

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA
MAITRISE EN GENIE, CONCENTRATION
ÉNERGIES RENOUVELABLES ET EFFICACITÉ
ÉNERGÉTIQUE
M. Sc. A.

PAR
Wend-Waoga Anthelme ZEMANE

AMÉLIORATION DE LA DURÉE DE VIE DU CONDENSATEUR SUR LE BUS CC DE
L'ONDULEUR POUR L'APPLICATION PHOTOVOLTAÏQUE

MONTREAL, LE 25 SEPTEMBRE 2015

©Tous droits réservés W. Anthelme Zémané

©Tous droits réservés

Cette licence signifie qu'il est interdit de reproduire, d'enregistrer ou de diffuser en tout ou en partie, le présent document. Le lecteur qui désire imprimer ou conserver sur un autre media une partie importante de ce document, doit obligatoirement en demander l'autorisation à l'auteur.

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Ambrish Chandra, directeur de mémoire
Département de génie électrique à l'École de technologie supérieure

M. Pierre Jean Lagacé, président du jury
Département de génie à l'École de technologie supérieure

M. Handy Fortin Blanchette, membre du jury
Département de génie à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 16 SEPTEMBRE 2015

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Le travail de recherche développé tout au long de ce mémoire a été effectué au sein du Groupe de Recherche en Électronique de Puissance et Commande Industrielle (G.R.E.P.C.I.) du département de génie électrique de l'École de Technologie Supérieure (ÉTS). Maîtrise

Ce travail a été supervisé par Monsieur Ambrish Chandra professeur à l'ÉTS dont je tiens vraiment à remercier de tout cœur pour la confiance à mon égard en acceptant de diriger ce travail de recherche aussi important. Par son expérience professionnelle, j'ai pu acquérir de nouvelles connaissances dans le domaine des énergies renouvelables et de l'énergie solaire en particulier.

Un grand merci à Monsieur Pierre Jean Lagacé professeur à l'ÉTS pour avoir accepté de présider ce jury et à Monsieur Handy Fortin Blanchette professeur à l'ÉTS pour sa participation dans ce jury également. Je suis très honoré.

Je tiens également à exprimer toute ma reconnaissance à Monsieur Shailendra Kumar Sharma Professeur Assistant en génie électrique à Shri G. S. Institute of Technology & Science et présentement en stage de post doctorat à l'ÉTS pour toute sa disponibilité et tous ses conseils pour la réussite de ce travail.

A mon défunt père, Sylvain Zémané, qui veille sur moi depuis le ciel, je le remercie de tout cœur pour ses prières et je demande à DIEU de veiller sur lui. Je remercie aussi ma mère Rosalie Daboné qui n'a ménagé d'effort pour me soutenir durant mon séjour à Montréal ainsi qu'à tous mes frères et sœurs.

Je dis un grand merci à tous mes collègues étudiants ainsi qu'à tous les professeurs du G.R.E.P.C.I pour les différents conseils en matière de recherche. Ils ont su créer un cadre de travail jovial et une bonne ambiance dans les laboratoires, ce qui a facilité mon intégration et m'a permis d'obtenir ces résultats.

AMÉLIORATION DE LA DURÉE DE VIE DU CONDENSATEUR SUR LE BUS CC DE L'ONDULEUR POUR L'APPLICATION PHOTOVOLTAÏQUE

Wend-Waoga Anthelme ZEMANE

RÉSUMÉ

Le panneau solaire a une durée de vie de près de 25ans, cependant l'onduleur n'a seulement qu'une durée de vie de 5ans en moyenne. Cette courte durée de vie de l'onduleur est due à un de ses composants qui est à la fois le plus important et le plus vulnérable : il s'agit du condensateur placé sur son bus CC. Ce document propose un circuit qui contribue à l'amélioration de la durée de vie du condensateur placé sur le bus CC de l'onduleur. Cette topologie proposée utilise un circuit additionnel de découplage de puissance monté en parallèle avec le condensateur du bus CC de l'onduleur. Ce circuit de découplage de puissance se comporte comme un buck-boost et allège ainsi la tâche du condensateur du bus CC dans le découplage de puissance. Grâce à cette topologie, il est possible d'utiliser un condensateur film à longue durée de vie sur le bus CC de l'onduleur. Ainsi avec le circuit proposé pour une puissance photovoltaïque de 3kW en entrée, le condensateur nécessaire sur le bus CC est seulement de 15 μ F, ce qui réduit beaucoup les pertes car ces condensateur ont une faible résistance série équivalente par rapport aux condensateurs chimiques de grande capacité. En ce qui concerne la commande de ce circuit de découplage de puissance, elle utilise le courant d'ondulation qui est produit par l'onduleur comme courant de référence afin de fournir la puissance nécessaire pour le découplage. Ce document étudie et explique le principe de fonctionnement du circuit proposé ainsi que la nouveauté de la commande du circuit additionnel de découplage de puissance. Les simulations effectuées sous MATLAB fournissent des résultats qui prouvent la viabilité de la topologie proposée. Cette amélioration de la durée de vie du condensateur du bus CC et par conséquent celle de l'onduleur et du système au complet se fait à un coût minimal grâce à la topologie proposée.

Mots clés--- Panneau solaire, condensateur, bus CC, onduleur, découplage de puissance.

IMPROVEMENT OF LIFETIME OF CAPACITOR ON THE INVERTER DC BUS FOR PHOTOVOLTAIC APPLICATION

Wend-Waoga Anthelme ZEMANE

ABSTRACT

The solar panel has a lifetime of about 25 years, but the inverter lifetime is on average only 5 years. This short life span of the inverter is due to its component that is both the most important and most vulnerable: it is the capacitor placed on the DC bus. This paper presents a topology which contributes to improve the lifetime of the capacitor placed on the DC bus of the inverter. The proposed typology uses an additional circuit of power decoupling which is mounted in parallel with the capacitor on the DC bus of the inverter. This power decoupling circuit behaves like a buck-boost circuit and thus eases the task of the DC bus capacitor in the power decoupling. With this topology, it is possible to use a long-life film capacitor on the DC bus of the inverter. The proposed circuit allows using, for 3kW photovoltaic power, only a 15 μ F capacitor on the DC bus, which greatly reduces losses because this kind of capacitor has a low equivalent series resistance compared to the high capacity chemical capacitor. Regarding the control of this power decoupling circuit, it uses the ripple current produced by the inverter as a reference current to provide the necessary power for the decoupling. This paper investigates the operating principle of the proposed circuit as well as the novelty of the control of the additional power decoupling circuit. All MATLAB simulations of circuit provide results that show the viability of the proposed topology. This improvement in the lifetime of the DC link capacitor and consequently that of the inverter and the entire system is achieved in a minimal cost through the proposed topology.

***Keywords---* Solar panel, capacitor, DC link, inverter, decoupling power.**

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE	3
1.1 Introduction.....	3
1.2 Contexte et motivation.....	4
1.3 Systèmes photovoltaïques.....	5
1.3.1 Le cas autonome	5
1.3.2 Le cas connecté au réseau.....	6
1.4 Condensateur de liaison du bus CC	6
1.4.1 Propriétés et paramètres d'un condensateur	7
1.4.2 Schéma électrique du condensateur	8
1.4.3 Condensateurs électrochimiques.....	10
1.4.3.1 Constitution et principe du condensateur électrolytique aluminium	10
1.4.3.2 Structure et connexions du condensateur électrolytique aluminium	11
1.4.4 Condensateurs à film.....	12
1.4.4.1 Constitution et principe du condensateur film métallisé.....	13
1.4.4.2 Constitution et principe du condensateur film à armatures	13
1.5 Topologies avec configuration du convertisseur DC/DC	13
1.5.1 Topologie à commutation douce.....	14
1.5.2 Topologie avec convertisseur DC/DC résonnant.....	15
1.5.3 Topologie avec un flyback comme convertisseur DC/DC	16
1.5.4 Topologie avec un convertisseur boost DC/DC à deux bobines.....	17
1.6 Découplage de puissance avec configuration de l'onduleur.....	18
1.6.1 Topologie à filtre actif parallèle.....	18
1.6.2 Topologie à onduleur monophasé type flyback avec circuit de découplage.....	19
1.6.3 Topologie à onduleur type flyback avec condensateur de découplage.....	20
1.6.4 Topologie utilisant un convertisseur à trois ports	21
1.8 Conclusion	23
CHAPITRE 2 ONDULEURS PHOTOVOLTAÏQUES ET PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT.....	25
2.1 Introduction.....	25
2.2 Généralités sur les systèmes photovoltaïques.....	25
2.2.1 Cellule photovoltaïque et effet photovoltaïque.....	26
2.2.1.1 Cellule photovoltaïque	26
2.2.1.2 Effet photovoltaïque.....	26
2.2.1.3 Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque	27
2.3 Les onduleurs photovoltaïques	32

2.3.1	Définition et propriété.....	33
2.3.2	Principe de fonctionnement	33
	2.3.2.1 Onduleur autonome.....	35
	2.3.2.2 Onduleur assisté par le réseau.....	35
2.4	Onduleur Monophasé.....	36
	2.4.1 Onduleur monophasé en demi-pont	36
	2.4.2 Onduleur monophasé en pont (Pont H)	37
2.5	Onduleur triphasé.....	37
2.6	Modélisation des onduleurs photovoltaïques.....	38
	2.6.1 Onduleur monophasé	38
	2.6.2 Onduleur triphasé.....	40
2.7	Effets harmoniques	42
	2.7.1 Taux de distorsion harmonique.....	43
	2.7.2 Conséquences des perturbations harmoniques.....	43
2.8	Rendement des onduleurs photovoltaïques.....	44
2.9	Conclusion	44
CHAPITRE 3	CONDENSATEURS UTILISÉS SUR LE BUS CC DE L'ONDULEUR : UTILITÉ ET FACTEURS INFLUENCANT LEUR DURÉE DE VIE.....	47
3.1	Introduction.....	47
3.2	Condensateurs du bus CC	48
	3.2.1 Condensateurs électrolytiques	48
	3.2.1.1 Condensateurs électrolytiques à l'aluminium.....	49
	3.2.1.2 Condensateurs électrolytiques au tantale.....	50
	3.2.2 Condensateurs céramiques.....	50
	3.2.3 Condensateurs à film plastiques métallisés.....	51
3.3	Rôle du condensateur sur le bus cc de l'onduleur.....	52
	3.3.1 Utilité des condensateurs	53
	3.3.2 Quantification de la puissance ondulée.....	55
	3.3.3 Capacité nécessaire du condensateur	56
3.4	Notion de fiabilité et de défaillance des condensateurs	58
3.5	Impact d'une défaillance du condensateur sur l'onduleur	60
3.6	Durée de vie et fin de vie d'un condensateur.....	64
	3.6.1 Durée de vie d'un condensateur.....	64
	3.6.1.1 Durée de vie du condensateur en fonction de la température	64
	3.6.1.2 Durée de vie du condensateur en fonction du courant.....	66
	3.6.1.3 Durée de vie du condensateur en fonction de la tension.....	67
	3.6.1.4 Relation entre la capacité et la tension d'ondulation	68
	3.6.1.5 Relation entre la résistance équivalente série et la tension d'ondulation	70
	3.6.2 Fin de vie d'un condensateur	73
3.7	Conclusion	73

CHAPITRE 4	OPTIMISATION DU FONCTIONNEMENT DES CONDENSATEURS DU BUS CC DE L'ONDULEUR	75
4.1	Introduction.....	75
4.2	Configuration du circuit proposé	75
4.2.1	Schéma complet du circuit proposé	76
4.2.2	Circuit additionnel de découplage de puissance	77
4.3	Principe de fonctionnement additionnel de découplage	78
4.3.1	Mode buck	79
4.3.2	Mode boost.....	79
4.4	Modèle du circuit proposé	80
4.4.1	Modélisation du convertisseur boost	80
	4.4.1.1 Principe	81
	4.4.1.2 Modèle mathématique.....	83
4.4.2	Modélisation de la puissance ondulatoire	85
4.4.3	Modélisation du circuit de découplage de puissance	87
4.5	Commande du circuit proposé	90
4.5.1	Commande du convertisseur boost.....	90
	4.5.1.1 Commande perturbation et observation (P&O).....	91
	4.5.1.2 Algorithme de la commande perturbation et observation (P&O).....	92
4.5.2	Commande du circuit de découplage de puissance.....	94
4.5.3	Commande de l'onduleur.....	98
	4.5.3.1 Contrôle de la tension du bus CC	99
	4.5.3.2 La synchronisation au réseau	100
	4.5.3.3 Contrôle du courant I_s du réseau	100
	4.5.3.4 Schéma de la commande de l'onduleur	101
4.6	Conclusion	101
CHAPITRE 5	RÉSULTATS DE SIMULATION ET DISCUSSION	103
5.1	Introduction.....	103
5.2	Schéma électrique du système complet	103
5.3	Simulation du système complet	106
5.3.1	Simulation du système avec éclairage maximal constant.....	106
	5.3.1.1 Cas connecté au réseau	107
	5.3.1.2 Cas autonome.....	111
5.3.2	Simulation du système avec éclairage variable	115
	5.3.2.1 Cas connecté au réseau	116
	5.3.2.2 Cas autonome.....	119
5.4	Simulation de la performance du circuit découplage de puissance	121
5.5	Comparaison entre condensateur électrolytique et film sur le bus CC	123
5.5.1	Paramètres des condensateurs électrolytique et film du bus CC	124
5.5.2	Comparaison de coût du circuit classique et du circuit proposé.....	125
	5.5.2.1 Circuit classique.....	125
	5.5.2.2 Circuit proposé.....	125

5.6	Avantages du circuit proposé.....	126
5.7	Méthode de prolongation de la durée de vie du condensateur sur le bus CC.....	128
5.7.1	Un condensateur électrolytique de 1250 μ F au bus CC.....	128
5.7.2	Deux condensateurs électrolytiques de 625 μ F au bus CC.....	129
5.7.3	Quatre condensateurs électrolytiques de 312.5 μ F au bus CC.....	130
5.8	Autres méthodes de prolongation de la durée de vie du condensateur.....	132
5.9	Conclusion.....	132
CONCLUSION.....		135
RECOMMANDATIONS.....		139
ANNEXE I	SCHEMA DE SIMULATION DE PANNEAU SOLAIRE.....	141
ANNEXE II	SCHEMA DE SIMULATION DE L'IMPACT D'UNE DÉFAILLANCE DU CONDENSATEUR DU BUS CC SUR L'ONDULEUR.....	143
ANNEXE III	SCHÉME SIMULINK SOUS MATLAB DE LA VARIATION DE LA TENSION ONDULÉE EN FONCTION DE LA CAPACITÉ ET DE LA RÉSISTANCE SÉRIE ÉQUIVALENTE.....	145
ANNEXE IV	SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE CONNECTÉ AU RÉSEAU.....	147
ANNEXE V	SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE AUTONOME AVEC SYSTÈME DE STOCKAGE D'ÉNERGIE.....	149
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		151

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Type de condensateur et capacité (Digi-Key ELECTRONICS, 2015).....7
Tableau 1.2	Type de condensateur et tension (Ultra-Long Life Snap-In, 2015).....7
Tableau 1.3	Constante μ_r de matériaux diélectriques (Digi-Key ELECTRONICS, 2015).....8
Tableau 2.1	Paramètres de la cellule photovoltaïque (MATLAB Academy, 2015).....30
Tableau 3.1	Statistique consommation mondiale par type de condensateur 201247
Tableau 3.2	Caractéristiques d'un condensateur électrolytique aluminium 3300uF65
Tableau 3.3	Valeurs tension ondulée en fonction de la capacité69
Tableau 3.4	Valeurs tension ondulée en fonction de la résistance série équivalente72
Tableau 5.1	Valeurs des paramètres de simulation.....106
Tableau 5.2	THD en fonction de l'ensoleillement G.....118
Tableau 5.3	Caractéristiques comparatives des condensateurs électrolytique et film.....124
Tableau 5.4	Composants et coût du circuit additionnel de découplage de puissance126

LISTE DES FIGURES

		Page
Figure 1.1	Générateur photovoltaïque et unité de conversion.....	5
Figure 1.2	Schéma électrique d'un condensateur	9
Figure 1.3	Schéma électrique simplifié du condensateur.....	9
Figure 1.4	Schéma d'un condensateur électrolytique à aluminium	11
Figure 1.5	Connexions du bobinage d'un condensateur électrolytique	12
Figure 1.6	Configuration générale avec liaison CC	14
Figure 1.7	Onduleur à commutation douce haute fréquence (Andersen et Alvsten, 1995)	15
Figure 1.8	Topologie à convertisseur DC/DC résonnant (Lohner, Meyer et Nagel, 1996)	15
Figure 1.9	Topologie avec un flyback en convertisseur DC/DC (Martins et Demonti, 2001) (Martins et Demonti, 2002).....	16
Figure 1.10	Topologie avec un convertisseur boost à deux bobines L1 et L2 (Wolfs et Li, 2002).....	17
Figure 1.11	Filtre actif parallèle Figure-A I-I (Kyritsis, Papanikolaou et Tatakis, 2007).....	19
Figure 1.12	Onduleur monophasé type flyback (Shimizu, Wada et Nakamura, 2006).....	20
Figure 1.13	Topologie à convertisseur flyback comme onduleur (Tan, Wang et Ji, 2007).....	21
Figure 1.14	Convertisseur à trois ports (Krein et Balog, 2009)	22
Figure 2.1	Effet photovoltaïque (Patel, 2006).....	27
Figure 2.2	Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque (Patel, 1999).....	27
Figure 2.3	Caractéristique courant-tension à irradiation variable et température constante	30

Figure 2.4	Caractéristique puissance-tension, irradiation variable et température constante	31
Figure 2.5	Caractéristique courant-tension, température variable et irradiation constante	31
Figure 2.6	Caractéristique puissance-tension, température variable et irradiation constante	32
Figure 2.7	Principe de fonctionnement d'un onduleur	33
Figure 2.8	Cas où S1-S3 sont fermés et S2-S4 ouverts et signal obtenu	34
Figure 2.9	Cas où S1-S3 sont ouverts et S2-S4 fermés et signal obtenu	35
Figure 2.10	Montage d'un onduleur en demi-pont	36
Figure 2.11	Schéma d'un onduleur triphasé	37
Figure 2.12	Schéma de modélisation d'un onduleur monophasé autonome	38
Figure 2.13	Schéma de modélisation de l'onduleur triphasé	41
Figure 3.1	Emplacement du condensateur du bus cc dans le circuit	48
Figure 3.2	Schéma condensateur électrolytique à l'aluminium (Condensateurs, 2015)	49
Figure 3.3	Schéma d'un condensateur électrolytique au tantale (Condensateurs, 2015)	50
Figure 3.4	Schéma d'un condensateur céramique (Condensateurs, 2015)	51
Figure 3.5	Structure des condensateurs à films plastiques métallisés	52
Figure 3.6	Courbes de la puissance P_{ac} , tension onduleur et tension V_{dc} du bus	54
Figure 3.7	Configuration du condensateur du bus CC comme filtre actif	57
Figure 3.8	Taux de défaillance $\lambda(t)$ en fonction du temps	59
Figure 3.9	Système photovoltaïque connecté au réseau	61
Figure 3.10	Effet du condensateur sur le courant d'entrée et de sortie	63
Figure 3.11	Évolution de la durée de vie L en fonction de la température ambiante T_a	65

Figure 3.12	Évolution de la température en fonction du courant d'ondulation	67
Figure 3.13	Schéma onduleur monophasé alimenté par une source continue.....	68
Figure 3.14	Variation de la tension ondulée en fonction de la capacité.....	69
Figure 3.15	Courbe des valeurs de la tension ondulée en fonction de la capacité	70
Figure 3.16	Variation de la tension ondulée en fonction de la résistance série équivalente	71
Figure 3.17	Courbe de la tension ondulée en fonction de la résistance série équivalente	72
Figure 4.1	Configuration générale du circuit proposé connecté au réseau	76
Figure 4.2	Configuration générale du circuit proposé en mode autonome	77
Figure 4.3	Circuit additionnel de découplage	78
Figure 4.4	Configuration du circuit en mode buck	79
Figure 4.5	Configuration du circuit en mode boost.....	80
Figure 4.6	Schéma classique du convertisseur boost (Ferrieux et Forest, 1987).....	81
Figure 4.12	Diagramme du circuit du convertisseur boost d'un système photovoltaïque.....	84
Figure 4.21	Schéma de l'onduleur et sa commande en mode connecté au réseau.....	98
Figure 5.1	Système complet connecté au réseau avec ses commandes.....	104
Figure 5.2	Système complet autonome avec ses commandes	105
Figure 5.3	Formes d'onde de la tension, du courant et de la puissance photovoltaïque.....	107
Figure 5.4	Formes d'ondes de la tension et du courant du réseau.....	108
Figure 5.5	Formes d'onde des tensions U_{bus} et U_{con}	109
Figure 5.6	Forme d'onde du courant du circuit additionnel de découplage de puissance	110
Figure 5.7	Zoom sur l'allure du courant du circuit additionnel de découplage de puissance	111

Figure 5.8	Formes d'onde de la tension, du courant et de la puissance photovoltaïque.....	112
Figure 5.9	Formes d'ondes de la tension et du courant de la charge	113
Figure 5.10	Forme d'onde de tension du condensateur du bus CC et de la batterie ...	114
Figure 5.11	Forme d'onde du courant de la batterie	115
Figure 5.12	Forme d'ondes ensoleillement G, tension U_{pv} , courant I_{pv} et puissance P_{pv}	116
Figure 5.13	Formes d'ondes de la tension et du courant du réseau.....	117
Figure 5.14	Formes d'onde des tensions U_{bus} et U_{con}	118
Figure 5.15	Ensoleillement, tension pv, courant pv, tension charge et courant charge.....	119
Figure 5.16	Forme d'onde de tension du condensateur du bus CC et de la batterie.....	120
Figure 5.17	Tensions U_{bus} et U_{con} des condensateurs.....	121
Figure 5.18	Ensoleillement G, tension U_{pv} , courant I_{pv} , tension $U_{réseau}$ et courant $I_{réseau}$	122
Figure 5.19	Courbes de simulation avec 1 condensateur électrolytique de 1250 μ F	129
Figure 5.20	Courbes de simulation avec 2 condensateur électrolytique de 625 μ F	130
Figure 5.21	Courbes de simulation avec 4 condensateurs électrolytiques de 312.5 μ F	131
Figure-A I-I	Schéma de simulation panneau solaire sous Simulink.....	141
Figure-A I-II	Schéma de l'impact d'une défaillance du condensateur sur l'onduleur.....	142
Figure-A I-III	Variation de la tension ondulée en fonction de ESR et de la capacité....	143
Figure-A I-IV	Système photovoltaïque connecté au réseau.....	144
Figure-A I-V	Système photovoltaïque autonome avec système de stockage d'énergie.....	145

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

CC	Courant Continu
AC	Courant alternatif
PV	Panneau photovoltaïque
C_i	Capacité idéale du condensateur,
U	Tension entre l'anode et la cathode
μ_0	Permittivité absolue du vide ($8.854 \cdot 10^{-12}$ F/m)
μ_r	Permittivité relative du diélectrique (matériaux)
A	Aire du diélectrique
e	Épaisseur du diélectrique
R _p	Résistance parallèle ou pertes dans le diélectrique
R _s	Résistance série ou connexion des armatures et de l'électrolyte
L	Inductance équivalente série
C	Capacité du condensateur,
ESR	Résistance équivalente série
ESL	Inductance équivalente série
V	Tension de sortie de la cellule (V)
I	Courant de sortie de la cellule (A)
q	Charge d'électron ($-1.6 \cdot 10^{-19}$ C)
k	Constant de Boltzmann ($-1.38 \cdot 10^{-38}$ J K ⁻¹)
T _c	Température absolue de fonctionnement de la jonction (°K)
a	Facteur d'idéalité de la diode ($1 < a < 2$)
R _s	Résistance série (Ω)
R _p	Résistance parallèle (Ω)
G	Ensoleillement
R	Charge
V _{pv}	Tension photovoltaïque
I _{pv}	Courant photovoltaïque
v _{ac}	Tension alternative
i _{ac}	Courant alternatif

XXII

V_{DC}	Tension continue
I_{DC}	Courant continu
F	Fréquence
Ω	Fréquence angulaire
FIT	Failure In Time
Γ	Décalage de l'origine du temps
H	Paramètre d'échelle du temps
B	Paramètre de forme
L	Durée de vie estimée
L_0	Durée de vie à la température nominale T_{max}
T_{max}	Température nominale
T_a	Température ambiante
I	Courant d'ondulation
σ	Conductivité thermique,
MPPT	Maximum Power Point Tracking
P&O	Perturb and observe
PLL	Phase Locked Loop
K_p, K_i	Gains régulateur PI
Θ	Déphasage entre courant tension réseau

INTRODUCTION

L'Homme, ayant pris conscience du réchauffement climatique causé par les émissions de gaz à effet de serre ainsi que du tarissement des puits de ressources fossiles, se penche désormais et sans retour sur les énergies renouvelables. Au rythme de la consommation actuelle, il est prévu que les réserves mondiales découvertes de pétrole s'épuisées en 2037 (Production mondiale, 2015). Par définition une énergie renouvelable est une énergie qui peut être utilisée de façon infinie à l'échelle humaine, car se renouvelant assez vite due aux phénomènes naturels comme le soleil, le vent, la chaleur de la terre, les chutes d'eau,... Parmi ces énergies renouvelables, l'énergie solaire photovoltaïque s'impose due à sa croissance exponentielle et l'innovation faite dans le domaine. Entre autre en 2012, la production mondiale d'électricité solaire était de 104,5 TWh avec 100,4 TWh d'électricité photovoltaïque. Cela est l'équivalent d'une croissance de 70 % en 2012 dans le domaine d'énergie solaire, et en moyenne 50.6% depuis 2002 (Production mondiale, 2015). Aussi selon les prévisions de l'Agence internationale de l'énergie (AIE), le solaire pourrait devenir la première source d'électricité mondiale d'ici 2050 (Investissements Écologiques, 2015).

Cependant le système solaire photovoltaïque étant constitué d'éléments d'électronique de puissance, ces éléments ont besoin d'une énergie électrique de qualité pour une longue durée de vie. L'unité de conversion de puissance du système photovoltaïque représente 8 à 12% de sa durée de vie totale (Xue et al., 2011). Dans cette unité de conversion, l'onduleur est l'un des éléments le plus fragile et le plus exposé aux risques de par ses multiple fonctions. Ces risques sont surtout liés à son condensateur de découplage situé entre la partie continue et la partie alternative. En d'autres termes, la performance et la durée de vie de l'onduleur dépendent de ce condensateur.

L'objectif principal de ce travail de recherche est de contribuer à améliorer la durée de vie du condensateur sur le bus CC de l'onduleur. Dans ce cadre il est très primordial de connaître le rôle de ce condensateur et par la suite reconnaître les facteurs qui réduisent sa durée de vie.

L'idéal est de proposer des solutions pour annihiler ou réduire au maximum ces facteurs qui influencent la durée de vie du condensateur.

Pour atteindre ces objectifs énumérés, ce mémoire s'articule autour de quatre parties.

Le premier chapitre consiste à l'étude générale des différents types d'onduleurs ainsi que leur principe de fonctionnement. A l'issue de cette étude, les différentes méthodes de conversion seront abordées de même que les avantages et les inconvénients de chacune d'elles. L'accent sera mis sur l'onduleur monophasé car beaucoup utilisé dans les systèmes photovoltaïques autonomes à petite échelle.

Le deuxième chapitre fait l'objet d'étude des condensateurs utilisés sur le bus CC de l'onduleur. Cette étude permettra de présenter globalement les condensateurs de liaison et de les modéliser par des méthodes de mesure de tension et de courant. Une étude plus détaillée sera faite exceptionnellement sur un des condensateurs à diélectrique plastique métallisé et à électrolytes chimiques.

Dans le troisième chapitre, c'est le rôle capital du condensateur du bus CC de l'onduleur qui sera abordé. L'accent sera mis surtout sur l'influence du condensateur dans le fonctionnement de cet onduleur. Par la suite les facteurs influençant la durée de vie des condensateurs qui seront présentés. Pour ce faire, l'effet de la température ambiante, l'effet de la tension appliquée, l'effet du courant ondulé et l'effet de la charge/décharge seront étudiés de façon minutieuse.

Le chapitre quatre relate une optimisation du fonctionnement des condensateurs du bus CC de l'onduleur. Il s'agit de stratégies permettant de limiter le vieillissement de ces condensateurs. En d'autres ces stratégies contribuent à optimiser et de prolonger la durée de vie des condensateurs. Le circuit proposé dans cette étude est très simple et moins coûteux par rapport à son rendement et à sa durée de vie.

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTÉRATURE

1.1 Introduction

La croissance de la population mondiale et l'évolution de la consommation d'énergie font aujourd'hui des énergies renouvelables un espoir avéré. Pour la littérature, des multiples ressources d'énergies renouvelables existantes, le solaire photovoltaïque se veut le plus attrayant à moyen et à long terme.

Cependant l'énergie produite par les panneaux photovoltaïques, bien qu'étant propre, doit être améliorée en terme de qualité avant d'être utilisée directement ou injectée dans le réseau. De nos jours, les recherches en électronique de puissance ont permis de mettre au point de nombreuses topologies de découplage de puissance permettant d'améliorer en quelque sorte l'énergie photovoltaïque.

En effet les techniques de découplage de puissance utilisées sont multiples et varient en fonction de la configuration du circuit électrique. Les techniques les plus connues sont celles qui utilisent l'onduleur comme filtre actif et celles qui emploient un condensateur de découplage au niveau du bus CC.

Cette revue de la littérature présente de façon globale les différents types de systèmes photovoltaïques, les différents types de condensateurs de découplages et aussi les topologies des onduleurs photovoltaïques ainsi que quelques techniques robustes de découplage.

1.2 Contexte et motivation

Le système photovoltaïque est constitué d'un certain nombre d'éléments de l'électronique de puissance dont le plus coûteux est l'onduleur. Son rôle principal est la conversion de l'énergie continue produite par les panneaux photovoltaïques en énergie alternative. Il doit assurer aussi la qualité de l'énergie selon certaines normes d'interconnexion, de IEEE-1547, avec le réseau(Committee). Au vu du cout et du rôle capital de l'onduleur, la durée de vie du système photovoltaïque dépend en grande partie de cet onduleur.

Pour les systèmes photovoltaïques connectés au réseau de distribution ou pour les systèmes photovoltaïques hybrides, le problème se pose moins car en cas de panne temporaire du générateur photovoltaïque, les autres sources d'énergie peuvent assurer la continuité de l'alimentation. Cependant en ce qui concerne les systèmes photovoltaïques autonomes ou isolés du réseau, le problème est crucial, car en cas de panne du générateur photovoltaïque, l'alimentation de la charge cesse immédiatement.

De façon globale, la durée de vie des panneaux solaires photovoltaïque est de 25 ans (Dunlop, Halton et Ossenbrink, 2005) pendant que celle de l'onduleur est située entre 3 et 5 ans, rarement 10 ans avec la garantie (Ristow et al., 2008). De ce fait, l'onduleur qui convertit l'énergie continue en énergie alternative est le plus vulnérable. Sa vulnérabilité est due à son condensateur de liaison situé sur le bus CC(Xue et al., 2011) et (Ton et Bower, 2005) qui réduit à moitié la durée de vie totale de cet onduleur (Rodriguez et Amaratunga, 2008). Pour augmenter la durée de vie de l'onduleur et donc celle du système complet, il faut donc augmenter la durée de vie du condensateur découplage situé sur son Bus CC. La figure 1.1 schématise un système photovoltaïque avec son unité de conversion constituée d'un convertisseur CC/CC et d'un convertisseur CC/AC ou onduleur.

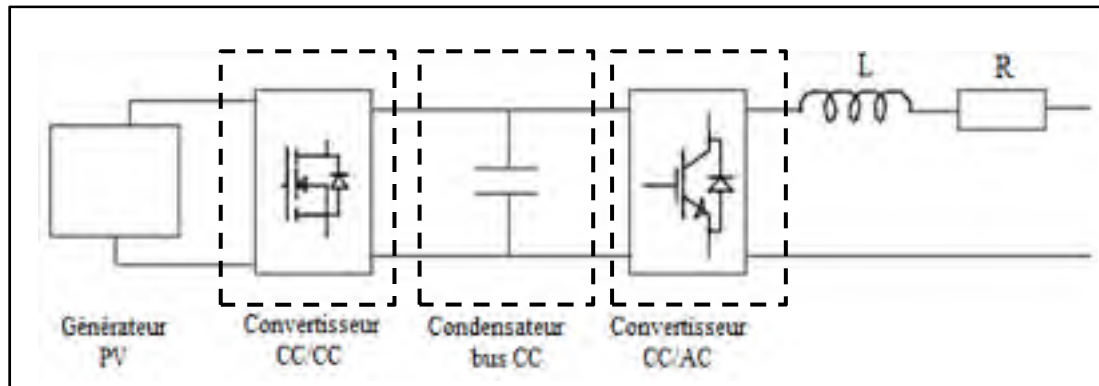


Figure 1.1 Générateur photovoltaïque et unité de conversion

Ce travail de recherche est basé sur la partie onduleur en essayant d'apporter des solutions pour améliorer la durée de vie du condensateur sur le bus CC de cet onduleur. Les systèmes photovoltaïques autonome et connecté au réseau seront abordés au cours de cette étude car la durée de vie totale du système photovoltaïque est réduite par son onduleur.

1.3 Systèmes photovoltaïques

La nature consommation de l'énergie photovoltaïque résidentielle varie en fonction de la situation de la résidence (IEA PVPS T1-17, 2008), (Luque et Hegedus, 2011) et (Rahman, Khallat et Chowdhury, 1988). Pour une résidence isolée, éloignée du réseau de distribution, le système photovoltaïque dans ce cas est autonome et pour les résidences proches du réseau, dans ce cas, le système photovoltaïque peut être connecté au réseau.

1.3.1 Le cas autonome

Le système photovoltaïque autonome d'un particulier produit de l'énergie électrique pour une utilisation personnelle ou par une centrale photovoltaïque autonome pour alimenter un groupe de consommateurs isolés du réseau électrique. L'intermittence de la production photovoltaïque oblige la plupart des producteurs à utiliser des éléments de stockage, ce qui leur permet d'avoir de l'énergie en permanence (Rahman, Khallat et Chowdhury, 1988).

1.3.2 Le cas connecté au réseau

Pour substituer le réseau de distribution existant depuis des années par les systèmes photovoltaïques, les chercheurs accentuent les recherches sur les techniques d'injection de l'énergie photovoltaïque dans le réseau. Ces recherches s'orientent vers deux cas très pratiques : l'injection de la totalité de production photovoltaïque ou du surplus (Riffonneau, Barruel et Bacha, 2008).

Ces deux cas diffèrent par la position seulement par la position des compteurs d'énergie. Dans le cas de l'injection de la totalité de production photovoltaïque, le producteur injecte directement toute sa production photovoltaïque dans le réseau. Par contre dans le cas de l'injection du surplus de la production, le producteur consomme en même temps sa production photovoltaïque et injecte l'excès ou surplus dans le réseau (HESPUL association, 2007)et (Riffonneau, 2009).

1.4 Condensateur de liaison du bus CC

Le condensateur du bus CC est l'élément clé de l'onduleur. Il assure le découplage de puissance entre les deux sources continue et alternative. Le condensateur stocke et restitue de l'énergie, il offre une possibilité d'alternance de puissance instantanée entre le convertisseur CC/CC et l'onduleur, ce qui permet au système de supporter les puissances variables du générateur photovoltaïque (Lisserre*, Blaabjerg et Dell'Aquila, 2004).

La variation de puissance du panneau photovoltaïque se fait autour de plusieurs points d'équilibre dont un seul correspond au point de puissance maximale. Les auteurs (Wu, Zhao et Liu, 2006) montrent la relation entre l'énergie stockée par le condensateur du bus CC de l'onduleur et la stabilité de ce point de puissance maximale. L'idéal serait que le panneau photovoltaïque fonctionne à chaque instant en ce point, ce qui permettra au condensateur d'emmagasiner plus d'énergie.

Il existe principalement trois types de condensateurs dont le condensateur à film plastique ou papier, le condensateur céramique ou verre et le condensateur électrolytique aluminium (Mouriès, 1995). Ces condensateurs diffèrent par leurs technologies, par la taille de leur capacité et aussi par leur tension. Selon Digi-Key, la famille des condensateurs en fonction de la capacité et de la tension peut être classée comme suit dans les tableaux 1.1 et 1.2:

Tableau 1.1 Type de condensateur et capacité (Digi-Key ELECTRONICS, 2015)

Condensateur	Capacité minimale	Capacité maximale
Électrolytique aluminium	0.1 μ F	2.2 $10^6 \mu$ F
Film	6.8. $10^{-7} \mu$ F	3000 μ F
Céramique	1. $10^{-6} \mu$ F	1800 μ F

Tableau 1.2 Type de condensateur et tension (Ultra-Long Life Snap-In, 2015)

Condensateur	Tension minimale	Tension maximale
Électrolytique aluminium	2.5V	630V
Film	10V	5kV
Céramique	50V	30kV

1.4.1 Propriétés et paramètres d'un condensateur

Par sa propriété de stockage d'énergie, le condensateur parvient à gérer les variations de la puissance du générateur photovoltaïque. Pour un condensateur de capacité idéale C_i et d'une tension U entre l'anode et la cathode, l'énergie E stockée par le condensateur (Cornell, 2007):

$$E = \frac{1}{2} C_i \cdot U^2 \quad (1.1)$$

La capacité C du condensateur est proportionnelle à l'aire A de l'anode et inversement proportionnel à l'épaisseur e du diélectrique (Lázaro et al., 2007):

$$C_i = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{A}{e} \quad (1.2)$$

Selon le matériau du condensateur, sa permittivité relative du diélectrique varie. Le tableau 1.3 donne quelques valeurs de la constante diélectrique μ_r pour un certain nombre de condensateur :

Tableau 1.3 Constante μ_r de matériaux diélectriques (Digi-Key ELECTRONICS, 2015)

Condensateur	Matériaux diélectrique	Constante μ_r
Électrolytique aluminium	Aluminium	2 - 6
Film	Papier ou Plastique	8 - 10
Céramique	Verre	4.8
	Mica	5.4 - 8.7
	Céramique	12 - 20000

Selon l'équation (1.2), pour obtenir un condensateur de grande capacité, il faut un diélectrique de grande permittivité relative, d'une grande aire et d'une épaisseur faible.

1.4.2 Schéma électrique du condensateur

Dans la littérature, le schéma électrique le plus connu du condensateur est représenté par la figure 1.2 (Cornell, 2007):

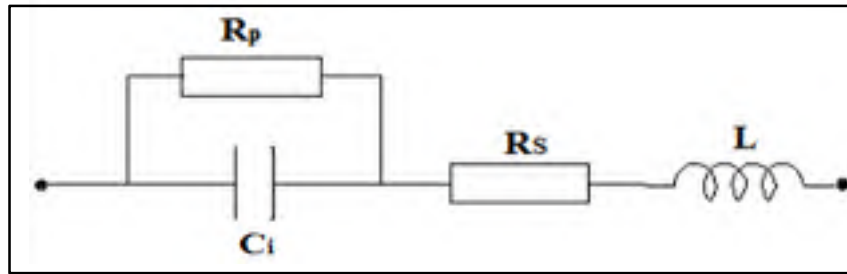


Figure 1.2 Schéma électrique d'un condensateur

La capacité C_i du condensateur dépend de la permittivité relative du diélectrique qui dépend à son tour de la température, de la tension appliquée et souvent peu de la fréquence. Les résistances R_p et R_s dépendent chacune de la température et de la tension appliquée aussi pour la résistance R_p (Cornell, 2007).

La résistance R_p qui correspond surtout au courant de fuite peut être négligé dans le schéma électrique du condensateur, d'où le schéma électrique simplifié de la figure 1.3:

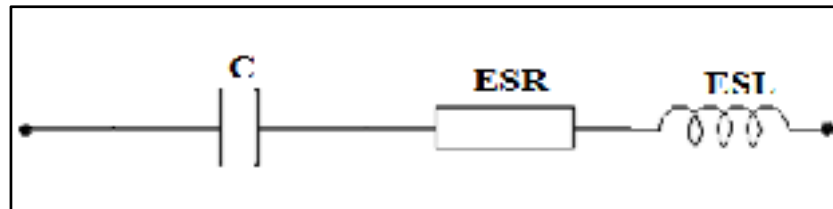


Figure 1.3 Schéma électrique simplifié du condensateur

Les paramètres C (capacité), ESR (résistance série équivalente) et ESL (inductance série équivalente) dépendent de la température et de la fréquence du condensateur. L'auteur (Besson, 1984) précise que ce modèle électrique simplifié permet de définir les valeurs nominales du condensateur.

Les condensateurs les plus utilisés pour le bus CC sont surtout les condensateurs à film plastique ou papier et le condensateur électrolytique aluminium. Ces condensateurs ont montré leur performance en termes de découplage de puissance, mais aussi des faiblesses dans certains cas.

1.4.3 Condensateurs électrochimiques

Les condensateurs chimiques sont des composants électroniques qui contiennent en plus des armatures, une solution chimique. Encore appelés condensateur électrolytique, les condensateurs chimiques ont une grande capacité et un coût assez faible. Ils sont beaucoup utilisés dans les applications basses fréquences. Par contre ils ont une fiabilité assez faible et une courte durée de vie (Venet et al., 2002).

Le condensateur électrolytique joue un rôle important dans l'unité de conversion de puissance, il régule la tension de sortie pour la correction de facteur de puissance, il équilibre la puissance du bus CC de l'onduleur, ... (Choi, Hong et Park, 2001), (Lázaro et al., 2007) et (Hur, Jung et Nam, 2001). Les auteurs de (Cornell, 2007) et (Nichicom, 1999) donnent en détail les propriétés de base du condensateur électrolytique, ce qui permet de mieux comprendre son principe de fonctionnement et ses propriétés.

Des condensateurs électrolytiques, le plus connu et le plus utilisé est le condensateur électrolytique aluminium. Il est beaucoup utilisé dans le bus CC de l'onduleur pour le découplage de puissance.

1.4.3.1 Constitution et principe du condensateur électrolytique aluminium

Le condensateur électrolytique aluminium est polarisé. Comme son nom l'indique, sa borne positive est formée d'une bande en aluminium qui est recouverte d'alumine : c'est le diélectrique. Il est constitué aussi d'un séparateur ou support d'électrolyte formé par des feuilles de papier imbibées du même électrolyte : c'est la borne négative (Bengt, 1995). Le condensateur électrolytique aluminium étant pour la plupart des cas polarisé, il est intolérable de l'alimenter en sens inverse, ce qui pourrait renverser la réaction dans l'électrolyte et causer la destruction de l'alumine ou court-circuiter le condensateur (Both, 2015).

L'électrolyte contenu dans le condensateur joue d'importants rôles : il garantit une bonne circulation du courant électrique et permet de régénérer l'oxyde d'alumine lorsque celui-ci est en manque (Perisse, 2003).

La figure 1.4 permet de résumer les différentes parties constituant le condensateur électrolytique aluminium (Perisse, 2003).

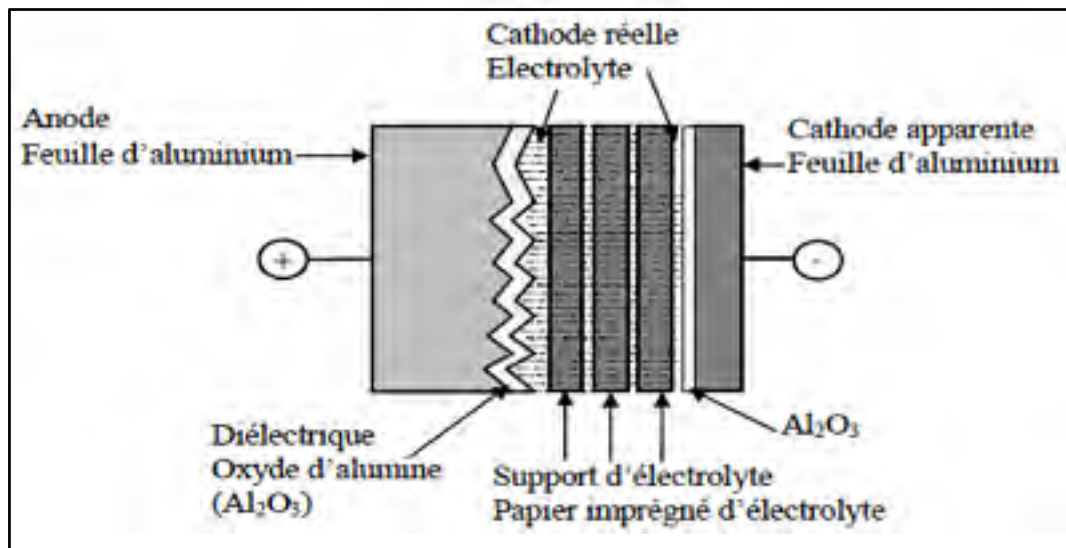


Figure 1.4 Schéma d'un condensateur électrolytique à aluminium

1.4.3.2 Structure et connexions du condensateur électrolytique aluminium

Les connexions dans le condensateur électrolytique joignent le bobinage du condensateur au boîtier. La connexion entre l'anode et la cathode se fait grâce à un papier qui empêche le court-circuit (Perisse, 2003). Les auteurs de (Joubert, 1996), (Perret, 2005) et (El-Husseini, 2001) montrent que le sens du courant et la répartition des courants dans les éléments de la bobine permettent de réduire les pertes et les échauffements dans le condensateur.

La figure 1.5 est celle d'un condensateur électrolytique indiquant les connexions du bobinage. Elle indique entre autre les bandes de connexion de l'anode et de la cathode de même que le papier qui sépare l'anode et de la cathode apparente.

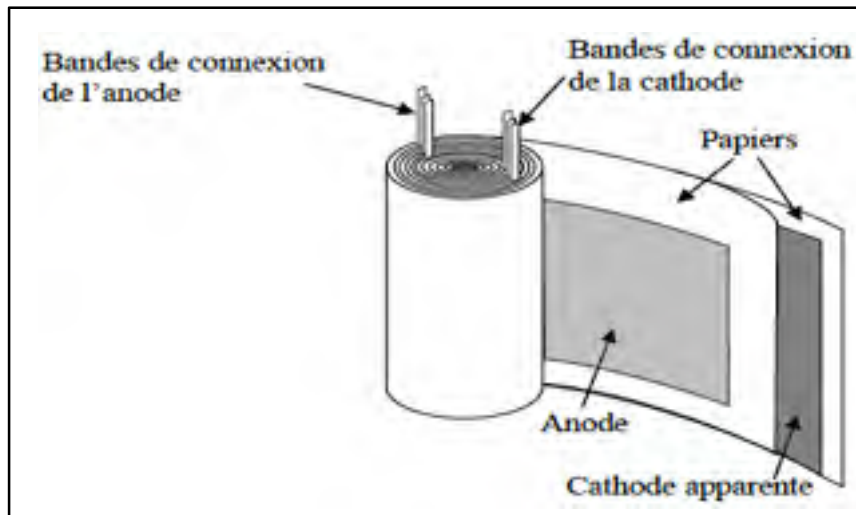


Figure 1.5 Connexions du bobinage d'un condensateur électrolytique

1.4.4 Condensateurs à film

La différence entre le condensateur à film et celui vu ci-dessus, le condensateur électrolytique, est que le condensateur à film ne contient pas d'électrolyte. Il est obtenu en faisant le bobinage de films plastiques diélectriques et d'armatures métalliques. Les condensateurs à film sont de plusieurs catégories, parmi lesquels les condensateurs films métallisés et les condensateurs films à armatures (Eurofarad, 2000).

Contrairement au condensateur chimique, le diélectrique de ce type de condensateur est un film plastique. D'une part, sur chaque face du film est déposée par évaporation sous vide une couche de métal de l'ordre de quelques nanomètres d'épaisseur constituant les armatures du condensateur film métallisé (Mouriès, 1995), (Eurofarad, 2000). D'autre part, les armatures peuvent être formées de feuilles métalliques indépendantes : il s'agit du condensateur film à armatures (Mouriès, 1995), (Eurofarad, 2000).

