

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ-BOUIRA



Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées
Département : Génie Electrique

Mémoire de fin d'étude

Présenté par :

Moussaoui Nabil

Mektoub Larbi

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

Filière : ELECTROMECHANIQUE

Option : ELECTROMECHANIQUE

Thème :

Détection et localisation d'un défaut dans un onduleur à deux niveaux destiné à
une application photovoltaïque

Devant le jury composé de :

Mr. A, BERRAG	MCB	UAMOB	Président
Mr. H, HOUASSINE	MCA	UAMOB	Encadreur
Mme. G, OUADFEL	Doctorante	UYFM	Co-Encadreur
Mr. S, BEN SAID	Professeur	UAMOB	Examineur
Mr. I, GRICHE	MAA	UAMOB	Examineur

Année Universitaire 2018/2019

Remerciement

Nous remercions dieu le tout puissant pour ce qu'il nous a tant donné comme volonté, santé et surtout patience, pour pouvoir, durant toutes ces longues années d'études d'arriver là où nous sommes aujourd'hui et de concrétiser tous nos efforts par ce modeste travail.

Nous tenons à présenter notre profonde gratitude à Mr HOUASSINE Hamza d'avoir proposé un sujet de recherche d'actualité, pour sa patience et son soutien. Sans oublier Mme OUADFEL Ghania pour son suivi, sa disponibilité et ses précieux conseils.

Nos remerciements vont également aux membres de jury qui nous ont fait l'honneur de participer au jury.

Nous tenons à exprimer notre reconnaissance éternelle pour nos familles pour leur amour et leur soutien, sans leurs encouragements permanents et leur soutien moral nous ne serons parvenues là où nous sommes.

Que toute personne ayant contribué de près ou de loin, à l'aboutissement de ce travail trouve ici le témoignage de notre profonde reconnaissance.

Enfin, nous ne pourrions terminer sans une pensée à l'ensemble de nos collègues qu'ils trouvent ici, l'expression de notre profonde gratitude.

Dédicace

Nous dédions ce modeste travail à:

Nos parents

Nos frères

Toutes nos sœurs.

Nos collègues

Et à toutes nos familles

Et à tous ceux et celles qui nous ont soutenu

Sommaire

Remerciement	
Dédicace	
Sommaire	
Liste des figures	
Liste des acronymes	
Introduction général	1
Chapitre I: Généralité sur les systèmes photovoltaïques	
I.1. Introduction	3
I.2. Cellule photovoltaïque	3
I.2.1. Effet photovoltaïque	3
I.2.2. Technologies des cellules solaires	4
I.2.3 Circuit électrique équivalent	4
I.3. Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque	5
I.3.1. Performance de la cellule	5
I.3.2 Caractéristique courant-tension et puissance-tension	6
I.3.3. Simulation d'une cellule photovoltaïque	7
I.4. Panneaux solaires	10
I.5. Système de protection	11
I.6. Système de stockage	12
I.7. Les différents types de système photovoltaïque.....	12
I.7.1. Système PV autonome.....	12
I.7.2 Système PV connecté directement au réseau.....	12
I.8. Avantages et Inconvénients de l'énergie Photovoltaïque	13

I.8.1. Principaux avantages de l'énergie photovoltaïque	13
I.8.2. Inconvénients de l'énergie photovoltaïque	13
I.9. Conclusion.....	14
Chapitre II: Les convertisseurs statiques	
II. Introduction	15
II.1. Les convertisseurs statiques	15
II.1. 1. Convertisseur DC/DC (Hacheur)	15
II.1.1.1. Hacheur dévolteur (série).....	16
II.1.1.2. Hacheur survolteur (parallèle).....	17
II.1.1.3. Hacheur dévolteur-survolteur	18
II.1.2. Commandes MPPT des convertisseurs DC-DC.....	20
II.2. Convertisseur DC/AC (Onduleur)	21
II.2.1. Technologies des onduleurs	21
II.2.1.1. Onduleurs modulaires (module inverter)	21
II.2.1.2. Onduleurs centralisés (central inverter).....	21
II.2.1.3. Onduleurs "String" ou "de Rangée".....	21
II.2.2. Choix des composants de l'onduleur	22
II.3. Convertisseur multi niveaux.....	23
II.3.1. Principe de base d'un onduleur	23
II.3.2. Différents topologie des onduleurs multi niveaux.....	24
II.3.2.1. Onduleur de tension à diode de bouclage	24
II.3.2.2. Onduleur de tension a condensateur flotteur	25
II.3.2.3. Onduleur de tension en cascade	26

II.4. Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI)	27
II.5. Modélisation de l'onduleur	28
II.5.1. Schéma block d'onduleur à deux niveaux	28
II.5.2. Résultat de simulation	29
II.6. Conclusion.....	30
Chapitre III: Diagnostic des défauts d'un système PV	
III.1. Introduction	31
III.2. Définitions d'un Défaut	31
III.3 Défauts d'un système photovoltaïque	31
III.3.1 Défauts du champ PV	31
III.3.2. Défaut des convertisseurs DC-DC et DC-AC	32
III.3.3 Défauts de connectique et câblage	32
III.3.4 Défauts dans le système de protection	32
III.3.4.1 Liaison équipotentielle	32
III.3.4.2 Fusible CC	33
III.3.4.3 Parafoudre	33
III.4 Principaux défauts et anomalies dans un générateurs PV	33
III.5 Définition de diagnostic.....	34
III.6 Etape de diagnostic	34
III.7 Méthodes de diagnostic	35
III.7.1 Méthodes sans modèles	35
III.7.2 Méthode à base de modèles	37
III.8 Conclusion.....	38

Chapitre IV: Analyse et Diagnostic des défauts dans l'onduleur a deux niveaux

IV.1. Introduction	39
IV.2. Detection et localisation des défauts par l'analyse de la réponse en fréquence FRA	39
IV.2.1 Principe de la méthode FRA	39
IV.2.2. Etude de la réponse fréquentielle de l'onduleur suite à des nombreux défauts	40
IV.2.2.1 Réponse en fréquence de l'onduleur sans défaut (état sain)	41
IV.2.2.2 Réponse en fréquentielle de l'onduleur avec défaut	41
IV.2.2.2.a Défaut de court circuit	41
IV.2.2.2.b Défaut de circuit ouvert	44
IV.3. Detection et localisation des défauts par la transformé de fourier rapide FFT	45
IV.3.1 Principe de la méthode FFT	45
IV.3.2. Etude de la réponse fréquentielle de l'onduleur suite à des nombreux défauts	45
IV.3.2.a Etat sain	45
IV.3.2. b Défaut de court circuit	46
IV.3.2.c Défaut de circuit ouvert	50
IV.4. Conclusion	54
Conclusion générale	55

Bibliographie

Résumé

Liste des Figures

Figure I.1: Fonctionnement d'une cellule solaire photovoltaïque	03
Figure I.2: Modèle de la cellule photovoltaïque réel.....	04
Figure I.3: Courbe $I = f(V)$ et la courbe $P = f(V)$ d'une cellule photovoltaïque	07
Figure I.4: schéma bloc d'une cellule photovoltaïque.....	07
Figure I.5: la caractéristique courant-tension d'une cellule en fonction de l'éclairement	08
Figure I.6: la caractéristique puissance-tension d'une cellule en fonction de l'éclairement..	08
Figure I.7: Caractéristique courant-tension d'une cellule en fonction de température	09
Figure I.8: Caractéristique puissance-tension d'une cellule en fonction de la température...	10
Figure I.9: Panneau PV constitué par cellules en série et cellules en parallèle	10
Figure I.10: Diodes de protection des modules	11
Figure I.11: Installation photovoltaïque autonome	12
Figure I.12: Installation photovoltaïque couplée au réseau	13
Figure II.1: Convertisseur DC-DC	15
Figure II.2: Schéma électrique d'un hacheur dévolteur.....	16
Figure II.3: Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur série.....	17
Figure II.4: Schéma électrique d'un hacheur survolteur.....	17
Figure II.5: Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur survolteur.....	18
Figure II.6: Schéma électrique d'un hacheur dévolteur-.....	19
Figure II.7: Chronogrammes de courant et de tension d'un hacheur dévolteur-survolteur...	19
Figure II.8: Diagramme synoptique d'un système photovoltaïque avec un module MPPT...	20
Figure II.9: Classification des onduleurs PV connectés au réseau	21
Figure II.10: la comparaison entre les interrupteurs de puissance.....	23
Figure II.11: Principe d'association de source en série.....	23
Figure II.12: Principe d'association de source en parallèle	24
Figure II.13: Structure d'un bras de l'onduleur NPC à trois et à quatre niveaux.....	24
Figure II.14: Structure d'un bras de l'onduleur à condensateurs flottants à trois et à quatre niveaux	25
Figure II.15: Structure d'un onduleur multi niveaux en cascade à cinq niveaux.....	26
Figure II.16: Principe de commande des courants par MLI	27
Figure II.17: Commande d'interrupteurs par MLI naturelle.....	28
Figure II.18: schéma block d'onduleur	28
Figure II.19: Tension de source.....	29

Figure II.20: Tension de sortie de bras A.....	29
Figure II.21: Tension de sortie de bras B.....	29
Figure II.22: Tension de sortie de bras C	30
Figure III.1: Organigramme de diagnostic des défauts.....	36
Figure III.2: structure d'un système flou.....	38
Figure IV.1: schéma structurel à haute fréquence d'un onduleur triphasé.....	41
Figure IV.2: la réponse en fréquence d'un onduleur triphasé sain	42
Figure IV.3: Comparaison entre l'état sain et les courts circuits des mosfets 1,2et 3.....	43
Figure IV.4: Comparaison entre l'état sain et les courts circuits des mosfets 1',2' et 3'.....	43
Figure IV.5: Comparaison entre l'état sain et les courts circuits des mosfets 1,1' et 11'	44
Figure IV.6: Comparaison entre l'état sain et les courts circuits des mosfets 2,2' et 22'.....	44
Figure IV.7: Comparaison entre l'état sain et les courts circuits des mosfets 3,3' et 33'.....	45
Figure IV.8: Comparaison entre la réponse en fréquence du défaut de circuit ouvert et d'état sain de l'onduleur.....	45
Figure IV.9: Forme d'onde des courants coté charge dans l'état sain	46
Figure IV.10: Spectre d'amplitude des courants coté charge dans l'état sain d'onduleur....	47
Figure IV.11 : Courant de source état sain	47
Figure IV.12 : Forme d'onde des courants coté charge dans le cas T1 court-circuité.....	48
Figure IV.13 : Courant de source quand T1 en court circuit	48
Figure IV.14 : Spectre d'amplitude des courants coté charge dans cas T1 court-circuité...	48
Figure IV.15 : Les courant de Sortie de court circuit de l'.....	49
Figure IV.16 : Courant de source de court circuit 1'.....	49
Figure IV.17 Spectre d'amplitude des courants coté charge dans cas T1' court-circuité des trois phases.....	49
Figure IV.18 : Les courant de Sortie de court circuit des MOSFETS 1' et 1'.....	50
Figure IV.19 : Courant de source quand un bras est court-circuité.....	50
Figure IV.20 : Spectre d'amplitude des courants coté charge dans cas T1' court-circuité des trois phases.....	50
Figure IV.21: Forme d'onde des courants cotés charge dans le cas T1 en circuit ouvert.....	51
Figure IV.22: Courant de source quand T1 en circuit ouvert.....	52
Figure IV.23: Spectre d'amplitude des courants coté charge dans cas T1 en circuit ouvert...	52
Figure IV.24: Forme d'onde des courants cotés charge dans le cas T1' en circuit ouvert.....	52

Figure IV.25: Courant de source quand T1 en circuit ouvert.....	53
Figure IV.26: Spectre d'amplitude des courants coté charge dans cas T1' en circuit ouvert..	53
Figure IV.27: Forme d'onde des courants cotés charge en cas T1 et T1' en circuit ouvert.....	53
Figure IV.28: Courant de source quand T1 et T1' en circuit ouvert.....	54
Figure IV.29: Spectre d'amplitude des courants coté charge dans cas T1' en circuit ouvert..	54

Liste des acronymes

PV	Photovoltaïque
I_{ph}	Le photo-courant
R_{sh}	Résistance shunt de la cellule
N	Le nombre de niveau de la tension de sortie
P	Puissance
R_s	Résistance série de la cellule
D	Diode
I_d	Courant de diode
I_{sh}	Courant de la résistance shunt (A)
R	Résistance parallèle
V	Tension de cellule photovoltaïque
I	Courant de la cellule photovoltaïque
I_{CC}	Courant de court-circuit
I_s	Courant de source
I_{SC}	Le courant de court circuit
V_{OC}	La tension de circuit ouvert
V_T	La tension aux bornes du générateur
MPP	Le point de puissance maximale
FF	Facteur de forme
V_{MPP}	Tension au point de puissance maximale (V)
I_{MMP}	Courant au point de puissance maximale, appelé aussi courant optimum (A)
P_{MMP}	Puissance au point de puissance maximale

η	Le rendement
P_{in}	La puissance lumineuse
P_{max}	La puissance maximale
P_{opt}	La puissance optimale
DC	Direct Current (courant continu (CC)).
GPV	Générateur photovoltaïque
DC/DC	Convertisseur (Courant Continue/Courant Continue).
MOSFET	Métal-Oxyde Semi-conducteur Field Effect Transistor.
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor (transistor bipolaire à grille isolée).
K	Commutateur
V_{PV}	La tension de générateur PV
f_e	La fréquence de découpage
V_c	Tension efficace.
P_{PV}	Puissance de générateur PV
P_c	Puissance efficace
I_c	Courant efficace (A)
I_{PV}	Le courant de générateur PV
V_k	La tension aux bornes de commutateur
V_l	La tension aux bornes de l'inductance
MPPT	Point de puissance maximale (maximum power point Tracking)
DC/AC	Convertisseur (Courant Continue/Courant Alternatif).
NPC	Neutral-Point-Clamped
AC	Alternatif Current (Courant Alternatif (CA)).

- MLI** Commande par modulation de largeur d'impulsion
- V_{dc}** La tension continue aux bornes du condensateur
- V_{sa}** La tension aux borne de premiere bras d'un onduleur
- V_{sb}** La tension aux borne de dexieme bras d'un onduleur
- V_{sc}** La tension aux borne de troisieme bras d'un onduleur
- AFNOR** Association française de normalisation
- CEI** communauté des états indépendants
- RNA** Réseaux de neurones artificiels
- SIF** Système d'inférence floue
- R** La résistance de matériau
- FRA** Analyse de La réponse en fréquence
- FFT** La transformée de Fourier rapide
- DFT** La transformée de Fourier discrète

Introduction générale

Introduction générale

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir, pour atteindre la suffisance des besoins énergétiques des sociétés industrialisées et la consommation humaine, ces besoins et la diminution des énergies fossiles poussent le monde à l'utilisation d'énergie photovoltaïque.

Durant les dernières années, le photovoltaïque est devenu rapidement l'une des technologies d'énergie les plus importantes, comme l'énergie éolienne, hydraulique et autres. La production photovoltaïque est devenue une technologie mature de l'énergie [1] et la demande sur cette forme énergétique ne cesse de croître qui à titre d'exemple en l'an 2011 la capacité des installations de production PV est de 27.7 GW dans le monde alors que la capacité totale en perspective était de 67GW à la fin de la même année [2].

A travers l'effet photovoltaïque, l'énergie fournie est très variable et en courant continu: il faut souvent la stocker et parfois la transformer. Les systèmes photovoltaïques peuvent être divisés en deux catégories: les systèmes autonomes et les systèmes hybrides connectés au réseau, l'association des centrales PV connectées au réseau électrique où une charge alimentée en alternatif se fait à l'aide des convertisseurs statiques [1].

Les convertisseurs statiques sont des appareils qui servent à transformer la tension continue fournie par les panneaux ou les batteries pour l'adapter à des récepteurs qui fonctionnent en une tension continue différente ou une tension alternative, ce travail se base sur les convertisseurs DC/AC (les onduleurs) [3].

Les onduleurs photovoltaïques servent à convertir l'énergie captée par les panneaux solaires directement ou celle emmagasinée dans les batteries afin de l'injecter au réseau pour la consommation; néanmoins comme tous les appareils électriques et électroniques, tombent en panne et se dégradent pendant la durée de fonctionnement, la sécurité, la fiabilité, la performance et la continuité de service constituent, aujourd'hui, des préoccupations majeures dans ce domaine, ce qui nécessite un diagnostic.

Le diagnostic consiste à la détection et la localisation des défauts dans un système, il existe plusieurs approches et méthodes de diagnostic; dans ce travail, pour diagnostiquer les défauts dans l'onduleur nous avons appliqué deux méthodes; la première méthode de diagnostic se fait avec l'analyse de la réponse en fréquence (FRA), qui est un des outils de diagnostic le plus utilisé pour la détection des défauts et l'évaluation de leurs états dans les transformateurs de puissance, elle est mise en œuvre pendant les phases normale d'arrêt

d'exploitation (Off line) ; la deuxième méthode consiste à l'analyse de la transformée de fourier rapide (FFT), elle mis en œuvre en cours d'exploitation (On line).

Ce mémoire est organisé autour de quatre chapitres qu'on décrit comme suit:

Le premier chapitre est consacré à la présentation des généralités sur les systèmes photovoltaïques, et les principaux avantages et inconvénients des différents types des systèmes photovoltaïques ; ce chapitre est dédié aussi à la modélisation d'un module photovoltaïque pour obtenir les caractéristiques I-V et P-V, et pour voir l'influence des paramètres (température-éclairage) sur ces dernières.

Le second chapitre aborde la description d'un hacheur avec ses différents types et le principe de son fonctionnement, la description de la commande MPPT, ce chapitre consacre aussi à la technologie des onduleurs avec le principe de leur fonctionnement, et la description de la commande MLI, comme il expose la topologie d'un onduleur multi niveaux et la simulation d'un onduleur de tension triphasé à deux niveaux avec une commande MLI sous PSIM.

Le troisième chapitre est consacré au diagnostic des défauts, nous parlons des différents défauts qu'on peut trouver dans les systèmes photovoltaïques et quelques méthodes de diagnostic de ces derniers.

Le quatrième chapitre aborde à la description de la méthode d'analyse de la réponse en fréquence FRA avec une simulation d'onduleur triphasé commandé par MLI sous Matlab/Simulink , et la méthode de la transformée de fourier rapide FFT avec la simulation d'un onduleur triphasé commandé par MLI sous PSIM.

Finalement, une conclusion générale résumera tous les résultats obtenus dans ce présent mémoire et nous avons proposés quelques perspectives.

Chapitre I :
Généralités sur les
systèmes
Photovoltaïque

I.1. Introduction

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

Dans ce chapitre nous allons expliquer un peu le phénomène photovoltaïque, ses éléments et leurs caractéristiques, le principe de fonctionnement, ainsi les avantages et inconvénients.

I.2. Cellule photovoltaïque

I.2.1. Effet photovoltaïque

Effet photovoltaïque est la conversion directe de l'énergie solaire en électricité, les cellules solaires photovoltaïques sont des semi-conducteurs capables de convertir directement la lumière en électricité, cette conversion, appelée effet photovoltaïque, il est composé de 3 étapes qui se résument en l'absorption de lumière par matériau de la cellule PV, le transfert d'énergie des photons vers les charges électriques et finalement la collecte de charge [4].

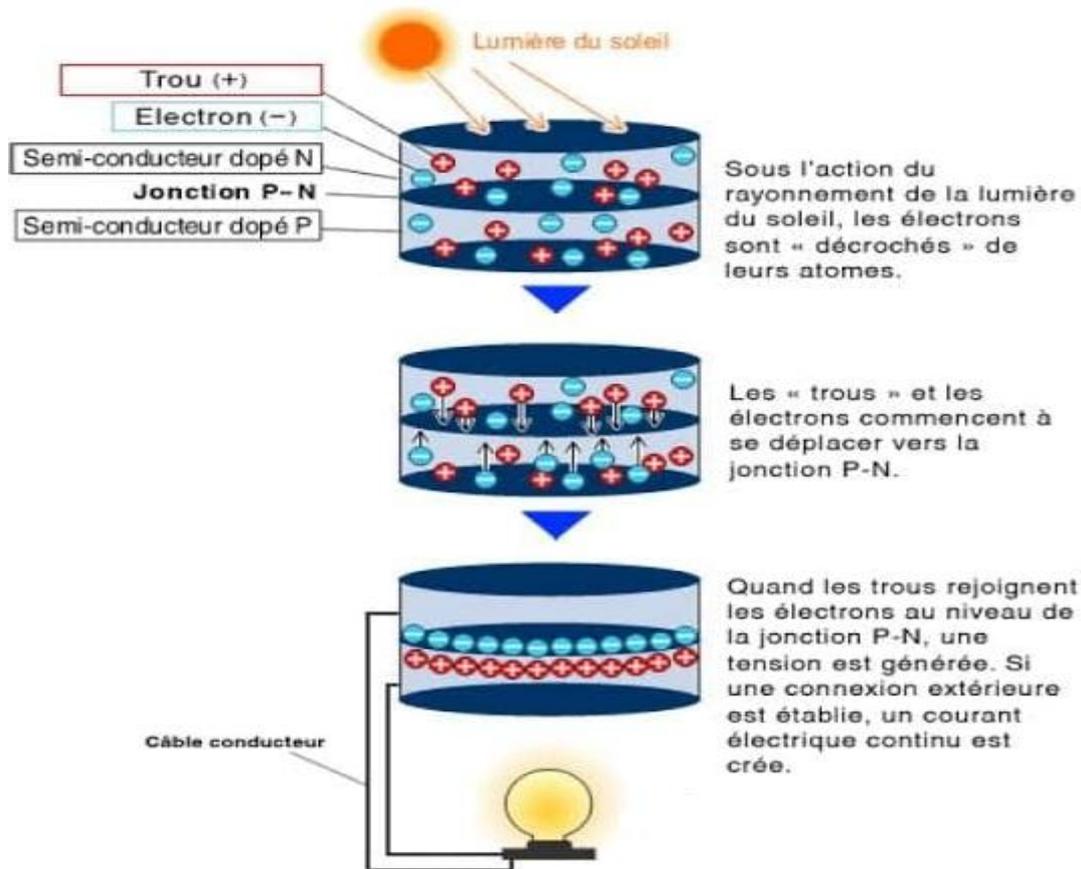


Figure I.1: Fonctionnement d'une cellule solaire photovoltaïque [5].

I.2.2. Technologies des cellules solaires

Le tableau I.1 présente les avantages et les inconvénients des technologies les plus utiliser pour une cellule photovoltaïque.

Type	Silicium mono cristallin 	Silicium poly Cristallin 	Amorphe 
Durée de vie	35 ans	35 ans	< 10 ans
Avantage	Bon rendement en soleil direct	Bon rendement en soleil direct (moins que le monocristallin mais plus que l'amorphe).	Souplesse, Prix moins élevé que le cristallin, Bon rendement en diffus.
Inconvénient	Mauvais rendement en soleil diffus (temps nuageux...), prix élevé.	Mauvais rendement en soleil diffus (temps nuageux...), prix élevé.	Mauvais rendement en plein soleil.

Tableau I.1: Avantages et inconvénients des cellules photovoltaïques [6].

I.2.3. Circuit électrique équivalent

➤ Cellule photovoltaïque réel

Sous éclairage, la cellule photovoltaïque réelle peut être représentée par un circuit électrique équivalent schématisé par la figure I.2 [7].

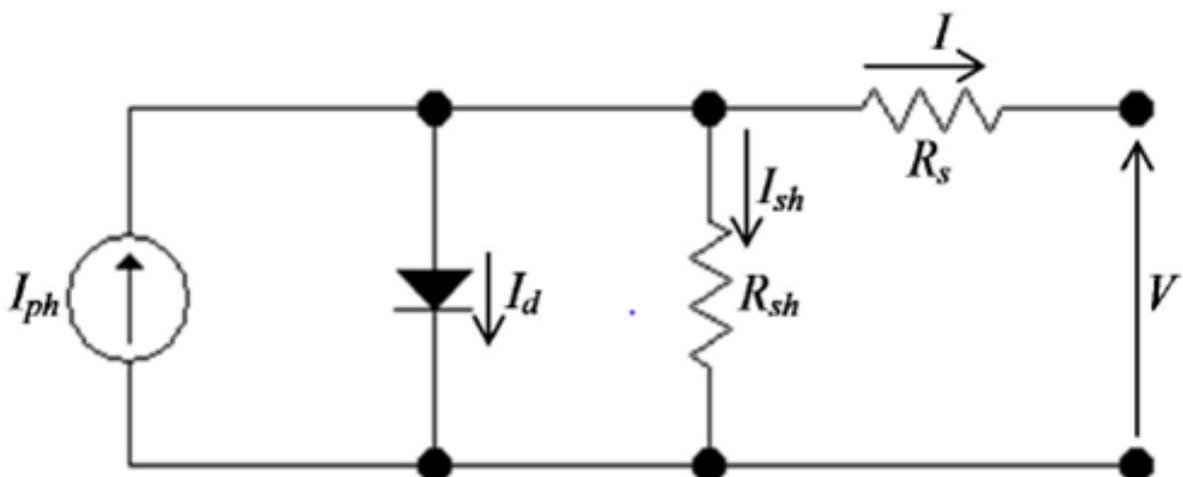


Figure I.2: Modèle de la cellule photovoltaïque réel [7].

- Un générateur de courant I_{ph} : produit un courant (correspondant au courant photo gène) résulte de la dissociation des excitations.

- La résistance parallèle **R** (résistance shunt **Rsh**) : correspond à une résistance de fuite causée par un défaut, entre les deux zones N et P de la jonction, Ceci est le cas lorsque la diffusion des contacts métalliques à haute température perce l'émetteur, Elle peut aussi être due à un court-circuit sur les bords de la cellule, cette résistance devra être la plus élevée possible.
- La résistance série **Rs** : modélise les pertes résistives au sein de la photopile, elle doit idéalement être plus faible possible pour limiter son influence sur le courant de la cellule.
- La diode **D** : représente la conductivité asymétrique dans la cellule solaire. Elle est due au contact bloquant à l'interface semi-conducteur/électrode ou au champ induit à l'interface donneur-accepteur.

On applique les lois de Kirchhoff sur le schéma de la figure **I.2** , on trouve:

$$I = I_{ph} - I_d - I_{Sh} \quad (\text{I.1})$$

$$I_{sh} * R_{sh} = I * R_s + V \quad (\text{I.2})$$

Donc le courant qui circule dans la résistance shunt et définit par :

$$I_{sh} = \frac{V + I * R_s}{R_{sh}} \quad (\text{I.3})$$

Où le courant I_d est donné par :

$$I_d = I_s \times \left(e^{\frac{V}{n * v_t}} - 1 \right) \quad (\text{I.4})$$

On remplace les équations **I.3** et **I.4** dans l'équation **I.1**, on obtient :

$$I = I_{ph} - I_s \times \left(e^{\frac{V + I * R_s}{n * v_t}} - 1 \right) - \frac{V + I * R_s}{R_{sh}} \quad (\text{I.5})$$

Il existe d'autres modèles des cellules photovoltaïques, mais le modèle représenté dans la figure **I.2** est le plus utilisé.

