

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البليدة

Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا

Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك

Département d'Électronique



Mémoire de Master

Filière Électrotechnique

Spécialité Machines Electriques

BOUCHERIT OMAR

Etude et modélisation d'un filtre LCL pour onduleur photovoltaïque connecté au réseau

Proposé par : Mr . KAHLANE Hamza

Année Universitaire 2018-2019

Remerciement

*Avant tout, nous remercions le dieu, le tout puissant,
de nous avoir donné le courage et la volonté pour accomplir
ce travail.*

*Nous tenons à remercier mon encadreur Mr
KALLALE Hamza pour sa disponibilité, ses
conseils précieux pendant la période de la réalisation de ce
travail et de leurs qualités tant professionnelles qu'humaines.*

*Nos remerciements vont également à tous les personnes qui
nous ont aidées à réaliser ce travail.*

*Enfin, nous adressons nos vifs remerciements à tous les
enseignants du
Département d'électronique qui ont assisté à notre formation.*

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

*Ma chère mère qui est ma source de bonheur et qui m'a entourée
d'amour et de tendresse.*

*Mon cher père pour son soutien inlassable et qui s'est sacrifié pour
moi.*

Sans oublier mes frères et mes sœurs.

*A tous mes camarades dans L'UGEL et mes amis en
particulier*

HALLAKE Ahmed, BOUHNIT A. Karim

SAUCDI A. Hamide, HORRA Tahie,

SAAD Taibi.

B. Omar

Résumé

Résumé

Dans ce mémoire nous avons fait une étude et modélisation d'un filtre LCL pour un onduleur photovoltaïque connecte au réseau électrique de distribution, l'Objet de ce filtre est de filtrer les harmoniques produites par l'onduleur. Le dimensionnement du filtre a été fait à partir du programme m-file sous Matlab, On a aussi simulé une simulation globale du panneau jusqu'à le réseau avec le filtre LCL sous simulink. L'amortissement passif permet de supprimer le pic près de la fréquence de résonance.

Mot clés : Filtre LCL, Amortissement passif, Onduleur, Photovoltaïque, réseau électrique.

Abstract

In this thesis we did a study and modeling of a LCL filter for a photovoltaic inverter connected to the distribution grid, the object of this filter is to filter the harmonics produced by the inverter. The sizing of the filter was done from the m-file program under Matlab, simulated global simulation of the panel to the network with the LCL filter under simulink Passive damping removes the peak near the resonant frequency.

Keywords: LCL filter, Passive damping, inverter, photovoltaic, electrical network.

ملخص

في هذه المذكرة قمنا بدراسة و نمذجة المرشح LCL العاكس الفولطا ضوئي المتصل بشبكة التوزيع الكهربائي, الهدف من هذا المرشح هو تصفية التوافقيات الناتجة عن العاكس. ابعاد هذا المرشح تستخرج انطلاقا من برنامج m-file في Matlab قمنا أيضا بنمذجة عامة من اللوحة الشمسية الى غاية وصلها بشبكة التوزيع الكهربائي بواسطة المرشح LCL بالبرنامج Simulink .

التخميد السلبي يزيل الذروة بالقرب من تردد الرنين (fréquence de résonance)

الكلمات المفتاحية: المرشح LCL, التخميد السلبي, العاكس الفولطا ضوئي, الشبكة الكهربائية

Table des matières

TABLE DES MATIERES

Table des matières

CHAPITRE I

LES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUE

I.1 Energie solaire.....	3
I.1.2 Rayonnement solaire.....	3
I.1.2.1 Le rayonnement direct.....	4
I.1.2.2 Le rayonnement diffus.....	4
I.1.2.3 Le rayonnement solaire réfléchi.....	4
I.1.2.4 Le rayonnement global.....	5
I.2 La cellule photovoltaïque.....	5
I.2.1 Les paramètres de la cellule.....	7
I.2.1.1 Courant de court-circuit.....	7
I.2.1.2 Tension de circuit ouvert.....	7
I.2.1.3 Facteur de Forme FF.....	7
I.2.1.4 Le rendement.....	8
I.2.2 Influence de la température.....	8
I.2.3 Influence de l'éclairement.....	9
I.2.4 Les différentes technologies des cellules PV.....	9
I.2.4.1 Cellules cristallines.....	10
I.2.4.2 Cellules à couches minces.....	10
I.3 Panneau solaire.....	10
I.3.1 Regroupement des cellules.....	10
I.3.1.1 Regroupement des cellules en série.....	10

TABLE DES MATIERES

I.3.1.2 Regroupement des cellules en parallèle.....	11
I.3.1.3 Regroupement des cellules (séries et parallèle).....	11
I.3.2 Protection classiques d'un générateur photovoltaïque.....	12
I.3.2.1 Les diodes séries (Diode anti retour).....	12
I.3.2.2 Les diodes parallèles (Diode by-pass.)	12
I.4 LES systèmes photovoltaïques.....	13
I.4.1 Classification d'un système solaire photovoltaïque.....	13
I.4.1.1 Système autonome.....	13
I.4.1.2 Système PV raccordée au réseau.....	14
I.4.1.3 Système hybride.....	14
I.4.2 Structure générale d'un système photovoltaïque.....	15
I.4.2.1 Les systèmes à connexion directe au réseau.....	15
I.4.2.2 Le système à bus continu intermédiaire.....	15
I.4.3 Classifications des Centrales Photovoltaïques Connectées au Réseau.....	15
I.4.3.1 Centrales de petite taille.....	15
I.4.3.2 Centrales de taille moyenne.....	16
I.4.3.3 Centrales de grande taille.....	16

CHAPITRE II

LES CONVERTISSEURS PHOTOVOLTAÏQUE ET FILTRE

II.1 Les Convertisseurs photovoltaïques.....	17
II.2 Convertisseurs DC/AC.....	17
II.2.1 Les onduleurs photovoltaïques.....	18
II.2.3 Commande de l'onduleur photovoltaïque connecté au réseau.....	19

TABLE DES MATIERES

II.2.3.1 Commande par hystérésis.....	20
II.2.3.2 La commande vectorielle.....	20
II.2.3.3 Commande par MLI.....	20
II.2.4 PLL (Phase Lock Loop).....	21
II.2.5 Technologies des onduleurs couplés au réseau.....	21
II.2.5.1 Onduleur central.....	22
II.2.5.2 Onduleur string.....	22
II.2.5.3 Onduleur multi-string.....	23
II.3 Convertisseurs DC/DC.....	23
II.3.1 Topologies de conversion (DC - DC).....	25
II.3.1.1 L'hacheur dévolteur (Buck).....	25
II.3.1.2 Hacheur parallèle (Boost).....	25
II.3.1.3 Hacheur Cùk.....	25
II.3.2 La commande (MPPT).....	26
II.4 Les filtre.....	27
II.4.1 Topologie de filtre.....	27
II.4.1.1 Filtre L.....	27
II.4.1.2 Filtre LC.....	27
II.4.1.3 Filtre LCL.....	28

CHAPITRE III

DIMENSIONNEMENT ET SIMULATION

III.1 Dimensionnement.....	29
III.1.1 Le panneau photovoltaïque.....	29
III.1.2 Puissance de découplage.....	31

TABLE DES MATIERES

III.1.3 Model du réseau.....	31
III.1.4 Dimensionnements de filtre LCL.....	32
III.1.5 Réponse fréquentielle du filtre LCL.....	34
III.1.5.1 Diagramme de Bode.....	35
III.1.5.2 Diagramme de bode pour différentes R_d	35
III.2 Simulation de l'onduleur avec le filtre LCL.....	36
III.2.1 Avant l'inductance L_i	36
III.2.2 Après l'inductance L_i	37
III.2.3 Après l'inductance L_g	38
III.2.4 Filtre (L) seulement.....	39
III.2.5 L'influence de la résistance R_d sur la tension connectée au réseau.....	39
III.2.6 L'influence de fréquence de commutation.....	40
III.2.7 La commande de la tension.....	41
III.2.8 Boucle à verrouillage de phase (phase locked loop) PLL.....	42

LISTE DES FIGURES

Liste des figures

Figure I.1 : Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil, notion de la Convention AM.....	3
Figure I.2 : Spectres Solaires relevés dans plusieurs conditions selon la convention AM. Source NREL Solar Spectrum.....	4
Figure I.3 : Composante du rayonnement global sur un plan horizontal.....	5
Figure I.4 : Coupe transversale d'une cellule PV typique.....	5
Figure I.5 : Caractéristique I(V) d'une cellule photovoltaïque.....	6
Figure I.6 : Schéma équivalent électrique d'une cellule PV.....	7
Figure I.7 : Exemple de réseau de caractéristiques d'un générateur photovoltaïque pour différents éclaircements.....	8
Figure I.8 : Caractéristiques de courant et de tension d'un module PV avec variation de température.....	9
Figure I.9 : Courant de module et d'irradiation.....	9
Figure I.10 : Différents technologie des cellules PV.....	10
Figure I.11 . Caractéristiques résultantes d'un groupement de cellules en série.....	11
Figure I.12 : Caractéristiques d'un groupement de cellules en parallèle.....	11
Figure I.13 : Association mixte des modules.....	12
Figure I.14 : Caractéristique de nombre des modules mixte.....	12
Figure I.15 : Diodes anti-retour.....	12
Figure I.16 : Diodes anti-retour et by-pass.....	13
Figure I.17 : Exemple de la structure d'un système PV autonome.....	14

LISTE DES FIGURES

Figure I.18 : Système PV raccordée au réseau.....	14
Figure I.19 : Système hybride.....	15
Figure II.1 : systèmes PV connecté au réseau.....	17
Figure II.2 : Symbole de convertisseur DC-AC monophasé et triphasé.....	18
Figure II.3 :Schéma fonctionnel de l'onduleur photovoltaïque.....	18
Figure II.4 : Classement des onduleurs photovoltaïque.....	19
Figure II.5 : Onduleurs monophasé et triphasé connectés au réseau.....	19
Figure II.6 : Contrôle de courant par hystérésis.....	20
Figure II.7 : Contrôle de courant par MLI.....	21
Figure II.8 : Principe de la Commande MLI.....	21
Figure II.9 : Structure de principe d'une PLL.....	21
Figure II.10 : Topologie onduleur central raccordée au réseau.....	22
Figure II.11 : Topologie onduleur string raccordée au réseau.....	23
Figure II.12 : Topologie onduleur multi-string raccordée au réseau.....	23
Figure II.13 : Schéma d'un quadripôle électrique.....	24
Figure II.14 : Périodes fermeture et ouverture d'un commutateur.....	24
Figure II.15 : Hacheur série (buck).....	25
Figure II.16 : Hacheur parallèle.....	25
Figure II.17 : Hacheur Cùk.....	26
Figure II.18 : Chaîne de conversion photovoltaïque avec convertisseur (DC-DC) contrôlé par une commande (PPM) sur charge DC.....	26
Figure II. 19 : Topologies de filtres de base.....	27
Figure II.20 : Le filtre LCL avec résistance d'amortissement.....	28

LISTE DES FIGURES

Figure III.1 : Schéma synoptique de l'onduleur photovoltaïque avec le filtre LCL connecté au réseau électrique.....	36
Figure III.2 : Description du panneau photovoltaïque dans Simulink.....	29
Figure III.3 : Panneaux photovoltaïque à différentes températures avec éclairement de $1000W/m^2$	30
Figure III.4 : Panneaux photovoltaïque à différents éclairements avec une température de $25 C^o$	30
Figure III.5 : Forme d'onde de tension.....	31
Figure III.6 : Modèle de réseau.....	31
Figure III.7 : Schéma de filtre LCL avec la résistance d'amortissement.....	32
Figure III.8 : Fréquence de résonance du filtre en fonction de rapport de l'inductance.....	32
Figure III.9 : Modèle en quadripôle du filtre LC.....	34
Figure III.10 : Diagramme de bode de filtre LCL.....	35
Figure III.11 : Diagramme de bode pour différentes R_d	35
Figure III.12 : Simulation de l'onduleur photovoltaïque avec le filtre LCL connecté au réseau électrique.	36
Figure III.13 : La tension et le courant après l'onduleur et avant L_i	36
Figure III.14 : La tension après l'inductance L_i	37
Figure III.15 : Analyse spectrale de tension Après l'inductance L_i	37
Figure III.16 : Les signaux de tension du réseau et la tension après le filtre LCL.....	38
Figure III.17 : Analyse spectrale de tension Après le filtre.....	38
Figure III.18 : La tension après suppression de l'inductance L_g et de la résistance R_d	39
Figure III.19 : Le signal de tension après le filtre LCL sans la résistance R_d	39
Figure III.20 : Le signal de tension après le filtre LCL avec la résistance R_d	40
Figure III.21 : signaux de tension pour le réseau et l'autre la sortie du filtre, avec une fréquence de commutation de 1 KHz.....	40

LISTE DES FIGURES

Figure III.22 : Tension du signal à la sortie du filtre avec fréquence de commutation de 4 KHz.....	41
Figure III.23 : Contrôle de la tension de l'onduleur monophasé.....	41
Figure III.24 : Tension du signal à la sortie du filtre pour différentes valeurs de m_a	42
Figure II.24 : Simulation de Contrôle de la tension.	42
Figure III.25 : Simulation de la Boucle à verrouillage de phase PLL.....	42

LISTE DES ABREVIATIONS ET SYMBOLE

Liste des Abréviations et Symbole

PV: Photovoltaïque.

GPV: Générateur Photovoltaïque.

I_{CC} : Le courant de court circuit

V_{OC} : La tension de circuit ouvert

I_{CELL} : Courant de sortie de la cellule

V_{CELL} : Tension de sortie de la cellule

I_{SAT} : est le courant de saturation

R_p : Résistance parallèle

R_s : Résistance série

V_T : le potentiel thermodynamique

K : la constante de Boltzmann

T : la température effective de la cellule en Kelvin

FF: Facteur de Forme.

η_s : Le rendement d'une cellule

MPPT: Maximum Power Point Tracking.

DC : Courant Continu (Direct Current).

AC : Courant Alternatif (Alternative Current)

HF : Haute fréquence

BF : Base fréquence

G_r : L'éclairement de référence $G=1000\text{w}/\text{m}^2$

P_{pv} : puissance de générateur Photovoltaïque

P_{res} : puissance de réseau

PWM: Pulse Width Modulation (MLI)

PPM : Point de Puissance Maximum

MLI : Modulation à Largeur d'Impulsion

PLL : Phase Lock Loop

THD : Taux Harmonique de Distorsion

Introduction générale

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale

L'énergie électrique est l'une des formes d'énergie la plus consommée partout dans le monde. C'est l'un des facteurs le plus important pour le développement d'un pays. Pour disposer de cette énergie qui est si importante, elle doit nécessairement être produite dans des centrales. Pour cela, on dispose des différents types de centrales de production de l'énergie électrique, parmi lesquelles nous pouvons citer :

Les centrales hydrauliques, les centrales thermiques, les centrales éoliennes et les centrales nucléaires

Les énergies renouvelables ont tout pour s'imposer, tant aux niveaux environnemental, social, qu'économique. Les énergies renouvelables devraient être le fer de lance de toute politique de lutte contre le réchauffement climatique [9].

L'énergie Photovoltaïque connaît actuellement un fort développement dans le monde. Ce développement est dopé par les politiques internationales qui visent la diminution de l'utilisation des énergies fossiles [6].

L'énergie solaire photovoltaïque qui est la conversion directe de la lumière en électricité grâce à des cellules solaires, représente une alternative intéressante et bien adaptée à des besoins limités. Malgré sa facilité de mise en œuvre, son faible impact environnemental et le peu d'entretien qu'il nécessite, un système photovoltaïque n'est plus concurrentiel lorsque la demande augmente. Ainsi une étude assez rigoureuse est nécessaire pour faire le meilleur choix et le plus performant avec le moindre coût possible [9].

Une des applications intéressantes de l'énergie renouvelable est la connexion au réseau électrique, Des onduleurs liés au réseau sont utilisés pour connecter des cellules photovoltaïques (PV) à un réseau monophasé ou triphasé. Un filtre est nécessaire entre l'onduleur et le réseau pour réduire les harmoniques du courant de sortie de l'onduleur.

Les filtres LCL sont couramment utilisés dans les onduleurs liés au réseau car ils permettent de réduire la taille des composants par l'utilisation de petites valeurs d'inductances et de condensateurs comparées aux filtres L et LC.

Dans ce mémoire, on a analysé la modélisation et la simulation d'un filtre LCL pour un onduleur photovoltaïque connecté au réseau électrique.

Pour décrire cela, ce mémoire est présenté en trois chapitres :

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Dans la première chapitre un état de l'art sur les énergies solaires et les celles photovoltaïques jusqu'à les panneaux solaires photovoltaïque, les types des systèmes photovoltaïques.

Dans le deuxième chapitre décrit certains convertisseurs de puissance et les techniques de commande et de conversion DC/ DC, DC /AC connectés au réseau, ainsi les filtres.

Finalement, au troisième chapitre du mémoire, les résultats de simulation sont discutés et analysés.

CHAPITRE I

Les Systèmes photovoltaïque

Chapitre I : Les Systèmes photovoltaïque

I. Les Systèmes photovoltaïque

I.1 Energie solaire

Le rayonnement solaire est constitué de photons dont la longueur d'onde s'étend de l'ultraviolet ($0.2 \mu\text{m}$) à l'infrarouge lointain ($2.5 \mu\text{m}$). On utilise la notion AM pour Air Mass afin de caractériser le spectre solaire en terme d'énergie. L'énergie totale transportée par le rayonnement solaire sur une distance soleil-terre est de l'ordre de 1350W/m^2 (AM0) dans l'espace hors atmosphère terrestre Figure I.1. Lorsque le rayonnement solaire traverse l'atmosphère, il subit une atténuation et une modification de son spectre, à la suite de phénomènes d'absorption et de diffusion dans les gaz, l'eau et les poussières. Ainsi, la couche d'ozone absorbe une partie du spectre lumineux provenant du soleil, et en particulier une partie des ultraviolets dangereux pour la santé. Le rayonnement solaire direct reçu au niveau du sol (à 90° d'inclinaison) atteint 1000W/m^2 du fait de l'absorption dans l'atmosphère (AM1). Cette valeur change en fonction de l'inclinaison des rayons lumineux par rapport au sol. Plus l'angle de pénétration θ est faible, plus l'épaisseur atmosphérique que les rayons auront à traverser sera grande, d'où une perte d'énergie conséquente. Par exemple, l'énergie directe transportée par le rayonnement solaire atteignant le sol avec un angle de 48° avoisine les 833W/m^2 (AM1.5).

