



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique



Université Amar THELIDJI - Laghouat

FACULTE : TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT : électrotechnique

MEMOIRE DE MASTER

Présenté par :

Elhouiti Fatiha

DOMAINE : Sciences et Technologies.

FILIERE : électrotechnique.

OPTION : Energies renouvelables en électrotechnique.

Thème

**Application des techniques d'intégrations
aux réseaux électriques dans un système de
conversion d'énergie renouvelable**

Jury de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	qualité
Mme. Chetih Saliha	Professeur	Présidente
Mr. Hamdi Abdelwahab	M.A.A	Examineur
Mme. Bouchiba Omelkhér	M.A.A	Rapporteur
Mr. birane Mouhoub	M.C.B	Co-rapporteur

Soutenu le : 03-10-2021

Dédicace

*À la mémoire de ma très chère copine Kelthoum
Hattab (Puisse Dieu vous avoir en sa sainte
miséricorde et que ce Travail soit une prière pour
votre âme.)*

*À mon cher père, mon idole dans cette vie et à ma
très chère mère qui m'a éclairé mon chemin Et qui
m'a encouragé (que dieu mes les garde)*

A mon très cher frère et mes très chères sœurs

A ma petite nièce Zineb

A tout ma famille.

Et tous mes chers amis

Je dédie ce modeste travail pour vous tous...

El houiti Fatiha

Remerciements

Avant tout, je remercie ALLAH, le tout puissant, de m'avoir donné le courage et la volonté pour accomplir ce travail.

J'adresse mes remerciements les plus sincères aux personnes qui m'ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire ainsi qu'à la réussite de cette formidable année universitaire.

*Mes plus sincères remerciements à mon encadreur **Mme. BOCHAIBA Oumelkhir** maitre-assistant à l'université de Laghouat, je lui exprime toute ma reconnaissance pour sa confiance en mon travail, sa patience et les nombreux conseils qu'il m'a prodigués, Je voudrais présenter mes remerciements aussi à mon Co-Encadreur **Mr. Birane mouhoub**.*

*Mes vifs remerciements vont également à **Mr. HAMDI Abdelwahab** et **Mme. Chetih Saliha** ont bien voulu être les superviseurs de ce travail et en même temps membres du jury.*

Enfin, je remercie l'université de Laghouat, notamment La faculté de Sciences et Technologies.

Elhouiti Fatiha .

Sommaire

Dédicace	I
Remerciements	II
Sommaire	III
Liste des figures	VI
Liste des tableaux	XI
Abréviation	X
Introduction Générale	1
Chapitre I : Le Système Photovoltaïque	
I.1 Introduction	3
I.2 Les énergies renouvelables	3
I.3 Énergie solaire	3
I.4 L'énergie solaire photovoltaïque	4
I.5 Système photovoltaïque	4
I.6 Les différents types de système photovoltaïque	4
I.6.1 Les installations autonomes	5
I.6.2 Installations photovoltaïques hybride	5
I.6.3 Les installations raccordées au réseau de distribution public	6
I.7 Les composants d'un système photovoltaïque	8
I.7.1 Générateur photovoltaïque	8
I.7.1.1 Caractéristique courant - tension $I(V)$ d'un générateur PV	9
I.7.1.2 Caractéristique puissance - tension $P(V)$ d'un générateur PV	9
I.7.1.3 L'influence de l'éclairement sur la caractéristique $I_{PV} = f(V_{PV})$	9
I.7.1.4 L'influence de l'éclairement sur la caractéristique $P_{PV} = f(V_{PV})$	10
I.7.1.5 L'influence de la température sur la caractéristique $I_{PV} = f(V_{PV})$	10
I.7.1.6 L'influence de la température sur la caractéristique $P_{PV} = f(V_{PV})$	11
I.7.1.7 Paramètres caractéristiques d'un générateur PV.	12
I.7.1.8 Association des cellules photovoltaïques.	12
I.7.3 Les convertisseurs statiques	13
I.7.3.1 les hacheurs	14
I.7.3.2 les onduleurs	15
I.7.3.3 les Régulateurs	17
I.7.4 Transformateur	19
I.7.5 la charge	19

I.7.6 la protection d'une installation PV	20
I.8 Les avantages et les inconvénients de système PV	22
I.9 Conclusion	22
Chapitre II : Intégration des énergies Photovoltaïques aux réseaux électriques	
II.1 Introduction	23
II.2 Structure générale d'un système photovoltaïque connecté au réseau	23
II.2.1 Les systèmes à connexion directe au réseau	23
II.2.2 Les systèmes a bus continu intermédiaire	24
II.3 Classifications des Centrales Photovoltaïques Connectées au Réseau	26
II.4 Modélisation du convertisseur DC/AC	26
II.4.1 Les filtre	27
II.4.2 Technologies des onduleurs couplés au réseau	28
II.4.2.1 Onduleurs modulaires (module inverter)	29
II.4.2.2 Onduleurs centralisés (central inverter)	29
II.4.2.3 Onduleurs String ou " Rangée"	30
II.4.3 Stratégie de Commande de l'onduleur coté réseau	30
II.4.4 Objectif de la commande de l'onduleur	31
II.5 Caractéristiques des onduleurs compatibles avec le réseau	31
II.6 Choix des éléments caractéristiques du convertisseur côté réseau	31
II.6.1 Valeur de la tension du bus continu	31
II.6.2 Valeur du condensateur du bus continu	32
II.6.3 Valeur de l'inductance de couplage au réseau	32
II.7 Influence des systèmes photovoltaïques sur le réseau de distribution	33
II.8 Influence du réseau de distribution sur le fonctionnement des installations photovoltaïques	34
II.9 Synchronisation au réseau	35
II.10 les techniques d'intégration d'énergie photovoltaïque aux réseaux électrique	36
II.10.1 la commande hystérésis	36
II.10.2 la commande MLI	37
II.10.3 la technique PLL	39
II.10.4 La commande VSC	40
II.11 Conclusion	42

Chapitre III : Application des techniques d'intégration aux réseaux électriques dans un système PV

III.1 Introduction	44
III.2 L'outil Matlab / Simulink	44
III.3 Système PV connecté aux réseaux	43
III.4 simulation et modélisation des systèmes PV connecté au réseau	44
III.4.1 Système PV connecté au réseau avec une commande MLI	44
III.4.1.1 modélisation et simulation de générateur photovoltaïque	44
III.4.1.2 modélisation et simulation du Convertisseur DC/AC	46
III.4.1.3 Le transformateur	48
III.4.1.4 Filtre	48
III.4.1.5 Réseau de distribution	49
III.4.1.6 Simulation et Résultats de système PV connecté au réseau avec la commande MLI	49
III.4.2 Système PV connecté au réseau avec une commande VSC	53
III.4.2.1 Modélisation et simulation de GPV de deuxième système	53
III.4.2.2 Modélisation et simulation de Convertisseur boost	54
III.4.2.3 Modélisation et Simulation de La technique VSC	55
III.4.2.4 Le transformateur	56
III.4.2.5 Filtre	56
III.4.2.6 Réseau de distribution	56
III.4.2.7 Résultat et simulation de système PV connecté au réseau avec la technique VSC	57
III.4.3 Comparaisons entre le système PV connecté au réseau avec la commande MLI et la commande VSC	61
III.5 Conclusion	63
Conclusion Générale	64
Bibliographie	65
Annexe 1	66
Résumé	

List des figures

Chapitre I : Le Système Photovoltaïque

Figure I.1 :	Les différents types d'énergies renouvelables	3
Figure I.2 :	Principe de la conversion photovoltaïque	4
Figure I.3 :	Arbre d'un système PV	5
Figure I.4 :	Installation Hybride	6
Figure I.5 :	injection totale	7
Figure I.6 :	injection surplus	7
Figure I.7 :	Schéma explicatif du fonctionnement d'une installation de panneaux solaires	8
Figure I.8 :	Caractéristique $I_{PV} = f(V_{PV})$ à éclairement constant et température constante	9
Figure I.9 :	Caractéristique $P_{PV} = f(V_{PV})$ à température et éclairement constants	9
Figure I.10 :	L'influence de l'éclairement sur la caractéristique $I_{PV} = f(V_{PV})$	10
Figure I.11 :	L'influence de l'éclairement sur la caractéristique $P_{PV} = f(V_{PV})$	10
Figure I.12 :	L'influence de la température sur la caractéristique $I_{PV} = f(V_{PV})$	11
Figure I.13 :	L'influence de la température sur la caractéristique $P_{PV} = f(V_{PV})$	11
Figure I.14 :	Associations en série	13
Figure I.15 :	Association en parallèle	13
Figure I.16 :	hacheur Série (buck)	14
Figure I.17 :	hacheur parallèle (boost)	15
Figure I.18 :	Schéma de principe de l'onduleur	16
Figure I.19 :	Onduleur triphasé	16
Figure I.20 :	Le principe P&O pour suivre le MPP	18
Figure I.21 :	l'algorithme P&O	18
Figure I.22 :	L'algorithme par incrémentation de conductance	19
Figure I.23 :	Architecture des réseaux électriques	20
Figure I.24 :	Schématisation d'un GPV élémentaire avec diodes by-pass et diode anti-retour	21
Figure I.25 :	diagramme de La protection électrique des installations PV	21
Chapitre II :	Intégration des énergies Photovoltaïques aux réseaux électriques	
Figure II.1 :	Plusieurs modules PV en série vers un seul onduleur	23
Figure II.2 :	Bus à basse tension alternative	24
Figure II.3 :	Convertisseur de type forward alimentant le bus continu	25
Figure II.4 :	Structure avec convertisseur de type fly-back.	25

Figure II.5 :	Hacheur élévateur de tension avec onduleur centralisé	26
Figure II.6 :	Filtre L	27
Figure II.7 :	Filtre LC	28
Figure II.8 :	Filtre LCL	28
Figure II.9 :	Onduleurs modulaires (module inverter)	29
Figure II.10 :	Onduleur central (Centralise inverter)	29
Figure II.11 :	Onduleurs de " Rangée" ou "string"	30
Figure II.12 :	Raccordement en parallèle de 2 sources d'énergie	36
Figure II.13 :	Schéma de principe du contrôle par hystérésis d'un bras de l'onduleur	36
Figure II.14 :	Signal hystérésis	36
Figure II.15 :	Le schéma de principe et le signal de MLI	38
Figure II.16 :	Principe d'une boucle à verrouillage de phase	39
Figure II.17 :	Bloc diagramme de SF-PLL	40
Figure II.18 :	Modèle Simulink du contrôleur principal du VSC	41
Chapitre III :	Application des techniques d'intégration aux réseaux électriques dans un système PV	
Figure III.1 :	schéma synoptique d'un système PV connecté au réseau	44
Figure III.2 :	Générateur PV sous Matlab	45
Figure III.3 :	Les caractéristiques I-V et P-V du module "Sun Power (SPR-415E-WHT-D)"	46
Figure III.4 :	L'onduleur DC/AC sous Matlab	47
Figure III.5 :	L'unité De contrôle de l'onduleur sous Matlab/Simulink	47
Figure III.6 :	Contrôleur MPPT sous Matlab	48
Figure III.7 :	Régulateur V_{DC} sous Matlab	48
Figure III.8 :	Régulateur de courant sous Matlab	48
Figure III.9 :	Bloc PLL sous Matlab	49
Figure III.10 :	Générateur MLI sous Matlab	49
Figure III.11 :	Système PV connecté aux réseaux avec une commande MLI	50
Figure III.12 :	Irradiation en fonction du temps	50
Figure III.13 :	La tension générée par le générateur PV	51
Figure III.14 :	Le courant généré par le générateur PV	51
Figure III.15 :	La puissance du générateur PV	51
Figure III.16 :	La tension injectée au réseau.	52
Figure III.17 :	le courant injecte au réseau	52
Figure III.18 :	La puissance injectée au réseau en fonction du temps	52
Figure III.19 :	Les caractéristiques I-V et P-V du module Sun Power SPR-305E-WHT-D"	54
Figure III.20 :	Convertisseur boost sous Matlab	55

Figure III.21 :	Contrôleur MPPT sous Matlab	55
Figure III.22 :	Modèle Simulink du contrôleur principal du VSC	56
Figure III.23 :	Système pv connecté aux réseaux avec une commande VSC	57
Figure III.24 :	Irradiation en fonction du temps de deuxième système	57
Figure III.25 :	La tension générée par le GPV de deuxième système	57
Figure III.26 :	la tension d'entrée d'onduleur	58
Figure III.27 :	Le courant généré par le GPV de deuxième système	58
Figure III.28 :	La puissance générée par le GPV de deuxième système	58
Figure III.29 :	la tension injecté au réseau de deuxième système	59
Figure III.30 :	Le courant injecte au reseau de deuxième système	59
Figure III.31 :	la puissance injectée au réseau de deuxième système	60
Figure III.32 :	rendement de système PV connecté au réseau avec la commande VSC	61
Figure III.33 :	rendement de système PV connecté au réseau avec la commande MLI	61
Figure III.34 :	THD de système PV connecté au réseau avec la commande MLI	62
Figure III.35 :	THD de système PV connecté au réseau avec la commande VSC	62
Figure III.36 :	la tension de sortie d'onduleur de système PV connecté au réseau avec la commande VSC	62
Figure III.37 :	la tension de sortie d'onduleur de système PV connecté au réseau avec la commande MLI	62

Liste de tableaux

Chapitre III : Application des techniques d'intégration aux réseaux électriques dans un système PV

Tableau III.1:	Les spécifications du fabricant du module "Sun Power (SPR-415E-WHT-D)"	45
Tableau III.2:	Les spécifications du fabricant du module "Sun Power SPR-305E-WHT-D"	54

Abréviation

PV	: Photovoltaïque
GPV	: Générateur Photovoltaïque
DC	: Courant continue (d irect c urent)
AC	: Courant a lternative
E	: Eclairage
AM	: Air m ass
V_{co}	: Tension de c ircuit o uvert
I_{cc}	: Courant de c ourt c ircuit
N_P	: Nombre p arallèle
N_S	: Nombre S érie
MPP	: M aximum p ower p oint
MPPT	: M aximum p ower p oint t racking
P&O	: P erturber et o bserver
PWM	: P ulse w ide m odulation
PLL	: P hase l ocked l oop
VSC	: V oltage s ource c onverter
MLI	: M odulation de l argeur d' i mplosion
THD	: T aux de d istorsion h armonique
V_{DC}	: La tension du générateur PV
V_{DC-Réf}	: La tension d'entrée d'onduleur
I_{DC}	: Le courant de GPV
P_{DC}	: La puissance de GPV
V_{AC}	: La tension générée par l'onduleur
I_{AC}	: Le courant généré par l'onduleur
P_{AC}	: La puissance générée par l'onduleur
STC	: Condition du t est s tandard

Introduction

Générale

Introduction Générale

Dans notre temps sans électricité la vie serait être difficile à imaginer, donc il est vraiment nécessaire de produire de l'électricité de manière efficace et continue, pour reprendre à la consommation croissante. Une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée à partir de sources fossiles les problèmes d'épuisement des ressources non-renouvelable, leur impacts environnementaux et la demande croissante de nouvelles ressources énergétiques ont fait l'objet de discussions animées ces dernières années.

Au vu de ces problèmes, les politiques énergétiques vont de plus en plus vers des énergies plus propres et plus durables «les énergies renouvelables».

Aujourd'hui, le défi mondial est tourné vers les énergies renouvelables, notamment le solaire, l'éolien, l'hydraulique, la géothermie, la biomasse...ces énergies renouvelables sont des énergies liées aux cycles du soleil et de la terre. L'exploitation de l'énergie solaire photovoltaïque fait l'objet de notre étude [1].

Le solaire photovoltaïque est vu aujourd'hui comme une alternative énergétique principale pour la production de l'électricité propre a de grande échelle, notamment des centrales photovoltaïques assure de plus en plus l'approvisionnement en électricité partout dans le monde. Malgré cette prouesse technologique, les panneaux photovoltaïque subis de nombreuses contraintes météorologique, climatique ou électrique au niveau des centrales photovoltaïques qui diminue leur rendement [2].

Les systèmes photovoltaïques sont de plus en plus souvent raccordés au réseau électrique. Ils permettent de produire de l'électricité de manière propre et d'injecter la production d'électricité la totalité ou l'excédentaire sur le réseau.

Les problèmes major lorsqu'on désire mettre en place un système photovoltaïque raccordé au réseau, des problématiques se situent à plusieurs niveaux de difficulté en commençant par le panneau solaire lui-même, la variation locale de tension, le déséquilibre de tensions, la variation rapide de puissance, l'injection des harmoniques, l'injection du courant continu et la synchronisation de l'onduleur avec le réseau. Ce travail, penche à l'étude et l'application des techniques d'intégration au réseau.

La rédaction de notre mémoire se compose de trois chapitres :

✓ L'objectif de première chapitre consiste a étudié le système PV, donc nous avons présenté des généralités sur l'énergie solaire photovoltaïque et leur différents installation en

Introduction Générale

suit nous allons aborder en détails les éléments principaux de système PV, nous allons terminer ce chapitre avec les avantages et les inconvénients de système PV.

✓ Le deuxième chapitre basé sur l'intégration des systèmes PV aux réseaux électriques donc on va présenter en premier, les différentes structures et les différentes configurations de système photovoltaïque connecté réseau et puis nous allons détailler l'élément principal qui assure la synchronisation entre les deux systèmes le convertisseur DC-AC, en suite nous présentons aussi l'influence de chaque système à l'autre, finalement on a illustré les différentes techniques de commande .

✓ le troisième chapitre est consacré à la modélisation et à la simulation deux systèmes PV connecté au réseau pour assurer la synchronisation entre ces deux nous allons appliquer deux techniques d'intégration MLI et VSC et finalement nous allons comparer ces deux techniques. L'étude par simulation est effectuée sous l'environnement Matlab Simulink.

✓ Nous terminons notre travail par une conclusion générale.

Chapitre I :

Les systèmes

Photovoltaïques

Introduction

Dans le cadre de nos recherches, L'énergie photovoltaïque résulte de la transformation directe de la lumière du soleil en énergie électrique aux moyens des cellules photovoltaïques généralement à base de silicium cristallin. Le nom Photovoltaïque vient du Grec, il est composé de deux parties :

- **Photos** : Lumière.
- **Volt** : Unité de tension électrique, du nom Alessandro Volta.

La production d'électricité par voie solaire photovoltaïque (PV) a explosé ces dernières années dans le monde. Les nouvelles installations solaires photovoltaïques ont représenté dans le monde, une puissance de 14 000 MW, portant la totalité des installations mondiales à plus de 35 000 MW.

Les énergies renouvelables

Les énergies renouvelables sont des formes d'énergies dont la consommation ne diminue pas la ressource à l'échelle humaine et dont la source est renouvelable. Le soleil est la principale source des différentes formes d'énergies renouvelables par son rayonnement direct ou indirect [3].

Il existe plusieurs types d'énergies renouvelables qui sont résumés dans l'organigramme de la figure I.1.

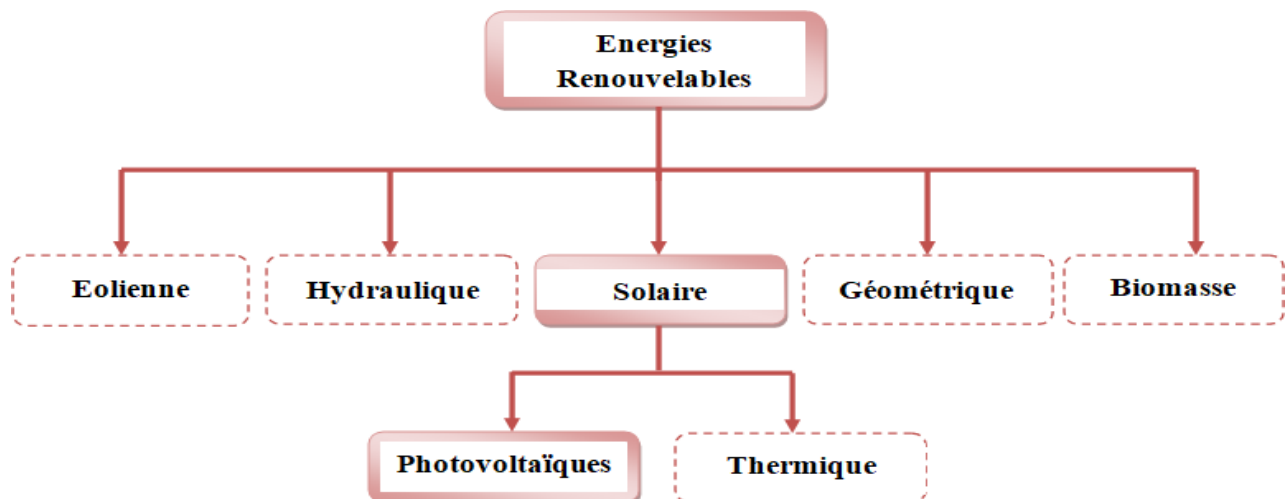


Figure I.1 : les différents types d'énergies renouvelables.

Énergie solaire

L'énergie solaire est la ressource énergétique la plus abondante sur terre. Elle est à l'origine de la majorité des énergies renouvelables, mais elle est très atténuée durant une

grande partie du jour. Cette énergie permet de produire de l'électricité à partir des centrales solaires thermiques ou par des panneaux solaires photovoltaïques. Par sa souplesse et sa facilité d'installation et de maintenance, l'énergie solaire est une solution technique et économique pour l'électrification des sites isolés, On peut distinguer deux types d'énergie solaire [3] :

- ✓ solaire photovoltaïque ;
- ✓ solaire thermique.

L'énergie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque est l'une des énergies renouvelables (énergie solaire) et la plus utilisée. Elle est transmise à la terre à travers l'espace sous forme de photons et de rayonnement électromagnétique. Elle consiste à convertir directement le rayonnement solaire en électricité figure I.2. Ont utilisant des cellules photovoltaïques qui représentent l'élément de base dans la conversion photovoltaïque [2].

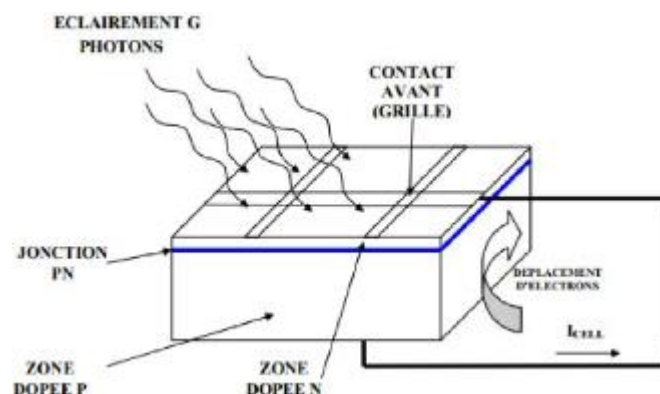


Figure I.2 : Principe de la conversion photovoltaïque.

Système photovoltaïque

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

Telle que les convertisseurs statiques (onduleur et hacheur) avec le système de régulation, les différents types de stockage et tout dispositif d'interconnexion et de sécurité ou de protection, dans le but d'assurer un approvisionnement dans les normes en électricité [2].

Les différents types de système photovoltaïque

L'organigramme de la figure I.3 représente les différents types de système PV.

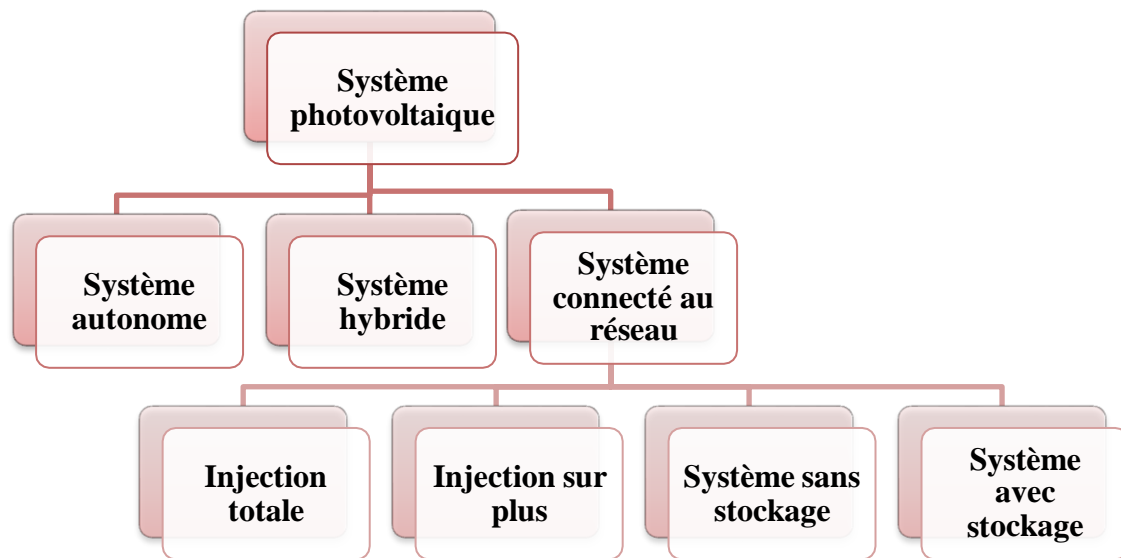


Figure I.3 : Architecture d'un système PV.

