

ÉÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
CENTRE UNIVERSITAIRE SALHI AHMED – NAAMA



INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES
DÉPARTEMENT DE TECHNOLOGIE

MÉMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de **Master** en :

Énergies Renouvelables

Option : Énergies Renouvelables en Électrotechnique

Intitulé :

ÉTUDE ET SIMULATION DES ONDULEURS AVEC COMMANDE SYMÉTRIQUE, COMMANDE DÉCALÉE ET LA COMMANDE MLI DANS LES SYSTÈMES PHOTOVOLTAÏQUES

Présenté par :

- ABIDALLAH Abdelhaq
- GUESMI Mohammed

Soutenu le : 21/06/2023 Devant le Jury :

M. REKKAL Kahina	MCB	Centre Universitaire Naâma	Président
M. BENOTMANE B. Noureddine	MCB	Centre Universitaire Naâma	Encadreur
M. Djellouli Romaisa	Doctorante	UDL-SBA	Co-Encadreur
M. KHESSAM Medjdoub	MCA	Centre Universitaire Naâma	Examineur

Naama – Algérie – 2023



REMERCIEMENTS

*Nos remerciements vont tout premièrement, à Dieu le tout puissant de
nous*

avoir donné le courage pour réaliser ce travail.

On tient à remercier :

*Notre encadreur Mr : **Benotmane** pour son suivi continu ainsi que sa
bonne orientation du travail. Nos remerciements vont également à nos
professeurs pour leurs conseils précieux.*

On remercie également les membres de jury :

*D'avoir accepté d'honorer par leur présence la soutenance de notre
mémoire de
fin d'étude.*

*Enfin on remercie tous ceux qui nous ont aidé de près ou de loin afin
d'achever ce travail en particulier mes collègues.*

Résumé

Devant le développement des énergies renouvelables, et concernant l'énergie solaire, la demande de sa conversion, pour son utilisation est en augmentation. Par conséquent, la recherche en électronique de puissance s'intéresse de plus en plus à la topologie des onduleurs solaires. Ces derniers sont la pièce maîtresse de tout système photovoltaïque, dont le rôle est de convertir une tension continue à une tension alternative. Dans ce travail, nous intéressons à l'étude des convertisseurs statiques et les différents types de commande et on essaye de faire une comparaison entre certaine stratégie pour prendre un taux de distorsions THD minimal et un signal presque sinusoïdal.

Mots clefs : Energie solaire, Système photovoltaïque, Onduleurs à deux niveaux, Commande symétrique, Commande décalée, Commande MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion).

Abstract

Faced with the development of renewable energies, and concerning solar energy, the demand for its conversion, for its use is increasing. Therefore, research in power electronics is increasingly interested in the topology of solar inverters. These are the centerpiece of any photovoltaic system, whose role is to convert a direct voltage to an alternating voltage. In this work, we are interested in the study of static converters and the different types of control and we try to make a comparison between a certain strategy to take a minimum THD distortion rate and an almost sinusoidal signal.

Keywords: Solar energy, Photovoltaic system, Two-level inverters, Symmetrical control, Offset control, PWM (Pulse Width Modulation) control.

ملخص

في مواجهة تطور الطاقات المتجددة، وفيما يتعلق بالطاقة الشمسية، فإن الطلب على تحويلها لاستخدامها آخذ في الازدياد. لذلك، يهتم البحث في إلكترونيات الطاقة بشكل متزايد بطوبولوجيا محولات الطاقة الشمسية. هذه هي حجر الزاوية في أي نظام ضوئي، يتمثل دوره في تحويل الجهد المباشر إلى جهد متناوب. في هذا العمل، نحن مهتمون بدراسة المحولات الثابتة وأنواع التحكم المختلفة ونحاول إجراء مقارنة بين استراتيجيات معينة لأخذ الحد الأدنى من معدل التشويه THD وإشارة جيبية تقريبا

الكلمات المفتاحية: الطاقة الشمسية، النظام الكهروضوئي، المحولات ثنائية المستوى، تحكم متماثل، تحكم في الأوفست، تحكم MLI (تعديل عرض النبض).



***Table
Des
Matières***

Table des matières

REMERCIEMENTS

Résumé

Table des figure

Introduction générale

Chapitre I : Généralité sur les systèmes photovoltaïques raccordés au réseau électrique

I.1. Introduction.....	2
I.2. Les conditions d'une exploitation efficace.....	2
I.2.1. Le rayonnement [7].....	2
I.2.1.1. Le rayonnement solaire [8].....	2
I.2.2. Inclinaison.....	2
I.2.3. Perte d'ombre.....	2
I.2.4. Pertes dues à la saleté [20] [21].....	2
I.2.5. Modules de température [22].....	2
I.2.6. Pertes par câblage [23].....	2
I.2.7. Efficacité des équipements [24].....	2
I.2.8. Détérioration des panneaux solaires.....	2
I.3. L'effet photovoltaïque.....	2
I.4. Le système photovoltaïque.....	2
I.4.1. La cellule photovoltaïque (photopile).....	2
I.4.2. Les caractéristiques d'une cellule solaire.....	2
I.4.3. Les paramètres d'une cellule photovoltaïque.....	2
I.4.4. Association des cellules photovoltaïque [41].....	2
I.4.5. Les différents types des cellules photovoltaïques.....	2
I.4.5.1. Technologies de la première génération à base de silicium cristallin.....	2
I.4.5.2. La technologie de la deuxième génération à base de couche-mince.....	2
I.4.5.3 Technologie de la troisième génération « Les cellules organiques ».....	2
I.4.6. La modélisation de la cellule photovoltaïque [48].....	2
I.5. Le passage de la cellule au module [51].....	2
I.5.1. Le module photovoltaïque [52].....	2
I.5.2. Les caractéristiques d'un module photovoltaïque [53].....	2
I.5.3. La protection d'un module photovoltaïque [55].....	2
I.6. Energie [58].....	2
I.6.1. Batterie [59].....	2
I.7. Les régulateurs [60].....	2
I.8. Les onduleurs [61].....	2
I.9. Conclusion.....	2
<i>Chapitre II : Généralité sur les différents types d'onduleurs et les différentes techniques de commandes</i>	
II.1. Introduction.....	2

TABLE DES MATIÈRES

II.2. Description du Convertisseur Continu-Alternatif (DC- AC)	2
II.3. Définitions des Onduleurs	2
II.4. Classification des onduleurs	2
II.4.1. Selon la réversibilité	2
II.4.1.1. Onduleur autonome (non raccordé au réseau électrique)	2
II.4.1.1.1. Les onduleurs a fréquence fixe	2
II.4.1.1.2. Les onduleurs à fréquence variable	2
II.4.1.2. Onduleurs non autonome (raccordés aux réseaux) [68]	2
II.4.2. Selon la nature de l'alimentation :	2
II.4.2.1. Onduleur de tension	2
II.4.2.2. Onduleur de courant	2
II.4.3. Selon la nature de la charge	2
II.4.3.1 Les onduleurs monophasés	2
II.4.3.2. Onduleur triphasé	2
II.5. Critère de choix d'onduleur :	2
II.6. Domaines d'application	2
II.7. Les avantage d'onduleurs	2
II.8. Les inconvénients d'onduleurs	2
II.9. Modélisation de l'onduleur de tension	2
II.10. Les techniques de commande des onduleurs triphasés	2
II.10.1. Commande plein onde 180°	2
II.10.2. Commande plein onde décalée 120°	2
II.10.3. Commande par la modulation de largeur d'impulsion	2
II.10.3.1. Modulation MLI Sinusoïdale (SPWM) : Triangulo-sinusoidale	2
II.10.3.1.1. Caractéristiques de la modulation	2
II.10.3.2. Technique MLI pré-calculée	2
II.11. Conclusion	2
Chapitre III: Simulation des techniques de commande des onduleurs	
III.1. Introduction	2
III.2. Les différentes techniques de commande	2
III.2.1. Onduleur monophasé	2
III.2.1.1. Commande symétrique (pleine onde 180°) d'un onduleur monophasé	2
III.2.1.2 Commande décalée	2
III.2.1.3 Commande MLI	2
III.2.2 Onduleur triphasé	2
III.2.2.1 Commande symétrique (pleine onde 180°)	2
III.2.2.2 Commande MLI	2
III.3. Conclusion	2
Conclusion général	
Références Bibliographie	

TABLE DES MATIÈRES



***Table
Des
Figure***

TABLE DES FIGURE

Table des figure

Figure I.1. Inclinaison du panneau solaire	3
Figure I.2. La distance de séparation entre les lignes des panneaux.....	4
Figure I.3. Le système photovoltaïque.....	6
Figure I.4. La cellule photovoltaïque.....	7
Figure I.5. Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque.....	8
Figure I.6. Caractéristique court-circuit d'une cellule photovoltaïque.....	9
Figure I.7. Caractéristique Tension en circuit ouvert d'une cellule photovoltaïque.....	9
Figure I.8. Caractéristique I-V des cellules photovoltaïques raccordées en série.....	11
Figure I.9. Caractéristique I-V des cellules photovoltaïques raccordées en parallèle.....	11
Figure I.10. Les cellules monocristallines.....	12
Figure I.11. Les cellules polycristallins.....	13
Figure I.12. Les cellules en couche mince.....	13
Figure I.13. Les cellules organiques.....	14
Figure I.14. Schéma équivalent du modèle à une diode.....	15
Figure I.15. Schéma équivalent du modèle à deux diodes.....	15
Figure I.16. Un module photovoltaïque.....	17
Figure I.17. protection des cellules contre la tension inverse.....	18
Figure I.18. protection des modules par des diodes.....	18
Figure I.19. La batterie d'un système PV.....	19
Figure I.20. Un régulateur d'un système PV.....	20
Figure I.21. Un onduleur d'un système PV.....	21
Figure. II.1. Digramme puissance-fréquence des composants Miller.....	23
Figure. II.2. Schéma de Conversion DC/AC et grandeur de sortie.....	23
Figure. II.3. Schéma d'un système photovoltaïque non raccordé au réseau.....	24
Figure. II.4. Alimentation sans coupure.....	24
Figure. II.5. Convertisseur de fréquence.....	25
Figure. II.6. Système photovoltaïque connecté au réseau.....	25
Figure. II.7. Représentation schématique d'un onduleur de tension.....	26
Figure. II.8. Représentation schématique d'un onduleur de courant.....	26
Figure. II.9. Montage d'un onduleur en pont complet.....	27
Figure. II.10. Montage d'un onduleur en demi-pont.....	27
Figure. II.11. Schéma électrique d'un onduleur de tension triphasé.....	28
Figure. II.12. Variations de vitesse de moteur synchrone.....	29
Figure. II.13. Transfert d'énergie.....	29
Figure. II.14. Alimentation de sureté.....	30
Figure. II.15. Raccord de panneaux solaire.....	30
Figure. II.16. Conversion de puissance.....	31
Figure. II.17. Onduleur triphasé de tension en pont.....	32
Figure. II.18. Le principe de commande du bras d'onduleur.....	34
Figure. II.19. Commande 180°.....	34
Figure. II.20. Forme des signaux de Commande plein onde 180°.....	35
Figure. II.21. Commande 120°.....	35

TABLE DES FIGURE

Figure. II.22. Signal de commande décalée.....	35
Figure. II.23. Principe de la modulation de largeur d'impulsion MLI.....	36
Figure. II.24. Schéma synoptique de la M.L.I.....	36
Figure. II.25. Courbes de signal de la porteuse, de référence et les tensions de sortie d'un Onduleur triphasé commandé en MLI sinus-triangle.....	37
Figure. II.26. Allure de commande MLI pré-calculée.....	38
Figure III.1. Montage d'un onduleur monophasé en pont avec commande symétrique.....	40
Figure III.2. Allure de tension et du courant de sortie d'un onduleur en pont avec commande 180°.....	41
Figure III.3. Tension et courant de l'interrupteur S1.....	41
Figure III.4. Spectre amplitude-harmonique de la tension de sortie et du courant (charge RL).....	42
Figure III.5. commande des interrupteurs.....	43
Figure III.6. Onduleur en pont avec commande décalée.....	43
Figure III.7. Allure de la tension et du courant de sortie d'un onduleur en pont avec commande décalée.....	44
Figure III.8. Spectre amplitude-harmonique de la tension de sortie et du courant (charge RL), d'une commande décalée.....	44
Figure III.9. Onduleur en pont avec commande MLI.....	45
Figure III.10. Allure de tension et du courant de sortie d'un onduleur en pont avec commande MLI	46
Figure III.11. Spectre amplitude-harmonique de la tension de sortie et du courant (charge RL), de la commande MLI.....	46
Figure III.12. Montage d'un onduleur triphasé avec commande symétrique.....	47
Figure III.13. Allure de tension et du courant de sortie d'un onduleur triphasé avec commande symétrique.....	47
Figure III.14. Tension et courant de l'interrupteur S1.....	48
Figure III.15. Spectre amplitude-harmonique de la tension de sortie et du courant (charge RL).....	48
Figure III.16. Onduleur triphasé avec commande MLI.....	49
Figure III.17. Allure de tension de sortie et du courant en fonction du temps.....	49
Figure III.18. Spectre d'harmonique de la tension de sortie et du courant (charge RL).....	50



***Introduction
Générale***

Introduction générale

L'utilisation des énergies renouvelables connaît une croissance significative dans le monde, devant la demande croissante d'énergie électrique essentiellement pour les besoins des régions éloignées dépourvues d'électricité fiable, désertes et montagneuses. Une grande partie de l'énergie consommée provient des combustibles fossiles (pétrole, gaz naturel, charbon, etc...) dont l'utilisation massive peut conduire à l'épuisement de ces réserves et menace réellement l'environnement, cette menace s'est manifestée principalement à travers la pollution et le réchauffement global de la terre. L'énergie solaire photovoltaïque est une forme d'énergie renouvelable permettant de produire de l'électricité par la transformation d'une partie du rayonnement solaire grâce à des modules solaires photovoltaïques, comprenant plusieurs cellules photovoltaïques reliées entre elles. Les impacts locaux du solaire sont très réduits : pas de bruit, pas de rejets et, sur le plan visuel, une relative discrétion voire pour certaines structures intégrées au bâtiment une réelle élégance.[1]

Dans le domaine de l'électricité, l'électronique de puissance est un domaine vital qui touche plusieurs activités tels que le réseau électrique, le transport (urbain, ferroviaire, maritime, etc.). Depuis plus de 40 ans, l'électronique de puissance est en perpétuelle évolution. Dans les années 80, l'électronique de puissance se résumait à l'étude des convertisseurs à diodes et thyristors. Avec le développement de nouveaux composants de puissance (transistor bipolaire puis MOSFET, GTO, IGBT, etc.) de nouvelles possibilités de conversion de l'énergie sont apparues, avec pour conséquence un accroissement de la complexité des systèmes.

Au début des années 90, l'évolution croissante des calibres en tension et en courant des semi-conducteurs de puissance a stimulé le marché des convertisseurs statiques de puissance spécialement dédiés aux applications de moyennes et de fortes puissances, allant de quelques kilowatts à plusieurs mégawatts. Néanmoins, malgré les avancées significatives des technologies utilisées en développement et en fabrication des interrupteurs de puissance, l'évolution des technologies des semi-conducteurs est restée lente par rapport à la demande du marché mondial. Ces dernières années, des convertisseurs statiques sont de plus en plus exploités dans des applications diverses. Devant le développement des énergies renouvelables, et concernant l'énergie solaire, la demande de sa conversion, pour son utilisation est en augmentation. Par conséquent, la recherche en électronique de puissance s'intéresse de plus en plus à la topologie des onduleurs solaires. Ces derniers sont la pièce maîtresse de tout système photovoltaïque, dont le rôle de convertir une tension continue à une tension alternative.

Dans ce travail nous intéressons à l'étude des convertisseurs statiques et les différents types de commande et on essaye de faire une comparaison entre certaine stratégie pour

INTRODUCTION GÉNÉRALE


prendre un taux de distorsions THD minimal et un signal presque sinusoïdal dans les normes nationales. Au fait, l'objectif de cette recherche est une synthèse des différentes commandes des onduleurs. Il est question également de procéder à plusieurs simulations concernant les Onduleur monophasé avec commande symétrique, décalée et commande MLI sinus triangle.[3]

Pour cela le mémoire sera organisé comme suit :

Au premier chapitre, on présente des généralités sur les systèmes photovoltaïques. On cite notamment le principe d'un rayonnement ainsi l'architecture du système photovoltaïque a des distinctes cellules.

Le deuxième chapitre présentera les différents types des convertisseurs, leurs avantages et inconvénients et l'étude des nouvelles techniques dites multiniveaux ainsi que des nouvelles topologies des onduleurs.

Au troisième chapitre des simulations axées sur la modélisation des convertisseurs pour trouver une bonne stratégie de commande avec le niveau désiré qui donne le meilleur résultat pour notre stratégie nous avons limitée notre travail aux onduleurs commandé par la commande symétrique, la commande décalée, et la commande MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion). L'étude par simulation est effectuée sous l'environnement Matlab Simulink. Nous terminons ce travail par une conclusion générale.



Chapitre I
Généralité sur les systèmes
photovoltaïques
Raccordés au
Réseau électrique

I.1. Introduction

Le processus de conversion de la lumière (photons) en électricité (tension) est appelé l'effet solaire photovoltaïque (PV). Les cellules solaires photovoltaïques convertissent directement la lumière du soleil en énergie solaire (électricité). Ils utilisent de fines couches de matériau semi-conducteur chargées différemment entre les couches supérieure et inférieure. Le matériau semi-conducteur peut être enfermé entre une feuille de verre et/ou une résine polymère. Ce présent chapitre a pour but de bien présenter les généralités de la technologie PV, à savoir, le principe d'un rayonnement ainsi l'architecture du système photovoltaïque a des distinctes cellules.

I.2. Les conditions d'une exploitation efficace

La production et les performances d'une installation photovoltaïque dépendent d'un certain nombre de facteurs. Pour obtenir le calcul et le résultat optimal d'une installation photovoltaïque, différentes normes doivent être prises en considération car elles auront une incidence sur les performances de l'installation. Voici quelques-uns de ces facteurs [4]:

- Le rayonnement.
- Inclination.
- Pertes dues aux ombres.
- Pertes dues à la poussière.
- Température des cellules.
- Efficacité des équipements.
- Détérioration des panneaux solaires...

Tous ces facteurs expliquent les pertes globales de l'installation et, par conséquent, ils ont une incidence sur son efficacité. C'est ce qu'on appelle le rapport de performance (PR) de l'installation.

La définition officielle du PR selon la norme 61724 de la IEC est "le rapport entre la mesure d'énergie du système par rapport à l'énergie hypothétique qui serait produite si le système a fonctionné à sa puissance nominale sous l'irradiation de référence". Le PR de l'installation tend à avoir des valeurs qui varient de 0,6 à 0,8 selon le type de l'installation et ses caractéristiques [5].

Ces différents indicateurs sont décrits en détail ci-dessous.

I.2.1. Le rayonnement [6]

Le rayonnement est l'énergie qui provient d'une source et qui se déplace dans l'espace à la vitesse de la lumière. Cette énergie est associée à un champ électrique et à un champ magnétique, et possède des propriétés ondulatoires. Vous pouvez également appeler le rayonnement « ondes électromagnétiques ». Parmi les radiations les plus connus au domaine

énergétique et électrique est le rayonnement solaire.

I.2.1.1. Le rayonnement solaire [7]

Le rayonnement solaire est la principale source de chaleur pour la terre et le moteur de la photosynthèse des plantes. Il provient du soleil et voyage à travers l'espace et l'atmosphère avant d'atteindre la surface de la Terre. Le rayonnement solaire peut être constitué en deux types componentiels, la composante directe, également connu sous le nom de "rayonnement par faisceau" ou "rayonnement par faisceau direct", est utilisé pour décrire le rayonnement solaire se déplaçant sur une ligne droite du soleil jusqu'à la surface de la terre, et la composante diffuse pour prévoir de tous les angles de l'atmosphère.

A. Différents composants du rayonnement solaire

En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire est absorbé et diffusé. Au sol on distingue plusieurs composants :

✓ **Rayonnement direct [8]**

Le rayonnement direct est défini comme un rayonnement qui n'a pas connu de diffusion dans l'atmosphère, de sorte qu'il est fixé en direction, provenant du disque du Soleil.

✓ **Rayonnement Diffus [9]**

Est le rayonnement solaire arrivant au sol après diffusion dans l'atmosphère. Lorsque l'on considère différents endroits ainsi que différents moments dans le temps, les différences de distribution et les différents états de constitution, les concentrations de vapeur d'eau et d'aérosol qui peuvent être trouvées dans l'atmosphère peuvent varier. Cela conduit à une absorption et une diffusion différente du rayonnement solaire.

✓ **Rayonnement réfléchi (Albédo)**

L'albédo est un paramètre clé largement utilisé dans les études sur le bilan énergétique de la surface terrestre, les prévisions météorologiques à moyen et long terme et les enquêtes sur le changement climatique mondial. Il représente la fraction d'un rayonnement incident diffusée ou réfléchi par un obstacle. Ce terme étant généralement réservé au sol et aux nuages. C'est une valeur moyenne de leur réflecteur pour le rayonnement considéré, et pour tous les angles d'incidences possibles. Par définition, le corps noir possède un albédo nul. Il faudra en tenir compte pour évaluer le rayonnement sur plans inclinés [10]. L'albédo est donné par l'équation :

$$\text{Albedo (alb)} = \text{énergie réfléchi}/\text{énergie reçue.} \quad (\text{I.1}) [10]$$

✓ **Rayonnement global**

Est le rayonnement solaire total qui tombe sur une surface horizontale. Il se compose du rayonnement direct et du rayonnement diffus. Le rayonnement global peut être mesuré à l'aide d'un pyranomètre. En règle générale, le rayonnement est plus fort à midi que le matin et le soir, et

il est plus fort en été qu'en hiver. En outre, plus vous êtes proche de l'équateur, plus le rayonnement global est fort [11].

I.2.2. Inclinaison

L'inclinaison du panneau, par rapport à l'horizontale, modifie le rayonnement collecté en raison de l'angle d'incidence des rayons solaires sur la surface [12].

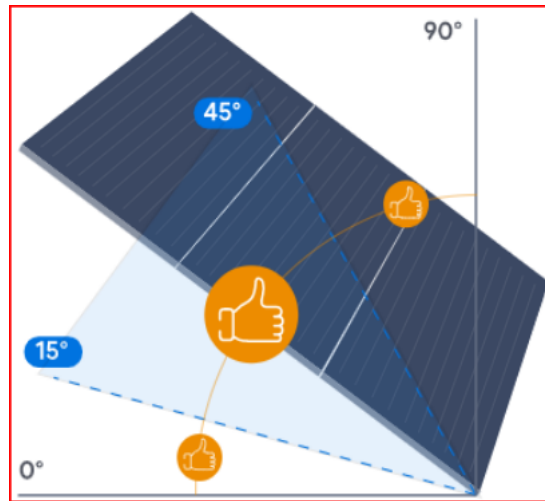


Figure I.1. Inclinaison du panneau solaire.[12]

L'inclinaison optimale de la surface des panneaux solaires pour optimiser l'utilisation annuelle du rayonnement solaire incident dépend de l'emplacement de l'installation . Trois situations sont généralement différenciées selon le besoin d'une plus grande production solaire [13].