I.3. Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque

I.3.1. Performance de la cellule

- **Le courant de court-circuit I_{CC}**

Le courant de court circuit s'agit du courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule, ainsi que la tension $V=0$

$$I_{SC} = I(V = 0) = I_{ph} - I_s (e^0 - 1) = I_{ph} \quad (\text{I.6})$$

Nous pouvons ainsi définir le courant de court-circuit I_{SC} est égal au courant généré par la photodiode I_{ph} [8].

- **Tension de circuit ouvert (V_{OC})**

La tension de circuit ouvert est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul, dans ce cas, la tension qui en résulte est appelée la tension de circuit ouvert V_{OC} [9].

$$V_{OC} = m \times V_T \times \ln\left(\frac{I_{SC}}{I_S} + 1\right) \quad (I.7)$$

Avec de très faibles courants la valeur 1 pour $\frac{I_{SC}}{I_S}$, peut être ignorée de sorte que l'équation devienne sous une forme simplifiée [8] :

$$V_{OC} = m \times V_T \times \ln\left(\frac{I_{SC}}{I_S}\right) \quad (I.8)$$

- **Le point de puissance maximale (MPP)**

La cellule solaire fournit des capacités différentes selon le point de fonctionnement dans lequel elle est utilisée. Le point où la puissance maximale (MPP) [8] :

$$P_{MPP} = V_{MPP} \times I_{MPP} \quad (I.9)$$

- **Facteur de forme (FF)**

Le facteur de forme ou le facteur de remplissage (FF), le facteur de forme nous indique la taille de la zone sous le point MPP par rapport à la zone $V_{OC} * I_{SC}$ (figure 1.8) [9] :

$$FF = \frac{P_{MPP}}{V_{OC} \times I_{SC}} = \frac{V_{MPP} \times I_{MPP}}{V_{OC} \times I_{SC}} \quad (I.10)$$

- **Le rendement η**

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

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{FF \times V_{OC} \times I_{SC}}{P_{in}} \quad (I.11)$$

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

I.3.2. Caractéristique courant-tension et puissance-tension

La figure ci-dessous représente les courbes $I = f(V)$ et $P = f(V)$ d'une cellule photovoltaïque typique dans des conditions constantes d'irradiation et de température.

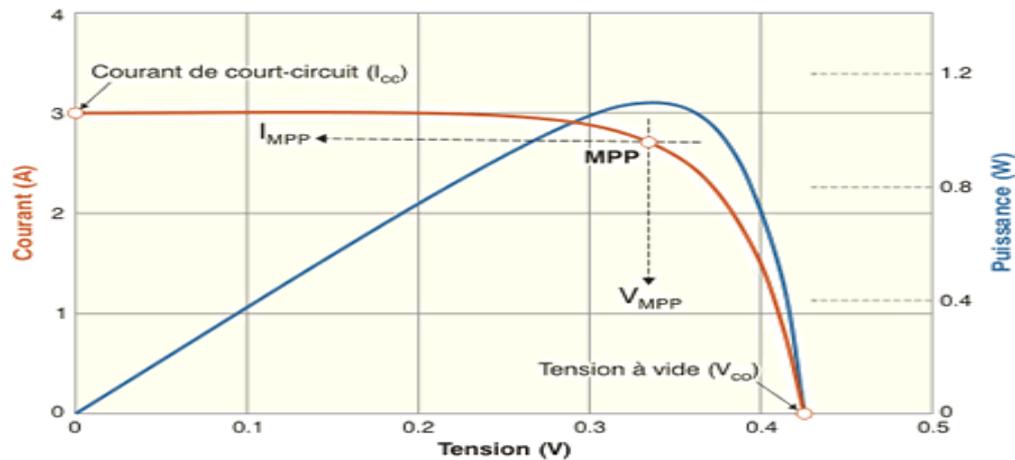


Figure I.4 : Courbe $I=f(V)$ et la courbe $P=f(V)$ d'une cellule photovoltaïque [9].

I.3.3. Simulation d'une cellule photovoltaïque

La figure I.5 représente le bloc de simulation d'un module photovoltaïque sous Matlab/Simulink.

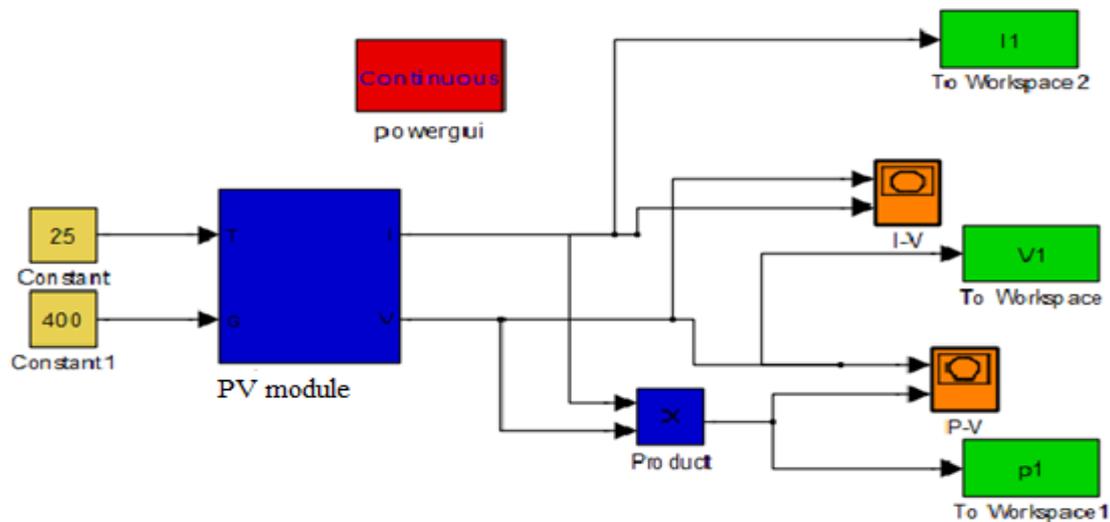


Figure I.5: Schéma bloc d'un module photovoltaïque

❖ Influence de l'éclairement :

La figure I.6 représente les caractéristiques $I(V)$ d'un module PV pour différents niveaux de rayonnement :

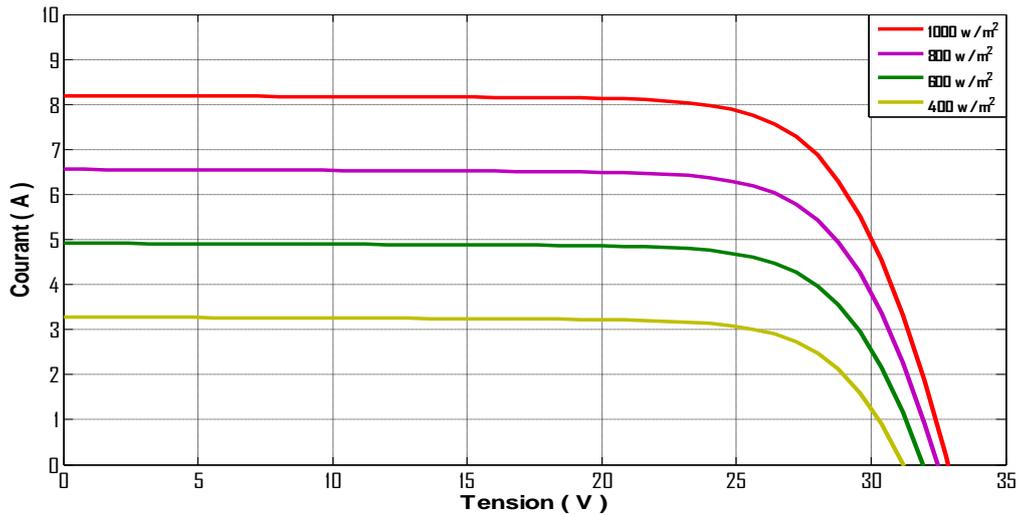


Figure I.6: La caractéristique courant-tension d'un module en fonction de l'éclairement.

Nous remarquons que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement. Par contre, la tension de circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, elle reste quasiment identique même à faible éclairement. L'irradiation standard, internationalement acceptée, pour mesurer la réponse des panneaux photovoltaïques est une intensité rayonnante de 1000 W/m^2 et une température de $25 \text{ }^\circ\text{C}$ [10].

La figure I.7 nous permet de déduire l'influence de l'éclairement sur la caractéristique $P(V)$:

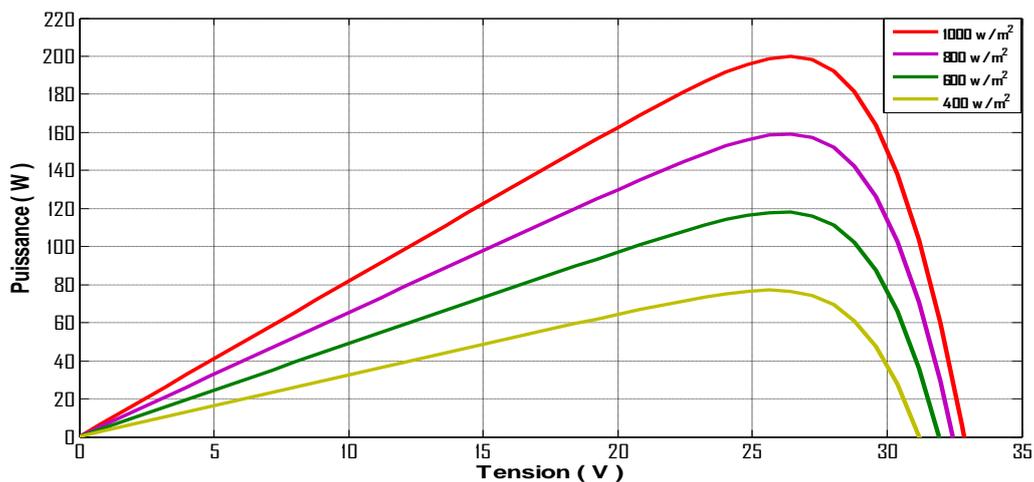


Figure I.7: La caractéristique puissance-tension d'un module en fonction de l'éclairement.

Il est clair que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement. Par contre, la tension de circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, mais reste quasiment identique même à faible éclairement. Ceci implique

donc que:

- La puissance optimale du module (P_{opt}) pratiquement proportionnelle à l'éclairement.
- Les points de puissance maximale se situent à peu près à la même tension [10].

❖ **Influence de température:**

La température est un paramètre essentiel puisque les cellules sont exposées aux rayonnements solaires, susceptibles de les échauffer. De plus, une partie du rayonnement absorbé n'est pas convertie en énergie électrique : elle se dissipe sous forme de chaleur.

La figure I.8 présente des courbes courant-tension pour différentes températures de fonctionnement d'un module photovoltaïque

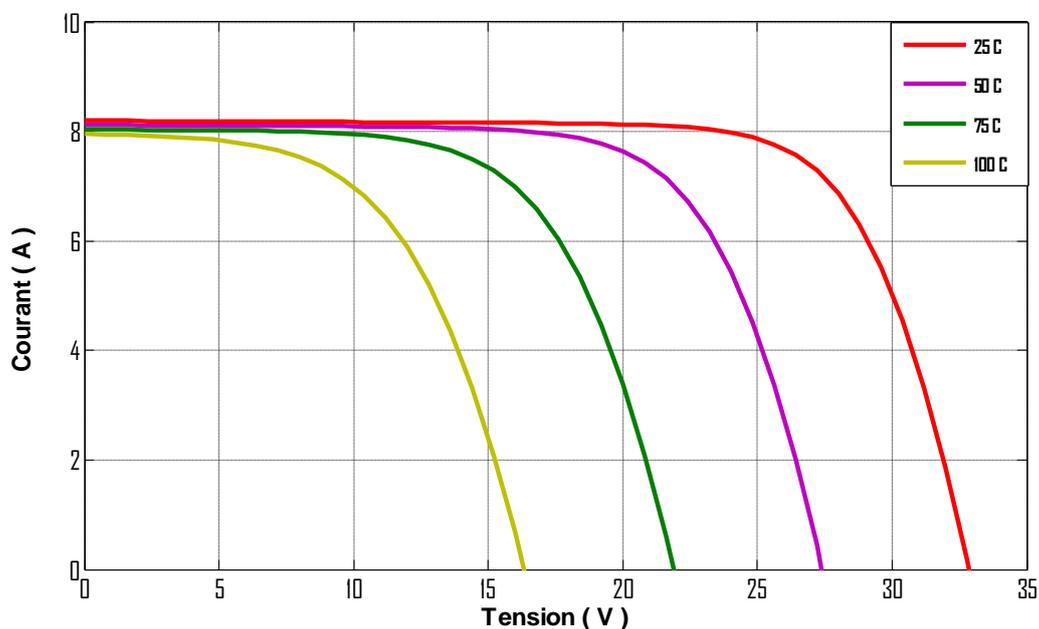


Figure I.8 : Caractéristique courant-tension d'un module en fonction de température.

Nous remarquons que la température a une influence négligeable sur la valeur du courant de court-circuit. Par contre, la tension de circuit ouvert baisse assez fortement lorsque la température augmente [10].

La figure I.9 illustre la variation de la puissance délivrée par un module photovoltaïque en fonction de la tension pour différentes valeurs de la température

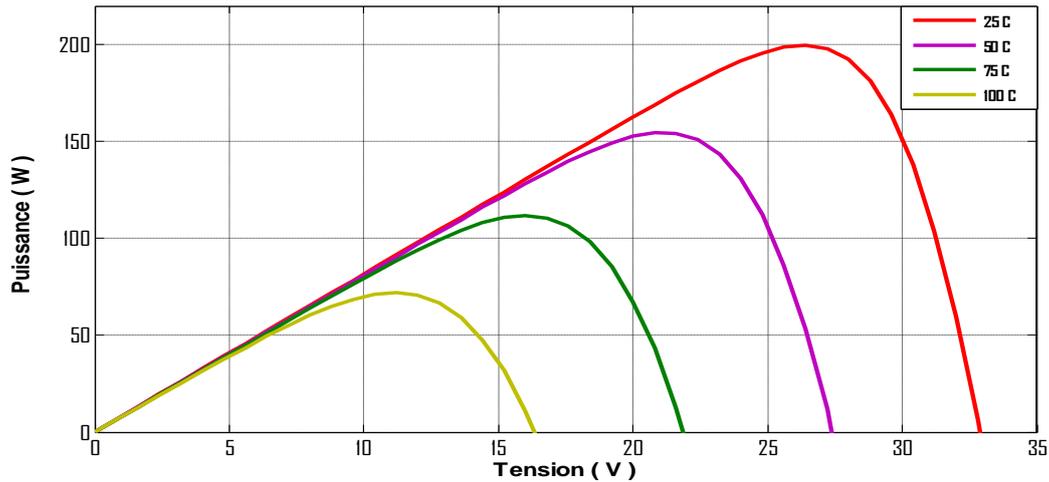


Figure I.9 : Caractéristique puissance-tension d'un module en fonction de la température.

Nous apercevons que la tension de circuit ouvert décroît en fonction d'une augmentation de la température. Par conséquent, on perd de la puissance disponible aux bornes de la cellule PV [10].

I.4. Panneaux solaires

Un panneau solaire convertit l'énergie lumineuse en énergie électrique DC, il est composé de cellules photovoltaïques, qui sont connectées en série/parallèle afin d'augmenter la tension d'utilisation et donc la puissance disponible au niveau de l'ensemble des cellules, nous le nommons aussi un générateur photovoltaïque GPV [11].

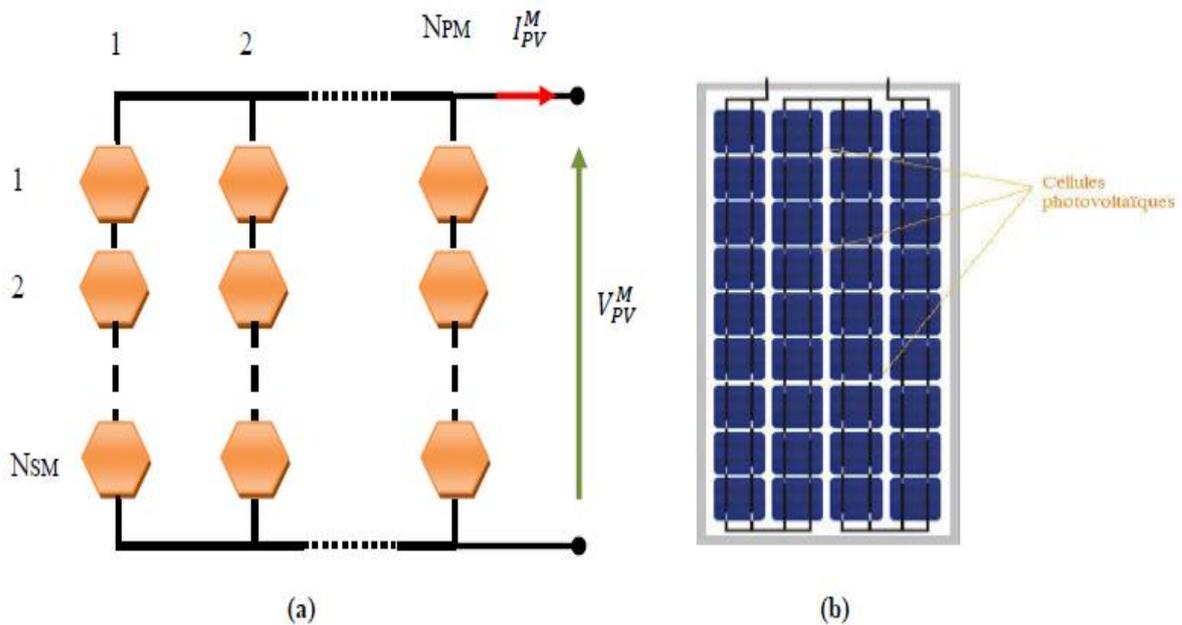


Figure I.10 : Panneau PV constitué par cellules en série et cellules en parallèle

(a) Structure d'un panneau (b) Panneau solaire photovoltaïque [11].

On distingue trois types de raccordement:

- **Raccordement série** : dans ce mode la tension augmente mais le courant reste lui-même
- **Raccordement parallèle** : dans ce mode le courant augmente mais la tension reste elle même.
- **Raccordement mixte (série-parallèle)** : dans ce mode le courant et la tension augmentent [11].

I.5. Système de protection

- **Diode de by-pass**

Diode de by-pass est connectée en antiparallèle avec un groupe de cellules pour protéger les cellules les plus faibles contre la polarisation inverse [12].

- **Diode anti-retour**

Pour empêcher la batterie de se décharger la nuit dans les photopiles, ou pour empêcher une série de modules contenant un module défaillant ou masqué, une diode "d'anti retour" est intégrée dans chaque série [12].

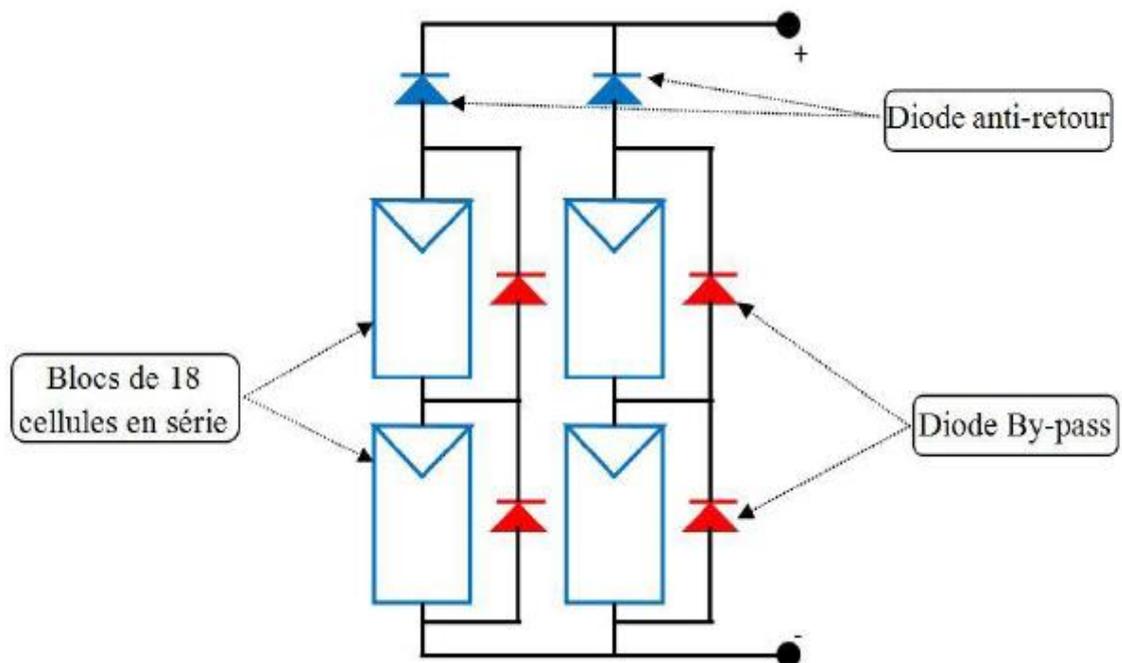


Figure I.11 : Diodes de protection des modules [4].

I.6. Système de stockage

Les batteries solaires, parfois, appelées "accumulateurs", destinées à emmagasiner de l'électricité (toujours en courant continu), elles stockent l'énergie produite par les panneaux photovoltaïques afin d'assurer l'alimentation électrique en toutes circonstances (jour ou nuit, ciel dégagé ou couvert) [13].

I.7. Les différents types de système photovoltaïque

I.7.1. Système PV autonome

Autonomes ou « stand-alone », les systèmes autonomes dépendent uniquement de l'énergie solaire pour répondre à la demande d'électricité. Ces installations isolées ne sont pas connectées au réseau, l'énergie produite par les cellules photovoltaïques au cours de la journée peut être utilisée immédiatement ou emmagasinée dans les accumulateurs, servant la nuit ou pendant des périodes à ciel couvert où dans le cas d'insuffisance d'énergie solaire.

En général ces installations comprennent quatre éléments :

- Un ou plusieurs modules PV;
- Le système de régulation;
- Une ou plusieurs batteries;
- L'onduleur [14].

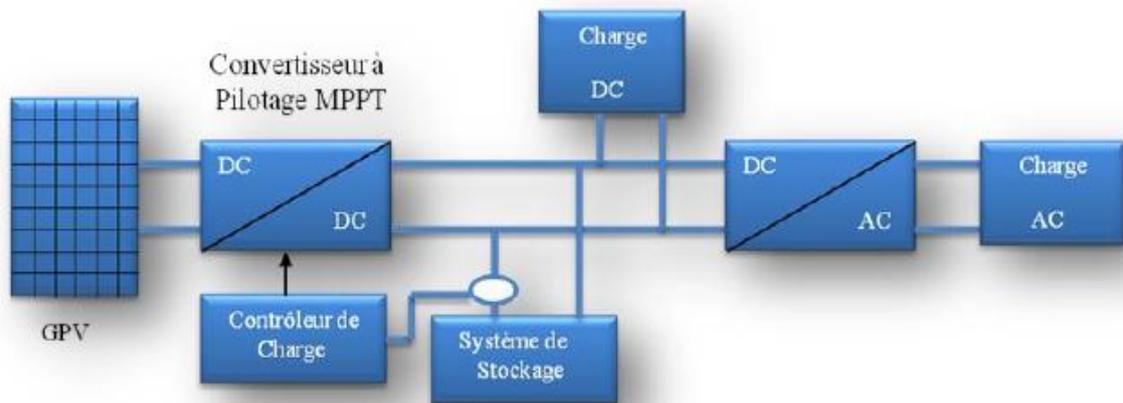


Figure I.12: Installation photovoltaïque autonome [14].

I.7.2. Système PV connecté directement au réseau

Les systèmes de production d'énergie photovoltaïque connectés à un réseau sont une résultante de la tendance à la décentralisation du réseau électrique, le courant généré peut être utilisé localement et les surproductions sont injectées au réseau. La centrale de distribution électrique se charge également d'équilibrer l'offre et la demande [14].

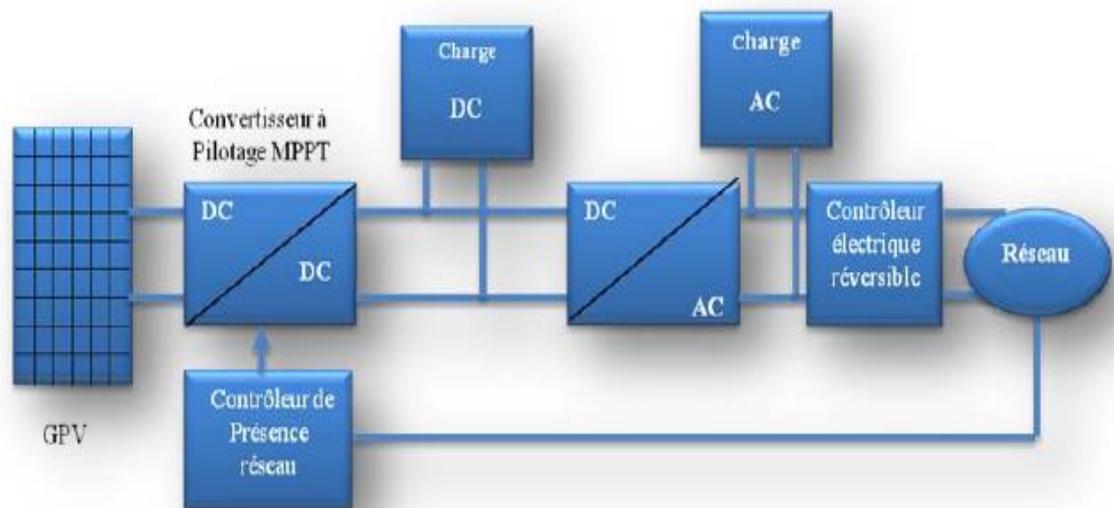


Figure I.13: Installation photovoltaïque couplée au réseau [14].

I.8. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

I.8.1. Principaux avantages de l'énergie photovoltaïque

Les systèmes solaires électriques offrent de nombreux avantages, sont les suivants:

- Ils sont de fonctionnement sûr, non polluants et silencieux;
- Sa fiabilité et la longue vie de l'installation;
- Ils n'exigent presque aucun entretien;
- Son coût de maintenance bas;
- Sa flexibilité (dimensionnement selon les besoins, modularité);
- Sa structure fixe;
- Ils sont des systèmes décentralisés [15].