Les installations autonomes

Le rôle des systèmes autonomes « stand-alone » est d'alimenter un ou plusieurs consommateurs situés dans une zone isolée. L'énergie produite doit être directement consommée et/ou stockée dans des accumulateurs pour garantir une continuité d'énergie, de nuit ou lorsqu'il n'y a pas assez de soleil [4].

Installations photovoltaïques hybride

Les systèmes photovoltaïque hybrides intègrent un générateur PV et un autre générateur (éolienne, groupe électrogène, système hydroélectrique...), et même parfois le réseau public d'électricité.

En général un système de batteries stocke l'énergie et permet ainsi de ne pas perdre l'énergie des sources aléatoires tels que le solaire ou l'éolien.

La difficulté de ce type de système est d'équilibrer les différentes sources d'énergie de façon à toutes les optimiser, étant entendu que les sources thermiques (Gazoil, gaz...) et le réseau public, sont toujours les appoints de dernier recours.

Aujourd'hui des systèmes à grande échelle intègrent une gestion fine des systèmes PV on parle souvent de « SMART GRID » c'est-à-dire des réseaux au sein desquels une régulation intelligente est coordonnée assure l'optimisation des différentes sources d'énergie [5].

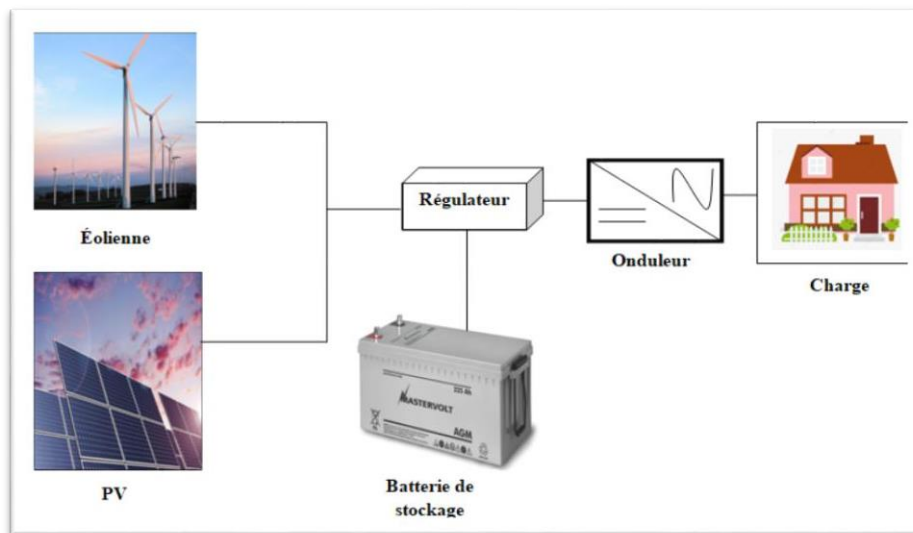


Figure I.4 : Installation Hybride PV-éolienne.

Les installations raccordées au réseau de distribution public

Non autonomes ou « grid connected » proposées dans cette étude, c'est-à-dire système relié en parallèle au réseau électrique public, et conçu pour injecter dans le réseau l'énergie électrique produite par les champs PV.

Dans Les systèmes reliés au réseau, les consommateurs standards de puissance AC sont connectés au générateur via un onduleur (convertisseur DC/AC).

Il existe quatre types de systèmes pv connecté aux réseaux sont présenté comme suit :

Solution avec injection totale

Toute l'énergie électrique produite par les capteurs photovoltaïques est envoyée pour être revendue sur le réseau de distribution. Cette solution est réalisée avec le raccordement au réseau public en deux points :

- le raccordement du consommateur qui reste identique avec son compteur de consommation (on ne peut pas utiliser sa propre production),
- le nouveau branchement permettant d'injecter l'intégralité de la production dans le réseau, dispose de deux compteurs :
 - ✓ l'un pour la production,
 - ✓ l'autre pour la non-consommation (permet de vérifier qu'aucun soutirage frauduleux n'est réalisé) [6].

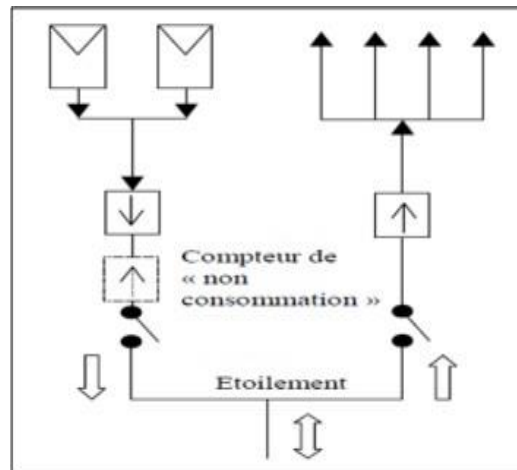


Figure I.5 : injection totale.

Solution avec injection surplus

Cette solution est réalisée avec le raccordement au réseau public en un point l'utilisateur consomme l'énergie qu'il produit avec le système solaire et l'excédent est injecté dans le réseau. Quand la production photovoltaïque est insuffisante, le réseau fournit l'énergie nécessaire. Un seul compteur supplémentaire est ajouté au compteur existant [6].

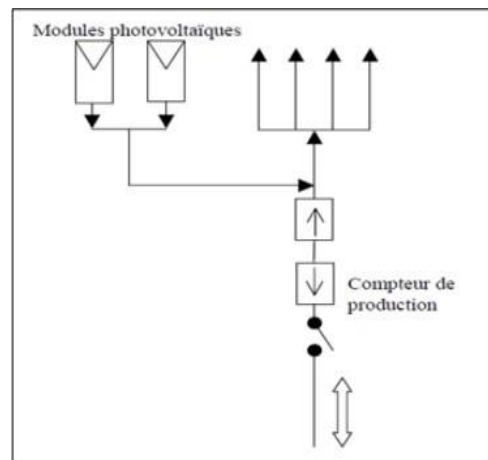


Figure I.6 : injection surplus.

Les systèmes PV connectés au réseau sans batterie de stockage

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

Une interface bidirectionnelle est placée entre la sortie alternative du système PV et le réseau constitué par un panneau de distribution. Cela permet de produire une puissance

alternative à partir du système PV soit en alimentant directement toutes les charges électriques, soit en injectant le surplus d'électricité (PV) dans le réseau lorsque les besoins sont plus importants.

La nuit ou par faible ensoleillement durant les périodes où les besoins des consommateurs sont supérieurs à la production (PV), le réseau fournit l'appoint nécessaire, l'équilibre énergétique peut être ainsi obtenue. Lorsque le réseau est à l'arrêt, le système (PV) est automatiquement coupé et déconnecté du réseau à partir du panneau de distribution. Ce facteur de sécurité supplémentaire est exigé pour s'assurer que la centrale (PV) est coupée du réseau lorsque celui-ci est hors service pour raison de maintenance ou autre [7].

Les systèmes PV connectés au réseau avec batterie

Ce type de système est utilisé généralement lorsqu'une puissance supplémentaire est nécessaire pour alimenter des charges critiques telles que la réfrigération, les pompes à eau, l'éclairage ou autres.

Dans des circonstances normales, le système fonctionne en mode relié au réseau en alimentant toutes les charges ou en renvoyant la puissance en surplus sur le réseau tout en maintenant la batterie en pleine charge [7].

les composants d'un système photovoltaïque

Générateur photovoltaïque :

Les générateurs PV comme leur nom indique génèrent l'énergie électrique. Une cellule photovoltaïque produit moins de 2 watts sous approximativement 0,5Volt. Alors Pour produire plus de puissance les cellules sont assemblées pour former un module, une association série et/ou parallèle de plusieurs cellules donne un module et une association série et/ou parallèle de plusieurs modules permet de réaliser un panneau L'ensemble des panneaux photovoltaïques interconnectés forme le générateur PV figure I.7, Celui-ci convertit directement la lumière solaire en électricité, sous forme de courant continu [8] [9].

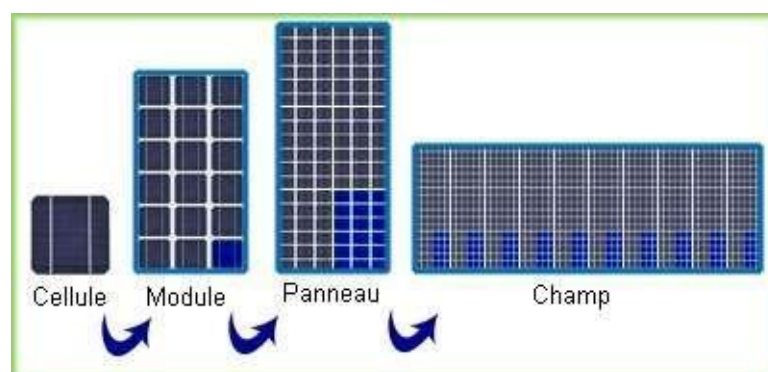


Figure I.7 : Schéma explicatif du fonctionnement d'une installation de panneaux solaires [10].

Caractéristique courant - tension $I(V)$ d'un générateur PV

Caractéristique $I_{PV} = f(V_{PV})$: À température (25°C) et éclairement ($1000\text{W}/\text{m}^2$) constants, et particulièrement aux conditions standards la caractéristique est donnée par la figure I.8.

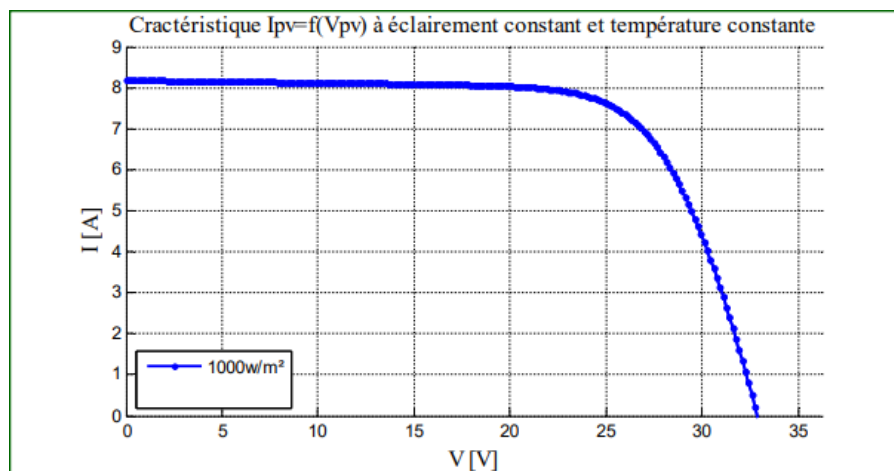


Figure I.8 : Caractéristique $I_{PV} = f(V_{PV})$ à éclairement constant et température constante [11].

Caractéristique puissance - tension $P(V)$ d'un générateur PV

Caractéristique $P_{PV} = f(V_{PV})$ à température (25°C) et éclairement ($1000\text{W}/\text{m}^2$) constants, et particulièrement aux conditions standards la caractéristique est donnée par la figure I.9.

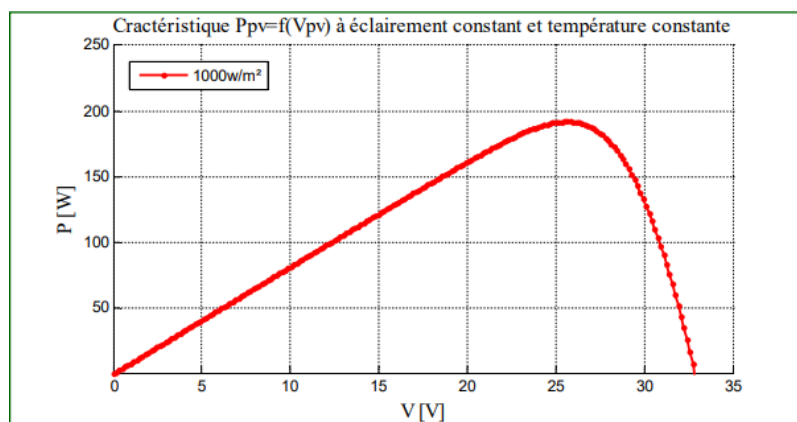


Figure I.9 : Caractéristique $P_{PV} = f(V_{PV})$ à température et éclairement constants [11].

L'influence de l'éclairement sur la caractéristique $I_{PV} = f(V_{PV})$

En faisant varier l'éclairement entre 200 et 1000 avec un pas de 200, la caractéristique $I_{PV} = f(V_{PV})$ est donnée par la figure I.10.

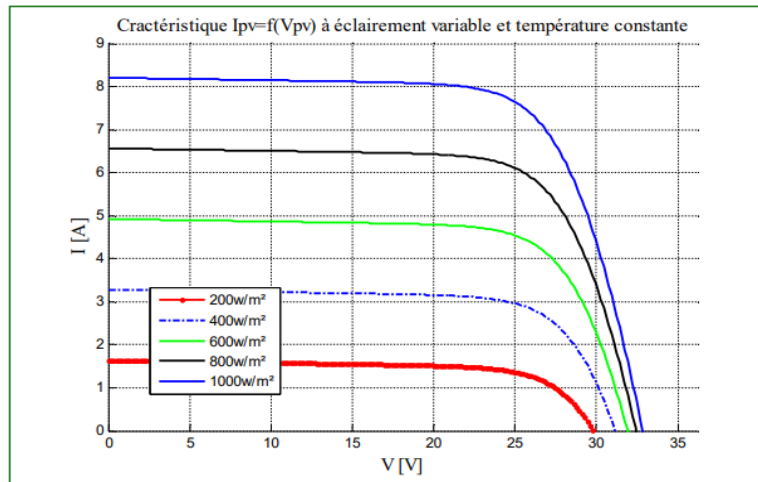


Figure I.10 : L'influence de l'éclairement sur la caractéristique $I_{PV} = f(V_{PV})$ [11].

D'après la Figure I.10, on remarque une forte diminution du courant de court-circuit par rapport à l'éclairement E et une faible diminution de la tension du circuit ouvert.

I.7. 1.4 L'influence de l'éclairement sur la caractéristique $P_{PV} = f(V_{PV})$

En faisant varier l'éclairement entre 200 et 1000 avec un pas de 200, la caractéristique $P_{PV} = f(V_{PV})$ est donnée par la figure I.11.

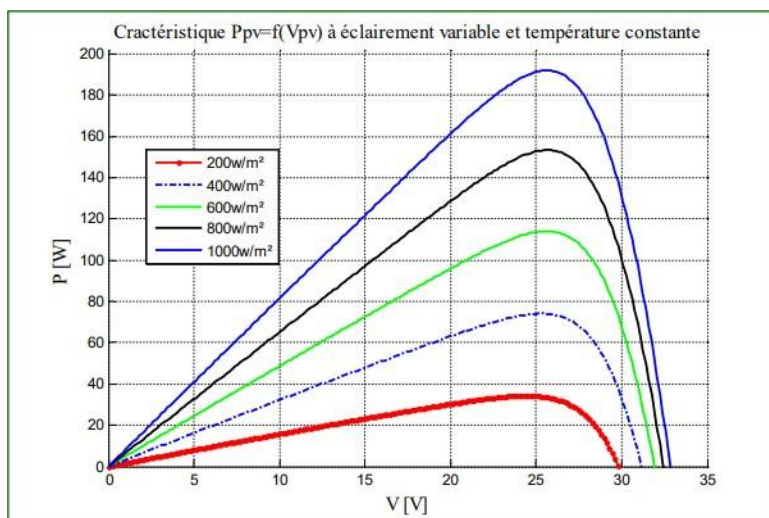


Figure I.11 : L'influence de l'éclairement sur la caractéristique $P_{PV} = f(V_{PV})$ [11].

On remarque sur la Figure I.11 que, l'éclairement influe proportionnellement sur la puissance et la tension du circuit ouvert d'un générateur photovoltaïque.

L'influence de la température sur la caractéristique $I_{PV} = f(V_{PV})$

En faisant varier la température ambiante entre (0°C et 75°C) avec un pas de 25°C l'influence de celle-ci sur la caractéristique ($I_{pv}-V_{pv}$) est donnée par la figure I.12, avec un éclairement $E = 1000\text{w/m}$.

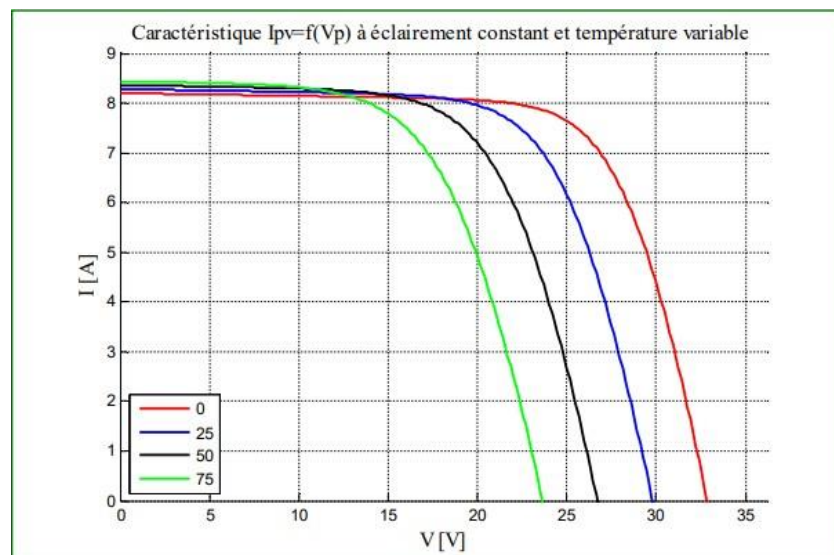


Figure I.12 : L'influence de la température sur la caractéristique $I_{PV} = f(V_{PV})$ [11].

On constate d'après la Figure I.12 que l'effet de l'augmentation de la température fait diminuer la tension du circuit ouvert du générateur photovoltaïque, contrairement au courant de court-circuit qui reste constant.

L'influence de la température sur la caractéristique $P_{PV} = f(V_{PV})$

En faisant varier la température ambiante entre (0°C et 75°C) avec un pas de 25°C l'influence de celle-ci sur la caractéristique $P_{PV} = f(V_{PV})$ est donnée par la figure I.13, avec un éclairement $E = 1000 \text{ w/m}$.

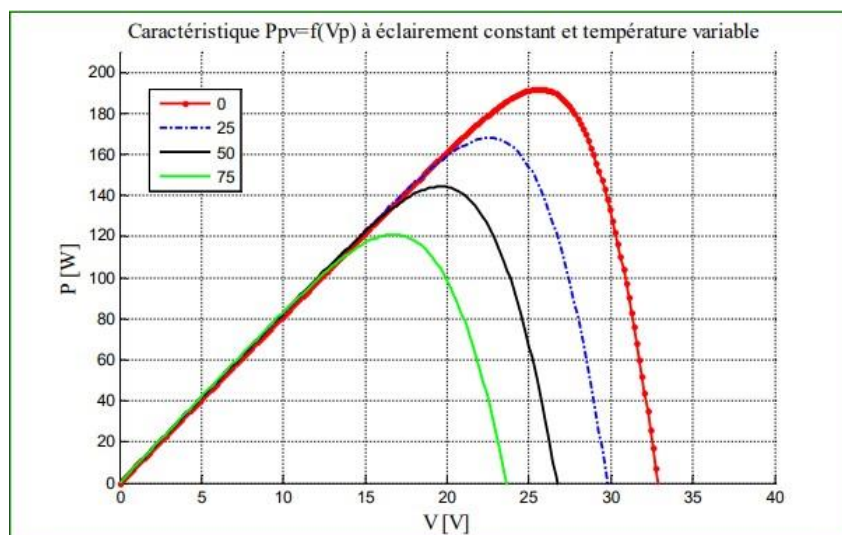


Figure I.13 : L'influence de la température sur la caractéristique $P_{PV} = f(V_{PV})$ [11]

D'après la figure I.13, l'effet de l'augmentation de la température sur la caractéristique $P_{PV} = f(V_{PV})$ fait diminuer légèrement la puissance et la tension du circuit ouvert du générateur photovoltaïque.

Paramètres caractéristiques d'un générateur PV.

- **La puissance crête P_c** : Puissance électrique maximum que peut fournir le module dans les conditions standards (25°C et un éclairage de 1000 W/m²).
- **La tension de circuit ouvert (à vide) V_{CO}** : tension aux bornes du module en l'absence de tout courant ;
- **Courant de court-circuit I_{CC}** : courant débité par un module en court-circuit ;
- **Le point de fonctionnement optimale (V_{mp}, I_{mp})** : lorsque la puissance de crête est maximum ;

$$P_m = V_{mp} * I_{mp} \quad (I.1)$$

- **Facteur de forme FF** : en anglais : « Fill Factor » est défini comme le rapport entre la puissance maximale et le produit (I_{CC}, V_{CO}), Ce paramètre compris entre 0 et 1, d'où il est donné par la relation :

$$FF = \frac{P_m}{I_{CC} * V_{CO}} = \frac{V_{mp} * I_{mp}}{I_{CC} * V_{CO}} \quad (I.2)$$

- **Rendement** : Il est défini comme le rapport entre la puissance maximale produite par la cellule et la puissance du rayonnement solaire qui arrive sur la cellule.

Association des cellules photovoltaïques

a. Mise en série

Les cellules sont assemblées pour former un GPV élémentaire (module photovoltaïque). Les connexions en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant. L'équation suivante résume les caractéristiques électriques d'une association série d'un nombre (N_s) cellules.[12]

$$V_{cos} = N_s * V_{CO} \quad (I.3)$$

$$I_{CCS} = I_{CC} \quad (I.4)$$

Avec :

- ✓ V_{cos} : la somme des tensions en circuit ouvert de N_s cellules en série ;
- ✓ I_{CCS} : courant de court-circuit de N_s cellules en série.

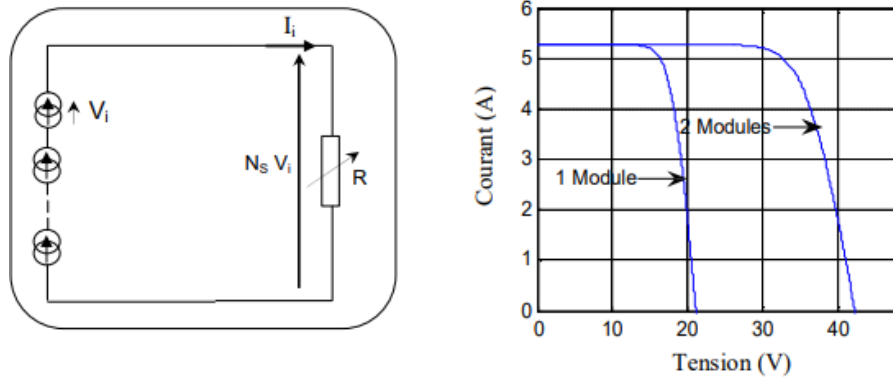


Figure I.14 : Associations en série [12].

b. Mise en parallèle

Les connexions en parallèle de plusieurs cellules augmentent le courant pour la même tension. L'équation suivante résume les caractéristiques électriques d'une association parallèle d'un nombre (N_p) cellules [12] :

$$I_{CCP} = N_p * I_{CC} \tag{I.5}$$

$$V_{CO} = V_{COP} \tag{I.6}$$

- ✓ I_{CCP} : la somme des courants de court circuit de (N_p) cellule en parallèle.
- ✓ V_{COP} : la tension du circuit ouvert de (N_p) cellules en parallèle.

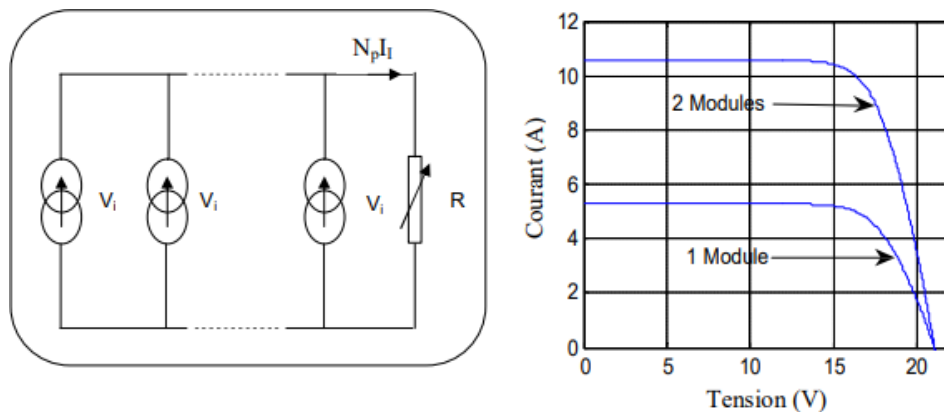


Figure I.15 : Association en parallèle [12].