- Demande annuelle : $B_{opt} = \varphi - 10$. (I.2)

- Demande pour l'été : $B_{opt} = \varphi - 20$. (I.3)

- Demande hivernale : $B_{opt} = \varphi + 10$. (I.4)

(B_{opt}) Représente l'angle d'inclinaison optimal et φ l'attitude du lieu.

I.2.3. Perte d'ombre

Les ombres environnantes produisent des pertes de rayonnement sur une surface. Ces pertes sont exprimées en pourcentage du rayonnement solaire global qui atteindrait la surface en l'absence de toute ombre. Les pertes peuvent être causées par les contours ombragés de l'installation photovoltaïque ou par des obstacles éloignés tels que des bâtiments ou des arbres. La distance minimale de séparation entre les lignes de panneaux afin d'éviter les pertes d'ombre entre elles est généralement calculée de la manière suivante [14]:

$$a = H / \text{tg} (61^\circ - \text{Attitude du lieu}) \tag{I.5}$$

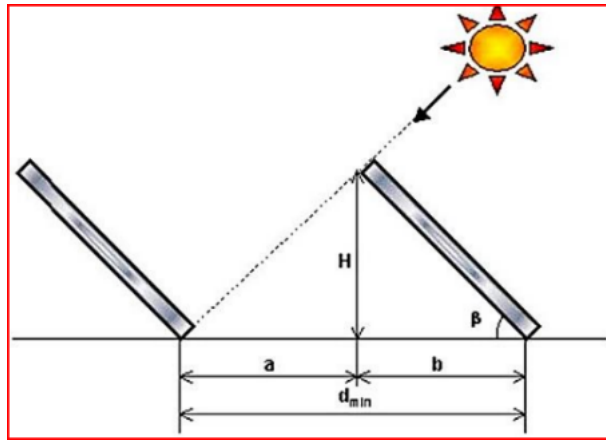


Figure I.2. La distance de séparation entre les lignes des panneaux.[14]

I.2.4. Pertes dues à la saleté [15]

La saleté et la poussière s'accablent sur les panneaux en raison de leur emplacement extérieur. Les pertes dues à la saleté sont estimées à 5 % dans un environnement normal. Ce pourcentage augmente dans les environnements plus fréquentés tels que les installations situées à proximité de routes de terre ou de zones d'industrie lourde.

I.2.5. Modules de température [16]

Les modules photovoltaïques perdent environ 4% de leur puissance pour chaque augmentation de 10°C de leur la température de fonctionnement. Ce pourcentage varie légèrement en fonction de la technologie. Le site La température de fonctionnement des modules photovoltaïques dépend de facteurs environnementaux tels que l'irradiation, la température ambiante et la vitesse du vent, ainsi que la position du module ou la ventilation de sa partie arrière. Cela implique que même si l'irradiation solaire accidentelle est identique, le même système photovoltaïque produira moins d'énergie dans un endroit chaud qu'un un endroit froid.

I.2.6. Pertes par câblage [17]

Les pertes de câblage sont dues à des pertes d'énergie causées par des chutes de tension à la fois dans le courant continu (DC) et dans le courant alternatif (AC), lorsque le courant circule dans un conducteur fait d'un matériau déterminé et placé dans une section déterminée. Ces pertes sont minimisées lorsque la section de câblage est correctement mesurée. Malgré cela, les pertes en courant continu peuvent atteindre 1,5% et les pertes en courant alternatif 3%.

I.2.7. Efficacité des équipements [18]

Tous les équipements qui constituent l'installation solaire photovoltaïque ont également un rendement qui influence l'installation. Les données de performance de l'équipement sont mises à disposition par le producteur. Par conséquent, les onduleurs (dispositif qui convertit le courant continu en courant alternatif) ont tendance à ont une efficacité d'environ 94 à 96% et les maximiseurs (contrôleur de charge de batterie avec Maximum Power Point Tracking technology) ont tendance à avoir une efficacité d'environ 98%.

I.2.8. Détérioration des panneaux solaires

Les panneaux photovoltaïques perdent leur efficacité au fil des ans de telle sorte qu'au bout de 20 ans, ils auront perdu environ 20 % de leur efficacité.

I.3. L'effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque (PV) est le processus par lequel deux matériaux dissemblables en contact étroit produisent une tension électrique lorsqu'ils sont frappés par la lumière. Il en résulte la création d'une tension et d'un courant électrique dans le matériau. Le courant produit est appelé photo-courant. Ici, une éjection d'électrons ne va pas se produire. Les électrons absorbent l'énergie, mais sont retenus dans la substance. Cet effet peut être observé dans les semi-conducteurs. [19]

Les cellules photovoltaïques sont interconnectées pour former des modules photovoltaïques d'une puissance pouvant atteindre plusieurs centaines de watts. Les modules photovoltaïques sont ensuite combinés pour former des systèmes photovoltaïques. Les systèmes photovoltaïques, composés de nombreuses cellules élémentaires placées en série utilisent également l'effet photovoltaïque.

I.4. Le système photovoltaïque

Le système photovoltaïque, également système PV ou système d'énergie solaire, désigne un système d'alimentation conçu pour fournir de l'énergie solaire utilisable au moyen de la photovoltaïque, une méthode de conversion de l'énergie solaire en électricité à courant continu utilisant des matériaux semi-conducteurs qui créent une tension ou un courant électrique dans un matériau lorsqu'il est exposé à la lumière. Il consiste en un agencement de plusieurs composants, notamment des panneaux solaires pour absorber et convertir la lumière du soleil en électricité, un onduleur solaire pour transformer le courant électrique continu en courant alternatif, ainsi que le montage, le câblage, les systèmes de mesure et d'autres accessoires électriques pour mettre en place un système fonctionnel [20].

Le système (PV) est composé d'un ou plusieurs panneaux solaires associés à un onduleur et à d'autres équipements électriques et mécaniques qui utilisent l'énergie du soleil pour produire de l'électricité, à savoir, une ou plusieurs batteries pour le stockage, des récepteurs à faible consommation, un interrupteur marche/arrêt et un conditionneur de puissance, ce dernier il comprend : un régulateur seul, un régulateur avec un convertisseur (DC /DC ou/et DC/ AC) ou un convertisseur seul [21]. La figure (I.3) montre un exemple d'une structure détaillée du système PV.

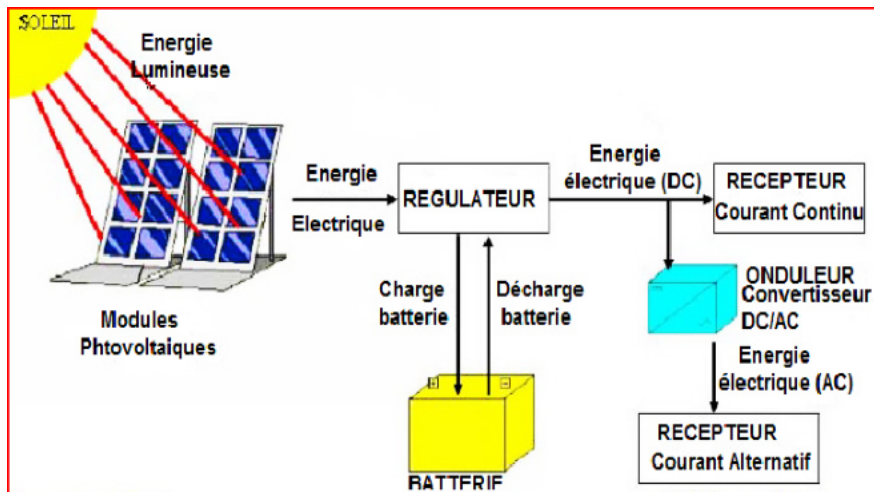


Figure I.3. Le système photovoltaïque.[21]

Via une autre description, tout système photovoltaïque peut se décomposer en trois parties : une partie production d'énergie, une partie contrôle de cette énergie et une partie utilisation de l'énergie produite. L'analyse précise de chacune de ces fonctions doit être approfondie afin de construire un système fiable techniquement [22].

I.4.1. La cellule photovoltaïque (photopile)

La cellule solaire photovoltaïque est un composant électronique à base de matériaux semi-conducteurs qui produisent des porteurs de charges (électrons-trous) en absorbant des photons. Le matériau est alors photoconducteur. Il existe de nombreuses cellules photovoltaïques dans un seul panneau solaire, et le courant créé par toutes les cellules ensemble fournit suffisamment d'électricité pour aider à alimenter votre école, votre maison et vos entreprises.

Pour réaliser une photopile, il est nécessaire de réaliser à la surface du semi-conducteur une jonction PN ou diode de surface, les photons incidents créent des paires électron-trou. Dans la zone de charge d'espace, les paires électron-trou créées par les photons sont dissociées par le champ électrique dirigé de la région n à la région p et une différence de potentiel apparaît. La tension interne de la diode constitue la source de tension et les photo-porteurs générés par le rayonnement solaire la source de courant. Ce courant photovoltaïque est dirigé de la région n à la région p, il est directement proportionnel à l'intensité de l'éclairement et il faut qu'il soit collecté en réalisant les contacts avant et arrière [23].

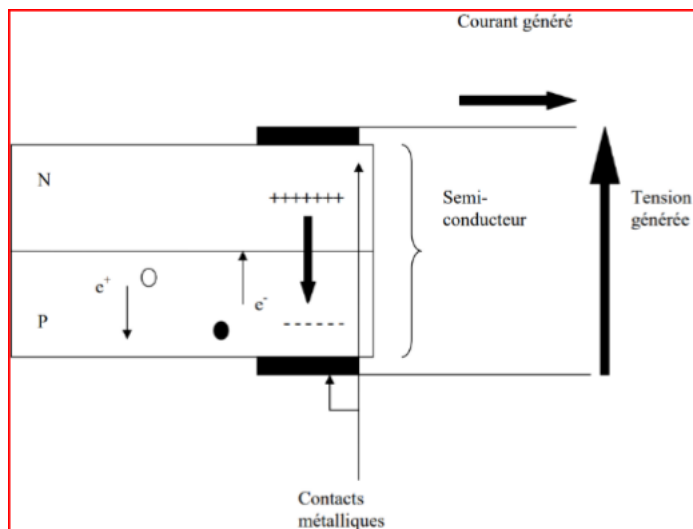


Figure I.4. La cellule photovoltaïque.[23]

Les électrons mobiles dans le semi-conducteur peuvent provenir soit de la région n (porteurs majoritaires), soit de la région p (porteurs minoritaires). On peut mettre en évidence le comportement de ces deux types de porteurs en appliquant une tension continue variable V aux bornes de la diode (à l'obscurité) et en fermant le circuit sur une résistance.

Pour une diode à jonction PN, il existe deux régions de fonctionnement prémentionnées et trois conditions de polarisation pour la diode à jonction standard. Les caractéristiques IV de la diode à jonction PN sont les suivantes :

Condition de polarisation nulle : Une conduction lorsqu'aucun potentiel de tension externe n'est appliquée à la diode de jonction PN [24].

Biais inverse : Le potentiel de tension est connecté à la borne négative, c'est-à-dire au matériau de type n et à la borne positive de la batterie au matériau de type N à travers la diode, ce qui a pour effet d'augmenter la largeur de la diode de jonction PN ou les couches d'appauvrissement entre ces deux matériaux semi-conducteurs.

Polarisation directe : Le potentiel de tension est connecté positif, borne (+ve), c'est-à-dire au matériau de type P et négatif (borne -ve) au matériau de type N à travers la diode, ce qui a pour effet de diminuer les diodes de jonction PN largeur, ou la couche d'appauvrissement entre les deux semi-conducteurs.

1.4.2. Les caractéristiques d'une cellule solaire **A. Courant-tension [25]**

La courbe caractéristique d'une cellule photovoltaïque représente la variation du courant qu'elle produit en fonction de la tension aux bornes de la cellule photovoltaïque depuis le court-circuit (tension nulle correspondant au courant maximum produit) jusqu'au circuit ouvert (courant nul pour une tension maximale aux bornes de la cellule).

La caractéristique courant-tension, illustrée dans la figure (I.5), décrit le comportement de la

cellule photovoltaïque sous l'influence des conditions météorologiques (niveau d'éclairement et température ambiante).

La courbe de la cellule solaire $I = f(V)$ passe par trois points importants qui sont :

- Le courant de court-circuit
- La tension de circuit ouvert
- La puissance maximale

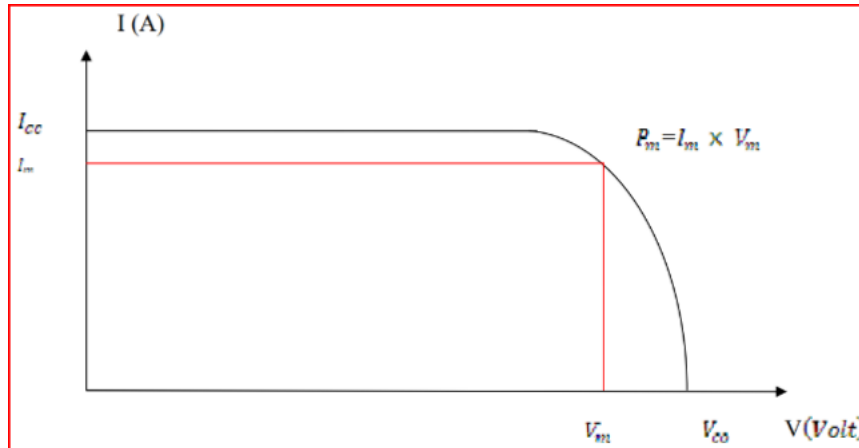


Figure I.5. caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque.[25]

La figure I.5 montre bien que dans la partie verticale de la caractéristique, la cellule PV peut être considérée comme un générateur à tension constante et dans sa partie horizontale comme une source de courant.

B. Court circuit (ISC) [26]

Le courant de court-circuit (ISC) est le courant qui traverse la cellule solaire lorsque la tension aux bornes de la cellule solaire est nulle (c'est-à-dire lorsque la cellule solaire est en court-circuit). Généralement écrit ISC, le courant de court-circuit est représenté sur la courbe IV ci-dessous. L'ISC est dû à la génération et à la collecte de porteurs générés par la lumière.

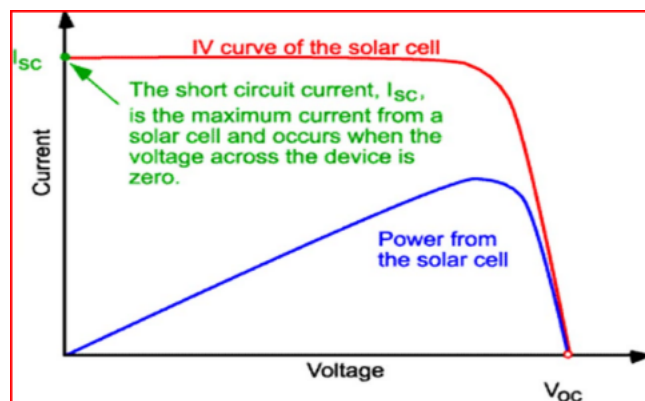


Figure I.6. caractéristique court-circuit d'une cellule photovoltaïque.[26]

C. Tension de court-circuit [27]

La tension en circuit ouvert, V_{OC} , est la tension maximale disponible à partir d'une cellule solaire, et cela se produit à un courant nul. La tension en circuit ouvert correspond à la quantité de polarisation directe sur la cellule solaire due à la polarisation de la jonction de la cellule solaire avec le courant généré par la lumière. La tension en circuit ouvert est indiquée sur la courbe IV, montrée à la figure (I.7).

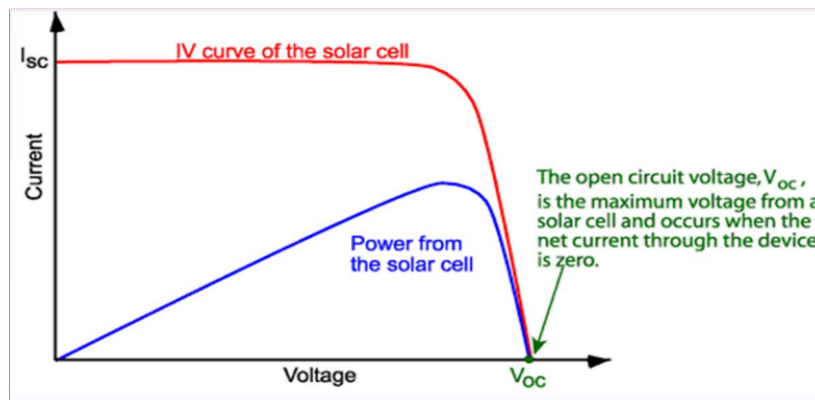


Figure I.7. Caractéristique Tension en circuit ouvert d'une cellule photovoltaïque.[27]

Une équation pour V_{oc} est trouvée en mettant le courant net égal à zéro dans l'équation de la cellule solaire, ce qui donne :

$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{I_L}{I_0} + 1\right) \quad (I.6)$$

D. La réponse spectrale [28]

La réponse spectrale est conceptuellement similaire à l'efficacité quantique. L'efficacité quantique donne le nombre d'électrons émis par la cellule solaire par rapport au nombre de photons incidents sur l'appareil, tandis que la réponse spectrale est le rapport du courant généré par la cellule solaire à la puissance **incidente** sur la cellule solaire.

E. L'efficacité d'énergie

L'efficacité de conversion d'une cellule photovoltaïque (PV), ou cellule solaire, est le pourcentage de l'énergie solaire qui brille sur un appareil PV qui est convertie en électricité utilisable. L'amélioration de cette efficacité de conversion est un objectif clé de la recherche et contribue à rendre les technologies photovoltaïques plus compétitives par rapport aux sources d'énergie conventionnelles [29].

I.4.3. Les paramètres d'une cellule photovoltaïque

Le modèle de cellule solaire à diode unique est un modèle efficace pour analyser la variation des différents paramètres d'une cellule PV et ses cinq paramètres externes et internes sont analysés en utilisant les valeurs idéales données par l'industrie. Les paramètres externes considérés sont l'irradiation solaire (I_s) et la température de la cellule (T) et concernant les paramètres internes sont la résistance série (R_s), la résistance shunt (R_{sh}) et le courant de

saturation inverse de la diode (I_s).

I.4.4. Association des cellules photovoltaïque [30]

Les modules peuvent également être connectés en série et en parallèle pour construire le champ photovoltaïque afin d'augmenter la tension et l'intensité d'utilisation. Toutefois, il importe de prendre quelques précautions car l'existence de cellules moins efficaces ou l'occlusion d'une ou plusieurs cellules (dus à de l'ombrage, de la poussière...etc.) peuvent endommager les cellules de façon permanente. Nous allons présenter le comportement de cellules PV lors de ces différentes connexions.

A. Association en série des cellules

Les cellules photovoltaïques peuvent se connecter en série. Les tensions de toutes les cellules s'ajoutent et le courant est le même que celui d'une seule cellule. Si l'une d'elles était plus faible en courant, elle imposerait son courant à toute la série ce qui pénaliserait le module complet [31].

$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n \tag{1.7}$$

$$I = I_1 = I_2 = I_n \tag{1.8}$$

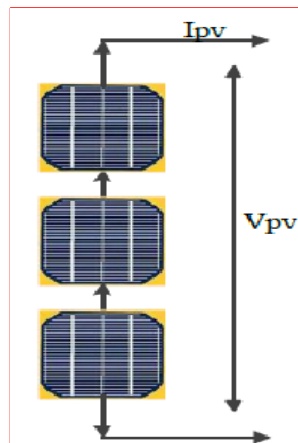


Figure I.8. Caractéristique I-V des cellules photovoltaïques raccordées en série.[31]

B. Association en parallèle des cellules

La mise en parallèle des cellules photovoltaïques permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Donc, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique électrique résultante du groupement est obtenue par addition des courants [32].

$$U = U_1 = U_2 = U_n \tag{1.9}$$

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n \tag{1.10}$$

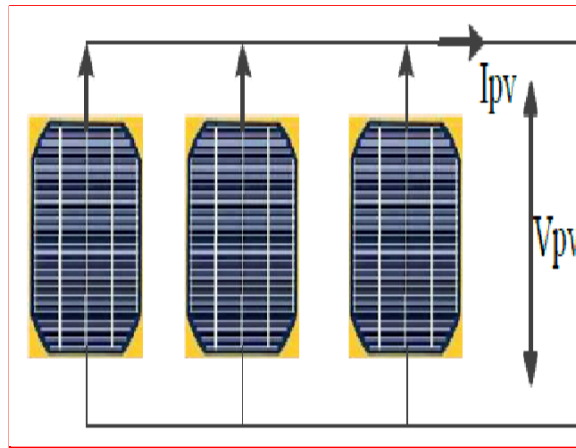


Figure I.9. Caractéristique I-V des cellules photovoltaïques raccordées en parallèle.[32]

I.4.5. Les différents types des cellules photovoltaïques

Les cellules PV peuvent être fabriquées de différentes manières et à partir d'une variété de matériaux différents. Malgré cette différence, ils accomplissent tous la même tâche de récolter l'énergie solaire et de la convertir en électricité utile. Le matériau le plus courant pour la construction de panneaux solaires est le silicium qui possède des propriétés semi-conductrices. Plusieurs de ces cellules solaires sont nécessaires pour construire un panneau solaire et de nombreux panneaux constituent un réseau photovoltaïque [33].

I.4.5.1. Technologies de la première génération à base de silicium cristallin

A. La technologie des cellules monocristallines [34]

Les premières cellules solaires disponibles dans le commerce étaient fabriquées à partir de silicium monocristallin, qui est une forme extrêmement pure de silicium. Pour les produire, un germe cristallin est extrait d'une masse de silicium fondu créant un lingot cylindrique avec une structure de réseau cristallin unique et continue. Ce cristal est ensuite scié mécaniquement en tranches minces, poli et dopé pour créer la jonction PN requise. Après l'ajout d'un revêtement antireflet et des contacts métalliques avant et arrière, la cellule est finalement câblée et emballée avec de nombreuses autres cellules dans un panneau solaire complet. Les cellules en silicium monocristallin sont très efficaces, mais leur processus de fabrication est lent et laborieux, ce qui les rend plus chers que leurs homologues polycristallins ou à couches minces.