I.8.2. Inconvénients de l'énergie photovoltaïque

- Le coût élevé de l'installation;
- Le rendement relativement bas de l'effet photovoltaïque;
- La puissance est réduite lorsque les conditions climatiques sont défavorables;
- Le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire pour une installation autonome;
- Même si l'électricité produite par une installation photovoltaïque est sans pollution, la fabrication, l'installation et l'élimination des panneaux ont un impact sur l'environnement;
- La durée de vie limitée des batteries solaires qui alourdit l'investissement [15].

I.9. Conclusion

Le caractère modulaire des panneaux solaire, la simplicité de l'installation, sa qualité de système écologique sont les points forts qui encouragent à utiliser les systèmes à énergie photovoltaïque, notamment dans les sites isolés, là où l'énergie conventionnelle ne parvient pas.

Le chapitre qui suit est consacré à présenter les différents convertisseurs statiques, qui représentent la partie électronique de puissance dans le système photovoltaïque, ainsi leurs caractéristiques.

Chapitre II:

Les convertisseurs statiques

II. Introduction

Nous désignons par système photovoltaïque l'ensemble des éléments constituant une application industrielle ou domestique tirant tout ou partie de son énergie électrique d'un générateur photovoltaïque, le transfert de cette énergie se fait à travers des convertisseurs statiques. Les convertisseurs statiques, adaptés à l'énergie solaire photovoltaïque, sont souvent appelés dans le commerce « convertisseurs solaires ». Nous consacrons ce chapitre à l'étude de différents types de convertisseurs statiques qu'on peut utiliser dans un système photovoltaïque.

II.1. Les convertisseurs statiques

Les convertisseurs statiques sont des systèmes permettant d'adapter la source d'énergie électrique à un récepteur donné. Suivant le type de machine à commander et suivant la nature de la source de puissance, on distingue plusieurs familles de convertisseurs statiques [16].

II. 1. 1. Convertisseur DC/DC (Hacheur)

Le convertisseur DC/DC sa fonction est de fournir une tension continue variable à partir d'une tension continue fixe. Cette conversion d'énergie s'effectue grâce à un découpage haut fréquence caractérisée par un rendement élevé [16].

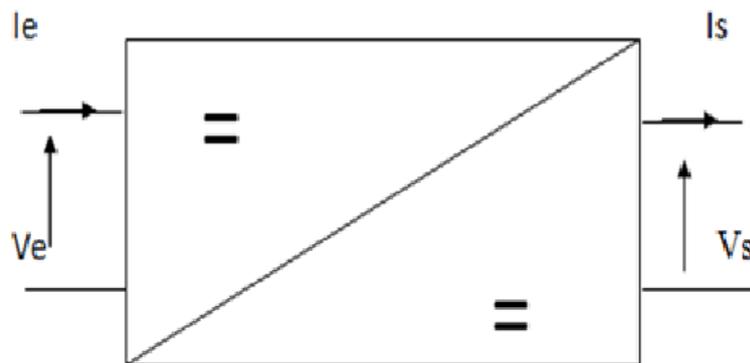


Figure II.1 : Convertisseur DC-DC [17].

Les trois configurations de base sont :

- Convertisseur dévolteur ;
- Convertisseur survolteur ;
- Convertisseur dévolteur-survolteur.

II.1.1.1. Hacheur dévolteur (série)

Le hacheur série est un convertisseur direct DC–DC, la source d'entrée est de type tension continue et la charge de sortie continue de type source de courant. L'interrupteur K peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage) [17].

La figure II.2 représente le schéma électrique d'un hacheur dévolteur:

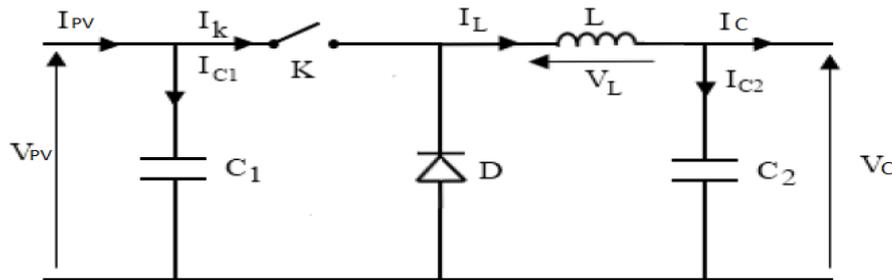


Figure II.2 : Schéma électrique d'un hacheur dévolteur [19].

Fonctionnement

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

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

Les chronogrammes (tracés dans le cas idéal) de la Figure II.3 sont tracés dans le cas d'une conduction continue, c'est-à-dire que le courant ne repasse jamais par zéro.

Pour calculer la relation entre la tension d'entrée et celle de sortie, on suppose que la tension moyenne aux bornes de l'inductance est nulle [19].

$$V_c = \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T} V_c dt \quad (\text{II. 1})$$

$$= \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T} V_{PV} dt \quad (\text{II. 2})$$

$$= \alpha V_{PV} \quad (\text{II. 3})$$

A pertes minimales on a :

$$P_{PV} = P_c \quad V_c I_c = V_{PV} I_c \quad I_{PV} = \frac{V_c}{V_{PV}} I_c \quad I_{PV} = \alpha I_c$$

Donc :

$$\alpha = \frac{V_c}{V_{PV}} = \frac{I_{PV}}{I_c} \quad (\text{II. 4})$$

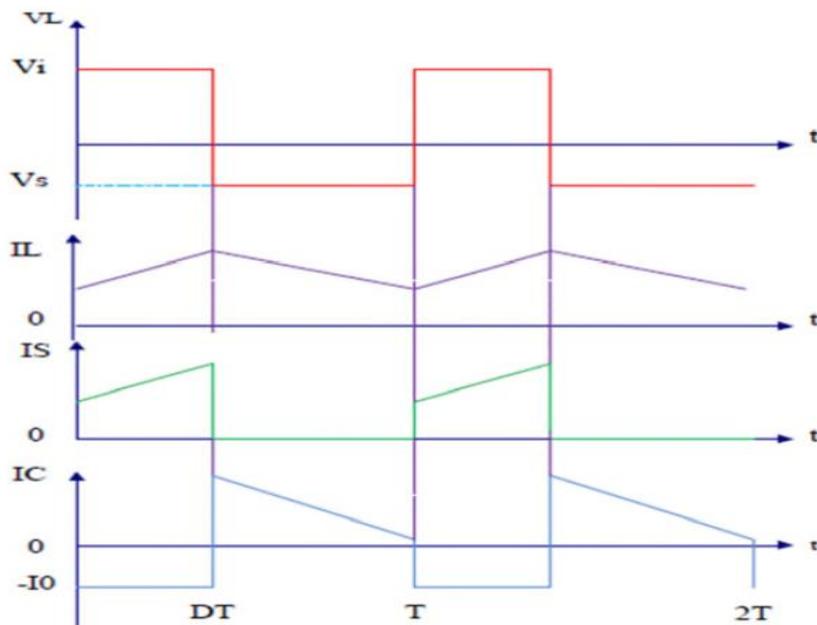


Figure II.3 : Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur série [20].

II.1.1.2. Hacheur survolteur (parallèle)

Le convertisseur survolteur est connu par le nom d'élévateur de tension peut être représenté par le circuit de la figure II.4.

C'est un convertisseur direct DC-DC. La source d'entrée est de type courant continu (inductance en série avec une source de tension) et la charge de sortie est de type tension continue (condensateur en parallèle avec la charge résistive). L'interrupteur K peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage) [18].

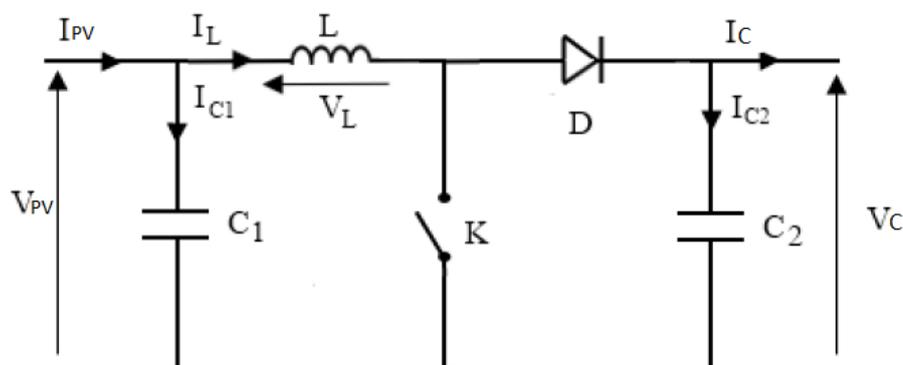


Figure II.4 : Schéma électrique d'un hacheur survolteur [19].

Fonctionnement

Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée αT , le courant dans l'inductance croît linéairement, la tension aux bornes de K est nulle.

Pendant le temps $t \in [\alpha T; T]$ l'interrupteur s'ouvre et l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre D [19].

On a alors $V_k = V_c$; en écrivant que la tension aux bornes de l'inductance est nulle, on arrive à :

$$V_{PV} = \frac{1}{T} \int_0^T V_{PV} dt \quad (\text{II. 5})$$

$$= \frac{1}{T} \int_0^T V_c dt \quad (\text{II. 6})$$

$$= V_{PV} (1 - \alpha) \quad (\text{II. 7})$$

A pertes minimales on a :

$$P_c = P_{PV} \quad V_c I_c = V_{PV} I_{PV} \quad I_c = \frac{V_{PV}}{V_c} I_{PV} \quad I_c = \alpha(1 - \alpha) I_{PV}$$

Donc :

$$(1 - \alpha) = \frac{V_{PV}}{V_c} = \frac{I_c}{I_{PV}} \quad (\text{II. 8})$$

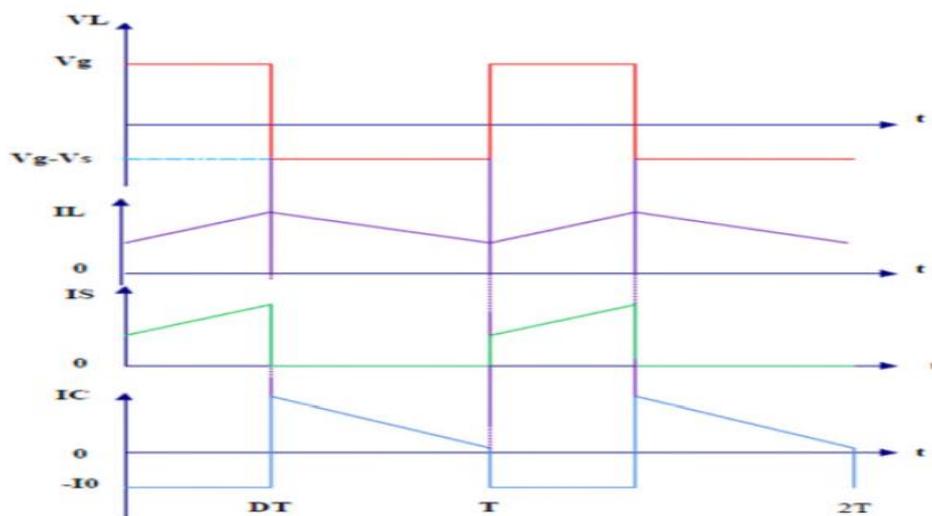


Figure II.5 : Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur survolteur [20].

II.1.1.3. Hacheur dévolteur-survolteur

Un convertisseur dévolteur-survolteur est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible ou plus grande valeur mais de polarité inverse. Un inconvénient de ce convertisseur est que son interrupteur ne possède pas de borne reliée au zéro, compliquant ainsi sa commande [18].

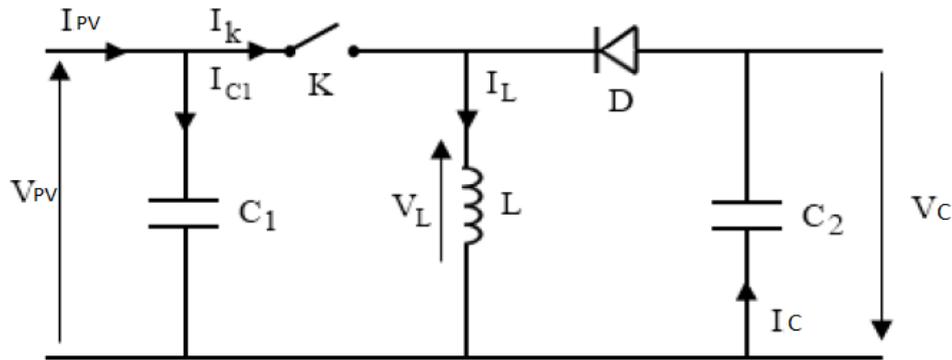


Figure II.6 : Schéma électrique d'un hacheur dévolteur-survolteur [19].

Fonctionnement

Cette structure de convertisseur permet d'obtenir des tensions négatives à partir de tension positive.

Le schéma de principe est présenté sur la Figure II.7. Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée αT_e , le courant augmente linéairement. La tension est égale à V_{PV} . À l'ouverture de K, la diode prend le relais et la tension V_l est égale à V_c . Par définition la tension moyenne aux bornes de l'inductance est nulle, il en résulte que [19]:

Quand le rapport cyclique $\alpha > 0.5$ le hacheur dévolteur-survolteur fonction comme un hacheur survolteur et si le rapport cyclique $\alpha < 0.5$; le hacheur dévolteur-survolteur fonction comme un hacheur dévolteur.

$$V_{PV} \cdot \alpha \cdot T = V_c \cdot (1 - \alpha)T \tag{II.9}$$

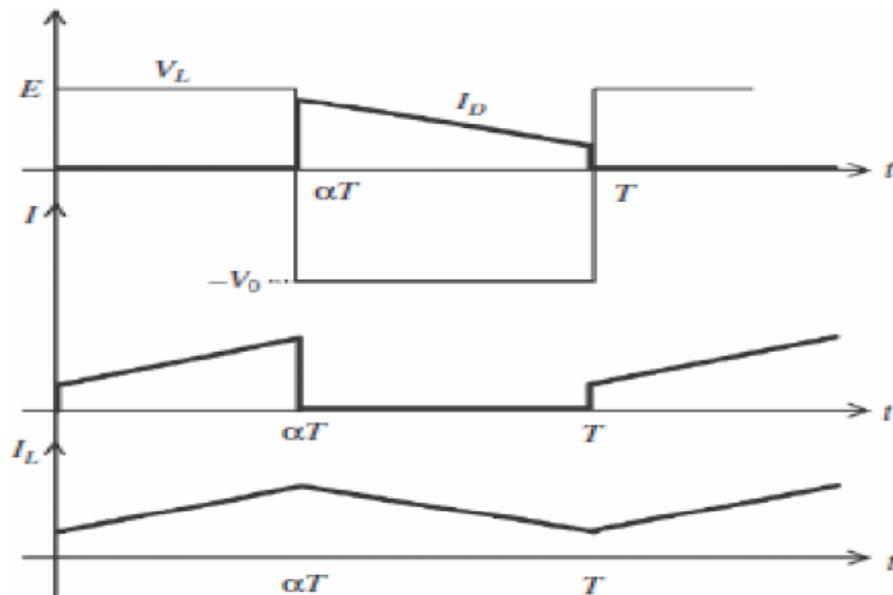


Figure II.7 : Chronogrammes de courant et de tension d'un hacheur dévolteur-survolteur [19].

II.1.2. Commandes MPPT des convertisseurs DC-DC

D'une manière générale et selon le type d'implémentation électronique, les commandes MPPT peuvent être classifiées en analogique, numérique ou mixte. Il est cependant plus intéressant de les classifier selon le type de recherche qu'elles effectuent et selon les paramètres d'entrée de la commande du MPPT. Bien qu'il existe un grand nombre de publications scientifiques qui présentent des commandes du MPPT plus ou moins complexes la figure II.8 montre le diagramme synoptique d'un système photovoltaïque, avec un module MPPT qui a pour entrées la tension et le courant de sortie du module. Dans la plupart des cas, on fait une maximisation de la puissance fournie par le module solaire.

Ces méthodes sont basées sur des algorithmes de recherche itérative pour trouver le point de fonctionnement du module solaire pour que la puissance générée soit maximale sans interruption de fonctionnement du système. Elles ne sont pas basées sur des valeurs des références prédéfinies ou à partir des paramètres opérationnels, mais sur la maximisation permanente de la puissance générée par les modules photovoltaïque PV. La puissance extraite du module est calculée à partir des mesures de courant I et de la tension V du module et la multiplication de ces deux grandeurs $P_{pv} = I_{pv} * V_{pv}$ [21].

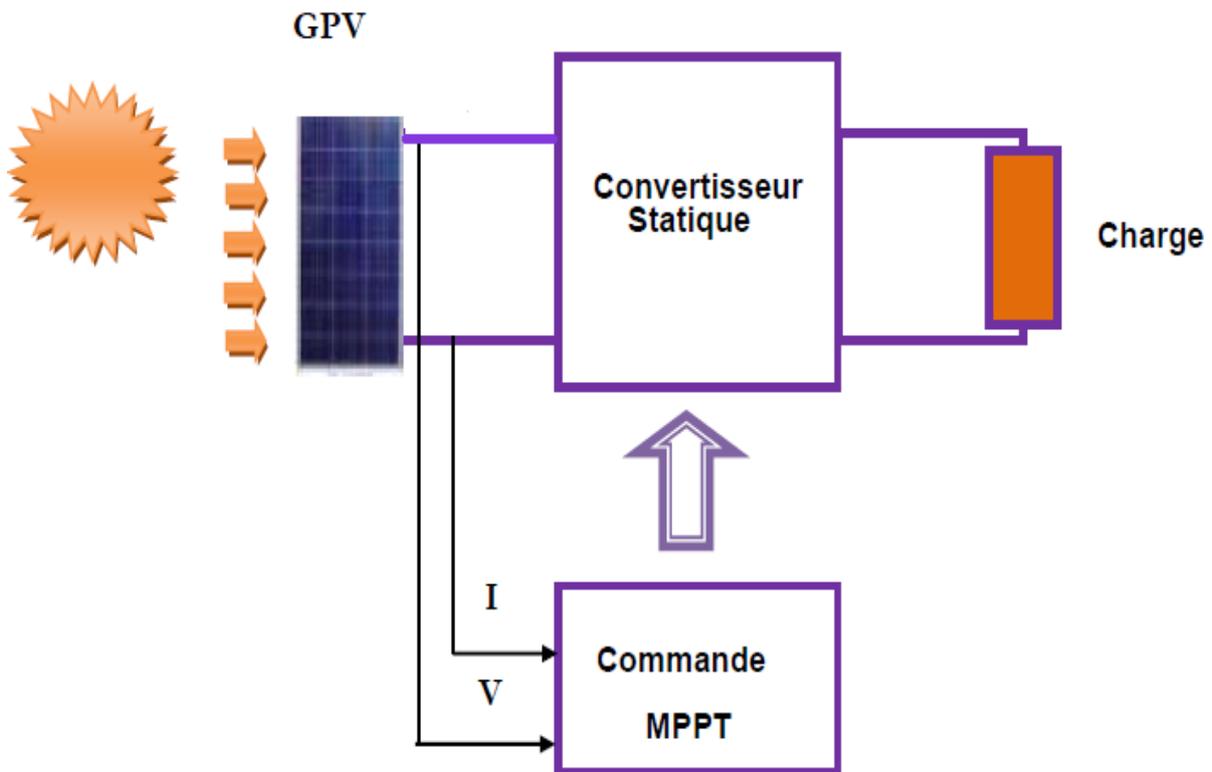


Figure II.8: Diagramme synoptique d'un système photovoltaïque avec un module MPPT[21]

II.2. Convertisseur DC/AC (Onduleur)

II.2.1. Technologies des onduleurs

Pour les onduleurs utilisés dans les applications PV, on distingue différents topologies, selon l'importance de l'installation, le rendement et la puissance.

II.2.1.1. Onduleurs modulaires (module inverter)

Suivant ce concept, chaque module solaire disposé d'un onduleur individuel, pour les installations plus importantes, tous les onduleurs sont connectés en parallèle côté courant alternatif. Les onduleurs modulaires sont montés à proximité immédiate du module solaire correspondant [2].

II.2.1.2. Onduleurs centralisés (central inverter)

Un onduleur centralisé de forte puissance transforme l'ensemble du courant continu produit par un champ de cellules solaires en courant alternatif. Le champ de cellules solaires est en règle générale constitué de plusieurs rangées connectées en parallèle. Chaque rangée est elle-même constituée de plusieurs modules solaires connectés en série. Pour éviter les pertes dans les câbles et obtenir un rendement élevé, on connecte le plus possible de modules en série [2].

II.2.1.3. Onduleurs "String" ou "de Rangée"

L'onduleur String est le plus utilisé. Le plus souvent, huit (ou plus) de modules solaires sont connectés en série. Comme une seule connexion série est nécessaire, les coûts d'installation sont réduits. Il est important de noter qu'en cas d'ombrage partiel des modules solaires, il n'y a pas de perte, l'emploi de diodes de by-pass est fortement recommandé [1].

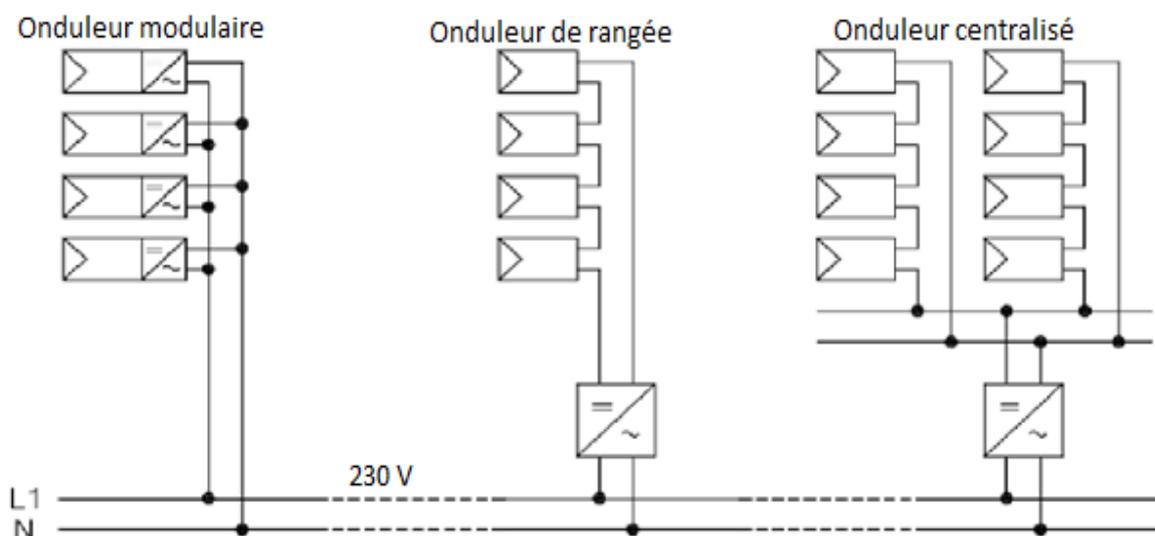


Figure II.9: Classification des onduleurs PV connectés au réseau [2].

Les installations jusqu'à 3 Kilowatt de puissance sont fréquemment réalisées avec un onduleur String. Pour une puissance plus élevée, il est possible de connecter plusieurs onduleurs String en parallèle, côté courant alternatif. L'intérêt dans ce concept est d'utiliser un plus grand nombre d'onduleurs du même type. Cela réduit les coûts de production et apporte un intérêt supplémentaire : si un onduleur tombe en panne, seule la production de la rangée concernée est défaillante. Ils sont toujours conçus en triphasé. La plupart du temps, les systèmes photovoltaïques (PV) sont installés dans les réseaux de distribution basse tension avec une puissance allant jusqu'à 30 KVA. Le type du réseau choisi au raccordement détermine la possibilité du choix des systèmes de surveillance, et la détection en cas de défaut [2].

II.2.2. Choix des composants de l'onduleur

Le mosfet est très bien adapté pour les convertisseurs basse-tension et à fréquence élevée (inférieure à 100V et supérieure à 50kHz) alors que l'IGBT est utilisé pour les tensions supérieures à 300V et des fréquences rarement supérieures à 20kHz. Les GTO et thyristors sont dédiés aux applications haute tension (>1kV) fort courant (>1kA). La figure II.10 résume cette classification de composants de puissance en fonction de la fréquence de commutation et du produit U.I des composants [21].

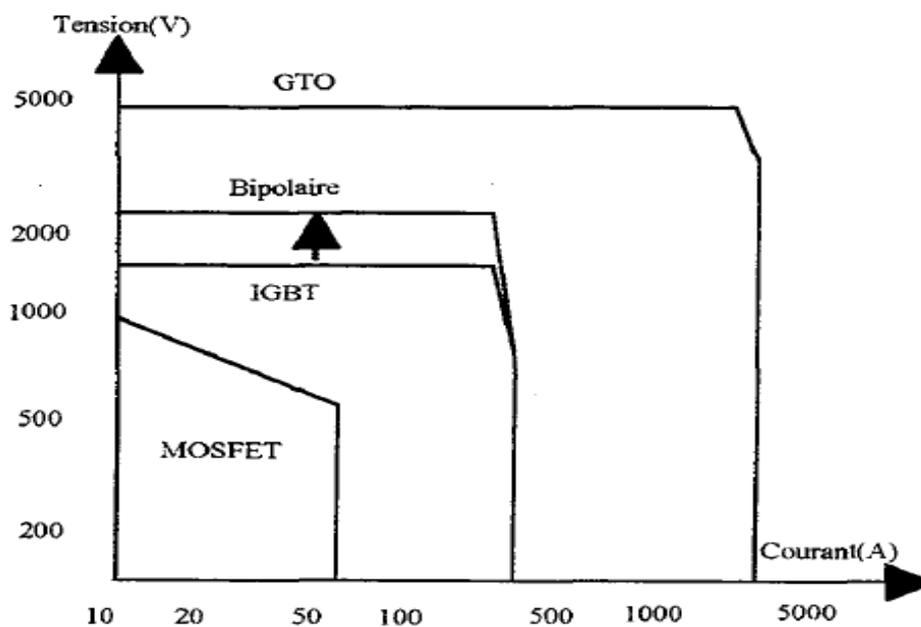


Figure II.10 : a) La comparaison entre les interrupteurs de tension en fonction de courant [23].