Système de stockage

Le stockage d'énergie consiste à emmagasiner pendant une période où elle est abondante ou moins coûteuse pour l'utiliser pendant une période durant laquelle elle est rare ou plus chère.

Parmi les formes de stockages d'énergies on cite :

- Sous forme d'énergie électrochimique dans les batteries ;
- Sous forme d'énergie chimique dans les piles à combustible ;

- Sous forme d'énergie mécanique ;
- Stockage hydraulique dans une station de transfert d'énergie par Pompage STEP ;
- Sous forme d'Énergie mécanique cinétique dans un volant d'inertie ;
- Sous forme d'énergie électrique dans un super condensateur.

Les convertisseurs statiques

Les convertisseurs sont des appareils servent à transformer la tension continue fournie par les panneaux ou les batteries 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.

En générale on trouve deux sorte de convertisseurs dans une installation PV, le hacheur et l'onduleur qui ont pour rôle d'extraire la puissance maximale du générateur PV et la convertir en puissance alternative avant de la consommer [2].

les hacheurs

Les hacheurs opèrent une conversion continue-continu. Placés entre un générateur et un récepteur, tous deux à courant continu, ils permettent de régler la tension appliquée au récepteur ou le courant qui y circule. Ils peuvent être directs ou indirects. [13]

Les hacheurs directs

Les hacheurs directs relient un générateur et un récepteur qui se comportent l'un comme une source de tension, l'autre comme une source de courant .Ils ne comportent que des interrupteurs qui permettent d'agir sur les connexions entre le générateur et le récepteur.[13]

a. Hacheur série

Le hacheur série (en anglais buck converter) dit aussi un abaisseur de tension est un convertisseur statique réglant le transfert d'énergie entre une générateur de tension continue est une source de courant continu. Suivant le schéma de principe ci-dessous figure I.16.

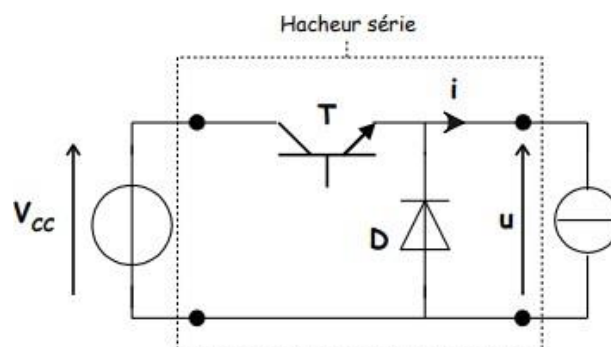


Figure I.16 : Hacheur Série (buck) [13].

b. Hacheur parallèle

Le hacheur parallèle (en anglais boost converter) dit aussi un élévateur est un convertisseur statique réglant le transfert d'énergie entre un générateur de courant continu et un récepteur de tension continue. Suivant le schéma de principe ci-dessous figure I.17.

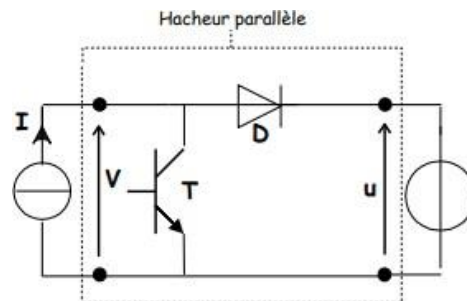


Figure I.17: Hacheur parallèle (boost) [13].

Hacheur indirect

Les hacheurs indirects relient un générateur et un récepteur de même nature. Ils comportent des interrupteurs et un élément de stockage d'énergie qui joue le rôle de source intermédiaire de courant ou de tension suivant que générateur et récepteur sont des sources de tension ou de courant. L'élément de stockage reçoit de l'énergie du générateur puis la transmet au récepteur en fonction des connexions établies par les interrupteurs [13].

a. Hacheur à stockage inductif

Ce type de hacheur, souvent appelé abaisseur-élévateur ou Buck-Boost, permet de relier deux sources de tension, par l'intermédiaire d'une source de courant (bobine) qui doit accumuler, puis restituer au récepteur l'énergie délivrée par le générateur [13].

b. Hacheur à stockage capacitif

Ce type de hacheur permet de relier deux sources de courant, par l'intermédiaire d'une source de tension (condensateur) qui doit accumuler, puis restituer au récepteur l'énergie délivrée par le générateur.[13]

les onduleurs

L'onduleur est un convertisseur statique DC/AC de haute performance il convertit la tension continue, en tension alternative contrôlée de façon très précise. Dans une station PV la puissance maximale extraite par le hacheur est convertie en puissance alternative active par l'onduleur. [2]

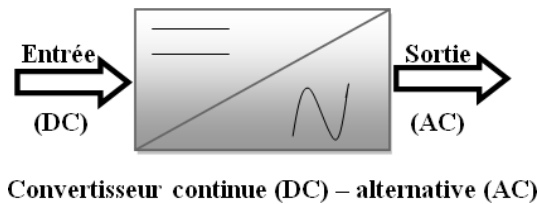


Figure I.18: Fonction de l'onduleur.

les différents types d'onduleurs

Un onduleur est un dispositif électronique assurant la conversion statique d'une tension/courant continu en tension /courant alternatif. Il est dit autonome s'il assure de lui-même sa fréquence et sa forme d'onde, Deux types d'onduleurs sont donc utilisés pour assurer une telle conversion. [14]

a. Onduleur Monophasé

Ce type d'onduleur délivrant en sa sortie une tension alternative monophasée. Il existe trois types d'onduleur monophasés :

- Onduleur Push pull ;
- Onduleur en demi-pont ;
- Onduleur en pont.

b. Les onduleurs triphasés

La plupart des machines sont triphasées comme montre la figure II.19, on utilise des onduleurs triphasés pour réaliser la variation de vitesse.

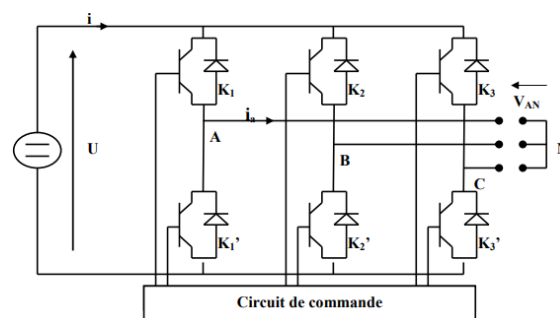


Figure I.19 : Onduleur triphasé [15]

Classification des onduleurs

Les onduleurs sont classés [14]:

a. Selon le mode de commutation

- **Les onduleurs autonomes** qui génèrent leur propre fréquence et leur propre tension alternative. Dans ces onduleurs la commutation est forcée. [14]

- **Les onduleurs non autonomes** dont la fréquence et la tension alternative sont imposées par le réseau qu'ils alimentent. Dans ces onduleurs la commutation est naturelle. Elle est naturelle en ce sens que ce sont les tensions alternatives du réseau qui effectuent le transfert du courant d'un thyristor à l'autre [14].

b. Selon la nature de la source continue

- **Onduleur de tension** la source DC impose la tension, la charge AC impose le courant sinusoïdal.
- **Onduleur de courant** la source DC impose le courant, la charge AC impose la tension sinusoïdale [14].

les Régulateurs

Les régulateurs de charge pour les systèmes photovoltaïques peuvent être divisés en quatre catégories :

Régulateurs série

Incorpore un interrupteur entre le GPV et l'accumulateur pour arrêter la charge. [5]

Régulateur shunt

Dont l'interrupteur court-circuite le GPV en fin de charge, c'est le modèle le plus répandu car simple à fabriquer. [5]

Régulateur PWM

Les régulateurs solaires PWM (Pulse Wide Management) possèdent un bon rendement et permettent d'optimiser la charge de la batterie. C'est à l'heure actuelle les régulateurs présentant le meilleur rapport prix/performance.

Régulateurs MPPT

Les régulateurs MPPT (Maximum Power Point Tracking) possèdent une technologie avancée qui recherche en permanence le point de puissance maximum. Ce qui permet de tirer les meilleures performances des panneaux photovoltaïques. En plus de fournir une augmentation d'énergie à une installation, ils optimisent la charge de la batterie et prolongent leur durée de vie. Les régulateurs MPPT balayent la tension du panneau pour trouver le point de sortie de puissance maximum. Ils sont capables d'adapter la tension fournie par le panneau pour l'aligner à la tension que la batterie peut recevoir.[16]

Parmi les stratégies MPPT les plus utilisées, on cite par exemple :

a. La technique perturbation et observation P&O

l'algorithme perturbation et observation (P and O) de poursuite du PPM est le plus utilisé (la technique utilisé dans cette thèse), et comme son nom l'indique il est basé sur la perturbation du système par l'augmentation ou la diminution de V_{ref} où en agissant directement sur le rapport cyclique du hacheur, puis l'observation de l'effet sur la puissance de sortie de panneau La figure I.20 présente le principe de suivi de point maximum et l'algorithme est décrite par la figure I.21 [17]

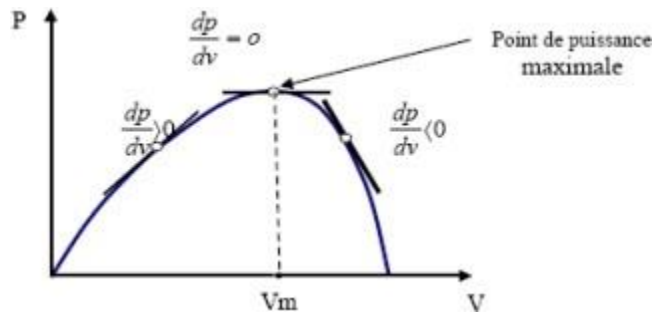


Figure I.20 : le principe P&O pour suivre le MPP [17].

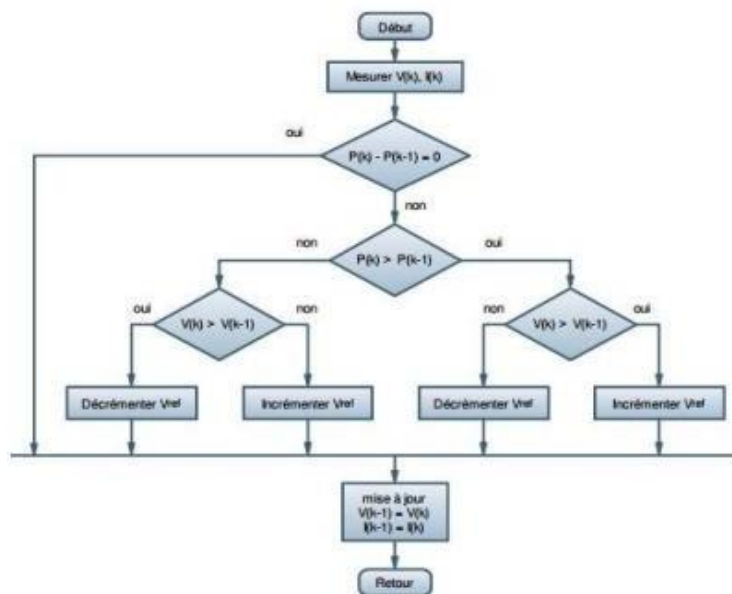


Figure I.21 : l'algorithme P&O[17].

b. la technique incrémentation de conductance (IC)

L'algorithme par incrémentation de conductance figure I.22 se résulte en dérivant la puissance du panneau photovoltaïque par rapport à la tension et en mettant le résultat égal à zéro [17].

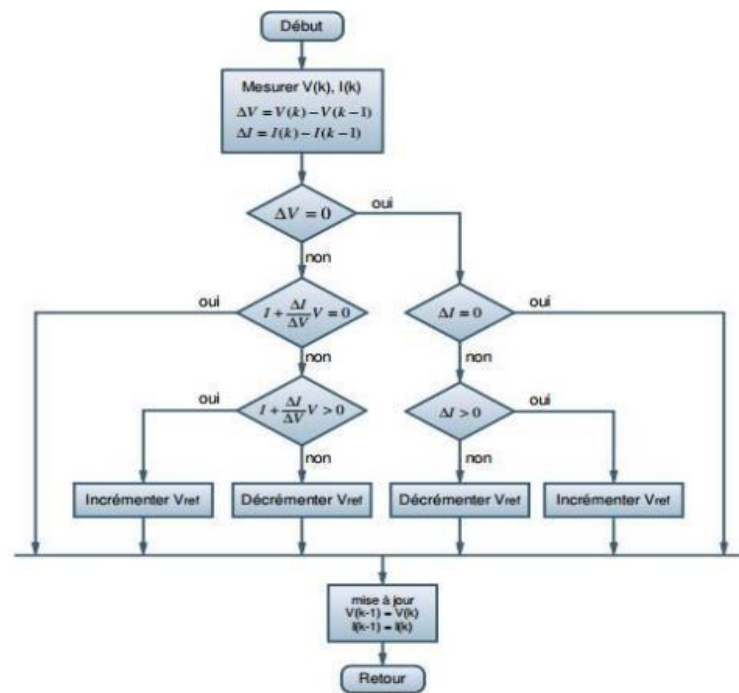


Figure I.22: L'algorithme par incrémentation de conductance [17].

c. Algorithme de la logique floue (FL)

FL est une nouvelle approche basée sur l'intelligence artificielle. Il représente une amélioration de l'algorithme classique de l'IC en termes de robustesse, de stabilité et la facilité d'implémentation. A l'instar des autres contrôleurs MPPT, la tâche principale du contrôleur FL est d'atteindre le MPP [18].

Transformateur

Suivant le poste électrique, le transformateur sera [19]:

- Élévateur, la tension au secondaire(en sortie) sera plus élevée que la tension primaire (en entrée), généralement en sortie de centrale.
- Abaisseur, la tension au secondaire(en sortie) sera moins élevée que la tension primaire (en entrée), utilisé pour l'adaptation à l'utilisation.

la charge

charge AC

Le courant alternatif (CA ou AC pour alternative current) c'est un type de courant électrique. Les électrons circulent de manière alternative dans les deux sens du circuit. En fait, c'est la rotation d'un alternateur qui génère un mouvement de va et vient des électrons. Dans ce cas, le déplacement des électrons se limite à quelques millièmes de millimètre. Le courant alternatif est mesuré par sa fréquence (en hertz). En Algérie, la fréquence est de 50Hz, le courant effectue donc 50 allers-retours par seconde. [20]

charge DC

Le courant continu (CC ou DC pour direct current) est un courant électrique dans lequel les électrons circulent continuellement dans la même direction, c'est-à-dire du pôle négatif vers le pôle positif. Sa vitesse de déplacement est de plusieurs mètres par heure et sa propagation se fait à la vitesse de la lumière [20].

Architecture des réseaux électriques

La conception et l'utilisation de chaque architecture du réseau électrique permettent d'atteindre plus ou moins une grande disponibilité de l'énergie électrique. Le coût économique du réseau dépend naturellement de sa complexité. Le choix d'une architecture de réseau est donc un compromis entre des critères techniques et économiques.

En fonction de la densité et de la nature des unités de production, un réseau aura une architecture semblable à celle de la figure I.23. Nous pouvons noter que les unités de production peuvent être raccordées aux différents étages selon la puissance mise en jeu. Les transformateurs jouent un rôle très important pour passer d'un niveau de tension à un autre donc pour passer d'un type de réseau à un autre [1].

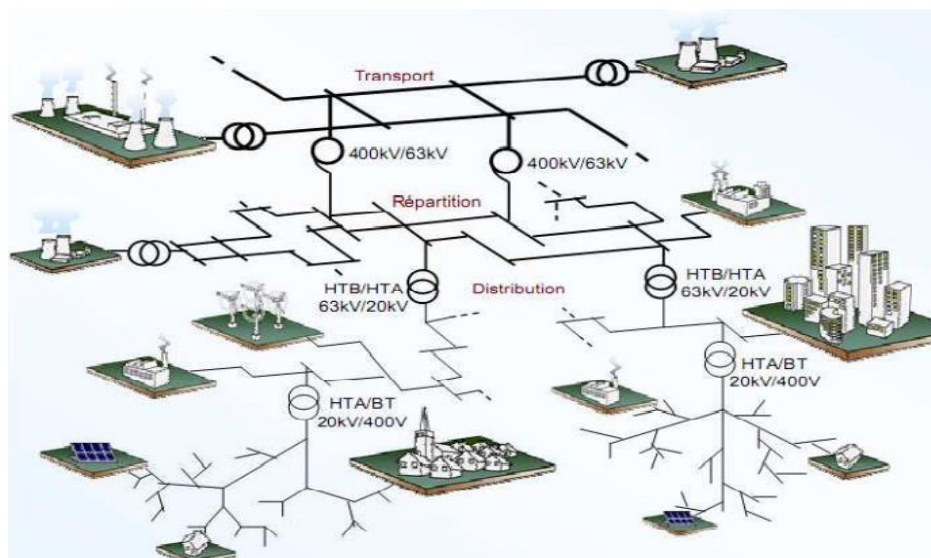


Figure I.23 : Architecture des réseaux électriques [1].

la protection d'une installation PV

la protection des panneaux PV

- **Diode by passe en parallèle** : les diodes by-pass peuvent isoler un sous-réseau de cellules lorsque l'éclairement n'est pas homogène (effet d'ombrage) évitant ainsi l'apparition de points chauds et la destruction des cellules mal éclairées.

- **Diode anti retour en série :** La diode anti-retour génère un courant négatif dans le GPV. Ce phénomène peut se produire lorsque plusieurs modules sont connectés en parallèle ou bien quand une charge en connexion directe peut basculer du mode récepteur au mode générateur, par exemple une batterie durant la nuit [21]

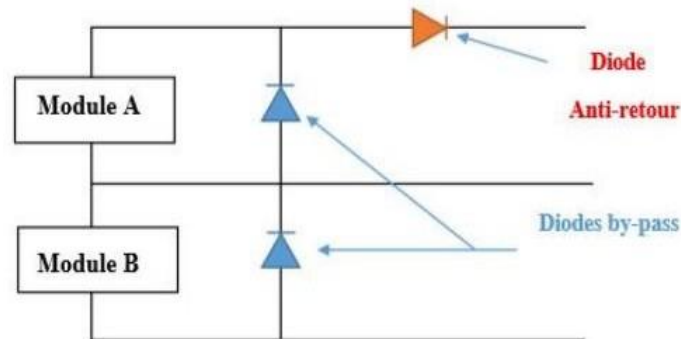


Figure I.24 : Schématisation d'un GPV élémentaire avec diodes by-pass et diode anti-retour [21].

La protection du générateur PV

- **Du côté alternatif :** il faut protéger l'installation contre les surintensités, les surtensions atmosphériques. Il faut prévoir la mise en place d'un interrupteur sectionneur afin de déconnecter l'installation ainsi que la mise en place de la protection des personnes.
- **Du côté continu :** il faut protéger l'installation contre les court-circuits et les surtensions atmosphériques. Il faut également prévoir la mise en place d'un interrupteur général permettant la coupure de l'ensemble des panneaux solaires en cas d'urgence [21].

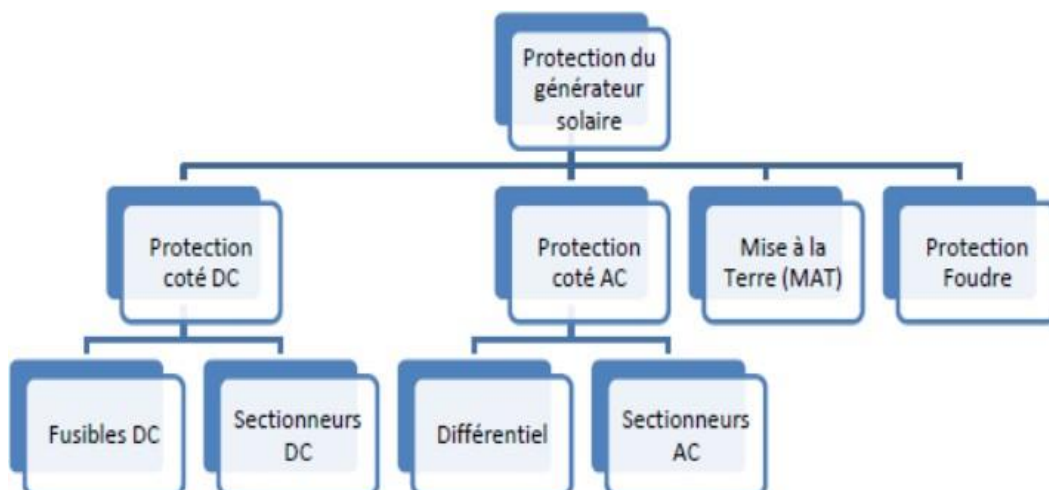


Figure I.25 : diagramme de La protection électrique des installations PV[21].

Les avantages et les inconvénients de système PV**Les avantages de système PV**

- L'énergie solaire est disponible Renouvelable, inépuisable et pas toxique ;
- La durée de vie des panneaux photovoltaïques est très longue (25 ans) ;
- Les systèmes PV peuvent être des systèmes autonomes qui fonctionnent sûrement, sans surveillance pendant de longues périodes ;
- ils peuvent être combinés avec d'autres sources d'énergie pour augmenter la fiabilité de système ;

les inconvénients de système PV

- Le coût de production est très élevé ;
- Stockage difficile ;
- l'énergie issue du générateur photovoltaïques est continu et de faible voltage (< à 30 V) donc il doit être transformé par l'intermédiaire d'un onduleur ;
- Beaucoup d'appareils vendus sur le marché fonctionnent avec du 230 V alternatif .

Conclusion

Dans ce chapitre notre objectif consiste à étudier les systèmes PV, donc on a présenté en premier, la définition de l'énergie renouvelable et l'énergie solaire et puis l'énergie photovoltaïque et le système photovoltaïque.

Ensuite, nous allons montrer à vous les différentes installations de système PV. Et puis, nous allons aborder en détails les éléments principaux de système PV.

À la fin de ce chapitre nous allons illustrer les avantages et les inconvénients de système PV.

Chapitre II

Intégration des énergies

Photovoltaïques aux réseaux électriques

Introduction

L'électricité produite par les énergies solaire photovoltaïque injectée via un réseau électrique, Le raccordement au réseau de l'installation photovoltaïque via un convertisseur statique DC-AC nécessite évidemment la synchronisation de ces deux systèmes. Parmi les possédés fréquemment utilisés pour assuré la synchronisation entre ces systèmes :

- ✓ La commande MLI ;
- ✓ La boucle de verrouillage de phase (PLL) ;
- ✓ La commande VSC (Voltage Source Converter).

Structure générale d'un système photovoltaïque connecté au réseau

Il existe deux types de structures de système photovoltaïque :

Les systèmes à connexion directe au réseau

Structure à convertisseur unique

Le dispositif représenté sur la figure II.1 est le plus le plus simple, Parce qu'il contient le moins de composants possible, Pour obtenir une tension continue suffisamment élevée, On associe plusieurs modules photovoltaïques en sérié.

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 (230V).

Il est avantageux d'installer un transformateur pour isoler le du réseau photovoltaïque système. Le principal inconvénient 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 de la puissance est voisin, car toutes les cellules ne délivrent pas le même courant en raison de leurs différences de structure interne et d'ensoleillement [22].

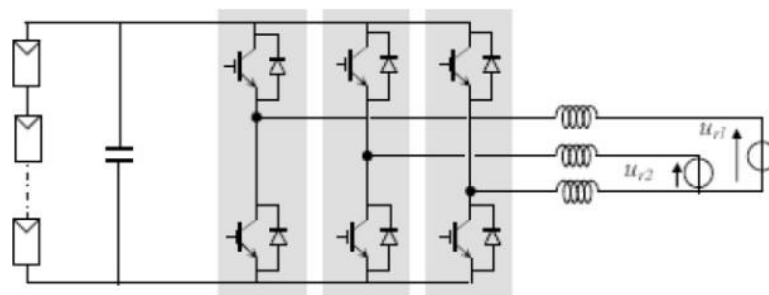


Figure II.1:Plusieurs modules PV en sérié vers un seul onduleur [22].

Structure avec bus à basse tension alternative

La figure II.2 montre un onduleur associé à un circuit de commande qui est directement connecté au module photovoltaïque. La tension en sortie de ce dernier est transformée en une tension alternative de fréquence 50 Hz. Cette tension est transportée grâce à un bus alternatif (220 V – 50 Hz, exemple du schéma) vers un transformateur central qui l'élève au niveau désiré. Le faible niveau de tension dans le bus est l'avantage majeur de ce type de montage, puisqu'il assure la sécurité des personnels.

