الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

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

---

Université Dr. Yahia Farés de
Médéa Faculté de Technologie



Mémoire de fin d'étude de Master

Département du Génie
Électrique Spécialité :
Energies
renouvelables en
Electrotechnique

THÉME

R éduction de taille de banque de condensateurs par commande des onduleurs (Application photovoltaïque)

Préparé par :
Mr SOFTA Yosra

Proposé et dirigé par
Dr .SKENDER Mohamed Rédha
Dr. MEDJBER Ahmed

PROMOTION 2023-2024

Remercient

On remercie Dieu le tout puissant de nous avoir donné la santé et La volonté d'entamer et de déterminer ce mémoire.

Tout d'abord, ce travail ne se saurait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement de mes promoteurs Dr SKENDER. MR et Dr MEDJBER. A, on les remercie pour la qualité de leurs encadrements, pour leurs patiences, leurs soutient moral, leurs encouragements, et leurs disponibilités durant notre préparation de ce mémoire.

On remercie aussi tous les membres jury d'avoir accepté jury ce travail.

Nos remerciements s'adressent également à tous nos professeurs pour leurs générosité et la patience dont ils ont su faire preuve.

En fin nous remercions vivement tous ceux qui de près ou de loin, Ont contribué d'une manière ou d'une autre à la réalisation de ce mémoire

Merci à tous et toutes

Dédicaces

Louange à Dieu, avec amour, gratitude et reconnaissance, pour le commencement et la fin, et leur dernière invocation était : "Louange à Dieu, Seigneur des mondes", après cinq années de travail et d'efforts pour réaliser mon rêve et poursuivre mes études. Ces années ont porté dans leurs plis les aspirations de mes nuits, et aujourd'hui, ma persévérance est devenue une force pour les yeux. Me voici maintenant sur le seuil de ma remise de diplôme, récoltant les fruits de mes efforts et levant fièrement mon chapeau. Avec tout mon orgueil, je te loue, ô Dieu, avant même que tu sois satisfait, et je te loue quand tu es satisfait, et je te loue après ta satisfaction, car tu m'as permis de réussir et de réaliser mon rêve...

Et avec tout mon amour, je dédie le fruit de ma réussite, ma graduation, à celui qui a embelli mon nom avec les plus beaux titres, qui m'a soutenu sans limites et donné sans rien attendre en retour, à celui qui m'a enseigné que la vie est un combat et que son arme est le savoir et la connaissance, mon soutien dans mon parcours, mon pilier, ma force et mon refuge après Dieu, ma fierté et mon honneur.

mon père

À celle à qui Dieu a placé le paradis sous ses pieds, dont le cœur m'a embrassé avant ses mains et qui a facilité mes épreuves par ses prières, à ce cœur tendre et cette lumière qui ont été ma force et ma réussite dans les nuits et les ténèbres .

ma mère

À mes frères et sœurs, qui m'ont été donnés par Dieu pour connaître à travers eux le goût de la belle vie, ceux qui ont changé mes concepts d'amour et de soutien dans ma vie.

Asmaa, Wassim, Fouad, Leena, Rayan.

À ma sœur, celle que ma mère n'a pas portée mais qui est devenue mon amie et mon soutien dans les moments difficiles.

Hanan.

À celui qui a semé l'espoir sur mon chemin, le compagnon du chemin et l'ami de tous les jours, bons et mauvais

Raouf

À tous ceux qui m'ont donné de la force en temps de faiblesse, à ceux qui m'ont soutenu et ont écarté les obstacles de mon chemin, préparant la voie en semant la confiance et la détermination en moi.



Résumé

ملخص

هذا العمل يقدم دراسة ومحاكاة لنظام تركيب كهروضوئي بهدف تقليل حجم مجموعة المكثفات عن طريق التحكم في العاكسات. لتحقيق ذلك، تم إجراء محاكاة لنموذج مصغر. التركيب المقترح تم تنفيذه بدقة. هذا الأخير مشابه للدائرة التقليدية التي تستخدم مكثف كيميائي ذو سعة كبيرة على ناقل التيار المستمر(CC) ، ولكنه مجهز بدائرة إضافية لفصل القدرة مثبتة بالتوازي مع مكثف ناقل التيار المستمر. هذه الدائرة الإضافية تعمل مثل دائرة تخفيض ورفع الجهد، حيث تقوم بشحن مكثفها في وضع التخفيض وتفريغه في وضع الرفع.

الكلمات المفتاحية :

, العاكس , المقطع , المرشحات , الرفع نظام ,الطاقة, ,أدوات .

