الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE.YAHIA FARES DE MEDEA

FACULTE DE LA TECHNOLOGIE

Département du Génie Électrique

Mémoire de Fin d'Études

Présenté pour l'obtention du Diplôme

de Master en Electrotechnique

Option: Réseaux électriques

THEME

Raccordement au réseau d'une centrale photovoltaïque par un convertisseur z-source

Proposé et dirigé par :

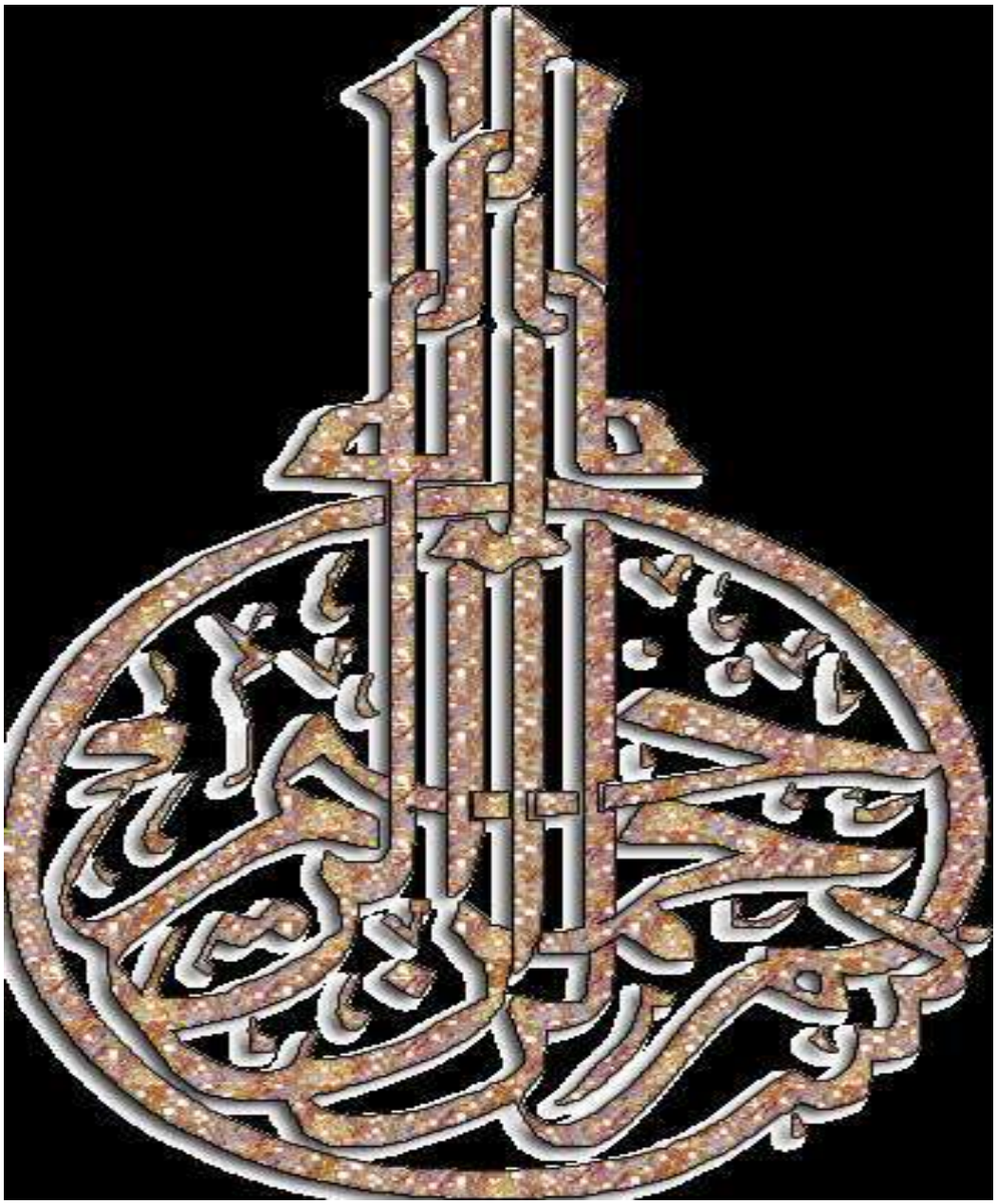
Mr. HENINI NOUREDDINE

Préparé et présenté par :

Saad Turkia

Reghmit Sihem

Année universitaire 2018 - 2019



Remerciements

Je voudrais d'abord remercier ***ALLAH*** *le plus puissant de nous avoir donné la force Pour réaliser ce travail.*

Je remercie sincèrement mon promoteur ***Mr HANINI NOUREDDINE*** *responsable du projet, qui m'a donné des conseils et des suggestions et des informations. J'ai développé.*

J'adresse mes plus vifs remerciements aux membres du jury pour l'honneur qu'ils me font en acceptant la charge de juger ce travail.

Enfin, Je tiens à remercier les responsables et tout le personnel du département de Génie Electrique de Médéa pour les facilités qu'ils m'ont accordés pour terminer ce travail.

Dédicace

Je dédie ce travail à :

- *Mes très chers parents FATIMA et MOHAMED pour leur soutien, leur sacrifice et leur tendresse et grâce à eux, j'ai pu terminer mes études. Que Dieu vous garde et vous bénisse.*
- *A mon marié SOUFIANE SOUIFI*
- *DJAMILA et NABILA et HABIBA et A mes sœurs ASSMA et ZOHRA*
- *A mes frères HAMZA et SALIM et REDOUANE*
- *A toute la famille REGHMIT et SOUIFI*
- *A mes amis (TURKIA, HAYET, WIDAD, NADJIA, SAFIA,)*
- *A l'ensemble des amis et camarades de groupe*

REGHMIT SIHAM

Dédicace

C'est avec une grande émotion, Je dédier ce modeste

Travail de fin d'étude aux êtres les plus chères ;

Mon père Embarek et ma mère Daami Massouda qui ont fait de moi ce qui je suis aujourd'hui et qui ont veillé de guider mes pas durant toute ma vie par leurs aides, leur grands émotions et leur sacrifice.

- *A mes chers frères et sœurs :*

Mohamed, Lakhedar, Abdelrahemane, Hakima, Fatehalla, Fatiha, Abdelhamid. Et surtout sans oublié ma grande sœur Fatma Pour l'amour, la tendresse et la compréhension.

- *Amon marié Hamza Yamani*
- *A tout ce qui m'ont aidé de prés ou de loin pour la réalisation de ce travail.*
- *A tout mes amis Surtout (Siham, Safia, Hayet, Nadjia, Widad,)*

SAAD TURKIA

ملخص:

في هذا العمل تم إجراءدراسة حولالأنظمةالكهروضوئيةالمتصلةبالشبكةالكهربائيةمن أجل تحسين هذا النظام تم إدخال محول Z المصدر في دائرة الربطعن طريق استبدالالمحول ذو التوتر المستمر والعاكس الكلاسيكيبهذا المحولZ.

يتم اختبارإمكانية النظام عن طريق المحاكاة في برنامج Matlab/Simulink أظهرت نتائج المحاكاة كفاءة هذا النظام .

الكلمات المفتاحية:اتصال بالشبكة , محطة الطاقة الضوئية , محول مصدرZ

RÉSUME :

Dans ce travail, une étude sur les systèmes photovoltaïques raccordés au réseau a été effectuée. Afin d'optimiser ce système, un convertisseur Z-source a été introduit dans le circuit de raccordement,en remplaçantla cascade hacheur survolteur et onduleur classique par ce convertisseur. L'avantage de ce dernier est d'éliminer la nécessité d'un hacheur survolteur et sa commande MPPT. La faisabilité du système est testée par simulation dans le logiciel Matlab/Simulink. Les résultats de simulation ont montré l'efficacité de ce système.

Mots clés : Raccordement au réseau, Centrale PV, Convertisseur Z-source

ABSTRACT:

In this work a study on the photovoltaic systems connected to the network was carried out. In order to optimize this system a source Z converter has been introduced into the connection circuit by replacing the booster chopper cascade and its MPPT command. The simulation results showed efficiency of this system.

Key words: grid connection, photovoltaic power station, Z-source converter.

Liste des figures

CHAPITRE I

Figure I.1 : Caractéristique courant-tension et paramètres physiques d'une cellule photovoltaïque **3**

Figure I.2 : Différents régimes selon la puissance d'éclairement. **5**

Figure I.3: Schéma de cellules photovoltaïques associées en parallèle **6**

Figure I.4: Schéma de cellules photovoltaïques associées en série **6**

Figure I.5: Structure (gauche) et diagramme de bande (droit) d'une cellule solaire photovoltaïque **8**

Figure I.6: Circuit équivalent complet d'une cellule PV. **9**

Figure I.7 : Schéma électrique idéal d'un module photovoltaïque**.** **10**

Figure I.8 : Schéma photovoltaïque d'un module à une diode. **12**

Figure I.9: Modèle électrique à deux diodes avec résistance shunt de la cellule PV **14**

Figure I.10: Modèle électrique à une diode sans résistance shunt**.** **15**

Figure I.11 : Schéma bloc du module photovoltaïque **17**

Figure I.12 : Caractéristique I=f(V) du module photovoltaïque **17**

Figure I.13 : Caractéristique P=f(V) du module photovoltaïque**.** **18**

Figure I.14: Influence de variation de l'éclairement sur les caractéristiques (I-V) (P-V) **18**

Figure I.15: Effet de la température sur la caractéristique Ipv (Vpv**)** **19**

CHAPITRE II

Figure II.1 : Structure de l'onduleur Z_source **21**

Figure II.2: Structure d'un panneau photovoltaïque commercialise et sa caractéristique I(V), P(V) **23**

Figure II.3: Puissance maximale en fonction de la température (gauche) et de l'éclairement (droite) **24**

Figure II.4 : Schéma synoptique de la M.L.I **25**

Figure II.5 : Signaux de commande de la stratégie *SBC* **27**

Figure II.6: Signaux de commande de la stratégie *MBC*. **28**

Figure II.7: Signaux de commande de la stratégie *MCBC*. **30**

Figure II.8:Génération des signaux de commande avec une stratégie d'MLI vectorielle. **33**

Figure II.9: Schéma l'onduleur z_source avec MLI **36**

Figure II.10 : Signaux de module de l'onduleur Z_source **36**

Figure II.11: Schéma générale d'un système photovoltaïque connecté MPPT **37**

Figure II.12: Schéma block de l'Hacheur Survolteur sur Matlab **37**

Figure II.13: Schéma block de la commande MPPT sous Matlab **38**

Figure II.14: courbe de tension de la commande MPPT **38**

Figure II.15: courbe de courant de la commande MPPT **38**

Figure II.16: courbe de puissance de la commande MPPT **39**

Figure II.17: courbe de rapport de la commande MPPT **39**

Figure II.18: courbe de tension de PV avec MPPT **39**

CHAPITRE III

Figure III.1: Classification des onduleurs *PV* connectés au réseau **43**

Figure III.2: Hacheur (Multiple- rangée-DC-DC) et l'onduleur **43**

Figure III.3: Onduleur Multiple-rangée **44**

Figure III.4: Onduleur modulaire (Module-intégrated invertir) **44**

Figure III.5: Schéma de structure d'un onduleur de tension triphasé connecté au réseau. **46**

Figure III.6: contrôle du courant par hystérésis classique **47**

Figure III.7 : Contrôle des courants de l'onduleur par hystérésis modulée**.** **48**

Figure III.8 : schéma de photovoltaïque raccordé avec l'onduleur Z_source **50**

Figure III.9: courbe de courant de l'onduleur Z_source **50**

Figure III.10: courbe de rapport de module Vabc de l'onduleur Z_source **51**

CHAPITRE IV

Figure IV.1: Système PV connecté au réseau **53**

Figure IV.2: Simulation d'un photovoltaïque raccordé au réseau avec l'onduleur Z_source **54**

Figure IV.3: courbe de courant Iabc de PV raccordé au réseau avec l'onduleur Z_source **54**

Figure IV.4: courbe de module Vabc de PV raccordé au réseau avec l'onduleur Z_source **55**

Nomenclatures

I_m : Courant maximal (A).

V_m : Tension maximal (V).

Pm : Puissance maximal (W).

I_{cc} : Courant de court-circuit (A).

V_{co} : Tension de circuit ouvert (V).

R_s: Résistance série en (Ω).

R_{sh} : Résistance shunt en (Ω).

E : Ensoleillement (W/m2).

FF : Facture de forme.

S : Surface de la cellule (m2).

η: Rendement de la cellule.

$\frac{KT_c}{q}$: représentant le potentiel dynamique.

T: est la température absolue.

T_a: Température ambiante.

T_j:Température de la cellule en (Kelvin).

q : la constante de charge d'électron $1.602.10^{-23}$C

K : la constante de Boltzmann $1.38.10^{-23}$J/K

I_{ph}: le courant photonique de la diode.

I_{sat} : Le courant de saturation

I_d : Le courant de la diode

V_d : La tension aux bornes de la diode.

P_{in}: Puissance lumineuse incidente

Vs : tension de seuil

I_s **:** Le courant de saturation en Ampère (A).

n**:** Le facteur de qualité de la diode; sans dimension.

n_s: Nombre de cellule en série dans un module.

V_{th}**:** Le potentiel thermique en Volt (V)

A : facteur d'idéalité de la jonction.

E_{ref}: Irradiation ou ensoleillement de référence 1000 W/m2

T_{ref}: Température de référence 25 °C.

I_{01}: Courant de saturation de la diode 1

I_{02}: Courant de saturation de la diode 2

I_{mpp} : Courant au point de puissance maximale appelé aussi courant optimum (I_{opt}).

V_{mpp} : Tension au point de puissance maximale ou tension optimale (V_{opt}).

P_{mpp}: Puissance au point de puissance maximale appelé aussi puissance optimale (P_{opt}).

ΔE : Représente la variation de l'irradiation W/m².

T_{stc} Et T_c: Représentent respectivement, la température dans les conditions standards de fonctionnement et dans des conditions quelconques (°C).

ΔT_c: Représente la variation de la température (°C).

ΔI_{PV}: Représente la variation du courant par rapport à l'insolation et à la température(A).

ΔV_{PV}: Représente la variation de la tension par rapport à l'insolation et à la température(V).

α_{sc}: est défini comme un coefficient courant de changement de la température à la référence ensoleillement [A /°C].

β_{oc}: est défini en tant que coefficient de tension de changement de la température [V/°C].

C : la capacité du condensateur.

F_e : Fréquence de découplage.

Abréviation

PV: Photovoltaïque.

PPM : Le point de fonctionnement optimal.

MPPT: Maximum Power Point Tracking.

P&O: Perturbation et observation.

DC: Courant Continu.

AC: Courant Alternatif.

MLI: Modulation de largeur d'impulsion (Pulse Width Modulation).

GPV: Générateur photovoltaïque.

PLL: Boucle à verrouillage de phase (Phase locked loop).

Ns : Nombre de cellules en série dans un module photovoltaïque.

Np : Nombre de cellules en série dans un module photovoltaïque.

A_{tr}: Amplitude du signal triangulaire (Porteuse).

B_h: Largeur de la bande à hystérésis.

TABLE DES MATIÈRES

Remerciements

Dédicace

Résumé

Liste de figure

Liste des symboles et abréviations

INTRODUCTION GENERALE 1

Chapitre I : Généralité sue le système photovoltaïque

I.1. INTRODUCTION **2**

I.2. Effet photovoltaïque **2**

I.3.Cellule photovoltaïque **2**

I.4. Paramètres photovoltaïques **3**

I.4.1.Tension en circuit ouvert $\boldsymbol{Vco}$ **3**

I .4.2.Courant de court circuit **5**

I.4.3.Point du fonctionnement *Pm* ($\boldsymbol{Vm}$) **5**

I.4.4.Facteur de forme FF **5**

I.4.5.Rendement η **6**

I.5. Association des cellules photovoltaïques **6**

I.6.Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque **8**

I.7. Circuit électrique équivalent **8**

I.8. Modélisation du panneau photovoltaïque **10**

I.8.1.Modèle idéal **10**

I.8.2.Modèle d'un panneau à une diode avec résistance shunt **11**

I.8.3. Modèle à deux diodes (à deux exponentielles) **13**

I.8.4.Modèle à une diode (implicite) **14**

I.9.Résultats de simulation dans les conditions standards **16**

I.9.1.Caractéristique I(V) et P(V) du module aux conditions STC (25°C, 1000W/m_2) **17**

I.9.2.Influence de la température et de l'éclairement **18**

I.9.2.1.*Influence de l'éclairement* **18**

I.9.2.2 .*Influence de la température* **19**

I.10.Avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques **19**

I.10.1.Avantages **19**

I.10.2.Inconvénients **20**

I.11.CONCLUSION **20**

Chapitre II: Comportement des onduleurs Z-sources

II.1.INTRODUCTION **21**

II.2.Structure du L'onduleur Z_source **21**

II.3.Principe De Fonctionnement De L'onduleur Z_source **21**

II.4.Méthode de poursuite du point de puissance maximal **22**

II.5.la poursuit du point de puissance maximale (MPPT) **22**

II.5.1.Structure et caractéristique d'un panneau PV **23**

II.5.2.Méthode des Perturbations et Observation **23**

II.6.Commande Par Modulation De Largeur D'Impulsion **24**

II.6.1. Principe de base de MLI **24**

II.6.2.Caractéristiques de la modulation **25**

II.7. Différente technique de modulation en MLI **25**

II.8. Stratégies de commande de l'onduleur Z_source **26**

II.8.1.Les stratégies de commande à MLI sinusoïdale **26**

II.8.1.1.*La commande d'élévation simple (Simple Boost Control SBC)* **26**

II.8.1.2.*La commande d'élévation maximale (Maximum Boost Control MBC)* **28**

II.8.1.3.*La commande d'élévation constante et maximale (Maximum Constant Boost Control MCBC)* **30**

II.8.2. Les stratégies de commande à MLI vectorielle **31**

II.8.2.1.*L'algorithme de la stratégie SVM d'un onduleur Z- source* **33**

II.8.2.2.*Calcul du facteur d'élévation B* **33**

II.9.Dimensionnement des éléments passifs du réseau d'impédance **34**

II.9.1.Dimensionnement de l'inductance LZ **34**

II.9.2.Dimensionnement du condensateur Cz **35**

II.9.3. Dimensionnement de l'onduleur **35**

II.10. Simulation de l'onduleur Z_source **35**

II.11.Simulation du Système photovoltaïque connecté avec MPPT **37**

II.11.1.Hacheur survolteur et commande MPPT **37**

II.12. CONCLUSION **40**

Chapitre III: Le système photovoltaïque connecté au réseau avec l'onduleur

III.1.INTRODUCTION **41**

III.2. Technologies des onduleurs couplés au réseau **41**

III.2.1.Onduleurs modulaires (module inverter) **41**

III.2.2. Onduleurs centralisés (central invertir) **41**

III.2.3. Onduleurs "de Rangée" **42**

III.3. Configuration des Systèmes PV **42**

III.3.1. Onduleur central (Central-plant invertir) **42**

III.3.2.Hacheur (Multiple-rangée-DC–DC) avec un onduleur **43**

III.3.3.Onduleur Multiple-rangée **43**

III.3.4.Onduleur modulaire (Module-integrated invertir) **44**

III.4.Convertisseurs DC/AC **44**

III.4.1.Principes de la conversion DC/AC d'un onduleur photovoltaïque **44**

III.4.2. Types d'onduleurs **45**

III.4.2.1.*Onduleur à onde sinusoïdale* **45**

III.4.2.2.*Onduleur à onde carrée* **45**

III.4.2.3.*Onduleur à onde pseudo-sinusoïdale* **45**

III.5.Contrôle de la liaison Onduleur-réseau électrique **46**

III.5.1.Présentation de la structure du système côté Onduleur- réseau **46**

III.5.2.Onduleur de tension **46**

III.5.2.1.*Différentes commandes de l'onduleur* **47**

III.5.2.2.*Contrôle des courants par hystérésis classique* **47**

III.5.2.3.*Contrôle des courants par hystérésis modulée* **47**

III.6.Contrôle de la tension du bus continu **49**

III.7.Simulation de photovoltaïque raccordé avec l'onduleur Z- Source **50**

III.8.CONCLUSION **51**

Chapitre IV : Système photovoltaïque raccorde au réseau avec l'onduleur Z_source

IV.1. INTRODUCTION **52**

IV.2. Les différents types de systèmes photovoltaïques **52**

IV.2.1.*1.Les systèmes à connexion directe au réseau* **52**

IV.2.1.2.*Le système à bus continu intermédiaire* **52**

IV.2.1.3*. Les systèmes PV connectés au réseau* **53**

IV.3. Simulation de système **54**

IV.4 .Résultat des simulations **54**

IV.5. Problème de connexion des systèmes photovoltaïques au réseau **55**

IV.6.Résultat et résumé **55**

IV.7. CONCLUSION **56**

CONCLUSION GENERALE **57**

BIBIOGRAPHIE

INTRODUCTION GENERALE

L'utilisation des énergies renouvelables connaît une croissance significative dans le monde, devant la demande croissante d'énergie électrique essentiellement pour les besoins des régions éloignées dépourvus d'électricité fiable, désertes et montagneuses. Une grande partie de l'énergie consommée provient des combustibles fossiles (pétrole, gaz naturel, charbon, etc...) dont l'utilisation massive peut conduire à l'épuisement de ces réserves et menace réellement l'environnement, cette menace s'est manifestée principalement à travers la pollution et le réchauffement global de la terre [1].

Aujourd'hui on distingue plusieurs sources d'énergies renouvelables, l'énergie Hydroélectrique, l'énergie géothermique, l'énergie de la biomasse, l'énergie éolienne et l'énergie photovoltaïque. L'avantage principal de ces énergies renouvelables et que leurs utilisations ne polluent pas l'atmosphère et qu'elles ne produisent pas de gaz à effet de serre comme le dioxyde de carbone et les oxydes d'azotes qui sont responsables du réchauffement de la terre. [2]

L'onduleur à Z_source est un convertisseur qui est apparu dans la littérature scientifique en 2011. Il fait partie de la famille des onduleurs à source impédance dont le plus célèbre est l'onduleur à Z_source. Ce convertisseur DC-AC permet d'élever la tension du bus continu Vdc en insérant dans le schéma de MLI des court- circuits de bras d'onduleur (interrupteurs haut et bas d'un même bras fermés simultanément) [3].

Dans ce mémoire, notre étude s'intéresse à la filière photovoltaïque et consiste essentiellement à la modélisation et le contrôle d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique avec l'onduleur z_source.