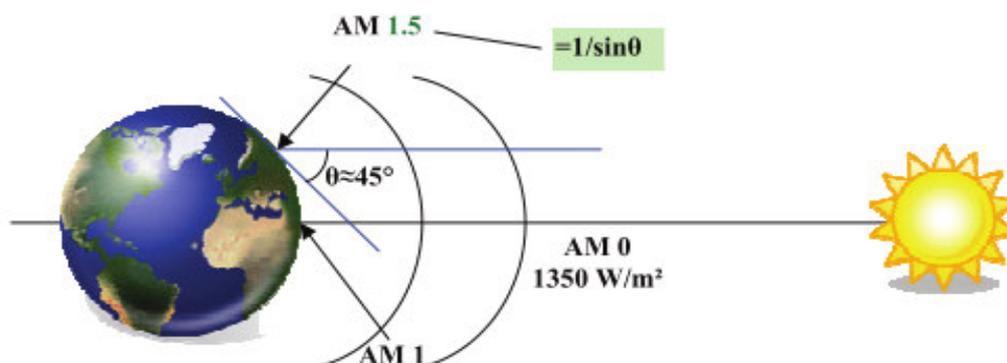


Figure I.1: Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil, notion de la Convention AM [3]

Pour connaître le rayonnement global reçu au sol, il faut ajouter à ce dernier le rayonnement diffus. Le rayonnement diffus concerne tout le rayonnement dont la trajectoire entre le soleil et le point d'observation n'est pas géométriquement rectiligne et qui est dispersé ou réfléchi par l'atmosphère ou bien le sol. En considérant ceci, on obtient une référence du spectre global notée AM1.5 avec une puissance de 1000W/m^2 , la Figure I.2 correspondant à nos latitudes [3].

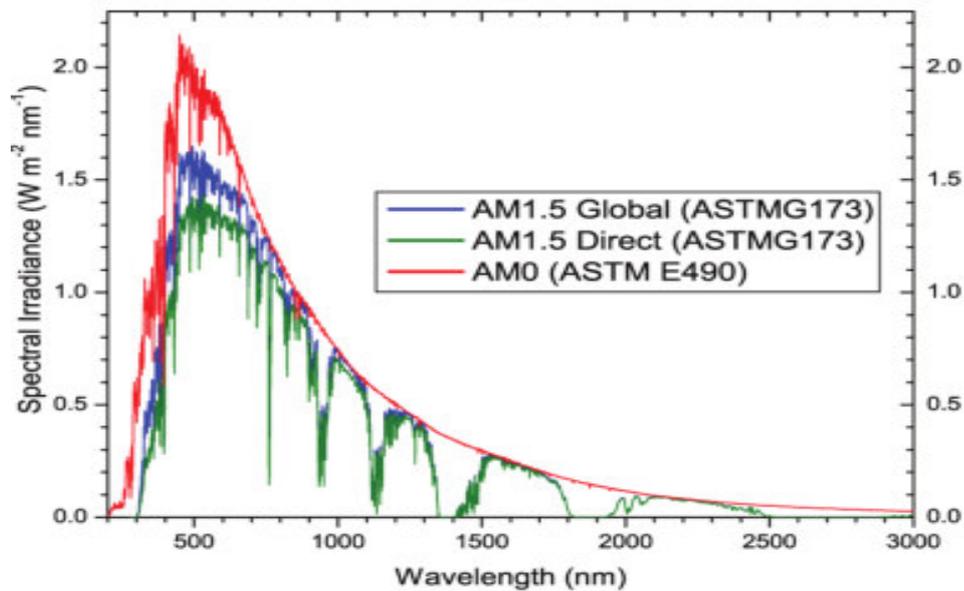


Figure I.2: Spectres Solaires relevés dans plusieurs conditions selon la convention AM.
Source NREL Solar Spectrum [3]

I.1.2 Rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est la matière première de l'énergie solaire. C'est une onde de longueur qui varie entre 0.2 et 4.10⁻⁶ m. sans la nécessité d'un support physique pour se déplacer, il arrive au sol après la perte d'une grande partie de son intensité, à cause d'une partie de l'ultraviolet, qui s'absorbent.

I.1.2.1 Le rayonnement direct

Est reçu directement du soleil, sans diffusion par l'atmosphère. Ses rayons sont parallèles entre eux, il forme donc des ombres et peut être concentré par des miroirs. Il peut être mesuré par un pyréliomètre.

I.1.2.2 Le rayonnement diffus

Est constitué par la lumière diffusée par l'atmosphère (air, nébulosité, aérosols). La diffusion est le phénomène qui répartit un faisceau parallèle en une multitude de faisceaux partant dans toutes les directions. Dans le ciel, ce sont à la fois les molécules d'air, les gouttelettes d'eau (nuages) et les poussières qui produisent ce (éclatement) des rayons du soleil. Cela dépend donc avant tout des conditions météorologiques.

I.1.2.3 Le rayonnement solaire réfléchi

Ou l'albédo du sol est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige).

Chapitre I : Les Systèmes photovoltaïque

I.1.2.4 Le rayonnement global

Est la somme de tous les rayonnements reçus, y compris le rayonnement réfléchi par le sol et les objets qui se trouvent à sa surface. Il est mesuré par un pyrano-mètre ou un polarimètre sans écran. Les stations météorologiques généralement mesurer le rayonnement global horizontal par un pyromètre placé horizontalement à l'endroit requis [9].

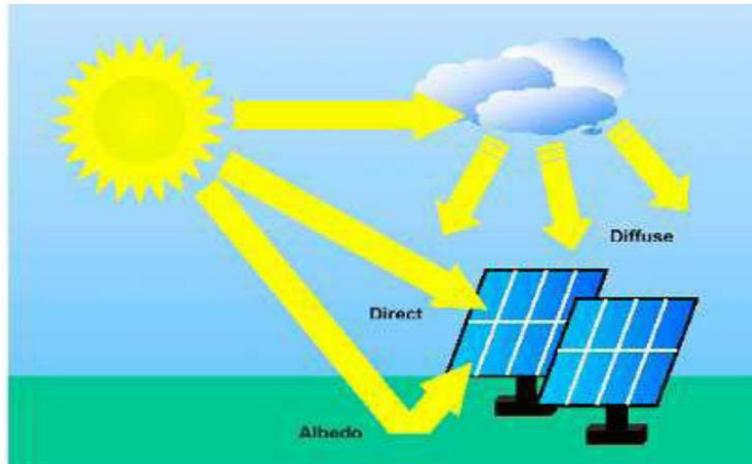


Figure I.3. Composante du rayonnement global sur un plan horizontal [9].

I.2 La cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule et du vieillissement de la cellule. La figure I.4 illustre une cellule PV typique où sa constitution est détaillée.

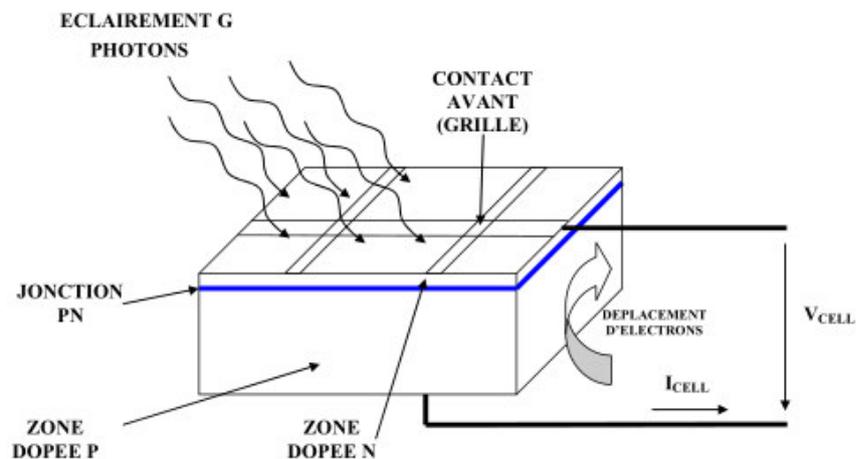


Figure I.4 : Coupe transversale d'une cellule PV typique [5].

Chapitre I : Les Systèmes photovoltaïque

Une cellule PV est réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée P (dopée au bore) et l'autre dopée N (dopée au phosphore) créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule. A travers une charge continue, on peut en plus récolter des porteurs. La tension maximale de la cellule est d'environ 0.6 V pour un courant nul. Cette tension est nommée tension de circuit ouvert (V_{OC}). Le courant maximal se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées, il est appelé courant de court-circuit (I_{CC}) et dépend fortement du niveau d'éclairage. Une cellule PV a, comme nous le voyons sur la figure I.5, une caractéristique $I(V)$ non linéaire avec un PPM.

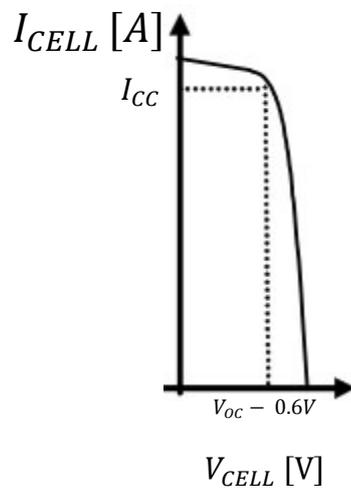


Figure I.5 : Caractéristique $I(V)$ d'une cellule photovoltaïque [5].

Une cellule PV peut se modéliser à partir de l'équation définissant le comportement statique de la jonction PN d'une diode classique. Ainsi, la figure I.6 illustre le schéma équivalent électrique d'une cellule PV réelle. Dans cette équation, on prend en compte le courant de court-circuit et les différentes résistances modélisant les pertes dues à la connectique. Ainsi, en statique, le comportement d'une cellule PV constituée d'une jonction PN à base de silicium peut être décrit par l'équation suivante :

$$I_{CELL} = I_{CC} - I_{SAT} \left[\exp \left[\frac{V_{CELL} - I_{CELL} R_S}{n V_T} \right] - 1 \right] - \frac{V_{CELL} + I_{CELL} R_S}{n R_P} \quad (I.1)$$

Avec :
$$V_T = \frac{KT}{e} \quad (I.2)$$

Où I_{SAT} est le courant de saturation, V_T , le potentiel thermodynamique, K, la constante de Boltzmann, T, la température effective de la cellule en Kelvin, e, la charge de l'électron, n, le facteur de non idéalité de la jonction, I_{CELL} est le courant fourni par la cellule, V_{CELL} la tension

Chapitre I : Les Systèmes photovoltaïque

à ses bornes, I_{CC} le courant de court-circuit de la cellule dépendant de l'éclairement et la température, R_p , la résistance shunt caractérisant les courants de fuite de la jonction et R_s la résistance série représentant les diverses résistances des contacts et de connexions [5].

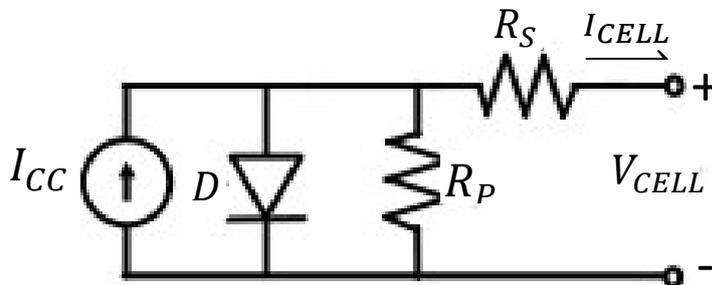


Figure I.6 : Schéma équivalent électrique d'une cellule PV [5].

I.2.1 Les paramètres de la cellule

La cellule solaire est caractérisée par le rendement de conversion η , une tension à circuit ouvert V_{OC} , un courant à court-circuit I_{CC} et un facteur de suffisance FF. Ces paramètres sont déterminés à partir des caractéristiques courant-tension. Leurs déterminations permettent les comparaisons de différentes cellules éclairées en conditions identiques.

I.2.1.1 Courant de court-circuit I_{CC}

Le courant de court-circuit est le courant obtenu quand les bornes de cellules sont en court-circuit. Il augmente linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et est relié sur la surface éclairée, le spectre du rayonnement solaire et la température.

I.2.1.2 Tension de circuit ouvert V_{OC}

La tension de circuit ouvert est obtenue quand le courant de cellules est nul. Il est lié à la résistance de shunt et à la barrière d'énergie. Sa valeur diminue avec la température et change peu avec l'insolation.

I.2.1.3 Facteur de Forme FF

Le facteur de suffisance d'une cellule solaire est défini comme le rapport d'une puissance maximale à la puissance calculée en multipliant la tension de circuit-ouvert par le courant de court-circuit. Cela reflète combien de résistances en série et peu de résistances. Shunt dans la cellule solaire. Pendant que la cellule solaire se dégrade avec l'âge, sa résistance en série tend à augmenter le résultat en un facteur inférieur de suffisance.

$$FF = V_{op}I_{op}/I_{sc}V_{oc}$$

Chapitre I : Les Systèmes photovoltaïque

I.2.1.4 Le rendement

Le rendement d'une cellule solaire est défini comme le rapport de la puissance maximale fournie par la cellule à la puissance lumineuse d'incident.

$$\eta_s = V_{op}I_{op}/GA$$

A est la surface génératrice en m^2 et G l'ensoleillement en W/m^2 [2].

I.2.2 Influence de la température

La caractéristique d'une cellule PV (ou d'un générateur PV) est directement dépendante de l'éclairement et de la température. La Figure I.7 donne l'allure générale des caractéristiques électriques d'un générateur photovoltaïque pour différents éclairements.

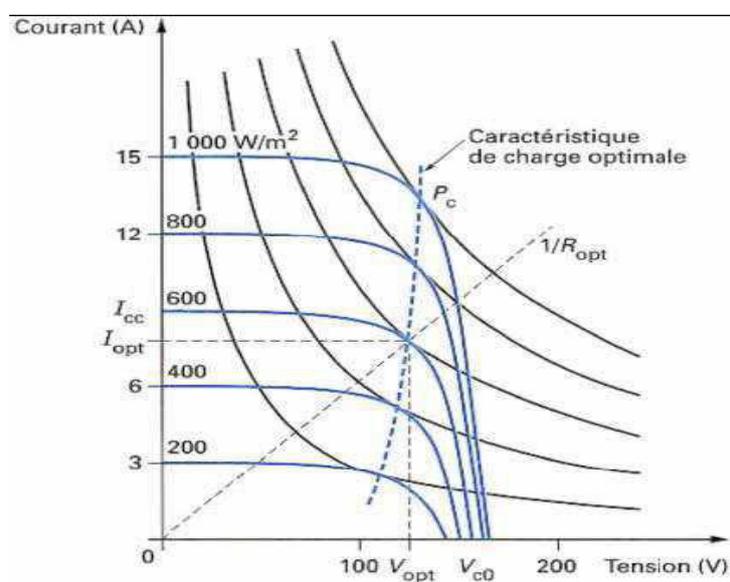


Figure I.7: Exemple de réseau de caractéristiques d'un générateur photovoltaïque pour différents éclairements [6].

Nous remarquons que, à température donnée, ici 25°C :

- Le courant de court-circuit I_{cc} varie proportionnellement à l'éclairement E.
- La tension à vide V_{co} varie peu avec l'éclairement. Elle peut être considérée comme une constante pour une installation donnée.

Les influences de ces paramètres se traduisent donc par des variations de la caractéristique utile du générateur photovoltaïque avec les conditions d'éclairement.

La température a également une influence sur la caractéristique d'un générateur PV. La Figure I.8 présente la variation des caractéristiques d'un générateur PV de 160W en fonction de la température à un éclairement donné. L'éclairement est ici fixé à 1000 W/m^2 [6].

Chapitre I : Les Systèmes photovoltaïque

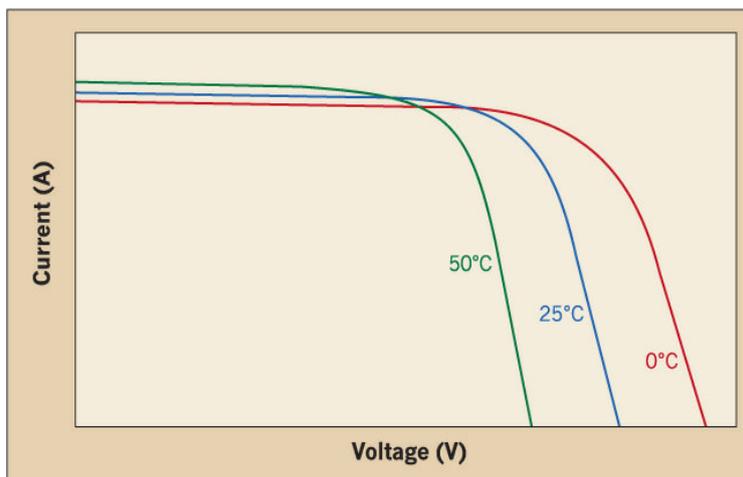


Figure I.8 : Caractéristiques de courant et de tension d'un module PV avec variation de température [7].

I.2.3 Influence de l'éclairement

L'énergie électrique produite par une cellule dépend de l'éclairement qu'elle reçoit sur sa surface. La figure (I.9) représente la caractéristique courant-tension d'une cellule en fonction de l'éclairement, à une température et une vitesse de circulation de l'air ambiant constantes. Le courant est directement proportionnel au rayonnement, contrairement à la tension qui ne varie que très peu en fonction de l'éclairement [9].

