



وزارة البحث العلمي والتعليم العالي
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
جامعة عبد الحميد بن باديس مستغانم
Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem
كلية العلوم والتكنولوجيا
Faculté des Sciences et de la Technologie
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



N° d'ordre : M...../GE/2022

MEMOIRE

Présenté pour obtenir le diplôme de master académique

MASTER EN GENIE ELECTRIQUE

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Electrotechnique Industrielle

par

1. HAMOU MAAMAR Touati
2. YOUB Kada

Intitulé du sujet

*Contrôle des puissances d'un système photovoltaïque connecté au réseau
à l'aide d'un convertisseur multi-niveaux de type NPC*

Soutenu le 06 / 07 / 2022 devant le jury composé de :

Président :	Mr Bekkouche Benaissa	Pr	Université de Mostaganem
Examineur :	Mr Souag Slimane	MCB	Université de Mostaganem
Rapporteur :	Mr Benyamina Mansour	MCA	Université de Mostaganem

Année Universitaire 2021/2022

Remerciement

Le travail présenté dans cette mémoire a été effectué dans le département de Génie électrique spécialité électrotechnique Industriel de l'université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem.

Nos remerciements, avant tout, à DIEU tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il nous a donné durant ces longues années d'études afin qu'on puisse arriver à ce stade.

On tient à souligner l'estime que nous portons à Mr. BENYAMINA Mansour Professeur à l'Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem, pour son soutien et son encadrement scientifique qui nous ont été bénéfiques pour mener à bien ce travail.

On tient à remercier plus particulièrement nos jury Mr. Bekkouche et Mr. Souag.

Dédicaces

J'ai toujours voulu offrir quelque chose à mes parents en guise de reconnaissance pour avoir faits de moi l'homme que je suis aujourd'hui, Et voilà, l'occasion est venue ;

Je dédie ce travail à :

Ma chère mère et mon honorable père pour leur soutien, leur aide Leur patience et leur amour.

Mes sœurs

A toutes mes enseignants

Toute ma famille

Tous mes amis

A toutes mes collègues chacun par son nom

A chaque personne qui m'a aidée.

Hamou Maamar Touati

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à celle qui m'a donné la vie, le symbole de tendresse, qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite, à ma mère ... Que dieu les gardes et les protège.

A mes adorables sœurs et frères

A mes amies.

A tous ceux qui me sont chères.

A tous ceux qui m'aiment.

A tous ceux que j'aime.

Je dédie ce travail.

Sommaire

Liste des figures.....	I
liste des symboles et abréviations	IV
Résumé.....	VII
Introduction Générale.....	01
L'objectif du travail.....	02
Chapitre I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques	
I-1- Introduction.....	03
I-2- Energie solaire.....	03
I-3- Rayonnement solaire.....	04
I-3-1- Le rayonnement direct.....	04
I-3-2- Le rayonnement diffus.....	04
I-3-3- Le rayonnement réfléchi ou l'albédo du sol.....	05
I-3-4- Le rayonnement global.....	05
I-4- La cellule photovoltaïque	05
I-4-1- Constitution et fonctionnement de la cellule photovoltaïque.....	06
I-4-2- Les types de cellules solaires (cellules photovoltaïques).....	07
I-4-2-1- cellule en silicium amorphe.....	07
I-4-2-2 Cellule en silicium monocristallin.....	08
I-4-2-3 Cellule en poly cristallin	08
I-4-3- Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque	09
I-5 Association des panneaux PV.....	11
I-5-1- Association en série.....	11
I-5-2- Association en parallèle.....	12
I-5-3- Association mixte (série-parallèle).....	13
I-6- Avantages et inconvénients d'une installation PV.....	14
I-6-1- Avantages	14
I-6-2- Inconvénients.....	15
I-7- Conclusion.....	15

Chapitre II : Etat de l'art du système PV raccordé au réseau

II-1-	Introduction	16
II-2-	Architectures du système PV connecté au réseau électrique.....	16
II-3-	Structure générale d'un système photovoltaïque.....	18
II-3-1-	Systèmes de connexion réseau directe.....	18
II-3-1-1	Structure à convertisseur unique.....	18
II-3-1-2	Structure à connexion simple avec transformateur.....	19
II-3-2-	Structure avec un bus DC intermédiaire d'un système PV connecté au réseau	20
II-4-	Les convertisseurs statiques pour les systèmes photovoltaïques connectés au réseau.....	20
II-4-1-	Les convertisseurs statiques DC/DC (hacheur).....	20
II-4-2-	Les types d'hacheurs.....	21
II-4-2-1-	Hacheur dévolteur (BUCK).....	21
II-4-2-2-	Hacheur survolteur (BOOST).....	22
II-4-2-3-	Hacheur mixte (BUCK-BOOST).....	24
II-5-	Commande MPPT (Maximum Power Point Tracking).....	24
II-5-1-	Introduction.....	24
II-5-2-	Principe de fonctionnement de MPPT.....	25
II-5-3-	Gestion de la MPPT	26
II-5-4-	Les différentes techniques de MPPT.....	27
II-5-4-1-	Méthode de perturbation et d'observation (P&O).....	27
II-6-	Les convertisseurs statiques DC/AC	29
II-6-1-	Onduleurs multi-niveaux.....	29
II-6-3-	Différentes topologies des onduleurs multi-niveaux.....	30
II-7-	Onduleur de tension multi-niveaux de type NPC.....	31
II-7-1-	Introduction.....	31
II-7-2-	Onduleur a trois niveaux de type NPC	32
II-7-2-1-	Structure.....	32
II-7-3-	Synthèse des stratégies de commande des convertisseurs multi-niveaux de type NPC.....	33
II-7-3-1-	Commande MLI Triangulo-sinusoïdale.....	33
II-8-	Les filtres passifs du raccordement au réseau électrique.....	34

II-8-1-	Filtre L.....	35
II-8-2-	Filtre LCL.....	35
II-9-	Conclusion.....	36

Chapitre III : Modélisation d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique à laide d'un convertisseur multi-niveaux de type NPC

III-1-	Introduction.....	37
III-2-	Modélisation et mise en équation.....	37
III-3-	Modélisation d'un générateur photovoltaïque.....	37
III-3-1-	Cas d'une cellule idéale.....	37
III-3-2-	Cas d'une cellule réelle	38
III-4-	Modélisation du convertisseur DC-DC BOOST et de la commande MPPT...	41
III-4-1-	hacheur BOOST.....	41
III-4-2-	commande MPPT.....	43
III-5-	Modélisation d'un onduleur à trois niveaux type NPC.....	43
III-5-1-	Commande complémentaire des onduleurs à trois niveaux.....	44
III-5-2-	Modèle de connaissance.....	44
III-5-3-	Principe fonctionnement de l'onduleur NPC à trois niveaux.....	45
III-5-4-	Modulation sinusoïdale à triangles multiples.....	48
III-5-5-	Régulation des courants des boucles internes.....	49
III-5-6-	Condition de synchronisation Onduleur Réseau.....	50
III-6-	Modélisation de l'interface réseau.....	52
III-7-	Modélisation d'onduleur et du filtre LC et la charge (RLCL).....	53
III-8-	Conclusion.....	56

Chapitre IV : Simulation et interprétation des résultats

IV-1-	Introduction.....	57
IV-2-	Système photovoltaïque connecté au réseau électrique proposé	57
IV-3-	Générateur photovoltaïque.....	59
IV-3-1-	Caractéristiques de panneau 1Soltech 1STH-215-P.....	59
IV-3-2-	Simulation du générateur (GPV) à éclairement et température variable.....	60
IV-4-	Simulation de l'hacheur survolteur (BOOST).....	63
IV-4-1-	Commande MPPT.....	63

IV-5-	simulation de l'onduleur NPC trois niveaux.....	67
IV-5-1-	Commande MLI par sinusoïdale à triangles multiples.....	68
IV-6-	Simulation du Système PV connecté au réseau.....	71
IV-7-	Conclusion.....	72

Conclusion générale.....

Bibliographie.....

Annexe.....

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1 :	Le soleil source de l'énergie solaire.....	03
Figure I.2 :	Structure basique d'une cellule solaire.....	05
Figure I.3 :	Schéma d'une cellule élémentaire.....	06
Figure I.4 :	cellule en silicium amorphe.....	07
Figure I.5 :	cellule en silicium monocristallin.....	08
Figure I.6 :	cellule en silicium poly cristallin.....	09
Figure I.7 :	Grandeurs physiques d'une cellule.....	09
Figure I.8 :	Association des modules en série.....	11
Figure I.9 :	Caractéristique P-V des cellules PV raccordées en série.....	12
Figure I.10 :	Association des modules en parallèle.....	12
Figure I.11 :	Caractéristique P-V des cellules PV raccordées en parallèle.....	13
Figure I.12 :	Association mixte des modules.....	13
Figure I.13 :	Caractéristique d'un groupement mixte.....	14

Chapitre II

Figure II.1 :	Topologie des systèmes PV connectés au réseau de distribution électrique.....	17
Figure II.2 :	Schéma synoptique d'un système PV connecté au réseau électrique.....	17
Figure II.3 :	Plusieurs modules PV en série à un seul onduleur.....	18
Figure II.4 :	Structure à connexion simple avec transformateur.....	19
Figure II.5 :	Structure avec BOOST intermédiaire d'un système PV connecté au réseau.....	20
Figure II.6 :	Schéma électrique d'un hacheur Buck.....	21
Figure II.7 :	Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur BUCK.....	22
Figure II.8 :	Schéma électrique d'un hacheur BOOST.....	23
Figure II.9 :	Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur BOOST.....	23
Figure II.10 :	Schéma électrique d'un hacheur BUCK-BOOST.....	24
Figure II.11 :	La caractéristique I-V, P-V et la trajectoire de PPM.....	25
Figure II.12 :	Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque.....	26

Figure II.13 :	Recherche et recouvrement du Point Puissance Maximale.....	26
Figure II.14 :	Organigramme de l'algorithme Perturbation et Observation (P&O).....	28
Figure II.15 :	Signe de ΔP et ΔV à différentes positions de la courbe caractéristique de puissance.....	28
Figure II.16 :	Différentes topologies d'onduleurs.....	29
Figure II.17 :	Onduleur à niveaux multiples.....	30
Figure II.18 :	Différentes topologies des onduleurs multi-niveaux.....	31
Figure II.19 :	Structure d'un onduleur NPC a 3 niveaux.....	32
Figure II.20 :	Les stratégies de modulation.....	33
Figure II.21 :	Topologies des filtres passifs.....	34
Chapitre III		
Figure III.1 :	Schéma équivalent d'une cellule idéale.....	37
Figure III.2 :	Schéma équivalente d'une cellule réelle.....	39
Figure III.3 :	L'MPPT avec incrémentation de la conductibilité.....	43
Figure III.4 :	Modèle de l'onduleur triphasé NPC	44
Figure III.5 :	Bras d'onduleur à trois niveaux.....	45
Figure III.6 :	Les différentes configurations fonctionnelles d'un bras.....	47
Figure III.7 :	Formes d'ondes d'un bras d'onduleur triphasé de type NPC.....	48
Figure III.8 :	Schéma de la boucle interne du courant.....	49
Figure III.9 :	Schéma de principe d'une PLL.....	47
Figure III.10 :	Schéma de l'interface de connexion d'un onduleur au réseau électrique alternatif ou à une charge.....	53
Figure III.11 :	Schéma du filtre LC et la charge RL.....	53
Chapitre IV		
Figure IV.1 :	Schéma synoptique d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique.....	57
Figure IV.2 :	Module photovoltaïque sous MATLAB.....	59
Figure IV.3 :	caractéristique (V-P) du générateur PV.....	60
Figure IV.4 :	caractéristique (V-I) du générateur PV.....	60
Figure IV.5 :	Influence de variation de l'éclairement sur la caractéristique (I-V)...	61
Figure IV.6 :	Influence de variation de l'éclairement sur la caractéristique (P-V)...	61
Figure IV.7 :	Influence de variation de température sur la caractéristique (P-V)....	62

Figure IV.8 :	Influence de variation de température sur la caractéristique (I-V)....	62
Figure IV.9 :	simulation d'un hacheur BOOST.....	63
Figure IV.10 :	Simulation de block MPPT par P&O.....	63
Figure IV.11:	Signal commande MPPT.....	64
Figure IV.12 :	Commande MPPT par P&O d'un hacheur BOOST.....	64
Figure IV.13 :	variation de l'éclairement en fonction du temps.....	65
Figure IV.14 :	puissance généré par GPV et puissance de sortie d'hacheur BOOST.....	65
Figure IV.15 :	Courbe de courant générée par GPV.....	66
Figure IV.16 :	Courbe de tension générée par GPV.....	66
Figure IV.17 :	Courbe de courant à la sortie de l' hacheur.....	66
Figure IV.18 :	Courbe de tension à la sortie de l' hacheur.....	67
Figure IV.19 :	Simulation de l'onduleur NPC 3 niveaux.....	67
Figure IV.20 :	Simulation de block de commande MLI pour un bras.....	68
Figure IV.21 :	Simulation de block de commande MLI pour 3 bras.....	68
Figure IV.22 :	: Signal de commande MLI par la modulation sinusoïdale à triangles multiples pour 3 bras.....	68
Figure IV.23 :	Tension d'une phase de l'onduleur V_{AO}	69
Figure IV.24 :	Tension d'une phase de l'onduleur par rapport au point neutre M, V_{AM}	69
Figure IV.25 :	Tension entre phase de l'onduleur V_{AB}	69
Figure IV.26 :	Tension du mode commun V_{mc}	70
Figure IV.27 :	Le courant de la phase Ia.....	70
Figure IV.28 :	simulation de système PV connecté au réseau.....	71
Figure IV.29 :	courbe de tension de trois phases de réseau.....	71
Figure IV.30 :	Courbe de courant de trois phases de réseau.....	72

Liste des symboles et abréviations

Symboles

ε	Albédo
a	facteur d'idéalité relatif au module ($1 < a < 2$)
C	Condensateur (F)
Fe	Fréquence(Hz)
Fs	Fréquence de commutation (rad/s)
G	L'irradiation solaire en ($W = m^2$)
I	Le courant en (A)
Ic	Courant de Condensateur(A)
Icc	Courant de court de circuit(A)
Id	Courant de diode(A)
Il	Courant de l'inductance (A)
Iopt	Courant optimum (A)
Ipsc	Courant en court circuit en parallèle(A)
Iph	Photo courant, dépendant de l'intensité de l'irradiation(A)
Ipm	Courant de puissance maximale (A)
Ipv	Courant fourni par la cellule(A)
Is	Le courant de saturation(A)
Isc	Courant en court circuit en série(A)
Ish	Le courant dérive par la résistance parallèle (A)
Isn	Le courant de court-circuit de référence(A)
K	constant de Boltzmann ($1, 38.10^{-23}J/K$)
Ki	Coefficient de la température
L	Inductance (H)
Np	Nombre de cellule en Marelle
Ns	Nombre de cellule en Série
P	puissance fournie par GPV(W)
Pc	puissance de charge (W)

Pinc	Puissance incidente (W)
Pmax	Puissance Maximale(W)
q	charge de l'electron ($q = 1,6 \cdot 10^{-19}C$)
R	résistance (Ω)
Rs	Résistance en série (Ω)
Rsh	Résistance en parallèle (Ω)
t	temps (s)
T	Température
Tc.Ta	Respectivement température de la cellule et température ambiante °K
Te	la période des impulsions(s)
Tn	Température du fonctionnement nominal °C
Ts	temps de commutation(s)
V	La tension en(V)
Vc	Tension de condensateur(V)
Vco	Tension de circuit ouvert(A)
Vl	Tension de l'inductance(V)
Vopt	Tension optimale(V)
Vpco	Tension en circuit ouvert en parallèle(V)
Vpm	Tension de puissance maximale(V)
Vpv	Tension aux bornes de la cellule(V)
Vsco	Tension de circuit ouvert en série (V)
Vt	Tension thermique donnée par représente la potentielle thermodynamique(V)

Abréviations

BT	Basse tension
D	La diode de roue libre
DC/AC	Continu/Alternative
DC/DC	Continu/Continu
FF	Facteur de forme
GPV	Générateur Photovoltaïque
HT	Haute tension
MLI	Modulation de largeur d'impulsion
MPPT	Maximum Power Point Tracking

MT	Moyenne tension
PI	Proportionnel Intégral
PLL	Phase Locked Loop
P-N	Positive-Négative
PPM	Point de puissance Maximale
P&O	Perturbation et Observation
PV	Panneau Photovoltaïque
PWM	Pulse Width Modulation

Résumé

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) est parmi les énergies renouvelables la plus utilisée pour la production de l'énergie électrique. Le point le plus important en ce qui concerne l'intégration des systèmes photovoltaïques au réseau est le convertisseur de puissance, notamment les onduleurs qui ne sont pas tout à fait capables de fonctionner en mode avancé. Les nouvelles techniques en développement permettent d'améliorer les performances des onduleurs en assurant l'intégration correcte des systèmes photovoltaïques en tenant compte des caractéristiques du réseau. D'où, des exigences pour le contrôle avancé de l'onduleur connecté au réseau permettent le contrôle complet de l'énergie photovoltaïque fournie.

En tenant compte de la synthèse des convertisseurs nous allons créer une connexion entre les énergies Créer .Utilisez ensuite le logiciel Matlab/Simulink pour l'assemblage global. Plusieurs commandes ont été appliquées pour que les meilleures performances et un fonctionnement garanti.

Mots clés : Photovoltaïque, connecté au réseau, BOOST,Commande, MPPT, onduleur, NPC, MLI.

Abstract

Photovoltaic (PV) solar energy is one of the most widely used renewable energies for the production of electrical energy. The most important point regarding the integration of photovoltaic systems into the grid is the power converter, especially inverters that are not quite capable of operating in advanced mode. The new techniques being developed make it possible to improve the performance of inverters ensuring the correct integration of photovoltaic systems taking into account network characteristics. Hence, requirements for advanced inverter control connected to the network allow complete control of the photovoltaic energy supplied. Taking into account the synthesis of the converters we will create a connection between the Create energies. Then use the Matlab/Simulink software for the overall assembly. Several commands have been applied for the best performance and guaranteed operation.

Keywords : Photovoltaic, grid-connected, BOOST, Control, MPPT, inverter, NPC, MLI.

Introduction

Générale

Introduction Générale

Ces dernières années, la consommation mondiale en énergie électrique a augmenté considérablement. Ceci est dû à l'évolution démographique, au développement des nouvelles technologies et à la croissance des Pays émergents [1], [2], [3], [4]. Les systèmes actuels de production d'énergie électrique sont pour la plupart issus de sources fossiles (le pétrole, gaz et leurs dérivés) ou du nucléaire [2], notamment en France qui possède 58 réacteurs pour 67 millions d'habitants seulement [5]. Or ces sources ne sont pas inépuisables. On parle du tarissement du pétrole à l'horizon 2030 [3]. Ces sources ne pourront donc pas répondre, à elles seules, à nos besoins énergétiques sur le long terme [2]. De plus, la transformation des sources fossiles en énergie électrique s'accompagne d'un dégagement de gaz carbonique CO_2 qui a un impact non négligeable sur l'effet de serre et le réchauffement climatique. Le nucléaire, quant à lui, est une source dont les déchets radioactifs sont difficiles à traiter. Certains déchets ont des demi-vies extrêmement longues [6]. Les techniques d'enfouissement actuellement développées à Bures (Haute-Marne 52, France) permettront de stocker ces déchets en toute sécurité [7].

Cependant, nous laisserons le soin de leur retraitement aux générations futures. Par conséquent, il est urgent de passer à une source d'énergie plus sûre qui nous permettra de continuer notre vie normale sans endommager notre environnement ni mettre les gens en danger.

Dans ce cadre, des nombreuses nations se sont engagées, à travers des conférences internationales sur le climat sous la bannière de l'Organisation des Nations Unies (*ONU*), à réduire les émissions de gaz à effet de serre. Parmi ces conférences on peut citer la *COP21* tenue à Paris du 30 novembre au 12 décembre 2015. Lors de cette rencontre, pour la première fois de l'histoire, les représentants des cent quatre-vingts quinze Etats, issus de tous les continents, se sont accordés à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre afin de stabiliser le réchauffement climatique en dessous de $2\text{ }^{\circ}C$ d'ici 2100 par rapport à la température de l'ère préindustrielle (période de référence 1861 – 1880) [8].

Cette réduction des émissions de gaz à effet de serre passe par la production d'électricité à partir d'énergies renouvelables non émettrices ou peu émettrices de gaz carbonique et une meilleure efficacité énergétique. L'une des formes d'énergie renouvelable les plus attractives est le solaire photovoltaïque (*PV*). En effet, l'énergie solaire *PV* est une source d'énergie propre, renouvelable (inépuisable) dont la source le soleil est gratuite.

Organisation du la mémoire

Ce mémoire s'articule autour des chapitres suivants :

Chapitre I : Sera consacré pour présenté des généralités sur les systèmes photovoltaïques, la définition, l'effet et la cellule PV, la modélisation est le module photovoltaïque.

Chapitre II : fera un état de l'art du système *PV* raccordé au réseau.

Chapitre III : abordera la modélisation des composants de notre système PV

Chapitre IV : traitera la simulation de notre système PV connecté au réseau électrique à l'aide d'un onduleur multi-niveaux de type NPC avec Matlab/Simulink

Chapitre I :

Généralités sur Les systèmes Photovoltaïques

I-1- Introduction

Alors que les gisements d'énergies fossiles et fissiles ne seront encore plus exploitables que pendant quelques dizaines d'années, l'énergie renouvelable dont l'énergie solaire poursuivra ses bienfaits sur terre pendant encore des milliards d'années [12], parmi c'est énergies renouvelable l'énergie photovoltaïque.

L'énergie photovoltaïque résulte de la transformation directe de la lumière du soleil en énergie électrique aux moyens des cellules généralement à base de silicium cristallin qui reste la filière la plus avancées sur le plan technologiques et industriel, en effet le silicium et l'un des éléments les plus abondants sur terre sous forme de silice non toxique. En effet le mot " photovoltaïque " vient de la grecque " photo " qui signifie lumière et de " voltaïque " qui tire son origine du nom d'un physicien italien Alessandro Volta (1754 -1827) qui a beaucoup contribué à la découverte de l'électricité, alors le photovoltaïque signifie littérairement la « lumière électricité » [13].

I-2 -L'énergie solaire

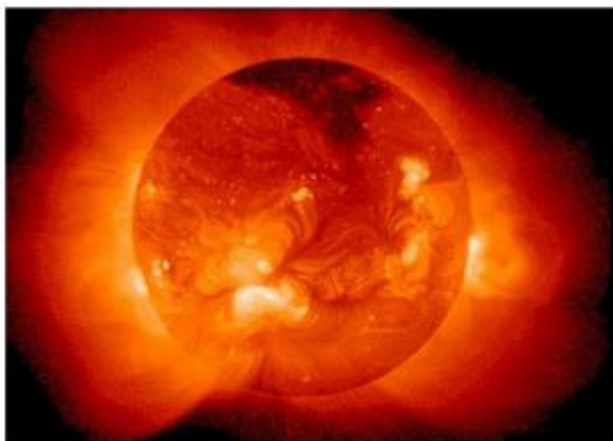


Figure I.1 : Le soleil source de l'énergie solaire

La distance de la terre au soleil est environ 150 million de kilomètres et la vitesse de la lumière est d'un peu plus de 300000 km/h [14], les rayons du soleil mettent donc environ 8 minutes à nous parvenir. La constante solaire est la densité d'énergie solaire qui atteint la frontière externe de l'atmosphère faisant face au soleil. Sa valeur est communément prise égale à 1360W/m². Au niveau du sol, la densité d'énergie solaire est réduit à 1000 W/ m² à cause de l'absorption dans l'atmosphère. Albert Einstein à découvert en travaillant sur l'effet photoélectrique que la lumière n'avait pas qu'un caractère ondulatoire, mais que son énergie est portée par des particules, les photons.

L'énergie d'un photon étant donnée par la relation [15]:

$$E = \frac{h \times c}{\lambda} \quad (1.1)$$

λ : La densité d'énergie solaire.

h : La constante de Planck.

c : La vitesse de la lumière.

Ainsi, plus la longueur d'onde est courte, plus l'énergie du photon est grande. Une façon commode d'exprimer cette énergie est :

$$E = \frac{1.26}{\lambda} \quad (1.2)$$

1.3 Rayonnement solaire

Malgré la distance considérable qui sépare le soleil de la terre 150.10 Km, la couche terrestre reçoit une quantité d'énergie importante 180.10 GW, c'est pour ça que l'énergie solaire se présente bien comme une alternative aux autres sources d'énergie. Cette quantité d'énergie quittera sa surface sous forme de rayonnement électromagnétique compris dans une longueur variant de 0.22 à 10 μm [16], l'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement comme suit : [17]

- 9% dans la bande des ultraviolets (< à 0.4 μm).
- 47% dans la bande visibles (0.4 à 0.8 μm).
- 44% dans la bande des infrarouges (> à 0.8 μm).

I-3-1- Le rayonnement direct

Le rayonnement direct est la différence entre le rayonnement global et le rayonnement diffus [18].

I-3-2 - Le rayonnement diffus

C'est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire global par l'atmosphère et à sa réflexion par les nuages et les aérosols [18].

I-3-3 - Le rayonnement réfléchi ou l'albédo du sol

C'est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige, etc....) [18].

I-3-4- Le rayonnement global

Le rayonnement global est subdivisé en rayonnements directs, diffus et reflété par le sol). Dans la figure ci-dessous est schématisé l'ensemble des rayonnements solaires reçus sur une surface terrestre [18].