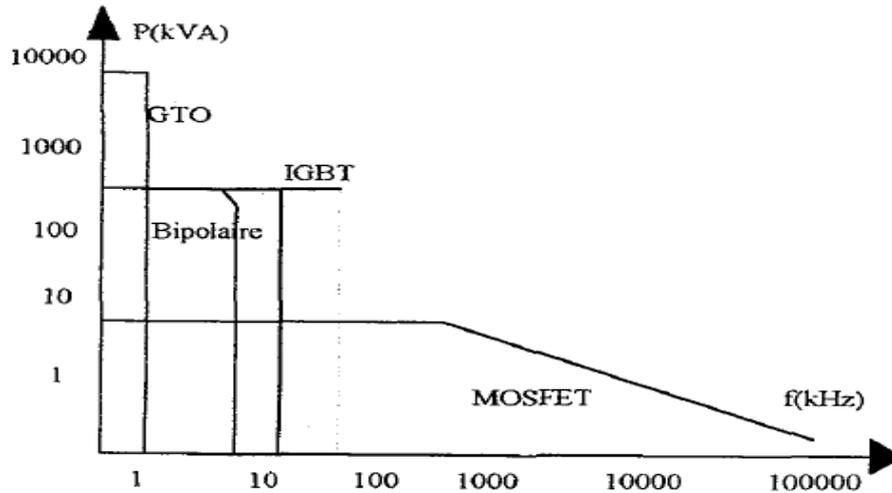


Figure II.10 :b) La comparaison entre les interrupteurs de puissance en fonction de fréquence [23].

II.3 Convertisseur multi niveaux :

Durant ces dernières années, nous vivons la naissance de nouveaux convertisseurs de puissance multi niveaux qui sont utilisés dans le domaine des entraînements de grande puissance et trouvent une intégration rapide dans le domaine PV [24].

II.3.1 Principe de base des convertisseurs multi niveaux :

Si on dispose de plusieurs sources de tension continue (obtenues par exemple à partir d'un diviseur capacitif), on peut faire apparaître autant de cellules de commutation élémentaires et les associer en série ou en parallèle. Cela permet de multiplier le nombre de niveaux que l'on peut donner à la tension de sortie comme l'illustrent les figures II.11 et II.12. Le principe schématisé sur ces figures peut être élargi pour obtenir une onde de tension à N niveaux [24].

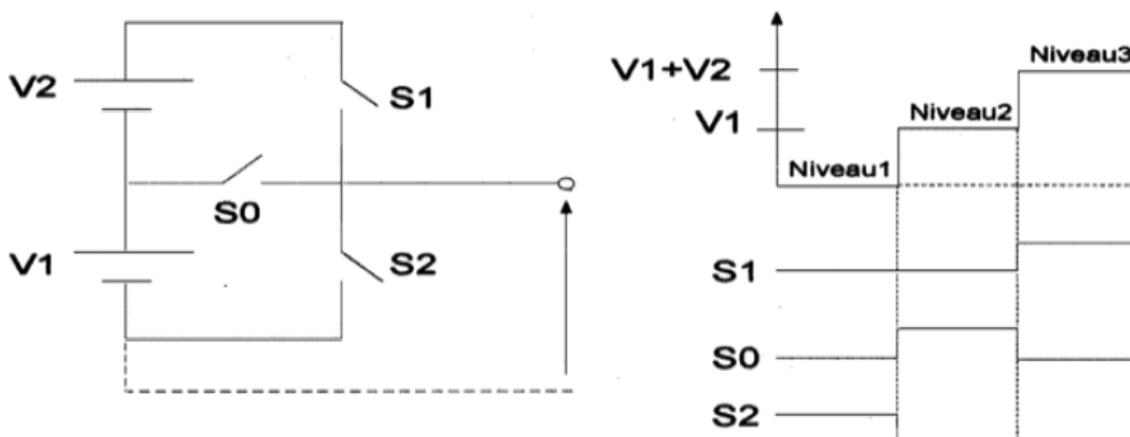


Figure II.11 : Principe d'association de source en série [24].

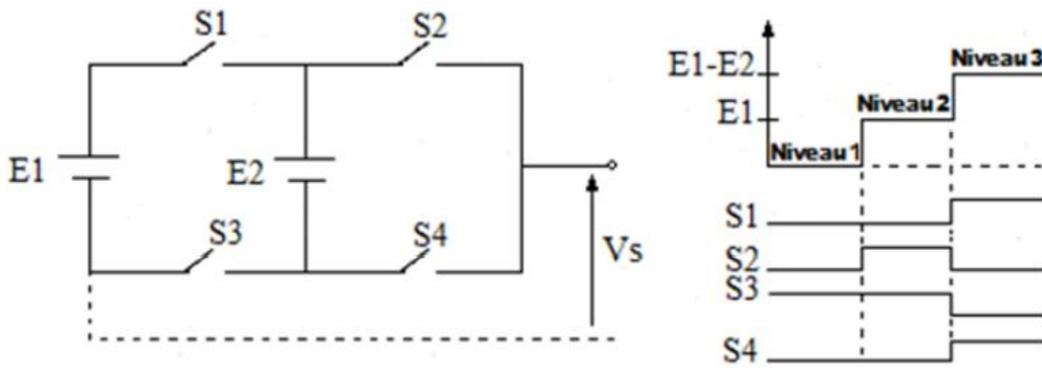


Figure II.12 : Principe d'association de source en parallèle [24].

II.3.2. Différents topologie des onduleurs multi niveaux :

Par définition, l'ondeur de tension multi niveaux possède trois ou plusieurs niveaux. L'objectif de cette partie est de donner un aperçue générale des trois topologies de base des onduleurs multi niveaux [1] :

- La topologie à diode de bouclage ;
- La topologie à condensateur flottant ;
- La topologie en cascade.

II.3.2.1. Onduleur de tension à diode de bouclage :(Onduleur clampé par les diodes).

La première topologie la plus pratique d'ondeur de tension multi niveaux est le NPC (Neutral-Point-Clamped) représenté dans la figure II.13.

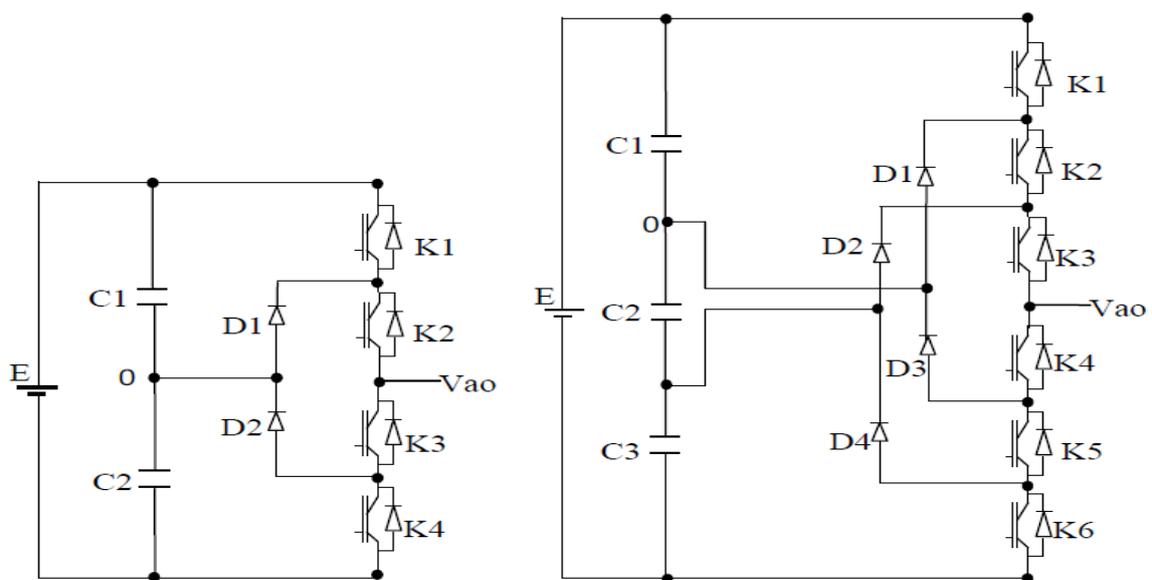


Figure II.13 : Structure d'un bras de l'ondeur NPC à trois et à quatre niveaux [25].

Il présente des avantages par rapport à la topologie d'onduleur à deux niveaux. ces avantages sont:

- Les composants de puissance à semi-conducteur bloquent une tension inverse égale seulement à la moitié de la tension de la source continue ;
- Cette topologie peut être généralisée et les principes employés dans la topologie d'onduleur à trois niveaux peuvent être étendus pour l'utilisation dans des topologies avec n'importe quel nombre de niveaux [25].

II.3.2.2. Onduleur de tension a condensateur flotteur

La topologie de l'onduleur multi niveaux à condensateur flotteur (flying capacitor multi level inverter), figure II.14, a été proposée en 1992. L'avantage de cette topologie est d'éliminer le problème des diodes de bouclages présenté dans les topologies des onduleurs NPC multi niveaux.

Cette topologie a quelques inconvénients :

- Le contrôleur de la charge du condensateur ajoute la complexité au contrôle du circuit entier ;
- Peut exiger plus de condensateurs que la topologie de l'onduleur NPC ;
- La présence d'un potentiel de résonance parasite entre les condensateurs découplés [25].

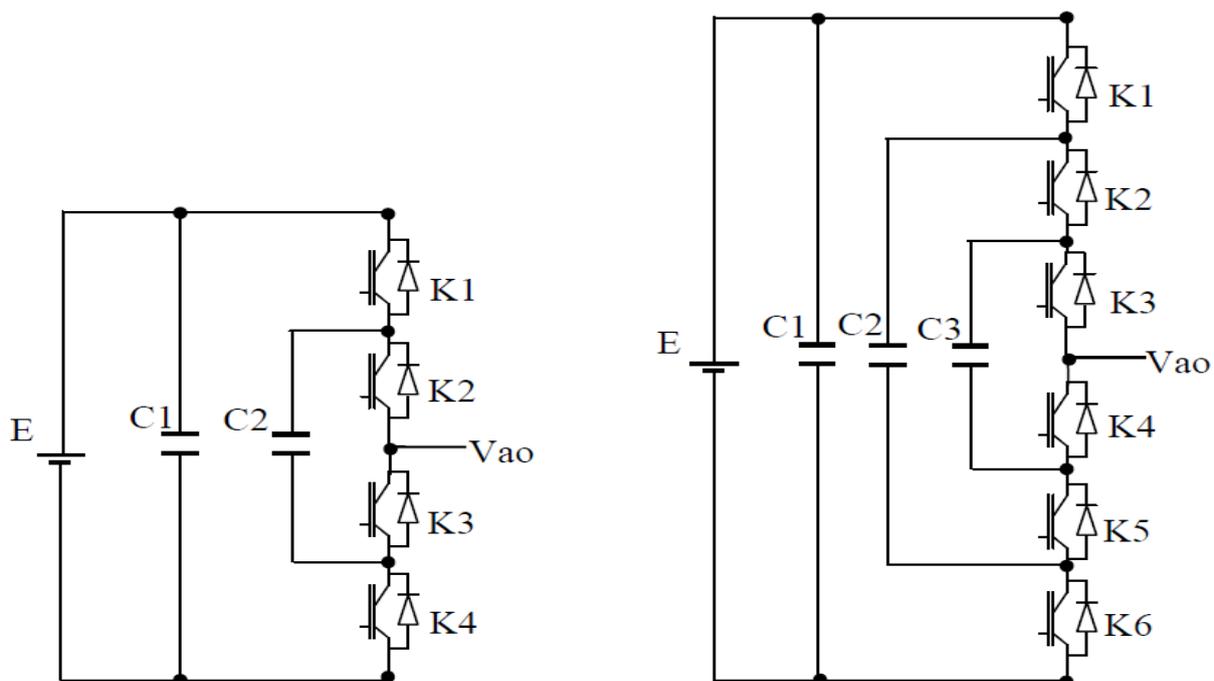


Figure II.14 : Structure d'un bras de l'onduleur à condensateurs flotteurs à trois et à quatre niveaux [25].

II.3.2.3. Onduleur de tension en cascade

Les onduleurs multi niveaux en cascade est une structure relativement nouvelle, un onduleur multi niveaux en cascade est tout simplement une connexion en série de plusieurs onduleurs monophasés.

Les onduleurs multi niveaux en cascade ont introduit l'idée d'utiliser des sources DC séparée pour produire une onde de tension AC. Chaque onduleur monophasé est connecté à sa propre source en courant continue. Les sorties de chaque onduleur monophasé est une onde de tension alternative, la figure II.15 représente la structure d'un onduleur multi niveau en cascade [26].

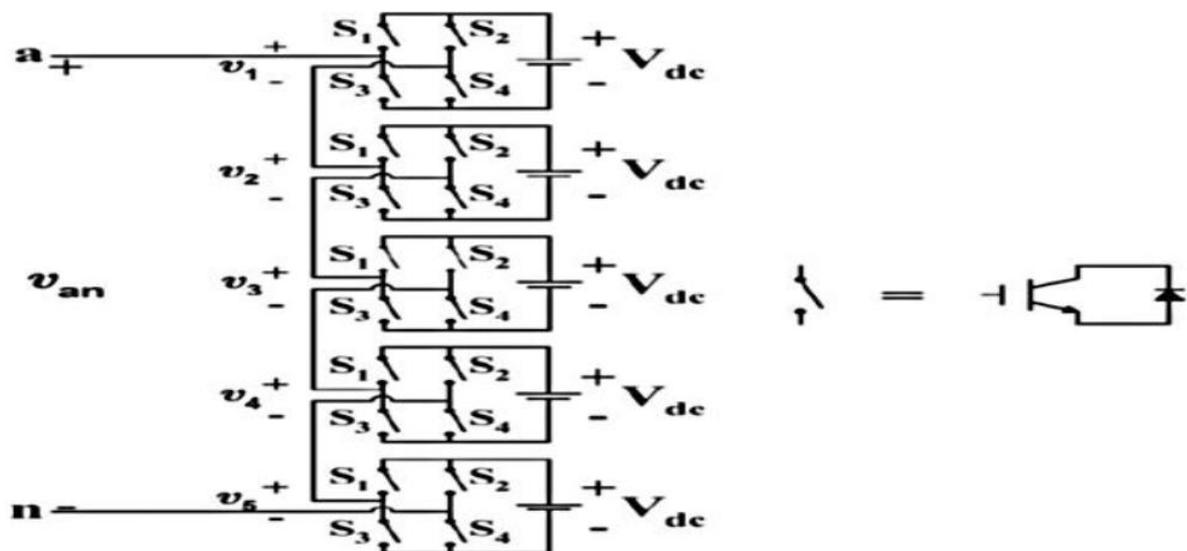


Figure II.15 : Structure d'un onduleur multi niveaux en cascade à cinq niveaux [26].

Comme toutes structures, l'onduleur multi niveaux en cascade possède des avantages et inconvénients dont on peut citer:

Les avantages

- Pour atteindre le même nombre de niveaux de tension, ce type de convertisseur nécessite moins de composants ;
- Contrairement à l'onduleur à diode de bouclage et à condensateur flottant, aucune diode supplémentaire n'est nécessaire ;
- Fabrication modulaire, comme chaque pont monophasé a la même structure.
- La tension de sortie totale de phase est une sommation des tensions produites par chaque onduleur monophasé ;

- Les petites sources à courant continu sont généralement impliquées, ce qui entraîne moins de problèmes de sécurité ;
- Le nombre de niveaux possibles de tension de sortie est plus du double du nombre de sources à courant continu ($N = 2s + 1$) [26].

Les inconvénients

- Pour un système à trois phases, il faudra plus de commutateurs que dans un onduleur traditionnel ;
- Nécessité d'équilibrer les sources DC entre les différents niveaux ;
- Besoin de plusieurs connecteurs/câbles pour connecter les sources DC [26].

II.4. Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI)

Le schéma de principe de la MLI est donné par la figure II.16, la commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI) est la technique de commande la plus utilisée, elle résout le problème de la maîtrise de la fréquence de commutation en fonctionnant avec une fréquence fixe facile à filtrer en aval de l'onduleur. La plus simple et la plus connue des modulations de largeur d'impulsion est sans doute la MLI à échantillonnage naturel, cette technique de commande met en œuvre d'abord un régulateur qui détermine la tension de référence de l'onduleur (modulatrice) à partir de l'écart entre le courant mesuré et sa référence.

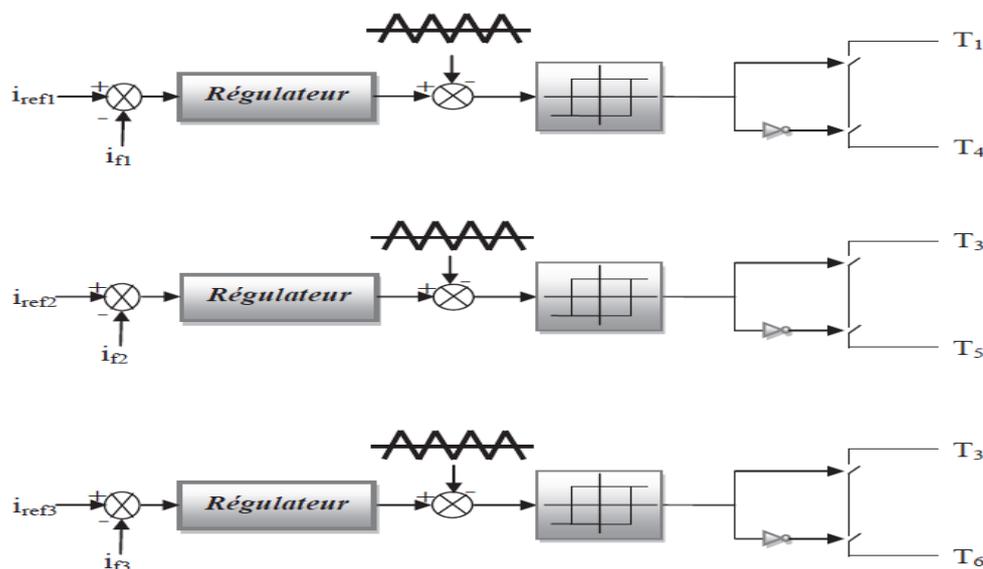


Figure II.16: Principe de commande des courants par MLI [27].

L'erreur à la sortie des régulateurs est ensuite comparée avec un signal triangulaire (porteuse à fréquence élevée fixant la fréquence de commutation), la sortie du comparateur fournit l'ordre de commande des interrupteurs comme il est présenté dans la figure II.17 [27].

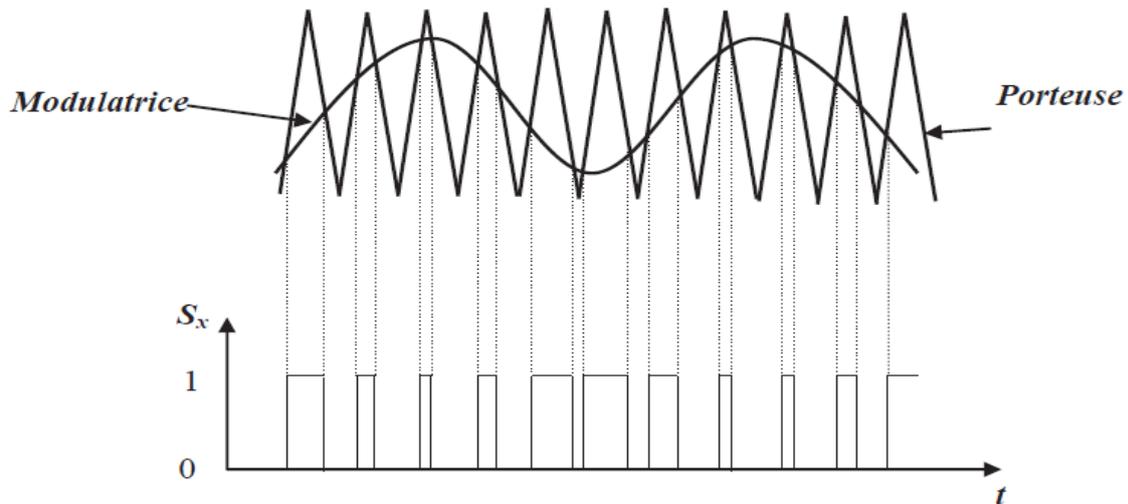


Figure II.17: Commande d'interrupteurs par MLI naturelle [27].

II.5. Modélisation de l'onduleur triphasé

II.5.1. Schéma block d'onduleur triphasé à deux niveaux

La figure II.18 représente le schéma bloc d'un onduleur triphasé à deux niveaux avec des interrupteurs mosfets réalisé sous PSIM ; nous avons injecté directement à l'entrée de l'onduleur la valeur de tension mesurée à la sortie d'un module photovoltaïque qui est 26.4 Volte.

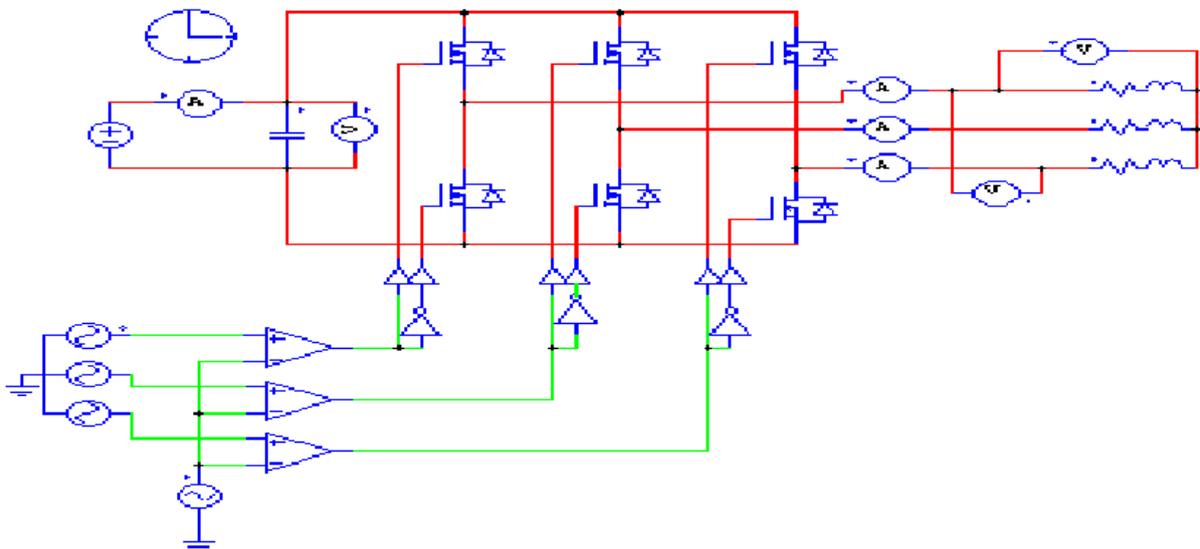
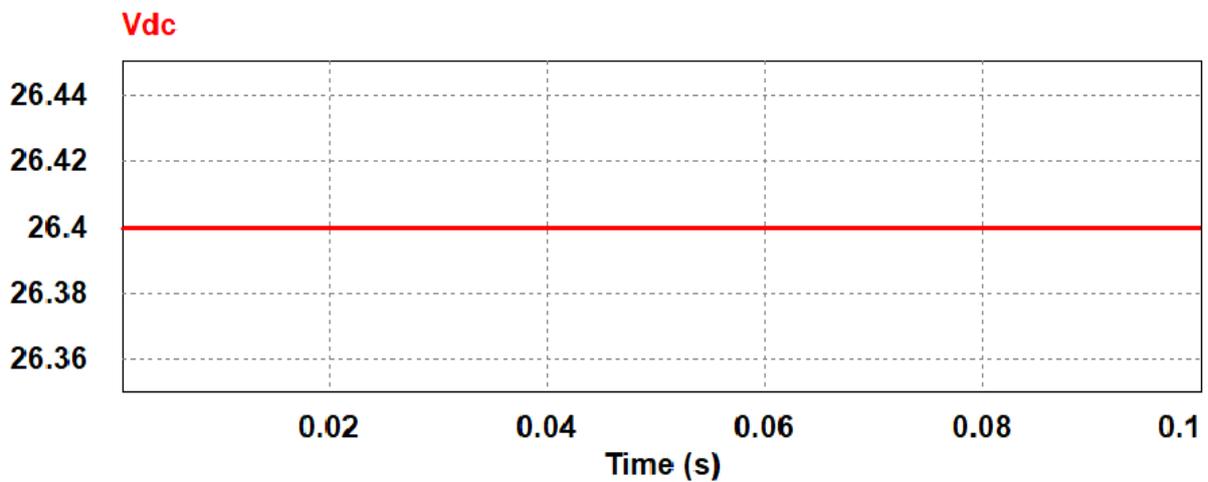
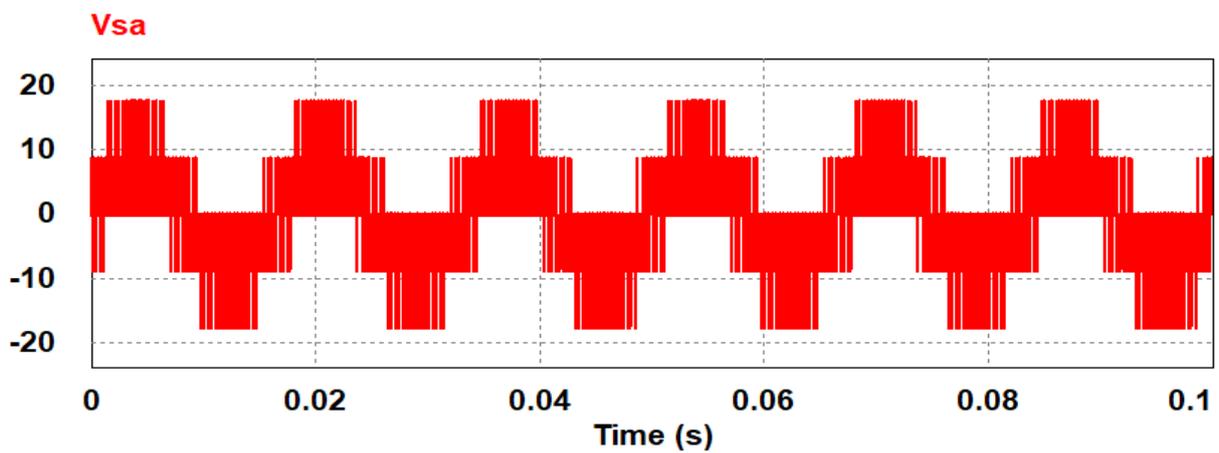
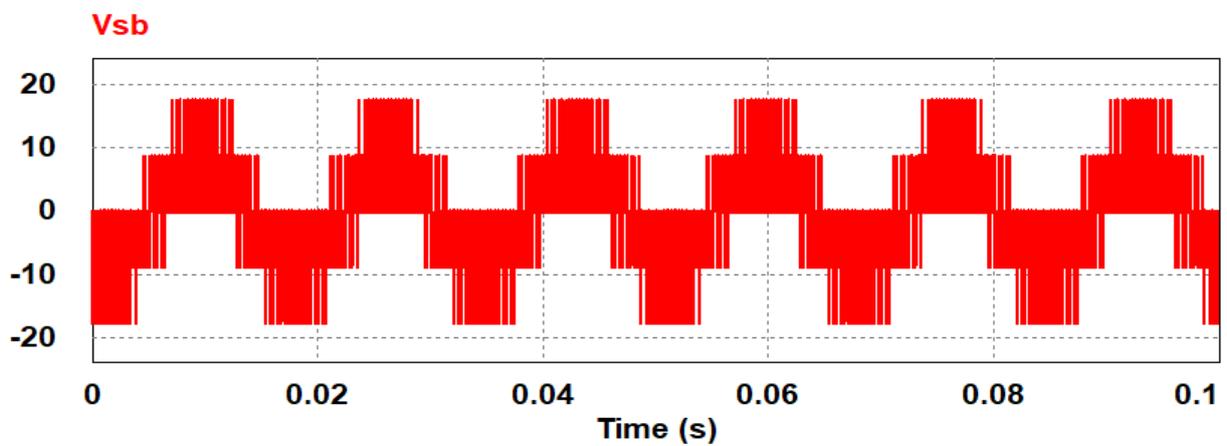


Figure II.18 : Schéma block de l'onduleur de tension à deux niveaux d'onduleur.