Abstract

This work presents the study and simulation of a photovoltaic installation system aimed at reducing the size of the capacitor bank by controlling the inverters. To achieve this, a miniature prototype simulation was established. The proposed setup was executed precisely. The latter is similar to the conventional circuit using a large-capacity electrolytic capacitor on the DC bus, but it is equipped with an additional power decoupling circuit mounted in parallel with the DC bus capacitor. This additional circuit operates like a buck-boost converter, charging its capacitor in buck mode and discharging it in boost mode.

Keywords:

Onduleur, Hacheur , Les filters ,boost , ,power system, toolbox , .

Résumé

Ce travail présente l'étude et la simulation d'un système d'une installation photovoltaïque dont l'objectif est la réduction de taille de banque de condensateurs par la commande des onduleurs. Pour ce faire, une simulation de prototype miniature a été établie. Le montage proposé a été réalisé de manière précise. Ce dernier est similaire au circuit classique utilisant un condensateur chimique de grande capacité sur le bus CC, mais il est équipé d'un circuit additionnel de découplage de puissance monté en parallèle avec le condensateur du bus CC. Ce circuit additionnel fonctionne comme un buck-boost, chargeant son condensateur en mode buck et le déchargeant en mode boost.

Mots clés:

Onduleur, Hacheur , boost ,Les filters , power system ,toolbox .

Remerciements

Dédicaces

Résumé

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste d'abréviations

Introduction Générale 1

Chapitre I : Généralités sur l'énergie PV

I.1 Introduction Générale **3**

I.2 Définition **3**

I.3 L'effet photovoltaïque **4**

I.4 La cellule photovoltaïque **4**

I.5.Le module photovoltaïque **5**

I.5.1.Constitution d'un module de photovoltaïque **5**

I.5.2.Association en série et en parallèle des modules PV **6**

I.5.2.1.Mise en série **6**

I.5.2.2.Mise en parallèle **7**

I.5.3.La Protection du module PV **8**

I.5.3.1.La diode anti-retour **8**

I.5.3.2.Les diodes by-pass **8**

I.6. Modélisation d'une cellule photovoltaïque **9**

I.6.1. Modèle à une diode **9**

I.6.2. Modèle à deux diodes **10**

I.7 Paramètres d'une cellule photovoltaïque **11**

I.7.1 Courant de court-circuit ($\boldsymbol{Icc}$) **11**

I.7.2 Tension de circuit–ouvert $\boldsymbol{Vco}$ **12**

I.7.3 Puissance maximale **12**

I.7.4 Facteur de forme **12**

I.7.5 Le rendement **13**

I.8 Générateur photovoltaïque **13**

I.8.1. Caractéristique d'un Générateur$\boldsymbol{P_V}$ **14**

I.8.1.1 Caractéristique puissance-tension **14**

I.8.1.2 Caractéristique courant-tension **14**

I.9 Protection d'un PV **15**

I.10 Système de refroidissement **16**

I.11 Conclusion **16**

Chapitre II : Les convertisseurs statiques dans les systèmes Photovoltaïques.

II.1 Introduction **17**

II.2 Les convertisseurs DC-DC (Hacheurs) **17**

II.3 Type de convertisseurs **18**

II.3.1 Hacheur survolteur (Boost) **18**

II.3.1.1 Modèle mathématique équivalent **19**

II.3.2 Hacheur dévolteur (Buck) **20**

II.3.3 Convertisseur Buck-Boost **22**

II.4 Les onduleurs photovoltaïques **23**

II.5 Définition onduleurs **23**

II.6 Principe de fonctionnement **24**

II.7 Onduleur Monophasé 25

II.8 Onduleur triphasé 26

II.9 Effets harmoniques 26

II.9.1 Taux de distorsion harmonique 27

II.9.2 Conséquences des perturbations harmoniques 27

II.10 Rendement des onduleurs photovoltaïques 28

Conclusion 28

Chapitre III : Les filtres

III.1 Introduction 29

III.2 Condensateurs 29

III.3 Condensateurs du bus CC 30

III.3.1 les types condensateur 30

III.3.1.1 Condensateurs électrolytiques 30

III.3.1.1.1 Condensateurs électrolytiques à l'aluminium 31

III.3.1.1.2 Condensateurs électrolytiques au tantale 32

III.3.1.2 Condensateurs céramiques 32

III.3.1.3 Condensateurs à film plastiques métallisés 33

III.4 Impact d'une défaillance du condensateur sur l'onduleur 33

III.5 Durée de vie et fin de vie d'un condensateur 35

III.5.1 Durée de vie d'un condensateur 35

III.5.2 Fin de vie d'un condensateur 35

III.6 Le filtre LCL 36

III.7 Modélisation en représentation d'état du filtre LCL 37

III.8 Fonctions de transfert d'un filtre LCL **39**

III.8.1 Fonction de transfert $\frac{i_g(s)}{U(s)}$ avec la méthode de superposition **39**