Cependant, la distance entre le transformateur et le module doit être faible à cause du courant important qui traverse les câbles et qui génère des pertes joules. Il y a un compromis à faire au niveau de la tension du bus alternatif. D'une part, il faut que sa valeur crête soit inférieure à celle délivrée par les modules (même avec un faible ensoleillement). D'autre part, une tension faible dans ce bus diminue le rendement [22].

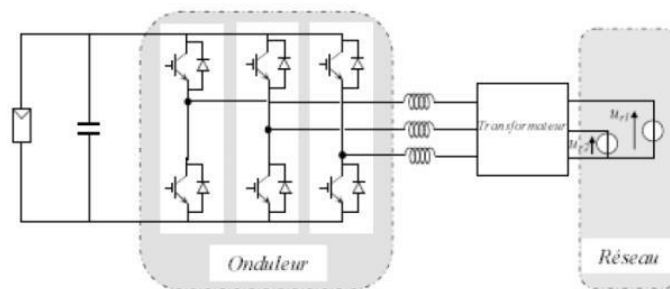


Figure II.2 : Bus à basse tension alternative [22].

Les systèmes a bus continu intermédiaire

Le générateur photovoltaïque est connecté par l'intermédiaire d'un convertisseur continu-continu. Un onduleur délivre une tension modulée, celle-ci est filtrée pour réduire le taux d'harmonique, on obtient alors en sortie de ce dispositif une tension utilisable pouvant être injectée dans le réseau [22].

Structure avec convertisseur forward

La figure II.3 présente un convertisseur forward qui est capable d'augmenter la tension en série du module photovoltaïque jusqu'à 350 V (tension désirée).

L'utilisation d'un transformateur pour la connexion au réseau n'est donc pas nécessaire, la conversion continu-alternative se fait de façon relativement simple, grâce à un onduleur centralisé. Les inconvénients majeurs de ce montage sont :

- la capacité doit être relativement importante, à cause des ondulations du courant en sortie du module.

- Le bus continu supportera un signal en créneau qui induira une grande émission d’ondes électromagnétiques et éventuellement des pertes de fuite ; l’induction du transformateur compris dans le convertisseur génèrera des pertes de fuite.
- La tension élevée qui traverse le bus continu réduit la sécurité du personnel d’entretien [22].

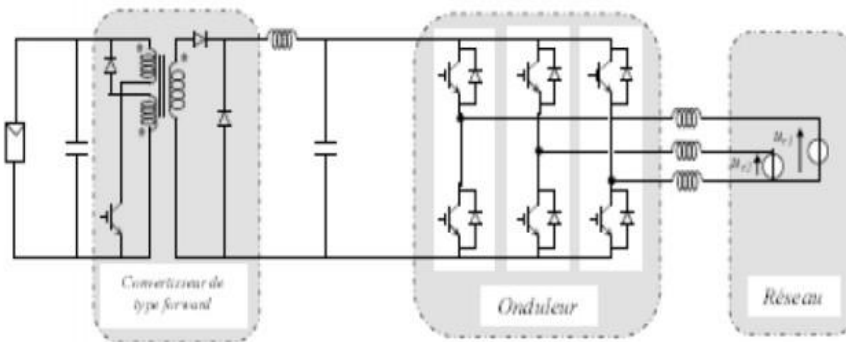


Figure II.3 : Convertisseur de type forward alimentant le bus continu [22].

Structure avec convertisseur de type fly-back

La figure II.4 montre une structure à base d’un convertisseur de type fly-back qui élève la tension sortie du module photovoltaïque au niveau de tension désirée. La caractéristique principale du fly-back se situe au niveau du transformateur qui agit comme l’inducteur principal et qui assure l’isolation galvanique.

Le hacheur est contrôlé pour obtenir un maximum d’énergie du module photovoltaïque et l’onduleur assure une tension constante et le transfert de puissance vers le réseau.

L’inconvénient du transformateur est qu’il génère des pertes et qui augmente le coût de l’installation [22].

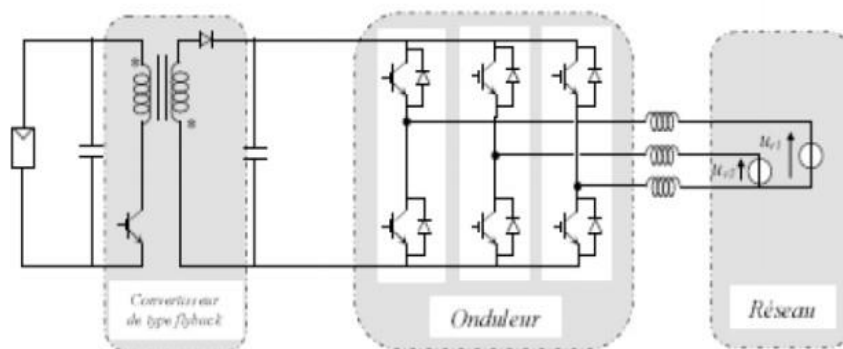


Figure II.4 : Structure avec convertisseur de type fly-back [22].

Structure avec hacheur et onduleur

La figure II.5 représente un hacheur qui élève la tension en sortie du module photovoltaïque délivrée sur le bus continu.

Avec le hacheur, il est difficile d'élever la tension en sortie des modules plus de 4 à 5 fois pour obtenir une tension continue suffisamment grande, en raison de la résistance de l'inductance. On adjoint un onduleur pour avoir une sortie sinusoïdale, puis un transformateur pour élever cette tension au niveau désiré (selon le réseau) et pour assurer l'isolation entre la partie " production " et la partie " utilisation".

L'avantage de ce système est que des batteries peuvent être facilement connectées au bus continu pour obtenir un système autonome. Le courant d'entrée est relativement lisse, c'est pour cela que la capacité peut être faible [22].

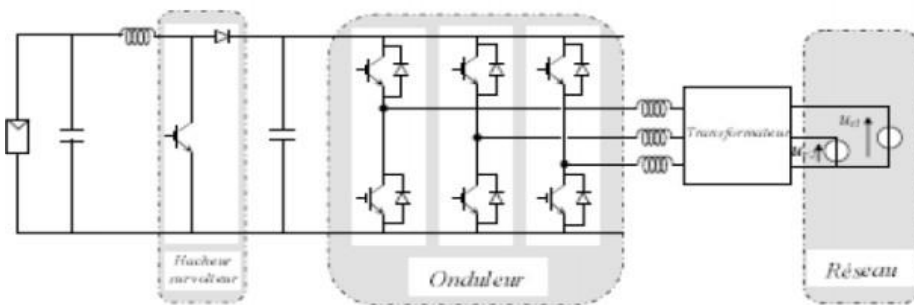


Figure II.5 : Hacheur élévateur de tension avec onduleur centralisé [22].

Classifications des Centrales Photovoltaïques Connectées au Réseau

Une première classification des (CPCR) en fonction de leur taille peut être faite de la manière suivante [24] :

Centrales de petite taille ($P_w = 1\text{à}10\text{KW}$)

Pour des applications sur les toits de maisons individuelles ou d'institutions publiques telles que les écoles, parkings,... Elles se connectent au réseau basse tension.

Centrales de taille moyenne ($P_w = 10\text{à}100\text{KW}$)

Ce type de système peut se trouver installé et intégré sur un édifice, sur un toit ou une façade. Il peut être connecté à la basse ou à la moyenne tension du réseau de distribution électrique selon sa taille.

Centrales de grande taille ($P_w \geq 500\text{KW}$)

Ce sont des systèmes centralisés et sont des propriétés de compagnies d'électricité. On peut également classer ces systèmes selon qu'ils soient munis de batteries de stockage ou non.

II.4 Convertisseurs DC/AC

Un convertisseur DC/AC (onduleur de tension utilisé dans ce travail) est essentiellement utilisé pour fournir une tension ou un courant alternatif afin d'assurer l'alimentation en énergie

des charges critiques (micro-ordinateur, station de télécommunication,..) pendant la coupure du réseau électrique ou une alimentation permanente pour les systèmes autonomes (centrales photovoltaïques, engins aérospatiaux,...) .

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

- Source de tension continue (par exemple: batterie) ;
- Convertisseur DC/AC ;
- Filtre (LC, L, ou LCL)[25].

Les filtres

Le filtre de sortie réduit les harmoniques du courant généré par la commutation des semi-conducteurs. Il existe plusieurs types de filtres. La variante la plus simple est l'inductance du filtre connectée à la sortie de l'onduleur. Mais aussi des combinaisons avec des condensateurs comme LC ou LCL peuvent être utilisées [26].

Filtre L

Le filtre L figure II.6 est le filtre de premier ordre avec une atténuation de 20 dB/décade sur toute la gamme de fréquences. Par conséquent, l'application de ce type de filtre convient aux convertisseurs à haute fréquence de commutation, où l'atténuation est importante. L'atténuation est successive.

D'autre part, l'inductance diminue considérablement la dynamique du convertisseur-filtre du système entier. La fonction de transfert du filtre L est représentée sur la figure 3 par une ligne pointillée noire [26].

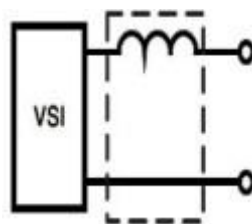


Figure II.6 : Filtre L [26].

Filtre LC

Le filtre LC est représenté à la figure II.7 Il s'agit d'un filtre de second ordre qui présente un meilleur comportement d'amortissement que le filtre L. Cette configuration simple est facile à concevoir et fonctionne généralement sans problème [26].

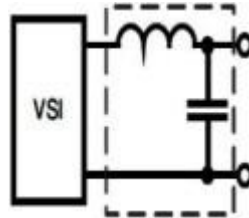


Figure II.7 : Filtre LC [26].

Filtre LCL

Le filtre LCL a une bonne atténuation des ondulations de courant, même avec de petites valeurs d'inductance. Cependant, il peut apporter résonances et des états instables dans le système. Par conséquent, le filtre doit être conçu précisément en fonction des paramètres du convertisseur spécifique [26].

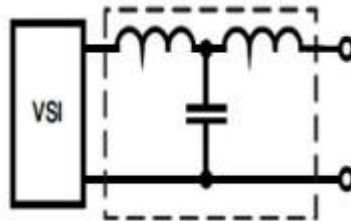


Figure II.128 : Filtre LCL [26].

Technologies des onduleurs couplés au réseau

L'installation d'un onduleur couplé au réseau électrique se fait avec l'accord de l'organisme de distributeur de d'énergie électrique.

Pour des raisons de sécurité, un onduleur couplé au réseau doit constamment surveiller ces perturbations et interrompre immédiatement l'injection en cas de défaillance ou de coupure.

Ceci est absolument nécessaire pour permettre une intervention sans danger sur le réseau des solutions techniques optimales en fonction des simples conditions locales ont amené au classement de trois différentes typologies d'onduleurs [27].

Onduleurs modulaires (module inverter)

Suivant ce concept, chaque module solaire dispose d'un onduleur individuel figure II.9, On prévoit de petits onduleurs pour réduire le coût, Les onduleurs modulaires sont montés à proximité immédiate du module solaire correspondant [27].

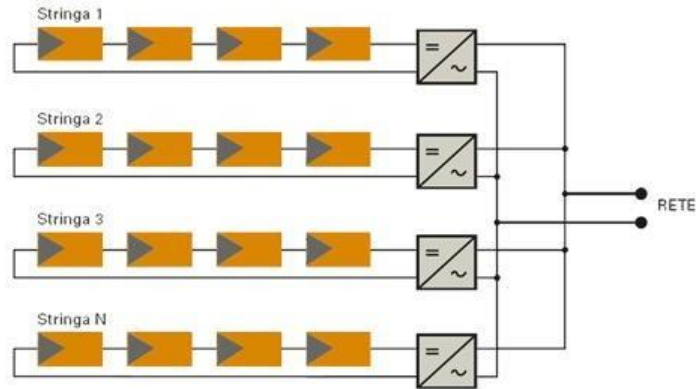


Figure II.9: Onduleurs modulaires (module inverter) [27].

Onduleurs centralisés (central inverter)

Un onduleur centralisé de forte puissance transforme l'ensemble du courant continu produit par un champ de cellules solaires en courant alternatif.

Le champ de cellules solaires est en règle générale constitué de plusieurs rangées connectées en parallèle.

Chaque rangée est elle-même constituée de plusieurs modules solaires connectés en série. Pour éviter les pertes dans les câbles et obtenir un rendement élevé, on connecte le plus possible de modules en série. Le schéma bloc d'un tel arrangement est donné par la Figure. II.10 [27].

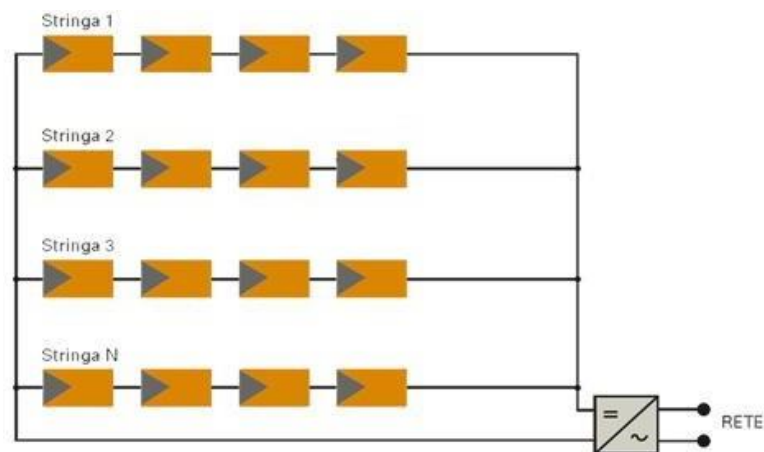


Figure II.10 : onduleur central (Centralise inverter) [27].

Onduleurs String ou " Rangée"

L'onduleur de rangée est le plus utilisé figure II.11. Le plus souvent, les modules solaires sont connectés en série.

Comme une seule connexion série est nécessaire, les coûts d'installation sont réduits. Il est important de noter qu'en cas d'ombrage partiel des modules solaires, il n'y a pas de perte, l'emploi de diodes de by-pass est fortement recommandé.

Les installations jusqu'à 3 Kilowatt de puissance sont fréquemment réalisées avec un onduleur String. Pour une puissance plus élevée, il est possible de connecter plusieurs onduleurs String en parallèle, côté courant alternatif. L'intérêt dans ce concept est d'utiliser un plus grand nombre d'onduleurs du même type. Cela réduit les coûts de production et apporte un intérêt supplémentaire, si un onduleur tombe en panne, seule la production de la rangée concernée est défaillante [27].

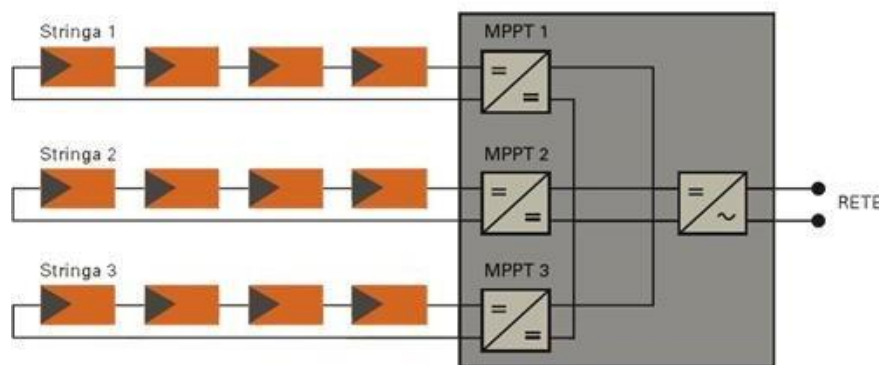


Figure II.11 : Onduleurs de " Rangée" ou "string"[27].

Stratégie de Commande de l'onduleur coté réseau

La structure du système de commande de l'onduleur peut être séparée en deux sous-systèmes ayant des dynamiques différentes le système rapide lié aux courants et le système lent qui est associé à la tension continue. De ce fait, une synthétisation de deux régulateurs pour la boucle des courants, et pour la boucle externe de la tension continue peut se faire.

La performance de la boucle des courants joue un rôle essentiel dans la performance globale du système, c'est pourquoi une commande ayant une réponse rapide et un bon comportement en état stationnaire s'avère nécessaire. Pour le réglage de la tension continue, l'utilisation de commandes classiques, en particulier du type proportionnel intégral, semble être suffisante pour obtenir des performances acceptables [28].

Objectif de la commande de l'onduleur

Le but de la commande est de gérer l'ordre d'ouverture et de fermeture des interrupteurs de sortie que la tension créée par l'onduleur soit la plus proche de la tension de référence. Parmi les méthodes de commande existantes dans la littérature peuvent être utilisées [29] :

- La commande Hystérésis ;
- La commande MLI ;
- La commande VSC.

Caractéristiques des onduleurs compatibles avec le réseau :

Les critères de compatibilité de l'onduleur avec le réseau sont [23] :

- Temps de réponse ;
- Facteur de puissance ;
- Commande de fréquence ;
- Rendement harmonique ;
- Synchronisation ;
- Contribution de courant de défaut ;
- Injection de courant continu ;
- Protection.

II.6 Choix des éléments caractéristiques du convertisseur côté réseau

Afin de réduire le coût, d'éviter beaucoup de problèmes de commande et d'atteindre de très bonnes performances dans la qualité de la puissance injectée, la première étape dans la conception de l'onduleur, qui permet l'injection au réseau, est de sélectionner ses paramètres adéquats [30]:

- ✓ Valeur de la tension du bus continu ;
- ✓ Valeur de la capacité du condensateur du bus continu ;
- ✓ Valeur de l'inductance de couplage au réseau.

Valeur de la tension du bus continu

Afin d'assurer la commandabilité du courant du convertisseur côté réseau, il faut que la tension du bus continu ($V_{DC-réf}$) soit supérieure à la valeur maximale (valeur crête) de la tension composée côté alternatif de l'onduleur et peut être déduite par la relation suivante [30]:

$$m_{a\ max} \left(\frac{V_{DC-réf}}{\sqrt{3}} \right) > V_{réf\ max} \Rightarrow V_{DC-réf} > \left(\frac{\sqrt{3} * V_{réf\ max}}{m_{a\ max}} \right) \quad (II.1)$$

Avec :

$m_{a\ max}$: La valeur maximum du coefficient de réglage.

$V_{DC\text{-}réf}$: La valeur maximum de la tension de phase à la sortie d'onduleur.

Valeur du condensateur du bus continu

La détermination de la valeur de la capacité du condensateur du bus peut être estimée en se basant sur le principe d'échange instantané de l'énergie nécessaire pour subvenir à une perturbation de puissance imposée par le générateur (régime transitoire) en appliquant le concept de l'équilibre d'énergie. Parmi les formules qui dimensionnent la valeur de la capacité dans le cas le plus défavorable, nous citons ci-dessous [30]:

$$C_{DC} = \frac{2 * P_{max} * 20 * 10^{-3}}{V_{DC}^2 (1 - k^2)} \quad (II.2)$$

$$k = (V_{DC\ min} / V_{DC}) \quad (II.3)$$

Avec :

P_{max} : La puissance maximale extraite qui sera injectée.

Cette formule est basée sur le rôle du condensateur du bus (DC) qui est de transiter la puissance extraite du générateur photovoltaïque. La tension « $V_{DC\ min}$ » doit être choisie judicieusement pour assurer la contrôlabilité du courant en tout points de fonctionnement [30].

Valeur de l'inductance de couplage au réseau

La présence des inductances de couplage au réseau est indispensable pour assurer le contrôle des courants injectés par l'onduleur. Ces inductances jouent le rôle de filtre passe bas et limitent l'ondulation du courant à la fréquence de commutation.

Pour cette raison, le calcul de l'inductance de couplage fait intervenir les paramètres classiques qui sont: la fréquence de commutation, l'ondulation maximale admissible du courant la traversant et la tension appliquée à ses bornes [30].

$$\Delta I_{max} = \frac{V_{DC}}{6.9 * L * f_c} \Rightarrow L = \frac{V_{DC}}{6.9 * \Delta I_{max} * f_c} \quad (II.4)$$

Avec :

ΔI_{max} : Ondulation du courant maximale admissible.

f_c : Fréquence de la porteuse (de commutation).

Influence des systèmes photovoltaïques sur le réseau de distribution

Le raccordement des installations photovoltaïques au réseau peut avoir des impacts importants sur son fonctionnement. Les influences les plus significatives des systèmes PV sur le réseau de distribution sont les suivants [31] :

Influence sur le plan de tension

La présence de générateur PV a une influence sur le plan de tension et sur les dispositifs de réglage du réseau. La tension varie en fonction des injections de puissance active et réactive sur le réseau. En particulier pendant une période de fort ensoleillement et de faible consommation, la tension de certains nœuds du réseau peut dépasser le seuil admissible. L'injection d'énergie sur le réseau fait croître la tension jusqu'à un seuil provoquant le découplage de certains dispositifs [31].

Influence sur le plan de protection

La contribution des systèmes photovoltaïques au courant de défaut dans le réseau de distribution a des conséquences faibles sur le plan de protection du départ en défaut. Mais la sensibilité et la sélectivité des protections du réseau peuvent être affectées et provoquer le déclenchement de la protection du départ en défaut [24].

Influence sur la qualité de l'énergie

- **Déséquilibre entre phases** : l'insertion des systèmes PV engendre un déséquilibre entre phases en cas d'utilisation d'onduleurs monophasés. Si la puissance produite n'est pas correctement répartie entre trois phases d'un même système PV triphasé, alors ce système va contribuer à déséquilibrer le réseau BT. Ce phénomène a été mis en évidence dans plusieurs études [31].
- **Injection d'harmoniques de courant** : la présence d'interfaces électronique de puissance peut injecter des harmoniques de découpage au réseau si les onduleurs ne sont pas munis de filtres efficaces. Les onduleurs actuels contribuent tout de même à l'augmentation des harmoniques de courant car ils fonctionnent le plus souvent à puissance réduite (un appareil fonctionnant à puissance réduite ne peut fournir la même qualité de courant qu'à puissance nominale). Les conséquences de ces harmoniques peuvent être instantanées sur certains

appareils électronique : trouble fonctionnels (synchronisation, commutation) disjonctions intempestives,...) [31].

Influence sur les pertes dans les réseaux de distribution

Généralement les installations PV de plusieurs MW, raccordées sur de départs HTA dédiés, conduiraient à une augmentation des pertes et que les installations PV de type résidentiel, plus proche des lieux de consommation, permettraient de réduire des pertes [31].

Influence du réseau de distribution sur le fonctionnement des installations photovoltaïques

Le fonctionnement et les perturbations de réseaux de distribution peuvent influencer le fonctionnement normal des systèmes PV. Ceci provient généralement, soit des caractéristiques intrinsèques des réseaux de distribution, soit de la qualité de tension dégradée par d'autres utilisateurs du réseau, soit d'une association de ces deux causes. Ces effets entraînent généralement des découplages injustifiés des onduleurs. Les influences du réseau de distribution sur le fonctionnement des installations photovoltaïque peuvent se résumer comme suit [31]:

Régime de neutre et courants de fuite

En Algérie, le régime de neutre utilisé en basse tension est de type TT. Avec ce régime, la protection des personnes s'effectue à l'aide de disjoncteurs ou d'interrupteurs différents qui ont pour fonction de s'ouvrir en cas de fuite de courant. Ces courants de fuite peuvent être d'amplitude importante et devenir potentiellement dangereux pour les personnes en cas de contact direct avec le fil de terre [31].

Niveau de tension du réseau

Le niveau initial (hors PV) de tension du réseau est un paramètre clé-à-vis du dimensionnement et du fonctionnement des installations PV et les types de protection de découplage.

Creux de tension et tenue des systèmes PV

Les creux de tension sont considérés comme les plus graves perturbations de la qualité de service en raison de leurs effets sur les processus sensibles. Leur profondeur et leur durée varient en fonction des caractéristiques du réseau et des groupes de production qui y sont raccordés.

Présence de composante continue et d'harmoniques de tension

Les onduleurs pour systèmes photovoltaïques hachent de courant continu issu des modules PV en modulation à largeur d'impulsion (MLI ou PWM) pour le convertir en courant alternatif sinusoïdal.

Inter harmoniques

Les inter-harmoniques (fréquences qui ne sont pas un multiple entier de la fréquence de réseau) sont produits par des variations rapides des charges, ou la saturation des transformateurs. Les inter-harmoniques créent des perturbations sévères sur les dispositifs de mesures de la fréquence et de l'impédance du réseau [31].

II.9 Synchronisation au réseau

Exigences de base de raccordement

Le raccordement au réseau de l'installation photovoltaïque nécessite la mise en parallèle des deux systèmes indépendants. Cette opération est donc régie par la loi d'interconnexion des sources qui exige que ces deux systèmes aient la même amplitude et une synchronisation de phase. Le premier critère qui concerne l'amplitude peut être satisfait en agissant tout simplement sur m_a (indice de modulation) de l'onduleur. Cependant, le réglage de la phase présente une problématique et un défi de taille spécialement en présence de distorsions dans les signaux [31].