Les cellules monocristallines présentent un aspect parfaitement homogène de couleur gris sombre. Cette structure homogène ne présente pas de joints de grains et correspond à la structure cristalline parfaitement ordonnée susceptible d'assurer un rendement optimum. L'obtention du Silicium se fait par tirage d'un lingot de monocristallin, ce qui lui confère des bords arrondis dont la couleur gris sombre offre un aspect visuel tout à fait reconnaissable. La différence réside essentiellement dans l'obtention du silicium brut.

La figure (I.10) présente les cellules monocristallines.

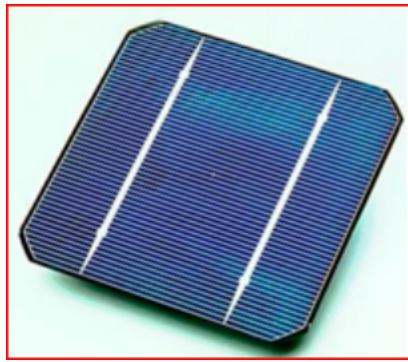


Figure I.10. Les cellules monocristallines.[34]

B. La technologie polycristallin [35]

Au lieu d'une seule structure cristalline uniforme, les cellules polycristallines (ou multicristallines) contiennent de nombreux petits grains de cristaux (voir figure I.6). Ils peuvent être fabriqués en coulant simplement un lingot en forme de cube à partir de silicium fondu, puis scié et emballé comme des cellules monocristallines. Une autre méthode connue sous le nom de croissance par film à définition de bord (EFG) consiste à étirer un mince ruban de silicium polycristallin à partir d'une masse de silicium fondu. Alternative moins chère mais moins efficace, les cellules PV en silicium polycristallin dominent le marché mondial, représentant environ 70 % de la production PV mondiale en 2015.

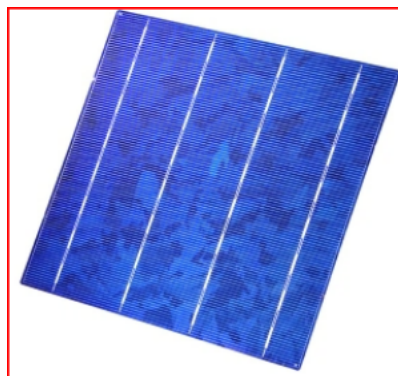


Figure I.11. Les cellules polycristallins.[35]

I.4.5.2. La technologie de la deuxième génération à base de couche-mince

Bien que les cellules PV cristallines dominent le marché, les cellules peuvent également être fabriquées à partir de couches minces, ce qui les rend beaucoup plus flexibles et durables. Un type de cellule PV à couches minces est le silicium amorphe (a-Si) qui est produit en déposant de fines couches de silicium sur un substrat en verre. Le résultat est une cellule très fine et flexible qui utilise moins de 1% du silicium nécessaire pour une cellule cristalline. En raison de cette réduction de matière première et d'un processus de fabrication moins énergivore, les cellules en silicium amorphe sont beaucoup moins chères à produire. Leur efficacité, cependant, est considérablement réduite car les atomes de silicium sont beaucoup moins ordonnés que dans

leurs formes cristallines, laissant des « liaisons pendantes » qui se combinent avec d'autres éléments les rendant électriquement inactifs. Ces cellules souffrent également d'une baisse de rendement de 20 % dans les premiers mois de fonctionnement avant de se stabiliser, et sont donc vendues avec des puissances nominales basées sur leur rendement dégradé [36].

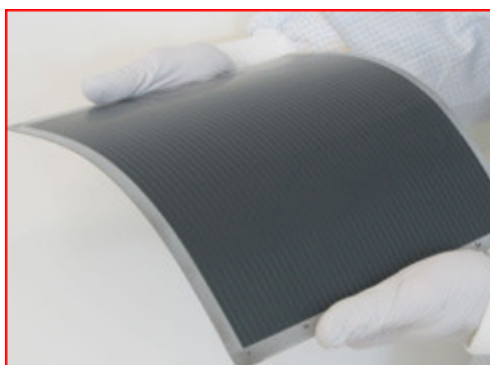


Figure I.12. Les cellules en couche mince.[36]

I.4.5.3 Technologie de la troisième génération « Les cellules organiques »

Les cellules solaires organiques (OSC) sont l'une des technologies photovoltaïques (PV) émergentes et sont classées comme cellules solaires de troisième génération avec un matériau polymère organique comme couche absorbant la lumière. Ce chapitre donne un bref aperçu des OSC avec une brève classification de l'application. De plus, les principes de fonctionnement et les structures du dispositif sont décrits. Les principaux matériaux organiques de la couche active des dispositifs photovoltaïques sont également résumés. La solubilité de la matière organique est le principal avantage dans la production d'OSC. Le traitement de la solution par des techniques roll-to-roll (R2R) dans des conditions ambiantes permet de fabriquer des OSC à faible coût et en grande quantité. La première partie de ce chapitre donne un aperçu des OSC, de leur fonctionnement et des matériaux utilisés. La deuxième partie est axée sur la production d'OSC et présente également des projets de démonstration et des tendances futures [37].

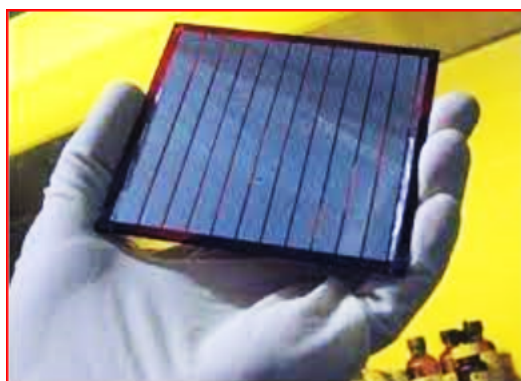


Figure I.13. Les cellules organiques.[37]

I.4.6. La modélisation de la cellule photovoltaïque [38]

Pour développer un modèle équivalent d'une cellule photovoltaïque, il est nécessaire de faire un choix judicieux des circuits électriques qui le constituent et de comprendre la configuration physique et les caractéristiques électriques des éléments de la cellule. Pour cela, plusieurs modèles mathématiques sont développés pour représenter le comportement non linéaire des jonctions des semi-conducteurs. Dans ce qui suit nous avons présenté deux modèles d'une cellule photovoltaïque, à savoir le modèle à deux diodes et le modèle à une diode.

A. Modèle a une diode [39]

La cellule photovoltaïque est représentée par le modèle « standard » à une diode. Ce modèle comporte une diode comme le montre la figure (I.14) suivante :

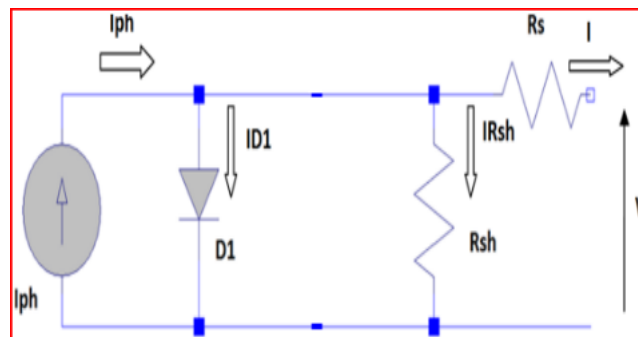


Figure I.14 : Schéma équivalent du modèle à une diode.[39]

L'expression du courant I devient alors :

$$I = I_{cc} - I_d \left[\exp \left(q \left(\frac{V + I \cdot R_s}{n \cdot K T} \right) \right) - 1 \right] - \frac{V + I \cdot R_s}{R_p} \quad (I.11)$$

La résistance parallèle (R_p) est très grande par rapport à la résistance série (R_s), son effet est donc très faible de telle sorte que l'on peut la négliger. Ce modèle, est largement utilisé pour la modélisation.

B. Modèle a deux diodes [40]

La structure schématisée a la figure (I.15), représente une connexion en parallèle de deux diodes de courants de saturation I_{01} et I_{02} et de facteurs de diode n_1 et n_2 , une source de courant produisant le courant de court-circuit de la cellule qui dépend de l'éclairement solaire. la résistance série R_s tient compte de la résistivité du matériau et du contact semi-conducteur-métal. Sa valeur peut être déterminée par l'inverse de la pente de la caractéristique $I(V)$ pour la tension à circuit ouvert V_{co} . La résistance parallèle R_{sh} traduit la présence d'un courant de fuite dans la

jonction :

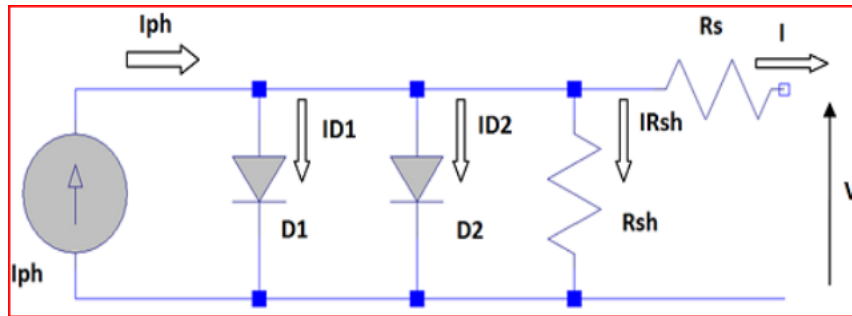


Figure I.15 : Schéma équivalent du modèle à deux diodes.[40]

Le courant I délivré par la cellule est donné par l'expression suivante :

$$I = I_{cc} - I_{d1} \left[\exp \left(q \left(\frac{V + I R_s}{n_1 K T} \right) \right) - 1 \right] - I_{d2} \left[\exp \left(q \left(\frac{V + I R_s}{n_2 K T} \right) \right) - 1 \right] - \frac{V + I R_s}{R_p} \quad (I.12)$$

Ou,

I_{cc} (A) : le courant de court-circuit de la cellule dépendant de l'ensoleillement et de la température.

I_{d1} (A) : correspondant au courant de saturation de la diode1.

I_{d2} (A) : correspondant au courant de saturation de la diode2.

K (1.381×10^{-23} J/K) : la constante de Boltzmann.

T (K) : la température effective de la cellule.

q (1.602×10^{-19} C) : la charge de l'électron.

n_1 : le facteur de non idéalité de la jonction de la diode1.

n_2 : le facteur de non idéalité de la jonction de la diode2.

I (A) : le courant fourni par la cellule.

V (V) : la tension aux bornes de la cellule.

R_p (Ω) : la résistance de shunt caractérisant les courants de fuites de la jonction.

R_s (Ω) : la résistance série représentant les diverses résistances des contacts et de connexions.

I.5. Le passage de la cellule au module [41]

La recherche sur la conception de cellules et de modules PV vise à fournir des technologies qui réduisent les coûts de l'électricité solaire en améliorant l'efficacité PV et en réduisant les coûts de fabrication tout en maintenant ou en augmentant la durée de vie des modules. Cette recherche ouvrira le marché solaire à des produits plus diversifiés en étudiant et en affinant des technologies qui en sont à des stades de développement plus précoces.

I.5.1. Le module photovoltaïque [42]

Aussi appelé panneaux solaires, un module solaire est un panneau photovoltaïque unique qui est un assemblage de cellules solaires connectées. Les cellules solaires absorbent la lumière du soleil comme source d'énergie pour produire de l'électricité. Un réseau de modules est utilisé pour alimenter les bâtiments en électricité.

Les modules photovoltaïques sont constitués de nombreuses cellules photovoltaïques individuelles interconnectées. Pour garantir une inclinaison correcte des modules et leur orientation vers le soleil, ils sont logés dans des structures de support. Chaque module dispose de deux bornes de sortie qui collectent le courant généré et le transfert aux systèmes de gestion d'une centrale solaire.

L'**efficacité** d'un module photovoltaïque est quantifiée comme le rapport entre la puissance électrique sortant des bornes et la puissance des rayons du soleil frappant la surface du module. La valeur standard utilisée pour indiquer le rayonnement solaire est de 1 000 watt/m². Si chaque mètre carré est frappé par 1 000 watts de lumière solaire, le pourcentage d'énergie réellement converti en électricité utilisable est ce qui constitue l'efficacité. La **durée de vie moyenne** d'un module photovoltaïque est d'environ 30 ans.



Figure I.16. Un module photovoltaïque.[42]

I.5.2. Les caractéristiques d'un module photovoltaïque [43]

Le panneau solaire photovoltaïque étant une association de cellules solaires, sa caractéristique $I(V)$ est directement liée à celle de la cellule de base, il est caractérisé par la tension en circuit ouvert V_{co} et le courant de court-circuit I_{cc} .

Le nombre d'électrons libérés par une cellule, pour une unité de temps donnée, dépend du flux de photons arrivant sur celle-ci, alors que le courant de sortie d'un panneau solaire dépendra donc:

- De l'ensoleillement ;
- De l'orientation du module par rapport au soleil (un panneau perpendiculaire aux rayons du

soleil reçoit le plus grand flux de photons) ;

- Du nombre de circuits de cellules montées en parallèle.

La puissance maximale est obtenue en un point qui dépend de la température et de l'intensité de l'éclairement, elle est exprimée en watt crête (Wc) et elle sert à déterminer le rendement nominal du panneau.

L'efficacité du module photovoltaïque (PV) est une note attribuée à votre module pour déterminer la quantité de lumière solaire qu'il absorbe et convertie en électricité utilisable. Ce processus est très important pour comprendre la quantité d'énergie que vous recevrez des panneaux. Si la valeur nominale du module est supérieure, vous aurez par la suite besoin de moins de panneaux.

I.5.3. La protection d'un module photovoltaïque [45]

Une installation photovoltaïque est destinée à produire de l'énergie électrique pendant des années. Il est donc indispensable d'ajouter des protections électriques aux modules pour éviter des pannes destructrices liées à l'association en série et en parallèle des cellules. Pour cela, deux types de protections classiques sont utilisés:

A. La diode anti-retour [46]

Empêche la circulation d'un courant négatif dans les GPV lorsque plusieurs modules sont connectés en parallèle. Cette diode est indispensable lorsque la charge est une batterie pour qu'elle ne débite pas sur le module PV pendant la nuit.

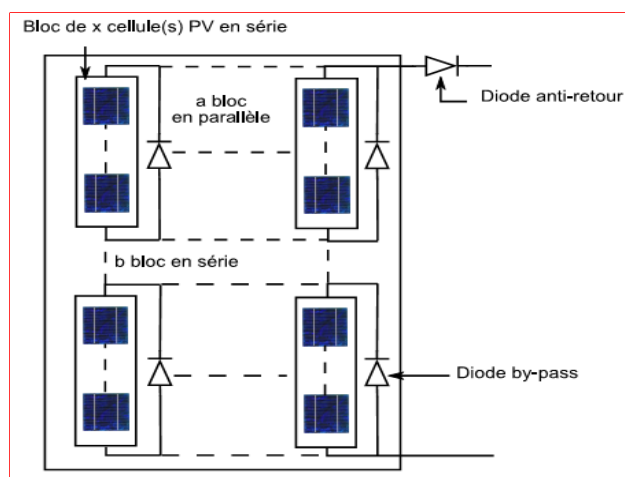


Figure I.17 : protection des cellules contre la tension inverse.[46]

B. Les diodes by-pass [47]

Servent à isoler un ensemble de cellules lorsque l'éclairement n'est pas homogène pour éviter l'apparition de points chauds et la destruction des cellules mal éclairées. La figure montre l'architecture d'un panneau photovoltaïque avec les diodes de protection, et la mise en évidence

du courant de circulation dans le cas de la défaillance d'une cellule.

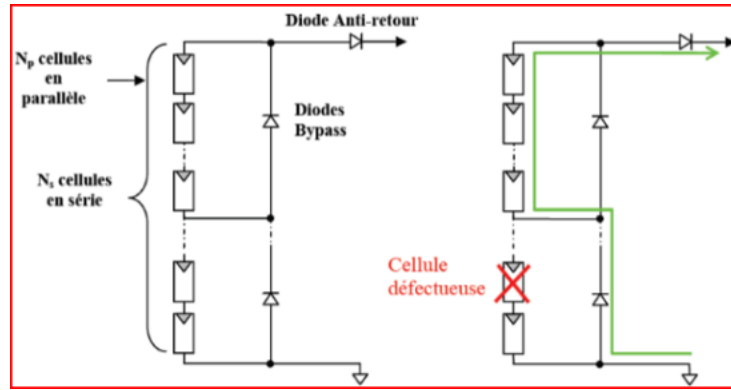


Figure I.18 : protection des modules par des diodes.[47]

I.6. Energie [48]

Une caractéristique fondamentale d'un système photovoltaïque est que l'électricité n'est produite que lorsque la lumière du soleil est disponible. Pour les systèmes dans lesquels le photovoltaïque est la seule source de production, le stockage est généralement nécessaire car une correspondance exacte entre la lumière solaire disponible et la charge est limitée à quelques types de systèmes - par exemple l'alimentation d'un ventilateur de refroidissement. Dans les systèmes hybrides ou connectés au réseau, où les batteries ne sont pas intrinsèquement nécessaires, elles peuvent être avantageusement incluses pour l'adaptation de la charge ou le conditionnement de l'alimentation.

Le type de stockage de loin le plus courant est le stockage chimique, sous la forme d'une batterie, bien que dans certains cas, d'autres formes de stockage puissent être utilisées. Par exemple, pour un petit stockage à court terme, un volant d'inertie ou un condensateur peut être utilisé pour le stockage, ou pour des systèmes photovoltaïques spécifiques à usage unique, tels que le pompage d'eau ou la réfrigération, le stockage peut être sous forme d'eau ou de glace.

I.6.1. Batterie [49]

Dans tout système photovoltaïque comprenant des batteries, les batteries deviennent un élément central du système global, ce qui affecte considérablement le coût, les exigences de maintenance, la fiabilité et la conception du système photovoltaïque. En raison de l'impact important des batteries dans un système photovoltaïque autonome, la compréhension des propriétés des batteries est essentielle pour comprendre le fonctionnement des systèmes photovoltaïques. Les paramètres de batterie importants qui affectent le fonctionnement et les performances du système photovoltaïque sont les exigences de maintenance de la batterie, la durée de vie de la batterie, la puissance disponible et l'efficacité.

Une batterie idéale pourrait être chargée et déchargée indéfiniment sous des régimes de charge/décharge arbitraires, aurait un rendement élevé, une densité d'énergie élevée, une faible

autodécharge et serait peu coûteuse. Celles-ci sont contrôlées non seulement par le choix initial de la batterie mais également par son utilisation dans le système, notamment son mode de charge et de décharge et sa température.



Figure I.19 : La batterie d'un système PV.[49]

I.7. Les régulateurs [50]

Les régulateurs solaires, également connus sous le nom de contrôleurs de charge solaire, régulent le courant de charge du panneau solaire pour fournir la charge la plus efficace aux batteries sans les surcharger. Ils empêchent également les batteries de se réinjecter dans le panneau solaire la nuit.



Figure I.20 : Un régulateur d'un système PV. [50]

I.8. Les onduleurs [51]


Un onduleur est l'un des équipements les plus importants d'un système d'énergie solaire. C'est un appareil qui convertit l'électricité en courant continu (CC), qui est ce que génère un panneau solaire, en électricité en courant alternatif (CA), qui est utilisée par le réseau électrique. En courant continu, l'électricité est maintenue à tension constante dans un sens. En courant alternatif, l'électricité circule dans les deux sens dans le circuit lorsque la tension passe du positif au négatif. Les onduleurs ne sont qu'un exemple d'une classe d'appareils appelés électronique de puissance qui régulent le flux d'énergie électrique.



Figure I.21 : Un onduleur d'un système PV. [51]

I.9. Conclusion

Ce premier chapitre, il a été constaté qu'un système photovoltaïque est une technologie développée pour transformer l'énergie des rayons du soleil en électricité grâce à des panneaux solaires. Il comprend dans la majorité des cas une structure d'une cellule solaire, un stockage de l'énergie électrique par l'intermédiaire des batteries d'accumulateurs, un contrôleur, un régulateur, et un onduleur, qui est l'un des équipements les plus importants d'un système d'énergie solaire.



Chapitre II
Généralité sur les différents
Types d'onduleurs et
Les différentes techniques de
commandes

II.1. Introduction

Dans plusieurs applications industrielles, on est souvent préoccupé d'avoir une alimentation stable et réglable. Cette tension peut être obtenue au moyen des onduleurs qui éliminent les fluctuations de la tension continue d'entrée, en maintenant la relation tension / fréquence constante tout en réglant l'amplitude de la tension requise par la charge.

Les conversions DC/AC consistent à générer une ou plusieurs tensions(s) alternative(s), le plus souvent sinusoïdale à partir d'une tension continue. Ceci permet principalement d'alimenter des appareils adaptés aux tensions réseaux à partir de batteries ou de tensions redressées, ou encore de piloter, par variation de fréquence, un moteur AC à vitesse variable. Les circuits qui réalisent ces opérations sont appelés « onduleur » [52].

Actuellement il existe différentes stratégies de commande, selon le type de convertisseur et les outils utilisés pour la conception de la commande. Malgré leur diversité, mais leurs objectifs restent toujours convergents. En effet, ces différentes techniques de commandes visent principalement à réguler en fréquence et en amplitude la tension ou le courant généré par le convertisseur. De plus, elles améliorent la qualité de l'énergie fournie par le convertisseur, cette amélioration est traduite par la minimisation de taux d'harmonique de la tension ou de courant générée. Par ailleurs ce second objectif dépend d'une stratégie à une autre [53].

Dans ce chapitre nous exposons la description, la modélisation d'un convertisseur statique (onduleur) et différentes stratégies de commande, qui diffèrent dans le concept et les performances.

II.2. Description du Convertisseur Continu-Alternatif (DC- AC)

L'onduleur de tension est un convertisseur statique constitué de cellules de commutation. Ces cellules de commutation sont déterminées par les niveaux de la puissance et la fréquence de commutation figure (II.1). En règle générale, plus les composants sont rapides, plus la puissance commutée est faible et inversement. A titre indicatif, les transistors MOSFET, sont considérés comme des composants très rapides mais de puissance relativement faible. Les transistors bipolaires sont moins rapides que les transistors MOSFET mais d'avantage plus puissants (quelques kHz à une dizaine de kW). Les transistors IGBT sont des composants de gamme standard (jusqu'à 20kHz à une des dizaines de kW). Les thyristors GTO destinées à l'application des grandes puissances et commutent très lentement et du type commandable à l'ouverture et à la fermeture ; ce qui n'est pas le cas pour le thyristor classique [65]. Il permet d'imposer à la machine un système de tensions alternatives triphasées réglables en fréquence et en valeur efficace grâce à des lois appropriées de commande des semi-conducteurs [54].

