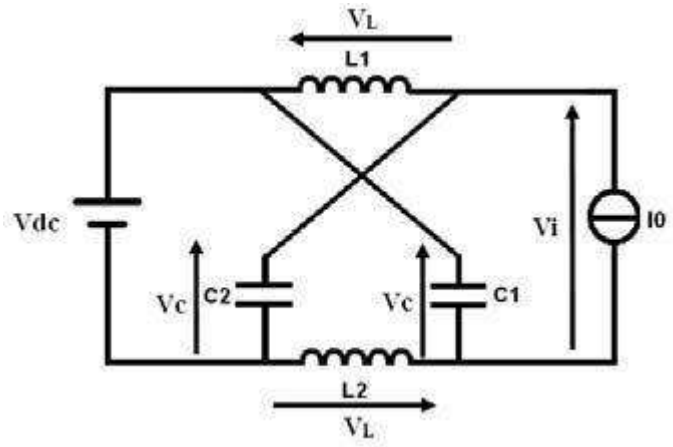


Figure .III.15 : Schéma équivalent du mode 1

On a :

$$V_L = V_d - V_c \quad et \quad ig = i_L + ic + C\frac{dV}{dt} \tag{III.7}$$

On obtient :

$$\begin{cases} \dfrac{dVc}{dt} = \dfrac{(ic - Vc)}{c} \\ \dfrac{d\text{iL}}{dt} - \dfrac{(Vdc - Vc)}{L} \\ \text{ig} = \text{iL} + \text{ic} \\ v_i = 2V_C - V_{dc} \\ v_i = V_C - V_L \end{cases} \tag{III.8}$$

Les valeurs des tensions (III.8)et (III.9)peuvent être déterminées :

$$\begin{cases} V_L = V_{dc} - V_c & \text{(III.8)} \\ V_i = V_C - V_L = 2V_C - V_{dc} & \text{(III.9)} \end{cases}$$

- **Mode 2 - Ds passante et onduleur en roue libre (sans court - circuité):**

Durant cet état, l'onduleur peut être représenté comme un circuit ouvert (Figuire .III.16) et les tensions Vc et vi restent identiques aux équations (III.7)et (III.8). C'est un cas particulier pour lequel i0 est nul.

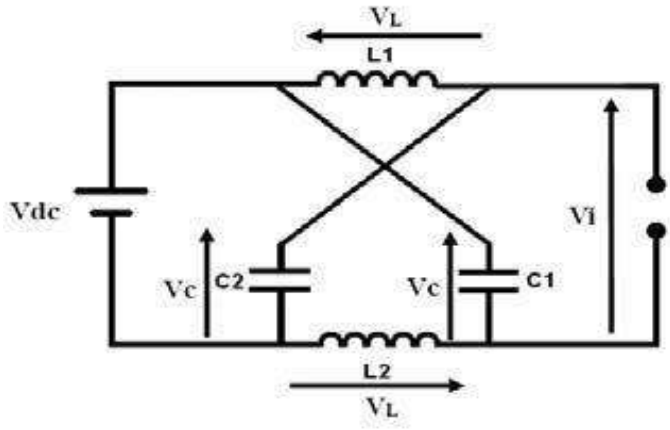


Figure .III.16: Schéma équivalent du mode 2

On a :

$$\begin{cases} i_L = -i_C \\ \dfrac{dVc}{dt} = -\dfrac{i_L}{C} \\ \dfrac{diL}{dt} = \dfrac{(Vc - Vi)}{L} \\ V_i = V_C - V_L \\ ig = 0 \end{cases} \quad \text{(III.10)}$$

- **Mode 3 – Ds bloquée et Z-source court-circuité :**

Durant cet état, au moins un bras de l'onduleur est court-circuité, ce qui impose une tension nulle en sortie de l'étage continu Z-source (figure .III.17).

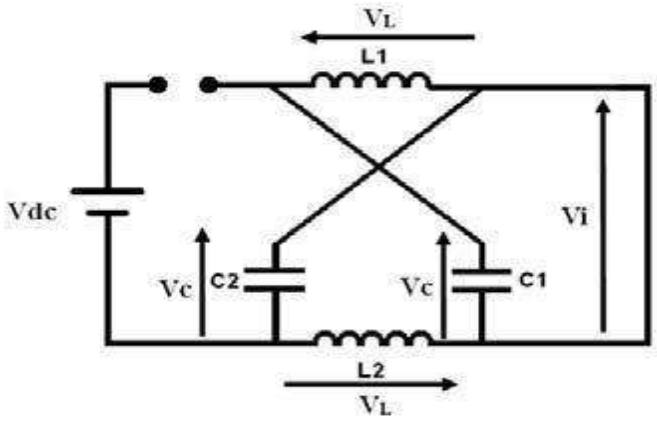


Figure .III.17: Schéma équivalent du mode 3

Donc la tension de la charge est nulle (Vi=0) : il n'y a pas de transfert d'énergie. La durée de l'état Shoot-Through est égale à To, et la période de commutation est égale à T.

nous pouvons déterminer les équations les tensions (III.8)et(III.9).

$$\begin{cases} VL=VC \\ Vi=0 \\ \frac{dVc}{dt}=-\frac{iL}{C} \\ \frac{diL}{dt}=-\frac{Vc}{L} \\ Ig=0 \end{cases} \quad \text{(III.11)}$$

T désigne la demi-période de la commande de la structure Z-source, la commande étant élaborée à partir de porteuses triangulaires:

$T = T0 + T1$

Avec T0 durée des courts-circuits de l'onduleur Z-source (Vi=0) et T1 la durée des états actifs de l'onduleur durant T. Le rapport cyclique de court-circuit T0/T est noté D0.

Pour résumer tous les états on aura les équations suivantes :

$$\begin{cases} C\frac{dVc}{dt} = -iL.D + (ig - iL)(1-D) \\ L\frac{diL}{dt} = Vc.D + (Vdc - Vc)(1-D) \\ Vi = (2Vc - Vdc)(1-D) \\ ig = (iL + ic)(1-D) \end{cases} \quad \text{(III.12)}$$

III.3.3 Commande de l'onduleur Zsource :

Il existe différents méthodes qui peuvent être utilisées pour contrôler et commander l'onduleur Z-source qui sont : Simple Boot, Maximum Boot ,constante Boost et MLI, quant va que nous allons expliquer en suivant :

III.3.3.1 Les méthodes de survoltage :

A. Simple Boost (MLI simple Boot Control SBC):

La commande Simple Boost est simple et facile à mettre en œuvre. Toutefois, le rapport cyclique Shoot-Through obtenu D diminue avec l'augmentation du taux de modulation « r ». Le rapport cyclique Shoot-Through maximum de la commande Simple Boost est limité à 1-r pour une opération particulière, atteignant zéro pour un taux de modulation égale à 1. Par

conséquent, l'opération avec un taux de modulation élevé pour la commande Simple Boost, conduit à une faible tension de sortie. Afin de générer une tension de sortie qui nécessite un gain en tension élevée, un faible taux de modulation doit être utilisé [29,30].

En fait, cette stratégie de commande insert le Shoot-Through dans tous les états nuls de la MLI traditionnelle pendant une période de commutation, qui maintient les six états actifs inchangés comme dans la MLI à porteuse classique. La méthode de commande Simple Boost est illustré sur la figure (.III.18).

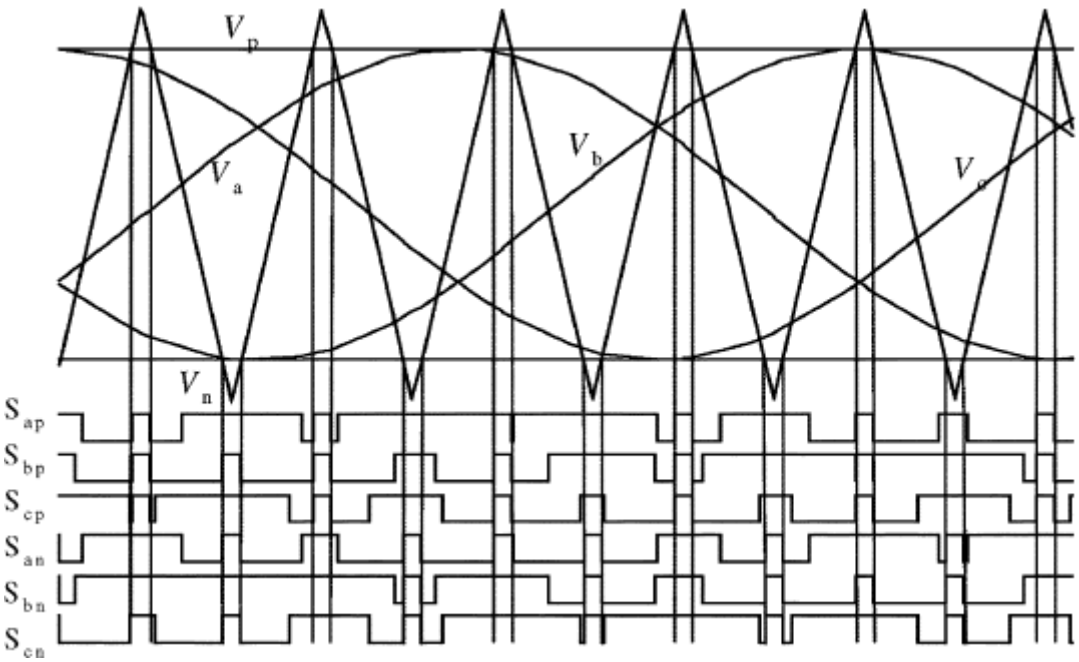


Figure .III.18 : La commande Simple Boost

Deux droites sont utilisées pour réaliser le rapport cyclique Shoot-Through (D).

La première est supérieure ou égale à la valeur de crête des tensions de références sinusoïdales triphasées tandis que l'autre est le négatif de la première. Chaque fois que les signaux de la porteuse triangulaire sont plus élevés que la ligne droite positive ou inférieure à la ligne droite négative, l'onduleur sera exploité en Shoot- Through, sinon, il fonctionne comme un onduleur à MLI traditionnelle.

La relation entre le taux de modulation (r) et le rapport cyclique maximal de Shoot-Through (D) est exprimée comme suit [29,30,46] :

$$D_{\max} = 1 - r \qquad \text{(III.13)}$$

Avec :

r=T1/T

Le gain en tension de l'onduleur Z-source peut être écrit comme suit [41] :

$$\begin{cases} G = B..r \\ B = \frac{1}{1-2D} \\ G = \frac{r}{1-2D} \end{cases} \quad \text{(III.14)}$$

On remplace la valeur de Dmax dans l'équation (III.14), on obtient :

$$G = \frac{Vac}{Vg/_2} = MB = \frac{r}{2r-1}$$

G : représente le gain de l'onduleur Z-source

B. Maximum Boost Control :

La figure (III.19) montre la stratégie de commande "maximum Boost", il est tout à fait similaire à la technique MLI conventionnelle. Cette méthode de commande maintient les six états actifs inchangée et transforme tous les états zéro en états Shoot- Through. On compare dans cette méthode entre la porteuse triangulaire et le maximum et le minimum des références, le circuit est en état Shoot-Through lorsque l'onde porteuse triangulaire est soit supérieure à la courbe maximale des références ou bien plus petit que le minimum des références, dans cette méthode le rapport cyclique de Shoot-Through se répète périodiquement toute les $\frac{\pi}{3}$:

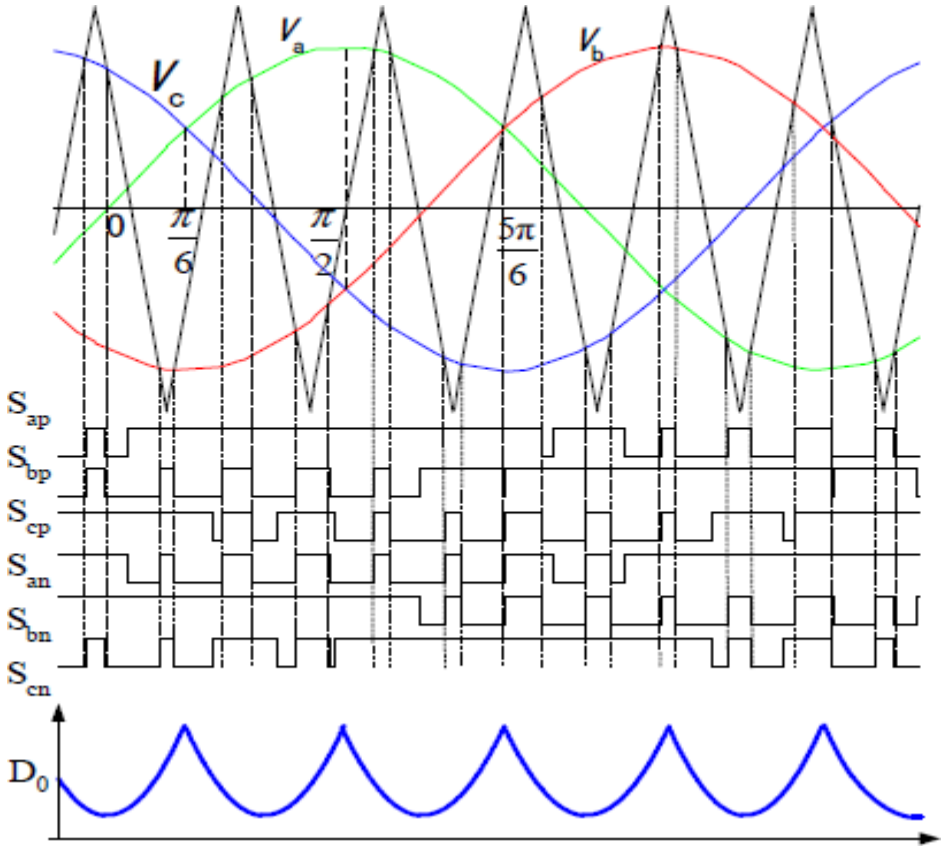


Figure .III.19 : La commande maximum boost.

$$\frac{T_0(\theta)}{\boldsymbol{T}} = \frac{2 - \left(r\sin\theta - r\,sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right)\right)}{2} \qquad \text{(III. 15)}$$

La valeur moyenne du rapport cyclique du shoot-through peut être calculée en intégrant la relation (III.15) [41]

$$\frac{T0}{T} = \frac{3}{\pi}\int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{2-\left(r\sin\theta - r\sin\left(\theta-\frac{2\pi}{3}\right)\right)}{2} d\theta = \frac{2\pi - 3\sqrt{3r}}{2\pi} \qquad \text{(III.16)}$$

Impliquerait : $$r = \frac{\pi(B+1)}{3\sqrt{3B}} \qquad \text{(III.17)}$$

D'où : $$G = rB = \frac{\widehat{Vac}}{\frac{Vg}{2}} = \frac{\pi(B+1)}{3\sqrt{3}} \qquad \text{(III.18)}$$

Et D aura la valeur minimale à $\omega t = \frac{\pi}{3}$ et la valeur maximum à $\omega t = \frac{\pi}{6}$ OU $\omega t = \frac{\pi}{2}$ [41]

C. Constant maximum Boost :

Dans cette méthode on a deux courbes Vp , VN qui enveloppent les signaux de références , et on a aussi la porteuse triangulaire, si la porteuse est supérieur à Vp ou inférieur à VN le ZSI est à l'état Shoot-Through, le rapport cyclique de Shoot-Trough D est constant d'où vient le nom de cette méthode (figure.III.18).Vp et VN sont périodique de période qui est trois fois plus grand que celle de commutation[29].