I-4- La cellule photovoltaïque

Les éléments les plus importants d'un système photovoltaïque sont les cellules, éléments de base de l'unité qui collectent la lumière du soleil; les modules, qui rassemblent un grand nombre de cellules au sein d'une unité; et, dans certains cas, les onduleurs, qui transforment l'électricité générée en électricité utilisable au quotidien. [19]

Les cellules photovoltaïques sont généralement réalisées à base de silicium cristallin, soit tranchées à partir de lingots, soit sous forme de rubans de silicium, soit en couches minces déposées sur un support à bas-coût. La performance d'une cellule solaire se mesure en termes de rendement de transformation de la lumière du soleil en électricité. Les cellules solaires les plus répandues dans le commerce ont un rendement de 15% - ce qui signifie qu'environ un sixième de la lumière du soleil frappant une cellule produit de l'électricité. Améliorer le rendement des cellules tout en poursuivant la réduction des coûts de production est un objectif important pour l'industrie photovoltaïque. [20]

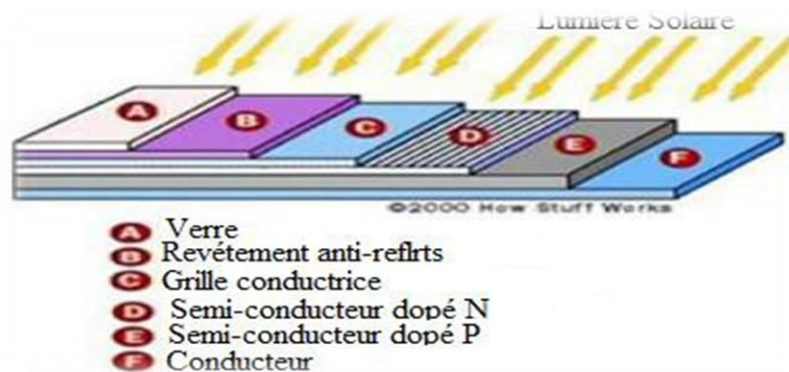


Figure I.2 : Structure basique d'une cellule solaire

I-4-1- Constitution et fonctionnement de la cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est assimilable à une diode photosensible. Son fonctionnement est basé sur les propriétés des matériaux semi-conducteurs.

Une cellule est constituée de deux couches minces d'un semi-conducteur qui sont dopées différemment, figure (I.3). Pour la couche N, c'est un apport d'électrons périphériques et pour la couche P c'est un déficit d'électrons, les deux couches présentent ainsi une différence de potentiel.

L'énergie des photons lumineux captés par les électrons périphériques

(Couche N) leur permet de franchir la barrière de potentiel et d'engendrer un courant électrique continu.

Pour effectuer la collecte de ce courant, des électrodes sont déposées par sérigraphie sur les deux couches du semi-conducteur. L'électrode supérieure est une grille permettant le passage des rayons lumineux. Une couche anti-reflet est ensuite déposée sur cette électrode afin d'accroître la quantité de lumière absorbée. [21-22]

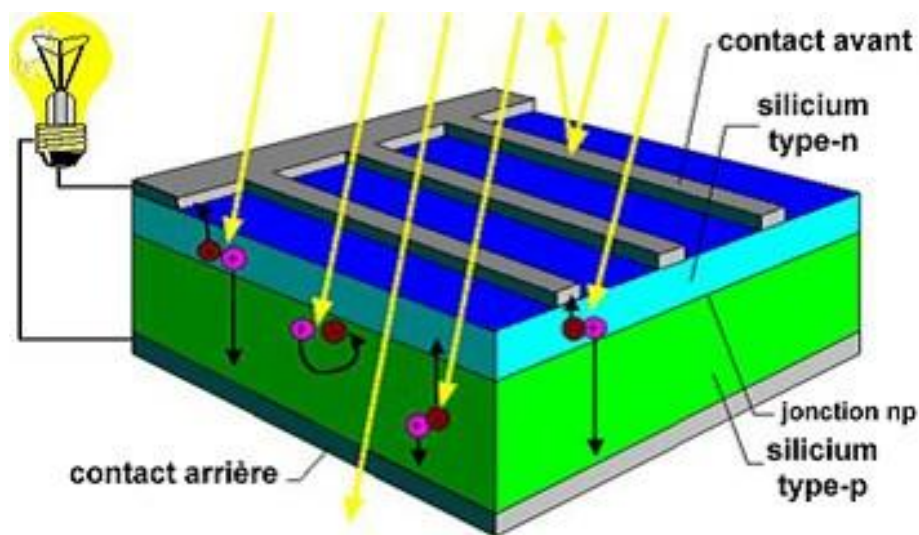


Figure I.3 : Schéma d'une cellule élémentaire

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.

Afin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier les paires électrons / trous créés est nécessaire. Pour cela on utilise le plus souvent une jonction P-N [23].

I-4-2- Les types de cellules solaires (cellules photovoltaïque)

Il existe différentes types de cellules solaires ou cellules photovoltaïque. Chaque type de cellule est caractérisé par a un rendement et un cout qui lui sont propres. Cependant, quelque soit le type, le rendement reste assez faible : entre 8 et 23% de l'énergie que les cellules reçoivent [24].

Il existe trois types de cellules principales :

I-4-2-1- Cellule en silicium amorphe :

Le silicium n'est pas cristallisé, il est déposé sur une feuille de verre. La cellule est gris très foncé. C'est la cellule des calculatrices et des montres dites solaires "[24].

Avantage :

- elles fonctionnent faible (par temps couvert ou a` l'intérieur d'un bâtiment).
- Elles sont moins chères que les autres.

Inconvénient :

- Leur rendement (10 % environ) est moins bon que les autres en plein soleil.
- Leurs performances diminuent sensiblement avec le temps.



Figure I.4 : cellule en silicium amorphe

I-4-2-2- Cellule en silicium monocristallin :

Lors du refroidissement du silicium fondu on s'arrange pour qu'il se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe le cristal en fines tranches qui donneront les cellules. Ces cellules sont en générale d'un bleu uniforme [24].

Avantage :

- elles fonctionnent faible (par temps couvert ou à l'intérieur d'un bâtiment).
- Elles sont moins chères que les autres.

Inconvénient :

- Leur rendement (10 % environ) est moins bon que les autres en pleinsoleil.
- Leurs performances diminuent sensiblement avec le temps.



Figure I.5 : cellule en silicium monocristallin

I-4-2-3- Cellule en poly cristallin :

Pendant le refroidissement du silicium, il se forme plusieurs cristaux. Ce genre de cellule est également bleu, mais pas uniforme, on distingue des motifs créés par les différents cristaux [24].

Avantage :

- Bon rendement (13% environ), mais cependant moins bon que pour le mono cristallin.
- Moins cher que le monocristallin.

Inconvénient :

Les mêmes que le mono cristallin.

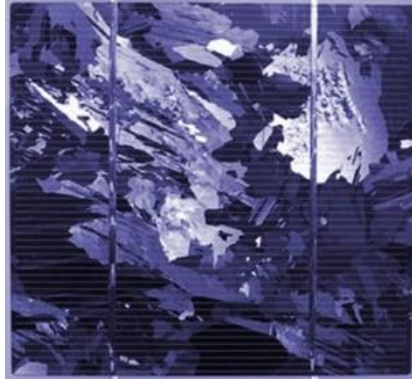


Figure I.6 : cellule en silicium poly cristallin

I-4-3- Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque

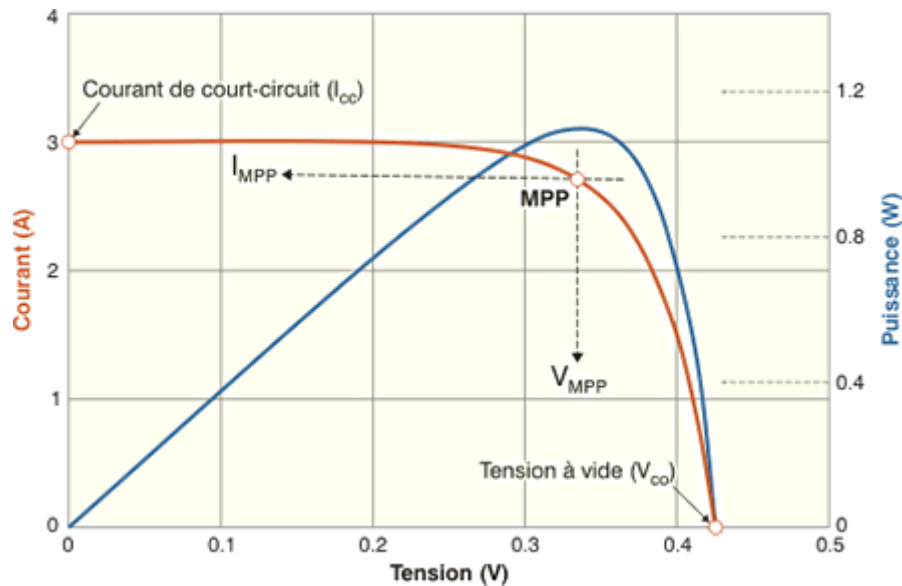


Figure I.7 : Grandeurs physiques d'une cellule

Les modules sont généralement des parallélépipèdes rectangles rigides minces (quelques centimètres d'épaisseur), dont les caractéristiques suivantes: [24]

- **La puissance de crête, P_c** : Puissance électrique maximum que peut fournir le module dans les conditions standards (25°C et un éclairement de 1000 W/m^2).
- **La caractéristique $I=f(V)$** : Courbe représentant le courant I débité par le module en fonction de la tension aux bornes de celui-ci

. - **Tension à vide, V_{co}** : Tension aux bornes du module en l'absence de tout courant, pour un éclairement " plein soleil ".

$$0 = I_{ph} - I_s \left(\exp^{\frac{q}{a.K.TC}(V_{co})} - 1 \right) - \frac{V_{co}}{R_{sh}} \quad (1.3)$$

Idéalement, sa valeur est légèrement inférieure à :

$$V_{co} = V_t \cdot \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_s + 1} \right) \quad (1.4)$$

La résistance série se calcule :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left(\exp^{\frac{q V_{pv} + R_s V_{pv}}{a.K.TC}} - 1 \right) \quad (1.5)$$

- **Courant de court-circuit, I_{cc}** : Courant débité par un module en court-circuit pour un éclairement " plein soleil ".

$$I_{cc} = I_{ph} - I_s \left(\exp^{\frac{q}{a.K.TC}(R_s.I_{cc})} - 1 \right) - \frac{R_s.I_{cc}}{R_{sh}} \quad (1.6)$$

Pour la plupart des cellules (qui ont une faible résistance série), on peut ignorer le terme.

$$I_s \left(\exp^{\frac{q}{a.K.TC}(R_s.I_{cc})} - 1 \right) \quad (1.7)$$

D'avant I_{ph} . Alors l'expression approximative du courant de CC est :

$$I_{cc} \cong \frac{I_{ph}}{\frac{R_s}{R_{sh}} + 1} \quad (1.8)$$

- **Point de fonctionnement optimum, $P_m (V_m, I_m)$** : Lorsque la puissance de crête est maximum en plein soleil,

$$P_m = V_{op} * I_{op} \quad (1.9)$$

- **Rendement** : Rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente.

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} = \frac{I_{opt}.V_{opt}}{P_{inc}} \quad (1.10)$$

- **Facteur de forme** : Rapport entre la puissance optimale P_m et la puissance maximale que peut avoir la cellule : $V_{co} \cdot I_{cc}$

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} \cdot V_{co}} = \frac{I_{opt} \cdot V_{opt}}{I_{cc} \cdot V_{co}} \quad (1.11)$$

I-5- Association des panneaux PV

I-5-1-Association en série

Dans un groupement en série représenté par la figure (I.8), les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par l'addition des tensions à courant donné.

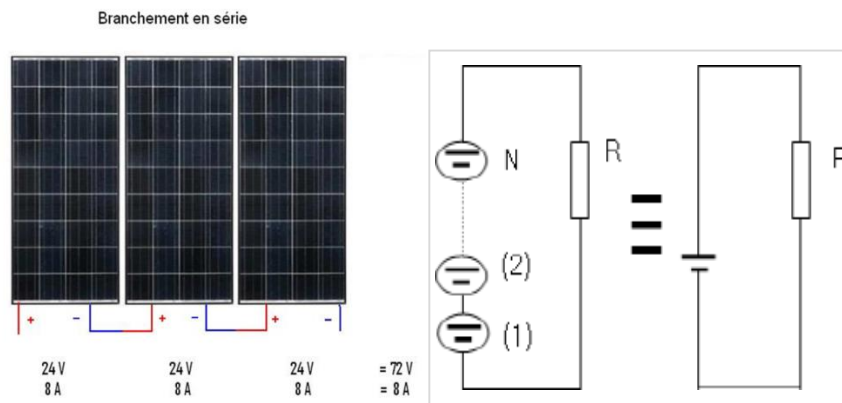


Figure I.8 : Association des modules en série

La figure (I.9) montre la caractéristique résultante (I_s , V_s) obtenue par l'association en série (indices) de ns cellules identiques (I_{cc} , V_{co}).

Avec :

$I_{scc} = I_{cc}$: le courant de court-circuit.

$V_{sco} = nsV_{co}$: la tension de circuit ouvert.

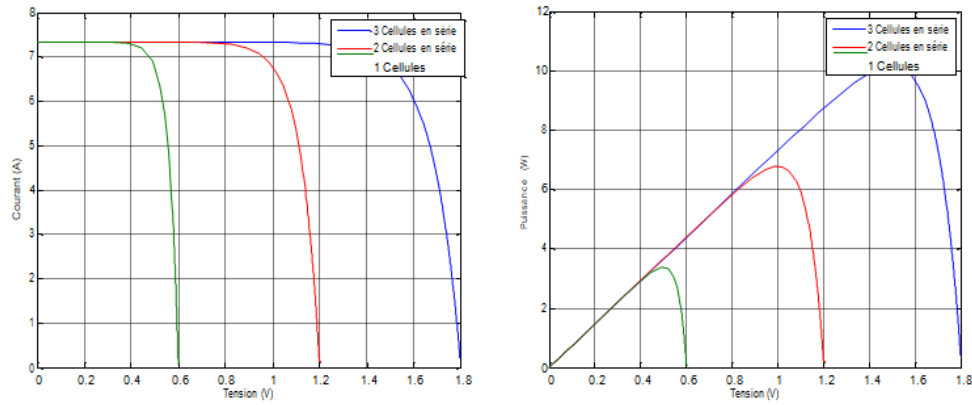


Figure I.9 : Caractéristique P-V des cellules PV raccordées en série.

I-5-2- Association en parallèle

Dans un groupement de cellules connectées en parallèle figure (I.10), les cellules étant soumises à la même tension, les intensités s'additionnent : la caractéristique résultante est obtenue par addition de courants à tension donnée.

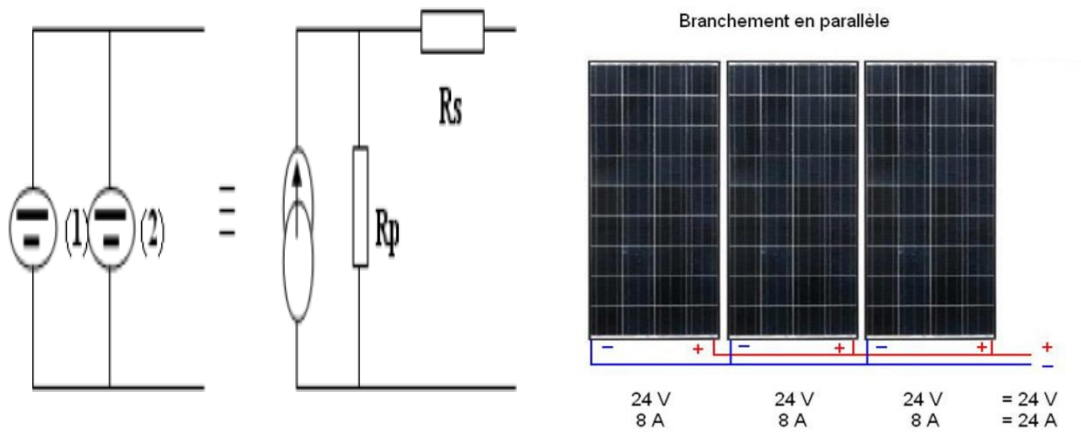


Figure I.10 : Association des modules en parallèle

La figure (I.11) montre la caractéristique résultante (I_{pcc}, V_{pco}) obtenue en associant en parallèle (indice p) np cellules identiques (I_{cc}, V_{co}).

$I_{pcc} = npI_{cc}$: le courant de court-circuit.

$V_{pco} = V_{co}$: la tension de circuit ouvert.

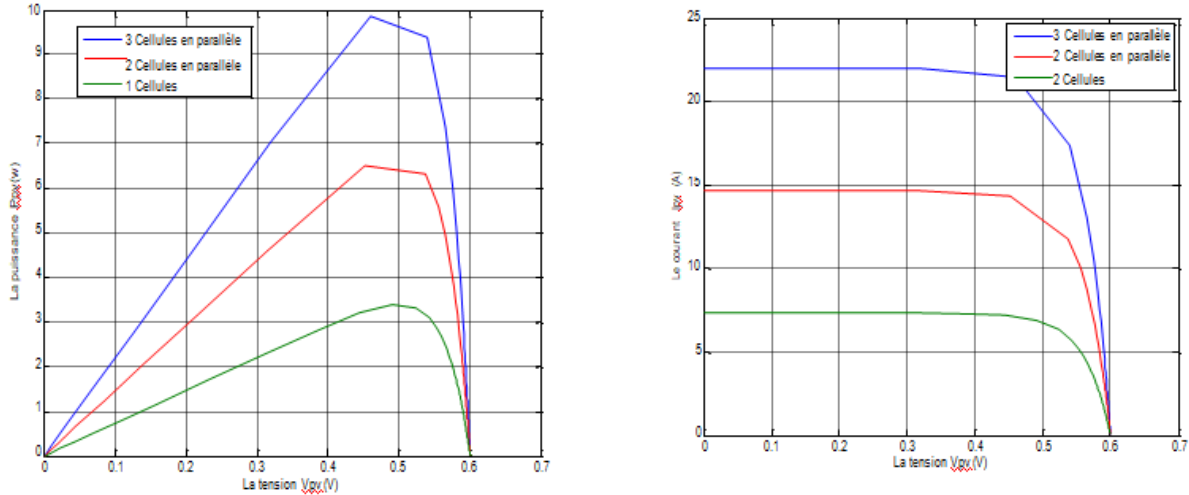


Figure I.11 : Caractéristique P-V des cellules PV raccordées en parallèle.

I-5-3- Association mixte (série-parallèle)

Le générateur photovoltaïque est constitué d'un réseau série-parallèle de nombreux modules photovoltaïques regroupés par panneaux photovoltaïques figure (I.12). La caractéristique électrique globale courant/tension du PV se déduit donc théoriquement de la combinaison des caractéristiques des cellules élémentaires supposées identiques qui le composent par deux affinités de rapport ns parallèlement à l'axe des tensions et de rapport np parallèlement à l'axe des courants,

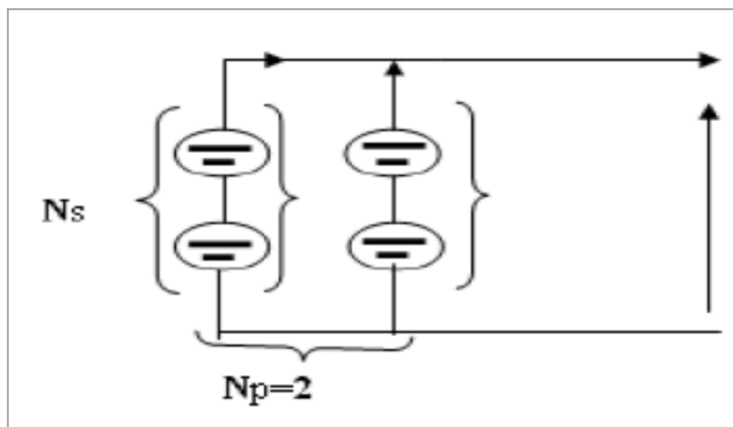


Figure I.12 : Association mixte des modules

Ainsi que l'illustre la figure (I.13), ns et np étant respectivement les nombres totaux de cellules en série et en parallèle.

$I_{cc} = np \cdot I_{cc}$: courant de court-circuit du module résultant.

$V_{co}=n \cdot V_{co}$: tension du circuit ouvert du module résultant.

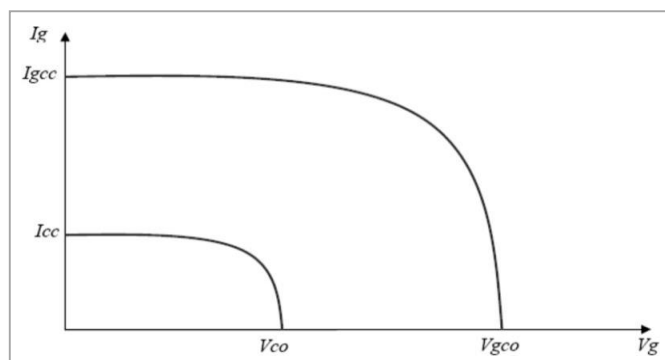


Figure I.13 : Caractéristique d'un groupement mixte

Les générateurs photovoltaïques sont alors réalisés en vue d'augmenter la tension (association en série) ou augmenter le courant (association en parallèle) par l'association d'un grand nombre de cellules élémentaires de même technologie et de caractéristiques identiques. Le câblage série-parallèle est donc utilisé pour obtenir un module PV (ou panneau PV) aux caractéristiques souhaitées (courant et tension suffisants) [25].

I-6- Avantages et inconvénients d'une installation PV

I-6-1- Avantages :

- D'abord une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- Ensuite le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au Mégawatt.
- Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions [26].

I-6-2- Inconvénients :

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % avec une limite théorique pour une cellule de 28%. Les générateurs photovoltaïques ne sont pas compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.
- Tributaire des conditions météorologiques.
- 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.
- Le faible rendement des panneaux photovoltaïques s'explique par le fonctionnement même des cellules. Pour arriver à déplacer un électron, il faut que l'énergie du rayonnement soit au moins égale à 1eV. Tous les rayons incidents ayant une énergie plus faible ne seront donc pas transformés en électricité. De même, les rayons lumineux dont l'énergie est supérieure à 1 eV perdront cette énergie, le reste sera dissipé sous forme de chaleur [25].

I-7- Conclusion

Ce chapitre s'est consacré à présenter les différents composants d'un système photovoltaïque. On a brièvement parlé de l'énergie solaire, les rayonnements solaire et leur type .On a présenté le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule PV et ses paramètres. Nous avons décrit les cellules solaires les plus couramment utilisées; les avantages et les inconvénients de chaque type ont été mentionnés.

Finalement nous avons cité les avantages et les inconvénients des systèmes PV en général.

Chapitre II :

Etat de l'art du système PV raccordé
au réseau

II-1- Introduction

La consommation énergétique mondiale augmente sans cesse associée à une réduction des ressources énergétiques fossiles. Avec l'ouverture des marchés de l'énergie électrique et les incitations étatiques, les productions décentralisées basées sur les énergies renouvelables se développent dans tous les pays. Parmi les sources renouvelables, les éoliennes et les systèmes photovoltaïques (PV) présentent de grands intérêts.

Ce chapitre présente l'architecture d'un système PV et ces différents composants qui rentrent dans cette architecture.

II-2- Architectures du système PV connecté au réseau électrique

Les systèmes *PV* connectés au réseau ont été très étudiés dans la littérature. En particulier dans les travaux de [1], [11]. L'onduleur est un élément central dans une architecture de système *PV* connecté au réseau de distribution électrique. En effet, il convertit le courant électrique continu produit par le générateur photovoltaïque en courant électrique alternatif qui est injecté au réseau. De nos jours, il existe principalement trois types d'associations de modules *PV* et onduleurs comme indiqué à la figure (II.1) :

- Le système centralisé où un seul onduleur est dimensionné en fonction de la puissance totale. Cette option est plutôt adaptée aux petites installations.
- Le système modulaire appelé également onduleurs string où plusieurs onduleurs sont reliés à une série des modules *PV*. Cette solution est demandée lorsque plusieurs champs de modules *PV* sont orientés différemment. Elle est destinée aux installations de forte puissance (de l'ordre de *MW*).
- Enfin le système avec onduleurs intégrés aux modules *PV*. Cette technique est également destinée aux installations de forte puissance (de l'ordre de *MW*).

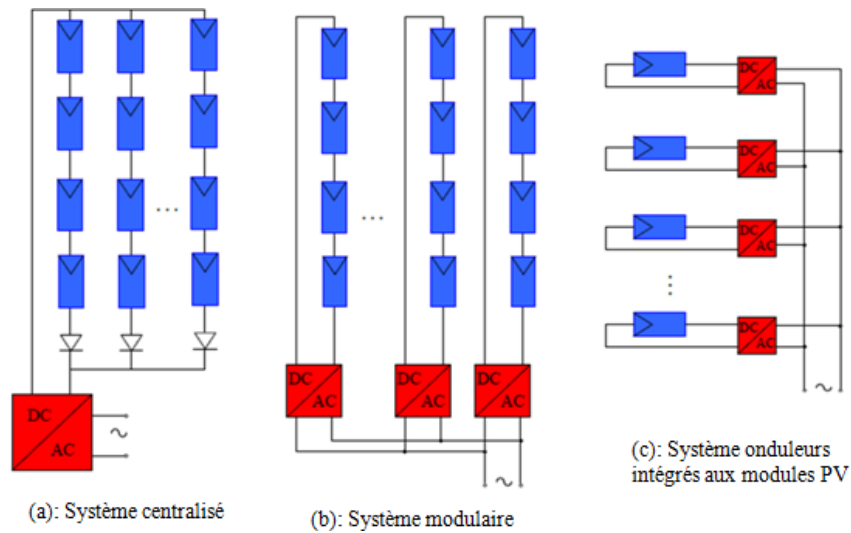


Figure II.1 : Topologie des systèmes PV connectés au réseau de distribution électrique

Il ressort que l'architecture d'un système photovoltaïque connecté au réseau contient un générateur photovoltaïque (*GPV*) qui est constitué d'un ensemble des modules *PV*, d'une interface d'électronique de puissance, d'un filtre passif de raccordement (filtre de sortie) et du réseau de distribution électrique. L'interface d'électronique de puissance peut être composée uniquement d'un onduleur : structure à connexion simple, ou d'un ensemble convertisseur *DC/DC* et d'un onduleur : on parle alors de structure avec bus continu intermédiaire [1], [27].