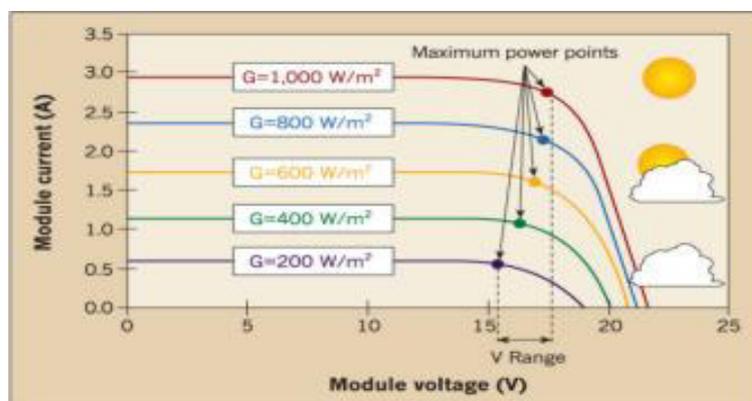


Figure I.9: Courant de module et d'irradiation [7].

I.2.4 Les différentes technologies des cellules PV

Le rendement des cellules PV dépend principalement des matériaux constitutants, la plupart des recherches photovoltaïque et sa répartition à grande échelle. Les technologies des cellules solaires se sont développées de manière très diverses. On distingue en général les cellules cristallines et les cellules à couches minces [8].

Chapitre I : Les Systèmes photovoltaïque

I.2.4.1 Cellules cristallines

Les cellules en silicium mono et poly-cristallin représentent environ 94% du marché. On reconnaît deux types des cellules sont :

a. La cellule monocristalline: qui s'approche le plus du modèle théorique: cette cellule est effectivement composée d'un seul cristal divisé en deux couches (figure I.10 a), Les cellules monocristallines permettent d'obtenir de hauts rendements, de l'ordre de 15 à 22 % [8].

b. Les cellules poly-cristallin : sont composées d'un agglomérat de cristaux (figure I.10b). Elles aussi proviennent du sciage de blocs de cristaux, mais ces blocs sont coulés et sont dès lors hétérogènes [8].

I.2.4.2 Cellules à couches minces : La technologie des couches minces a l'avantage de produire les cellules par un procédé de revêtement à grande surface peu onéreux. Elles sont plus minces et peuvent même être déposées sur des supports flexibles (figure I.10 c) [8].

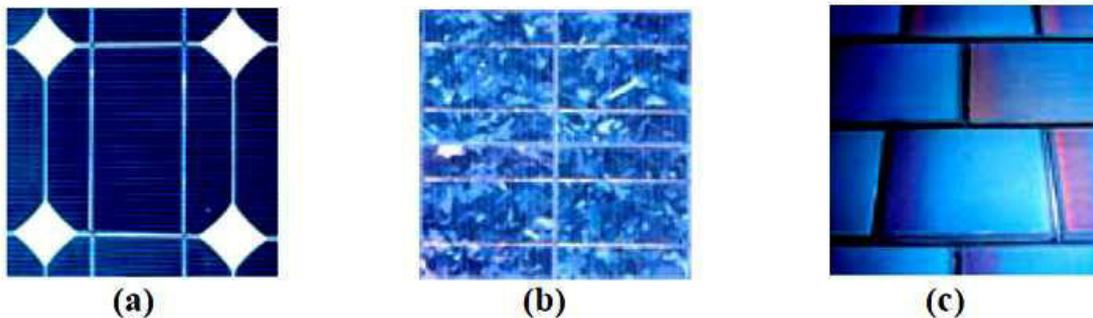


Figure I.10 : Différents technologies des cellules PV [8].

I.3 Panneau solaire

Se compose des modules PV interconnectés en série ou en parallèle pour produire la puissance électrique. Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire, avec un degré d'inclinaison spécifique. Les modules peuvent également être connectés en série et en parallèle afin d'augmenter la tension et l'intensité d'utilisation [9].

I.3.1 Regroupement des cellules

I.3.1.1 Regroupement des cellules en série

Une cellule PV, c'est l'unité de base d'un système photovoltaïque ne produit qu'une très faible puissance électrique, typiquement de 2.5 W sous une tension de moins d'un volt. Pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées en série ou/et en parallèle avec grand

Chapitre I : Les Systèmes photovoltaïque

nombre pour former un générateur ou un panneau. L'association en série des cellules délivre une tension égale à la somme des tensions individuelles et un courant égal à celui d'une seule cellule [9].

La caractéristique d'un groupement de n_s cellules PV identiques est présentée sur la figure (I.11).

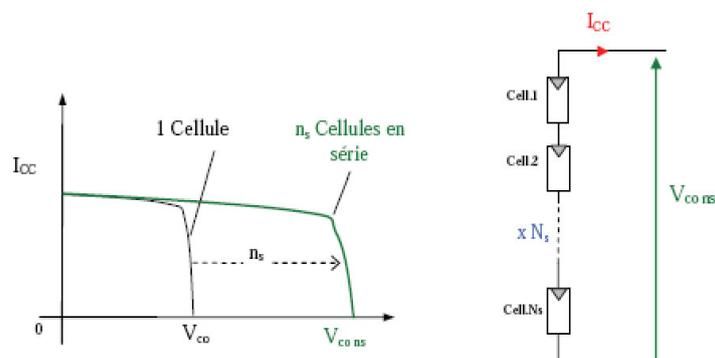


Figure I.11. Caractéristiques résultantes d'un groupement de cellules en série [4]

I.3.1.2 Regroupement des cellules en parallèle

Dans un groupement de cellules connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et un courant égal à la somme des courants individuels.

La caractéristique d'un groupement de n_s cellules PV identiques est présentée sur la figure (I.12).

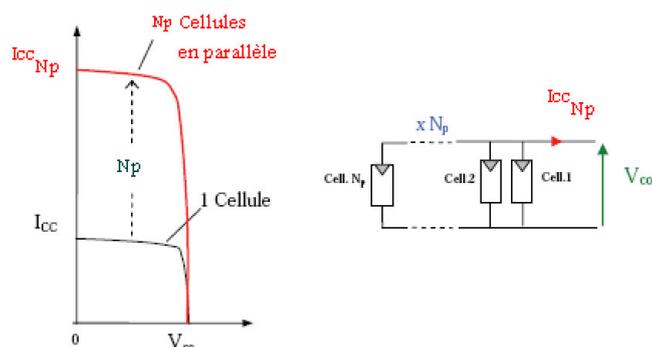


Figure I.12 : Caractéristiques d'un groupement de cellules en parallèle [4]

I.3.1.3 Regroupement des cellules (séries et parallèle)

Pour avoir une satisfaction en courant et en tension, on est obligé d'utiliser un groupement mixte, c'est à dire Série-Parallèle [9].

Chapitre I : Les Systèmes photovoltaïque

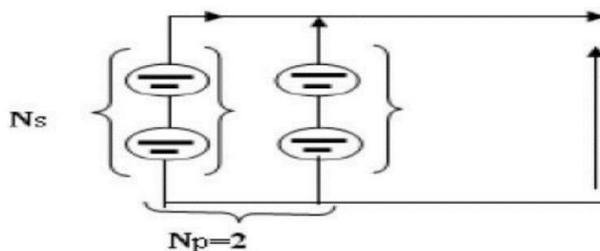


Figure I.13 : Association mixte des modules [9].

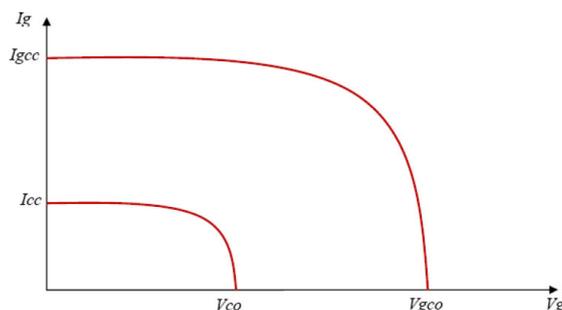


Figure I.14 : Caractéristique de nombre des modules mixte [9].

I.3.2 Protection classiques d'un générateur photovoltaïque

Tout choc électrique doit être évité aux cellules, qui sont des éléments fragiles.

En particulier, elles peuvent être détruites par un échauffement excessif par effet Joule si elles deviennent réceptrices de courant. Il y a deux types de protections sont classiquement utilisés dans les installations actuelles [9].

I.3.2.1 Les diodes séries (Diode anti retour)

Ces diodes, sont placées en série avec un module ou une branche de modules câblés en série afin d'empêcher tout courant électrique de retourner vers les modules. Pour les systèmes solaires connectés à une batterie, la diode de blocage empêche la circulation d'un courant inverse dans le sens batterie vers panneau durant la nuit. La chute de tension aux bornes de la diode dépend du type utilisé [9].

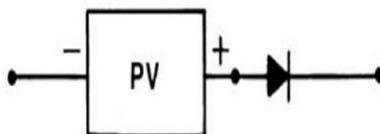


Figure I.15 : Diodes anti-retour [9].

I.3.2.2 Les diodes parallèles (Diode by-pass.)

Les diodes by-pass permettant de ne pas perdre la totalité de la chaîne et éviter les points chauds. La diode by-pass est appelée diode shunt car elle shunte les cellules correspondant à

Chapitre I : Les Systèmes photovoltaïque

la partie non éclairée les autres cellules continuent à produire l'énergie correspondant à la partie éclairée du module. En condition normale de fonctionnement les diodes shunt ne conduisent aucun courant [8].

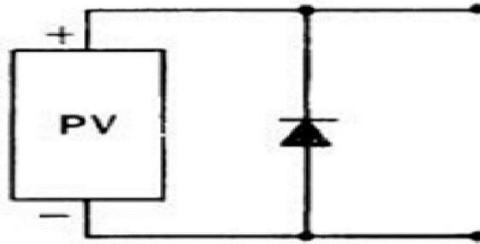


Figure I.16 : Diodes anti-retour et by-pass

I.4 Les systèmes photovoltaïques

Un système photovoltaïque se compose d'un champ de modules et d'un ensemble de composants qui adapte l'électricité produite par les modules aux spécifications des récepteurs. Cet ensemble, appelé aussi "Balance of System" ou BOS, comprend tous les équipements entre le champ de modules et la charge finale, à savoir la structure rigide (fixe ou mobile) pour poser les modules, les câblages, la batterie en cas de stockage et sont régulateur de charge, et l'onduleur lorsque les appareils fonctionnent en courant alternatif [4].

I.4.1 Classification d'un système solaire photovoltaïque

Les systèmes PV sont composés selon les exigences en trois types :

- Autonome
- Hybride
- Raccordée au réseau

I.4.1.1 Système autonome

Le rôle des systèmes autonomes est d'alimenter un ou plusieurs consommateurs situés dans une zone isolée du réseau électrique, Comme on le remarque sur la Figure II.1 qui représente l'exemple d'un système PV autonome, un système de stockage est associé aux Générateurs PV pour assurer l'alimentation à chaque instant et pendant plusieurs jours malgré l'intermittence de la production. Ce système de stockage représente une part très importante du Coût de l'installation, et ces conditions de fonctionnement sont très contraignantes. Par conséquent, des systèmes de gestion de l'énergie ont été développés afin d'optimiser l'adurée de vie du système de stockage et de réduire les coûts de fonctionnement.

Chapitre I : Les Systèmes photovoltaïque

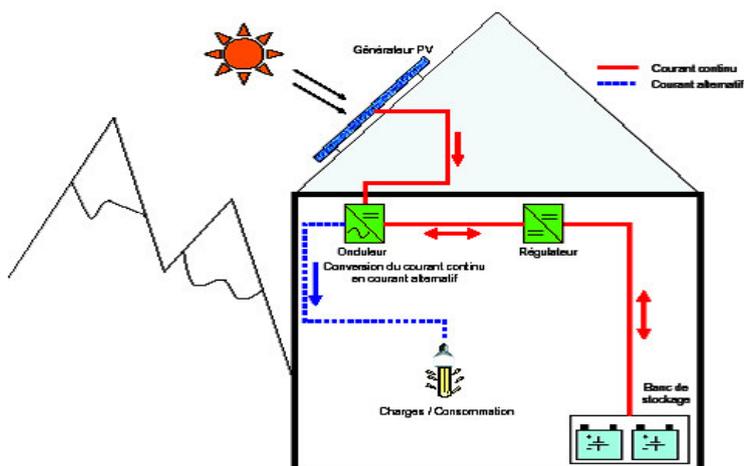


Figure I.17 : Exemple de la structure d'un système PV autonome.

I.4.1.2 Système PV raccordée au réseau

Une installation PV peut être connectée en parallèle avec le réseau d'électricité. Les panneaux solaires sont connectés en série pour former des « strings », eux même reliés à un onduleur. La tâche de l'onduleur est de transformer le courant continu sortant des panneaux en courant alternatif. Chaque onduleur est choisi en fonction de la puissance des panneaux et peut accueillir un ou plusieurs strings.

Si la consommation locale est supérieure à la production de l'installation PV, l'appoint est fourni par le réseau. Dans le cas contraire, l'énergie est fournie au réseau public et sert à alimenter les consommateurs [8].

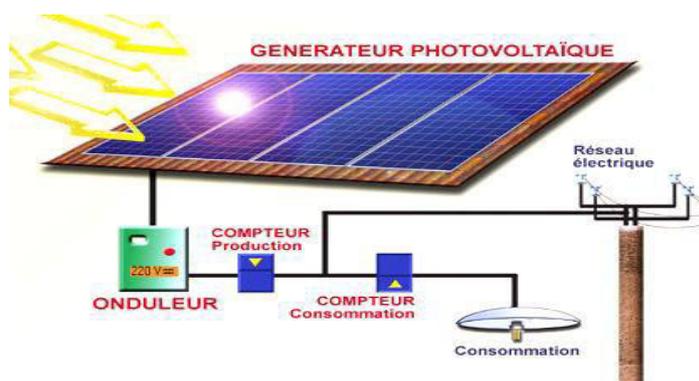


Figure I.18 : Système PV raccordée au réseau.

I.4.1.3 Système hybride

Les systèmes hybrides reçoivent une partie de leur énergie d'une ou plusieurs sources supplémentaires, qui sont également indépendants des réseaux de distribution d'électricité.

Chapitre I : Les Systèmes photovoltaïque

En pratique le générateur photovoltaïque est combiné à une éolienne ou à un groupe électrogène combustible, ou aux deux à la fois avec des accumulateurs de stockage de l'énergie. Un tel système s'avère un bon choix pour les applications qui nécessitent une alimentation continue d'une puissance assez élevée [8].

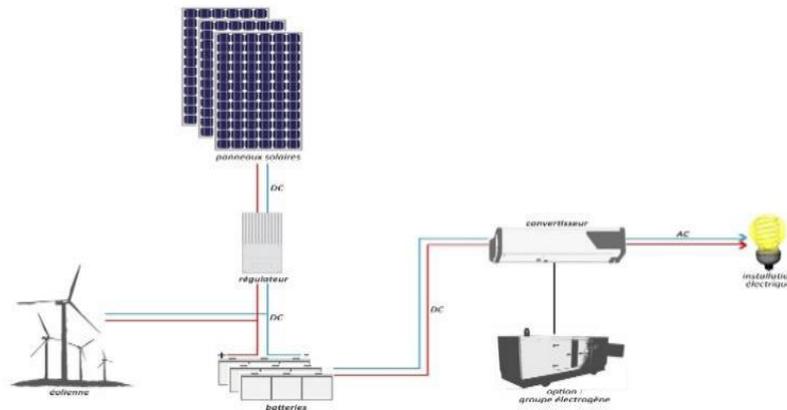


Figure II.19 : Système hybride.

I.4.2 Structure générale d'un système photovoltaïque

Il existe deux types de structures de système photovoltaïque :

I.4.2.1 Les systèmes à connexion directe au réseau :

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

I.4.2.2 Le système à bus continu intermédiaire :

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

Il existe plusieurs architectures pour les dispositifs permettant de convertir la tension continue issue du générateur photovoltaïque en une tension sinusoïdale utilisable [4].

I.4.3 Classifications des Centrales Photovoltaïques Connectées au Réseau

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

I.4.3.1 Centrales de petite taille ($P_w=1$ à 10 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.

Chapitre I : Les Systèmes photovoltaïque

I.4.3.2 Centrales de taille moyenne ($P_w=10$ à 100 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.

I.4.3.3 Centrales de grande taille ($P_w \geq 500$ KW)

Ce sont des systèmes centralisés et sont de la propriété de compagnies d'électricité. On peut également classer ces systèmes selon qu'ils soient munis de batteries de stockage Ou non [4].

CHAPITRE II

Les convertisseurs photovoltaïques Et filtre

Chapitre II : Les convertisseurs photovoltaïque et filtre

II.1 Les Convertisseurs photovoltaïques

Par convention, des systèmes de conversion photovoltaïques reliés au réseau se composent de convertisseur DC-DC et d'onduleur. Le convertisseur DC-DC est contrôlé pour la poursuite du point de puissance maximum du panneau photovoltaïque et l'onduleur est contrôlé pour produire le courant de telle manière que le courant de système ait une faible déformation totale d'harmonique et il ait en phase avec la tension de réseau. Cette partie décrit certain convertisseurs d'électronique de puissance et les techniques de commande et de conversion (DC-DC) [17].

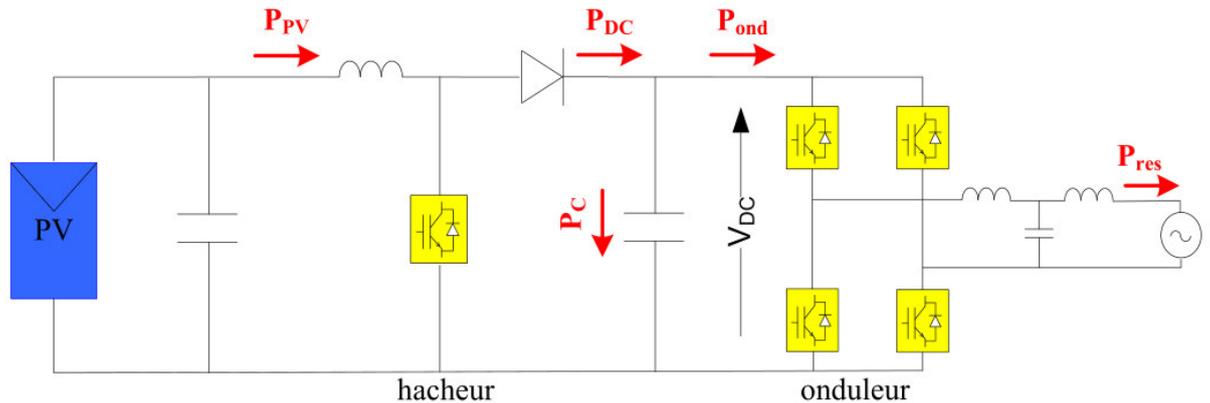


Figure II.1 : systèmes PV connecté au réseau [11].