Chapitre I

Généralités des Systèmes Photovoltaïques

I.1. Introduction :

L'énergie de soleil est une source énergétique quasiment illimitée, il pourrait couvrir plusieurs milliers de fois notre consommation globale d'énergie. C'est pourquoi, l'homme cherche depuis long temps à mettre à profit cette énergie importante et diffusée sur l'ensemble de la planète, il est arrivé à réaliser ce but par le moyen dit cellule photovoltaïque.

Cette énergie solaire est disponible en abondance sur toute la surface terrestre, et malgré une atténuation importante lorsqu'elle traverse l'atmosphère, la quantité qui reste est encore assez importante quand elle arrive au sol. On peut ainsi compter sur 10 000 w/m² crête dans les zones tempérées et jusqu'à 14 000 W/m² lorsque l'atmosphère est faiblement polluée [5-6]. Pour comprendre le fonctionnement de cette énergie et en optimiser son utilisation, nous effectuons dans ce chapitre un bref rappel sur le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule photovoltaïque et ses performances ainsi le générateur solaire photovoltaïque et leurs performances.

I.2. Effet photovoltaïque :

Il s'agit de transformer l'énergie contenue dans la lumière du soleil en énergie électrique par le biais d'un capteur constitué de matériaux sensibles à l'énergie contenue dans les photons. Ce capteur se présente à l'échelle élémentaire sous forme d'une cellule nommée cellule PV. L'effet photovoltaïque fut observé la première fois par le physicien français Edmond Becquerel [7]. Toutefois, ce n'est qu'au cours des années 1950 que les chercheurs de la compagnie Bell, aux États-Unis, parvinrent à fabriquer la première photopile, l'élément primaire ou de base d'un système photovoltaïque [8].

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 [9].

I.3.Cellule photovoltaïque :

La cellule photovoltaïque est dispositif électronique destine à transforme la lumière en électricité, sa structure une fonction ***PN*** c'est-à-dire est composée de deux couches : une couche ***P*** et une couche ***N***. La cellule solaire est basée d'un semi-conducteur qui est en silicium, c'est un convertisseur instantané fournissent de l'énergie électrique s'il reçoit une énergie solaire sous forme de rayonnement. Se comporte alors comme en génération de courant continue. [10].

I.4. Paramètres photovoltaïques :

Il existe de nombreux paramètres qui permettent de caractériser une cellule solaire. Ces paramètres sont appelés paramètres photovoltaïques et sont déduits de la caractéristique *I(V)* [11].

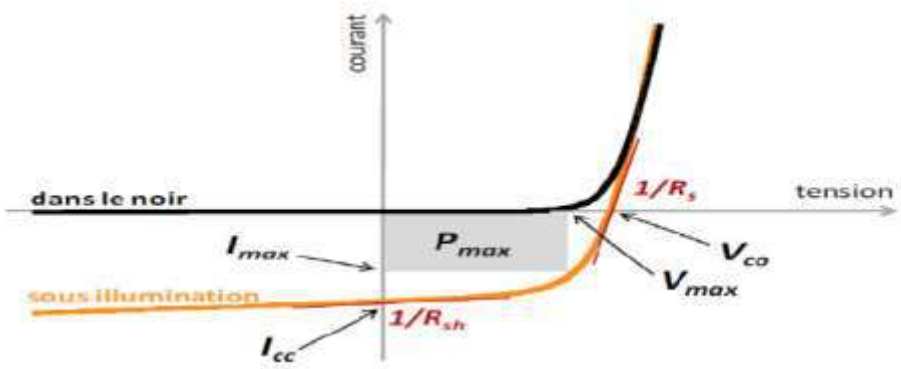


Figure I.1: Caractéristique courant-tension et paramètres physiques d'une cellule photovoltaïque**.**

La figure(I.1) représente une caractéristique courant-tension *I*(*V*) dans le noir et sous illumination typique d'une cellule photovoltaïque à jonction PN. Le tracé de cette courbe permet d'accéder à bon nombre de paramètres physiques caractéristiques du composant. Les premiers paramètres qui apparaissent sur la caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque sont le courant de court-circuit (I_{cc}), la tension à circuit ouvert (V_{co}) et le facteur de forme (*FF*) du composant [11].

I.4.1.Tension en circuit ouvert Vco :

C'est la tension mesurée aux bornes de la cellule et pour laquelle le courant débité par la cellule solaire est nul, elle est donnée par la relation : [12]

$$Vco = n V_{th} log\ 1 + IphIs \qquad \text{I.1}$$

$$V_{co} = \frac{KT_c}{q} \log\left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1\right) \qquad \text{I.2}$$

Avec:

$\frac{KT_c}{q}$: représentant le potentiel dynamique.

T_c : est la température absolue.

q : la constante de charge d'électron $1.602.10^{-19}$C

K : la constante de Boltzmann $1.38.10^{-23}$J/K

I_{ph}: le courant photonique

I_s : le courant de saturation

Deux régimes peuvent être observés suivant le degré d'éclairement.

- ✓ Régime des faibles flux lumineux: dans ce cas, I_{ph}-I_s, ce qui permet d'écrire :

$$\log\left(\frac{I_{ph}}{I_s}+1\right)=\frac{I_{ph}}{I_s} \qquad \text{I. 3}$$

D'où :

$$V_{c0}=\frac{KT_c}{q}\log\left(\frac{I_{ph}}{I_s}\right) \qquad \text{I.4}$$

C'est la zone de comportement linéaire de la cellule. La formule précédente peut s'écrire aussi

$$V_{co}=R_0.I_{ph} \qquad \text{I.5}$$

On pose:

$$R_0=\frac{KT_c}{q.I_s} \qquad \text{I.6}$$

R_0: est la résistance interne de la diode en polarisation externe nulle (circuit ouvert) et sous faible flux lumineux.

• Régime des flux lumineux suffisamment intenses pour que I_{ph}/I_s, soit:

$$\frac{I_{ph}}{I_s}\gg 1 \qquad \text{I.7}$$

D'où: $V_{c0}=\frac{KT_c}{q}\log\left(\frac{I_{ph}}{I_s}\right)$ I.8

C'est le domaine du comportement logarithmique.

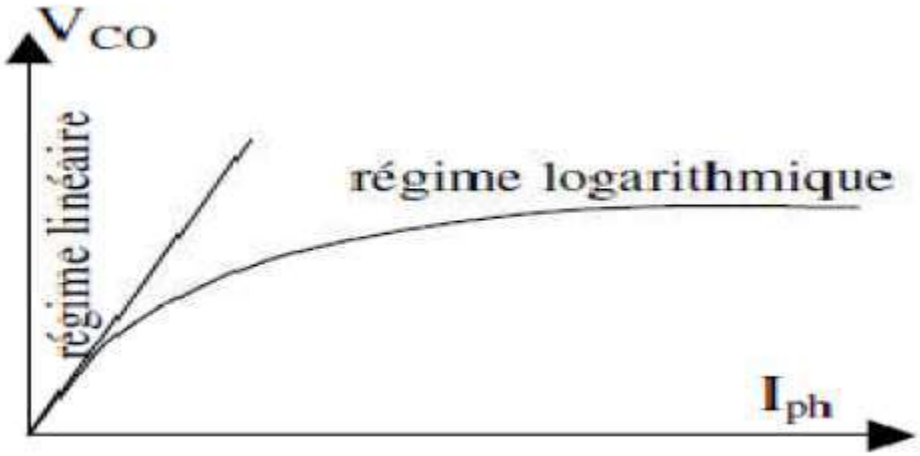


Figure I.2: Différents régimes selon la puissance d'éclairement [11].

I .4.2.Courant de court circuit : [12]

En court circuit ***V=0*** :

D'où $Icc=Iph$ I.9

I.4.3.Point du fonctionnement *Pm* (*Vm*) :

La puissance maximale d'une cellule photovoltaïque éclairée est la grandeur essentielle pour évaluer sa performance; elle est donnée par la relation :

$$Pm=Vm*Im \quad \text{I.10}$$

Elle traduit sur la caractéristique **I-V** le point du fonctionnement ***Pm*** (V_m, I_m) qui est situé au coude de la caractéristique **I-V** et dit point de puissance maximale où les valeurs de tension V_m et du courant I_m appelées également tension et courant maximums respectivement [13].

I.4.4.Facteur de forme FF :

A l'aide de la caractéristique courant-tension d'une cellule dans l'obscurité et sous éclairement, il est possible d'évaluer les performances et le comportement électrique de la cellule photovoltaïque, donc le facteur de forme **(FF)** « en anglais : Fil Factor » est définit comme le rapport entre la puissance maximale et le produit **;** d'ou il est donne par la relation :

$$P_{max}=\text{FF}\times I_{cc}\times V_{co}$$

$$I_{max}\times V_{max}=\text{FF}\times I_{cc}\times V_{co}$$

Donc:

$$\text{FF}=\frac{P_{max}}{V_{co}.I_{cc}} \quad \text{I.11}$$

Ce paramètre compris entre 0 et 1, on l'exprime en % qualifie la forme plus ou moins rectangulaire de la caractéristique *I-V* de la cellule solaire. Si celle-ci était carrée le facteur de forme serait égal à 1**.** Mais, généralement le facteur de forme prend des valeurs entre 0.6 et 0.85. [13]

I.4.5 Rendement η :

Le rendement, des cellules PV désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente, P_{in}[11].

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{FF.I_{cc}.V_{co}}{P_{in}}$$

$\boldsymbol{P_{in}}$**:** Puissance incident;

S : surface de la cellule photovoltaïque Ou d'après :

P_{max}=$\boldsymbol{FF \times Icc \times Vco}$

$\eta = \boldsymbol{FF \times Icc \times Vco \times PinS}$ I.12

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert. Le rendement de conversion est un paramètre essentiel. En effet, la seule connaissance de sa valeur permet d'évaluer les performances de la cellule [11].

I.5.Association des cellules photovoltaïques [14] :

- **En Parallèle :**

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

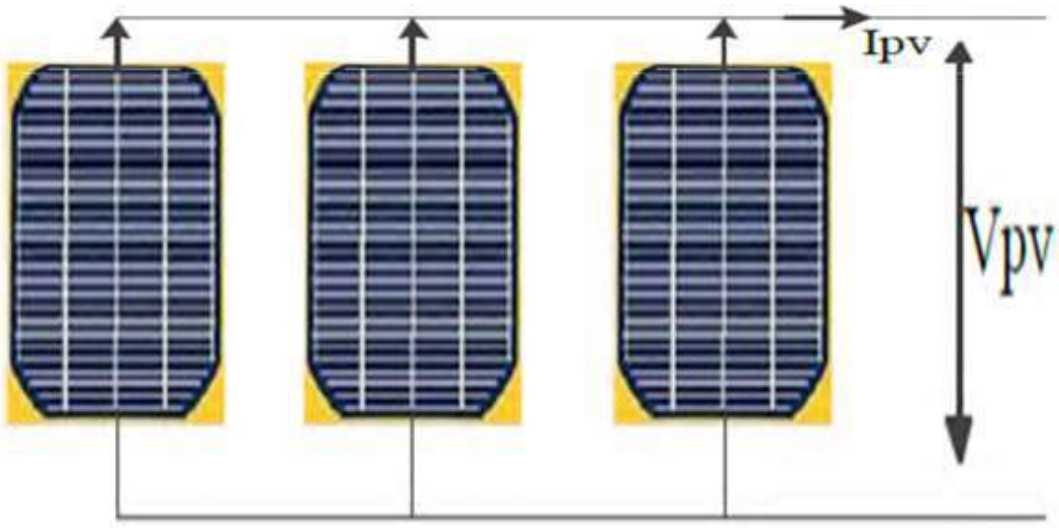


Figure I.3: Schéma de cellules associées en parallèle

- **En Série :**

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la Caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par addition des tensions à courant donné :

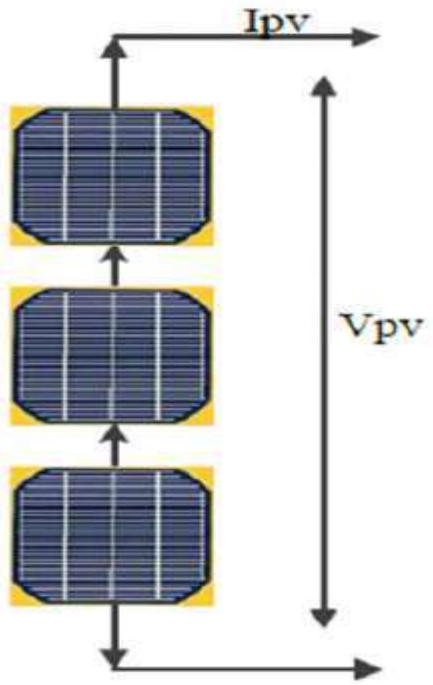


Figure I.4: Schéma de cellules photovoltaïques associées en série

I.6.Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque [15] :

Une cellule photovoltaïque est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Cette transformation est basée sur trois mécanismes suivants :

- Absorption des photons (dont d'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif.
- Conversion de l'énergie du photon énergie électrique, Ce qui correspond à la création de paires électron /trou dans le matériau semi-conducteurs:
- Collecte des particules générées dans le dispositif.

Le matériau constituant la cellule photovoltaïque doit donc posséder deux niveaux d'énergie et être assez conducteur pour permettre l'écoulement du courant d'où l'intérêt des semi-conducteurs pour l'industrie photovoltaïque. A fin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier les pairs électron/trou créées est nécessaire. Pour cela on utilise le plut souvent une jonction PN d'autres structures, comme les hâté-jonctions et les Schottky peuvent également être utilisées. Le fonctionnement des cellules photovoltaïque est illustré sur la figure

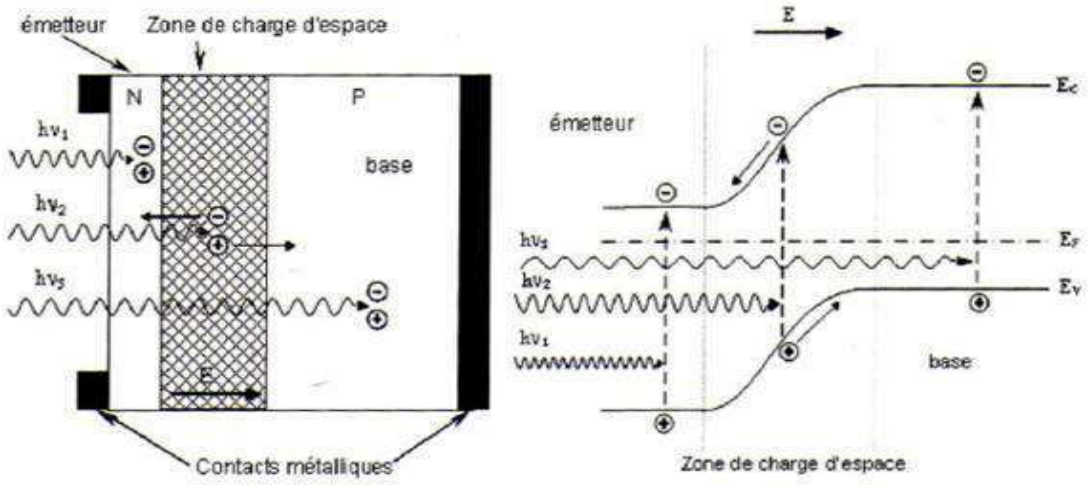


Figure I.5: Structure (gauche) et diagramme de bande (droit) d'une cellule solaire photovoltaïque. (Les dimensions respectives des différentes zones ne sont pas respectées**)**

I.7. Circuit électrique équivalent : [*16*]

Le circuit équivalent d'un système électrique est fréquemment utilisé afin de décrire son comportement électrique à l'aide de composants électriques élémentaires (source, résistance, diode, bobine, condensateur, etc.).

L'expérience montre qu'a l'obscurité; une cellule solaire suit le comportement d'une diode classique, elle commence à conduire lorsque la tension appliquée est supérieure à la tension de seuil ***Vs***. Dans le cas d'une cellule idéale a l'obscurité, caractéristique ***I-V*** peut être représenté par la relation suivant :

$$I_{obs} = I_s \exp V/nV_{th} - 1 \qquad \text{I.13}$$

Où

I_s **:** Le courant de saturation en Ampère (A).

n**:** Le facteur de qualité de la diode; sans dimension.

V_{th}**:** Le potentiel thermique en Volt (V); il est donné par:

$$V_{th}: \quad = K\,T/\,q \qquad \text{I.14}$$

Où

K : la constante de Boltzmann (**1.38066×10-23 J/K= 8.61400×10-5 eV/K**).

T : la température absolue en Kelvin (**K**).

q **:** la charge absolue d'un électron en coulomb (**1.60281×10-19 C**).

Sous éclairement, un termeI_{ph} , tenant compte du photo-courant généré est rajouté, On obtient le circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale sous éclairement qui est représente par l'équation suivante :

$$\mathbf{I= Iph - Iobs = Iph - I[\ exp(\ V/nVth) - 1]} \qquad \text{I.15}$$

Dans le cas d'une cellule photovoltaïque réelle, d'autres paramètres tenant compte des effets résistifs et des fuites vers les bords; qu'ils doivent être pris en considération et l'équation de la caractéristique ***I-V*** devient alors [16] :

$$\mathbf{I= Iph - I[\ exp\ (V+IRs)nVth - 1] - (V+IRs)/Rsh} \qquad \text{I.16}$$

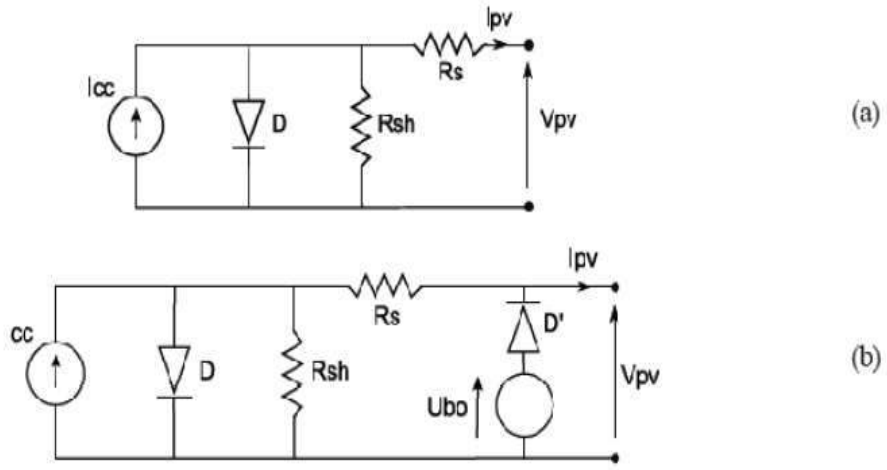


Figure 1.6: Circuit équivalent complet d'une cellule PV

I.8. Modélisation du panneau photovoltaïque :

Il existe plusieurs modèles mathématiques du panneau photovoltaïque, dans ce chapitre on va présenter quelques uns.

I-8-1-Modèle idéal [17] :

Le panneau photovoltaïque peut être représenté par le circuit électrique équivalent donné par la figure (I.7) il se compose d'un générateur de courant et d'une diode parallèle.

Le courant Ipv généré par la cellule s'écrit alors.

Après la loi des nœuds en obtient alors :

$$I_{pv}=I_{ph}-I_d \qquad \text{I.17}$$

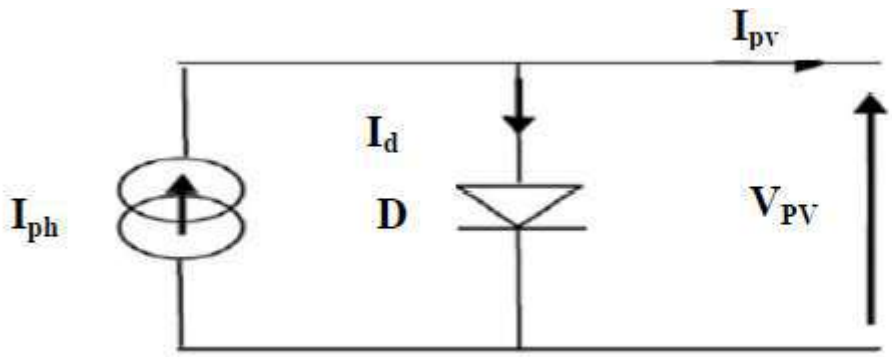


Figure I.7: Schéma électrique idéal d'un module photovoltaïque**.**

Pour un générateur PV idéal, la tension aux bornes de la diode est égale à :

$$V_{pv}= I_d \qquad \text{I.18}$$

V_d: La tension aux bornes de la diode.

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

$$I_d = I_0 \times \left[e^{\frac{q\times V_{pv}}{nKT}} - 1\right] \qquad \text{I.19}$$

I_0 : Courant de saturation de la diode, qui est exprime comme suit :

$$I_0 = (\mathrm{T1})\times (\frac{T}{T1})^{\frac{3}{n}\square}\times e^{-q\times Eg/A\times k(\frac{1}{T}-\frac{1}{T1})} \qquad \text{I.20}$$

□

ET :

$$I_0(t_1) = \frac{Icc(T1)}{e^{\frac{q\times voc(T1)}{A\times K\times T1}}-1} \qquad \text{I.21}$$

Avec:

E_g□: Energie de gape de la cellule (1.12 eV).

Icc: Courant de court circuit.

V_{co}: Tension de circuit ouvert.

q : Charge électrique qui est égale à 1.6×10-19 C.

K : Constante de Boltzmann (K=1.3854 × 10-23 J/K).

A : Facteur de qualité de la diode.

(KT/q) : Représente le potentiel thermique.

T_1: Température à l'instant T1.

T2 : Température à l'instant T2.

I_{ph}: Courant photonique de la diode qui est donné par la relation suivante :

Avec :

$$I_{ph} = I_{ph}(T_1) \times [1 + k_0 \times (T - T_1)] \quad \text{I.22}$$

Avec :

$$K_0 = \frac{Icc(T_2)I_{cc} - I_{cc}(T_1)}{T_2 - T_1} \quad \text{I.23}$$

D'âpres les relations (I.17) et (I.19) on obtient :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \times \left[e^{q \times \frac{(V_{PV})}{AKT}} - 1\right] \quad \text{I.24}$$

Ce qui implique :

$$I_{pv} = I_{ph}(T_1) \times [1 + K_0 \times (T - T_1)] - I_0 \times [\frac{q \times (V_{pv})}{AKT} - 1] \quad \text{I.25}$$

□□

I.8.2.Modèle d'une cellule PV réelle à une diode [18] :

Le schéma équivalent du module photovoltaïque réel tient compte d'effets résistifs ce schéma équivalent est constitué d'une diode (D), une source de courant (I_{ph}) caractérisant le photo-courant, une résistance série (Rs) représentant les pertes par effet Joule, et une résistance shunte (Rsh) caractérisant un courant de fuite entre la grille supérieure et le contact arrière qui est généralement très supérieure à (Rs).