La figure (II.2) représente le synoptique d'un système PV connecté au réseau de distribution électrique

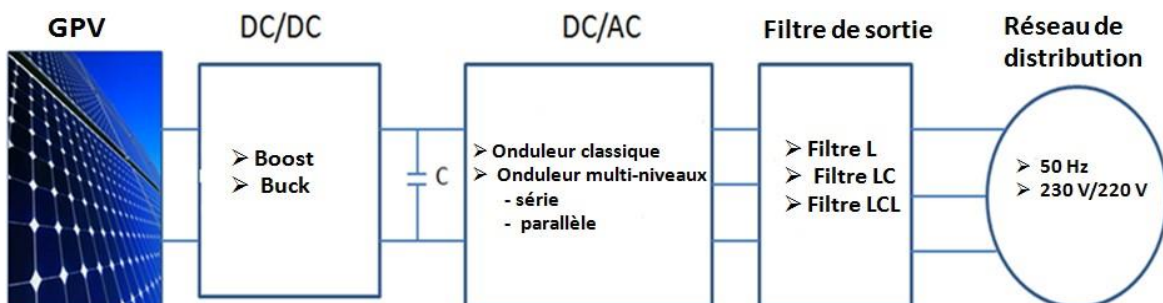


Figure II.2 : Schéma synoptique d'un système PV connecté au réseau électrique

II-3- Structure générale d'un système photovoltaïque

On peut classer deux types de structures générales d'un système PV connecté au réseau :

II-3-1- Systèmes de connexion réseau directe

La structure à connexion simple comporte un générateur photovoltaïque (*GPV*), un convertisseur *DC/AC* (onduleur), un filtre passif et un réseau de distribution électrique [1]. Cette structure elle-même existe sous deux configurations possibles : la structure à convertisseur unique (sans transformateur) et la structure avec transformateur.

II-3-1-1- Structure à convertisseur unique

Le dispositif représenté à la figure (II.3) est le plus simple, car il comporte le moins de composants possibles. Plusieurs modules PV sont connectés en série pour obtenir une tension continue suffisamment grande. Cette solution est une alternative à un hacheur élévateur de tension. La tension continue obtenue alimente directement un onduleur central, qui fournit la tension sinusoïdale désirée (230 V). Il pourrait être avantageux d'insérer un transformateur pour isoler le système photovoltaïque du réseau. L'inconvénient majeur de ce dispositif est l'arrêt total et immédiat de la production d'énergie lors d'un problème survenant en amont de l'onduleur. De plus, le contrôle du point de puissance maximum est voisin, car toutes les cellules ne délivrent pas le même courant en raison de leurs différences structure interne et d'ensoleillement. [28]

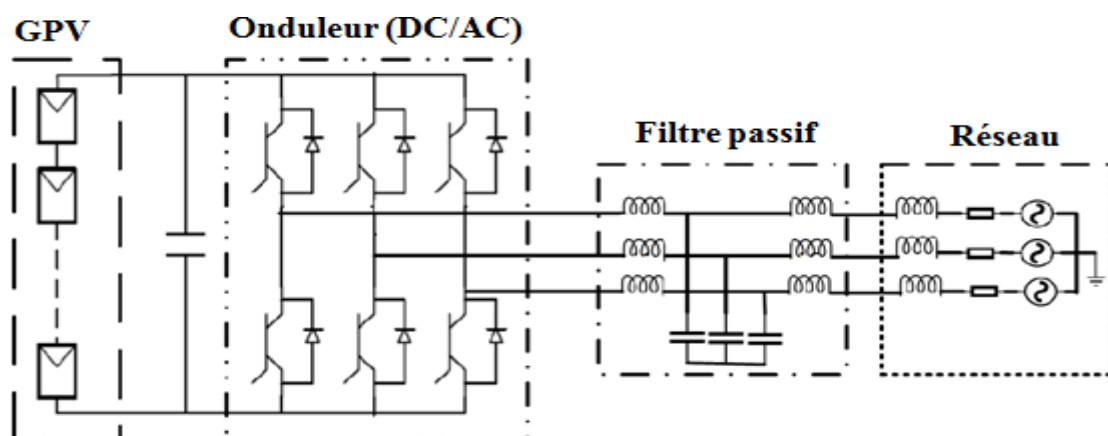


Figure II.3 : Plusieurs modules PV en série à un seul onduleur.

La valeur moyenne sur une période de découpage s'écrit sous la forme suivante :

$$V_{moy} = \frac{V_{dc}}{2} (2\alpha - 1) \quad (2.1)$$

Avec : V_{moy} est la tension moyenne en sortie de l'onduleur, V_{dc} est la tension du bus continu à l'entrée de l'onduleur et α est le rapport cyclique de la commande.

Le rapport cyclique de la commande en fonction du temps s'écrit comme suit :

$$\alpha(t) = \frac{m_1 \sin(2\pi f_r t + \varphi)}{2} \quad (2.2)$$

Avec : m_1 est la profondeur de modulation, f_r est la fréquence du réseau ($f_r = 50$ Hz) et φ est le déphasage par rapport à la référence de phase [29].

II-3-1-2- Structure à connexion simple avec transformateur

La figure (II.4) montre un onduleur associé à un circuit de commande qui est connecté directement au module photovoltaïque. La tension de sortie de ce dernier est transformée en une tension de fréquence 50 Hz alternatif. Cette tension est transportée grâce à un bus alternatif (220 V - 50 Hz, par exemple de schéma) vers un transformateur central qui élève le niveau désiré. Le faible niveau de tension dans le bus est l'avantage majeur de ce type de montage, car elle assure la sécurité du personnel. Toutefois, la distance entre le transformateur et le module doit être faible à cause du courant qui traverse les câbles et qui génère des pertes Joule. Il y a un compromis à faire au niveau de la tension du bus alternative. [28]

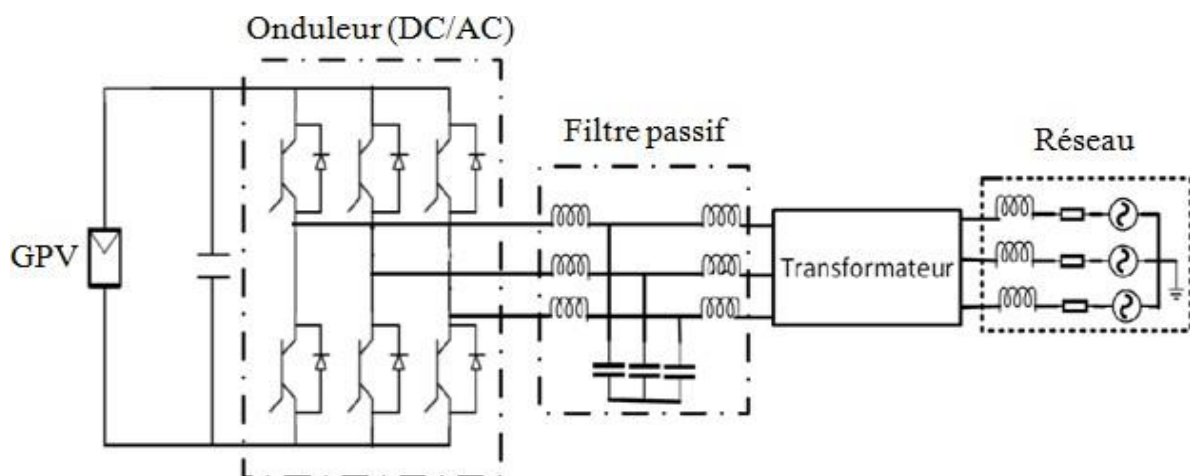


Figure II.4 : Structure à connexion simple avec transformateur

II-3-2- Structure avec un bus DC intermédiaire d'un système PV connecté au réseau

La structure avec bus *DC* intermédiaire d'un système *PV* connecté au réseau est composée d'un *GPV*, d'un convertisseur *DC/DC*, d'un onduleur de tension, d'un filtre passif de raccordement au réseau et du réseau de distribution électrique. Le bus *DC* intermédiaire est un convertisseur *DC/DC* qui peut être un hacheur BOOST ou Buck [1]. Cependant, un Buck/BOOST est souvent utilisé pour des raisons de simplicité d'une part et d'autre part lorsqu'un rapport d'élévation de tension inférieur à trois permet d'obtenir un rendement correct [19], [11]. La Figure II.5 présente cette structure avec un bus *DC* intermédiaire dans le cas où le bus *DC* est un BOOST.

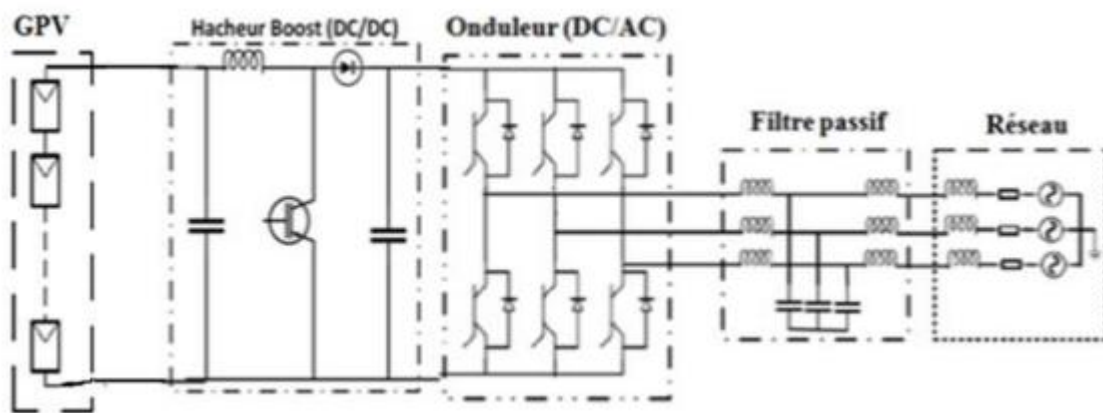


Figure II.5 : Structure avec BOOST intermédiaire d'un système PV connecté au réseau

II-4- Les convertisseurs statiques pour les systèmes photovoltaïques connectés au réseau

Les convertisseurs sont des appareils servant à transformer la tension électrique pour l'adapter à des récepteurs fonctionnant en une tension continue différente ou une tension alternative. L'étude du convertisseur est intéressante dans la mesure où il est utilisé dans la plupart des nouveaux types de sources de production d'énergie dispersée connectée au réseau (éolienne, photovoltaïque, pile à combustible...). La tension fournie par les panneaux photovoltaïques est une tension de type continu pour l'adapter à nous besoin il y a deux sortes de convertisseur (les hacheurs DC-DC, les onduleurs DC-AC). [31]

II-4-1-- Les convertisseurs statiques DC/DC (hacheur)

Le hacheur est un convertisseur continue/continue permettant de convertir une énergie continue à un niveau donné de tension (ou de courant) en une énergie continue à un autre

niveau de tension (ou de courant). Son utilisation s'avère nécessaire pour stocker l'énergie photovoltaïque dans des batteries, ou pour alimenter une charge continue [32]. Le hacheur se compose de condensateurs, d'inductance et de commutateurs. Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, c'est la raison pour laquelle on a de bons rendements dans les hacheurs [33]. Les hacheurs sont des convertisseurs continus qui procèdent par découpage d'une grandeur d'entrée continue, tension ou courant et dont la grandeur de sortie est également continue ou à faible ondulation [34].

II-4-2- Les types d'hacheurs

Il existe plusieurs types de convertisseurs DC-DC. Parmi lesquels, on présente le principe des trois types de convertisseurs à découpage (dévolteur (BUCK), survolteur (BOOST), et mixte (BUCK-BOOST), utilisés fréquemment dans les systèmes photovoltaïques pour générer les tensions et les courants souhaités ainsi que pour l'adaptation des panneaux solaires avec les différentes charges [35].

II-4-2-1- Hacheur dévolteur (BUCK)

Le convertisseur dévolteur peut être souvent trouvé dans la littérature sous le nom de hacheur BUCK ou hacheur série. La figure (II.6) présente le schéma de principe du convertisseur dévolteur. Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie inférieure. [36]

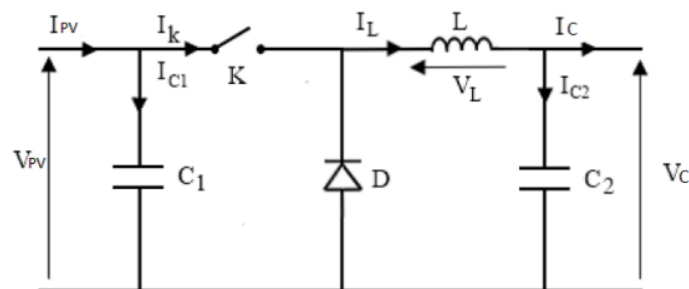


Figure II.6 : Schéma électrique d'un hacheur Buck

Fonctionnement

On note α : le rapport cyclique des impulsions qui commandent l'interrupteur.

T_e : étant la période des impulsions.

Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée $\alpha.T$, la tension V_{pv} appliquée aux bornes de la diode et L 'interrupteur est commandé à la fréquence de découpage $f_e = 1/T_e$.

La source V_{pv} fournit de l'énergie à la charge et à l'inductance. Pendant le Temps $t \in [\alpha T; T]$ l'interrupteur s'ouvre et l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre D. La tension à ses bornes est donc nulle [37].

Les chronogrammes (tracés dans le cas idéal) de la Figure(II.7) sont tracés dans le cas d'une conduction continue, c'est-à-dire que le courant ne repasse jamais par zéro. Pour calculer la relation entre la tension d'entrée et celle de sortie, on exprime que la tension moyenne aux bornes de l'inductance est nulle [37].

$$V_c = \frac{1}{T} \int_0^{\infty} V_{pv} dt \quad (2.3)$$

$$V_c = \alpha \cdot V_{pv} \quad (2.4)$$

A pertes minimales on a :

$$P_{pv} = P_c \leftrightarrow V_c \cdot I_c = V_{pv} \cdot I_{pv} \leftrightarrow I_{pv} = \frac{V_c}{V_{pv}} I_c \leftrightarrow I_{pv} = \alpha \cdot I_c$$

Donc :

$$\alpha = \frac{V_c}{V_{pv}} = \frac{I_{pv}}{I_c} \quad (2.5)$$

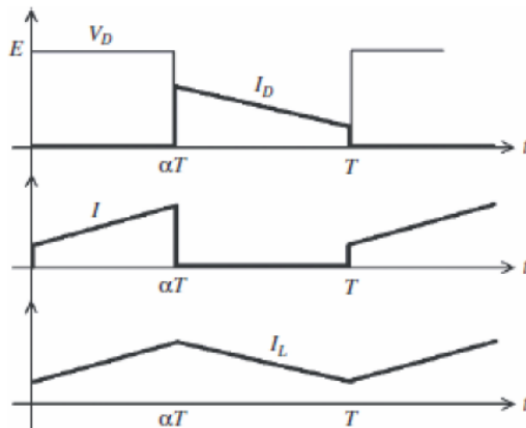


Figure II.7 : Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur BUCK

II-4-2-2- Hacheur survolteur (BOOST) :

Ce dernier est un convertisseur survolteur, connu aussi sous le nom de « BOOST » ou hacheur parallèle ; son schéma de principe de base est celui de la figure (II.8). Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie supérieure. [36]

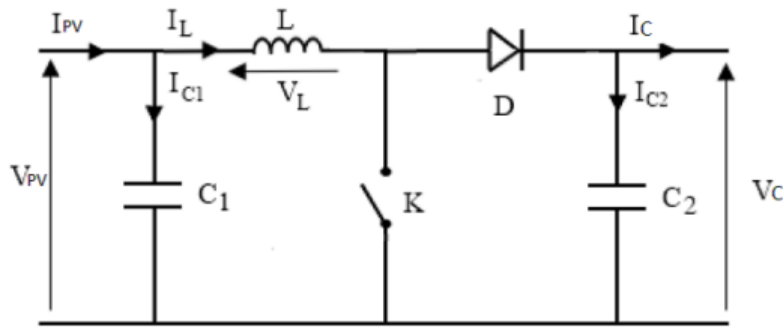


Figure II.8 : Schéma électrique d'un hacheur BOOST

Fonctionnement :

Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée $\alpha.T$, le courant dans l'inductance croît linéairement. La tension aux bornes de K est nulle [37]. Pendant le temps $t \in [\alpha.T; T]$ l'interrupteur s'ouvre et l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre D. On a alors $V_k = V_c$.

En écrivant que la tension aux bornes de l'inductance est nulle, on arrive à [37] :

$$V_{pv} = \frac{1}{T} \int_0^{\infty} V_c dt \quad (2.6)$$

$$V_{pv} = V_c(1 - \alpha) \quad (2.7)$$

A pertes minimales on a :

$$P_c = P_{pv} \leftrightarrow V_c . I_c = V_{pv} . I_{pv} \leftrightarrow I_c = \frac{V_{pv}}{V_c} I_{pv} \leftrightarrow C = (1 - \alpha) I_{pv}$$

Donc :

$$(1 - \alpha) = \frac{V_{pv}}{V_c} = \frac{I_c}{I_{pv}} \quad (2.8)$$

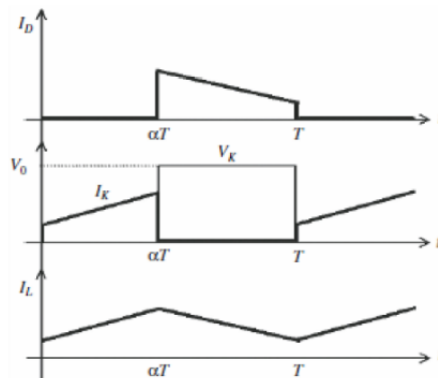


Figure II.9 : Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur BOOST

II-4-2-3- Hacheur mixte (BUCK-BOOST)

Le hacheur BUCK-BOOST est un convertisseur indirect DC-DC à stockage inductif. La source d'entrée est de type tension continue (filtrage capacitif en parallèle avec une source de tension) et la charge de sortie continue de type source de tension (condensateur en parallèle avec la charge résistive). L'interrupteur K peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage) [38].

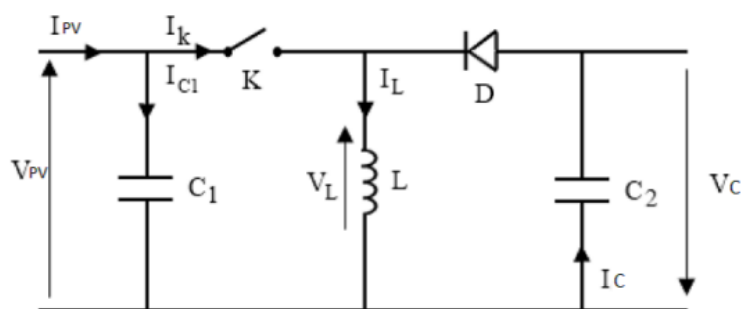


Figure II.10 : Schéma électrique d'un hacheur BUCK-BOOST

Fonctionnement :

Cette structure de convertisseur permet d'obtenir des tensions négatives à partir de tension positive. Le schéma de principe est présenté sur Figure (II.10). Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée $\alpha \cdot T_e$, le courant augmente linéairement. La tension est égale à V_{pv} . A l'ouverture de K, la diode prend le relais et la tension V_L est égale à V_c . Par définition La tension moyenne aux bornes de l'inductance est nulle, Il en résulte que [37] :

– Quand le rapport cyclique $\alpha > 0.5$ le hacheur BUCK-BOOST fonction comme un hacheur BOOST et si le rapport cyclique $\alpha < 0.5$ le hacheur BUCK-BOOST fonction comme un hacheur BUCK.

$$V_{pv} \cdot \alpha \cdot T = V_c(1 - \alpha)T \quad (2.9)$$

II-5- Commande MPPT (Maximum Power Point Tracking)

II-5-1- Introduction

Pour la meilleure exploitation de diverses ressources des énergies renouvelables, il est important d'améliorer l'efficacité et la fiabilité des systèmes photovoltaïques GPV.

Le suivi de point de puissance maximale (MPPT) a un rôle important dans la performance des systèmes d'énergie photovoltaïque. Les systèmes photovoltaïques GPV peuvent produire une puissance maximale à un point de fonctionnement particulier appelé Maximum Power Point (MPP). [25]

II-5-2- Principe de fonctionnement de MPPT

Un MPPT, de l'anglais « Maximum Power Point Tracking » est un principe permettant de suivre, comme son nom l'indique, le point de puissance maximale d'un générateur électrique non linéaire. En conséquence, pour un même éclairement, la puissance délivrée sera différente selon la charge. Un contrôleur MPPT permet donc de piloter le convertisseur statique reliant la charge (une batterie par exemple) et le panneau photovoltaïque de manière à fournir en permanence le maximum de puissance à la charge chaque instant. La figure (II.11) représente la trajectoire du point de puissance maximale produite par le générateur.

La Figure (II.12) présente le schéma de principe d'un module photovoltaïque doté d'étage d'adaptation DC-DC entre le GPV et la charge de sortie. Cette structure correspond à un système plus communément appelé système autonome. Il permet le plus souvent d'alimenter une batterie servant de stocke l'énergie pour une charge qui ne supporte pas les fluctuations de tension.

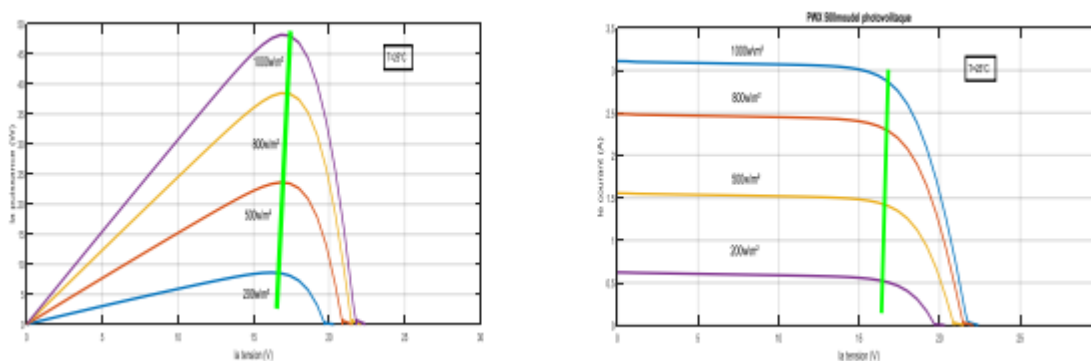


Figure II.11 : La caractéristique I-V, P-V et la trajectoire de PPM

Cet étage d'adaptation dispose d'une commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) qui lui permet de rechercher le PPM que peut fournir un panneau solaire photovoltaïque. L'algorithme de recherche MPPT peut être plus ou moins complexe en fonction du type d'implantation choisi et des performances recherchées.

Cependant au final, tous les algorithmes performants doivent jouer sur la variation du rapport cyclique du convertisseur de puissance associé [12]

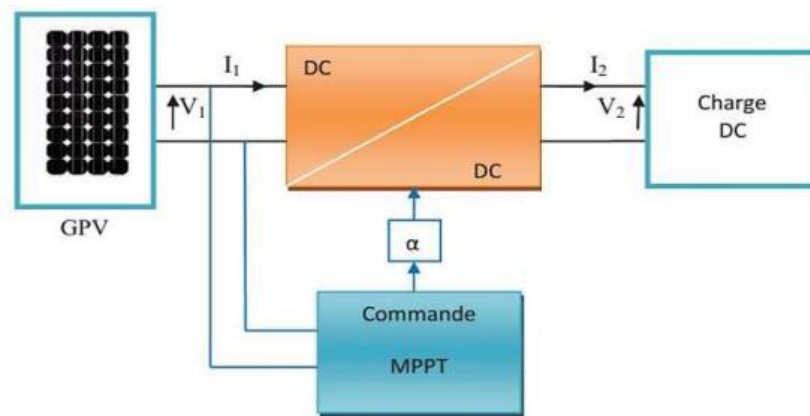


Figure II.12 : Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque

II-5-3- Gestion de la MPPT

La figure (II.13) illustre trois cas de perturbations. Suivant le type de perturbation, le point de fonctionnement bascule du point de puissance maximal PPM1 vers un nouveau point P1 de fonctionnement plus ou moins éloigné de l'optimum. Dans ce cas est pour une variation d'ensoleillement il suffit de réajuster la valeur du rapport cyclique pour converger vers le nouveau point de puissance maximum PPM2. Dans le cas b pour une variation de charge on peut également constater une modification du point de fonctionnement qui peut retrouver une nouvelle position optimale grâce à l'action d'une commande. Enfin dans le dernier cas c de variation de point de fonctionnement peut se produire lié aux variations de température de fonctionnement du GPV. Bien qu'il faut également agir au niveau de la commande [39].

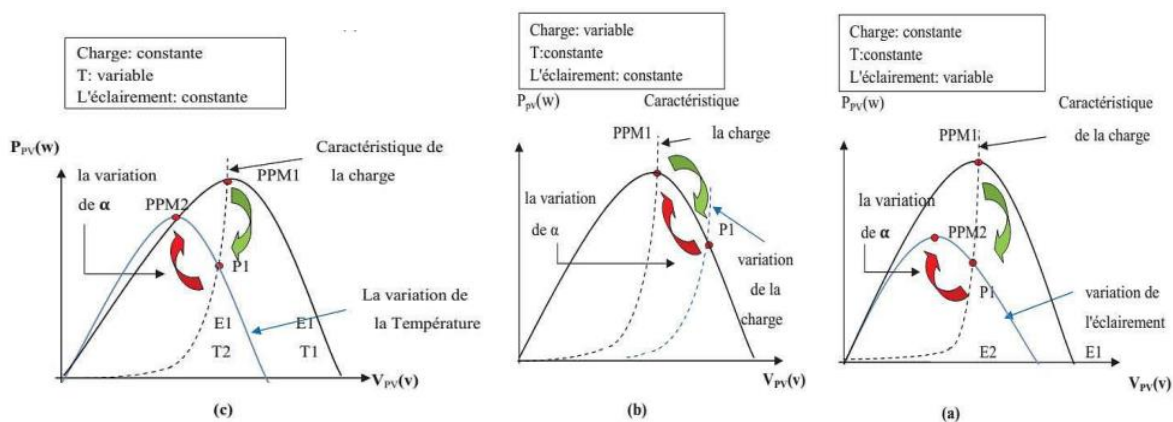


Figure II.13 : Recherche et recouvrement du Point Puissance Maximale (a) suite à une variation d'éclairement, (b) suite à une variation de charge, (c) suite à une variation de température

II-5-4- Les différentes techniques de MPPT

Afin d'extraire Le maximum de puissance d'un panneau solaire, on peut raisonner sur plusieurs et différentes méthodes, Certains des concepts sont très robustes et simples, tandis que d'autres approches exigent des dispositifs de logique très sophistiqués tels que des microprocesseurs combinés avec des circuits de puissance, de convertisseurs de commutation... Divers travaux sur des commandes assurant un fonctionnement de type MPPT apparaissent régulièrement depuis 1968, date de publication de la première loi de commande de ce type adaptée à une source d'énergie renouvelable de type PV. En littérature on trouve fréquemment les techniques de maximisation de puissance suivantes [39] :

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

Chacune de ces techniques à ces propres avantages et inconvénients du point de vue simplicité, efficacité et robustesse. Dans notre travail, on se limite à la méthode de Perturbation et observation (P&O), qui est très simple à implanter, et de bon rendement.