II.2 Convertisseurs DC/AC

Un convertisseur (DC/AC) est un convertisseur statique qui permet la transformation de l'énergie de type continue, en une énergie alternative. la forme de la tension de la sortie de l'onduleur doit être plus proche d'une sinusoïde (l'allure sinusoïdale), c'est que le taux d'harmonique soit très faible, et ça dépend essentiellement à la technique de commande utilisée.

Les convertisseurs (DC/AC) se distinguent principalement par la nature de l'étage continu et par le nombre de phases de la source alternative. Si l'étage continu est vu comme étant une source de courant, les convertisseurs continu-alternatif associés sont des onduleurs de courant. Si l'étage continu est vu comme étant une source de tension, les convertisseurs continu-alternatif associés sont des onduleurs de tension.

Le plus souvent, on utilise deux ou trois phases. Ces convertisseurs (DC/AC) sont des convertisseurs directs, ils ne sont composés que d'interrupteurs semi-conducteurs, et la nature de la source continue impose la nature de la source alternative [9].

Il y a une autre classification des onduleurs qui se différencie selon la nature de la fréquence de sortie, soit fixe ou soit variable [1].

Chapitre II : Les convertisseurs photovoltaïque et filtre

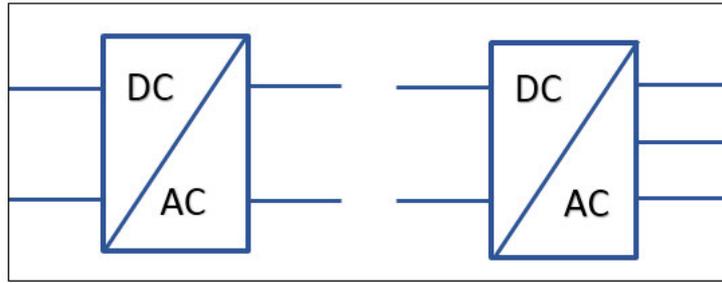


Figure II.2 : Symbole de convertisseur DC-AC monophasé et triphasé.

II.2.1 Les onduleurs photovoltaïques

Un onduleur est un composant électronique qui permet de transformer l'électricité Continue provenant d'un module photovoltaïque en électricité alternative pouvant être transmise au réseau électrique. Il est constitué d'un chercheur du Point de Puissance Maximum (MPPT : Maximum Point Puissance Tracker) qui recherche le point de fonctionnement optimal provenant des modules, d'un pont qui permet de transformer l'électricité continue en électricité alternative et d'un transformateur qui permet d'imposer une fréquence prédéfinie (50 Hz ou 60 Hz). Le schéma fonctionnel de l'onduleur est représenté en Figure II.3 [12]

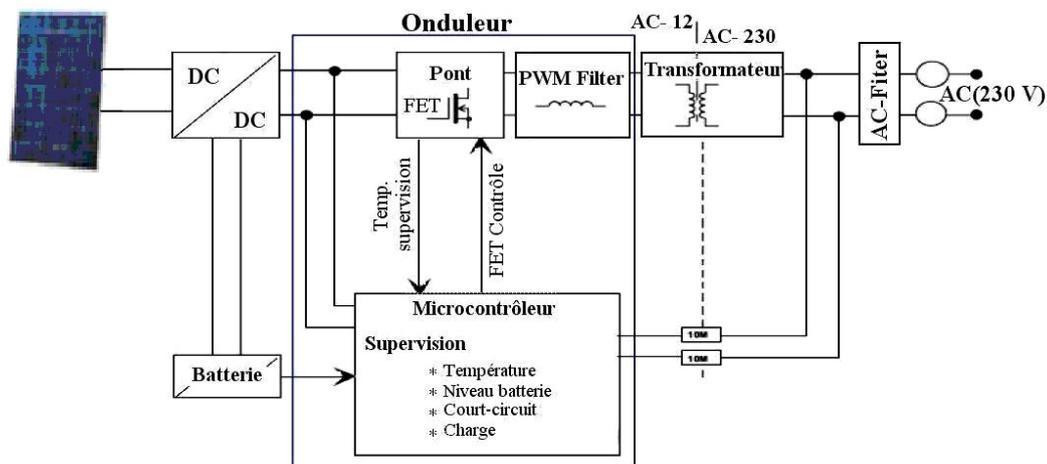


Figure II.3: Schéma fonctionnel de l'onduleur photovoltaïque [13].

L'isolement galvanique de l'onduleur connecté au réseau dépend des normes en vigueur dans chaque pays. Par exemple aux USA, l'isolement galvanique est toujours exigé. Pour l'isolement galvanique, on utilise un transformateur de BF ou HF. Cette dernière solution est plus compacte, mais il faut faire attention à la conception des transformateurs afin de minimiser les pertes (les pertes du système dépendront aussi du transformateur). C'est pourquoi l'onduleur sans transformateur a toujours le rendement le plus élevé [11]. Différents types d'onduleur PV sont présentés dans la Figure II.4.

Chapitre II : Les convertisseurs photovoltaïque et filtre

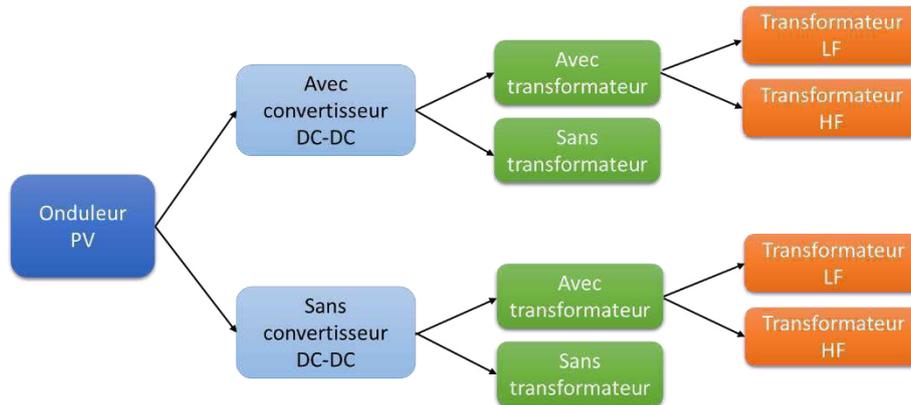


Figure II.4 : Classement des onduleurs photovoltaïque.

Il existe deux types d'onduleurs : monophasé et triphasé connecté au réseau comme indiqué sur la Figure II.5.

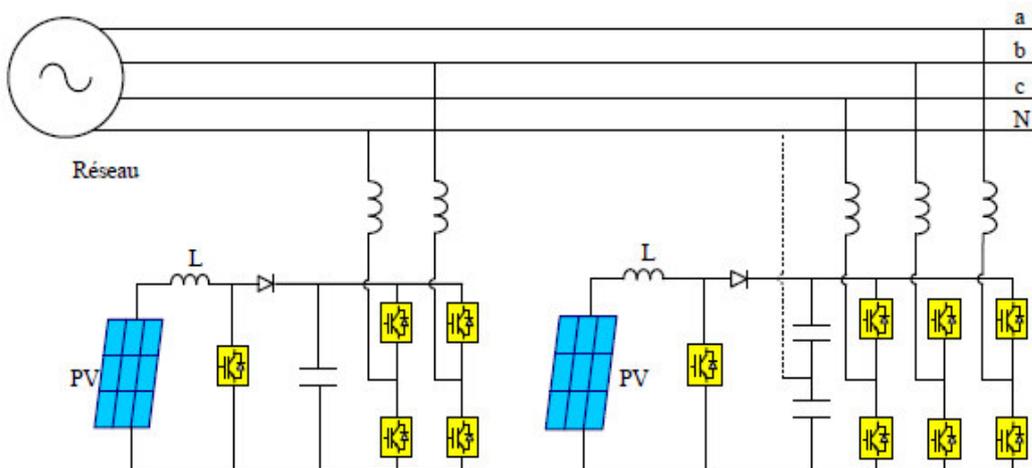


Figure II.5 : Onduleurs monophasé et triphasé connectés au réseau [11].

II.2.3 Commande de l'onduleur photovoltaïque connecté au réseau.

Le système de production d'énergie est connecté au réseau via un onduleur et un filtre. Le rôle d'onduleur est de maintenir la tension du bus continu constante quel que soit l'amplitude et le sens de la puissance, en générant le courant du condensateur nécessaire notamment dans la phase de démarrage par le contrôle des courants transités par le réseau via le filtre [23].

L'objectif de la commande est de générer les ordres d'ouverture et de fermeture des interrupteurs de sorte que la tension créée par l'onduleur soit la plus proche de la tension de référence [4].

Pour obtenir une forme d'onde image de la référence on doit faire face au choix de la commande rapprochée :

Chapitre II : Les convertisseurs photovoltaïque et filtre

II.2.3.1 Commande par hystérésis

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

En pratique, c'est la technique schématisée sur la Figure II.6 que l'on utilise. La différence entre le courant de référence et celui mesuré est appliquée à l'entrée d'un comparateur à hystérésis dont la sortie fournit directement l'ordre de commande des interrupteurs du bras correspondant de l'onduleur [4] :

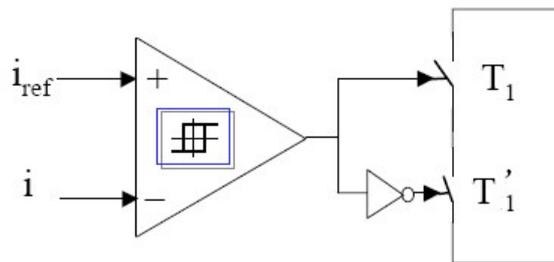


Figure II.6 : Contrôle de courant par hystérésis [4]

II.2.3.2 La commande vectorielle

La modulation de largeur d'impulsion vectorielle utilise un algorithme numérique afin d'obtenir une séquence de commande des interrupteurs de l'onduleur permettant de générer un vecteur tension de sortie qui s'approche le mieux possible du vecteur tension de référence [1].

I.2.3.3 Commande par MLI

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. Le schéma de principe de cette méthode est donné sur la Figure II.7 [4] :

Chapitre II : Les convertisseurs photovoltaïque et filtre

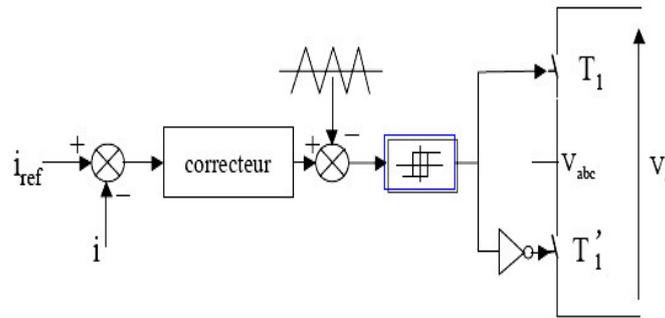


Figure II.7 : Contrôle de courant par MLI [4]

L'utilisation de la modulation de largeur d'impulsion permet d'éliminer les premiers rangs d'harmoniques de courant afin d'améliorer le facteur de puissance. Cependant, cette technique ne résout pas totalement le problème des harmoniques de courant [9].

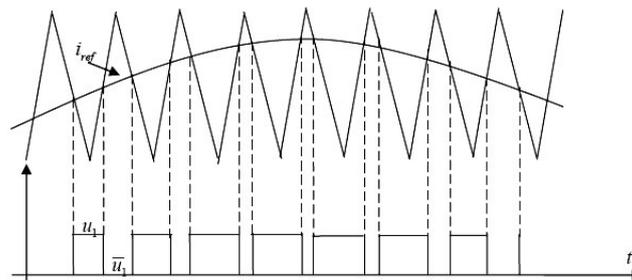


Figure II.8 : Principe de la Commande MLI [9].

II.2.4 PLL (Phase Lock Loop)

Afin de connecter des sources au réseau électrique, il faut synchroniser la tension du générateur de production avec celle du réseau, c'est pourquoi l'information de phase et de fréquence de la tension du réseau est nécessaire [22].

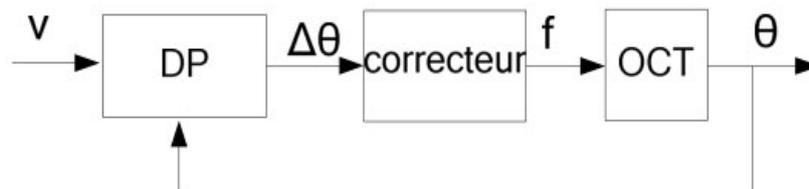


Figure II.9 : Structure de principe d'une PLL [22].

II.2.5 Technologies des onduleurs couplés au réseau

L'onduleur couplé au réseau est utilisé pour les installations photovoltaïques. Il permet de transformer le courant continu, produit par les modules solaires, en un courant ondulé conforme à celui du réseau. Il adapte également le courant produit à la fréquence et à la tension du réseau.

Chapitre II : Les convertisseurs photovoltaïque et filtre

Dans les installations d'habitation, le courant solaire produit est d'abord utilisé par l'habitation elle-même, si le courant produit pour l'habitation est excédentaire, l'excédent est injecté dans le réseau.

L'installation d'un onduleur couplé au réseau électrique se fait avec l'accord de l'organisme de distributeur de d'énergie électrique. Pour des raisons de sécurité, un onduleur couplé au réseau doit constamment surveiller ces perturbations et interrompre immédiatement l'injection en cas de défaillance ou de coupure. Ceci est absolument nécessaire pour permettre une intervention sans danger sur le réseau [4].

II.2.5.1 Onduleur central

Cette architecture est la plus classique et la plus ancienne. Un seul onduleur est utilisé et réalise la conversion de la puissance DC totale en puissance AC totale injectée sur le réseau. Cette architecture est peu coûteuse et simple à surveiller. Elle permet également une maintenance simple et rapide. L'inconvénient réside dans le fait qu'il y a un seul MPPT pour tout l'ensemble du champ, ce qui limite l'extraction optimale de la puissance du champ, car il peut exister des différences de caractéristiques en charge sur chaque string, liées à l'ombrage, au vieillissement du matériel, etc...

Le type de montage de la figure II.10 a présente plusieurs défauts:

- Pertes de conversion solaire (un seul MPPT pour un ensemble de modules).
- Pertes et risques électriques dans le câblage DC.
- Aucune évolutivité.
- Aucune continuité de service en cas de panne de l'onduleur.

Malgré les nombreux défauts de cette configuration, cette solution reste très employée dans les centrales PV au sol de forte puissance [14].

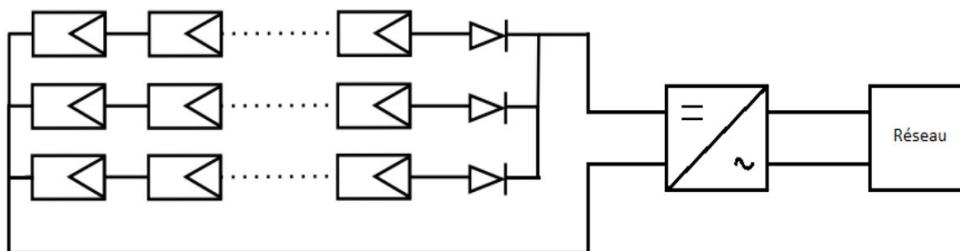


Figure II.10 : Topologie onduleur central raccordée au réseau [14].

II.2.5.2 Onduleur string

Dans cette architecture, un onduleur est placé au bout de chaque chaîne ce qui a pour but d'augmenter le nombre de convertisseur DC/DC qui amène à la possibilité d'extraction du maximum de puissance. La panne d'un onduleur n'engendre pas l'arrêt total du système. L'autre avantage est que cette structure est évolutive dans le sens où chaque string est indépendant. Une comparaison de la structure onduleur string et onduleur central, a permis de montrer la similarité de ces deux structures aux niveaux des pertes. L'énergie perdue compte 10% de l'énergie totale produite. Dans le cas d'un ombrage du système PV, la structure

Chapitre II : Les convertisseurs photovoltaïque et filtre

onduleur central produit 12% de moins d'énergie que la structure onduleur string. En conclusion, l'étude a montré que l'onduleur string a un rendement global plus élevé, prenant en compte les pertes ainsi que le nombre de jours ensoleillés et ombragés. L'ombrage est un paramètre majeur dans la performance de la structure PV [14].

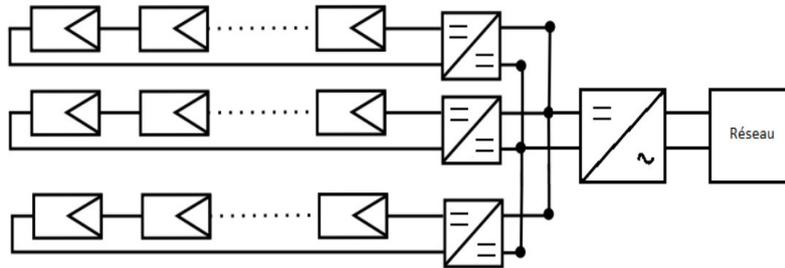


Figure II.11: Topologie onduleur string raccordée au réseau [14].

II.2.5.3 Onduleur multi-string

Cette architecture utilise un seul onduleur, tout en ayant un MPPT par string, en utilisant un hacheur ce qui réduit le nombre d'interactions entre le réseau et le système PV. L'intérêt principal est de réduire le coût par rapport à l'architecture précédente puisque l'hacheur n'a pas besoin d'intégrer des fonctionnalités de mesure et de surveillance des données électriques du réseau.

Le coût peut être réduit aussi par le fait que l'hacheur n'intègre pas le contrôle commande de la partie alternative, ni la détection du courant continu résiduel sur le réseau. En cas de panne de l'onduleur par contre, la continuité du service n'est plus assurée [14].