1.4.4.1 Constitution et principe du condensateur film métallisé

Les armatures de ce type de condensateur sont obtenues en déposant, par évaporation sous vide, sur le film diélectrique une fine couche de zinc ou d'aluminium. Ce dépôt de métal, par sa nature et son épaisseur, définit le courant crête ou courant efficace que peut supporter le condensateur (Eurofarad, 2000).

La faible épaisseur du condensateur film métallisé et son large volume lui donnent la propriété d'auto-cicatrisation qui lui permet de se régénérer lorsqu'un amorçage causé par un défaut du diélectrique survient entre les armatures (Mouriès, 1995), (Eurofarad, 2000). De plus il est moins volumineux que le condensateur film à armatures.

1.4.4.2 Constitution et principe du condensateur film à armatures

Ce modèle de condensateur, plus il possède des armatures à grande épaisseur, plus sa résistance série est faible, ce qui améliore de façon générale ses performances. Cependant, ces améliorations diminuent le volume du condensateur, d'où il perd ses propriétés d'auto-cicatrisation (Eurofarad, 2000).

Le condensateur film à armatures est généralement utilisé dans des installations hautes tension. Il est aussi une solution pour les applications dont les contraintes de tension ou de courant ou de puissance sont assez élevées (Eurofarad, 2000).

1.5 Topologies avec configuration du convertisseur DC/DC

De nos jours, les recherches dans le domaine photovoltaïque ont abouti à la mise en place de nombreuses topologies pour les onduleurs avec une configuration du convertisseur DC/DC. Ces topologies varient en fonction des besoins. Il s'agira surtout de la topologie des convertisseurs avec différentes configurations du condensateur du bus CC. Ces configurations peuvent être réparties en trois possibilités (Li et Wolfs, 2008) à savoir :

convertisseur avec liaison CC, convertisseur avec un pseudo liaison CC et convertisseur sans liaison CC.

Dans le cas de ce travail de recherche, il serait intéressant de se pencher surtout sur les topologies des convertisseurs photovoltaïques avec liaison CC.

La configuration des convertisseurs avec liaison CC varie dépendamment selon la disposition ou le modèle de la liaison CC. La figure 1.6 représente de façon globale la configuration avec la liaison CC (Li et Wolfs, 2008):

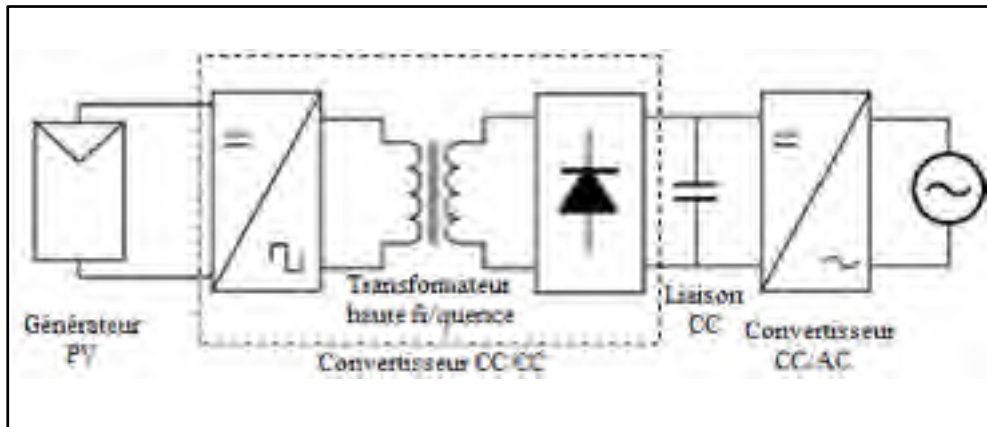


Figure 1.6 Configuration générale avec liaison CC

1.5.1 Topologie à commutation douce

La topologie présentée par (Andersen et Alvsten, 1995) est composée d'un convertisseur analogique de point de puissance maximale, d'un onduleur à commutation douce de haute fréquence, d'une commande logique et analogique et de circuits de protection. Le circuit est simple à implémenter dû au fait que tous les composants utilisés sont standards, ce qui offre une production d'énergie à faible coût (Andersen et Alvsten, 1995). Le circuit de cette topologie est représenté sur la figure 1.7:

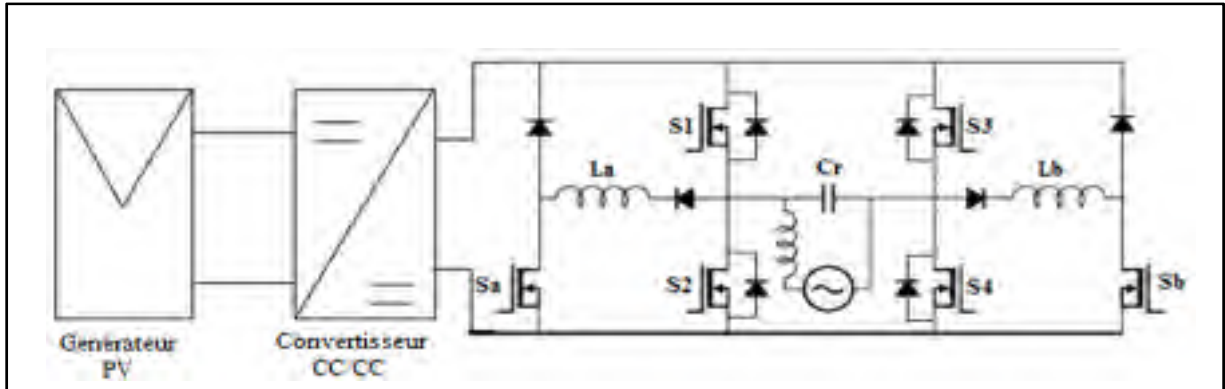


Figure 1.7 Onduleur à commutation douce haute fréquence (Andersen et Alvsten, 1995)

La différence de l'onduleur de cette topologie et de l'onduleur ordinaire réside au niveau des deux commutateurs Sa et Sb aux extrémités. De plus, son but est de bloquer la diode du transistor S1 ou S3 en faisant passer le courant dans le transistor S2 ou S4 grâce au condensateur Cr. De part ces différentes configurations, cette topologie présente une bonne efficacité et bon facteur de puissance (Andersen et Alvsten, 1995).

1.5.2 Topologie avec convertisseur DC/DC résonnant

Cette topologie utilise un convertisseur DC/DC résonnant du côté du générateur photovoltaïque. De plus, dans cette topologie l'onduleur utilisé est en pont complet (quatre commutateurs), mais il possède deux diodes supplémentaires (Li et Wolfs, 2008). Cela est résumé sur la figure 1.8 :

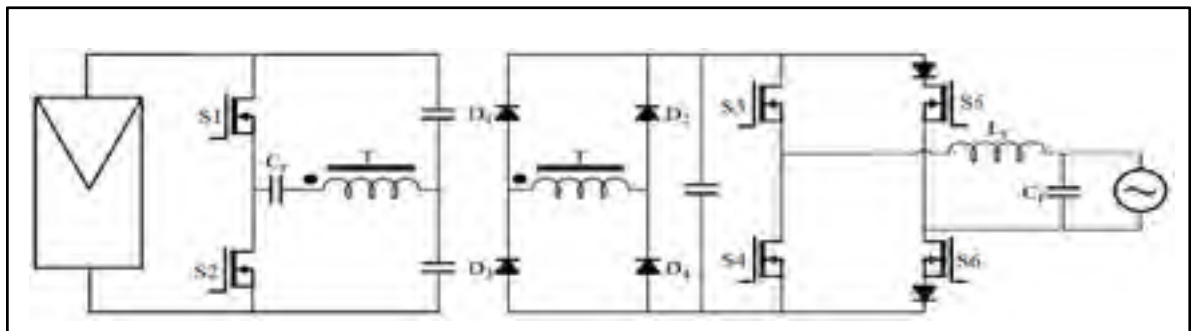


Figure 1.8 Topologie à convertisseur DC/DC résonnant (Lohner, Meyer et Nagel, 1996)

Le principe de fonctionnement de l'onduleur de cette topologie n'est pas aussi simple parce que d'une part, les commutateurs S3 et S4 sont contrôlés par une commande «bang-bang» à haute fréquence pour commander le courant injecté dans le réseau. D'autre part, les commutateurs S5 et S6 sont commandés par la polarité et le passage par zéro de la tension du réseau. Ce pendant cette technique de contrôle réduit les pertes par commutation dans l'onduleur comparé à l'onduleur à commande classique (Li et Wolfs, 2008), (Lohner, Meyer et Nagel, 1996).

1.5.3 Topologie avec un flyback comme convertisseur DC/DC

Cette topologie associe un convertisseur flyback comme convertisseur DC/DC et un onduleur à commande de modulation d'impulsions ou PWM (pulse width modulation) conventionnel (Martins et Demonti, 2001) et (Martins et Demonti, 2002).

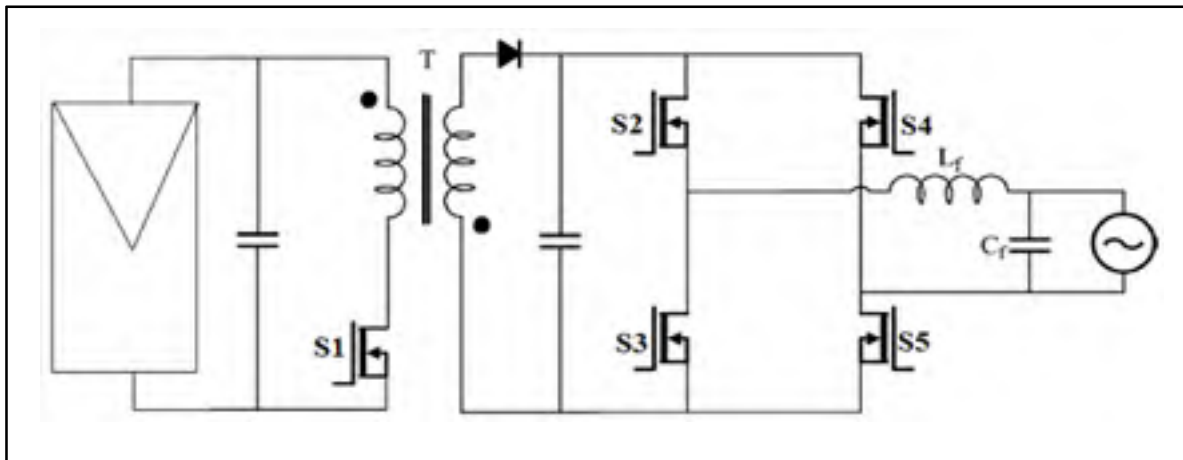


Figure 1.9 Topologie avec un flyback en convertisseur DC/DC (Martins et Demonti, 2001)
(Martins et Demonti, 2002)

Le courant fourni par le circuit de cette topologie, grâce à sa commande, est de grande qualité en ce sens que son taux de distorsion harmonique est faible. De plus le fonctionnement à haute fréquence a réduit considérablement la taille des condensateurs et des composants magnétique, ce qui réduit le nombre des composants en général (Martins et Demonti, 2002).

1.5.4 Topologie avec un convertisseur boost DC/DC à deux bobines

La topologie analysée dans (Wolfs et Li, 2002) est composée d'un convertisseur boost DC/DC et d'un onduleur DC/AC commandé par un PWM conventionnel. Le convertisseur boost proposé ici diffère du boost conventionnel car il est muni de deux bobines supplémentaires L_1 et L_2 qui se comportent comme des sources de courant efficace. La nouveauté ici aussi est que l'inductance de fuite du transformateur et la capacité des commutateurs sont utilisées, cela permet d'avoir une commutation douce des commutateurs à l'entrée et des diodes en sortie (Wolfs et Li, 2002). Le schéma de la topologie est représenté sur la figure 1.10 :

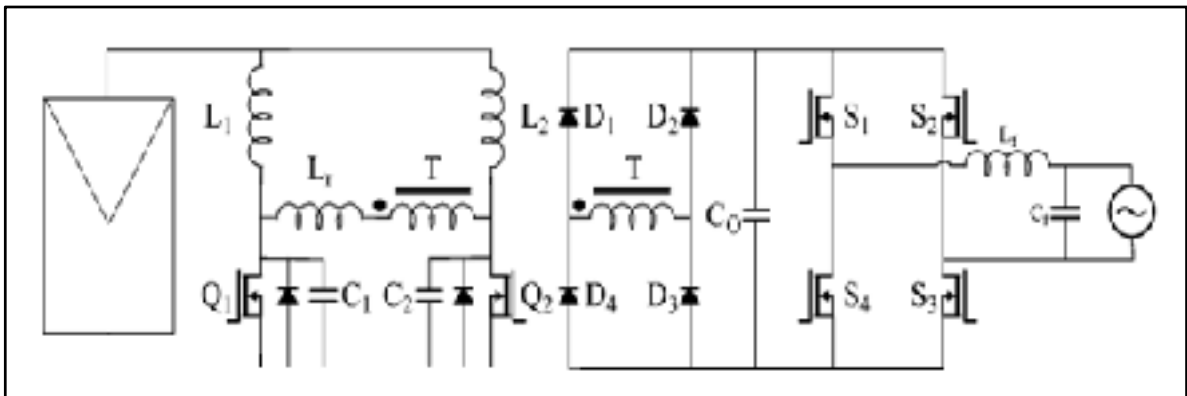


Figure 1.10 Topologie à convertisseur boost à deux bobines L_1 et L_2 (Wolfs et Li, 2002)

Les topologies passées en revue ci-dessus sont toutes des topologies améliorées en terme d'efficacité et de cout. La topologie proposée par (Martins et Demonti, 2001) et (Martins et Demonti, 2002) semble avoir une grande fiabilité et un cout assez réduit du fait de sa petite taille. L'inconvénient est que cette topologie n'utilisant pas la commutation douce comme dans les topologies de (Andersen et Alvsten, 1995), (Lohner, Meyer et Nagel, 1996) et (Wolfs et Li, 2002), son efficacité sera réduite à des commutations de hautes fréquences (Li et Wolfs, 2008).

1.6 Découplage de puissance avec configuration de l'onduleur

Le générateur photovoltaïque de façon approximative produit une puissance constante au point de puissance maximale. Cependant, la puissance à la sortie de l'onduleur ou du réseau est variable avec une fréquence double, d'où il est nécessaire d'équilibrer cette variation de puissance entre le générateur photovoltaïque et le réseau.

Des techniques de découplage de puissance existent et la plupart du temps un élément de stockage est placé entre la sortie du générateur photovoltaïque et l'entrée de de l'onduleur. Les éléments de stockage les plus utilisés sont les condensateurs électrolytiques dus à leur faible coût et à leur grand volume (Hu et al., 2010). Cependant, ces condensateurs ont une courte durée de vie, entre 1000 et 7000 heures à 105°C (Investissements Écologiques, 2015). Les techniques de découplage de puissance peuvent être classées en trois groupes principaux en se tenant compte de l'emplacement du condensateur de découplage (Hu et al., 2010): découplage du côté du panneau photovoltaïque, découplage de la liaison CC, et le découplage du côté AC.

Les auteurs (Kyritsis, Papanikolaou et Tatakis, 2007), (Shimizu, Wada et Nakamura, 2006), (Tan, Wang et Ji, 2007) et (Krein et Balog, 2009) présentent diverses techniques de découplage de grande fiabilité et bon rendement. Ces techniques diffèrent surtout par la taille du condensateur de découplage qui a un impact sur la durée de vie du système et aussi du nombre d'éléments utilisés qui a un impact sur le rendement total du circuit (Hu et al., 2010).

1.6.1 Topologie à filtre actif parallèle

La technique de découplage présentée dans (Kyritsis, Papanikolaou et Tatakis, 2007) est une technique améliorée car la capacité du condensateur de découplage CD a été réduite de 3000 μ F à 100 μ F. De plus la tension moyenne et la tension d'ondulation de ce condensateur ont été augmentées. Le but de ce circuit est d'éliminer l'ondulation à basse fréquence du courant photovoltaïque pour permettre au générateur photovoltaïque de fonctionner au point

de puissance maximale (Kyritsis, Papanikolaou et Tatakis, 2007). La figure 1.11 représente le schéma de la topologie associé au circuit de découplage.

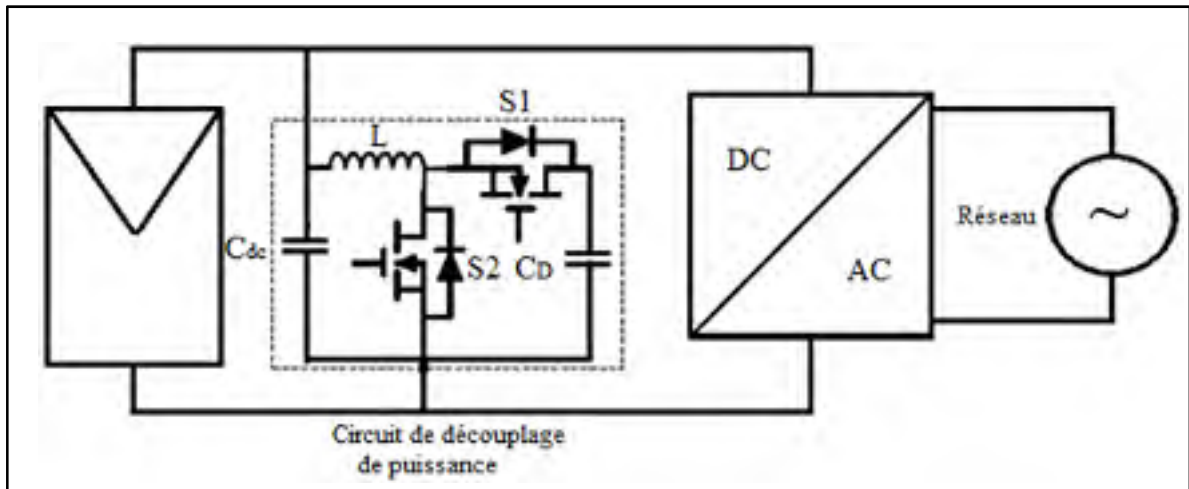


Figure 1.11 Filtre actif parallèle Figure-A I-I(Kyritsis, Papanikolaou et Tatakis, 2007)

1.6.2 Topologie à onduleur monophasé type flyback avec circuit de découplage

La topologie proposée par (Shimizu, Wada et Nakamura, 2006) est un onduleur de type flyback à un seul étage de conversion. Ce circuit est muni d'un dispositif de découplage de puissance dont le condensateur de découplage a une capacité de $40\mu\text{F}$. La faible capacité du condensateur de découplage permet d'utiliser un petit condensateur film de longue durée de vie, ce qui augmente globalement la durée de vie totale du système (Shimizu, Wada et Nakamura, 2006).

Le fonctionnement du circuit est simple. La puissance constante issue du panneau photovoltaïque est transférée d'abord dans le circuit de découplage, où le condensateur de découplage C_D module cette puissance pour l'adapter à celle du réseau.

Cependant les auteurs de (Shimizu, Wada et Nakamura, 2006) signalent que l'addition du circuit de découplage augmentant le nombre d'éléments peut contribuer à réduire le rendement global du système. Dans (Hu et al., 2010) il est noté que ce rendement pourrait être seulement que 70%.

La figure 1.12 permet de résumer la topologie proposée dans (Shimizu, Wada et Nakamura, 2006), où le circuit additionnel de découplage est entouré en pointillé.

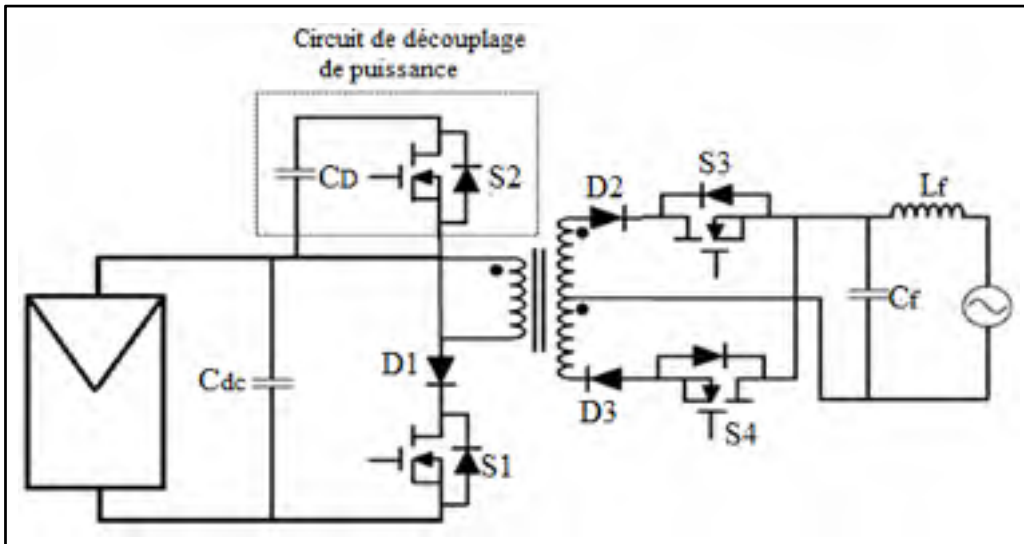


Figure 1.12 Onduleur monophasé type flyback
(Shimizu, Wada et Nakamura, 2006)

1.6.3 Topologie à onduleur type flyback avec condensateur de découplage

Dans cette topologie de (Tan, Wang et Ji, 2007) un convertisseur flyback est également utilisé comme onduleur. Le convertisseur DC/DC est un convertisseur SEPIC qui contient le condensateur de découplage permettant ainsi le découplage de puissance. Cette topologie, à la différence de celle proposée par (Shimizu, Wada et Nakamura, 2006), est à deux étages, dont le premier maximise la puissance continue du panneau photovoltaïque et le second module la puissance alternative.

Cette technique offre la possibilité de réduire la taille du condensateur de découplage C_d , ce qui permet une augmentation de la tension moyenne et de la tension d'ondulation (Hu et al., 2010). En somme, cela augmente la durée de vie de l'unité de conversion et de tout le système en général.

Le circuit de la topologie est représenté sur la figure 1.13 sur laquelle le condensateur de découplage C_d est les différents convertisseurs sont indiqués.

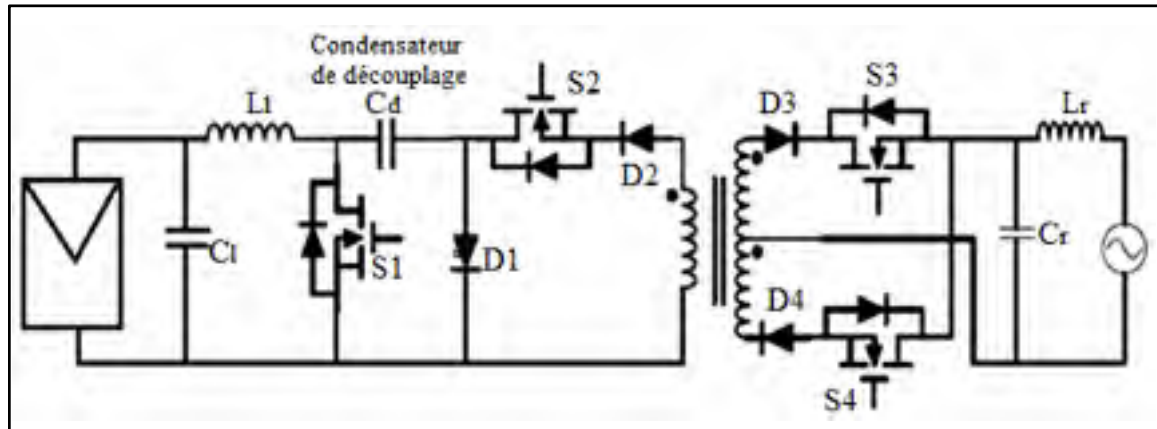


Figure 1.13 Topologie à convertisseur flyback comme onduleur (Tan, Wang et Ji, 2007)

1.6.4 Topologie utilisant un convertisseur à trois ports

La littérature montre qu'il est possible d'utiliser un port d'ondulation de puissance pour gérer le stockage d'énergie et réduire l'ondulation dans le condensateur de découplage. De plus port d'ondulation de puissance permet au concepteur de circuit d'utiliser de petit condensateur film, longue durée de vie (Krein et Balog, 2009). La topologie que propose d'ailleurs (Krein et Balog, 2009) utilise un filtre actif comme troisième port associé au cyclo-convertisseur pour gérer le découplage de puissance.

Le circuit de découplage ici, qui est un filtre actif, permet d'avoir une grande ondulation de tension dans le condensateur de découplage ce qui permet en retour d'utiliser un condensateur à faible capacité comme le condensateur film.

La figure 1.14 montre le circuit de configuration de la topologie. Le convertisseur DC/DC du côté du panneau photovoltaïque est un convertisseur push-pull et le convertisseur du DC/AC est un cyclo-convertisseur composé de huit thyristors.

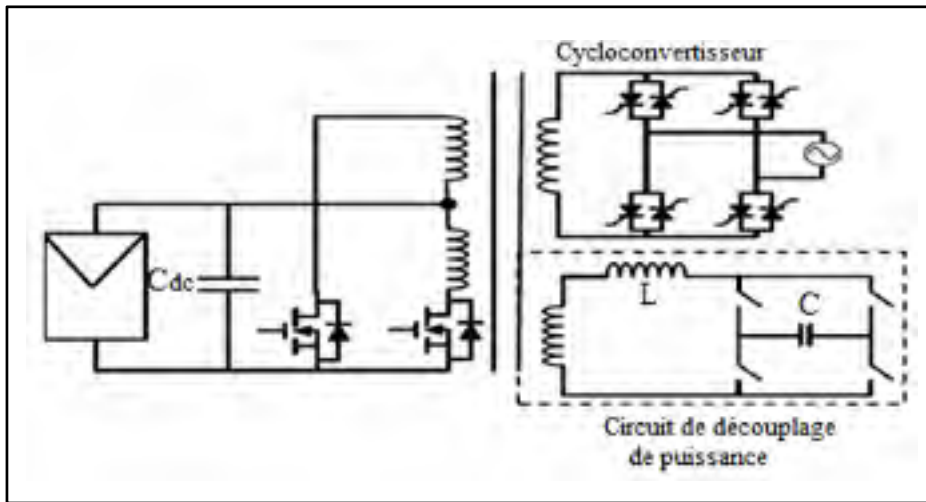


Figure 1.14 Convertisseur à trois ports (Krein et Balog, 2009)

1.7 Réduction de la taille du condensateur du bus DC

Lors de la conception de l'onduleur photovoltaïque, le choix du condensateur de découplage est une étape très importante. La durée de vie de l'onduleur dépend énormément de ce condensateur de découplage, d'où son choix doit être judicieux pour offrir une durée de vie assez longue à l'onduleur.

Le condensateur sur le bus CC de l'onduleur a pour tâche principale d'équilibrer la puissance entre le générateur photovoltaïque et le réseau. Cela est causé par le fait que la puissance produite par le panneau photovoltaïque est continue et celle du réseau est variable à double fréquence, donc le condensateur doit fournir l'énergie nécessaire pour équilibrer cette différence de puissance.

Pour la plupart des cas, les condensateurs électrolytiques sont utilisés pour le découplage de puissance dans les systèmes photovoltaïques dû à leur grande capacité par rapport au prix. Cependant ils ont une durée de vie très limitée, ce qui oblige les concepteurs à utiliser des condensateurs de petite capacité à longue durée de vie.

Plusieurs topologies ont été proposées pour la réduction de la taille du condensateur, ce qui permet l'utilisation de petits condensateurs. Dans (Krein et Balog, 2009), un filtre actif est utilisé comme circuit de découplage de puissance, ce qui a permis de réduire la taille du condensateur de découplage. Aussi dans (Shimizu, Wada et Nakamura, 2006), un circuit auxiliaire est utilisé pour le découplage de puissance, ce qui a réduit la capacité du condensateur.

Les auteurs (Gu et Nam, 2006) utilisent une méthode de contrôle direct du courant du condensateur de découplage pour minimiser sa taille et utiliser par la suite des condensateurs longue durée de vie. Cette méthode consiste à égaliser le courant à la sortie du convertisseur DC/DC et le courant à l'entrée de l'onduleur.

1.8 Conclusion

Ce chapitre présente de façon succincte quelques travaux déjà réalisés dans divers domaines des systèmes photovoltaïques. Les deux grands groupes de système photovoltaïque à savoir le système photovoltaïque autonome et le système photovoltaïque connecté au réseau ont fait l'objet d'une brève discussion. Dans le cadre de ce travail de recherche sur l'amélioration de la durée de vie du condensateur du bus CC de l'onduleur, les condensateurs de liaison du bus CC ont été présentés de façon générale de même que les différentes topologies de l'onduleur.

Plusieurs solutions ont été déjà proposées pour une amélioration de la durée de vie du condensateur du bus CC. Certaines solutions sont présentées comme étant traditionnelles et d'autres comme solutions modernes. La plupart des solutions modernes est basée sur le découplage de puissance avec diverses topologies qui permet la réduction de la taille du condensateur du bus CC. Ainsi, la majorité des topologies de découplage de puissance utilise un circuit additionnel couplé au circuit classique ou traditionnel. Dans ce contexte, nous avons proposé un circuit muni d'un autre circuit additionnel de découplage de puissance qui améliore la durée de vie du condensateur du bus CC de l'onduleur.

CHAPITRE 2

ONDULEURS PHOTOVOLTAÏQUES ET PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

2.1 Introduction

L'énergie produite par les panneaux photovoltaïques étant continue, il est nécessaire de la convertir en énergie alternative pour les charges alternatives ou pour être injectée dans le réseau. Encore appelé convertisseur statique continu/alternatif, l'onduleur est un dispositif d'électronique de puissance qui convertie l'énergie continue du panneau photovoltaïque en énergie alternative. De plus sa fonction de conversion, l'onduleur assure également la liaison entre le panneau photovoltaïque et le réseau. Pour une stabilité de l'énergie injectée dans le réseau et de la rentabilité financière du système, l'onduleur doit posséder de grandes performances techniques et une grande fiabilité. Toutes exigences rendent l'onduleur coûteux et vulnérable.

L'objectif de ce deuxième chapitre est de présenter de façon globale les onduleurs photovoltaïques et leur principe de fonctionnement. Les généralités sur les systèmes photovoltaïques seront abordées. Il sera également question de modélisation et de rendement des onduleurs photovoltaïques.

2.2 Généralités sur les systèmes photovoltaïques

Le déficit entre la consommation et la production d'énergie électrique ne faisant que croître, les compagnies de distribution d'électricité ne parviennent à satisfaire leurs clients. Pour résoudre ce problème, ces compagnies de distribution d'électricité sensibilisent les clients à produire de l'énergie photovoltaïque dont ils peuvent consommer sur place et de leur revendre le surplus ou la totalité de la production. Le cas injection de la production photovoltaïque fait encore l'objet de plusieurs recherches car l'énergie injectée dans le réseau doit être de bonne qualité.

Dans cette partie il sera abordé seulement la cellule photovoltaïque puis son principe de fonctionnement.

2.2.1 Cellule photovoltaïque et effet photovoltaïque

2.2.1.1 Cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque se comporte comme générateur de courant. Lorsque les rayons lumineux tombent sur une cellule photovoltaïque, elle les transforme de façon directe en énergie électrique. L'énergie électrique produite varie avec la puissance d'éclairement des rayons lumineux. Dans (Islam, Rahman et Mominuzzaman, 2014) la variation de la performance de la cellule photovoltaïque en fonction de la puissance de l'éclairement a été étudiée et expérimentée. Les principaux constituants de la cellule photovoltaïque sont des matériaux semi-conducteurs. La revue des progrès de ces cellules photovoltaïques de troisième génération est faite dans (Green, 2006). La cellule photovoltaïque au silicium a été développée pour la première fois aux Bell Telephone Laboratories en 1954 avec un rendement de 6% (Chapin, Fuller et Pearson, 1954). Dans ces dernières années, ce rendement avoisine 18% (Goetzberger et Hoffmann, 2005). Des multiples familles de cellules photovoltaïques existantes, les plus connues sont celles en couche mince et celles en silicium cristallin regroupant le polycristallin 54,4% du marché mondial et le monocristallin 29,36% (Goetzberger et Hoffmann, 2005). Des prévisions d'amélioration d'efficacité et de rendement de ces cellules sont notées dans (Patel, 2006).

2.2.1.2 Effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque se définit comme étant la base du fonctionnement de la cellule photovoltaïque (Leslie Jr, 2003). Comme l'indique la littérature, la cellule photovoltaïque est formée de deux couches dont la couche supérieure notée N qui est un apport d'électrons périphériques et la couche inférieure notée P qui est un déficit d'électrons : il s'agit d'une jonction PN (Patel, 1999). Les rayons lumineux qui frappent la surface de la cellule étant constitués de photons transportant chacun de l'énergie, sont captés par les électrons

périphériques de la couche N. Cela permet aux électrons périphériques de mouvoir et laissant des trous de signe positif : ce phénomène crée une différence de potentiel qui donne naissance à un champ électrique (Green, 2006). Le principe l'effet photovoltaïque peut être résumé comme l'explique la figure 2.1 (Patel, 2006).

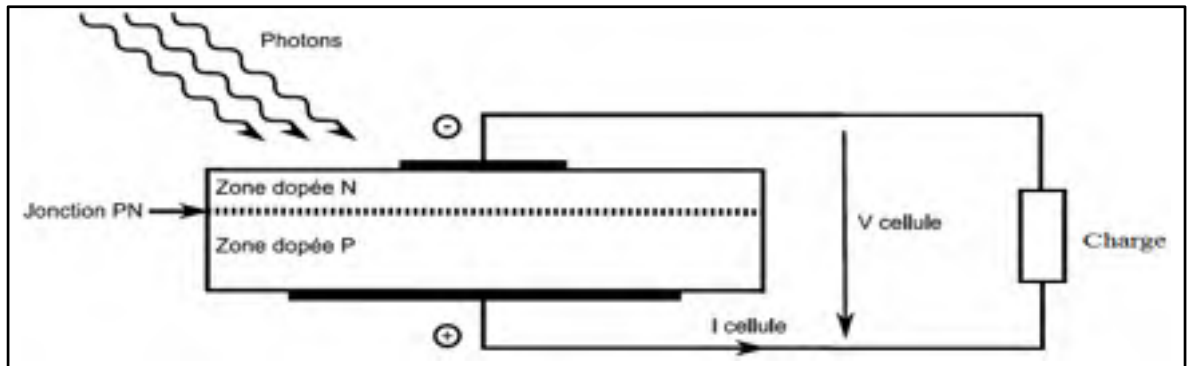


Figure 2.1 Effet photovoltaïque (Patel, 2006)

2.2.1.3 Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque peut être caractérisée par son courant et la tension, donc de sa puissance. A partir de son circuit équivalent représenté par la figure 2.2, il ressort que la cellule photovoltaïque possède une résistance série ou résistance interne de la cellule et une résistance parallèle due au courant de fuite de la jonction PN (Patel, 1999).

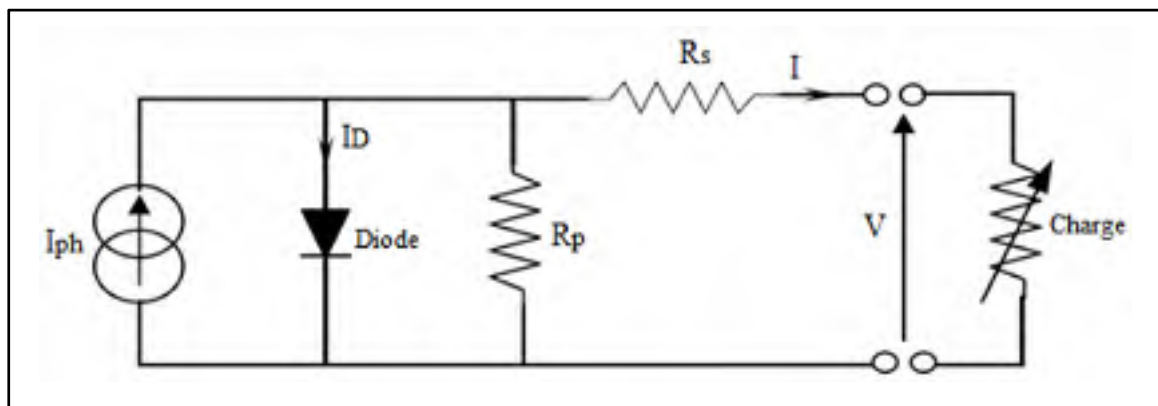


Figure 2.2 Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque (Patel, 1999)

Les équations mathématiques dérivant du circuit équivalent de la cellule photovoltaïque sont obtenues comme suit (Banu et Istrate, 2012), (Tsai, Tu et Su, 2008) et (Altas et Sharaf, 2007):

$$I = I_{ph} - I_D - I_p \quad (2.1)$$

L'expression du photo-courant I_{ph} est donnée par :

$$I_{ph} = \frac{G}{G_{ref}} \left(I_{ph,ref} + k_i (T_C - T_{ref}) \right) \quad (2.2)$$

Le coefficient de température k_i se détermine par la relation :

$$k_i = \frac{I_{SC} - I_{SC,ref}}{T_C - T_{C,ref}} \quad (2.3)$$

On note que $I_{ph,ref} = I_{SC,ref}$

Le courant de la diode est obtenu suivant la relation ci-dessous :

$$I_D = I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(V + I.R_S)}{a.k.T_C} \right] - 1 \right\} \quad (2.4)$$

Le courant de saturation de la diode est donné par l'équation suivante :

$$I_0 = I_{0,ref} \left(\frac{T_C}{T_{C,ref}} \right)^3 \exp \left[\frac{qE_G}{a.k} \left(\frac{1}{T_{C,ref}} - \frac{1}{T_C} \right) \right] \quad (2.5)$$

L'expression suivante permet de calculer le courant dans la résistance parallèle :

$$I_p = \frac{V + I.R_S}{R_P} \quad (2.6)$$

Pour simplifier les équations, posons :

$$V_t = \frac{q}{a.k.T_C} \quad (2.7)$$

D'où l'équation (2.1) s'écrit :

$$I = I_{ph} - I_O \left\{ \exp \left[\frac{(V + I.R_S)}{V_t} \right] - 1 \right\} - \frac{V + I.R_S}{R_P} \quad (2.8)$$

On note que pour obtenir le courant et la tension désirés, il faut associer plusieurs cellules en série (augmentation de tension) ou en parallèle (tension augmentation de courant). En posant N_S le nombre de cellules en série et N_P le nombre de cellules en parallèle, l'équation (2.8) devient :

$$I = N_P I_{ph} - N_P I_O \left\{ \exp \left[\frac{(V + I.R_S(N_S/N_P))}{N_S V_t} \right] - 1 \right\} - \frac{V + I.R_S}{R_P} \quad (2.9)$$

Le modèle Simulink de cette équation (2.9) permet de simuler l'effet de la température et de l'ensoleillement sur le courant et la tension de la cellule photovoltaïque. Le schéma de simulation sous Simulink est représenté en ANNEXE I.

Pour cela il faut considérer un module photovoltaïque de type Kyocera KD135GX-LP dont les caractéristiques sont données sur le tableau 2.1 (MATLAB Academy, 2015):

Tableau 2.1 Paramètres de la cellule photovoltaïque (MATLAB Academy, 2015)

Caractéristique physique	Kyocera KD135GX-LP
Caractéristiques électriques standard	$G_{ref} = 1000 \text{ W/m}^2$, $T_{ref} = 25^\circ\text{C}$, AM 1.5
Puissance maximale	135 W
Tension de circuit ouvert (V_{OC})	22.0999 V
Courant de circuit ouvert (I_{SC})	8.36955 A
Tension au point maximal (V_{mp})	17.7 V
Courant au point maximal (I_{mp})	7.62959 A
Résistance série (R_S)	0.10593 Ω
Résistance parallèle (R_P)	142.84 Ω
Courant de saturation de la diode (I_{sat})	9.845e-07 A
Courant photo-générer (I_{ph})	8.3758 A
Facteur d'idéalité de la diode (a)	1.5

La simulation sous MATLAB donne les courbes suivantes ci-dessous :

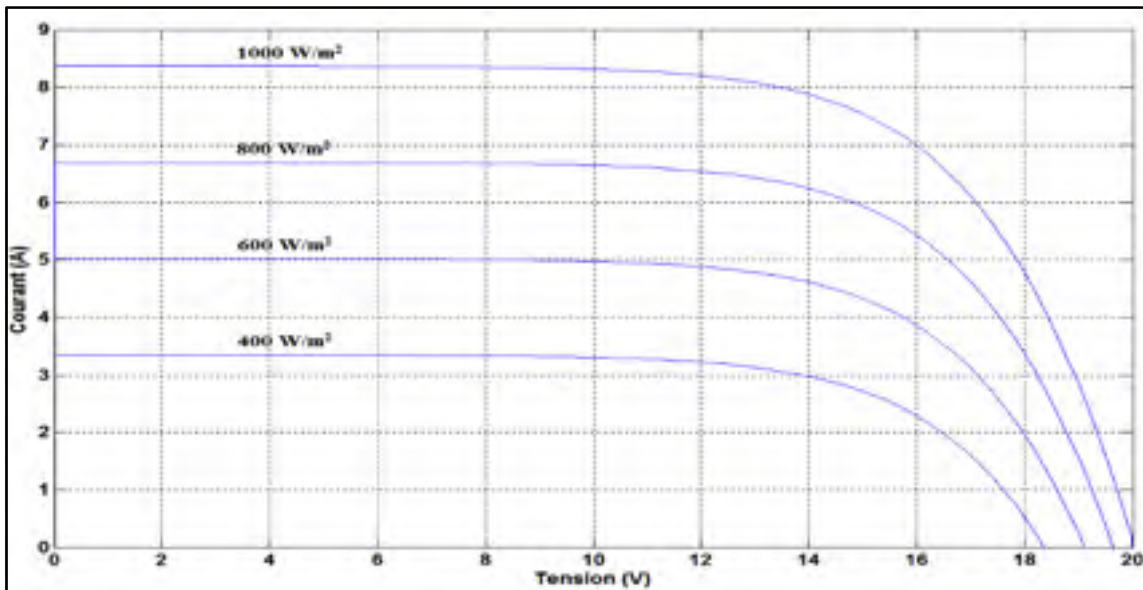


Figure 2.3 Caractéristique courant-tension à irradiation variable et température constante

Selon la figure 2.3, on constate que le courant de sortie du générateur photovoltaïque varie fortement avec l'irradiation. Le courant augmente lorsque l'ensoleillement augmente. La tension aussi augmente de façon modérée avec l'irradiation. On constate également qu'à chaque valeur d'irradiation correspond un point de puissance maximal différent.

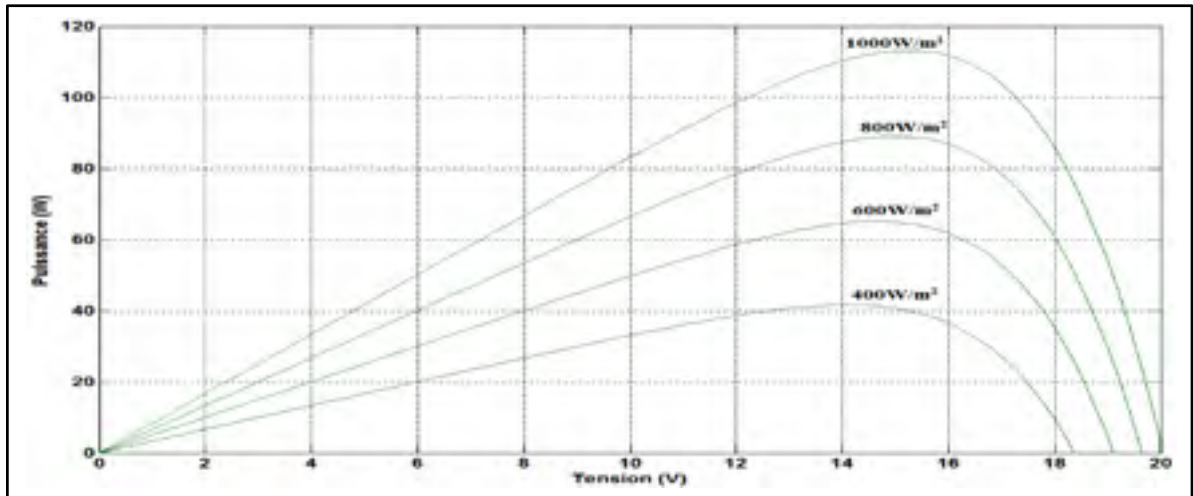


Figure 2.4 Caractéristique puissance-tension, irradiation variable et température constante

Comme le cas précédent, on constate d'après la figure 2.4 que la puissance augmente avec l'irradiation. Cela est normal, car le courant et la tension augmentent aussi avec l'irradiation.

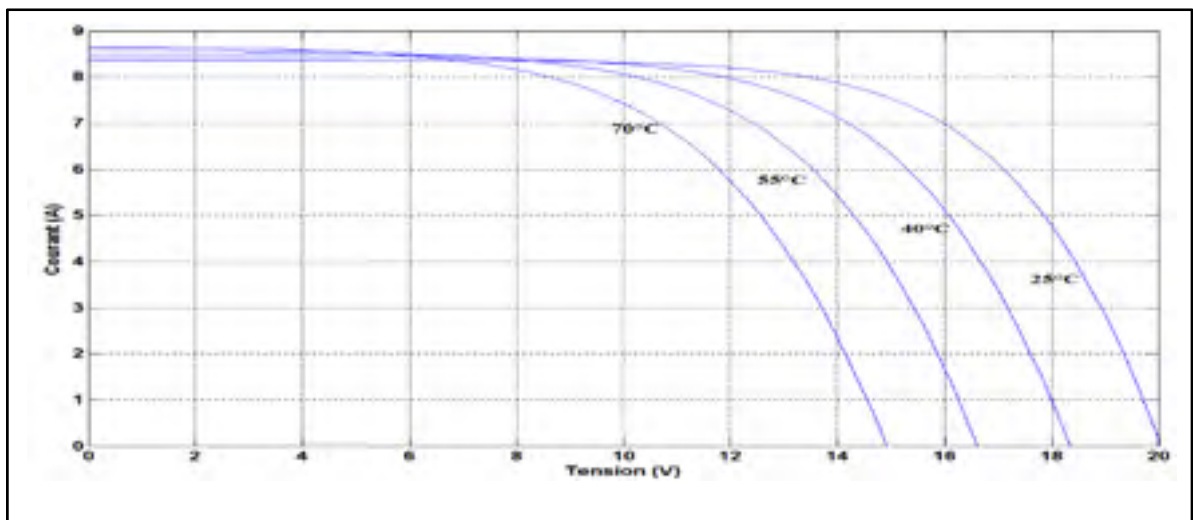


Figure 2.5 Caractéristique courant-tension, température variable et irradiation constante

Pour ce qui est de la figure 2.5, on remarque la tension du générateur photovoltaïque diminue considérablement lorsque la température augmente. Par contre, le courant augmente légèrement avec la température.