II.5.2. Résultat de simulation**Figure II.19** : Tension de source**Figure II.20** : Tension de sortie aux bornes de la charge de la première phase.**Figure II.21** : Tension de sortie aux bornes de la charge de la deuxième phase

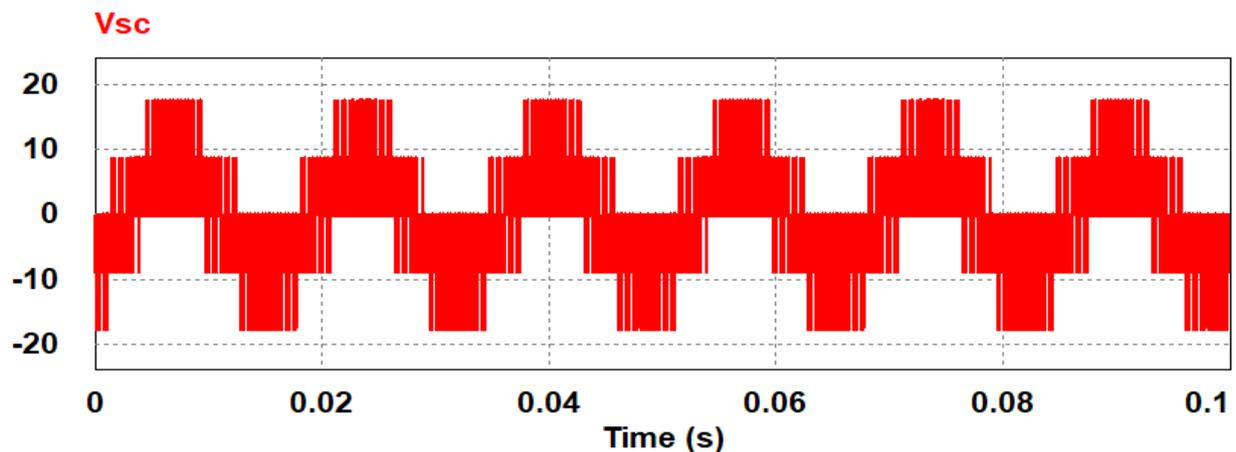


Figure II.22 : Tension de sortie aux bornes de la charge de la troisième phase

Les figures précédentes représentent les tensions d'entrée et sortie obtenus par la simulation d'un onduleur triphase à deux niveaux sous PSIM, comme nous l'avons vu, la tension d'entrée (V_{dc}) est représenté par la **figure II.19** est une tension continu avec une valeur fixe qui est 26.4V, par contre les tensions de sortie V_{sa} , V_{sb} et V_{sc} aux borne des trois charges est représentées ont une forme d'onde sinusoïdale par les **figures II.20**, **II.21**, **II.22**.

II.8.Conclusion

Les convertisseurs photovoltaïques ont un rôle fondamental permettant l'adaptation de l'énergie électrique aux différentes applications. Dans ce chapitre nous avons étudié deux types de convertisseurs statiques, qui sont très utilisé dans la chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque, ainsi l'intérêt des ces derniers dans un système PV pour la connexion avec le réseau DC ou avec le réseau AC.

Dans le chapitre qui suit, nous allons présenter les différents défauts et les méthodes de diagnostic dans les systèmes photovoltaïques.

Chapitre III:

Diagnostic des défauts d'un système PV

III.1. Introduction

Tout système est susceptible de présenter des symptômes révélateurs de défauts, le défi est de pouvoir détecter et localiser ces défauts d'une manière automatique. Nous décrivons dans cette partie les différents défauts et anomalies associées à une installation photovoltaïque. Au cours de son fonctionnement, ainsi les différentes méthodes de diagnostic.

III.2. Définition d'un défaut

Un défaut est une anomalie de fonctionnement d'un système physique. On appelle défaut tout écart entre la caractéristique observée sur le dispositif et la caractéristique théorique. Cet écart est idéalement nul en absence d'anomalies. Les défauts peuvent apparaître au niveau des capteurs, des actionneurs ou au niveau du système lui-même [28].

III.3. Défauts d'un système photovoltaïque

Les défauts d'un système PV peuvent être produits pendant la phase de conception, d'installation, et d'exploitation de ces systèmes. Dans cette section, on présente les principaux défauts associés aux éléments d'un système photovoltaïque et leurs causes [29].

III.3.1. Défauts du champ PV

Ils rassemblent tous les défauts associés aux cellules PV, modules, diodes de by-pass et anti retour, et les câbles de connexion, on trouve :

- **Défaut de court-circuit**

Il provient principalement de l'infiltration de l'eau dans les boîtiers des modules, et du mauvais câblage entre les modules et l'onduleur.

- **Défaut de circuit ouvert**

Les causes de ce défaut peuvent être :

- Mauvaise connexion des diodes qui conduit au non fonctionnement ;
- Sous dimensionnement des diodes qui conduisent à la destruction des diodes et à l'échauffement de la boîte jonction ;
- Échauffement des diodes causé par une mauvaise dissipation de la chaleur ou placement des diodes dans un endroit mal ventilé ;
- Mauvaise ventilation des modules ;
- Une fissure qui conduit à la détérioration des cellules ;
- Les foudres et les tempêtes sur l'installation.

- **Défaut d'inversion de la polarité**

Ce défaut est provenu de l'inversion de la polarité des diodes au montage (défaut de conception), et d'un mauvais câblage des modules.

- **Défaut de la résistance de shunt**

Ce défaut est lie au problème de la création d'une résistance en parallèle des diodes de by-pass et des modules, cette résistance est due à la corrosion des diodes et des modules causée par la pénétration de l'eau et de l'humidité [29].

III.3.2. Défaut des convertisseurs DC-DC et DC-AC

L'onduleur est un composant couteux et complexe dans un système photovoltaïque. Les défauts qui sont majoritairement provoques sur un onduleur sont [1] :

- **Non activité des onduleurs**

L'irradiation insuffisante de l'éclairement (début ou la fin de la journée, neige, nuage) empêche le démarrage de l'onduleur, l'onduleur reste alors en attente de conditions extérieures favorables pour commencer à transformer de l'électricité solaire.

- **Echauffement de l'onduleur**

Dans des conditions de température élevée, par exemple l'onduleur installé dans un endroit non ventilé, son rendement diminuera, et sa durée de vie risque également de diminuer.

- **Défauts des composants constituant le convertisseur DC-DC et DC-AC**

On trouve la déconnexion des inductances et des capacités, le court-circuit et le circuit ouvert des diodes et des interrupteurs, et ceci conduit à une mauvaise extraction du PPM, et à la diminution de rendement de l'onduleur ou l'arrêt de l'onduleur complètement [29].

III.3.3. Défauts de connectique et câblage

La connectique électrique est le troisième composant essentiel d'une installation photovoltaïque, elle peut être à l'origine de pertes de production, mais également de départs de feu dans les cas les plus sévères, les principales câblage peuvent être générées par des problèmes de conception : câble manquant, sous dimensionnement, mauvais câblage des strings, connectique entre câbles défectueuse...,ou apparaissent lors du fonctionnement de l'installation : dégradation , défaut d'isolation , vieillissement UV, déconnexion [30].

III.3.4. Défauts dans le système de protection

III.3.4.1. Liaison équipotentielle

Son rôle est de protéger des personnes des contacts indirects en évacuant à la terre les

courants de défaut, parmi les défauts les plus fréquents on trouve :

- Une liaison non durable dans le temps, sans prise en compte de la corrosion galvanique entre métaux, ou avec une liaison non continue par la mise en série des cadres des modules ou de tout autre élément ;
- Des prises de terre multiples pour un même bâtiment, ce qui peut présenter un risque de choc électrique par différence de potentiel.
- Une section de conducteur insuffisante.

III.3.4.2. Fusible Court Circuit

Les séries de modules des courants inverses qui pourraient s'y déverser, typiquement si la série fonctionne en récepteur sous dimensionnés entraineront des pertes de production, tandis que des fusibles surdimensionnés ne protègent pas les chaînes de modules.

III.3.4.3. Parafoudre

Les parafoudres protègent l'installation PV des surtensions d'origine atmosphérique en les évacuant à la terre ; s'ils sont détériorés ; il y en outre un risque de court-circuit et donc d'échauffement [30].

III.4. Principaux défauts et anomalies dans un générateurs PV

Le tableau III.1 présente les défauts les plus fréquents dans un générateur PV.

Éléments du générateur PV	Origines de défauts de d'anomalies
Générateur PV	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Feuilles d'arbre, déjections, pollution, sable, neige... ▪ Détérioration des cellules, fissure, échauffement des cellules. ▪ Pénétration de l'humidité, dégradation des interconnexions, corrosion des liaisons entre les cellules. ▪ Module de performances différentes ▪ Module arraché ou cassé ▪ Modules court-circuités, modules inversés

Boite de jonction	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Rupture du circuit électrique ▪ Court-circuit du circuit électrique ▪ Destruction de la liaison ▪ Corrosion des connexions
Câblage et connecteur	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Circuit ouvert ▪ Court-circuit ▪ Mauvais câblage (module inversé) ▪ Corrosion des contacts ▪ Rupture du circuit électrique.
Diode de protection (diode de by-pass et diode anti-retour)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Destruction des diodes ▪ Absence ou non fonctionnement de diodes ▪ Inversion de la polarité des diodes au montage, ▪ diode mal connectée.

Tableau III.1 : Principaux défauts et anomalies de générateur PV [31].

III.5. Définition de diagnostic

Le diagnostic a pour objet de trouver la cause d'une défaillance. Nous adopterons la définition qui a été retenue par les instances internationales de normalisation (AFNOR, CEI) : "Le diagnostic est l'identification de la cause probable de la (ou des) défaillance (s) à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'informations provenant d'une inspection, d'un contrôle ou d'un test" [32].

III.6. Etapes de diagnostic

Les étapes sont détaillées comme suit :

- **Prise de mesures:** La mesure que l'on fait sur le système est la seule information pour connaître l'évolution du système. Elle se fait à l'aide d'un capteur approprié et nécessite souvent une étape de filtrage.
- **Détection de défauts:** Souvent, il s'agit d'un test statistique traitant un signal susceptible de contenir des informations sur l'état du système à surveiller.
- **Localisation de défauts :** C'est souvent une tâche liée aux caractéristiques du système. Il s'agit d'un test qui traite l'information sur l'origine de la provenance du défaut.

- Identification de défauts : Il s'agit de caractériser le défaut, d'estimer son importance et son comportement dans le temps
- Décision : C'est une décision sur le type d'action à prendre pour rétablir de système.
- Correction : C'est l'action d'arrêter le système et de procéder à une maintenance corrective
- Adaptation : C'est l'action de reconfiguration et d'adaptation de la consigne à injecter dans le système [33].

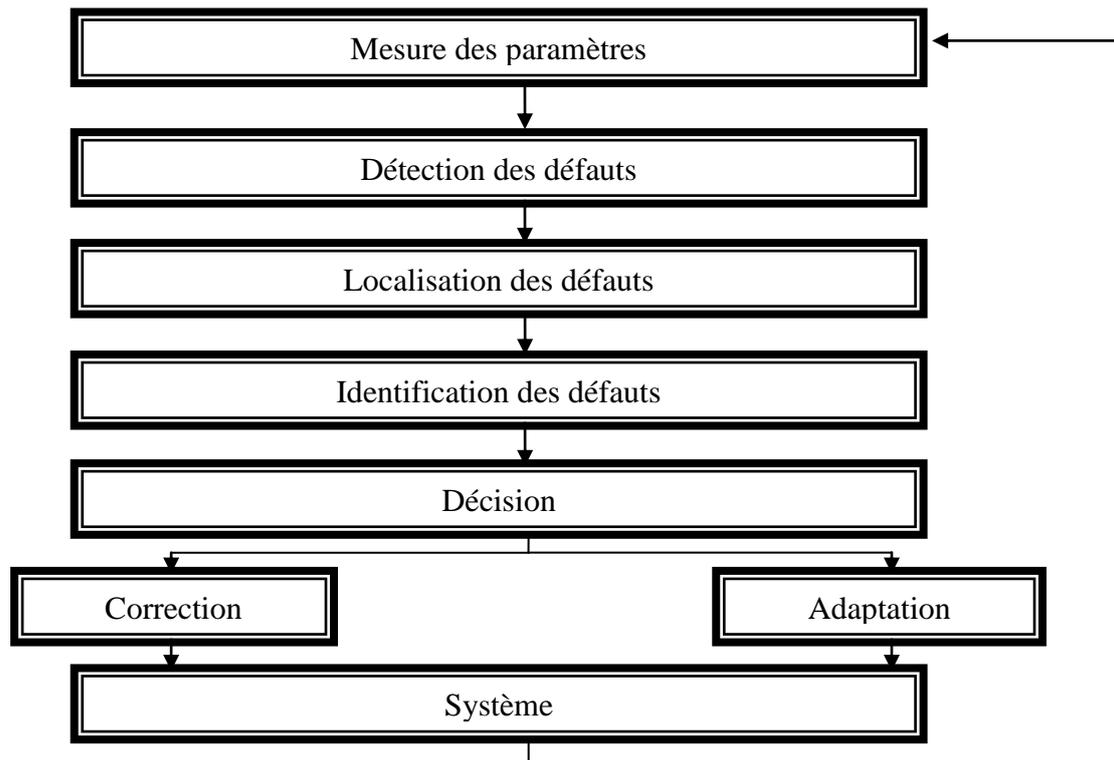


Figure III.1 : Organigramme de diagnostic des défauts [33].

III.7. Méthodes de diagnostic

Les méthodes de diagnostic des défauts sont très variées. On les distingue à partir de leur type de connaissance utilisée pour vérifier la cohérence entre les observations réelles et de références. Ces dernières se répartissent en deux classes : les méthodes avec modèle et les méthodes sans modèle.

III.7.1 Méthodes sans modèles

❖ Analyse fréquentielle (Filtrage)

C'est une première approche du traitement du signal, elle repose sur l'analyse fréquentielle (transformée de Fourier). Elle est bien évidemment très utilisée pour la détection

de phénomènes périodiques comme en analyse vibratoire, le contenu spectral des signaux est utilisé pour détecter des défauts dans les machines électriques. Les signaux sont tout d'abord analysés en état normal de fonctionnement. Ensuite, toute déviation des caractéristiques fréquentielles d'un signal est reliée à une situation de fonctionnement défaillant, l'inconvénient de cette approche d'être assez sensible aux bruits de mesure quand ceux-ci coïncident avec la zone fréquentielle d'intérêt. De plus un échantillonnage fréquent est nécessaire pour permettre de reconstituer le signal de départ tout en minimisant la perte de fréquence [34] ;

Parmi les sous méthodes d'analyse fréquentielle on trouve :

- L'analyse de la réponse fréquentielle (FRA) : consiste à analyser la réponse fréquentielle d'un système, et la comparer avec un autre cas non défectueux.
- La transformée de fourier rapide (FFT) : est l'une des opérations les plus couramment utilisées en traitement du signal pour fournir une analyse du spectre de fréquences,

❖ **Redondance matérielle**

La redondance matérielle consiste en la mise en place d'une série de capteurs mesurant la même grandeur physique sur un même organe du système. Les comparaisons par différence des mesures des capteurs deux à deux forment alors les résidus. Si un des capteurs est défaillant, il est alors détecté et isolé facilement, car il affecte tous les résidus où il intervient, De nombreuses applications industrielles appliquent cette méthode de diagnostic [35].

❖ **Capteurs spécifiques (capteurs détecteurs)**

Des capteurs spécifiques peuvent également être utilisés pour générer directement des signaux de détection ou connaître l'état d'un composant, Par exemple, les capteurs d'état de fonctionnement d'un moteur ou de dépassement de seuils sont largement employés dans les installations industrielles [34].

❖ **Réseaux de neurones artificiels (RNA)**

« L'étude » objective et précise des RNA converge pour souligner l'importance de la diriger sous le soin et contrôle de la neurophysiologie qui s'intéresse d'avantage aux problèmes de défaillances, en communiquant à l'entrée du réseau artificiel des données de simulation à la place des mesures effectuées par des capteurs, ce qui permet une description approximative de son état [36].

❖ Systèmes d'Inférence Flous

Le traitement réalisé par un système d'inférence flou (SIF) est divisé en trois tâches essentielles :

- 1- La fuzzification transforme une valeur numérique x_0 de l'entree en une valeur floue.
- 2- L'inférence, produit l'image de la partie floue issue de la fuzzification par une relation floue R , généralement construite à partir de règles.
- 3- La defuzzification transforme la partie floue issue de l'inférence en une valeur numérique y en sortie, la defuzzification constitue alors une prise de décision [37].

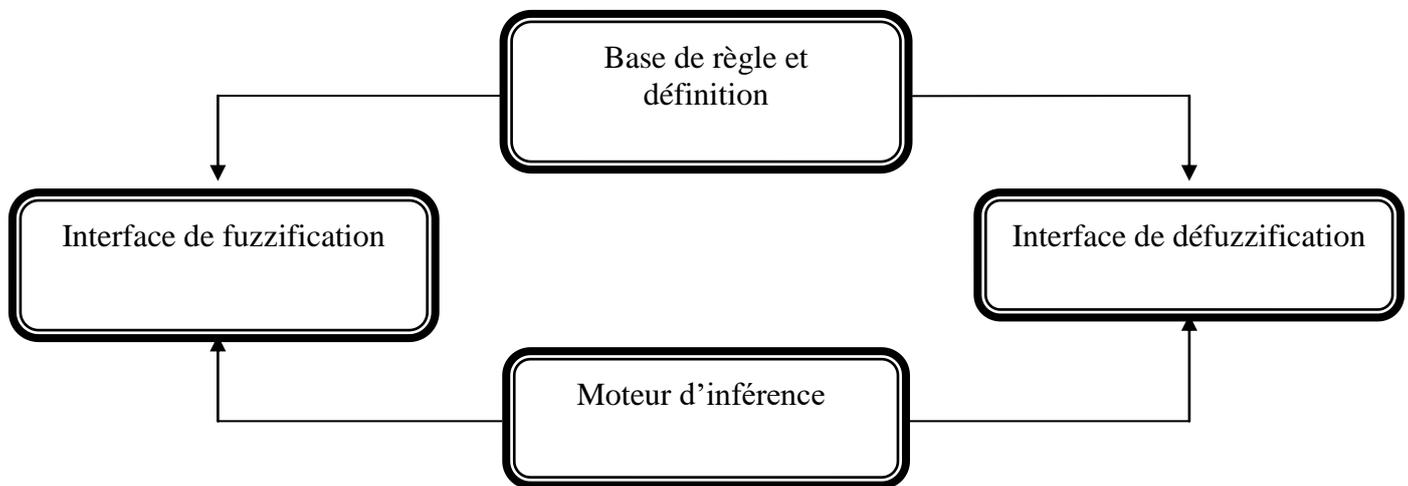


Figure III.2 : structure d'un système flou [37].

III.7.2. Méthode à base de modèles

❖ Espace de parité

Cette méthode est généralement appliquée dans un espace à temps discret, en prenant des mesures sur un intervalle de temps appelé fenêtre d'observation. La redondance d'information est ainsi créée sans avoir recours aux dérivations successives des mesures. Les incertitudes paramétriques sont modélisées selon le type des informations disponibles [38].

❖ Estimation paramétrique

Cette approche considère que l'influence des défauts se reflète à la fois sur les paramètres et sur les variables du système physique. Le principe de cette méthode consiste à estimer en continu des paramètres du procédé en utilisant les mesures d'entrée/sortie et en évaluant la distance qui les sépare des valeurs de référence de l'état normal du procédé, l'estimation paramétrique possède l'avantage d'apporter de l'information sur la taille des

déviations. Toutefois, un des inconvénients majeurs de la méthode réside dans la nécessité d'avoir un système physique excité en permanence. Ceci pose des problèmes pratiques dans le cas de procédés dangereux ou fonctionnant en mode stationnaire. De plus, les relations entre les paramètres mathématiques et physiques ne sont pas toujours inversibles de façon unitaire, ce qui complique la tâche du diagnostic basé sur les résidus [39].

❖ **Estimation d'état (observateur)**

L'idée principale de cette approche consiste à générer un vecteur de résidus en estimant une combinaison ou l'ensemble des mesures du système surveillé à partir des grandeurs mesurables (par exemple, les signaux d'entrée et de sortie). Les résidus sont alors générés au travers de la différence (éventuellement filtrée) entre les sorties estimées et les sorties réelles et/ou mesurées [39].

III.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents défauts affectant les systèmes PV. Ensuite, nous avons donné quelques notions de base sur les méthodes de diagnostic des ses défauts. Où leur rôle consiste à suivre le fonctionnement de système PV dans le but de détecter, localiser et établir un diagnostic des défaillances qui affecte ces performances et sa sureté de fonctionnement.

Afin de mieux comprendre et maîtriser la méthode de l'analyse fréquentielle énumérées dans ce chapitre en particulier les techniques FRA et la FFT, le chapitre suivant est consacré à l'application de ces derniers sur les onduleurs photovoltaïques à deux niveaux.

Chapitre IV: Analyse et diagnostic des défauts dans l'onduleur à deux niveaux

IV.1. Introduction

L'onduleur est un élément extrêmement important dans les systèmes électrique, donc, sa surveillance est nécessaire pour la continuité et la stabilité de l'alimentation. Actuellement un grand axe de recherches est orienté vers la surveillance de l'état du convertisseur statique, en effet, un convertisseur tel que l'onduleur est susceptible de présenter des défauts structurels tels que les défauts de court circuit, circuit ouvert, ce type de dysfonctionnement peut induire des endommagements pour le système entier de production si le personnel n'est pas averti et qu'un arrêt intempestif ne soit produit. Puisque, l'appareillage de protection n'intervient qu'au dernier stade de défaut; il est donc évident, que l'investissement dans le domaine de la détection des dysfonctionnements paraît une solution incontournable.

Dans ce contexte, le présent chapitre porte sur l'application des deux approches la FRA et la FFT qui sont dédiées à la détection et au diagnostic de ces différents défauts dans le convertisseur DC/AC car l'onduleur possède sa propre réponse en fréquence, appelée « empreinte », la présence d'un défaut peut provoquer des variations de cette réponse, toute déviation des caractéristiques fréquentielles d'un signal est reliée à une situation de défaillance, la méthode FRA et FFT représentent un outil utile qui peut détecter ou bien donner une indication des changements, dont la cause doit être ensuite identifiée et analysée[40].

IV.2. Detection et localisation des défauts par l'analyse de la réponse en fréquence FRA

IV.2.1. Principe de la méthode FRA

Analyse de la réponse en fréquence est une technique de surveillance de l'état hors ligne, elle est généralement caractérisée par l'amplitude de la réponse du système, mesurée en décibels, et la phase, mesurée en degrés (ou en radians) en fonction de la fréquence[40].

Le principe de fonctionnement est d'injecter un signal ou une tension d'excitation sinusoidale dont la fréquence augmente en continu, à un extrémité de composant, puis mesurer le signal de réponse sur une large plage de fréquence (méthode de balayage en fréquence), grâce à une mesure direct dans le domaine fréquentiel, aucun traitement des données supplémentaires n'est requis [41].

La comparaison des signaux d'entrée et de sortie génère une réponse en fréquence unique qui peut être comparée aux données de référence. Ainsi, les écarts peuvent indiquer des changement au niveau des composants internes, ces écarts peuvent être directement liés

aux différentes sections de la plage de fréquence et nous le pouvons généralement les distinguer les uns des autres, les changements, le déplacement ou la déformation des composants internes entraînent des changements dans cette fonction de transfert, une comparaison des graphiques permet de les identifier [40].

IV.2.2. Etude de la réponse fréquentielle de l'onduleur suite à des plusieurs défauts

Un onduleur de tension triphasé à deux niveaux à base de mosfet est constitué de trois bras, avec deux interrupteurs pour chaque bras. Le schéma structurel à haute fréquence d'un tel onduleur, est illustré par la figure IV.1.

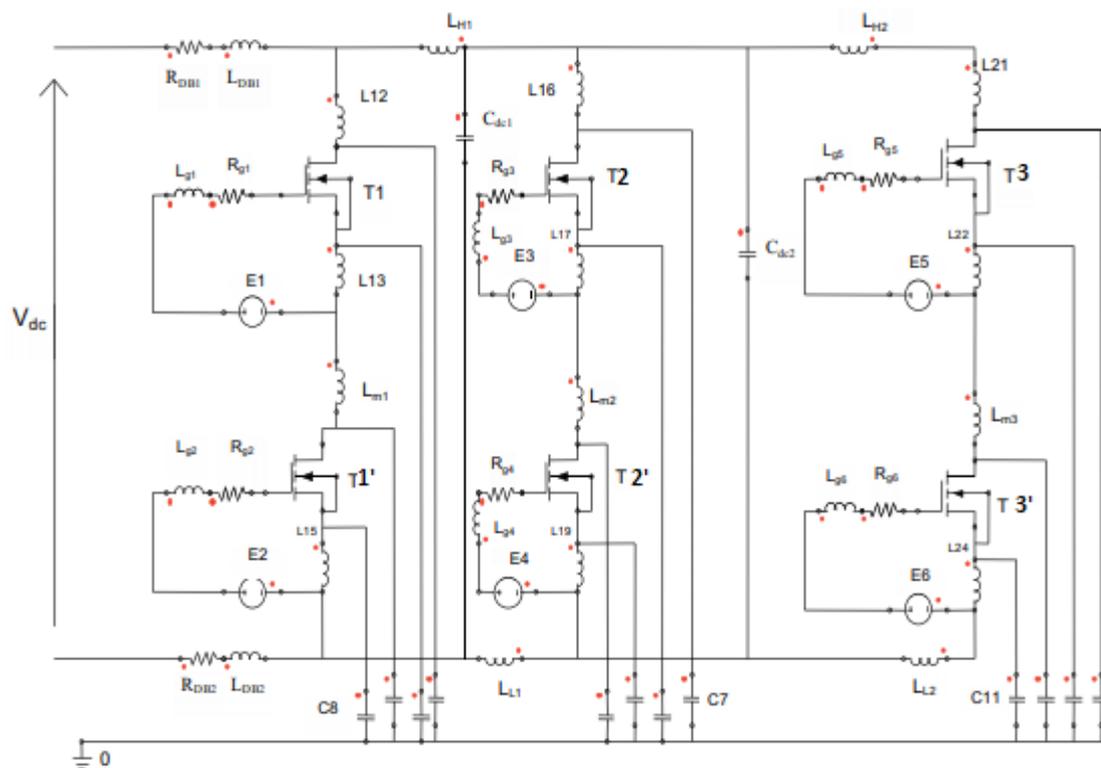


Figure IV.1 : Schéma structurel à haute fréquence d'un onduleur triphasé [42].