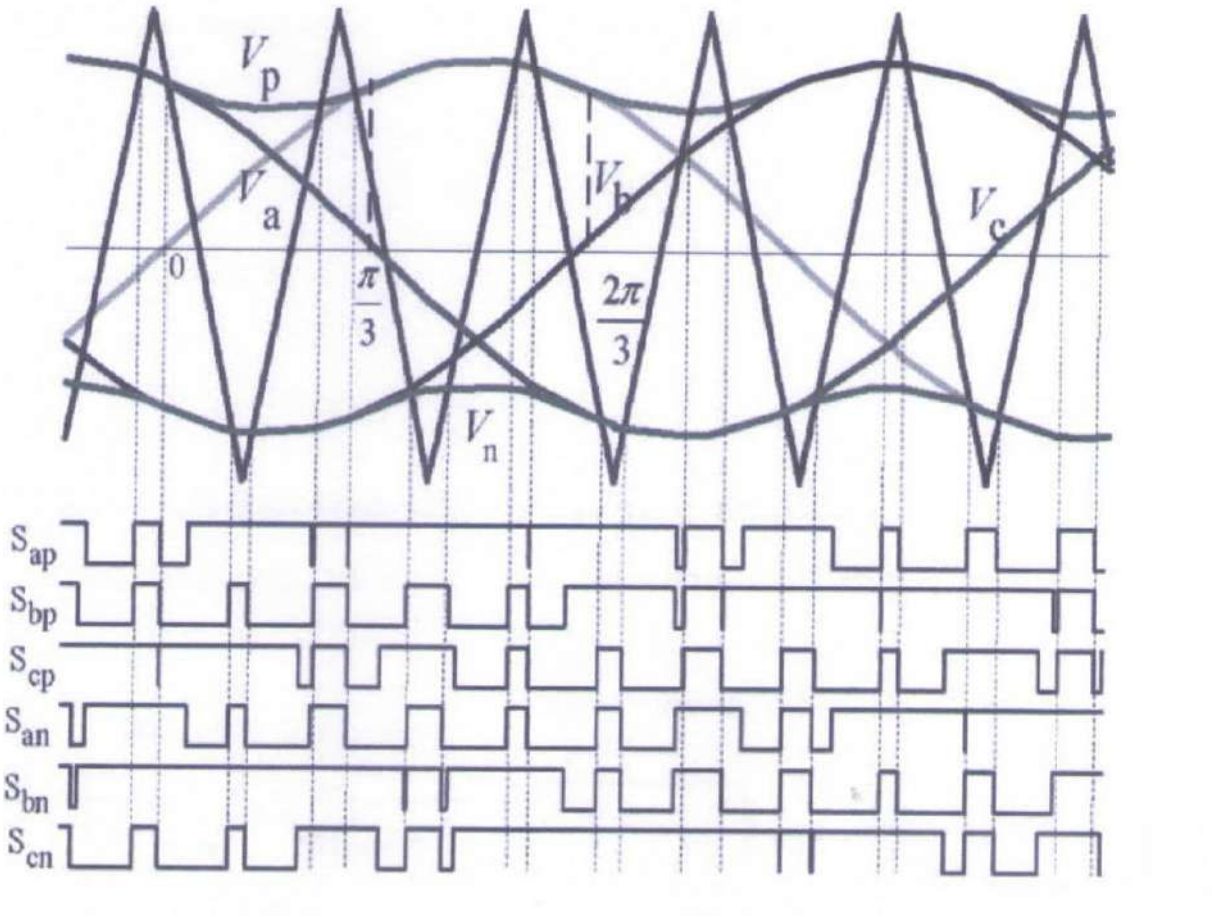


Figure .III.20 : La commande constant Boost.

Pour la première demi-période $\frac{\pi}{3}$: les courbes d'enveloppes sont expriméesrespectivement :

$$\begin{cases} Vp1 = \sqrt{3r} + r\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \text{Pour : } 0 < \theta < {}^{\pi}/_{3} \\ Vn_1 = r\sin\left(\theta - \frac{2\ \pi}{3}\right) \end{cases} \quad \text{(III.19)}$$

Pour la deuxième demi période$\left[\frac{\pi}{3}\right]$, $\left[\frac{2\pi}{3}\right]$: V_p et V_n sont sont exprimées respectivement :

$$\begin{cases} Vp2 = r\sin(\theta) \\ Vn2 = r\sin(\theta) - \sqrt{3}r \end{cases} \quad \text{Pour : } {}^{\pi}/_{3} < \theta < {}^{2\pi}/_{3} \qquad \text{(III.20)}$$

Evidemment, la distance entre ces deux courbes détermine le rapport Shoot-Through, elle est toujours constante pour un taux de modulation donné, c.-à-d , $\sqrt{3}r$ .C est pourquoi le rapport Shoot-Through peut être exprimé comme suit [29,32] :

$$\frac{T0}{T} = \frac{2-\sqrt{3r}}{2} = 1 - \frac{\sqrt{3}r}{2} \qquad \text{(III. 21)}$$

Le facteur de survoltage sera :

$$B = \frac{1}{1-2\frac{T0}{T}} = \frac{1}{\sqrt{3}r-1} \qquad \text{(III. 22)}$$

Par conséquent le gain s'écrit :

$$G = r.B = \frac{r}{\sqrt{3}r-1} \qquad \text{(III.23)}$$

III.3.3.2 Commande MLI classique et MLI modifiée :

A. MLI classique :

Cette stratégie dont le principe est basée sur la variation de l'amplitude de la référence, et la fixation de celle de la porteuse, qui est représentée par un signal triangulaire. L'onde de sortie, est alors obtenue par une simple comparaison des deux ondes, donnant ainsi l'ordre d'allumage où d'extinction aux composants constituant l'onduleur (Figure .III.21)

Remarque :

La Figure (Figure .III.21) rappelle la génération des signaux de commande des interrupteurs à partir d'une MLI classique par comparaison de trois tensions de référence $va*$, $vb*$ et $vc*$ avec une porteuse hautes fréquences $p(t)$. Elle est présentée ici sur une période de découpage T. Les états zéros ($EZ1$ et $EZ2$) ainsi que les états actifs ($Act1$ et $Act2$) ont été repérés. Les commandes associées aux deux interrupteurs d'un même bras sont complémentées comme l'illustre la figure [39].

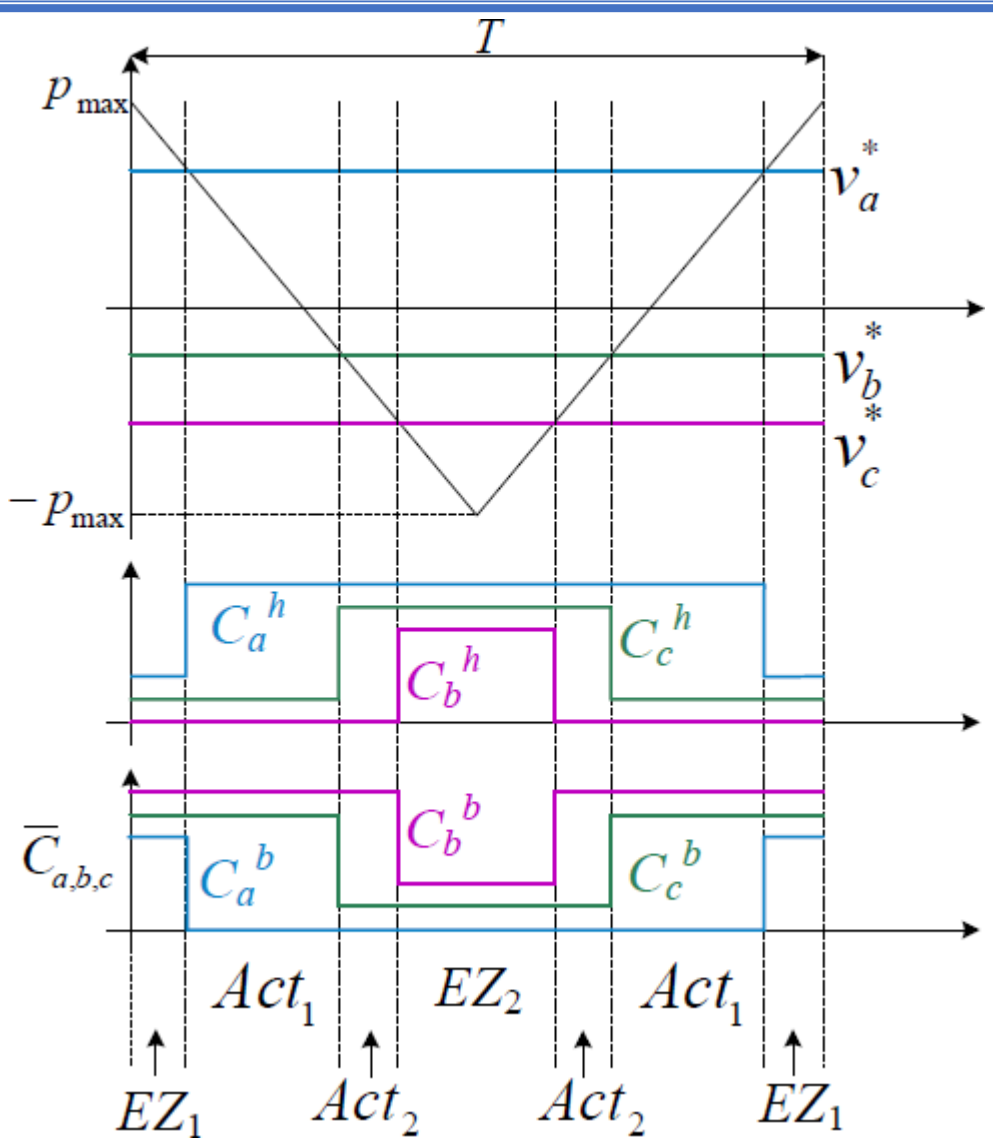


Figure .III.21: commande MLI conventionnelle .

B. L'état Shoot-Through :

L'onduleur de tension conventionnel accepte huit états : six états actifs (en échange de puissance instantanée entre la charge et le circuit DC) et deux états nuls (quand la charge est court-circuitée par des transistors). Tandis que l'onduleur à Z-source peut prendre neuf états c'est à dire un état de plus par rapport à l'onduleur conventionnel. Le neuvième état supplémentaire est le troisième état nul, survenant lorsque la charge est court-circuitée simultanément par des groupes inférieurs et supérieurs de transistors. Cet état est défini comme l'état Shoot-Through et peut-être généré par sept configurations différentes bien que des procédures équivalentes : indépendamment par chaque branche (trois procédures), simultanément par deux des trois branches (trois procédures), et simultanément à travers tous

les trois branches (une procédure)[40,41].

La caractéristique principale et unique de l'onduleur à Z-source est que l'état de "Shoot-Through" permet de soulever une tension de sortie supérieure à la tension d'entrée. De ce qui suit, nous allons présenter les méthodes de survoltage et qui permettent d'insérer l'état Shoot-Through sans modifier le fonctionnement des MLI, pour ne pas altérer la tension de sortie de ZSI.

C. MLI modifiée:

Tout les schémas des MLI traditionnels pourraient être utilisés pour contrôler l'onduleur Z-source avec des modifications adéquates ainsi que leurs rapports théoriques entrée-sorties contrôler l'onduleur Z-source avec des modifications adéquates ainsi que leurs rapports théoriques entrées-sorties sont toujours valables. Lorsque la tension continue est suffisamment élevée pour générer la tension de courant alternatif désiré, la commande MLI classique est utilisée. Dans chaque cycle de commutation, deux états nuls "non Shoot-Through" sont utilisés avec deux états actives adjacentes pour synthétiser la tension souhaitée [41,43]. Quand la tension continue n'est pas suffisante pour générer directement une tension de sortie désirée, une MLI modifiée avec des états " Shoot-Through " nuls serait utilisé pour accroître la tension du bus continu [41,42].

L'état Shoot-Through peut être introduit dans la MLI classique pour un onduleur de tension sans la modifier. On distribue les états Shoot-Through avec des durées égales dans les états zéro. D' après la figure III.22 on remarque que les états actifs ne sont pas changés après l'introduction de l'états Shoot-Through .

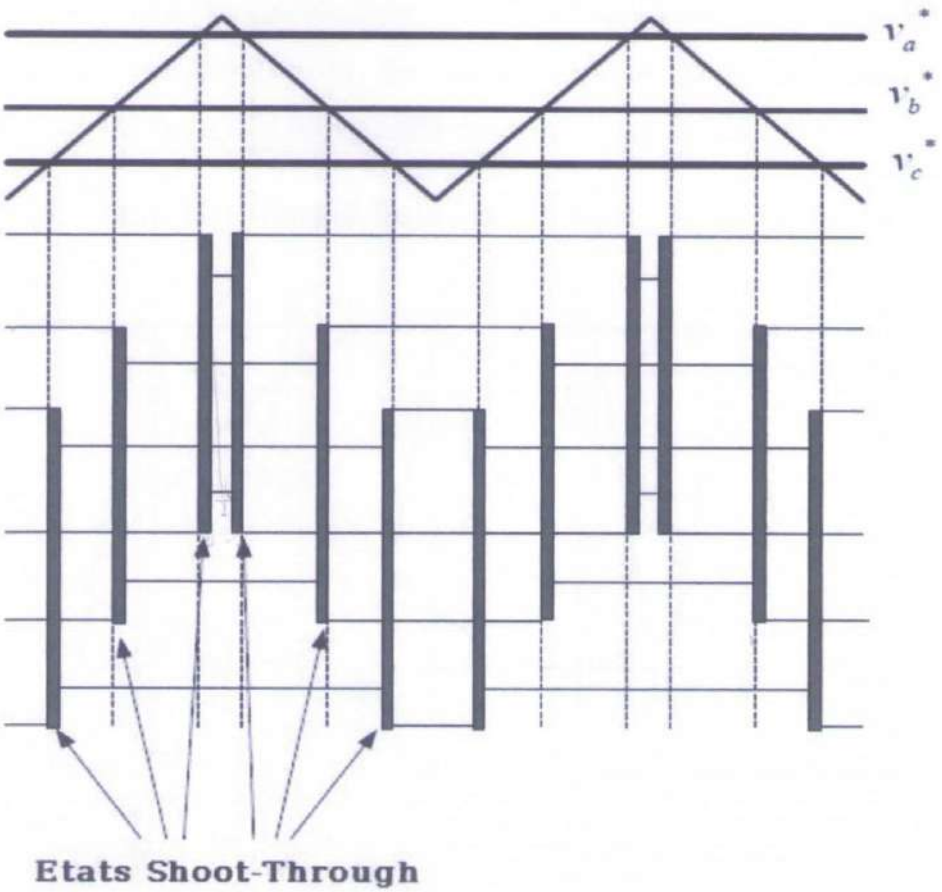


Figure .III.22: Commande MLI modifiée

III.4. Conclusion :

Nous avons terminé la troisième chapitre de cette étude dont nous avons parlé À propos de Les convertisseurs DC/DC (de type hacheur) , DC/AC de (types onduleurs) en général et les convertisseurs Z-source et nous en parlions de Principe de fonctionnement de l'onduleur z-source.

Nous avons abordés la commande du convertisseur z-source dans cette partie et nous avons fait une étude sur l'onduleur de tension à deux niveaux commandés par la commande Simple Boost, pour introduire l'état « Schoot-Through » qui n'existe pas dans les onduleurs conventionnels.

Chapitre IV : Résultats de simulation et interprétations

IV.1 Introduction :

Actuellement, plusieurs outils de simulation parmi les quels MATLAB/simulink sont utilisés dans les milieux universitaires.

La simulation de ce travail est faite par l'utilisation d'un logiciel MATLAB/simulink 6.5 et 7.7 qui est destiné principalement au calcul scientifique, de la modélisation et de la simulation, le noyau de calcul est associé à l'environnement SIMULINK permettant une modélisation basée sur des schémas blocs.

A l'aide de la simulation on a pu visualiser les courbes de réponse. L'exploitation des courbes ultérieur est réalisée à l'aide des blocs 'To Workspace'.

IV.2 Les résultats de Simulation :

IV.2.1 Les résultats de Simulation de générateur photovoltaïque :

(Figure IV.1) représente le schéma d'un générateur photovoltaïque sous SIMILINK (matlab) ce dernierse compose des éléments suivants :

- Le panneau solaire,
- la batterie .