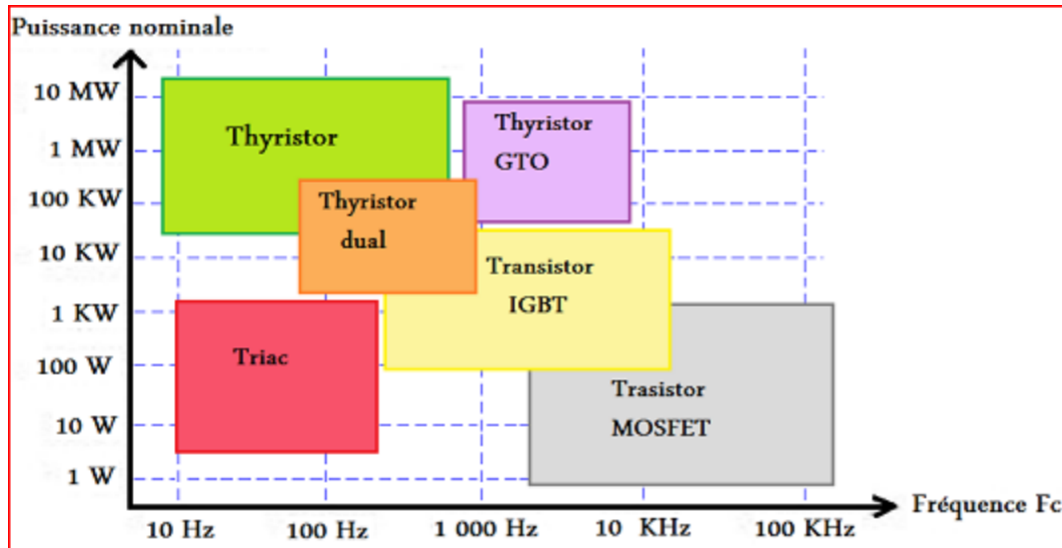


Figure. II.1. Digramme puissance-fréquence des composants Miller.[54]

II.3. Définitions des Onduleurs

Un onduleur est un convertisseur statique capable de transformer l'énergie d'une source à tension continue en une énergie à tension alternative. Il existe plusieurs structures d'onduleurs, dont chacune correspond à un type d'application déterminé permettant des performances recherchées [55].

Les onduleurs sont utilisés afin de :

- ❖ Soit fournir des tensions ou courants alternatifs de fréquence et amplitudes variables.
- ❖ Soit fournir une ou des tensions alternatives de fréquence et d'amplitude fixes.

En fait, cette conversion d'énergie est satisfaite au moyen d'un dispositif de commande (semi-conducteurs). Il permet d'obtenir aux bornes du récepteur une tension alternative réglable en fréquence et en valeur efficace, en utilisant ainsi une séquence adéquate de commande. On distingue les onduleurs de tension et les onduleurs de courant, en fonction de la source d'entrée continue : source de tension ou source de courant [56].

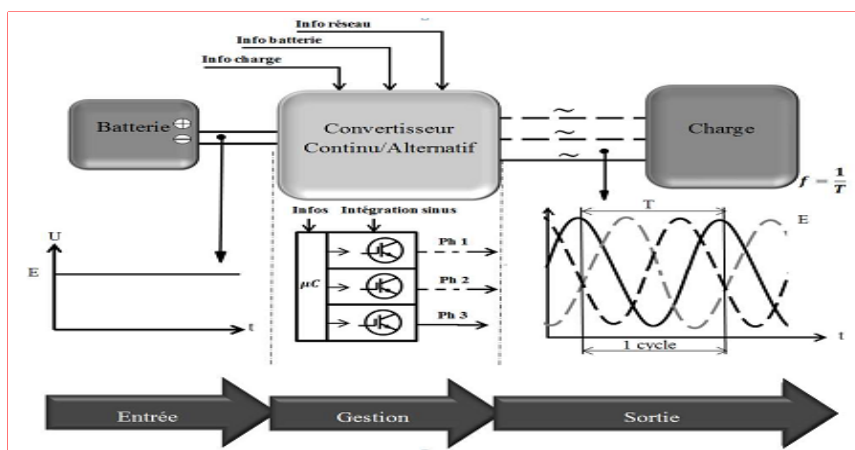


Figure. II.2. Schéma de Conversion DC/AC et grandeur de sortie.[56]

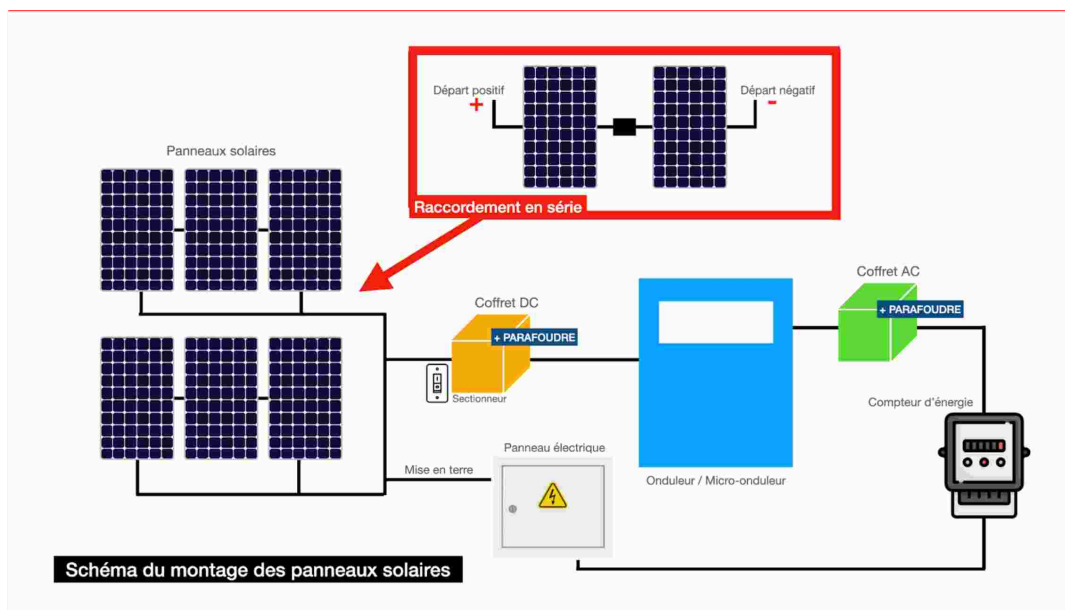
II.4. Classification des onduleurs

Une première classification peut être faite en distinguant :

II.4.1. Selon la réversibilité

II.4.1.1. Onduleur autonome (non raccordé au réseau électrique)

On appelle onduleur autonome, un système qui délivre une tension avec une fréquence soit fixe, soit ajustable par l'utilisateur en épuisant de l'énergie d'un circuit auxiliaire pour la



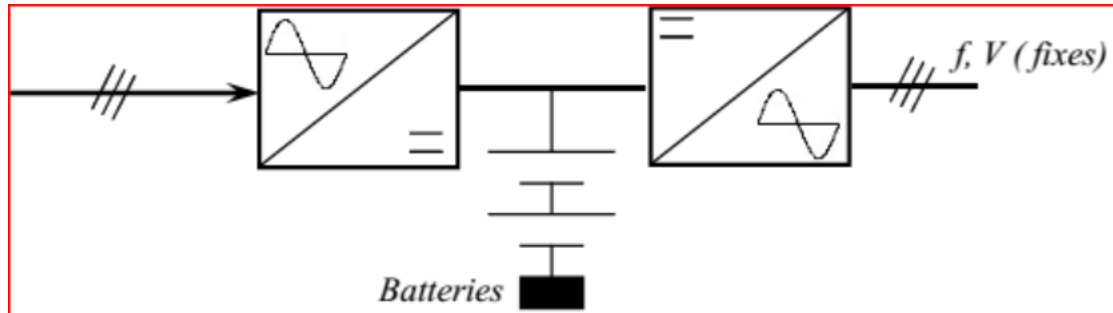
commutation des thyristors ou l'autre semi-conducteurs [57].

Figure. II.3. Schéma d'un système photovoltaïque non raccordé au réseau.[57]

Parmi les domaines d'emploi des onduleurs autonomes on trouve principalement [58]:

II.4.1.1.1. Les onduleurs a fréquence fixe

Utilisé comme source de secours ou alimentation sans coupure, Il est alimenté le plus souvent à partir d'une batterie d'accumulateurs (cas de PC, salles d'informatique,...) comme il est



montré sur la figure. II.4 [59]:

Figure. II.4. Alimentation sans coupure.[59]

Il est utilisé aussi pour l'alimentation des charges inductives (fours à induction, ...) mais dans ce cas tous les onduleurs sont monophasés.

II.4.1.1.2. Les onduleurs à fréquence variable

Dans ce cas il est utilisé pour la variation de vitesse des moteurs asynchrones triphasés,

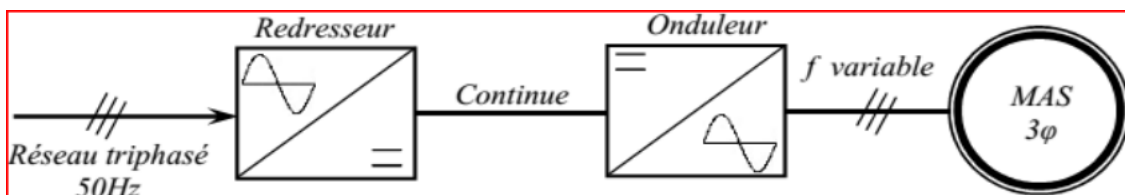


figure.II.5 [59] :

Figure. II.5. Convertisseur de fréquence.[59]

II.4.1.2. Onduleurs non autonome (raccordés aux réseaux) [57]

Un onduleur réseau a pour principe de transformer une tension continue en une tension alternative, mais dans ce cas avec une fréquence et une valeur équivalente à celle du réseau. En effet, l'onde sera obligatoirement sinusoïdale et que cette tension alternative qui va charger le réseau, devra se mettre en phase avec ce dernier et répondre à un ensemble de prescriptions et d'impératifs de sécurité plus contraignants. Les onduleurs couplés au réseau utilisent deux techniques de génération du signal alternatif :

- ❖ Soit la sinusoïde est produite par l'onduleur qui utilise le passage par zéro du réseau pour se synchroniser.
- ❖ Soit le réseau est utilisé comme source du signal et de synchronisation. Certains onduleurs utilisent un transformateur pour isoler les panneaux solaires du réseau.

D'autres, possède un système de test en continu du courant délivré par les panneaux. En cas de fuite, l'onduleur s'arrête pour éviter tout court-circuit entre les panneaux et le réseau. Chaque onduleur utilise pour son fonctionnement interne, une certaine quantité d'énergie fournie, soit par les panneaux photovoltaïques, soit par le réseau ce qui contribue à influencer les pertes de rendement annuelles. Pour la sécurité du système, les compagnies d'électricité exigent en général une surveillance de la tension et de la fréquence produites et une coupure très rapide en cas d'absence de réseau. Il faut noter que la limitation de puissance à 3,5 kW par phase implique une limitation du courant produit. Enfin, les onduleurs réseau sont de type MPPT (Maximum Power Point Tracking) et leur microprocesseur peut faire varier le point de puissance maximale du générateur en direction de la tension limite et ainsi limiter la puissance à l'entrée.

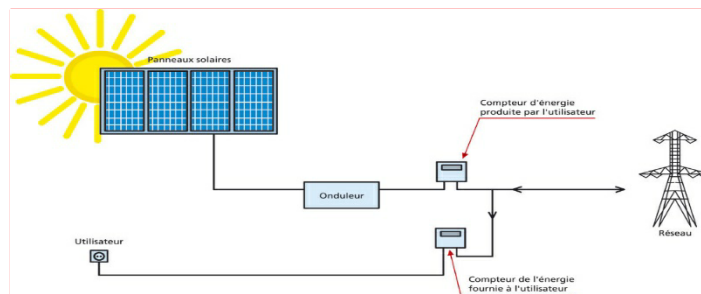
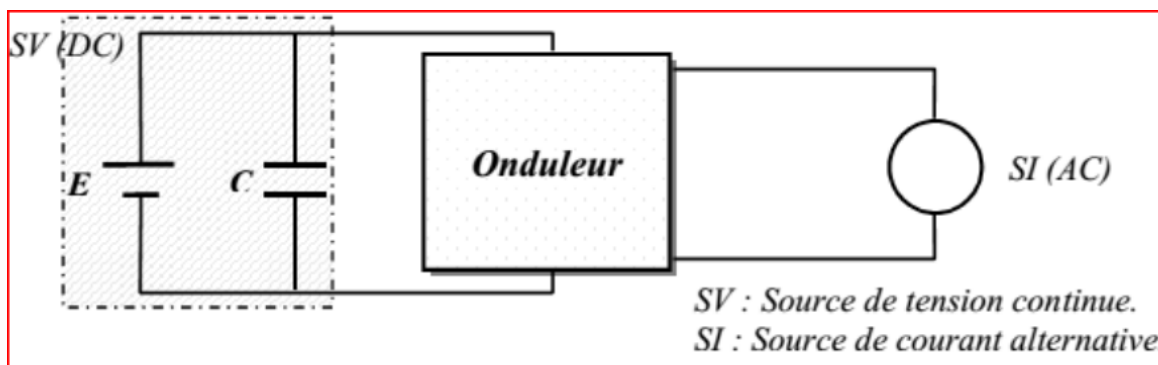


Figure. II.6. Système photovoltaïque connecté au réseau.[57]

II.4.2. Selon la nature de l'alimentation :

II.4.2.1. Onduleur de tension

Un onduleur de tension est alimenté par une source de tension continue (source d'impédance interne négligeable), la tension v n'est pas affectée par les variations du courant i qui la traverse. La tension de la sortie de l'onduleur est fonction de la valeur moyenne imposée par le côté



continu. Le courant i dépend de la charge placée du côté alternatif [60].

Figure. II.7. Représentation schématique d'un onduleur de tension.[60]

II.4.2.2. Onduleur de courant

Un onduleur de courant (souvent appelé commutateur de courant) est alimenté par une

source de courant continu, c'est-à-dire par une source d'inductance interne si grande que le courant i qui la traverse ne peut être affecté par les variations de la tension v à ses bornes [60].

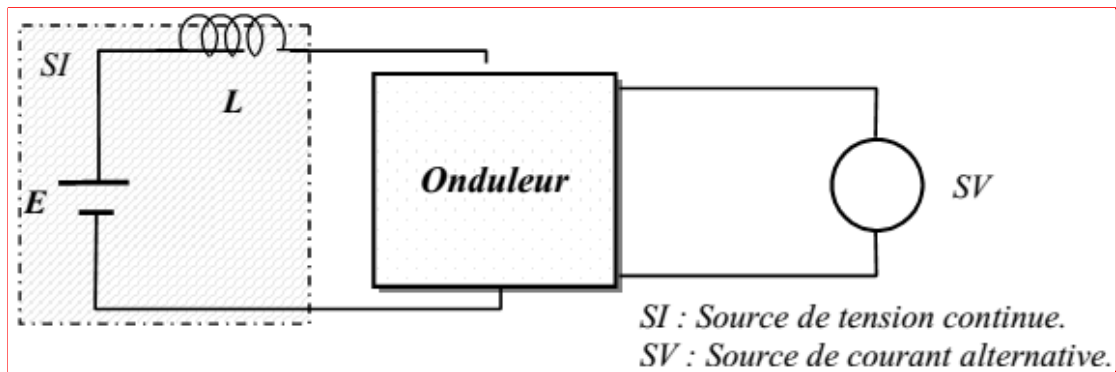


Figure. II.8. Représentation schématique d'un onduleur de courant.[60]

II.4.3. Selon la nature de la charge

II.4.3.1 Les onduleurs monophasés

Pour obtenir une tension alternative à partir d'une tension continue en utilisant deux interrupteurs, il faut un point milieu, soit du côté de la sortie alternative, soit du côté de l'entrée continue, cela correspond à :

- 1) L'onduleur monophasé avec transformateur de sortie à point milieu appelé onduleur push-pull. Si on veut varier la largeur relative des créneaux formant les alternances de la tension de sortie, il faut quatre interrupteurs c'est : l'onduleur monophasé en pont [61].

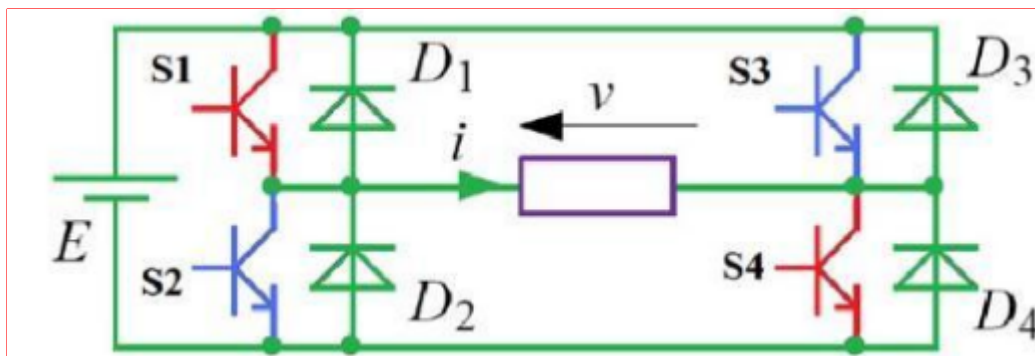
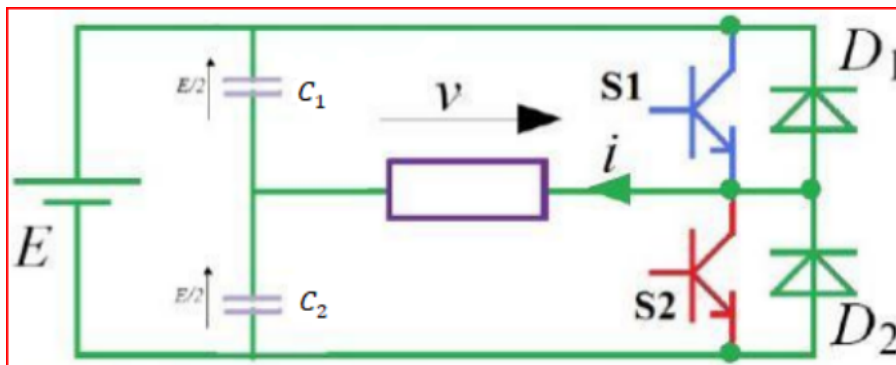


Figure. II.9. Montage d'un onduleur en pont complet.[61]

➤ Principe de fonctionnement

Nous supposons que les interrupteurs s_1 et s_4 sont fermés pendant la première demi-période rendant la tension u égale $+E$, les interrupteurs s_2 et s_3 sont fermés pendant l'autre demi période rendant u égale à $-E$. Cette commande s'appelle la commande symétrique. Il existe d'autres types de commande tels que, la commande décalée et la commande MLI [62]. Nous signalons que les diodes montées en tête bêche avec les transistors ou les thyristors sont très importantes pour la protection de ces derniers et évacuer l'énergie stockée dans les selfs de la Charge.



2) L'onduleur monophasé avec diviseur capacitif à l'entrée appelé onduleur en demi-pont.

Figure. II.10. Montage d'un onduleur en demi-pont.[62]

➤ Principe de fonctionnement

On dispose d'une source unique de tension et le point milieu est réalisé par la mise en série de deux capacités à valeur élevée. Ces deux capacités sont traversées par les courants de la charge, lorsque le transistor S_1 conduit, la capacité C_1 se décharge et la capacité C_2 se charge, la tension $E/2$. De même lorsque S_2 conduit la capacité C_2 se décharge et la capacité C_1 se charge, la tension $-E/2$ [63].

II.4.3.2. Onduleur triphasé

L'onduleur triphasé en pont est constitué de trois cellules de commutation (figure II.11). On retrouve évidemment une structure différentielle dans laquelle les tensions triphasées sont obtenues de façon composée sur les trois bornes de sortie. L'onduleur triphasé doit évidemment, en régime normal, délivrer un système de tension dont les composantes fondamentales forment un système équilibré.[64]

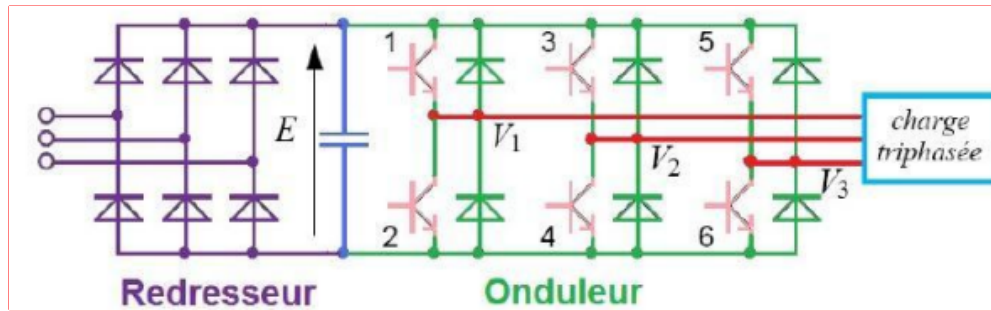


Figure. II.11. Schéma électrique d'un onduleur de tension triphasé.

➤ Principe de fonctionnement de l'onduleur triphasé

La représentation schématique de l'onduleur est fournie pour assurer la continuité des courants de sortie alternatif I_a , I_b et I_c les interrupteur S_1 et S_2 , S_3 et S_4 , S_5 et S_6 doivent être complémentaire deux à deux et on définit $S_i = (T_i, D_i)$, et pour que les tensions de sortie V_a , V_b et V_c soient identiques à un tiers de la période T de leur fondamental près, il faut commander chaque demi pont avec un retard de $T/3$ sur le précédent. En commande pleine onde on ferme donc:

- S_1 pour $\omega t = 0$ et S_2 pour $\omega t = \pi$.
- S_3 pour $\omega t = 2\pi/3$ et S_4 pour $\omega t = \pi + 2\pi/3$.
- S_5 pour $\omega t = 4\pi/3$ et S_6 pour $\omega t = \pi + 4\pi/3$. [65]

II.5. Critère de choix d'onduleur :

- ❖ Premier critère de choix d'un onduleur : sa puissance

La puissance est le premier critère de choix d'un onduleur. En effet, un onduleur doit avoir une puissance suffisante pour suppléer une panne de courant. La puissance d'un onduleur est exprimée en Volts Ampères (VA). La conversion rapide et approximative des V.A en watts est obtenue par le calcul suivant : Nombre de V.A = Nombre de Watts/0,66. Pour savoir la puissance dont on a besoin, on fait la somme des consommations de tout le matériel qui doit être connecté à l'onduleur.

- ❖ Second critère de choix : le type de défaillance électrique

Pour choisir un onduleur, il faut aussi avoir en tête le type de problème qu'il faudra régler. Ainsi, si on veut pallier aux coupures de courant, il est possible d'utiliser l'un des trois types d'onduleurs. Pour faire face aux chutes de tension.

- ❖ Troisième critère de choix : le type d'utilisation

Le type d'utilisation est également un critère important, sinon le plus important, pour choisir un onduleur. Chaque type d'onduleur convient à une catégorie d'activités en particulier.) [66].