II-5-4-1- Méthode de perturbation et d'observation (P&O)

La méthode de perturbation et observation (P&O) est une approche largement répandue dans la recherche de MPPT parce qu'elle est simple et exige seulement des mesures de tension et du courant du panneau photovoltaïque VP V et IP V respectivement, elle peut dépister le point maximum de puissance même lors des variations de l'éclairement et la température.

L'avantage de cette méthode c'est qu'elle a la particularité d'avoir une structure de régulation simple, et peu de paramètre de mesure. Elle peut déduire le point de puissance maximale même lors des variations de l'éclairement et la température, pour toutes ces raisons, la méthode P&O est devenue une approche largement répandue dans la recherche du MPPT [23].

La figure (II.14) montre l'organigramme de l'algorithme de P&O.

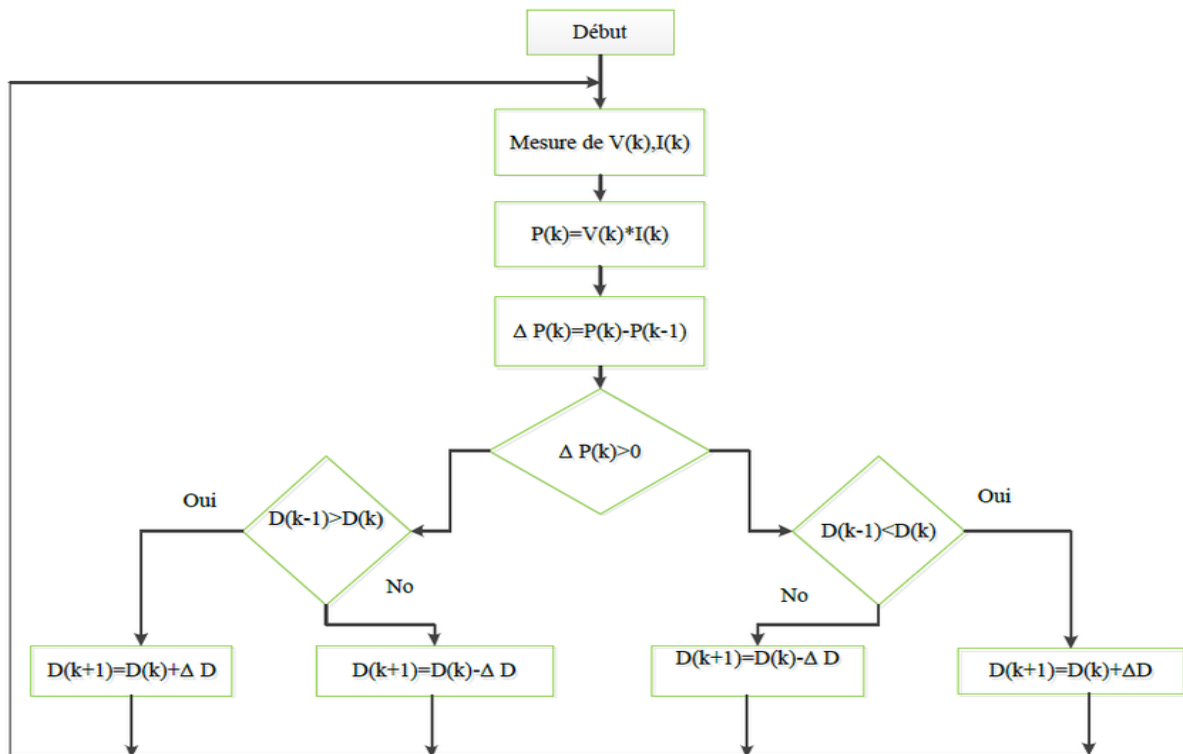


Figure II.14 : Organigramme de l’algorithme Perturbation et Observation (P&O)

Comme son nom l’indique, la méthode P&O fonctionne avec la perturbation de la tension V_{pv} et l’observation de l’impact de ce changement sur la puissance de sortie du panneau photovoltaïque.[18] Sur la figure (II.15), on voit que si la tension de fonctionnement varie dans une direction donnée ce qui implique que la puissance augmente ($\Delta P > 0$), la variation doit alors se déplacer vers le point de fonctionnement (PPM). L’algorithme P&O continuera à observer la variation de la tension dans la même direction. Par contre, si la puissance diminue ($\Delta P < 0$), alors la variation est éloignée du point de fonctionnement du PPM.

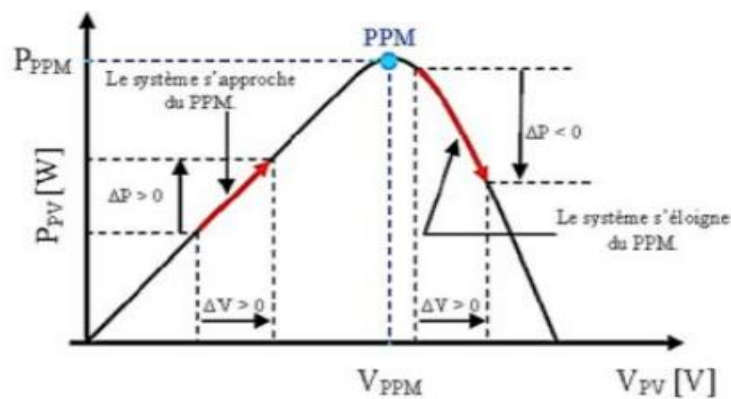


Figure II.15 : Signe de ΔP et ΔV à différentes positions de la courbe caractéristique de puissance

II-6- Les convertisseurs statiques DC/AC

Connus sous les appellations d'onduleurs, les convertisseurs statiques *DC/AC* sont largement étudiés dans la littérature. Un onduleur est un convertisseur statique d'électronique de puissance qui convertit une tension (ou courant) continue *DC* en une tension (ou courant) alternative *AC*. Il existe principalement deux types d'onduleurs de tension connectés au réseau selon le niveau de puissance à injecter [1], [11]:

- L'onduleur monophasé.
- L'onduleur triphasé.

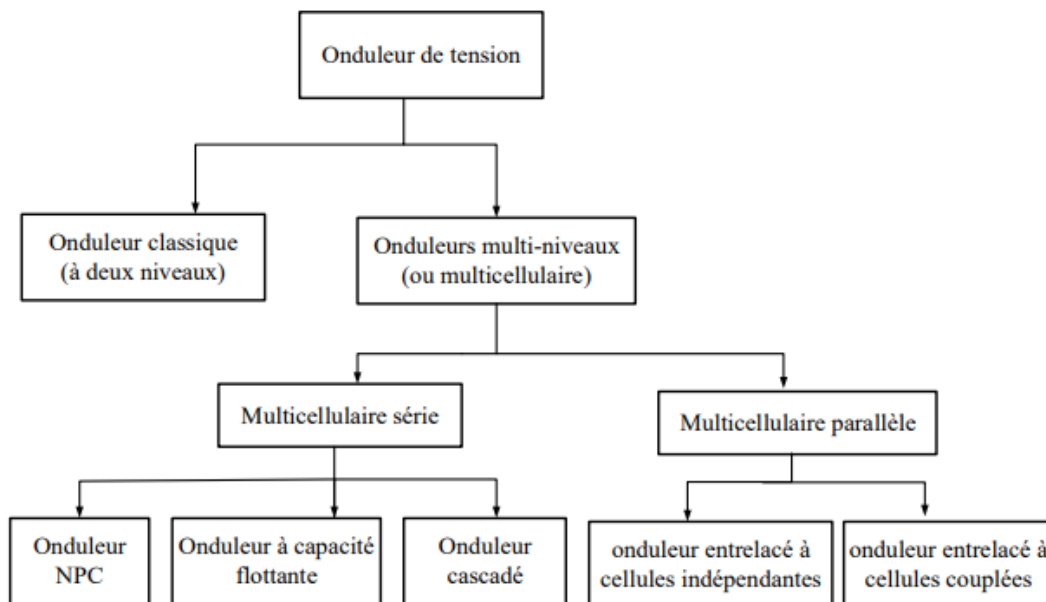


Figure II.16 : Différentes topologies d'onduleurs

Dans notre travail on va s'intéresser à l'onduleur triphasé spécifiquement les onduleurs multi-niveaux de type NPC à trois niveaux.

II-6-1- Onduleurs multi-niveaux

Un onduleur est un convertisseur statique, assurant la conversion continue alternatif. Ces dernières années, des convertisseurs statiques sont de plus en plus exploités dans des applications diverses. Certaines d'entre eux exigent une alimentation électrique à haute ou moyenne tension, facilement réglable et ayant de bonnes performances spectrales. De nouvelles techniques dites multi-niveaux ainsi que de nouvelles topologies de convertisseurs ont été développées. Elles permettent de générer plusieurs niveaux de tension à la sortie du

convertisseur. Le nombre de semi-conducteurs nécessaires à la réalisation de ces topologies augmente avec le nombre de niveaux désirés.

Un onduleur est dit "multi-niveaux" lorsqu'il génère une tension découpée de sortie composée d'au moins trois niveaux. Pour un réseau moyenne tension, il est difficile de connecter directement un seul commutateur à semi-conducteur de puissance. En conséquence, les onduleurs multi-niveaux ont été introduits comme alternative dans les applications à haute puissance et moyenne tension car ils proposent plusieurs avantages [31].

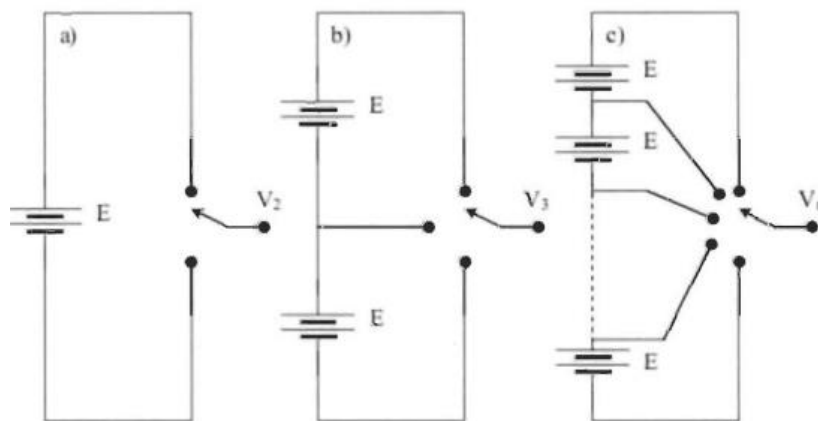


Figure II.17 : Onduleur à niveaux multiples: a) à deux niveaux. b) à trois niveaux. c) à N-niveaux

La figure (II.17) aide à comprendre comment fonctionne les onduleurs multi-niveaux. Un onduleur à deux niveaux est représenté à la figure (II.17. a), dans laquelle les commutateurs semi-conducteurs ont été remplacés par un interrupteur idéal. La tension de sortie ne peut prendre que deux valeurs: 0 ou E. Sur la figure (II.17. b), la tension de sortie de trois niveaux peut prendre trois valeurs: 0, E ou 2E.

Dans la figure (II.17. c) le cas général de N niveaux est présenté.

II-6-2- Différentes topologies des onduleurs multi-niveaux

L'objectif de cette partie est de donner un aperçu général des trois topologies de base des onduleurs multi-niveaux :

- la topologie à diodes de bouclage (en anglais diode clamp)
- la topologie à condensateurs flottants (en anglais Flying Capacitor)
- la topologie en pont H cascades (en anglais Cascaded H-bridge)

La figure (II.19) Représente les topologies des onduleurs multi-niveaux les plus récentes

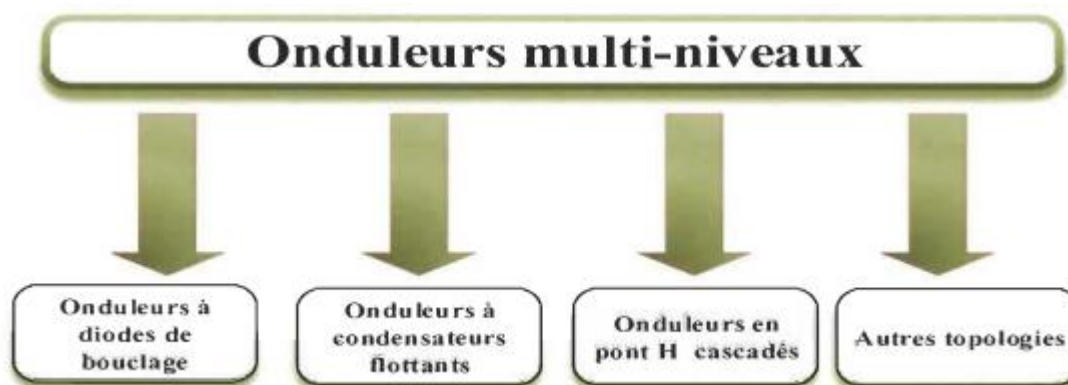


Figure II.18 : Différentes topologies des onduleurs multi-niveaux

Dans notre travail on s'intéresse à l'utilisation de l'onduleur à diodes de bouclage (NPC) car il est le plus pratique et simple à maîtriser en œuvre (réalisation, commande ...).

II-7-Onduleur de tension multi-niveaux de type NPC

II-7-1-Introduction

L'évolution rapide des techniques de fabrication des dispositifs à semi-conducteurs et l'orientation des concepteurs vers la technologie des composants hybrides tels que l'IGBT ont permis de développer de nouvelles structures d'onduleurs d'une grande performance par rapport aux structures classiques, en l'occurrence, les onduleurs multi-niveaux. Ils sont mieux adaptés aux applications de grandes puissances parce qu'ils réduisent les contraintes dues aux phénomènes de commutation sollicitant les interrupteurs.

La première structure d'onduleurs multi-niveaux à apparaître est le NPC (Neutral Point Clamped) à trois niveaux, proposés par Nabae.

L'extension de cette topologie, aux niveaux supérieurs à trois, a permis l'apparition de la topologie d'onduleur multi-niveaux à diode de bouclage (Diode Clamped Inverter) [40].

II-7-2- Onduleur a trois niveaux de type NPC

II-7-2-1-Structure

L'idée de base de l'onduleur NPC est l'obtention d'une tension de sortie à trois niveaux par la superposition de deux interrupteurs élémentaires alimenté chacun par une source de tension continue distincte [40].

La structure de l'onduleur de tension en pont triphasé de type NPC à 3 niveaux est représentée par la figure (II.19). Elle est composée de trois demi ponts monophasés. A partir de la source principale de tension continue E , et à l'aide d'un diviseur de tension capacitif formé par les condensateurs C_1 et C_2 de même capacité, on obtient deux sources secondaires

De tension continue délivrant chacune un potentiel à demi tension $E/2$. Cette structure crée alors un point neutre O entre les condensateurs C_1 et C_2 .

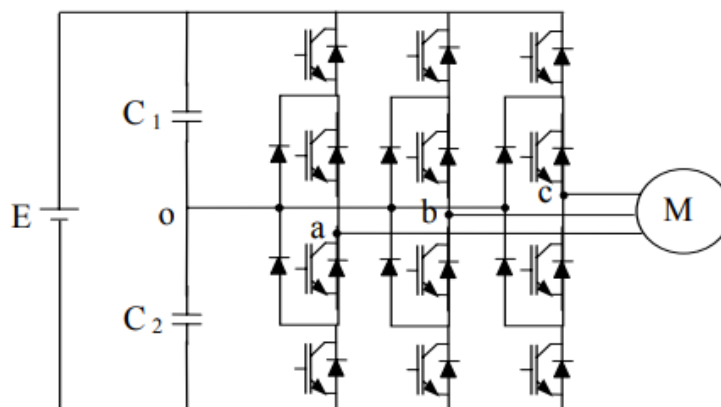


Figure II.19 : Structure d'un onduleur NPC a 3 niveaux

Chaque demi-pont est composé de deux étages d'interrupteurs. Chaque étage comporte deux transistors IGBT en série avec un point commun relié par une diode au point neutre O . Des diodes anti parallèles sur les transistors assurent la réversibilité des courants de la charge.

L'onduleur multi-niveaux de type NPC permet d'avoir une tension plus proche de la sinusoïde que celle issue de l'onduleur classique à deux niveaux. Il permet également, par la mise en série des interrupteurs, une meilleure maîtrise des contraintes en tension sur les composants [40].

II-7-3- Synthèse des stratégies de commande des convertisseurs multi-niveaux de type NPC :

Depuis plusieurs années, nous assistons à un regain d'intérêt pour l'étude des techniques multi-niveaux et spécialement (Les onduleurs multi-niveaux). Ces techniques qui constituent un secteur de recherche relativement récent, demandent encore beaucoup de développements et d'optimisation du point de vue de la commande. Plusieurs commandes sont utilisées afin d'améliorer les signaux de sortie de ces convertisseurs, ces derniers font sans cesse l'objet de nombreuses publications. La figure (II.20) représente les différentes stratégies de modulation des onduleurs multi-niveaux les plus récentes. [42]

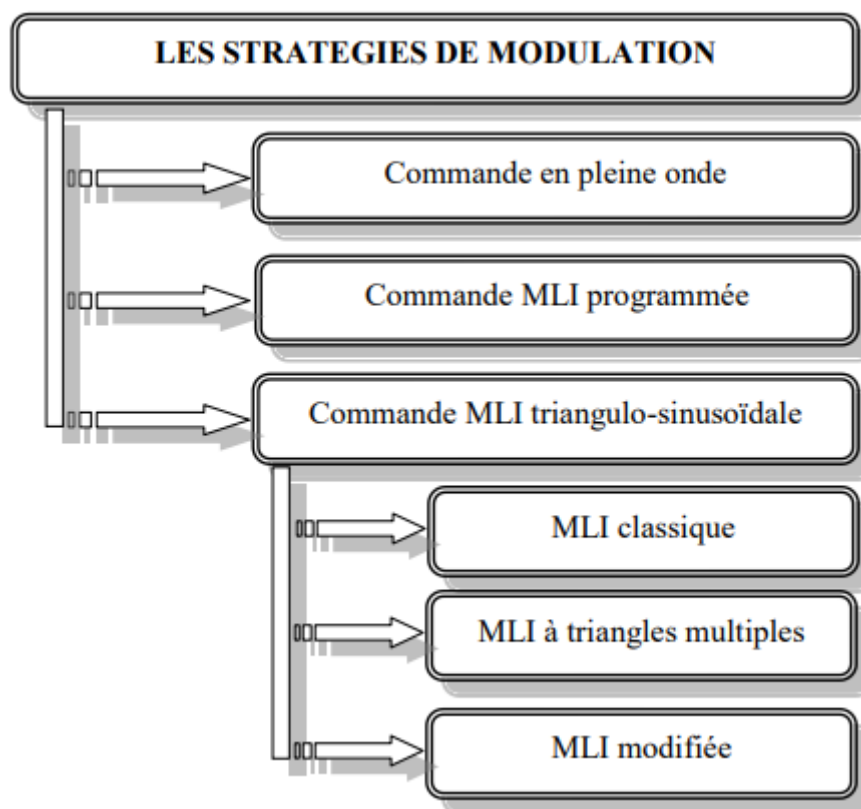


Figure II.20 : Les stratégies de modulation.

Dans notre travail on s'intéresse à utiliser la commande MLI triangulo-sinusoïdale à triangles multiples.

II-7-3-1- Commande MLI Triangulo-sinusoïdale

La modulation de la largeur d'impulsion (PWM) est une technique très utilisée dans l'industrie.

Son principe de base est la génération de signaux de commutation d'interrupteurs suite à une comparaison de l'amplitude de signaux en dent de scie nommés porteuses et un signal sinusoïdale nommé référence.

Les impulsions de commutations ainsi obtenues permettent la commande des interrupteurs du convertisseur.

Dans cette section, on analyse trois stratégies de modulation à MLI [42] :

- Modulation sinusoïdale classique.
- Modulation à triangles multiples
- Modulation modifiée.

Il s'agit de déterminer, pour un onduleur trois niveaux de type NPC, le signal de commande généré par chacune des trois techniques.

II-8- Les filtres passifs du raccordement au réseau électrique

Les filtres passifs du raccordement au réseau électrique ont pour rôle de supprimer certains harmoniques HF générés par l'onduleur afin d'injecter le courant au réseau électrique dans le respect des normes relatives aux harmoniques réseaux et à la compatibilité électromagnétique. Il existe principalement deux types des filtres passifs de raccordement au réseau : le filtre L , et le filtre LCL . La Figure (II.20) montre ces trois filtres passifs.

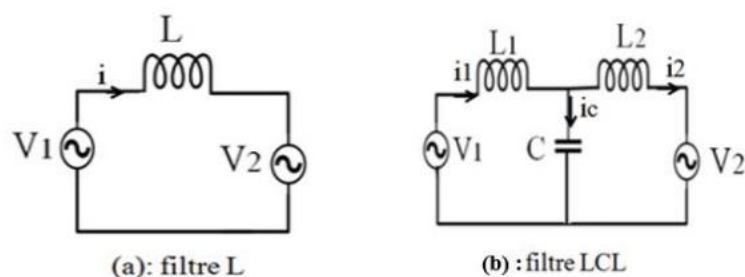


Figure II.21 : Topologies des filtres passifs

Avec : $V1$ et $i1$ sont la tension et le courant de sortie de l'onduleur, $V2$ et $i2$ sont la tension et le courant du réseau, i_c est le courant circulant dans le condensateur, C est le condensateur du filtre et L , $L1$, $L2$ sont les inductances du filtre.

II-8-1- Filtre L

Le filtre de base utilisé dans la connexion au réseau électrique est constitué par une inductance. Ce composant est absolument nécessaire pour contrôler le courant entre les deux sources de tension que sont l'onduleur et le réseau : c'est donc plus qu'un filtre mais un élément fonctionnel du système, il contribue aussi à filtrer au premier ordre les harmoniques de courant *HF*. Cependant, ce filtre simple ne permet pas une atténuation suffisante des harmoniques du courant à injecter au réseau. La fonction de transfert du filtre *L*, dans le cas où on néglige la résistance interne de l'inductance et lorsque $V_2 = 0$, est donnée à l'équation (2.11) (p est l'opérateur de Laplace). Il s'agit d'un filtre du premier ordre et possède une atténuation théorique de $-20dB/décade$. Pour diminuer les ondulations il faudrait augmenter la valeur de l'inductance ce qui ralentit la dynamique de régulation en courant et engendre une augmentation du volume et du poids de l'onduleur. De plus, une chute de tension significative est produite avec ce filtre à la fréquence du réseau. Le filtre *L* est plutôt adapté pour le raccordement d'un convertisseur ayant une fréquence de commutation élevée où l'atténuation est suffisante. [29]

$$H(p)L = \frac{I(p)}{V_1(p)} = \frac{1}{L.p} \quad (2.11)$$

II-8-2- Filtre LCL

Le filtre *LCL* est la structure la plus souvent utilisée pour connecter un onduleur au réseau. Il permet une bonne atténuation des harmoniques de courant même avec des faibles inductances. La fonction de transfert du filtre LCL lorsque $V_2 = 0$ est indiquée à l'équation (2.12) C'est un filtre de troisième ordre qui possède une atténuation théorique de $-60Db/décade$ (meilleure que celle du filtre L). Le filtre LCL réalise un meilleur découplage entre le filtre et l'impédance du réseau car il possède une sortie inductive au point commun de connexion au réseau. Donc, il y a deux raisons principales d'utiliser un filtre *LCL* au détriment d'un filtre *L* : premièrement, pour la même taille (volume), le filtre *LCL* a une meilleure atténuation que le filtre *L* ; deuxièmement, le filtre *LCL* évite le problème de la chute de tension qu'on pourrait avoir avec le filtre *L* et diminue davantage l'ondulation du courant à injecter au réseau. [29]

$$H(p)LCL = \frac{I2(p)}{V1(p)} = \frac{1}{L1CL2p^3 + (L1+L2)p} \quad (2.12)$$

II-9- Conclusion

Ce chapitre a été consacré à l'état de l'art d'un système PV. Des différentes architectures des systèmes PV connectés au réseau ont été présentées, nous avons aussi abordé une étude bibliographique sur les constituants des systèmes PV connectés au réseau, en particulier nous avons passé en revue les différentes topologies des convertisseurs statiques leur types et technique de commande dans le quelle une grande partie été consacré au convertisseur multi niveaux, et de voire les filtres passifs avec ces avantages et ces inconvénients.

Le chapitre suivant fait l'objet de la modélisation du système PV choisi pour notre étude.

Chapitre III :

Modélisation d'un système photovoltaïque
connecté au réseau électrique à l'aide d'un
convertisseur multi-niveaux de type NPC

III-1-Introduction

La modélisation nécessite un ensemble d'équations caractérisant tous les éléments du système étudié. A ce niveau, la condition qui s'impose c'est de connaître les critères d'entrées (donnée de base) c'est-à-dire les données météorologiques au niveau du site de l'installation de notre système, les données relatives aux utilisateurs, et les données relatives aux équipements.

Dans ce chapitre, une présentation est faite pour le modèle d'un générateur photovoltaïque, le modèle de l'hacheur survolteur BOOST et l'onduleur multi-niveaux de type NPC et en fin du réseau électrique.

III-2- Modélisation et mise en équation

Le système PV connecté au réseau électrique envisagé est composé d'un :

- générateur PV de puissance crête 100 kW
- convertisseur DC/DC élévateur (BOOST) de tension commandé en MPPT
- onduleur triphasé multi-niveaux, commandé avec un signal sinusoïdal PWM (MLI), et relié à un filtre LCL permettant le lissage du courant de sortie et visant à éliminer les harmoniques indésirables.
- Réseau MT relié avec une charge RL

III-3- Modélisation d'un générateur photovoltaïque

III-3-1- Cas d'une cellule idéale

Dans le cas idéal, la cellule d'une jonction PN soumise à l'éclairement photovoltaïque connecté à une charge peut être schématisée par un générateur de courant I_{ph} en parallèle avec une diode délivrant un courant selon la figure (III.1), qui représente le circuit équivalent d'une cellule solaire e idéale [30].