III.8.2 Fonction de transfert $\frac{i_g(s)}{V_g(s)}$ avec la méthode de superposition **40**

Conclusion **40**

Chapitre IV : Résultats de simulation

IV.1 Introduction **41**

IV.2 Configuration du circuit proposé **41**

IV.2.1 Schéma complet du circuit proposé **42**

IV.2.2 Circuit additionnel de découplage de puissance **43**

IV.3 Principe de fonctionnement du circuit additionnel de découplage **44**

IV.3.1 Mode Buck **44**

IV.3.2 Mode boost **45**

IV.4 Modèle du circuit proposé **46**

IV.4.1 Modélisation du convertisseur boost **46**

IV.4.2 Modélisation de la puissance ondulatoire **46**

IV.4.3 Modélisation du circuit de découplage de puissance **48**

IV.5 Simulation de Système globale **49**

IV.5.1 Panneau Photovoltaïque (bloc orange) avec Contrôleur MPPT **51**

IV.5.2 Filtre de bus continu (Branche RC Série) **52**

IV.5.3 Filtre LCL avant **53**

IV.5.4 Filtre LCL après **54**

Conclusion **55**

Conclusion Générale **56**

Références……

Figure I.1: Schéma simplifié d'un système photovoltaïque **3**

Figure I.2: Schéma de principe d'une cellule photovoltaïque **4**

Figure I.3: Représentation schématique d'une cellule solaire **5**

Figure I.4: Composition du module photovoltaïque **6**

Figure I.5: Association en série et en parallèle des modules PV **6**

Figure I.6: Mise en série des panneaux solaires **7**

Figure I.7: Mise en parallèle des panneaux solaires **7**

Figure I.8: Protection des modules Photovoltaïques **9**

Figure I.9: Schéma équivalent du modèle à une diode **9**

Figure I.10: Schéma équivalent du modèle à deux diodes **10**

Figure I.11: Composants d'un générateur PV **13**

Figure I.12: Courbe P = f(V) d'un module photovoltaïque **14**

Figure I.13: Caractéristique I = f(V) d'un module photovoltaïque **15**

Figure I.14: Protection des modules par les diodes anti retour by-pass **16**

Figure II.1 : Symbole d'un Convertisseurs DC/DC 'Hacheur' **18**

Figure II.2 : Schéma électrique du convertisseur Boost. **19**

Figure II.3 : Caractéristique de la tension et du courant du hacheur survolteur **20**

Figure II.4 : Circuit électrique de base du hacheur dévolteur **21**

Figure II.5 : Caractéristique de la tension et des courants d'un convertisseur Buck **22**

Figure II.6 : Circuit électrique de base de le hacheur dévolteur /survolteur **22**

Figure II.7 : Caractéristique de la tension et du courant du Buck-Boost **23**

Figure II. 8 : Principe de fonctionnement d'un onduleur **24**

Figure II. 9 : Cas ou S1-S3 sont fermés et S2-S4 ouverts et signal obtenu **25**

Figure II. 10 : Cas ou S1-S3 sont ouverts et S2-S4 fermés et signal obtenu **25**

Figure II.11 : Schéma de modélisation de l'onduleur triphasé **26**

Figure III.1 : Emplacement du condensateur du bus cc dans le circuit **30**

Figure III.2 : CONDENSATEUR ÉLECTROLYTIQUE MONACOR 22UF LSC-220NP. **31**

Figure III.3 : Schéma condensateur électrolytique à l'aluminium (Condensateurs, 2015) **32**

Figure III.4 : Schéma d'un condensateur électrolytique au tantale (Condensateurs, 2015) ... **32**

Figure III.5 : Structure des condensateurs à films polypropylène métallisés **33**

Figure III.6 : Système photovoltaïque connecté au réseau **34**

Figure III.7 : Schéma du filtre LCL **36**

Figure III.8 : Filtre LCL connecté au réseau **37**

Figure III.9 : Circuit impédance du filtre LCL **38**

Figure IV.1 : Configuration générale du circuit proposé connecté au réseau **42**

Figure IV.2 : Configuration générale du circuit proposé en mode autonome **42**

Figure IV.3 : Circuit additionnel de découplage **43**

Figure IV.4 : Configuration du circuit en mode bucK **45**

Figure IV.5 : Configuration du circuit en mode boost **45**

Figure IV.6 : Schéma classique du convertisseur boost (Ferrieux et Forest, 1987) **46**