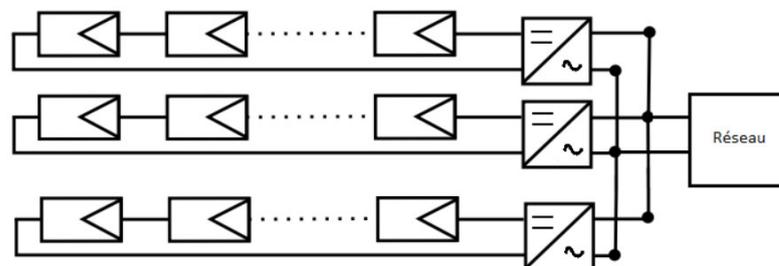


Figure II.12 : Topologie onduleur multi-string raccordée au réseau

II.3 Convertisseurs DC/DC

Pour la conversion de puissance, il est essentiel que le rendement soit maintenu élevé pour éviter la dissipation de la puissance et pour éviter les échauffements excessifs dans les composants électroniques. Pour cette raison toute la conversion de puissance échangée doit être réalisée autour des composants de stockage d'énergie (inductance et condensateurs) et les commutateurs. Les commutateurs de puissance utilisés dépendent du niveau de la puissance à convertir ou à commander.

Les MOSFETS (transistors à effet de champ d'oxyde de métal) sont habituellement utilisés à la puissance relativement basse (quelques kW) et les IGBTs (transistors bipolaires à gâchette isolée) à des puissances plus élevées. Les thyristors ont été généralement utilisés et acceptés dans les plus hauts niveaux de puissance. D'un point de vue circuit, le hacheur

Chapitre II : Les convertisseurs photovoltaïque et filtre

apparaît comme un quadripôle (figure II.13), jouant le rôle d'organe de liaison entre deux parties d'un réseau. On peut le considérer comme un transformateur de grandeurs électriques continues [17].

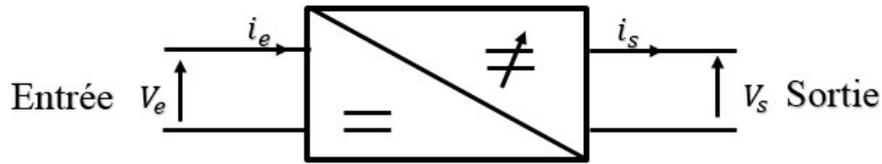


Figure II.13 : Schéma d'un quadripôle électrique [17].

Le hacheur se compose de condensateurs, d'inductances et de commutateurs. Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, c'est la raison pour laquelle on a de bons rendements dans les hacheurs. Le commutateur est un dispositif semi-conducteur en mode (bloqué -saturé), si le dispositif semi-conducteur est bloqué, son courant est zéro et par conséquent sa dissipation de puissance est nulle. Si le dispositif est dans l'état saturé, la chute de tension à ses bornes sera presque zéro et par conséquent la puissance perdue sera très petite. Pendant le fonctionnement de le hacheur, le transistor sera commuté à une fréquence constante f_s avec un temps de fermeture = $d.T_s$ et un temps d'ouverture = $(1 - d).T_s$ [17].

Où :

- T_s est la période de commutation qui est égale à $1/f_s$.
- d le rapport cyclique du commutateur ($d \in [0, 1]$) figure II.14.

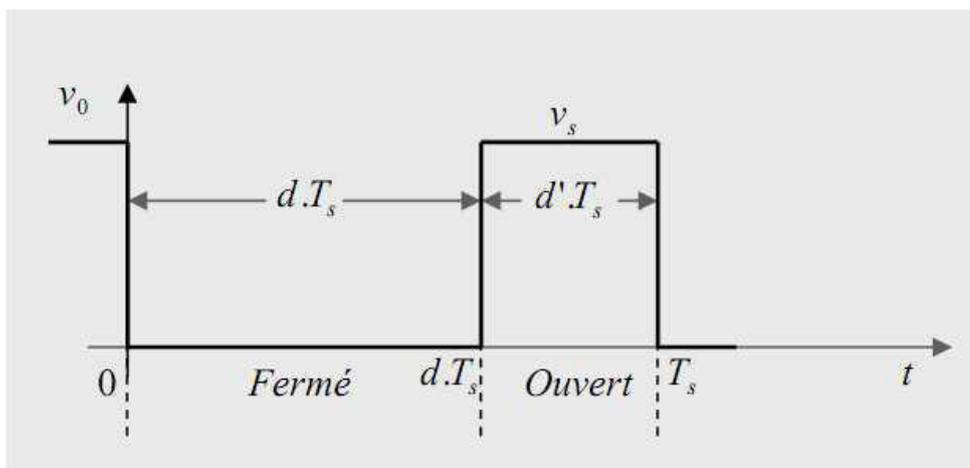


Figure II.14 : Périodes fermeture et ouverture d'un commutateur [17].

II.3.1 Topologies de conversion (DC - DC) :

Trois topologies de base de circuit de conversion (DC-DC) seront décrites dans les paragraphes suivants :

Chapitre II : Les convertisseurs photovoltaïque et filtre

II.3.1.1 Le hacheur dévolteur (Buck)

Le hacheur dévolteur, sous sa forme de base est présenté par la (Figure II.15). On considère l'interrupteur I et la diode D parfaits.

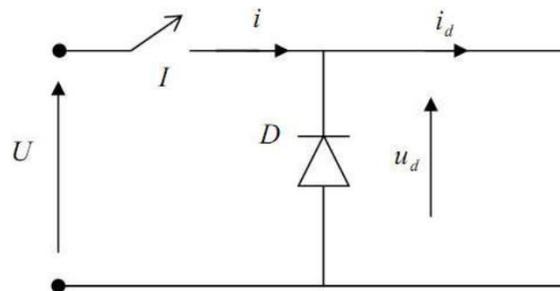


Figure II.15 : Hacheur série (buck).

II.3.1.2 Hacheur parallèle (Boost)

Le hacheur boost est aussi appelé hacheur survolteur. Ce montage permet de fournir une tension moyenne U_{d0} à partir d'une source de tension continue $U > U_{d0}$. Le montage étudié est donné à la figure II.16 [17].

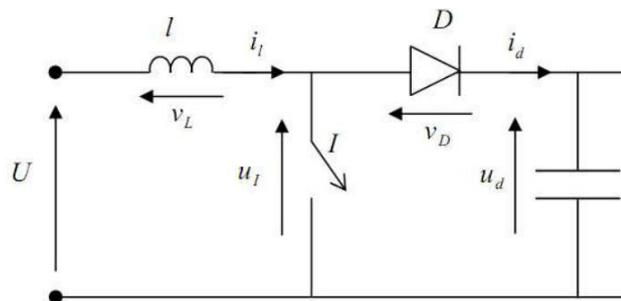


Figure II.16: Hacheur parallèle [17].

On distingue deux phases de fonctionnement [17] :

- 1- lorsque l'interrupteur I est fermé, la diode est polarisée en inverse $V_D = u_d$; la charge est donc isolée de la source. La source fournit de l'énergie à l'inductance L .
- 2- lorsque l'interrupteur I est ouvert, l'étage de sortie (C) reçoit de l'énergie de la source et de l'inductance L .

II.3.1.3 Hacheur Cùk

Le montage étudié est donné à la (figure II.17). Contrairement aux autres convertisseurs le hacheur Cùk utilise la capacité comme une moyenne de transfert d'énergie, donc l'analyse est basée sur l'équilibre de courant du condensateur.

La tension de sortie peut être inférieure au supérieure à la tension d'entrée car la topologie du convertisseur Cùk est une topologie en cascade de deux convertisseur un buck et un boost.

Chapitre II : Les convertisseurs photovoltaïque et filtre

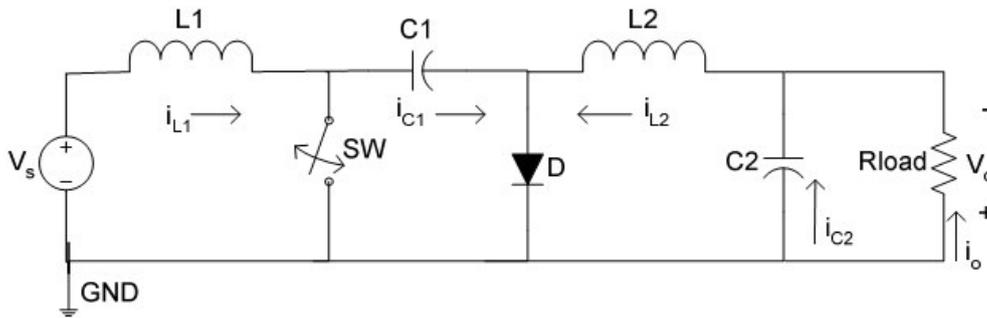


Figure II.17 : Hacheur Cùk.

II.3.2 La commande (MPPT)

Un MPPT, (Maximum Power Point Tracker) est un principe permettant de suivre, comme son nom l'indique, le point de puissance maximale d'un générateur électrique non linéaire. Les systèmes MPPT sont généralement associés avec les générateurs photovoltaïques. La poursuite du point maximum de la puissance (MPPT) est une partie essentielle dans les systèmes photovoltaïques. Plusieurs techniques sont développées depuis 1968 date de publication de la première loi de commande de ce type adaptées à une source d'énergie renouvelable de type PV. Ces techniques se différencient entre elles par leur complexité, nombre de capteurs requis, la vitesse de convergence, coût, rendement et domaine d'application.

Par définition, une commande MPPT, associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un générateur PV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quels que soient les conditions météorologiques (température et l'éclairement) [9].

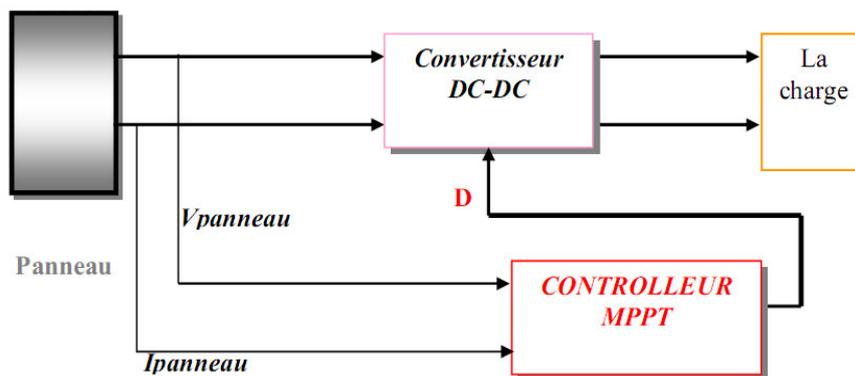


Figure II.18 : Chaîne de conversion photovoltaïque avec convertisseur (DC-DC) contrôlé par une commande (PPM) sur charge DC [17].

II.4 Les filtres

Les onduleurs ne peuvent pas être directement connectés au réseau c'est à cause des harmoniques qui dégradent la qualité de l'énergie. Il existe différentes normes qui limitent les harmoniques pouvant être injectés dans le réseau. Les transformateurs sont coûteux et

Chapitre II : Les convertisseurs photovoltaïque et filtre

encombrant, ce qui rend le système coûteux. Une autre solution en utilisant un circuit de filtrage comme interface. Il existe trois types de filtres passifs généralement utilisés [16].

II.4.1 Topologie de filtre

Le filtre de sortie de l'onduleur réduit les harmoniques, Il existe plusieurs types de filtres.

La topologie la plus simple c'est le filtre inductif (Filtre L) connecté à la sortie de l'onduleur. Il y a des autres topologies comme le LC ou LCL peuvent être utilisées [26].

Ces topologies possibles sont illustrées à la Figure II.19.

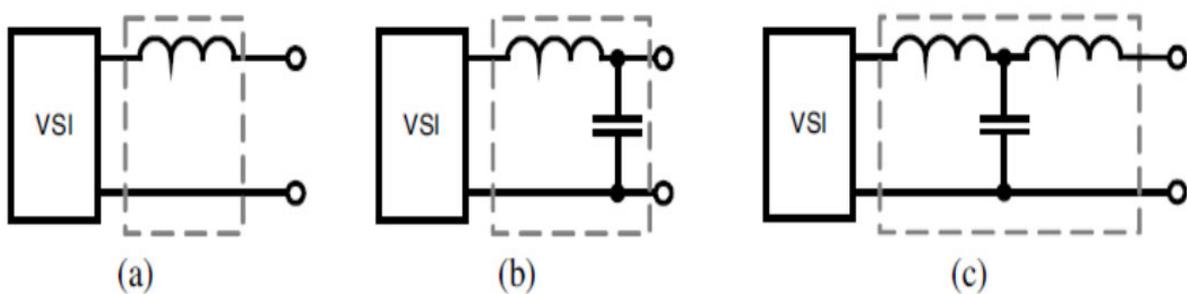


Figure II. 19 : Topologies de filtres de base [19].

II.4.1.1 Filtre L

Le filtre L (Figure II. 19.a) 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 fréquence de commutation élevée, où l'atténuation est succincte. De l'autre côté, l'inductance diminue considérablement la dynamique de l'ensemble du convertisseur filtre du système.

II.4.1.2 Filtre LC

Le filtre LC est représenté sur la figure II. 19.b. C'est deuxième ordre filtre et il a de meilleurs comportements d'amortissement que L-filtre. Cela configuration simple est facile à concevoir et fonctionne sans problème.

Le filtre de second ordre fournit 12 dB par oct avec d'atténuation après la fréquence de coupure, il n'a aucun gain avant la fréquence de coupure, mais elle présente un pic à la résonance la fréquence. La fonction de transfert du filtre LC est:

$$F(S) = \frac{1}{1 + L_f S + L_f C_f S^2}$$

II.4.1.3 Filtre LCL

Le filtre LCL est un de filtre passe-bas (figure II. 19.c) qui garantit le couplage entre les différentes sources et une bonne atténuation pour les fréquences supérieures à la fréquence de coupure pour cela il est le choix d'équation pour notre système. L'atténuation du filtre LCL

Chapitre II : Les convertisseurs photovoltaïque et filtre

est 60 dB/décade pour les fréquences supérieures à la fréquence de coupure pour cela une fréquence de commutation de valeur inférieure peut être appliquée.

Il garantit aussi un meilleur découplage entre l'impédance du réseau et les perturbations du courant à travers l'inductance du réseau. Donc c'est le filtre convenable pour notre application. Néanmoins le filtre LCL peut entraîner le phénomène de résonance dans notre cas indésirable, il faut donc choisir les bonnes valeurs des composants du filtre [10].

Schéma fonctionnel de l'onduleur connecté au réseau l'utilisation de ce filtre LCL est illustrée à la Figure II.20.

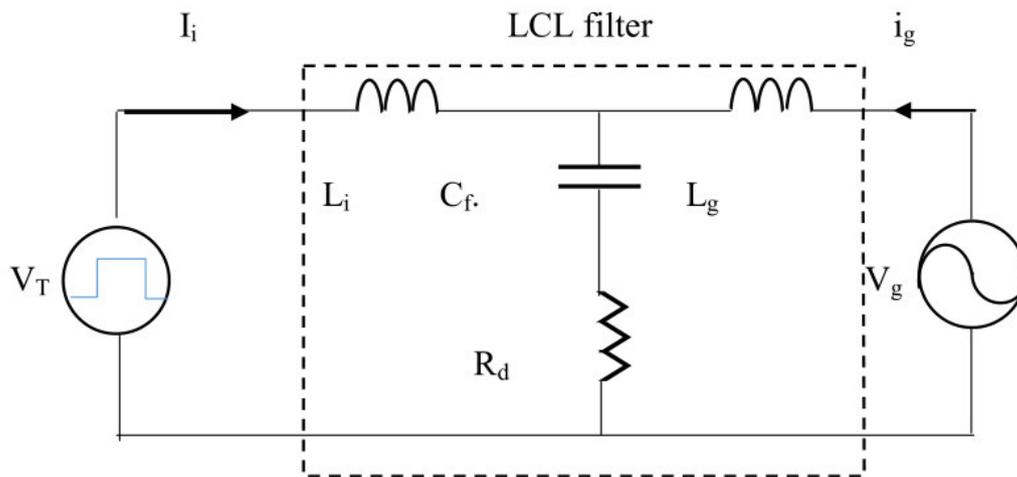


Figure II.20 : Le filtre LCL avec résistance d'amortissement [26].

CHAPITRE III

Dimensionnements Et simulation

Chapitre III : Dimensionnement Et Simulation

III.1 Dimensionnement

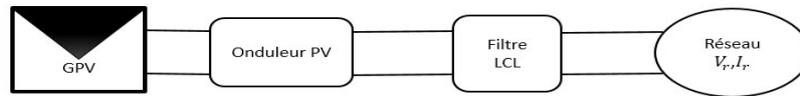


Figure III.1 : Schéma synoptique de l'onduleur photovoltaïque avec le filtre LCL connecté au réseau électrique.

III.1.1 Le panneau photovoltaïque

Le bloc photovoltaïque disponible dans Simulink (PV Array) a été initialisé comme indiqué à la figure III.2.

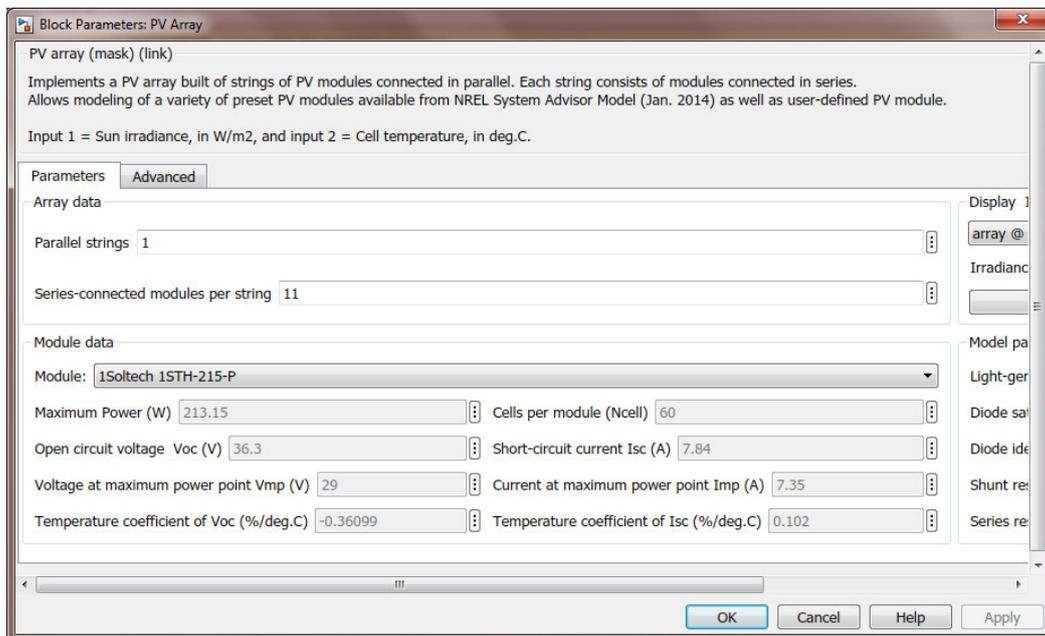


Figure III.2 : Description du panneau photovoltaïque dans Simulink.