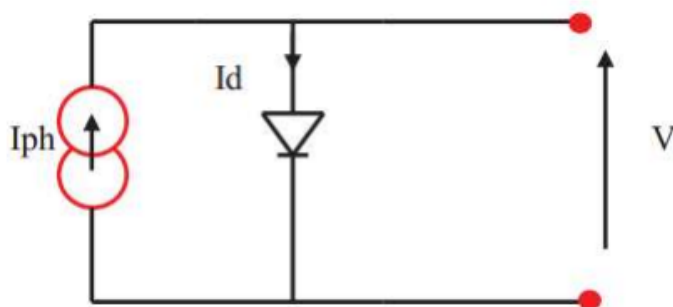


Figure III.1 : Schéma équivalent d'une cellule idéale

Les équations retenues de ce modèle sont:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d \quad (3.1)$$

Le courant I_{ph} est assimilé au courant I_{sc} avec $V_{pv} = 0$, courant de court-circuit obtenu en court-circuitant la charge.

$$I_{ph} = I_{sc} = \frac{E}{E_{ref}} \quad (3.2)$$

E: L'éclairement absorbé par la cellule

Eref: L'éclairement de référence (1000 w/m²)

$$I_d = I_0 \left(e^{\frac{V_d}{V_t}} - 1 \right) \quad (3.3)$$

I_0 : Courant de saturation inverse de la diode

$$I_t = \frac{nKT}{q} \quad (3.4)$$

I_t : Tension thermique

n : Facteur d'idéalité de la photopile

K : Constant de Boltzmann (1,38.10⁻²³J/K)

q : Charge de l'électron (1,6.10⁻¹⁹C)

III-3-2- Cas d'une cellule réelle

Une cellule photovoltaïque se comporte comme une source de courant shuntée par une diode figure (III.2). Le modèle est complété par une résistance série R_S et une résistance parallèle ou shunt R_{Sh} des contacts métalliques et une résistance de fuite périphérique due à la résistance de base et aux contributions des bords de la jonction et des contacts de surface avant et arrière Cellule. [23]

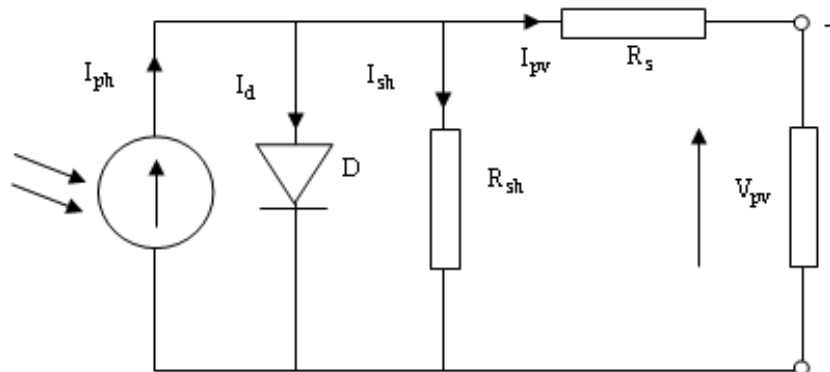


Figure III.2: Schéma équivalente d'une cellule réelle

Le courant délivré par la cellule est donné par la loi de Kirchhoff :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (3.5)$$

I_{pv} : Courant généré par la cellule photovoltaïque

I_{ph} : Photo courant créé par la cellule (proportionnel au rayonnement incident)

I_d : Le courant circulant dans la diode.

Le courant de la branche parallèle s'écrit :

$$I_{sh} = \frac{V_d}{R_{sh}}$$

La tension aux bornes de la diode étant égale à :

$$V_d = V_{pv} + R_s \cdot I_{pv}$$

Le courant de la diode représente le courant de fuite interne à une cellule causée par la jonction P-N de la cellule et s'écrit :

$$I_d = I_s \left(\exp\left(\frac{V_d}{V_t}\right) - 1 \right) \quad (3.6)$$

Avec :
$$Vt = \frac{n.K.Tc}{q}$$

Le courant de saturation inverse de la jonction I_s :

$$I_s = I_{sn} \left(\frac{Tc}{Tn} \right)^3 \cdot \exp \left(\frac{q.Eg}{n.k} \left(\frac{1}{Tn} - \frac{1}{Tc} \right) \right) \quad (3.7)$$

I_{sn} : est le courant de c-c de la cellule à la température de référence T_n et l'éclairement

T_c : Température de la jonction des cellules PV [$^{\circ}$ k]

T_n : Température de référence des cellules PV [$^{\circ}$ K]

n : facteur d'idéalité de la jonction

E_g : Energie de fap [ev]

$$I_{sn} = \frac{I_{ccn}}{\frac{q.V_{0c}}{e^{nKT_1}} - 1}$$

Le photo courant I_{ph} est directement dépendant du rayonnement solaire incident G et de la température de la cellule T_c , il est donné par la relation :

$$I_{ph} = I_{cc} = \frac{G}{G_0} (I_{phn} + K_i(Tc - Tn)) \quad (3.8)$$

$$K_i = \frac{I_{cc}(T_2) - I_{cc}(T_1)}{T_2 - T_1} \quad (3.9)$$

Avec :
$$K_i = 10^{-4} JK^{-1}$$

La température de la cellule T_c varie en fonction de l'éclairement et de la température ambiante, selon la relation linéaire :

$$Tc = Ta + \frac{Tn}{800} G \quad (3.10)$$

Ainsi Le courant fourni par le GPV peut s'écrire :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left(\exp^{\frac{q}{n \cdot K \cdot T_c} (V_{pv} + R_s \cdot I_{pv})} - 1 \right) - \frac{V_{pv} + R_s \cdot I_{pv}}{R_{sh}} \quad (3.11)$$

Avec :

I_{ph} : Le photo-courant [A]

I_{pv} : Courant débité par la cellule [A]

V_{pv} : Tension générée par la cellule [V]

I_s : Courant de saturation de la diode [A]

T_c : Température de la cellule [K]

a : Facteur d'idéalité de la cellule (n compris entre 1 et 2)

K : Constant de Boltzmann, $K=1,38 \cdot 10^{-23}$ [J/K]

q : Charge d'un électron, $q= 1.16 \cdot 10^{-19}$ [C]

Puissance fournie :

$$P = V_{pv} \cdot I_{pv} = V_{pv} \left(I_{ph} - I_s \left(\exp^{\frac{q}{a \cdot K \cdot T_c} (V_{pv} + R_s \cdot I_{pv})} - 1 \right) - \frac{V_{pv} + R_s \cdot I_{pv}}{R_{sh}} \right) \quad (3.12)$$

III-4- Modélisation du convertisseur DC-DC BOOST et de la commande MPPT

III-4-1- hacheur BOOST

Les calculs des paramètres du hacheur BOOST se fait à l'aide des formules ci-dessous [23] :

Le rapport cyclique α :

$$V_{pv} = V_c \frac{1}{(1-\alpha)} \gg \alpha = 1 - \frac{V_{pv}}{V_c} \quad (3.13)$$

Résistance R :

$$P_c = \frac{V_c^2}{R} \gg R = \frac{V_c^2}{P_c} \quad (3.14)$$

Nous aurons ainsi :

$$\Delta i_L = \frac{1}{2} (i_L(\alpha \cdot T_s) - i_L(0)) \quad (3.15)$$

Ainsi l'inductance (L) peut être calculée comme suit :

$$VL = L \frac{diL}{dt} \gg V_{pv} = L \frac{diL}{dt} \quad (3.16)$$

En utilisant $V_L(t) = V_{pv}$ dans le premier sous-intervalle. Le courant i_L de la première période est donné par :

$$i_L(\alpha.Ts) = i_L(0) + \frac{V_{pv}}{L}(\alpha Ts) \quad (3.17)$$

Si on remplace ce dernier dans la première équation on obtient

$$\Delta iL = \frac{V_{pv}}{2.\Delta iL.Fs} \alpha \quad (3.18)$$

Et on en déduit la formule utilisée pour calculer la valeur de L'inductance L

Avec :

$$Fs = \frac{1}{Ts}$$

$$L = \frac{V_{pv}}{2.\Delta iL.Fs} \alpha \quad (3.19)$$

Capacité C :

Nous aurons ainsi :

$$i_C = C \frac{dV_C}{dt}$$

En calculant :

$$\int_{\Delta Ts}^{Ts} V_C = \frac{1}{C} \int_0^{\alpha Ts} i dt$$

Nous obtenons :

$$-2\Delta V_C = \frac{(-1)V_S}{c.R} \alpha Ts \gg C = \frac{V_C}{2\Delta V_C R F_S} \alpha \quad (3.20)$$

III-4-2- commande MPPT

La commande en MPPT se fait selon le schéma synoptique suivant :

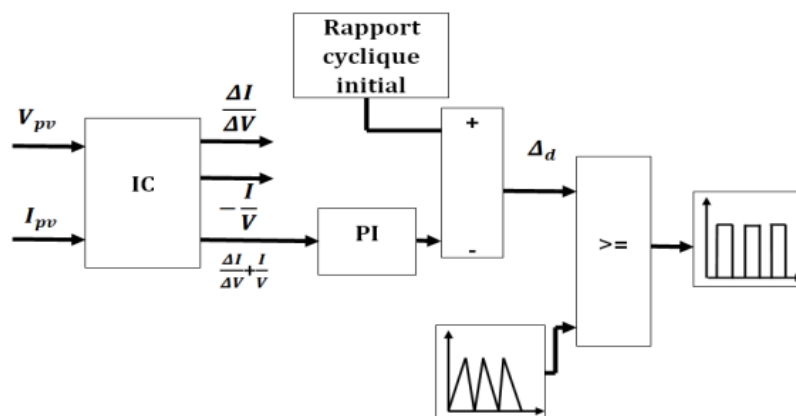


Figure III.3 : L'MPPT avec incrément de la conductibilité

Au point de puissance maximale du générateur PV on doit avoir :

- ✓ $\frac{dP}{dV} = 0 \gg \frac{d(V.I)}{dV} = 0 \gg I + V \cdot \frac{dI}{dV} = 0 \gg \frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V}$
- ✓ Erreur $= \frac{dI}{dV} + \frac{1}{V}$: doit tendre vers 0.
- ✓ Sortie du régulateur PI= correction du rapport cyclique (CRC) de façon que : $-5 \cdot 10^{-3} < CRC < 5 \cdot 10^{-3}$ qui représente le pas de changement du rapport cyclique ; avec $0 < \Delta d < 1$.

III-5- Modélisation d'un onduleur à trois niveaux type NPC

On considère un onduleur triphasé du type NPC «Neutral Point Clampe» commandé en MLI avec boucle de verrouillage de phase et de réglage du courant et de tension.

Son modèle est donné par la figure (III.4.) qui suit.

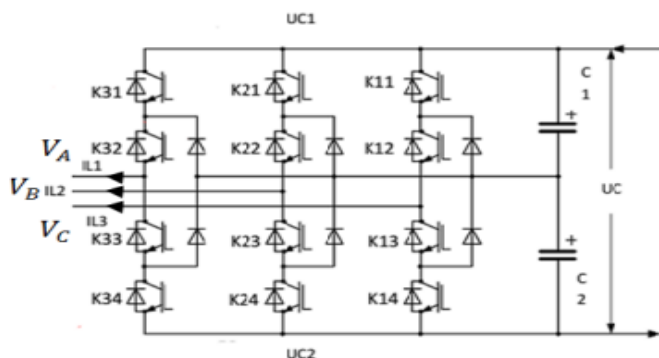


Figure III.4 : Modèle de l'onduleur triphasé NPC

III-5-1- Commande complémentaire des onduleurs à trois niveaux

Pour un onduleur à trois niveaux, on définit la commande complémentaire suivante :

B_{ks} : La commande de base de transistor T_{ks} du bras k.

k: Le numéro du bras (k =1, 2, 3). [41]

III-5-2- Modèle de connaissance

On définit le modèle de connaissance des onduleurs à trois niveaux en utilisant la notion de fonction de connexion des interrupteurs et demi bras.

La commande complémentaire s'exprime en utilisant ces fonctions de connexion comme suit [41]:

(F_{ks}) : La fonction de connexion de chaque interrupteur qui décrit son état fermé ou ouvert. Cette fonction est définie comme suit :

$$F_{ks} = \begin{cases} 1 & \text{si } TD_{ks} \text{ est fermé} \\ 0 & \text{si } TD_{ks} \text{ est ouvert} \end{cases}$$

On définira la fonction de connexion du demi -bras F_{km} comme suit :

m=1 Le demi bras du haut

m=0 Le demi bras du bas

Les fonctions de connexion des demi bras s'expriment, en fonction de celles des interrupteurs comme suit :

Avec F_{k1}^b et F_{k0}^b respectivement pour le demi-bras du haut et, celui du bas.

F_{km} vaut "1" dans le cas où les interrupteurs du demi bras sont tous fermés, et nulle dans tous les autres cas.

Le tableau (III.1.) présente la table d'excitation des interrupteurs d'un bras d'onduleur à trois niveaux

Tableau III.1 : Table d'excitation des interrupteurs d'un bras de l'onduleur à trois niveaux.

Etat des interrupteurs				Tension bloquée
F_{k1}	F_{k2}	F_{k3}	F_{k4}	V_k
1	1	0	0	$E/2$
0	1	0	1	0
1	0	1	0	$-E/2$
0	0	1	1	0

III-5-3- Principe fonctionnement de l'onduleur NPC a trois niveaux

Pour décrire le fonctionnement de l'onduleur triphasé de type NPC, on considère un seul bras dont la structure est représentée par la figure (III.5). Il faut déterminer les valeurs que peut prendre la tension simple V_{ao} entre la borne "a" de la charge et le point neutre O. Cette tension est entièrement définie par l'état (0 ou 1) des quatre interrupteurs K_1 , K_2 , K_3 et K_4 du bras.

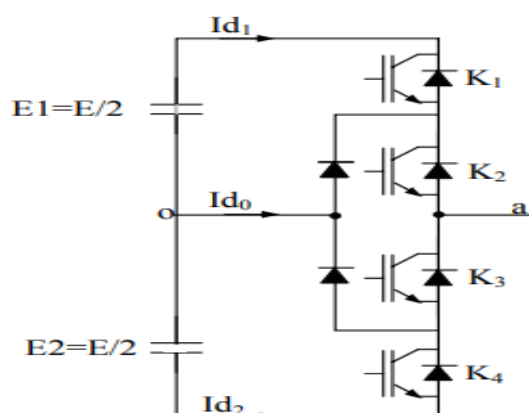


Figure III.5 : Bras d'onduleur à trois niveaux

Le sens positif ou négatif des courants I_{d0} , I_{d1} et I_{d2} fixe le sens du transfert de l'énergie du convertisseur. Lorsque la source de tension est génératrice et la charge est réceptrice, le courant passe à travers les transistors. Lorsque le transfert d'énergie s'effectue de la charge vers la source d'entrée, ce sont les diodes antiparallèles qui assurent le passage du courant.

Sur les $2^4 = 16$ séquences possibles, seules trois séquences sont mises en œuvre. Toutes les autres séquences ne sont pas fonctionnelles, et sont donc à éviter. En effet, elles provoquent, soient, des court-circuits des sources de tension continue :

- court-circuit d'E1 et d'E2 avec les séquences [1111] et [1001],
- court-circuit d'E1 avec les séquences [1110], [1000] et [1010],
- court-circuit d'E2 avec les séquences [0111], [0001] et [0101].

Soient, elles provoquent la déconnexion de la charge pour la séquence [0000]. Soient encore, elles ne permettent pas d'assurer la connexion de la charge au point neutre pour les séquences [0100] et [0010].

La figure (III.6) montre les configurations du bras de l'onduleur de type NPC qui correspond aux trois séquences fonctionnelles suivantes:

- Séquence 1: K1, K2 sont passants et K3, K4 sont bloqués (figure (III.6.a)), on a:

La tension de sortie est :

$$V_{ao} = +E/2.$$

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{K3} = V_{K4} = +E/2.$$

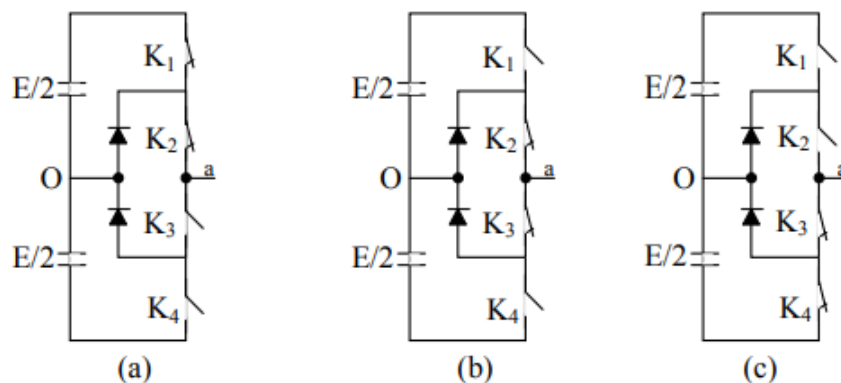


Figure III.6 : Les différentes configurations fonctionnelles d'un bras

➤ Séquence 2: K2, K3 sont passants et K1, K4 sont bloqués (figure (III.6.b)), on a :
La charge est mise en court-circuit à travers l'un des interrupteurs K2 ou K3 et l'une des diodes de bouclage (roue libre). Donc, le point à est relié directement au point neutre O.

Alors, la tension de sortie V_{ao} est nulle :

$$V_{ao} = 0.$$

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{K1} = V_{K4} = +E/2.$$

➤ Séquence 3: K1, K2 sont bloqués et K3, K4 sont passants (figure (III.6.c)), on a :
La tension de sortie est :

$$V_{ao} = -E/2.$$

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{K1} = V_{K2} = +E/2.$$

Les séquences 1, 2 et 3 vont s'enchaîner durant chaque période de la façon suivante : 1-2-3-2.

Pour visualiser l'enchaînement des séquences décrites ci-dessus, la figure (III.7) montre les formes d'onde de la tension de sortie V_{ao} , ainsi que les signaux de commande de chaque interrupteur.

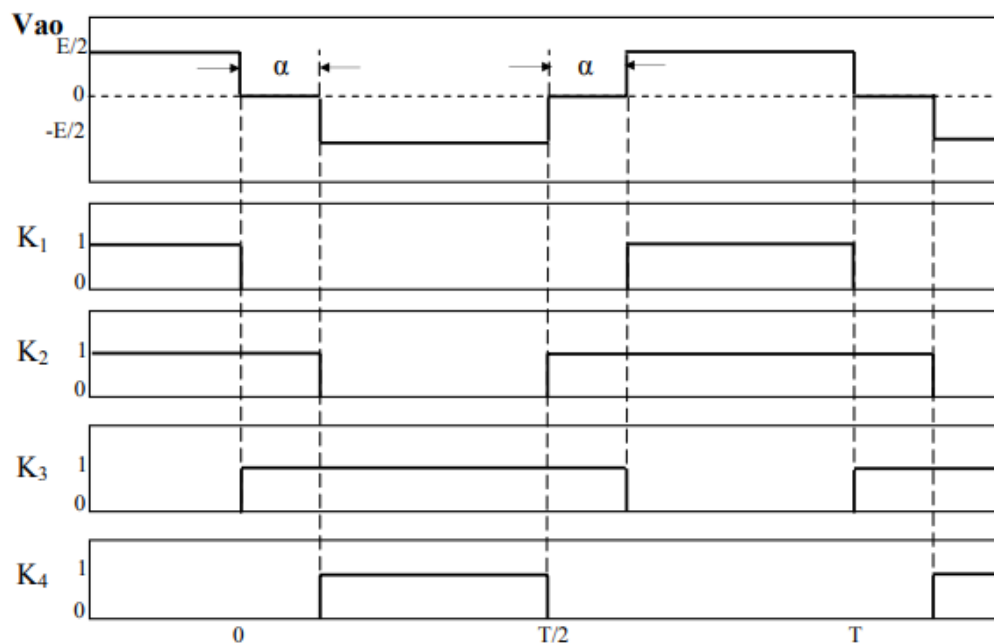


Figure III.7 : Formes d'ondes d'un bras d'onduleur triphasé de type NPC

Cette analyse montre que, la structure de l'onduleur à trois niveaux limite à $E/2$ la tension imposée à chaque interrupteur lorsqu'il est bloqué, alors que dans la structure classique de l'onduleur à deux niveaux, cette tension vaut la tension continue complète E . C'est cette caractéristique de l'onduleur à trois niveaux qui permet de monter en tension et en puissance, dans le cas des applications de forte puissance. [40]

III-5-4- Modulation sinusoïdale à triangles multiples

Cette technique est basée, dans son principe, sur la modulation sinusoïdale classique. Pour un onduleur à trois niveaux, elle recommande l'utilisation de deux signaux triangulaires de même fréquence f_c et de même amplitude A_c (crête à crête). Ces signaux triangulaires sont comparés, pour chaque phase, avec un signal de référence d'amplitude A_s et de fréquence f_s . C'est la modulation sinusoïdale à double triangle.

Pour les onduleurs avec un nombre de niveaux m supérieur à trois, la technique sinusoïdale classique avec son signal triangulaire unique, ne permet pas la génération de tous les signaux de commande requis. Alors, c'est la modulation sinusoïdale à triangles multiples qui le permet. Cette technique nécessite $(m-1)$ signaux triangulaires de même fréquence f_c et de même amplitude A_c .

Le taux de modulation m_a et le rapport de fréquence m_f sont donnés respectivement par les expressions suivantes :

$$ma = \frac{As}{Ac(m-1)} \quad (3.21)$$

$$mf = \frac{fc}{fs} \quad (3.22)$$

II-5-5- Régulation des courants des boucles internes

Dans le cadre de l'application de la commande MLI, un régulateur de type PI a été utilisé pour la régulation de la boucle de courant, qui est représenté par la figure (III.8)

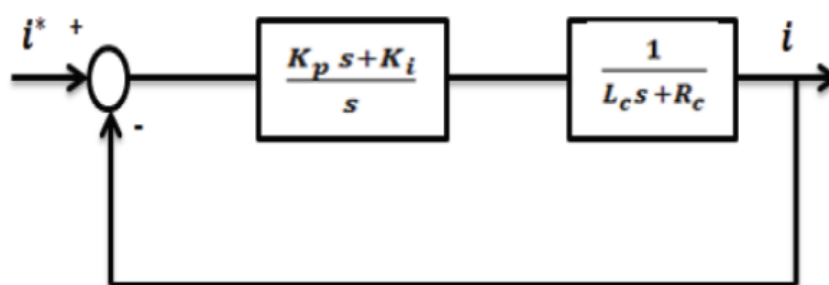


Figure III.8: Schéma de la boucle interne du courant

En boucle fermée, nous obtenons la fonction de transfert suivante :

$$\frac{i}{i'} = \frac{Kp}{Lc} \frac{s + \frac{Ki}{Kp}}{s^2 + \frac{5Rs + Kp}{Lc} + \frac{Ki}{Lc}} \quad (3.23)$$

Avec i et i' représentent respectivement le courant à la sortie de l'onduleur et le courant de référence.

En comparant avec la fonction de transfert standard qui est de la forme :

$$F(s) = \frac{2\varepsilon\omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + 2\varepsilon\omega_n s + \omega_n^2} \quad (3.24)$$

Nous obtenons alors les paramètres du régulateur de courant égaux à :

$$Kpi = 2\varepsilon\omega_n Lc - Rc \quad Kii = Lc\omega_n^2 \quad \text{Avec} \quad \varepsilon = \frac{\sqrt{2}}{2}$$

En remplaçant Kp et Ki par leurs expressions nous obtenons l'équation suivante :

$$Ci(s) = \frac{2\varepsilon\omega_n i Lc - Rc s + Lc\omega_n^2 i}{s} \quad (3.25)$$

En supposant $Lc = 15\text{mH}$ et $Rc = 0.01$ Avec $\omega = 300$

La formule qui permet de discrétiser l'équation est la suivante :

$$C(s) = Kp + \frac{Ki}{s}$$

$$C(z) = Kpi + Kii \frac{Tsc}{z-1}$$

$$C(z) = \frac{Kpi.z + Kii * Tsc - Kpi}{z-1}$$

$$C(z) = \frac{Pil.z + Pi0}{z-1} \quad (3.26)$$

Nous obtenons alors :

$$Pil = Kpi$$

$$Pi0 = Kii * Tsc - Kpi$$

Tsc : Temps d'échantillonnage

III-5-6- Condition de synchronisation Onduleur Réseau

Dans le but de réaliser la synchronisation du convertisseur (onduleur) avec le réseau électrique, une PLL a été utilisée. Cette dernière est représentée par la figure (III.9)

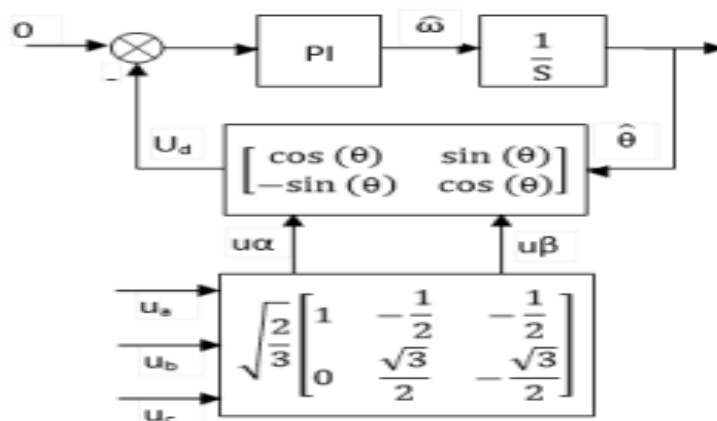


Figure III.9 : Schéma de principe d'une PLL

Le principe de la méthode utilise une propriété fondamentale de la transformation de Park, en effet soit un système de tension triphasé équilibré de pulsation ω .

$$\begin{bmatrix} ua \\ ub \\ uc \end{bmatrix} = \sqrt{2} U \begin{bmatrix} \sin(\omega t) \\ \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

La transformation de Concordia donne :

$$U\alpha\beta = TUabc$$

$$\begin{bmatrix} u\alpha \\ u\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} ua \\ ub \\ uc \end{bmatrix}$$

La rotation conduit à :

$$Udq = RU\alpha\beta$$

$$\begin{bmatrix} ud \\ uq \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u\alpha \\ u\beta \end{bmatrix}$$

On peut alors écrire :

$$Udq = RTUabc = \frac{2}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin(\omega t) \\ \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix}$$

$$Udq = \frac{2}{\sqrt{3}} U \begin{bmatrix} \sin(\omega t) \\ \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{3}{2}(\omega t) \\ -\frac{3}{2}(\omega t) \end{bmatrix}$$

$$= \sqrt{3} U \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin(\omega t) \\ -\cos(\omega t) \end{bmatrix}$$

$$Udq = \sqrt{3} U \begin{bmatrix} \sin(\omega t - \theta) \\ \cos(\omega t + \theta) \end{bmatrix} Udq = \sqrt{3} U \begin{bmatrix} \sin(\theta' - \theta) \\ \cos(\theta' + \theta) \end{bmatrix}$$

Avec :

$$\theta' = \omega t \quad \theta: \text{Angle de PARK}$$

Ainsi pour satisfaire une synchronisation on doit avoir la dérivée de l'angle instantané intervenant dans la transformation est égale ω ou encore :

$$\theta = \theta'$$

Et par conséquent :

$$Ud = 0$$

Les tensions simples u_a, u_b, u_c , mesurées au point de raccordement, subissent dans un premier temps la transformation de Concordia. Les tensions ainsi obtenues sont exprimées dans le repère de Park. L'angle de cette rotation est issu de l'intégration de l'estimation de la pulsation, déterminée par le régulateur PI.