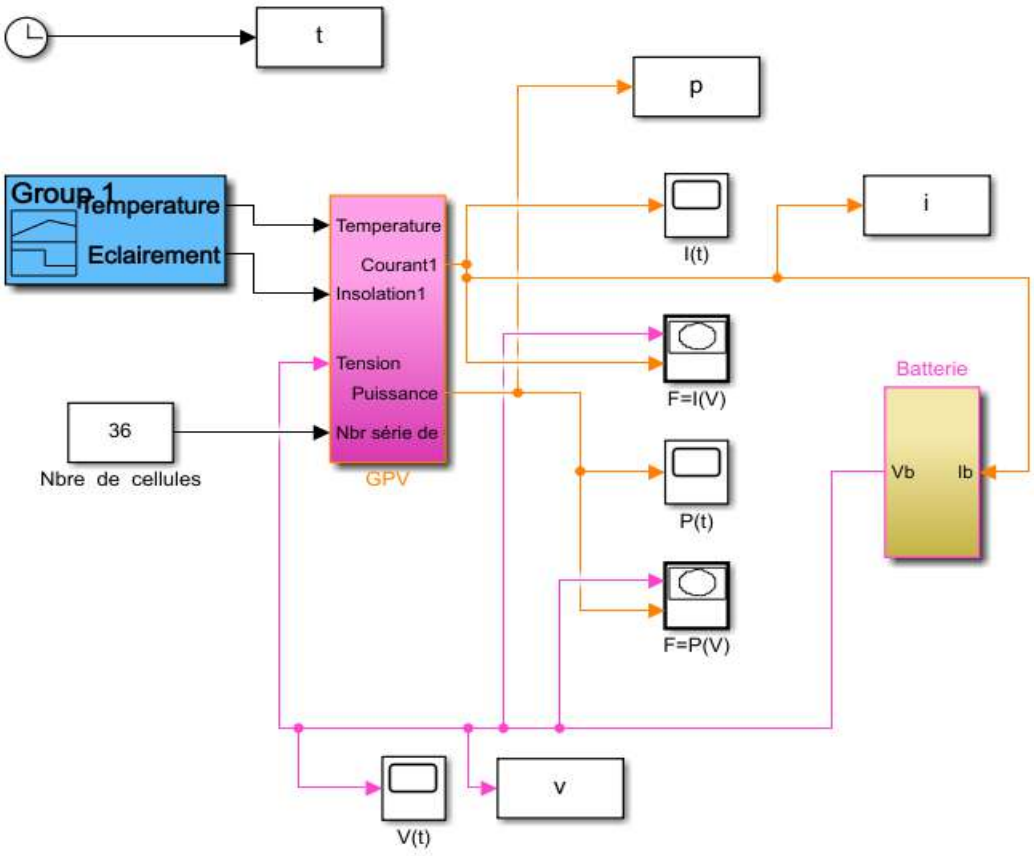


Figure IV.1 :le schéma d'un générateur photovoltaïque.

(Figuire IV. 2) représente le Schéma bloc de la simulation du panneau solaire avec 36 cellules sous 1000W/m^2 .

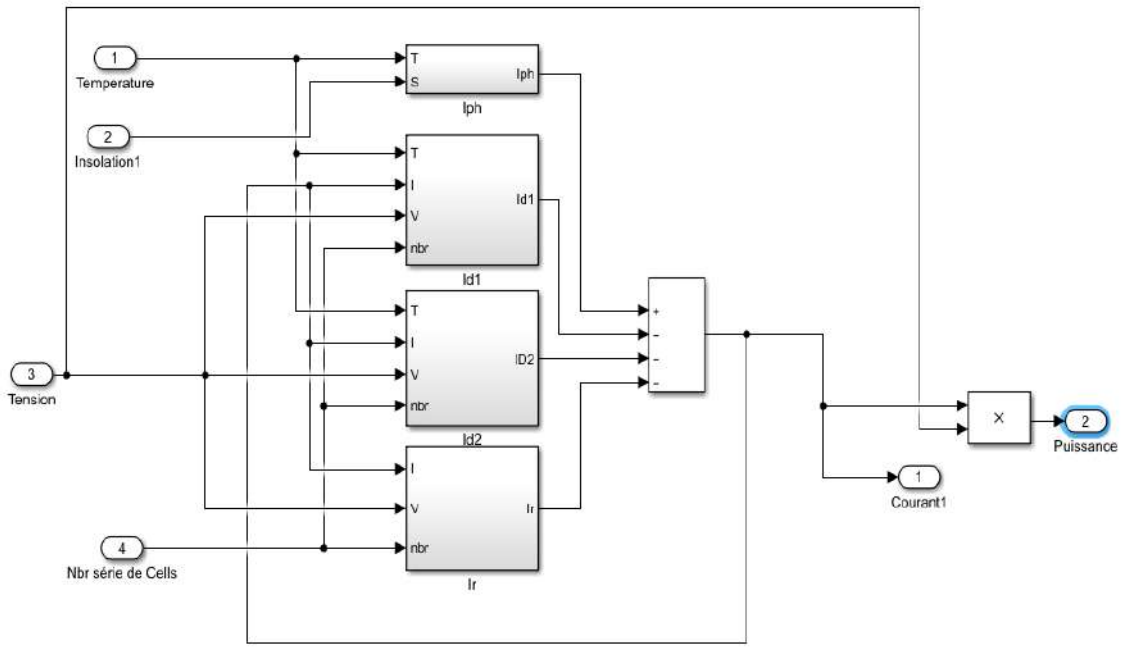


Figure IV.2 : Schéma bloc de la simulation du panneau solaire avec 36 cellules sous 1000W/m^2.

(Figure IV.3) représente Fonction de transfert de la batterie.

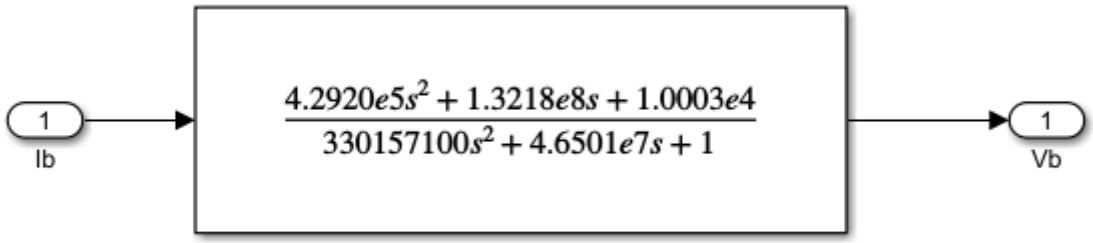


Figure IV. 3: Fonction de transfert de la batterie.

Le courant ,la puissance ,la tension et les caractéristiques Ipv(V) et Ppv (V) de générateur PV dans les conditions standard (E=1000 W/m^2 et T=25°C) sont présenté comme suit dans les figure (IV. 4 , IV.5 ,IV.6 ,IV.7 et IV.8).

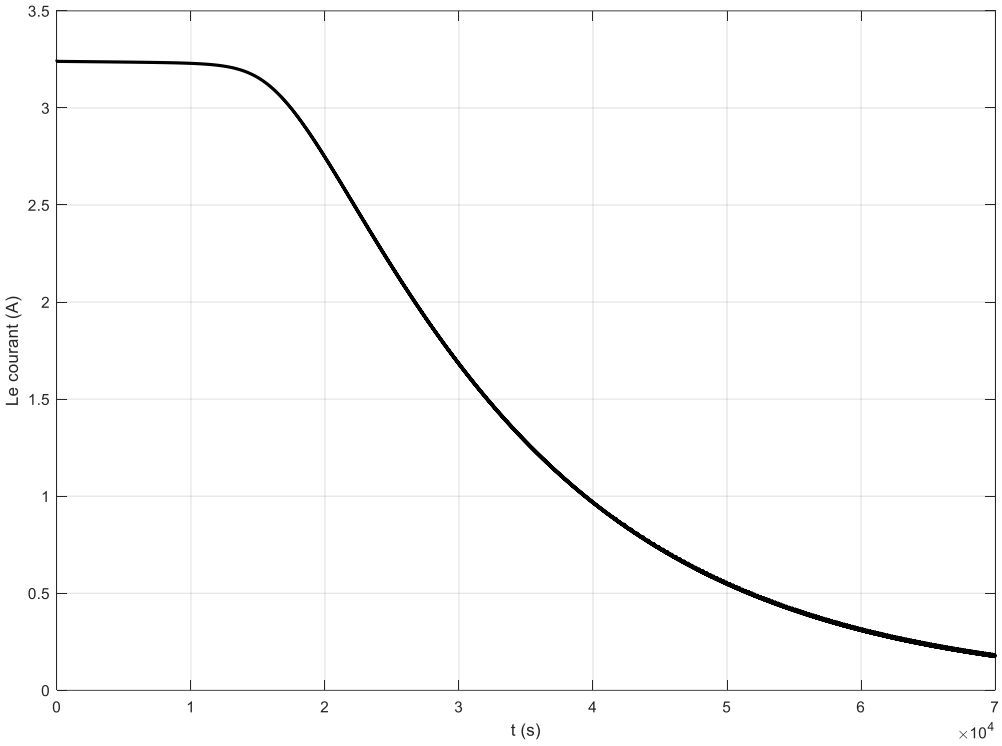


Figure IV.4: Le courant de PV.

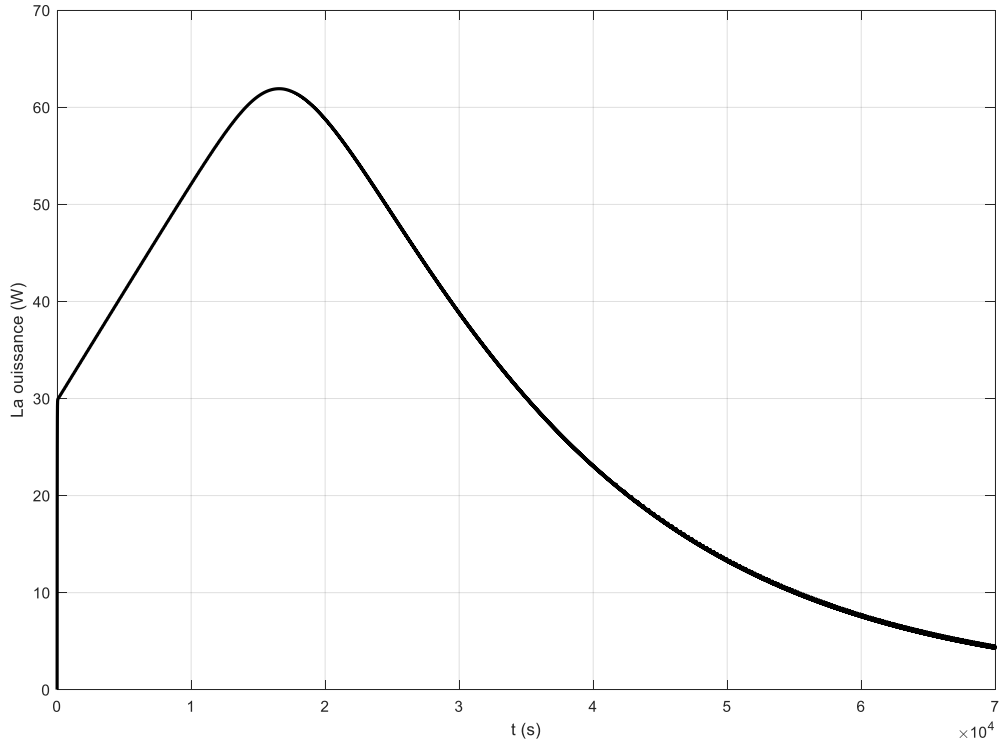


Figure IV.5: La puissance de PV.

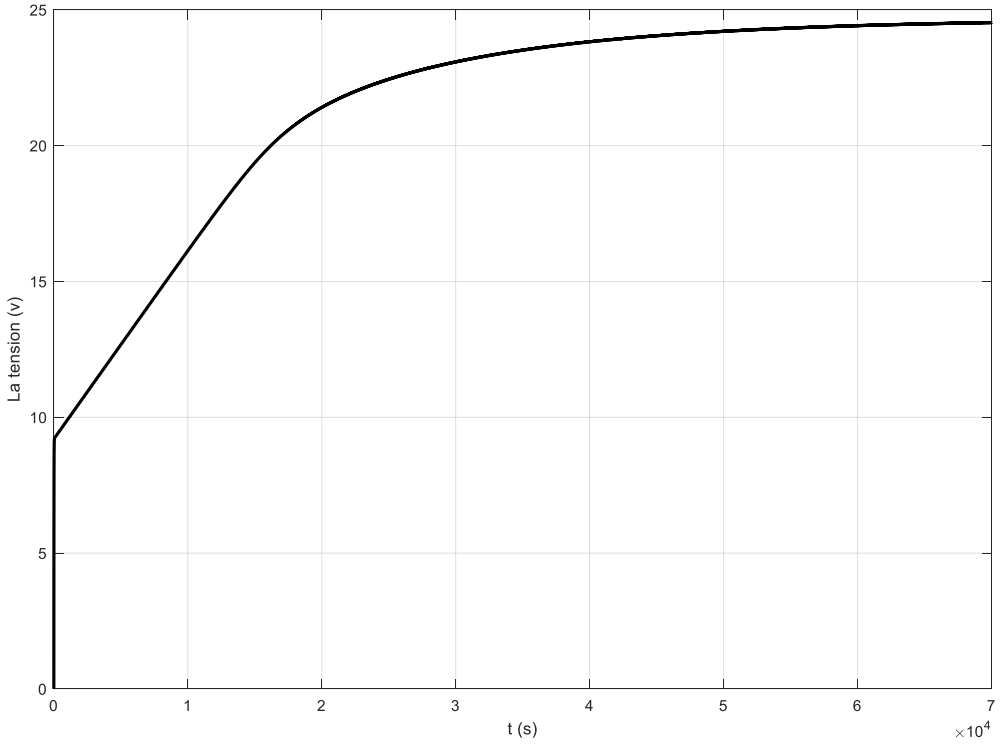


Figure IV.6 : La tension à la sortie de PV.

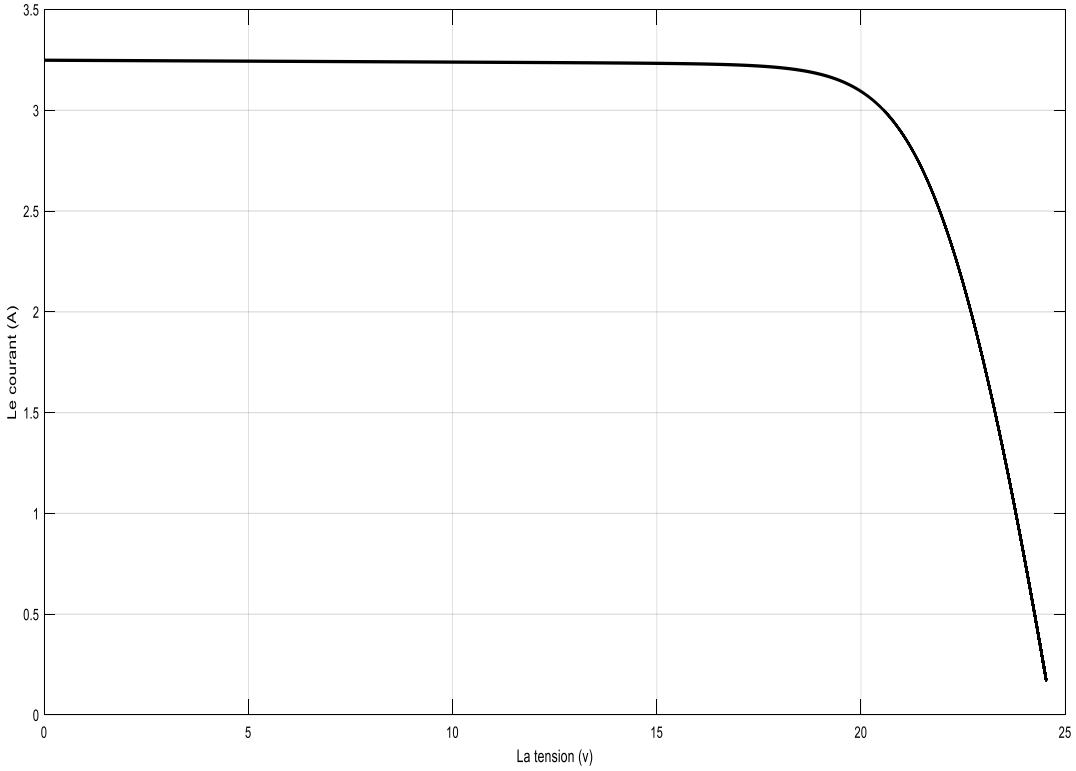


Figure IV.7: Caractéristique I PV(V) dans les conditions standard.