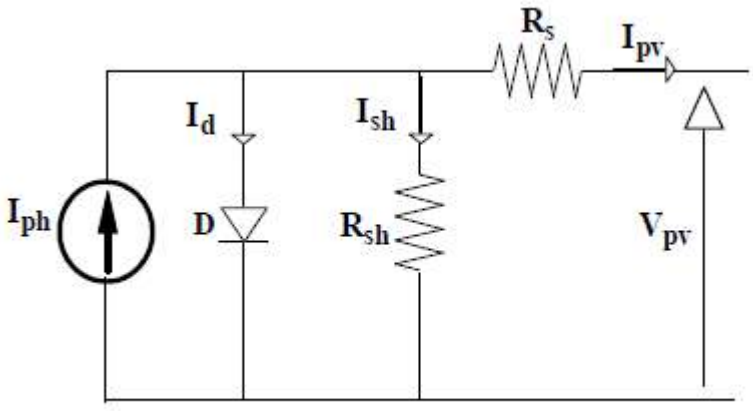


Figure I.8: Schéma photovoltaïque d'un module à une diode.

Le courant de sortie du module photovoltaïque se met sous la forme mathématique suivante [19] :

$$I_{PV} = I_{ph} - I_d - I_{sh} \qquad \text{I.25}$$

Avec I_{ph}, I_d, I_{sh} et I_{PV} sont respectivement le courant photonique, le courant de la diode, courant de résistance shunt et le courant de fonctionnement ou (courant délivrer par le module), qui dépendent du rayonnement solaire et de la température des cellules.

Le courant I_{ph} est directement dépendant du rayonnement solaire E et de la température de la celluleT_j, est donné par la relation suivante :

$$I_{ph} = P_1 \times E_1[1 + P_2.(E - E_{ref}) + P_3(T_j - T_{ref})] \qquad \text{I.26}$$

La température de la cellule peut être calculée à partir de la température ambiante et celle d'irradiation comme suit :

$$T_j = T_a + E(\frac{NOCT-20}{800}) \qquad \text{I.27}$$

Avec :

NOCT : Température nominale de fonctionnement de la cellule solaire.

T_a: Température ambiante.

Et Le courant de la diode est donné par :

$$I_d = I_{sat}[\exp\left(\frac{q\times(V+R\times I_{ph})}{A.n_s.K.T_j} - 1\right)] \qquad \text{I.28}$$

Avec :

K : Constante de Boltzmann (K=1.3854 * 10-23 J/K).

A : Facteur de qualité de la diode.

I_{ph}:Courant photonique de la diode.

q: Charge de l'électron e=1.6*10-19 coulomb.

T_j:Température de la cellule en (Kelvin).

n_s: Nombre de cellule en série dans un module.

I_{sat}:Courant de saturation, il est fortement dépendant de la température, il est donné par la relation suivante :

$$I_{sat} = P_4.Tj^3.\exp(-\frac{E_g}{K.T_j}) \quad \text{I.29}$$

Le courant de la résistance shunt est calculé par :

$$I_{sh} = \frac{(V_{pv}+R_s.I_{pv})}{R_{sh}} \quad \text{I.30}$$

Le courant du module est calculé par (I.25) (I. 26) :

I_{PV}□ = I_{ph} (E, T) − I_d(V,I_{pv},T_j) − I_{sh} (V) I.31

$$□I_{PV} = P_1.E\left[1 + P_2.\left(E - E_{ref}\right) + P_2.\left(T_j - T_{ref}\right)\right] -$$

$$P_4.T_j^3.\exp\left(-\frac{E_g}{KT_j}\right).\left[\exp\left(\frac{q(V_{PV}+R_s.I_{PV}}{AKT_j}\right) - 1\right]$$

I.32

□□□

Avec :

A : facteur d'idéalité de la jonction.

E_{ref}: Irradiation ou ensoleillement de référence 1000 W/m2

T_{ref}: Température de référence 25 °C.

I.8.3.Modèle à deux diodes (à deux exponentielles) [17]

Le module photovoltaïque est représenté par le circuit électrique suivant (figure, II.9), qui se compose d'une source de courant modélisant le flux lumineux, deux diodes pour la polarisation de la cellule, une résistance shunt et une résistance série.

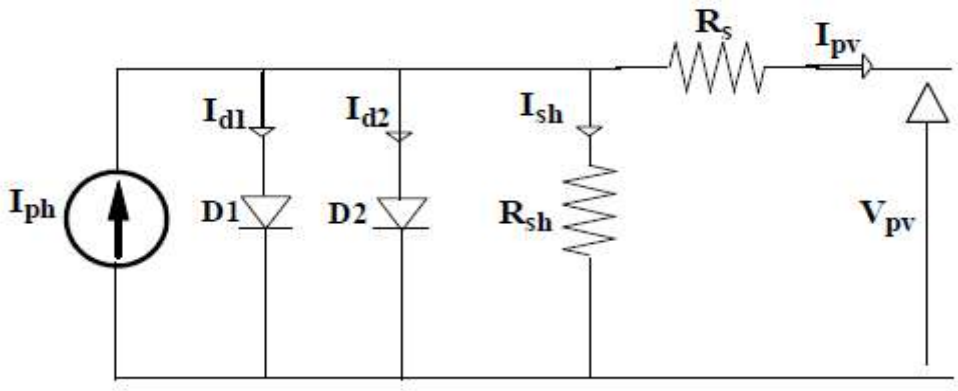


Figure I.9: Modèle électrique à deux diodes avec résistance shunt de la cellule PV.

Après la loi des mailles on trouve :

$$I_{PV} = I_{Ph} - (I_{d1} + I_{d2}) - I_{sh} \qquad \text{I.34}$$

D'où :

$$I_{PV} = I_{Ph} - I_{01} \times \left[e^{q \times \frac{(V_{pv}+R_s \times I_{ph})}{AKT}} - 1\right] - I_{02} \times \left[e^{q \times \frac{(V_{pv}+R_s \times I_{ph})}{AKT}} - 1\right] - \left[\frac{V_{pv}+(R_s \times I_{ph})}{R_{sh}}\right] \qquad \text{I.35}$$

I_{01}: Courant de saturation de la diode 1

I_{02}: Courant de saturation de la diode 2.

I.8.4.Modèle à une diode (implicite) [19] :

Un modèle électrique empirique simple, le plus proche du générateur photovoltaïque, est actuellement le plus utilisé en raison de la qualité des résultats obtenus, c'est le modèle à une diode et sans résistance shunt.

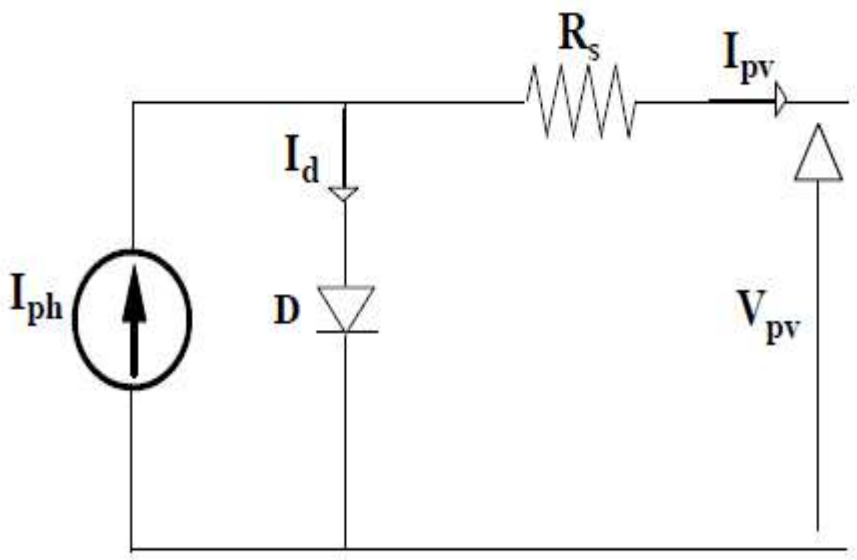


Figure I.10: Modèle électrique à une diode sans résistance shunt.

L'expression du courant de la cellule est donnée par les expressions suivantes :

$$I_{PV} = I_{Ph} - I_d = I_{cc}.\{1 - K_1.[\exp(K_2.V_{PV}^m) - 1]\} \quad \text{I.36}$$

Avec :

I_{ph}: Représente le photon-courant, il dépend de l'ensoleillement et de la température.

I_d : Courant de polarisation de la jonction P-N.

Ou les coefficientsK_1,K_2,K_3,K_4et m sont donnés par :

$$K_1 = 0.01175 \quad \text{I.37}$$

$$K_2 = \frac{K_4}{V_{oc}^m} \quad \text{I.38}$$

$$K_3 = \ln[\frac{I_{cc}(1+K_1)-I_{mmp}}{K_1 I_{cc}}] \quad \text{I.39}$$

$$K_4 = \ln[\frac{(1+K_1)}{K_1}] \quad \text{I.40}$$

$$M=\frac{ln\frac{K_3}{K_4}}{\ln(\frac{Vmpp}{Voc})} \quad \text{I.41}$$

Ou :

I_{mpp} : Courant au point de puissance maximale appelé aussi courant optimum (I_{opt}).

V_{mpp} : Tension au point de puissance maximale ou tension optimale (V_{opt}).

I_{cc}: Courant en circuit ouvert.

V_{co} : Tension en circuit ouvert.

On applique L'équation (I.36) que pour un niveau d'insolation E et de température particuliers (E= 1000 W/m2, T=25°C), Relatifs aux conditions standards de fonctionnement, ces derniers influent sur les paramètres qui varient selon les équations suivantes :

$$\Delta T_c = T_c - T_{stc} \quad \text{I.42}$$

$$\Delta I_{PV} = \alpha_{sc}\left(\frac{E}{E_{stc}}\right).\Delta T_c + \left[\left(\frac{E}{E_{stc}}\right) - 1\right].I_{stc} \quad \text{I.43}$$

$$\Delta V_{PV} = -\beta_{oc}.\Delta T_c\text{-}R_S.\Delta I_{PV} \quad \text{I.44}$$

Avec :

E et E_{stc} : Représente respectivement, le niveau d'insolation dans les conditions standards de fonctionnement et des conditions quelconques.

ΔE : Représente la variation de l'ensoleillement.

T_{stc} et T_c: représente respectivement, la température dans les conditions standards de fonctionnement et dans les conditions quelconques.

ΔT_c: Désigne la variation de la température.

ΔI_{PV}: Désigne la variation du courant par rapport à l'insolation et à la température.

Δ_V : Désigne la variation de la tension par rapport à l'ensoleillement et à la température.

α_{sc}: Définit en tant que coefficient de courant de changement de la température [A/°C].

β_{oc}: Définit en tant que coefficient de tension de changement de la température [V/°C].

Nous obtiendrons alors les nouvelles valeurs du courant ainsi que de la tension photovoltaïque qui seront représentées par les équations suivantes :

$$I_{PV\,nouv} = I_{stc} + \Delta I_{PV} \quad \text{I.45}$$

$$V_{PV\,nouv} = V_{stc} + \Delta V_{PV} \quad \text{I.46}$$

Dans notre cas on a choisit le modèle d'un module photovoltaïque à une diode (Modèle implicite) qui est représenté ci –dessus [19].

I.9.Résultats de simulation dans les conditions standards

Le schéma de simulation réalisé sous Matlab est représenté par la figure qui suit :

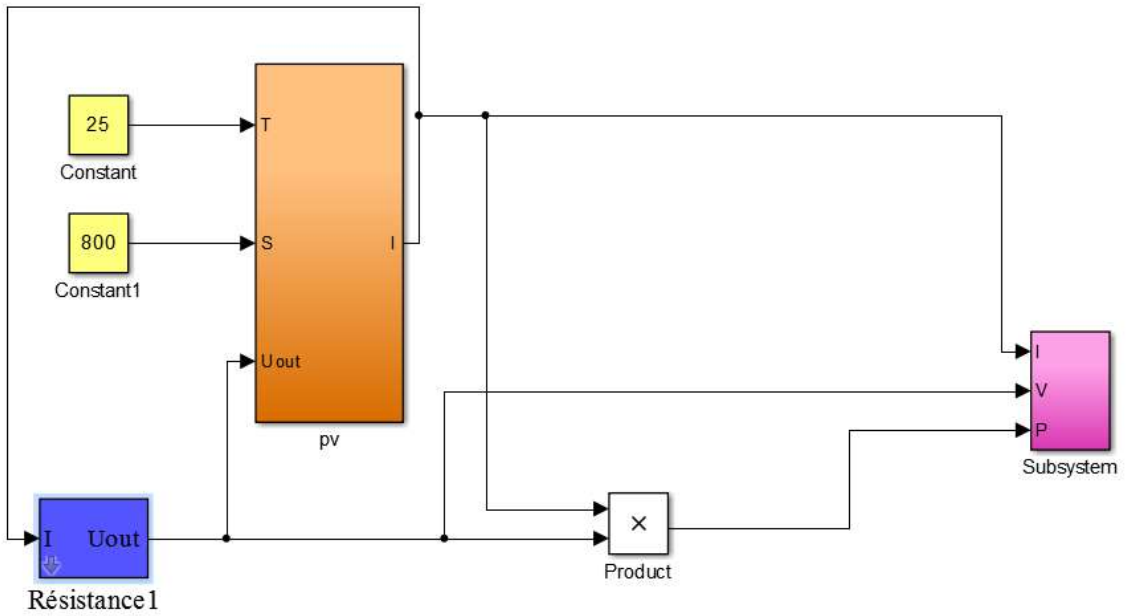


Figure 11: Schéma bloc du module photovoltaïque

I.9.1: Caractéristique I(V) et P(V) du module aux conditions STC (25°C, 1000W/m_2)

Les figures (I.12) et (I.13) Nous donnent sous (matlab/simulink), les caractéristiques I=f(V), P=f(V) du module photovoltaïque dans les conditions standards E=1000W/m2 et T=25°C.

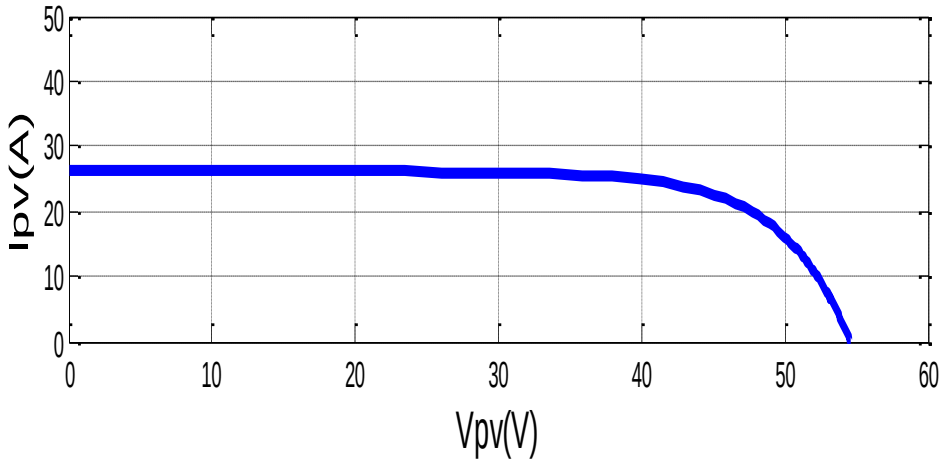


Figure I.12: Caractéristique I=f(V) du module photovoltaïque

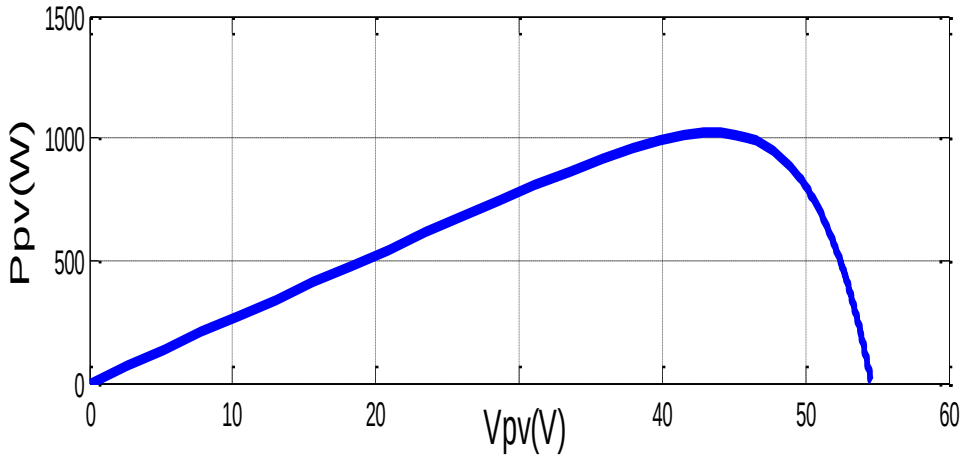


Figure I.13: Caractéristique P=f(V) du module photovoltaïque**.**

On remarque que dans un premier temps la tension augmente, le courant quant à lui reste stable. Dans un second temps, le courant baisse légèrement et la tension augmente peu (nous sommes dans la zone du point de puissance maximal PPM) dans un troisième temps, le courant baisse fortement et la tension augmente très peu.

I.9.2.Influence de la température et de l'éclairement

I.9.2.1.Influence de l'éclairement

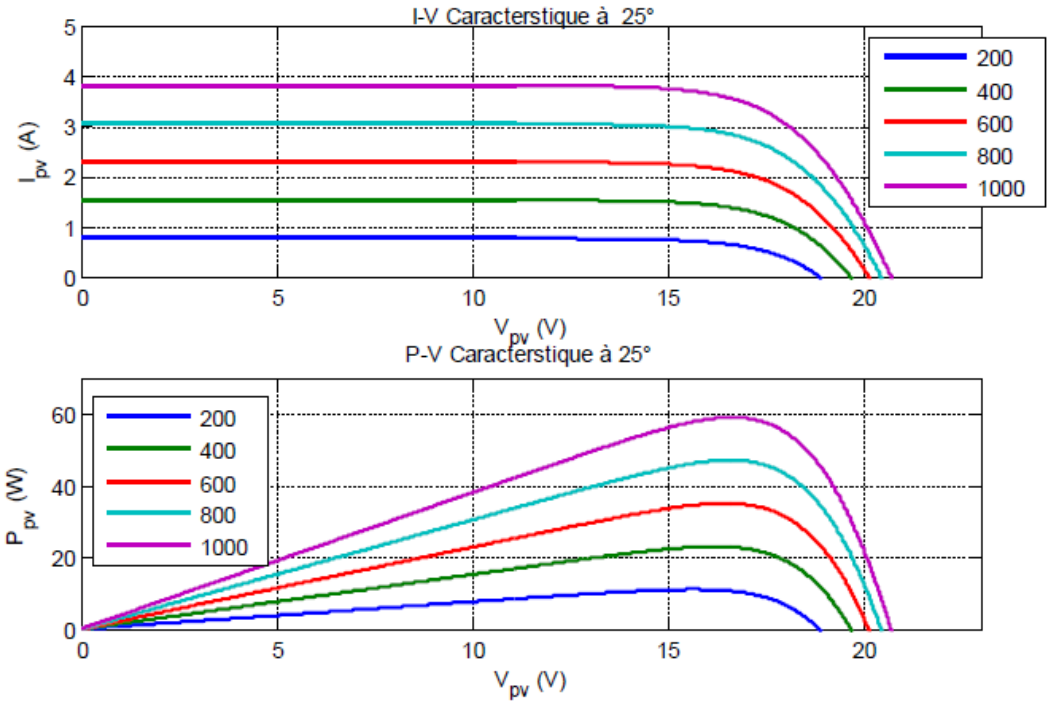


Figure I.14: Influence de variation de l'éclairement sur les caractéristiques (I-V) (P-V)

On remarque que la valeur du courant de court –circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement, par contre la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les même proportions, elle reste quasiment identique même à faible éclairement

I.9.2.2 : Influence de la température

En faisant varier la température de 25°C jusqu'à 70°C, la caractéristique (I_{pv}=f(V_{pv})) est donnée par les figures (I.15) On remarque que la tension en circuit ouvert baisse assez légèrement avec l'augmentation de la température. Par contre cette dernière a une influence négligeable sur le courant de court-circuit.

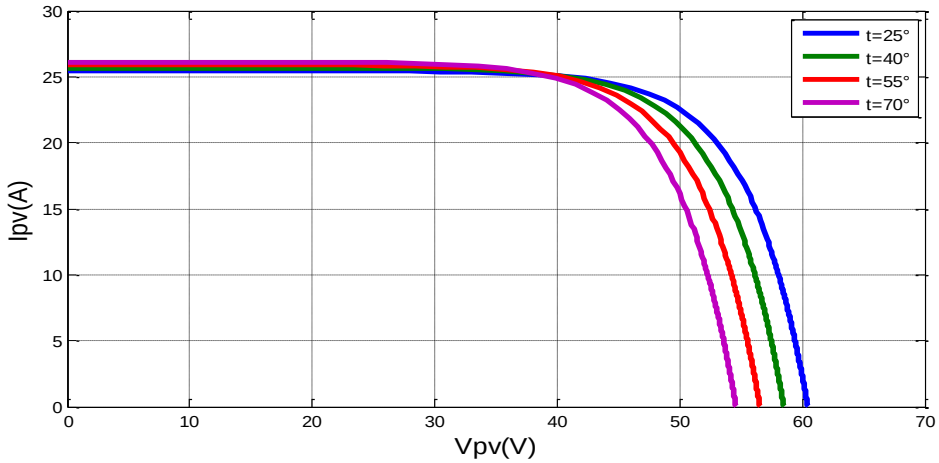


Figure I.15: Effet de la température sur la caractéristique I_{pv} (V_{pv})

A partir des deux figures (I.14) ainsi que (I.15), on peut observer que la caractéristique P_{pv} (V_{pv}) change considérablement avec la variation du niveau d'ensoleillement ; alors que le changement est assez négligeable lors de la variation de la température. Ceci s'explique par le fait que le courant varie considérablement avec la variation de l'irradiation ; alors que la tension .Par contre, cette dernière varie beaucoup, quand la température varie.