Figure IV.7: Le schéma global de system **49**

Figure IV.8 : Panneau Photovoltaïque (bloc orange) avec Contrôleur MPPT **51**

Figure IV.9 : la réponse transitoire d'un signal dans un système de conversion d'énergie Photovoltaïque **51**

Figure IV.10 : Filtre de bus continu (Branche RC Série) **52**

Figure IV.11 : la réponse transitoire de la tension de sortie de filtre dans un système de conversion d'énergie photovoltaïque **52**

Figure IV.12 : Filtre LCL avant **53**

Figure IV.13 : les caractéristiques électriques avant l'application des filtres LCL. La première figure illustre les tensions et les courants pour trois phases **53**

Figure IV.14 : Filtre LCL après..... **54**

Figure IV.15 : les caractéristiques électriques après l'application des filtres LCL..... **54**

Liste des abréviations

$\boldsymbol{I_{pv}}$	Le courant fourni par la cellule lorsqu'elle fonctionne en générateur (A).
$\boldsymbol{I_{ph}}$	Les photo- courants générés par les cellules solaires (A).
$\boldsymbol{I_{sat}}$	Le courant de saturation (A).
$\mathbf{I_{CC}}$	Le courant de court-circuit (A).
$\mathbf{V_{pv}}$	La tension aux bornes du PV (V)
$\mathbf{V_{co}}$	La tension de circuit ouvert (V).
$\mathbf{R_{se}}$	La résistance série (Ω) du PV (V)
$\mathbf{R_{ch}}$	La résistance parallèle (Ω) du PV (V).
$\boldsymbol{n}$	Le facteur de qualité de la diode.
T	La température des cellules en Kelvin (K).
$\mathbf{P_{max}}$	La puissance maximale (W).
$\mathbf{V_{max}}$	La tension maximale (V).
$\mathbf{I_{max}}$	Le courant maximale (A).
$\boldsymbol{P_{inc}}$	Puissance incidente
$\boldsymbol{R_{se}}$	Résistance série
FF	Facteur de forme.
η	Le rendement.
α	Le rapport cyclique des impulsions qui commandent l'interrupteur
$\boldsymbol{V_i}$	Tension d'entrée.
$\boldsymbol{I_L}$	Courant d'inductance.
$\boldsymbol{I_0}$	Courant de sortie.
$\mathbf{U_{ds}}$	Tension continue.
$\boldsymbol{T_s}$	Période des impulsions .
AC	Courant alternatif.
CC	Courant Continu .
PV	Panneau photovoltaïque.
PLL	Phase Locked Loop.

Liste des abréviations

MPPT	Maximum Power Point Tracking.
F	Fréquence.
L	Inductance équivalente série.
C	Capacité du condensateur.

Énergie photovoltaïque joue un rôle crucial dans la transition énergétique mondiale, offrant une alternative renouvelable aux sources d'énergie traditionnelles. Pour maximiser l'efficacité et la fiabilité des systèmes photovoltaïques, une gestion optimale de la conversion de l'énergie est essentielle. Les onduleurs, qui convertissent le courant continu (DC) produit par les panneaux solaires en courant alternatif (AC) compatible avec le réseau, sont au cœur de cette gestion.

Un des défis majeurs dans la conception des systèmes photovoltaïques est la nécessité d'incorporer une banque de condensateurs de grande taille pour lisser les variations de tension et stabiliser le système. Ces condensateurs, bien qu'essentiels, peuvent être coûteux et encombrants, limitant ainsi l'efficacité et la compacité des installations photovoltaïques. Mon projet se concentre sur la réduction de la taille de ces banques de condensateurs en optimisant la commande des onduleurs.

L'objectif principal de mes recherches est de développer et de mettre en œuvre des stratégies de commande avancées pour les onduleurs, permettant de minimiser la capacité de stockage nécessaire sans compromettre la performance du système. Pour ce faire, j'explore plusieurs approches innovantes de commande, notamment **:**

- Commande prédictive : Cette méthode permet de prévoir les comportements futurs du système et d'ajuster les paramètres de commande en conséquence, réduisant ainsi les fluctuations de tension et de courant.
- Commande adaptative : En adaptant dynamiquement les paramètres de commande en fonction des conditions opérationnelles, cette approche optimise en temps réel la performance de l'onduleur, permettant une utilisation plus efficace des condensateurs.
- Techniques de modulation avancées : L'application de techniques de modulation sophistiquées permet de réduire le stress sur les composants du système et d'améliorer la qualité de l'alimentation, ce qui contribue également à réduire la taille des condensateurs nécessaires.

Mes recherches impliquent la modélisation mathématique détaillée des systèmes photovoltaïques et l'utilisation de simulations informatiques pour tester et valider les différentes stratégies de commande. Grâce à des outils tels que Matlab/Simulink, je suis capable de simuler divers scénarios opérationnels et d'évaluer l'impact des techniques de commande sur la stabilité et l'efficacité du système.