En considérant que pour les petites valeurs de :

$$\Delta\theta' = \theta' - \theta$$

Le terme : $\sin(\Delta\theta') \approx \Delta\theta'$

La fonction de transfert de ce système en boucle fermée est alors égale à :

$$\frac{\theta}{\theta'} = \frac{\sqrt{3}VmKp\left(\frac{1+\tau is}{\tau is}\right)\frac{1}{s}}{1+\sqrt{3}VmKp\left(\frac{1+\tau is}{\tau is}\right)\frac{1}{s}} \quad (3.28)$$

En comparant avec la fonction de transfert de deuxième ordre :

$$F(s) = \frac{2\varepsilon\omega n s + \omega^2 n}{s^2 + 2\varepsilon\omega n s + \omega^2 n} \quad (3.29)$$

Nous obtenons :

$$Kp = \frac{2\varepsilon\omega n}{\sqrt{3}Vm} \quad \text{Et} \quad \tau i = \frac{2\varepsilon}{\omega n}$$

III-6- Modélisation de l'interface réseau

Les charges sont les éléments consommateurs de puissance électrique dans un système. La consommation de cette puissance électrique dépend des caractéristiques de la charge. Une modélisation correcte de ces caractéristiques est indispensable pour représenter finement le comportement de la charge. La Figure (III.8) nous montre le modèle de la charge connectée à l'onduleur de tension : [28]

- le filtre LC
- les charges équilibrées de nature RL
- le réseau électrique

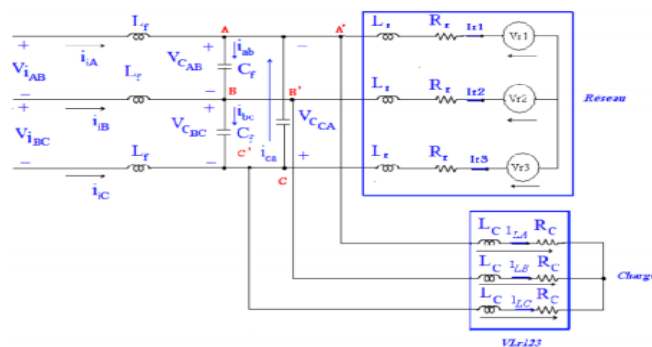


Figure III.8 : Schéma de l'interface de connexion d'un onduleur au réseau électrique alternatif ou à une charge.

III-7 Modélisation d'onduleur et du filtre LC et la charge (RLCL)

Le modèle d'état de l'ensemble de sortie d'onduleur, filtre LC et la charge (*RCLC*) est donnée par la Figure (III.9) [28]

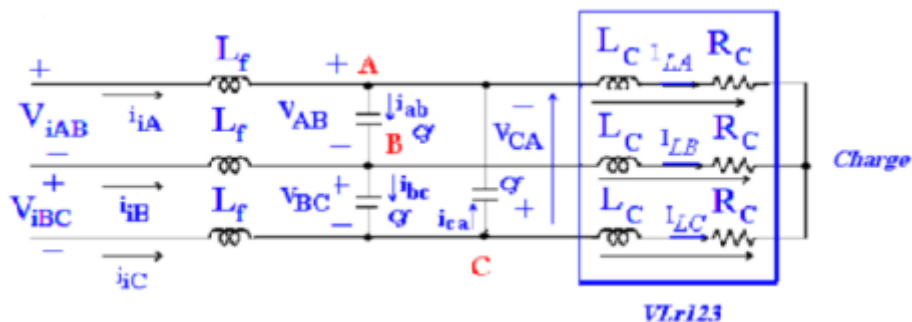


Figure III.9 : Schéma du filtre LC et la charge RL

En appliquant la loi de Kirchhoff aux nœuds A, B, et C, les équations des courants et des tensions du filtre LC décrites par la figure (III.9), sont données comme suit :

Nœuds(A) :

$$I_{iA} + I_{ca} = I_{AB} + I_{LA} \rightarrow I_{iA} + Cf \frac{dV_{CA}}{dt} = Cf \frac{dV_{AB}}{dt} + I_{LA} \quad (3.3)$$

Nœuds(B) :

$$I_{iB} + I_{ab} = I_{bc} + I_{LB} \rightarrow I_{iB} + Cf \frac{dV_{AB}}{dt} = Cf \frac{dV_{AC}}{dt} + I_{LB} \quad (3.31)$$

Nœuds(C) :

$$I_{iC} + I_{bc} = I_{ca} + I_{LC} \rightarrow I_{iC} + Cf \frac{dV_{BC}}{dt} = Cf \frac{dV_{CA}}{dt} + I_{LC} \quad (3.32)$$

Avec :

$$I_{ca} = Cf \frac{dV_{CA}}{dt}, I_{ab} = Cf \frac{dV_{AV}}{dt}, I_{bc} = \frac{dV_{BC}}{dt}$$

En substituant (3.31) dans (3.30), on trouve :

$$\begin{aligned} I_{iA} - I_{iB} + Cf \left(\frac{dV_{CA}}{dt} - \frac{dV_{AB}}{dt} \right) &= Cf \left(\frac{dV_{AB}}{dt} - \frac{dV_{BC}}{dt} \right) + I_{LA} - I_{LB} \\ \rightarrow Cf \left(\frac{dV_{CA}}{dt} + \frac{dV_{BC}}{dt} - 2 \frac{dV_{AB}}{dt} \right) &= -I_{iA} + I_{iB} + I_{LA} - I_{LB} \end{aligned} \quad (3.33)$$

En substituant (3.32) dans (3.31), on trouve :

$$\begin{aligned} I_{ib} - I_{ic} + Cf \left(\frac{dV_{AB}}{dt} - \frac{dV_{BC}}{dt} \right) &= Cf \left(\frac{dV_{BC}}{dt} - \frac{dV_{CA}}{dt} \right) + I_{LB} - I_{LC} \\ \rightarrow Cf \left(\frac{dV_{AB}}{dt} + \frac{dV_{CA}}{dt} - 2 \frac{dV_{BC}}{dt} \right) &= -I_{iB} + I_{iC} + I_{LB} - I_{LC} \end{aligned} \quad (3.34)$$

En substituant (3.30) dans (3.32), on trouve :

$$\begin{aligned} I_{iC} - I_{iA} + Cf \left(\frac{dV_{BC}}{dt} - \frac{dV_{CA}}{dt} \right) &= Cf \left(\frac{dV_{CA}}{dt} - \frac{dV_{AB}}{dt} \right) + I_{LC} - I_{LA} \\ \rightarrow Cf \left(\frac{dV_{BC}}{dt} + \frac{dV_{AB}}{dt} - 2 \frac{dV_{CA}}{dt} \right) &= -I_{iC} + I_{iA} + I_{LC} - I_{LA} \end{aligned} \quad (3.35)$$

Afin de simplifier l'équation (3.33) et (3.34), nous utilisons le rapport de la somme des tensions algébriques égales à zéro entre les phases de la charge, tel que :

$$V_{AB} + V_{BC} + V_{CA} = 0 \quad (3.36)$$

D'après l'équation (3.33), l'équation (3.34) et (3.35) peuvent être écrites respectivement comme suit :

$$\begin{cases} \frac{dV_{AB}}{dt} = \frac{1}{3cf} I_{iAB} - \frac{1}{3cf} (I_{LAB}) \\ \frac{dV_{AC}}{dt} = \frac{1}{3cf} I_{iBC} - \frac{1}{3cf} (I_{LBC}) \\ \frac{dV_{CA}}{dt} = \frac{1}{3cf} I_{iCA} - \frac{1}{3cf} (I_{LCA}) \end{cases} \quad (3.36)$$

Avec :

$$I_{iAB} = I_{iA} - I_{iB}, I_{iBC} = I_{iB} - I_{iC}, I_{iCA} = I_{iC} - I_{iA}$$

Et

$$I_{LAB} = I_{LA} - I_{LB}, I_{LBC} = I_{LB} - I_{LC}, I_{LCA} = I_{LC} - I_{LA} \quad (3.37)$$

En appliquant la loi des mailles aux tensions du côté de l'onduleur, les équations des courants peuvent être écrites comme suit :

$$\begin{cases} \frac{dI_{AB}}{dt} = \frac{1}{L_f} L_{AB} - \frac{1}{L_f} (V_{iAB}) \\ \frac{dI_{BC}}{dt} = \frac{1}{L_f} L_{BC} - \frac{1}{L_f} (V_{iBC}) \\ \frac{dI_{CA}}{dt} = \frac{1}{L_f} L_{CA} - \frac{1}{L_f} (V_{iCA}) \end{cases} \quad (3.38)$$

En appliquant la loi des mailles du côté charge, les équations des tensions peuvent être décrites comme suit :

$$\begin{cases} VAB = Lr \frac{diLA}{dt} + RciLA - Lc \frac{diLB}{dt} - RciLB \\ VBC = Lr \frac{diLB}{dt} + RciLB - Lc \frac{diLC}{dt} - RciLC \\ VCA = Lr \frac{diLC}{dt} + RciLC - Lc \frac{diLA}{dt} - RciLA \end{cases} \quad (3.39)$$

L'équation (3.39) peut être réécrite comme suit :

$$\begin{cases} \frac{diLAB}{dt} = -\frac{Rc}{Lc} LAB - \frac{1}{Lc} VLAB \\ \frac{diLBC}{dt} = -\frac{Rc}{Lc} LBC - \frac{1}{Lc} VLBC \\ \frac{diLCA}{dt} = -\frac{Rc}{Lc} LCA - \frac{1}{Lc} VLCA \end{cases} \quad (3.40)$$

III-8- Conclusion

La modélisation de chaque composant du système photovoltaïque complet a été élaborée à partir des modèles de la littérature (générateur PV, convertisseur DC/DC, le MPPT, l'onduleur NPC, filtre et charge) ; cette modélisation est une étape essentielle permet d'introduire un certain nombre de modèles puis évaluer la caractéristique de chaque élément de l'installation ainsi les paramètres constitutants. Dans un système énergétique photovoltaïque, on désire toujours travailler au voisinage du point de puissance maximale MPPT, afin de minimiser au maximum les pertes en énergie produite. Pour voir l'efficacité de la méthode d'optimisation P&O dans le rôle de suivre le point de puissance maximale.

Le chapitre suivant est consacré à la simulation globale de notre système PV choisi.

Chapitre IV :

Simulation et interprétation

Des résultats

IV-1- Introduction

Dans ce chapitre nous avons utilisé l'outil MATLAB /SIMULINK pour simuler tous les équipements représentant le système photovoltaïque connecté au réseau électrique tel que le générateur photovoltaïque, le hacheur survolteur (BOOST), l'onduleur multi-niveaux de type NPC avec la méthode de commande MLI et en fin la charge.

Afin de maximiser l'efficacité du système d'énergie renouvelable, il est nécessaire de poursuivre le point de puissance maximale (MPP) de la source d'entrée. Dans ce contexte, nous proposons un système de commande MPPT par une méthode classique P&O pour améliorer l'efficacité de conversion d'énergie PV.

IV-2-Système photovoltaïque connecté au réseau électrique proposé

Le système que nous proposons pour l'étude et la simulation est schématisé par la Figure (IV.1)

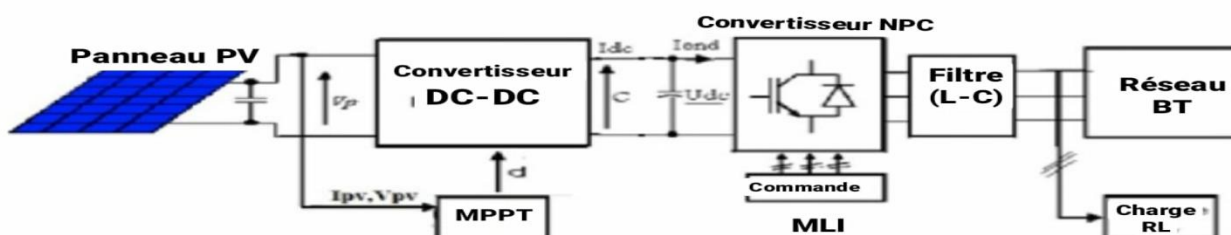


Figure IV.1 : Schéma synoptique d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique

Le modèle de la centrale photovoltaïque représenté par la Figure (IV.1) est constitué de:

Générateur photovoltaïque :

Formé de 10 modules avec un nombre $N_s = 60$ de cellules en série. Nous avons étudié l'influence des paramètres extérieurs, l'éclairement et la température sur les caractéristiques (courant-tension, puissance-tension).

Convertisseur DC-DC :

Ce convertisseur est connu par le nom d'élevateur de tension (BOOST), qui est l'étage d'adaptation (DC-DC) entre le (GPV) et la charge de sortie. Cette structure correspond à un système plus communément appelé, système autonome. L'étage d'adaptation dispose d'une commande (MPPT) (Maximum Power Point Tracking) qui lui permet de rechercher le (PPM) que peut fournir un panneau solaire photovoltaïque.

Convertisseur DC-AC :

On va choisir dans ce travail l'onduleur à trois niveaux de type NPC commandé par MLI.

Filtre LC :

Le filtre LC élimine les harmoniques de découpage presque parfaitement et son comportement est quasiment idéal lorsqu'on travaille à vide (courant de sortie nul) et avec des signaux de fréquences voisines de la fréquence fondamentale [8].

Pour pouvoir connecter l'onduleur de tension en parallèle avec le réseau et le faire travailler comme une source de courant, il est nécessaire d'utiliser un filtre de raccordement de nature inductive (L ou LCL). La fonction de ce filtre permet d'une part de convertir le compensateur en un dipôle de courant du point de vue du réseau, et d'autre part de réduire la dynamique du courant, de façon à le rendre plus facile à contrôler.

Le filtre de type (L) permet de diminuer les harmoniques autour de la fréquence de commutation. Pour obtenir cela, la valeur de cette inductance doit être relativement élevée, cependant cette augmentation peut mettre en risque la capacité de compensation du système. Le filtre (LCL) est l'autre alternative de raccordement. [8]

La charge :

Nous avons choisi une charge équilibrée (RL) sur le côté (AC) Alternatif.

Le réseau électrique :

Il représente le réseau électrique de distribution publique d'amplitude $V_r = 800$ V et de fréquence $f = 50$ Hz

IV-3- Générateur photovoltaïque

On va choisir dans ce travail le générateur PV de 10 modules 1Soltech 1STH-215-P en série, qui contient de 72 cellules solaire en série dans chaque module.

Les caractéristiques électriques de ce panneau photovoltaïque sont données par le tableau suivant :

Tableau IV.1 : caractéristiques électriques de Module PV.

Caractéristiques électriques à :	$E=1000 \text{ W/m}^2$, $T=25 \text{ }^\circ\text{C}$
Puissance maximale de module (P_{\max})	213.5 W
Courant de court-circuit (I_{CC})	7.84 A
Tension de circuit ouvert (V_{oc})	36.3 V
Courant au point de MPPT (I_m)	7.35 A
Tension au point de MMPT (V_m)	29 V
Nombre des cellules par module	60
Nombre de modules en série (N_s)	10

IV-3-1- Caractéristiques de panneau 1Soltech 1STH-215-P

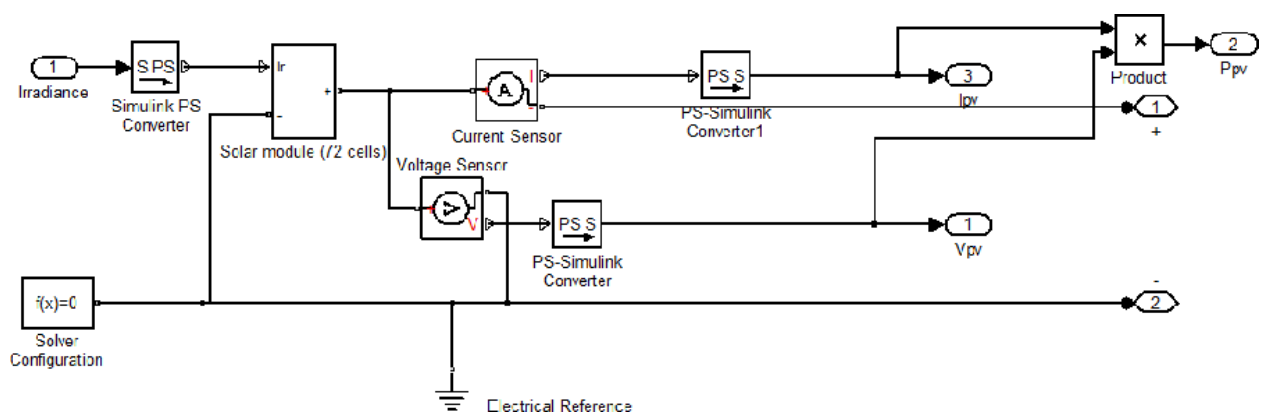


Figure IV.2 : Module photovoltaïque sous MATLAB

La simulation d'un générateur PV sous les conditions standard ($E=1000 \text{ w/m}^2$ et $T=25^\circ$), a donnée les courbes présenté dans la figure (IV.3) et (IV.4)

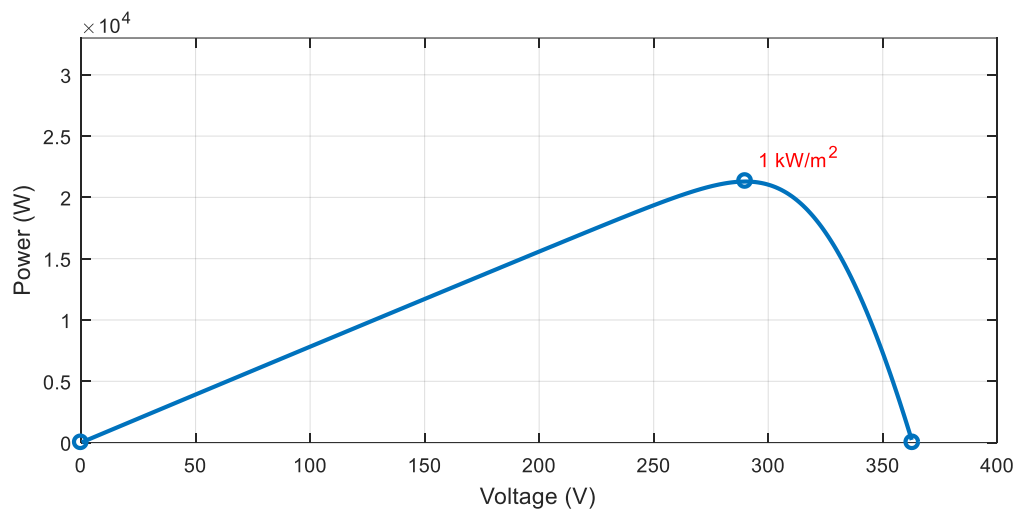


Figure IV.3 : caractéristique (V-P) du générateur PV

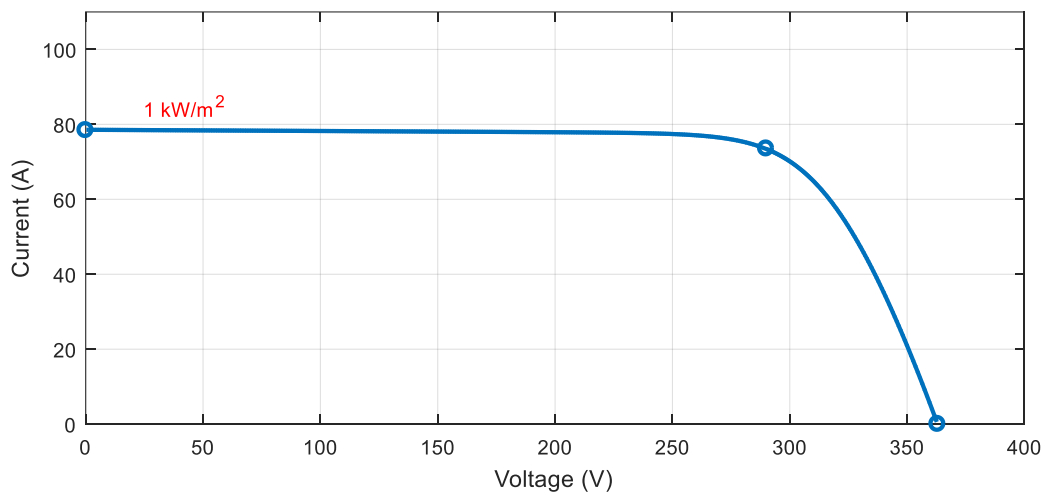


Figure IV.4 : caractéristique (V-P) du générateur PV

IV-3-2- Simulation du générateur (GPV) à éclairement et température variable

Afin de constater l'influence des conditions externes de l'éclairement et de la température (E , T) sur la caractéristique (I-V) (P-V), nous avons adopté la méthode suivante :

1- Pour visualiser l'influence de l'éclairement, on fixe la température ambiante ($T=25^\circ$) et on fait varier l'éclairement dans une gamme suffisante.

En faisant varier l'éclairement (E) entre 200 et 1000 avec un pas de 200, la caractéristique ($P=f(V)$) est donnée par la figure (IV.5) et la caractéristique ($I=f(V)$) est donnée par la figure (IV.6) :

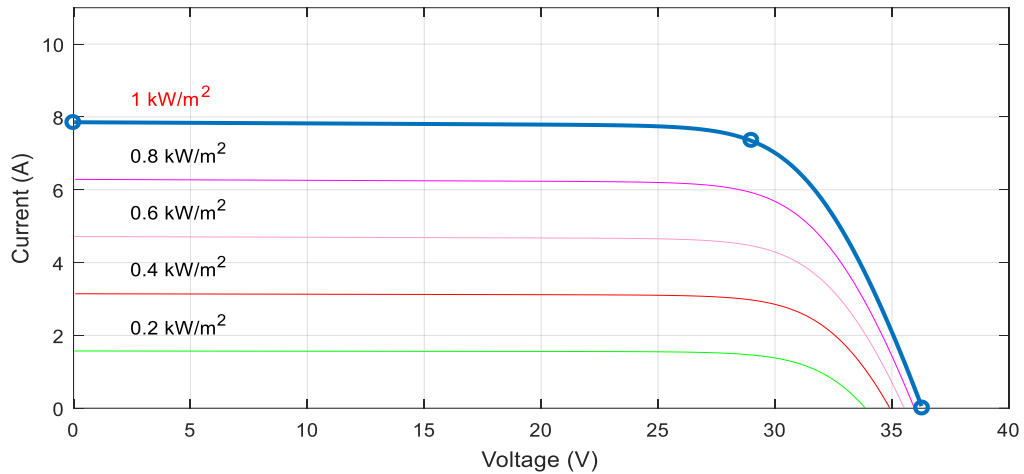


Figure IV.5 : Influence de variation de l'éclairement sur la caractéristique (I-V)

On remarque une forte diminution du courant de court-circuit par rapport l'éclairement (E) et une faible diminution de tension de circuit ouvert.

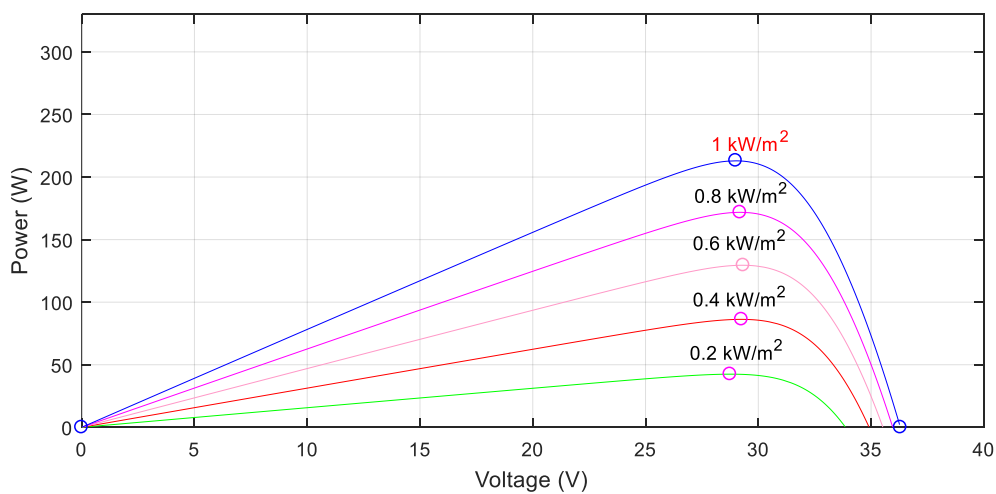


Figure IV.6 : Influence de variation de l'éclairement sur la caractéristique (P-V)

On remarque sur les figures (III.5) et (III.6) que l'éclairement influe proportionnellement sur la puissance et la tension de circuit ouvert de GPV.

2- Pour un éclairement constant ($E=1000 \text{ w/m}^2$), on varie la température afin de voir l'influence de celui-ci par rapport aux caractéristique de générateur PV.