Connexion en parallèle de deux sources d'énergie

Le schéma de la figure II.12, représente le schéma de connexion d'une source $V1$ ayant un déphasage θ_1 et d'une source $V2$ ayant un déphasage de θ_2 . La source $V1$ symbolise l'onduleur qui reçoit son énergie du panneau solaire alors que la source $V2$, représente le réseau de distribution. Entre les deux sources, l'impédance X représente l'impédance de la ligne. L'opération que l'on désire effectuer est le transfert de puissance de $V1$ à $V2$. Ce transfert est régi par les amplitudes de $V1$ et $V2$ et par le déphasage $\theta = \theta_1 - \theta_2$ [31].

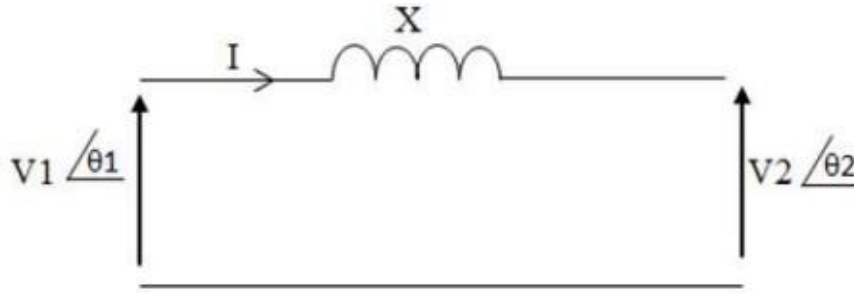


Figure II.12 : Raccordement en parallèle de 2 sources d'énergie [31].

II.10 les techniques d'intégration d'énergie photovoltaïque aux réseaux électrique la commande hystérésis

La commande par hystérésis, également connu comme « commande en tout ou rien », La réalisation de cette technique, consiste à accomplir les deux étapes suivantes :

- Comparer le courant mesuré avec le courant de référence ce qui produit un signal de commande qui sera le signal d'entrée appliqué au comparateur à hystérésis.
- Fixer une bande dans laquelle le courant peut évoluer. L'atteinte du courant à l'une des limites provoque le changement du fonctionnement des interrupteurs de telle manière que le courant ne dépasse pas cette limite et se dirige vers l'autre [33].

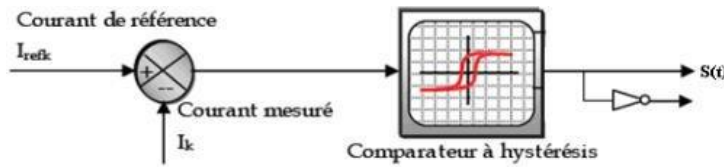


Figure II.13: Schéma de principe du contrôle par hystérésis d'un bras de l'onduleur [33].

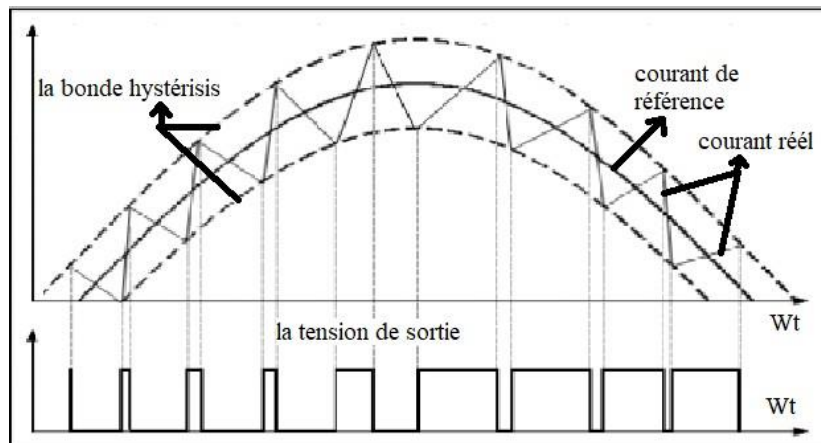


Figure II.14 : Signal hystérésis [33].

Avantage :

- Cette méthode est facile à effectuer car il est indépendant de la catégorie de la charge et ne pas exiger la connaissance des paramètres de la machine [33].

Inconvénient :

- Comme les commutations dépendent des instants où le signal de sortie touche ou dépasse les limites supérieures et inférieures de la bande hystérésis, le rapport cyclique ne peut être connu d'avance. Ainsi, elle ne peut être contrôlée.

Solutions :

Ont été proposées afin de régler ce problème. Parmi elles la commande par hystérésis modulée qui consiste à comparer le signal d'erreur, produit suite à la première comparaison entre le courant de référence et le courant réel, avec un signal triangulaire qui fixe la fréquence de commutation.

la commande MLI

La technique de modulation en largeur d'impulsion MLI (**M**odulation de **L**argeur d'**I**mpulsion ou PWM : **P**ulse **W**idth **M**odulation) est l'essor et le fruit du développement de l'électronique de puissance. Elle est le cœur du contrôle des convertisseurs statiques.

Elle est souvent utilisée pour générer une tension triphasée à fréquence et amplitude variables. Il existe 3 manières de gérer la commutation des thyristors ou des transistors de puissance [34]:

- MLI à commande par sinusoïde ;
- MLI synchrone pour limiter les harmoniques ;
- MLI asynchrone pour améliorer la réaction du moteur à toute modification rapide de la commande du variateur de fréquence.

Le principe de commande de l'onduleur réside dans l'utilisation d'un comparateur de tensions. Ce comparateur superpose à trois tensions sinusoïdales de référence une tension de forme triangulaire (porteuse). La fréquence des trois sinusoïdes de référence correspond à celle des tensions souhaitées à la sortie de l'onduleur [35].

Les intersections entre les sinusoïdes et l'onde triangulaire déterminent l'allumage ou l'extinction des thyristors (ou des transistors de puissance) selon le cas. La méthode basée sur la MLI met en œuvre d'abord un régulateur qui, à partir de l'écart entre le courant et sa référence, détermine la tension de référence de l'onduleur (modulatrice). Cette dernière est ensuite comparée avec un signal en dent de scie à fréquence élevée (porteuse). La sortie du

comparateur fournit l'ordre de commande des interrupteurs [35]. Le schéma de principe et le signal de cette méthode est donné sur la figure II.15 suivante :

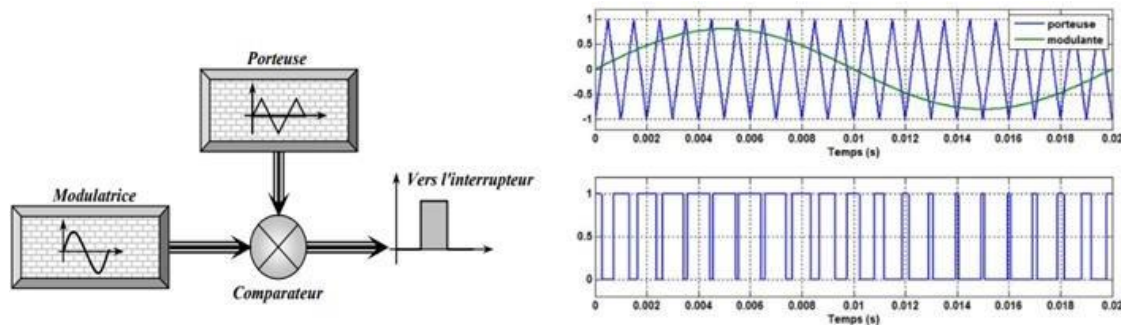


Figure II.15: Le schéma de principe et le signal de MLI [35].

➤ Principaux avantages et inconvénients de la commande MLI

Les avantages

- Une bonne élimination d'harmonique par rapport aux autres commandes;
- Avec une même source continue la MLI permet l'alimentation de plusieurs ensembles onduleurs, moteurs asynchrones;
- La variation de la valeur du fondamental de tension de sortie;
- La MLI permet d'écartier vers des fréquences élevées les harmoniques de la tension de sortie (le filtrage) [36].

Les inconvénients de la MLI

- Le contenu harmonique généré par une onde M.L.I entraîne des pertes dans le réseau (pertes fer dans le transformateur, pertes Joule et pertes par courants de Foucault) ;
- Elle génère des bruits acoustiques et des résonances électromécaniques dans les machines tournantes des oscillations de couple ;
- Elle déstabilise le système à cause de l'injection du bruit sur la commande[36].

la technique PLL

Les boucles à verrouillage de phase appelées PLL (PLL : **P**hased **L**ocked **L**oop) sont des circuits intégrés très utilisés en électronique. Il s'agit donc comme leur nom l'indique d'un asservissement de phase dont le rôle est d'asservir la phase d'un oscillateur local à celle d'un signal extérieur[37].

➤ Principe de base :

La boucle à verrouillage de phase est un asservissement de phase ou de fréquence d'un système en fonction d'une consigne donnée (signal injecté à l'entrée)[38].

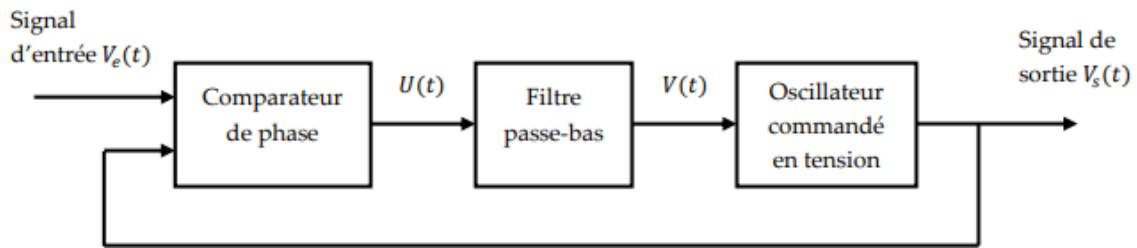


Figure II.16 : Principe d'une boucle à verrouillage de phase [38]

Une boucle à verrouillage de phase ou PLL est constituée de trois parties principales :

- Un comparateur de phase ou détecteur de phase fournit en sortie une information sur le déphasage entre le signal de sortie du VCO et le signal d'entrée de la boucle. Il fournit une tension proportionnelle à la différence de phase entre la consigne et le signal de sortie.
- Un filtre passe-bas : La tension (t) de sortie du comparateur étant inutilisable à cause de ses harmoniques, le rôle du filtre passe-bas est de ne conserver que la composante continue qui est proportionnelle à l'écart de phase et d'assurer les performances de l'asservissement bande passante, amortissement, etc.
- L'oscillateur contrôlé ou oscillateur commandé en tension «Voltage Controlled Oscillator » en anglais est un circuit qui délivre une tension périodique (sinus, carré, etc.) dont la fréquence dépend de la tension appliquée à son entrée[38].

➤ Principe de la SF-PLL

Il existe plus d'une dizaine de techniques de PLL et la technique de PLL dans le repère stationnaire (Synchronous Frame PLL en anglais) est l'approche la plus utilisée dans les systèmes triphasés[39].

Le schéma fonctionnel de la SF-PLL est illustré dans la figure II.17, où l'angle de phase instantané est détecté en synchronisant le repère tournant de la PLL avec le vecteur de la tension du réseau. Le contrôleur PI, régule la composante Vd ou le Vq à zéro. Dans des conditions idéales, sans distorsion harmonique ou déséquilibre, la SF-PLL avec une largeur de bande élevée peut rapporter une détection rapide et précise de la phase de la tension du réseau. En présence d'harmoniques et de distorsions, la SF-PLL est en mesure de bien fonctionner, mais avec des temps de réponse plus lents[39].

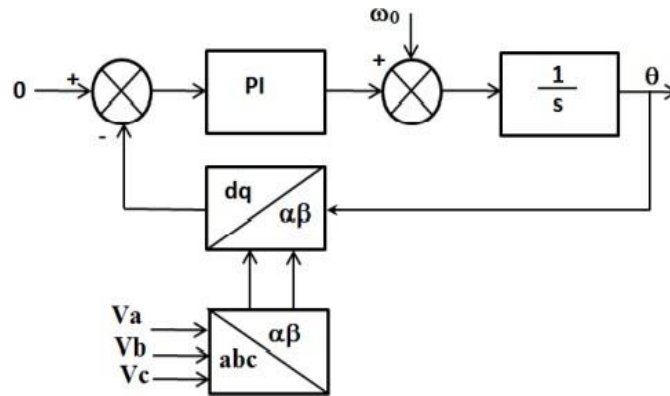


Figure II.17: Bloc diagramme de SF-PLL [39].

➤ **Passage de abc à dq à l'aide de la transformation de Park**

La transformation de Park est constituée d'une transformation triphasée-diphasé. Puis vers le repère dq. Ces deux transformations permettent de passer du repère abc vers le repère transformations sont des rotations et sont appelées Concordia et Clark. [39]

L'implantation de cette transformation sur microcontrôleur se fait à l'aide de la relation matricielle de l'équation suivante :

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 2 * \frac{\pi}{3}) & \cos(\theta - 4 * \frac{\pi}{3}) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - 2 * \frac{\pi}{3}) & -\sin(\theta - 4 * \frac{\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (II.5)$$

La commande VSC

Le système VSC-HVDC (Voltage Source Converter- High Voltage Direct Current) régule la tension du bus CC et maintient le facteur de puissance unitaire. Le système de contrôle utilise deux boucles de contrôle :

- une boucle de contrôle externe qui régule la tension du lien DC.
- une boucle de contrôle interne qui régule les courants de réseau I_d et I_q (composants de courant actif et réactif).

La référence de courant I_d est la sortie du régulateur externe de la tension CC. La référence de courant I_q est fixée à zéro afin de maintenir le facteur de puissance unitaire[40].

Les sorties de tension V_d et V_q du contrôleur de courant sont converties en trois signaux de modulation utilisés par le générateur d'impulsions PWM à trois niveaux. Le système de commande utilise un temps d'échantillonnage de 100µs pour les régulateurs de tension et de courant ainsi que pour l'unité de synchronisation PLL Les générateurs d'impulsions des

convertisseurs Boost et VSC utilisent un temps d'échantillonnage rapide de $1\mu s$ afin d'assurer la synchronisation des signaux[25].

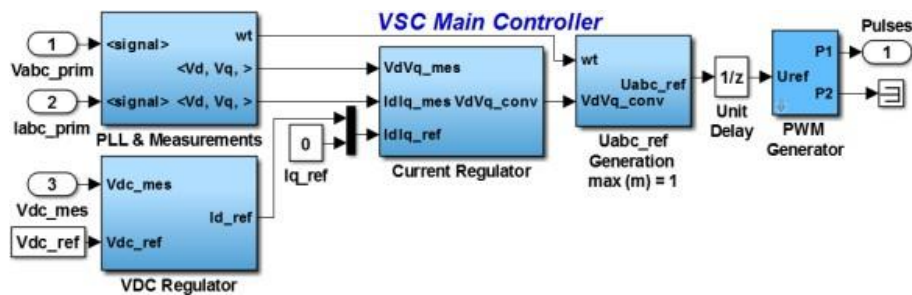


Figure II.18 : Modèle Simulink du contrôleur principal du VSC[40].

Les convertisseurs de source de tension (VSC) sont des convertisseurs auto-mutés pour connecter les systèmes HVAC et HVDC à l'aide de dispositifs adaptés aux applications électroniques de haute puissance, telles que les IGBT. Les VSC sont capables d'auto-mutation, pouvant générer des tensions AC sans avoir besoin de s'appuyer sur un système AC. Cela permet un contrôle rapide et indépendant de la puissance active et réactive et de la capacité de démarrage noir [40].

➤ Les avantages et les inconvénients [32]

Avantages

- Contrôle indépendant de la puissance active et réactive ;
- Un minimum de risques de pannes de commutation ;
- Facilité de mise en œuvre pour des systèmes à plusieurs terminaux, parce que la polarité du côté DC est la même du côté redresseur que du côté onduleur ;
- Facilité de contrôle du niveau de la tension.

Inconvénients

- Utilisation des IGBT, rend la liaison VSC-HVDC plus chère.
- Défauts des lignes mises à la terre sont très problématiques;

II.11 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons donné la théorie de l'intégration de l'énergie photovoltaïque au réseau électrique, donc on a présenté en premier, les différentes structures et les différentes configurations de système photovoltaïque connecté réseau et les classifications des centrales PV. Ensuite, nous avons abordé en détails l'élément principal qui assure l'intégration entre les deux systèmes le convertisseur DC-AC, et les différentes technologies d'onduleur.

Et puis, nous a montré l'Influence des systèmes photovoltaïques sur le réseau de distribution et Influence de réseau de distribution sur les systèmes photovoltaïques, et les conditions d'intégration. À la fin de ce chapitre nous allons illustrer les différents technique de commande d'onduleurs pour assuré la synchronisation entre le réseau et le système PV.

Chapitre III

Application des techniques d'intégration aux réseaux électriques dans un système PV

III.1 Introduction

Le but de la modélisation et la simulation des composants du système PV connecté au réseau est d'aider à comprendre les critères et les conditions de la connexion des systèmes PV connectés au réseau. Ces conditions permettent d'assurer un bon fonctionnement et qualité de service de l'énergie électrique injectée au réseau.

III.2.L'outil Matlab / Simulink

Simulink est un environnement de diagramme de blocs pour la simulation multi-domaines et la conception à base de modèles. Il prend en charge la conception au niveau système, la simulation, la génération automatique de code, ainsi que le test et la vérification continus des systèmes embarqués. Simulink fournit un éditeur graphique, des bibliothèques de blocs personnalisables et des solveurs pour la modélisation et la simulation de systèmes dynamiques. Il est intégré à MATLAB, ce qui vous permet d'incorporer des algorithmes MATLAB dans les modèles et d'exporter les résultats de simulation vers MATLAB pour une analyse plus approfondie.

III.3.Système PV connecté aux réseaux

Dans cette partie nous voulons tester deux techniques d'intégrations des systèmes à énergies renouvelables au réseau, notre choix est basé sur les techniques de la commande MLI et VSC appliquées à un système PV connecté au réseau.

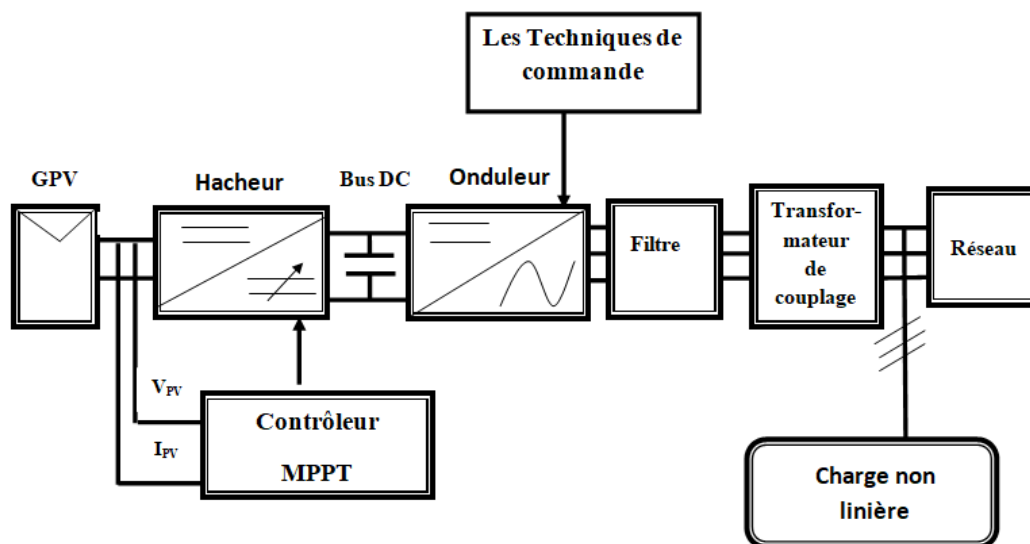


Figure III.1: Schéma synoptique d'un système PV connecté au réseau.

III.4.Modélisation et simulation des systèmes PV connecté au réseau

III.4.1.Système PV connecté au réseau avec une commande MLI

Chapitre III Application des techniques d'intégration aux réseaux électriques dans un système PV

Le premier système teste l'application de la technique MLI dans l'intégration des systèmes PV, les principaux composants sont le générateur PV qui génère le courant et la tension, le convertisseur boost qui augmente la tension du générateur PV et commandé par le contrôle MPPT. Dans ce système on utilise la technique de Perturbation et d'observation (P&O) pour obtenir la puissance maximale du générateur photovoltaïque, la conversion DC/AC est effectuée par un onduleur triphasé commandé par une unité de contrôle qui se compose d'un régulateur de courant, d'un régulateur de tension, la PLL, et la technique MLI. La tension de sortie de l'onduleur est connectée à un filtre pour éliminer les composantes harmoniques, un transformateur de couplage triphasé est utilisé pour adapter la tension injectée au réseau de distribution.

III.4.1.1 Modélisation et simulation du générateur photovoltaïque

Le premier système constitué de 245 modules type "Sun Power (SPR-415E-WHT-D)". Il se compose de 35 chaînes parallèles, et chaque chaîne comporte 7 modules de connectés en série. Le bloc du générateur PV est illustré dans la Figure III.2. Les caractéristiques I-V et P-V du module sont représentées dans la Figure III.3.

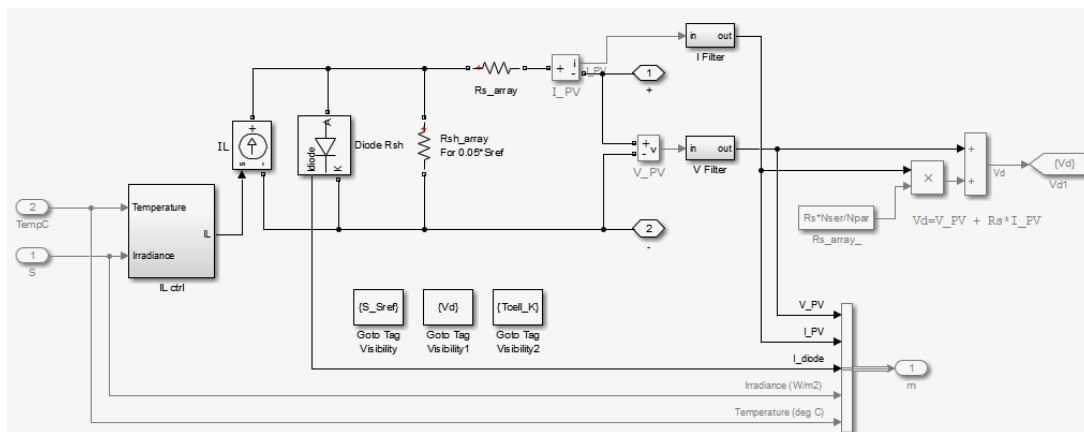


Figure III.2: Générateur PV sous Matlab.

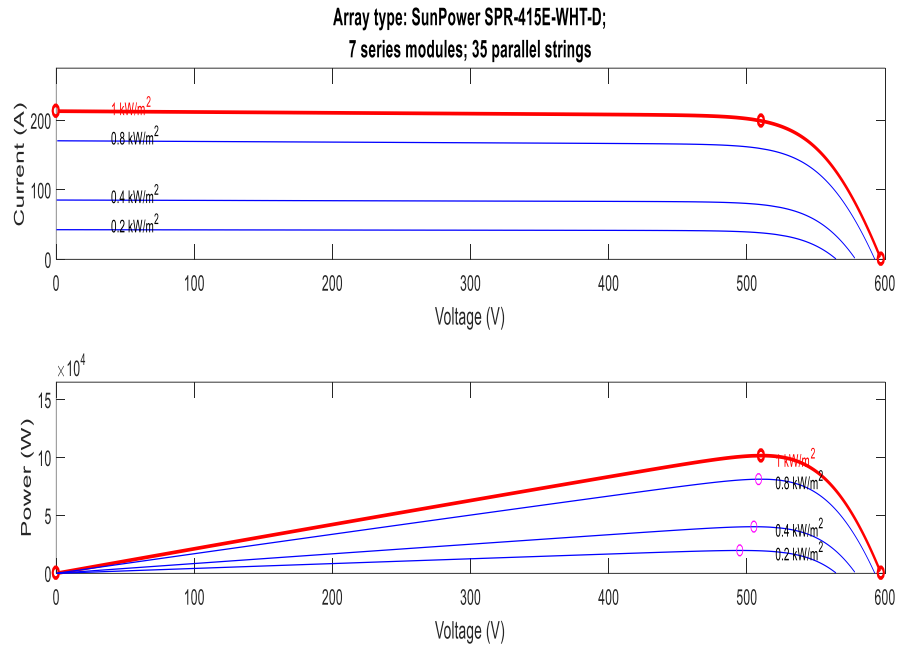


Figure III.3: Les caractéristiques I-V et P-V du module "Sun Power (SPR-415E-WHT-D)".