II.6. Domaines d'application

Parmi les nombreux domaines d'emploi des onduleurs autonomes, on trouve Principalement Les onduleurs à fréquence fixe à commutation forcée : Alimentés le plus souvent Par une batterie d'accumulateur, ils jouent d'ordinaire le rôle d'alimentation de sécurité, ils Constituent à ce titre, le principe déboucle actuel des onduleurs autonomes.

Les onduleurs à fréquence variable à commutation forces : Alimentés à partir du réseau Industriel par l'intermédiaire d'un montage redresseur, ils délivrent une tension de fréquence et de valeurs efficaces nécessaires pour faire tourner à vitesse variable un moteur à courant alternatif.

- ❑ La variation de la vitesse

La vitesse d'un moteur synchrone est fixée par la pulsation des courants statiques. Pour changer de vitesse il faut donc changer la fréquence des tensions d'alimentation. Il faut donc

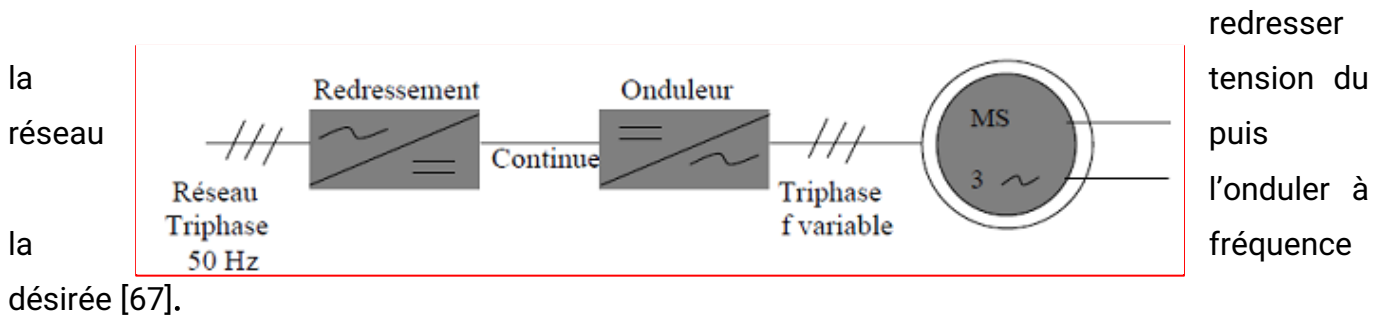


Figure. II.12. Variations de vitesse de moteur synchrone.[67]

- ❑ Transfert d'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes

La France fournit de l'énergie électrique à la Grande-Bretagne, mais la fréquence du réseau anglais est 60

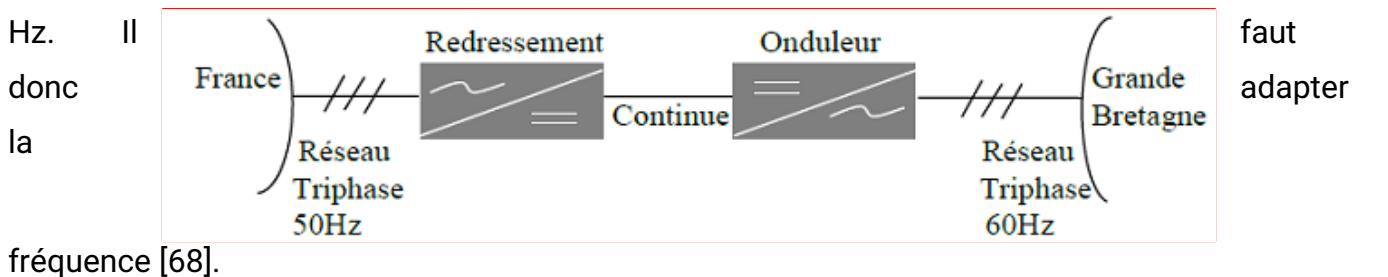
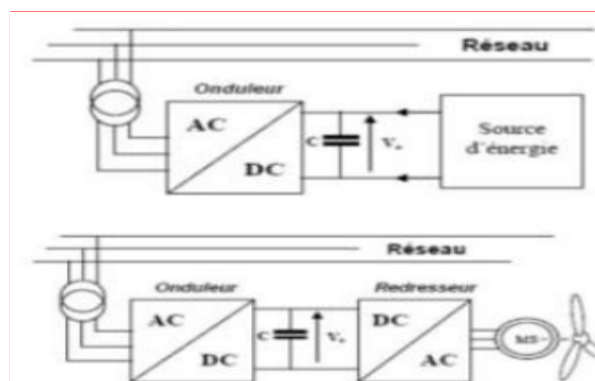


Figure. II.13. Transfert

Alimentation de Pour contrarier les tensions parasites informatiques.



d'énergie.[68]

sûreté microcoupures ou les dans le système

Figure. II.14. Alimentation de sureté.[68]

- ❑ Les convertisseurs de tension continue/continue à découpage : la tension continue est d'abord ondulée en haute fréquence (quelques dizaines ou centaines de kHz), puis appliquée à un transformateur en ferrite et enfin redressée.
- ❑ Dans le domaine de la soudure à l'arc les onduleurs sont souvent appelés inverters. Les onduleurs dans les postes à l'arc vont générer un courant alternatif monophasé à moyenne fréquence (entre 5 kHz et 20 kHz), ce qui permet d'utiliser des transformateurs élévateurs de courant nettement plus petits et légers que ceux employés traditionnellement à la fréquence du réseau, soit 50 Hz ou 60 Hz.
- ❑ Le raccord solaires au électrique. des panneaux réseau

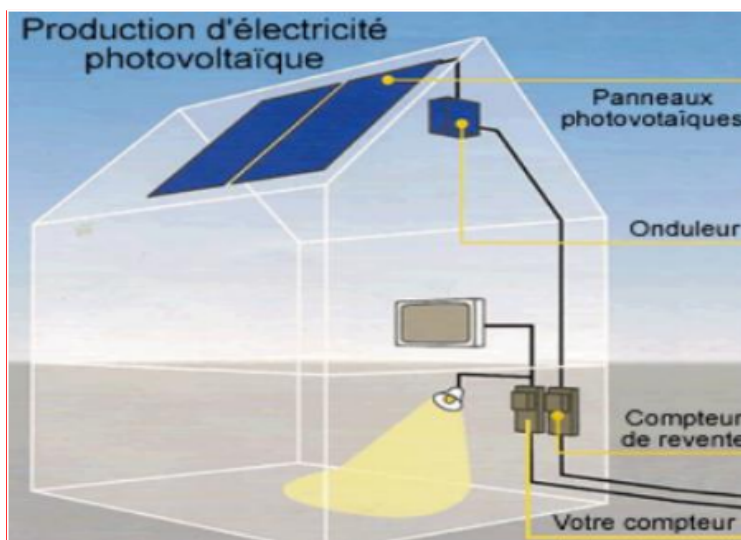


Figure. II.15. Raccord de panneaux solaire.[68]

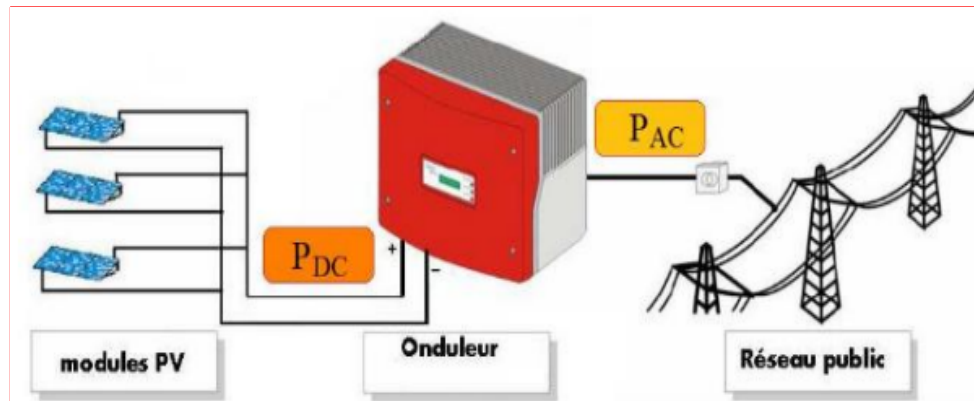


Figure. II.16. Conversion de puissance.[68]

II.7. Les avantages d'onduleurs

- Le principal avantage de l'onduleur est de protéger des installations électriques contre les coupures brusques ou intempestives du courant. Ces coupures peuvent endommager ces installations, faire laisser inachevé un travail qu'on a commencé où faire perdre des données ou des textes en cours de traitement.
- Le coût de mise en place est faible.
- Le montage de l'onduleur centralisé est vraiment simple.
- L'usage est simple et sans inconvénients majeurs.
- En cas de panne, le service après-vente est facile à réaliser car tout est centralisé.
- La possibilité d'augmenter la productivité globale de l'installation grâce à l'ajout de strings.
- La compatibilité avec les batteries de nombreuses marques.

II.8. Les inconvénients d'onduleurs

- En cas de détérioration du câblage, la sécurité de l'édifice peut être compromise avec un risque d'incendie.
- En cas de problème sur panneaux, la perte de production est probable.
- Le dimensionnement de l'onduleur centralisé doit-être fait de manière professionnelle.
- La durée de vie du matériel (environ 10 ans) et les garanties sont courtes (de 5 à 7 ans)[69].

II.9. Modélisation de l'onduleur de tension

Pour modéliser l'onduleur de tension, figure. II.18, on considère son alimentation comme une source parfaite, supposée être constituée de deux générateurs de f.é.m égale à $U_0/2$ connectés entre eux par un point noté n_0 [70]. Il est à noter que les interrupteurs d'un même bras ne doivent jamais être fermés simultanément. Chaque interrupteur n'est donc enclenché qu'une

seule fois par période, c'est à dire que si : $S_i=1$, alors $S_i'=0$ avec $i = a, b, c$.

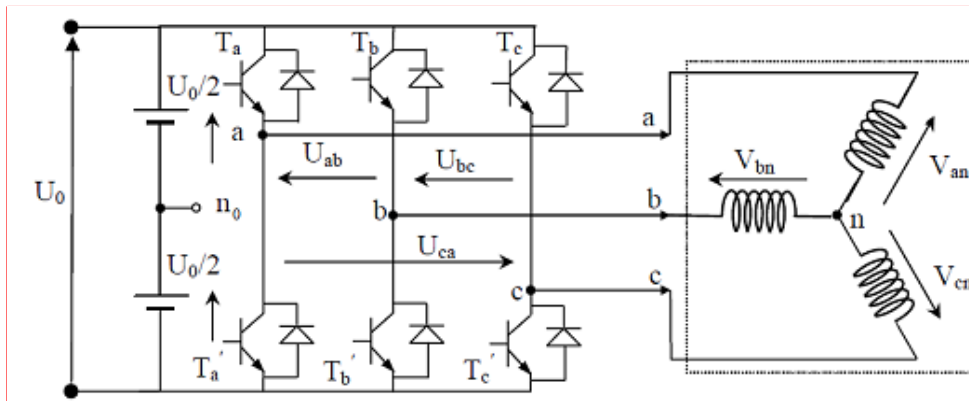


Figure. II.17. Onduleur triphasé de tension en pont.[70]

La commutation entre les interrupteurs est supposée instantanée et les chutes de tension à leurs bornes sont considérées négligeables.

II.9.1. Hypothèses simplificatrices

On considère les hypothèses simplificatrices suivantes [71] :

- La commutation des interrupteurs est instantanée.
- La chute de tension aux bornes des interrupteurs est négligeable.
- La charge est triphasée, équilibrée et couplée en étoile avec un neutre isolé.

II.9.2. Détermination des tensions de sortie de l'onduleur

Les interrupteurs S_1 et S_2 , S_3 et S_4 , S_5 et S_6 , doivent être complémentaires deux à deux, quel que soit la loi de commande à adopter, il est possible d'établir des relations générales que nous utiliserons pour la commande MLI ; quels que soient les courants, les interrupteurs imposent les tensions entre les bornes de sortie a, b, c et le point milieu (fictif) 'O' de la source de tension [34]. L'onduleur est commandé à partir des grandeurs logiques S_i , on a :

- si $S_i=1$, alors S_1 est fermée et S_2 est ouvert,
- si $S_i=0$, alors S_1 est ouvert et S_2 est ferme Les tensions composées sont obtenues à partir des sorties de l'onduleur :

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{an_0} - V_{bn_0} \\ U_{bc} = V_{bn_0} - V_{cn_0} \\ U_{cn} = V_{cn_0} - V_{an_0} \end{cases} \quad (II.1)$$

Les tensions simples des phases de la charge issues des tensions composées ont une somme nulle. A cause de l'équilibre du récepteur : $I_a + I_b + I_c = 0$, entraîne $V_a + V_b + V_c = 0$.

Donc on peut écrire :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{1}{3}(U_{ab} - U_{ca}) \\ V_{bn} = \frac{1}{3}(U_{bc} - U_{ab}) \\ V_{cn} = \frac{1}{3}(U_{ca} - U_{bc}) \end{cases} \quad (II.2)$$

Elles peuvent s'écrire à partir des tensions de sorties de l'onduleur en introduisant la tension du neutre de la charge par rapport au point de référence n_0 .

$$\begin{cases} V_{an} + V_{nn_0} = V_{an_0} \\ V_{bn} + V_{nn_0} = V_{bn_0} \\ V_{cn} + V_{nn_0} = V_{cn_0} \end{cases} \quad (II.3)$$

Donc, on peut déduire que :

$$V_{nn_0} = \frac{1}{3}(V_{an_0} + V_{bn_0} + V_{cn_0}) \quad (II.4)$$

L'état des interrupteurs supposés parfaits \Leftrightarrow Si (1 ou 0) $\{i=a, b, c\}$ on a :

$$V_{in_0} = S_i U_0 - \frac{U_0}{2} \quad (II.5)$$

On a donc :

$$\begin{cases} (S_a - 0.5)U_0 = V_{an_0} \\ (S_b - 0.5)U_0 = V_{bn_0} \\ (S_c - 0.5)U_0 = V_{cn_0} \end{cases} \quad (II.6)$$

En remplaçant (II.3) dans (II.2), on obtient :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{2}{3}V_{an_0} - \frac{1}{3}V_{bn_0} - \frac{1}{3}V_{cn_0} \\ V_{bn} = \frac{2}{3}V_{bn_0} - \frac{1}{3}V_{an_0} - \frac{1}{3}V_{cn_0} \\ V_{cn} = \frac{2}{3}V_{cn_0} - \frac{1}{3}V_{bn_0} - \frac{1}{3}V_{an_0} \end{cases} \quad (II.7)$$

En remplaçant (II.5) dans (II.6), on obtient :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} U_0 \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.8})$$

Donc l'onduleur de tension peut être modélisé par une matrice [T] assurant le passage continu alternatif selon la relation suivante :

$$[V_{AC}] = [T][U_0] \quad (\text{II.9})$$

Tel que

$$[T] = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \quad (\text{II.10})$$

Ou :

V_{AC} : Tension alternatif équilibrée.

U_0 : Tension continu.

[T] : Matrice de l'onduleur.

II.10. Les techniques de commande des onduleurs triphasés

Les onduleurs se pilotent via une commande fortement non linéaire. Ce non linéarité est dû à la structure des onduleurs composés d'IGBT qui ne se pilotent qu'en tout ou rien. Par conséquent il est nécessaire que la commande soit elle aussi en tout ou rien. La commande la plus classique des interrupteurs des onduleurs se fait par comparaison entre deux signaux. En effet cela force la commande à être binaire (soit 0 soit 1). Les signaux en questions se nomment modulante et porteuse. La modulante étant classiquement, la tension de référence divisée par la tension de bus et la porteuse est un signal triangulaire compris entre 0 et 1. La commande est alors générée ainsi : Si le modulant est plus grand que la porteuse alors la commande de l'interrupteur prend 1 et 0 sinon. Il est important de savoir que la modulante définie précédemment n'est pas la seule possible, et qu'il en existe un nombre très important.

Le principe de commande d'un onduleur est présenté sur la figure.II.19, qui est valable pour un bras de commutation [57].

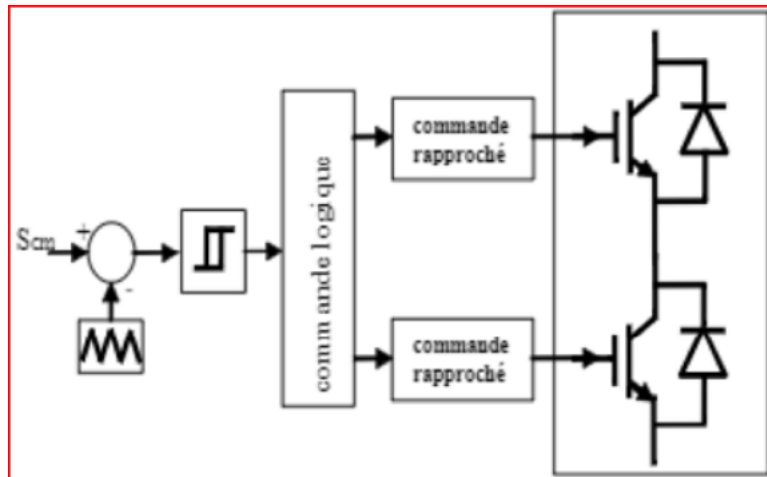


Figure. II.18. Le principe de commande du bras d'onduleur.[57]

II.10.1. Commande plein onde 180°

- La commande de chaque demi-pont est symétrique.
- Les commandes des demi ponts sont décalées de $T/3$ l'une par rapport à l'autre.
- Les interrupteurs s_1 et s_4 , s_2 et s_5 , s_3 et s_6 doivent être complémentaires deux à deux. L'ouverture et la fermeture des six interrupteurs déterminent six intervalles distincts. Durant chaque période des grandeurs de sortie. [72]

La figure.II.20 montre l'état des interrupteurs s_1 et s_2 , s_3 de l'onduleur triphasé.

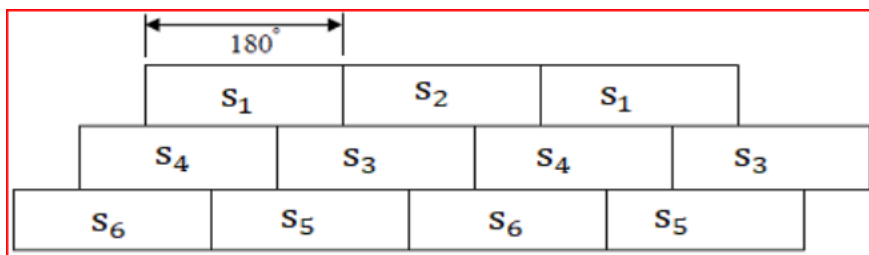


Figure. II.19. Commande 180°. [72]

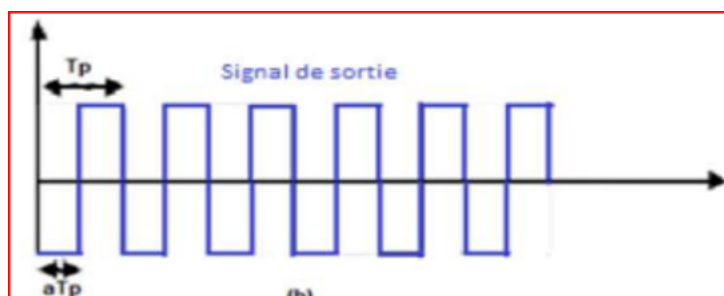


Figure. II.20. Forme des signaux de Commande plein onde 180°. [72]

II.10.2. Commande plein onde décalée 120°

Dans la commande 120° chaque interrupteur est commandé pour une durée d'un tiers d'une période. La fermeture d'un interrupteur ne coïncide pas avec l'ouverture de l'autre interrupteur située dans le même bras [72]. La commande des interrupteurs de deux bras différents est

décalée de 120° .

Chaque interrupteur est commandé pendant 120° Il y a un « trou » de 60° (ou 30°) entre les commandes de deux interrupteurs d'une même branche, (commande disjointe).

Les commandes des interrupteurs d'une branche sont décalées de 120° par rapport aux interrupteurs d'une branche voisine.

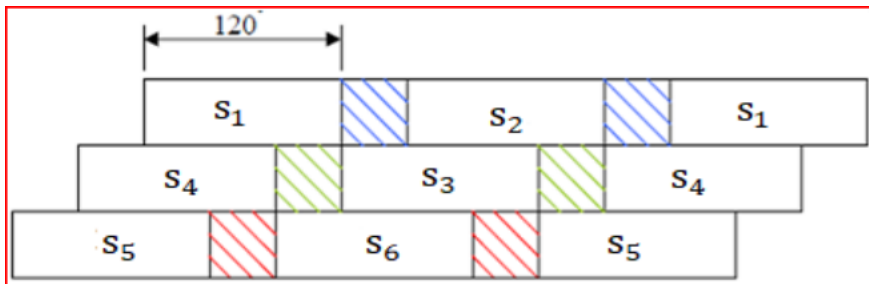


Figure. II.21. Commande 120° . [72]

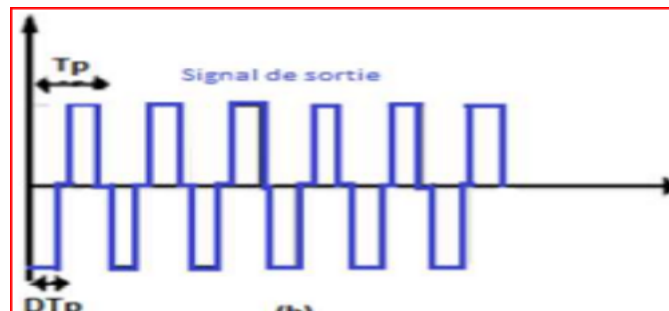


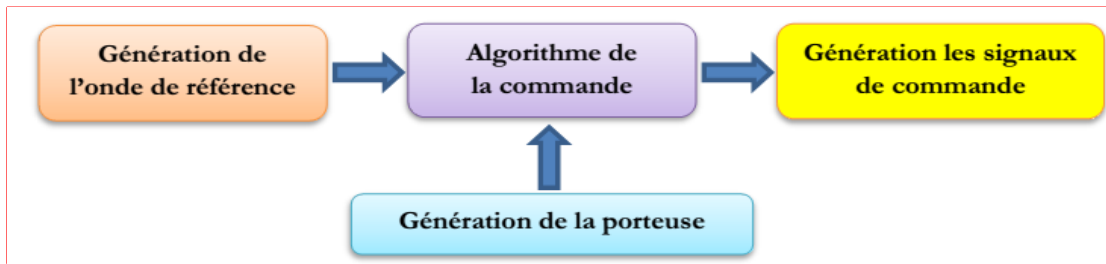
Figure. II.22. Signal de commande décalée. [72]

II.10.3. Commande par la modulation de largeur d'impulsion

La technique de modulation en largeur d'impulsion MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion ou PWM : Pulse Width Modulation) est l'essor et le fruit du développement de l'électronique de puissance à la fin du siècle dernier. Elle est le cœur du contrôle des convertisseurs statiques. Le choix de la technique MLI pour contrôler l'onduleur de tension est d'avoir une réponse rapide et des performances élevées. La MLI est composée d'impulsions dont la largeur dépend des choix effectués pour la stratégie de modulation [73]. Les méthodes MLI sont préférées en raison de leur fréquence de commutation fixe, de leur faible courant d'ondulation et de leurs caractéristiques de spectre harmoniques bien définies. Ces stratégies intègrent une "tension de sortie moyenne par cycle" égale à la tension de référence, en utilisant soit la technique sinusoïdale ou les méthodes numériques de programmation d'impulsion (pré-calculée). L'avantage caractéristique est qu'ils servent à générer une relation linéaire entre les tensions

de référence et de sortie dans une plage limitée.