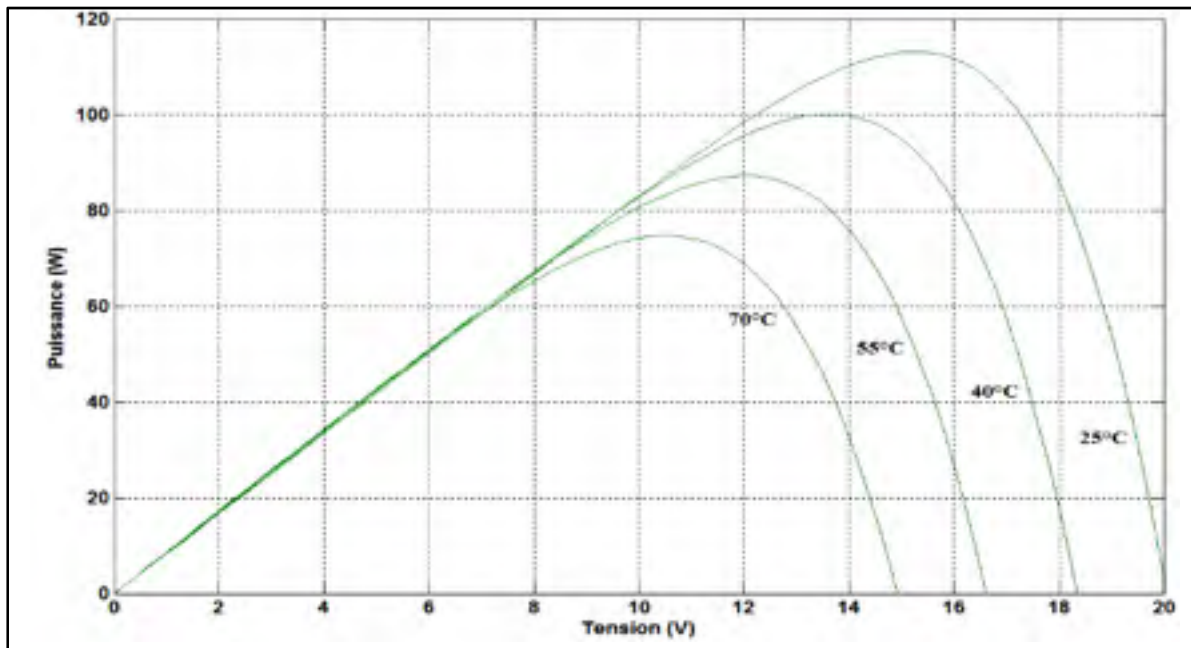


Figure 2.6 Caractéristique puissance-tension, température variable et irradiation constante

Puisque la tension diminue considérablement et le courant augmente très peu avec la température, alors la puissance va diminuer avec l'augmentation de la température. Cela est constaté sur la figure 2.6.

2.3 Les onduleurs photovoltaïques

Les onduleurs photovoltaïques sont des composants de l'électronique de puissance appartenant à la famille des convertisseurs statiques. Leur rôle principal est la conversion de l'énergie continue en énergie alternative. En fonction des besoins, la source d'entrée de l'onduleur peut être une source de courant ou une source de tension et en sortie on contrôle l'amplitude et la fréquence de la tension ou du courant.

2.3.1 Définition et propriété

Comme ce qui a été dit ci-dessus, un onduleur est un dispositif qui permet de convertir l'énergie continue issue du panneau photovoltaïque en énergie alternative symétrique d'amplitude et de fréquence désirée.

En effet, les onduleurs utilisés pour alimenter les moteurs à courant alternatif qui fonctionnent à vitesse variable sont des onduleurs qui fournissent des tensions ou des courants alternatifs dont les amplitudes et les fréquences sont variables. Par contre, les onduleurs utilisés pour les charges sécurisées fournissent des tensions ou des courants d'amplitude et de fréquences fixes.

Il existe deux types d'onduleur : les onduleurs monophasés et les onduleurs triphasés. Ces onduleurs utilisent plusieurs types de commande, mais la plus utilisée est la commande MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion) qui permet de produire une tension de sortie alternative. Leur principe de fonctionnement est basé sur la commutation.

2.3.2 Principe de fonctionnement

L'énergie à l'entrée de l'onduleur étant continue et celle en sortie alternative, cela laisse voir que son principe de fonctionnement est basé sur la commutation. Cette commutation est réalisée grâce à des interrupteurs qui commutent de façon alternative (figure 2.7)

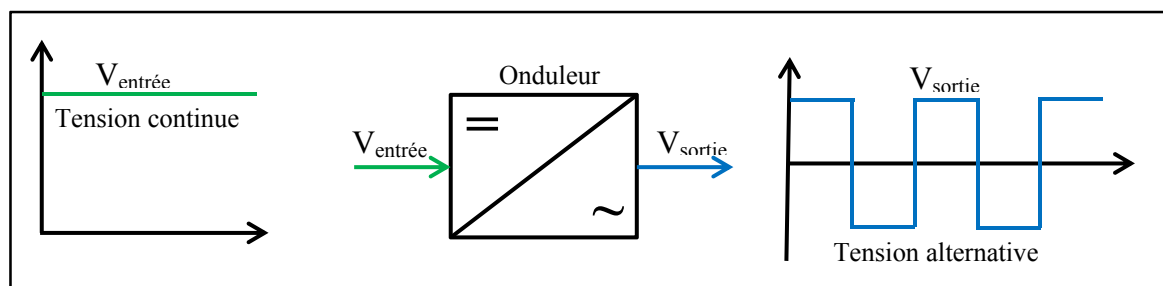


Figure 2.7 Principe de fonctionnement d'un onduleur

Les onduleurs ont le même principe lorsqu'ils fonctionnent, mais ceux des systèmes photovoltaïques diffèrent un peu des autres onduleurs d'électronique de puissance. L'objectif principal de l'onduleur photovoltaïque est la recherche du point de puissance maximale.

De façon générale en utilisant, un onduleur formé de deux paires d'interrupteurs notés S1, S2, S3 et S4 comme l'indiquent les figures ci-dessous, l'onde alternative est obtenue en sortie (Mohan et Undeland, 2007).

Le fonctionnement de l'onduleur a deux paires d'interrupteurs se résume en deux cas :

- lorsque les interrupteurs S1-S3 sont fermés et S2-S4 ouverts, on obtient la partie positive de l'alternance de la tension ou $u = U_{dc}$ (figure 2.8).
- lorsque les interrupteurs S1-S3 sont ouverts et S2-S4 fermés, on obtient la partie négative de l'alternance de la tension ou $u = -U_{dc}$ (figure 2.9).

La somme de ces deux signaux donne le signal complet sur une période.

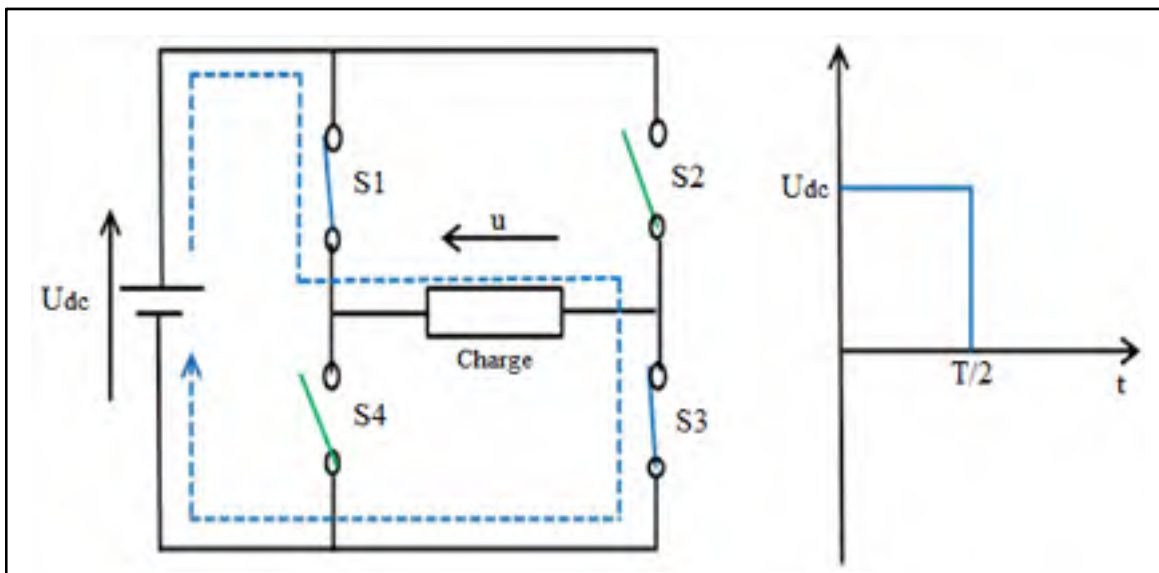


Figure 2.8 Cas où S1-S3 sont fermés et S2-S4 ouverts et signal obtenu

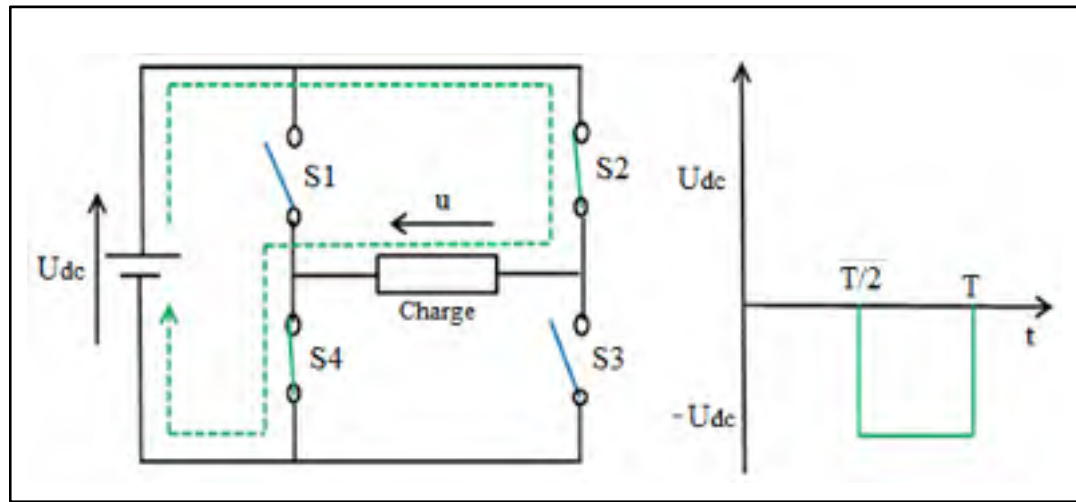


Figure 2.9 Cas où S1-S3 sont ouverts et S2-S4 fermés et signal obtenu

Les installations photovoltaïques sont de deux grands groupes : le système photovoltaïque autonome et le système photovoltaïque connecté au réseau. Dans le cas où le système est autonome, l'onduleur est dit autonome et dans le cas où le système est connecté au réseau, l'onduleur est dit assisté.

2.3.2.1 Onduleur autonome

Il s'agit d'un onduleur non réversible dont les composantes sont commandées à la fermeture et à l'ouverture par des signaux de référence interne. La fréquence du signal de sortie est variable et dépend de la charge.

Les onduleurs autonomes sont de deux catégories : l'onduleur autonome basse fréquence et l'onduleur autonome haute fréquence.

2.3.2.2 Onduleur assisté par le réseau

Ce type d'onduleur, contrairement au précédent est beaucoup plus simple car sa commutation se fait de façon naturelle en utilisant des thyristors commandés uniquement à la fermeture. De plus cet onduleur ne fonctionne qu'en présence du réseau.

La suite de l'étude va porter essentiellement sur deux types d'onduleurs à savoir le monophasé et le triphasé. Mais l'accent sera plus mis sur l'onduleur monophasé car le système photovoltaïque ici en question est de petite échelle.

2.4 Onduleur Monophasé

L'onduleur monophasé peut être réalisé avec deux interrupteurs : montage en demi-pont ou avec quatre interrupteurs : montage en pont. Pour la réalisation de l'onduleur dans ces cas, il faut créer aux bornes de la charge une tension alternative en utilisant des interrupteurs bidirectionnels gérés par une commande (Mohan et Undeland, 2007).

2.4.1 Onduleur monophasé en demi-pont

L'onduleur monophasé en demi-pont est formé de deux interrupteurs et on fait l'hypothèse que la capacité des deux condensateurs utilisés dans le circuit est très grande de sorte que leur tension $U_{dc}/2$ soit toujours constante en régime permanent (Rashid, 2003). Le principe est similaire à ce qui a été dit plus haut : lorsque S1 est fermé et S2 ouvert, alors la tension de la charge est $u = -U_{dc}/2$ et lorsque S1 est ouvert et S2 fermé, on $u = U_{dc}/2$. Le courant i et la tension u possèdent la même forme si la commande est symétrique.

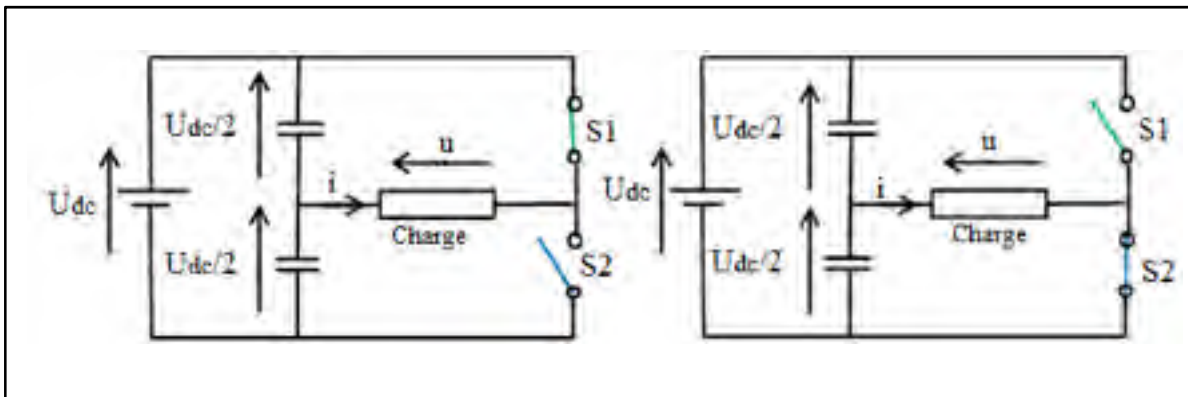


Figure 2.10 Montage d'un onduleur en demi-pont

2.4.2 Onduleur monophasé en pont (Pont H)

Dans ce cas précis c'est un onduleur a quatre interrupteurs. Pour obtenir la tension alternative aux bornes de la charge, il faut commander les interrupteurs deux à deux (Rashid, 2003). Ainsi lorsque les interrupteurs lorsque les interrupteurs S1-S3 sont fermés et S2-S4 ouverts, la tension de la charge est $u = U_{dc}$. Cependant si les interrupteurs S1-S3 sont ouverts et S2-S4 fermés, la tension de la charge devient $u = -U_{dc}$

2.5 Onduleur triphasé

L'onduleur triphasé comme son nom l'indique est constitué de trois paires d'interrupteurs donc de trois bras. Il est en quelque sorte formé de trois sinusoïdes monophasées avec un angle de décalage de 120° .

Son principe est simple si l'interrupteur du haut (S1, S3 ou S5) est fermé et l'interrupteur du bas (S2, S4 ou S6) est ouvert alors la tension de la phase n'est pas nulle. Par contre si l'interrupteur du haut est ouvert et celui du bas est fermé alors la tension de la phase est nulle (Rashid, 1993).

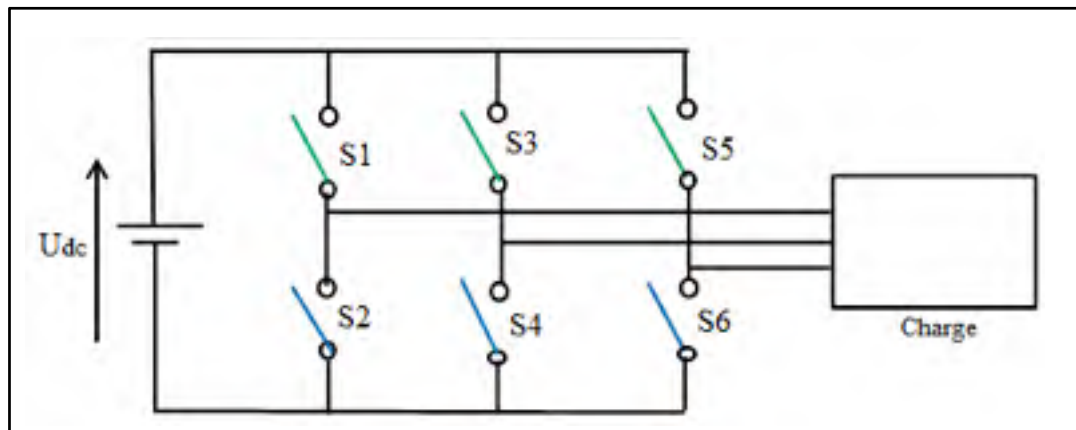


Figure 2.11 Schéma d'un onduleur triphasé

Pour mieux comprendre le principe de fonctionnement des onduleurs monophasé et triphasé, il va falloir les modéliser en courant et en tension.

2.6 Modélisation des onduleurs photovoltaïques

Pour simplifier la partie modélisation, les schémas équivalents des onduleurs monophasé et triphasé déjà vu ci-dessus seront utilisés. Ils se composent de l'onduleur monophasé en pont et de l'onduleur triphasé à trois bras. Le côté continu de chaque onduleur comporte un condensateur qui permet de stocker l'énergie (Krein, 2008). Les filtres utilisés en sortie sont des filtres passifs de type (L, C) ou (L, R).

2.6.1 Onduleur monophasé

Soit le schéma électrique de la figure 2.12 de l'onduleur monophasé avec tous les paramètres de modélisation. Cette modélisation porte sur un onduleur monophasé autonome.

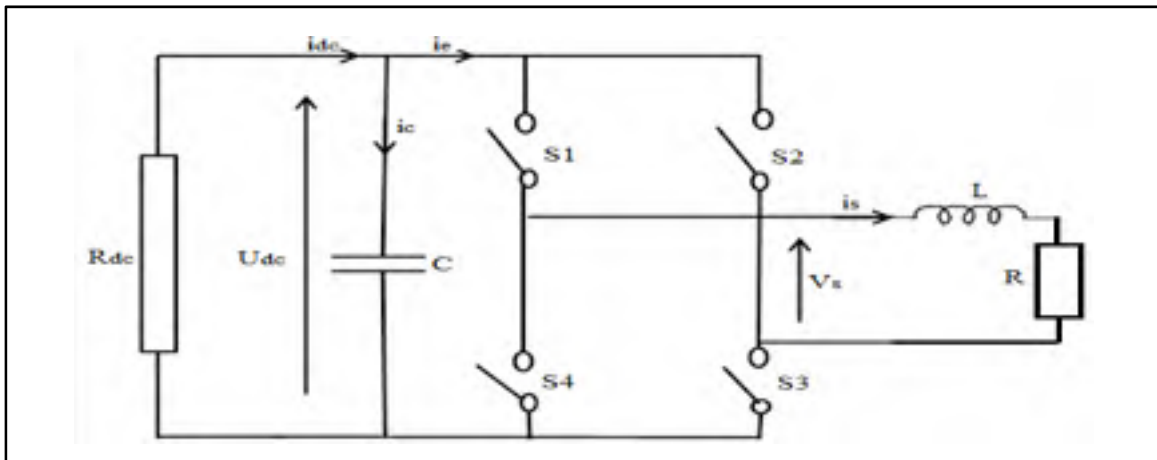


Figure 2.12 Schéma de modélisation d'un onduleur monophasé autonome

Selon le schéma de la figure 2.12 ci-dessus, l'expression de la tension de la bobine L est:

$$V_S = V_L + V_R \text{ avec } V_L = L \frac{di_s}{dt} \quad (2.10)$$

$$L \frac{di_S}{dt} = V_S - V_R \quad (2.11)$$

En fonction des états des commutateurs S1, S2, S3 et S4 la tension V_S est soit égale ou opposée à la tension U_{dc} ou soit nulle. Posons les conditions suivantes :

- Pour un commutateur fermé alors $S_i = 1$, avec $i = 1, 2, 3, 4$.
- Pour un commutateur ouvert alors $S_i = 0$, avec $i = 1, 2, 3, 4$.

Comme cela été dit ci-dessus, lorsque les interrupteurs S1-S3 sont fermés alors S2-S4 sont ouverts et vice versa. Pour simplifier l'étude, considérons les états des interrupteurs S1 et S2, c'est-à-dire que lorsque S1 est ouvert alors S2 est fermé. Un état ouvert correspond à 0 et un état fermé correspond à 1.

$$V_S = U_{dc}(S1 - S2) \quad (2.12)$$

Car $V_S = U_{dc}$ pour $S1 = 1$ et $S2 = 0$ ou $V_S = -U_{dc}$ pour $S1 = 0$ et $S2 = 1$ ou $V_S = 0$ pour $S1 = S2$.

L'équation (2.11) peut alors s'écrire :

$$L \frac{di_S}{dt} = U_{dc}(S1 - S2) - V_R \quad (2.13)$$

De même l'équation du courant aux bornes du condensateur C est donnée par:

$$i_C = i_{dc} - i_e, \text{ avec } i_{dc} = -\frac{U_{dc}}{R_{dc}} \quad (2.14)$$

$$C \frac{dU_{dc}}{dt} = -\frac{U_{dc}}{R_{dc}} - i_e \quad (2.15)$$

En utilisant les mêmes conditions et les mêmes simplifications, il résulte que :

$$i_e = i_s(S1 - S2) \quad (2.16)$$

Car $i_e = i_s$ pour $S1 = 1$ et $S2 = 0$ ou $i_e = -i_s$ pour $S1 = 0$ et $S2 = 1$ ou $i_e = 0$ pour $S1 = S2$.

L'équation (2.15) devient dans ce cas :

$$C \frac{dU_{dc}}{dt} = -\frac{U_{dc}}{R_{dc}} - i_s(S1 - S2) \quad (2.17)$$

Le système d'équations obtenu des équations (2.13) et (2.16) s'écrit comme suit :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_s(t) \\ U_{dc}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{S1 - S2}{L} \\ -\frac{S1 - S2}{C} & -\frac{1}{R_{dc}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s(t) \\ U_{dc}(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_R \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

Pour le cas d'un onduleur monophasé connecté au réseau, alors dans le système d'équations (2.18), seule la tension V_R de la charge est remplacée par la tension $V_{rés}$ du réseau.

2.6.2 Onduleur triphasé

La modélisation de l'onduleur triphasé va porter sur celui de deux niveaux illustré par le schéma électrique de la figure 2.13. Il comporte un point neutre n flottant à partir duquel les tensions de phases seront mesurées. La tension continue de la source est notée U_{dc} et $S1, S2, \dots, S6$ désignent les états des interrupteurs.

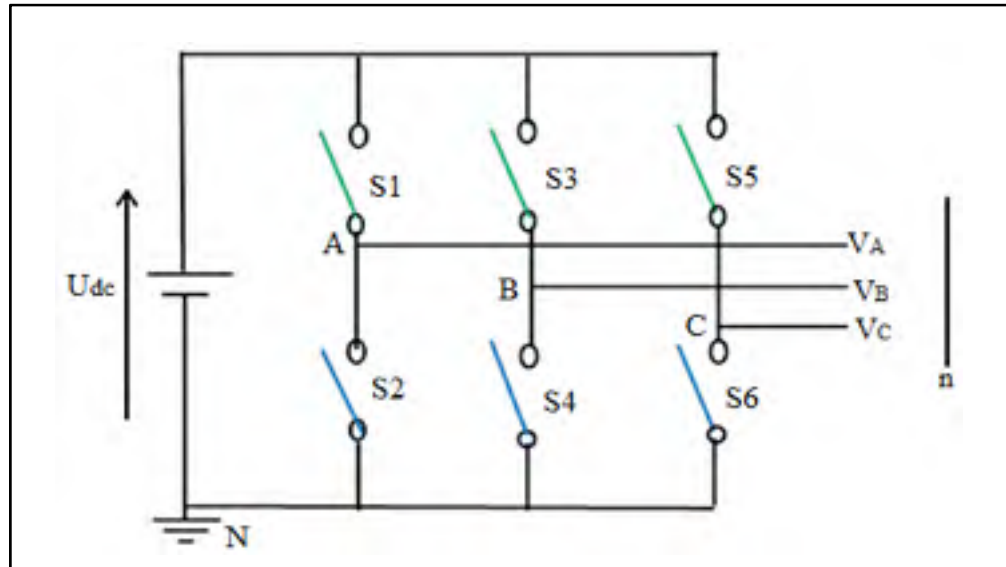


Figure 2.13 Schéma de modélisation de l'onduleur triphasé

Il faut noter que lorsque l'interrupteur du haut (S1, S3 ou S5) est fermé alors celui du bas (S2, S4 ou S6) est ouvert. En fonction des états des commutateurs, les tensions de sortie par rapport à la borne négative de la source continue s'écrivent (Rashid, 2003):

$$\begin{aligned} V_{AN} &= S_1 U_{dc} \\ V_{BN} &= S_3 U_{dc} \\ V_{CN} &= S_5 U_{dc} \end{aligned} \quad (2.19)$$

Les tensions composées des phases A, B et C peuvent alors s'écrire :

$$\begin{aligned} V_{AB} &= V_{AN} + V_{NB} = V_{AN} - V_{BN} = (S_1 - S_3)U_{dc} \\ V_{BC} &= V_{BN} + V_{NC} = V_{BN} - V_{CN} = (S_3 - S_5)U_{dc} \\ V_{CA} &= V_{CN} + V_{NA} = V_{CN} - V_{AN} = (S_5 - S_1)U_{dc} \end{aligned} \quad (2.20)$$

On fait l'hypothèse que

$$V_{AN} + V_{BN} + V_{CN} = 0 \quad (2.21)$$

En combinant les équations (2.20) et (2.21), on obtient :

$$\begin{aligned}
 V_{AN} &= \frac{2}{3}V_{AN} - \frac{1}{3}V_{BN} - \frac{1}{3}V_{CN} \\
 V_{BN} &= \frac{2}{3}V_{BN} - \frac{1}{3}V_{AN} - \frac{1}{3}V_{CN} \\
 V_{CN} &= \frac{2}{3}V_{CN} - \frac{1}{3}V_{AN} - \frac{1}{3}V_{BN}
 \end{aligned} \tag{2.22}$$

En remplaçant V_{AN} , V_{BN} et V_{CN} par leurs expressions respectives, l'équation (2.22) devient :

$$\begin{aligned}
 V_{AN} &= \frac{1}{3}(2S1 - S3 - S5)U_{dc} \\
 V_{BN} &= \frac{1}{3}(2S3 - S1 - S5)U_{dc} \\
 V_{CN} &= \frac{1}{3}(2S5 - S1 - S3)U_{dc}
 \end{aligned} \tag{2.23}$$

Sous forme matricielle, les équations (2.20) et (2.22) sont données respectivement par :

$$\begin{pmatrix} V_{AB} \\ V_{BC} \\ V_{CA} \end{pmatrix} = U_{dc} \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S1 \\ S3 \\ S5 \end{pmatrix} \tag{2.24}$$

$$\begin{pmatrix} V_{AN} \\ V_{BN} \\ V_{CN} \end{pmatrix} = \frac{1}{3}U_{dc} \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S1 \\ S3 \\ S5 \end{pmatrix} \tag{2.25}$$

2.7 Effets harmoniques

Un harmonique est une perturbation observée sur un signal comme le courant ou la tension. C'est une composante sinusoïdale périodique dont la fréquence est multiple de la fréquence fondamentale.

En effet les harmoniques présents dans le réseau de distribution proviennent pour la plupart du temps des charges non linéaires. Par exemple les systèmes utilisant des redresseurs à diode ou à thyristors, les récepteurs à arc électrique, les variateurs de lumière, les téléviseurs, ... Les fréquences de ces harmoniques sont de rangs impairs (3, 5, 7, 9, 11, 13, ...).

En ce qui concerne les panneaux photovoltaïques, l'énergie fournie étant continue, les harmoniques sont de rangs pairs. L'harmonique de second ordre est le plus nuisible et doit être réduit le maximum possible (Krein et Balog Jr, 2010).

Taux de distorsion harmonique

Le taux de distorsion harmonique (ou total harmonic distortion, THD en anglais) est le rapport de la valeur efficace de la somme de tous les harmoniques et de la composante fondamentale. Sa formule s'écrit :

$$THD = \frac{\sqrt{H_2^2 + H_3^2 + \dots + H_n^2}}{H_1} \quad (2.26)$$

n l'ordre de l'harmonique, $n \geq 2$.

De façon explicite, le taux de distorsion harmonique est équivalent à l'augmentation de l'effet Joule dans les lignes de distribution et dans les dispositifs. Selon la loi IEEE 519, le taux de distorsion harmonique doit être plus petit que 5 (THD < 5).

Conséquences des perturbations harmoniques

Les harmoniques sont à l'origine de nombreux problèmes sur les installations et les équipements électriques. Ces problèmes sont le plus souvent le claquage de diélectrique dû à l'augmentation des valeurs crêtes, l'échauffement et les pertes en tension puis en courant du à l'augmentation des valeurs efficaces, ...

Ces harmoniques peuvent avoir des conséquences immédiates ou à long terme (Collombet, Lupin et SCHONEK, 1999):

- Comme conséquences immédiates, on peut citer le papillotement des écrans d'affichage, bruits acoustiques des transformateurs, vibrations des inductances, mauvais fonctionnement des circuits de commande, ...
- Les problèmes à long terme se résument à l'échauffement excessif des condensateurs, pertes accrues dans les transformateurs et les inductances, vieillissement accéléré des équipements électroniques, ...

Tous ces problèmes liés aux harmoniques jouent sur la durée de vie des composantes électroniques et particulièrement sur le rendement de l'onduleur.

2.8 Rendement des onduleurs photovoltaïques

De façon pratique, le rendement d'un onduleur dépend de la tension continue DC en entrée et aussi de la tension alternative AC en sortie (Jantsch et al., 1997). La caractéristique I-V du générateur photovoltaïque étant fonction de la température et de l'ensoleillement, l'onduleur travaille de sorte que la puissance délivrée soit toujours maximale, malgré ces variations. De ce fait, la valeur du rendement de l'onduleur est obtenue en effectuant le rapport entre la puissance continue délivrée par le générateur photovoltaïque et la puissance alternative en sortie de l'onduleur (Haerberlin et Borgna, 2004), soit $\eta = \frac{P_{AC}}{P_{pv}}$.

2.9 Conclusion

D'une manière générale, la production photovoltaïque est liée à plusieurs paramètres comme la température et l'éclairement. Comme l'indique la littérature, la simulation de l'effet de la température et de l'ensoleillement sur le courant et la tension de la cellule photovoltaïque confirme que le courant de sortie du générateur photovoltaïque varie beaucoup avec l'ensoleillement et sa tension diminue énormément lorsque la température augmente.

Les onduleurs utilisés pour convertir l'énergie continue du générateur photovoltaïque en énergie alternative et aussi en partie pour la réduction des harmoniques sont de deux types à savoir l'onduleur monophasé et l'onduleur triphasé. Dans le cadre de ce travail de recherche, nous nous intéresserons à l'onduleur monophasé. La modélisation de l'onduleur effectuée dans ce chapitre permettra plus tard de concevoir sa commande grâce aux équations présentées.

CHAPITRE 3

CONDENSATEURS UTILISÉS SUR LE BUS CC DE L'ONDULEUR : UTILITÉ ET FACTEURS INFLUENCANT LEUR DURÉE DE VIE

3.1 Introduction

L'évolution dans le domaine de l'électronique de puissance a permis de disposer de nos jours d'un grand nombre de technologies des condensateurs, en particulier ceux utilisés dans le bus CC de l'onduleur. En fonction de la consommation mondiale en matière de condensateurs et des technologies disponibles, les pourcentages varient d'un condensateur à l'autre. Selon (ECIA eWorkspace, 2015) le pourcentage de consommation mondiale des condensateurs peut être résumé dans le tableau 3.1:

Tableau 3.1 Statistique consommation mondiale par type de condensateur 2012

Condensateur	Pourcentage (%)
Ceramic multilayer	49
Aluminium	39
Tantalum	7
Metalised and film	6
Ceramic single layer	3

Ces nombreux types de condensateurs utilisés sur le bus CC de l'onduleur et ont un rôle très important dans la gestion du flux énergétique. Ces condensateurs étant des assemblages complexes, il serait intéressant de définir leurs grandeurs caractéristiques et déceler les facteurs influençant leur durée de vie pour une probable amélioration.

Ce chapitre est consacré à l'étude du rôle du condensateur sur le bus cc de l'onduleur, l'impact de sa défaillance sur la durée de vie de l'onduleur ainsi que sa fiabilité et son vieillissement lié aux différents paramètres l'ESR, le courant et la tension ondulés, la charge et la décharge.

3.2 Condensateurs du bus CC

Les condensateurs utilisés sur le bus CC de l'onduleur varient en fonction de leur nature physique ou chimique, en fonction de leur capacité ou en fonction de la tension et du courant ondulés. De façon globale, trois principaux types de condensateurs sont utilisés sur le bus CC de l'onduleur (Wang et Blaabjerg, 2013): les condensateurs électrolytiques, les condensateurs film et les condensateurs céramiques. La figure 3.1 permet de voir l'emplacement du condensateur de découplage sur le bus CC, il est placé à cheval entre l'énergie d'entrée (continue) et l'énergie de sortie (alternative).

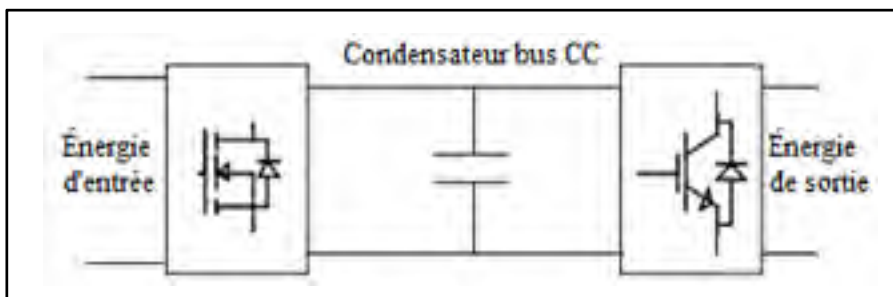


Figure 3.1 Emplacement du condensateur du bus cc dans le circuit

Dépendamment des besoins et des paramètres du circuit, le concepteur peut faire le choix du condensateur convenable. Ce choix se fait surtout en fonction de la capacité du condensateur, de sa tension de service, des valeurs de résistance série, du courant de fuite et du type de diélectrique utilisé.

3.2.1 Condensateurs électrolytiques

Le condensateur électrolytique est un composant passif beaucoup sollicité en électronique de puissance pour diverses raisons telles que le coût, la capacité ou la tension. Il est particulièrement plus utilisé dans les applications de filtrage et de découplage nécessitant des condensateurs de grande capacité ou de haute tension.

Les condensateurs électrolytiques sont subdivisés en plusieurs groupes selon la nature de l'électrolyte, du boîtier,... Cependant, les condensateurs électrolytiques les plus utilisés sont ceux en aluminium et en tantale (Automotive, 2013).

3.2.1.1 Condensateurs électrolytiques à l'aluminium

Le condensateur électrolytique à l'aluminium est polarisé et possède une grande capacité. Sa borne positive (ou anode) est formée d'une bande d'aluminium recouverte d'une couche d'alumine et sa borne négative (ou cathode) est formée d'une bande d'aluminium uniquement. Son diélectrique d'alumine et du papier de type particulier imprégné d'un électrolyte adéquat.

Les condensateurs électrolytiques aluminium sont composés des condensateurs aluminium à électrolyte non solide, des condensateurs aluminium à électrolyte solide des condensateurs à polymère hybride (Automotive, 2013).

La figure 3.2 schématise de façon transversale un condensateur électrolytique à l'aluminium. Les différentes parties internes et connexions sont indiquées (Condensateurs, 2015).

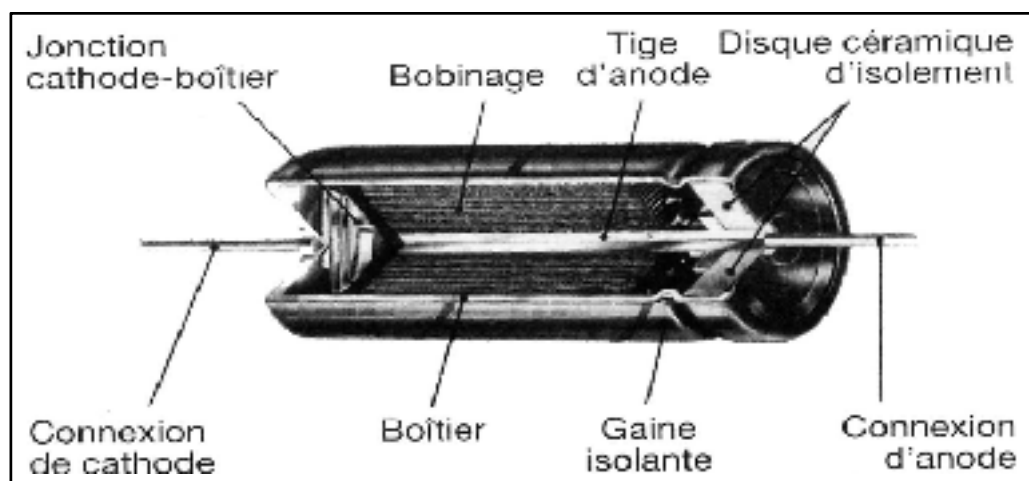


Figure 3.2 Schéma condensateur électrolytique à l'aluminium (Condensateurs, 2015)

3.2.1.2 Condensateurs électrolytiques au tantale

Ces condensateurs sont polarisés aussi et possèdent une grande capacité pour un faible volume. La borne positive du condensateur électrolytique au tantale est formée d'une pastille de tantale et sa borne négative est constituée d'un boîtier en argent qui résiste à l'électrolyte solide de bioxyde de manganèse (Condensateurs, 2015).

La figure 3.3 est celle de la coupe transversale d'un condensateur électrolytique au tantale dans laquelle les bornes, l'électrolyte, le boîtier, les connexions, ... sont représentés.

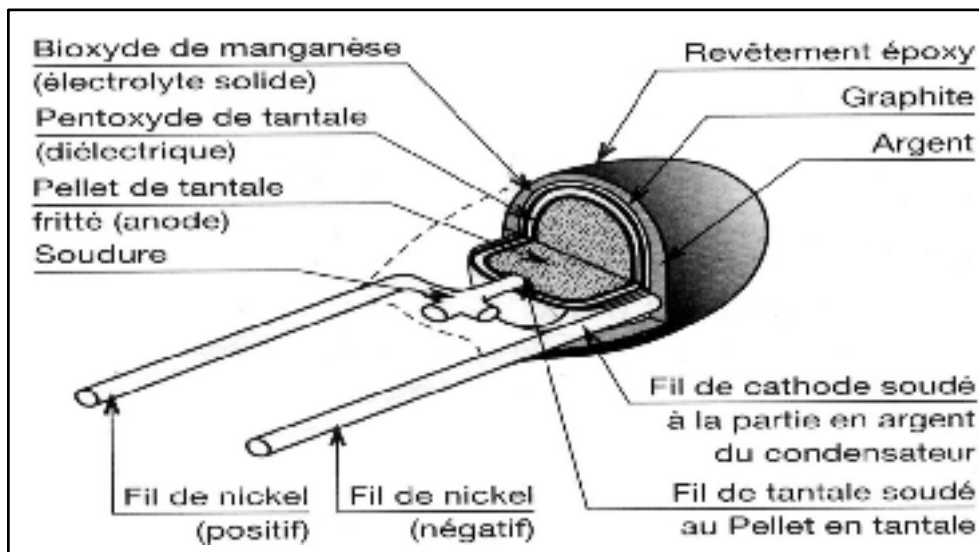


Figure 3.3 Schéma d'un condensateur électrolytique au tantale (Condensateurs, 2015)

3.2.2 Condensateurs céramiques

Le condensateur céramique est un condensateur dont le diélectrique est une céramique. La céramique est connue comme étant un matériau inorganique, non métallique dont sa technologie de mise en œuvre est la technologie céramique.

Le condensateur céramique de petite capacité ou monocouche est formé d'une pastille, d'un tube ou d'un disque céramique qui est métallisé à l'argent sur ses deux faces. Sa capacité

peut être augmentée en réduisant simplement l'épaisseur du diélectrique et en augmentant les couches : on parle alors de condensateurs multicouches.

La figure 3.4 est celle du schéma d'un condensateur céramique sur laquelle on peut observer le diélectrique, la couche métallique, l'emballage de même que les pattes de connexion (Condensateurs, 2015).

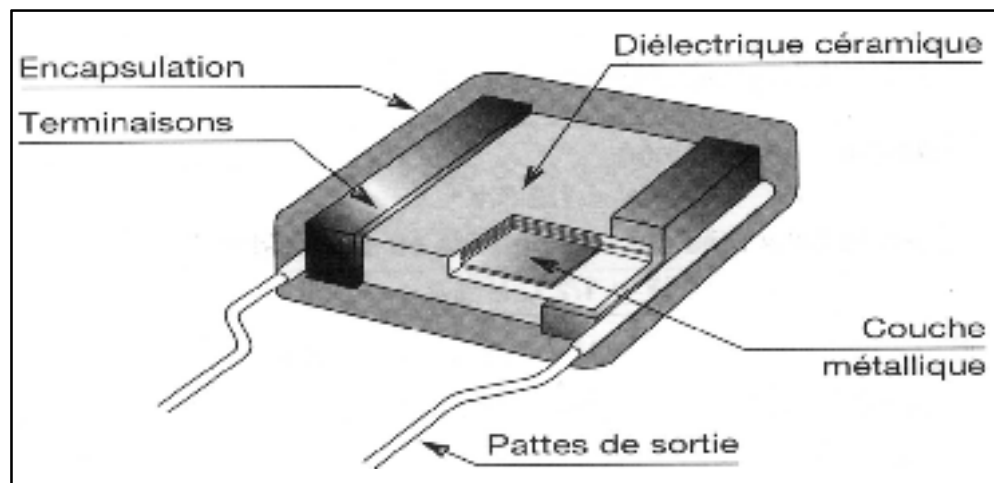


Figure 3.4 Schéma d'un condensateur céramique (Condensateurs, 2015)

3.2.3 Condensateurs à film plastiques métallisés

Les condensateurs à films plastiques métallisés sont des condensateurs dont le diélectrique est un film plastique dont les caractéristiques varient en fonction de la matière utilisée. Le film plastique est métallisé en aluminium ou en zinc dans le but de réduire le volume du condensateur et de constituer ses électrodes.

La figure 3.5 indique l'agencement structurel des différentes parties du condensateur à film plastique métallisé. Le métal utilisé ici est l'aluminium (DREAM & SONG WEB, 2015).

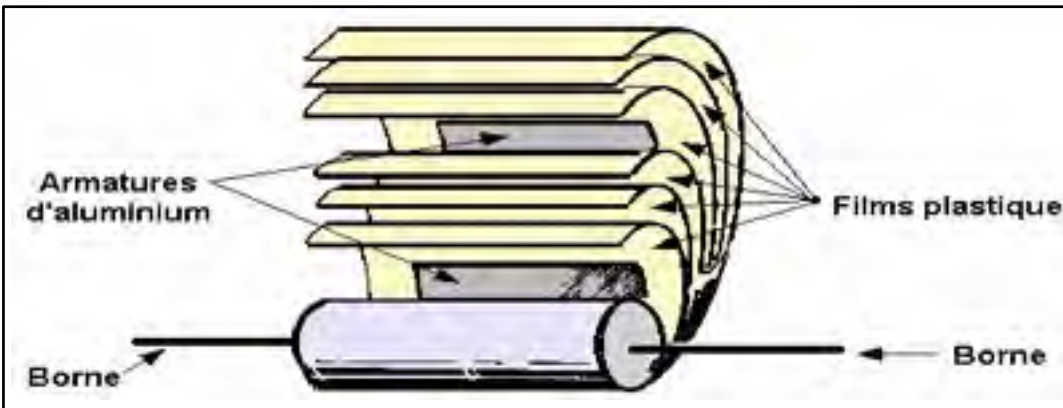


Figure 3.5 Structure des condensateurs à films plastiques métallisés

Les différents types de condensateurs énumérés ci-dessus jouent chacun un rôle important dans l'électronique de puissance. Ils sont utilisés pour la plus part du temps comme élément de découplage, de liaison, de filtrage, de compensation de température, de stockage d'énergie ou de mémoire.

3.3 Rôle du condensateur sur le bus cc de l'onduleur

Le condensateur de façon générale, est considéré comme étant un réservoir d'énergie dû au fait qu'il emmagasine l'énergie pour la restituer plus tard. Son rôle principal est donc d'accumuler des charges qui serviront plus tard ou des charges dont on ne sait quoi faire (courant parasite). En somme, par ce rôle d'accumulateur d'énergie, le condensateur joue en quelque sorte le rôle de régulateur de tension.

L'onduleur est constitué de commutateurs qui lui permettent de convertir l'énergie continue du générateur photovoltaïque en énergie alternative. Ces commutateurs dans leur fonctionnement injectent des ondulations de tension sur la tension constante du générateur photovoltaïque, ce qui perturbe le fonctionnement au point de puissance maximale du système photovoltaïque. Pour pallier à cette ondulation de tension, un condensateur est placé sur le bus CC de l'onduleur (Salcone et Bond, 2009).

3.3.1 Utilité des condensateurs

Le condensateur est l'élément principal du bus CC et son rôle est surtout de réduire l'ondulation de tension causée par l'onduleur. Comme cela a été dit ci-dessus, la puissance produite par le générateur photovoltaïque est constante et celle aux bornes de l'onduleur est variable avec un terme dont la fréquence est double.

La figure 3.6 présente la relation entre la puissance de sortie P_{ac} , la tension de l'onduleur et la tension du bus CC (Gao et al., 2009). Sur cette figure, il est les parties charge et décharge du condensateur du bus CC sont mises en évidence. La double fréquence de la puissance P_{ac} de l'onduleur est aussi visible car sa valeur maximale est deux fois la puissance d'entrée. Le condensateur devant compenser cette oscillation de puissance, alors l'oscillation à double fréquence de la puissance se répercute sur sa tension.

Sur la figure 3.6, la partie de la tension limitée en pointillé rouge, montre que sur une période, la tension V_{dc} du condensateur varie deux fois par rapport à la tension V_{ac} de l'onduleur.

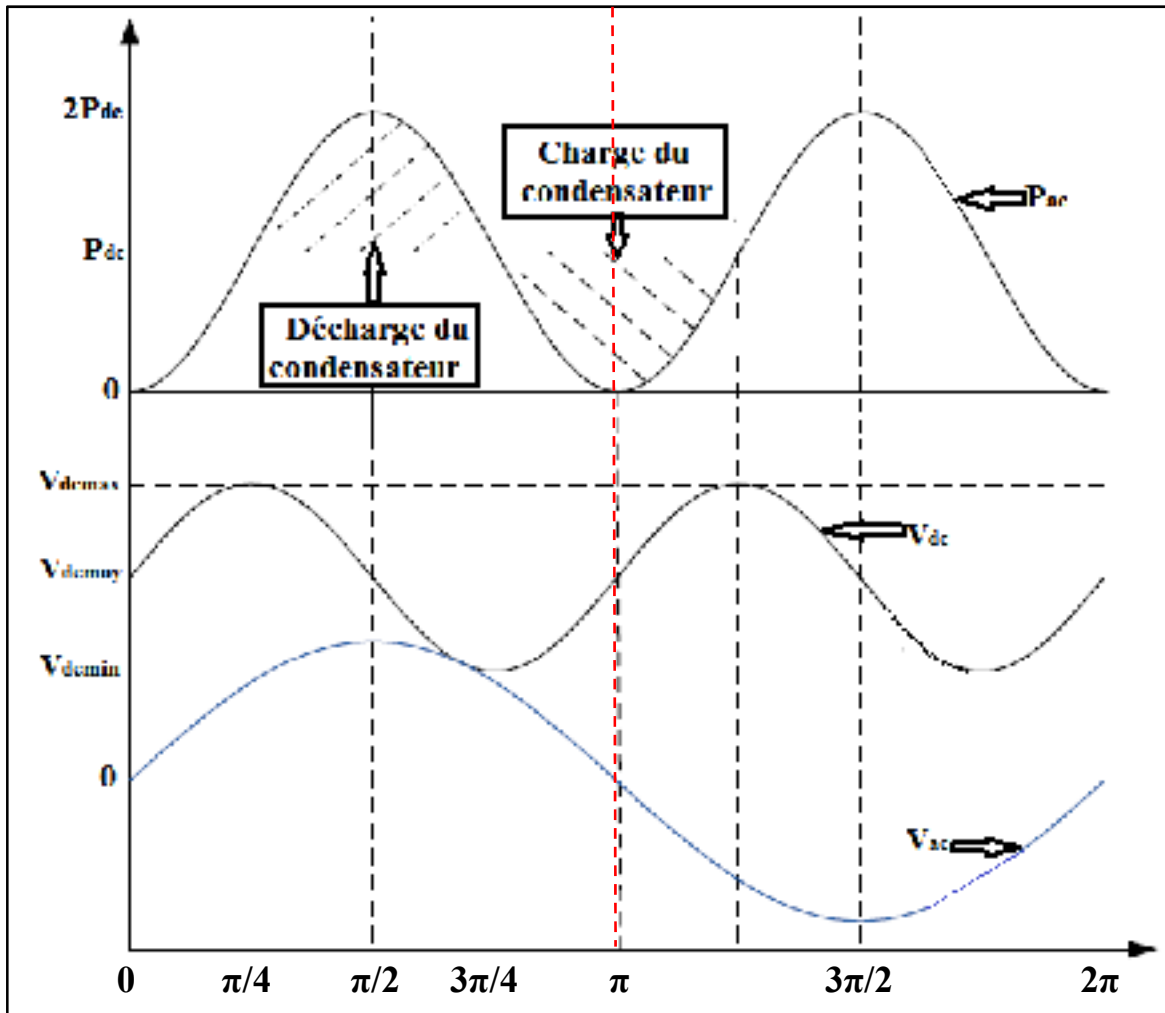


Figure 3.6 Courbes de la puissance P_{ac} , tension onduleur et tension V_{dc} du bus

On constate qu'à partir de l'instant $\pi/4$, la puissance de l'onduleur croît jusqu'à sa valeur maximale et est supérieure à celle du générateur photovoltaïque. En ce moment, le condensateur commence à se décharger progressivement avec la diminution de sa tension jusqu'à l'instant $3\pi/4$. A partir de cet instant, la puissance de l'onduleur décroît jusqu'à sa valeur minimale et devient inférieure à celle du générateur photovoltaïque. Puis le condensateur se charge et sa tension augmente jusqu'à la valeur maximale. Un nouveau cycle reprend et ainsi de suite.