Les spécifications du fabricant pour le module "Sun Power (SPR-415E-WHT-D)" mesurés dans des conditions standard (STC) de rayonnement solaire 1000W/m² et de température de module de 25°C, de masse d'air égale à 1.5 sont indiquées dans le tableau III.1.

Tableau III.1: Les spécifications du fabricant du module "Sun Power (SPR-415E-WHT-D) "

Nom de module	Sun Power (SPR-415E-WHT-D)
Nombre des cellules par modules	128
Tension en circuit ouvert (V_{oc})	85.3 V
Courant de court-circuit (I_{sc})	6.09 A
Tension de puissance maximale (V_{mp})	72.9 V
Courant d'alimentation maximal (I_{mp})	5.69 A
Puissance Maximal (P_{mp})	414.801 W

III.4.1.2 Modélisation et simulation du convertisseur DC/AC

L'onduleur DC/AC triphasé est modélisé en utilisant un pont IGBT à trois niveaux contrôlés par MLI figure III.4, l'unité de contrôle de l'onduleur est conçue est simulée comme les montre la figure III.5ci-dessous.

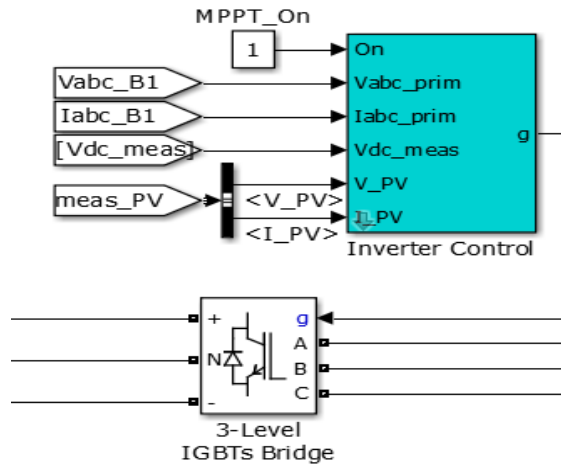


Figure III.4 : L'onduleur DC/AC sous Matlab

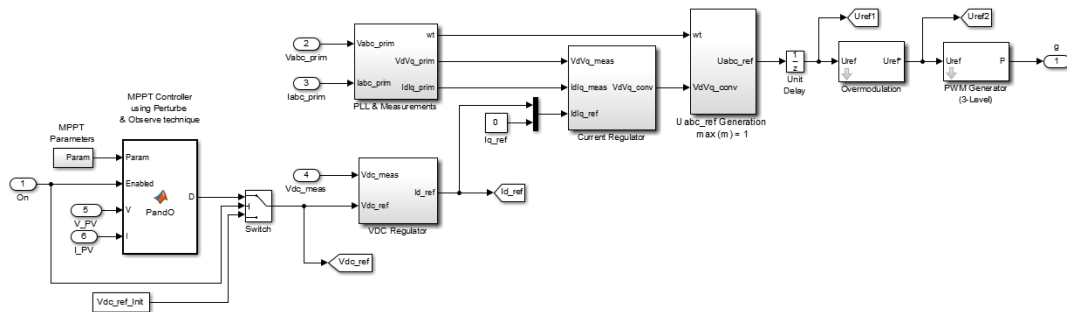


Figure III.5: L'unité de contrôle de l'onduleur sous Matlab/Simulink

Le système de contrôle contient cinq sous-systèmes majeurs basés sur Simulink :

- **Contrôleur MPPT** : Le contrôleur de suivi du point de puissance maximale (MPPT) est basé sur la technique P&O « Perturber et observer » figure III.6et son algorithme en Annexe 1. Ce système MPPT fait varier automatiquement le signal de référence V_{DC} du régulateur V_{DC} de l'onduleur afin d'obtenir une tension continue qui extraira la puissance maximale du générateur photovoltaïque.

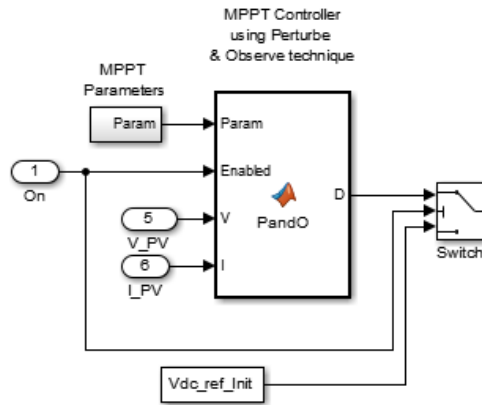


Figure III.6 : contrôleur MPPT sous Matlab.

- **Régulateur V_{DC}** : détermine la référence I_d (courant actif) requise pour le régulateur de courant.

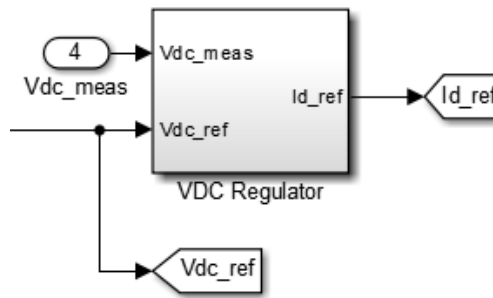


Figure III.7 : Régulateur V_{DC} sous Matlab.

- **Régulateur de courant** : Sur la base des références de courant I_d et I_q (courant réactif), le régulateur détermine les tensions de référence requises pour l'onduleur. Dans notre exemple, la référence I_q est mise à zéro.

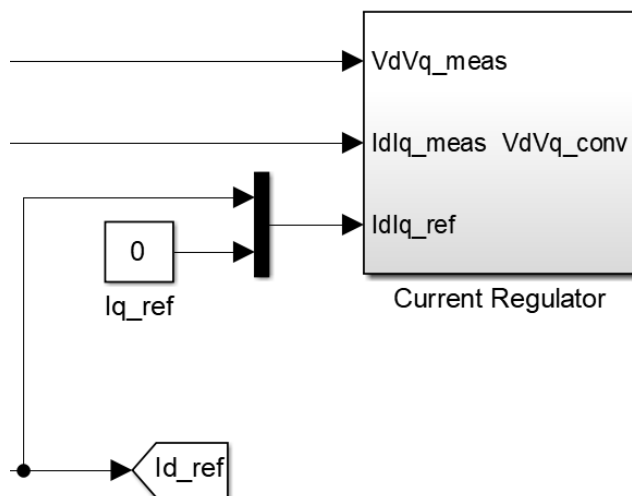


Figure III.8 : Régulateur de courant sous Matlab.

Chapitre III Application des techniques d'intégration aux réseaux électriques dans un système PV

- **PLL & Mesures** : Nécessaire pour la synchronisation et les mesures de tension/courant, Le principe de la PLL consiste à annuler la composante Vd en déterminant un angle q qui doit être en phase avec la tension du réseau. Les étapes de la synchronisation se résument à :
 - Transformations abc du réseau triphasé en dq ;
 - Calcul de la composante Vd ;
 - Annulation de cette composante Vd en régulant à l'aide d'un correcteur PI, la fréquence angulaire ;
 - Intégration de la fréquence angulaire pour déduire l'angle θ .

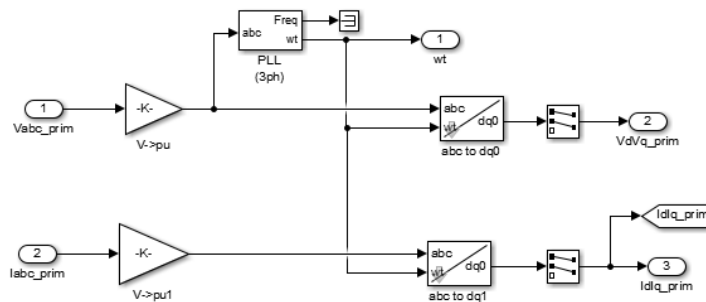


Figure III.9 : Bloc PLL sous Matlab

- **Générateur MLI** : génère des signaux d'allumage vers les IGBT en fonction des tensions de référence requises.

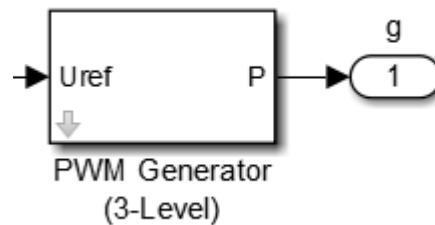


Figure III.10: Générateur MLI sous Matlab.

III.4.1.3. Le transformateur

Utilisé dans ce système est un transformateur de couplage triphasé 100 kVA 260V/25kV.

III.4.1.4. Filtre

La tension de sortie de l'onduleur est connectée à un filtre pour éliminer les composantes harmoniques. On utilise le filtre LC.

III.4.1.5. Réseau de distribution

Le réseau est modélisé comme un réseau de distribution. La connexion au réseau est réalisée en connectant la sortie de l'onduleur avec deux lignes d'alimentation de 25 kV, des charges, un transformateur

Chapitre III Application des techniques d'intégration aux réseaux électriques dans un système PV

triphasé delta/étoile de 250kVA 250V/25kV, de mise à la terre et un système de transmission équivalent à 120 kV.

III.4.1.6. Simulation et Résultats

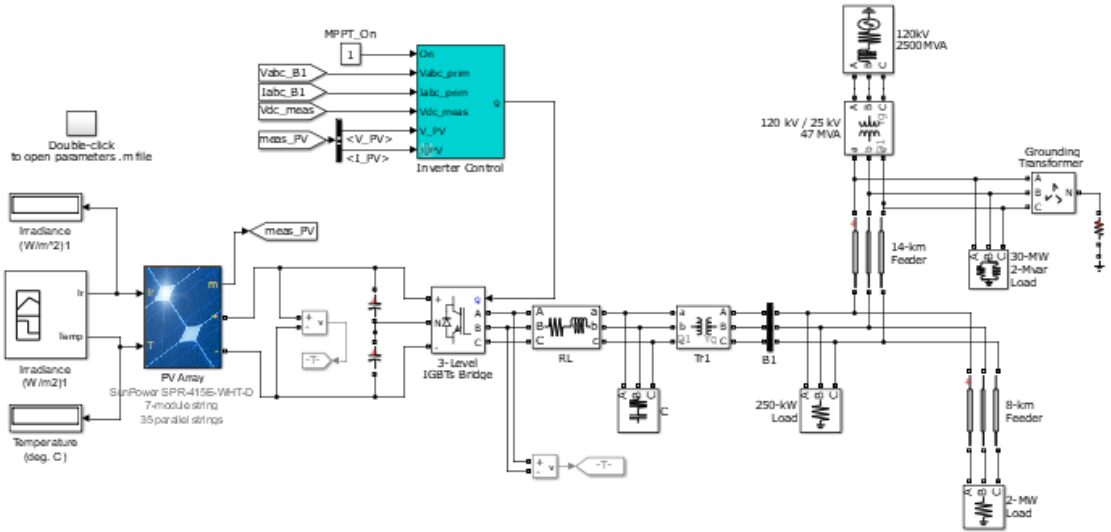


Figure III.11 : Système PV connecté au réseau avec une commande MLI.

La simulation commence avec des conditions de test standard (25 degrés C, 1000 W/m²) et le temps de simulation est 6 secondes.

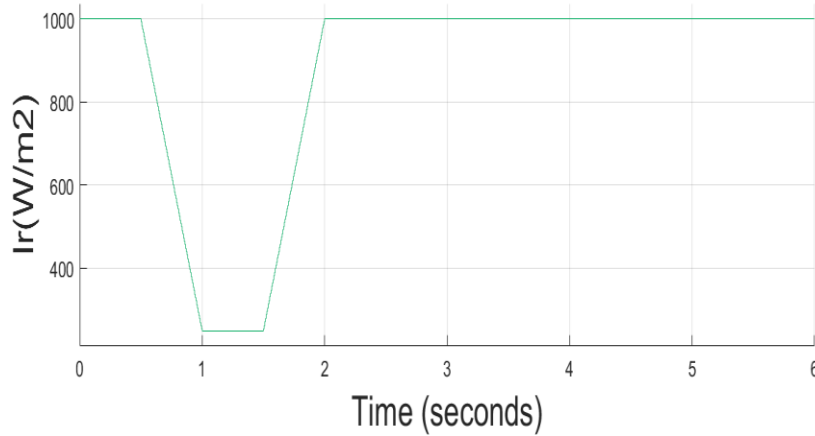


Figure III.12 : Irradiation en fonction du temps.

Les figures III.13.14.15 Représentent la tension et le courant et la puissance générant par le générateur PV de système 1.

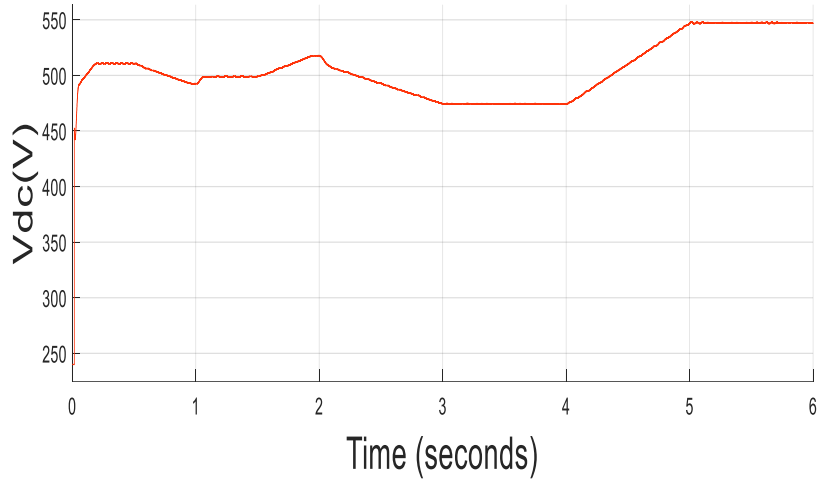


Figure III.13 : La tension générée par le générateur PV.

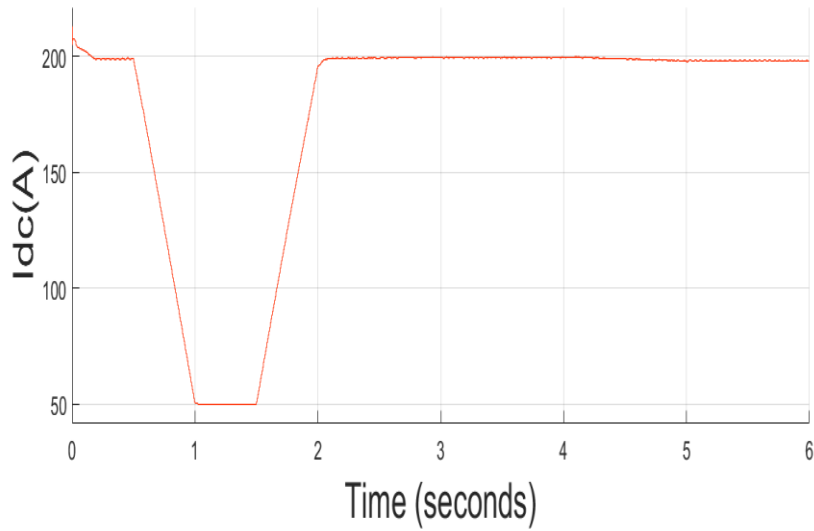


Figure III.14 : Le courant générée par le générateur PV.

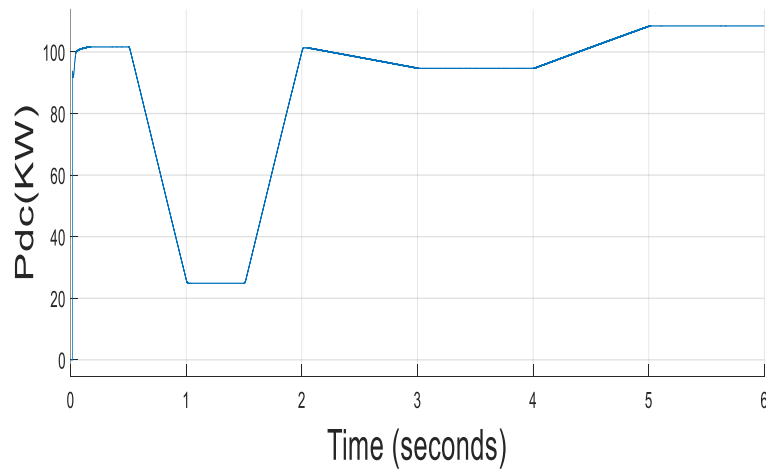


Figure III.15 : La puissance du générateur PV.

Les figures III.16.17.18 Représentent respectivement la tension et le courant et la puissance générés par l'onduleur :

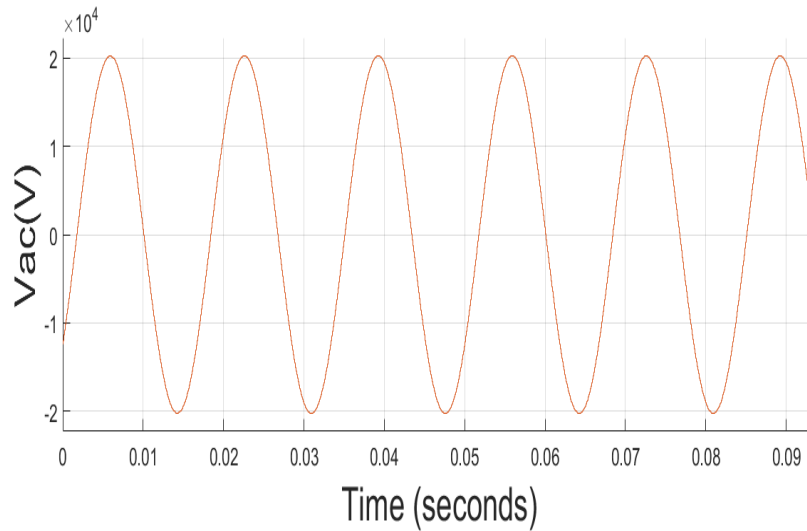


Figure III.16 : La tension injectée au réseau.

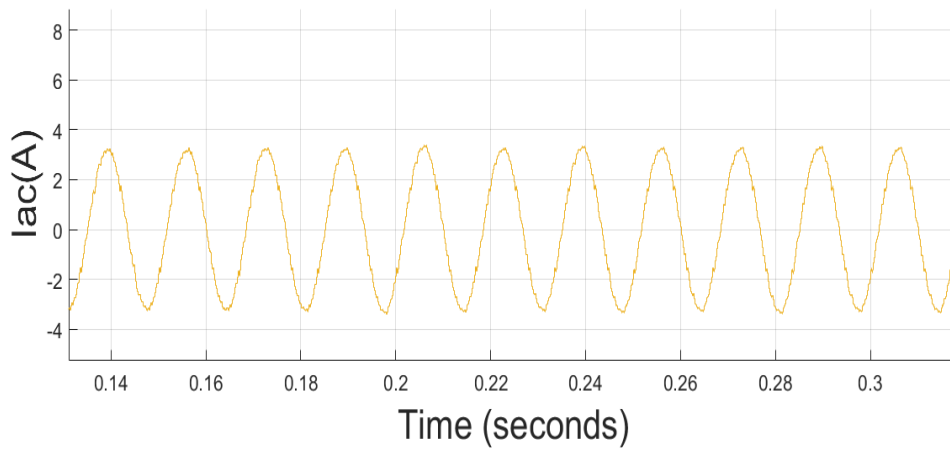


Figure III.17: le courant injecté au réseau.

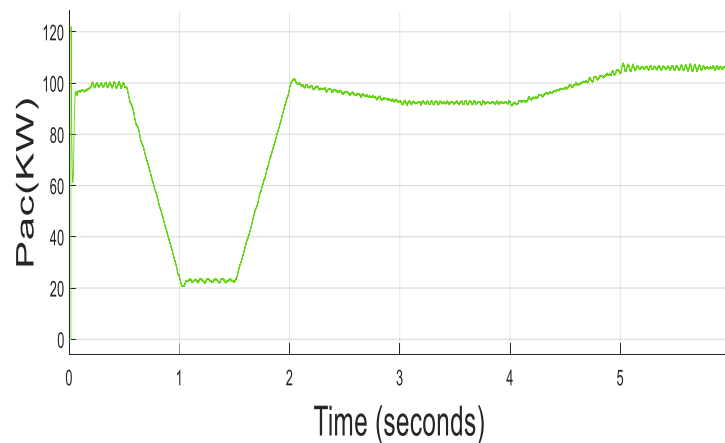


Figure III.18 : La puissance injectée au réseau en fonction du temps.

- De $t = 0s$ à $t = 0.05s$, l'onduleur est bloqué. La tension de GPV correspond à la tension de circuit ouvert ($V_{pv}=7$ modules en série $\cdot V_{co} = 7 \cdot 85.3 = 597.1$ V) figure III.13, la puissance de GPV et la puissance injecté augmentant car les impulsions du convertisseur est bloqué figure III.15 et figure III.18.

Chapitre III Application des techniques d'intégration aux réseaux électriques dans un système PV

- De $t = 0.05 \text{ s}$ à $t = 0.3 \text{ s}$, l'onduleur est déverrouillé. La tension continue est $V_{dc-ref} = 500 \text{ V}$, l'éclairement est fixé à 1000 W/m^2 figure III.12, la puissance de GPV égal 100 kW figure III.15 et la puissance injectée égale à 97 kW figure III.18.
- De $t = 0,3 \text{ s}$ à $t = 0,5 \text{ s}$, le MPPT est activé. Le régulateur MPPT commence à réguler la tension PV ($V_{PV} = N_{ser} * V_{mp} = 7 * 72.9 = 510.3 \text{ V}$) en faisant varier le cycle de service afin d'extraire une puissance maximale. Alors que la puissance maximale spécifiée avec un éclairement énergétique de 1000 W/m^2 est de 101.6 kW figure III.15.
- De $t = 0,5 \text{ s}$ à $t = 1,0 \text{ s}$, l'éclairement est réduit de 1000 W/m^2 à 250 W/m^2 figure III.12. le contrôleur MPPT continue de suivre la puissance maximale fournie par le GPV, les variations de l'irradiation conduisent à modifier la puissance injectée dans le réseau.
- De $t = 1,0 \text{ s}$ à $t = 1,5 \text{ s}$ lorsque l'éclairement reste constant est égale à 250 W/m^2 . La tension figure III.13 et la puissance PV correspondantes sont $V_{pv} = 500 \text{ V}$ et $P_{pv} = 24,4 \text{ kW}$ et $P_{ac} = 23 \text{ kW}$.
- De $t = 1,5 \text{ s}$ à $t = 6,0 \text{ s}$, l'irradiance solaire est rétablie à 1000 W/m^2 puis la température varie entre 50° C . et 0° C . Afin d'observer l'impact de la température. Notez que la puissance de sortie PV maximale (108 kW) et la puissance injectée (105.5 kW) sont obtenues à une température minimale (0° C).

III.4.2. Système PV connecté au réseau avec une commande VSC

Le deuxième système consiste à étudier l'application de la technique VSC avec les principales composants du système PV le générateur PV, le convertisseur boost qui est commandé par le contrôle MPPT dans ce système on utilisé la technique Perturbation et d'observation (P&O), la conversion DC/AC est effectuée par un onduleur triphasé commandé par la technique VSC qui convertie la tension continue fourni par le système PV en une tension alternative il se compose d'un régulateur V_{DC} , un régulateur de courant et la PLL, la tension de sortie est filtrée pour éliminer les harmoniques, un transformateur de couplage triphasé est utilisé pour augmenter la tension injecte au réseau de distribution.

III.4.2.1. Modélisation et simulation de GPV du deuxième système

Le deuxième système Utilisé 330 modules de type "Sun Power SPR-305E-WHT-D". il se compose de 66 chaînes parallèles. Chaque chaîne comporte 5 modules connectés en série. Le bloc du générateur photovoltaïque a deux entrées qui vous permettent de faire varier l'ensoleillement (entrée 1 en W/m^2) et la température (entrée 2 en degrés C). Les caractéristiques I-V et P-V du module sont représentées dans la Figure III.19.