I.10.Avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques [20] :

I.10.1.Avantages

1. Le soleil est une source d'énergie propre et renouvelable, qui ne produit ni le gaz nid déché toxique par son utilisation.
2. Le processus photovoltaïque est complètement à semi-conducteurs et d'un seul bloc.
Il n'y a aucune pièce mobile et aucun matériau n'est consommé ou émis.
3. Pas de pollution, ni émissions ou odeurs discernables.

4. Ils peuvent être des systèmes autonomes qui actionnent sûrement sans surveillance pendant de longues périodes.

5. Grande fiabilité.

6. Ils peuvent être combinés avec d'autres sources d'énergies pour augmenter la fiabilité du système.

7. Ils n'exigent aucun raccordement à une source d'énergie ou à un approvisionnement en carburant existant.

I.10.2.Inconvénients :

1. La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.

2. Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-17 %.

3. Tributaire des conditions météorologiques.

4. Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru.

Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes.

I.11.Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les enjeux et les développements actuels du photovoltaïque. Nous avons ensuite présenté le fonctionnement d'une cellule en expliquant brièvement le phénomène photovoltaïque. Nous avons vu que la cellule PV présente une caractéristique I(U) non linéaire et qu'elle peut être modélisée par un circuit électrique simple. Nous avons présenté l'influence des différents paramètres extérieurs sur cette caractéristique. Le courant de court-circuit évolue principalement avec l'éclairement et la tension à vide avec la température. L'interconnexion de cellules PV en série ou en parallèle pose plusieurs problèmes de déséquilibre qui sont très pénalisants si les cellules n'ont pas le même point de fonctionnement.

CHAPITRE II :

Comportement des onduleurs Z-sources

II.1.NTRODUCTION

L'onduleur Z_source a été récemment introduit [17], la terminologie Z_source (Source d'Impédance) 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 [21].

II.2.Structure du L'onduleur Z_source :

La topologie d'un onduleur de tension triphasé d'une structure z_source est donnée dans la Figure I.1. Il est constitué d'un onduleur triphasé connecté à la source de tension continue par l'intermédiaire d'un réseau d'impédance et une diode de protection pour empêcher la décharge des deux condensateurs dans la source de tension continue.

Cette structure a été proposé pour remplacer la structure classique afin d'optimiser la chaine de puissance en terme de composants et de coût **[22] [23] [24]**.

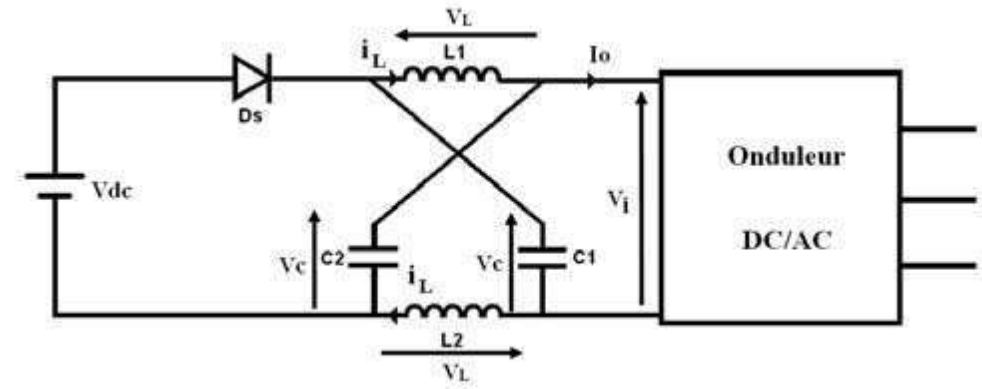


Figure 1 : Structure de l'onduleur Z_source.

II.3.Principe De Fonctionnement De L'onduleur Z-SOURCE :

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-circuit de bras de l'onduleur.

Ces courts-circuits sont effectués pendant les phases de roue libre sur la charge triphasée de l'onduleur (vecteurs nuls des MLI vectorielles). 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 [21].

L'amplification maximale b est obtenue lorsqu'on court-circuite 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, état actif (échange de puissance entre l'étage continu et la charge), court-circuites bras de l'onduleur [21].

II.4.Méthode de poursuite du point de puissance maximal:

Pour obtenir un meilleur rendement dans le fonctionnement des générateurs photovoltaïques, la technique appelée la poursuite de la puissance maximale (MPPT) qui consiste à transférer de façon optimale toute la puissance électrique à extraire de cette source de l'énergie photovoltaïque vers la charge à alimenter. Elle doit être utilisée dans toute application utilisant ces générateurs, et deviendra nécessaire et même indispensable selon la théorie du transfert optimal de puissance. Les techniques de contrôle employées pour la poursuite du point de puissance sont [25]

II.5.La poursuit du point de puissance maximal(MPPT):

La recherche du point de puissance maximum (MPPT) est intégralement réalisée de façon électronique, sans aucun dispositif ou système mécanique.

Le contrôleur ou régulateur MPPT mesure et compare en permanence, la tension délivrée par le panneau avec celle du dispositif batterie I.

Il calcule alors le niveau de puissance maximum que :

• le panneau peut délivrer à la batterie

• la batterie est capable de recevoir

A partir de cette valeur de puissance, il détermine la tension la plus adaptée afin de fournir une intensité optimum pour la batterie.

La méthode PO^5est la plus simple pour faire une recherche du MPP. Dans le cas d'une application photovoltaïque, il s'agit en fait d'un algorithme qui va chercher la valeur optimale par ≪essai-erreur≫ en faisant varier la valeur de la tension U, et en analysant la puissance de sortie P (ou l'intensité de sortie I). L'objectif est de maximiser P, en augmentant au maximum la tension U sans faire baisser l'intensité I [25].

II.5.1 : Structure et caractéristique d'un panneau PV : [26]

On présente la structure d'un panneau PV commercialise a la Figure II.3.a : un panneau se compose de 72 cellules, une diode by-pass est connectée en parallèle a un groupe de 9 cellules en série, 2 groupes (chaque groupe de 9 cellules) sont mis en série avec une diode anti-retour, enfin, 4 blocs (chaque bloc de 18 cellules) sont connectes en parallèle.

Paramètre de chaque panneau :

µ Tension nominale V nom=24V

µ Tension en circuit ouvert V ouvert=43,2V

µ Puissance maximale P max=165W

La Figure II.2.b illustre la relation courant-tension et puissance-tension du PV.

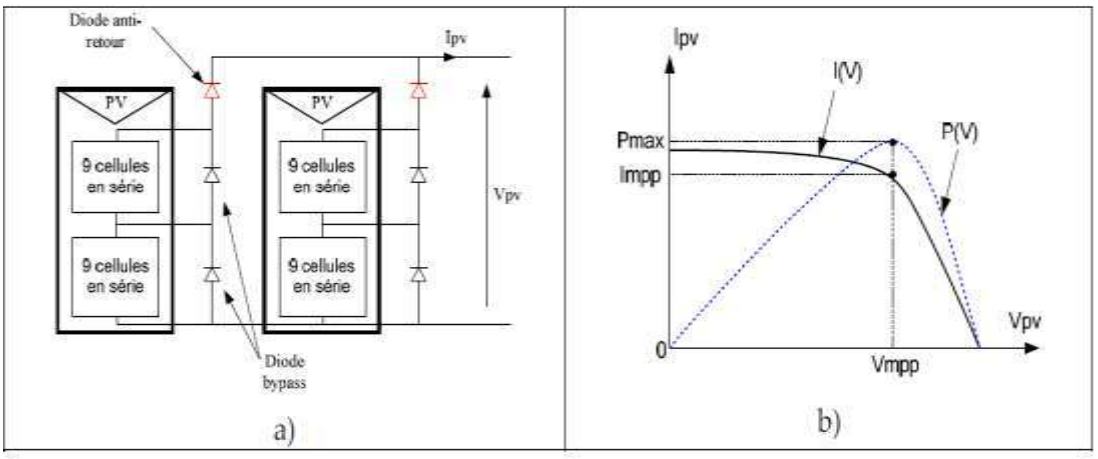


Figure II.2: Structure d'un panneau photovoltaïque commercialise et sa caractéristique I(V), P(V)

II.5.2.Méthode des Perturbations et Observation [27]

Les systèmes PV se comportent comme une source intermittente car leur puissance dépend de la température et de l'éclairement, la Figure II.3 nous montre ces caractéristiques. Dans le cas d'un système PV raccorde au réseau, il travaille au point de puissance maximale MPP aux fins de maximisation du rendement. Mais ce MPP varie toujours en fonction de l'irradiation, de la dérive des paramètres, de la température, du non uniformité de l'éclairement,…. On doit donc mettre en œuvre un algorithme permettant de retrouver ce point en temps réel, il s'agit de l'algorithme MPPT.

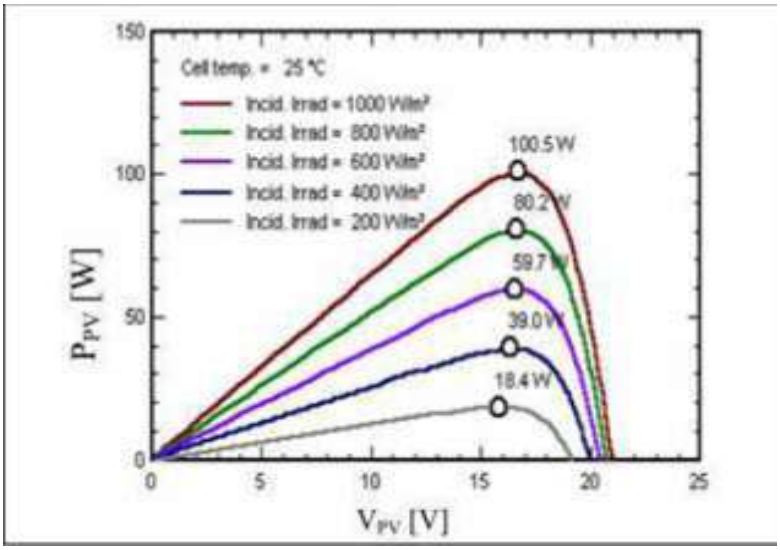


Figure II.3. Puissance maximale en fonction de la température (gauche) et de l'éclairement (droite) [27]

Dans la littérature, il existe beaucoup d'articles sur le MPPT, les trois méthodes les plus utilisées sont Hill Climbing, Perturbation and Observation (P&O) [28] et l'Incrément de Conductance (IncCond). Dans [29] un point de vue global sur les 19 méthodes de MPPT est présente, lequel donne une estimation et comparaison sur les critères : simplicité, nombre de capteur, prix et application. A partir de ces remarques, on trouve que la méthode P&O est largement utilisée pour sa simplicité d'implémentation en numérique, le temps de réponse acceptable, son moindre cout et elle convient a l'application PV.

Le principe de la commande de type P&O consiste à perturber la tension V_{pv} d'une faible amplitude ΔV autour de sa valeur initiale et à analyser le comportement de la variation de puissance P_{pv} qui en résulte [29].

II.6.Commande Par Modulation De Largeur D'Impulsion [30]:

La modulation de largeur d'impulsion (en anglo-saxon pulse width modulation) consiste à adapter une fréquence de commutation supérieure à la fréquence des grandeurs de sortie et à former chaque alternance d'une tension de sortie d'une succession de créneaux de largeurs convenables. Cette technique peut être considérée comme une extension du principe de la commande par découpage ou la durée des impulsions n'est plus régulière mais choisie de façon à supprimer le maximum d'harmoniques de rangs faibles difficiles à filtrer.

II.6.1. Principe de base de MLI :

Le principe de base de la modulation de largeur d'impulsion est sur le découpage d'une pleine onde rectangulaire. Ainsi la tension de sortie de l'onduleur est formée par une

succession de créneaux d'amplitude égale à la tension d'alimentation (continue) et de largeur variable. La technique la plus répandue pour la reproduction d'un signal MLI est de comparer un signal triangulaire appelé porteuse de haute fréquence à un signal de référence appelé modulatrice et qui constitue l'énergie du signal recueil à la sortie de l'onduleur [30], Figure 4

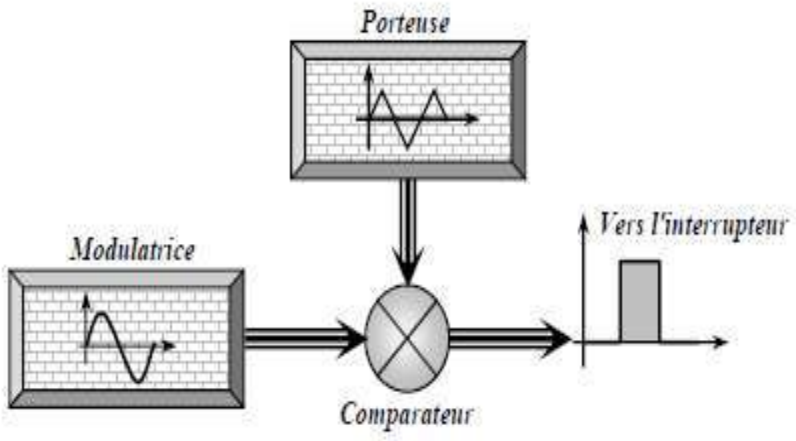


Figure 4: Schéma synoptique de la M.L.I

II.6.2. Caractéristiques de la modulation [30]:

La technique de la MLI se caractérise par deux grandeurs :

. ***Le coefficient de réglage*****:** qu'est défini comme étant le rapport de l'amplitude de l'onde modulante à celle de l'onde porteuse. Il permet de déterminer l'amplitude du fondamental de l'onde de modulation de largeur d'impulsion :

$$M_R = \frac{V_m}{V_p} \qquad \text{II.1}$$

.L'indice de modulation**:** Il est défini comme étant le rapport de la fréquence de l'onde porteuse à celle de l'onde modulant

$$M_I = \frac{f_p}{fm} \qquad \text{II.2}$$

II.7.Différente technique de modulation en MLI [30]:

Le principe de base pour la comparaison des deux ondes est un amplificateur fonctionnant en comparateur, le chargement d'état du comparateur est obtenu après chaque intersection des deux ondes, d'où à la sortie on obtient un créneau d'impulsion de largeur variables pour cela on distingue deux procédés pour l'obtention des ondes modulés [44] :

. Fonctionnement en boucle ouverte;

. Fonctionnement en boucle fermée;

II.8. Stratégies de commande de l'onduleur z_source :

L'étude des stratégies de commande de l'onduleur à structure z_source se résume sur l'étude des stratégies de commande dédiées aux onduleurs triphasés à structure z_source à cause de la méthode de commande choisie qui est la commande en alternance des deux onduleurs virtuels.

Les stratégies de contrôle de l'onduleur triphasé à structure z_source sont développées à partir des techniques de commande de la Modulation de la Largeur d'Impulsion (*MLI*) sinusoïdale et vectorielle, utilisées dans les onduleurs conventionnels **[31]**.

II.8.1. Les stratégies de commande à MLI sinusoïdale :

Les stratégies de commande à MLI sinusoïdales sont basées sur le transfert partiel ou total de l'état zéro de l'onduleur vers l'état du court-circuit. Dans ce contexte.

Le principe général de ces stratégies, est basé sur l'addition de deux signaux de références supplémentaires, destinés à la génération de l'état de court-circuit et donc l'élévation du bus continu **[32]**.

II.8.1.1 La commande d'élévation simple (Simple Boost Control SBC) :

a) Principe de la commande :

Cette stratégie est caractérisée principalement par sa simplicité et elle s'articule sur le transfert partiel de l'état zéro vers l'état du court-circuit. Elle est basée sur la commande MLI sinusoïdale traditionnelle avec l'ajout de deux lignes droites comme signaux de référence supplémentaires, l'une est positive et l'autre est négative, passant respectivement par les valeurs maximale et minimale du signal sinusoïdal de référence pour produire la durée de l'état du court-circuit **[33][34][34][35]**

L'insertion de cet état est générée lorsque la porteuse est supérieure ou inférieure respectivement aux deux lignes droites positive et négative. La Figure II.5 représente les signaux de commande de cette stratégie.

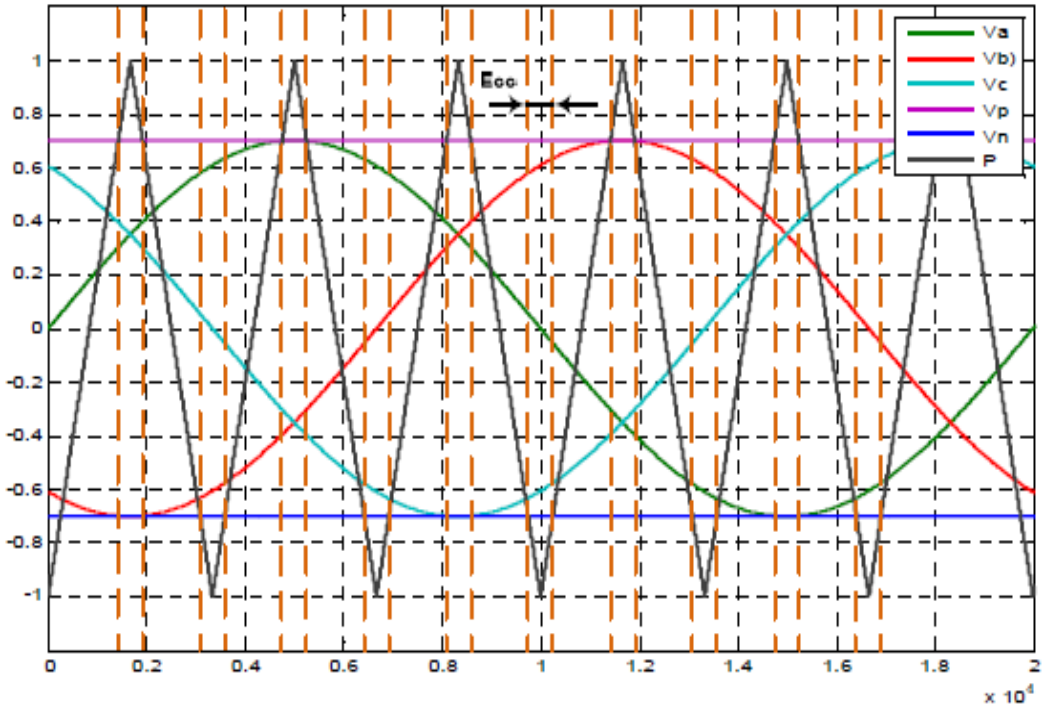


Figure II.5: Signaux de commande de la stratégie *SBC*

b) Calcul du facteur d'élévation B :

Le rapport cyclique de l'état du court-circuit dans cette stratégie est lié indirectement au rapport des amplitudes r par la relation cité ci-après, exprimée à partir de la figure II.5:

$$m = 6 \quad \textbf{Et} \quad r = 0.7$$

$$d=1-r \qquad \text{II.3}$$

Les équations de deux lignes droites d'une porteuse symétriques sont :

$$\begin{cases} d_1 = \frac{4}{T} * t - 1 \\ d_2 = 1 - \frac{4}{T} * (t - \frac{T}{2}) \end{cases} \qquad \text{II.4}$$

L'instant t_1 représente l'intersection entre la ligne droite négative ($V_n = -r$) et la ligne d_1 , tel que :

$$\frac{4}{T} * t_1 - 1 = -r = \frac{4}{T} * \frac{T_0}{4} - 1 \qquad \text{II.5}$$

A partir de cette relation, on peut déduire que :

$$\frac{T_0}{T}=d=1-r \qquad \text{II.6}$$

Le remplacement de la dernière expression du rapport cyclique *d* de l'état du court circuit, nous donne les expressions du facteur d'élévation *B* et du gain total G de l'onduleur en fonction de rapport des amplitudes r :

$$\begin{cases} d = \frac{1}{2*r-1} \\ G = \frac{r}{2*r-1} \\ B = 2G - 1 \end{cases} \qquad \text{II.7}$$

II.8.1.2.La commande d'élévation maximale (Maximum Boost Control MBC) :

a) Principe de la commande :

Cette stratégie de commande est développée dans le but de remédier à la contrainte majeure de la stratégie précédente et ce, par le transfert total de l'état zéro vers l'état du court circuit (shoot through), afin d'obtenir des gains totaux *G* très importants avec des valeurs acceptables du rapport des amplitudes *r*. Cette stratégie est similaire à la précédente, néanmoins les deux signaux de références supplémentaires (positif et négatif) sont obtenus par une comparaison de trois signaux sinusoïdaux de référence pour trouver le max et la min de ces signaux **[33] [35] [37].**

L'insertion de l'état du court-circuit est générée lorsque la porteuse est supérieure ou inférieure respectivement aux max et min des trois signaux de références.

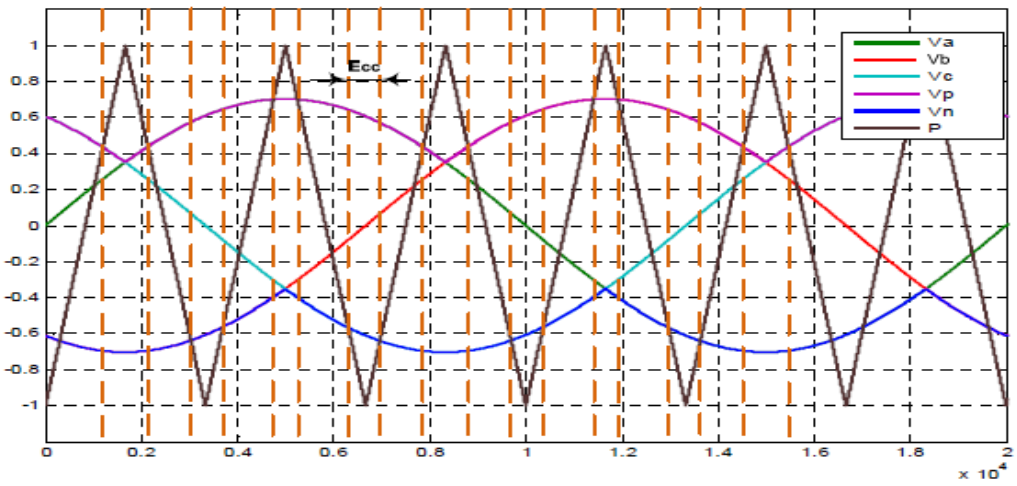


Figure II.6: Signaux de commande de la stratégie *MBC*.

b) Calcul du facteur d'élévation B :

En utilisant les expressions de la porteuse et des tensions de référence dans l'intervalle *[5π/6, π]* où $v_a > v_b > v_c$, on peut déduire le rapport cyclique de l'état court-circuit pendant une période *T* de découpage d'une MLI sinusoïdale symétrique.