3.3.2 Quantification de la puissance ondulée

Pour trouver la quantité de puissance ondulatoire, il est important de s'inspirer de la puissance du générateur photovoltaïque et de celle fournie par l'onduleur. La puissance du générateur photovoltaïque étant constante, son équation est donnée par :

$$P_{pv} = V_{pv} * I_{pv} \quad (3.1)$$

La puissance issue de l'onduleur pour la charge ou le réseau est alternative, dû au fait que la tension et le courant sont alternatifs. En admettant que le déphasage entre la tension et le courant est nul, leurs formules sont obtenus respectivement par :

$$v_{ac}(t) = V_{ac} \sin(\omega t) \quad (3.2)$$

$$i_{ac}(t) = I_{ac} \sin(\omega t) \quad (3.3)$$

La puissance instantanée fournie à la charge ou au réseau est obtenue en faisant le produit de la tension $v_{ac}(t)$ et du courant $i_{ac}(t)$:

$$p_{ac}(t) = v_{ac}(t) * i_{ac}(t)$$

$$p_{ac}(t) = \frac{V_{ac} * I_{ac}}{2} - \frac{V_{ac} * I_{ac}}{2} \cos(2\omega t) \quad (3.4)$$

En faisant l'hypothèse qu'il n'y a pas de pertes dans le système de conversion, alors la valeur moyenne de la puissance instantanée $p_{ac}(t)$ issue de l'onduleur est égale à la puissance constante P_{dc} du générateur photovoltaïque. D'où on peut écrire :

$$P_{dc} = P = V_{dc} * I_{dc}$$

$$p_{ac}(t) = P - P * \cos(2\omega t) \quad (3.5)$$

La différence entre $p_{ac}(t)$ et P_{dc} est donnée par :

$$P_{dc} - p_{ac}(t) = P * \cos(2\omega t) \quad (3.6)$$

Comme l'équation (3.6) le montre, la différence entre la puissance instantanée issue de l'onduleur et la puissance constante du générateur photovoltaïque n'est pas nulle, elle donne un terme ondulatoire à double fréquence. Ce terme à fréquence double perturbe la production continue du générateur photovoltaïque, il faut donc de l'énergie supplémentaire pour compenser cela. Un condensateur peut être utilisé pour équilibrer cette différence de puissance.

3.3.3 Capacité nécessaire du condensateur

De façon générale, le condensateur est utilisé pour l'équilibrage de puissance ou la réduction des ondulations placé sur le bus CC de l'onduleur. Il permet de réduire les oscillations et de maintenir la tension du générateur photovoltaïque constante. Ce condensateur utilisé pour éliminer la partie ondulatoire de la puissance issue de l'onduleur a une capacité dépendante de la puissance, de la tension, de la variation de tension et de la fréquence de commutation.

La figure 3.7 permet de voir le condensateur utilisé pour l'élimination de l'ondulation à double fréquence ainsi que la puissance fournie par le panneau photovoltaïque, celle du réseau et la puissance fournie par le condensateur pour compenser les ondulations.

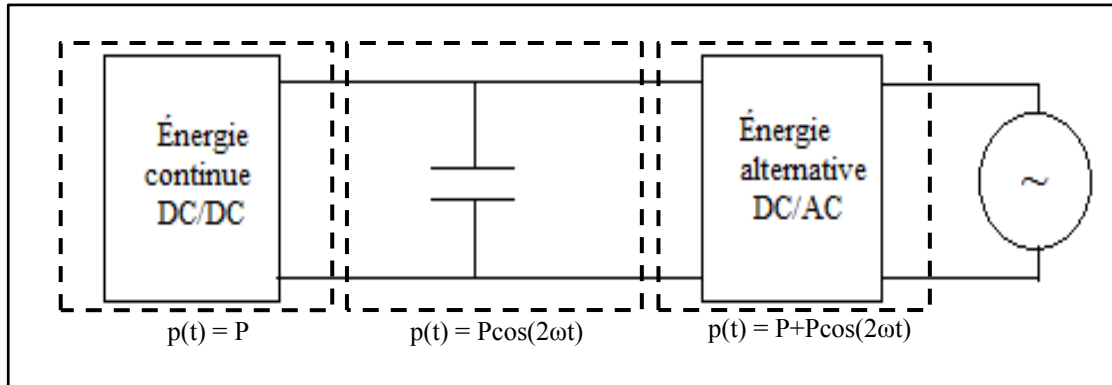


Figure 3.7 Configuration du condensateur du bus CC comme filtre actif

Selon l'équation (3.6), la puissance nécessaire du condensateur pour l'élimination de l'ondulation est :

$$P_{cond}(t) = v_{cond}(t) * i_{cond}(t) = P * \cos(2\omega t) \quad (3.7)$$

La tension du condensateur dans le modèle petit signal a un terme constant V_{dc} et un terme ondulateur \tilde{v} très faible (Krein et Balog, 2009). Son expression est donnée par :

$$v_{cond}(t) = V_{dc} + \tilde{v} \quad (3.8)$$

En considérant la tension du condensateur continue égale à V_{dc} dans la limite de petit signal, le courant du condensateur peut être écrit comme suit :

$$i_{cond}(t) = \frac{P}{V_{dc}} * \cos(2\omega t) \quad (3.9)$$

La formule générale de i_{cond} est donnée par l'équation (3.10) ci-dessous :

$$i_{cond}(t) = C * \frac{d\tilde{v}}{dt} \quad (3.10)$$

Le terme ondulatoire \tilde{v} de la tension, comme cela a été dit ci-dessus, est un terme à variation double fréquence (Krein et Balog, 2009). Il peut être écrit alors comme :

$$\tilde{v} = V_{ond} * \sin(2\omega t) \quad (3.11)$$

D'où :

$$i_{cond} = 2\omega * C * V_{ond} * \cos(2\omega t) \quad (3.12)$$

Avec V_{ond} la partie ondulatoire de la tension du condensateur, elle correspond à la variation tension crête à crête permise et ω la fréquence angulaire. On note que $\omega = 2\pi f$, f la fréquence.

En combinant les équations (3.9) et (3.12), on obtient :

$$C = \frac{P}{2\omega * V_{dc} * V_{ond}} \quad (3.13)$$

A l'aide de cette formule, il est possible de déterminer la capacité nécessaire du condensateur pour la réduction des ondulations de la tension du générateur photovoltaïque connaissant la puissance à fournir, la fréquence de commutation, la tension du bus CC et l'ondulation de tension autorisée.

Vue l'importance et le rôle du condensateur situé sur le bus CC de l'onduleur, il est nécessaire de bien le dimensionner pour éviter sa destruction prématurée car cela pourrait avoir un impact sur l'onduleur en particulier et du système en général.

3.4 Notion de fiabilité et de défaillance des condensateurs

De façon générale, la fiabilité d'un élément est la probabilité de n'avoir aucune défaillance jusqu'à sa durée de vie prévue par le fabricant (Wikipédia, 2015).

La fiabilité du condensateur du bus CC est donc l'aptitude à accomplir le découplage de puissance durant un certain temps donné dans des conditions bien précises. Elle correspond aussi au maintien des qualités du condensateur dans le temps. La fiabilité étant une probabilité, sa valeur est décroissante en fonction du temps (t) et elle est comprise entre 0 et 1. Elle est notée $R(t)$, Le R vient du mot anglais Reliability (fiabilité).

Par contre, la défaillance d'un élément est définie comme étant une panne lors de son fonctionnement dans des conditions bien définies.

Le condensateur du bus CC est dit en défaillance lorsque certains de ses paramètres électriques dépassent les limites prévues par le concepteur. Dans cet état, le condensateur court un grand risque de détérioration et mettant ainsi tout le système au complet en danger. Pour mesurer ce risque de défaillance, il est plus pratique d'utiliser une probabilité conditionnelle appelée taux de défaillance (ou failure rate en anglais). Il est noté $\lambda(t)$ et estime la mesure des risques pour que le condensateur ayant fonctionné durant un temps t tombe en panne pendant l'intervalle de temps $t, \Delta t$. Il s'exprime en FIT (Failure In Time), 1FIT = 1 défaillance/10⁹ heures.

De façon générale, le taux de défaillance est représenté par une courbe en forme de baignoire comme l'indique la figure 3.8 (ECIA eWorkspace, 2015):

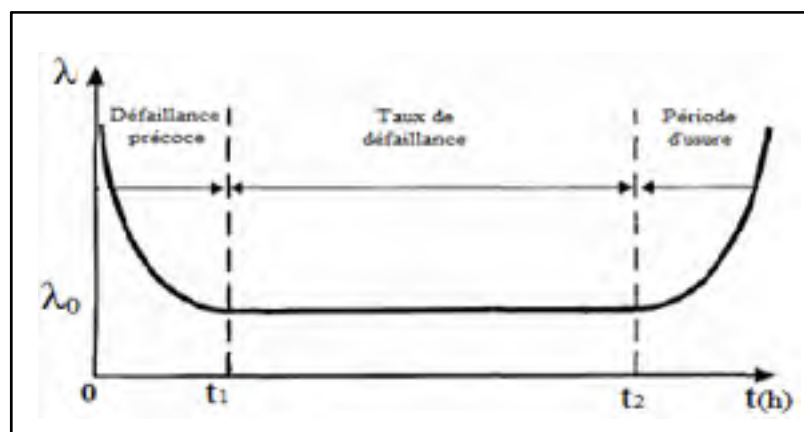


Figure 3.8 Taux de défaillance $\lambda(t)$ en fonction du temps

- La période de défaillance précoce ($t < t_1$), elle est due aux défauts de jeunesse du condensateur. Durant cette période, le taux de défaillance $\lambda(t)$ décroît.
- La période intermédiaire ($t_1 < t < t_2$), elle correspond à la durée de vie normale du condensateur. Tout au long de cette période, le taux de défaillance $\lambda(t)$ reste constant.
- La période d'usure ($t > t_2$), elle correspond à la période de vieillissement du condensateur, ce qui fait augmenter le taux de défaillance dans ce cas.

Le taux de défaillance est modélisé le plus souvent par une loi de Weibull qui donne l'expression de la fiabilité $R(t)$ sous la forme :

$$R(t) = \exp \left[- \left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^\beta \right] \quad (3.14)$$

Le taux de défaillance s'obtient en considérant $\gamma = 0$, d'où on a :

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta} \right)^{\beta-1} \quad (3.15)$$

Les trois périodes de la courbe ci-dessus en forme de baignoire peuvent être identifiées en fonction des différentes valeurs de β . Ainsi, $\beta < 1$ est la période de défaillance précoce, $\beta = 1$ correspond à la durée de vie normale et $\beta > 1$ correspond à la période de vieillissement.

3.5 Impact d'une défaillance du condensateur sur l'onduleur

L'onduleur étant un élément à rôle capital et de surcroît le plus coûteux du système photovoltaïque, il doit donc avoir une longue durée de vie équivalente à celle du générateur photovoltaïque. Pour cela, les éléments constitutifs de l'onduleur doivent être fiables et robustes, surtout l'élément de découplage de puissance qui est le condensateur situé sur son bus CC.

Le condensateur jouant un rôle important de découplage de puissance dans l'onduleur, cela l'expose à des défaillances très précoces. Le rôle principal du condensateur du bus CC de l'onduleur est de réduire au maximum l'ondulation à double fréquence en équilibrant la puissance entre le générateur photovoltaïque et le réseau.

En outre, pour comprendre l'impact de la défaillance du condensateur sur l'onduleur, une méthode possible est d'étudier l'effet d'un circuit ouvert du condensateur du bus CC sur l'onduleur. En d'autre terme, il s'agit d'étudier le comportement de l'onduleur lorsque le condensateur du bus CC est brulé.

Considérons donc un circuit typique constitué d'un générateur photovoltaïque connecté au réseau à travers un onduleur et un condensateur placé sur le bus CC de l'onduleur pour l'équilibrage de puissance. Un convertisseur boost est utilisé pour amplifier la tension fournie par le générateur photovoltaïque. L'étude consiste à comparer le comportement du système global en particulier de l'onduleur lorsque le condensateur du bus CC fonctionne normalement avec le cas où le condensateur du bus CC est en panne, il sera simplement considéré comme un circuit ouvert. Le circuit de l'étude est représenté par la figure 3.9:

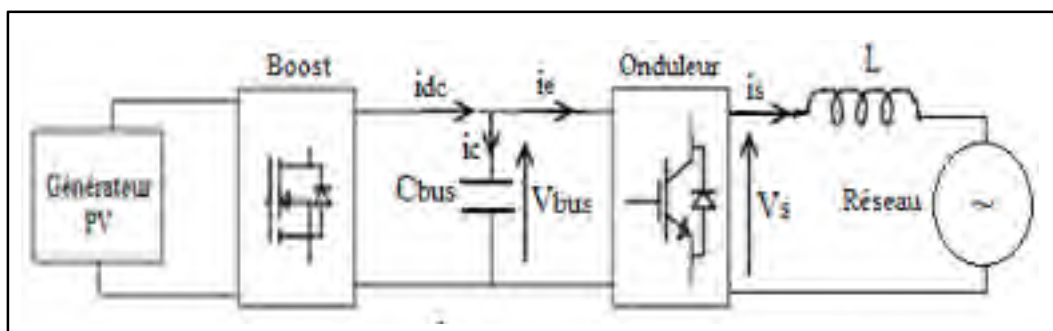


Figure 3.9 Système photovoltaïque connecté au réseau

A partir du circuit de la figure 3.9, il est possible d'écrire les équations des tensions et des courants comme suit :

$$V_S = V_L + V_{Rés} \quad (3.16)$$

$$i_e = i_{dc} - i_c \quad (3.17)$$

La tension U_{dc} est continue, cependant la tension V_S est alternative et elle est égale à $\pm V_{bus}$ en fonction des états des commutateurs de l'onduleur. De même, le courant i_e est égal à $\pm i_s$ en fonction des états des commutateurs de l'onduleur.

Supposons maintenant que le condensateur du bus CC soit en panne, c'est-à-dire qu'il est brulé. On constate que la tension $V_{Rés}$ ne changera pas car le condensateur est monté en parallèle sur le bus CC de l'onduleur. Par contre, le courant i_c s'annule d'où on a :

$$i_e = i_{dc} \quad (3.18)$$

Ces différents états peuvent être simulés sur MATLAB ce qui permettra d'observer l'impact de la défaillance du condensateur du bus CC sur le système en général et de l'onduleur en particulier.

Pour la simulation, le condensateur du bus CC fonctionne normalement jusqu'à 1s et par la suite il est mis en circuit ouvert. Cela veut dire qu'à partir de 1s, le courant ne traverse plus le condensateur du bus CC est l'énergie issue du générateur photovoltaïque après avoir été amplifiée par le convertisseur boost est directement envoyée à l'onduleur. Le schéma de simulation sous Simulink de MATLAB est donné en ANNEXEII.

La figure 3.10 donne le résultat de la simulation, où l'on peut observer l'allure des courbes avec et sans le condensateur du bus CC. Ici on s'intéresse seulement aux courants du générateur photovoltaïque et du réseau.

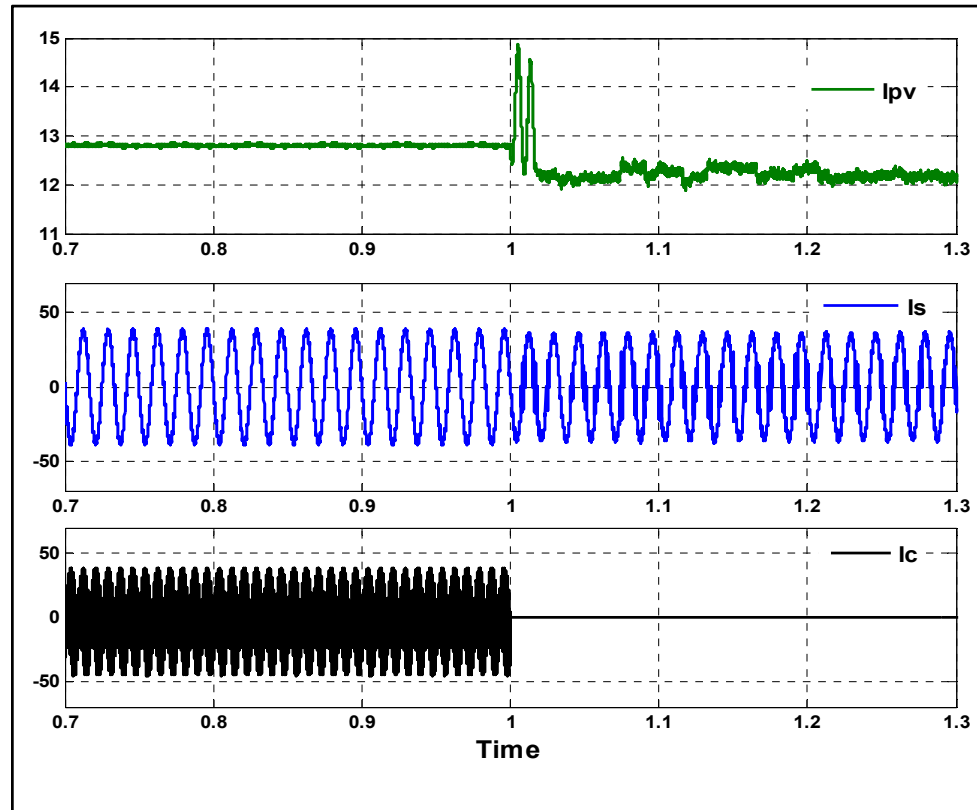


Figure 3.10 Effet du condensateur sur le courant d'entrée et de sortie

A partir de ces courbes, on observe que le courant I_c du condensateur de bus CC s'annule à partir de 1s, cela veut dire que le condensateur a été effectivement mis hors service à partir de cette période. Pour les courbes I_{pv} et I_s , elles permettent de voir que les courants du générateur photovoltaïque et de sortie de l'onduleur sont perturbés après 1s. Ils diminuent en amplitude et en plus contiennent plus d'harmonique qu'avant 1s. La diminution des courants entraîne les pertes en puissances en entrée comme en sortie.

Ces résultats permettent de conclure que le condensateur du bus CC équilibre les puissances d'entrée et de sortie. Il permet à l'onduleur aussi de réduire les harmoniques des courants. Bien que l'impact du condensateur ne soit pas très fort sur l'onduleur dû au fait qu'il soit monté en parallèle, il affecte l'efficacité du MPPT car la puissance fournie par le générateur photovoltaïque est réduite. Cela est dû au fait que lorsque le condensateur est en panne, le système photovoltaïque est privé d'une partie de la compensation de variation de tension.

3.6 Durée de vie et fin de vie d'un condensateur

La défaillance d'un composant d'électronique de puissance provient de façon générale du manque de marge dans son dimensionnement, les conditions dans lesquelles il fonctionne, les défauts de fabrication ou de son usure normale. Ainsi de façon particulière, la défaillance des condensateurs est surtout liée à leur dimensionnement, les conditions auxquelles ils sont soumis et d'autres défaillances aléatoires.

3.6.1 Durée de vie d'un condensateur

Dans la littérature, il est connu que les grands condensateurs chimiques sont plus exposés à des risques par rapport aux petits condensateurs solides. Cela veut dire que les condensateurs solides résistent mieux aux conditions de fonctionnement que les condensateurs chimiques.

La durée de vie du condensateur électrolytique est liée à sa température, à la tension appliquée à ses bornes et à son courant d'ondulation. De ce fait, la durée de vie du condensateur s'exprime en nombre d'heures de fonctionnement en fonction des variables comme la température, la tension et le courant.

3.6.1.1 Durée de vie du condensateur en fonction de la température

Pour déterminer la durée de vie du condensateur électrolytique la loi d'Arrhenius est couramment utilisée. Elle permet de constater que la durée de vie du condensateur double lorsque sa température diminue de 10 degrés. La formule est régie par l'équation 3.19:

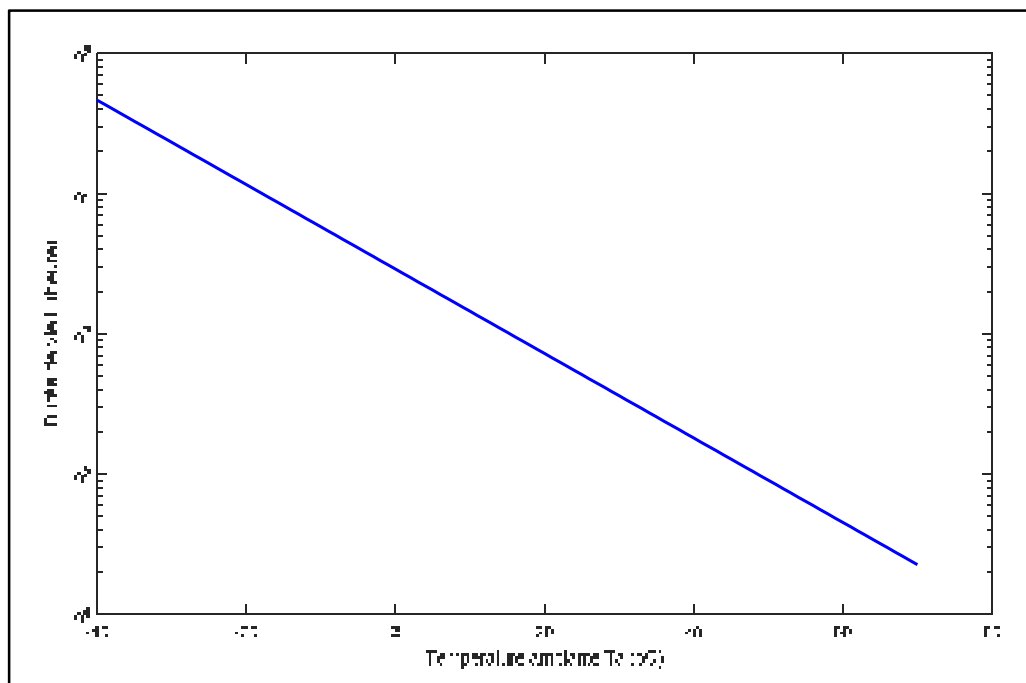
$$L = L_0 * 2^{\frac{T_{max}-T_a}{10}} \quad (3.19)$$

Pour illustrer l'évolution de la durée de vie du condensateur en fonction de la température ambiante, considérons un condensateur fourni par Digi-key Canada dont les caractéristiques sont représentées sur le tableau 3.2 (Digi-Key ELECTRONICS, 2015):

Tableau 3.2 Caractéristiques d'un condensateur électrolytique aluminium 3300uF

Famille	Condensateur aluminium électrolytique
Capacité	3300 μ F
Tension	400 V
ESR	48 m Ω
Durée de vie à 105°C	2000 heures
Température de fonctionnement	-40°C~105°C
Courant d'ondulation	9.73 A
Dimensions	(31.80mm*76.20mm*92.08mm)

A partir des caractéristiques du tableau ci-dessus, il est possible de construire la courbe de variation de la durée de vie L du condensateur en fonction de la température ambiante T_a . Pour cela, supposons que la température ambiante T_a varie entre -40°C et 70°C et la maximale $T_{max} = 105^\circ\text{C}$. On note que la durée de vie L est en semilog sur l'axe des y.

Figure 3.11 Évolution de la durée de vie L en fonction de la température ambiante T_a

Selon la caractéristique, on constate effectivement que la durée de vie L du condensateur diminue progressivement avec l'augmentation de la température ambiante T_a . Cela veut dire que plus la température ambiante à laquelle est soumise le condensateur augmente, plus il court des risques de détérioration.

Pour éviter cette réduction exponentielle de la durée de vie du condensateur, son environnement de fonctionnement doit être maintenu à une température relativement faible. Pour ce faire, il est important d'éviter toute condition qui pourrait surchauffer le condensateur.

3.6.1.2 Durée de vie du condensateur en fonction du courant

Les condensateurs électrolytiques utilisés sur le bus CC de l'onduleur souffrent du courant d'ondulation qui les traverse. Ce courant provoque l'échauffement des condensateurs dû à l'effet joule, ce qui permet de déterminer l'écart de température donné par la formule :

$$\Delta T = \frac{ESR * I^2}{\sigma * A} \quad (3.20)$$

Comme le cas précédent, il est possible de construire la variation de la température ΔT du condensateur en fonction de l'augmentation du courant ondulé qui le traverse. Sachant que l'augmentation de la température diminue la durée de vie du condensateur, si la relation entre le courant d'ondulation et la température est établie, alors il sera possible de conclure de l'impact de l'augmentation du courant d'ondulation sur la durée de vie du condensateur.

Considérons le condensateur précédent ci-dessus dont les caractéristiques sont représentées sur le tableau 1. On admet que le courant d'ondulation varie entre 0A et 15A, la conductivité thermique de l'aluminium étant de $\sigma = 237 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ et l'aire $A=0.0242316\text{m}^2$.

La caractéristique de la variation de la température ΔT en fonction de du courant d'ondulation I peut être représentée par la figure 3.12 :

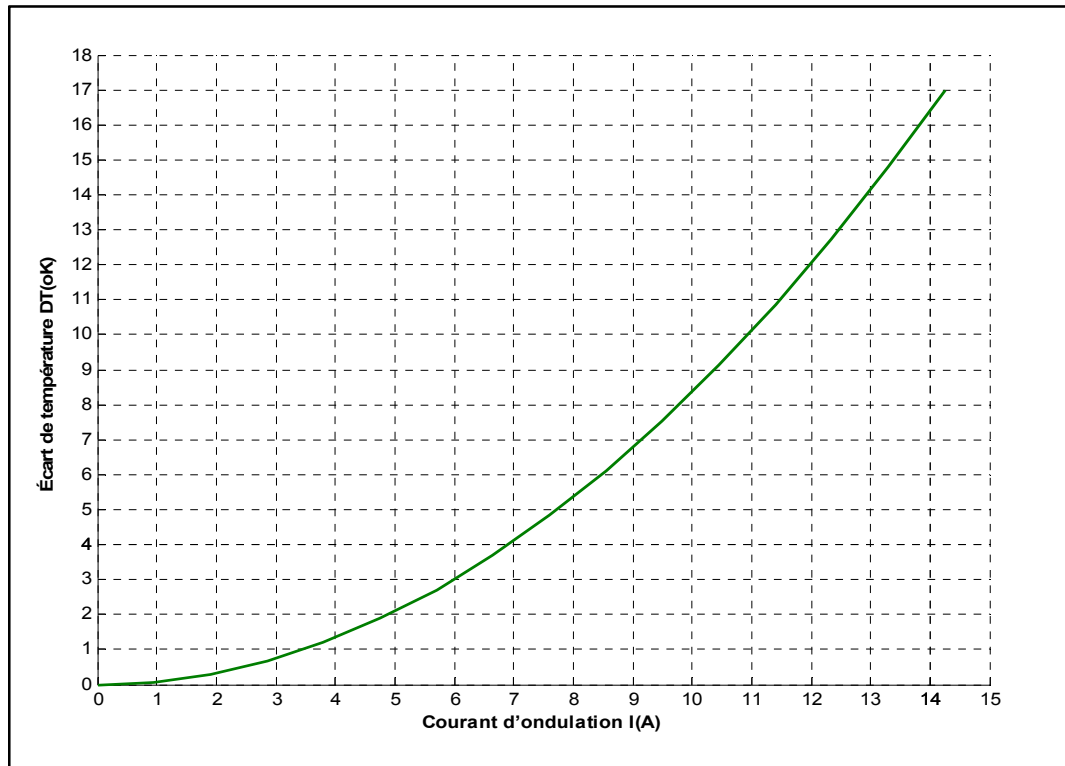


Figure 3.12 Évolution de la température en fonction du courant d'ondulation

A partir de la figure 3.12, on constate belle et bien que la température du condensateur augmente avec le courant ondulé qui le traverse. L'augmentation de cette température provoque des pertes par effet Joule dans le condensateur. Cela permet de conclure que la durée de vie L du condensateur diminue lorsque le courant ondulé augmente.

3.6.1.3 Durée de vie du condensateur en fonction de la tension

Comparativement au courant d'ondulation, la durée de vie du condensateur dépend peu de la tension à ses bornes. Cependant, dans la littérature il est recommandé que la tension aux bornes du condensateur n'excède pas 80% de sa tension nominale. Bien que la tension ait peu d'impact sur le condensateur, il est formellement interdit de le polariser dans le circuit.

En effet, pour le condensateur placé aux bornes du bus CC de l'onduleur, sa tension est régulée par le contrôleur de l'onduleur. Cela lui permet d'avoir à chaque instant à ses bornes

une variation constante de tension. D'où l'effet de la variation de tension sur la durée de vie du condensateur peut être minimisé.

3.6.1.4 Relation entre la capacité et la tension d'ondulation

La relation entre la capacité et la tension d'ondulation du condensateur peut être obtenue par la simulation d'un circuit constitué d'un onduleur monophasé alimenté par une source continue. Cette méthode est similaire à celle employée par (Lifeng et al., 2011), à la seule différence que la simulation dans leur cas a été faite avec convertisseur boost.

Il s'agira d'observer la variation de la tension aux bornes du condensateur du bus CC avec différentes valeurs de capacité. Le schéma de l'onduleur monophasé alimenté par la source continue est représenté par la figure 3.13 :

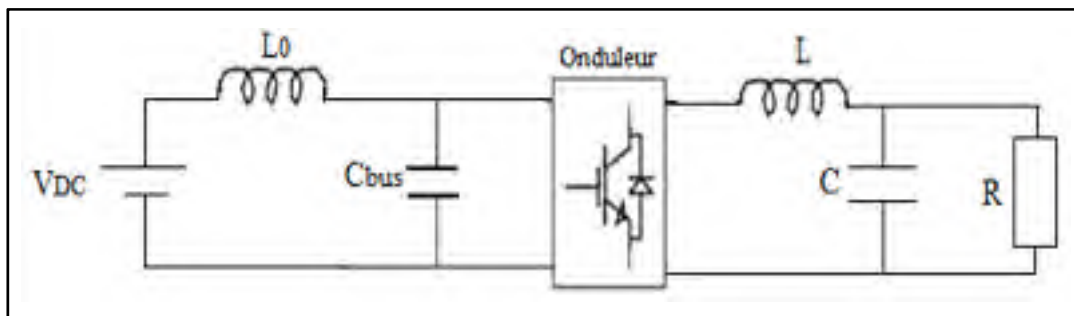


Figure 3.13 Schéma onduleur monophasé alimenté par une source continue

Pour effectuer la simulation du circuit sous Matlab, les paramètres suivants peuvent être considérés : tension continue à l'entrée $V_{DC} = 24V$, la bobine $L_0 = 5mH$, la bobine $L=5mH$, le condensateur $C = 1\mu F$, la charge $R = 10\Omega$ et le condensateur du bus CC varie entre $1500\mu F$ et $300\mu F$. Le schéma de simulation sous Simulink de MATLAB est donné en ANNEXEIII.

En fonction des différentes valeurs du condensateur du bus CC, observons le comportement de la tension ondulée à ses bornes.

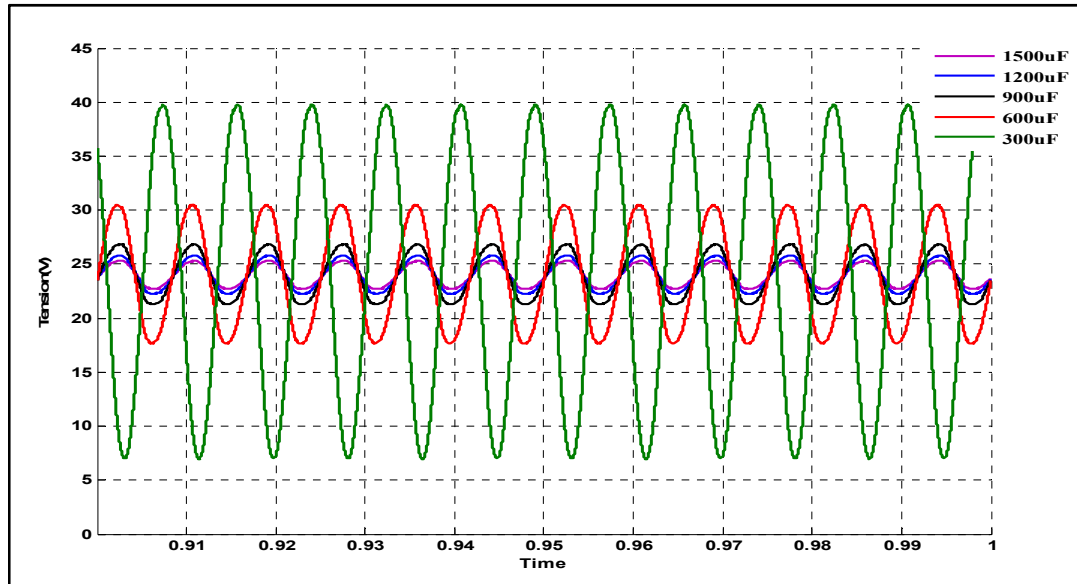


Figure 3.14 Variation de la tension ondulée en fonction de la capacité

Selon le graphe de la figure ci-dessus, il est constaté que lorsque la capacité du condensateur diminue, sa la tension ondulée augmente. Les tensions ondulées relevées en fonction de la capacité du condensateur sont données par le tableau 3.3 :

Tableau 3.3 Valeurs tension ondulée en fonction de la capacité

Capacité (μF)	Tension ondulée (V)
1500	2.55
1200	3.5
900	5.55
600	12.75
300	33.00

En ajustant les valeurs obtenues par simulation de la tension ondulée en fonction de la capacité du condensateur, on obtient la courbe représentée sur la figure 3.15.

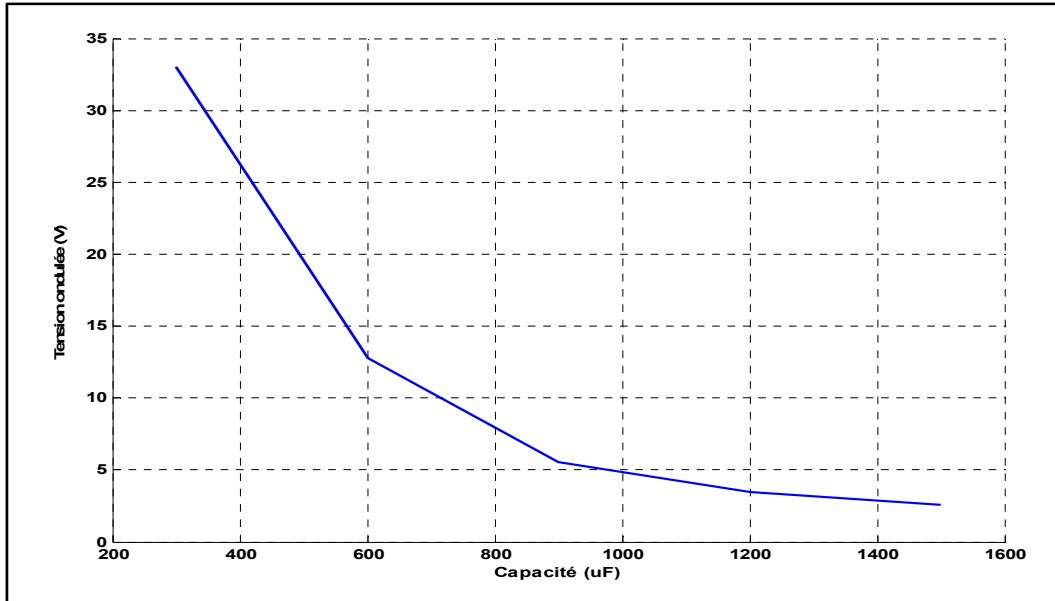


Figure 3.15 Courbe des valeurs de la tension ondulée en fonction de la capacité

Un fois de plus, cette courbe confirme que lorsque la capacité du condensateur décroît, la tension d'ondulation à ses bornes augmente. Selon la courbe, lorsque la réduction de la capacité du condensateur est d'au moins 60% de sa valeur idéale, l'augmentation de la tension d'ondulation est relativement faible. Par contre, lorsque la capacité est réduite en dessous de 20% de sa valeur idéale, la tension d'ondulation augmente considérablement.

D'après ces résultats, lorsque la capacité du condensateur est réduite jusqu'à 20%, cela lui met dans un état de défaillance, vue l'augmentation considérable des ondulations. Il est donc préférable de maintenir la capacité du condensateur au-dessus de 60% de sa valeur idéale.

3.6.1.5 Relation entre la résistance équivalente série et la tension d'ondulation

Le circuit de simulation de la relation entre la résistance équivalente série et la tension d'ondulation est identique au cas précédent, sauf que ici la capacité est constante et la résistance série équivalente varie. Alors l'étude ici est d'observer la variation de la tension aux bornes du condensateur du bus CC avec différentes valeurs de la résistance série équivalente (ESR). Cette méthode a été utilisée aussi par (Lifeng et al., 2011) mais avec un convertisseur boost à la place de l'onduleur.

Pour effectuer la simulation du circuit sous Matlab, les paramètres sont identiques au cas précédents. La capacité du condensateur du bus CC est $1500\mu\text{F}$ et sa résistance série équivalente ESR idéale est de $80\text{m}\Omega$. Mais pour la simulation, la valeur de la résistance série équivalente varie entre $80\text{m}\Omega$ et $400\text{m}\Omega$. Le schéma de simulation sous Simulink de MATLAB est également donné en ANNEXEIII.

Pour différentes valeurs de la résistance série équivalente, observons le comportement de la tension ondulée aux bornes du condensateur du bus CC.

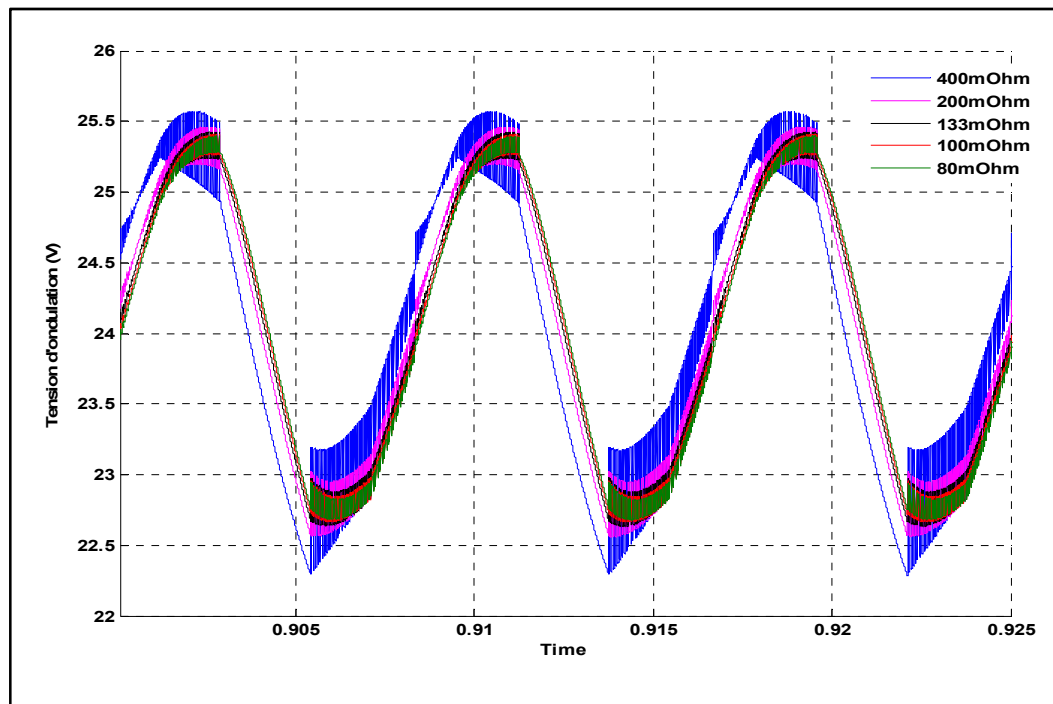


Figure 3.16 Variation de la tension ondulée en fonction de la résistance série équivalente

Une observation minutieuse de la courbe de la figure 3.16 montre que lorsque la résistance série équivalente du condensateur augmente, sa tension ondulée aussi augmente. Relevons sur le tableau ci-dessous les valeurs de la tension ondulée en fonction des différentes valeurs de la résistance série équivalente du condensateur.

Tableau 3.4 Valeurs tension ondulée en fonction de la résistance série équivalente

Résistance série équivalente (mΩ)	Tension ondulée (V)
80	2.65
100	2.69
133	2.74
200	2.86
400	3.08

Comme le cas précédent, en ajustant les valeurs obtenues par simulation de la tension ondulée en fonction de la résistance série équivalente du condensateur, on obtient la courbe représentée sur la figure 3.17 :

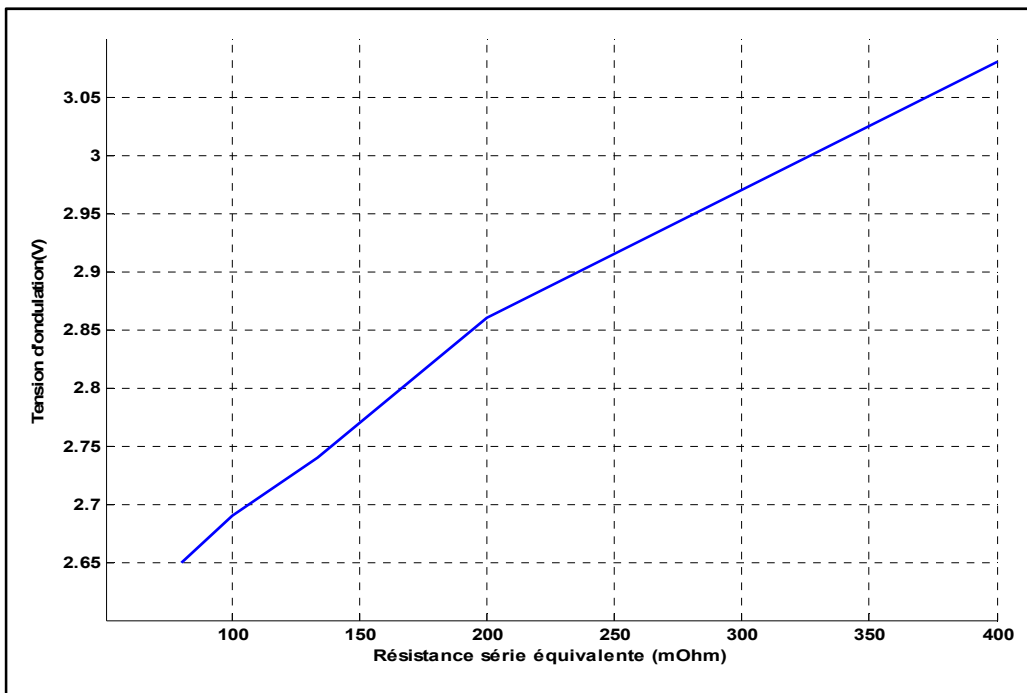


Figure 3.17 Courbe de la tension ondulée en fonction de la résistance série équivalente

Selon la courbe de la tension ondulée en fonction de la résistance série équivalente du condensateur, on constate la tension ondulée augmente légèrement avec la résistance série

équivalente et la courbe est presque linéaire. Ces résultats prouvent que lorsque la résistance série équivalente du condensateur du bus CC de l'onduleur augmente, il court le risque de défaillance dû à l'augmentation des ondulations.

3.6.2 Fin de vie d'un condensateur

En se basant sur la durée de vie du condensateur et les causes de ses différentes défaillances, la fin de vie d'un condensateur est surtout basée sur la modification de certains de ses paramètres. A partir des simulations effectuées, la fin de vie du condensateur est surtout liée à la modification de sa capacité ou de sa résistance série équivalente. Lorsque la capacité du condensateur diminue jusqu'à 20% ou lorsque sa résistance équivalente série augmente, on parle de fin de vie du condensateur car il sera en état de défaillance.

3.7 Conclusion

Dans ce chapitre, il était question de condensateurs utilisés sur le bus cc de l'onduleur. De ce fait nous nous sommes intéressés de l'utilité et des facteurs qui influencent la durée de vie de ces condensateurs. Ces derniers sont divisés en deux grands groupes que sont les condensateurs chimiques et les condensateurs solides. De façon générale, les condensateurs chimiques ont une grande capacité mais subissent beaucoup face aux contraintes durant leur fonctionnement. Cependant, les condensateurs solides ont pour la plupart de petite capacité et résistent face aux contraintes durant leur fonctionnement.

Le rôle du condensateur sur le bus CC de l'onduleur est d'emmagasiner de l'énergie qui servira plus tard, d'absorber les courants parasites et aussi réduire au maximum les ondulations de tension causées par les commutateurs de l'onduleur. De plus, l'efficacité de la commande MPPT du système photovoltaïque est en partie due au condensateur du bus CC de l'onduleur.

Le rôle important joué par le condensateur du bus CC lui expose à des risques de détérioration. Les contraintes qui nuisent considérablement à la durée de vie du condensateur

sont surtout température, la tension appliquée à ses bornes et au courant d'ondulation. Tous ces paramètres modifient les valeurs internes comme la capacité et la résistance série équivalente du condensateur qui finit par se détériorer.

CHAPITRE 4

OPTIMISATION DU FONCTIONNEMENT DES CONDENSATEURS DU BUS CC DE L'ONDULEUR

4.1 Introduction

Le système photovoltaïque solaire est l'une des énergies renouvelables la plus propre et dont l'exploitation pourrait profiter à long terme aux futures générations. Mais de nos jours, son rendement est encore faible en termes de rapport production-coût. Cependant, les recherches sont prometteuses et ce rendement pourrait augmenter dans un bref délai. L'amélioration de l'efficacité des panneaux solaires photovoltaïques est surtout basée sur la technique de recherche du point de puissance maximale, car en ce point, le générateur photovoltaïque fournit toujours le maximum de sa production.

Le convertisseur boost CC/CC est utilisé comme une interface entre le générateur photovoltaïque et la charge pour transférer le maximum de puissance. Toutefois, l'onduleur utilisé pour la conversion de l'énergie continue en énergie alternative génère des harmoniques de second ordre qui perturbent le point de puissance maximale. Pour remédier à cela, on utilise souvent des condensateurs de grande capacité ou des circuits additionnels pour compenser les ondulations (Krein et Balog, 2009).