Pour étudier les différentes défaillances dans l'onduleur triphasé à deux niveaux avec la technique d'analyse fréquentielle, nous avons appliqué plusieurs types de défauts sur l'onduleur puis nous avons comparé ces résultats avec le cas où l'onduleur était en bon état c'est-à-dire sain ou sans défaut.

Les défauts simulés sont les suivants:

- Défaut de court-circuit d'un bras complet ;
- Défaut de court-circuit d'un des six interrupteurs ;
- Défauts d'ouvertures d'un des six interrupteurs ;
- Défauts d'ouvertures des deux interrupteurs du même bras.

IV.2.2.1. Réponse en fréquence de l'onduleur sans défaut (état sain)

La figure IV.2 représente la réponse en fréquence d'un onduleur triphasé supposé sain.

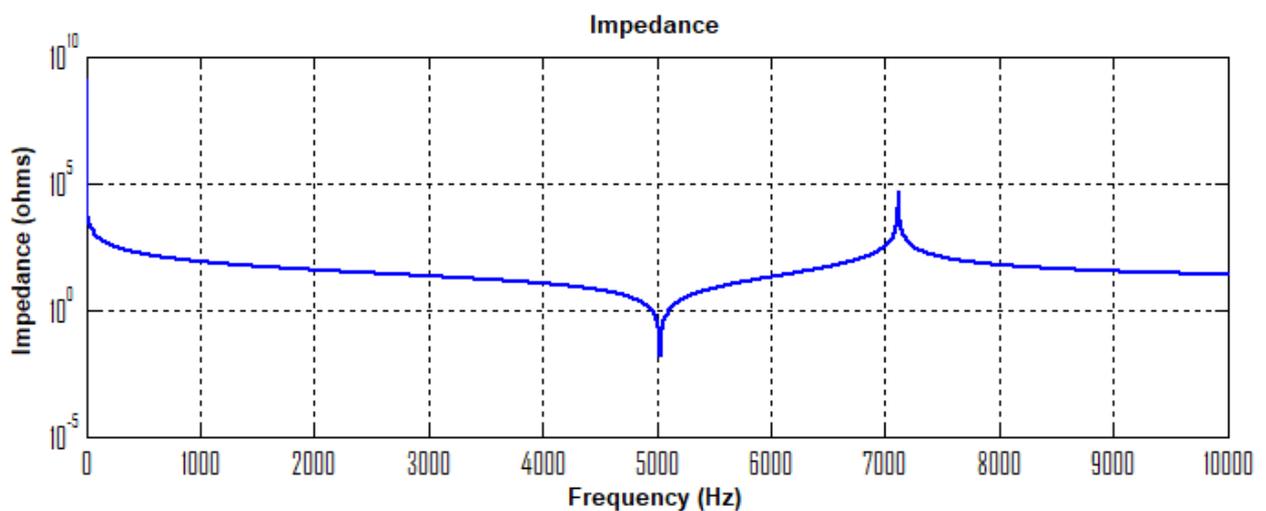


Figure IV.2 : La réponse en fréquence d'un onduleur triphasé sain

Cette modélisation fréquentielle prend en compte l'ensemble des paramètres de la cellule de commutation que se soit ceux du schéma électrique haute fréquence ou ceux des conditions de fonctionnement. Il apparaît ainsi des résonances à haute fréquence lors de chaque commutation entre les inductances parasites de connectique (ou composants magnétiques) et les capacités structurelles des semi-conducteurs.

Nous constatons effectivement que le comportement inductif est limité à environ 5kHz, qu'au-delà le comportement devient capacitif jusqu'à environ 7.1KHz.

IV.2.2.2. Réponse fréquentielle de l'onduleur avec défaut

IV.2.2.2.a. Défaut de court circuit

Les simulations effectuées permettent d'avoir les empreintes engendrées par les différents défauts considérés, en suite ces dernières sont comparées à celle issue de l'onduleur sain, afin d'analyser les perturbations sur les réponses en fréquence suite à ces anomalies

simulées pour enfin déduire les plages de fréquences où les signatures sont affectées et associer chaque gamme de fréquence à un défaut bien déterminé.

La figure IV.3 représente la réponse en fréquence des courts circuits des mosfets de la cathode commune 1,2 et 3 ainsi l'état sain.

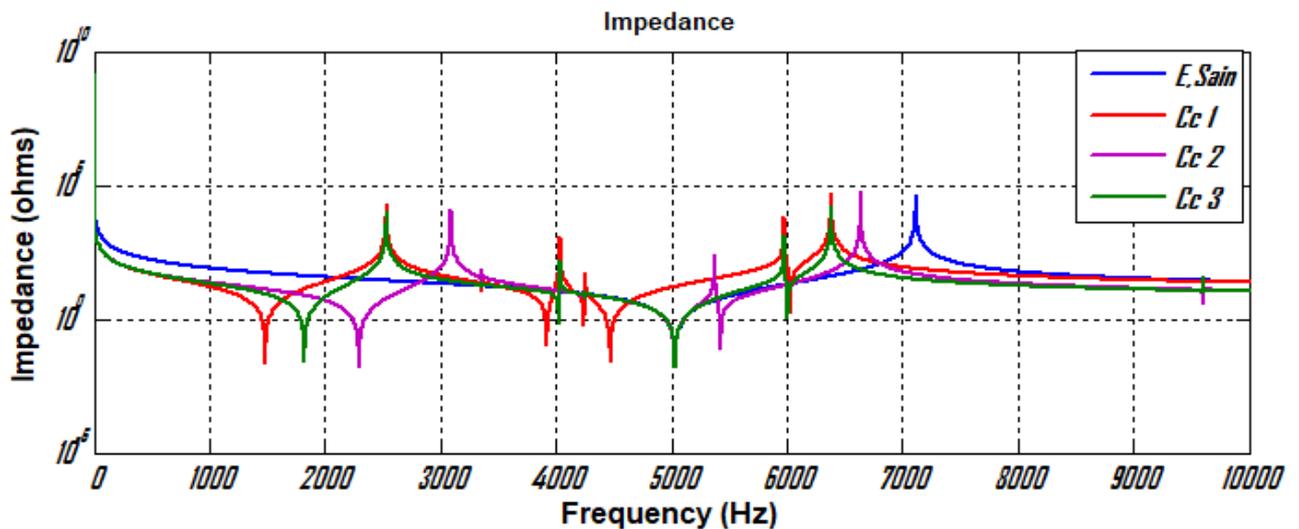


Figure IV.3 : Comparaison entre l'état sain et les courts circuits des mosfets 1,2 et 3.

La figure IV.4 représente la réponse fréquentielle des courts circuits des mosfets de l'anode commune 1',2' et 3' ainsi que l'état sain.

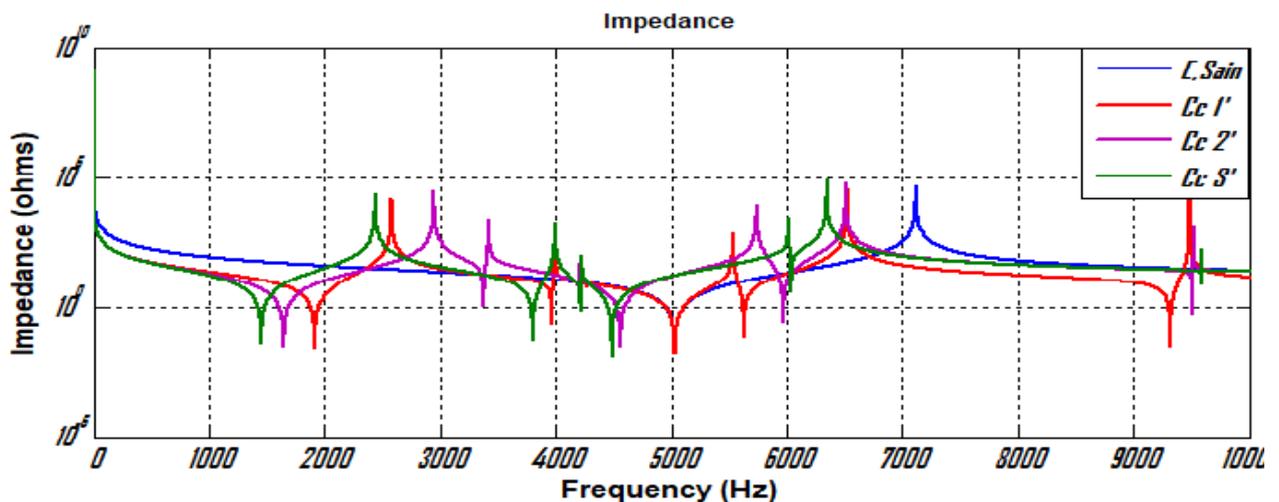


Figure IV.4 : Comparaison entre l'état sain et les courts circuits des mosfets 1',2' et 3'.

De la réponse en fréquence de l'onduleur affecté par un court circuit au niveau des mosfets 1,2 et 3 et 1',2' et 3' respectivement, nous remarquons une déformation de signature de l'impédance par rapport à celle obtenue d'un onduleur sain, comme nous apercevons

l'apparition des résonances et antirésonances dans la zone d'environ 1KHz et 7KHz, ce qui explique la présence d'un défaut au niveau de la structure de conversion ou bien le mode de commutation des composants. Comme nous remarquons l'apparition d'autre types de pics de résonances entre 9KHz et 10 KHz sont dus à un défaut au niveau de la technologie des interrupteurs. Nous constatons également que le défaut est absent à partir de 10KHz, car ces défauts sont dus au circuit numérique de commande et là, la FRA est effectuée hors service [43].

Les figures ci-dessous IV.5, IV.6, IV.7 représentent une comparaison entre la réponse fréquentielle des courts circuits des mosfets du même bras et l'état sain.

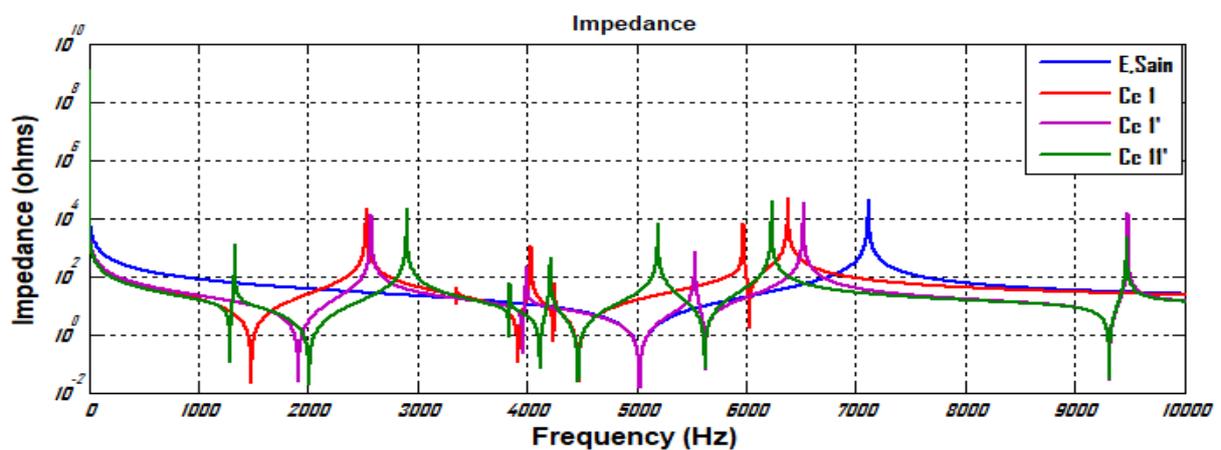


Figure IV.5 : Comparaison entre l'état sain et les courts circuits des mosfets 1,1' et 11'.

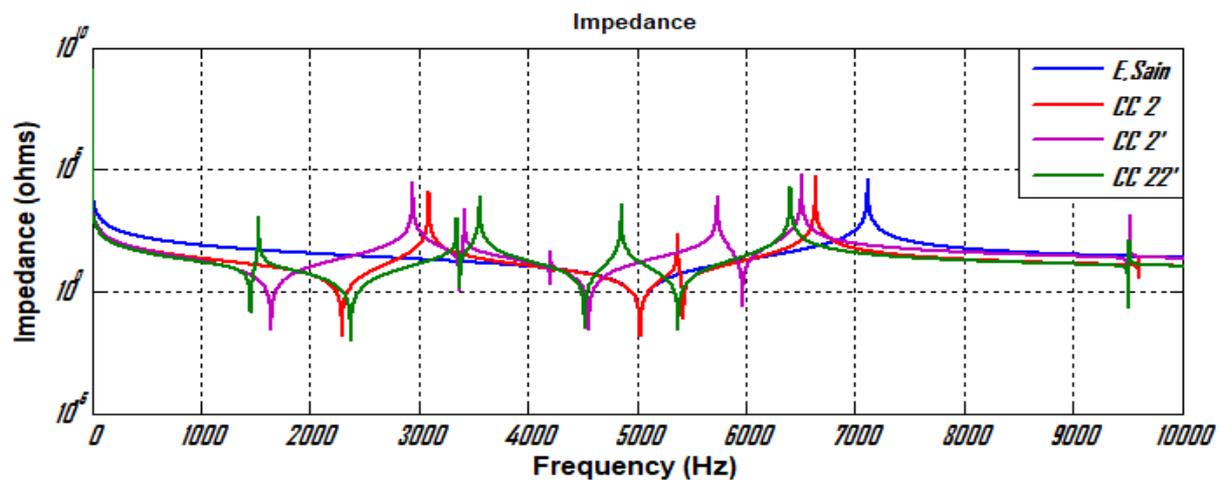


Figure IV.6 : Comparaison entre l'état sain et les courts circuits des mosfets 2,2' et 22'.

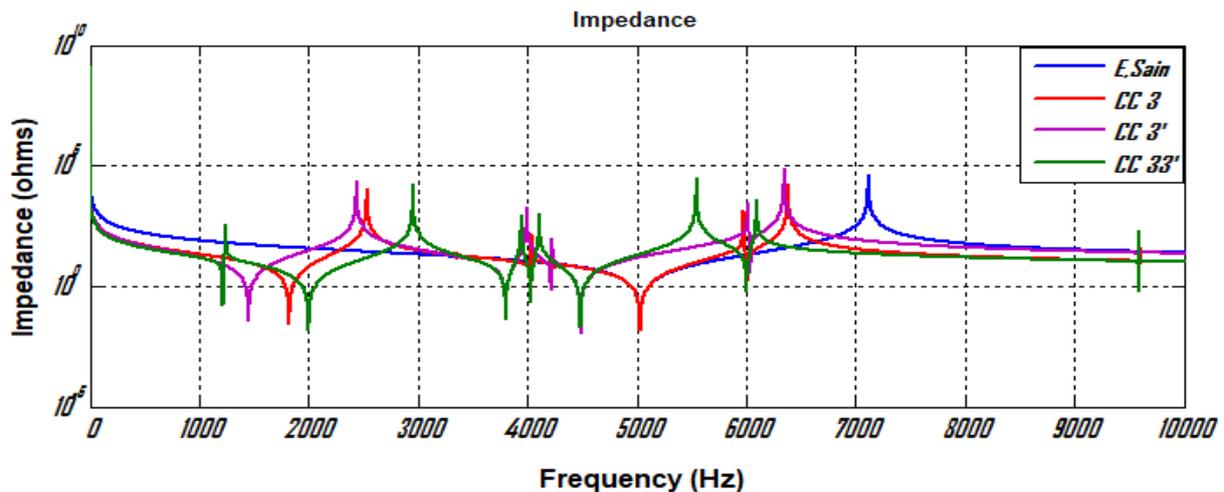


Figure IV.7 : Comparaison entre l'état sain et les courts circuits des mosfets 3,3' et 33'.

Comme nous l'avons vu, les composants de l'électronique de puissance intègrent des termes parasites qui modifient leur fonctionnement en fonction de la fréquence, ce qui explique la différence entre la réponse en fréquence des composants 1,2, 3 et 1', 2',3', 11', 22' et 33' défectueux ou bien court circuité, car à chaque niveau de fréquence nous avons un nouveau modèle équivalent à haute fréquence de l'onduleur, après avoir appliqué le défaut de court-circuit, nous constatons un effet dominant inductif entre 1KHz et 4KHz et ça change en effet capacitif entre 5KHz et 7 KHz [43].

IV.2.2.2.b. Défaut de circuit ouvert

Nous avons provoqué un défaut de circuit ouvert au sein de l'onduleur triphasé, la figure IV.8 représente la réponse en fréquence du défaut et celui de l'état sain.

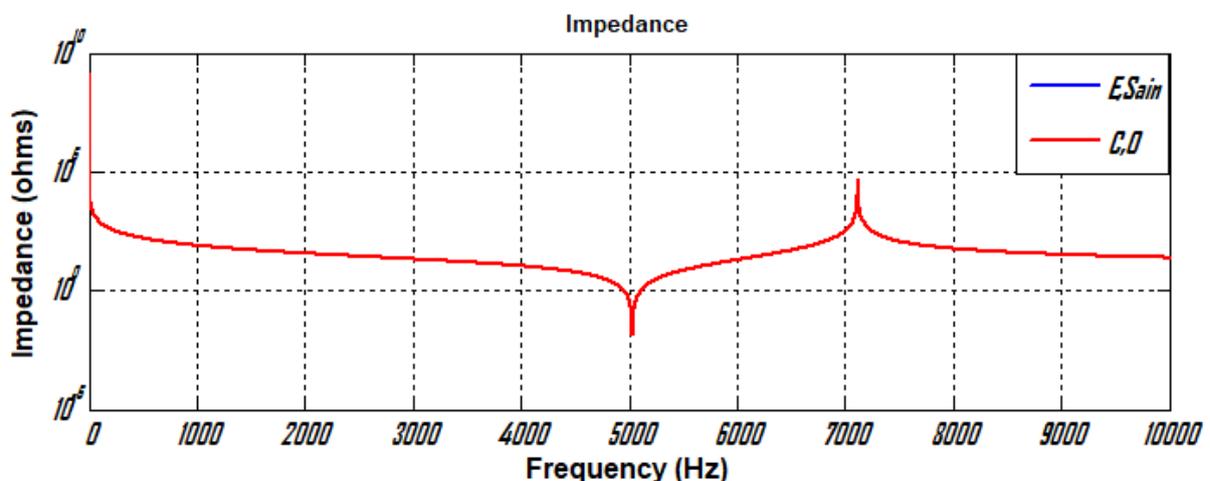


Figure IV.8 : Comparaison entre la réponse en fréquence du défaut de circuit ouvert et d'état sain de l'onduleur.

Nous remarquons que les résultats de la réponse en fréquence de défaut de circuit ouvert au niveau d'un composant quelconque de l'onduleur triphasé sont similaires avec celle de l'état sain. Cette méthode, nous ne offre pas assez d'informations sur le composant défectueux. Nous avons utilisés une autre méthode qui est la transformé de fourier rapide.

IV.3. Detection et localisation des défauts par la transformé de fourier rapide FFT

IV.3.1 Principe de la méthode FFT

La FFT ou bien la transformée de fourier rapide est une technique d'algorithme très efficace utilisé pour convertir un signal du domaine temporel en un signal du domaine fréquentiel équivalent basé sur la transformée de fourier discrète (DFT), la FFT est l'une des opérations les plus couramment utilisées en numérique, traitement du signal pour fournir une analyse du spectre de fréquences[44].

IV.3.2. Etude de la réponse fréquentielle de l'onduleur suite à des nombreux défauts

Pour voir l'influence des défauts appliqué sur l'onduleur triphasé à deux niveaux avec la méthode FFT, nous allons comparez les résultats obtenus des cas avec défauts avec les résultats obtenus dans le cas ou l'onduleur est sain, les défauts appliqués sont: court-circuit et circuit ouvert d'un bras, les résultats obtenus pendant l'application des différents défauts sont présentés dans le but de comprendre et de connaitre les conséquences de ces défauts sur les grandeurs électriques, les défauts appliqués sont limités seulement sur un bras.

IV.3.2.a Etat sain

La figure ci-dessus représente les courants d'entrée et sortie obtenus par la simulation d'un onduleur triphase à deux niveaux sous PSIM en état de fonctionnement normal, état Sain.

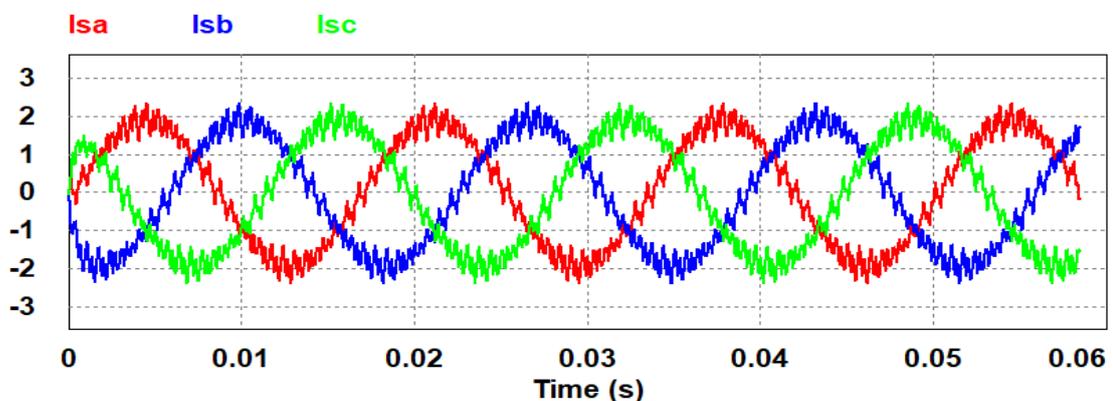


Figure IV.9 Forme d'onde des courants coté charge dans l'état sain

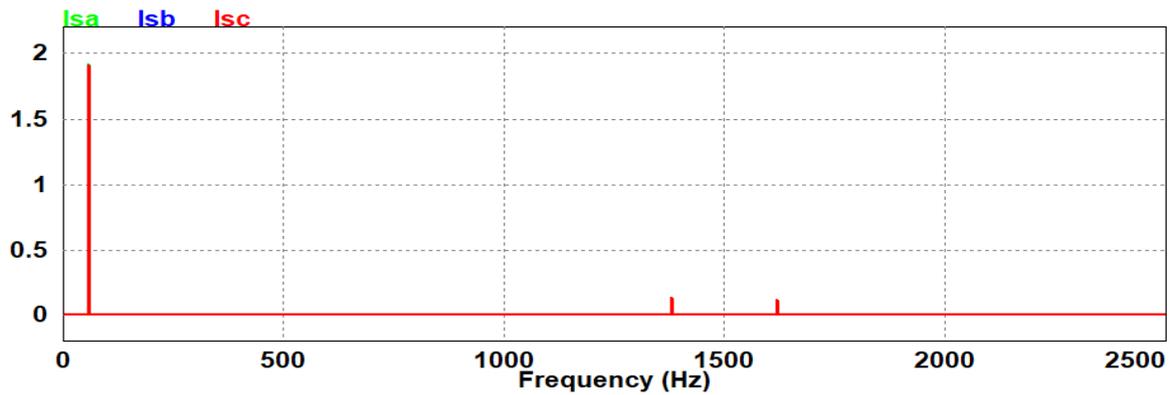


Figure IV.10 Spectre d'amplitude des courants côté charge dans l'état sain de l'onduleur

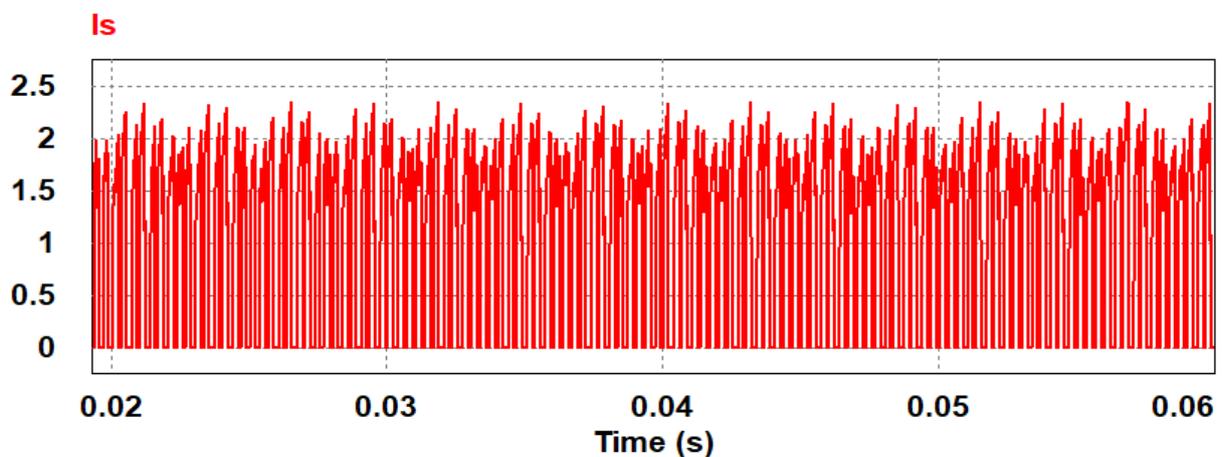


Figure IV.11 Courant de source état sain

La forme d'onde de courant de sortie est quasi sinusoidale. Comme nous apercevons l'absence des harmoniques de rang 3 malgré la présence de quelques inter-harmoniques autour de cette dernière, la présence de ce genre d'harmoniques est due à des variations périodiques ou aléatoires de la puissance absorbée par la charge [45].

IV.3.2. b Défaut de court circuit

Dans cette partie nous avons provoqués plusieurs court-circuits au niveau des mosfets du premier bras côté source afin d'étudier le défaut de court circuit dans un onduleur triphasé.

La validation de la première approche pour l'analyse de défaut de court circuit est faite en utilisant PSIM, car la mise en pratique de ce type de défaut nécessite certains dispositifs de protection pour éviter l'endommagement des interrupteurs et leurs commandes.

- **Court circuit de T1**

La figure IV.12 représente les courants d'entrée et de sortie d'un onduleur triphasé avec un court circuit au niveau de Mosfet 1.