Figure. II.23. Principe de la modulation de largeur d'impulsion MLI.[73]



II.10.3.1.

Modulation MLI Sinusoïdale (SPWM) : Triangulo-sinusoidale

La technique MLI sinusoïdale est une technique très utilisée en industrie et est largement passée en revues dans la littérature. Le principe de cette technique consiste à comparer un signal de référence (modulante) à une porteuse figure.II.25.

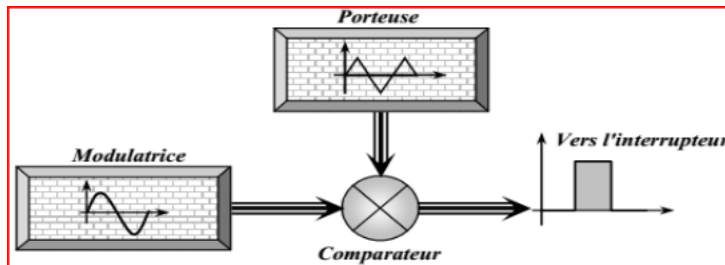


Figure. II.24. Schéma synoptique de la M.L.I.[73]

Le signal de référence représente l'image de la sinusoïde qu'on désire à la sortie de l'onduleur. Ce signal est modulable en amplitude et en fréquence. Quant à la porteuse, elle définit la cadence de la commutation des interrupteurs statiques de l'onduleur, c'est un

rapport

signal de haute fréquence par rapport au signal de référence.

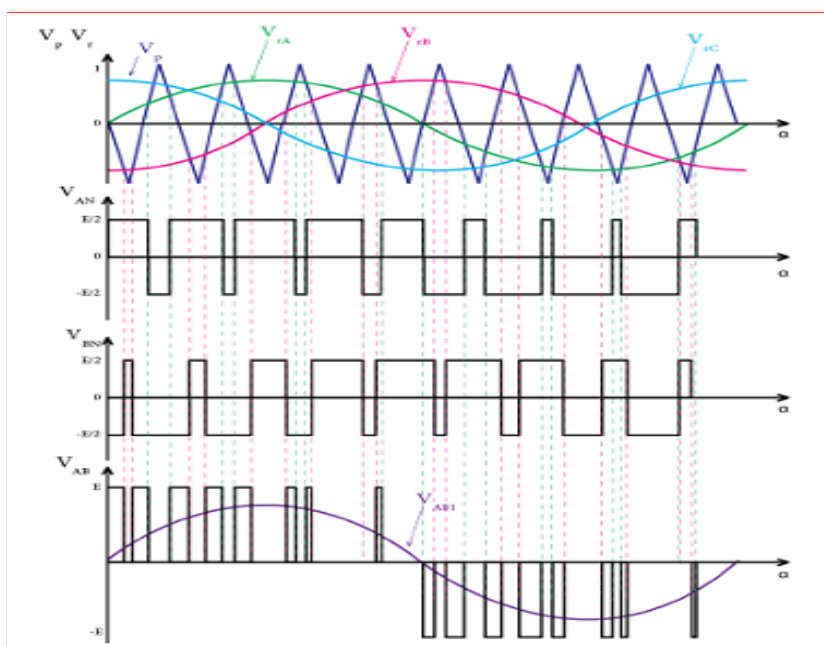


Figure. II.25. Courbes de signal de la porteuse, de référence et les tensions de sortie d'un Onduleur triphasé commandé en MLI sinus-triangle.

II.10.3.1.1. Caractéristiques de la modulation

Afin de comparer les résultats de différentes méthodes MLI, plusieurs indices de performance sont définis en fonction de l'analyse de fréquence. Ces analyses des tensions et des courants à l'entrée ou à la sortie de l'onduleur peuvent être réalisées avec les coefficients de la série de Fourier ou avec la transformée de Fourier.

- **Taux de modulation**

La largeur d'impulsion de technique MLI sinus-triangle dépend au ratio de signal de référence au signal triangulaire porteuse il est défini comme [74] :

$$M_a = \frac{A_r}{A_p} \quad (\text{II.11})$$

A_r : Amplitude de signal de référence.

A_p : Amplitude de signal de la porteuse (triangulaire) On peut exprimer l'amplitude d'harmonique fondamentale de tension simple d'un onduleur [75] :

$$V_{AN_1} = M_a \frac{A_r}{A_p} \quad (\text{II.12})$$

- **L'indice de modulation**

Il est défini comme étant le rapport de la fréquence de l'onde porteuse à celle de l'onde modulante [71] :

$$M_i = \frac{f_p}{f_m} \quad (\text{II.13})$$

f_p La fréquence du signal de porteuse triangulaire.

f_m La fréquence du signal de modulation.

- **Taux de distorsion harmonique totale (THD)**

Ce facteur nous donne une idée qualitative sur la similitude de forme d'onde réelle avec sa Composante fondamentale ; il est donné comme suit [57] :

$$\text{THD} = \frac{\sqrt{V_{\text{eff}}^2 - V_{\text{eff1}}^2}}{V_{\text{eff1}}} \quad (\text{II.14})$$

V_{eff} : La valeur efficace de la tension de sortie (V_s)

V_{eff1} : La valeur efficace de la première harmonique (fondamentale) de la tension de sortie.

II.10.3.2. Technique MLI pré-calculée

L'application des méthodes MLI dans différents systèmes industriels vise à améliorer les taux d'harmoniques, à réduire les pertes dans l'onduleur ou dans la charge, à réduire les pulsations de couple et les vibrations dans les applications des machines électriques [74]. Les

techniques de modulation sont des techniques qui déterminent les angles de commutation des interrupteurs en temps réel. Ces angles peuvent aussi se calculer de façon préalable et convenable, tenant compte du nombre des harmoniques de faible ordre que l'on désire éliminer ou pousser vers des fréquences plus élevées. Une fois les angles calculés, le motif de commande peut se générer préalablement et se mémoriser dans un EPROM pour commander les interrupteurs de l'onduleur. La technique MLI pré-calculée est basé sur la définition hors ligne optimale des instants de commutation pour éliminer les harmoniques indésirables d'ordre inférieur et contrôler la tension fondamentale. L'inconvénient de cette approche est l'informatique étendue. En comparaison avec MLI sinus-triangle ou MLI vectorielle, MLI pré-calculée peut offrir :

- Réduction de la fréquence de commutation de l'onduleur d'environ 50%
- Fonctionnement direct en sur-modulation fournissant plus de tension de sortie
- Réduction de l'ondulation du courant continu et élimination d'oscillations dans le filtre de sortie
- Mise en œuvre plus simple à partir d'une table de correspondance. Généralement, on utilise une onde qui présente une double symétrie par rapport au quart et à la demi-période comme montré sur la figure II.27. Cette onde est caractérisée par le nombre de créneaux ou d'impulsions par alternance. Que ce soit impair ou pair, ces angles suffisent pour déterminer la largeur de l'ensemble des créneaux [76].

Ces angles de commutation sont déterminés de telle façon à éliminer certains harmoniques

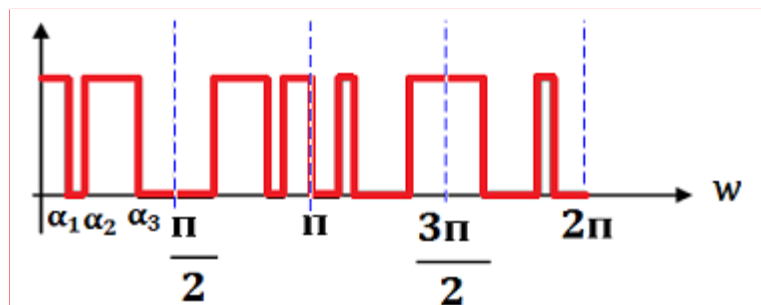


Figure. II.26. Allure

de

commande MLI pré-calculée.[76]

Le développement de la technique tient compte de la périodicité et de la symétrie en utilisant la théorie de la série de Fourier. La décomposition en série de Fourier d'un signal MLI permet d'exprimer une relation entre l'amplitude d'une raie et les angles de commutation du signal tel que :

$$f(\omega t) = a_n + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \sin(n\omega t) + b_n \cos(n\omega t)] \quad (\text{II.15})$$

Où a_n et b_n sont des coefficients données par :

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \sin(\omega t) d(\omega t) \quad (\text{II.16})$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \cos(\omega t) d(\omega t) \quad (\text{II.17})$$

Considérons que le signal est périodique et symétrique impair en quart d'onde, comme montré dans la figure. II.27 c'est-à-dire : Pour une fonction pareille, ses coefficients a_n et b_n de la série de Fourier s'écrivent :

$$a_n = \frac{4}{n\pi} \sum_{k=1}^p (-1)^{k+1} \cos(n a_k) \quad (\text{II.18})$$

Donc, pour tous n impair, et p donné, les coefficients sont donnés par:

$$a_n = \frac{4}{n\pi} \sum_{k=1}^p (-1)^{k+1} \cos(n a_k) \quad \text{ou } 0 < a_1 < a_2 < \dots < a_p < \frac{\pi}{2} \quad (\text{II.19})$$

Pour éliminer les harmoniques désirées, l'expression précédente s'égalise à zéro et le système des équations non linéaires résultantes est résolu pour obtenir les angles a_1, a_2, \dots, a_p qui définissent les instants de commutation des interrupteurs, c'est-à-dire [77]:

$$f_i(\alpha) = \frac{4}{n_i \pi} \sum_{k=1}^p (-1)^{k+1} \cos(n_i a_k) = 0 \quad (\text{II.20})$$

Où $n_i, i=1, 2, \dots, p$, sont les harmoniques à éliminer.

- ❖ **Remarque** : le nombre d'impulsion p par alternance est égal au nombre d'harmoniques à éliminer. D'autre part, l'expression de la tension est égale à :

$$V(\omega t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{n\pi} \sum_{k=1}^p (-1)^{k+1} \cos(n a_k) \sin(n \omega t) \quad (\text{II.21})$$

L'équation (II.17) contient k variables (angles) et k équations à résoudre pour éliminer $k-1$ harmoniques et contrôler la composante fondamentale. Pour l'onduleur de tension triphasé, l'élimination des faibles harmoniques dans la tension simple implique l'élimination des faibles harmoniques dans la tension composée.

II.11. Conclusion

Tout au long de ce chapitre nous avons présenté différents types des convertisseurs DC-AC existants avec leur principe de fonctionnement ainsi que leurs stratégies de commandes et le domaine d'application.



Chapitre III

Simulation des techniques

De commande

Des onduleurs

III.1. Introduction

La simulation est un art qui consiste à convertir une conception de circuit en un modèle logiciel, puis à le tester à l'aide de stimuli d'entrée et d'une surveillance de sortie. Il peut être utilisé pour évaluer la performance de nouveaux circuits pour l'amélioration des connaissances [11]. Les défauts de n'importe quel circuit peuvent être corrigés dès le début de la conception à l'aide d'une simulation. Les nouvelles techniques peuvent être mises à l'essai à l'aide de logiciels fondés sur la simulation, ce qui permet d'économiser du temps et de l'argent et d'éviter tout risque potentiel de court-circuit entre composants de puissance [12].

La simulation de convertisseurs statiques avec Matlab-Simulink est basée sur une approche à topologie variable où les conditions de commutation des semi-conducteurs sont réalisées par des fonctions de commutation. Les interrupteurs sont supposés idéaux (interrupteur fermé = chute de tension nulle, interrupteur ouvert = courant nul). L'objectif de cette modélisation est l'obtention des formes d'ondes principales (tensions, courants) et le spectre d'harmoniques des convertisseurs.

Pour valider notre travail, plusieurs résultats de simulation seront présentés dans ce chapitre afin de valider les différentes techniques de commande constituant ce système convertisseurs pour les applications photovoltaïques sur Matlab Simulink.

III.2. Les différentes techniques de commande

III.2.1. Onduleur monophasé

III.2.1.1. Commande symétrique (pleine onde 180°) d'un onduleur monophasé

Dans ce cas de commande (Fig. III.1) :

- Chaque interrupteur conduit durant 180° ;
- Les interrupteurs S1 et S2 sont complémentaires ;
- $[0, \frac{\pi}{2}]$ les interrupteurs S1 et S4 sont passants, la tension aux bornes de la charge

est égale à U et entre $[\frac{\pi}{2}, \pi]$ les interrupteurs S3 et S4 sont passants et la tension aux bornes de la charge est égale à -U (Fig. III.2).

La Figure (III.3) montre ce qui se passe à l'intérieur de l'interrupteur S1. Lorsque l'interrupteur est passant, la tension à ses bornes est nulle et le courant passe. Quand

l'interrupteur est ouvert, la tension aux bornes de celui-ci existe et le courant s'annule. Les interrupteurs commandés fonctionnent dans les parties positives et les diodes fonctionnent dans les parties négatives.

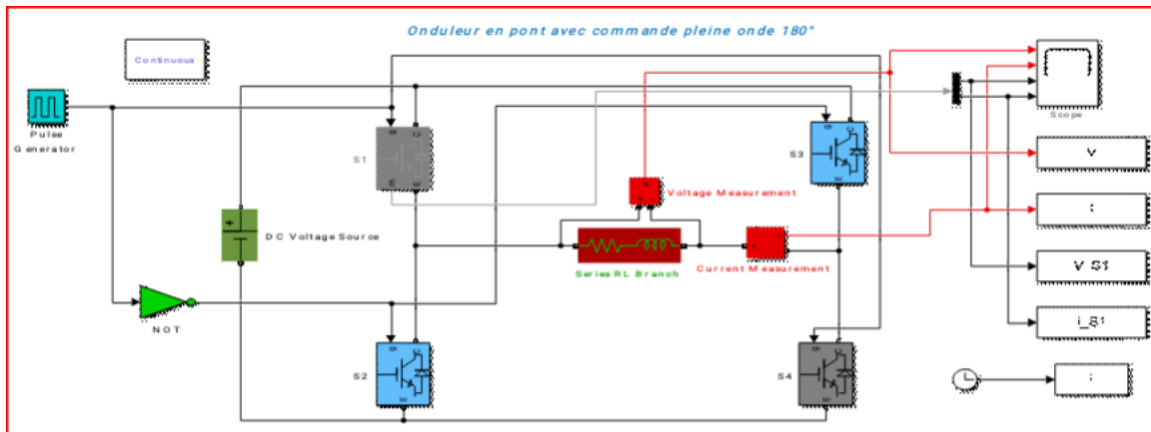


Figure III.1 – Montage d'un onduleur monophasé en pont avec commande symétrique.

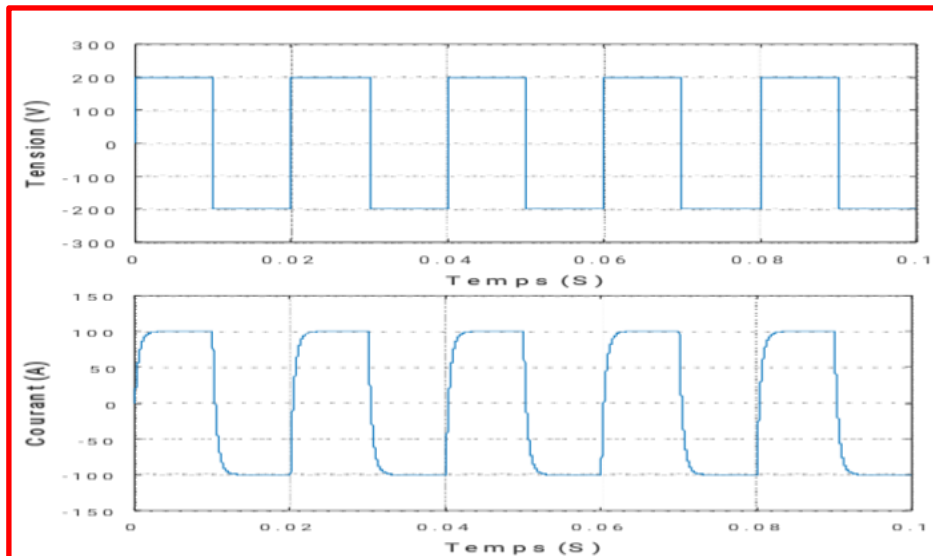


Figure III.2 Allure de tension et du courant de sortie d'un onduleur en pont avec commande 180°

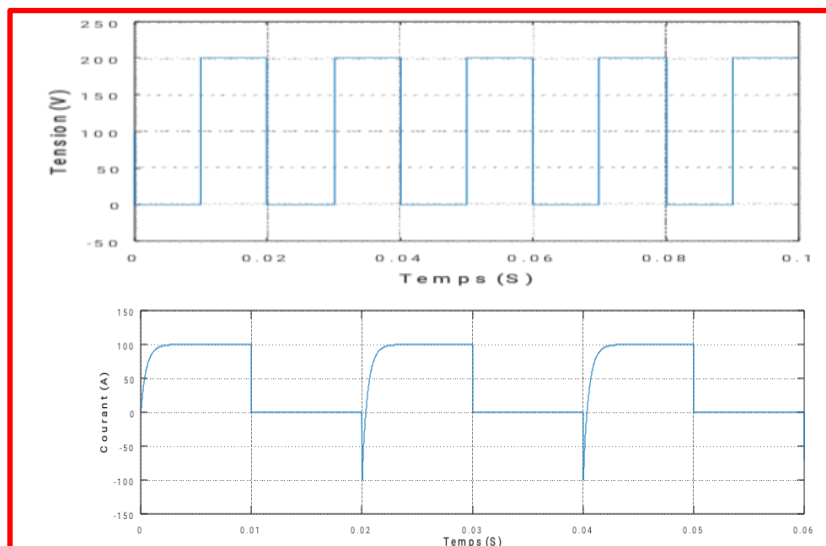


Figure III.3 Tension et courant de l'interrupteur S1

L'analyse spectrale du signal donne le taux de distorsion harmonique de la tension et du courant (Fig. III 4)

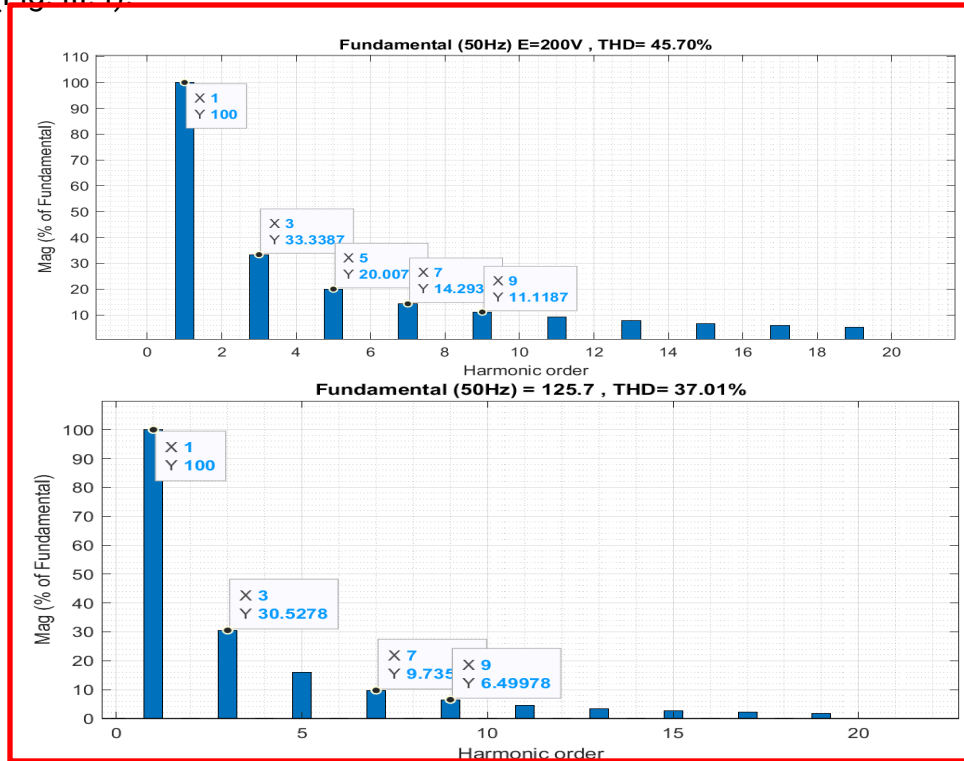


Figure III.4 Spectre amplitude-harmonique de la tension de sortie et du courant (charge RL)

Interprétations :

La tension générée par cette stratégie à une forme rectangulaire et sa décomposition en série de fourrier montre qu'elle est riche en harmoniques. Celles de rang faible ont une amplitude très élevée ce qui influe négativement sur la distorsion de la tension et du courant. L'augmentation du THD diminue la qualité d'énergie avec une relation inversement proportionnelle.

On a deux parties de fonctionnement : la partie d'alimentation lorsque le courant et la tension sont positifs, ce qui implique une puissance positive et la partie de récupération lorsque le courant est négatif et la tension positive, impliquant une puissance négative.

En appliquant ce type de commande pour les onduleurs triphasés, on obtient un système de tension alternative triphasée. La phase décalée par rapport à l'autre de 120° est caractérisée par l'absence des harmoniques de rangs multiples de trois.

Pour atténuer les harmoniques contenues dans ces ondes et surtout celles qui sont proches de la fondamentale, on peut placer à la sortie de l'onduleur un filtre ou changer carrément la commande des interrupteurs.

Le filtre est un élément d'un poids et d'un prix élevés. Ainsi donc, pour diminuer le poids et le prix du filtre, on préfère dans certains cas faire appel à des techniques d'onduleurs plus sophistiquées. Les deux techniques sont la modulation de largeur d'impulsion MLI qui est générée par la composition de signaux sinus triangle et MLI programmée.

III.2.1.2 Commande décalée

Le montage de l'onduleur, avec la commande décalée, reste le même (Fig. III.9), c'est la commande des interrupteurs qui change. La figure (III.8) illustre ce changement.