Dans ce chapitre, le circuit proposé est combiné à un circuit additionnel pour compenser les harmoniques. La commande utilisée pour ce circuit additionnel permet de réduire la capacité des condensateurs et de ce fait, il est possible d'utiliser de petits condensateurs longue durée de vie.

4.2 Configuration du circuit proposé

Les éléments de stockage d'énergie comme le condensateur sont utilisés dans les systèmes photovoltaïques autonomes ou connectés au réseau pour le découplage de puissance. Ils

permettent la réduction des harmoniques de second ordre du courant du générateur photovoltaïque et les harmoniques de troisième ordre du courant du réseau.

Dans ce document, le travail de recherche effectué considère un circuit supplémentaire combiné au circuit classique pour assurer l'équilibre de puissance, la réduction des ondulations et de la taille du condensateur utilisé sur le bus CC de l'onduleur. Le circuit classique est composé d'un générateur photovoltaïque, d'un convertisseur boost et d'un onduleur connecté à une charge ou au réseau. Le circuit supplémentaire est placé entre le convertisseur CC/CC boost et l'onduleur.

4.2.1 Schéma complet du circuit proposé

La configuration de ce circuit supplémentaire et de sa commande permettent l'utilisation de condensateurs de taille minimale qui supportent une forte ondulation de tension et d'autres contraintes. La figure 4.1 correspond à la configuration générale du circuit proposé en mode connecté au réseau et la figure 4.2 le mode autonome.

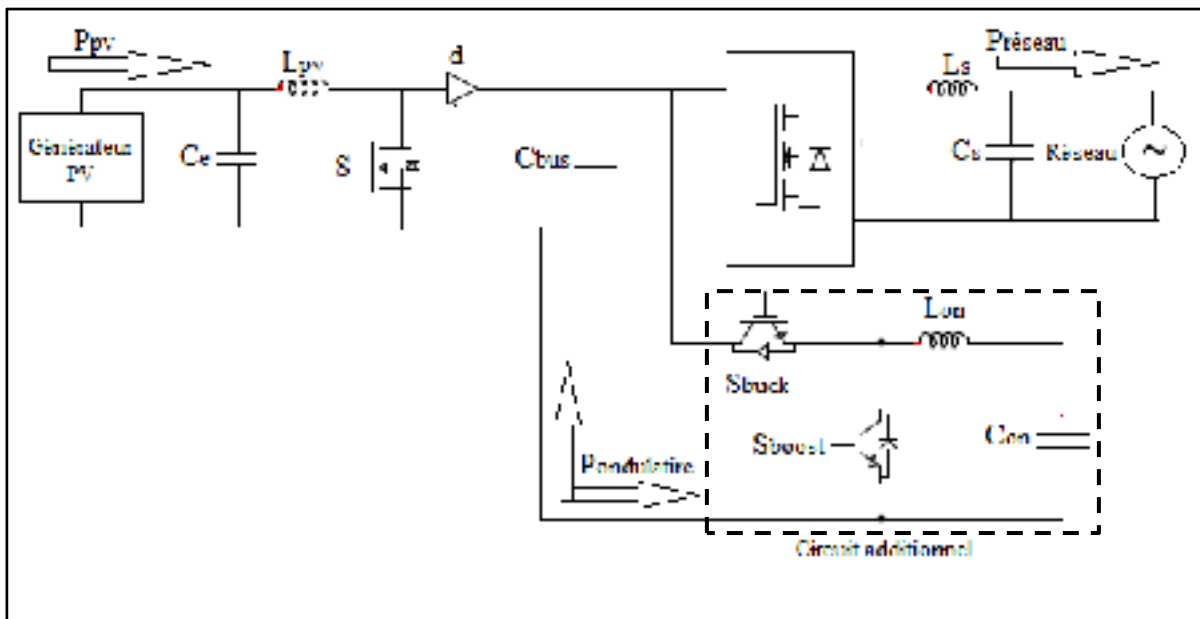


Figure 4.1 Configuration générale du circuit proposé connecté au réseau

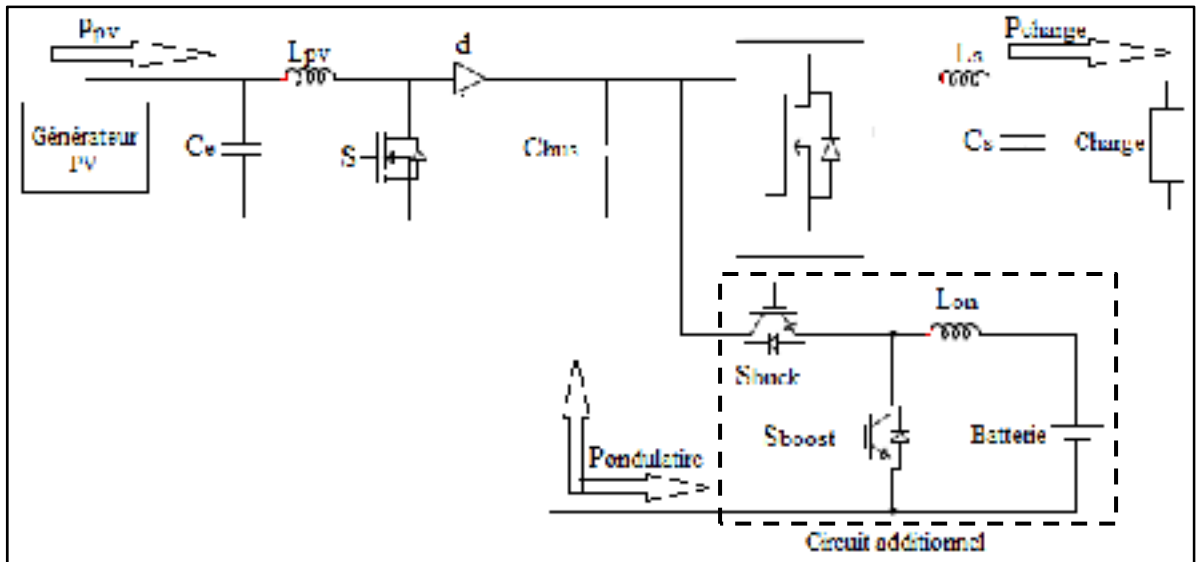


Figure 4.2 Configuration générale du circuit proposé en mode autonome

Le principe de fonctionnement de ce circuit ci-dessus est très simple. Ce principe est lié à la fois à la source continue et à la source alternative. Le condensateur du bus CC et le circuit additionnel assurent simultanément le découplage de puissance.

4.2.2 Circuit additionnel de découplage de puissance

Le but du circuit additionnel de découplage est de réduire l'ondulation de tension du condensateur du bus CC, les harmoniques du courant du générateur photovoltaïque et aussi les harmoniques du courant de l'onduleur afin de permettre une éventuelle injection dans le réseau. Aussi ce circuit est à mesure de filtrer les composantes nuisibles émises par les commutateurs.

Comme l'indique la figure 4.3, le circuit additionnel de découplage comprend deux éléments de gestion d'énergie : une bobine L_{on} et un condensateur C_{on} . Il comporte aussi deux commutateurs dont l'un assure le transfert d'énergie en mode buck (S_{buck}) et l'autre le transfert d'énergie en mode boost (S_{boost}).

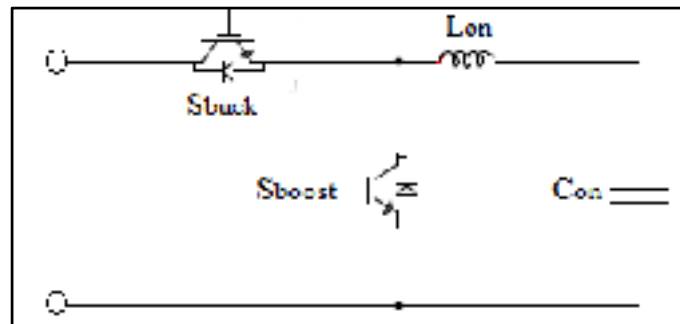


Figure 4.3 Circuit additionnel de découplage

4.3 Principe de fonctionnement du circuit additionnel de découplage

La configuration générale du circuit proposé est représentée par les deux figures 4.1 et 4.2 ci-dessus où le circuit de découplage qui est un circuit auxiliaire se comporte comme un convertisseur buck-boost. Dans la configuration d'un tel circuit, la tension du bus CC est contrôlée par la commande de l'onduleur et la puissance ondulatoire générée par cet onduleur est contrôlée par le circuit additionnel de découplage (Wang et al., 2011).

Le circuit auxiliaire de découplage de puissance est un circuit simple composé de deux commutateurs, d'une bobine et d'un condensateur. On note que le condensateur permet de stocker de l'énergie qui sera utilisée plus tard pour équilibrer la différence de puissance entre les différentes sources. La bobine assure le transfert d'énergie entre le condensateur du circuit de découplage et le bus CC de l'onduleur.

Le circuit additionnel se comportant comme un buck-boost, son principe de fonctionnement peut être scindé en deux phases dont la phase de charge (ou mode buck) et de décharge (ou mode boost) du condensateur auxiliaire.

4.3.1 Mode buck

Le mode buck ou phase de charge du condensateur du circuit auxiliaire est schématisé par la figure 4.4, où le sens de circulation de la puissance dans le circuit auxiliaire est représenté suivant la ligne verte.

Durant ce mode, le commutateur S_{buck} est activé et le commutateur S_{boost} désactivé. Le commutateur S_{buck} contrôle donc le transfert des ondulations du bus CC dans le condensateur C_{on} du circuit auxiliaire par l'intermédiaire de la bobine L_{on} , ce qui va réduire bien entendu l'ondulation de tension du condensateur du bus CC. Ce phénomène permet au bus CC de charger la bobine et le condensateur du circuit auxiliaire de découplage de puissance.

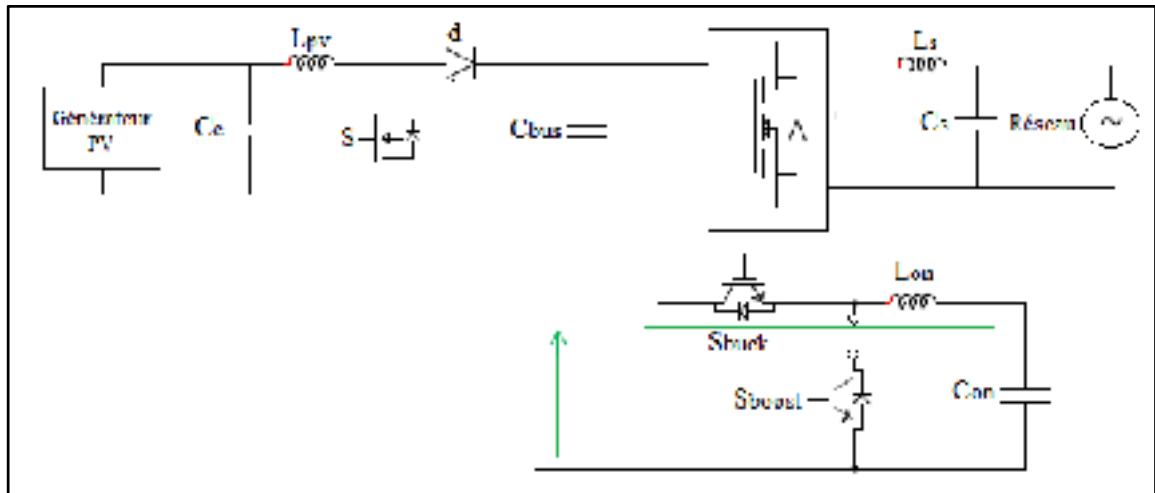


Figure 4.4 Configuration du circuit en mode buck

4.3.2 Mode boost

Le mode boost ou phase de décharge du condensateur du circuit auxiliaire s'effectue lorsque le commutateur S_{buck} est ouvert et le commutateur S_{boost} fermé. Ce mode est représenté par la figure 4.5.

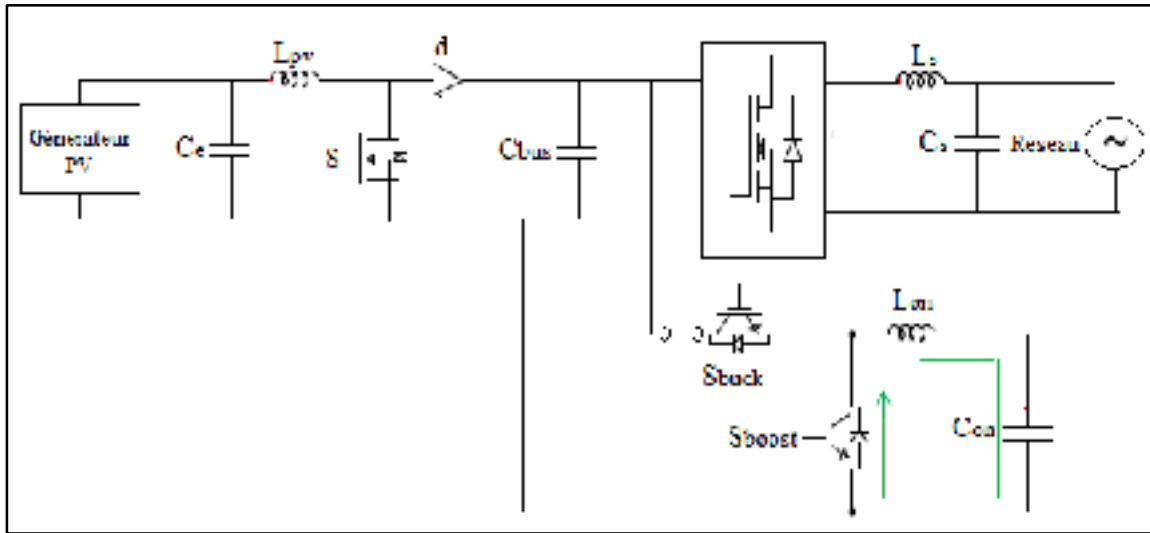


Figure 4.5 Configuration du circuit en mode boost

Dans cette phase, le commutateur S_{buck} est désactivé dans l'objectif d'empêcher les ondulations du condensateur C_{on} de retourner vers le bus CC de l'onduleur et durant cette période, la bobine L_{on} transfère son énergie au condensateur C_{on} . Au même moment, dès que le commutateur S_{boost} est activé, le condensateur C_{on} recharge la bobine L_{on} . A la fin de cette période un cycle reprend et ainsi de suite.

4.4 Modèle du circuit proposé

Le circuit proposé dans ce travail de recherche est une solution adéquate qui permet de répondre de façon globale aux problèmes liées aux ondulations de tension et aux harmoniques de courant. Ce circuit étant composé de sources d'énergie et des unités de conversion de puissance, sa modélisation se fera suivant chacune de ses parties constitutives.

4.4.1 Modélisation du convertisseur boost

Le convertisseur CC/CC boost encore appelé hacheur élévateur, hacheur survolteur ou hacheur parallèle permet d'élever la tension continue issue du générateur photovoltaïque à une valeur désirée. La source d'entrée est un courant continu fourni par une inductance en

série avec une la source de tension continue et la sortie correspond à une tension continue fournie par un condensateur en parallèle avec la charge.

Le schéma classique du convertisseur boost est représenté sur la figure 4.6 où S est un commutateur contrôlé par une commande.

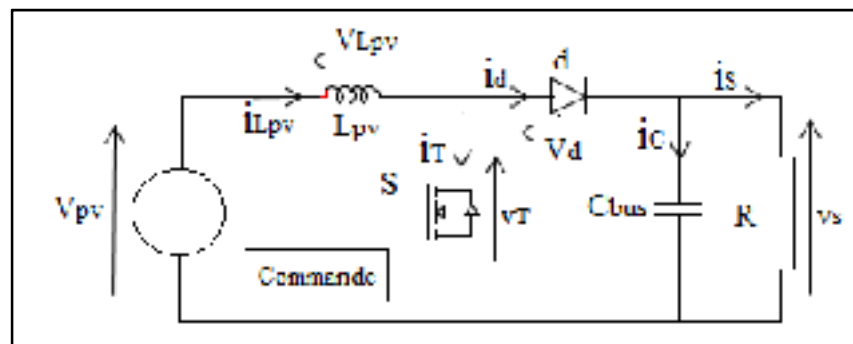


Figure 4.6 Schéma classique du convertisseur boost (Ferrieux et Forest, 1987)

4.4.1.1 Principe

Le principe de fonctionnement du convertisseur boost est basé sur la commutation de l'interrupteur S. Cela donne lieu à deux états pour le commutateur S : l'état fermé où S est activé et l'état ouvert où S est bloqué.

Durant la période T_{ON} , le commutateur S est fermé et la diode D est bloquée. La source de tension continue charge la bobine L_{pv} à travers S, d'où l'augmentation linéaire du courant de la bobine L_{pv} . L'énergie emmagasinée par cette bobine L_{pv} servira plus tard à charger le condensateur C qui, en ce moment doit fournir l'énergie nécessaire à la charge.

Durant la période T_{OFF} , le commutateur S est bloqué et la diode D est passante. La source de tension continue et la bobine L alimente le condensateur C et la charge R. Durant cette période, le condensateur C emmagasine de l'énergie qu'il restituera plus tard à la charge R. Un nouveau cycle reprend et ainsi de suite (Ferrieux et Forest, 1987).

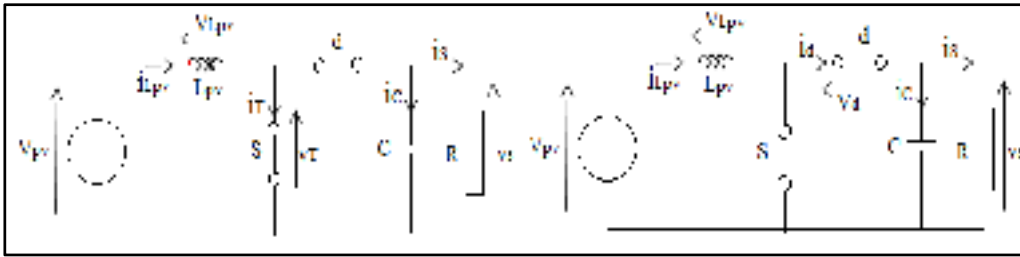


Figure 4.7 Période TON et période TOFF respectivement

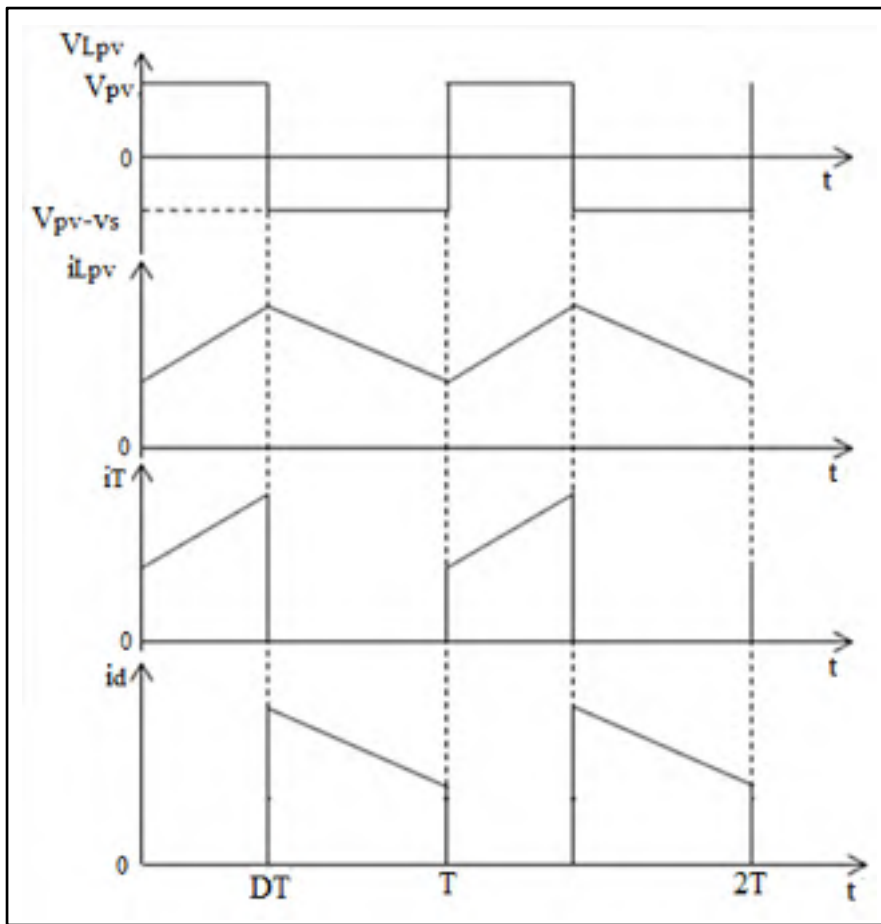


Figure 4.9 Caractéristique de la tension et du courant du convertisseur boost

La figure 4.10 représente les formes d'onde du courant et de la tension du convertisseur boost. On constate que le commutateur S est fermé durant la période $T_{ON} = DT$ avec $0 \leq t \leq DT$ et est ouvert à $T_{OFF} = (1-D)T$ avec $DT \leq t \leq T$.

Il est bien clair que lorsque le commutateur S est fermé, c'est-à-dire sur la position ON, le courant de la bobine L augmente de façon linéaire et en ce moment, la diode D est bloquée.

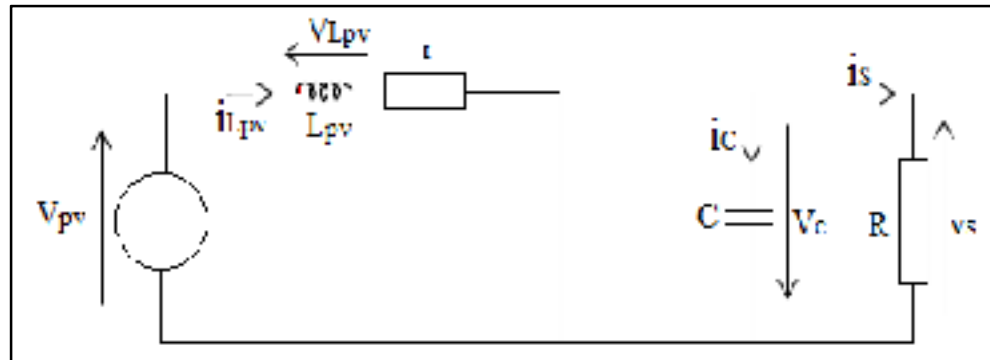


Figure 4.10 Circuit équivalent $0 \leq t \leq DT$

Par contre, lorsque S devient ouvert, c'est-à-dire sur la position OFF, le courant de la bobine diminue linéairement, ce qui signifie qu'elle restitue l'énergie emmagasinée précédemment. Pendant cette période, la diode D est passante

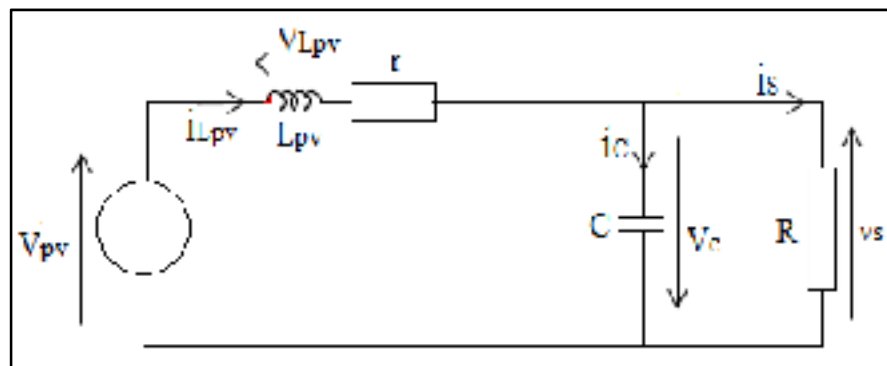


Figure 4.11 Circuit équivalent $DT \leq t \leq T$

4.4.1.2 Modèle mathématique

Le diagramme du circuit du convertisseur boost d'un système photovoltaïque peut être schématisé comme l'indique la figure 4.12. Sur ce diagramme, D représente la fonction de commutation du commutateur S pour contrôler la puissance de sortie du générateur

photovoltaïque. La valeur de D varie entre 0 et 1. Lorsque $D = 1$, le commutateur est fermé et lorsque $D = 0$, le commutateur est ouvert.

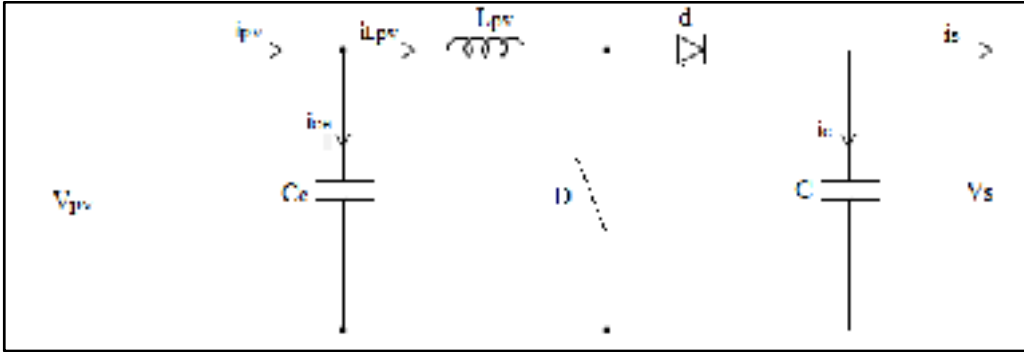


Figure 4.12 Diagramme du circuit du convertisseur boost d'un système photovoltaïque

Selon l'état du commutateur S , les équations de courants et tensions peuvent s'écrire :

$$V_{pv} = (1 - D)V_S + L_{pv} \frac{di_{L_{pv}}}{dt} \quad (4.1)$$

$$\frac{di_{L_{pv}}}{dt} = \frac{1}{L_{pv}} V_{pv} - \frac{1}{L_{pv}} (1 - D)V_S$$

$$i_{L_{pv}} = i_{pv} - C_e \frac{dV_{pv}}{dt} \quad (4.2)$$

$$\frac{dV_{pv}}{dt} = \frac{1}{C_e} i_{pv} - \frac{1}{C_e} i_{L_{pv}}$$

$$i_S = (1 - D)i_{L_{pv}} - C \frac{dV_S}{dt} \quad (4.3)$$

$$\frac{dV_S}{dt} = \frac{1}{C} (1 - D)i_{L_{pv}} - \frac{1}{C} i_S$$

En posant $x_1 = V_{pv}$, $x_2 = i_{L_{pv}}$ et $x_3 = V_S$, les équations (4.1), (4.2) et (4.3) peuvent s'écrire:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= \frac{1}{C_e} i_{pv} - \frac{1}{C_e} x_2 \\ \dot{x}_2 &= \frac{1}{L_{pv}} x_1 - \frac{1}{L_{pv}} (1 - D) x_3 \\ \dot{x}_3 &= \frac{1}{C} (1 - D) x_2 - \frac{1}{C} x_3 \end{aligned} \quad (4.4)$$

Sous forme matricielle, ces équations deviennent :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{C_e} & 0 \\ \frac{1}{L_{pv}} & 0 & \frac{1}{L_{pv}} (1 - D) \\ 0 & \frac{1}{C} (1 - D) & -\frac{1}{C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{C_e} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} i_{pv} \quad (4.5)$$

4.4.2 Modélisation de la puissance ondulatoire

Pour modéliser la puissance ondulatoire, supposons que le déphasage entre le courant et la tension de sortie du réseau causé par la chute de tension dans la bobine L_{on} est Θ . En supposant aussi que les convertisseurs sont sans pertes, alors la tension, le courant et la puissance sont obtenus par les expressions suivantes :

$$v_s(t) = V_s \sin(\omega t) \quad (4.6)$$

$$i_s(t) = I_s \sin(\omega t - \Theta) \quad (4.7)$$

La puissance instantanée est alors :

$$p_{rés}(t) = \frac{V_s I_s}{2} \cos \theta - \frac{V_s I_s}{2} \cos(2\omega t - \theta) \quad (4.8)$$

Pour mettre en évidence la puissance ondulatoire, il est important de connaître l'énergie de la bobine L du côté du réseau. D'où :

$$E_L = \frac{1}{2} L i_s^2 = \frac{1}{2} L I_s^2 \sin^2(\omega t - \theta) \quad (4.9)$$

$$P_L = \frac{dE_L}{dt} = \frac{1}{2} \omega L I_s^2 \sin(2\omega t - 2\theta) \quad (4.10)$$

La puissance totale obtenue en sortie en tenant compte de la puissance de la bobine est donnée par la formule (Wang et al., 2011):

$$p_s(t) = \frac{V_s I_s}{2} \cos(\theta) - \left(\frac{V_s I_s}{2} \cos(2\omega t - \theta) + \frac{\omega L I_s^2}{2} \sin(2\omega t - 2\theta) \right) \quad (4.11)$$

Selon l'équation (4.11), la puissance de sortie instantanée est constituée d'une partie constante et d'une partie ondulatoire notée respectivement (Wang et al., 2011):

$$P = \frac{V_s I_s}{2} \cos(\theta) \quad (4.12)$$

$$p_{on}(t) = - \left(\frac{V_s I_s}{2} \cos(2\omega t - \theta) + \frac{\omega L I_s^2}{2} \sin(2\omega t - 2\theta) \right) \quad (4.13)$$

La puissance ondulatoire P_{on} peut être encore écrite sous la forme suivante :

$$p_{on}(t) = \sqrt{\left(\frac{V_s I_s}{2}\right)^2 \cos^2 \theta + \left(\frac{\omega L I_s^2}{2} - \frac{V_s I_s}{2} \sin(2\omega t - 2\theta)\right)^2} \sin(2\omega t - 2\theta + \alpha) \quad (4.14)$$

$$\text{Avec } \alpha = \frac{V_s I_s \cos(\theta)}{\omega L I_s^2 - V_s I_s \sin(\theta)}$$

La puissance P_{on} constitue la puissance ondulatoire qui est une puissance harmonique de second ordre. Cette puissance perturbe la puissance constante du générateur photovoltaïque qui voit son courant contenir des harmoniques de second ordre.

4.4.3 Modélisation du circuit de découplage de puissance

Le circuit de découplage proposé dans cette étude se comporte comme un circuit buck-boost. Son fonctionnement est basé sur le principe d'injection des courants harmoniques dans le réseau. Ces composants harmoniques des courants sont utilisés comme courant de référence pour le control du circuit de découplage. De plus, la boucle de régulation de la tension du condensateur du circuit de découplage permet de compenser les pertes dans ses éléments constitutifs.

Le circuit de découplage de puissance devant équilibrer la puissance en réduisant les ondulations, il est important de bien dimensionner le condensateur du bus CC de l'onduleur. Pour y arriver il faut connaître d'abord la puissance ondulatoire qui a été déjà calculée ci-dessus.

En effet dans le système photovoltaïque classique connecté au réseau sans circuit additionnel de découplage de puissance, un condensateur de grande capacité est utilisé dans le bus CC de l'onduleur pour assurer le découplage de puissance. Pour déterminer la capacité de ce

condensateur, il faut faire l'hypothèse que la puissance fournie par le condensateur doit être égale à la puissance ondulatoire calculée ci-dessus.

La puissance du condensateur a été calculée dans le chapitre III en tenant compte du terme ondulatoire de sa tension. En identifiant la puissance du condensateur à celle de la puissance ondulatoire et en tenant compte des différentes approximations, la capacité du condensateur est donnée par :

$$C_{bus} = \frac{\sqrt{P^2 + \left[\frac{2\omega LP^2}{V_s^2 \cos^2 \theta} - P \frac{\sin(2\omega - 2\theta)}{\cos(\theta)} \right]^2}}{2\pi f V_{bus} \Delta V_{bus}} \quad (4.15)$$

L'équation (4.15) de la capacité du condensateur établie la relation entre la tension du bus CC, de l'ondulation de tension désirée et de la puissance du réseau. On note que $2V_{on} = \Delta V_{bus}$.

En considérant une puissance $P = 3\text{kW}$ et une tension $V_{bus} = 400\text{V}$ avec une variation de 2%, alors le condensateur nécessaire est environ $1250\mu\text{F}$.

Le condensateur nécessaire dans ce cas est un condensateur de grande capacité. Pour réduire sa taille, un circuit de découplage de puissance est alors monté en parallèle avec le condensateur du bus CC de l'onduleur. Ce circuit additionnel doit fournir la puissance nécessaire pour équilibrer la différence de puissance entre le générateur photovoltaïque et le réseau. La puissance fournie par le circuit additionnel est la somme de la puissance sa bobine L_{on} et de condensateur C_{on} (Harb, Mirjafari et Balog, 2013), d'où :

$$p_{ad}(t) = p_{Lon}(t) + p_{Con}(t)$$

$$p_{ad}(t) = v_{Lon}(t)i_{Lon}(t) + v_{Con}(t)i_{Con}(t) \quad (4.16)$$

La bobine L_{on} et le condensateur C_{on} étant montés en série, le courant qui les traverse est identique et ainsi on a :

$$i_{L_{on}}(t) = i_{C_{on}}(t) = C_{on} \frac{dv_{C_{on}}(t)}{dt} = V_{C_{on}} C_{on} \omega \cos(\omega t + \psi) \quad (4.17)$$

La tension aux bornes de la bobine L_{on} est :

$$v_{L_{on}}(t) = L_{on} \frac{di_{L_{on}}(t)}{dt} = -V_{C_{on}} C_{on} \omega^2 \sin(\omega t + \psi) \quad (4.18)$$

La puissance fournie par le circuit additionnel de découplage de puissance est alors :

$$p_{ad}(t) = \frac{V_{C_{on}}^2 C_{on} \omega (1 - \omega^2 L_{on} C_{on})}{2} \sin[2(\omega t + \psi)] \quad (4.19)$$

Le rôle du circuit additionnel de découplage de puissance étant d'annuler les ondulations, on peut identifier l'équation (4.14) de la puissance d'ondulation à l'équation (4.19) de la puissance fournie par le circuit additionnel. D'où la capacité du condensateur C_{on} est :

$$C_{on} = \frac{2 \sqrt{P^2 + \left[\frac{2\omega LP^2}{V_s^2 \cos^2 \Theta} - P \frac{\sin(2\omega - 2\Theta)}{\cos(\Theta)} \right]^2}}{V_{C_{on}}^2 C_{on} \omega (1 - \omega^2 L_{on} C_{on})} \frac{\sin(2\omega t - 2\Theta + \alpha)}{\sin(2\omega t + 2\psi)} \quad (4.19)$$

Cette expression de la capacité du condensateur est indépendante de la tension ondulatoire et permet d'avoir une capacité faible pour le condensateur.

4.5 Commande du circuit proposé

Après avoir effectué la modélisation des différents éléments du circuit proposé, il est nécessaire de proposer des commandes pour chacun d'eux, ce qui leur imposera une certaine valeur de référence.

4.5.1 Commande du convertisseur boost

La modélisation du convertisseur boost a permis de constater qu'il possède des structures linéaires par morceaux décrites par des équations différentielles. De ce fait, la commande utilisée doit permettre de réguler l'énergie de sortie du convertisseur boost. La commande classique du convertisseur boost des systèmes photovoltaïques est la technique de recherche du point de puissance maximale (ou MPPT en anglais). La figure 4.13 représente le bloc classique de la commande MPPT.

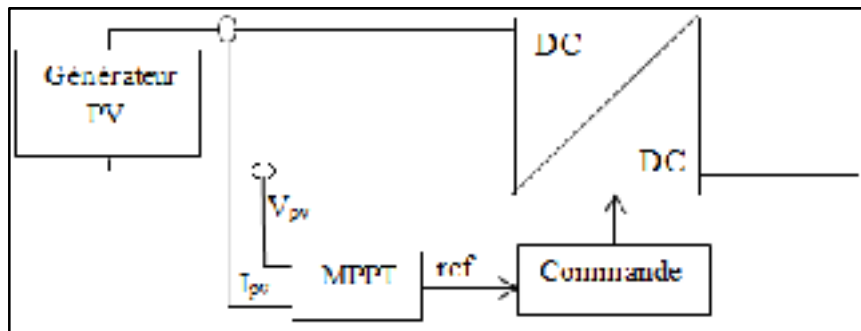


Figure 4.13 Bloc classique de la commande MPPT

Il existe plusieurs méthodes de MPPT. (Liu et al., 2008) compare deux méthodes de MPPT à savoir la méthode perturb and observe (P&O) et la méthode hill climbing. (Stala, Koska et Stawiarski, 2011) et (Kasa, Iida et Chen, 2005) étudient également le MPPT de façon à améliorer le rendement des panneaux photovoltaïques. La meilleure méthode et la plus simple d'ailleurs, selon la littérature, est la méthode perturbation et observation.

4.5.1.1 Commande perturbation et observation (P&O)

Le principe de cette commande est basé sur la recherche en permanence du point extrême d'une variable du système comme la tension ou le courant par la perturbation d'un de ses paramètres d'entrée en observant l'impact sur la puissance de sortie. La recherche du point de puissance se fait en comparant la puissance actuelle $P(t)$ obtenue à l'instant (t) par rapport à la puissance précédente $P(t-1)$ obtenue à l'instant $(t-1)$.

Si $P(t) > P(t-1)$ ou $dp/dv > 0$, le point se rapproche du point de puissance maximale donc la perturbation se fait toujours dans le même sens. L'algorithme de la commande P&O augmente la tension de référence pour que le point atteigne le point de puissance maximale.

Par contre si $P(t) < P(t-1)$ ou $dp/dv < 0$ le point s'éloigne du point de puissance maximale, donc il faut changer le sens de la perturbation. Dans ce cas, l'algorithme de la commande P&O diminue la tension de référence afin que le point atteigne le point de puissance maximale.

La figure 4.14 représente la caractéristique de la puissance du générateur photovoltaïque où P_{PPM} représente la puissance au point de puissance maximale et V_{PPM} représente la tension au point de puissance maximale.

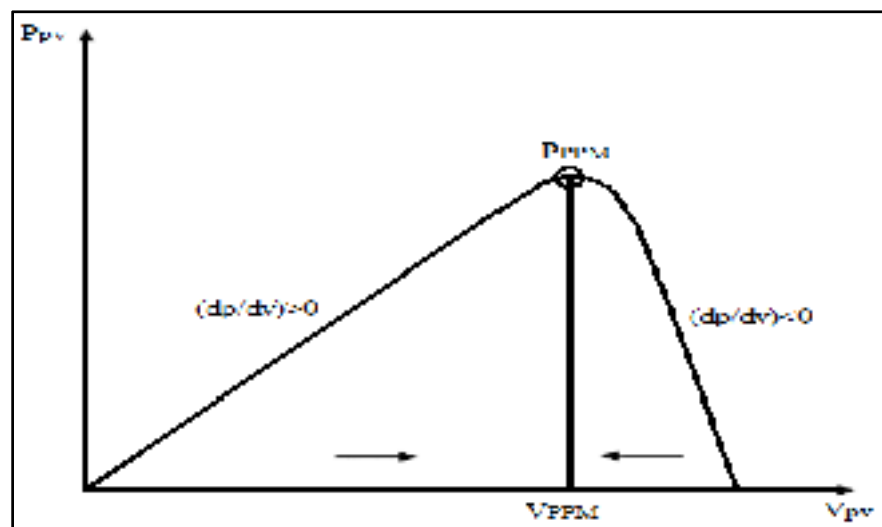


Figure 4.14 Caractéristique de la puissance du générateur photovoltaïque

4.5.1.2 Algorithme de la commande perturbation et observation (P&O)

L'algorithme P&O utilisé dans ce travail a pour variable de perturbation le courant du générateur photovoltaïque. Dans ce cas, le courant de référence du générateur photovoltaïque est perturbé et on observe à chaque fois l'impact sur la puissance de sortie du générateur photovoltaïque (Chen et al, 2002).

Le principe consiste dans un premier temps de mesurer la tension V_{pv} et courant I_{pv} du générateur photovoltaïque où la puissance P_{pv} du générateur photovoltaïque est obtenue en faisant le produit de V_{pv} par I_{pv} . Ensuite le courant I_{pv} et la puissance P_{pv} sont mesurés, si la puissance P_{pv} et le courant I_{pv} augmentent, alors le courant de référence est augmenté lors de la perturbation. Par contre si la puissance P_{pv} augmente et le courant I_{pv} diminue alors le courant de référence est réduit lors de la perturbation. De même si la puissance P_{pv} diminue et le courant I_{pv} augmente, alors le courant de référence est réduit lors de la perturbation. Mais si la puissance P_{pv} et le courant I_{pv} diminuent, alors le courant de référence est augmenté lors de la perturbation.

De façon concrète, pour l'algorithme P&O, si la puissance P_{pv} augmente lors de la perturbation du courant de référence, alors la perturbation se fait toujours dans le même sens jusqu'à ce le point de puissance maximale soit atteint. Cependant, si la puissance P_{pv} diminue, alors le sens de la perturbation doit être changé dans le sens inverse jusqu'à ce que le point de puissance maximale soit atteint.

La figure 4.15 représente l'organigramme de l'algorithme P&O. Cet organigramme résume le principe de la commande P&O. Pour simplifier l'organigramme, on note $V_{pv} = V$, $I_{pv} = I$ et $P_{pv} = P$.

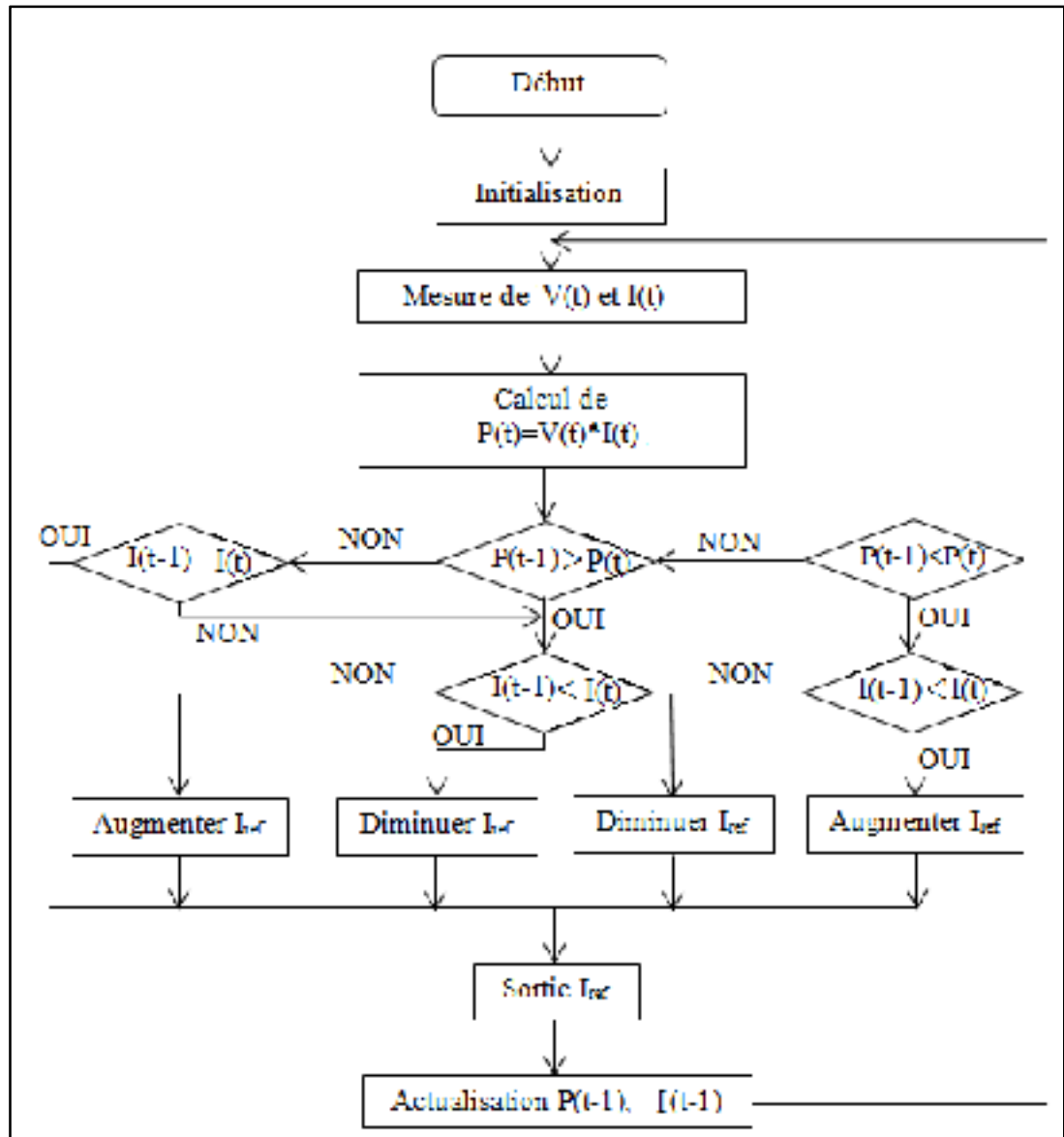


Figure 4.15 Organigramme de l'algorithme P&O

Le bloc de la commande MPPT avec control du courant de référence tiré de cet organigramme peut être schématisé comme l'indique la figure 4.16.

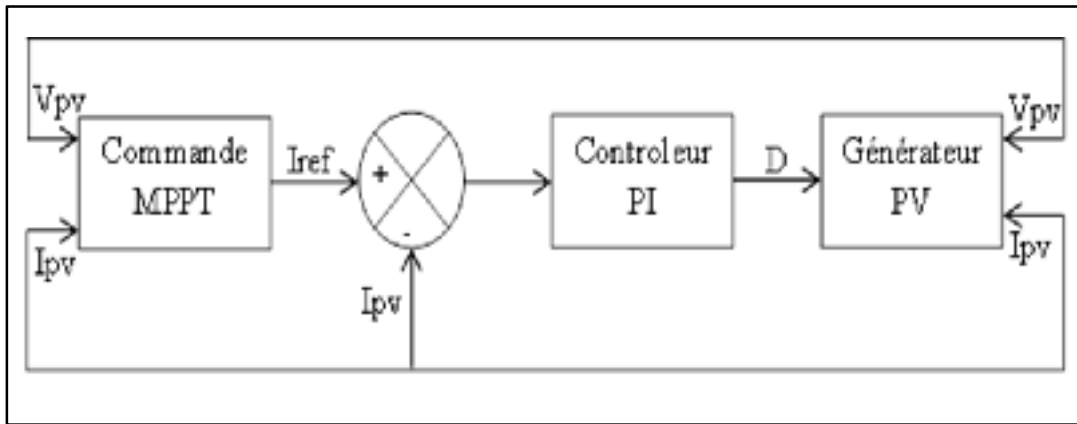


Figure 4.16 Bloc de la commande MPPT avec control du courant de référence

4.5.2 Commande du circuit de découplage de puissance

D'après le schéma de la configuration générale du circuit proposé, le circuit de découplage de puissance est monté en parallèle avec le condensateur du bus CC de l'onduleur, ce qui réduit les pertes de puissance. Le circuit de découplage de puissance muni de sa commande peut être schématisé par la figure 4.17 :

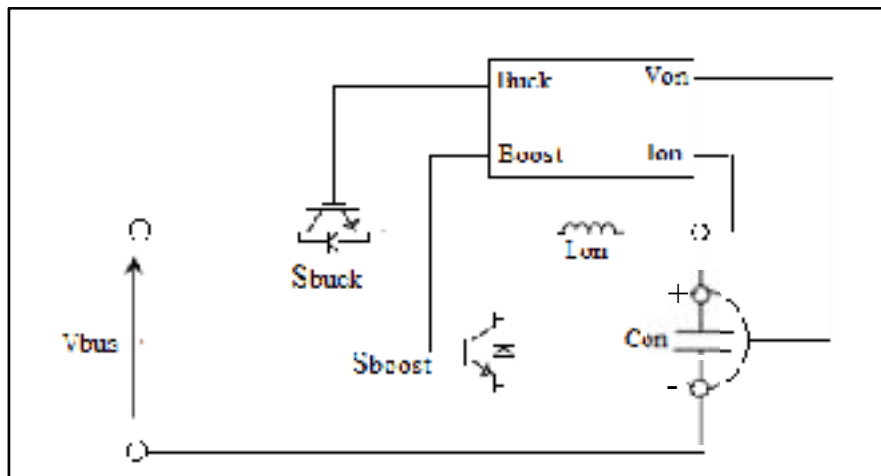


Figure 4.17 Circuit de découplage de puissance et sa commande

L'objectif de la commande du circuit additionnel de découplage de puissance est de permettre la production et la régulation d'un courant de compensation pour compenser le

courant ondulatoire de second ordre généré par l'onduleur. Le principe de cette commande est simple.