Les résultats attendus de cette recherche incluent une réduction substantielle de la taille des condensateurs nécessaires, une amélioration de la qualité de l'alimentation électrique, et une meilleure intégration des systèmes photovoltaïques dans les réseaux électriques existants. En optimisant la commande des onduleurs, ce projet vise à rendre les systèmes photovoltaïques plus compacts, plus économiques et plus performants.

Chapitre I : Généralités sur l'énergie PV .

I.1 Introduction

Les énergies renouvelables sont des sources d'énergie qui se renouvellent naturellement et ne s'épuisent pas avec le temps. Elles sont également appelées énergies vertes ou énergies propres, car elles ne produisent pas ou peu de gaz à effet de serre ni de polluants atmosphériques, contrairement aux énergies fossiles comme le pétrole, le gaz naturel ou le charbon [1] .

Dans le premier chapitre, nous explorerons les fondements essentiels du domaine photovoltaïque, jetant les bases nécessaires pour comprendre en profondeur le fonctionnement et les applications de cette technologie. Nous aborderons les principes fondamentaux de l'effet photovoltaïque, qui est au cœur de la conversion directe de l'énergie solaire en électricité. En outre, nous examinerons le processus de fabrication des cellules solaires, mettant en lumière les étapes clés impliquées dans la transformation des lingots de silicium en dispositifs fonctionnels. Cette immersion dans les généralités du photovoltaïque constituera un socle solide pour notre exploration approfondie des applications, des avancées technologiques et des enjeux liés à cette forme d'énergie renouvelable tout au long de ce chapitre.

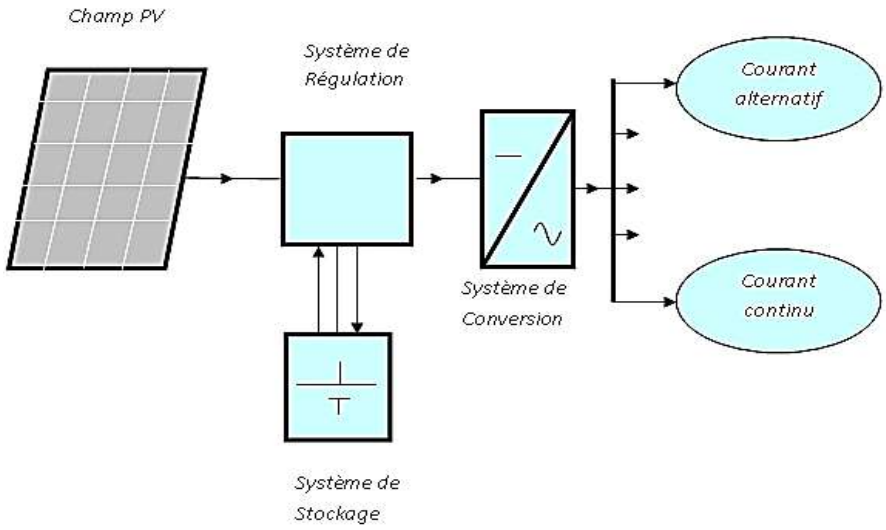


Figure I.1 : Schéma simplifié d'un système photovoltaïque.

I.2 Définition

Le terme « photovoltaïque », souvent abrégé par les lettres PV, a été forgé en combinant les mots « photo », un terme grec signifiant lumière, et « Volta », le nom du physicien italien Alessandro Volta, inventeur de la pile électrochimique en 1800. L'effet photovoltaïque, qui représente la conversion directe de l'énergie solaire en électricité, a été découvert par le physicien

français Antoine Becquerel en 1839. Aujourd'hui, en raison de sa fiabilité et de son engagement envers l'environnement, le photovoltaïque occupe une position cruciale dans le paysage énergétique.

I.3 L'effet photovoltaïque

Lorsqu'un matériau est exposé à la lumière du soleil, les photons constituant la lumière attaquent les atomes exposés au rayonnement. Les électrons des couches électroniques supérieures, appelés aussi électrons de valence ont tendance à être arracher. Dans les cellules PV, une partie des électrons ne revient pas à son état initial et les électrons arrachés créent une tension électrique continue et faible [2].