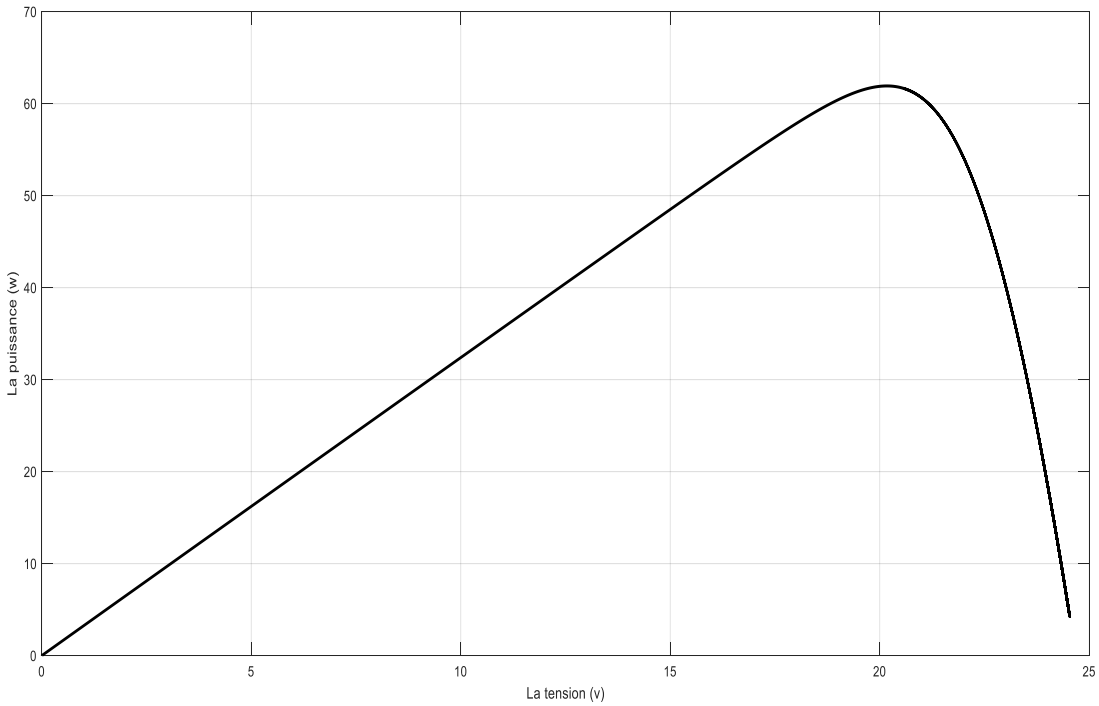


Figure IV.8: Caractéristique P PV(V) dans les conditions standard.

IV.2.2 Les résultats de Simulation de générateur photovoltaïque avec La commande MPPT :

IV.2.2.1 Perturbation Et Observation (P&O, Perturbation And Observe) :

(Figure IV.9) représente le schéma d'un générateur photovoltaïque avec commande mppt (contrôleur P&O) sous SIMILINK (Matlab) ce dernier se compose des éléments suivants :

- Le panneau solaire,
- le convertisseur dc-dc (le hacheur),
- la batterie,
- et le contrôleur MPPT(P&O).

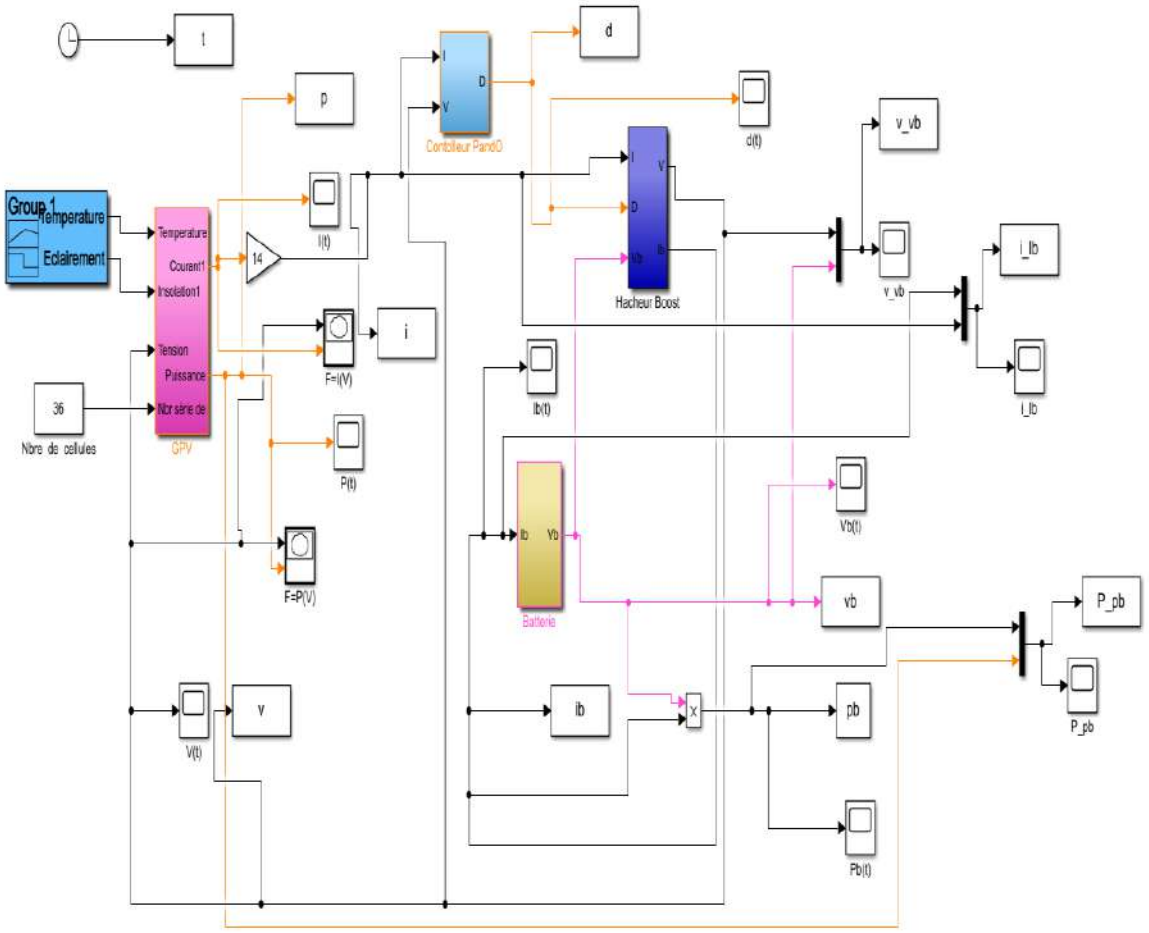


Figure IV.9 : Schéma sous SIMULINK d'un générateur PV avec La commande MPPT (P&O, Perturb And Observe) .

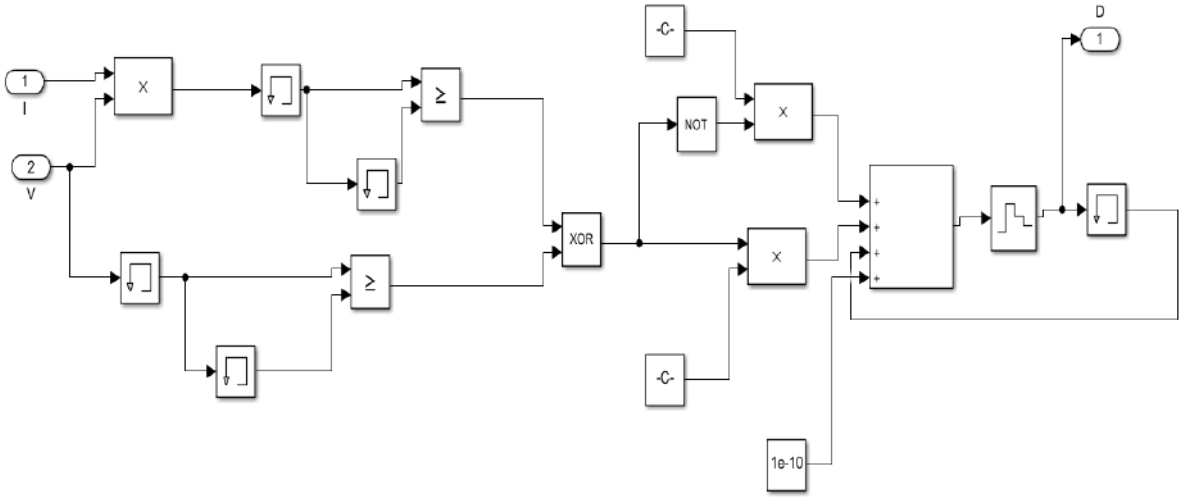


Figure IV.10 : Schéma sous SIMULINK de controleur P&O.

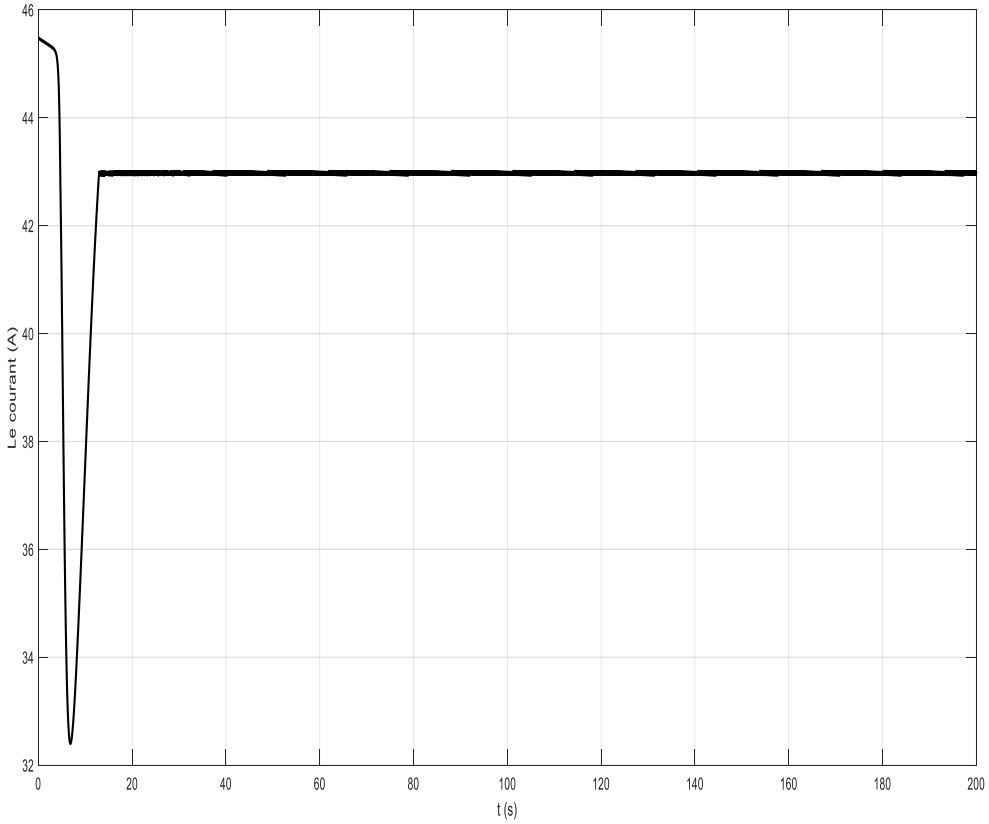


Figure IV.11: Le courant de pv avec commande mppt (P&O et hacheur boost).

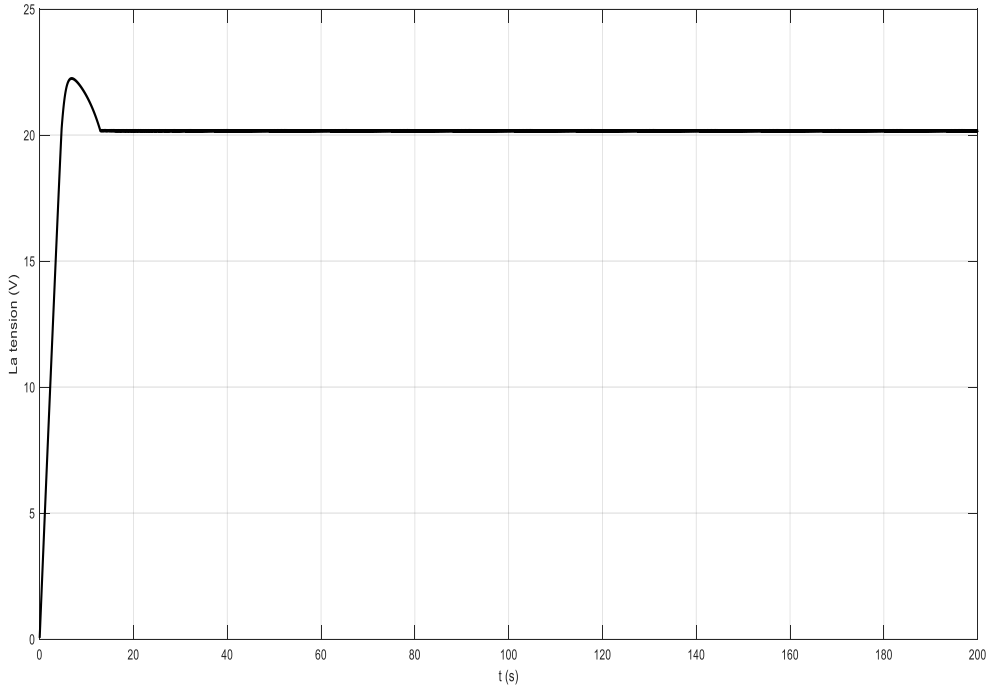


Figure IV.12 : La tension de PV avec commande mppt (P&O).

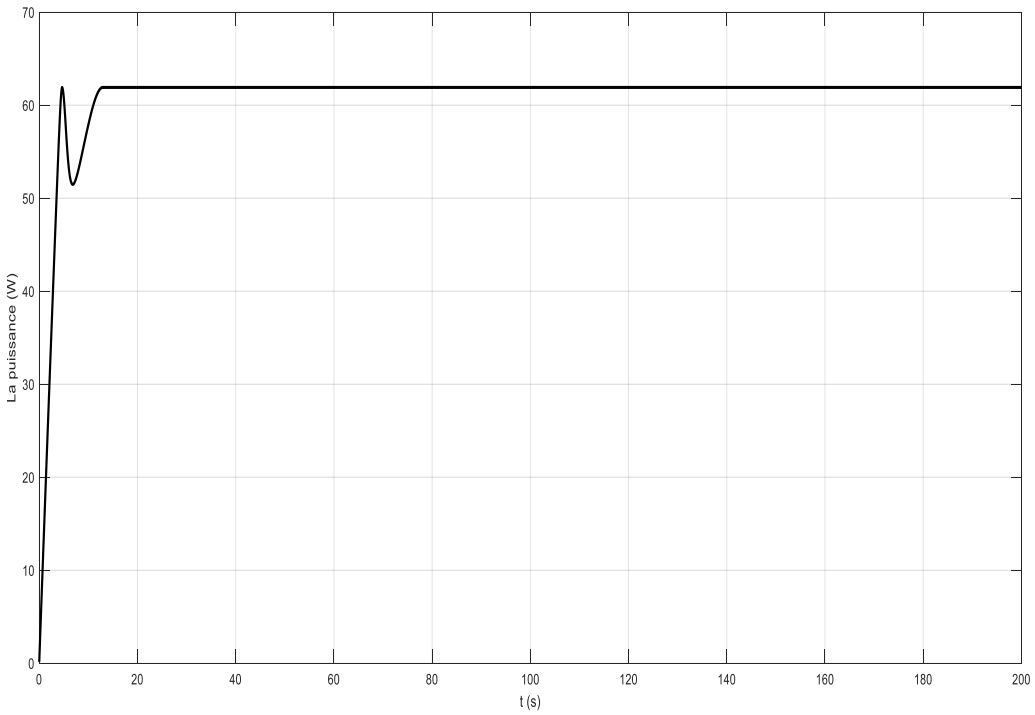


Figure IV.13 : La puissance de PV avec commande mppt (P&O).