La durée du court-circuit dans cet intervalle, est répartie en quatre segments, les durées du premier et du dernier segment peuvent être calculées à partir de l'intersection de la porteuse et la tension de référence v_a, tandis que les durées des autres segments, peuvent être calculées à partir de l'intersection de la porteuse et la tension de référence v_b.

A partir de la Figure II.6 on trouve les expressions de T1 et T2 comme suit

$$\begin{cases} \frac{T_1}{T} = \frac{1}{4}(1 - v_a) \\ \frac{T_2}{T} = \frac{1}{4}(1 - v_b) \end{cases} \quad \text{II.8}$$

En remplaçant les tensions de référence v_a et v_b par leurs expressions, les durées T_1 et T_2 sont données par :

$$\begin{cases} \frac{T_1(\theta)}{T} = \frac{1}{4}(1 - r.\sin(\theta)) \\ \frac{T_2(\theta)}{T} = \frac{1}{4}(1+.\sin(\theta - 2.\frac{\pi}{3})) \end{cases} \quad \text{II.9}$$

Donc, on peut écrire :

$$\mathrm{d}(\theta) = \frac{T_{st}(\theta)}{T} = 2\frac{T_1(\theta)}{T} + 2\frac{T_2(\theta)}{T} = 1 - \frac{r}{2}(\sin(\theta) - \sin\left(\theta - 2.\frac{\pi}{3}\right)) \quad \text{II.10}$$

Après simplification, la relation précédente peut être donnée par :

$$\mathrm{d}\,(\theta) = 1 - \frac{\sqrt{3}}{2}.r.\cos(\theta - \frac{\pi}{3}) \quad \text{II.11}$$

A partir de la dernière relation on peut déduire :

$$\begin{cases} d_{min}\left(\theta = \frac{\pi}{3}\right) = 1 - \frac{\sqrt{3}}{2}r \\ d_{max}\left(\theta = \frac{\pi}{6}\right) = 1 - \frac{3}{4}r \end{cases} \quad \text{II.12}$$

Le rapport cyclique d dans cette stratégie est toujours maximal par rapport à la stratégie *SBC* et ce, quelle que soit la valeur du r. ainsi qu'il est variable dans chaque période de commutation, ce qui engendre des ondulations très importantes du courant traversant l'inductance L_z. La valeur moyenne du d, peut être calculée par l'intégrale suivante :

$$đ = \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{2-(r.\sin\theta - r.\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}))}{2} d\theta \quad \text{II.13}$$

Ce qui nous donnée :

$$đ = \frac{2\pi - 3\sqrt{3}.r}{2\pi} \quad \text{II.14}$$

La combinaison de cette dernière relation avec les relations I.12 et I.13 nous permet d'écrire que :

$$\begin{cases} d = \frac{\pi}{3\sqrt{3}.r-\pi} \\ G = \frac{\pi.r}{3\sqrt{3}r-\pi} \\ B = \frac{3\sqrt{3}.G-\pi}{\pi.G} \end{cases} \qquad \text{II.15}$$

II.8.1.3.La commande d'élévation constante et maximale (Maximum Constant Boost Control MCBC) :

Cette stratégie de commande est développée dans le but de remédier aux contraintes des deux stratégies précédentes par la conservation du rapport cyclique de l'état du court circuit constant, tout en gardant le gain G très important avec des valeurs acceptables du r.

Elle s'articule sur l'insertion de l'harmonique trois de la tension de référence.

a) Principe de commande :

Le principe de cette stratégie est basé sur l'injection de l'harmonique trois du fondamental, cette injection génère un nouveau signal de référence.

Les deux signaux supplémentaires de référence *Vp* et *Vn* dans cette stratégie, sont des lignes droites passant respectivement par les valeurs maximale et minimale du nouveau signal de référence. L'insertion de l'état du court-circuit est générée dès que la porteuse est supérieure ou inférieure respectivement aux deux lignes droites positive et négative. Ce principe est similaire à celui de la stratégie SBC. La figure suivante représente les signaux de commande de la dite stratégie

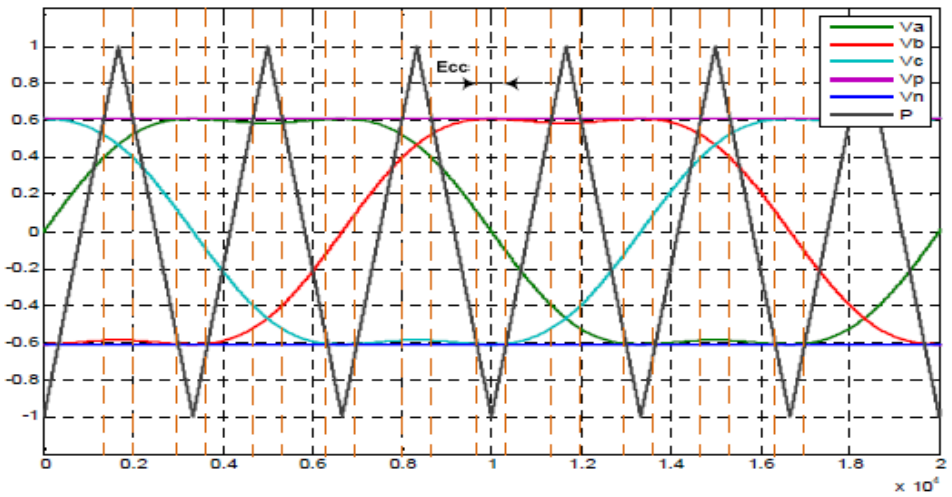


Figure II.7: Signaux de commande de la stratégie *MCBC*.

b) Calcul du facteur d'élévation :

Ce facteur d'amplification dépend de l'amplitude de l'harmonique à injecter dans le fondamental, l'expression générale de cet harmonique pour la tension V_a est donnée par la relation suivante :

$$h_3(t) = a.\sin(3.w.t) \qquad \text{II.16}$$

Si on prend :

$$a=\frac{1}{6}.r \qquad \text{II.17}$$

L'expression du nouveau signal de référence, sera comme suit :

$$V'_a(t) = v_a(t) + h_3(t) = r.\sin(w.t) + \frac{r}{6}.\sin(3.w.t) \qquad \text{II.18}$$

Ce signal a une amplitude maximale de $\frac{\sqrt{3}}{2}.r$, ce qui nous permet de déduire que les deux lignes droites ont les expressions suivantes :

$$\begin{cases} V_p = \frac{\sqrt{3}}{2}.r \\ V_n = -\frac{\sqrt{3}}{2}.r \end{cases} \qquad \text{II.19}$$

Le calcul du *B* peut être effectué en utilisant la même procédure du calcul de la stratégie SBC, et on déduit :

$$d=1-\frac{\sqrt{3}r}{2} \qquad \text{II.20}$$

Le remplacement de la dernière expression du rapport cyclique *d* dans les relations *I-10* et *I-11*, nous donne les expressions du facteur d'amplification *B* et du gain total *G* de l'onduleur en fonction du rapport des amplitudes *r* :

$$\begin{cases} B = \frac{1}{\sqrt{3}.r-1} \\ G = \frac{r}{\sqrt{3}.r-1} \\ B = \sqrt{3}.G - 1 \end{cases} \qquad \text{II.21}$$

II.8.2. Les stratégies de commande à MLI vectorielle :

Ces stratégies sont basées sur les mêmes démarches de la MLI vectorielle d'un onduleur conventionnel avec l'insertion de l'état du court-circuit nécessaire à l'adaptation (élévation) de la tension continue sans affecter les durées des vecteurs actifs.

Pour ne pas modifier le comportement de la machine, les états supplémentaires de court-circuit sont ajoutés pendant les états zéros de l'onduleur (application des vecteurs V_{000} et V_{111}). Il est ainsi intéressant de connaitre la durée de ces états puisqu'elle définit la durée du

rapport cyclique maximal (d_{max}) pouvant être insérer par la période de découpage **[38] [39] [39]**.

A partir de l'équation (II-4), de la connaissance des composantes des tensions de référence $V_{\alpha réf}$ et $V_{\beta réf}$et en considérant que les durées des états zéros sont égales (T_{000} =T_{111}= T_{EZ}/2)

Il est possible d'extraire les expressions des temps T100, T110 et TEZ du secteur S1 par exemple (soit pour θ ∈ [0, π/3]):

$$\begin{cases} T_{100}(\theta) = -T\ m\ \sin(\theta - \frac{\pi}{3}) \\ T_{110}(\theta) = T\ m \sin(\theta) \\ T_{EZ}(\theta) = T - T_{110}(\theta) - T_{110}(\theta) \end{cases} \quad \text{II.16}$$

La durée de l'état zéro $T_{EZ}(\theta)$ s'exprime alors par (II-16), cette équation permet d'en déduire le rapport cyclique maximum pouvant être inséré dans le schéma de commande par MLI.

$$T_{EZ}(\theta) = \mathrm{T}(1 - \frac{\sqrt{3}\,\mathrm{V_{max}}}{\tilde{\mathrm{v}}_{\mathrm{i}}} \sin(\theta + \frac{\pi}{3})) \quad \text{II.17}$$

Le choix de la valeur minimale permet de sur-dimensionner légèrement la tension du bus continu pour être certain de se disposer en tout temps d'une durée suffisante d'états zéros pour insérer le court-circuit. La valeur maximale choisie pour le rapport cyclique d_{max} est alors constante, ce qui permet de supprimer les problèmes d'ondulations liées à l'évolution de la durée des états zéros **[37]**. Nous aboutissons à la valeur maximale du rapport cyclique de court-circuit qu'il est possible d'insérer dans T, donnée en fonction de la profondeur de modulation m :

$$\begin{cases} d_{max} = 1 - m \\ T_{CC} = T * d_{max} \end{cases} \quad \text{II.18}$$

La structure de la MLI vectorielle à quatre courts-circuits est donnée en Figure II.8

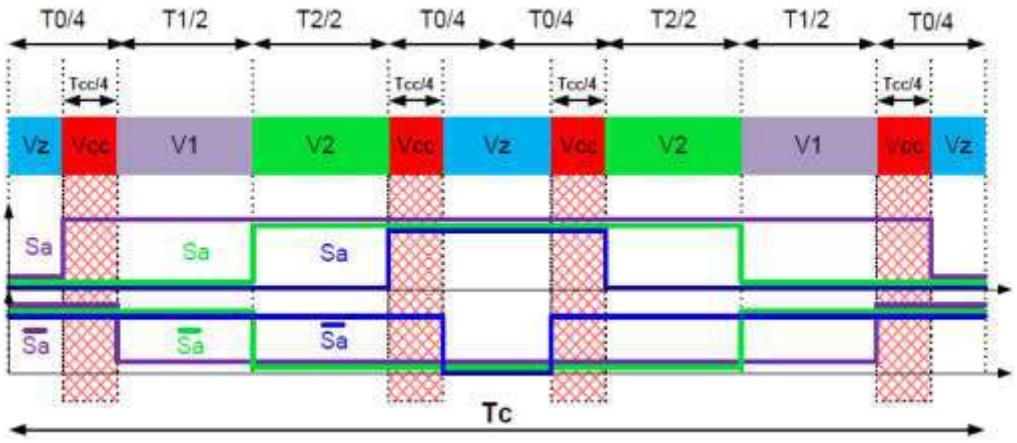


Figure II.8: Génération des signaux de commande avec une stratégie d'MLI vectorielle.

II.8.2.1.L'algorithme de la stratégie SVM d'un onduleur z_source [37] :

L'algorithme de la MLI vectorielle pour un onduleur z_source, est structuré sous la forme suivante :

.La représentation vectorielle des tensions triphasées dans un plan bidimensionnel (α, β);

.La détermination du vecteur de tension *Vréf 1* et *Vréf 2* dans le repère (α, β);

.La détermination de l'angle de rotation θ des deux vecteurs de tension;

.La détermination des durées d'utilisation des vecteurs actifs des deux vecteurs de tension ;

.La détermination de la durée d'utilisation des vecteurs nuls des deux vecteurs de tension ;

. La détermination de la durée de l'état du court-circuit des deux vecteurs de tension;

.La sélection du mode1 ou mode2.

. L'élaboration du séquencèrent des vecteurs actifs, zéro et court-circuit, de l'onduleur sélectionné.

II.8.2.2.Calcul du facteur d'élévation B :

Ce facteur dépend du nombre de court-circuit insérés, il est déterminé à condition que la soustraction des durées des vecteurs nuls et de l'état du court-circuit, soit supérieure à zéro.

On note *m* : la profondeur de modulation, Elle évalue le rapport de la valeur instantanée V_{max} de l'amplitude des tensions triphasées sur la valeur maximale V_{max}^{lim} qu'il est possible d'obtenir à partir de la tension V_i disponible aux bornes de l'onduleur [37].

$$m=\sqrt{2}.\frac{\|V_{réf}\|}{V_i}=\sqrt{3}.V_{max}/V_i \qquad \text{II.19}$$

Pour la SVM à quatre court-circuité (figure II.7), on exploitant la relation II.17, nous obtenons le rapport cyclique d'élévation maximal de la stratégie SVM à quatre court-circuités, qu'il est possible d'insérer pour une tension crête de la charge. V_{max}

$$d_{max} = 1 - m = 1 - \sqrt{3}.\frac{V_{max}}{V_i} = 1 - \frac{\sqrt{3}}{2}r \qquad tel\ que \quad r = \frac{V_{max}}{V_i/2}$$

De ce qui précède, et en utilisant la relation du facteur d'élévation :

$$\begin{cases} B = \frac{1}{\sqrt{3}.r-1} \\ G = \frac{r}{\sqrt{3}.r-1} \\ B = \sqrt{3}.G - 1 \end{cases} \qquad \text{II.20}$$

II.9.Dimensionnement des éléments passifs du réseau d'impédance :

II.9.1.Dimensionnement de l'inductance LZ :

L'inductance L_z assure le stockage d'énergie électrique et le lissage du courant que la traverse, ce dernier présente une ondulation Δi_{Lz}, qui est définie comme étant la différence entre la valeur maximale et la valeur minimale du courant **[13]**.

Pendant l'état de court-circuit (shoot through state) les tensions aux bornes de l'inductance et du condensateur sont égales, ce qui nous permet d'écrire:

$$\begin{cases} v_{cz} = \frac{1-d}{1-2.d}V_e \\ f_m = \frac{1}{T} \end{cases} \qquad \text{II.21}$$

$$\Delta i_{Lzmax} = i_{Lzmax} - i_{Lzmin} = \frac{v_{cz}.d.T}{L_z} \qquad \text{II.22}$$

On peut déduire de ces deux relation que:

$$\Delta i_{Lz} = \frac{d.(1-d)}{Lz.f_m(1-2.d)}V_e \qquad \text{II.23}$$

Avec $f_m$représente la fréquence de commutation des *IGBT*.

L'impédance peut être dimensionnée en respectant la condition

$$L_z \geq \frac{d.(1-d)}{\Delta i_{Lz}.f_m(1-2.d)}V_e \qquad \text{II.24}$$

La valeur maximale admissible pour i_L résulte d'un compromis :

.Une valeur trop faible de Δi_{Lz} conduit à une valeur excessive de l'inductance L_z;

. Une valeur trop élevée de Δi_{Lz} augmente la valeur maximale du courant que les interrupteurs et la diode doivent supporter, le maximum correspond en outre au courant que les interrupteurs doivent pouvoir interrompre.

Le choix de la fréquence de commutation f_m est crucial. Plus elle est grande, plus est petit le noyau de l'inductance et plus sont importantes les pertes par commutation de la puissance.

I.9.2.Dimensionnement du condensateur Cz :

Le but du condensateur est d'absorber l'ondulation du courant et de maintenir une tension assez constante afin de générer des tensions de sortie sinusoïdales. Pendant l'état court-circuit, le condensateur charge les inductances, et le courant traversant le condensateur est égale au courant de l'inductance. Ce qui nous permet d'écrire :

$$i_{Cz} = i_{Lz} = C_z \frac{\Delta v_{cz}}{\Delta t} \qquad \text{II.24}$$

On peut déduire que :

$$C_z = \frac{i_{Lz}.d}{\Delta v_{cz}.f_m} \qquad \text{II.25}$$

Le courant i_{Lz} peut être estimé par la relation suivante :

$$i_{Lz} = \frac{P}{V_e} \qquad \text{II.26}$$

Finalement, le condensateur doit être dimensionné tout en respectant la relation suivante :

$$C_z = \frac{P.d}{\Delta v_{cz}.f_m.V_e} \qquad \text{II.27}$$

I.9.3.Dimensionnement de l'onduleur :

Afin de déterminer les valeurs numériques des éléments passifs (Cz et Lz) du réseau d'impédance, il est nécessaire de connaitre la puissance de l'onduleur, la tension continue d'entrée Ve, le rapport cyclique d maximal de l'état de court-circuit et la fréquence de commutation f, ainsi que les valeurs tolérées des ondulations du courant et de tension **[9]**.

II.10.Simulation de l'onduleur Z_source:

La figure ci-dessous qui est représenté l'onduleur Z- source :

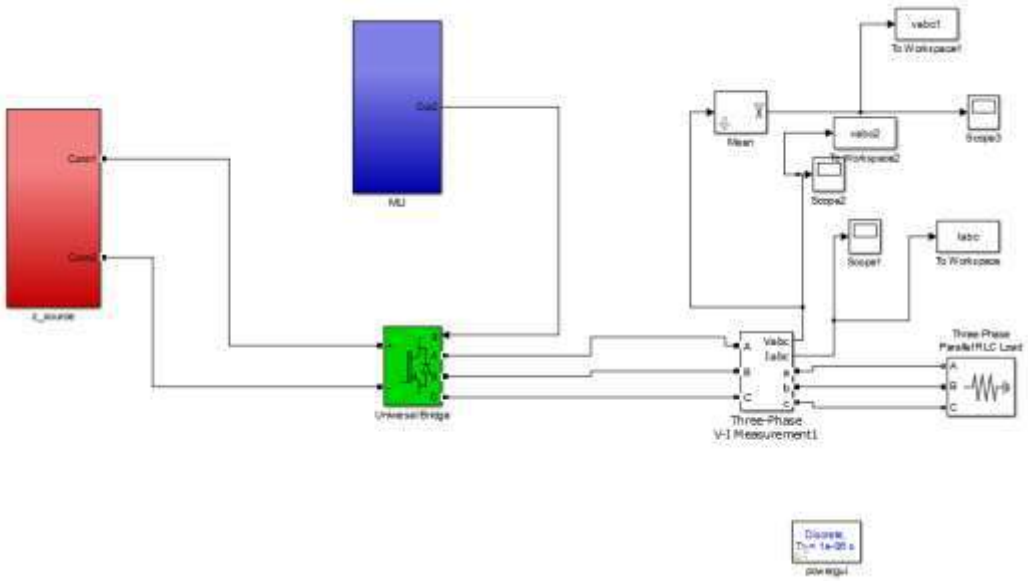


Figure II.9: Schéma l'onduleur z_source avec MLI

Les résultats de simulation sont :

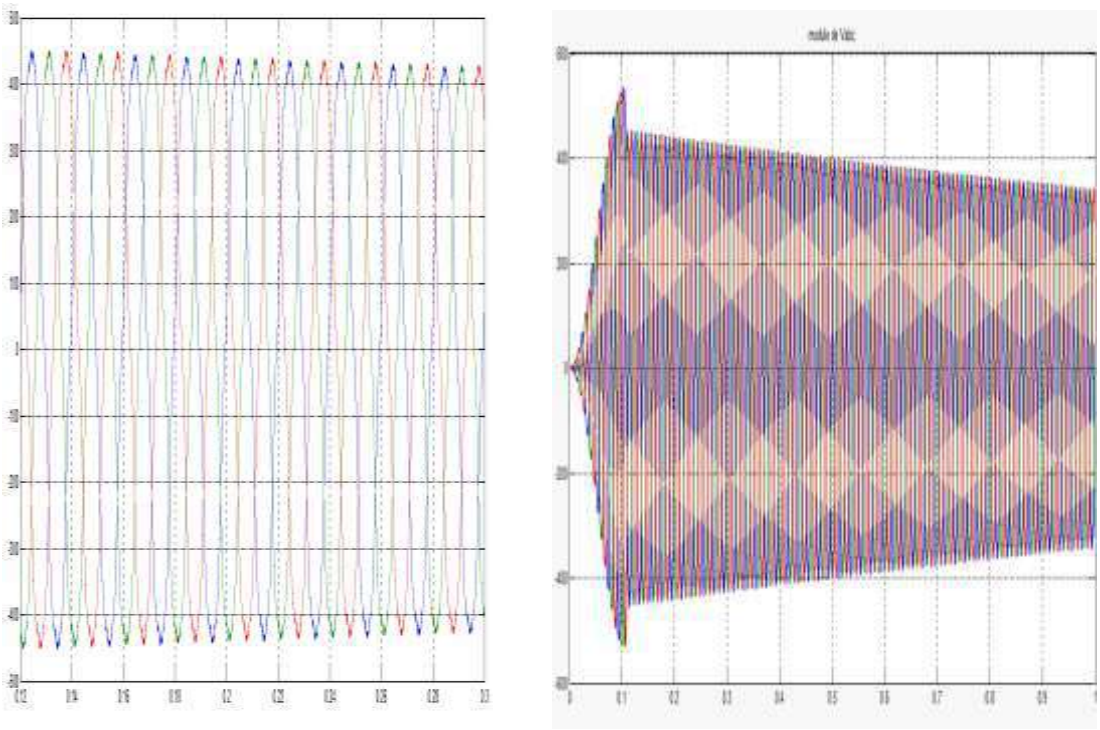


Figure II.10 : Signaux de module de l'onduleur Z_source

II.11.Simulation du Système photovoltaïque connecté avec MPPT:

Le système que nous proposons pour l'étude et la simulation est schématisé par la Figure (II .11)