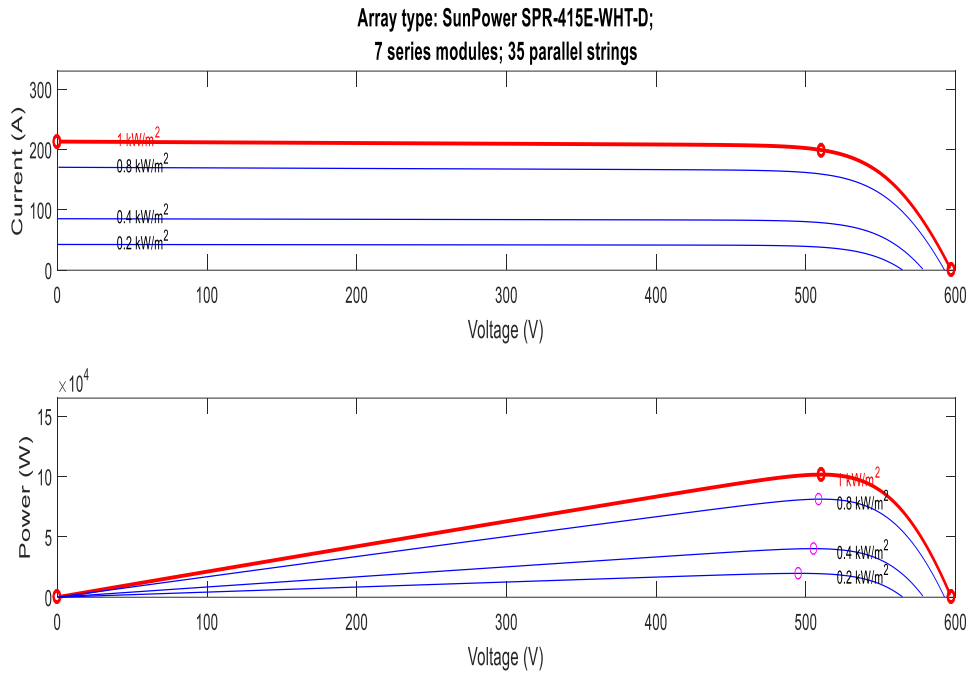


Figure III.19 : Les caractéristiques I-V et P-V du module Sun Power SPR-305E-WHT-D''.

Les spécifications du fabricant du module "Sun Power SPR-305E-WHT-D" mesurées dans des conditions standard (STC) de rayonnement solaire 1000W/m^2 et de température de module de 25°C , de masse d'air égale à 1.5 sont listées dans le Tableau III.2 :

Tableau III.2 :Les spécifications du fabricant du module "Sun Power SPR-305E-WHT-D"

33	Sun Power SPR-305E-WHT-D
Nombre des cellules	96
Tension en circuit ouvert(V_{oc})	64.2 V
Courant de court-circuit(I_{sc})	5.96 A
Tension de puissance maximale(V_{mp})	54.7 V
Courant d'alimentation maximal(I_{mp})	5.58 A
Puissance Maximal (P_{mp})	305.226 W

III.4.2.2.Modélisation et simulation de convertisseur boost

Il est mis en œuvre dans ce convertisseur proposé en utilisant une diode et un MOSFET. Pour augmenter la tension de sortie PV (308 V)à un niveau plus élevé (500 V) adapté au fonctionnement de l'onduleur DC/AC connecté au réseau électrique.

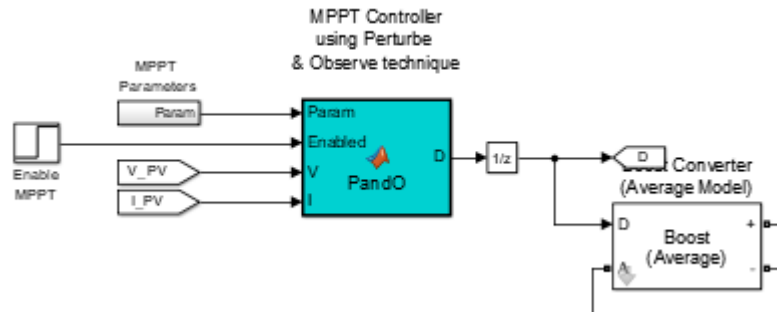


Figure III.20 : Convertisseur boost sous Matlab

Le convertisseur boost utilise le contrôleur MPPT qui varie automatiquement le rapport cyclique afin de générer la tension requise pour extraire la puissance maximale.

➤ **Contrôleur MPPT**

Le point de puissance maximale du réseau PV change continuellement et la technique MPPT est donc utilisée pour maintenir le point de fonctionnement du réseau PV à son MPP. La technique P&O (voir annexe 1) est utilisé dans ce travail c'est la technique la plus largement utilisée pour suivre la puissance maximale du réseau.

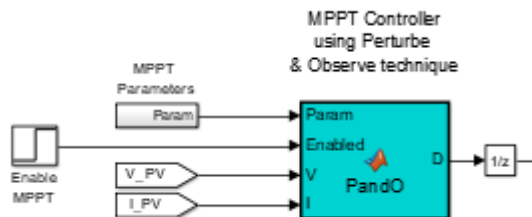


Figure III.21 : Contrôleur MPPT sous Matlab.

III.4.2.3. Modélisation et Simulation de La technique VSC

Les modules PV génèrent un courant continu (CC) et une tension. Cependant, pour alimenter le réseau en électricité, il faut un courant alternatif (CA) et une tension (CA). Les onduleurs sont les équipements utilisés pour convertir le CC en CA. En outre, ils peuvent être chargés de maintenir le point de fonctionnement de la matrice PV au MPP. Ceci est généralement réalisé à l'aide d'algorithmes de suivi MPP. Il existe différentes configurations d'onduleurs en fonction de la manière dont les modules PV sont connectés à l'onduleur.

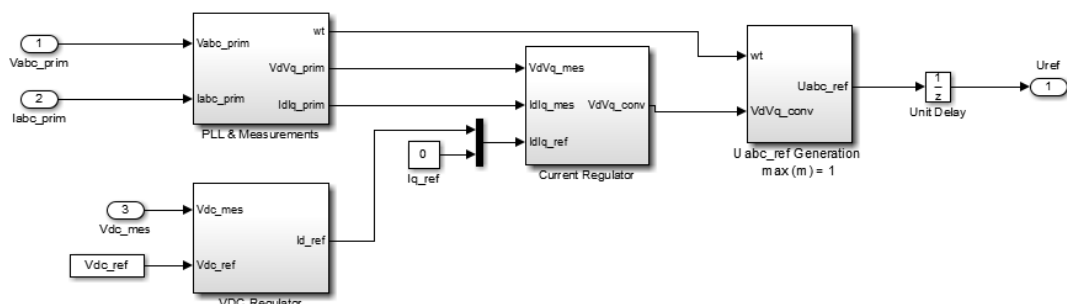


Figure III.22 : Modèle Simulink du contrôleur principal du VSC.

La VSC convertit les tensions de liaison de 500 V CC en 260 V CA et maintient le facteur de puissance à l'unité. Le système de contrôle du VSC se compose de :

- Une boucle de contrôle externe (Vdcregulator) qui régule la tension de liaison CC à +/- 250 V ;
- Une boucle de contrôle interne (Curent regulator) qui régule les composantes de courant du réseau (actif et réactif) ;
- Une boucle à verrouillage de phase (PLL&Measurement) pour la synchronisation et les mesures de tension/courant ;
- Le système de contrôle utilise un temps d'échantillonnage de 100 microsecondes pour les régulateurs de tension et de courant.

III.4.2.4.Le transformateur

Utilisé dans ce système c'est un transformateur de couplage triphasé 100 kVa 260V/25kV.

III.4.2.5.Filtre

La tension de sortie de l'onduleur est connectée à un filtre pour éliminer les composantes harmoniques. On utilise le filtre LC.

III.4.2.6.Réseau de distribution

Le réseau est modélisé comme un réseau de distribution. Il comprenait deux lignes d'alimentation de 25 kV, des charges, un transformateur de mise à la terre et un système de transmission équivalent à 120 kV.

III.4.2.7.Résultats et simulation du deuxième système

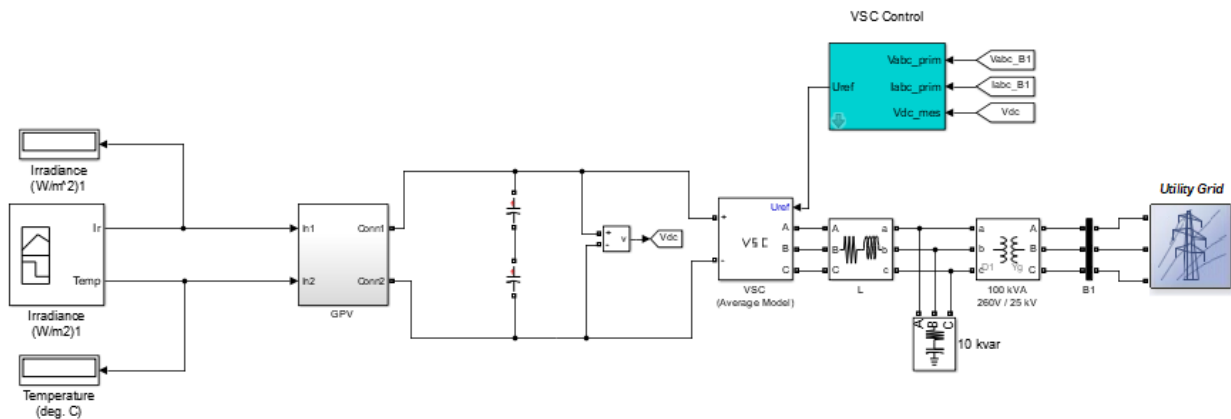


Figure III.23 : Système PV connecté aux réseaux avec une commande VSC.

La simulation commence avec des conditions de test standard (25 degrés C, 1000 W/m²).

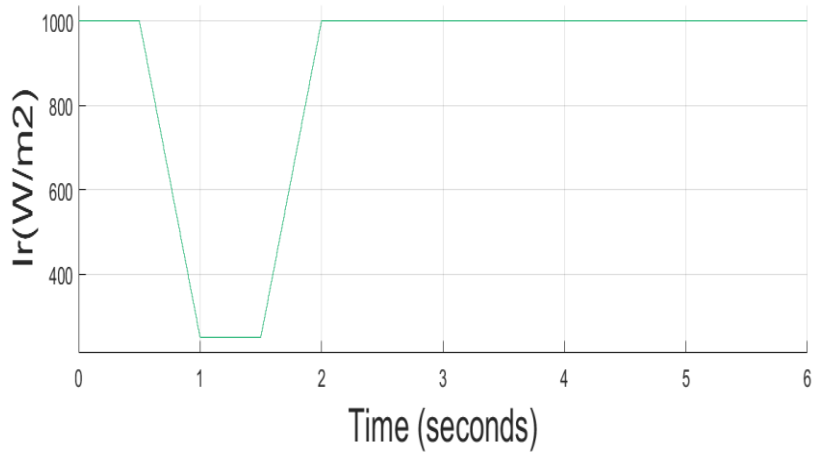


Figure III.24 : Irradiation en fonction du temps du deuxième système.

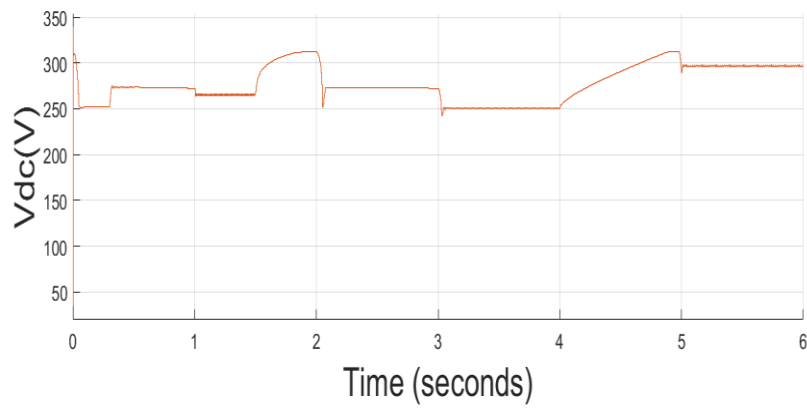


Figure III.25 : La tension générée par le GPV du deuxième système.

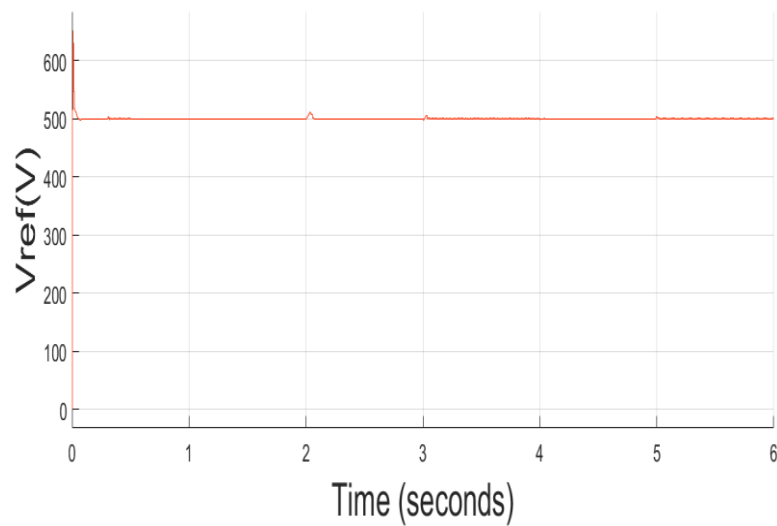


Figure III.26 : La tension d'entrée d'onduleur.

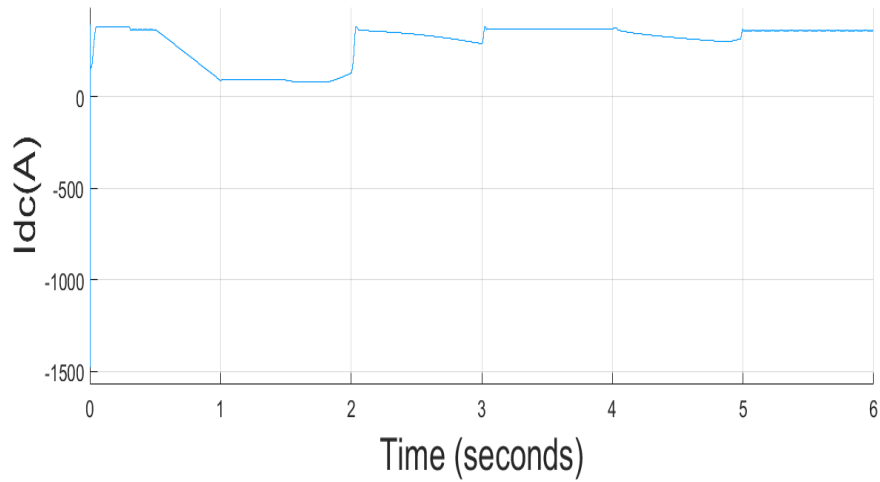


Figure III.27 : Le courant généré par le GPV du deuxième système

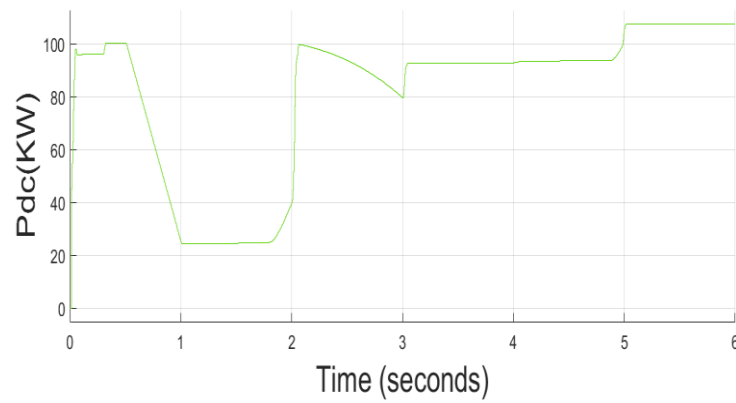


Figure III.28 : La puissance générée par le GPV du deuxième système.

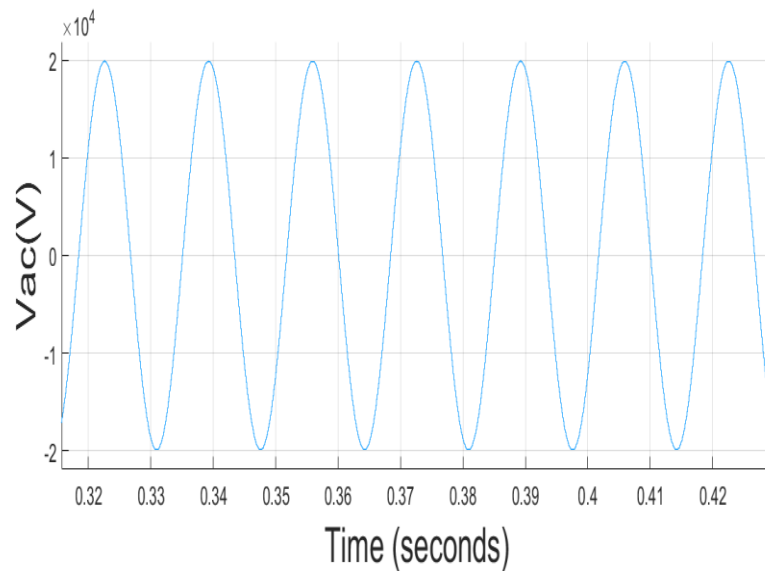


Figure III.29 : la tension injecté au réseau de deuxième système.

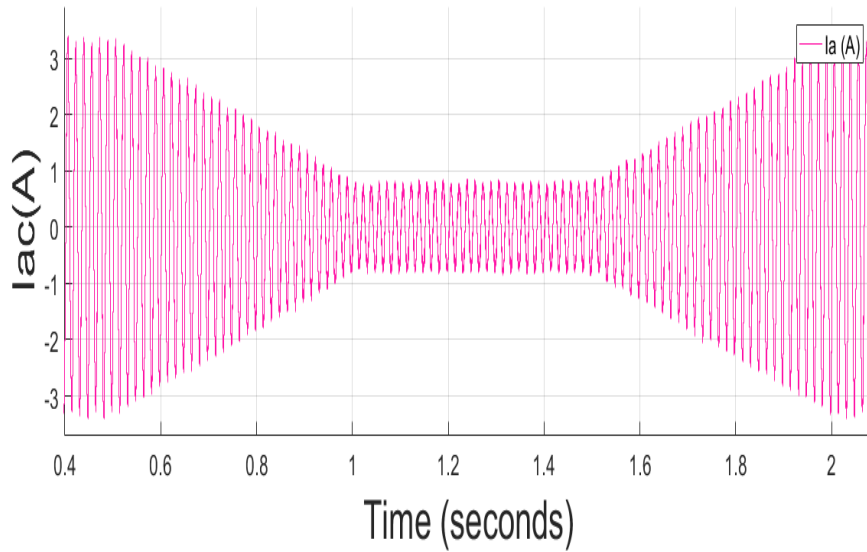


Figure III.30 :Le courant injecté au reseau du deuxième système.

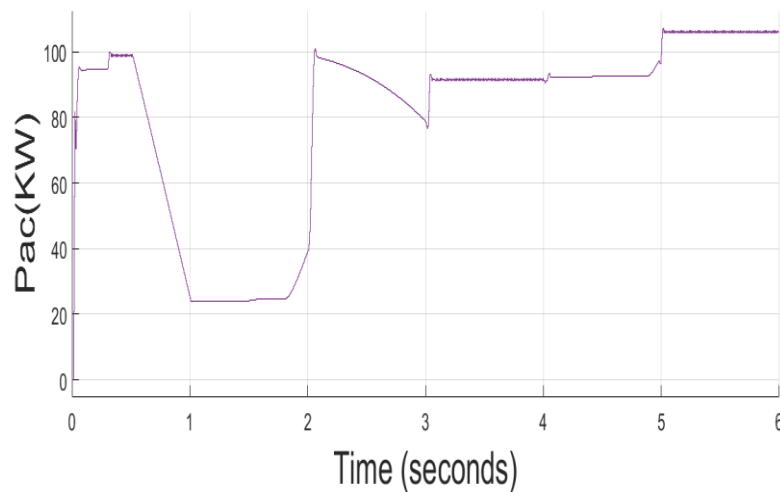


Figure III.31 : la puissance injectée au réseau de deuxième système.

- De $t=0s$ à $t=0.05s$, les impulsions de l'onduleur VSC est bloqué, la tension GPV correspond à la tension de circuit ouvert ($V_{pv} = 5 \text{ modules en série} * V_{co} = 5 * 64.2 = 321 V$) figure III.25, la puissance de GPV et la puissance injecte augment car les impulsions du convertisseur sont bloqué.
- De $t=0.05s$ à $t=0.3s$, le convertisseur boost et l'onduleur VSC sont déverrouillés, donc la tension de GPV (V_{ref-DC}) adapté et fixé à 500 V figure III.26, et l'éclairement fixé à $1000 W/m^2$ figure III.24, la puissance de GPV égale à 98 kW figure III.28, et la puissance injectée 96 kW figure III.31.
- De $t=0.3s$ à $t=0.5s$, le contrôle MPPT activé, en faisant varier le cycle de service afin d'extraire une puissance maximale. Alors que la puissance maximale spécifiée avec un éclairement énergétique de $1000 W/m^2$ est de 100.7 KW figure III.28.

Chapitre III Application des techniques d'intégration aux réseaux électriques dans un système PV

- De $t=0,5$ s à $t=1,0$ s, l'éclairement est diminué linéairement de 1000 W/m^2 à 250 W/m^2 figure III.24. le contrôleur MPPT continue de suivre la puissance maximale fournie par le GPV, et le courant continue à diminuer de $0,98 \text{ A}$ à $0,2 \text{ A}$ or, on peut déduire que le courant croît proportionnellement avec l'éclairement.
- De $t=1,0$ s à $t=1,5$ s lorsque l'éclairement reste constant et égale à 250 W/m^2 , la tension et la puissance PV correspondantes sont $V_{pv} = 265 \text{ V}$ et $P_{pv} = 24,4 \text{ kW}$.
- De $t=1,5$ s à $t=6,0$ s, l'éclairement solaire est rétabli à 1000 W/m^2 puis la température varie entre 50° C . et 0° C . afin d'observer l'impact de la température. Notez que la puissance de sortie PV maximale ($107,5 \text{ kW}$) est obtenue à une température minimale (0° C).

III.5. Comparaisons entre les deux systèmes

- **Le rendement :** c'est le rapport entre l'énergie électrique produite et énergie électrique injecté.

$$\eta = \frac{P_{\text{entrée}}}{P_{\text{sortie}}} \quad (\text{III.1})$$

- Le rendement de la commande VSC est $\eta(vsc) = 0,98$:

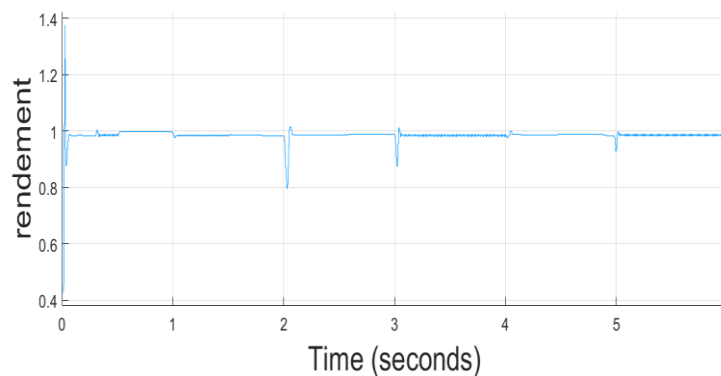


Figure III.32 : Rendement de système PV connecté au réseau avec la commande VSC

- Le rendement de la commande MLI $\eta(MLI) = 0,9725$:

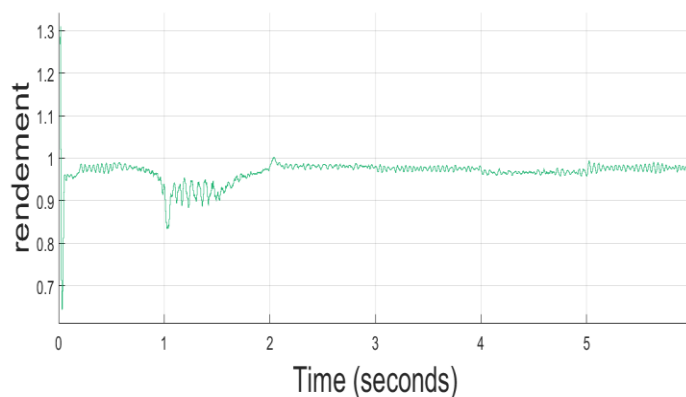


Figure III.33 : Rendement de système PV connecté au réseau avec la commande MLI

➤ On remarque que le rendement de la technique VSC est mieux que le rendement de la technique MLI. $\eta(vsc) > \eta(MLI)$

• La fréquence

À partir des deux circuits on remarque que la fréquence d'onduleur est égale à la fréquence du réseau ($f = 60\text{hz}$).