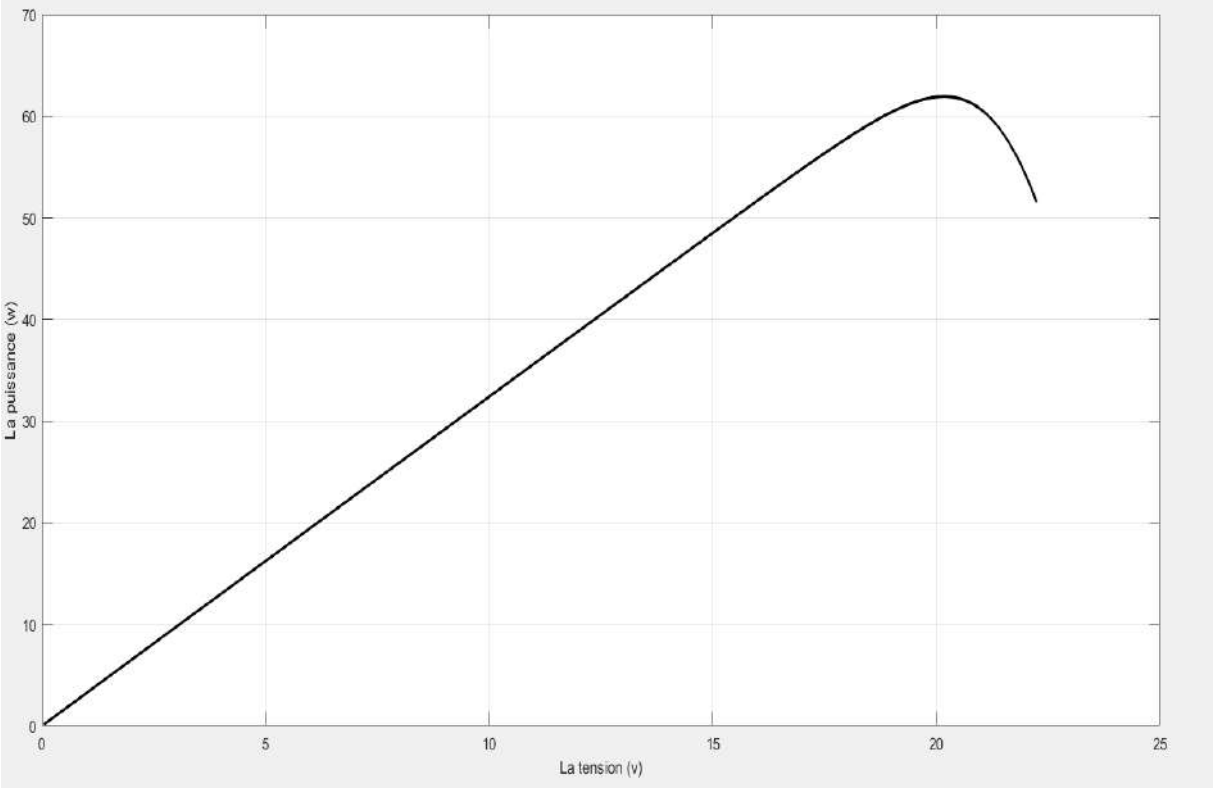


Figure IV.14 : Caractéristique P PV(V) dans les conditions standard de PV avec commande mppt (P&O).

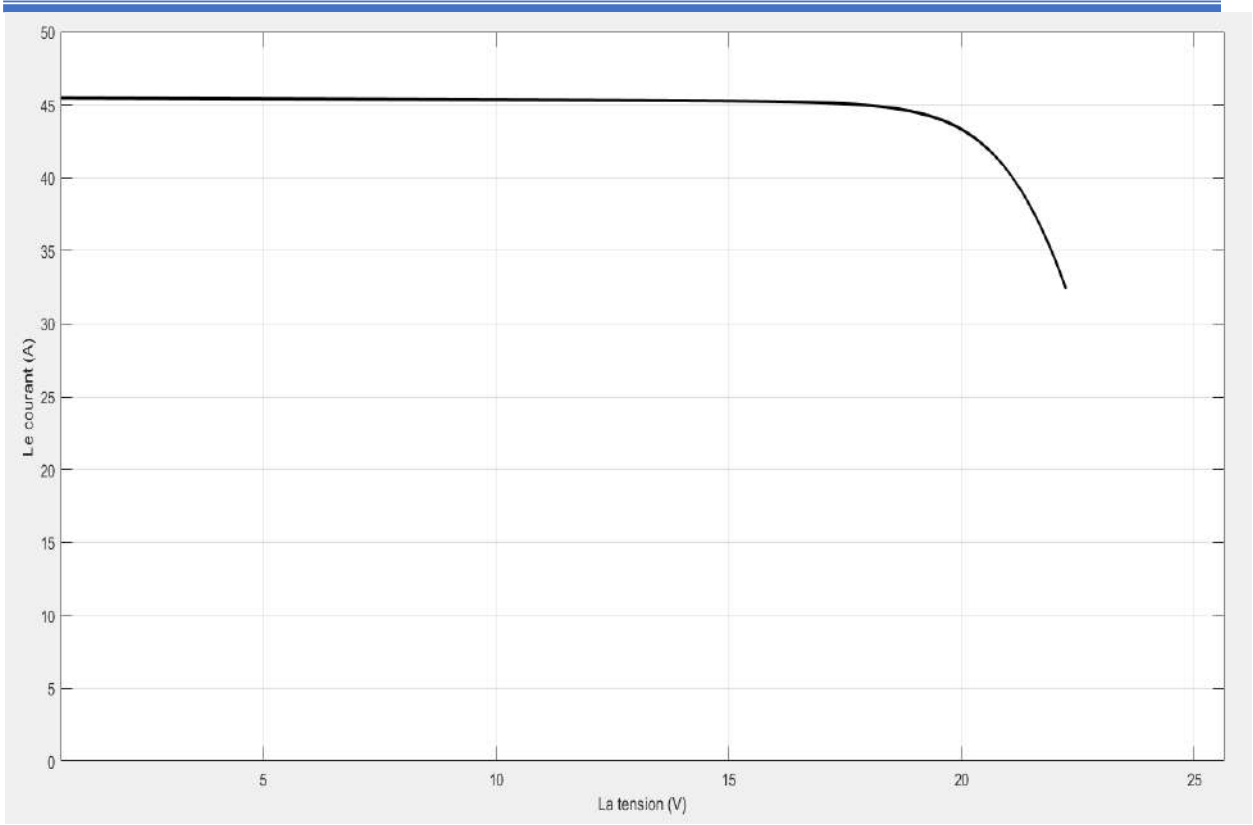


Figure IV.15: Caractéristique I PV(V) dans les conditions standard de PV avec commande mppt (P&O).

Ce genre de techniques basées sur la dérivée de la puissance générée par les panneaux solaires afinde traquer le point de puissance maximale MPP présente des oscillations au-dessous de ce point ce quedonne que la puissance maximale n'est jamais atteinte, cela est la cause de l'approximation de la dérivée continue par une différence discrète ce qui conduite à l'impossibilité d'annuler la dérivée.

IV.2.2.2 réseaux de neurones artificiels :

(Figure IV.16) représente le schéma d'un générateur photovoltaïque avec commande mppt (réseaux de neurones artificiels) sous SIMILINK (Matlab) :

ce dernier se compose des éléments suivants :

- Le panneau solaire,
- le convertisseur dc-dc (le hacheur),
- la batterie,
- et le contrôleur MPPT(réseaux de neurones).

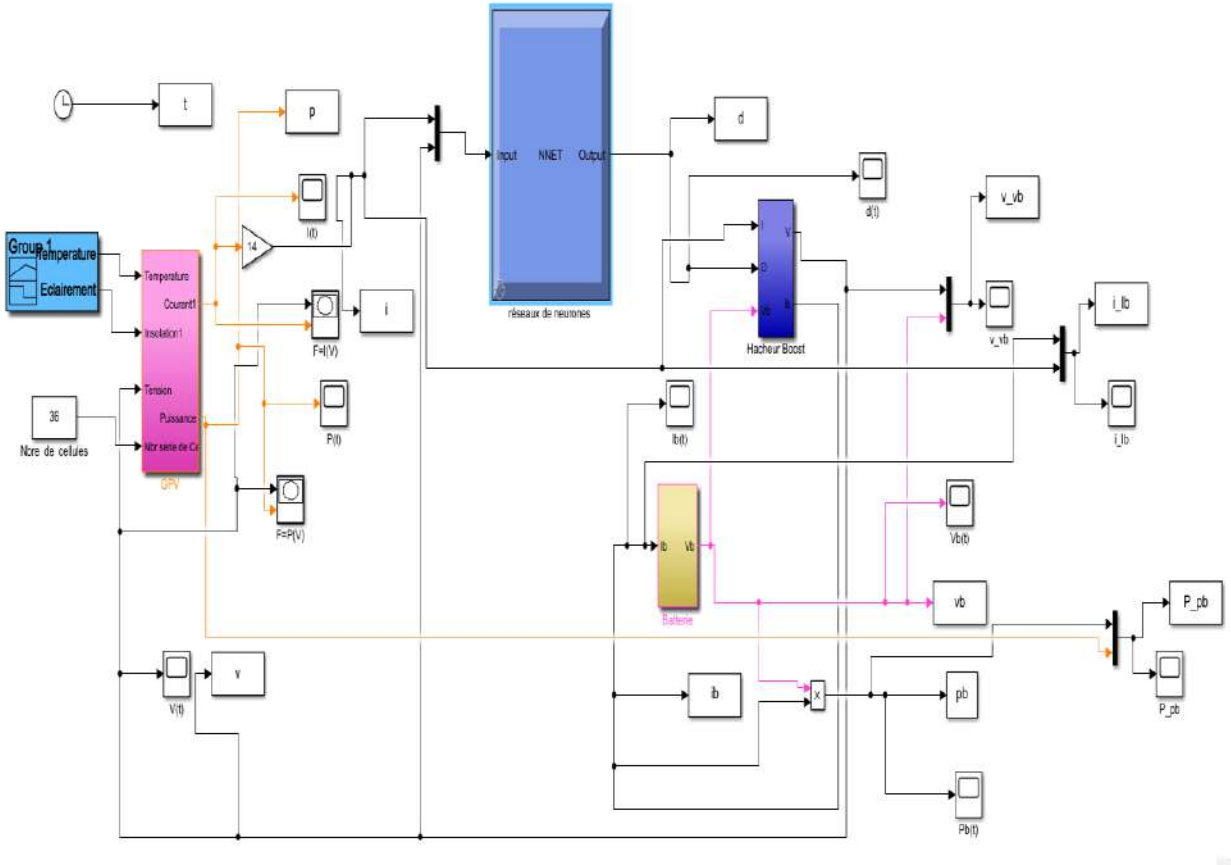
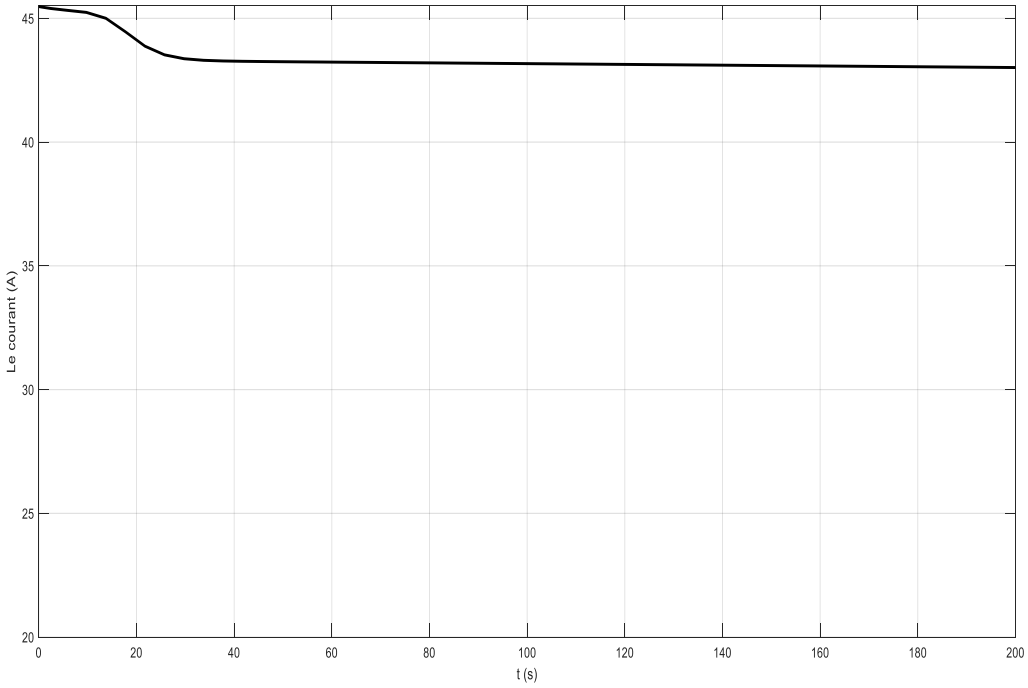
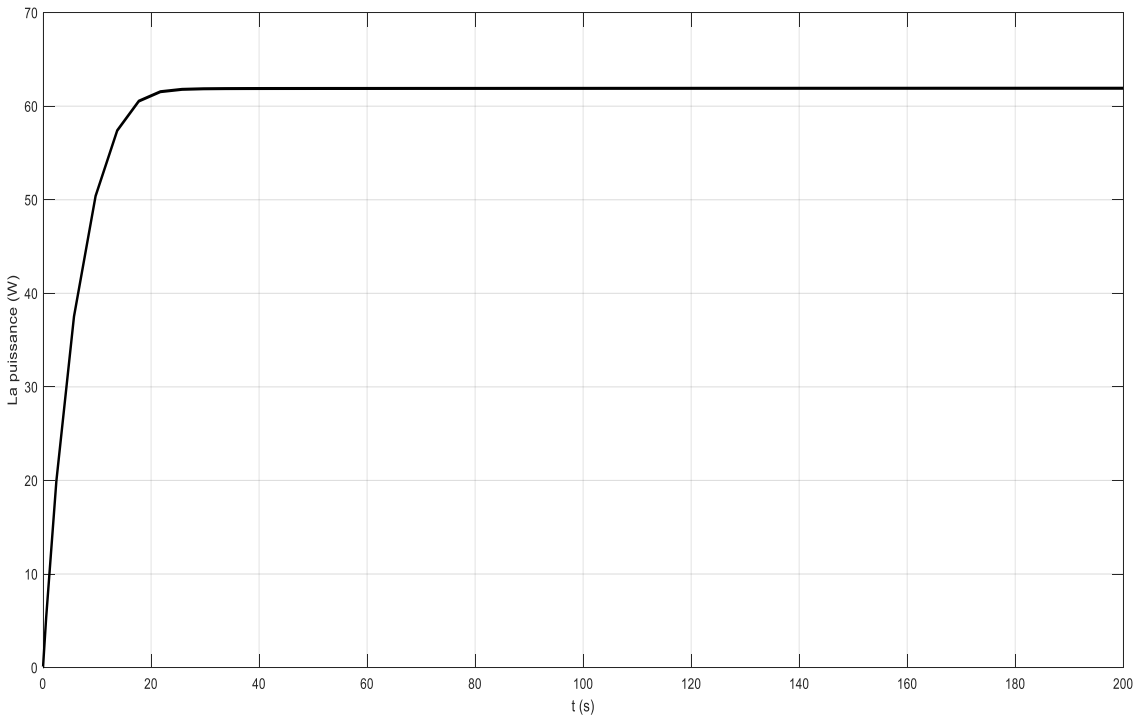