En faisant varier la température ambiante (T) entre (25c° et 40c°) avec pas de 5c°

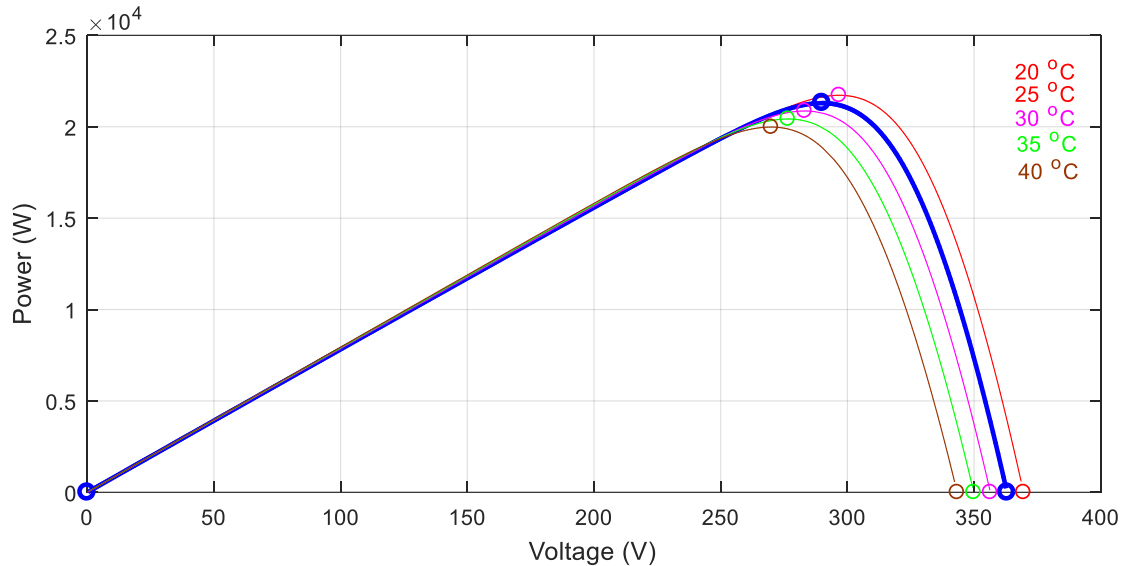


Figure IV.7 : Influence de variation de température sur la caractéristique (P-V)

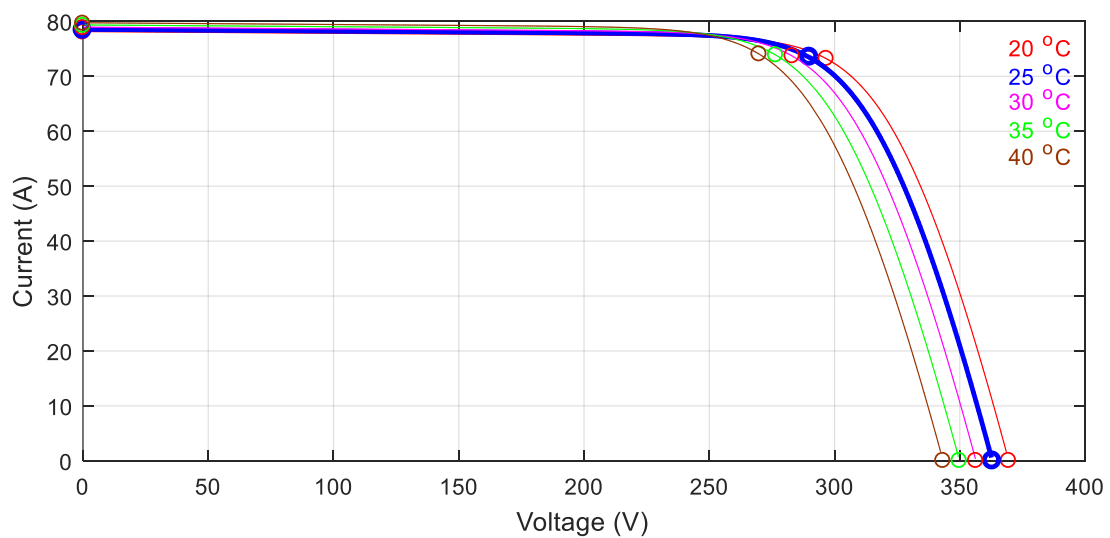


Figure IV.8 : Influence de variation de température sur la caractéristique (I-V)

L'effet de l'augmentation de température fait diminuer la tension du circuit ouvert de GPV, contrairement au courant de court-circuit qui reste constant.

IV-4- Simulation de l'hacheur survolteur (BOOST)

Parmi les techniques de commande à MPPT du hacheur (BOOST) décrites au chapitre II, nous avons choisi la méthode de perturbe & observe. Le schéma de simulation est donné par la Figure (IV.9)

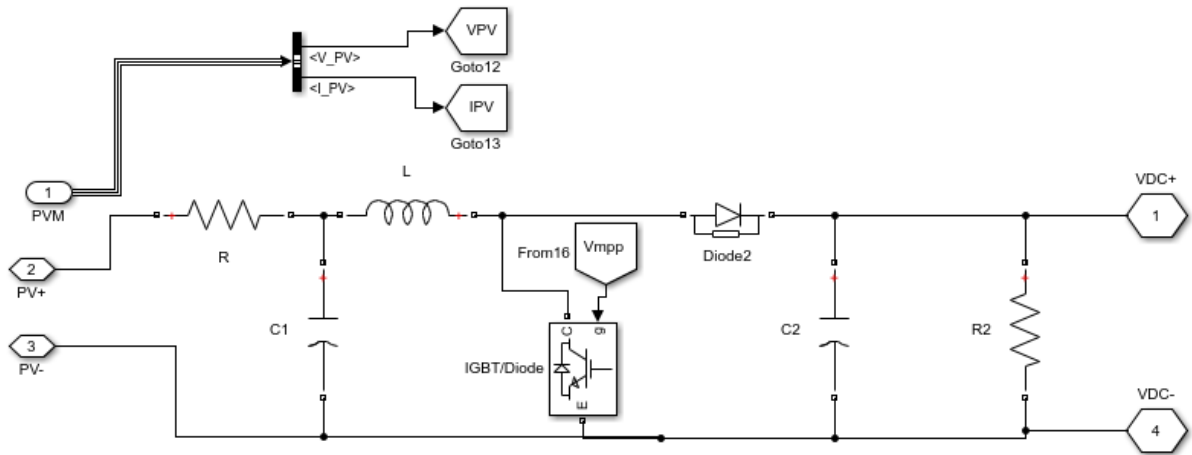


Figure IV.9 : simulation d'un hacheur BOOST

IV-4-1- Commande MPPT

On va simuler la commande de P&O à partir de l'organigramme qui présente dans le chapitre II.

La simulation de perturbe et observe présenté sur la figure (IV.10) suivante :

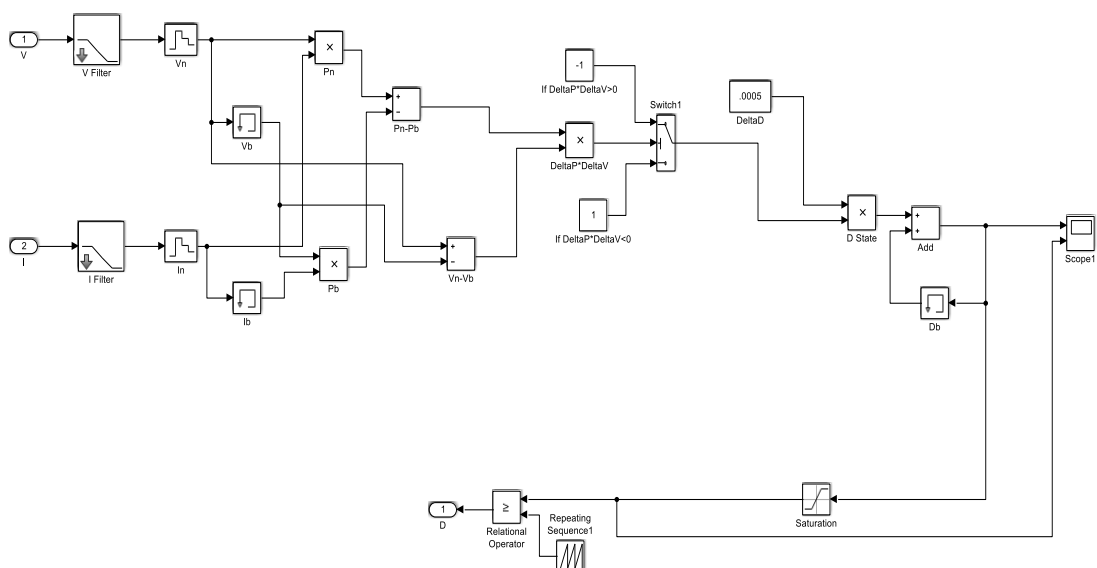


Figure IV.10 : Simulation de block MPPT par P&O

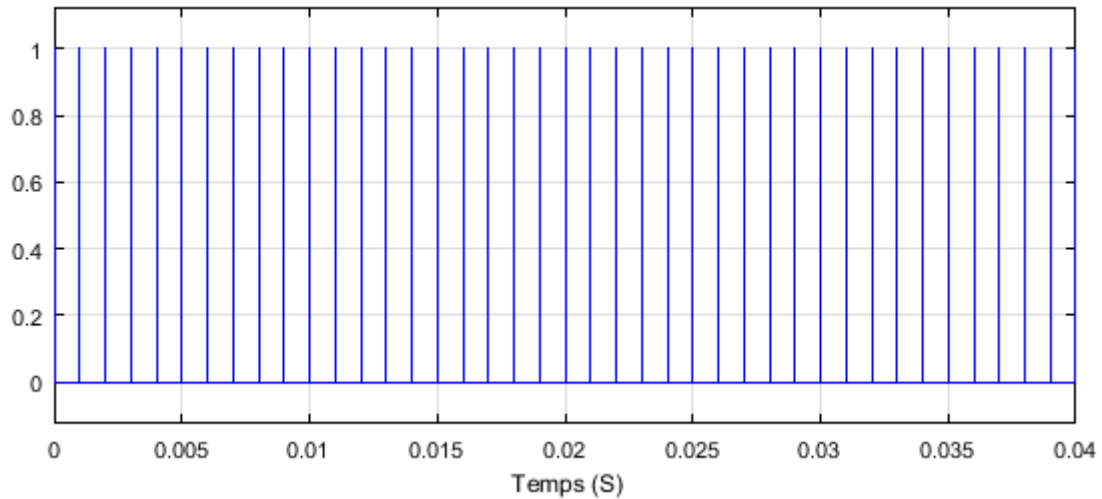


Figure IV.11: Signal de commande MPPT

On va alimenter une charge $R= 31 \Omega$, et on commande l’hacheur par la méthode de Perturbe & observe, la réalisation de cette configuration est présentée sur la figure (IV.12) qui est implanté sur Matlab /Simulink.

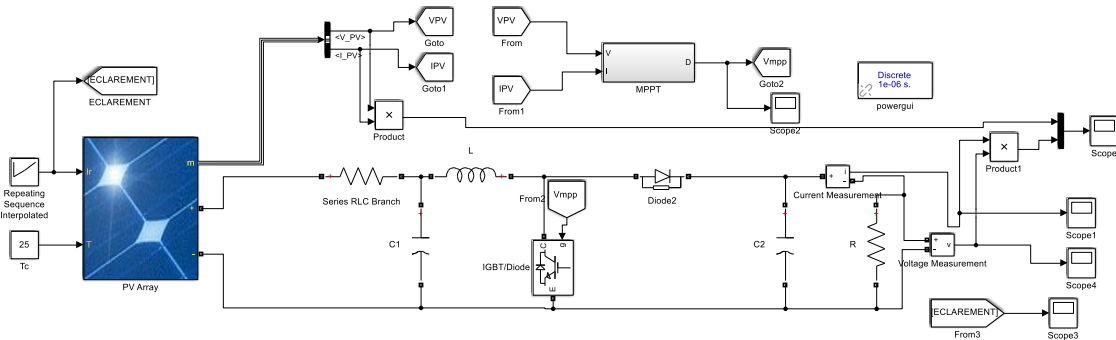


Figure IV.12 : Commande MPPT par P&O d’un hacheur BOOST

En géré cette configuration avec la variation de l’éclairement figure (IV.13) et affiché la puissance obtenus sur un même graphe avec la puissance générée par le générateur qui donné par la figure (IV-13) suivante :

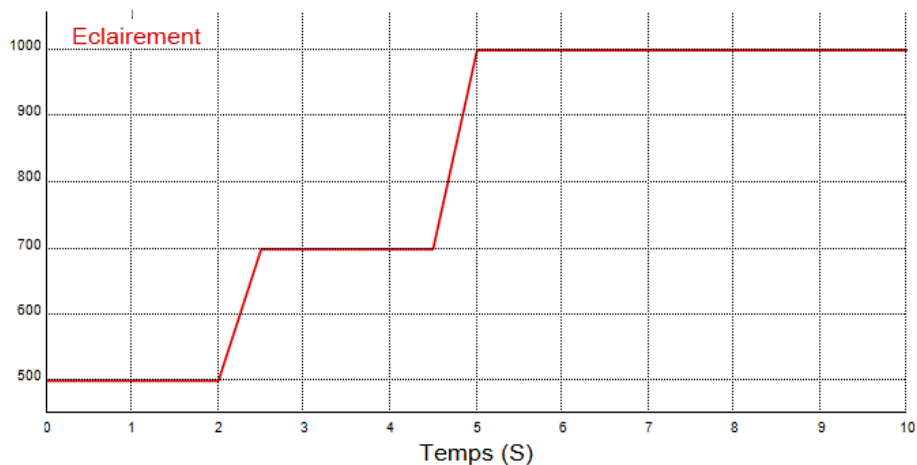


Figure IV.13 : Variation de l'éclairement en fonction du temps

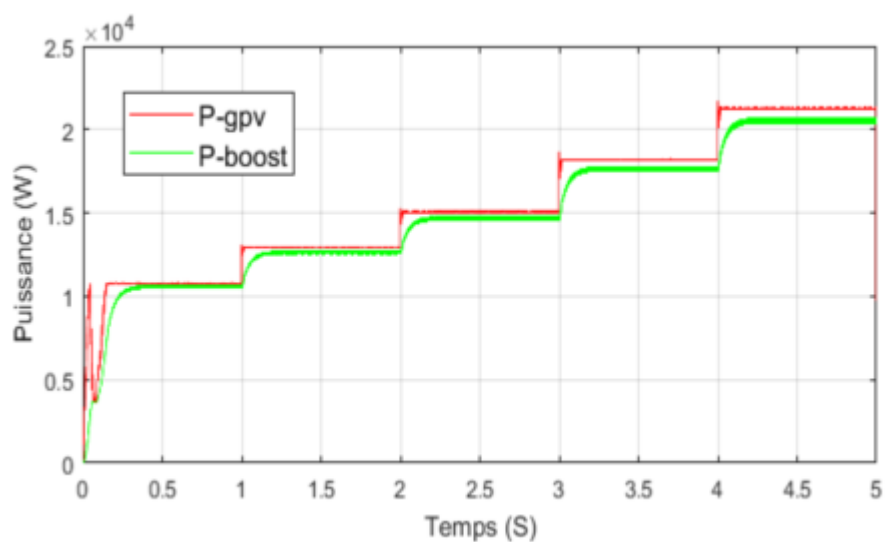


Figure IV.14 : Puissance générée par GPV et puissance de sortie d'hacheur BOOST

On remarque sur cette figure que les courbes de puissance qui sont fournies par l'hacheur suivent la puissance générée par le générateur photovoltaïque.

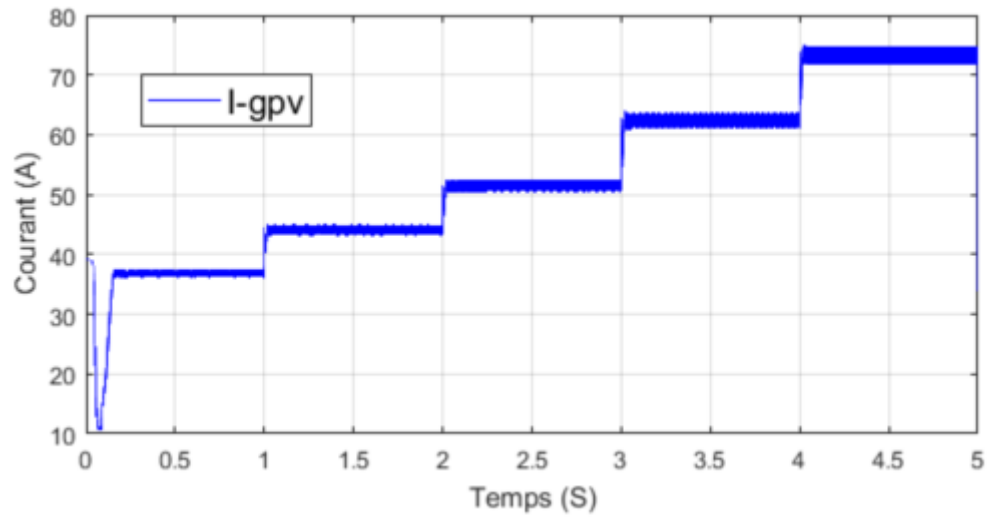


Figure IV.15 : Courbe de courant générée par GPV

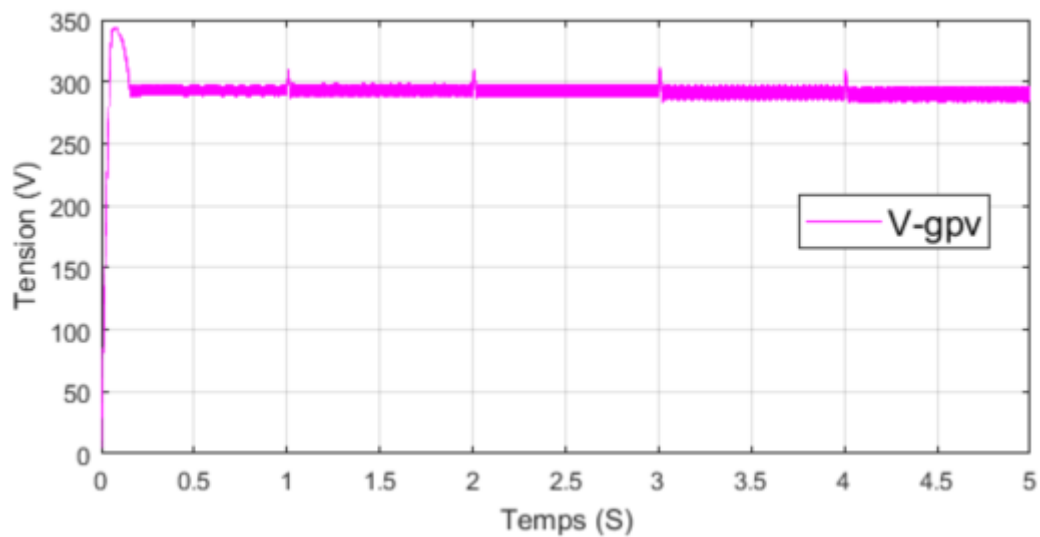


Figure IV.16 : Courbe de tension générée par GPV

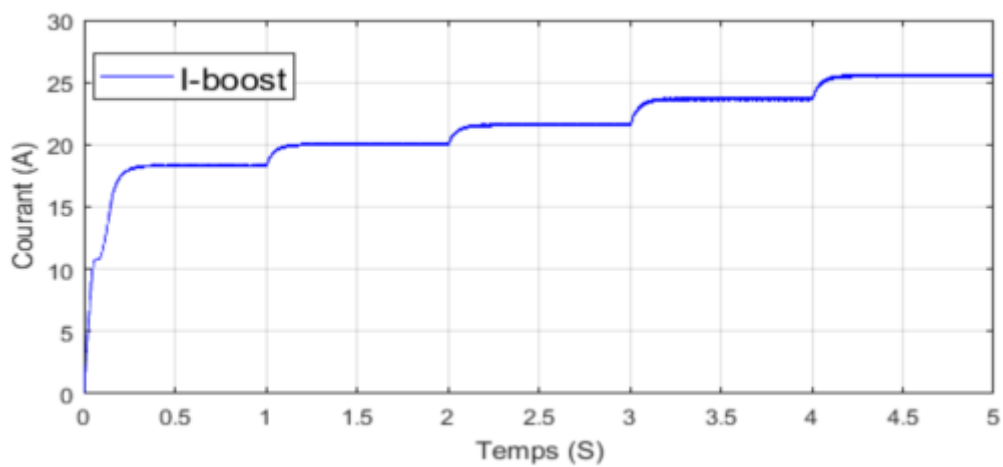


Figure IV.17 : Courbe de courant à la sortie de l'hacheur

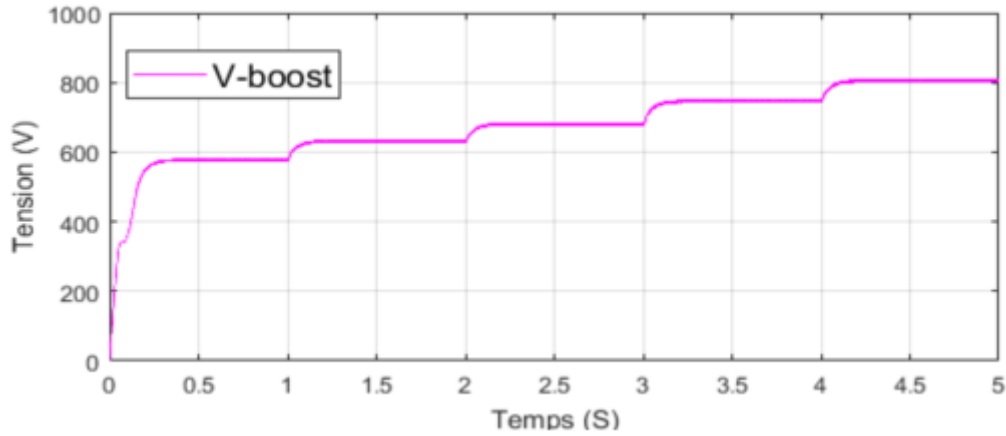


Figure IV.18 : Courbe de tension à la sortie de l’hacheur

Les résultats de simulation du système photovoltaïque adapté par la commande MPPT sont représentés par les figures (IV.14), (IV.15), (IV.16), (IV.17) et (IV.18).

Ces figures représentent la tension, le courant et la puissance générées par le générateur photovoltaïque, ainsi que la tension, le courant et la puissance à la sortie du système photovoltaïque. Ces résultats montrent que l’hacheur survolteur et la commande MPPT par la méthode P&O effectuent correctement leurs rôles. L’hacheur survolteur fournit une tension à sa sortie supérieure à celle fournie par le générateur photovoltaïque.

Et la commande MPPT adapte le générateur PV à la charge (transfert de la puissance maximale fournie par le générateur PV).

IV-5- simulation de l’onduleur NPC trois niveaux

On va choisir dans ce travail l’onduleur triphasé trois niveaux type NPC commandé par MLI

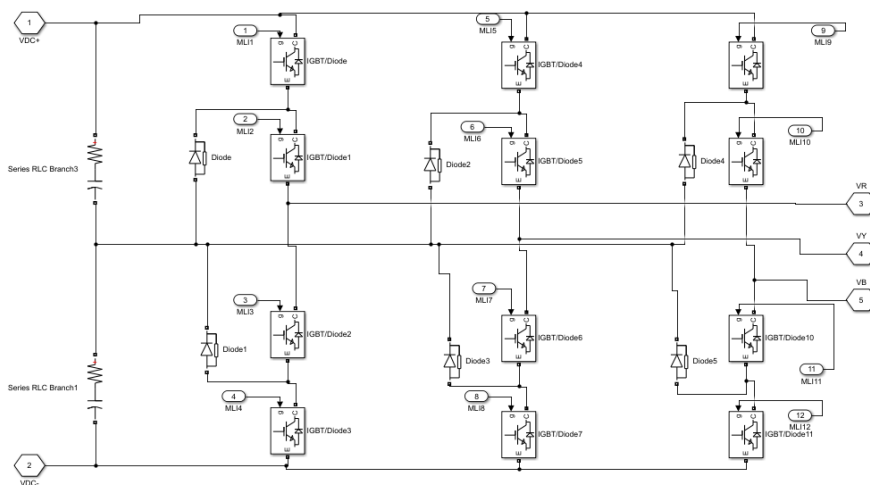


Figure IV.19 : Simulation de l’onduleur NPC 3 niveaux

IV-5-1- Commande MLI par sinusoidale à triangles multiples

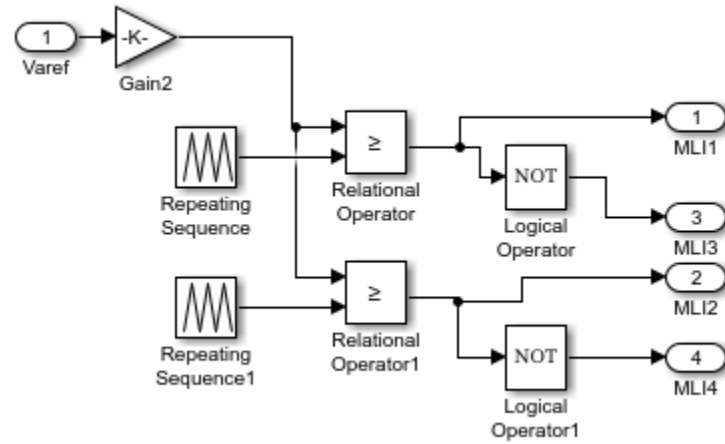


Figure IV.20 : Bloc de commande de la MLI pour un seul bras

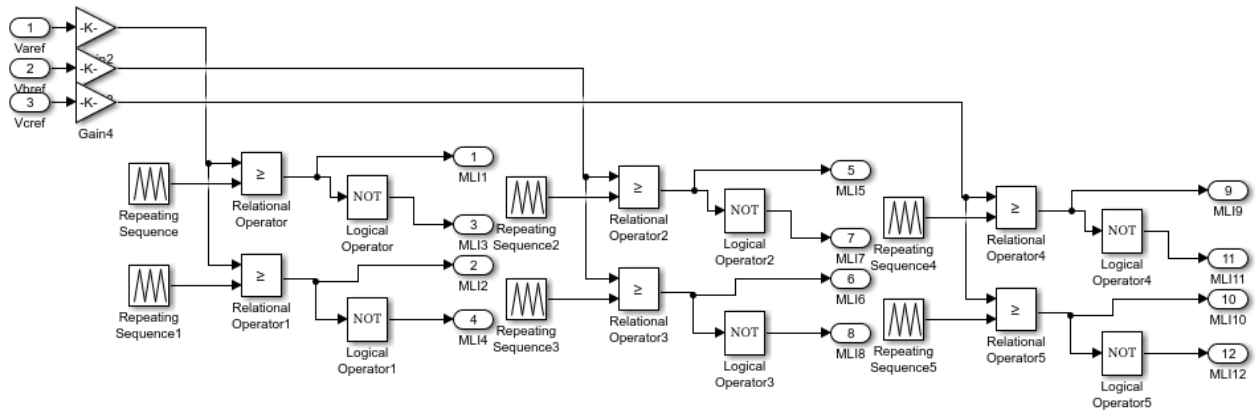


Figure IV.21 : Commande MLI pour 3 bras

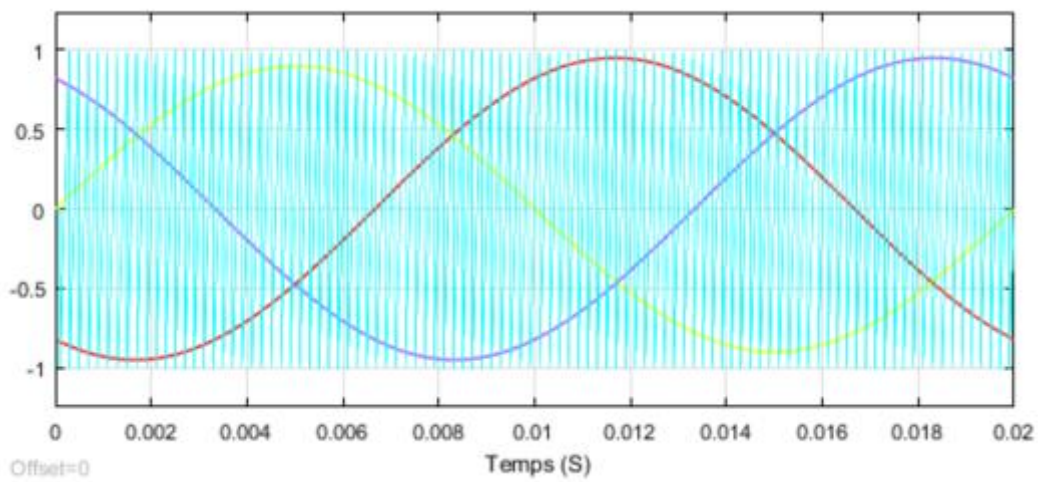


Figure IV.22 : Signal de commande MLI par la modulation sinusoidale à triangles multiples pour 3 bras

La figure (IV.22) représente le principe de la modulation sinusoidale à un seul triangle avec trois signaux de référence, qui génèrent les signaux de commande des interrupteurs.