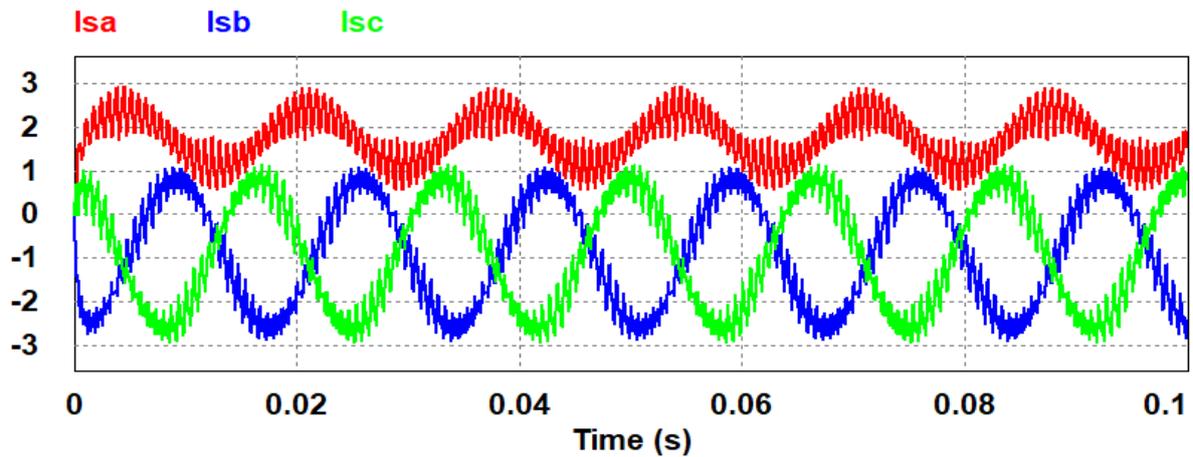


Figure IV.12: Forme d'onde des courants côté charge dans le cas T1 court-circuité

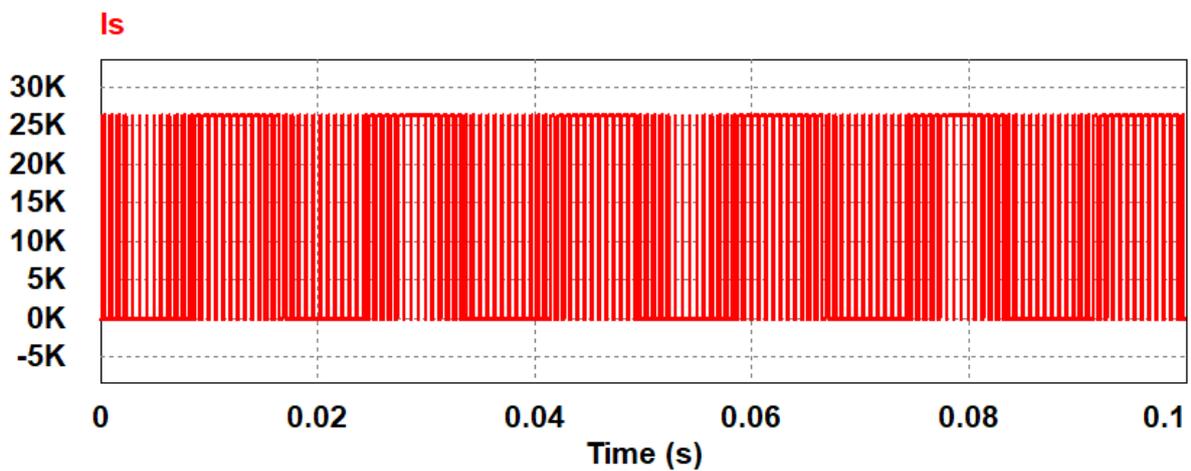


Figure IV.13 Courant de source quand T1 en court circuit

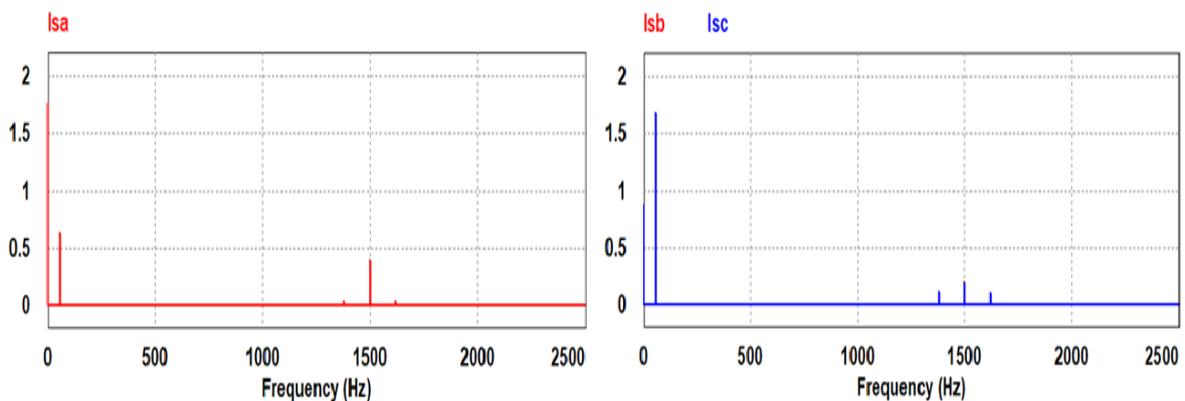


Figure IV.14 Spectre d'amplitude des courants côté charge dans cas T1 court-circuité

- **Court circuit de T1'**

La figure IV.15 représente les courants d'entrée et de sortie d'un onduleur triphasé avec un court circuit au niveau de Mosfet 1'.

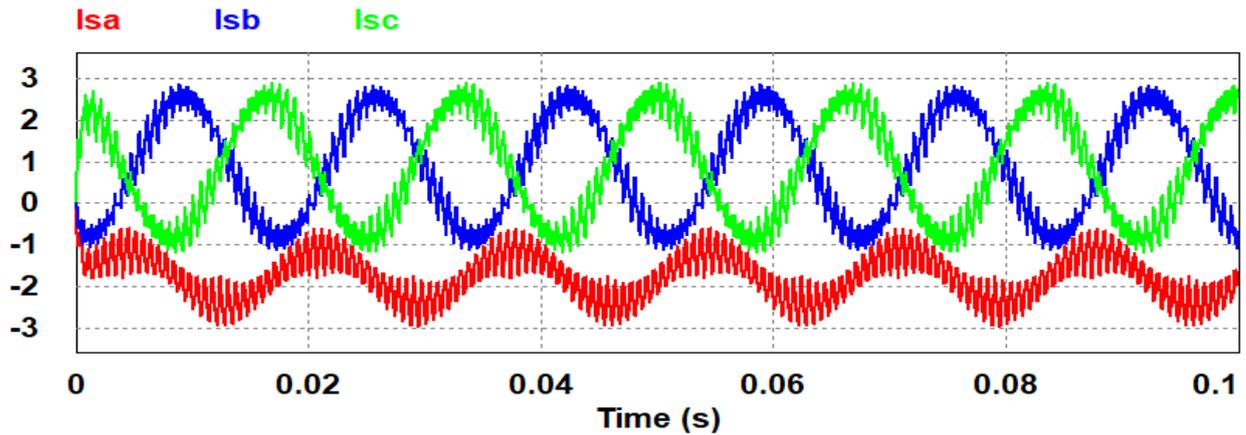


Figure IV.15: Les courants de Sortie de court circuit de T1'

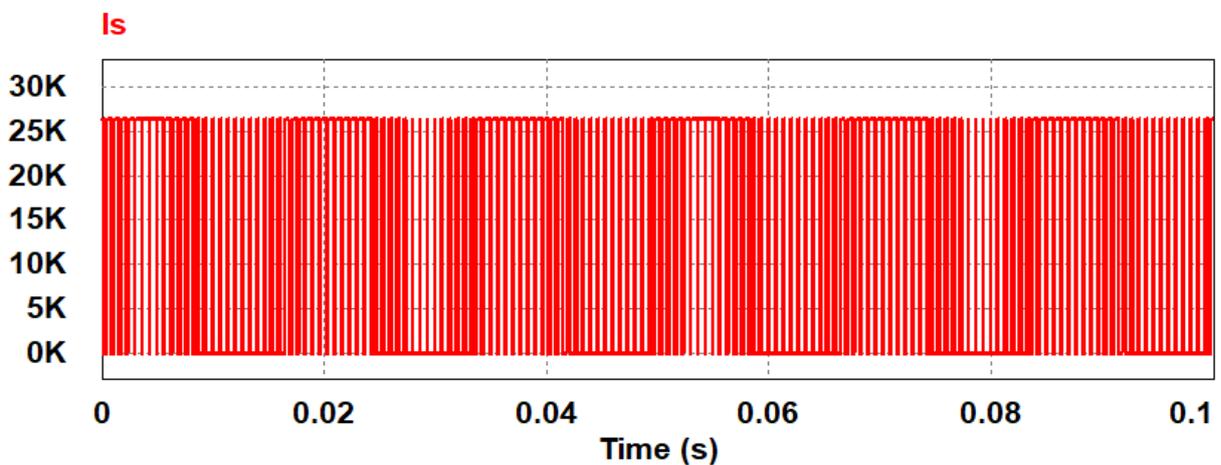


Figure IV.16: Courant de source de court circuit T1'

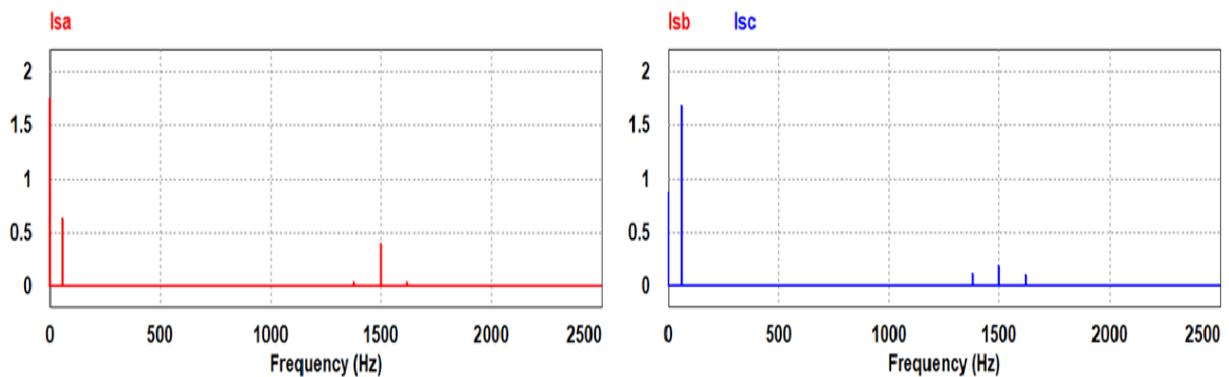


Figure IV.17: Spectre d'amplitude des courants côté charge dans cas T1' court-circuité des trois phases

- **Court circuit de T1 et T1'**

Les figures IV.18 , IV.19 , IV.20 représentent les courants d'entrée et de sortie d'un onduleur triphasé avec un court circuit de bras complet (Mosfets 1 et 1').

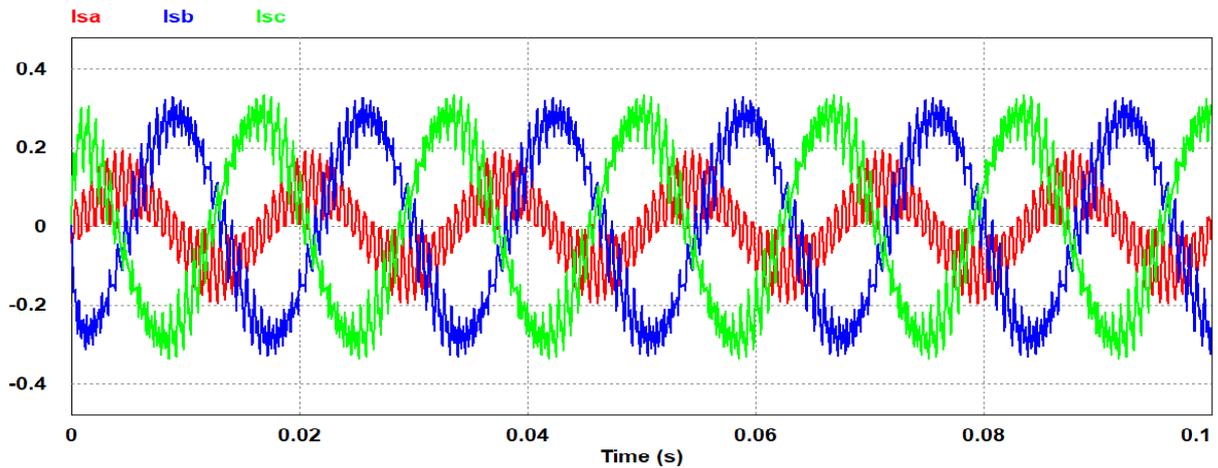


Figure IV.18: Les courant de sortie de court circuit des MOSFETS T1 et T1'

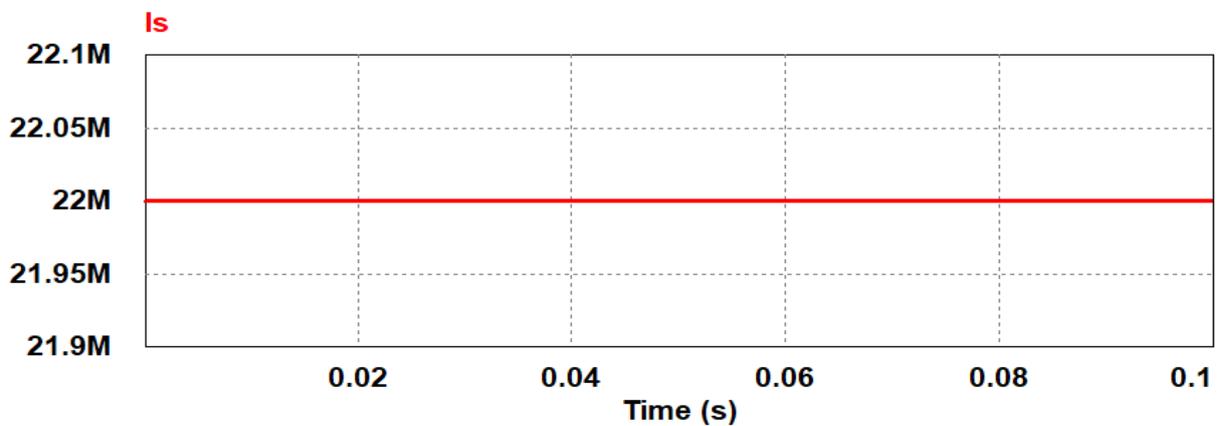


Figure IV.19: Courant de source quand un bras est court-circuité

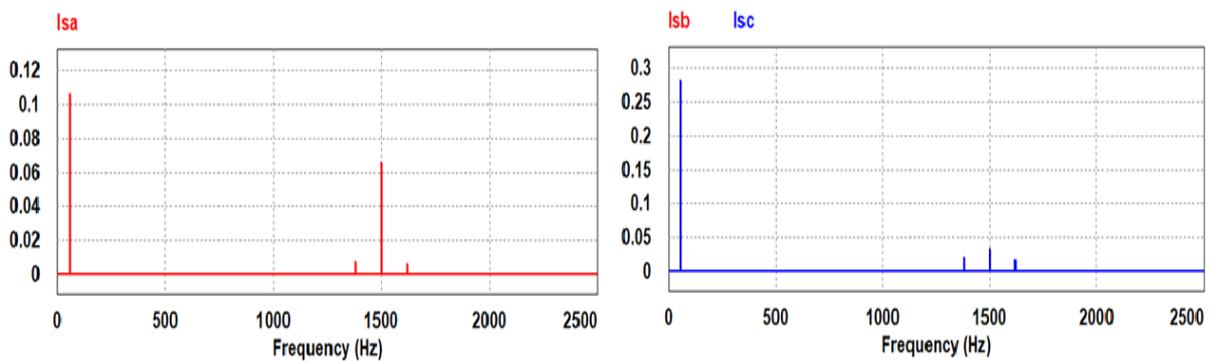


Figure IV.20: Spectre d'amplitude des courants coté charge dans le bras est court-circuité.

Interprétations des résultats du court circuit

Il existe aussi plusieurs scénarios de défaut court-circuit, nous s'intéressons au court-circuit d'un seul bras, le régime de défaut court-circuit se produit lorsqu'un des composants d'une cellule de commutation reste constamment fermé.

Ces défauts consistent à la mise en états fermé de l'un des interrupteur du bras 'A' (T1 ou T1') ou le bras complet, nous constatons que ce type de défaut provoque un fonctionnement perturbé et instable du système en raison du changement du mode de fonctionnement pendant l'application du défaut, la conséquence principale de la mise en court circuit d'un mosfet sur le fonctionnement de l'onduleur est l'apparition de deux chemins de circulation incontrôlable du courant, en effet le courant de la source ne peut plus être contrôlé car il augmente à des niveaux intolérables quelques kilo-Ampère dans le cas où l'un des interrupteurs est court-circuité et de l'ordre de méga-ampère dans le cas le bras est court-circuité, les courants de phases A et B, C deviennent fortement déséquilibrés et leurs amplitudes ont diminuées par rapport au cas sain de l'onduleur, ce qui nous permet de dire que ce défaut peut à lui seul provoquer d'énormes dégâts quelques soit sur la charge ou sur l'installation photovoltaïque une fois branchée, pour le spectre d'harmonique nous remarquons l'apparition des harmoniques de rang 3 et quelques inter-harmoniques d'amplitude variables et même le fondamental change d'amplitude à cause des défauts de court-circuit appliqués

IV.3.2.c. Défaut de circuit ouvert

Nous avons provoqués plusieurs circuits ouverts au niveau des mosfets afin d'étudier le défaut de circuit ouvert dans un onduleur triphasé.

- **Circuit ouvert au niveau de T1**

Les figures IV.21 ,IV.22 et IV.23 représentent les courants d'entrée et de sortie d'un onduleur triphasé avec un défaut de circuit ouvert au niveau de Mosfet 1.

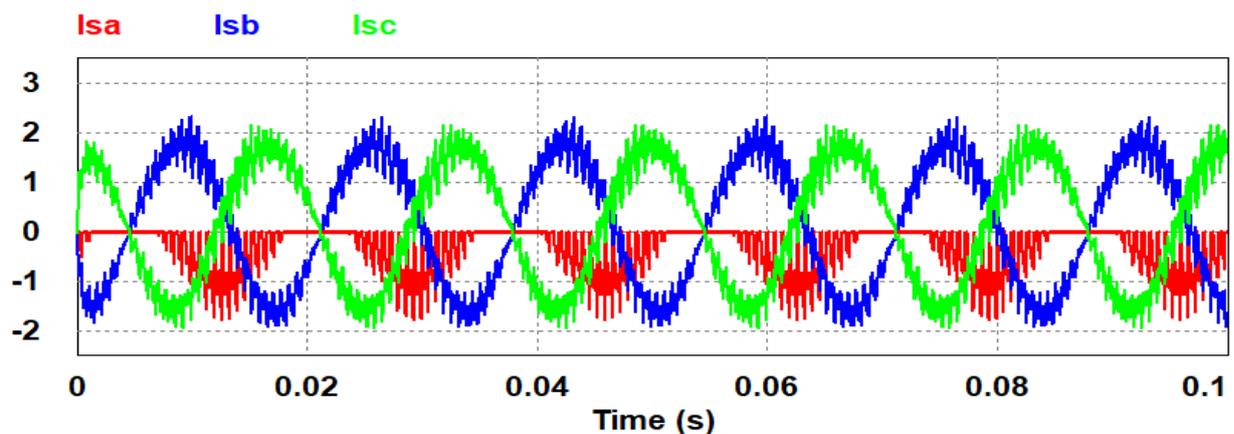


Figure IV.21: Forme d'onde des courants côté charge dans le cas T1 en circuit ouvert

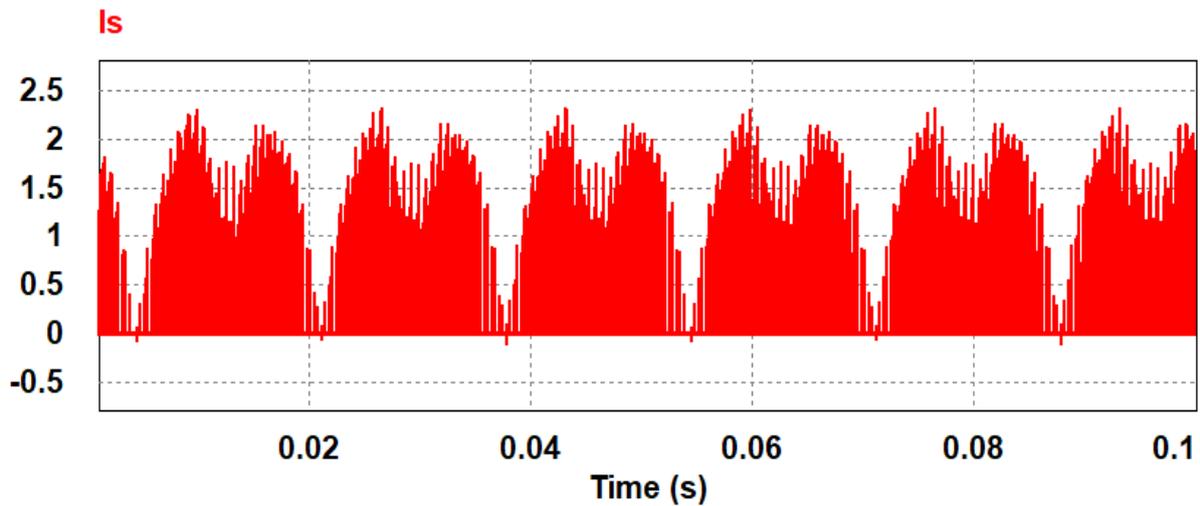


Figure IV.22: Courant de source quand T1 en circuit ouvert

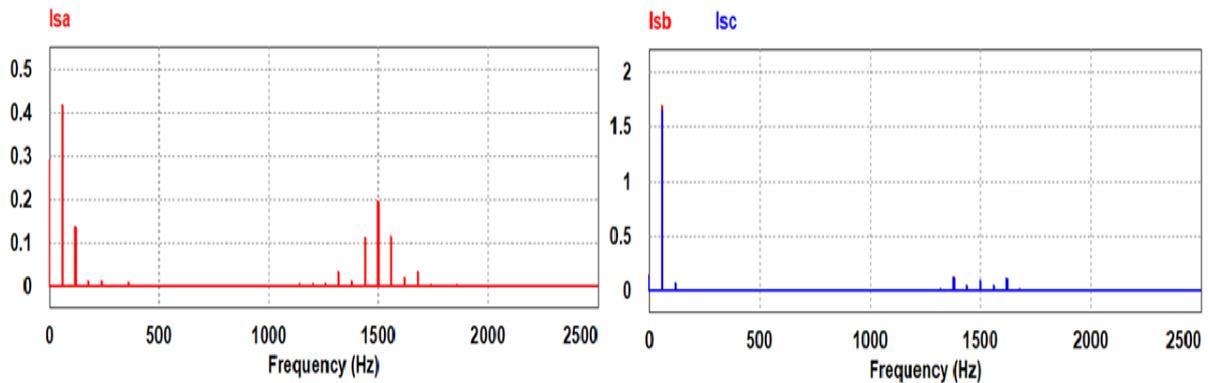


Figure IV.23: Spectre d'amplitude des courants côté charge dans cas T1 en circuit ouvert.

- **Circuit ouvert au niveau de T1'**

Les figures IV.24 , IV.25 et IV.26 représentent les courants d'entrée et de sortie d'un onduleur triphasé avec un circuit ouvert au niveau de Mosfet 1'.

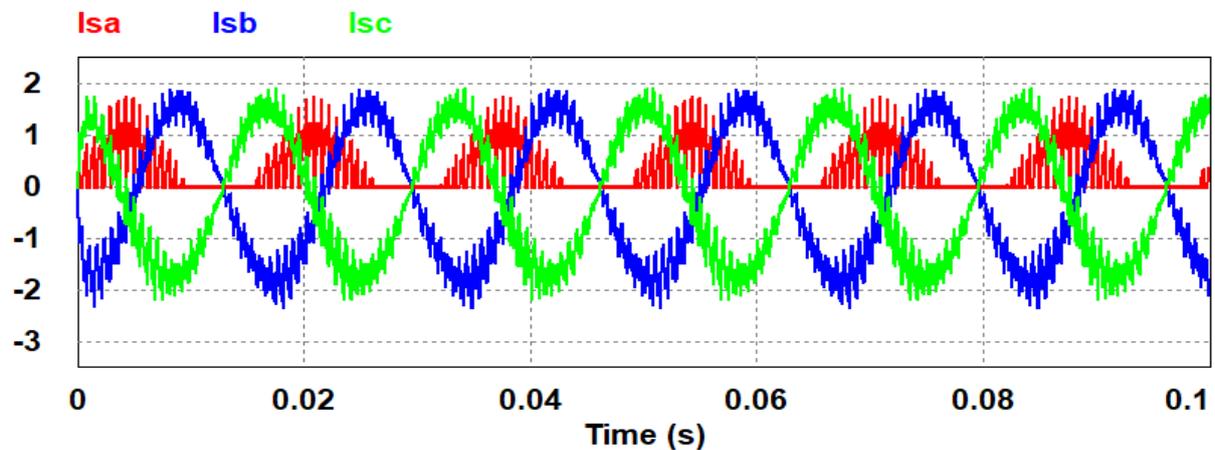


Figure IV.24: Forme d'onde des courants côté charge dans le cas T1' en circuit ouvert.