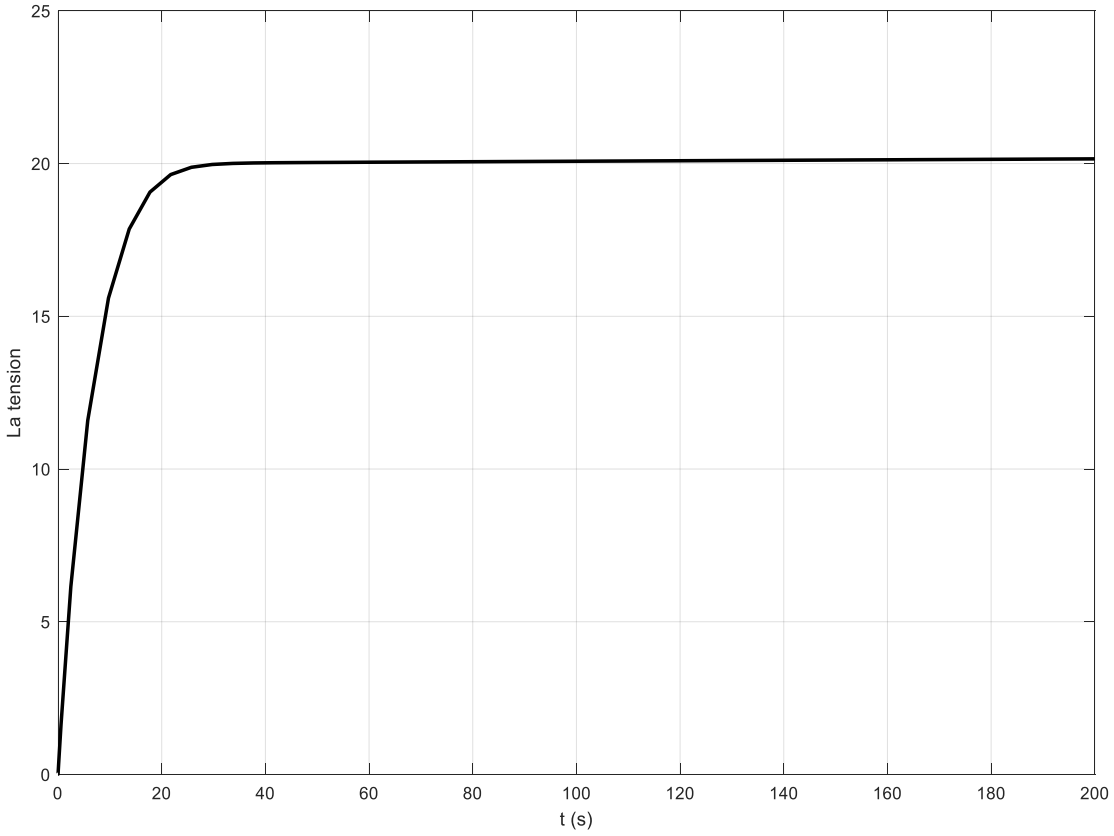
Figure IV.16 : Schéma sous SIMULINK d'un générateur PV avec La commande MPPT (réseaux de neurones artificiels).



Figuire IV.17 : Le courant de PV avec commande mppt (réseaux de neurones artificiels).



Figuire IV.18 : La puissance de PV avec commande mppt (réseaux de neurones artificiels).



Figuire IV.19: La tension de PV avec commande mppt (réseaux de neurones artificiels).

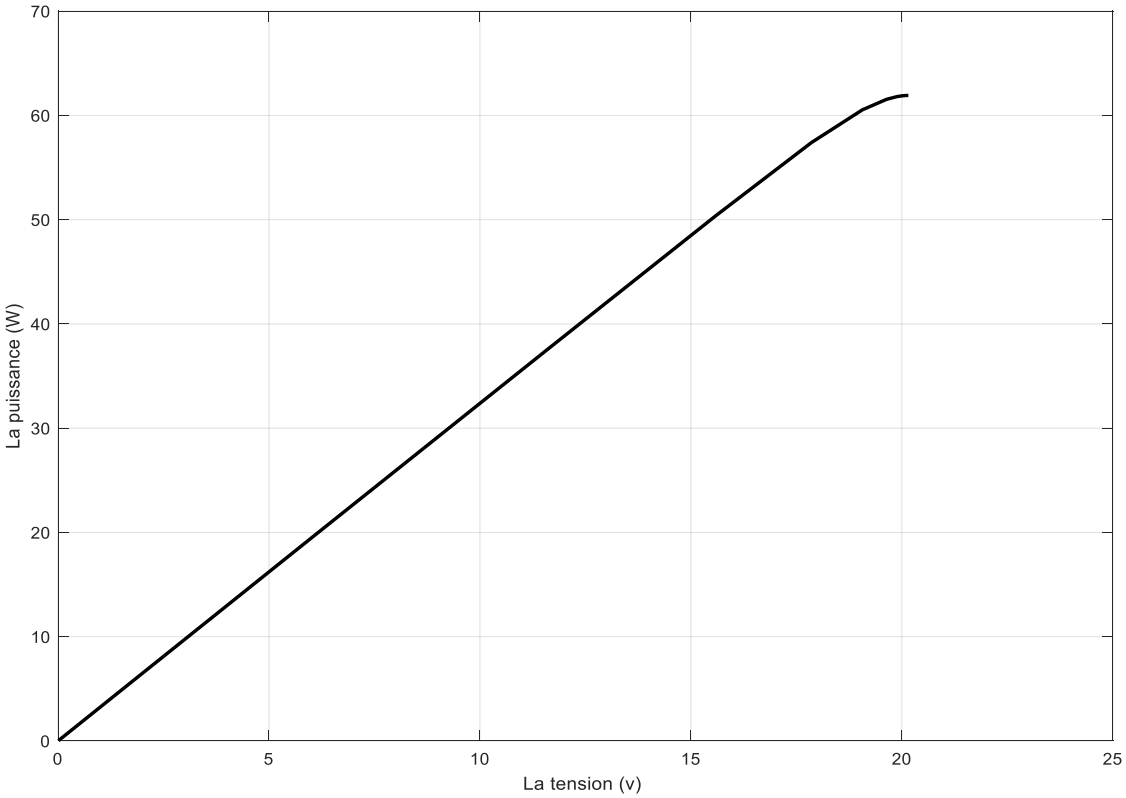


Figure IV.20 : Caractéristique P PV(V) dans les conditions standard de PV avec commande mppt (réseaux de neurones artificiels).

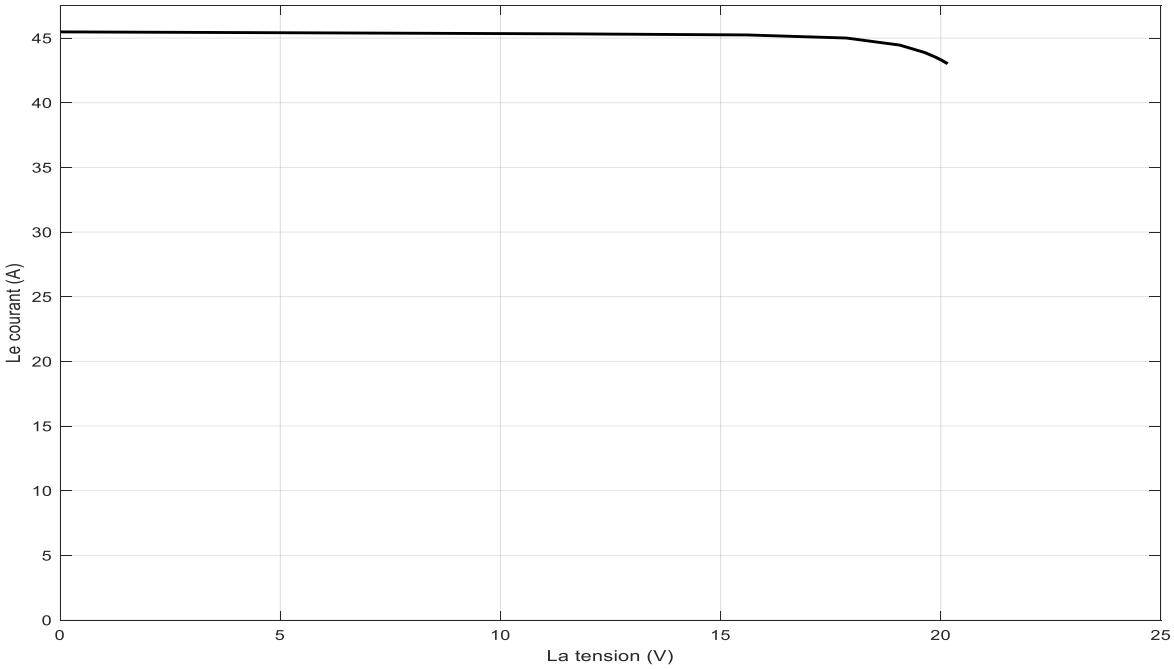


Figure IV.21: Caractéristique I PV(V) dans les conditions standard de PV avec commande mppt (réseaux de neurones artificiels).

IV.2.2.3 Comparaison entre les résultats de Perturbation Et Observation (P&O, Perturbation And Observe) et de réseaux de neurones artificiels :

(Figure IV.22) représente P PV(V) dans les conditions standard de PV avec les deux méthode de commande mppt (P&O, Perturbation And Observe et réseaux de neurones artificiels) :

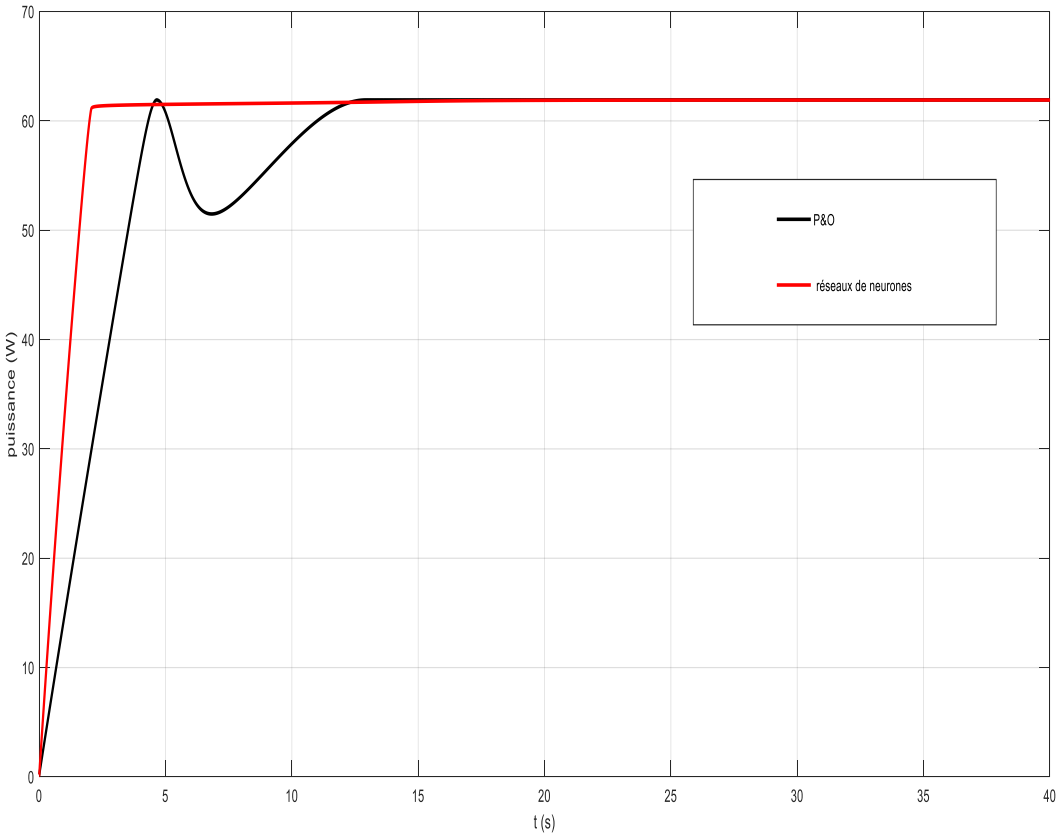


Figure IV.22 : Caractéristique P PV(V) dans les conditions standard de PV avec commande mppt (P&O, Perturbation And Observe et réseaux de neurones artificiels).

Remarque :

nous remarquons que le technique de réseaux de neurones artificiels plus rapide (temps de réponse) en comparaison avec le technique de (P&O, Perturbation And Observe) .

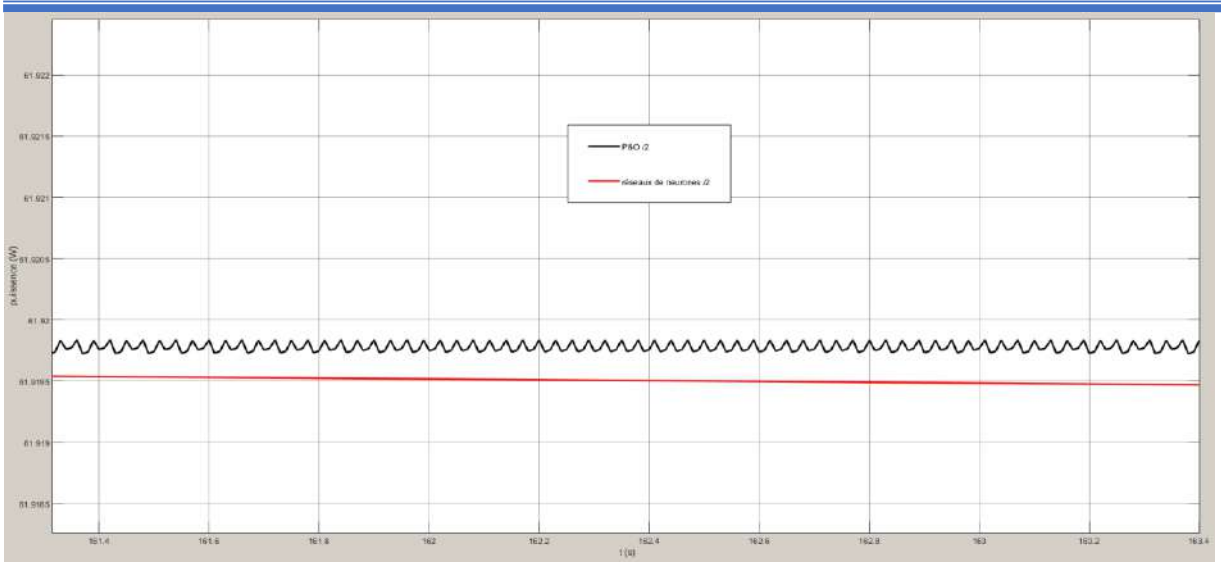


Figure IV.23 : zoom en Caractéristique P PV(V) dans les conditions standard de PV avec commande mppt (P&O, Perturbation And Observe et réseaux de neurones artificiels).

Remarque :

nous remarquons que le technique de réseaux de neurones artificiels plus stable en comparaison avec le technique de (P&O, Perturbation And Observe) que nous observons des perturbation dans le technique de P&O.

Donc : Nous concluons que la méthode de réseaux de neurones artificiels est meilleure que la méthode P&O, Perturbation And Observe.