Le modèle de panneaux solaires (11 panneaux attachés en série) ci-dessous représenté dans la figure III.1 où chacun produit une puissance de 213.15 w et une tension max de 29 V ainsi qu'un courant max de 7.35 A.

Le système constitué de 11 panneaux solaires connectés en série, produit une puissance de 2.34 kW, et une tension de circuit ouvert de 399.3 V avec un courant de court-circuit de 7,84 A. Cette tension maximale de point d'alimentation étant produite avec un taux d'éclairement évalué à $1000 \text{ W} / \text{m}^2$ et une température de 25 C° .

Les courbes ($I(V)$ et $P(V)$) à différentes températures et éclairements, sont montrées dans les figures III.3 et III.4 respectivement.

Chapitre III : Dimensionnement Et Simulation

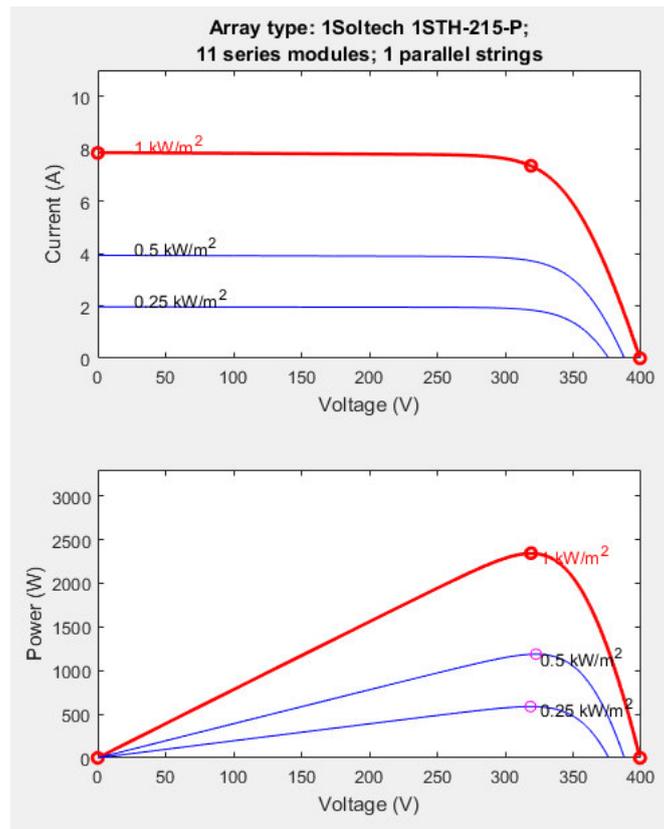


Figure III.3 Panneaux photovoltaïque à différentes températures avec éclairement de 1000 W/m^2

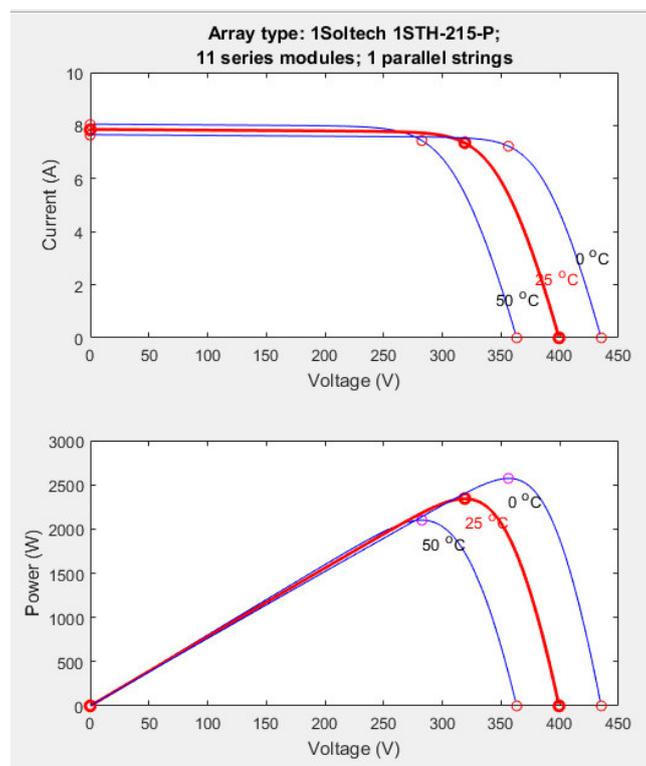


Figure III.4 : Panneaux photovoltaïque à différents éclairements avec une température de 25°C .

Chapitre III : Dimensionnement Et Simulation

III.1.2 Puissance de découplage

Le découplage de puissance est généralement réalisable au moyen d'un condensateur. Le condensateur est soit placé en parallèle avec les modules PV, soit entre les étages de l'onduleur et le convertisseur

La taille du condensateur de découplage peut être exprimée par l'équation [15].

$$C = \frac{P_{PV}}{2 \omega_n V_C \Delta V_C} \quad (III.1)$$

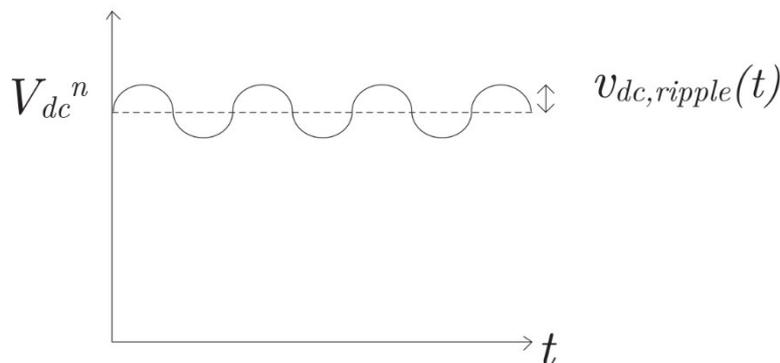


Figure III.5 : Forme d'onde de tension [25].

On obtient : $C = 237 \mu F$, avec :

P_{PV} : La puissance nominale de panneaux = $2.34 kW$.

ω_n : La fréquence de réseau = $50 Hz$.

V_C : La tension moyenne aux bornes du condensateur = $399.3 V$.

ΔV_C : L'amplitude de l'ondulation de la tension : $10 \% V_C = 39.39 V$.

III.1.3 Model du réseau

Le réseau est modélisé comme une source de tension monophasée avec une tension efficace de 220V. Une charge de 1550 W (puissance active) et d'autre charge de 311 Var (puissance réactive) est connectée au réseau comme indiqué sur la figure III.

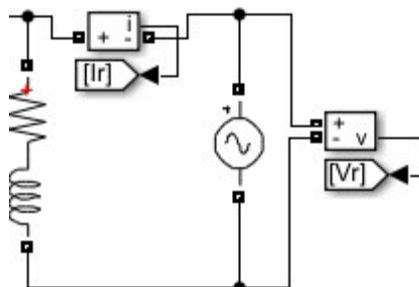


Figure III.6 : Modèle de réseau.

Chapitre III : Dimensionnement Et Simulation

III.1.4 Dimensionnements de filtre LCL

Le filtre LCL est utilisé pour interconnecter l'onduleur au réseau. Comme l'onduleur est basé sur des composants de commutations et des signaux de déclenchement sous forme d'impulsions, Le courant de sortie peut contenir des perturbations d'harmoniques importantes avec tendance à réduire la qualité de l'énergie [16].

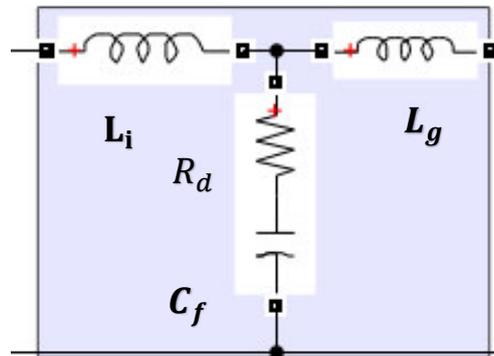


Figure III.7 : Schéma de filtre LCL avec la résistance d'amortissement.

La première étape du calcul des composants du filtre est la conception de l'inductance côté onduleur L_i , qui peut limiter l'ondulation du courant de sortie jusqu'à 10% de l'amplitude nominale :

$$L_i = \frac{V_{DC}}{8 \Delta I_{max} f_S} \quad (III.2)$$

Où ΔI_{max} est l'ondulation actuelle de 10% spécifiée [28].

$$\Delta I_{max} = 0.1 \frac{\sqrt{2} P_n}{V_r} \quad (III.3)$$

L'inductance du côté réseau L_g , est déterminée par la valeur acceptable d'ondulation de commutation dans le réseau [29] :

$$r = \frac{L_i}{L_g} \quad (III.4)$$

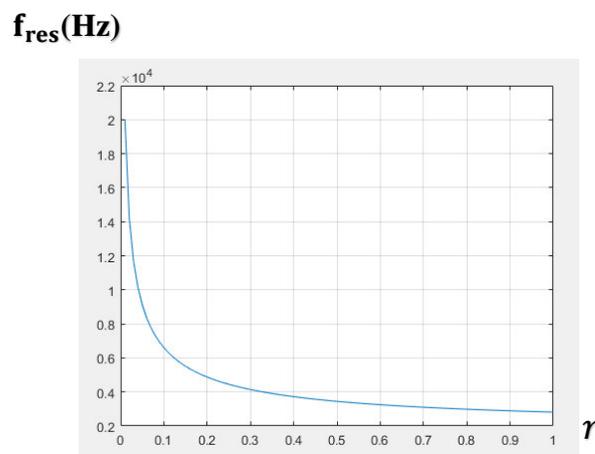


Figure III.8 : Fréquence de résonance du filtre en fonction de rapport de l'inductance.

Chapitre III : Dimensionnement Et Simulation

La conception de la capacité de filtrage découle du fait que la variation maximale du facteur de puissance acceptable par le réseau est de 5%. La capacité du filtre peut donc être calculée comme une multiplication de la capacité de base du système C_b [16-27] :

$$C_f = 0.05 \times C_b \quad (\text{III.5})$$

La capacité de base C_b se calcule à l'aide de la formule suivante :

$$C_b = \frac{P_n}{\omega_n V_f^2} \quad (\text{III.6})$$

La dernière étape de la conception est le contrôle de la fréquence de résonance du filtre. La fréquence de résonance doit être éloignée de la fréquence du réseau et doit être au minimum égal à la moitié de la fréquence de commutation, car le filtre doit avoir une atténuation suffisante de la fréquence de découpage du convertisseur [28]. La fréquence de résonance du filtre LCL peut être calculée comme suit :

$$f_{\text{res}} = \sqrt{\frac{L_i + L_g}{L_i L_g C_f}} \quad (\text{III.7})$$

La plage de fréquences de résonance du filtre LCL doit satisfaire à la condition de l'équation (III.8)

$$10 f_r \leq f_{\text{res}} \leq f_s \quad (\text{III.8})$$

Afin de réduire les oscillations et les états instables du filtre, il convient d'ajouter le condensateur avec une résistance connectée en série. Cette solution est parfois appelée « amortissement passif ». C'est simple et fiable, mais l'inconvénient c'est elle va augmenter les pertes de chaleur dans le système et cela diminue considérablement l'efficacité du filtre [28]. La valeur de la résistance d'amortissement peut être calculée comme suit :

$$R_d = 0.1 \frac{1}{3 \omega_{\text{res}} C_f} \quad (\text{III.9})$$

Avec :

P_n la puissance nominale (la puissance de sortie de l'onduleur) 2.35 kW

V_f la tension efficace monophasée du réseau 220 V

f_s la fréquence de commutation du l'onduleur 40 kHz

Chapitre III : Dimensionnement Et Simulation

f_r la fréquence de réseau 50 Hz

ω_n la Pulsation de réseau 314,2 rad/s

V_{DC} la source de tension continue (la tension d'entrée de l'onduleur) 400V

Après les calculs nous obtenons les résultats suivants:

$$\begin{aligned} \Delta I_{max} &= 1.5072 \text{ A} & L_i &= 0.83 \text{ mH} & C_b &= 154.2 \mu\text{F} & C_f &= 7.71 \mu\text{F} \\ L_g &= 0.265 \text{ mH} & f_{res} &= 4.04 \text{ kHz} & R_d &= 2.49 \Omega \end{aligned}$$

III.1.5 Réponse fréquentielle du filtre LCL

L'expression de la fonction de transfert du Filtre LCL est donnée par la relation :

$$H_{LCL} = \frac{I_r}{V_i} \quad (\text{III.10})$$

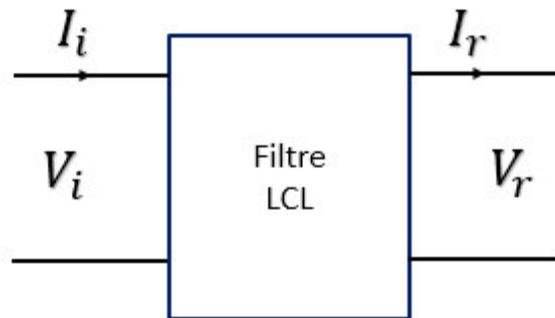


Figure III.9 : Modèle en quadripôle du filtre LC

Avec : V_i est la tension de sortie de l'onduleur.

I_r : Le courant de réseau.

Où la tension de réseau est supposée être une tension idéale source capable de décharger toutes les fréquences harmoniques. Si on définit $V_r = 0$. Conditions pour les onduleurs à commande de courant, La fonction de transfert du filtre LCL (en négligeant la résistance d'amortissement) est :

$$H_{LCL}(S) = \frac{1}{L_i L_g C_f S^3 + (L_i + L_g)S} \quad (\text{III.11})$$

Et avec quelques manipulations algébriques simples, la fonction de transfert avec la résistance d'amortissement devient [26]:

$$H_{LCL,d}(S) = \frac{C_f R_d S + 1}{L_i L_g C_f S^3 + C_f (L_i + L_g) R_d S^2 + (L_i + L_g)S} \quad (\text{III.12})$$

Chapitre III : Dimensionnement Et Simulation

III.1.5.1 Diagramme de Bode

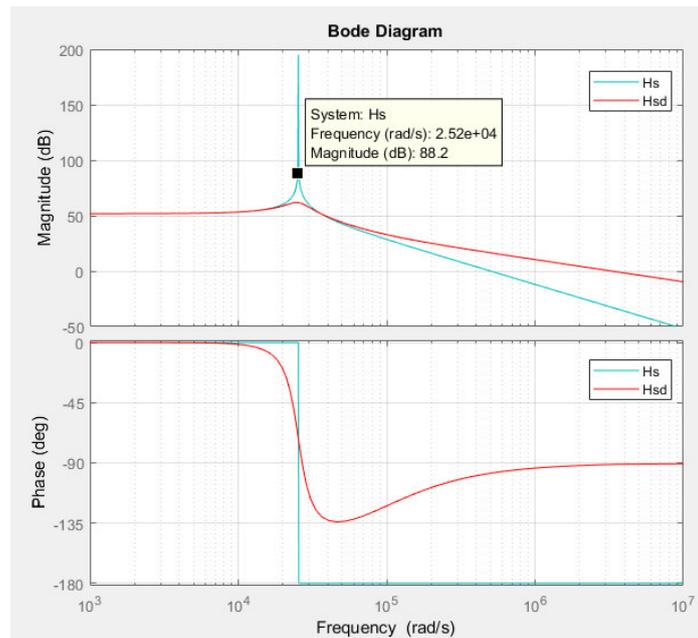


Figure III.10 : Diagramme de bode de filtre LCL

Commentaire

On remarque sur le graphe que le pic a diminué après l'ajout de la résistance R_d et noter également aussi que la fréquence de résonance est vérifiée cela après le calcul on utilisant la relation (III.7).

On à : $\omega_{res} = 2 \pi f_{res}$, Donc : $\omega_{res} = 2.53 \times 10^4$ rad/s

La figure en rouge représente le filtre LCL après l'ajoute de la résistance R_d , et en bleu représente le filtre LCL avant l'ajoute de la résistance R_d .

III.1.5.2 Diagramme de bode pour différentes R_d

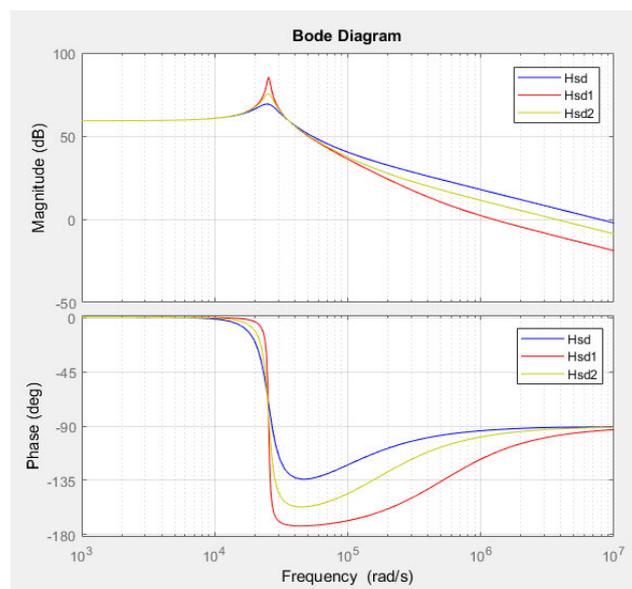


Figure III.11 : Diagramme de bode pour différentes R_d

Chapitre III : Dimensionnement Et Simulation

Après avoir observé les graphes on remarque que le pic prend différentes positions, et ça dépend de la valeur de la résistance R_d , La courbe bleu est le meilleur résultat et correspond à la valeur optimale de résistance de 1.7Ω calculée à l'aide de l'équation (III.9), La courbe en rouge correspond à la résistance de 0.25Ω , et la courbe jaune à la résistance de 0.8Ω . Nous avons choisi ces deux dernières valeurs aléatoirement.