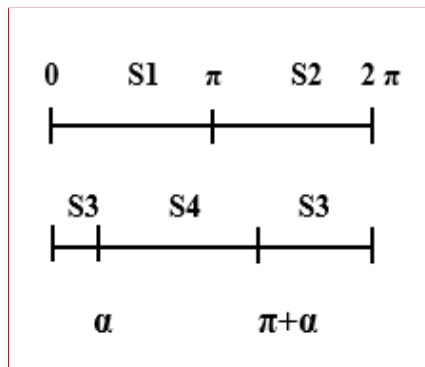


Figure III.5 commande des interrupteurs

Les interrupteurs S1 et S2 restent toujours complémentaires. Dans l'intervalle $[0, \alpha]$, les interrupteurs S1 et S3 fonctionnent ; cela implique un circuit ouvert. La tension aux bornes de la charge est égale à 0. Dans la période $[\alpha, \pi]$, les interrupteurs S1 et S4 fonctionnent ; ce qui implique un circuit fermé. La tension aux bornes de la charge est égale à U et c'est la même chose pour la deuxième demi période sauf au niveau de l'intervalle $[\pi+\alpha, 2\pi]$. La tension aux bornes de la charge est égale à U (Fig. III.7).

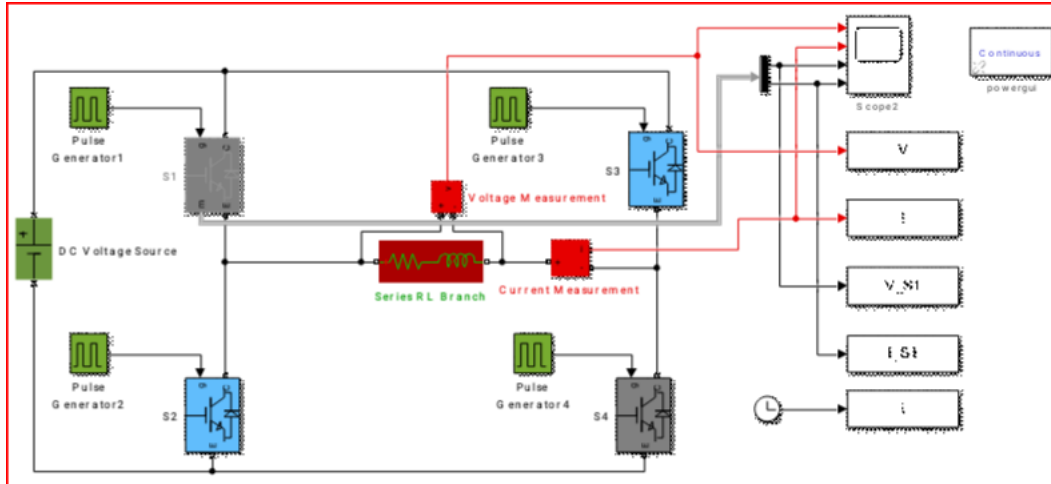


Figure III.6 Onduleur en pont avec commande décalée

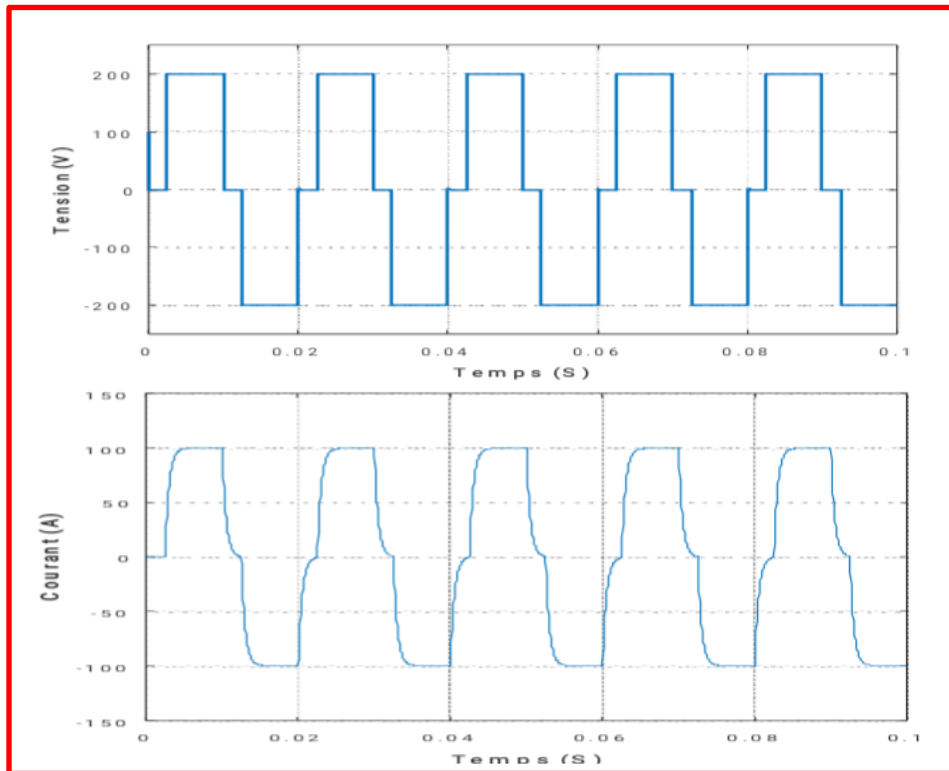


Figure III.7 Allure de la tension et du courant de sortie d'un onduleur en pont avec commande décalée

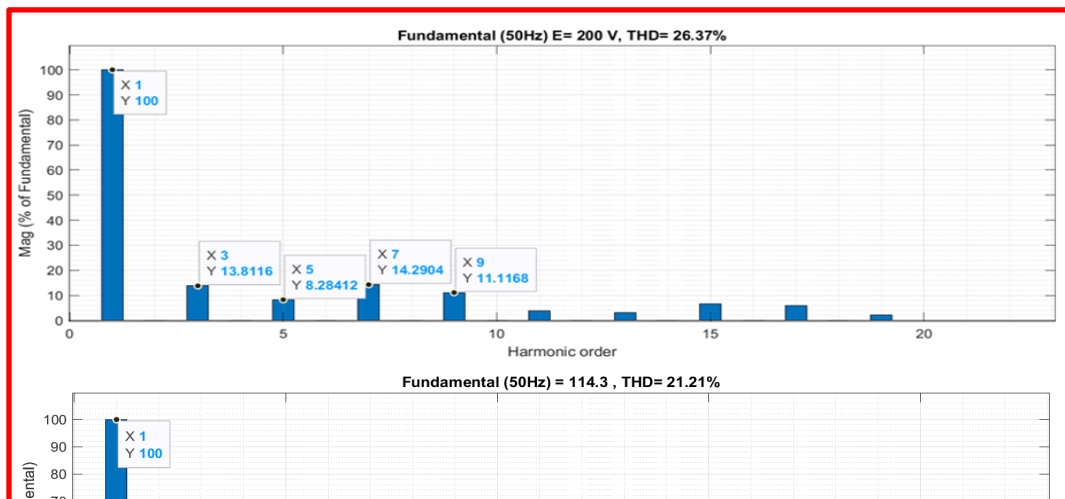


Figure III.8 Spectre amplitude-harmonique de la tension de sortie et du courant (charge RL), d'une commande décalée.

Interprétations de la commande décalée :

La tension générée par ce type de commande à une forme rectangulaire (trois niveaux) et sa décomposition en série de fourrier montre qu'elle est riche en harmoniques. Les harmoniques de rang faible ont une amplitude très élevée, ce qui influe négativement sur la distorsion de la tension et du courant.

On a trois parties de fonctionnement : une première partie d'alimentation lorsque le courant et la tension sont positifs, ce qui implique une puissance positive ; une deuxième partie de récupération lorsque le courant est négatif et la tension positive, impliquant une puissance négative et une dernière partie de roue libre lorsque la puissance est nulle. La commande décalée améliore la tension de sortie par rapport à la commande 180° (symétrique) mais toujours reste des harmoniques gênants, alors on utilise la commande MLI

III.2.1.3 Commande MLI

Les tensions, obtenues aux bornes du récepteur pour les onduleurs monophasés conventionnels, présentent plusieurs harmoniques. Il est donc nécessaire de chercher à se rapprocher d'une forme d'onde sinusoïdale. Pour cela, on fait appel à la technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI). Dans ce cas, la tension et la fréquence de sortie sont contrôlées par l'onduleur (Fig. III.9). Cette méthode consiste à adopter une fréquence de commutation supérieure à la fréquence des grandeurs de sortie, et à former chaque alternance de la tension de sortie d'une succession de créneaux de largeurs convenables (Fig. III.10).

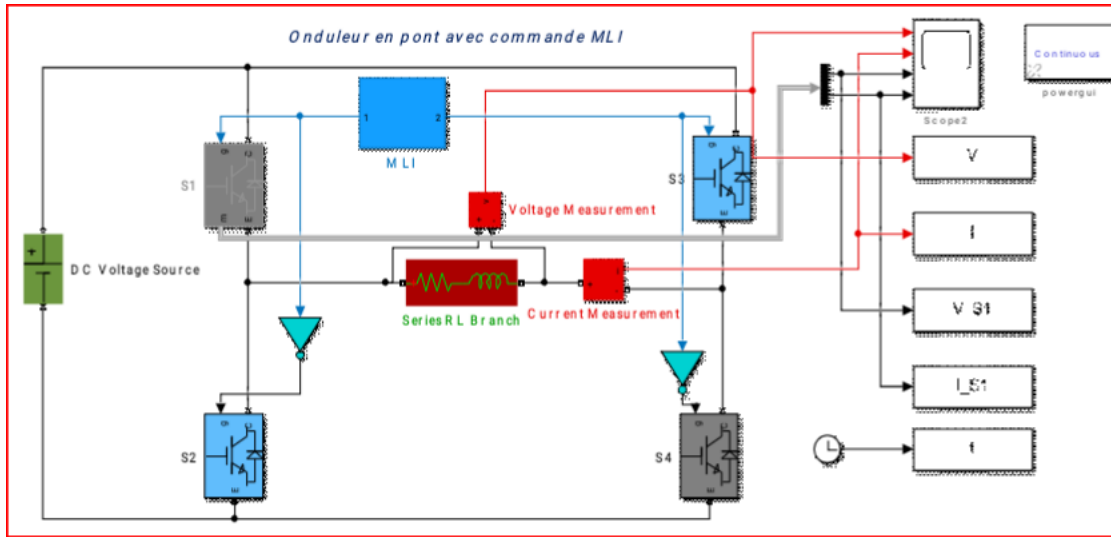


Figure III.9 Onduleur en pont avec commande MLI

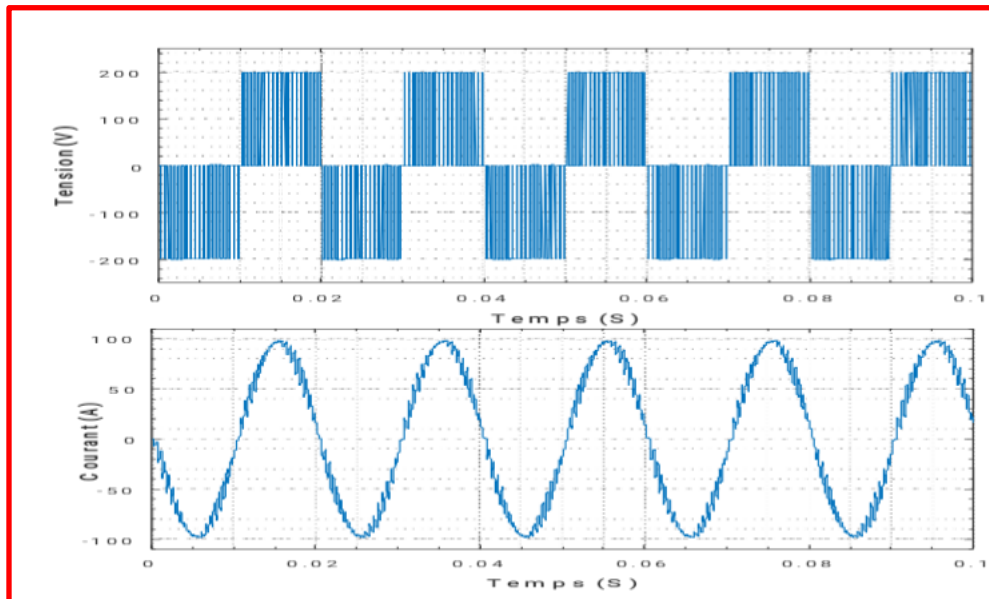


Figure III.10 Allure de tension et du courant de sortie d'un onduleur en pont avec commande MLI

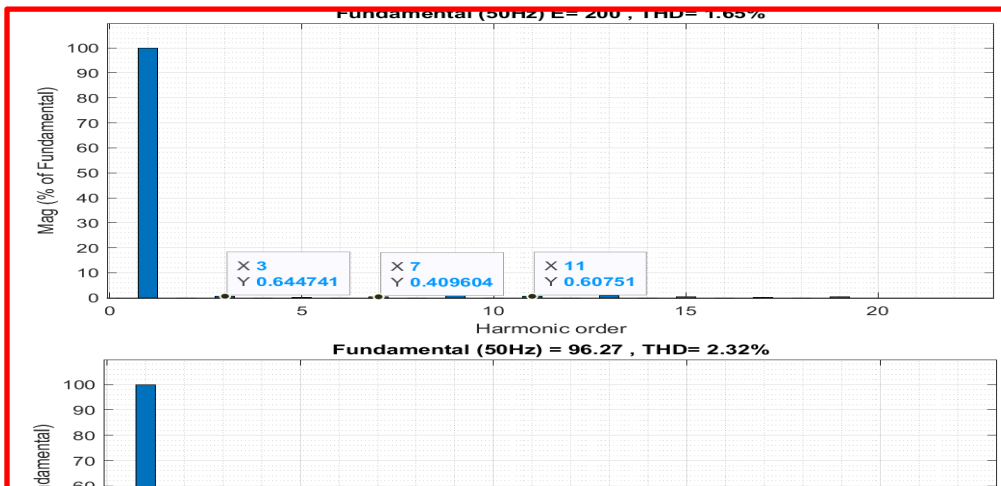


Figure III.11 Spectre amplitude-harmonique de la tension de sortie et du courant (charge RL), de la commande MLI.

Interprétations de la commande MLI sinus triangle :

La technique MLI permet :

- de repousser, vers des fréquences élevées, les harmoniques d'ordres inférieurs de la tension de sortie, ce que facilite le filtrage au niveau de la charge ;
- de faire varier la valeur fondamentale de la tension désirée ;
- une bonne neutralisation de l'onde de sortie ;
- une diminution significative de THD du courant ;
- de rendre le courant pratiquement sinusoïdal ;
- un bon contrôle de la phase du fondamental de la tension de sortie par rapport à une référence établie par la commande ;
- un contrôle de la valeur efficace du fondamental de la tension (phase-neutre) qui reste constante lorsque la valeur efficace du courant varie.

III.2.2 Onduleur triphasé

III.2.2.1 Commande symétrique (pleine onde 180°)

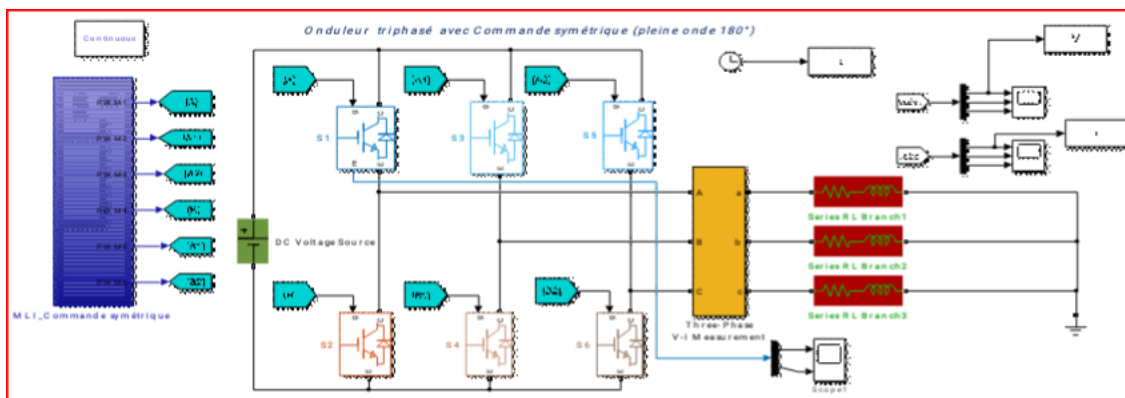


Figure III.12 Montage d'un onduleur triphasé avec commande symétrique.

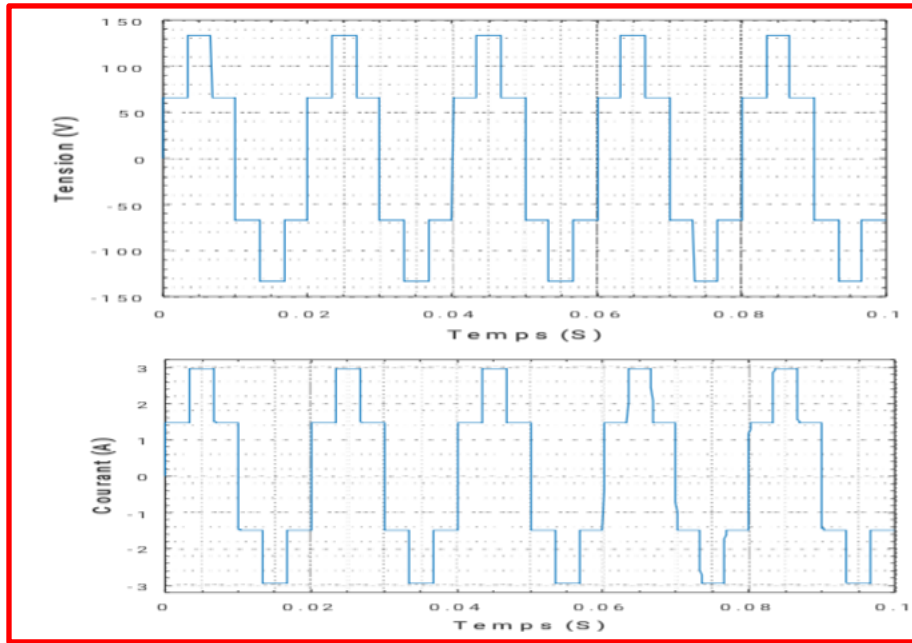


Figure III.13 Allure de tension et du courant de sortie d'un onduleur triphasé avec commande symétrique.

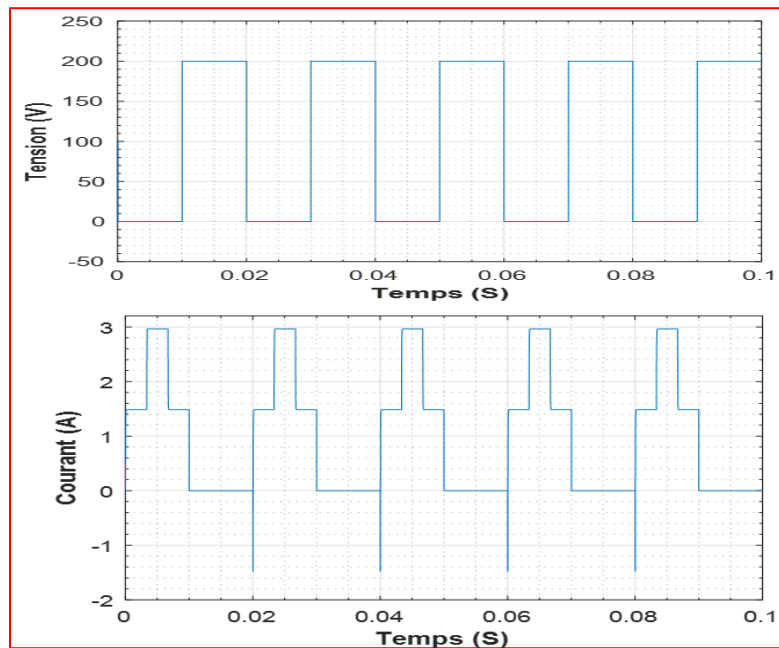


Figure III.14 Tension et courant de l'interrupteur S1

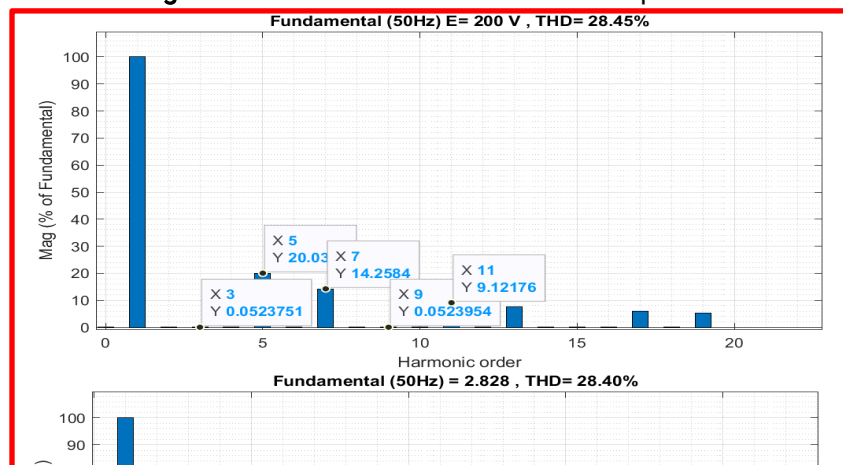


Figure III.15 Spectre amplitude-harmonique de la tension de sortie et du courant (charge RL).

Interprétations de la commande symétrique :

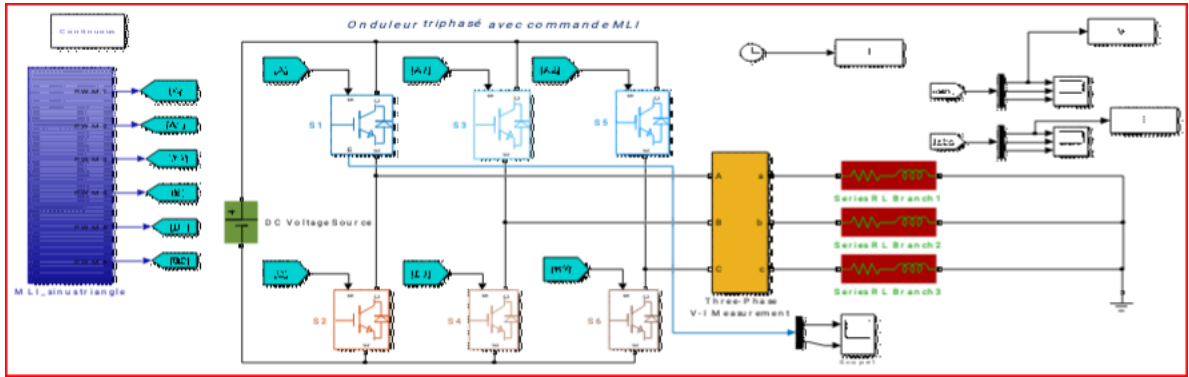
La tension composée V_{ab} a alterné entre $+V_{dc}$ et $-V_{dc}$, tandis que la tension simple A alterné entre $2V_{dc}/3$, $V_{dc}/3$ d'une part, et $-V_{dc}/3$, $-2V_{dc}/3$ d'autre part, comme Déjà on a vu au premier chapitre. Le spectre d'harmonique de la tension de sortie est très riche en harmoniques De rang faible, donc le filtrage est difficile, ce qui montre que sa forme est très éloignée à la forme sinusoïdale et ce qui limite son utilisation dans l'industrie. Stratégie de commande la plus simple et qui ne permet pas de varier sa valeur Efficace.