IV.2.3 le convertisseur DC-DC (le hacheur) :

(Figure IV.24) représente la tension a l'entré et la tension sortie de l'hacheur boost

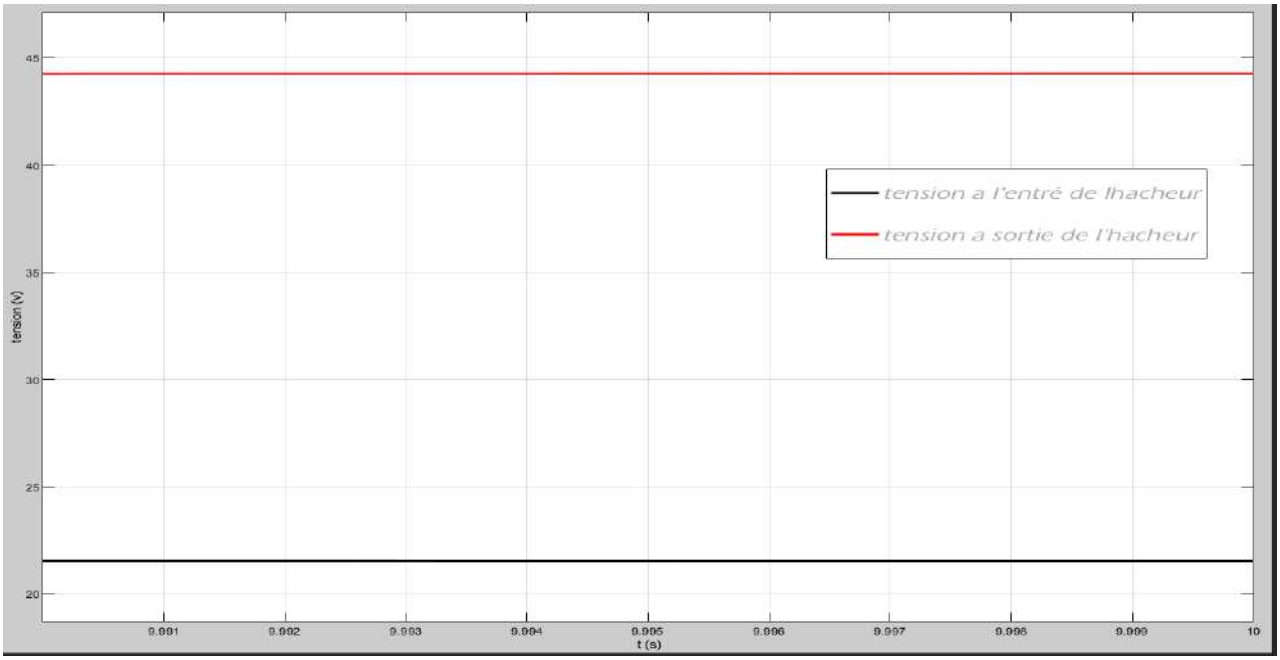


Figure IV.24: la tension a l'entré et la tension sortie de l'hacheur boost .

On remarque que la tension d'entrée du hacheur presque est égale à V = 22 volts et que la tension de sortie de l' hacheur est V = 44 volts.

donc : l'hacheur augmenté la valeur de la tension.

IV.2.4 Simulation de l'installation photovoltaïque et Z-source :

(Figure IV.25) représente le schéma d'un générateur photovoltaïque avec onduleur z-source sous SIMILINK (matlab). Ce dernier compose des éléments suivants :

- Le panneau solaire,
- PWM générateur .

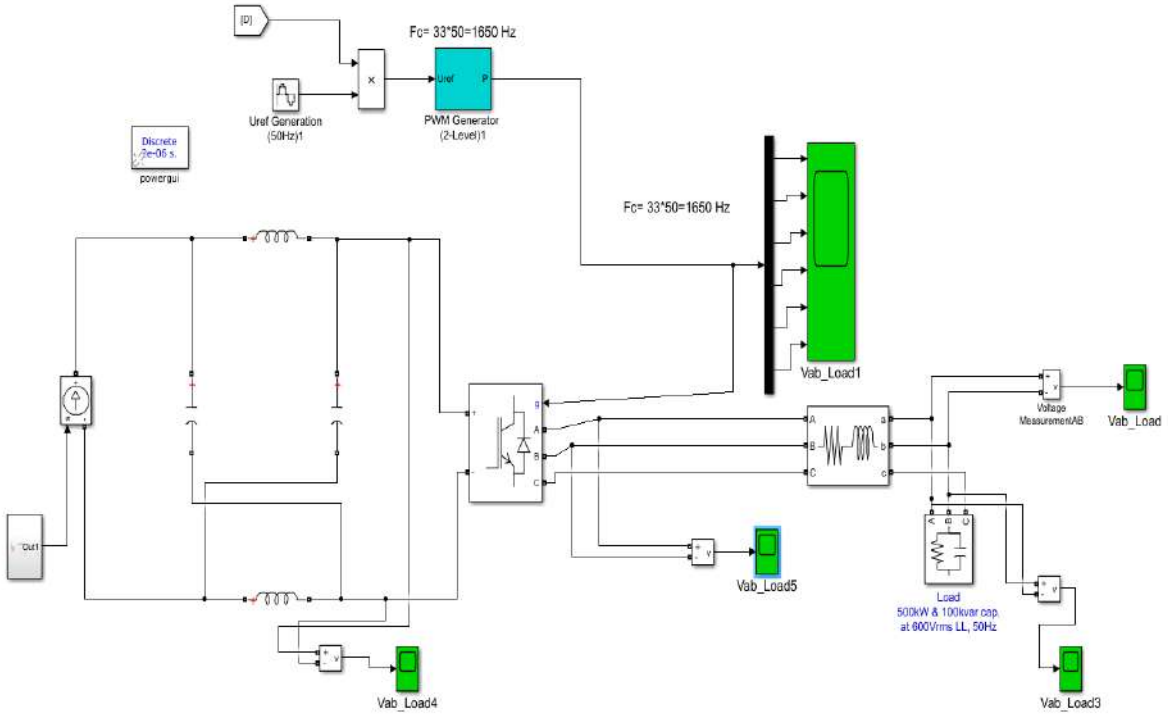


Figure IV.25 : le schéma d'un générateur photovoltaïque avec onduleur z-source sous SIMILINK (matlab).

Figure IV.26 montre la modulation, les signaux d'attaque pour les sixcommutateurs les signaux ST du procédé de commande simple Boot

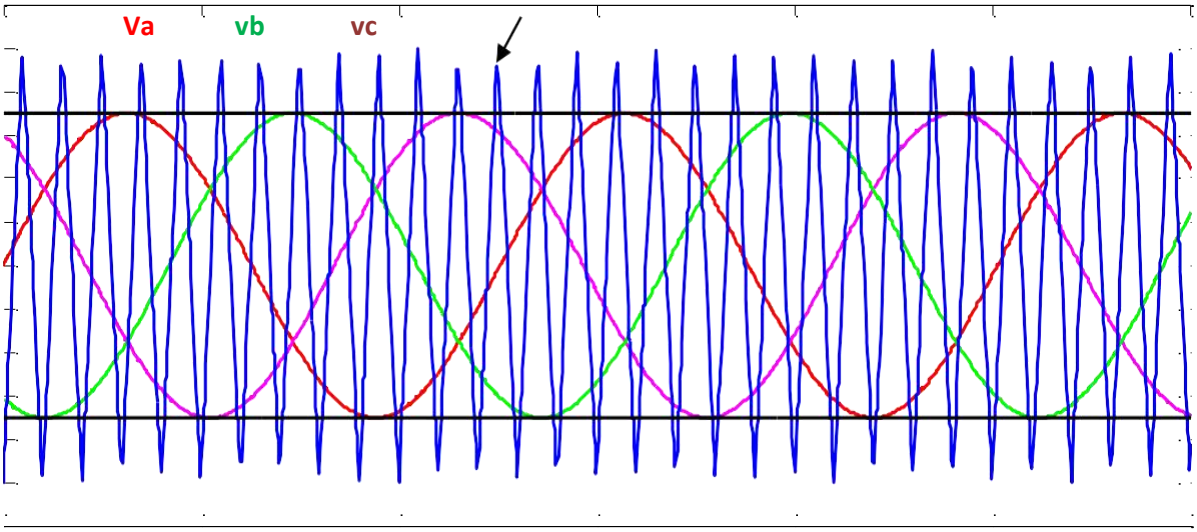


Figure IV.26 : Modulation.

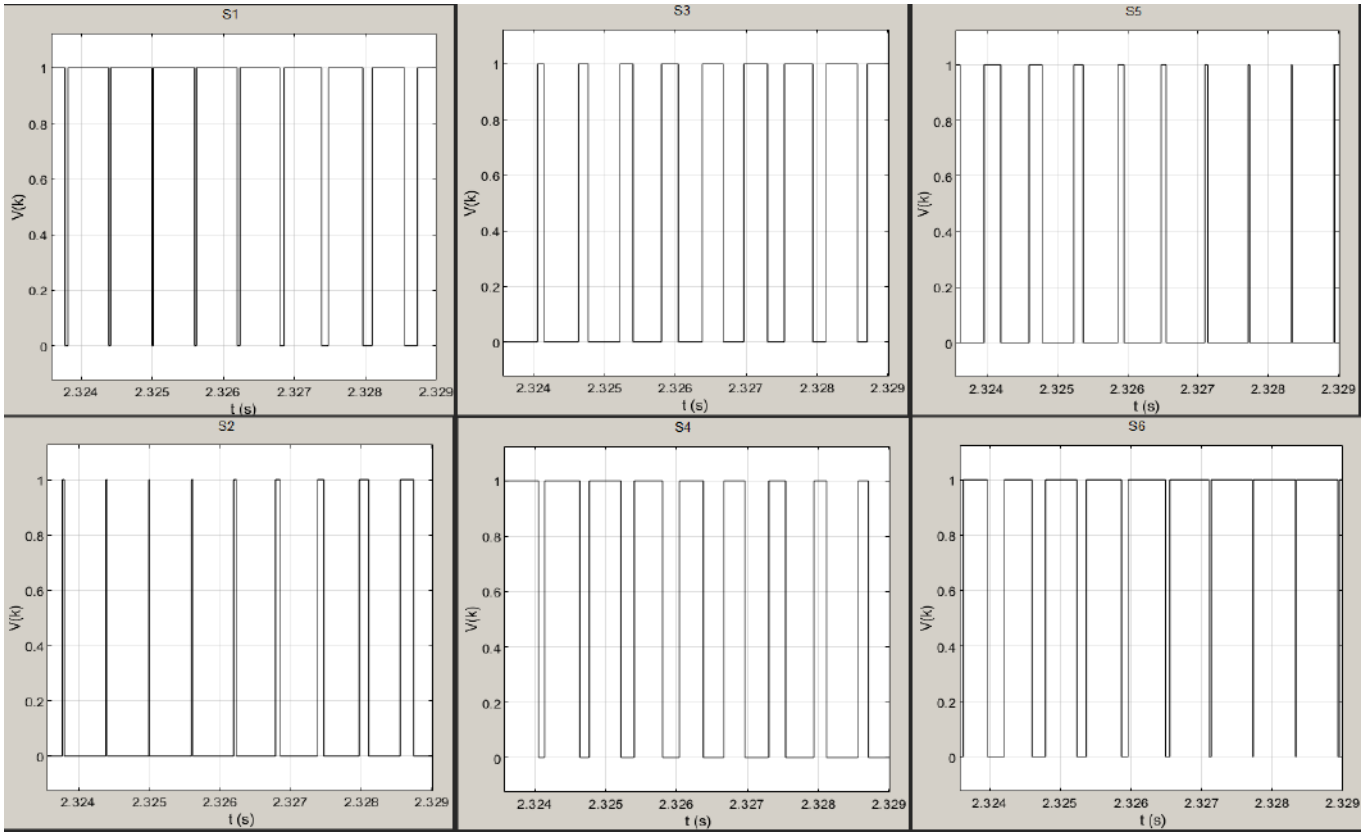


Figure IV.27 : Les commutateur (S1,S2,S3,S4,S5,S6) .

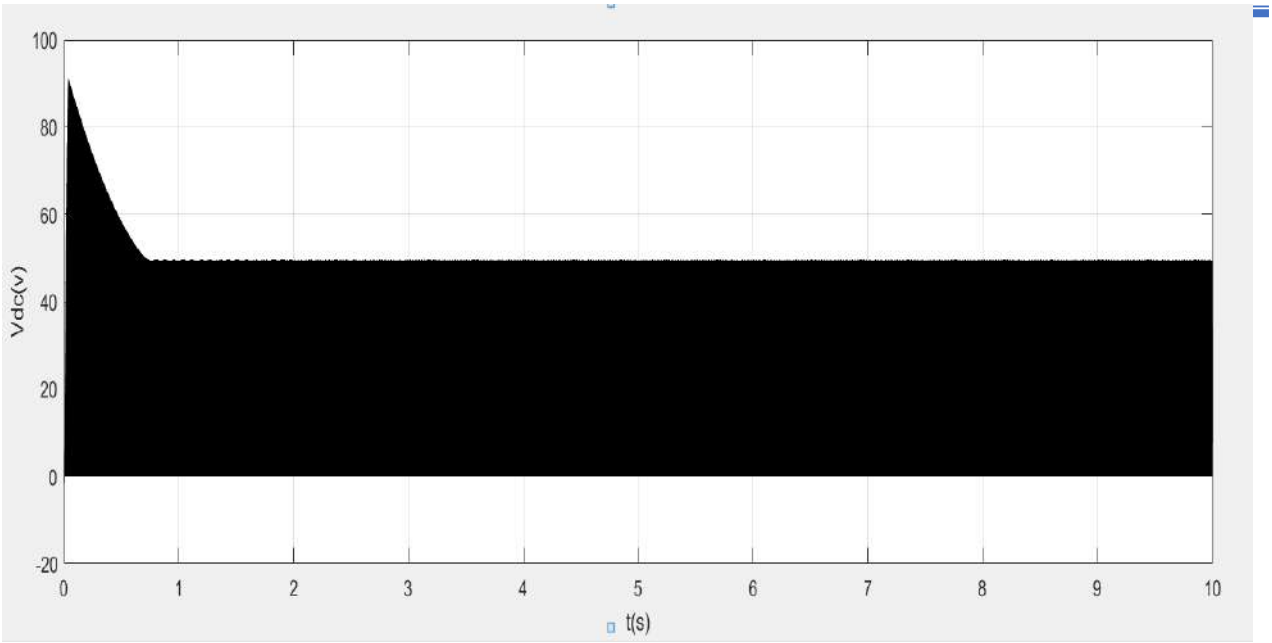


Figure IV.28 : tension de la sortie z-source.

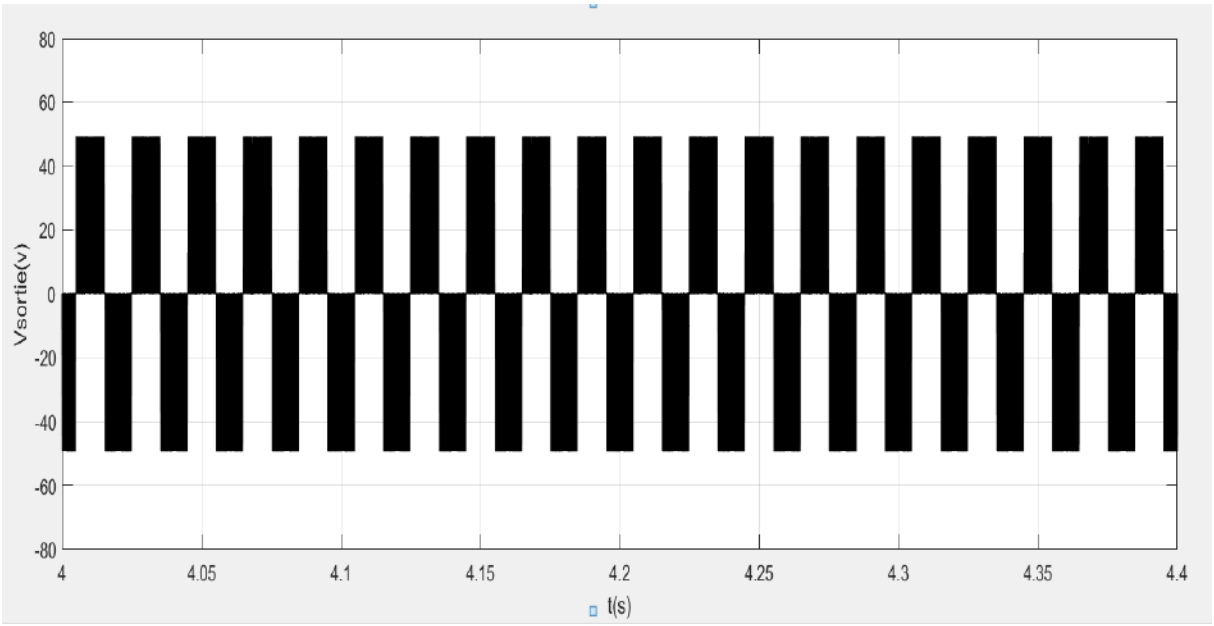


Figure IV.29 : tension de la sortie de londuleur ligne-ligne .