III.2 Simulation de l'onduleur avec le filtre LCL

Cette partie montre le rôle du filtre LCL et de ses composants dans la réduction des harmoniques. Nous allons mesurer les tensions pour différentes parties du filtre.

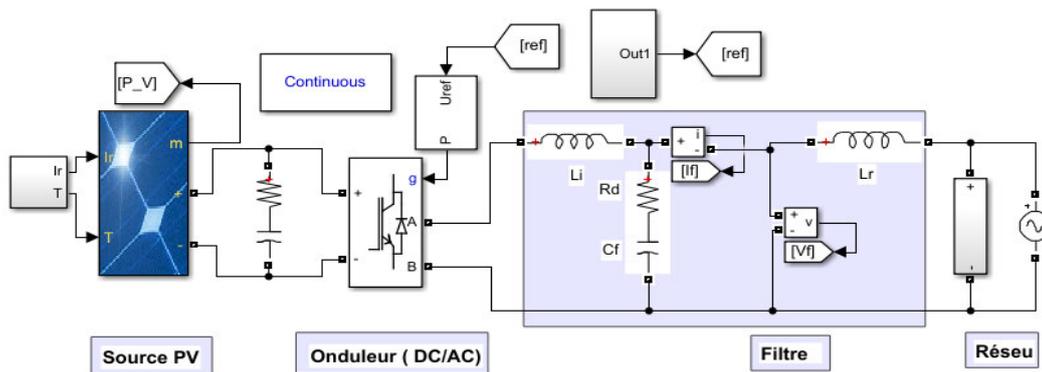


Figure III.12: Simulation de l'onduleur photovoltaïque avec le filtre LCL connecté au réseau électrique.

III.2.1 Avant l'inductance L_i

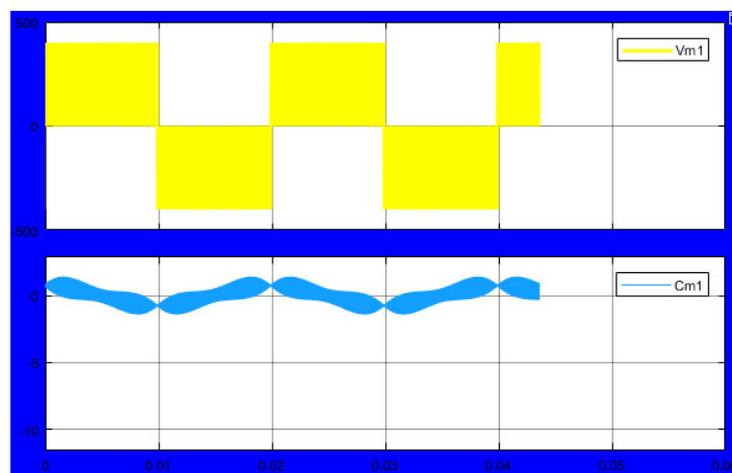


Figure III.13 : La tension et le courant après l'onduleur et avant L_i .

On remarque que la forme du signal qui sort de l'onduleur figure (III.12) est complètement différente de la forme du signal à la tension et le courant de référence (réseau), donc Il n'est pas valide pour se connecter au réseau.

Chapitre III : Dimensionnement Et Simulation

III.2.2 Après l'inductance L_i

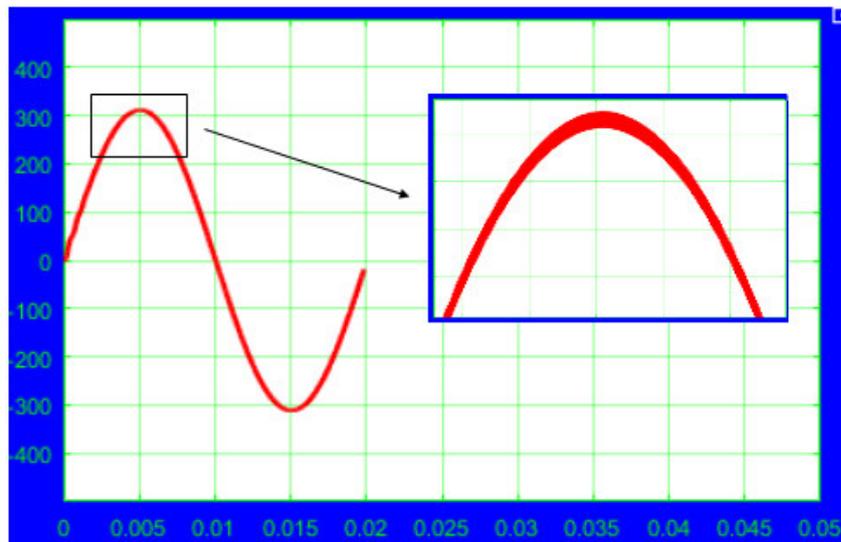


Figure III.14 : La tension après l'inductance L_i .

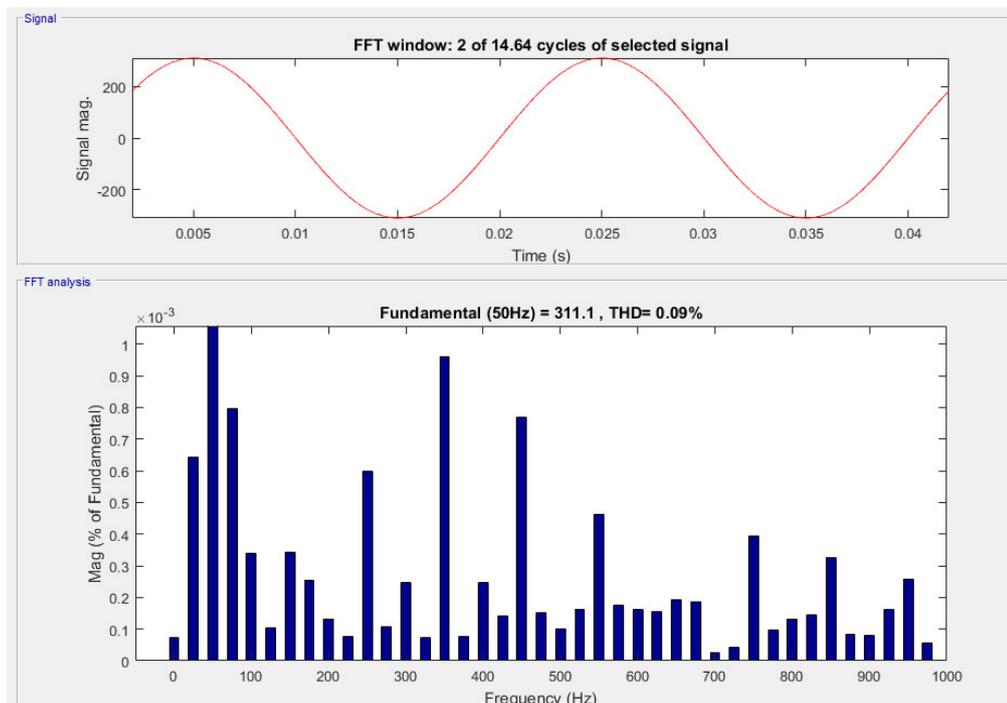


Figure III.15: Analyse spectrale de tension Après l'inductance L_i .

En mesurant la tension après l'inductance L_i , on constate que la forme du signal de la tension s'est améliorée un peu et mieux qu'auparavant, Ce résultat est dû au rôle de l'inductance L_i . Comme indiqué sur la figure III.13, On remarque d'après la figure (III.14) l'influence du filtre sur l'amélioration de la tension Après l'inductance L_i .

Chapitre III : Dimensionnement Et Simulation

III.2.3 Après l'inductance L_g

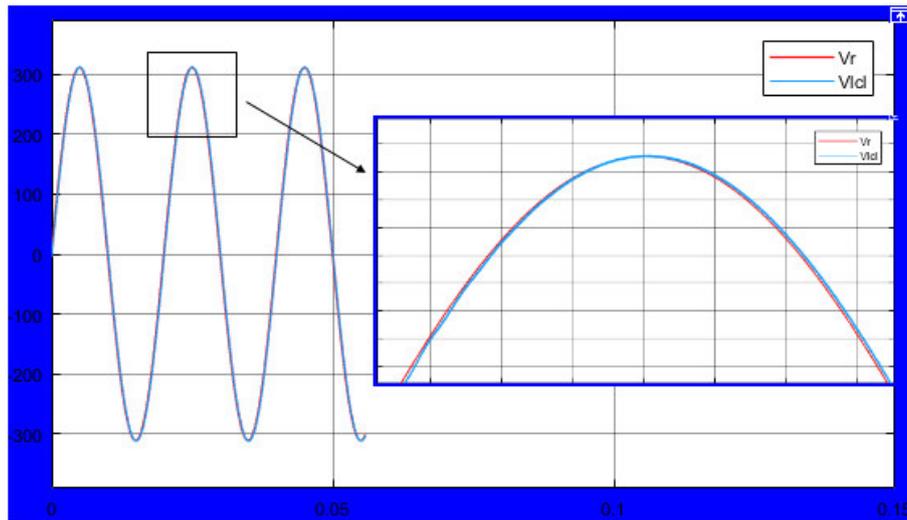


Figure III.16: Les signaux de tension du réseau et la tension après le filtre LCL

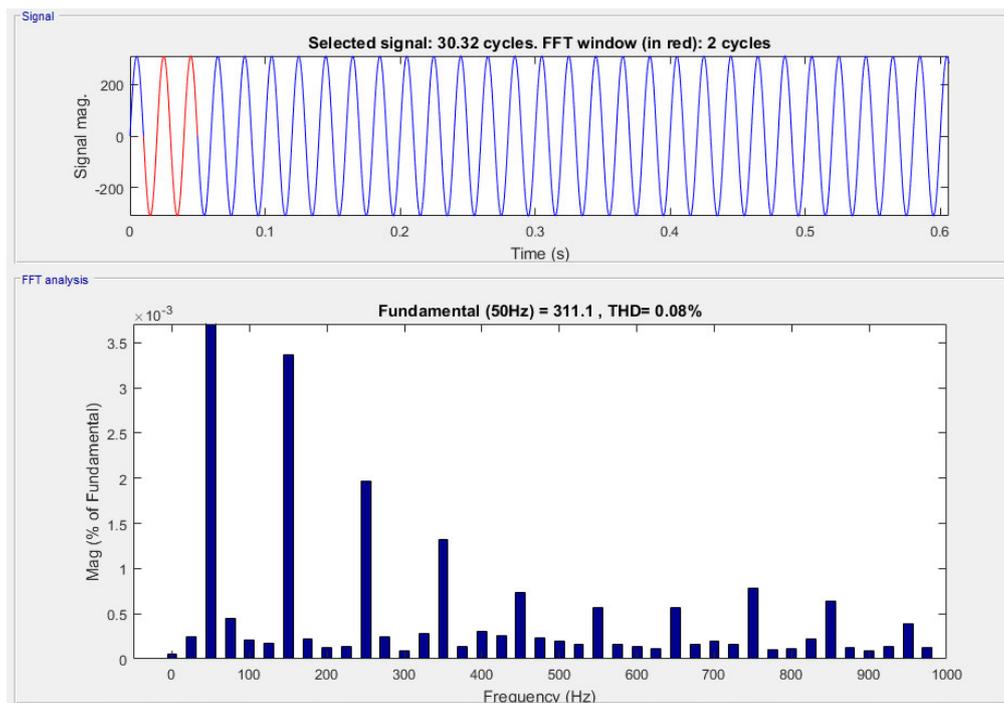


Figure III.17 : Analyse spectrale de tension Après le filtre.

Après avoir mesuré la tension au dernier point du filtre signifie après l'inductance L_g , on remarque que la forme du signal de tension s'est améliorée de manière significative et est devenue presque comme la tension de référence (La tension de réseau). Nous avons obtenu de bons résultats là où ils ont diminué les harmoniques et de là va augmenter la qualité de l'énergie. Dans la figure III.16 Ci-dessus, nous observons la similitude entre les deux signaux, Le signal en bleu représente la tension mesurée après le filtre et le signe rouge représente le signal de tension de réseau. On remarque d'après la figure (III.17) l'influence du filtre sur l'amélioration de la tension injectée au réseau.

Chapitre III : Dimensionnement Et Simulation

III.2.4 Filtre (L) seulement

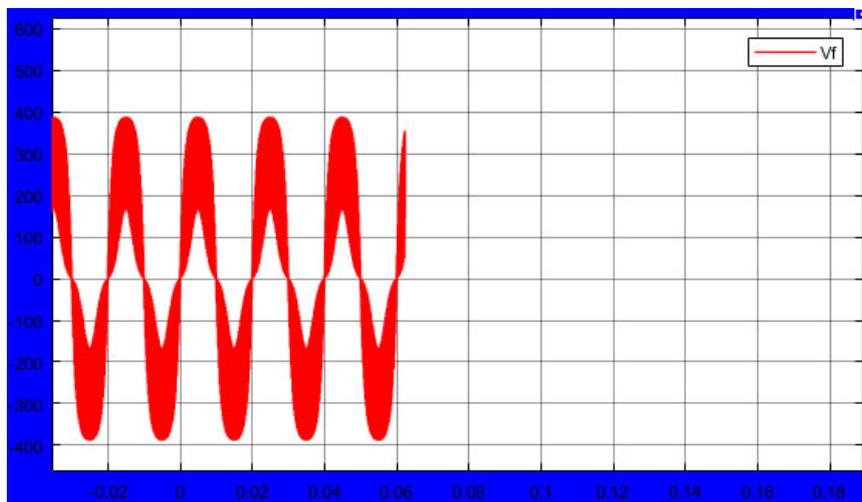


Figure III.18 : La tension après suppression de l'inductance L_g et de la résistance R_d .

D'après la figure (III.18) on observe la forme déformée de la tension injectée au réseau. Et nous avons eu ce résultat en supprimant l'inductance et la résistance

III.2.5 L'influence de la résistance R_d sur la tension connectée au réseau

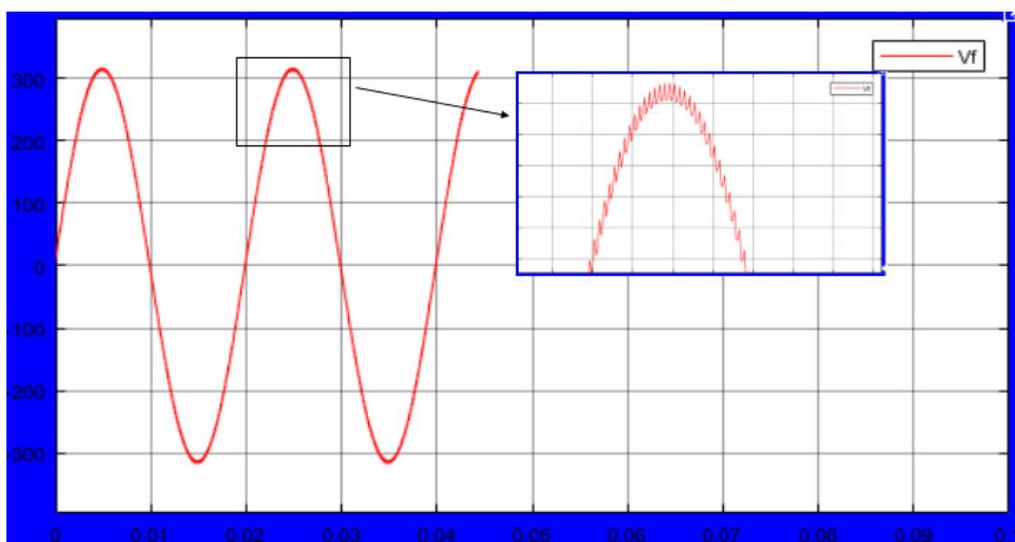


Figure III.19 : Le signal de tension après le filtre LCL sans la résistance R_d .

Chapitre III : Dimensionnement Et Simulation

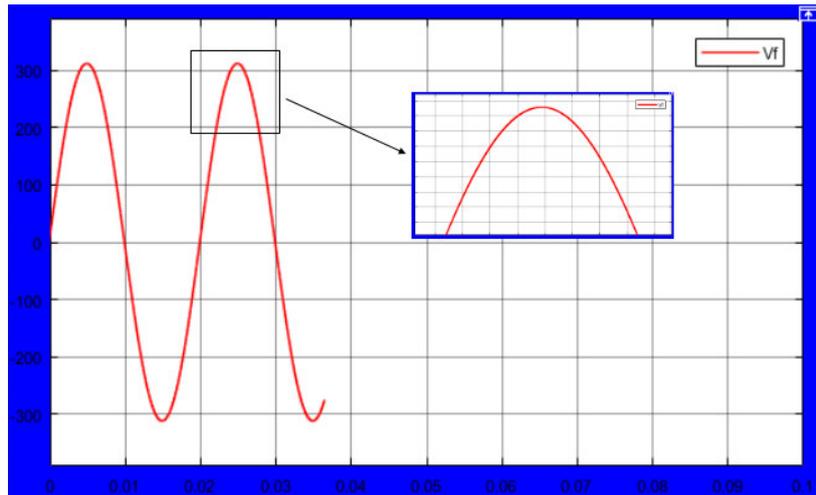


Figure III.20 : Le signal de tension après le filtre LCL avec la résistance R_d .

Nous avons déjà vu le rôle de la résistance R_d sur le diagramme de bode, quand on a réduit le pic. Un autre test c'est directement à partir de la simulation simulink (onduleur + filtre). Le premier test mesure le signal de tension avec le filtre et sans la résistance R_d , Le deuxième test est la mesure avec le filtre (Après avoir ajouté la résistance R_d), nous constatons une amélioration du résultat par rapport au précédent Comme le montre la figure III.20.