• Les harmoniques

Les techniques d'intégration peut réduire la distorsion harmonique (THD) de la tension de sortie d'onduleur

➤ Le taux de distorsion harmonique totale de la technique MLI est $THD = 2.04\%$:

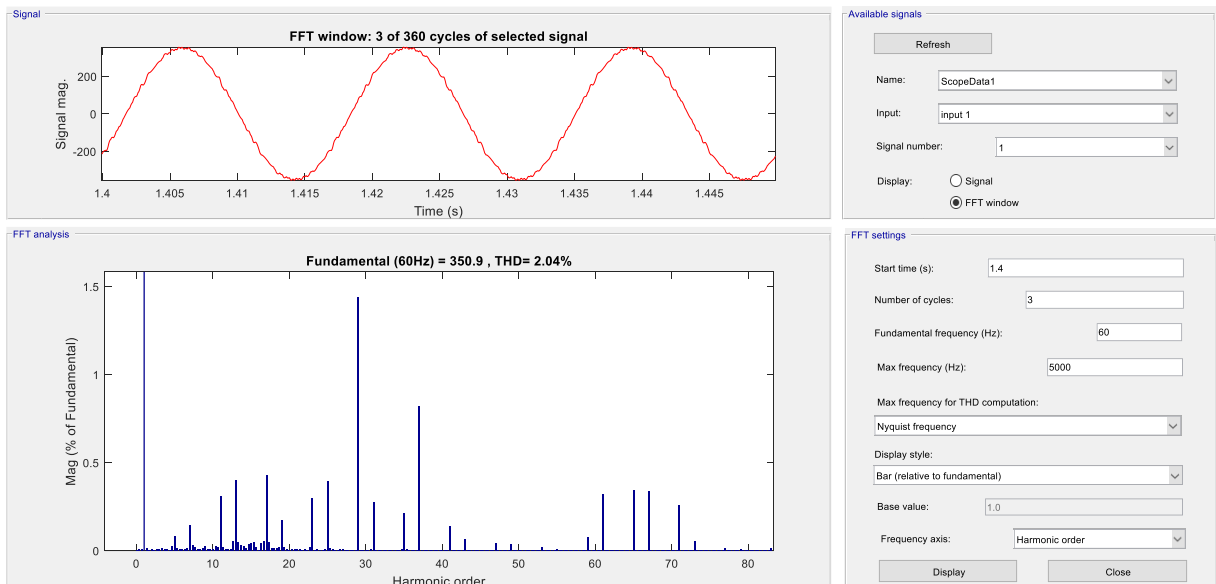


Figure III.34 : THD de système PV connecté au réseau avec la commande MLI

Chapitre III Application des techniques d'intégration aux réseaux électriques dans un système PV

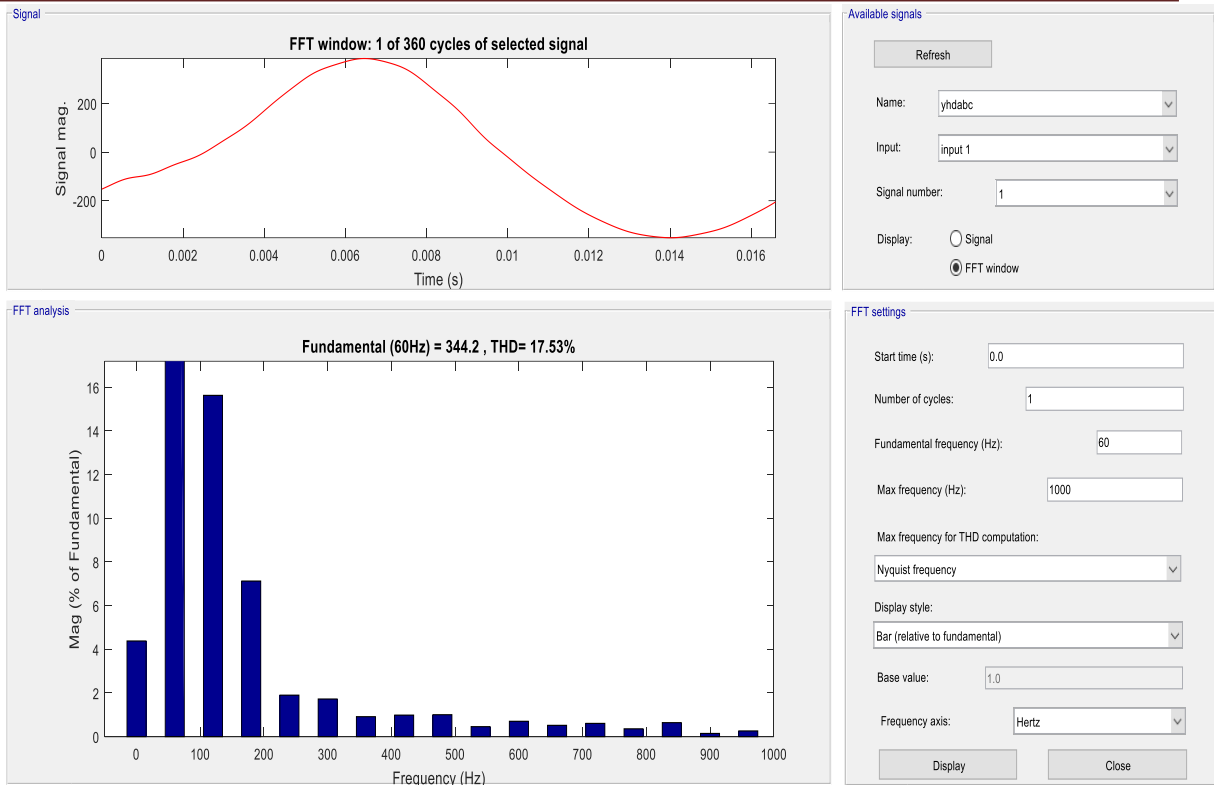


Figure III.35 : THD du système PV connecté au réseau avec la commande VSC.

- L'amplitude et le déphasage :

L'amplitude et le déphasage des tension de sortie d'onduleur est la même dans les deux systèmes.

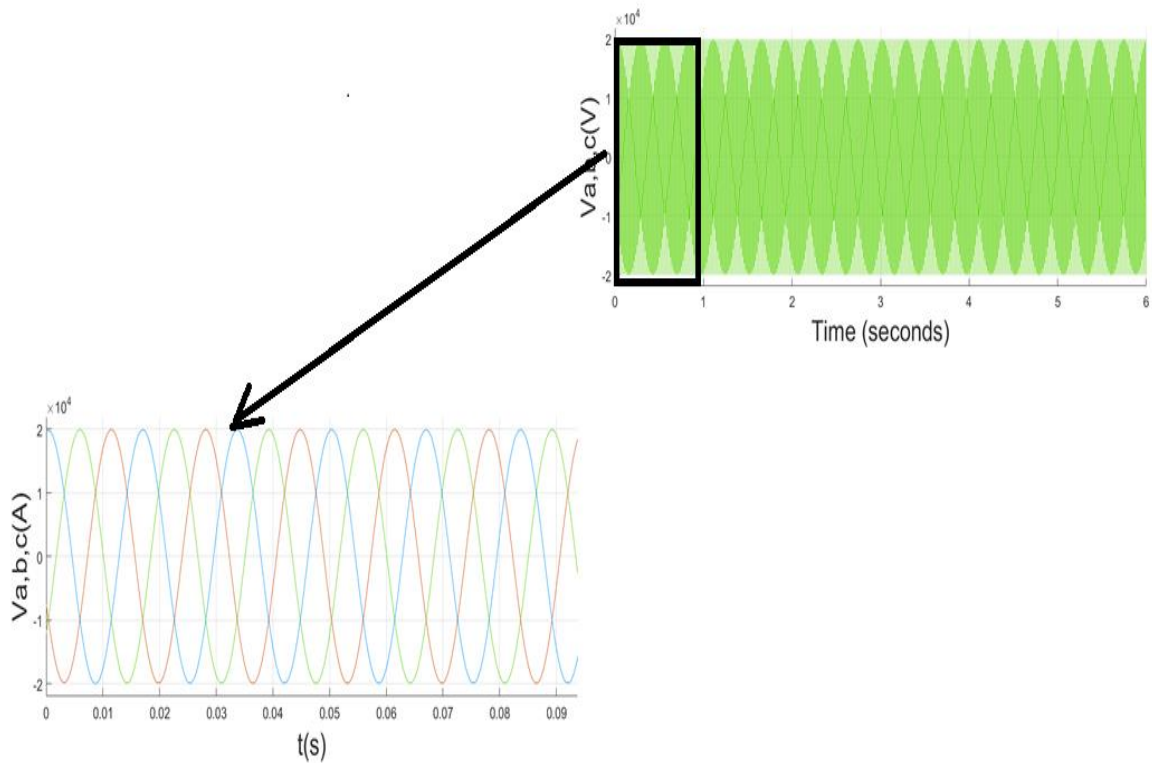


Figure III.36 : la tension de sortie d'onduleur de système PV connecté au réseau avec la commande VSC

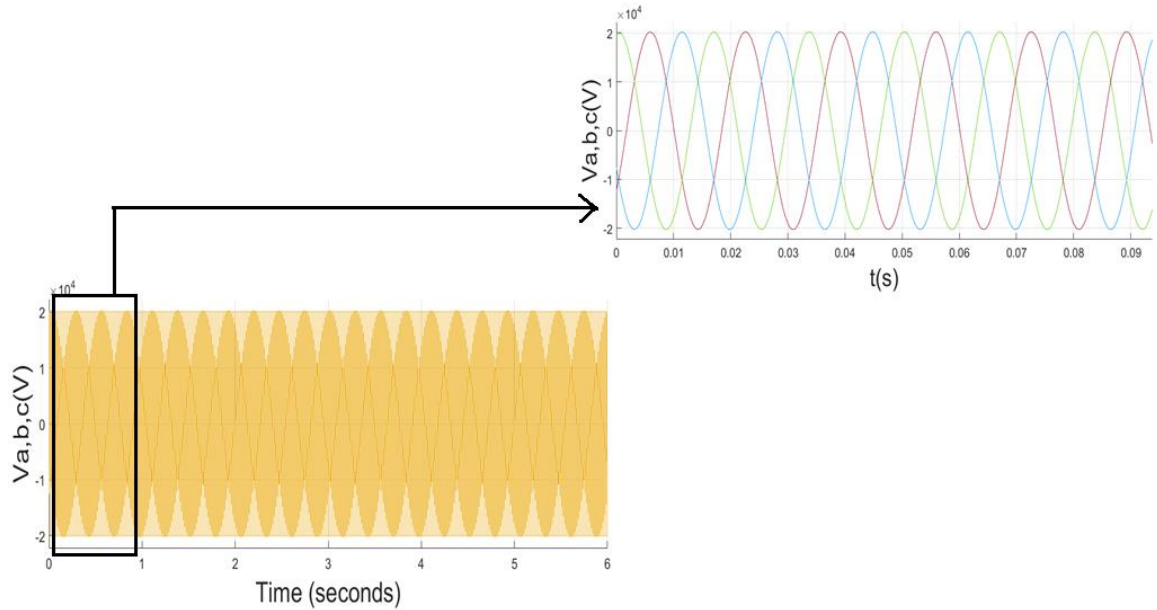


Figure III.37 : la tension de sortie d'onduleur de système PV connecté au réseau avec la commande MLI

III.6. Conclusion

Ce chapitre présente la modélisation et la simulation de deux systèmes photovoltaïques de 100 kW connectés au réseau de 25 KVa travers un onduleur triphasé. Un GPV a été utilisé pour absorber l'irradiation solaire et générer de l'énergie en courant continu. L'algorithme de P&O a été mis en œuvre pour la mise en œuvre du MPPT avec le convertisseur DC/DC boost. La sortie du premier système a été alimentée à l'onduleur triphasé de source de tension contrôlé par le signal MLI et le deuxième système a été alimenté à l'onduleur triphasé de source de tension contrôlé par la technique VSC. A la fin de se débarrasser des harmoniques produites par la nature de la commutation de l'onduleur, des filtres ont été utilisés. L'adaptation de phase a également été mise en œuvre par le biais de PLL.

A la fin de ce chapitre nous avons fait une comparaison entre les deux techniques d'intégrations.

Conclusion générale

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

C'est assurément un cheminement de recherche très intéressant dans les domaines suivants:

- La simulation sur ordinateur: Matlab et Simulink;
- L'électronique de puissance : commande de hacheurs et d'onduleurs;
- L'instrumentation : filtrage de signaux ;
- L'informatique ;
- L'automatique : stabilité de la synchronisation d'une PLL avec le réseau électrique.

La première phase de nos travaux est une recherche bibliographique sur le système solaire photovoltaïque. Cette phase nous a permis d'avoir une vision plus précise sur l'énergie PV, les différents systèmes, les composants, les avantages et les inconvénients.

La deuxième phase de notre travail c'est l'intégration de système PV au réseau, le convertisseur DC-AC, les conditions d'intégration, l'impact d'intégration et les différents techniques d'intégration PLL, VSC, MLI.

La dernière phase c'est une simulation de deux systèmes PV raccordé aux réseaux réalisé avec le Matlab Simulink, chaque système avec une technique d'intégration, l'onduleur de premier système commandé avec la technique MLI et la boucle PLL, et l'onduleur de deuxième système commandé avec la technique VSC.

À la fin, on a fait une petite comparaison entre c'est deux système et on a conclu que le rendement dans le deuxième système avec la technique VSC plus élevé que le premier système commandé par MLI, et on a remarqué que la technique MLI minimisé les harmoniques mieux que la technique VSC.

Bibliographie

- [1] : BEMANA NGUEOUELE Yannick, Modélisation des injections de puissance d'un système PV sur un réseau public, mémoire de master, Energie et Procédés Industriels, institue internationale d'ingénierie de l'eau et l'environnement, 2012.
- [2] : Meghellet Hanine et Hocine Lynda, Contribution à l'étude d'un système photovoltaïque, mémoire de master 2, Électromécanique, Université Colonel Akli Mohand-Oulhadj Bouira, 2017-2018.
- [3] : Talha fatma, Gestion de la Maintenance Assistée par Ordinateur d'une Centrale Solaire PV Connecté au Réseau, mémoire de master 2, Energies renouvelables en électrotechnique, université Amar Thelidji Laghouat, 2019.
- [4] : disponible sur : <http://univ.ency-education.com> consulté le 18/09/2021 à 15:00 PM.
- [5] : Antar Fatima Zahra, Saci Zhour Ismahane, Dimensionnement et Etude TechnicoEconomique d'un Système Solaire Photovoltaïque pour une Ecole Primaire avec PVSYST, mémoire master 2, Energies renouvelables en électrotechnique, université Amar Thelidji Laghouat, 2020
- [6] : Fellah Nadia Sidibe Oumar, Etude et dimensionnement de l'installation photovoltaïque du DECANAT de la faculté ST, mémoire master 2, Electrotechnique Industrielle, Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem, 2018/2019
- [7] : ABBASSEN Lyes, Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque, mémoire de magister, MACHINES ELECTRIQUES, UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI OUZOU, 2011.
- [8] : disponible sur : <https://www.ef4.be/fr> consulté le 06/06/2021 à 23:05 PM.
- [9] : NOUAR ALLAL, MOHAMMED LUQMAN, Etude et dimensionnement d'une centrale hybride PV/éolien, mémoire de master 2, Energies renouvelables en électrotechnique, université Amar Thelidji Laghouat, 2020
- [10] : disponible sur: <https://www.futura-sciences.com/> consulté le 08/06/2021 à 14:34 PM
- [11] : Mr. MESSAOUDENE Hichem, Détermination intelligente de la puissance maximale des modules photovoltaïques, mémoire master 2, Microélectronique, UNIVERSITE EL HADJ LAKHDAR BATNA, 2013/2014
- [12] : BOUKHERS Djamil, OPTIMISATION D'UN SYSTEME D'ENERGIE PHOTOVOLTAIQUE APPLICATION AU POMPAGE, mémoire de magister, Modélisation Et Commande Des Machines Electriques, Université Mentouri de Constantine, 2007.
- [13] : Guy Séguier et Francis Labrique et Philippe Delarue, 2015, Électronique de puissance Structures commandes applications, 10e édition, Dunod, Paris 5 rue Laromiguière, Paris.
- [14] : MOUSSOUNI Nasser Eddine & OUADFEL Sofiane, Etude et réalisation d'un onduleur de tension monophasé, mémoire master 2, Commande des Systèmes Electriques, Université

Abderrahmane MIRA- BEJAIA, 2016/2017.

- [15] : Fraoun Safia, Khadi Chafia, Bourouh Yassine, MISE EN ŒUVRE D'ALGORITHME MLI VECTORIELLE AVEC UNE CARTE DSPACE DS 1102, Mémoire de fin d'études, UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI, TIZI-OUZOU,2008.
- [16] : Sofiane FELLOUAH, Siham MESBAHI, ETUDE D'UN SYSTEME PHOTOVOLTAIQUE CONNECTE AU RESEAU, mémoire master 2, MATERIAUX ET DISPOSITIFS ELECTRONIQUES ET PHOTOVOLTAIQUES,2015.
- [17] : Karkarine Abdelkader, Modélisation et contrôle d'un système photovoltaïque, mémoire master 2, commande des systèmes industriels, université MOKHTAR BADJI U Annaba, juin 2017.
- [18] : Nedjma Aouchiche. Conception d'une commande MPPT optimale à base d'intelligence artificielle d'un système photovoltaïque.. Autre. Université Bourgogne Franche-Comté, 2020.
- [19] : disponible sur : <http://lycees.ac-rouen.fr/> consulté le 15/06/2021 à 19 :21 PM
- [20] : disponible à : <https://lenergeek.com/> consulté le 15/06/2021 à 22 :00 PM
- [21] : Mr TARGANT Lyes & Mr KHALEF Sofiane, Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique, mémoire de master 2, UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI-OUZOU,2018
- [22] : Disponible sur : <http://thesis.univ-biskra.dz/1151/4/2emechapitre.pdf> consulté le 15/09/2021 à 17:30 PM
- [23] : ABBASSEN Lyes, Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque, mémoire de magister, Option : MACHINES ELECTRIQUES, UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI OUZOU, Soutenue le 05/05/2011.
- [24] : F. Bouchtouche cherfa «Etude et réalisation d'une centrale photovoltaïque connectée au réseau de distribution électrique BT». Mémoire de magister, Ecole National Polytechnique Elharach, 2004.
- [25] : (AIE)., l.a.i.d.l.é., La production mondiale d'énergie solaire photovoltaïque. 2010
- [26] : A.E.W.H. Kahlane, L. Hassaine , M. Kherchi, LCL filter design for photovoltaic grid connected systems,2014, Centre de Développement des Energies Renouvelables, CDER B.P. 62, Route de l'Observatoire, Bouzaréah, 16340, Algiers, Algeria.
- [27] : Zidane Achref eddine, Sahtout Mehdi, LES SYSTEMS PHOTOVOLTAIQUES CONNECTES AU RESAU, mémoire de master, UNIVERSITE Badj Mokhtar Annaba, juin 2017.
- [28] : XU, J., Filtrage active shunt des harmoniques des réseaux de distribution d'électricité Thèse de doctorat de l'INPL, Nancy, Janvier 1994.
- [29] : Shahraki, E.G., Apport de l'UPFC à l'amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques. Thèse de doctorat de l'université Henri Poincaré, Nancy-I, Octobre 2003.

- [30] : Mr. GASSAB Samir, Modélisation d'une centrale à énergie renouvelable photovoltaïque-éolienne, Mémoire de Magister, Machines électriques et leurs commandes, UNIVERSITE FERHAT ABBAS – SETIF UFAS (ALGERIE),15/12/2011.
- [31] : Célia DJILI, Karima FAREB, Etude d'impact d'une centrale photovoltaïque sur un réseau électrique, mémoire de master, Spécialité : Réseaux électriques, UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU, Soutenu le 13/07/ 2017
- [32] : Mounir BENADJA, APPROCHES POUR LA RÉDUCTION DE L'IMPACT DE DÉFAUT DANS LE TRANSPORT D'ÉNERGIE DU PARC ÉOLIEN OFFSHORE VIA VSC-HVDC, mémoire de doctorat, UNIVERSITÉ DU QUÉBEC, LE 12 OCTOBRE 2016.
- [33] : Chebabi kamilia, Etude d'une loi de commande En Courant par hystérésis à bande Adaptative pour un onduleur de tension, Filière d'Electrotechnique, mémoire de master, Université Mohamed Khider de Biskra, 2018/2019.
- [34] : Boudjemâa, M., Application du formalisme Bond Graph à une chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque. Université Mentouri de Constantine Faculté des Sciences de l'Ingénieur Département d'Electrotechnique, Algérie 2007: p. 43-45
- [35] : XU, J., Filtrage active shunt des harmoniques des réseaux de distribution d'électricité Thèse de doctorat de l'INPL, Nancy, Janvier 1994
- [36] : GHORZI Zoulikha, MIMOUNI Amina, Stratégies de commande des onduleurs, Filière Electrotechnique, ECOLE SUPERIEURE EN SCIENCES APPLIQUEES de T L E M C E N, 2018 /2019
- [37] : G. Couturier, BOUCLE A VERROUILLAGE DE PHASE et APPLICATIONS, (Vol. 9), email : couturier@elec.iuta.u-bordeaux.fr.
- [38] : Idi Guéro Abdoul-Aziz, Kechidi Youcef, Commande d'un moteur à courant continu à l'aide de la PLL, département d'automatique, mémoire de master, UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU, Soutenu le 10/07/2016.
- [39] : OULD BAHAMMOU Abdelkader, La synchronisation d'un générateur photovoltaïque connecté au réseau électrique, mémoire master, DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA MATIERE, UNIVERSITE AHMED DRAIA ADRAR, 14 / 06 / 2011.
- [40] : Ioan Viorel Banu & Marcel Istrate, conférence A Study on Anti-Islanding Detection Algorithms for Grid-Tied Photovoltaic systems, May 2014, Brasov, Romania At: Brasov, Project: [Research on Integration of Photovoltaic Sources into the Power Grid](#)

ANNEXE 01 : Programmation P&O sous Matlab.

```
function D = PandO(Param, Enabled, V, I)

% MPPT controller based on the Perturb & Observe algorithm.

% D output = Duty cycle of the boost converter (value between 0 and 1)
%
% Enabled input = 1 to enable the MPPT controller
% V input = PV array terminal voltage (V)
% I input = PV array current (A)
%
% Param input:
Dinit = Param(1); %Initial value for D output
Dmax = Param(2); %Maximum value for D
Dmin = Param(3); %Minimum value for D
deltaD = Param(4); %Increment value used to increase/decrease the duty cycle D
% ( increasing D = decreasing Vref )
%

persistent Vold Pold Dold;

dataType = 'double';

if isempty(Vold)
    Vold=0;
    Pold=0;
    Dold=Dinit;
end
P= V*I;
dV= V - Vold;
dP= P - Pold;

if dP ~= 0 & Enabled ~=0
    if dP < 0
        if dV < 0
            D = Dold - deltaD;
        else
            D = Dold + deltaD;
        end
    else
        if dV < 0
            D = Dold + deltaD;
        else
            D = Dold - deltaD;
        end
    end
else D=Dold;
end

if D >= Dmax | D<= Dmin
    D=Dold;
end

Dold=D;
Vold=V;
Pold=P;
```

ملخص:

يُعتمد الهدف الرئيسي من هذه الرسالة على دراسة تقنيات دمج الأنظمة الكهروضوئية في الشبكة الكهربائية. في البداية تطرقت إلى هياكل الأنظمة الكهروضوئية والمحولات المستخدمة في التكامل مع عناصر التحكم هذه، ثم درسنا طريقتين للتحكم في محولات الشبكة: PWM و VSC مع حلقة PLL. وفي الأخير، اخبرنا تأثير هذه التقنيات على دمج الأنظمة الكهروضوئية في الشبكة من خلال محاكاة نموذجين باستخدام Matlab Simulink حيث نستخدم هذه المحاكاة على المقارنة بين هاتين الطريقتين للتحكم.

الكلمات الرئيسية: نظام PV، الاتصال بالشبكة الكهربائية، التحكم PWM، التحكم VSC، حلقة PLL.

Résumé

L'objectif principal de la présente thèse repose, sur l'étude des techniques d'intégrations des systèmes photovoltaïques au réseau. D'abord on a touché les structures des systèmes photovoltaïque et les convertisseurs utilisés dans l'intégration avec ces commandes, puis on a étudié deux techniques de commande liées aux onduleurs des réseaux: MLI et VSC avec la boucle de PLL. En fin on a testé l'influence de ces techniques à l'intégration des systèmes PV au réseau par une simulation de deux modèles sous Matlab Simulink ou notre simulation est basée sur la comparaison entre ces deux techniques de commandes.

Mots clé : Système PV, Intégration au réseau, la commande MLI, la commande VSC, la boucle PLL.

Abstract

The main objective of this thesis is, on the study of techniques for integrating photovoltaic systems into the grid. First we touched the structures of photovoltaic systems and the converters used in the integration with these controls, then we studied two control techniques related to grid inverters: PWM and VSC with the PLL loop. Finally, we tested the influences of these techniques on the integration of PV systems into the grid by a simulation of two models in Matlab Simulink where our simulation is based on the comparison between these two control techniques.

Keywords: PV system, Grid integration, PWM control, VSC control, PLL loop.