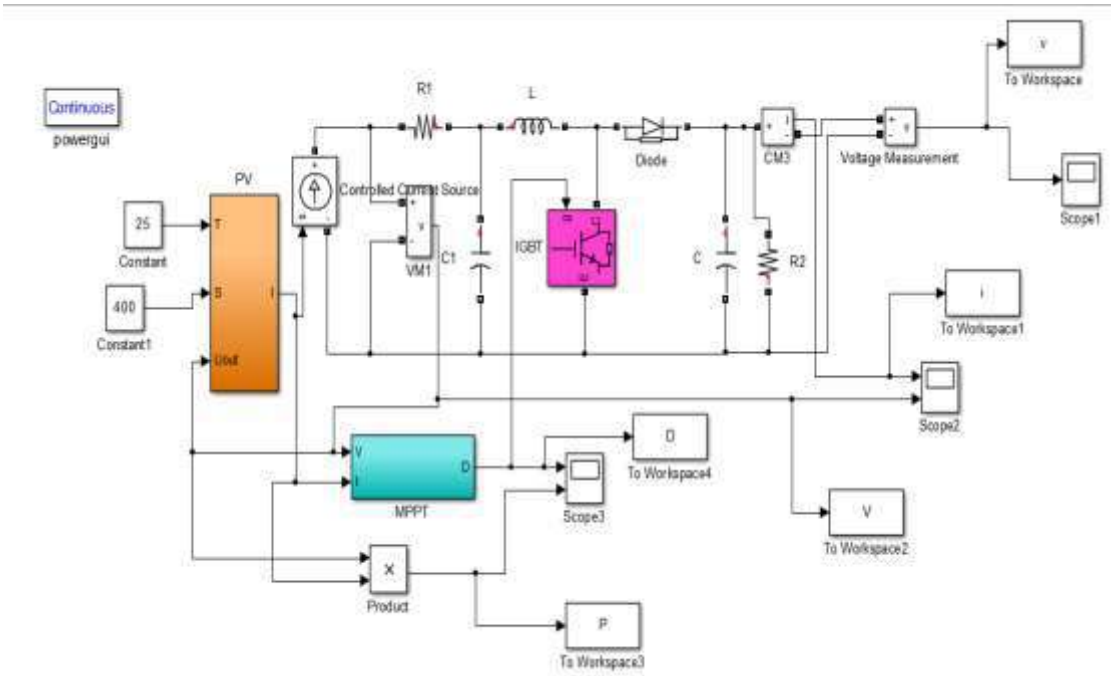


Figure II.11: Schéma générale d'un système photovoltaïque connecté MPPT

II.11.1.Hacheur survolteur et commande MPPT :

Le schéma bloc du hacheur survolteur est représenté par (la figure II.12)

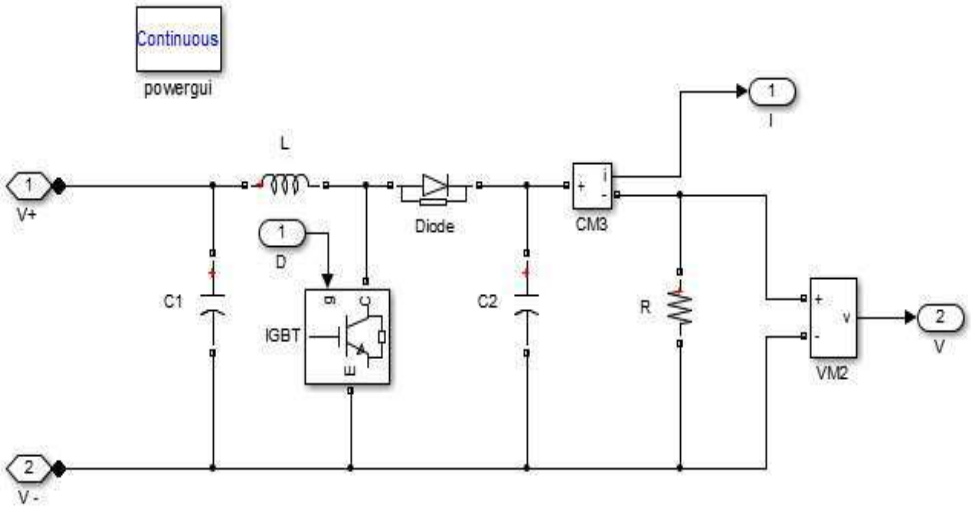


Figure II.12: Schéma block de l'Hacheur Survolteur sur matlab

Le schéma block de la commande MPPT sur Matlab est représenté sur (figure II.13)

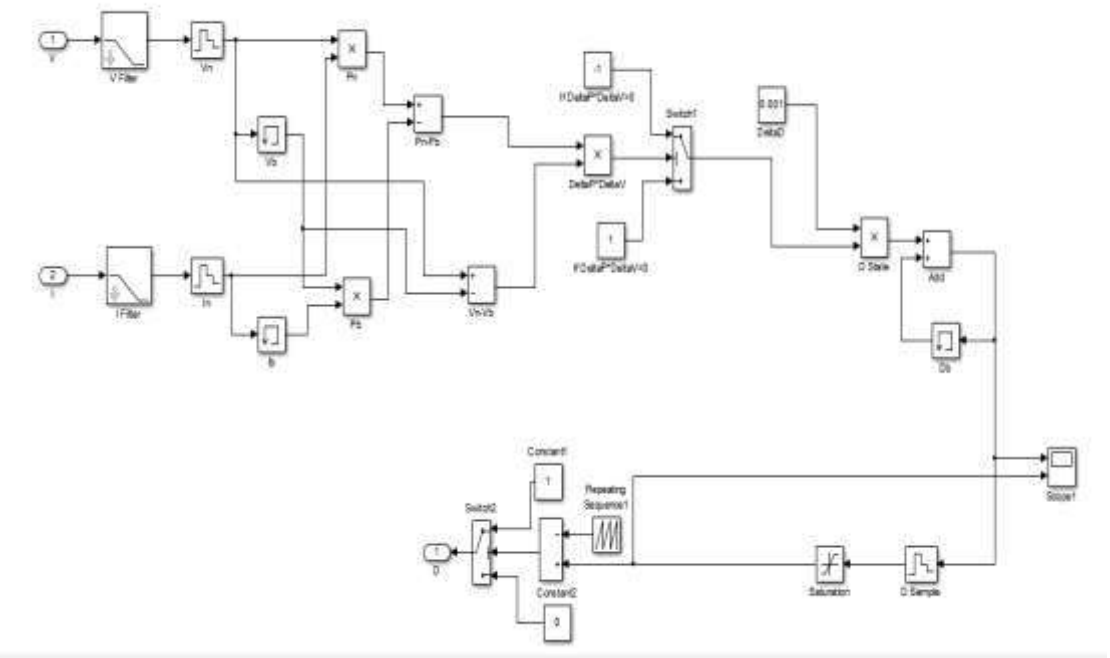


Figure II.13: Schéma block de la commande MPPT sous Matlab

Les résultats des simulations ont donné les graphes suivants :

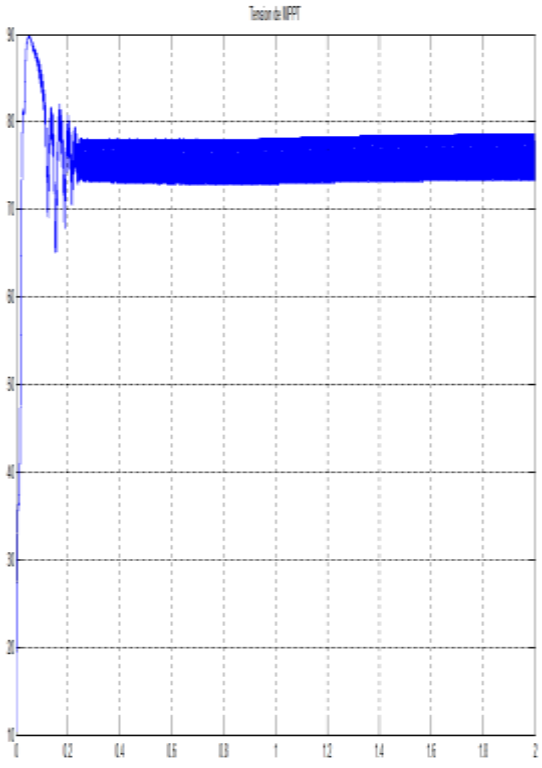


Figure II.14: courbe de tension de la commande MPPT

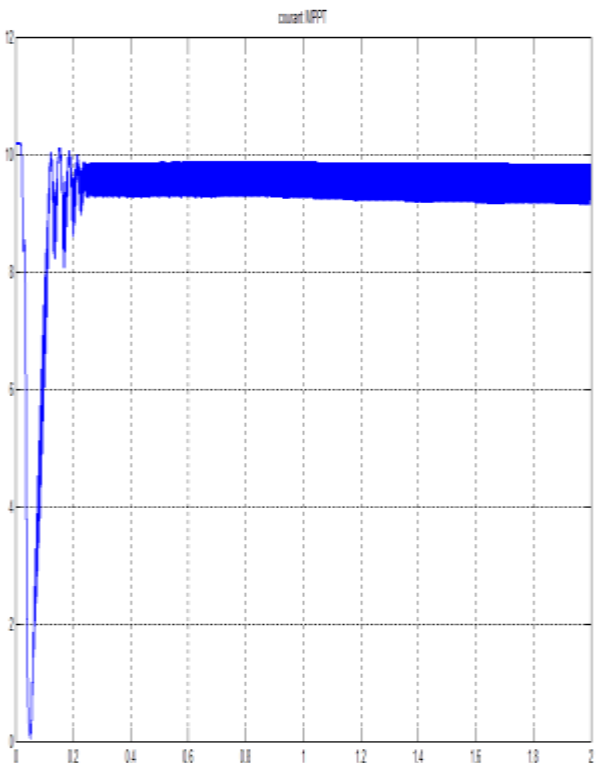


Figure II.15: courbe de courant de la commande MPPT

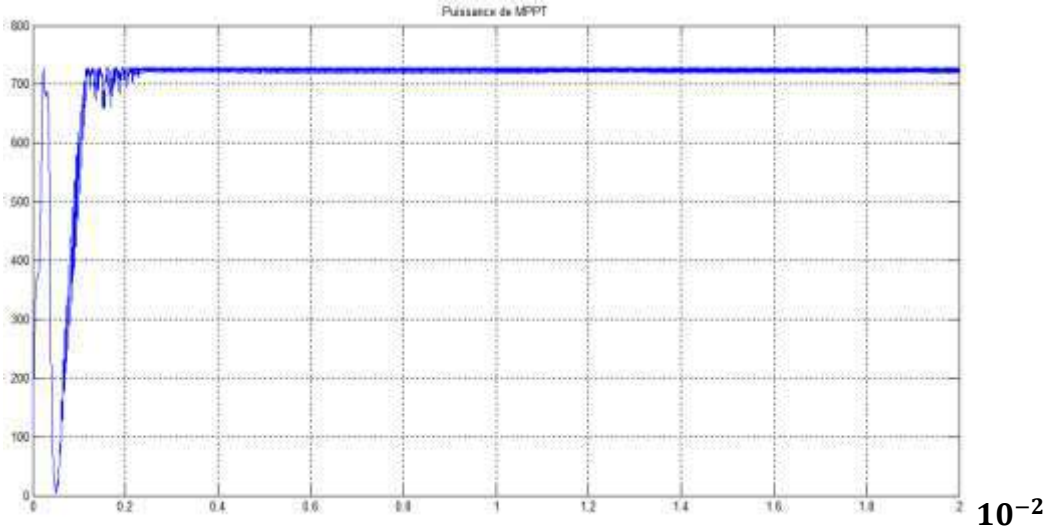


Figure II.16: courbe de puissance de la commande MPPT

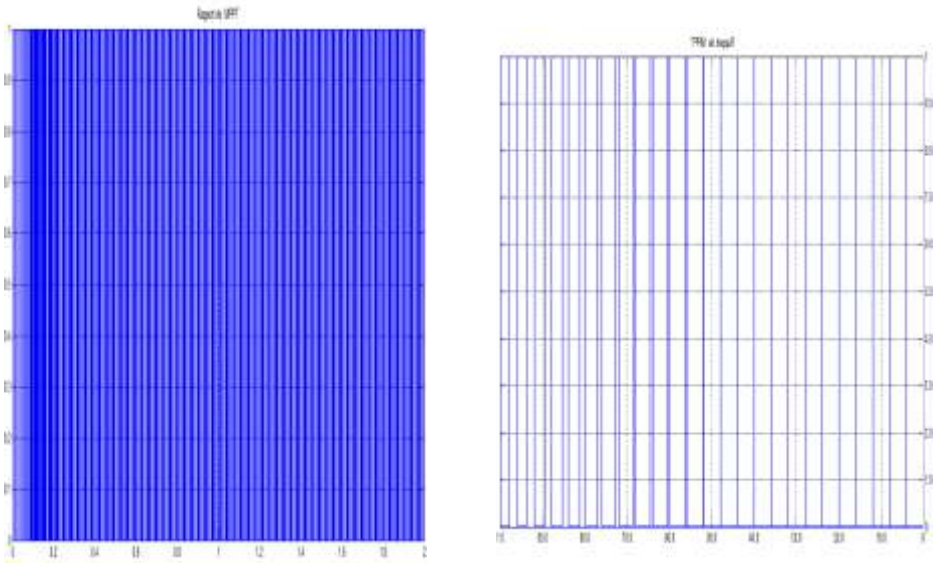


Figure II.17: courbe rapport de la commande MPPT

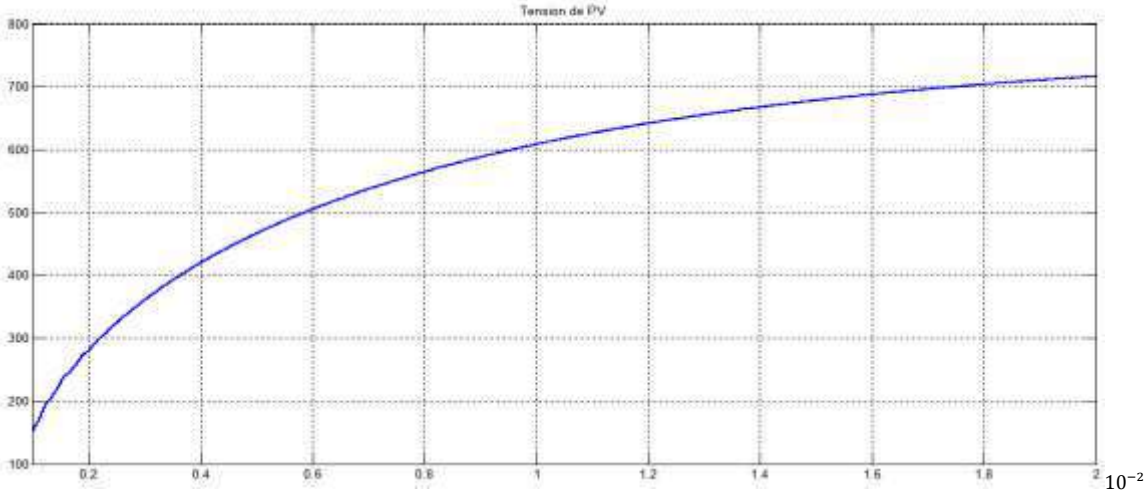


Figure II.18: courbe de tension de PV avec MPPT

II.12. CONCLUSION :

Dans ce chapitre, nous avons énumérés les différentes stratégies de commande d'un onduleur z_source, qui sont élaborées à partir des techniques de commande MLI sinusoïdale. La stratégie SBC présente l'avantage d'être simple avec un faible taux d'ondulation du courant i_{Lz} . Le facteur d'élévation et le taux d'ondulation du courant i_{Lz} élevé caractérisant la stratégie MBC. Les stratégies MCBC présente un bon facteur d'élévation avec un taux d'ondulation du courant i_{Lz} faible.

D'autre part, un dimensionnement des éléments passifs du réseau d'impédance en z a été aussi fait pour faire fonctionner l'onduleur dans les meilleures conditions.

Chapitre III :

Système photovoltaïque connecté au réseau

III.1.INTRODUCTION:

Dans ce chapitre, une étude descriptive générale Le système photovoltaïque connecté au réseau avec l'onduleur est présentée. Cette étude comprend : technologies des onduleurs couplés au réseau, leurs types, contrôle et la commande de l'onduleur.

III.2.Technologies des onduleurs couplés au réseau :

L'onduleur couplé au réseau est utilisé pour les installations photovoltaïques. Il permet de transformer le courant continu, produit par les modules solaires, en un courant ondulé conforme à celui du réseau. Il adapte également le courant produit à la fréquence et à la tension du réseau. Dans les installations d'habitation, le courant solaire produit est d'abord utilisé par l'habitation elle-même, si le courant produit pour l'habitation est excédentaire, l'excédent est injecté dans le réseau. L'installation d'un onduleur couplé au réseau électrique se fait avec l'accord de l'organisme de distributeur de d'énergie électrique. Pour des raisons de sécurité, un onduleur couplé au réseau doit constamment surveiller ces perturbations et interrompre immédiatement l'injection en cas de défaillance ou de coupure. Ceci est absolument nécessaire pour permettre une intervention sans danger sur le réseau [41].

III.2.1. Onduleurs modulaires (module inverter) :

Suivant ce concept, chaque module solaire dispose d'un onduleur individuel (par ex. Saladin 120 de Master volt). Pour les installations plus importantes, tous les onduleurs sont connectés en parallèle côté courant alternatif. Les onduleurs modulaires sont montés à proximité immédiate du module solaire correspondant [42].

III.2.2. Onduleurs centralisés (central invertir) :

Un onduleur centralisé de forte puissance transforme l'ensemble du courant continu produit par un champ de cellules solaires en courant alternatif. Le champ de cellules solaires est en règle générale constitué de plusieurs rangées connectées en parallèle. Chaque rangée est elle-même constituée de plusieurs modules solaires connectés en série. Pour éviter les pertes dans les câbles et obtenir un rendement élevé, on connecte le plus possible de modules en série [42].

III.2.3. Onduleurs "de Rangée" :

L'onduleur de rangée est le plus utilisé. Le plus souvent, huit (ou plus) de modules solaires sont connectés en série. Comme une seule connexion série est nécessaire, les coûts d'installation sont réduits. Il est important de noter qu'en cas d'ombrage partiel des modules solaires, il n'y a pas de perte, l'emploi de diodes de by-pass est fortement recommandé. Les installations jusqu'à 3 Kilowatt de puissance sont fréquemment réalisées avec un onduleur String. Pour une puissance plus élevée, il est possible de connecter plusieurs onduleurs String en parallèle, côté courant alternatif. L'intérêt dans ce concept est d'utiliser un plus grand nombre d'onduleurs du même type. Cela réduit les coûts de production et apporte un intérêt supplémentaire : si un onduleur tombe en panne, seule la production de la rangée concernée est défaillante [42].

III.3. Configuration des Systèmes PV :

Les convertisseurs utilisés doivent être utile et compatibles pour le traitement de puissance et la synchronisation avec la puissance de service. En général, quatre types de système PV connecté au réseau sans batterie de stockage sont identifiés, leurs configurations ont été conçues comme suivent [43] :

• Onduleur central (Central-plant inverter)
• Hacheur (Multiple-string dc–dc) avec un onduleur unique
• Onduleur Multiple-string
• Onduleur modulaire (Module-intégrated invertir)

III.3.1. Onduleur central (Central-plant invertir) [43]:

Dans les onduleurs centraux, habituellement on utilise un grand onduleur pour convertir la puissance du côté *(DC-DC)* des modules (*PV)* à une puissance (*AC)* sur le côté alternatif. Dans ce système, les modules de (*PV)* sont en série pour former un panneau, et plusieurs de ces panneaux sont reliés en parallèle au hacheur. Le schéma bloc d'un tel arrangement est donné par la Figure. II.1 :

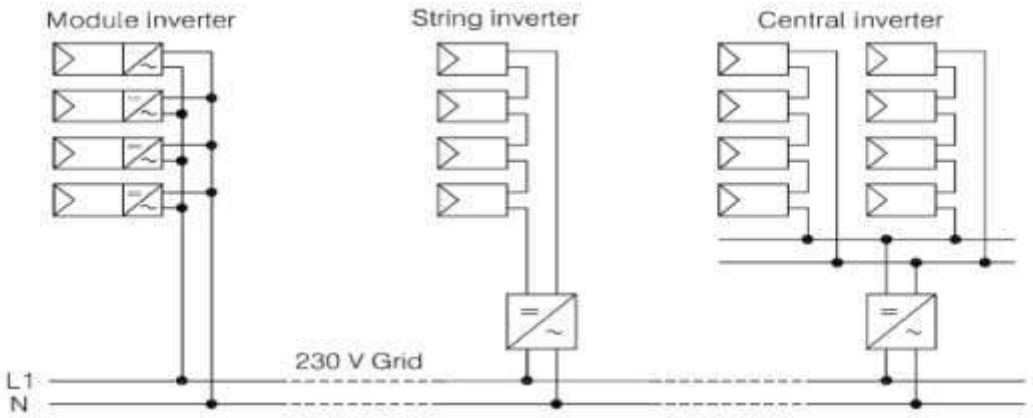


Figure.III.1: Classification des onduleurs *PV* connectés au réseau

III.3.2. Hacheur (Multiple-rangée-DC–DC) avec un onduleur :

Le schéma du montage est donné par la Figure III.2, Dans le multiple- du convertisseur *(DC-DC)*, chaque hacheur booste possède un transformateur qui assure l'isolation galvanique et un lien de conversion commun *(DC-DC)* [43].

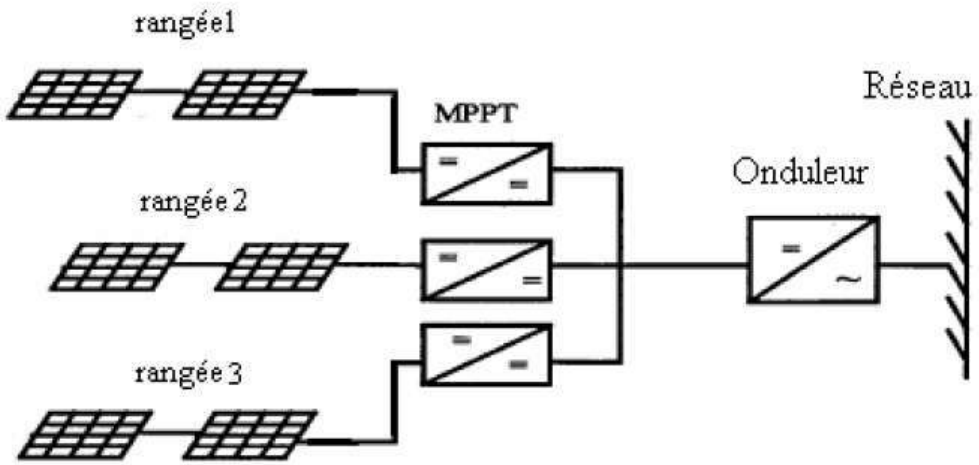


Figure.III.2*:* Hacheur (Multiple- rangée-DC-DC) et l'onduleur

III.3.3. Onduleur Multiple-rangée :

La Figure III.3 montre le schéma fonctionnel d'un système de conversion de multiple convertisseur (multiple-string). Il se comporte d'un ensemble de modules reliés en série du côté (*DC)*, et la conversion individuelle de la puissance de (*DC)* en (*AC)* est assurée par un petit onduleur.