Un contrôleur de tension PI1 (Proportional Integral) assure la régulation de la tension du condensateur C_{on} en comparant la tension $U_{c_{on}}$ à la tension de référence $U_{c_{on}}^*$. La sortie de ce régulateur permet d'obtenir un courant I_{on}^* représentant la variation à appliquer pour amener la tension $U_{c_{on}}$ en une valeur moyenne de la tension $U_{c_{on}}^*$. L'erreur $U_{c_{one}}$ obtenue en comparant la tension $U_{c_{on}}$ à sa valeur de référence $U_{c_{on}}^*$ est donnée par :

$$U_{c_{one}}(t) = U_{c_{on}}^*(t) - U_{c_{on}}(t-1) \quad (4.20)$$

Cette erreur $U_{c_{one}}$ est envoyée dans le régulateur PI1 qui, donne en sortie un courant de référence I_{on}^* dont l'équation est donnée par :

$$I_{on}^*(t) = K_{PI}[U_{c_{one}}(t) - U_{c_{one}}(t-1)] \quad (4.21)$$

Pour produire le courant de compensation, ce courant de référence I_{on}^* obtenu en sortie du régulateur est additionné au courant alternatif I_{on} récupérer à la sortie du deuxième régulateur PI dans la commande PWM de l'onduleur. L'équation du courant de compensation est donnée par :

$$I_{comp}(t) = I_{on}^*(t) + I_{on}(t) \quad (4.22)$$

Le courant de compensation I_{comp} est utilisé dans deux cas :

- D'abord il est comparé au courant $I_{L_{on}}$ de la bobine L_{on} du circuit de découplage, l'erreur obtenue est envoyée dans un régulateur PI2 dont le courant obtenu en sa sortie est comparé à un signal sinusoïdal.
- Ensuite il est comparé à 0 et lorsque sa valeur est positive, le signal est envoyé dans la switch S5 du circuit additionnel de découplage de puissance : c'est le mode buck,

mais si sa valeur est négative, le signal est envoyé dans le switch S6 du circuit additionnel : c'est le mode boost.

L'organigramme de la commande du circuit additionnel de découplage de puissance est représenté sur la figure 4.18 :

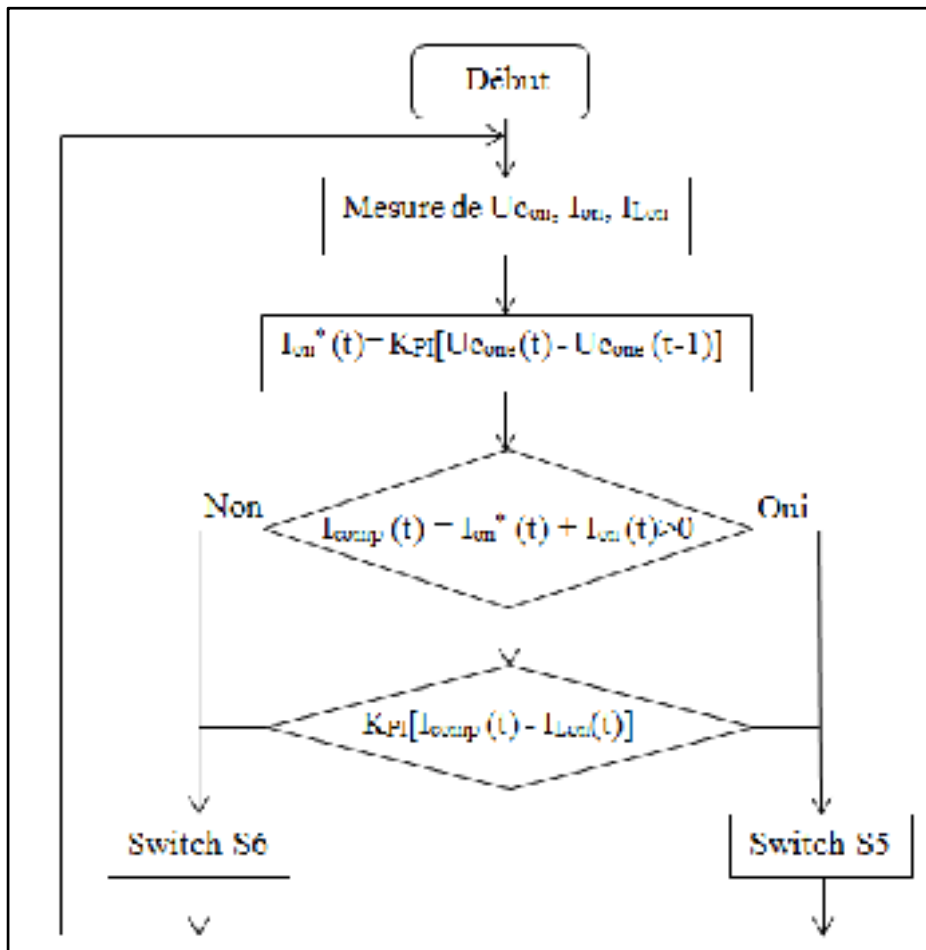


Figure 4.18 Organigramme de la commande du circuit additionnel

Le schéma de la commande du circuit additionnel de découplage de puissance dans le cas connecté au réseau décrite ci-dessus est représenté sur la figure 4.19 :

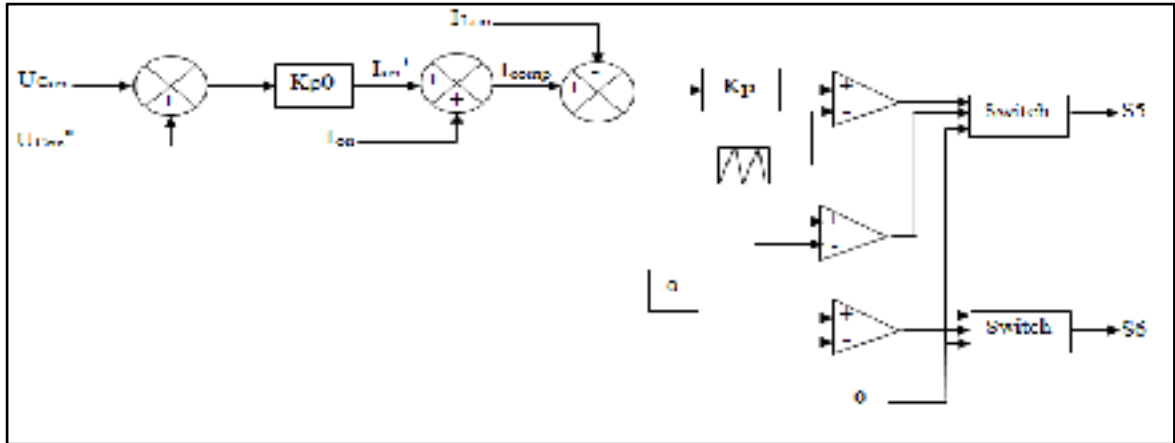


Figure 4.19 Schéma de la commande du circuit additionnel en mode connecté au réseau

Pour le cas autonome, il s'agit de remplacer le condensateur du circuit onduleur par une batterie qui permet de compenser la charge lorsque la puissance du générateur photovoltaïque est en déficit. Dans ce cas précis, la tension et le courant du condensateur du bus CC sont régulés par la commande du circuit additionnel de découplage de puissance. Le schéma de cette commande est représenté par la figure 4.20 :

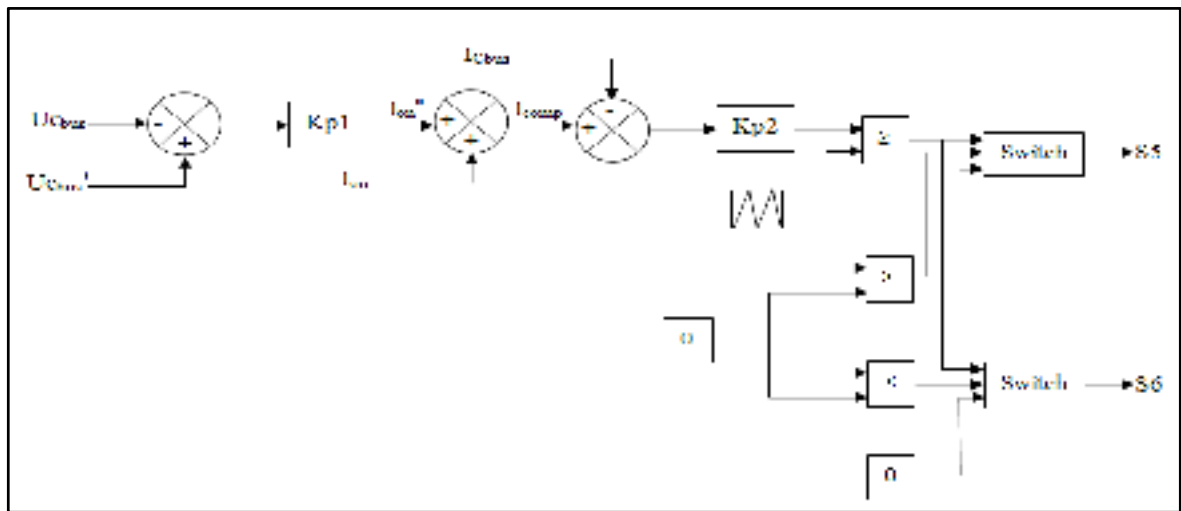


Figure 4.20 Schéma de la commande du circuit additionnel en mode autonome

La configuration de la commande du circuit additionnel de découplage de puissance dans le cas d'un système photovoltaïque autonome permet à la batterie de compenser le courant et la tension de la charge en cas de déficit de puissance photovoltaïque.

4.5.3 Commande de l'onduleur

L'onduleur est un élément clé du système photovoltaïque connecté au réseau. Son rôle primordial est d'assurer la conversion de l'énergie continue fournie par le générateur photovoltaïque en énergie alternative. De plus le courant qu'il produit doit être en conformité en termes d'harmoniques avec celui du réseau pour permettre son injection. Pour parvenir à cette fonction, la commande doit générer des ordres permettant l'ouverture et la fermeture des interrupteurs de l'onduleur. Cela permet à la tension fournie par l'onduleur de suivre la tension de référence.

Le schéma de l'onduleur et de sa commande munie des variables d'entrée peut être représenté par la figure 4.21:

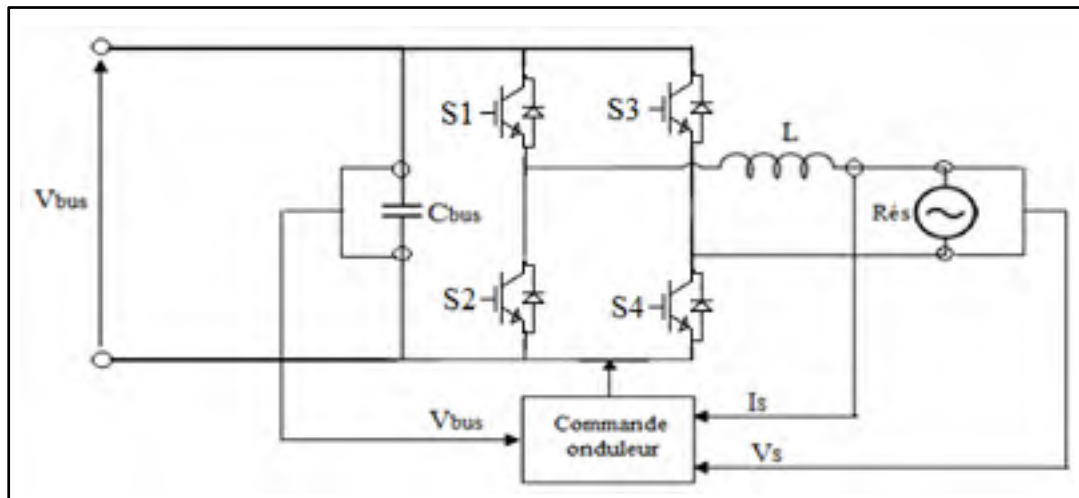


Figure 4.21 Schéma de l'onduleur et sa commande en mode connecté au réseau

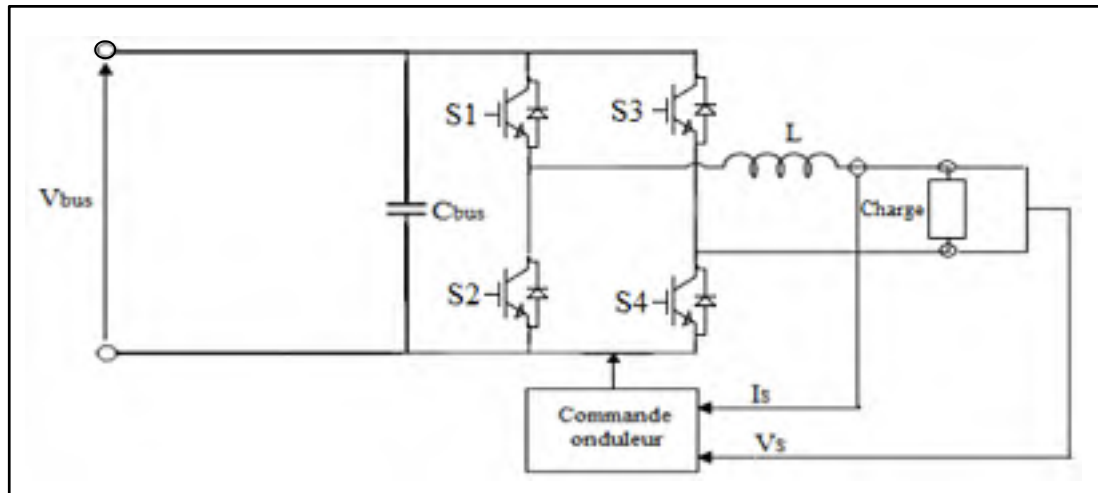


Figure 4.22 Schéma de l'onduleur et sa commande en mode autonome

La commande de l'onduleur peut être scindée en trois grandes parties dont le contrôle de la tension U_{bus} du bus CC, la synchronisation au réseau et le contrôle du courant I_S .

4.5.3.1 Contrôle de la tension du bus CC

La tension du bus CC est contrôlée grâce à la comparaison à chaque instant de la tension mesurée aux bornes du condensateur du bus CC à une tension de référence U_{bus}^* . Après cette comparaison, l'erreur obtenue passe dans un régulateur PI dont un courant de référence est produit à sa sortie. Ce courant de référence sera utilisé pour minimiser l'écart entre la tension U_{bus} et sa référence U_{bus}^* .

À chaque instant, l'erreur de la tension U_{bus} du bus CC envoyée dans le régulateur PI est donnée par l'équation :

$$U_{e_{bus}}(t) = U_{bus}^*(t) - U_{bus}(t) \quad (4.23)$$

De même à chaque instant, le courant de référence obtenu à la sortie du régulateur PI peut être estimé par l'équation :

$$I_{bus}(t)^* = I_{bus}(t-1)^* + K_p[U_{ebus}(t) - U_{ebus}(t-1)] + K_i U_{ebus}(t) \quad (4.25)$$

4.5.3.2 La synchronisation au réseau

La synchronisation au réseau se fait ici grâce à une boucle à phase asservie ou boucle à verrouillage de phase ou PLL (Phase Locked Loop en anglais). La PLL permet donc d'asservir une phase instantanée de sortie sur une phase instantanée d'entrée. A son entrée on a la tension du réseau et sa sortie est sous forme de sinus et de cosinus de l'angle mesuré à partir de la tension.

Le courant de référence I_s^* du réseau est obtenu grâce à la sortie de la PLL et du courant de référence I_{bus}^* fourni par la régulation de la tension du bus CC. Ainsi à chaque instant, l'expression du courant de référence i_s^* du réseau est donné par la relation suivante :

$$I_s(t)^* = I_s(t-1)^* + I_{bus}(t)^* * (U_s/U_{sm}) \quad (4.24)$$

4.5.3.3 Contrôle du courant I_s du réseau

Pour contrôler le courant I_s du réseau, le courant de référence I_s^* obtenu ci-dessus dans l'équation (4.27) est comparé à chaque instant avec le courant I_s fourni au réseau. L'erreur de cette comparaison est donnée par :

$$I_{es}(t) = I_s^*(t) - I_s(t) \quad (4.25)$$

Cette erreur est ensuite communiquée à un régulateur PI. Ce régulateur fournit en sortie un courant ondulatoire qui est comparé à un signal triangulaire dont l'ordre est par la suite envoyé dans les switch de l'onduleur. Le courant obtenu à la sortie du régaleur est aussi utilisé dans la compensation de la commande du circuit additionnel de découplage de puissance. Son équation à chaque instant est donnée par :

$$I_{on}(t) = K_p'[I_{es}(t) - I_{es}(t - 1)] + K_i'I_{es}(t) \quad (4.26)$$

4.5.3.4 Schéma de la commande de l'onduleur

A partir des différentes étapes énumérées ci-dessus, le schéma de la commande de l'onduleur peut être représenté comme suit sur la figure 4.23:

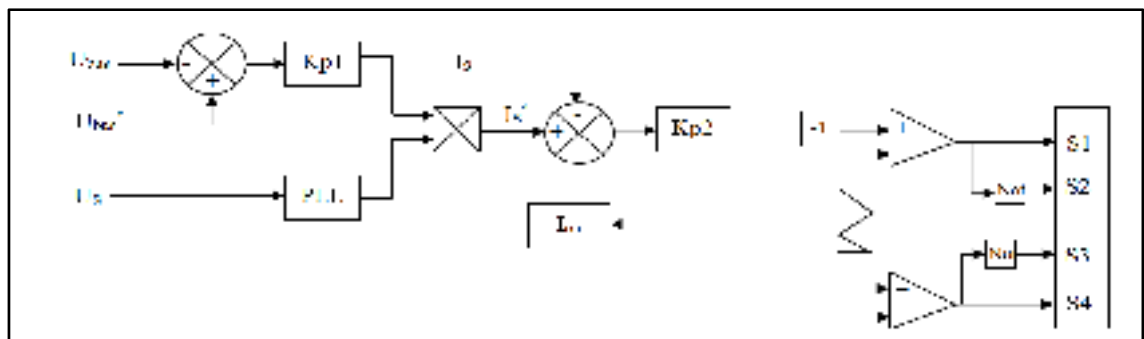


Figure 4.23 Schéma de la commande de l'onduleur en mode connecté au réseau

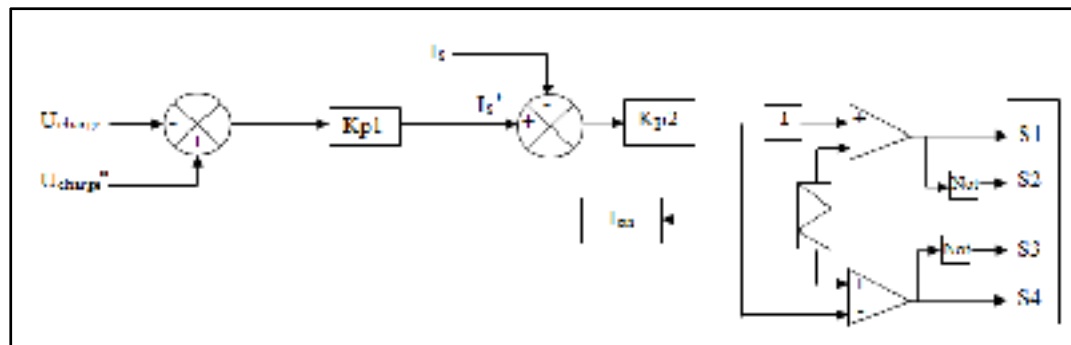


Figure 4.24 Schéma de la commande de l'onduleur en mode autonome

4.6 Conclusion

Le circuit proposé dans ce travail de recherche a été présenté ainsi que tous ses composants. Le circuit est semblable au circuit classique qui utilise un condensateur chimique de grande capacité au bus CC sauf qu'il muni d'un circuit additionnel de découplage de puissance monté en parallèle avec le condensateur du bus CC. Ce circuit additionnel de découplage de

puissance se comporte comme un buck-boost de sorte que durant le mode buck son condensateur se charge et durant le mode boost il se décharge.

La modélisation du circuit proposé a été réalisée de façon détaillée si bien que chaque composant a été modélisé ainsi que sa commande. Pour le convertisseur boost, la commande utilisée la commande MPPT perturbation et observation (P&O) qui est une commande simple et efficace selon la littérature. En ce qui concerne l'onduleur, sa commande régule la tension du condensateur du bus CC et assure la synchronisation au réseau grâce à une boucle à phase asservie ou boucle à verrouillage de phase dans le cas connecté au réseau. Cependant dans le cas autonome, sa commande régule la tension et le courant de la charge puis la commande du circuit additionnel de découplage de puissance régule la tension et le courant du condensateur du bus CC. Dans le cas couplé au réseau aussi la commande du circuit additionnel de découplage de puissance régule la tension et le courant de son condensateur.

CHAPITRE 5

RÉSULTATS DE SIMULATION ET DISCUSSION

5.1 Introduction

Pour mieux comprendre le fonctionnement d'un système, il est nécessaire de le simuler et de voir son comportement à travers ses différentes courbes. Ce chapitre fera ainsi l'œuvre de la démonstration de la faisabilité du system complet en se basant sur la simulation et la discussion des résultats.

L'objectif de ce travail étant de réduire au maximum la taille du condensateur du bus CC pour pouvoir utiliser des petits condensateurs film à longue durée de vie, il sera important de bien étudier la fiabilité du système de découplage à l'origine de la réduction de la taille de ce condensateur.

Dans un premier temps il sera question de la simulation du système avec un condensateur électrolytique au bus CC de l'onduleur, ensuite la simulation du système muni du circuit de découplage de puissance et enfin la simulation de la performance du circuit découplage de puissance.

5.2 Schéma électrique du système complet

Le schéma du système complet est constitué entre autre des éléments suivants :

- générateur photovoltaïque,
- convertisseur boost régulé par une commande MPPT,
- circuit de découplage de puissance muni de sa commande,
- onduleur monophasé régulé par sa commande,
- Charge,
- Batterie,
- réseau monophasé.

La simulation permettra de tester et de comprendre de façon globale le comportement du système. Lors de cette simulation, des perturbations sont faites sur certains paramètres du système pour voir sa réaction. Le logiciel de simulation MATLAB est utilisé pour ces travaux et il a permis d'analyser les performances et la fiabilité du circuit de découplage de puissance associé à l'onduleur.

Le schéma du système complet muni de ses différentes commandes est représenté sur les figures 5.1 (cas connecté au réseau) et 5.2 (cas autonome):

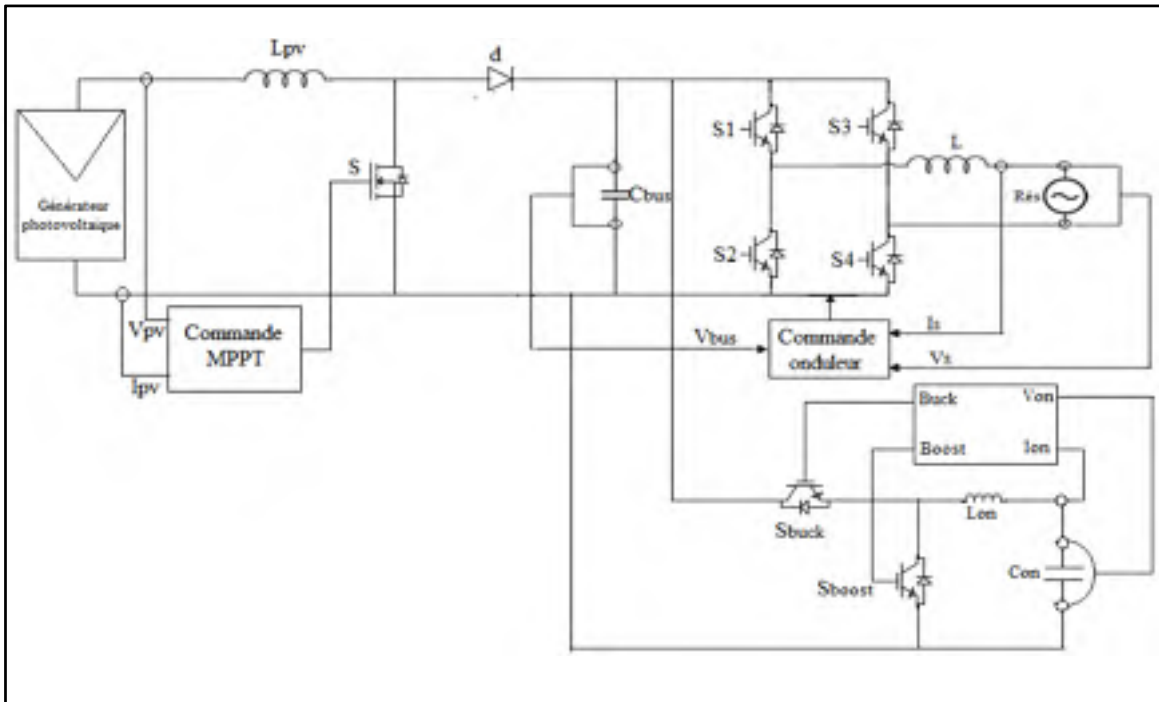


Figure 5.1 Système complet connecté au réseau avec ses commandes

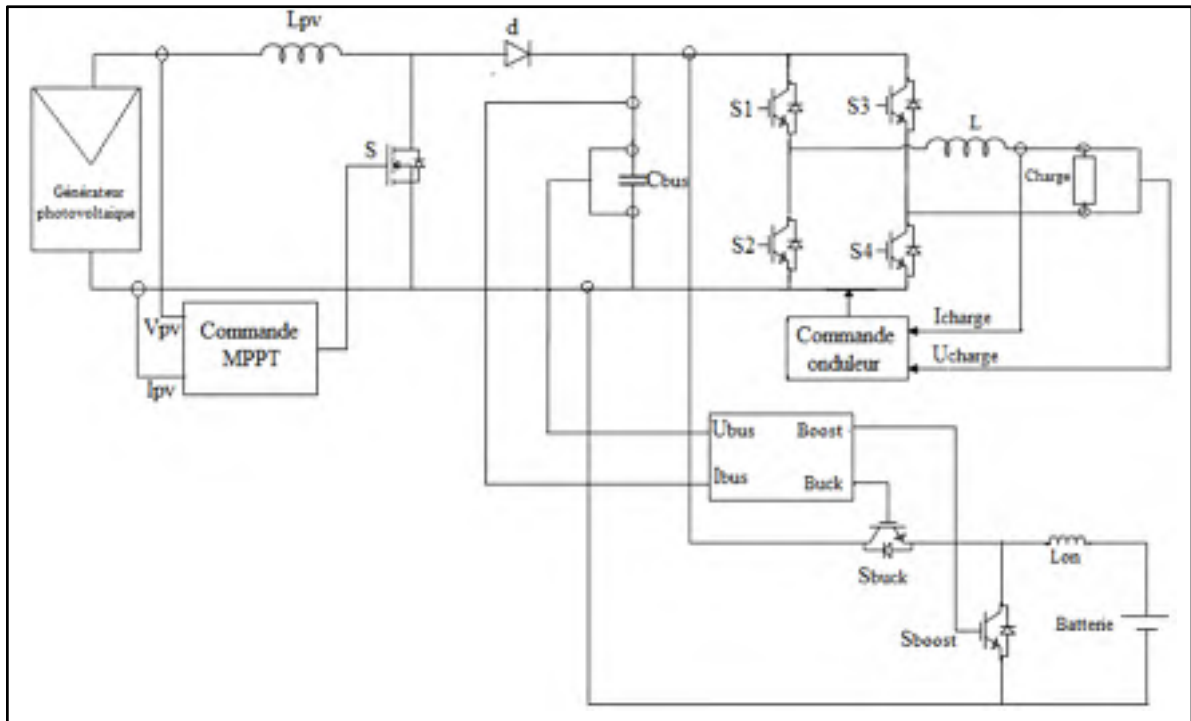


Figure 5.2 Système complet autonome avec ses commandes

Les paramètres de simulation et la valeur des composants du circuit complet sont :

En utilisant un ensoleillement de $G=1000\text{W/m}^2$, le générateur photovoltaïque fournit une puissance moyenne $P_{pv}=3000\text{W}$, dont la tension moyenne est $V_{pv}=240\text{V}$ et le courant moyen est $I_{pv}=12,8\text{A}$.

Tableau 5.1 Valeurs des paramètres de simulation

Paramètres	Cas connecté au réseau	Cas autonome
Inductance L_{pv}	30 μ H	80 μ H
Condensateur bus CC	15 μ F	15 μ F
Condensateur C_{on}	25 μ F	Batterie
Inductance L_{on}	20 μ H	2 μ H
Inductance de sortie L_s	3.3mH	4mH
Tension efficace (réseau et charge)	110V	110V
Fréquence de commutation	20kHz	20kHz
Fréquence réseau	60Hz	
Puissance charge	-	1.5kW

5.3 Simulation du système complet

Les schémas des figures 5.1 et 5.2 représentent le système complet muni du circuit additionnel de découplage de puissance. L'énergie continue produite par le générateur photovoltaïque est transformée en énergie alternative qui alimente ensuite la charge dans le cas autonome ou injectée dans le réseau dans le cas connecté au réseau. Pour appréhender le comportement du système, il faut tenir compte, lors de la simulation, de l'ensoleillement selon qu'il soit constant ou variable.

5.3.1 Simulation du système avec éclairement maximal constant

Dans ce cas de simulation, l'éclairement est fixé à une valeur maximale et constante, soit $G=1000\text{W/m}^2$. Les figures suivantes ci-dessous représentent les allures des courbes obtenues lors de cette simulation. Le schéma de simulation sous Simulink de MATLAB de cette partie est représenté en ANNEXEIV.

5.3.1.1 Cas connecté au réseau

La figure 5.3 représente les formes d'onde la tension et du courant du générateur photovoltaïque et donc aussi de sa puissance en fonction de l'ensoleillement constant.

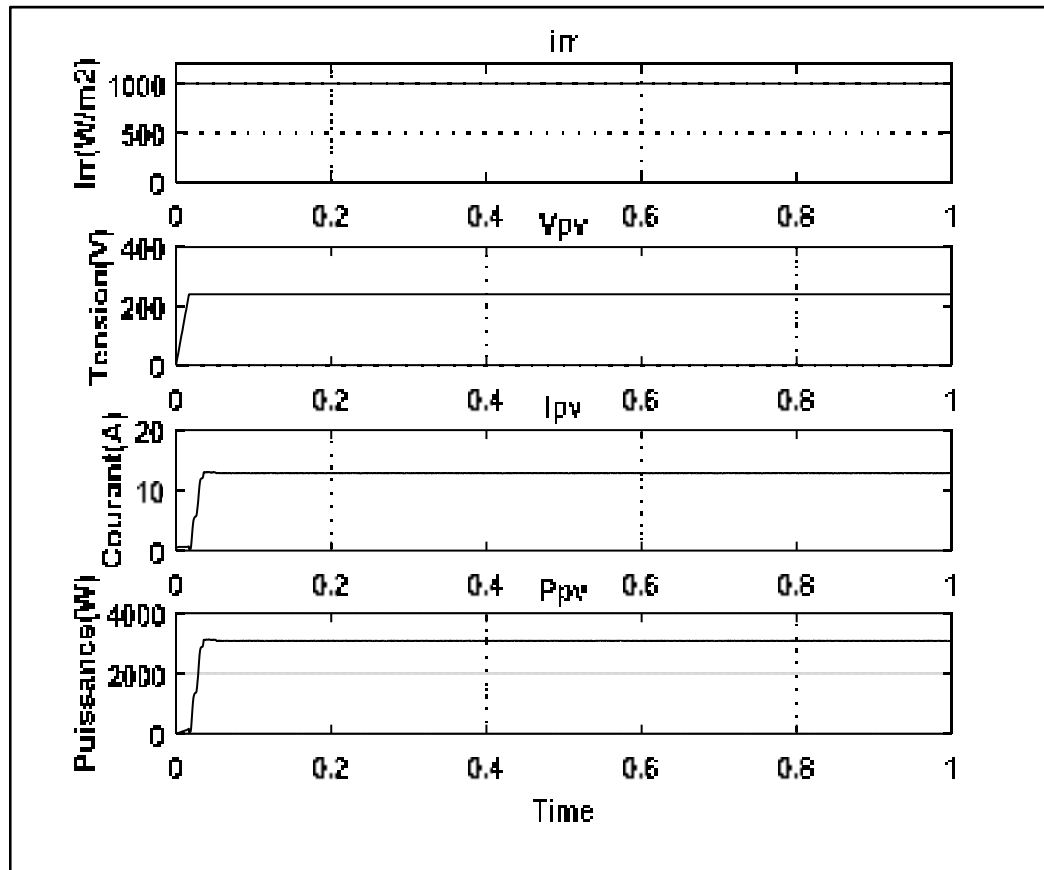


Figure 5.3 Formes d'onde de la tension, du courant et de la puissance photovoltaïque

L'ensoleillement étant constant, les formes d'onde de la tension et du courant du générateur photovoltaïque sont aussi constantes, ce qui produit donc une puissance photovoltaïque constante. De plus, la tension et le courant photovoltaïques atteignent leur valeur maximale pour cet ensoleillement maximal constant. La valeur de la tension est bien $U_{pv}=240V$ et celle du courant $I_{pv}=12,8A$.

Grâce à la commande MPPT qui permet au générateur photovoltaïque de fournir sa puissance maximale, le courant et la tension du générateur photovoltaïque atteignent leur valeur maximale et y demeurent tant que l'ensoleillement est à sa valeur maximale. Le produit de cette tension et du courant photovoltaïque donne la puissance fournie par le générateur photovoltaïque qui est aussi constante et maximale.

La figure 4 ci-dessous représente les formes d'ondes de la tension et du courant du réseau.

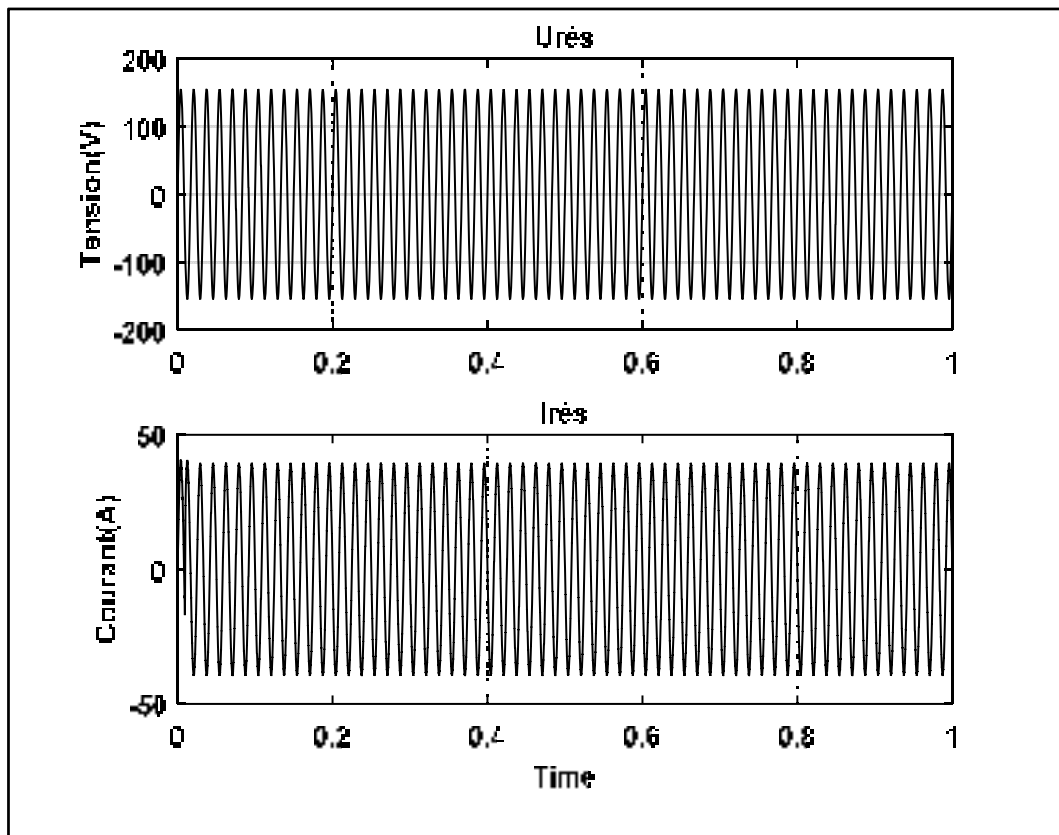


Figure 5.4 Formes d'ondes de la tension et du courant du réseau

Tout comme la tension et le courant fournis par le générateur photovoltaïque, la tension et le courant du réseau atteignent aussi leur valeur maximale. On constate que la tension et le courant du réseau sont bien en opposition de phase. La valeur maximale de la tension est bien $U_{rés}=155V$ et celle du courant $I_{rés}=38,70A$. Une fois de plus, lorsque l'ensoleillement est

constant et que le générateur photovoltaïque fournit le maximum de sa puissance, la puissance injectée dans le réseau est constante et maximale.

Intéressons-nous maintenant aux formes d'onde de la tension aux bornes des condensateurs du bus CC et du circuit additionnel de découplage de puissance. La tension du condensateur du bus CC est notée U_{bus} et celle du circuit additionnel de découplage de puissance U_{con} .

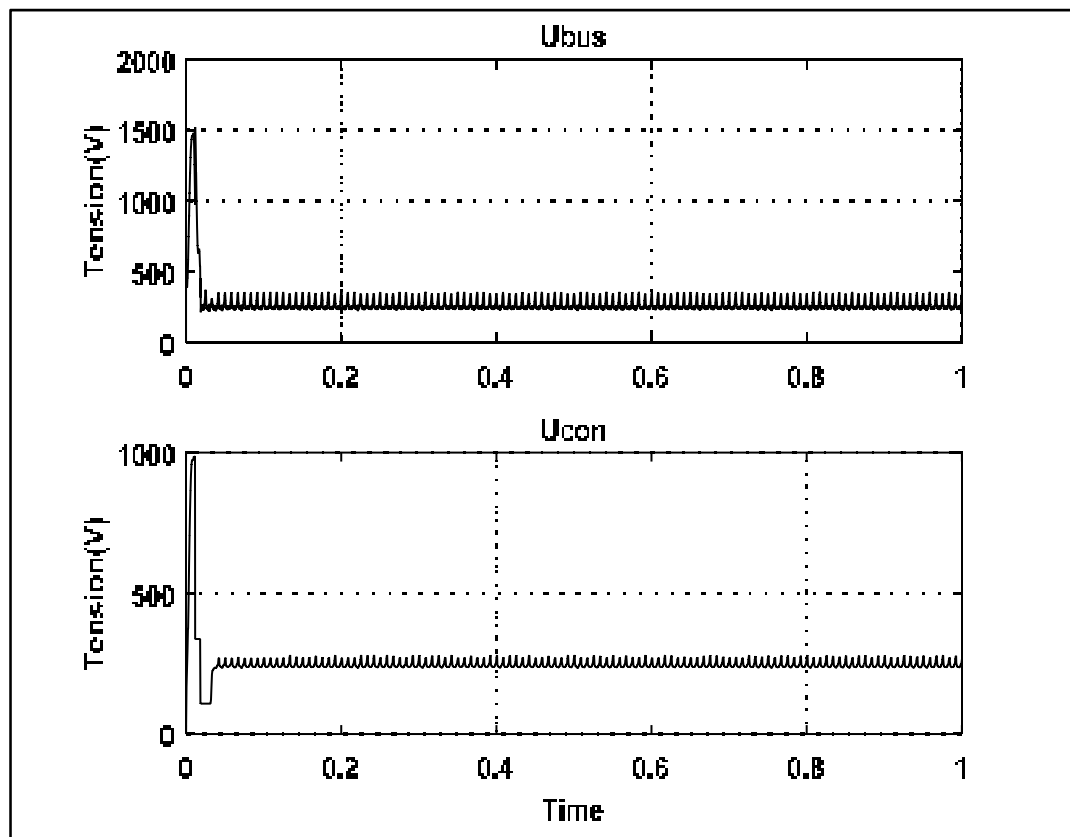


Figure 5.5 Formes d'onde des tensions U_{bus} et U_{con}

La forme d'onde de la tension du condensateur du bus CC montre une ondulation de tension faible dont la valeur est $\Delta U_{bus} = 55V$. Pour la tension du condensateur du circuit additionnel de découplage de puissance, l'ondulation de tension est proche de celle du bus CC, soit $\Delta U_{con} = 50V$. En ce qui concerne la littérature, ces valeurs d'ondulation de tension sont bonnes et n'impactent pas sur la durée de vie du condensateur film.

Il faut noter aussi que les ondulations dans un circuit sont sources de pertes de façon générale dans ce circuit. Alors même si l'ondulation de tension n'a pas d'effet sur la durée de vie du condensateur film, la faible ondulation de tension permet dans ce cas de minimiser les pertes dans le condensateur en particulier et dans le circuit en général.

Le courant dans le circuit additionnel de découplage de puissance est étudié et l'allure de sa forme d'onde est représentée sur la figure 5.6 :

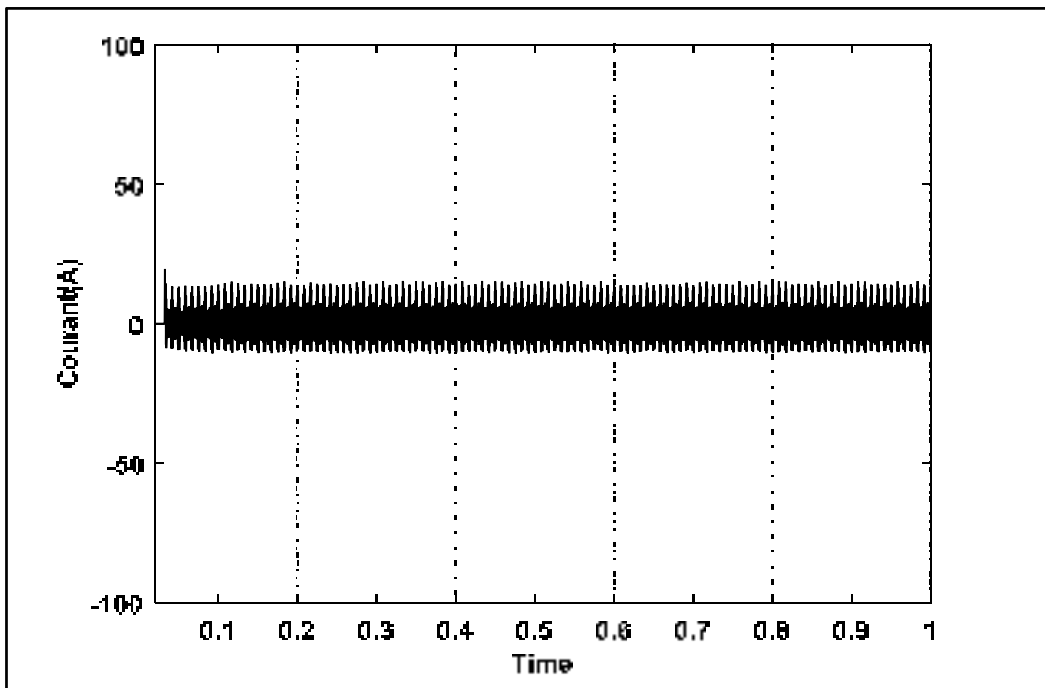


Figure 5.6 Forme d'onde du courant du circuit additionnel de découplage de puissance

En faisant un zoom sur la forme d'onde du courant du circuit additionnel de découplage de puissance, on obtient l'allure donnée par la figure 5.7 :

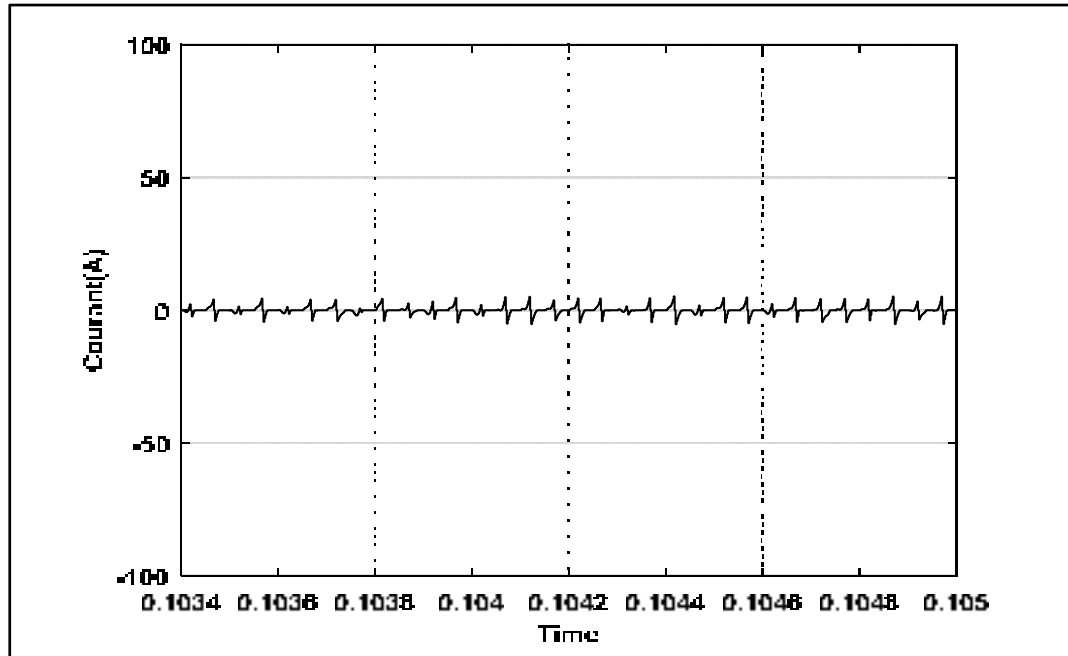


Figure 5.7 Zoom sur l'allure du courant du circuit additionnel de découplage de puissance

La configuration de la commande du circuit additionnel de découplage de puissance fait que le courant qui le traverse ait une allure alternative. Cela est dû au fait que le courant de compensation pris dans l'onduleur et utilisé comme référence dans la commande du circuit de découplage est alternatif. De plus, il faut se rappeler que le circuit additionnel de découplage de puissance fonctionne en mode buck-boost, ce qui fait alterner l'allure de son courant dû à l'absorption et à la restriction d'énergie.

5.3.1.2 Cas autonome

Analysons l'allure de la tension et du courant fournis par le générateur photovoltaïque à une charge constante de 1.5kW de puissance. Le modèle de simulation sous Simulink de MATLAB de ce système est représenté en ANNEXEV.

La figure ci-dessous représente les formes d'onde la tension et du courant fourni a la charge par le générateur photovoltaïque et donc aussi de sa puissance en fonction de l'ensoleillement constant.