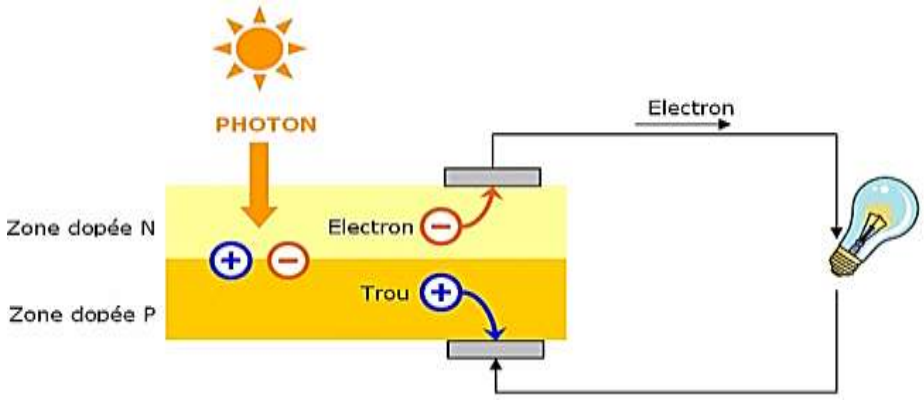


Figure I.2 : Schema de principe d'une cellule photovoltaïque

I.4 La cellule photovoltaïque

Le fonctionnement de la cellule repose sur l'exploitation de l'effet photovoltaïque, qui convertit directement l'énergie lumineuse en électricité grâce à l'utilisation de rayons solaires. Ce processus s'effectue à travers la production et le transport d'électricité dans un matériau semi-conducteur, générant des charges électriques positives et négatives sous l'influence de la lumière.

La fabrication des cellules débute avec des lingots de silicium, qui sont ensuite découpés en fines couches de type P ou N, en introduisant du brome ou du phosphore. En formant une jonction PN, une cellule solaire est créée en réunissant deux zones de types opposés.

Près de la jonction, un champ électrique émerge, maintenant la séparation des charges positives et négatives. Des contacts métalliques sous forme de grille, à l'avant et à l'arrière, sont déposés.

La conversion de l'énergie photovoltaïque repose sur trois phénomènes physiques étroitement liés et simultanés :

- Absorption des photons par le matériau.
- Transfert d'énergie des photons aux charges électriques.
- Collecte des charges générées dans le dispositif [3].

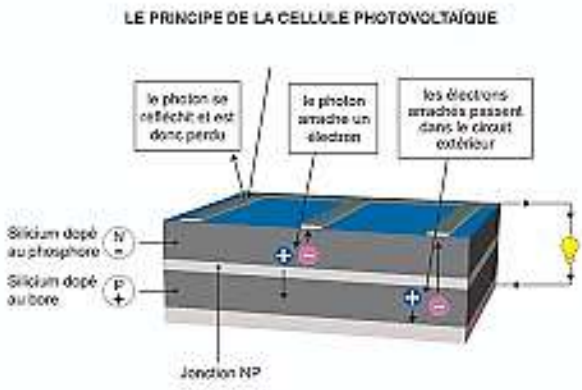


Figure I.3 : Représentation schématique d'une cellule solaire.

I.5.Le module photovoltaïque

I.5.1.Constitution d'un module de photovoltaïque

Un module solaire photovoltaïque est composé généralement de six éléments :

- Cadre en aluminium.
- Joint pour fixer le module.
- Verre : pour la protection du module.
- Couche de l'EVA (EVA: éthylène-acétate de vinyle) : pour résister aux intempéries et à l'humidité.
- Cellules photovoltaïque.
- Feuille de Tedlar blanc : pour plus de résistance mécanique des grands modules.

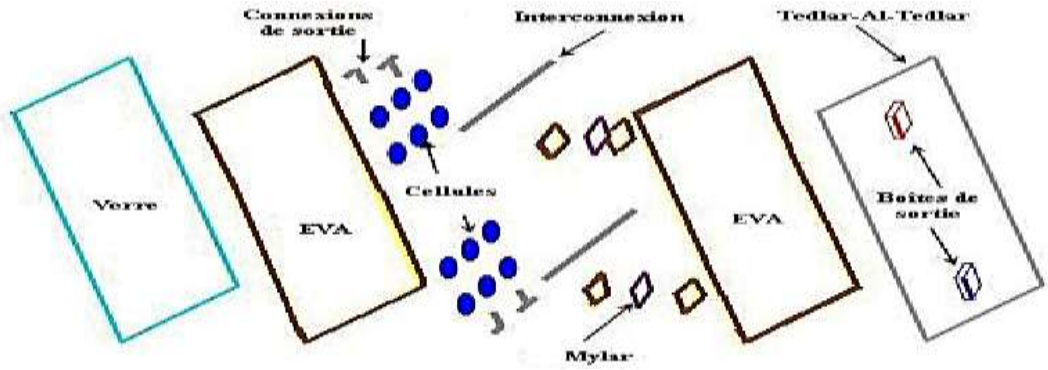


Figure I.4 : Composition du module photovoltaïque.