Beaucoup de tels onduleurs sont reliés en parallèle du côté *(AC)*. Cet arrangement n'est pas affecté en ombrageant des panneaux. Il n'est pas aussi sérieusement affecté par l'échec de l'onduleur [43].

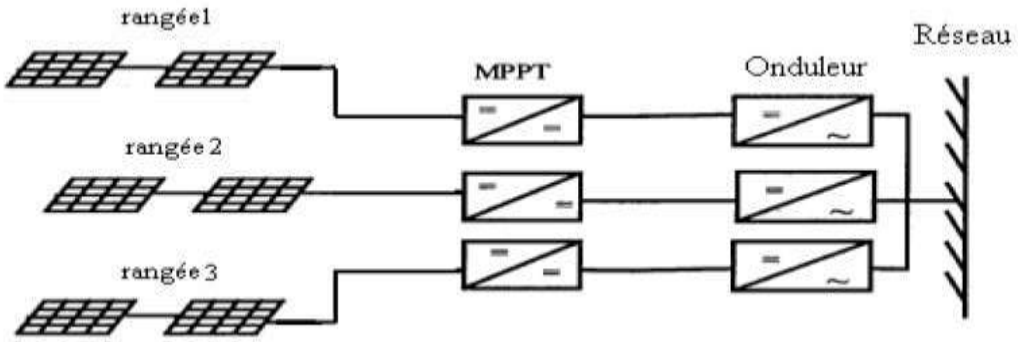


Figure.III.3*:* Onduleur Multiple-rangée

III.3.4. Onduleur modulaire (Module-integrated invertir) :

Dans les systèmes d'onduleur modulaire de la Figure III.3, chaque module photovoltaïque aura un petit onduleur (typiquement 50W à 300W) et aucun câblage n'est requis. On prévoit de petits onduleurs pour réduire le coût [40].

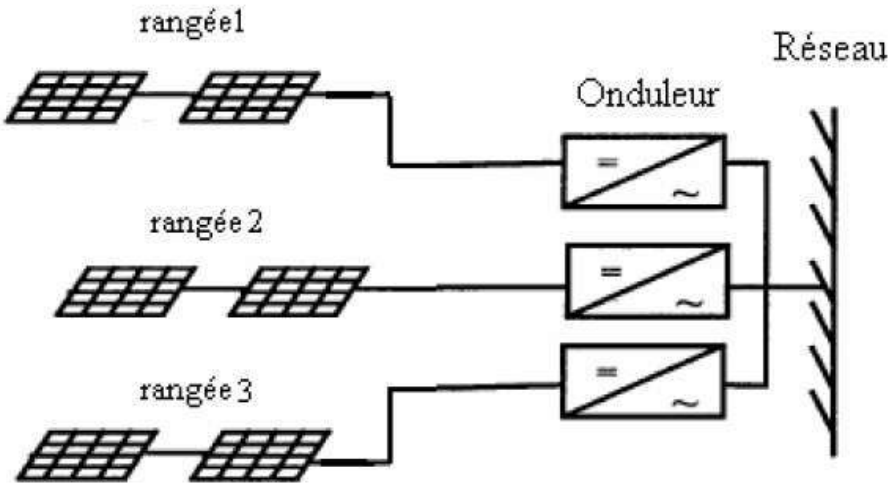


Figure.III.4*:* Onduleur modulaire (Module-intégrated invertir)

III.4.Convertisseurs DC/AC :

III.4.1. Principes de la conversion DC/AC d'un onduleur photovoltaïque :

Il a pour rôle de convertir le courant continu des panneaux photovoltaïques en courant alternatif identique à celui de Sone gaz (réseau triphasé, 220V et 50Hz). C'est un appareil électronique de haute technologie conçu pour répondre à toutes les exigences du réseau, comme la qualité, la sécurité et la fiabilité, et il permet un

contrôle parfait du fonctionnement. Il se présente sous la forme d'un boîtier métallique de petite dimension, muni d'un radiateur et doit être placé sur un support vertical (mur par exemple). Il n'émet aucun parasite électromagnétique et ne génère quasiment aucun bruit. Afin de limiter les pertes, il doit être placé le plus près possible des panneaux photovoltaïques [45].

III.4.2. Types d'onduleurs :

Les onduleurs utilisés dans les installations solaires autonomes sont caractérisés par leur technologie et par la forme d'onde qu'ils génèrent [46]:

III.4.2.1. Onduleur à onde sinusoïdale :

Les onduleurs modernes sinusoïdaux pour les installations indépendantes utilisent les mêmes techniques que celles développées pour la liaison au réseau. Les circuits sont plus simples à mettre en œuvré, les protections et synchronisation au réseau n'existant pas. On trouve ainsi sur le marché de petits onduleurs (100 à 500 W) utilisant la technique HF intermédiaire sans filtre de sortie ; le signal haute fréquence toujours présent peut ainsi éventuellement perturber la charge. Les appareils plus puissants utilisant cette technique ont en général un filtre éliminant les harmoniques HF [46].

III.4.2.2. Onduleur à onde carrée :

C'est la technique la plus simple pour générer une onde alternative. Dans ce cas, on commande deux transistors dans le primaire d'un transformateur par un oscillateur de 50 Hz. S'il est parfaitement carré, le signal généré va produire une somme d'harmoniques impaires qui ne pourront souvent pas alimenter sans problèmes des charges inductives. Les appareils utilisant cette technique n'ont pas de réglage de la tension de sortie. Celle-ci va donc varier avec la charge et la tension d'entrée [46].

III.4.2.3. Onduleur à onde pseudo-sinusoïdale :

Ce sont en général les appareils les plus performants en termes de rendement. La technique utilisée part d'un oscillateur à modulation de largeur d'impulsion à 50 Hz commandant deux transistors dans le primaire d'un transformateur. Le signal produit est un double carré (positif et négatif) avec passages par zéro le passage par zéro à chaque commutation réduit les harmoniques par rapport au signal carré. Le carré de largeur variable en fonction de la charge et de la tension d'entrée permet un réglage précis de la tension de sortie [46].

III.5.Contrôle de la liaison Onduleur-réseau électrique :

L'interface de la liaison au réseau est constituée d'un bus continu, d'un convertisseur Triphasé et d'un filtre d'entrée de nature (RL). Cette interface permettra de fonctionner comme Une source de courant liée au réseau électrique.

L'objectif du convertisseur est d'assurer le bon fonctionnement des convertisseurs en Régulant la tension du bus continu à une valeur suffisamment élevée. Le contrôle de cette Tension se fait en jouant sur la puissance active transitée au réseau [46].

III.5.1.Présentation de la structure du système côté Onduleur- réseau :

La figure ci- dessous représente la structure de l'onduleur triphasé connecté au réseau Électrique :

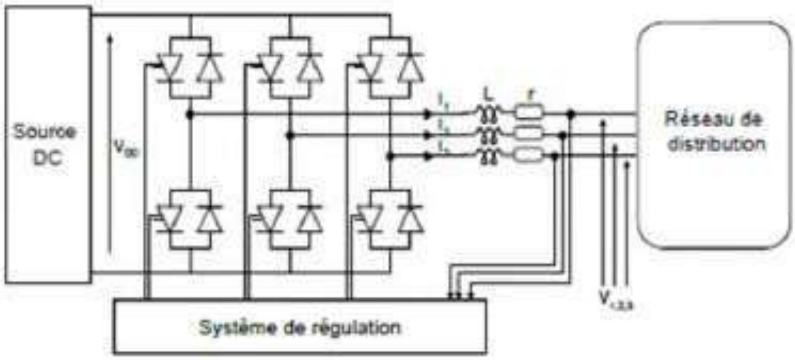


Figure III.5: Schéma de structure d'un onduleur de tension triphasé connecté au réseau.

III.5.2.Onduleur de tension :

La figure (III.5) présente un onduleur triphasé à structure de tension. Il se compose de Trois bras d'interrupteurs de courant, commandés à la fermeture et à l'ouverture, réalisés à partir D'un transistor (GTO ou IGBT).Le stockage de l'énergie du côté continu se fait par l'intermédiaire d'un condensateur C de tension V_{dc}. Le filtre de sortie est un filtre passif Habituellement du premier ordre (R, L) employé pour connecter l'onduleur de tension au réseau.

En pratique, la commande des deux semi-conducteurs d'un même bras se fait de Manière complémentaire : la conduction de l'un entraine le blocage de l'autre.

Afin d'éviter un court circuit à cause du délai de blocage des interrupteurs, il faut

Insérer sur un même bras, un temps d'attente, également appelé temps mort, entre la commande De blocage d'un interrupteur et la commande d'amorçage de l'autre. Avec l'hypothèse de Commutation instantanée. Par conséquent, le condensateur ne risque aucun court circuit [46].

III.5.2.1.Différentes commandes de l'onduleur :

Deux stratégies de commande de l'onduleur de tension sont principalement mises en Œuvre : la commande par MLI et la commande par hystérésis. La commande par hystérésis, elle peut être à bande fixe, à bande variable ou bien encore dite « modulée ». Dans notre Travail, nous présenterons les modes de commande suivants :

- Hystérésis conventionnelle.
- Hystérésis modulée [46].

III.5.2.2.Contrôle des courants par hystérésis classique :

Le principe du contrôle des courants par hystérésis consiste à maintenir chacun des Courants générés dans une bande enveloppant les courants de référence. Chaque violation de Cette bande donne un ordre de commutation.

La différence entre le courant de référence et celui mesuré est appliquée à l'entré d'un Comparateur à hystérésis dont la sortie fournit directement l'ordre de commande des Interrupteurs du bras correspondant de l'onduleur. La figure ci-dessous présente le schéma de Contrôle.

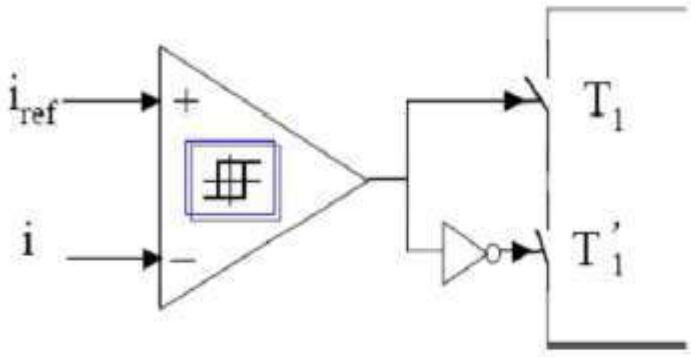


Figure III.6: contrôle du courant par hystérésis classique [46].

Fréquence de commutation variable peut être son inconvénient. Celui-ci-peut être remédié par Une version de contrôle par hystérésis avec une fréquence de commutation fixe (hystérésis Modulée).

III.5.2.3.Contrôle des courants par hystérésis modulée :

La commande par hystérésis modulée a pour objectif de résoudre l'inconvénient

Majeur de la commande par hystérésis conventionnelle en fixant la fréquence de commutation Des semi conducteurs. Cette commande consiste à ajouter aux signaux (Ia*, Ib*,Ic*) un signal Triangulaire I_{tr}, de fréquence f_{tr} et d'amplitude A_{tr}. La fréquence f_{tr} doit être choisie égale à la Fréquence de commutation que l'on souhaite imposer aux composants de puissance. Le signal Ainsi obtenu attaque alors l'entrée d'un régulateur à hystérésis de largeur de bande $2B_h$ dont la Sortie permet de commander les interrupteurs de puissance. Le schéma de cette commande est Décrit à la figure suivante :

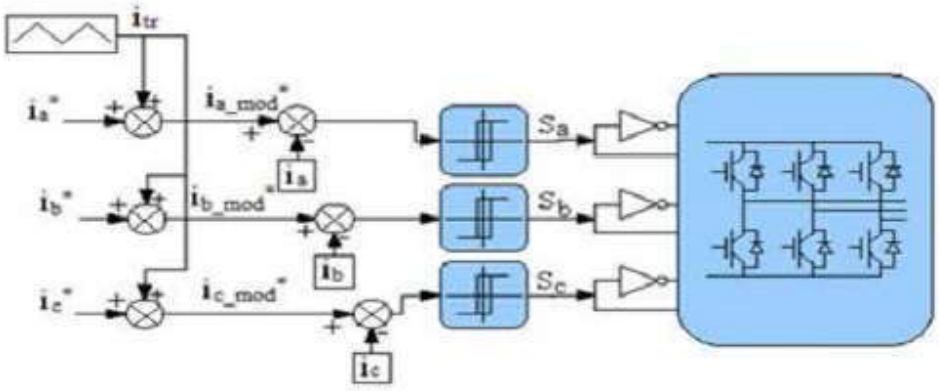


Figure III. 7: Contrôle des courants de l'onduleur par hystérésis modulée**.**

Dans le cas du contrôle par hystérésis modulée, il est important de dimensionner Correctement les valeurs des deux paramètres déterminants, à savoir A_{tr} du signal triangulaire et B_h. Si ces paramètres ne sont pas correctement déterminés, la fréquence de commutation des interrupteurs de puissance sera soit supérieure, soit inférieure, à la fréquence souhaitée.

En effet, afin de fixer la fréquence de commutation en régime permanent, il ne doit exister que deux intersections entre le courant réel et la bande hystérésis pendant chaque période T : la première avec la limite inférieure du contrôleur d'hystérésis et la deuxième avec sa limite supérieure. Si cette condition est respectée, on aura ainsi une fréquence de Commutation des interrupteurs constante et égale à celle du signal triangulaire.

On peut calculer A_{tr}, B_h à partir des deux cas extrêmes de vitesses de changement du Courant :

$$(\frac{di}{dt})\ \text{Max}\ \text{ et }(\frac{di}{dt})\ \text{min} \qquad \text{III.1}$$

Dans le cas où la vitesse de changement du courant est maximale et pour que la

Fréquence de commutation soit égale à celle du signal triangulaire, nous obtenons la condition Suivante :

$$\left(\frac{di}{dt}\right) \text{Max} < \frac{2.(Atr+Bh)}{\frac{T}{2}} = \frac{4(Atr+Bh)}{T} \qquad \text{III.2}$$

Dans le cas où la vitesse de changement du courant est minimale, pour avoir toujours Une commutation par période T, la condition suivante doit être satisfaite :

$$\left(\frac{di}{dt}\right) \text{Min} > \frac{2Bh}{T} \qquad \text{III.3}$$

Afin d'avoir au moins une intersection entre le courant réel et les limites supérieures Ou inférieures de l'hystérésis dans chaque demi période, la condition suivante est nécessaire : Bh<Ath

III.6.Contrôle de la tension du bus continu :

Le contrôle du bus continu est une procédure indispensable. L'observation des Fluctuations de la tension aux bornes des condensateurs donnent des indications sur l'évolution des échanges d'énergie entre ces derniers et le réseau.

Chaque convertisseur exerce son influence sur ce circuit, par le courant qu'il donne ou Qu'il prend au condensateur. L'′evolution temporelle de la tension à ses bornes est obtenue à Partir de l'intégration du courant capacitif :

$$I_c = I_{pv} - I_{ond} \qquad \text{III.4}$$

Et :

$$V_{dc} = \frac{1}{Cdc} \int (Ipv - Iond) \, . \, dt \qquad \text{III.5}$$

La régulation de la tension du bus continu est assurée par une gestion des échanges de puissances entre la sortie du convertisseur côté panneau photovoltaïque et l'entrée du convertisseur côté réseau. En ajustant la puissance transitée par ce dernier, il est possible de Contrôler la puissance emmagasinée dans le condensateur et donc de régler la tension du bus Continu [43].

III.7.Simulation de photovoltaïque raccordé avec l'onduleur Z_source :

Le figure (III.8) est représenté schéma de photovoltaïque raccordé avec l'onduleur Z_source

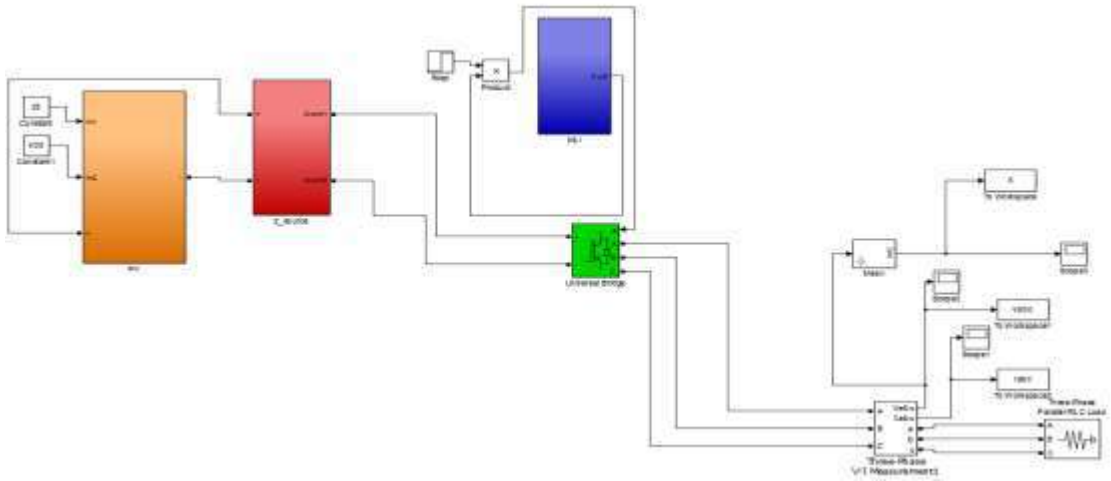


Figure III.8: schéma de photovoltaïque raccordé avec l'onduleur Z_source

Les résultats des simulations ont donné les graphes suivants :

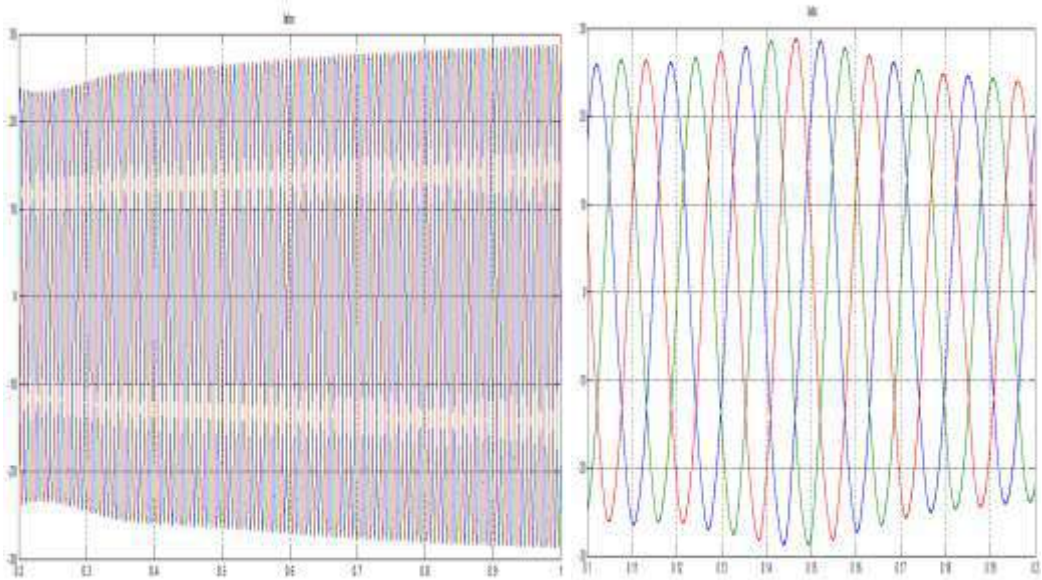


Figure.III.9:courbe de courant de l'onduleur Z_source

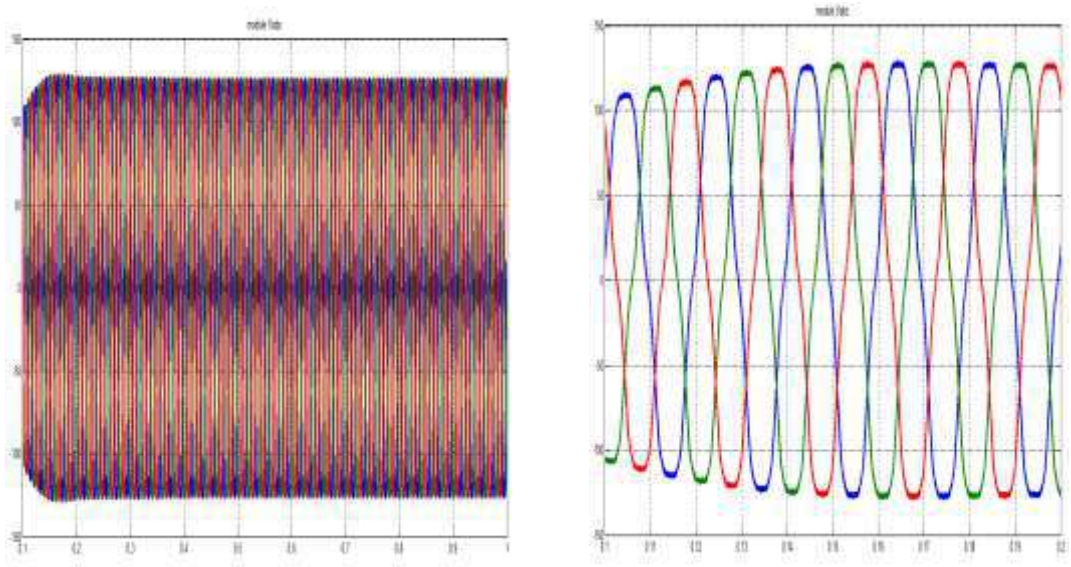


Figure.III.10:courbe de module Vabc de l'onduleur Z_source

III.8.CONCLUSION :

Le fonctionnement du générateur photovoltaïque et le récepteur à leur rendement optimal, nécessitent l'insertion des convertisseurs statiques entre le générateur et le récepteur. Dans la littérature, plusieurs travaux se sont intéressés à l'étude des systèmes photovoltaïques connectés au réseau électrique. Ce chapitre (I) a été consacré à l'introduction de quelques notions et définitions relatives aux systèmes photovoltaïques. Des informations au sujet de ces systèmes ont été décrites en donnant leur structure générale et en abordant les problèmes comportant l'interconnexion et les conditions standards d'interconnexion ou de raccordement.