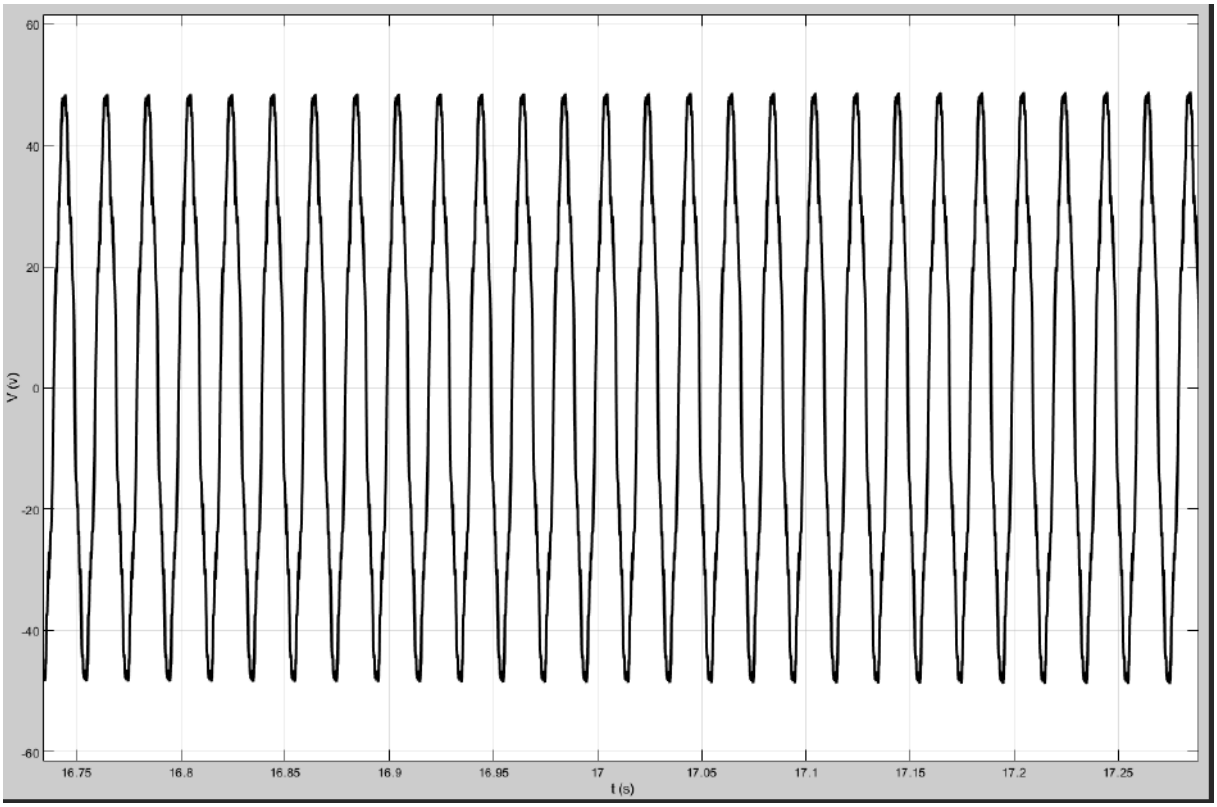


Figure IV.30 : La tension générale à la sortie de l'onduleur z-source avec filtre .

Remarque :

on remarque que la tension V à la sortie de l'onduleur z-source est amplifie de 22 à 49 V avec une forme alternative.

Donc l'intérêt de convertisseur z-source est pouvoir obtenir une tension alternative de sortie plus importante qu'avec un onduleur classique, soit un effet « Boostnaturel ».

IV.3 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons analysé et discuté les résultats que nous avons obtenus à partir des schémas et les sumilation que nous avons étudiés (les commandes mppt, hacheur boost et les convertiseur z-source).

Nous rappelons les conclusions les plus importantes, qui sont :

- la méthode de réseaux de neurones artificiels est meilleure que la méthode P&O (Perturbation And Observe).
- l'hacheur augmenté la valeur de la tension.
- l'intérêt de convertisseur z-source est pouvoir obtenir une tension alternative de sortie plus importante qu'avec un onduleur classique, soit un effet « Boost naturel ».

Conclusion générale

Conclusion générale :

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre du développement des nouveaux convertisseurs, dans le but d'améliorer la fiabilité et le rendement des systèmes de production des énergies électriques à source renouvelable. L'objectif principale dans notre projet est étudié l'onduleur z-source et ses différentes stratégies de commande et on a particulier la commande Simple Boost,

Nous avons commencé par les Généralité sur les systèmes photovoltaïques dans le chapitre I

Dans le deuxième chapitre , nous avons parler sur les commandes MPPT (types et pricipe de fonctionnement) , surtout Perturbation Et Observation et La technique MPPT de réseaux de neurones artificiels .

Dans le troisième chapitre ,nous avons parlé À propos de Les convertisseurs DC/DC (de type hacheur) , DC/AC de (types onduleurs) en général et les convertisseurs Z-source et nous en parlions de Principe de fonctionnement de l'onduleur z-source et Nous avons abordés la commande du convertisseur z-source .

Dans le dernier chapitre nous avons analysé et discuté les résultats que nous avons obtenus à partir des schémas et les sumilation que nous avons étudiés (les commandes mppt, hacheur boost et les convertiseur z-source).

quelques perspectives :

- ✓ la méthode de réseaux de neurones artificiels est meilleure que la méthode P&O (Perturbation And Observe).
- ✓ l'hacheur augmenté la valeur de la tension.
- ✓ l'intérêt de convertisseur z-source est pouvoir obtenir une tension alternative de sortie plus importante qu'avec un onduleur classique, soit un effet « Boost naturel ».

Bibliographie :

[1] F. Chekired, « Etude et implémentation d'une commande MPPT neuro-floue sur FPGA», mémoire demagister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2008.

[2] « S. Ameziane Implantation expérimentale de MPPT pour un système de génération hybride solaire éolienMémoire de Magistère Université de Batna Laboratoire des Systèmes Propulsion Induction Electromagnétiques LSP .pdf ».

[3] W.Bennaci, « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT », Master, Université Kasdi Merbah–Ouargla, Algérie, 2012.

[4] Latreche . s et bouzid. k << etude et realisation d'un systeme photovoltaïque a base d'une carte arduinouno >> universite kasdi merbah,ouargla, algerie, 2015.

[5] A. C. Pastor, "Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques ," Institit National de Science Appliquée de toulouse Thèse de doctorat.

[6] A. Labouret and M. Villoz, Energie Solaire Photovoltaïque - 4ème édition. France: Dunod, 2009.

[7] G. Dzimano, "Modeling of photovoltaic systems," Master thesis, The Ohio State University, USA, 2008.

[8] F. LASNIER, "Photovoltaic engineering handbook", ed. Adam Hilger, U.K.; 1990.

[9] Jacques bochirol – ines eduction << le photovoltaique integre au batiment ensag>> 21 novembre 2012 formation-solaire-photovoltaique.

[10] Afghoul H., Krim F., Chikouche D., Beddar A., « A novel implementation of MPPT sliding mode controller for PV generation systems », EUROCON 2013 IEEE, Zagreb, Croatia, pp. 789 – 794, 2013.

[11] Afghoul H., Krim F., Chikouche D., Beddar A., Babes B., « Real-time implementation of PV energy injection via single phase active power filter under variable conditions », The First National Conference on Electronics and New Technologies (NCENT'2015), M'Sila, Algeria, 2015.

[12] Afghoul H., Krim F., Chikouche D., « Increase the photovoltaic conversion efficiency using Neuro-fuzzy control applied to MPPT », Renewable and Sustainable Energy Conference (IREC'13), Ouarzazate, Morocco, pp. 348 – 353, 2013.

[13] Yassine LASMI. Optimisation de la poursuite du point de puissance maximale (MPPT) d"un système photovoltaïque par les techniques intelligentes. Université Sétif - 1 (ALGERIE).

[14] A. Tchapo singo “système d‟alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l‟habitat énergétiquement autonome ”, Thèse de doctorat université Henri Poincaré 2010.

[15] J. Fadat, Chaîne de conversion d’énergie photovoltaïque, Commande MPPT, La Revue 3EI n° 43 – Décembre 2005, ESIEE-Amiens 14 Quai de la Somme – BP 100 – 80 082 Amiens.

[16] F. Chekired, Etude et implémentation d’une commande MPPT neuro-floue sur FPGA, Mémoire de Magister de l’Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2008.

[17] H. Afghoul, F. Krim, D. Chikouche, A. Beddar, “Implementation of Direct Power Control for shunt active power filter”, Systems and Control (ICSC), 2013 3rd International Conference on, 29-31 Oct. 2013, Algiers, pp. 697 – 701, DOI : 10.1109/ICoSC.2013.6750935.

[18] L. Protin et al., Convertisseurs photovoltaïques, Technique de l’ingénieur, traité génie électrique, pp 3-360, 1992.

[19] S. Masoum et al., Microprocessor-controlled new class of optimal battery chargers for photovoltaic application, Vol. 19, September 2004.

[20] F. Chekired, Etude et implémentation d’une commande MPPT neuro-floue sur FPGA, Mémoire de Magister de l’Ecole Nationale Polytechnique, Alger,2008.

[21] F.Z. Peng. « Z-source inverter ». In 37th IAS Annual Meeting. Conference Record of the Industry Applications Conference, volume 2, pages 775 –781 vol.2, oct. 2002.

[22] PENG F.Z., Z-source inverter, Industry Applications, IEEE Transactions on, Volume 39, Issue 2, March-April2003 Page(s):504 – 510.

[23] François Gruson1, Arnaud Videt1, Philippe Le Moigne1, Philippe Delarue2, Philippe Baudesson3, Jacques Ecrabey4 , « Intérêt de la structure onduleur Z- source », L2EP-Ecole Centrale de Lille, Cité Scientifique – BP 48, 59651 Villeneuve d’Ascq cedex, L2EP-U.S.T.L. bât. P2, Cité Scientifique, 59655 Villeneuve d’Ascq,Schneider Toshiba Inverter Europe, 33 rue Blanchet, 27120 Pacy-sur-Eure, Schneider Electric, Site 38 Tec Rue Henri Tarze, 38000 Grenoble.

[24] HESPUL « Les Onduleurs pour Systèmes Photovoltaïques Fonctionnement, Etat de l’Art et Etude des Performances »,2007.

[25] Abdelkader Boukaroura « Modélisation et Diagnostic d’un Onduleur Triphasé par l’Approche Bond Graph », mémoire Présenté pour l’obtention du Diplôme de magister en électrotechnique. Université Ferhat Abbas de Sétif.2009.

[26] S. Kido et al., 'High Performance UPS System Employing Microcomputer – Based Control', IEEE INTELE'91, 1991.

[27] S.Fernandez, "Comparaison des performances électriques d'un onduleur triphasé deux niveaux à commandes directes et indirectes connecté au réseau," Thèse de doctorat, Université Lille 1, Nord de France, 2013.

[28] Ch.Krishna kantha, P.Deepthi Sree, "Analysis, Simulation &Comparison of Various Multilevel Inverters Using Different PWM Strategies," IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering, Vol. 9, no. 2, PP 54-65, 2014.

[29] BENZIADA .Mohamed Abdelghani, OUAIL Mohamed. « Utilisation du convertisseur Z-source dans un système photovoltaïque », thèse d'ingénieur d'État en Électrotechnique, juin 2015 à l'ENP.

[30] Jin LI, Jinjun LIU, Zeng LIU, "Loss Oriented Evaluation and Comparison of Z-Source Inverters Using Différent Puise Width Modulation Stratégies", IEEE Applied Power Electronics Conférence and Exposition, pp. 851 -856, 2009.

[31] H.Rostami, D.A.Khaburi , « voltage gain comparison of different control methods of the Z-source inverter » , article. Universite of science and technologie

,Tehran,Iran.

[32] Miaosen Shen, Jin Wang1, Alan Joseph, Fang Z. Peng, Leon M. Tolbert, and Donald J. Adams , « Maximum Constant Boost Control of the Z-Source Inverter » Article, Michigan State University Department of Electrical and Computer Engineering, University of Tennessee, Oak Ridge National Laboratory.

[33] F.Z. Peng. « Z-source inverter ». In 37th IAS Annual Meeting. Conference Record of the Industry Applications Conference, volume 2, pages 775 –781 vol.2, oct. 2002.

[34] http://www.solener.com/intro_f.html, site consulté le 29/09/2016.

[35] O.Kherif , « Analyse d'un convertisseur Z-source DC-DC commandé par la technique MLI dans la mode de conduction continu en régime permanent », Ecole Nationale Polytechnique, Alger 2012.

[36] A .Battison « Modélisation, commande, stabilité et mise en œuvre des onduleurs à source impédante . Application aux systèmes embarqués. » Thèse de doctorat, Université de Lorraine.

[37] F.Z. Peng. « Z-source inverter ». In 37th IAS Annual Meeting. Conference Record of the Industry Applications Conference, volume 2, pages 775 –781 vol.2, oct. 2002.

[38] N.Amala Sri, K.Ravi Shankar, « Grid connected photovoltaic power generation controller Z-source interverter with single stage power conversion », IJMERTMR, ISSN N° . 2348-4845, Vol. 1, N°,11, pp.66-71, 2014.

[39] Omar Ellabban, Joeri Van Mierlo and Philippe Lataire « Compraison Between different PWM control methods for different Z-source inverter topologies », IEEE European conference on power electronics and application, pp.1-11,2009.

[40] Y. Liu, B. Ge, and H. Abu-Rub, "Theoretical and experimental evaluation of four space-vector modulations applied to quasi-Z-source inverters," IET Power Electronics, vol. 6, pp. 1257-1269, 2013.

[41] C. Cédric “optimisation énergétique de l‟étage d‟adaptation électronique dédie à la conversion photovoltaïque ”, Thèse de doctorat université de Toulouse 2008.

[42] Dr. belaid lalouni sofia <<cours energie solaire photovoltaïque >> , universite a.mira de bejaia 2014-2015.

[43] M. Shen, J. Wang, A. Joseph, F. Z. Peng, L. M. Tolbert, and D. J. Adams, "Constant boost control of the Z-source inverter to minimize current ripple and voltage stress," Industry Applications, IEEE Transactions on, vol. 42, pp. 770-778, 2006.

[44] H. Knopf. “Analysis, simulation, and evaluation of maximum powerpoint tracking (MPPT) methods for a solar powered vehicle”. Master of Sciences Portland University, 1999.

[45] Alexandre. Battistton,« Amélioration du rendement d’un onduleur Z-source par une stratégie d’adaptation de sa tension du bus continu », Article, juin 2014, IFP Energie nouvelles.

[46] Byamakesh .Nayak ,Saswati.Swapna Dash , « perfermance analyse of different control strategies in a Z-source inverter », article, YMCA university of science et tech , india ,

[47] Yin Li, Javad Khazaei, Lingling Fan, Zhixin Miao, "Modeling of Z-Source Converter For Renewable Energy Intégration", North American Power Symposium (NAPS), pp. 1-6, 2013.

[48] BENZIADA .Mohamed Abdelghani, OUAIL Mohamed. « Utilisation du convertisseur Z-source dans un système photovoltaïque », thèse d’ingénieur d'État en Électrotechnique, juin 2015 à l'ENP.

[49] THANGAPRAKASH S, "Performance investigation on integrated controlled Z-source inverter using modified modulation technique", Thèse de doctorat, ANNA University, Chennai, India, September 2.

[50] Andrzej M. Trzynadlowski, Frede Blaabjerg, John K. Pedersen, R. Lynn Kirlin, Stanislaw Legowski, "Random Puise Width Modulation Techniques for Converter--Fed Drive Systems-A Review", IEEE Transactions on Industry Applications, VOL. 30, NO. 5, September / October 1994.

[51] Andrew S. Golder. Photovoltaic Generator Modeling for Large Scale Distribution System Studies. Thesis Master of Science in Electrical Engineering. October 2006.

[52] N. Abouchabana, « Etude d'une nouvelle topologie buck-boost appliquée à un MPPT », Mémoire de Magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2009.