La tension générée par cette stratégie à une forme quasi rectangulaire, sa décomposition en série de Fourier montre qu'elle est riche en harmoniques.

Les harmoniques de rang faible ont une amplitude très élevée ce qui influe négativement sur la distorsion du courant.

Le taux de distorsion harmonique est très élevé (faible qualité d'énergie).

III.2.2.2 Commande MLI



La figure (III.16) représente le schéma d'un onduleur triphasé avec commande MLI.

Figure III.16 Onduleur triphasé avec commande MLI.

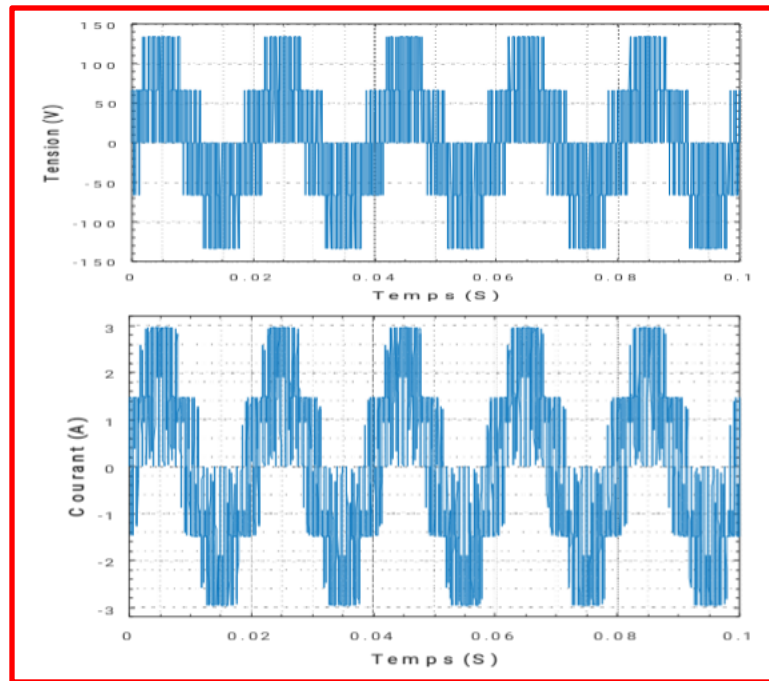


Figure III.17 Allure de tension de sortie et du courant en fonction du temps.

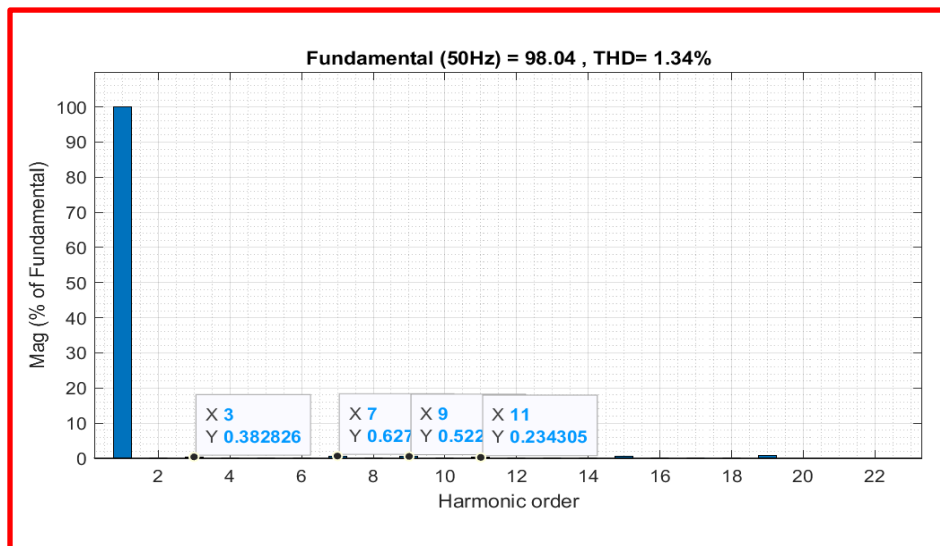


Figure III.18 Spectre d'harmonique de la tension de sortie et du courant (charge RL).

Pour un faible indice de modulation, les harmoniques proches de la fondamentale de 3^{ème} et 5^{ème} sont faibles, tandis que les harmoniques de rang élevé prennent une amplitude importante. Si on augmente la fréquence d'échantillonnage, les harmoniques seront repoussées vers la haute fréquence avec l'apparition d'harmoniques proches de la fondamentale avec une faible amplitude.

L'augmentation de la fréquence de commutation améliore le THD de courant et de la tension.

Interprétations de la Commande MLI :

La technique MLI permet :

- de repousser vers des fréquences élevées les harmoniques d'ordres inférieurs de la tension de sortie, facilitant le filtrage au niveau de la charge.
- une diminution significative de THD du courant.
- de faire varier la valeur fondamentale de la tension désirée.
- une bonne neutralisation de l'onde de sortie.
- de rendre le courant pratiquement sinusoïdal.
- un bon contrôle de la phase du fondamental de la tension de sortie par rapport à une référence établie par la commande.
- un contrôle de la valeur efficace du fondamental de la tension (phase-neutre) qui

reste constante lorsque la valeur efficace du courant varie ;

Cependant, cette technique est imparfaite. Car, le contenu d'harmonique généré par une onde MLI entraîne des pertes dans le réseau (pertes fer dans le transformateur, pertes Joule dans la ligne et le convertisseur) et dans la charge (pertes Joules, fer et par courants de Foucault).

III.3. Conclusion

La nécessité de la simulation des convertisseurs de puissance pour la mise au point des systèmes complexes est indispensable. Il a été montré que la notion de fonction de commutation permettait de simuler de façon relativement simple les formes d'ondes des convertisseurs à interrupteurs commandés à l'amorçage et au blocage.

Dans ce chapitre, on a simulé plusieurs types de commande. La commande plein onde délivre une tension comportant des harmoniques qui sont proches de la fondamentale avec une amplitude importante qui se traduit par une mauvaise qualité d'énergie, c'est pour cette raison qu'on est passé à la commande MLI sinus triangle. Avec cette technique, on a constaté que les harmoniques seront repoussées vers la haute fréquence, mais plus on augmente la fréquence de commutation plus la valeur efficace de la tension de sortie diminue. Les contraintes de cette technique sont les composants utilisés qui limitent leur exploitation au maximum.



***Conclusion
Générale***

Conclusion général

La simulation joue un rôle essentiel dans l'étude de ces techniques de commande. En utilisant des outils de simulation appropriés, il est possible de modéliser et d'analyser le comportement du système dans différentes conditions de fonctionnement. Cela permet de prédire les performances, d'optimiser les paramètres de commande et de prendre des décisions éclairées lors de la conception et de l'exploitation des systèmes.

En intégrant l'étude et la simulation des onduleurs avec la commande symétrique, la commande décalée et la commande de modulation de largeur d'impulsion (MLI) dans une mémoire de fin d'études, nous contribuons à l'avancement des connaissances dans le domaine des énergies renouvelables et de la conversion photovoltaïque. Ces recherches permettent de mieux comprendre les aspects techniques et les défis associés à l'exploitation des systèmes photovoltaïques, tout en proposant des solutions innovantes pour améliorer leur efficacité et leur fiabilité.

La dernière partie a exposé la simulation de ces techniques de l'onduleur que nous avons étudiée. Les résultats originaux ont été similaires avec les résultats de simulation ce qui montre l'efficacité de notre onduleur.

- La MLI sinusoïdale triangulaire permet de faire varier la valeur du fondamentale de la tension de sortie.

Les harmoniques dus à la MLI sont de rang élevé, et ils génèrent donc des fréquences élevées, donc la MLI donne de très faibles harmoniques.

Il est essentiel de poursuivre les efforts de recherche dans ce domaine, en explorant de nouvelles approches de commande, en optimisant les stratégies existantes et en tenant compte des évolutions technologiques. Grâce à ces avancées, nous pourrons réaliser une transition énergétique plus efficace et durable, en exploitant pleinement le potentiel de l'énergie solaire pour répondre aux besoins énergétiques croissants de notre société.



Références
Bibliographie

Références Bibliographie

- [1] Al-Waeli, Ali HA, et al. "Systèmes Photovoltaïques/Thermiques (PV/T) : Etat des lieux et perspectives d'avenir." *Revue des énergies renouvelables et durables* 77 (2017): 109-130.
- [2] Du, Dengfeng, Jo Darkwa et Georgios Kokogiannakis. "Systèmes de gestion thermique pour les installations photovoltaïques (PV) : un examen critique." *Énergie solaire* 97 (2013) : 238-254.
- [3] Abdelli Ahmed , Issellal Abdelfetah Omar Abdelkodouss. *Commande DTC d'une MAS à l'aide d'un onduleur cinq niveaux*. Université SAAD DAHLAB de BLIDA, 2017-2018.
- [4] ERRAHMANI, Aziza, Nora BEN ATHMANE, and Rachid MAOUEDJ. *Amélioration de l'efficacité des panneaux photovoltaïques par l'installation d'un système de refroidissement par l'eau des modules PV*. Diss. Université Ahmed Draia-ADRAR, 2019.
- [5] BELLABACI, Anouar. *Contribution a la modélisation du rayonnement solaire comme un paramètre climatologique pour des applications photovoltaïques en Algérie*. Diss. UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA, 2021.
- [6] Jacobs, Jennifer M., et al. "Solar Radiation, Longwave Radiation and Emergent Wetland Evapotranspiration Estimates from Satellite Data in Florida, USA/Estimations a partir de données satellitaires du rayonnement solaire, du rayonnement de grande longueur d'onde et de l'évapotranspiration d'une zone humide de Floride (EUA)." *Hydrological Sciences Journal* 49.3 (2004).
- [7] Ghodbane, M., et al. "Study and numerical simulation of solar system for air heating." *Journal of Fundamental and Applied Sciences* 8.1 (2016): 41-60.
- [8] Cooper, P. I. "The absorption of radiation in solar stills." *Solar energy* 12.3 (1969): 333-346.
- [9] Tadili, R., and Mohammed Najib Bargach. "Une méthode d'estimation du rayonnement solaire global reçu par une surface inclinée-Application aux sites marocains." *La météorologie* 2005.50 (2005): 46-50.
- [10] Saad, Arezki, and Hakim Damous. *Etude et conception d'un chauffe-eau solaire*. Diss. Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 2018.
- [11] Ferial, BOUDJABI Amel, et al. "ETUDE EXPERIMENTALE D'UN PANNEAU PHOTOVOLTAÏQUE THERMIQUE MODIFIE (PV-T) EN INCLINAISON VERTICALE."
- [12] KECILI, I., SAIT SAADA, and R. NEBBALI. "Optimisation de l'Angle d'Inclinaison d'un Panneau Solaire."
- [13] Berry, J. P., et al. "Cellules solaires au silicium sous concentration Eléments de conception-Un exemple d'application." *Revue de Physique Appliquée* 14.1 (1979): 193-199.
- [14] Benelkadi, A. O., A. Kaabeche, and Y. Bakelli. "Etude de faisabilité technico-économique des centrales photovoltaïques en Algérie." *Journal of Renewable Energies* 21.2 (2018) : 181-198.
- [15] Cheref, Sarah. *Etude et dimensionnement technico-économique d'une centrale photovoltaïque de 50 MW raccordée au réseau électrique à Guerrara (Ghardaia)*. Diss. 2021.
- [16] ABDENNOUR, BOUZOUAID AHMED BEN SAHAL. "Dimensionnement d'une centrale PV."
- [17] IDDA, Ahmed, et al. "Différentes Configurations du Système PV pour l'Alimentation Sans Interruption (ASI) : Application au Relais GSM."

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIE

- [18] Khelifi, M., et al. "Effet photovoltaïque dans des couches minces de phtalocyanines." *Revue de physique appliquée* 20.7 (1985): 511-521.
- [19] Helali, Kamelia. *Modelisation d'une cellule photovoltaïque: etude comparative*. Diss. Université Mouloud Mammeri, 2012.
- [20] Zarour, Laid, and Aissa Bouzid. "Etude technique d'un système d'énergie hybride photovoltaïque-éolien hors réseau." (2017).
- [21] Ait Cheikh, Mohamed Salah. *Etude, investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques*. Diss. 2007.
- [22] Rachedi, Samia, and Keireddine Ghaffour. "Analyse des caractéristiques IV des jonctions PN à base de SiC." (2005).
- [23] Benmoussa, W. C., S. Amara, and A. Zerga. "Etude comparative des modèles de la caractéristique courant-tension d'une cellule solaire au silicium monocristallin." *Revue des Energies Renouvelables ICRES-07, Tlemcen* 301-306 (2007).
- [24] MOUSSAOUI, Nafissa, et al. "l'étude par simulation de l'influence du dopage sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires à base de silicium amorphe." (2016).
- [25] Mancor, Mansoura. *Simulation numérique des caractéristiques électriques d'une cellule solaire à double jonction en (AlGaAs/GaAs)*. Diss. Université Mohamed Khider-Biskra, 2012.
- [26] Wolf, Martin, and Hans Rauschenbach. "Series resistance effects on solar cell measurements." *Advanced energy conversion* 3.2 (1963): 455-479.
- [27] Le Rouzo, Judikaël. *Etude expérimentale et théorique de la réponse angulaire et de la réponse spectrale hors bande de détecteurs infrarouges hautes performances*. Diss. Ecole Polytechnique X, 2007.
- [28] BAIYOU, Lamri, and Ammar BOUSSAG. *Effet de la Température ambiante sur l'efficacité d'un Panneau solaire photovoltaïque*. Diss. UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA, 2020.
- [29] Oulha, Lokmane, Faycel Guziz, and Boubakaer Khouildate. *Effet des matériaux à changement de phase sur l'efficacité d'un panneau photovoltaïque*. Diss.
- [30] Petibon, Stéphane. *Nouvelles architectures distribuées de gestion et conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques*. Diss. Université Paul Sabatier-Toulouse III, 2009.
- [31] Bailly, Loïc. *Cellules photovoltaïques organiques souples à grande surface*. Diss. Université Sciences et Technologies-Bordeaux I, 2010.
- [32] Agroui, K. "Etude du comportement thermique de modules photovoltaïques de technologie monoverre et biverre au silicium cristallin." *Revue des Energies Renouvelables : Valorisation* 1 (1999): 7-11.
- [33] Thiaux, Yaël. "Optimisation des profils de consommation pour minimiser les coûts économique et énergétique sur cycle de vie des systèmes photovoltaïques autonomes et hybrides Évaluation du potentiel de la technologie Li-ion." *Diss. École normale supérieure de Cachan-ENS Cachan* (2010).
- [34] Berger, Sébastien. *Croissance de silicium monocristallin en couche mince par épitaxie en phase liquide sur couches sacrificielles pour report sur substrat faible coût pour applications photovoltaïques*. Diss. Lyon, INSA, 2003.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIE

- [35] Destruel, Pierre, and Isabelle Seguy. "Les cellules photovoltaïques organiques." *Reflète de la physique* 6 (2007) : 16-18.
- [36] Laplaze, D., and I. Youm. "Modélisation d'une cellule photovoltaïque I : Détermination des paramètres à partir de la caractéristique courant-tension sous éclairnement." *Solar cells* 14.2 (1985) : 167-177.
- [37] Abdesslam, Belaout, et al. "Comparaison entre les Modèles à une Seule Diode et de Bishop de la Cellule Solaire." (2016).
- [38] Helali, Kamelia. *Modelisation d'une cellule photovoltaïque: etude comparative*. Diss. Université Mouloud Mammeri, 2012.
- [39] Yahya, A. Ould Mohamed, A. Ould Mahmoud, and I. Youm. "Etude et modélisation d'un générateur photovoltaïque." *Journal of Renewable Energies* 11.3 (2008): 473-483.
- [40] Aoun, Nouar, and R. Chenni. "Etude et modélisation des différents modèles de la cellule photovoltaïque établis sur base de valeurs nominales." (2017).
- [41] Larbi, Degla Mohammed, Ben Ahmed Bachir, and N. A. S. R. I. Nadjib. "Dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque." (2017).
- [42] Abbassen, Lyes. *Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque*. Diss. Université Mouloud Mammeri, 2011.
- [43] Chaima, Djendi. *Etude de l'effet de la tension directe de la diode by-pass sur la puissance maximale d'un système photovoltaïque en présence d'ombrage partiel*. Diss. Faculté des Sciences et Technologies, 2021.
- [44] Ardjouna, C. H. E. B. A. B. H. I. *Etude d'identification et localisation des défauts d'un générateur photovoltaïque*. Diss. UNIVERSITE DE MOHAMED BOUDIAF M'SILA FACULTE DE TECHNOLOGIE, 2016.
- [45] Malek, A., et al. "Alimentation Electrique par une Installation Photovoltaïque Destinée pour des Equipements de la Veille de l'Atmosphère Globale." *Bulletin des énergies renouvelables-N* (2002).
- [46] Abbassen, Lyes. *Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque*. Diss. Université Mouloud Mammeri, 2011.
- [47] Zaamta, Souade, and A. Dib. "Réalisation d'un régulateur solaire à base de microcontrôleur pour le contrôle de l'état de charge et la protection des accumulateurs." *Journal of Renewable Energies* 12.1 (2009): 137-147.
- [48] Boukhers, Djamil, and A. Bouzid. "Optimisation d'un système d'énergie photovoltaïque. Application au pompage." (2017).
- [49] Amina Merhoum « OPTIMISATION DES TECHNIQUES DE MLI POUR LES EQUIPEMENTS FACTS A BASE D'ONDULEUR » Mémoire de Magister en Electrotechnique, Option : Conditionnement des réseaux électriques Université des Sciences et de la Technologie d'Oran « Mohamed Boudiaf » 2013.
- [50] M. Ben Ahmed Bouzid et M. Ghedamsi Kaci M, "IMPLEMENTATION SUR DSP F28335 DES STRATEGIES DE COMMANDE D'UN CONVERTISSEUR DC/AC", Mémoire de Master, Université A. MIRA-BEJAI, 2017
- [51] Celanovic N., Boroyevich D. "A FAST SPACE VECTOR MODULATION ALGORITHM FOR MULTILEVEL THREE PHASE CONVERTERS". IEEE Trans. IA, Vol. 37, No2, pp.637- 641 (2001).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIE

- [52] A. Kheldoun, "AMELIORATION DES PERFORMANCES D'UN VARIATEUR DE VITESSE PAR MOTEUR ASYNCHRONE CONTROLE PAR LA METHODE A FLUX ORIENTE", Thèse de doctorat à l'université de Boumerdes, 2007.
- [53] Eladjaoui Moussa, H. Bechar Belaid « MODELISATION ET COMMANDE D'UN ONDULEUR TRIPHASE MULTINIVEAUX » Diplôme d'Ingénieur d'Etat en Electrotechnique Universite Mouloud-Mammeri De Tizi-Ouzou 2012/2013.
- [54] Oussama Degla, Tarek Sayah Lembarek « ETUDE PAR SIMULATION D'UN ONDULEUR » Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2020.
- [55] M. C. s. Boumediene, «ETUDE, CONCEPTION ET RELISATION D'UN ONDULEUR MULTI-NIVEAUX,» Université De Becher, 2014/2015.
- [56] G. Pinson, Physique appliquée : Onduleurs.
- [57] Berrezek Farid « Etude des Différentes Techniques de Commande des Onduleurs à MLI Associés à une Machine Asynchrone » Mémoire De Magister, Université Badji Mokhtar. Annaba 2006.
- [58] OKBA Salah et BEDDIAR Walid. « Etude et réalisation d'un onduleur de tension triphasé à MLI », mémoire de Master, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'sila 2019.
- [59] Mekaret Fayssal & Zidouri Abdelkhaliq, « Etude, simulation et réalisation d'un mini onduleur pour systèmes photovoltaïques », mémoire de master, Université Aboubakr Belkaïd-Tlemcen2018.
- [60] C. Adel, «Contribution à la commande des convertisseurs multicellulaires série,» UNIVERSITE FERHAT ABBAS DE SETIF, 2009-2010.
- [61] Benadel HANI Choudira MESSAOUD, « Technique de commande d'un onduleur triphasé », projet de fin d'étude licence génie électrique.
- [62] Ayachi Zakaria, Djotni Karim « Etude Et Eimulation D'un Onduleur De Tension Triphase », Projet Fin D'étude Licence, Université Badji Mokhtar Annaba 2021.
- [63] B. Tinhinane, «Etude et stratégie de commande des convertisseurs modulaires multi-niveaux,» Université Abderrahmane MIRA bejaia, 2016-2017.
- [64] J. Camille de Barros, "Application de la Logique Floue à la Commande Optimale du Moteur Asynchrone" Thèse de Doctorat, Université Marseille, France 2003.
- [65] G. Segulier, et F. Labrique, "Les Convertisseurs de L'électronique de Puissance, vol. 5, Commande et Comportement Dynamique " Edition Tec.Doc, Paris Cedex, 1998.
- [66] D. Youssouf, «Modelisation Et Commande D'un Onduleur Triphase Pilote Par MLI a Structre Multiniveaux,» université kasdi merbah-ouargla, 2011.2012.
- [67] B. L. Dokic and B. Branki, "Power Electronics Converters and Regulators", 3rd Editio. Springer, 2015.
- [68] BAHY Abdelouahab et DJEDIDI Mohammed Riadh, "Commande d'un Onduleur Triphasé par Différentes Techniques MLI en Utilisant la Carte DSPACE", Mémoire de Master, Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-oued,2017.
- [69] A.Massoum, A.Meroufel, M.K .Fellah, "Commande en vitesse par mode glissement d'un moteur asynchrone alimenté en courant avec réduction de l'effet chatering" CNEA'04, université de sidi bel abbés ,23-24 mai2004.
- [70] Z.Ait wali, "Application des FPGA à la commande d'un moteur asynchrone", Mémoire de magister UMMTO Tizi-ouzou.
- [71] L. Li, D. Czarkowski, Y. Liu, P. Pillay,"Multilevel space vector PWM technique based on phase-shifted harmonic suppression", in Conf. Rec. IEEE APEC, 2000.