III.2.6 L'influence de fréquence de commutation

La fréquence de commutation est un paramètre de l'onduleur, et la sélection de cette fréquence est très importante car elle joue un rôle dans la formation du signal sortant de l'onduleur. Et aussi influencé le rôle du filtre. Dans cette étude, nous avons choisi la valeur de la fréquence de commutation de 40 kHz. Nous allons changer sa valeur en changeant les valeurs des composants du filtre auxquels elle se rapporte, nous prenons une valeur de 1kHz. Note après la valeur modifiée fréquence de commutation une grande différence entre le signal de tension du réseau et le signal de tension de sortie du filtre, tout d'abord, la tension maximale de réseau et de sortie du filtre ne sont pas égaux, notez également la présence d'harmoniques dans le signal de tension, comme le montre la figure III.21.

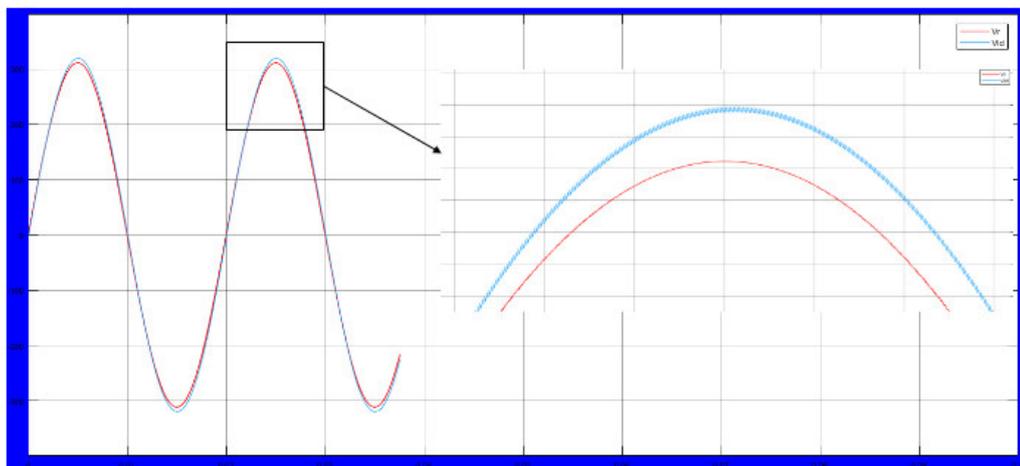


Figure III.21 : signaux de tension pour le réseau et l'autre la sortie du filtre, avec une fréquence de commutation de 1 KHz.

Chapitre III : Dimensionnement Et Simulation

Lorsque nous essayons de changer la valeur de la fréquence de commutation à 4 KHz et que nous conservons les valeurs du filtre comme dans le premier à la valeur de 40 KHz. Notez que le signal de tension est complètement modifié, comme indiqué sur la Figure III.22.

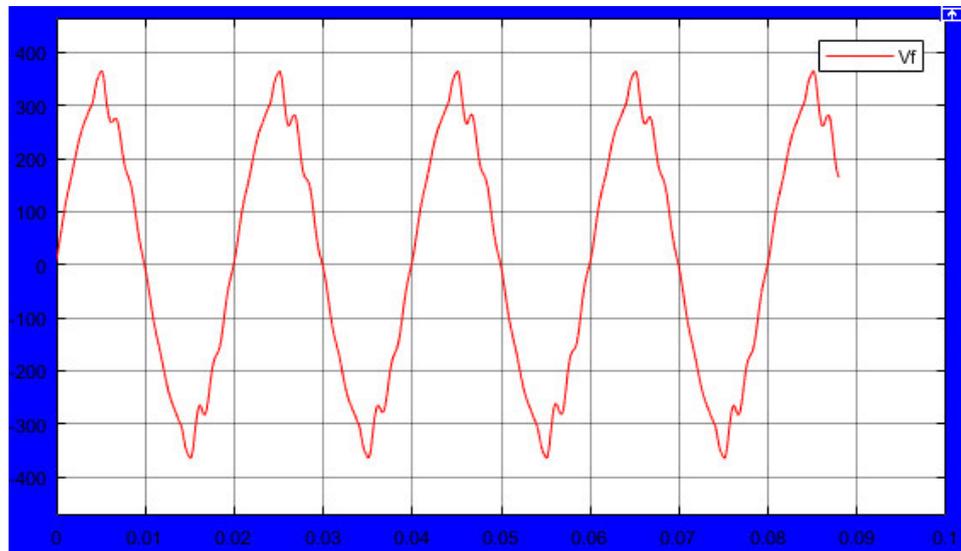


Figure III.22 : Tension du signal à la sortie du filtre avec fréquence de commutation de 4 KHz.

III.2.7 La commande de la tension

L'expression temporelle du rapport cyclique est la suivante :

$$\alpha(t) = m_a \sin(\omega t + \varphi)$$

Avec :

φ : le déphasage par rapport à la référence de phase.

m_a : Est l'indice de modulation choisi pour être 0,778.

$$m_a = \frac{\sqrt{2}V_r}{V_{DC}} \quad (\text{III.3})$$

V_r : La tension efficace de réseau.

V_{DC} : la tension continue qui délivre le panneau PV.

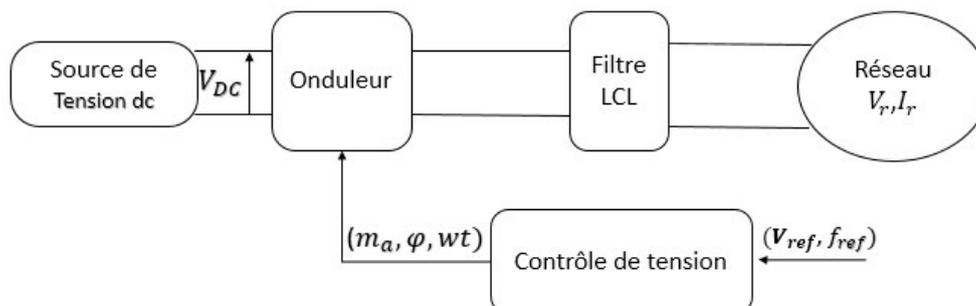


Figure II.22 : Contrôle de la tension de l'onduleur monophasé.

Chapitre III : Dimensionnement Et Simulation

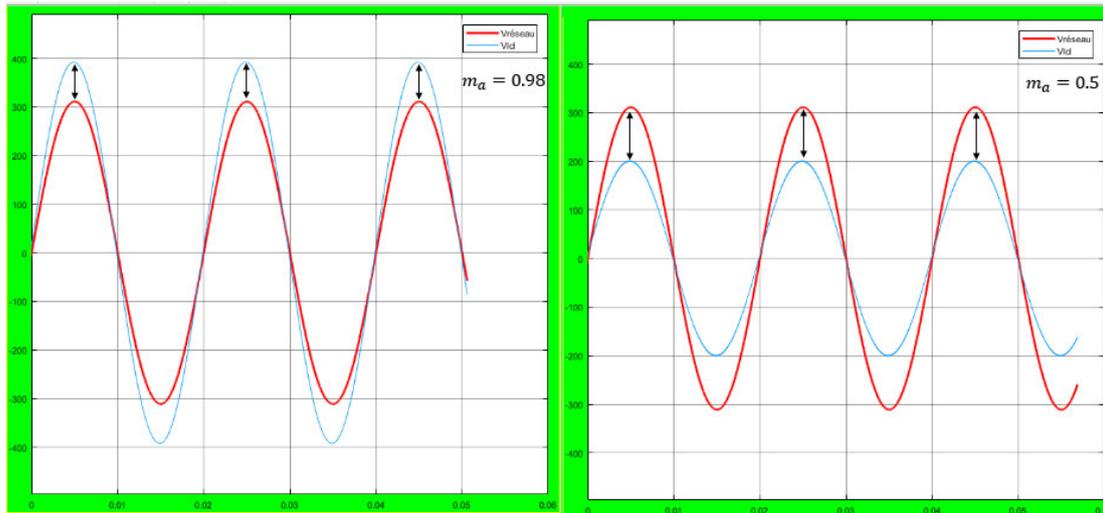


Figure III.23 : Tension du signal à la sortie du filtre pour différentes valeurs de m_a .

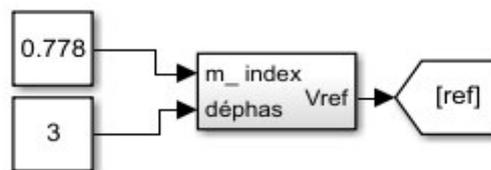


Figure II.22 : Simulation de Contrôle de la tension.

III.2.8 Boucle à verrouillage de phase (phase locked loop) PLL

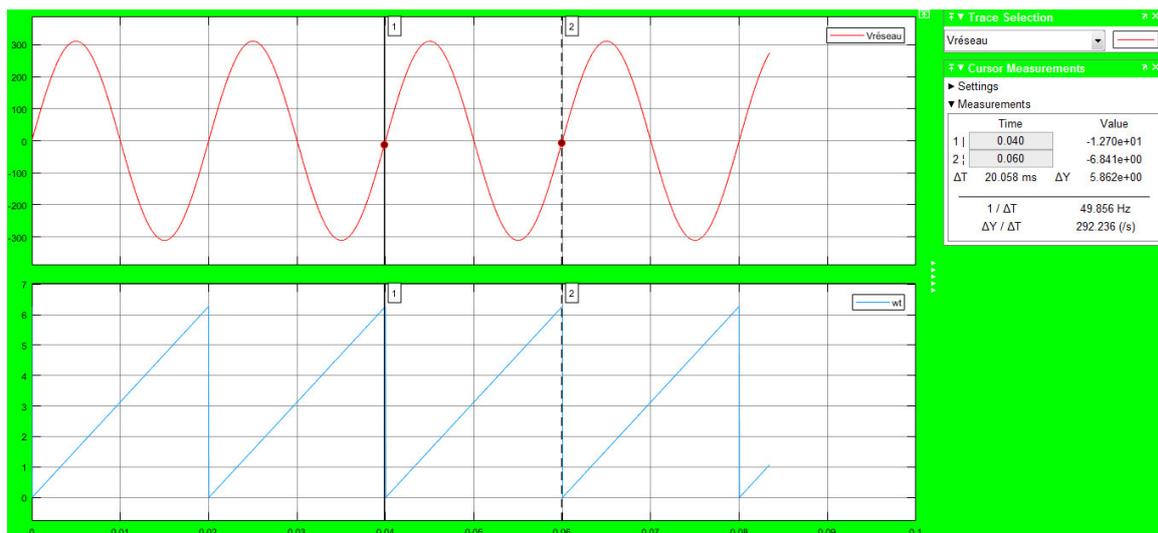


Figure III.23 : Simulation de la Boucle à verrouillage de phase PLL.

Ce Bloc pour bien synchroniser la tension de l'onduleur + filtre avec la tension de réseau.

Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Le travail qu'on a présenté ouvrir une analyse d'une modélisation et simulation d'un Filtre LCL pour un onduleur photovoltaïque connecté au réseau électrique monophasé on utilisant le logiciel MATLAB (Simulink).

Dans un premier temps, on a donné des généralités sur l'énergie solaire et les systèmes photovoltaïques, principe de l'effet photovoltaïques, cellule photovoltaïques. Ainsi le générateur photovoltaïque et leurs performances.

On a étudié, dans un deuxième temps, quelques types des convertisseurs statiques utilisés dans les systèmes photovoltaïques. Comme le hacheur dévolteur, le hacheur survolteur, le hacheur mixte (dévolteur-survolteur) et l'onduleur photovoltaïque connecté au réseau. Qui est commandé par MLI. Ainsi, on a décrit d'autres méthodes de contrôle comme Commande par hystérésis, La commande vectorielle.

Un convertisseur DC-AC (l'onduleur) commandé par la MLI, pour transformer la tension continue délivré par le panneau photovoltaïque à une tension alternative sinusoïdale puis filtrée par l'intermédiaire d'un filtre LCL, ce système sert à injecter de la puissance au réseau de distribution. D'après les résultats de simulation on a les courbes de la tension injectée au réseau dans le cas du système sans filtre et avec filtre et aussi à différents points du filtre, Les résultats de simulation étaient satisfaisants et nous avons montré l'intérêt du Filtre LCL par rapport à d'autres topologies L et LC.

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUES

Référence Bibliographiques

[1] MEFLAH Aissa, « Modélisation et commande d'une chaîne de pompage photovoltaïque », Mémoire de magister, Université de Tlemcen, 2011.

[2] ARROUF Mohamed, « Optimisation de l'ensemble onduleur, moteur et pompe branché sur un générateur photovoltaïque », Thèse de Doctorat, Université de Constantine, 2007.

[3] PETIBON Stéphane, « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques », Thèse de Doctorat, Université Toulouse, 2009.

[4]. ABBASSEN. Lyes, « Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque ». Mémoire de magister, l'Université de Tizi Ouzou, 2011.

[5]. PASTOR. Angel. Cid, « Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques ». Thèse de Doctorat, Université Toulouse, 2006.

[6]. VIGHETTI. Stéphane, « Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau : Choix et dimensionnement des étages de conversion ». Thèse de Doctorat, l'université de Grenoble, 2010.

[7]. MASSAWE. Henry, «Grid Connected Photovoltaic Systems with Smart Grid functionality». Mémoire de master, Norwegian University of Science and Technology, June 2013.

[8]. MEDDOUR. Youcef, YAZI. Zoubir, « Etude de raccordement d'un système photovoltaïque au réseau électrique ». Mémoire Master, l'université de Ouargla, 2015.

[9]. HAMDANI. Abderrahmane, KACEM. Brahim, « Etude et Simulation de Connection d'une Centrale Photovoltaïque au Réseau Electrique Triphasé ». Mémoire master, l'Université Adrar, 2018.

[10]. NOUIKES. Sofiane, TAYEBI. Abdelghani, « Conception et commande d'un système de production décentralisée ». Mémoire de Master, l'Université de M'sila, Juin 2018

[11]. NGUYEN. Van. Linh, « Couplage des systèmes photovoltaïques et des véhicules électriques au réseau Problèmes et solutions ». Thèse de Doctorat, Université de Grenoble, 2014

[12]. LARONDE. Rémi, « Fiabilité et durabilité d'un système complexe dédié aux énergies renouvelables-Application à un système photovoltaïque ». Thèse de Doctorat, L'Université d'Angers, 2011

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUES

- [13]. M. Adouane et al, « Etude et conception d'un onduleur monophasé autonome géré par microcontrôleur PIC 16F876A ». Revue des Energies Renouvelables Vol. 12 N°4 (2009) 543 – 550
- [14]. BRESSAN. Michaël, « Développement d'un outil de supervision et de contrôle pour une installation solaire photovoltaïque ». Thèse de Doctorat, Université de Perpignan, 2014
- [15]. KJAER. Baekhoej, PEDERSEN. John. K, BLAABJERG. Frede, « A Review of Single-Phase Grid-Connected Inverters for Photovoltaic Modules». IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. 41, NO. 5, SEPTEMBER/OCTOBER 2005.
- [16]. NOMAN. M. Mohsin, « Design of a Grid Connected Photovoltaic Power Electronic Converter ». Memoire de master, University of Norway, June 2017.
- [17]. SAHLI. Abdeslem, « Filtrage actif et contrôle de puissances : application aux systèmes photovoltaïques interconnectés au réseau ». Mémoire de magister, Université Ferhat Abbas de Setif, 2012.
- [18]. SAHLA. Fouad, « Microréseaux îlotables : étude et coordination des protections des générateurs et du réseau ». Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lille, 2010.
- [19]. M. Meddah, M. Bourahla, N. Bouchetata, « Synthèse des convertisseurs statiques DC/AC pour les systèmes photovoltaïques ». Revue des Energies Renouvelables ICESD'11 Adrar (2011) 101 – 112.
- [20]. HOUARI. Azeddine, « Contribution à l'étude de micro-réseaux autonomes alimentés par des sources photovoltaïques ». Thèse de Doctorat, Université de Lorraine, 2012 .
- [21] MAHAMA. Chabakata, « Analyse et commandes des convertisseurs multi-niveaux pour un générateur photovoltaïque connecté au réseau électrique ». Thèse de Doctorat, Université Tunis El Manar, 2018
- [22]. THI. MINH. Chau. Le, « Couplage onduleurs photovoltaïques et réseau, aspects contrôle/commande et rejet de perturbations ». Thèse de Doctorat, Université de Grenoble, 2012.
- [23]. REGUIG. BERRA. Ahmed, « Commandes non linéaires d'un système HVDC raccordé à une ferme éolienne offshore ». Thèse de Doctorat de l'Université de M'sila, 2019.
- [24]. ASLAIN. OVONO. ZUE, « Conception et simulation de systèmes d'interfaçage de l'énergie photovoltaïque au réseau de distribution opérationnels 24h par jour ». Mémoire de master, l'Université de Montréal, 2007

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUES

- [25]. ZONG. Xiangdong, « A Single Phase Grid Connected DC/AC Inverter with Reactive Power Control for Residential PV Application ». Mémoire de master, l'Université de Toronto, 2011
- [26]. KAHLANE. A.E.W.H, HASSAINE. Linda, LARBES. Cherif, « LCL Filter Design with Passive Damping for Photovoltaic Grid Connected Systems ». IREC2015 The Sixth International Renewable Energy Congress, 21 May 2015
- [27]. SEDO. Jozef, KASCAK. Slavomir, « Design of output LCL filter and control of single-phase inverter for grid-connected system ». [Electrical_Engineering](#) December 2017, Volume 99, [Issue 4](#), pp 1217–1232
- [28]. KAHLANE. A.E.W.H, L. Hassaine, M. Kherchi, « LCL filter design for photovoltaic grid connected systems ». Revue des Energies Renouvelables SIENR'14 Ghardaïa (2014) 227 – 232
- [29]. A. Reznik et al, « LCL Filter Design and Performance Analysis for Grid Interconnected Systems ». [IEEE Transactions on Industry Applications](#) (Volume: 50 , Issue: 2 , March-April 2014)
- [30]. M.A. Hamzaoui, « Optimisation de la production de l'électricité renouvelable pour site isolé », Thèse de Doctorat de l'Université de Reims Champagne-Ardenne
- [31]. « Le photovoltaïque raccordé au réseau », https://www.pedagogie.ac-aix-marseille.fr/upload/docs/application/pdf/2012-07/edf_photovoltaique_raccorde_au_reseau.pdf