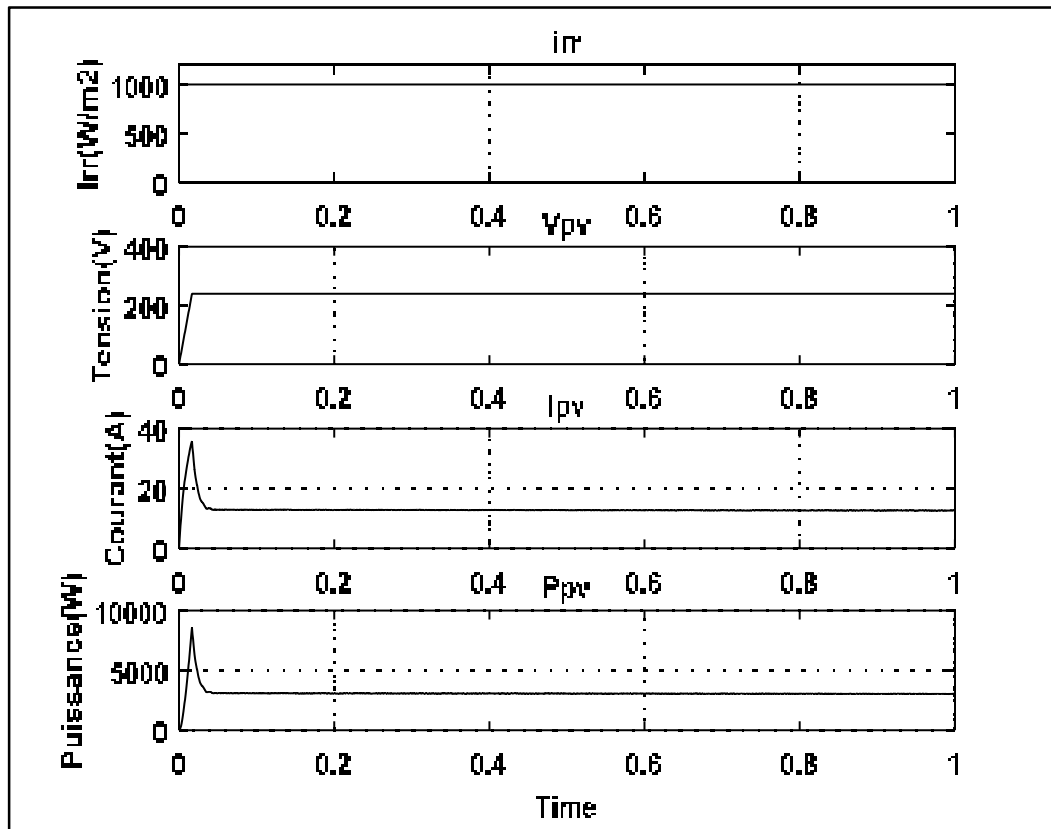


Figure 5.8 Formes d'onde de la tension, du courant et de la puissance photovoltaïque

Comme le cas connecté au réseau, pour un ensoleillement constant, les formes d'onde de la tension et du courant du générateur photovoltaïque sont aussi constantes, ce qui produit aussi une puissance photovoltaïque constante. La valeur maximale atteinte par la tension est $U_{pv}=240V$ et celle atteinte par le courant $I_{pv}=12,8A$ exactement comme le cas connecté au réseau. Ces résultats sont atteints aussi grâce à la commande MPPT qui permet au générateur photovoltaïque de transférer le maximum de sa puissance à la charge.

Regardons maintenant le comportement de la tension et du courant de la charge pour un ensoleillement constant fourni au générateur photovoltaïque.

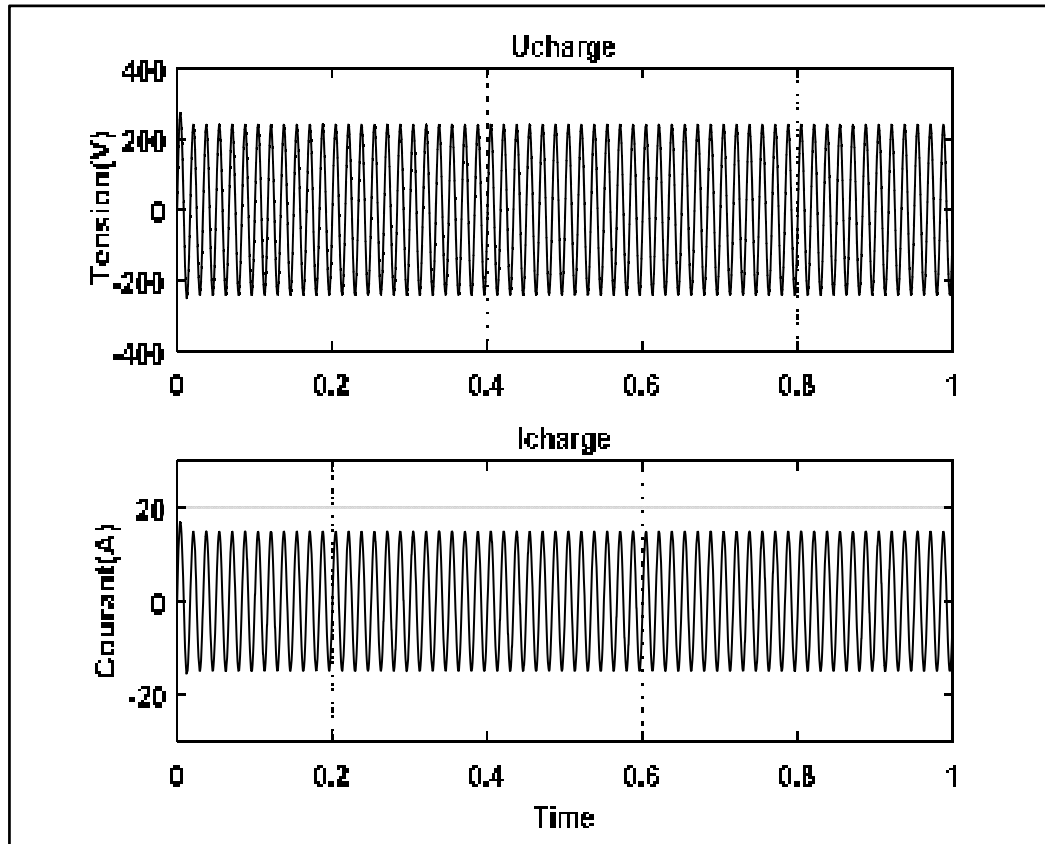


Figure 5.9 Formes d'ondes de la tension et du courant de la charge

Les formes d'ondes de la tension et du courant de la charge données par la figure ci-dessus montrent que la tension et le courant de la charge atteignent également leur valeur maximale constante pour un ensoleillement maximal et constant.

Le condensateur du bus CC et la batterie jouant un rôle important dans l'équilibrage de puissance, regardons alors l'allure de leur tension et de l'ondulation produite par ces tensions.

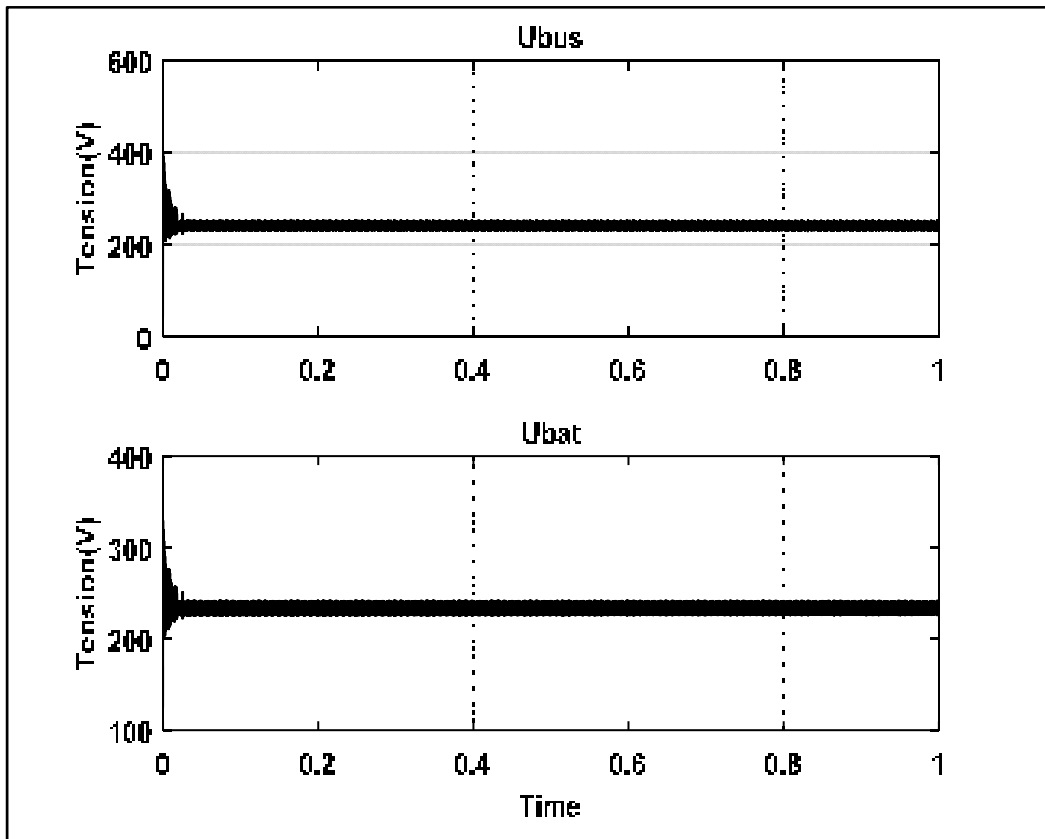


Figure 5.10 Forme d'onde de tension du condensateur du bus CC et de la batterie

Selon l'allure des courbes de la figure 5.10, l'ondulation de tension aux bornes du condensateur du bus CC est faible et sa valeur est $\Delta U_{\text{bus}}=20\text{V}$, celle de la batterie aussi est faible et sa valeur est $\Delta U_{\text{bat}}=15\text{V}$. Comme cela a été dit ci-dessus, la faible ondulation minimise les pertes dans le circuit. Cela permet également à la batterie de conserver pendant longtemps que possible ses cycles de charge-décharge.

L'allure de la courbe du courant qui traverse la batterie est représentée par la figure 5.11.

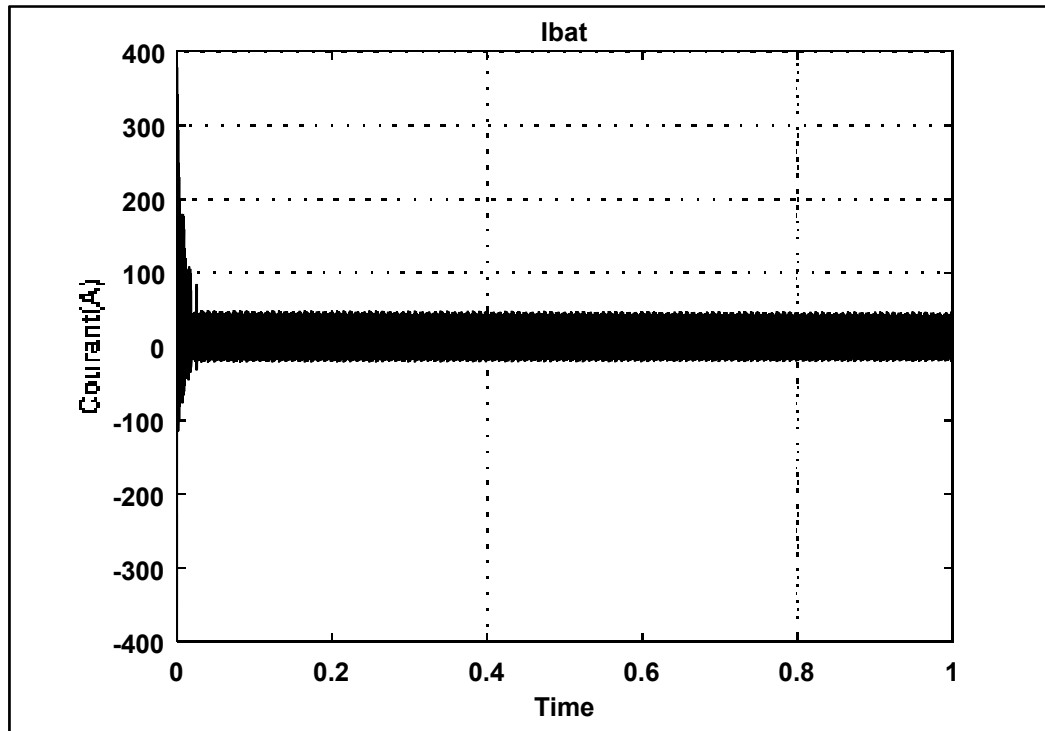


Figure 5.11 Forme d'onde du courant de la batterie

Des figures qui précèdent il ressort que, d'une façon générale, pour un ensoleillement constant la puissance fournie par le générateur photovoltaïque est maximale et constante que ce soit le cas connecté au réseau ou le cas autonome. De plus les courants et les tensions du réseau (cas connecté au réseau) et de la charge (cas autonome) atteignent leur valeur maximale et restent constants.

5.3.2 Simulation du système avec éclairage variable

Contrairement au cas précédent, l'ensoleillement dans cette partie est variable et il varie entre 200W/m^2 et 1000W/m^2 . Analysons certains cas critiques où l'ensoleillement est $G=200\text{W/m}^2$ et $G=500\text{W/m}^2$. Pour cela, des variations brusques de l'ensoleillement seront appliquées à un certain temps t donné.

5.3.2.1 Cas connecté au réseau

Appliquons une variation sur l'irradiation de $G=1000\text{W/m}^2$ à $G=200\text{W/m}^2$ à partir de $t=0.35\text{s}$, ensuite il passe de $G=200\text{W/m}^2$ à $G=500\text{W/m}^2$ à $t=0.65\text{s}$ et enfin il croit de nouveau de $G=500\text{W/m}^2$ à $G=1000\text{W/m}^2$ à $t=1.02\text{s}$.

La figure 5.12 permet d'observer l'influence de l'ensoleillement G sur la tension et le courant photovoltaïques, ainsi que la puissance. La figure est constituée respectivement de l'ensoleillement G , de la tension U_{pv} , du courant I_{pv} et de la puissance P_{pv} photovoltaïque.

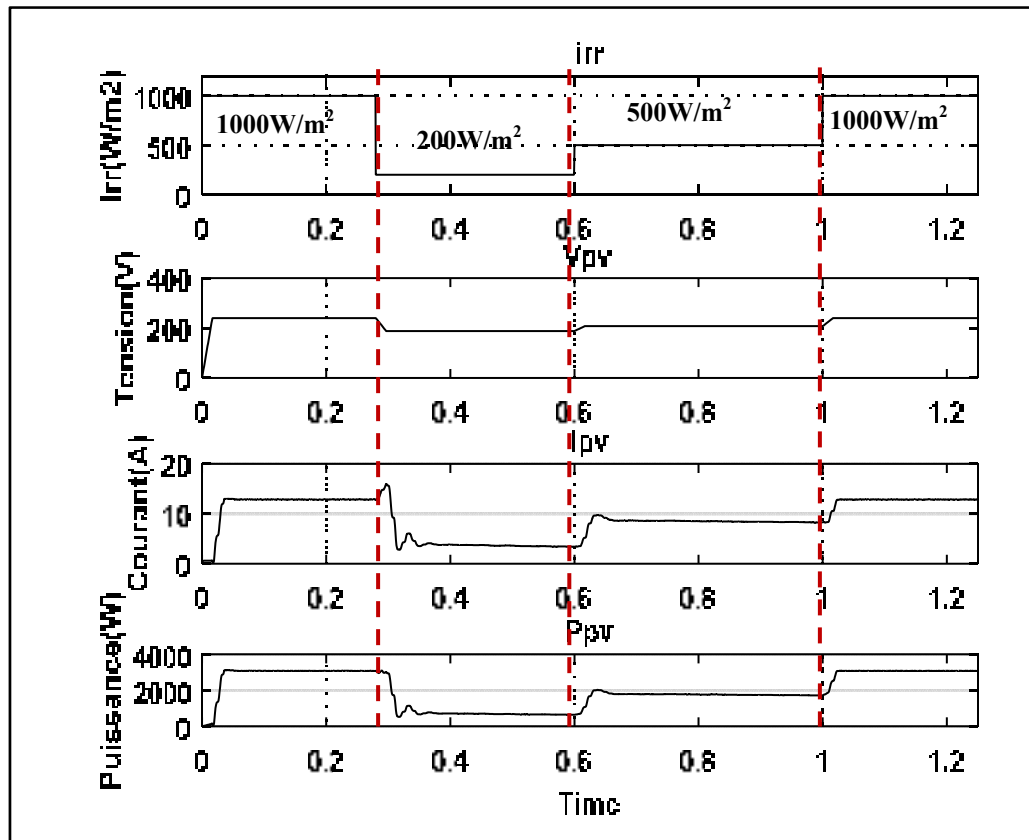


Figure 5.12 Forme d'ondes ensoleillement G , tension U_{pv} , courant I_{pv} et puissance P_{pv}

D'après la figure 5.12, on constate que la tension U_{pv} varie très peu (quasi constante) avec l'ensoleillement G , cependant, le courant I_{pv} varie énormément avec cet ensoleillement.

Donc on conclut que la puissance fournie par le générateur photovoltaïque varie avec l'ensoleillement. On constate que lorsque l'irradiation $G=200\text{W/m}^2$, la puissance fournie par le générateur photovoltaïque est $P_{pv}=665\text{W}$ en moyenne et lorsque $G=500\text{W/m}^2$, elle est $P_{pv}=1675\text{W}$ en moyenne.

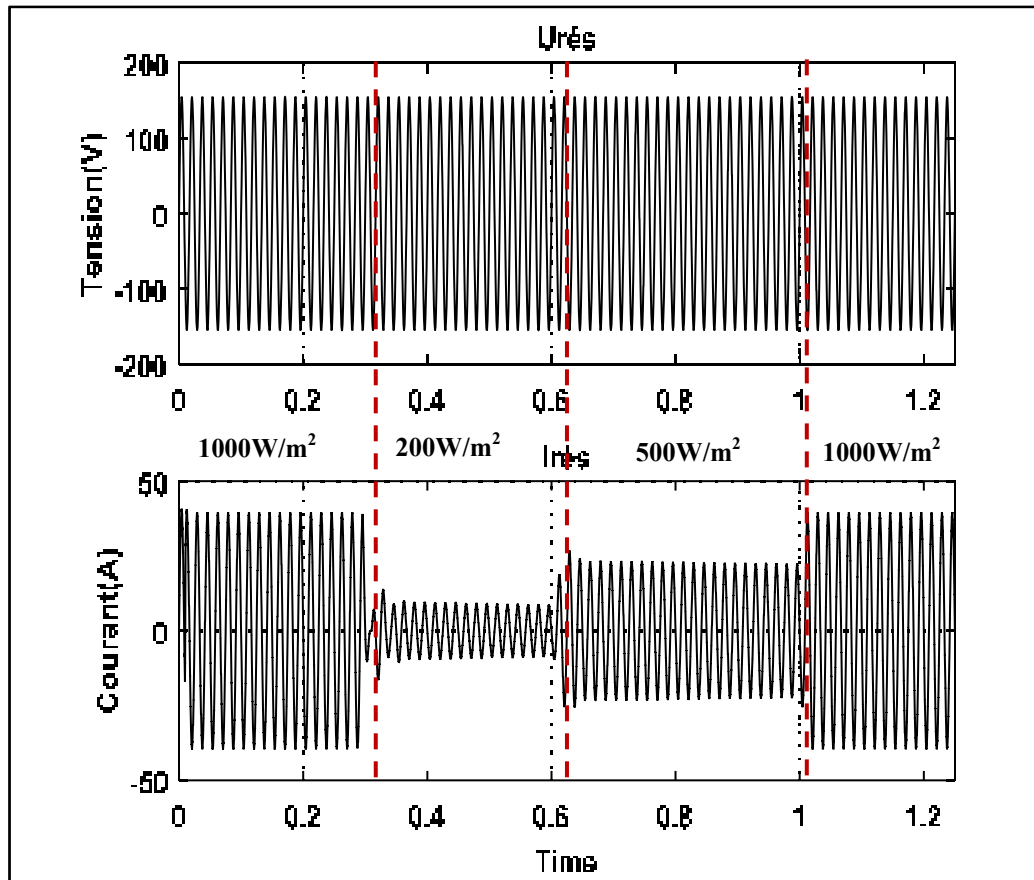


Figure 5.13 Formes d'ondes de la tension et du courant du réseau

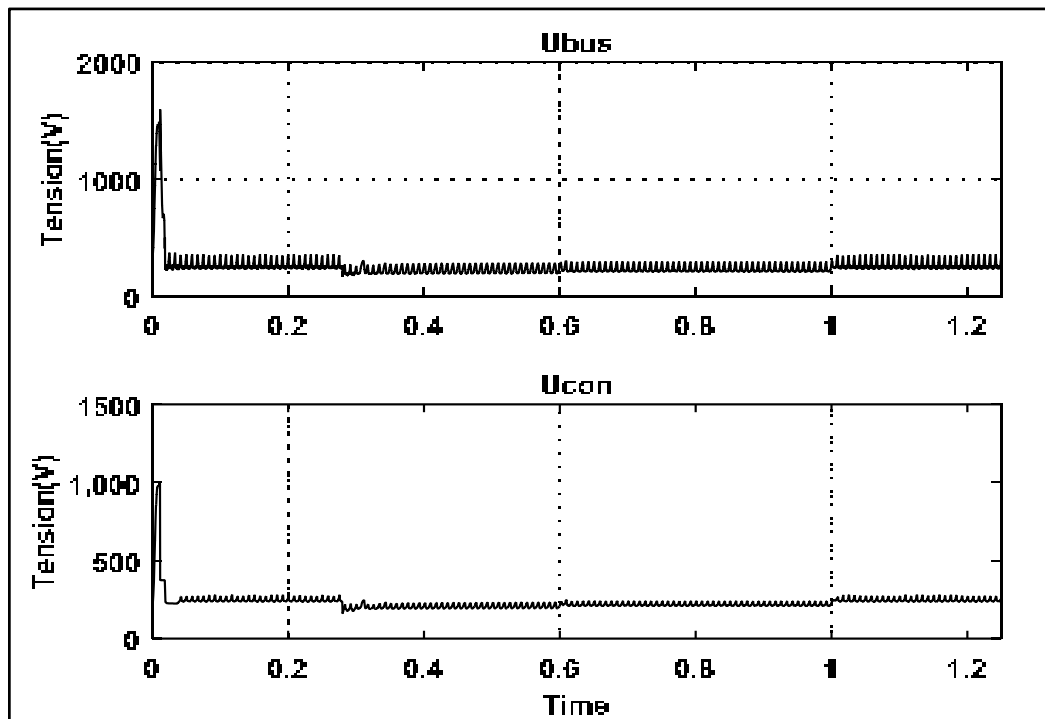
La figure 5.13 ci-dessus montre que la tension du réseau reste constant quel que soit la variation de l'ensoleillement. Cependant, le courant du réseau varie dans le même sens que l'ensoleillement, c'est-à-dire que lorsque l'ensoleillement diminue, le courant du réseau diminue aussi et il croit lorsque l'ensoleillement augmente.

Après mesure du spectre harmonique, les THD correspondant à chaque valeur de l'ensoleillement G sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau 5.2 THD en fonction de l'insolation G

Ensoleillement G (W/m ²)	THD (%)
1000	0.49
500	1.47
200	4.87

Intéressons-nous maintenant à l'allure des tensions U_{bus} et U_{con} respectivement aux bornes des condensateurs du bus CC et du circuit additionnel de découplage de puissance.

Figure 5.14 Formes d'onde des tensions U_{bus} et U_{con}

On constate d'après la figure précédente que les tensions U_{bus} et U_{con} respectivement aux bornes des condensateurs du bus CC et du circuit additionnel de découplage de puissance quasiment constantes malgré la variation de l'insolation. Cela prouve que la commande de l'onduleur oblige la tension du bus CC à suivre sa référence quel que soit la variation subie par l'insolation. C'est le même cas que la tension du condensateur du circuit

additionnel dont sa commande aussi lui permet de suivre sa référence dans le cas où l'ensoleillement varie.

5.3.2.2 Cas autonome

Comme le cas connecté au réseau, appliquons une variation sur l'irradiation de $G=1000\text{W/m}^2$ à $G=500\text{W/m}^2$ à partir de $t=0.35\text{s}$, ensuite il passe de $G=500\text{W/m}^2$ à $G=200\text{W/m}^2$ à $t=0.65\text{s}$ et enfin il croit de nouveau de $G=200\text{W/m}^2$ à $G=1000\text{W/m}^2$ à $t=1\text{s}$.

Après simulation, la figure ci-dessous représente respectivement l'allure de l'irradiation G , de la tension U_{pv} , du courant I_{pv} , la tension U_{charge} et enfin le courant I_{charge} .

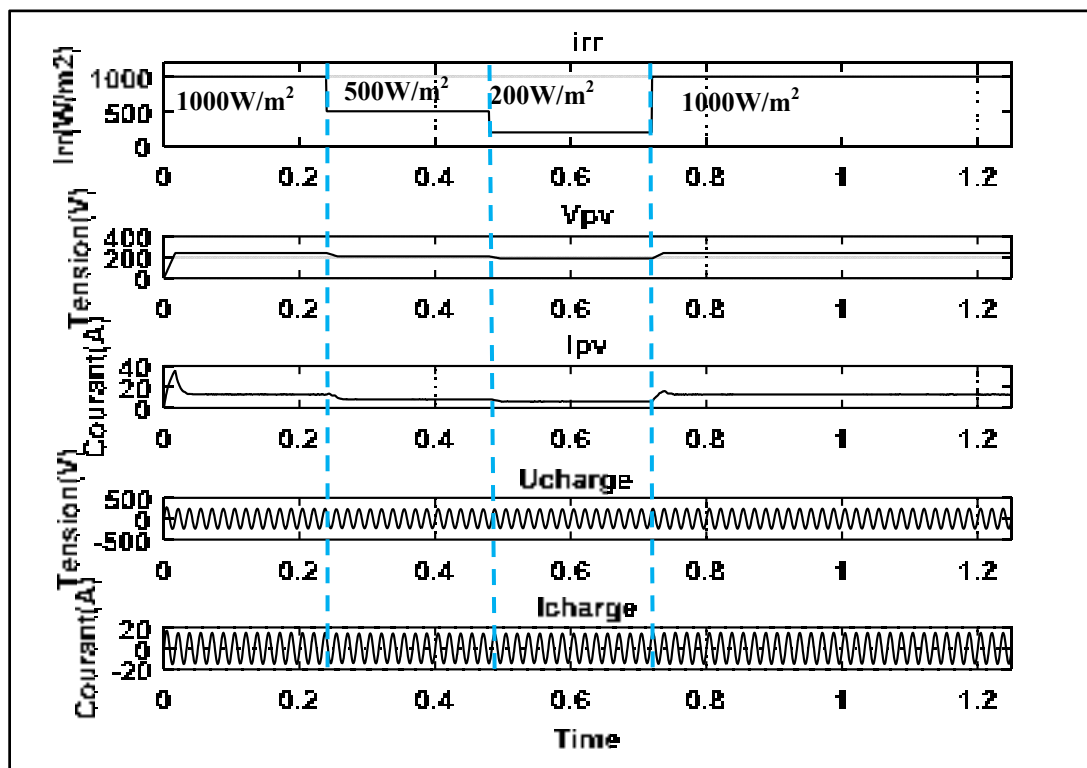


Figure 5.15 Ensoleillement, tension PV, courant PV, tension charge et courant charge

Les résultats sont identiques au cas connecté au réseau c'est-à-dire que la tension photovoltaïque varie peu avec l'ensoleillement, par contre le courant photovoltaïque varie

fortement et donc la puissance aussi. La tension et le courant de la charge restent constants malgré les variations de l'irradiation. Cela est dû au fait que la batterie fournit la puissance manquante lorsque le générateur photovoltaïque est en déficit. Tant que la batterie restera chargée, la charge sera alimentée au maximum même si l'ensoleillement est perturbé.

La figure 5.16 donne la forme d'onde de tension du condensateur du bus CC et celle de la batterie. On constate aussi que les deux tensions sont quasi constantes malgré la variation de l'ensoleillement.

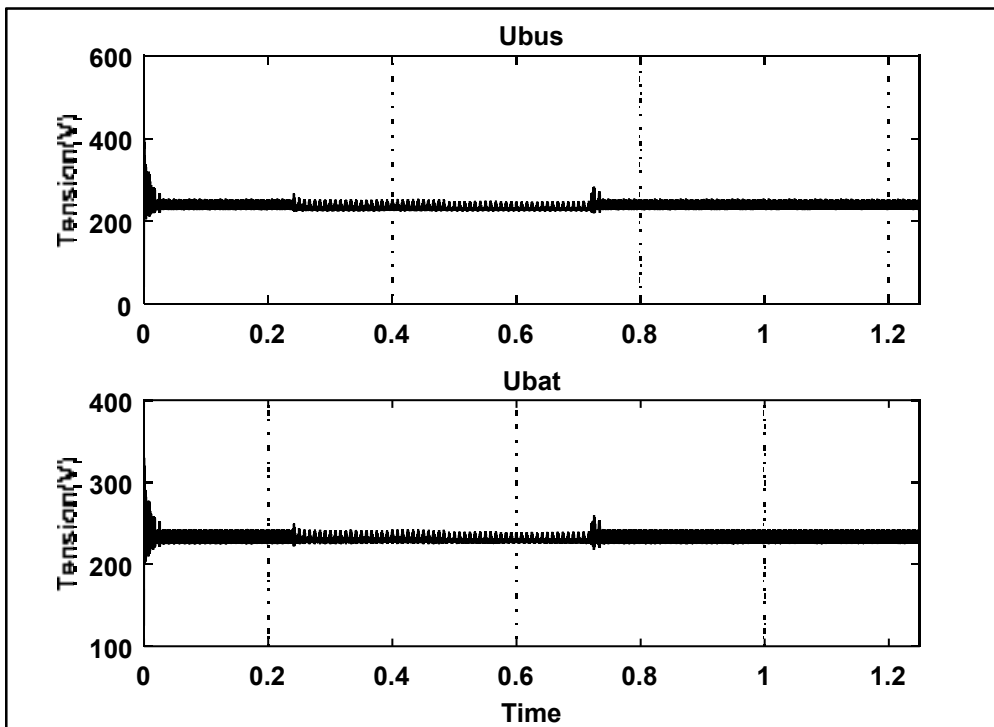


Figure 5.16 Forme d'onde de tension du condensateur du bus CC et de la batterie

Les allures des courbes analysées ci-dessus permettent de conclure que la puissance photovoltaïque injectée dans le réseau est affectée par l'ensoleillement, par contre pour un système photovoltaïque autonome munie d'une batterie, la puissance de la charge reste constante même si l'ensoleillement varie. Cela grâce à la puissance fournie par la batterie à la charge en cas d'insuffisance de puissance photovoltaïque.

5.4 Simulation de la performance du circuit découplage de puissance

Le circuit additionnel de découplage de puissance a pour rôle d'assister le condensateur du bus CC de l'onduleur dans le découplage de puissance. De ce fait, il devra permettre la réduction de l'ondulation de tension du condensateur du bus CC. Pour mieux observer cela, simulons le circuit complet en mode connecté au réseau avec le circuit additionnel de découplage de puissance inactif dans un premier temps, puis par la suite ce circuit additionnel est activé.

La figure 5.17 représente l'allure de la tension aux bornes du condensateur du bus CC et celle aux bornes du condensateur du circuit additionnel de découplage de puissance. Sur cette figure, le circuit additionnel de découplage de puissance est inactif du début jusqu'à $t=0.25s$ et $t=0.75s$ jusqu'à la fin, puis il est activé de $t=0.25s$ jusqu'à $t=0.75s$.

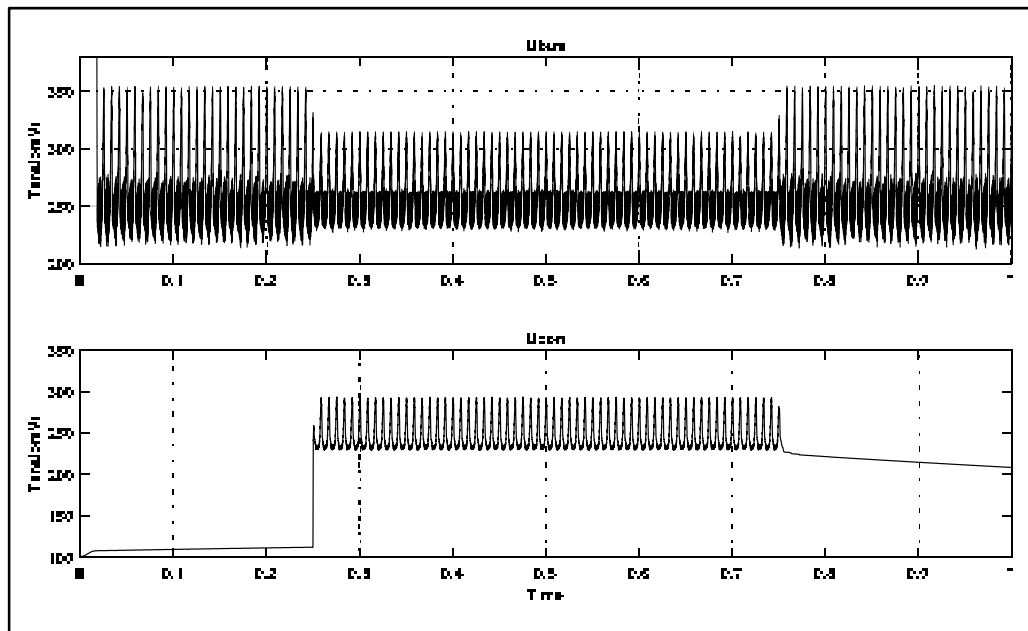


Figure 5.17 Tensions U_{bus} et U_{con} des condensateurs

A partir de la figure 5.17, il est constaté que lorsque le circuit additionnel de découplage de puissance est désactivé, (c'est-à-dire avant 0.5s), l'ondulation de tension du condensateur du bus CC est $\Delta U_{bus}=120V$ et après activation du circuit additionnel de découplage de

puissance, cette ondulation de tension est réduite à $\Delta U_{\text{bus}}=60\text{V}$. Cela montre que lorsque le circuit additionnel de découplage de puissance est activé, une partie de l'ondulation de tension du condensateur du bus CC est absorbé par le condensateur du circuit additionnel de découplage de puissance.

En plus d'absorber l'ondulation de tension du condensateur du bus CC, le circuit additionnel de découplage de puissance améliore la qualité du courant injecté dans le réseau vue que son rôle principal étant d'assurer le découplage de puissance.

La figure 5.18 dessous représente respectivement l'allure de l'irradiation G , de la tension U_{pv} , du courant I_{pv} , la tension $U_{\text{réseau}}$ et enfin le courant $I_{\text{réseau}}$.

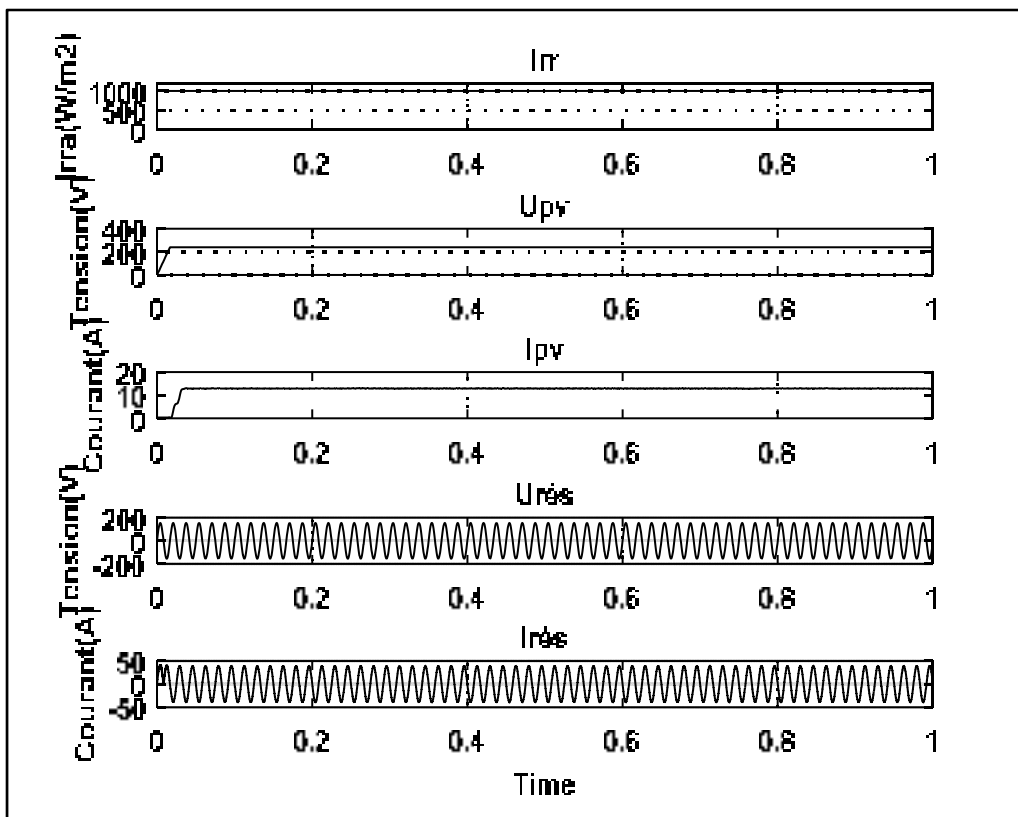


Figure 5.18 Ensoleillement G , tension U_{pv} , courant I_{pv} , tension $U_{\text{réseau}}$ et courant $I_{\text{réseau}}$

A partir de la figure ci-dessus, on constate que le circuit additionnel de découplage de puissance n'affecte pas les formes d'ondes de courant et de tension du générateur photovoltaïque et du réseau lorsqu'il est activé et désactivé.

Les courbes obtenues à l'issue de la simulation dans cette partie montrent que le circuit de découplage de puissance joue un rôle important dans le découplage de puissance et permet ainsi de réduire la taille du condensateur du bus CC. De plus on constate que aussi que l'activation ou la désactivation du circuit de découplage de puissance n'impacte pas sur les formes d'ondes de courant et de tension.

5.5 Comparaison entre condensateur électrolytique et film sur le bus CC

La méthode classique de découplage de puissance la plus connue est l'utilisation de condensateur électrolytique de grande capacité sur le bus CC de l'onduleur. Or dans la littérature, il est démontré que ces condensateurs ont une durée de vie très courte et sont source de perte de puissance due à leur grande résistance série équivalente (ESR).

Dans le cas de notre travail de recherche, la méthode utilisée est celle du circuit additionnel de découplage de puissance qui permet par la suite l'utilisation de condensateur film de petite capacité et de longue durée de vie sur le bus CC de l'onduleur. Ce type de condensateur supporte de nombreuses contraintes comme l'ondulation de tension ou de courant qui impactent peu sur sa durée de vie par rapport au condensateur électrolytique de grande capacité.

Dans le chapitre précédent, en utilisant la méthode traditionnelle de découplage de puissance dans notre cas avec une puissance $P = 3\text{kW}$ et une tension $V_{\text{bus}} = 350\text{V}$ avec une variation de 2%, alors le condensateur nécessaire a environ une capacité de $1250\mu\text{F}$. une telle capacité correspond à un condensateur électrolytique. Cependant, avec la méthode du circuit additionnel de découplage de puissance, le condensateur du bus CC a une capacité très réduite de l'ordre de $15\mu\text{F}$. Cette capacité correspond à celle d'un condensateur film.

5.5.1 Paramètres des condensateurs électrolytique et film du bus CC

Sans le circuit de découplage de puissance, c'est un condensateur électrolytique d'une capacité de $1250\mu\text{F}$ qui est utilisé sur le bus Cc de l'onduleur et avec le circuit de découplage de puissance, c'est un condensateur de $15\mu\text{F}$ qui est utilisé. A partir des paramètres de ces condensateurs, il est possible de les comparer en utilisant les bases de données fournies par Digi-Key ELECTRONICS et Vishay.

Le tableau 5.3 donne les caractéristiques comparatives des deux condensateurs électrolytique et film utilisés dans ce travail (Digi-Key ELECTRONICS, 2015) et (VISHAY, 2015).

Tableau 5.3 Caractéristiques comparatives des condensateurs électrolytique et film

Capacitor	Aluminum Electrolytic	Film Capacitor
Température de fonctionnemnet	$-25^{\circ}\text{C} \sim 105^{\circ}\text{C}$	$-55^{\circ}\text{C} \sim 105^{\circ}\text{C}$
Volume	$>4700\text{mm}^3$	20.247mm^3
Capacité	$1250\mu\text{F}$	$15\mu\text{F}$
Résistance série équivalente (ESR)	$140\text{ m}\Omega$	-
Durée de vie @ Temp.	$3000\text{ Hrs @ }105^{\circ}\text{C}$	$>100000\text{ Hrs @ }70^{\circ}\text{C}$

Le tableau 5.3 compare les caractéristiques des condensateurs électrolytique et film qui ont été étudiés dans ce travail. Il est évident que le condensateur film est plus avantageux que le condensateur électrolytique sur presque tous les niveaux. Non seulement le condensateur électrolytique est très volumineux mais aussi il possède une grande résistance série équivalente (ESR). De plus il a une durée de vie très courte par rapport au condensateur film.

5.5.2 Comparaison de coût du circuit classique et du circuit proposé

Pour effectuer la comparaison, il s'agit de calculer dans le cas du circuit classique le coût du condensateur électrolytique et dans le cas du circuit proposé le coût total du circuit additionnel de découplage de puissance plus celui du condensateur du bus CC de l'onduleur.

5.5.2.1 Circuit classique

Comme cela a été dit ci-dessus, dans le circuit classique on utilise un condensateur électrolytique de grande capacité pour assurer le découplage de puissance. Dans notre cas, selon les calculs, le condensateur électrolytique nécessaire à une capacité de $1250\mu\text{F}$. Selon la base de données de Digi-Key ELECTRONICS, ce type de condensateur a une durée de vie de 3000 heures à une température de fonctionnement 105°C et son coût est de 42.43\$ (CAD).

5.5.2.2 Circuit proposé

Pour le circuit proposé regardons les coûts des différents éléments dans la base de données de Digi-Key ELECTRONICS et Vishay. Le condensateur du bus CC de l'onduleur dans ce circuit à une capacité de $15\mu\text{F}$ avec une durée de vie de plus de 100000 heures et son coût est de 16.90\$ (CAD). Le circuit additionnel de découplage de puissance est constitué de deux commutateurs MOSFET de 1.93\$ (CAD) l'unité, une bobine d'inductance $L_{\text{on}}=20\mu\text{H}$ dont le prix est de 3.48\$ (CAD) et un condensateur de capacité $C_{\text{on}}=25\mu\text{F}$ avec une durée de vie de plus de 100000 heures dont le prix est de 29.86\$ (CAD).

Résumons les différents composants du circuit additionnel de découplage de puissance ainsi que leur coût dans le tableau 5.4 :

Tableau 5.4 Composants et coût du circuit additionnel de découplage de puissance

Composants	Coût
1 Condensateur (25 μ F)	29.86\$ (CAD)
2 MOSFET	3.86\$ (CAD)
1 Inductance (20 μ H)	3.48\$ (CAD)
Circuit imprimé et autres	10\$ (CAD)

Le coût total du circuit additionnel de découplage de puissance est de :

$$29.6 + 3.86 + 3.48 + 10 = 47.20\$ \text{ (CAD)}.$$

En ajoutant le coût du condensateur du bus CC, on obtient le coût total du circuit proposé, soit : $47.20 + 16.90 = 64.1\$ \text{ (CAD)}$.

En comparant dans l'immédiat le cout du circuit classique à celui du circuit proposé, on constate que celui du circuit classique est moins élevé par rapport à celui du circuit proposé. Cependant, en tenant compte de la durée de vie des condensateurs, le circuit proposé est nettement moins couteux par rapport au circuit classique.

5.6 Avantages du circuit proposé

La différence entre le circuit classique et le circuit proposé dans ce travail de recherche est que ce dernier est identique au circuit classique sauf qu'un circuit de découplage de puissance est monté en parallèle avec le condensateur du bus CC de l'onduleur. Le fait que le circuit additionnel de découplage de puissance soit monté en parallèle avec le condensateur du bus CC évite la perturbation des courants et des tensions du réseau en cas de déconnexion de ce circuit de découplage.

D'une part, les condensateurs utilisés dans le circuit proposé sont tous des condensateurs film de petite capacité à longue durée de vie. Ces types de condensateurs ont une résistance série équivalente négligeable, ce qui réduit considérablement les pertes dans le circuit. De plus ces

condensateurs supportent un grand nombre de contraintes comparées aux condensateurs électrolytiques de grande capacité, ce qui leur permet d'avoir une longue durée de vie comparé à ces derniers.

Aussi, en ce qui concerne le coût du circuit additionnel de découplage de puissance, d'après les calculs précédents ci-dessus, on remarque qu'il est légèrement couteux par rapport au circuit classique à condensateur électrolytique. Cependant à long terme, le circuit additionnel est rentable. Par exemple le condensateur électrolytique a une durée de vie de plus de 100000heures à 70°C, calculons la durée de vie du condensateur électrolytique (3000heures à 105°C) à cette température de 70°C en utilisant la formule de la durée de vie du condensateur en fonction de la température vue au chapitre III, soit :

$$L = L_0 * 2^{\frac{T_{\max}-T_a}{10}}$$

$$= 3000 * 2^{\frac{105-70}{10}}$$

$$L=33941.13\text{heures}$$

A la même température ambiante de 70°C, le condensateur électrolytique a seulement une durée de vie de 33941.13heures pendant que le condensateur électrolytique est à plus de 100000heures. En faisant un rapport simple toujours à une température ambiante de 70°C, on constate que le condensateur film a une durée de vie au moins 3 fois plus longue que le condensateur électrolytique. Dans ce cas, à long terme, le coût du condensateur électrolytique du circuit classique est multiplié au moins par 3. Ce qui fait augmenter le coût du circuit classique a plus de 127\$(CAD).

Tous ces avantages du point de vu coût et de durée de vie confèrent une robustesse au circuit proposé. Il est évident qu'à long terme, c'est plus avantageux d'investir sur un circuit constitué de condensateurs film à petite capacité que d'investir sur un circuit comportant des condensateurs électrolytiques même si le coût est faible dans l'immédiat.

5.7 Méthode de prolongation de la durée de vie du condensateur sur le bus CC

A partir des études menées dans ce travail de recherche et selon la littérature, les condensateurs les plus fragiles en termes de durée de vie sont les condensateurs chimiques à grande capacité. Ils sont vulnérables face aux différentes contraintes subies dans leur fonction de découplage de puissance ou de filtrage ou de liaison dans les circuits électroniques.

Le circuit proposé dans ce travail étant constitué d'un circuit additionnel de découplage de puissance monté en parallèle avec le condensateur du bus CC, il est souhaitable alors pour le circuit classique à condensateur électrolytique de grande capacité, d'utiliser plusieurs condensateurs en parallèle de petite capacité à la place du condensateur de grande capacité. En plaçant ces condensateurs en parallèle, la capacité totale est obtenue en additionnant la capacité de chacun de ces condensateurs.

Pour vérifier cette solution, considérons le circuit classique constitué dans un premier temps d'un condensateur électrolytique de capacité de $1250\mu\text{F}$ sur le bus CC de l'onduleur, dans un second temps nous utiliserons deux condensateurs électrolytiques identiques de capacité $625\mu\text{F}$ chacun et enfin nous utiliserons quatre condensateurs électrolytiques identiques de capacité $312.5\mu\text{F}$ chacun. Nous gardons les mêmes paramètres de simulation sous MATLAB comme ci-dessus. Appliquons une variation sur l'irradiation de $G=1000\text{W}/\text{m}^2$ à $G=200\text{W}/\text{m}^2$ à partir de $t=0.35\text{s}$, ensuite il passe de $G=200\text{W}/\text{m}^2$ à $G=500\text{W}/\text{m}^2$ à $t=0.65\text{s}$ et enfin il croit de nouveau de $G=500\text{W}/\text{m}^2$ à $G=1000\text{W}/\text{m}^2$ à $t=1.02\text{s}$.