Chapitre IV

Système photovoltaïque raccordé au réseau via un onduleur z_source

IV.1. INTRODUCTION :

Dans ce chapitre, on présentera une étude de simulation d'un système photovoltaïque raccordé au réseau avec l'onduleur z_source adapté par une commande MPPT numérique « perturbation et observation ». Ce système est comprend un générateur photovoltaïque, un convertisseur survolteur « boost », une commande MPPT « perturbation et observation » ainsi qu'un réseau.

Le contrôle de la puissance, ainsi que la simulation ont été effectués sous le logiciel MATLAB/Simulink [11].

IV.2. Les différents types de systèmes photovoltaïques :

Un système photovoltaïque se compose d'un champ de modules et d'un ensemble de composants qui adapte l'électricité produite par les modules aux spécifications des récepteurs. Cet ensemble, appelé aussi "Balace of System" ou BOS, comprend tous les équipements entre le champ de modules et la charge finale, à savoir la structure rigide (fixe ou mobile) pour poser les modules, les câblages, la batterie en cas de stockage et sont régulateur de charge, et l'onduleur lorsque les appareils fonctionnent en courant alternatif [41].

IV.2.1. Structure générale d'un système photovoltaïque :

Il existe deux types de structures de système photovoltaïque :

IV.*2.1.1.Les systèmes à connexion directe au réseau* :

Cette installation est constituée d'un générateur photovoltaïque connecté directement, à l'aide d'un onduleur au réseau électrique.

IV.2.1.2.Le système à bus continu intermédiaire :

Le générateur photovoltaïque est connecté par l'intermédiaire d'un convertisseur continu-continu. Un onduleur délivre une tension modulée, celle-ci est filtrée pour réduire le taux d'harmonique, on obtient alors en sortie de ce dispositif une tension utilisable pouvant être injectée dans le réseau.

Il existe plusieurs architectures pour les dispositifs permettant de convertir la tension continue issue du générateur photovoltaïque en une tension sinusoïdale utilisable (230V).

Dans la suite de cette partie, différents montages seront décrits, en précisant leurs avantages et inconvénients [41].

***IV.2.1.3. Les systèmes PV connectés au réseau* :**

Ces systèmes sont ainsi conçus pour fonctionner en parallèle et en interconnexion avec le réseau public d'électricité.

Le principal composant de ce type de système est l'onduleur. Il convertit la puissance continue *(DC)* obtenue à partir des modules *PV* en puissance alternative en respectant les conditions de qualité de la tension et de la puissance exigées par le réseau, avec une possibilité d'arrêt automatique quand le réseau n'est pas en fonctionnement.

Une interface bidirectionnelle est placée entre la sortie alternative du système *PV* et le réseau constitué par un panneau de distribution. Cela permet de produire une puissance alternative à partir du système *PV* soit en alimentant directement toutes les charges électriques, soit en injectant le surplus d'électricité (*PV)* dans le réseau lorsque les besoins sont plus importants. La nuit ou par faible ensoleillement durant les périodes où les besoins des consommateurs sont supérieurs à la production (*PV),* le réseau fournit l'appoint nécessaire, l'équilibre énergétique peut être ainsi obtenue. Lorsque le réseau est à l'arrêt, le système (*PV)* est automatiquement coupé et déconnecté du réseau à partir du panneau de distribution. Ce facteur de sécurité supplémentaire est exigé pour s'assurer que la centrale (*PV)* est coupée du réseau lorsque celui-ci est hors service pour raison de maintenance ou autre (cette fonction est appelée îlotage ou islanding) [41].

La maintenance des (*CPCR)* fonctionnant sans batterie, est particulièrement facile **:** Elle se résume a la vérification de l'état de propreté des modules (*PV)*.

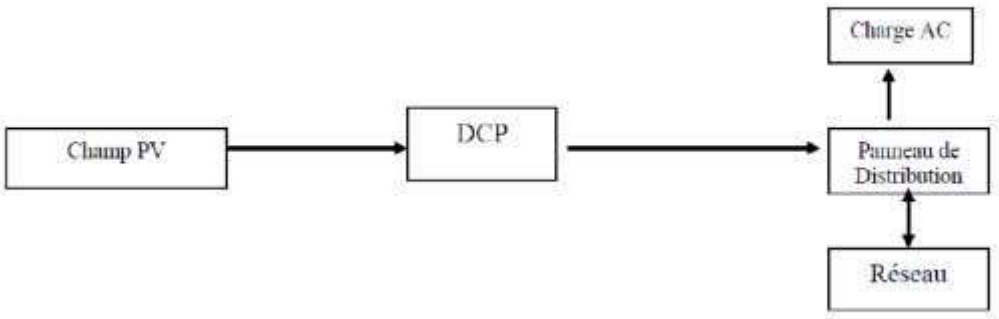


Figure. IV .1*:* Système PV connecté au réseau

IV.3.Simulation de système :

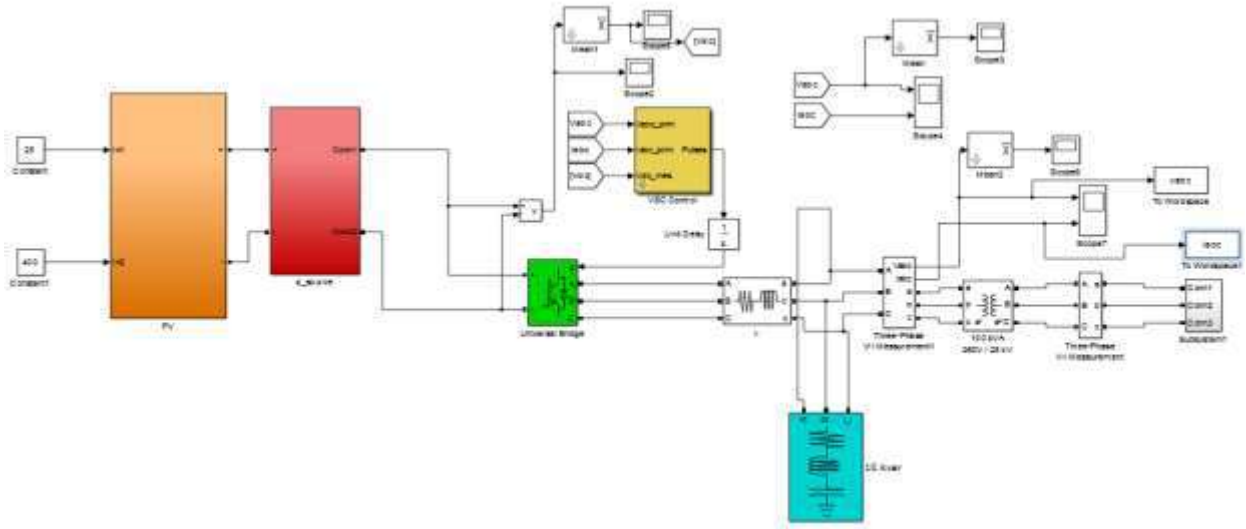


Figure. IV. 2: simulation d'un photovoltaïque raccordé au réseau avec l'onduleur z_source

IV.4 .Résultat des simulations:

Le résultat de la simulation est représenté dans (la figure IV.3)

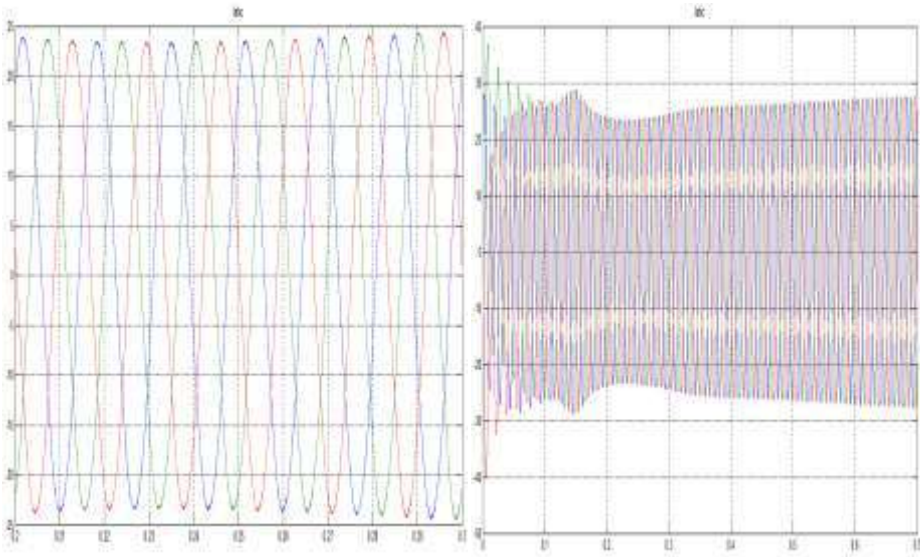


Figure. IV.3: courbe de courant I abc de PV raccordé au réseau avec l'onduleur Z_source

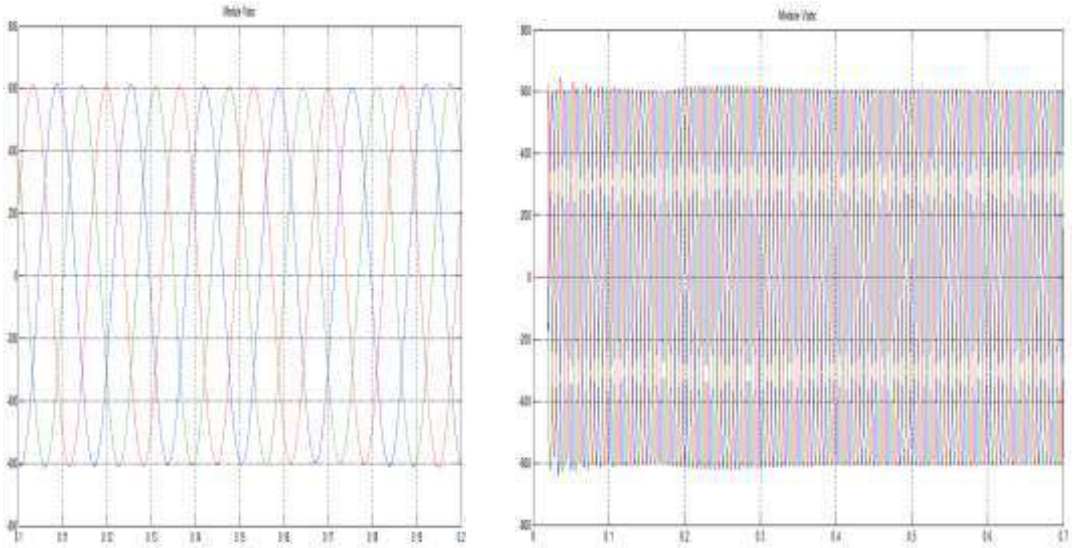


Figure. IV.4 : courbe de module Vabc de PV raccordé au réseau avec l'onduleur Z_source

IV.5. Problème de connexion des systèmes photovoltaïques au réseau :

Les problèmes concernant l'interconnexion du système photovoltaïque au réseau sont:

• Le débrochage de système photovoltaïque si le réseau présente une défaillance (le problème d'islanding).

• La protection contre la foudre.

• La qualité de puissance fournie au réseau.

• Les effets des systèmes multiples sur une partie du réseau, en particulier monophasé non équilibré.

• Le dosage fiable des flux de puissance.

• Risques techniques et financiers.

IV.6.Résultat et résumé :

La figure IV.2 est le schéma global de simulation de la connexion au réseaué lectrique que nous avons utilisé sous MATLAB-Simulink. Nous avons utilisé l'assemblage des schémas blocs de la figure IV.2 pour le contrôle et l'injection de la puissance au réseau électrique et recherché le maximum point de puissance. Ce schéma contient les différents blocs [26]:

• Schéma block de générateur PV

• Schéma block de l'Hacheur Survolteur

• Schéma block de la commande MPPT

• Schéma block de l'onduleur

• Schéma block de notre réseau

Notre but dans cette étude est la modélisation puis la simulation d'un système photovoltaïque et sa connexion au réseau électrique avec l'onduleur z_source.

IV.7. CONCLUSION :

Dans ce chapitre nous avons fait la simulation de chaque équipements représentant le système photovoltaïque connecté au réseau électrique, tel que le générateur photovoltaïque, l'hacheur commandé pour la recherche du point de puissance maximale (MPPT) et l'onduleur commandé par MLI et en fin le réseau électrique.

Les résultats obtenus de courant et tension et la courbe de point fonctionnement maximal par la simulation sont très suffisants et satisfaisante, et se rapprochent à ceux présentés dans la théorie [11].

Conclusion Générale

Dans ce travail nous avons fait l'étude des systèmes photovoltaïques qui se compose essentiellement d'un générateur PV (GPV), convertisseur (DC/DC boost), la commande (MPPT) et une charge [11].

Dans notre travail nous avons présenté les systèmes photovoltaïques en se basant particulièrement au système photovoltaïque raccordés au réseau qui est constitué essentiellement d'un générateur photovoltaïque (GPV) et un convertisseur DC-DC Boost, un onduleur commandé par MLI et le réseau électrique.

On a simulé ce système sous Matlab/Simulink, on a pris en compte l'influence de variation des conditions climatiques (l'éclairement) sur le MPPT où la puissance de fonctionnement du système est maximale.

La commande MPPT permet la meilleure connexion entre le générateur photovoltaïque (GPV) et la charge et elle le force de fonctionner toujours au point de puissance maximale [11].

Par ce travail, nous souhaitons d'avoir apporté une contribution à l'étude des caractéristiques photovoltaïques de la cellule solaire, l'étude des systèmes photovoltaïques connectés au réseau électrique et la commandes MPPT [11].

Les résultats analytiques, de simulation et ont été présenté. L'onduleur Z_source peut Alimenter la tension, minimiser le nombre de composants, augmenter l'efficacité et réduire le Coût. Il convient de noter à nouveau que le concept Z_source peut être appliqué à toute la gamme de conversion de puissance. Basé sur concept, il est évident que de nombreux circuits de conversion Z_source peuvent être dérivés. Le système redresseur / inverseur Z_source peut produire une tension de sortie supérieure à la Tension d'entrée ca en contrôlant le facteur de relance, ce qui est impossible pour le Traditionnel. [11]

Bibliographie

[1] M.ZIDANE, M. MEZIANI « Etude d'une installation photovoltaïque en vue d'un pompage solaire 6M3/JOUR» Mémoire d'Ingénieur d'Etat en Electrotechnique Université de Bejaia, 2011.

[2] D.BOUKHERS, « Optimisation d'un système d'énergie photovoltaïque application au pompage», Mémoire de Magister, Université de Constantine, 2007.

[3] BELKHIRI Faysal «Etude et réalisation d'un onduleur à neuf interrupteurs-Z_source alimentant deux moteurs asynchrones». MÉMOIRE de Magistère, JULY.

[4] BATTISTON Alexandre « Modélisation, commande, stabilité et mise en œuvre des onduleurs à Source impédante », Thèse Doctorat, génie électrique, Université de Lorraine, 2014.

[5] S.M. Ait-Cheikh, «Etude, Investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques», Thèse de Doctorat d'état, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2007.

[6] M. Adouane, «Etude et conception d'une stratégie de commande d'un onduleur connecté au réseau électrique», Mémoire de magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2008.

[7] A. AZIZ, « Propriétés Electriques des Composants Electroniques Minéraux et Organiques, Conception et Modélisation d'une Chaîne Photovoltaïque Pour une Meilleure Exploitation de l'Energie Solaire », Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse III, France, 2006.

[8] OUMNAD, « Electronique Fondamentale», Ecole Mohammadia des Ingénieurs, Site Internet, http://z.oumnad.123.fr.

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

[10] Nichapour OleKsiy (simulation, fabrication et analyse de cellule photovoltaïque à contacte arrières interdigités) Thèse de doctorat. L'institut national des sciences appliquées de Lyon 2005.

[11] Zidane Achref eddine, «LES SYSTEMS PHOTOVOLTAIQUES CONNECTES AU RESAU», MEMOIRE DE MASTER, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR Annaba, Juin 2017.

[12] BERREZZOUG Hanane, «Principe de fonctionnement et mesure des caractéristiques d'une cellule photovoltaïque», MEMOIRE DE MASTER, 2016

[13] Medjelled Yamina (Effet de la Résistance Série sur les Performances d'une Cellule Photovoltaïque à Multi jonction sous concentration solaire. Approximation de forte injection) Mémoire de Magister, 2012.

[14] F.SALAMA « Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique». Mémoire de Magister, Université de Sétif, 2011.

[15] Nichiporuk OleKsiy « Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrière interdigités ». Thèse de doctorat, L'institut national des sciences appliquées de Lyon, 2005.

[16] O.Harici et A.Othmane (Etude et évaluation des performances des concentrateurs et poursuit solaires) Mémoire d'ingéniera, Juin 2005.

[17] M .KECIRI, N.BENMESSAOUD « Etude et maximisation de puissance d'un système photovoltaïque », Mémoire de Master en Electrotechnique, Université Abderrahmane Mira de Bejaia, 2012.

[18] F.SALAMA « Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique». Mémoire de Magister, Université de Sétif, 2011.

[19] Y.OUADFEL, L. LAMARA « Etude et optimisation d'un système d'énergie photovoltaïque », Mémoire d'ingénieur d'état en électrotechnique, Université Abderrahmane Mira de Bejaia, 2011.

[20] OUABDELKADER Katia, MERSEL Houria «Modélisation et Contrôle d'un Système Photovoltaïque Connecté au Réseau», Mémoire de Master en Electrotechnique, Université Abderrahmane Mira de Bejaia, 2014-2015.

[21] PENG F.Z., Z-source inverter, Industry Applications, IEEE Transactions on, Volume 39, Issue 2, March-April 2003 Page(s):504 – 510

[22] S.M.DEHGHAN, A.AMIRI, M.MOHAMADIAN ET M.A.E.ANDERSEN, «Modular space-vector pulse-width modulation for nine-switch converters», IET Power Electronics, pp 1-3, Décembre 2012.

[23] P.PREETI «Performance Analysis of Different Control Methods of Z-Source Inverter Feeding Industrial Drives», Master of engineering of power systems, Thapar University, 2012.

[24] V. S. NEVE «A literature survey on z-source inverter», VSRD International Journal of Electrical, Electronics & Communication Engineering, Vol. 2 No. 11 November 2012.

[25].F. Bouchtouche cherfa «Etude et réalisation d'une centrale photovoltaïque connectée au réseau de distribution électrique BT». Mémoire de magister, Ecole National Polytechnique Elharach, 2004.

[26] Synergrid, «Prescriptions techniques spécifiques de raccordement d'installations de production décentralisée fonctionnant en parallèle sur le réseau de distribution». Fédération des Gestionnaires de Réseaux électrique et Gaz en Belgique.

[27] Tuan TRAN-QUOC et Seddik BACHA «Couplage Onduleurs Photovoltaïques et Réseau, aspects contrôle/commande et rejet de perturbations». Thèse de DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE ,2012

[28] Bratcu. A.I., Munteanu. I., Bacha. S, Picault. D., Raison. B., «Power optimization strategy for cascaded DC-DC converter architectures of photovoltaic modules», IEEE International Conference on Industrial Technology, ICIT 2009, Gippsland – VIC, Fevrier2009.

[29] Trishan Esram, Patrick L. Chapman, "Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques", IEEE Transactions on Energy Conversion, Page(s): 439 – 449, 2007.

[30]Adjimi Nadia, Belaidi Wahiba «Modélisation et commande d'un onduleur MLI». Mémoire de magister en Systèmes Electriques & Automatique (SEA),2009

[31] F.Z.PENG, M.SHEN, and Z.QIAN «Maximum Boost Control of the Z-Source Inverter». IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 20, NO. 4, JULY, 2005.

[32] F.Z.PENG, M.SHEN, and Z.QIAN "Maximum Boost Control of the Z-Source Inverter". IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 20, NO. 4, JULY 2005.

[33] J.-P. FERRIEUX, F. FOREST "Alimentations à découpage – Convertisseur à résonance", édition Masson, p. 249-257, 1994.

[34] M. OLSZEWSKI "Z-Source Inverter for Fuel Cell Vehicles", U.S Department of Energy Freedom CAR and Vehicle Technologies, 2005.

[35] M. RAZALI “Simple boost switching technique for z-source inverter”, Faculty of Electrical Engineering University Technology Malaysia.

[36] M. SHEN “Constant Boost Control of the Z-Source Inverter to Minimize Current Ripple and Voltage Stress”, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 42, no. 3, may/June 2006

[37] A.BATTISTON “Modélisation, commande, stabilité et mise en œuvre des onduleurs à source impédante”, Thèse Doctorat, Université de Lorraine, 29 septembre2014.

[38] C.ROFF, “Space Vector Pulse-Width-Modulation For use with Inverters”, Application Note, Department of Computer and Electrical Engineering Michigan State University East Lansing, 2005.

[39] S. THANGAPRAKASH “Modified Space Vector Pulse Width Modulation for Z Source Inverters”, International Journal of Recent Trends in Engineering, Vol 2, No. 6, November 2009.

[40]Y. Pankow, « Etude de l’intégration de la production décentralisé dans un réseau basse tension». Thèse de doctorat de l’école National supérieure d’Art et Métiers, décembre 2004

[41]A. Oi, «Design and simulation of photovoltaic water pumping system ». Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science in Electrical Engineering, Faculty of California Polytechnic State University, San Luis Obispo September 2005.

[42] Detlef Schulz, Matthias John and Thomas Pfeifer «Grid Integration of Photovoltaic and Fuel Cells». Department of Electrical Engineering, Electrical Power Engineering, Helmut-Schmidt-University, Holstenhofweg 85, D-22043 Hamburg, Germany.

[43]…. J. David Irwin, MUHAMMAD H. RASHID «Power electronics Handbook». University of West Florida Joint Program and Computer Engineering, Copyright # 2001 by ACADEMIC PRESS.

[44]. HESPUL, « Guide de l’utilisateur de Toit Solaire Photovoltaïque». 114 bd du 11 novembre 1918 F-69100 Villeurbanne, Site web : www.hespul.org, Décembre 2002.

[45]. J. XU «Filtrage active shunt des harmoniques des réseaux de distribution d'électricité». Thèse de doctorat de l’INPL, Nancy, Janvier 1994.

[46]. P. Reichenbach, M. Sella, P. Affolter et J. Bonvin «Centrales photovoltaïques, Guide pour le dimensionnement et la réalisation de projets à l’usage des bureaux

d’ingénieurs». Direction du projet et coordination Jean Graf, EPFL-DA-ITB-LESO, 1015 Lausanne.