I.5.2.Association en série et en parallèle des modules PV

Les modules peuvent également être connectés en série et en parallèle pour construire le champ photovoltaïque afin d'augmenter la tension et l'intensité d'utilisation. Toutefois, il importe de prendre quelques précautions car l'existence de cellules moins efficaces ou l'occlusion d'une ou plusieurs cellules (dues à de l'ombrage, de la poussière,….etc.) peuvent endommager les cellules de façon permanente [4] .

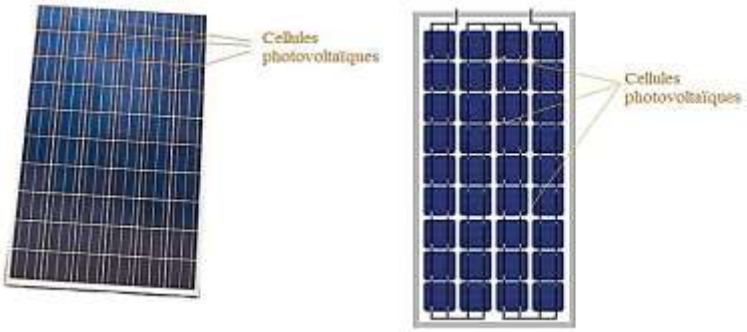


Figure I.5:Association en série et en parallèle des modules PV.

I.5.2.1.Mise en série

En additionnant des cellules ou des modules identiques en série, le courant de la branche reste le même mais la tension augmente proportionnellement au nombre de cellules (modules) en série [3].

$$U = U_1 + U_2 + \cdots\cdots + U_n \qquad (I.1)$$

$$I = I_1 = I_2 = I_n$$

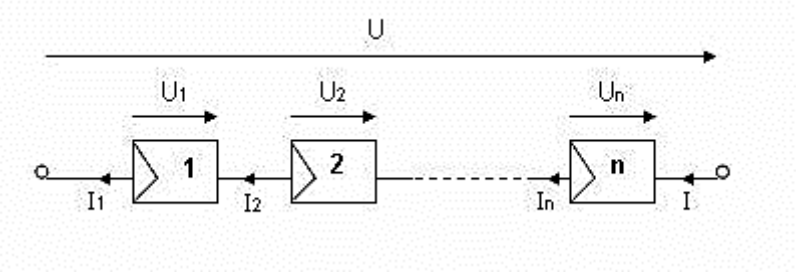


Figure I.6: Mise en série des panneaux solaires.

Avec : $U =$ tension totale de module PV.

$U_1 =$ Tension de module PV nombre 1.

$U_2 =$ Tension de module PV nombre 2.

$U_n =$ Tension de module PV nombre n.

$I_1 =$ Courant de module PV nombre 1.

$I_{2=}$ Courant de module PV nombre 2.

$I_n =$ Courant de module PV nombre n.

I.5.2.2.Mise en parallèle

En additionnant des modules ou cellules identiques en parallèle, la tension de la branche est égale à la tension de chaque module et l'intensité augmente proportionnellement au nombre de modules en parallèle dans la branche [3].

$$U = U_1 = U_2 = U_3 \cdots \cdots U_n \quad \text{(I.2)}$$
$$I = I_1 = I_2 = I_3 \cdots \cdots I_n$$

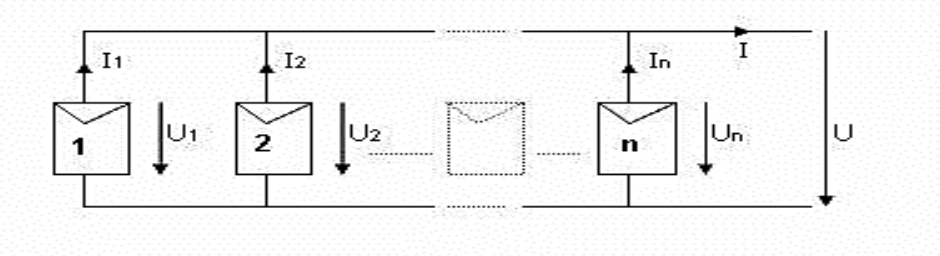


Figure I.7 : Mise en parallèle des panneaux solaires.

Avec : $U =$ tension totale de module PV.

$U_1 =$ Tension de module PV nombre 1.

$U_2 =$ Tension de module PV nombre 2.

$U_3 =$ Tension de module PV nombre 3.

$U_n =$ Tension de module PV nombre n.

$I_1 =$Courant de module PV nombre 1.

$I_2 =$ Courant de module PV nombre 2.