5.7.1 Un condensateur électrolytique de $1250\mu\text{F}$ au bus CC

Le circuit utilisé ici est le circuit classique avec un condensateur électrolytique sur le bus CC. Analysons les résultats obtenus après simulation :

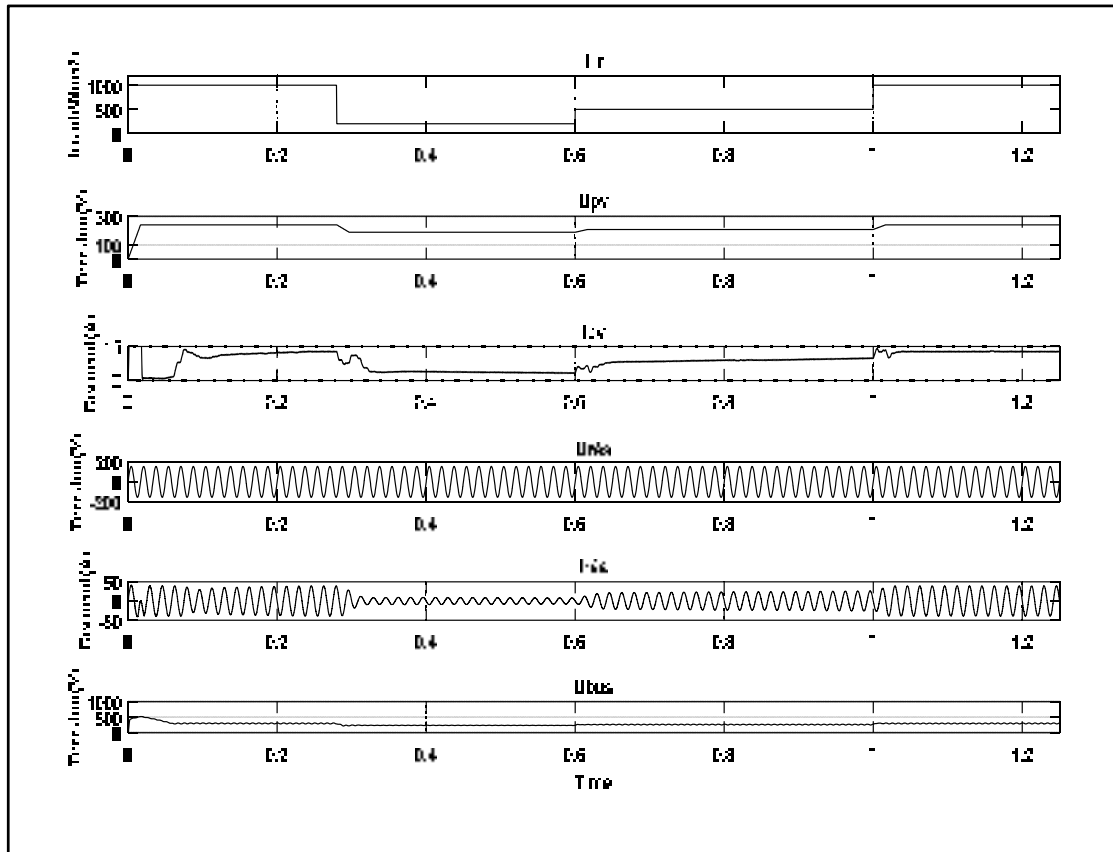


Figure 5.19 Courbes de simulation avec 1 condensateur électrolytique de $1250\mu\text{F}$

Comme les résultats obtenus précédemment avec le circuit additionnel de découplage de puissance, on constate que la tension du réseau reste constante quel que soit la variation de l'ensoleillement. Mais quand au courant du réseau, il diminue lorsque l'ensoleillement diminue et augmente lorsque celui-ci augmente.

5.7.2 Deux condensateurs électrolytiques de $625\mu\text{F}$ au bus CC

Le circuit dans ce cas-ci est identique au précédent sauf que le condensateur de $1250\mu\text{F}$ est remplacé par deux condensateurs identiques de $625\mu\text{F}$ chacun. Les résultats obtenus après simulation sont indiqués sur la figure 5.20:

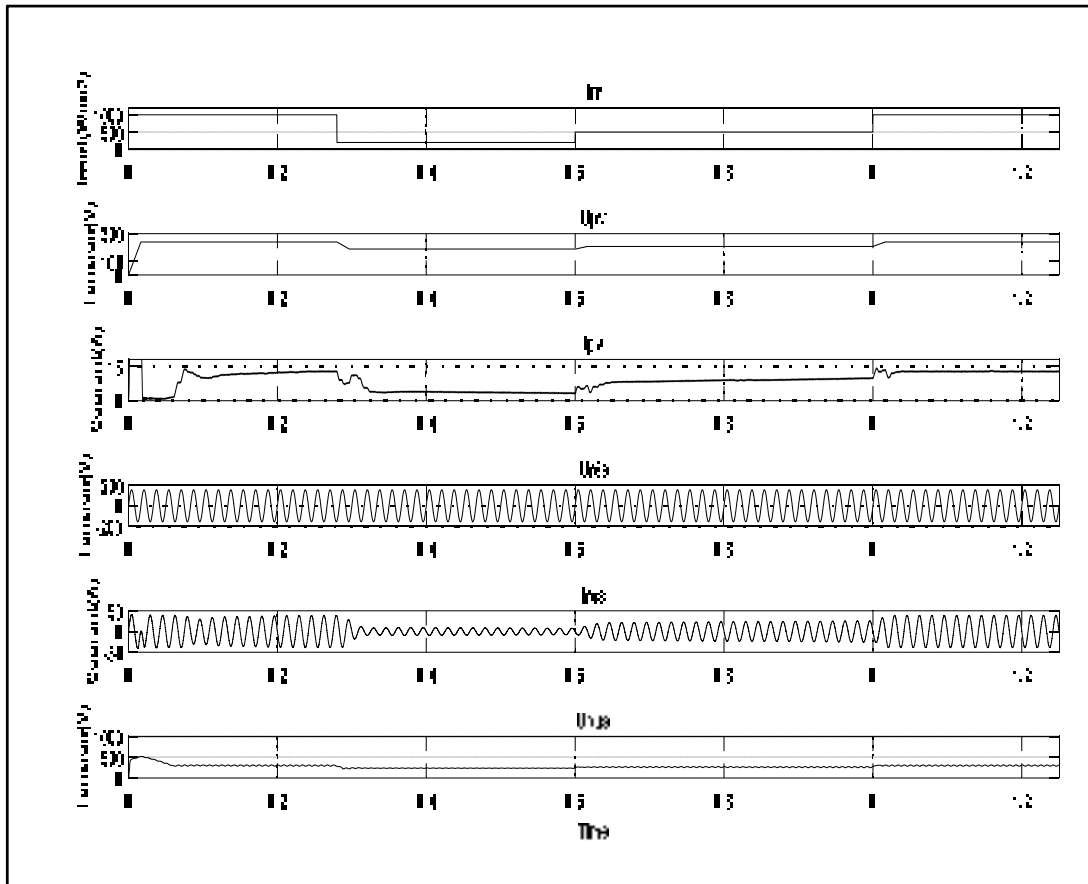


Figure 5.20 Courbes de simulation avec 2 condensateur électrolytique de $625\mu\text{F}$

D'après les courbes de la figure 5.20, on constate que les résultats sont identiques au cas précédent avec un condensateur électrolytique de $1250\mu\text{F}$ au bus CC.

5.7.3 Quatre condensateurs électrolytiques de $312.5\mu\text{F}$ au bus CC

De même que les deux cas précédents, le circuit de cette partie comporte quatre condensateurs identiques de capacité $312.5\mu\text{F}$ chacun sur le bus CC. Les résultats obtenus après simulation sont indiqués sur la figure suivante:

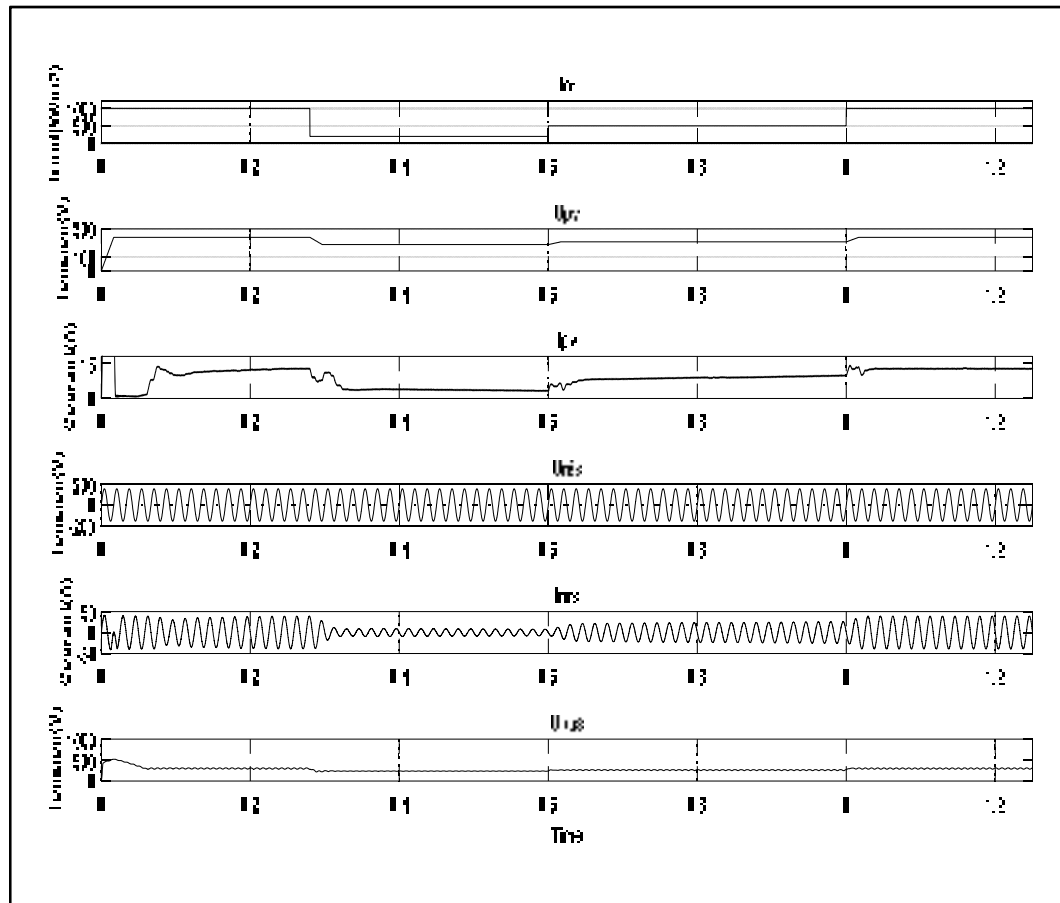


Figure 5.21 Courbes de simulation avec 4 condensateurs électrolytiques de $312.5\mu\text{F}$

Les résultats obtenus sur la figure 5.21 sont similaires aux deux cas précédents avec un condensateur et deux condensateurs au bus CC.

De façon générale, selon les fournisseurs plus la taille du condensateur est petite plus sa durée de vie en nombre d'heures est grande et aussi sa résistance série équivalente est faible, ce qui minimise les pertes par échauffement. Ainsi donc, les résultats obtenus étant identiques, il serait meilleur en terme de durée de vie d'utiliser plusieurs condensateurs de petite capacité en parallèle sur le bus CC de l'onduleur en remplacement du condensateur de grande capacité à durée de vie limitée. Ces petits condensateurs étant montés en parallèle, la résistance équivalente est faible, donc l'efficacité du circuit est augmentée dans ce cas.

De plus, en ce qui concerne le coût, le fournisseur vend généralement le condensateur par unité (Farad). Cela veut dire qu'il y a très peu de différence de coût entre le gros condensateur électrolytique de $1250\mu\text{F}$ et les 4 petits condensateurs de $312.5\mu\text{F}$.

5.8 Autres méthodes de prolongation de la durée de vie du condensateur

D'après l'étude menée dans le chapitre III, il est ressorti que la durée de vie du condensateur chimique dépend surtout de certains paramètres comme la température de fonctionnement et le courant d'ondulation. Pour cela, les méthodes les plus simples pour améliorer la durée de vie des condensateurs chimiques utilisés dans le bus CC de l'onduleur sont :

- Placer le condensateur loin des sources de chaleur, c'est-à-dire installer le condensateur loin des éléments comme les transistors, les transformateurs ou les éléments à grande résistance produisant beaucoup de chaleur, ou dans le cas contraire utiliser un refroidisseur pour le condensateur qui le maintiendra à une température de fonctionnement relativement faible.
- L'autre contrainte importante étant le courant d'ondulation, il s'agira d'éviter que le condensateur atteigne son courant d'ondulation maximal. Cela peut se faire grâce à la commande de l'onduleur qui contrôle en même la tension et le courant du condensateur du bus CC. En régulant correctement cette commande, elle limite le courant d'ondulation du condensateur.
- L'étude a montré aussi que la tension impacte peut sur la durée de vie du condensateur, cependant les fabricants demandent à ce que l'utilisateur ne dépasse pas 80% de la tension nominale. Pour une bonne durée de vie du condensateur, ne pas dépasser 80% de la tension nominale.

5.9 Conclusion

Dans ce chapitre, il était question de simuler le circuit proposé qui diffère du circuit classique par l'addition d'un circuit de découplage de puissance. Les résultats de simulation ont permis de mieux comprendre le fonctionnement du circuit proposé. Cette simulation qui a été d'abord effectuée sous un ensoleillement constant, a été par la suite

effectuée sous un ensoleillement variable et cela en mode autonome puis en mode connecté au réseau.

Les résultats de simulation sous un ensoleillement constant indiquent que le courant et la tension du réseau ou de la charge atteignent leur maximum et restent constants. Quant aux tensions du condensateur du bus CC et du circuit de découplage, elles présentent une faible ondulation. Cela est dû en partie grâce à la commande MPPT et à la commande du circuit additionnel de découplage de puissance.

En ce qui concerne la simulation à ensoleillement variable, les résultats sont conformes à ceux de la littérature. Pour le cas connecté au réseau le courant injecté varie avec l'ensoleillement, cependant pour le cas autonome, grâce à la batterie, la puissance photovoltaïque est compensée en cas de baisse de l'ensoleillement. La qualité des courants et des tensions sont bonnes car ils sont conformes aux normes fixées par le standard IEEE 519-1992.

Enfin la simulation des performances du circuit additionnel de découplage de puissance ont permis de cerner le rôle capital de ce circuit qui est le découplage de puissance. Il soutient énormément le condensateur du bus CC, ce qui réduit sa taille et par conséquent lui offre une longue durée de vie. Cela est constaté en partie par la réduction de l'ondulation de tension du condensateur du bus CC lorsque le circuit de découplage de puissance est activé.

CONCLUSION

La demande mondiale en énergie ne fait que croître au fil des années. Cette croissance fait augmenter la pollution de l'environnement dû à l'utilisation des énergies fossiles. Aussi ces énergies se font de plus en plus rares dû à leur exploitation massive. Pour protéger l'environnement par la destruction de la couche d'ozone les chercheurs se sont orientés sans détour vers les énergies renouvelables, surtout le solaire photovoltaïque. Des avancées sont faites dans le domaine mais beaucoup reste à faire. La technologie solaire photovoltaïque rencontre toujours des difficultés surtout au niveau de la durée de vie de ses composants.

De façon générale, le panneau solaire a une durée de vie de près de 25ans, pendant que l'onduleur ne fonctionne seulement que 5ans le plus souvent. Cette courte durée de vie de l'onduleur est due au condensateur placé sur son bus CC. Donc pour augmenter la durée de vie de l'onduleur il faut obligatoirement améliorer la durée de vie du condensateur placé sur son bus CC. C'est dans cette optique que notre travail de recherche a porté sur l'amélioration de la durée de vie du condensateur situé sur le bus CC de l'onduleur. Ce travail a été développé en 5 chapitres qui débute de la revue de la littérature jusqu'aux résultats et discussion. L'objectif de ce travail est de proposer des solutions pour une amélioration nette de la durée de vie du condensateur situé sur le bus CC de l'onduleur ce qui augmentera en retour la durée de vie de l'onduleur et par conséquent celle du système photovoltaïque au complet.

Avant d'aborder le sujet de recherche proprement dit, nous avons passé en revue les travaux déjà effectués dans le cadre de l'amélioration de la durée de vie du condensateur sur le bus CC de l'onduleur. Plusieurs topologies de découplage de puissance sont proposées et leurs performances ont été testées au laboratoire. De façon globale, ces topologies font usage de circuit de découplage de puissance qui réduit ainsi la taille du condensateur du bus CC et par conséquent l'utilisation de condensateur film de petite capacité en lieu et place du condensateur chimique de grande capacité. Le condensateur film de petite capacité ayant une

longue durée de vie, une fois placé sur le bus CC de l'onduleur, augmente ainsi la durée de vie de cet onduleur.

Après avoir passé en revue les travaux déjà effectués en ce qui concerne l'amélioration de la durée de vie du condensateur sur le bus CC de l'onduleur, nous avons étudié et simulé la cellule photovoltaïque. Les résultats de cette simulation ont permis de confirmer l'impact de l'ensoleillement sur la tension et le courant photovoltaïque. On rappelle que le courant de sortie du générateur photovoltaïque varie considérablement avec l'irradiation pendant que la tension varie de façon modérée. Cependant la tension du générateur photovoltaïque diminue considérablement lorsque la température augmente et son courant augmente légèrement avec la température. L'onduleur monophasé qui a été l'objet de cette étude est à l'origine de la conversion de l'énergie continue du générateur photovoltaïque en une énergie alternative qui est ensuite injectée dans le réseau ou alimente directement la charge.

Afin de proposer des solutions qui contribueront à améliorer la durée de vie du condensateur sur le bus CC de l'onduleur, nous avons énuméré d'abord les condensateurs utilisés sur ce bus CC ainsi que les facteurs qui influencent leur durée de vie. Les condensateurs sont classés en deux grands groupes dont les condensateurs chimiques et les condensateurs solides. Les condensateurs chimiques ont une grande capacité mais une durée de vie très limitée et sont utilisés dans les bus CC des topologies classiques ou traditionnelles. Cependant, les condensateurs film à petite capacité et à longue durée de vie sont utilisés dans les topologies modernes. Le condensateur du bus CC de l'onduleur absorbe les courants parasites et réduit aussi les ondulations de tension qui perturbent la production continue du générateur photovoltaïque. Les facteurs qui entravent à la durée de vie du condensateur sont surtout la température, le courant d'ondulation et la tension appliquée à ses bornes.

Comme solution qui peut contribuer à améliorer la durée de vie du condensateur situé sur le bus CC de l'onduleur, nous avons proposé une topologie qui a été présentée et étudiée durant ce travail. La topologie du circuit proposé est munie d'un circuit additionnel de découplage de puissance monté en parallèle avec le condensateur du bus CC de l'onduleur. Grâce à ce

circuit de découplage de puissance, il est possible d'utiliser un condensateur film de petite capacité et a longue durée de vie sur le bus CC de l'onduleur. Cela prolonge la vie de l'onduleur et par conséquent celle du système photovoltaïque.

La nouveauté dans ce travail est que les condensateurs utilisés ont de petites capacités par rapport à la puissance d'entrée qui est de l'ordre de 3kW. Ensuite, grâce à ces condensateurs de petite capacité les pertes sont réduites car leur résistance série équivalente est négligeable comparé aux condensateurs chimiques de grande capacité qui possèdent une grande résistance série équivalente. Enfin la commande du circuit additionnel de découplage de puissance utilise le courant d'ondulation qui est produit par l'onduleur comme courant de référence pour produire la puissance nécessaire au découplage. Grâce à cette technique, la durée de vie de l'onduleur peut être prolongée au même niveau que celui du panneau solaire photovoltaïque a un coût très minimal.

Les simulations effectuées sous MATLAB ont permis de mieux comprendre le principe de fonctionnement du circuit proposé. Les résultats obtenus sont conformes aux normes fixées par le standard IEEE 519-1992 et de ce fait, cela prouve la robustesse du circuit additionnel de découplage de puissance. Dans la dernière partie de ce travail, quelques suggestions ont été faites dans le but surtout d'améliorer la durée de vie des condensateurs chimiques de grande capacité.

RECOMMANDATIONS

Au terme de notre étude, force est de reconnaître que malgré la preuve de la viabilité du circuit proposé par simulation, il serait souhaitable de vérifier cela à temps réel. C'est-à-dire qu'il faudra implémenter ce circuit au laboratoire pour confirmer les résultats théoriques obtenus par simulation.

De plus la solution proposée, pour le cas d'un onduleur utilisant un condensateur électrolytique de grande capacité, qui consiste à utiliser plusieurs condensateurs électrolytiques de petite capacité en lieu et place de celui de grande capacité fonctionne bien en simulation. Il serait encore plus intéressant d'implémenter cette solution en temps réel pour une confirmation des résultats de simulation.

ANNEXE I

SCHEMA DE SIMULATION DE PANNEAU SOLAIRE

Ce schéma a été utilisé pour tracer la caractéristique courant-tension à irradiation variable et température constante, la caractéristique puissance-tension, irradiation variable et température constante, la caractéristique courant-tension, température variable et irradiation constante et la caractéristique puissance-tension, température variable et irradiation constante.

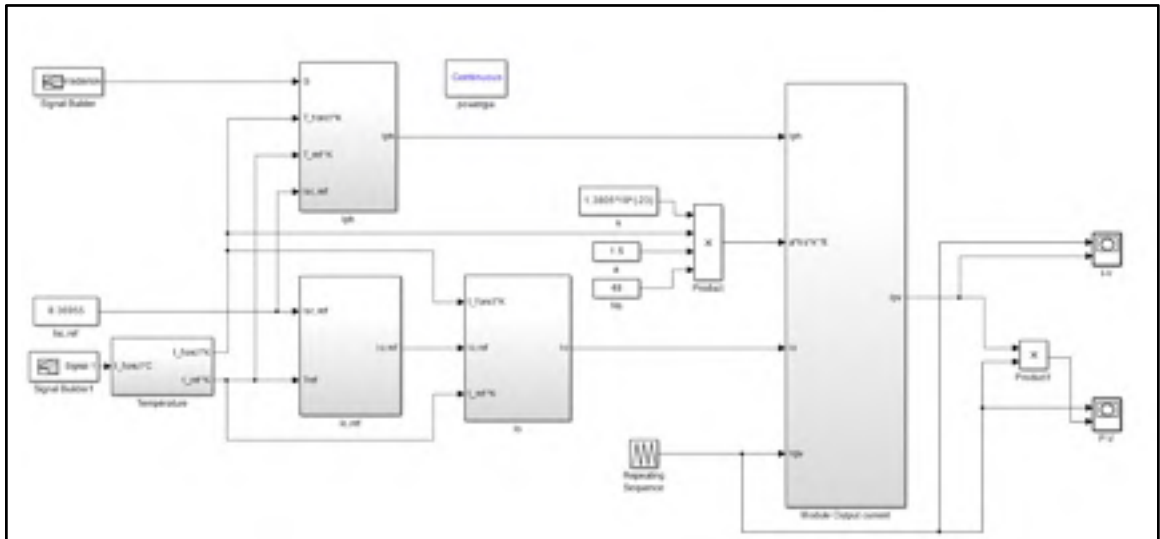


Figure-A I-I Schéma de simulation panneau solaire sous Simulink

ANNEXE II

SCHEMA DE SIMULATION DE L'IMPACT D'UNE DÉFAILLANCE DU CONDENSATEUR DU BUS CC SUR L'ONDULEUR

Le schéma Simulink ci-dessous permet de simuler de l'impact d'une défaillance du condensateur du bus CC sur l'onduleur. Les résultats de cette simulation sont donnés dans le chapitre III.

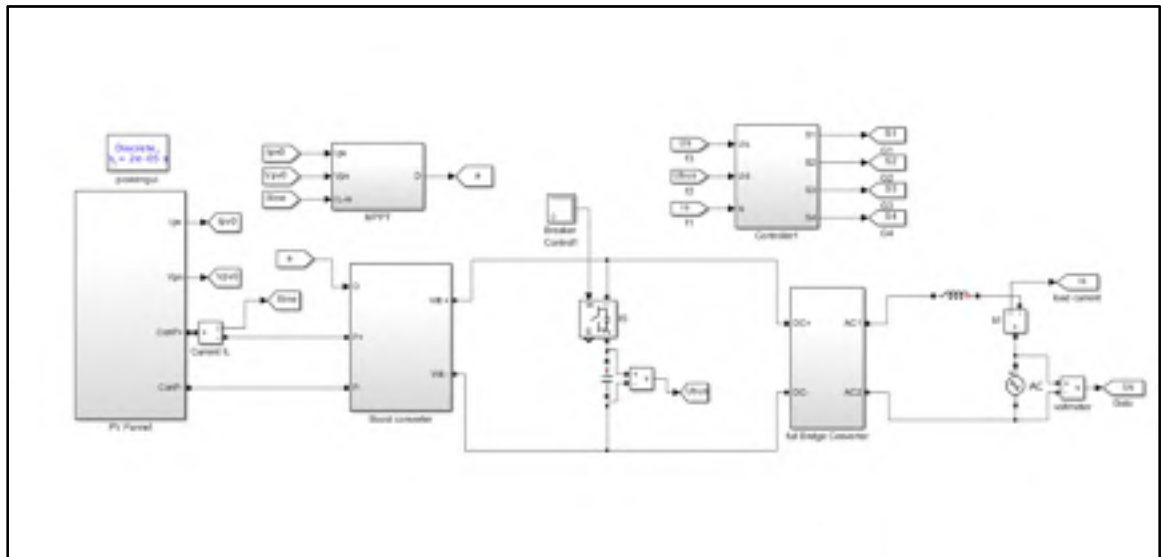


Figure-A II-I Schéma de l'impact d'une défaillance du condensateur sur l'onduleur

ANNEXE III

SCHÉME SIMULINK SOUS MATLAB DE LA VARIATION DE LA TENSION ONDULÉE EN FONCTION DE LA CAPACITÉ ET DE LA RÉSISTANCE SÉRIE ÉQUIVALENTE

Ce schéma Simulink permet d'une part d'observer la variation de la tension ondulée en fonction de la résistance série équivalente et d'autre part la variation de la tension ondulée en fonction de la capacité du condensateur.

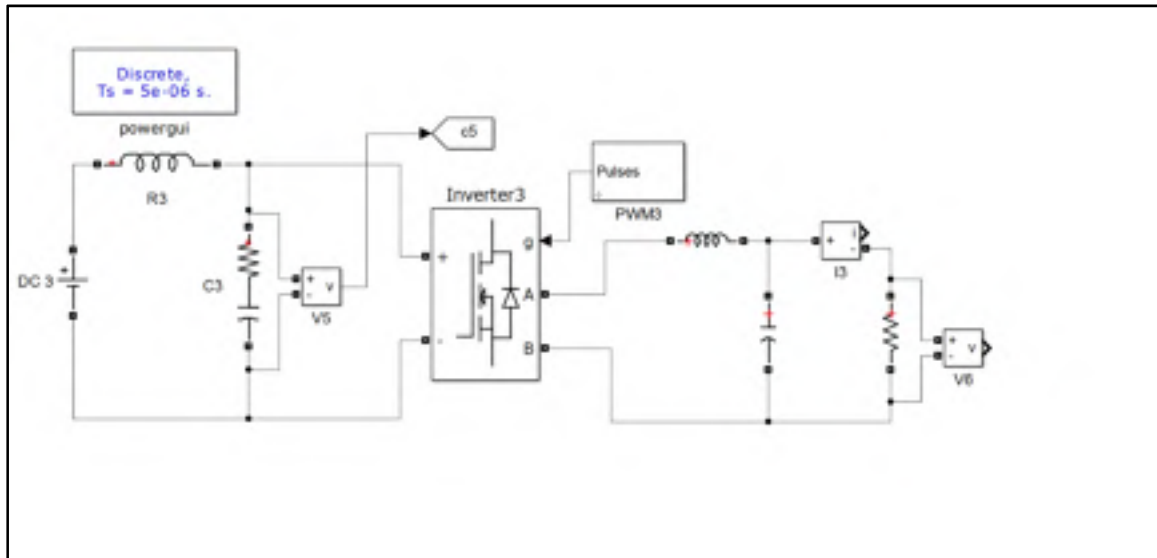


Figure-A III-I Variation de la tension ondulée en fonction de ESR et de la capacité

ANNEXE IV

SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE CONNECTÉ AU RÉSEAU

Le modèle Simulink de MATLAB ci-dessous est celui d'un système photovoltaïque connecté au réseau avec un circuit additionnel de découplage de puissance.

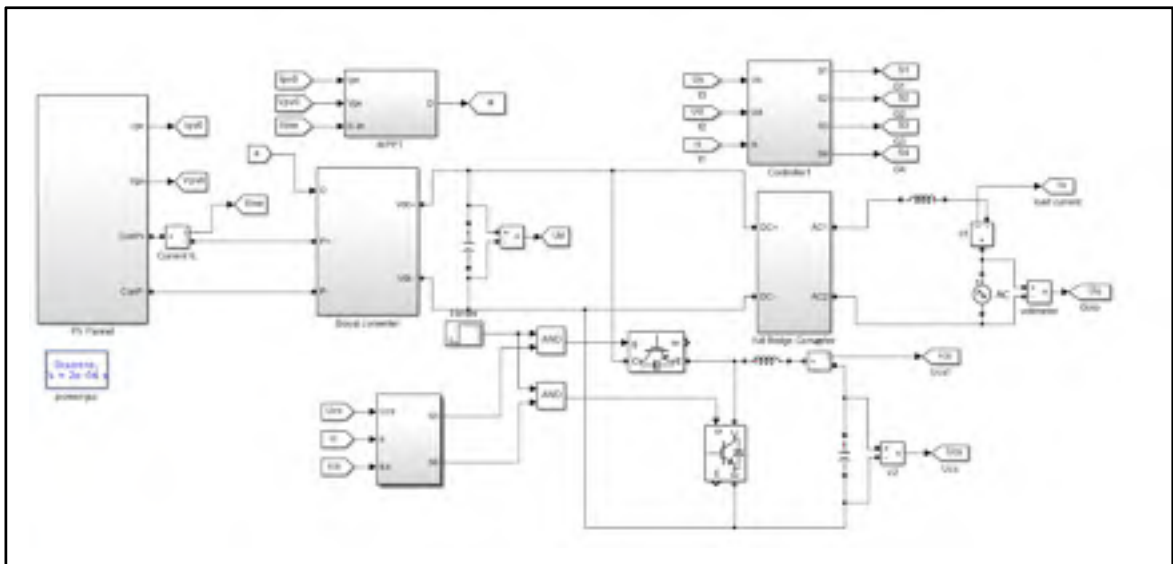


Figure-A IV-I Système photovoltaïque connecté au réseau

ANNEXE V

SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE AUTONOME AVEC SYSTÈME DE STOCKAGE D'ÉNERGIE

Le modèle Simulink de MATLAB ci-dessous représente un système photovoltaïque autonome avec un système de stockage d'énergie.

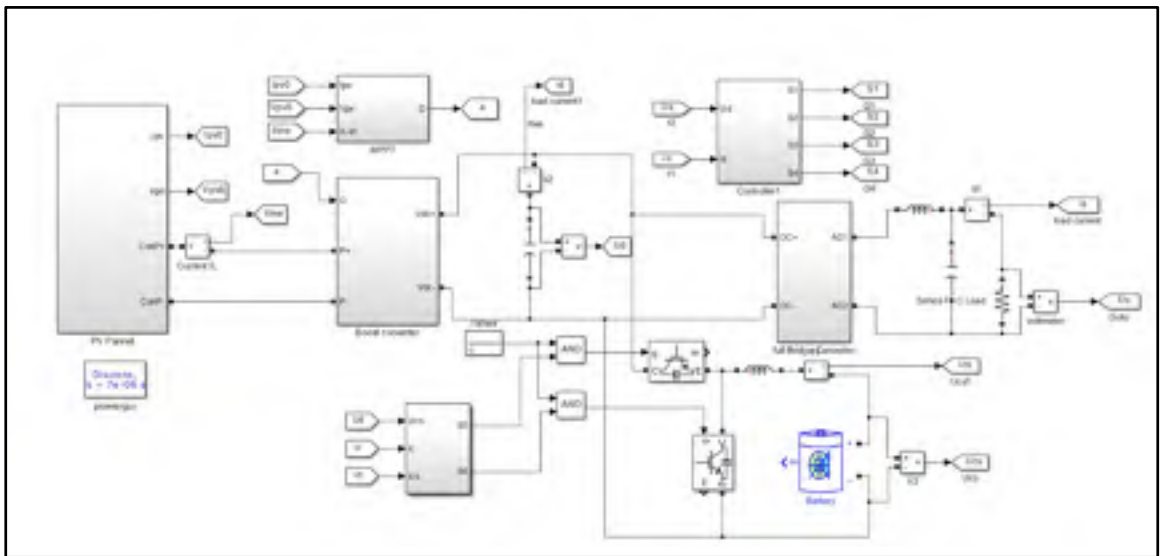


Figure-A V-I Système photovoltaïque autonome avec système de stockage d'énergie

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Altas, IH, et AM Sharaf. 2007. « A photovoltaic array simulation model for Matlab-Simulink GUI environment ». In *Clean Electrical Power, 2007. ICCEP'07. International Conference on*. p. 341-345. IEEE.
- Andersen, Michael, et Bengt Alvsten. 1995. « 200 W low cost module integrated utility interface for modular photovoltaic energy systems ». In *Industrial Electronics, Control, and Instrumentation, 1995., Proceedings of the 1995 IEEE IECON 21st International Conference on*. Vol. 1, p. 572-577. IEEE.
- Automotive & Industrial Systems Company April, 2013. «Aluminium electrolytic capacitors» Issued by Panasonic Co., Ltd. Fifth edition.
- Banu, E, et Marcel Istrate. 2012. « Modeling and simulation of photovoltaic arrays ». *Buletinul AGIR*, vol. 3, p. 161-166.
- Bengt, Alvsten. 1995. « Electrolytic capacitors theory and applications ». *RIFA Electrolytic Capacitors*.
- Besson, René. 1984. *Technologie des composants électroniques*. Ed. radio.
- Both, Jens. 2015. « Electrolytic capacitors, 1890 to 1925: early history and basic principle ». *Electrical Insulation Magazine, IEEE*, vol. 31, n° 1, p. 22-29.
- Chapin, Daryl M, CS Fuller et GL Pearson. 1954. « A new silicon p-n junction photocell for converting solar radiation into electrical power ». *Journal of Applied Physics*, n° 25, p. 676-677.
- Chen, Y.-M.-C. Liu, F.-Y. Wu and Y.-E. Wu. 10-14 Mar 2002. «Multi-Input Converter with Power Factor Correction and Maximum Power Point Tracking Features». 17th Annual IEEE, Vol. 1, pp490-496.
- Choi, Byungcho, Sung-Soo Hong et Hyokil Park. 2001. « Modeling and small-signal analysis of controlled on-time boost power-factor-correction circuit ». *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 48, n° 1, p. 136-142.
- Collombet, Christian, Jean-Marc Lupin et Jacques SCHONEK. 1999. « Perturbations harmoniques dans les réseaux pollués, et leur traitement ». *Cahier Technique Schneider Electric*, n° 152.
- Committee, ISC. « IEEE standard for interconnecting distributed resources with electric power systems ». *IEEE Std. 1547–2003*, p. 1-28.

Condensateurs. En ligne. <http://neo.sys.pagesperso-orange.fr/Page%20html/Base/pass-cond02.htm> Consulté le 20 mai 2015.

Cornell Dubilier, Liberty, SC 29657. April 4, 2007. «Aluminum Electrolytic Capacitors Application Guide». <http://www.cde.com/new/appguide>.

Digi-Key ELECTRONICS. En ligne. <http://www.digikey.ca> Consulté le 11 mai 2015.

DREAM & SONG WEB. En ligne. http://dreamsong.free.fr/le_condensateur_5832.htm Consulté le 20 mai 2015.

Dunlop, Ewan D, David Halton et Heinz Ossenbrink. 2005. « 20 years of life and more: where is the end of life of a PV module? ». In *Photovoltaic Specialists Conference, 2005. Conference Record of the Thirty-first IEEE*. p. 1593-1596. IEEE.

ECIA eWorkspace. En ligne. <http://standards.ec-central.org> Consulté le 10 avril 2015.

El-Husseini, Mohamad-Hussein. 2001. « Amélioration de la fiabilité des condensateurs à films polypropylène métallisés ». Lyon 1.

Eurofarad. Certifications ISO 9001 V 2000 : 001-96 / 005-96 «Capacitors for industrial application». Product Catalog 049. www.eurofarad.com.

FERRIEUX,J.P, F. FOREST. 1999. «Alimentations à découpage - Convertisseurs à résonance». 3e édition revue et augmentée.

Gao, Feng, Ding Li, Poh Chiang Loh, Yi Tang et Peng Wang. 2009. « Indirect dc-link voltage control of two-stage single-phase PV inverter ». In *Energy Conversion Congress and Exposition, 2009. ECCE 2009. IEEE*. p. 1166-1172. IEEE.

Goetzberger, Adolf, et Volker Uwe Hoffmann. 2005. *Photovoltaic solar energy generation*, 112. Springer Science & Business Media.

Green, Martin. 2006. « Recent developments and future prospects for third generation and other advanced cells ». In *Photovoltaic Energy Conversion, Conference Record of the 2006 IEEE 4th World Conference on*. Vol. 1, p. 15-19. IEEE.

Gu, Bon-Gwan, et Kwanghee Nam. 2006. « A DC-link capacitor minimization method through direct capacitor current control ». *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol. 42, n° 2, p. 573-581.

Haeberlin, H, et L Borgna. 2004. « A new approach for semi-automated measurement of PV inverters, especially MPP tracking efficiency, using a linear PV array simulator with high stability ». *Power [kW]*, vol. 24, n° 28, p. 32.

- Harb, Souhib, Mehran Mirjafari et Robert S Balog. 2013. « Ripple-port module-integrated inverter for grid-connected PV applications ». *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol. 49, n° 6, p. 2692-2698.
- HESPUL association. 2007. « Efficacité énergétique et énergies renouvelables, photovoltaïque raccorde au réseau », Espace Info Energie du Rhône, <http://www.hespul.org>.
- Hu, Haibing, Souhib Harb, Nasser Kutkut, Issa Batarseh et Z John Shen. 2010. « Power decoupling techniques for micro-inverters in PV systems-a review ». In *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2010 IEEE*. p. 3235-3240. IEEE.
- Hur, Namho, Jinhwan Jung et Kwanghee Nam. 2001. « A fast dynamic DC-link power-balancing scheme for a PWM converter-inverter system ». *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 48, n° 4, p. 794-803.
- IEA Photovoltaic power systems program, IEA PVPS T1-17. 2008. « Trends in photovoltaic applications. Survey report of selected IEA countries between 1992 and 2007 », <http://www.iea-pvps.org/>.
- Investissements Écologiques. En ligne. <http://www.solstice-groupe.com> Consulté le 12 mars 2015.
- Islam, Md, Mohammad Ziaur Rahman et Sharif Mohammad Mominuzzaman. 2014. « The effect of irradiation on different parameters of monocrystalline photovoltaic solar cell ». In *Developments in Renewable Energy Technology (ICDRET), 2014 3rd International Conference on the*. p. 1-6. IEEE.
- Jantsch, M, M Real, H Häberlin, C Whitaker, K Kurokawa, G Blässer, P Kremer et CWG Verhoeve. 1997. *Measurement of PV maximum power point tracking performance*. Netherlands Energy Research Foundation ECN.
- Joubert, Charles. 1996. « Etude des phénomènes électromagnétiques dans les condensateurs à films métallisés-Nouvelle génération de condensateurs ». Ecole Centrale de Lyon.
- Kasa, Nobuyuki, Takahiko Iida et Liang Chen. 2005. « Flyback inverter controlled by sensorless current MPPT for photovoltaic power system ». *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 52, n° 4, p. 1145-1152.
- Krein, Philip T, et Robert S Balog. 2009. « Cost-effective hundred-year life for single-phase inverters and rectifiers in solar and LED lighting applications based on minimum capacitance requirements and a ripple power port ». In *Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2009. APEC 2009. Twenty-Fourth Annual IEEE*. p. 620-625. IEEE.

- Kyritsis, AC, NP Papanikolaou et EC Tatakis. 2007. « A novel parallel active filter for current pulsation smoothing on single stage grid-connected AC-PV modules ». In *Power Electronics and Applications, 2007 European Conference on*. p. 1-10. IEEE.
- Lázaro, Antonio, Andrés Barrado, Marina Sanz, Vicente Salas et Emilio Olías. 2007. « New power factor correction AC-DC converter with reduced storage capacitor voltage ». *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 54, n° 1, p. 384-397.
- Leslie Jr, Leonard G. 2003. « DESIGN AND ANALYSIS OF A GRID CONNECTED PHOTOVOLTAIC GENERATION SYSTEM WITH ACTIVE FILTERING FUNCTION ». Virginia Polytechnic Institute and State University.
- Li, Quan, et Peter Wolfs. 2008. « A review of the single phase photovoltaic module integrated converter topologies with three different DC link configurations ». *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 23, n° 3, p. 1320-1333.
- Libo Wu, Zhengming Zhao and Jianzhen Liu. 2006. «Maximum power point tracking algorithm stability study for single stage type photovoltaic grid connected generation system». *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, vol.6, pp.73-77.
- Lifeng, Wu, Zhou Shihong Du Yinyu, Guan Yong et Pan Wei. 2011. « Effect of Electrolytic Capacitors on the Life of SMPS ». *Journal of Convergence Information Technology and its Applications*, vol. 6, n° 6, p. 491-499.
- Liserre*, Marco, Frede Blaabjerg et Antonio Dell'Aquila. 2004. « Step-by-step design procedure for a grid-connected three-phase PWM voltage source converter ». *International Journal of Electronics*, vol. 91, n° 8, p. 445-460.
- Liu, Fangrui, Yong Kang, Yu Zhang et Shanxu Duan. 2008. « Comparison of P&O and hill climbing MPPT methods for grid-connected PV converter ». In *Industrial Electronics and Applications, 2008. ICIEA 2008. 3rd IEEE Conference on*. p. 804-807. IEEE.
- Lohner, A, T Meyer et A Nagel. 1996. « A new panel-integratable inverter concept for grid-connected photovoltaic systems ». In *Industrial Electronics, 1996. ISIE'96., Proceedings of the IEEE International Symposium on*. Vol. 2, p. 827-831. IEEE.
- Luque, Antonio, et Steven Hegedus. 2011. *Handbook of photovoltaic science and engineering*. John Wiley & Sons.
- Martins, Denizar Cruz, et Rogers Demonti. 2001. « Photovoltaic energy processing for utility connected system ». In *Industrial Electronics Society, 2001. IECON'01. The 27th Annual Conference of the IEEE*. Vol. 3, p. 1965-1969. IEEE.

- Martins, Denizar Cruz, et Rogers Demonti. 2002. « Grid connected PV system using two energy processing stages ». In *Photovoltaic Specialists Conference, 2002. Conference Record of the Twenty-Ninth IEEE*. p. 1649-1652. IEEE.
- MATLAB Academy. En ligne. <http://www.mathworks.com> Consulté le 22 mai 2015
- Mohan, Ned, et Tore M Undeland. 2007. *Power electronics: converters, applications, and design*. John Wiley & Sons.
- Mouriès, Gérard. 1995. *Condensateurs utilisés en électronique de puissance*. Ed. Techniques Ingénieur.
- Nichicom Corporation. May 1999. «Technical Notes» CAT.8101D
- Patel, Mukund. 2006. « Wind and Solar Power Systems—Design, Analysis, and Operation ». *Wind Engineering*, vol. 30, n° 3, p. 265-266.
- Patel, Mukund. 1999. «Wind and Solar Power Systems, CRC Press LLC», p 138-157.
- Perisse, Frédéric. 2003. « Etude et analyse des modes de défaillances des condensateurs électrolytiques à l'aluminium et des thyristors, appliquées au système de protection du LHC (Large Hadron Collider) ». Université Claude Bernard-Lyon I.
- Perret, Robert. 2005. « Mise en œuvre des composants électroniques de puissance ».
- Production mondiale d'énergie solaire photovoltaïque. En ligne. <http://www.planetoscope.com> Consulté le 10 mars 2015.
- Rahman, Saifur, MA Khallat et BH Chowdhury. 1988. « A discussion on the diversity in the applications of photovoltaic systems ». *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol. 3, n° 4, p. 738-746.
- Rashid, MH. 1993. « Power Electronics Circuits, Devices, and Application, Ptrentice-Hall International ». *Inc., London*.
- Rashid, Muhammad Harunur. 2003. *Power electronics: circuits, devices, and applications*. Pearson Education India.
- Riffonneau, Y, F Barruel et S Bacha. 2008. « Problématique du stockage associé aux systèmes photovoltaïques connectés au réseau ». *Revue des Energies Renouvelables*, vol. 11, n° 3, p. 407-422.
- Riffonneau, Yann. 2009. « GESTION DES FLUX ÉNERGÉTIQUE DANS UN SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE AVEC STOCKAGE CONNECTER AU RÉSEAU—Application à l'habitat ». Université Joseph-Fourier-Grenoble I.

- Ristow, Alan, Miroslav Begović, Aleksandar Pregelj et Ajeet Rohatgi. 2008. « Development of a methodology for improving photovoltaic inverter reliability ». *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 55, n° 7, p. 2581-2592.
- Rodriguez, Cuauhtemoc, et Gehan AJ Amaratunga. 2008. « Long-lifetime power inverter for photovoltaic AC modules ». *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 55, n° 7, p. 2593-2601.
- Salcone, Michael, et Joe Bond. 2009. « Selecting film bus link capacitors for high performance inverter applications ». In *Electric Machines and Drives Conference, 2009. IEMDC'09. IEEE International*. p. 1692-1699. IEEE.
- Shimizu, Toshihisa, Keiji Wada et Naoki Nakamura. 2006. « Flyback-type single-phase utility interactive inverter with power pulsation decoupling on the dc input for an ac photovoltaic module system ». *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 21, n° 5, p. 1264-1272.
- Stala, Robert, Krzysztof Koska et Lukasz Stawiarski. 2011. « Realization of modified ripple-based mppt in a single-phase single-stage grid-connected photovoltaic system ». In *Industrial Electronics (ISIE), 2011 IEEE International Symposium on*. p. 1106-1111. IEEE.
- Tan, GH, JZ Wang et YC Ji. 2007. « Soft-switching flyback inverter with enhanced power decoupling for photovoltaic applications ». *IET Electric Power Applications*, vol. 1, n° 2, p. 264-274.
- Ton, Dan, et Ward Bower. 2005. « Summary report on the DOE high-tech inverter workshop ». *Online. US Department of Energy*.
- Tsai, Huan-Liang, Ci-Siang Tu et Yi-Jie Su. 2008. « Development of generalized photovoltaic model using MATLAB/SIMULINK ». In *Proceedings of the world congress on engineering and computer science*. Vol. 2008, p. 1-6. Citeseer.
- Venet, Pascal, Frédéric Perisse, MH El-Husseini et Gérard Rojat. 2002. « Realization of a smart electrolytic capacitor circuit ». *Industry Applications Magazine, IEEE*, vol. 8, n° 1, p. 16-20.
- VISHAY. En ligne. <http://www.vishay.com/docs/26033/gentecin.pdf>
Consulté le 2 juin 2015.
- Wang, Huai, et Frede Blaabjerg. 2013. « Reliability of capacitors for DC-link applications—An overview ». In *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2013 IEEE*. p. 1866-1873. IEEE.

Wang, Ruxi, Fred Wang, Dushan Boroyevich, Rolando Burgos, Rixin Lai, Puqi Ning et Kaushik Rajashekara. 2011. « A high power density single-phase PWM rectifier with active ripple energy storage ». *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 26, n° 5, p. 1430-1443.

Wikipedia. <http://fr.wikipedia.org/wiki/Fiabilit%C3%A9> Consulté le 20 mai 2015

Wolfs, Peter, et Quan Li. 2002. « An analysis of a resonant half bridge dual converter operating in continuous and discontinuous modes ». In *Power Electronics Specialists Conference, 2002. pesc 02. 2002 IEEE 33rd Annual*. Vol. 3, p. 1313-1318. IEEE.

Xue, Yaosuo, Kurthakoti C Divya, Gerd Griepentrog, Mihalache Liviu, Sindhu Suresh et Madhav Manjrekar. 2011. « Towards next generation photovoltaic inverters ». In *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2011 IEEE*. p. 2467-2474. IEEE.