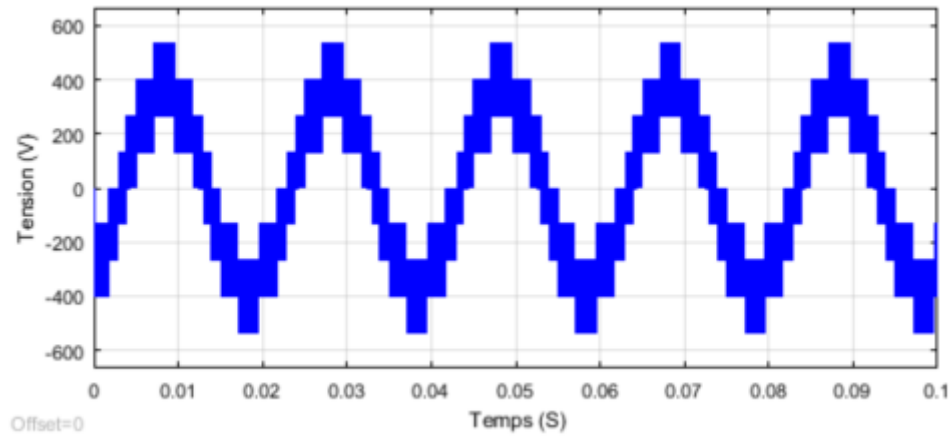


Figure IV.23 : Tension d'une phase de l'onduleur VAO.

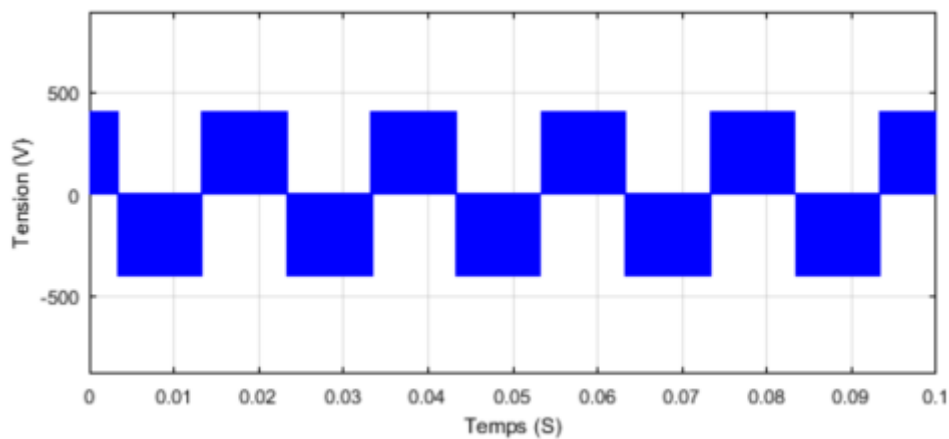


Figure IV.24 : Tension d'une phase de l'onduleur par rapport au point neutre M, V_{AM}

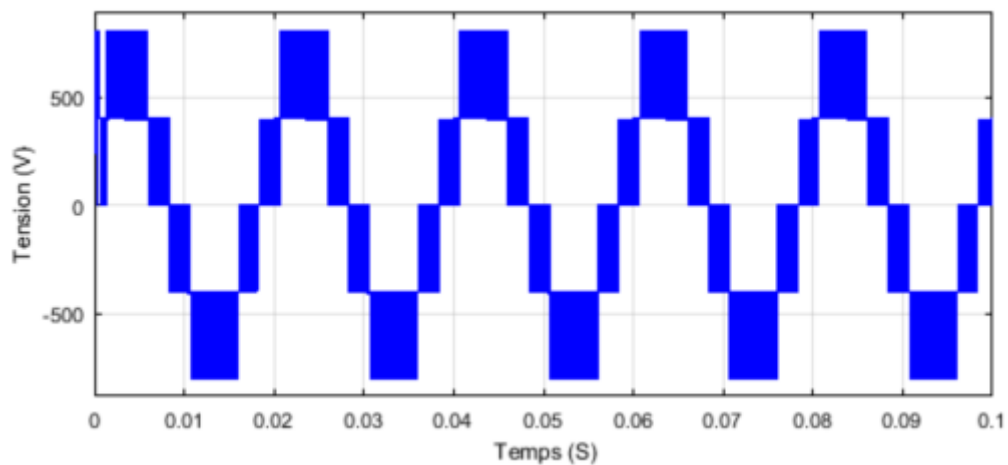


Figure IV.25 : Tension entre phase de l'onduleur V_{AB}

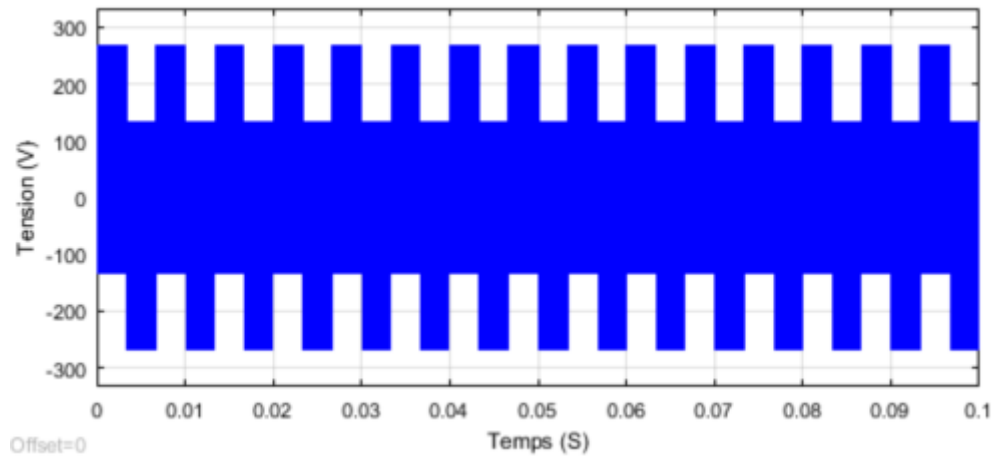


Figure IV.26 : Tension du mode commun V_{mc} .

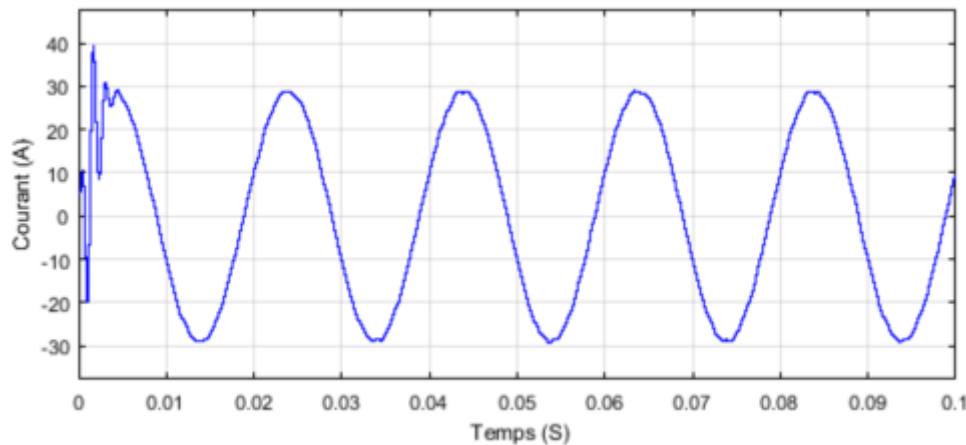


Figure IV.27 : Le courant de la phase I_a .

Les résultats de simulation pour l'onduleur trois niveaux commandé par la Modulation sinusoïdale à triangles multiples sont illustrés dans les figures IV.23- IV.27.

D'après l'analyse des figures IV.23, IV.24 et IV.25 qui montrent les tensions simples et composées, nous constatons que les tensions sont constituées de petits créneaux, si on augmente le mf le nombre de créneaux augmente.

Nous remarquons l'amélioration de la forme du courant I_a de charge sur la figure (IV.27).

Nous constatons la présence de la tension du mode homopolaire (mode commun) sur la figure (IV.26), qui est due à cette technique de commande.

IV- 6- Simulation du Système PV connecté au réseau

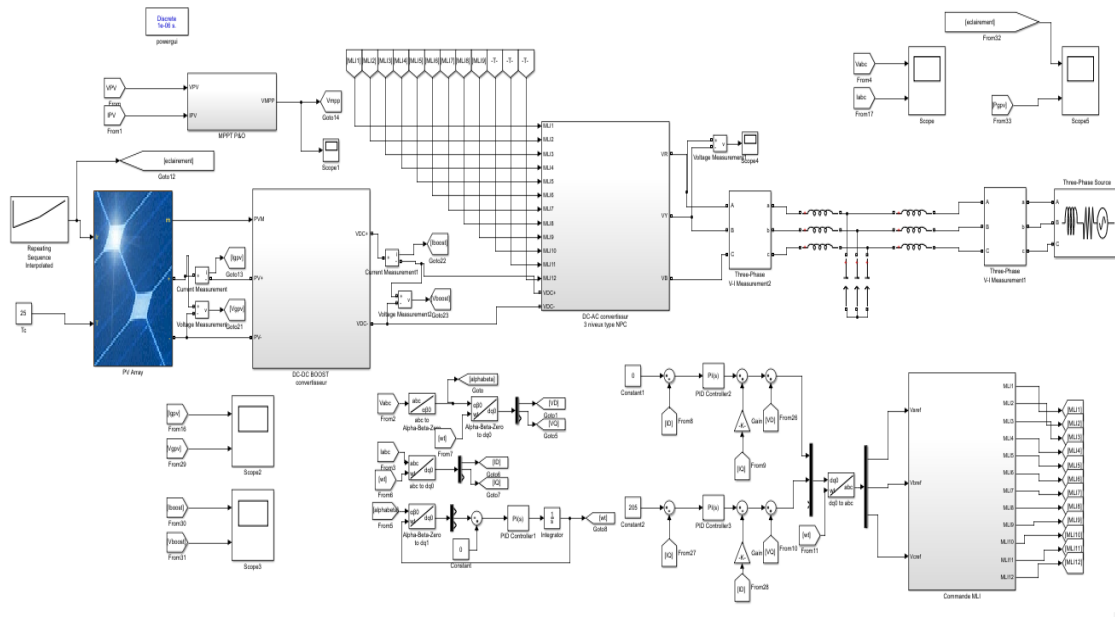


Figure IV.28 : Simulation de système PV connecté au réseau

Ce système était simulé pour une température de 25 c° et un éclairement (E) de valeur 1000 les résultats de simulations sont présentés par les figures suivantes:

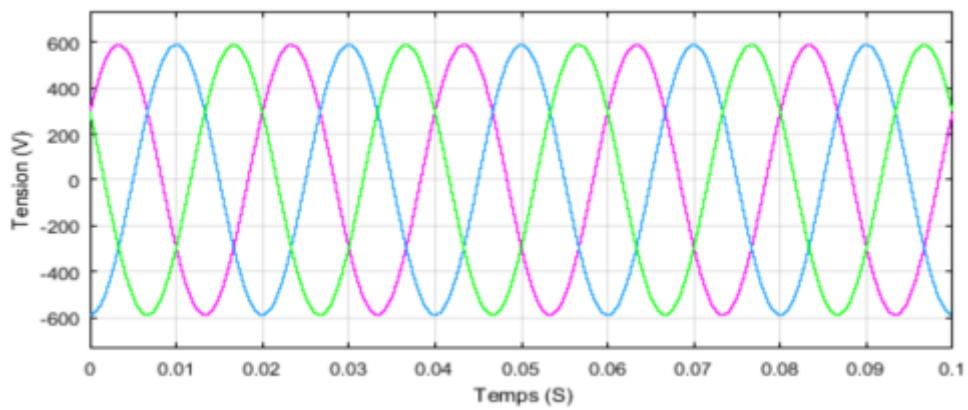


Figure IV.29 : Les trois tensions du réseau

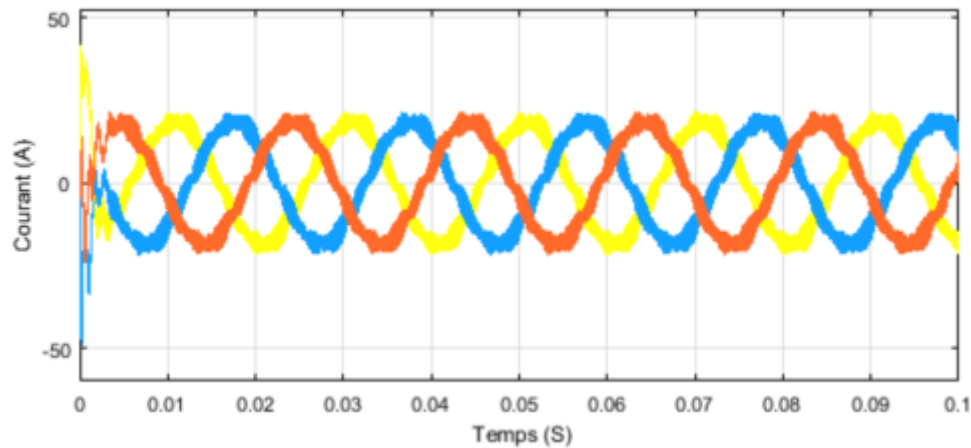


Figure IV.30 : Les trois courants de phases du réseau

Les résultats montrent la poursuite du point de fonctionnement optimale lors de la perturbation. La tension de réseau et le courant de réseau sont présentés sur la figure (IV.29), (IV.30) la forme d'onde du courant injecté est clairement sinusoïdale et en phase avec la tension du réseau.

Les résultats montrent que l'utilisation d'une configuration convenable d'onduleur NPC qui sera connecté au réseau toute en assurant un fonctionnement optimal de la source PV.

IV-7- Conclusion

Pour mettre en évidence l'étude des systèmes PV connectés aux réseaux électriques triphasés moyenne tension, on a pu simuler les caractéristiques fondamentales et calculer les performances du système du générateur PV, le hacheur BOOST et l'onduleur 3 niveaux type NPC.

Notamment le modèle global de simulation a permis d'obtenir une bonne qualité des signaux de tension et de courant et une bonne synchronisation avec le réseau électrique ainsi qu'une meilleure efficacité du système par l'onduleur multi-niveaux. Ce système a été étudié en considérant un modèle simplifié du réseau électrique et les simulations ont été faites avec des données d'ensoleillement statiques.

Conclusion

Générale

La demande mondiale en énergie évolue rapidement et les ressources naturelles de l'énergie telles que l'uranium, le gaz et le pétrole diminuent en raison d'une grande diffusion et développement de l'industrie ces dernières années. Pour couvrir les besoins en énergie, des recherches sont conduites à l'énergie renouvelable. Une des énergies renouvelables qui peut accomplir la demande est l'énergie solaire photovoltaïque, c'est une énergie propre, silencieuse, disponible et gratuite. C'est d'ailleurs ce qui explique que son utilisation connaît une croissance significative dans le monde.

Le travail présenté dans ce mémoire concerne les systèmes photovoltaïques couplés au réseau électrique. Ce dispositif est amené à connaître des développements importants liés essentiellement à une volonté de plus en plus affichée de diversification des moyens de production, d'un meilleur respect de l'environnement et une meilleure gestion de l'énergie électrique dans un contexte de développement durable.

Ainsi, après un rappel sur les ressources énergétiques renouvelables et sur les systèmes de conversion associés, nous sommes intéressés aux chaînes de production photovoltaïque.

Les études menées sur un plan théorique ont permis : d'établir un modèle mathématique de circuit équivalent d'un générateur photovoltaïque.

Ainsi donner une estimation précise et rapide de la puissance fournie sous l'effet des variations météorologiques (ensoleillement et température). La maximisation de la production, compte tenu du caractère fluctuant de la source PV considérée exige un développement d'une commande de type MPPT performante. Pour notre part, nous avons opté pour une MPPT P&O

Dans notre travail nous avons utilisé :

Un convertisseur statique (DC/DC) hacheur BOOST à transistor Mosfet qui fournit une tension continue réglable satisfaisant la poursuite de la puissance maximale MPPT.

Un convertisseur (DC/AC) onduleur à trois niveaux type NPC à transistor IGBT de tension qui convertit celle-ci à une tension alternative commandée par la MLI.

Les résultats de simulation des différents modules et de système complet sont satisfaisants.

Bibliographie :

- [1] : R. MAROUANI, Commande et Réalisation d'un Système Photovoltaïque Raccordé à un Réseau de Distribution, Tunis: Thèse de Doctorat de la Faculté des Sciences de Tunis, Juin 2013.
- [2] : M. Chabakata, Systèmes multi-sources pour l'habitat isolé : architectures et gestion de l'énergie, chez Polytech Nantes, Rapport de Master 2 Recherche SEGE, Saint Nazaire, Juillet 2014.
- [3] : A. T. Singo, Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride, Nancy: Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Février 2010.
- [4] : M. Zandi, Contribution au pilotage des sources hybrides d'énergie électrique, Nancy: Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, Novembre 2010.
- [5] : EDF, Le nucléaire en chiffres, Source internet: <https://www.edf.fr/groupe-edf/espacesdedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/le-nucleaire-en-chiffres>, 2014.
- [6] : Independent WHO., Contamination du territoire français par le césium 137, Source internet: <http://independentwho.org/fr/contamination-cesium-137/>, 2001.
- [7] : Wikipedia, Laboratoire de Bure, https://fr.wikipedia.org/wiki/Laboratoire_de_Bure, 2017.
- [8] : U. i. e. P. f. COP21, « Réunion parlementaire a l'occasion de la conférence des nations unies sur les changements climatiques,» Paris, Décembre 2015.
- [9] : Outilssolaires.com, Rayonnement solaire global sur un plan horizontal, Source internet: <http://outilssolaires.com/developpement-durable/energie-solaire/ensoleillement/>, 2011.
- [10] : E. V. a. B. Dumas, Le pico photovoltaïque : macro impact en Afrique Source internet:<http://energypoint.bearingpoint.com/blog/2016/03/07/le-pico-photovoltaique-macroimpact-en-afrique-chapitre-14/> March, 2016.
- [11] : V. L. Nguyen, Couplage des systèmes photovoltaïques et des véhicules électriques au réseau Problèmes et solutions, Université de Grenoble: Thèse de Doctorat de l'Université de Grenoble, 2014.
- [12] : Touil Nacer Eddine, Ghenbazi Slimane, Modélisation et Simulation d'un Système Photovoltaïque, Université Echahid Hama Lakhder d'El-Oued, mémoire de master académique, 2015.
- [13] : Encarta 2005.
- [14] : J. Royer et T. Djiako et E. Schiler, B. Sadasy. ,, Le pompage photovoltaïque", université d'Ottawa, 1998.

- [15] : Othman ben seddik.fathi djaloud. Étude et optimisation d un Sys PV. Mémoire de master eth .université d'Ouargla 2012.
- [16] : B.Equer le pompage photovoltaïque Manuel de cours, énergie solaire photovoltaïque ellipses 1993.
- [17] : Mechalikh Med Nadjib, HAMADA Charaf Eddine Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau Mémoire de master Université Kasdi Merbah Ourgla 2013.
- [18] : Slama fateh. Modélisation d un Sys multi générateurs PV interconnectent au réseau électrique. Magister en eth. Ufa Sétif.
- [19] : [http : //www.photovoltaique.info/.../Epia_Techno](http://www.photovoltaique.info/.../Epia_Techno)
- [20] : Belhadj Mohammed « Modélisation D'un Système De Captage photovoltaïque Autonome » Mémoire de Magister Universitaire De Bechar 2008
- [21] : B. Flèche, D. delagnes, «énergie solaire photovoltaïque», STI ELT juin 2007.
- [22] : Y. Pankow, «Etude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau basse tension application au générateur photovoltaïque », thèse de Doctorat, centre nationale de recherche technologique de Lille, 2004.
- [23] : **HAMIDA CHOHRAOUI & RATIBA HADBI**, «modélisation et simulation d'un système photovoltaïque connecté au réseau », mémoire de fin d'étude, UNIVERSITE' ABOU BEKR BELKAID TLEMCEN, 2016.
- [24] : Mr. MEFLAH AISSA « Modélisation et commande d'une chaine de pompage photovoltaïque » Thème de Magister, UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID – TLEMCEN 2012.
- [25] : Mr TARGANT Lyes & Mr KHALEF Sofiane, «Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique », mémoire de master, UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU, 2017.
- [26] : K. Kheloufi, Modélisation mathématique et circuit électronique équivalent de cellules solaire à colorant organique, Master, Univ, UMMTO, 2018.
- [27] : L. Hassaine, Onduleurs photovoltaïques connectés au réseau électrique, Maître de recherche B, Division Energie solaire photovoltaïque, E-mail : lhassaine@cder.dz, source internet:http://www.cder.dz/vlib/bulletin/pdf/bulletin_020_05.pdf, 2011.
- [28] : **ABBASSEN LYESS** « Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque » Thème de Magister, UNIVERSITE de MOULOUD MAMMERI _ TIZI OUZOU, 2011.
- [29] : Chabakata Mahamat Analyse et commandes des convertisseurs multi-niveaux pour un générateur photovoltaïque connecté au réseau électrique Thèse de doctorat de l'Université

Paris-Saclay préparée à l'Ecole Normale Supérieure de Cachan (Ecole normale Supérieure Paris-Saclay) ,2018.

[30]: M. Z. F.Z. Zerhoun, "Optimisation d'un système à énergie verte avec validation pratique," revue des énergies renouvelables, vol. 11, no. N°1, p. 41–49, 2008.

[31] : Zergoune M A et Hideb A, "Commande d'onduleur multi niveaux à structure en cascade par stratégie d'élimination d'harmonique sélective," Université Kasdi Merbah de Ouargla, 201 7.

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

[32] : CH.Maher, Gestion Energétique des Panneaux photovoltaïque, Mémoire Master Université Sfax 2007-2008.

[33] : K.Sobaihi, étude et réalisation d'un hacheur de Tracking du point de puissance Maximale (MPPT) a contre réaction, Mémoire de Magister Ecole Nationale polytechnique 10, Avenue Hassen Badi El –Harrach Alger.

[34] : Alain Bilbao learreta Réalisation de commandes MPPT Numérique Rapport de stage fin d'études Université Rovira virgili 2006.

[35] : Mechaliikh Med Nadjib, Hamada Charaf Eddine , Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau Mémoire de master Université Kasdi Merbah Ourgla 2013.

[36] : BENSACI Wafa « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT » Thème de Master, Université Kasdi Merbah–Ouargla 2012.

[37] : Christian Ripoll Bogdan Grabowski. Aide-mémoire Electronique. Dunod, 5e édition, 2008.

[38] : Le queu Thierry. Cours d'electronique de puissance, IUT GEII 2 ième année, Option EEP. 2004/2005.

[39] : Bennai Boumediene, Benameur Hichem Commande d'un onduleur multi niveaux pour l'injection de puissance photovoltaïque au réseau électrique, mémoire de master, Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent ,2017/2018.

[40] : Yakoub Khadidja, réduction des effets de la tension homopolaire dans les associations onduleurs multiniveaux moteur à induction, mémoire de master, Université de Batna ,2005.

[41] : Berrahal Khoukha, Application d'un onduleur multi-niveaux à la compensation de l a puissance réactive, thèse du doctorat, Université de Batna -2-, 2018.

[42]: Mr. Benyamina Mansour, Contribution à la Commande et au Contrôle Robuste d'un Compensateur ASVC à Base d'Onduleurs Multi niveaux, thèse du doctorat, universite des sciences et de la technologie d'oran mohamed boudiaf, 10 - 03 – 2013.

Annexe :**1-Paramètre de l'hacheur utilisé:**

Condensateur 1	2e-3 F
Condensateur 2	3e-3 F
résistance série	0.1 Ω
Inductance	1e-3 H

2- Paramètre de commande MLI:

Signale sinusoïdale	
Amplitude (V)	5
Fréquence (rad/s)	50*2*pi
Signale triangulaire	
Amplitude (V)	1
Fréquence (rad/s)	2*2000*pi

3- Paramètre de réseau:

Filtre LCL	
Inductance	500e-6 H
Condensateur	100e-6 F
Inductance	500e-6 H
Charge RL	
Resistance	1e-6 Ω
Inductance	1 e-6 H