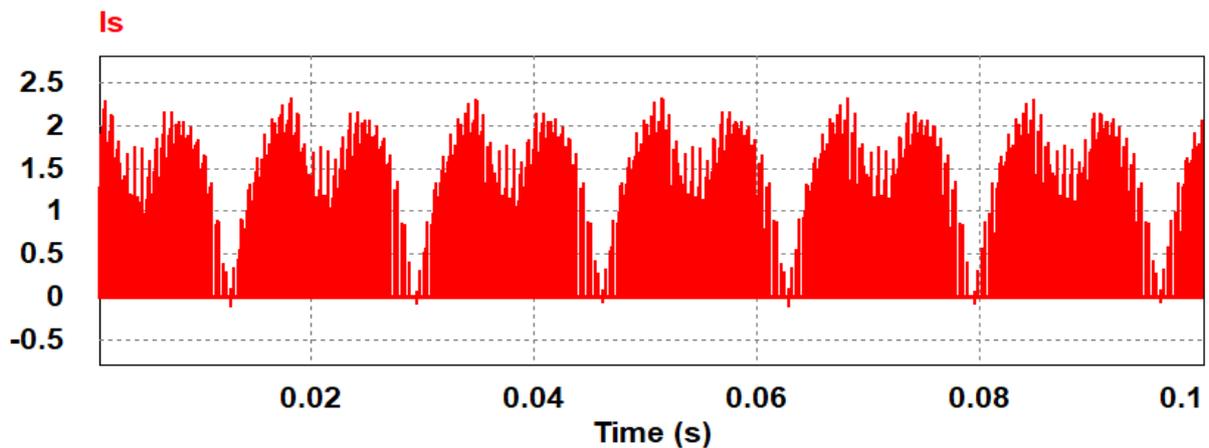


Figure IV.25: Courant de source quand T1' en circuit ouvert

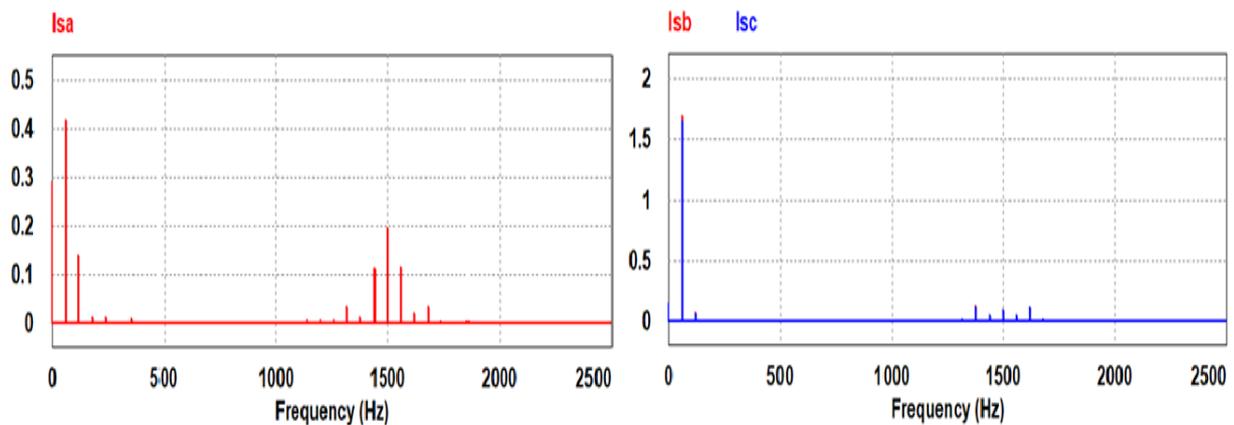


Figure IV.26: Spectre d'amplitude des courants côté charge dans cas T1' en circuit ouvert

- **Circuit ouvert au niveau de T1 et T1'**

Les figures IV.27 , IV.28 et IV.29 représentent les courants d'entrée et de sortie d'un onduleur triphasé avec un circuit ouvert de bras complet (Mosfets 1 et 1').

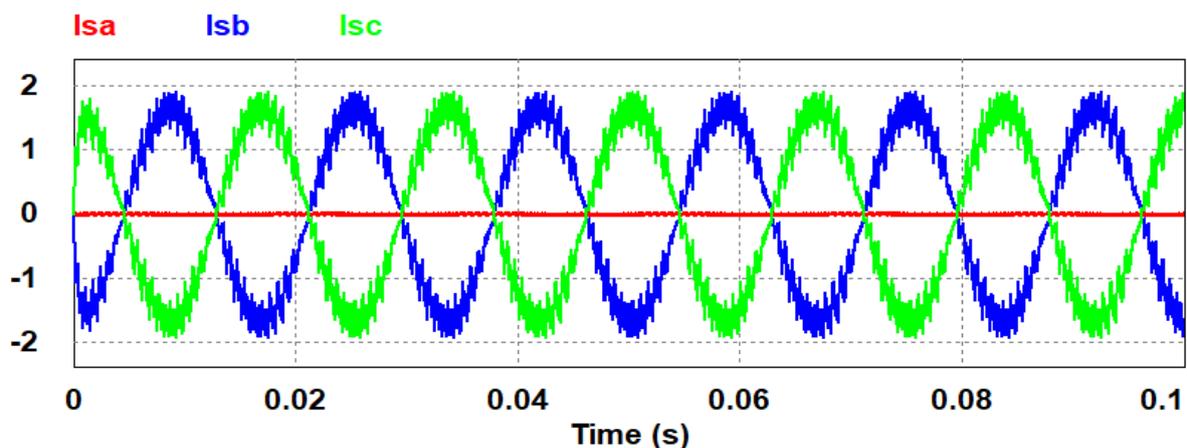


Figure IV.27: Forme d'onde des courants côté charge dans le cas T1 et T1' en circuit ouvert

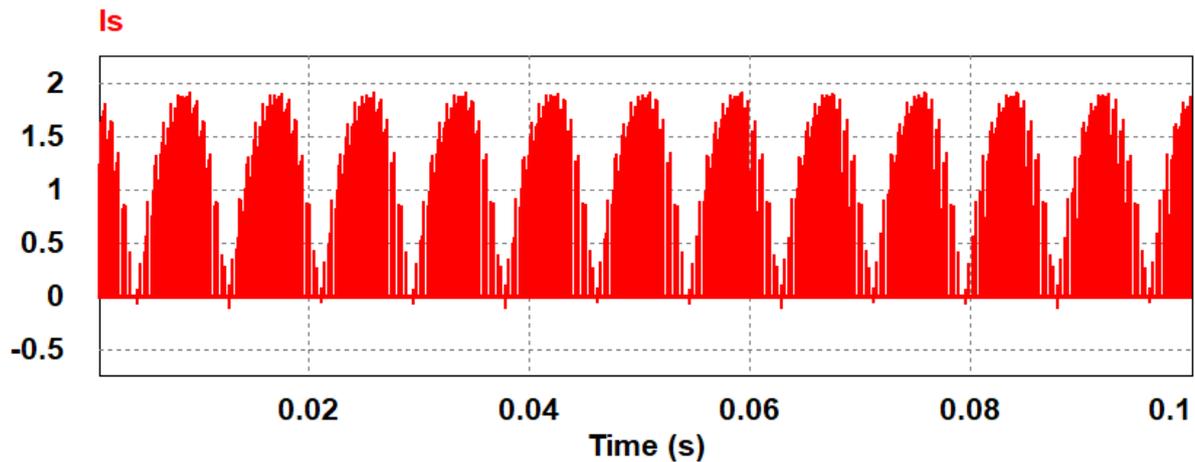


Figure IV.28: Courant de source quand T1 et T1' en circuit ouvert

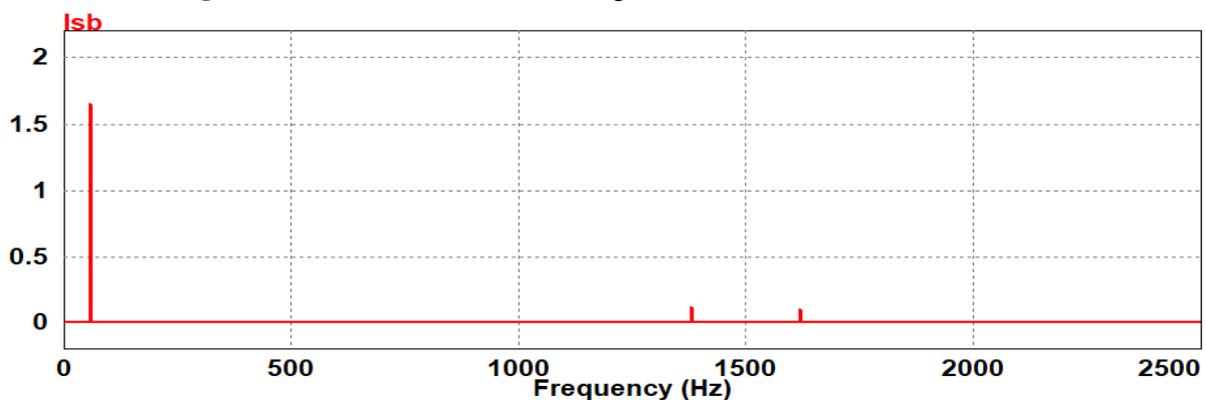


Figure IV.29: Spectre d'amplitude des courants côté charge dans cas T1' en circuit ouvert

interprétation des résultats de circuit ouvert

- défaut1** : Ce type de défaut consiste à la mise en ouverture de l'un des interrupteurs de bras A (T1 ou/et T1'), cela conduit à éliminer l'alternance positive ou négative du courant de phase de ce bras, ce mode de défaut introduit une déformation et une discontinuité d'onde de courant ce qui provoque des perturbations dans le système (changement de fonctionnement). Ainsi que l'onde de courants est déformées, ce qui introduit des pertes électriques à cause des harmoniques qu'il contient, les courants des deux autres phases, prennent des valeurs instantanément un peu plus basses pour maintenir le fonctionnement de la charge.

- défaut 2** : Lorsque nous provoquons un défaut de circuit ouvert au niveau du bras (mosfet 1 et 1'), ce mode de défaut correspond à la perte de la commande d'un bras, ce défaut provoque la perturbation de système, ainsi que l'annulation du courant de la phase défectueuse et une diminution importante de la valeur efficace de courants des deux autres phases. nous pouvons dire dans ce cas que notre onduleur triphasé s'est transformé en

onduleur monophasé à cause du défaut de circuit ouvert du bras, ce qui implique la réduction du rendement de ce dernier. Comme nous apercevons la diminution l'amplitude des harmoniques et l'annulation de la valeur moyenne de la forme spectrale de courant de sortie par rapport à celle d'entrée,

IV.4. Conclusion

Le travail dans ce chapitre avait pour objectif la détection et le diagnostic des défauts dans un convertisseur DC/AC (onduleur), les différents états de commutations des interrupteurs ont été exploités dans l'objectif d'étudier l'impact de la présence d'un défaut sur les performances du convertisseur statique. Dans notre étude deux types de défauts ont été considérés : le défaut circuit-ouvert et le défaut court-circuit, pour cela nous avons créé des scénarios de défauts interrupteurs afin d'analyser les conséquences de ces défauts et voir le comportement des courants côté charge et côté source, nous avons appliqués deux approches la FRA et la FFT, les résultats de simulations montrent le degré de danger de défauts type court-circuit par rapport au défaut de type circuit-ouvert.

Conclusion générale

Ce manuscrit présente une étude intitulée « Détection et localisation des défauts dans un onduleur à deux niveaux dédié à une application photovoltaïque ».

L'objectif principal de ce travail est d'améliorer la disponibilité des onduleurs utilisés dans des installations photovoltaïques, et cela en développant des méthodes de diagnostic de défauts rapide, efficace et fiable adaptés à l'installation pour assurer un bon fonctionnement du système avec un bon rendement.

Pour mener cette étude, dans un premier temps, nous avons donné un aperçu sur l'influence de l'éclairement et la température sur la caractéristique électrique d'un module photovoltaïque, puis nous avons utilisé un onduleur triphasé à deux niveaux, deux types de défauts interrupteurs ont été considérés, les défauts circuit-ouvert et les défauts court-circuit (simple ou multiple) sur les interrupteurs d'un convertisseur statique (DC/AC).

Ce travail à été réalisé pour répondre aux exigences croissantes des industriels et des utilisateurs des installations photovoltaïques associées aux convertisseurs statiques, dont le but est d'assurer une continuité de fonctionnement avec ou sans la présence d'un défaut au sein de l'installation.

Afin d'étudier les deux types de défauts énoncées ci-dessus, nous avons appliqué deux approches de la méthode d'analyse fréquentielle qui sont comme suit :

- Premièrement, nous avons appliqué analyse de la réponse fréquentielle (FRA), cette dernière mis en œuvre pendant les phases normale d'arrêt d'exploitation (Off line), cependant elle donne des résultats seulement dans le cas de défaut court-circuit par contre ces résultats en cas de défaut de circuit ouvert sont quasiment identique avec celui d'état de fonctionnement normal (état sain) ;
- Deuxièmement, la transformé de fourier rapide (FFT), cette dernière mis en œuvre en cours d'exploitation (On line), contrairement à la méthode de FRA, elle donne des résultats dans le cas des différents défauts (court circuit et circuit ouvert).

Nous constatons, après simulation que ces types de défauts risquent de provoquer des perturbations et dysfonctionnement, ainsi que l'endommagement des autres composants de système. Afin de réduire les conséquences néfastes suite à ces défauts, il est nécessaire de les détecter le plus rapidement possible et d'inhiber la commande de l'interrupteur défectueux.

Puisqu'une réaction rapide est exigée, la méthode de détection doit être la plus simple et la plus efficace possible.

En perspective de ce travail, d'autres points pourraient être envisagés pour mettre en exergue certains aspects théoriques et pratiques.

Une première étude serait de développer les deux approches utilisés dans ce travail pour qu'elles deviennent tolérantes aux défauts en temps réel des onduleurs des installations photovoltaïques en tenant compte de la majorité des défauts qui peuvent survenir dans le système complet (défauts des panneaux solaire, défauts convertisseurs statiques onduleurs et hacheurs, défauts câblage, défauts batteries, défauts capteurs et défauts commande...) tout en assurant que le diagnostic puisse être fait dans un délais très court.

L'utilisation des convertisseurs multi-niveaux (3 ou 5 niveaux pour ne pas compliquer la commande) ce type de convertisseurs est plus robuste aux défauts interrupteurs. Sans compensation de défauts le système est capable de fonctionner avec des performances dégradées, le multiple des interrupteurs pour un bras de convertisseur garantir la réduction de l'effet de défauts en comparaison avec un convertisseur classique à deux niveaux.

Que les futurs travaux s'améliorent pour qu'elles puissent détecter le défaut de circuit ouvert avec la méthode d'analyse de la réponse fréquentielle (FRA) au sein des onduleurs photovoltaïques; plus la possibilité d'implémentation pratique de cette méthode.

Bibliographie

- [1] BOUCHERITTE Wafa, «Convertisseurs multi niveaux dans les systèmes PV Connectés au réseau», mémoire de magister en génie électrique, université Mouhamed Khider – Biskra,2009.
- [2] BELAOUT Abdeslam, «Etude et diagnostic des défauts fréquents aux systèmes photovoltaïques (PV) par emploi de la caractéristique courant-tension», mémoire de magister en électronique, université de Sétif, 28/10/2014.
- [3] B.Othmane & D .Fathi, «étude et optimisation de fonctionnement d'un système photovoltaïque» mémoire de master en génie électrique, université Kasdi Marba -Ouargla, 2012.
- [4] BELKAID Abdelhakim, «Conception et implémentation d'une commande MPPT de haute performance pour une chaine de conversion photovoltaïque autonome», Thèse de Doctorat, université Ferhat Abbas-Sétif, 2015
- [5] BRAHMI I ,Souhila, « Optimisation du fonctionnement d'un générateur photovoltaïque par guidage automatique des panneaux solaires »,thèse doctorat en réseaux électrique, université Djillali Liabes _Sidi Bel Abbes, 2018.
- [6] F.Djaloud, «Etude et optimisation du fonctionnement d'un système photovoltaïque», Mémoire de Master, université d'Ouargla, 2012.
- [7] BELBACHIR Soumia, «Modélisation et simulation de l'influence de la résistance shunt sur les caractéristiques I(V) et P(V) d'une cellule photovoltaïque», mémoire de master en physique, université Abou-Bekr Belkaid – Tlemcen, 2017.
- [8] W.C. Ben Moussa, S. Amara et A. Zerga, «Etude comparative des modèles de la caractéristique courant-tension d'une cellule solaire au silicium monocristallin», Université Abou-Bekr Belkaïd, B.P. 119, Tlemcen, 2007.
- [9] BENDJELLOULI Zakaria, «Contribution à la modélisation d'une cellule solaire», mémoire de magistère, université de Bechar, 2009.

- [10] CHERDOUH Karima, ARKOUB Mohand, «Banc de mesures pour installation photovoltaïque » Mémoire de master, université Abderrahmane Mira- Bejaia, 2015/2016.
- [11] LOUKRIZ Djamel, «Poursuite du Point Maximale d'un Système Photovoltaïque par les Méthodes Intelligentes», mémoire de master, université de M'Sila, 2016.
- [12] HELALI Kamelia, « Modélisation D'une Cellule Photovoltaïque Etude Comparative», mémoire de Magister en électrotechnique, université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, 2012.
- [13] MAZOUZ Karim, «Etude d'une batterie de stockage dans un système photovoltaïque», mémoire de master, Université A.Mira-Bejaïa, 2011/2012.
- [14] KHENFER Riad, «Détection et isolation de défauts combinant des méthodes à base de données appliquées aux systèmes électro-énergétiques», thèse doctorat en automatique, université Ferhat Abbes-Sétif1, 2015.
- [15] NAIM .Houcine, «Etude de gestion d'une mini-centrale solaire et mise au point d'un dispositif automatique de mesures, contrôles et régulation de l'énergie électrique», Thèse de Doctorat en physique, université Mohamed Boudiaf-Oran, 2015/2016.
- [16] F.BENDJOUDI et F.LAKHDARI, «Etude et Simulation d'un système de pompage photovoltaïque avec batteries», Mémoire de Master Faculté de Technologie, universite Abderrahmane Mira de Bejaia ,2014.
- [17] M.BESSEM ABDELGHANI, «Modélisation et simulation d'un pompage photovoltaïque», Mémoire de Master Faculté de Technologie, universite BADJI MOKHTAR-Annaba, 2018.
- [18] O.Bensessik et F.Djaloud, «Etude et optimisation du fonctionnement d'un système photovoltaïque», Mémoire de Master, universite Kasdi Merbah-Ouargal, 2012.
- [19] M. Merah et M. Zakaria Kari, «Conception, simulation et réalisation d'un onduleur assisté (Grid-Tie Inverter)», Mémoire de Master, Université Abou Bekr Belkaïd-Tlemcen.2015.
- [20] M. Boulkouane Mourad et M. DJABELLAH Nassim, «Influence des générateurs photovoltaïques sur la stabilité des réseaux électriques», Mémoire de Master, Université A.Mira-Bejaïa, 2016.

- [21] AHMADI Ismail, «étude et simulation d'un système de pompage d'eau couplé à un générateur photovoltaïque», Mémoire de Master en génie électrique, université Larbi Ben M'hidi-Oum Elbouaghi, 2012/2013.
- [22] BENAOUICHA Mounir et Mr GUERROUT Yousef, «Réalisation d'un onduleur de tension commandé par la carte Dspace 1104», Mémoire de Master. Université A.Mira-Bejaïa.2015.
- [23] AGBOSSOU Komi Akpé, «Modélisation et mise en œuvre de l'IGBT dans un onduleur de moyenne puissance», thèse de Doctorat en génie électrique, l'Institut National Polytechnique de Lorraine.1996.
- [24] ZEGRAR Mansour, «Optimisation de l'association GPV-onduleur multi niveaux», thèse doctorat en électronique, université Mohamed Boudiaf-Oran, 2016/2017.
- [25] AIS.Belkacem, «Topologie des onduleurs solaire étude et synthèse», Mémoire magister en génie électrique, université Mohamed Boudhiaf-Oran, 2011/2012.
- [26] KAHLAOUI. Imed Eddine, CHOUIA Mohamed El Amine, «Simulation de couplage d'un moteur asynchrone avec un onduleur multi niveaux alimenté par un générateur photovoltaïque», Mémoire master, Université Kasdi Merbah-Ouargla, 2016.
- [27] B. Abdelkader, «Contribution à l'Etude des Stratégies de Commande des Filtres Actifs Triphasés», Mémoire de Magister, université Mohamed Chérif Messaadia-Souk-ahras, 2014.
- [28] Wissem. SAIGHI, «Estimation d' diagnostic de fonctionnement des systèmes linéaires», Mémoire de Master, université Larbi Ben M'hidi-Oum-ElBouaghi, 2012/2013.
- [29] WAFIA. Chine, «contribution au diagnostic des défauts dans les systèmes photovoltaïque », thèse doctorat, université Med Seddik Ben Yahia-Jijel ,2014.
- [30] Cécile Miquel, Costantina Stavrou, Nicolas Lebert et jérémy Sarantou, Prévenir les désordre améliorer la qualité de la construction, Pole prévention produits mis en œuvre, juillet 2018.
- [31] Messaoud SAOUDI, Massinissa SALHI, «Etude et optimisation d'un système photovoltaïque», mémoire master, Université A.MIRA - BEJAIA, 15 Juin 2017.
- [32] BEDOUD Khouloud, «Modélisation et diagnostic de défaillance d'une électrovanne pneumatique», mémoire magister, université Badji Mokhtar-ANNABA.2009/2010.

- [33] N. Aouchiche, «Défauts liés aux systèmes photovoltaïques autonomes et techniques de diagnostic -Etat de l'art», Centre de Développement des Energies Renouvelables, CDER, 2018.
- [34] BOUKAROURA. Abdelkader, «Modélisation et Diagnostic d'un Onduleur Triphasé par l'Approche Bond Graph», diplôme magister, université Ferhat Abbas-Sétif, 2009.
- [35] MERAI. Kamel, «Estimation d'Etat et Diagnostic de Fonctionnement des Système non Linéaires», diplôme de magister, université Badji Mokhtar, 2010.
- [36] AMRANI Mohamed, «Surveillance et diagnostic d'une ligne de production par les réseaux de neurones artificiels», mémoire de magister, université M'Hamed Bougara-Boumerdes, 2010.
- [37] El Hadi Rebba, «Génération automatique et optimisation des systèmes a inférence floue » Thèses doctorat, université paris XII, 2003.
- [38] Mohand Arab DJEZIRI, « Diagnostic des Systèmes Incertains par l'Approche Bond Graph», thèse doctorat, Ecole Centrale de Lille, 2007.
- [39] Irwin ISSURY, «Contribution au développement d'une stratégie de diagnostic global en fonction des diagnostiqueurs locaux- Application à une mission spatiale», thèse doctorat, université Bordeaux, 2011.
- [40] M. CHENANE SOUHEYB M. RAKHOUANE ADNANE, «Simulation d'une décharge partielle dans un enroulement d'un transformateur de puissance», mémoire de master en électromécanique, Université Akli Mohand Oulhadj–Bouira, 2017/2018.
- [41] MEZARI NAOUEL, «Diagnostic des transformateur de puissance», mémoire de magister en machine électrique, Université Mouloud Mammeri - TIZI-OUZOU.
- [42] S, Mohamed, H, Mahmoud, and B, Jaleddine, « Comparative study of conventional modulation schemes in terms of conducted and radiated EMI generated by three-phase inverters », Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, no :25, pp, 1599-1611, May. 2017.
- [43] François. C, Cyrille.G, Eric. L, Bertrand.R «La compatibilité électromagnétique en électronique de puissance, principes et cas d'études», édition Lavoisier, 2013.
- [44] C, Rulph, «DSP Applications Using C and the TMS320C6x DSK », edition Copyright, 2002.

- [45] I. Jlassi, J. O. Estima, S. K. El Khil, N. M. Bellaaj, and A. J. M. Cardoso, «Multiple open-circuit faults diagnosis in back-to-back converters of PMSG drives for wind turbine systems», *IEEE Transaction on Power Electronics.*, vol. 30, no. 5, pp. 2689–2702, May. 2015.

Résumé

Comme tout processus industriel, le convertisseur statique d'une installation photovoltaïque peut être soumis, au cours de son fonctionnement, à différents défauts et anomalies conduisant à une baisse de la performance de l'appareillage et voire à son indisponibilité. Permettre de diagnostiquer finement et de faire la détection et la localisation de défauts dans un convertisseur PV réduit les coûts de maintenance et surtout augmente la productivité. Dans ce travail, nous nous intéressons spécifiquement à la détection et la localisation de défauts dans le convertisseur Photovoltaïque DC/AC, C'est-à-dire l'onduleur associé à l'installation photovoltaïque. L'objectif de ce travail, est d'assurer une continuité de fonctionnement avec ou sans la présence d'un défaut au sein d'un onduleur photovoltaïque, Pour mener cette étude, nous avons utilisé un onduleur triphasé à deux niveaux. Deux types de défauts interrupteurs ont été considérés, les défauts circuit-ouvert et les défauts court-circuit, pour étudier ses deux types de défauts, nous avons appliqué deux approches de la méthode d'analyse fréquentielle qui sont Analyse de la réponse fréquentielle (FRA) et La transformé de Fourier Rapide (FFT).

Mots-clés: *Analyse de la réponse fréquentielle (FRA), La transformé de Fourier Rapide (FFT), onduleur à deux niveaux, défauts circuit-ouvert, défauts court-circuit, installation photovoltaïque.*

Abstract

Like any industrial process, the static converter of a photovoltaic installation may be subjected, during its operation, to various faults and anomalies leading to a diminution in the performance of equipment and even to its unavailability. Allowing accurate diagnosis and detection and localization of faults in a PV converter reduces maintenance costs and, above all increases productivity. In this work, we are specifically interested in detecting and locating faults in the DC/AC photovoltaic converter, i.e. the inverter associated with the photovoltaic installation. The objective of this work is to ensure continuity of operation with or without the presence of a fault in a photovoltaic inverter. In order to carry out this study, we used a two level three phase inverter. Two types of interrupting faults were considered, open-circuit and short-circuit faults, to study both types of faults, we applied two approaches of the methods of frequency analysis, who are, Frequency Response Analysis (FRA) and Fast Fourier Transform (FFT).

Keywords: *Frequency Response Analysis (FRA), Fast Fourier Transform (FFT), two-level inverter, open-circuit faults, short-circuit faults, photovoltaic installation.*

المخلص

مثل أي عملية صناعية يمكن أن يتعرض المحول الكهروضوئي أثناء تشغيله إلى العديد من العيوب التي تؤدي إلى الانخفاض في الأداء. إن السماح بالتشخيص الدقيق والكشف عن الأعطال وتحديد موقعها في محول الطاقة الضوئية يقلل من تكاليف الصيانة ويزيد من الإنتاجية. نحن مهتمون في هذا العمل على وجه التحديد باكتشاف وتحديد موقع العيوب في المحول الكهروضوئي أي العاكس المرتبط بالنظام الكهروضوئي. الهدف من هذا العمل هو ضمان استمرارية التشغيل مع أو بدون وجود عطل في العاكس الكهروضوئي. لإجراء هذه الدراسة استخدمنا عاكس ثلاثي الطور مع مستويين وتم الأخذ بعين الاعتبار نوعين من أعطال التبديل عيوب الدائرة المفتوحة و عيوب الدائرة القصيرة. لدراسة نوعي العيوب قمنا بتطبيق نهجين من طريقة تحليل التردد هي تحليل استجابة التردد و تحويل فورييه السريع.

الكلمات المفتاحية

تحليل استجابة التردد تحويل فورييه السريع. عاكس على مستويين. أعطال الدائرة المفتوحة. أعطال الدائرة القصيرة. النظام الكهروضوئي.