I.5.3.La Protection du module PV

Une installation photovoltaïque est destinée à produire de l'énergie électrique pendant des années. Il est donc indispensable d'ajouter des protections électriques aux modules pour éviter des pannes destructrices liées à l'association en série et en parallèle des cellules. Pour cela, deux types de protections classiques sont utilisés [5] .

I.5.3.1.La diode anti-retour

Empêche la circulation d'un courant négatif dans les GPV lorsque plusieurs modules sont connectés en parallèle. Cette diode est indispensable lorsque la charge est une batterie pour qu'elle ne débite pas sur le module PV pendant la nuit [3] .

I.5.3.2.Les diodes by-pass

Servent à isoler un ensemble de cellules lorsque l'éclairement n'est pas homogène pour éviter l'apparition de points chauds et la destruction des cellules mal éclairées.

La figure montre l'architecture d'un panneau photovoltaïque avec les diodes de protection, et la mise en évidence du courant de circulation dans le cas de la défaillance d'une cellule [3].

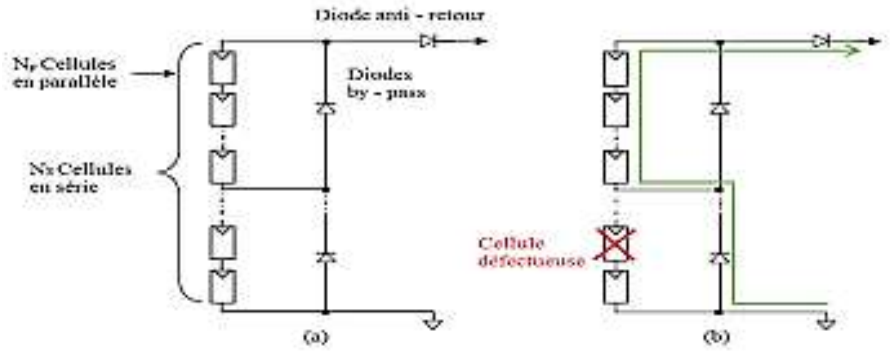


Figure I.8: Protection des modules Photovoltaïques.

I.6. Modélisation d'une cellule photovoltaïque

Afin de créer un modèle équivalent d'une cellule photovoltaïque, il est essentiel de prendre des décisions éclairées quant aux circuits électriques qui le composent et de comprendre la configuration physique ainsi que les caractéristiques électriques des éléments de la cellule. À cette fin, divers modèles mathématiques sont élaborés pour représenter le comportement non linéaire des jonctions des semi-conducteurs. Dans la suite, nous exposons deux modèles de cellules photovoltaïques, à savoir le modèle à deux diodes et le modèle à une diode.

I.6.1. Modèle à une diode

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

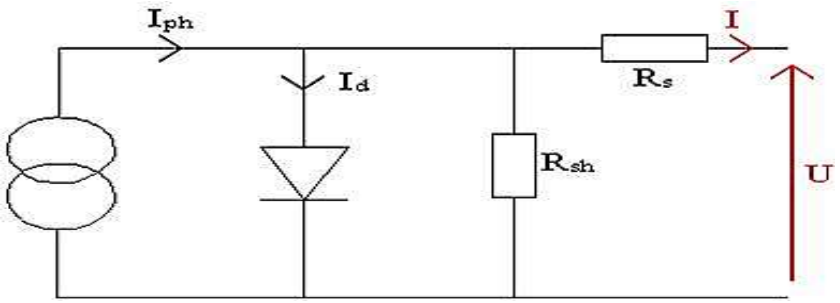


Figure I.9 : Schéma équivalent du modèle à une diode.

L'expression du courant I devient alors :

$$I = Icc - Id\ [e^{q(\frac{V+I*RS}{n*KT})} \quad \text{(I.3)}$$

Résistance parallèle (**Rp**) est très grande par rapport à la résistance série (**Rs**), son effet est donc très faible de telle sorte que l'on peut la négliger. Ce modèle, est largement utilisé pour la modélisation [5] .

I.6.2. Modèle à deux diodes

La figure suivante représente le circuit équivalent d'une cellule solaire, réalisé par la connexion en parallèle de deux diodes de courants de saturation I01 et I02 et de facteurs de diode n1 et n2, une source de courant produisant le courant de court-circuit de la cellule qui dépend de l'éclairement solaire.la résistance série R s tient compte de la résistivité du matériau et du contact semi-conducteur-métal. Sa valeur peut être déterminée par l'inverse de la pente de la caractéristique I(V) pour la tension à circuit ouvertVco. La résistance parallèle R sh traduit la présence d'un courant de fuite dans la jonction.[6]

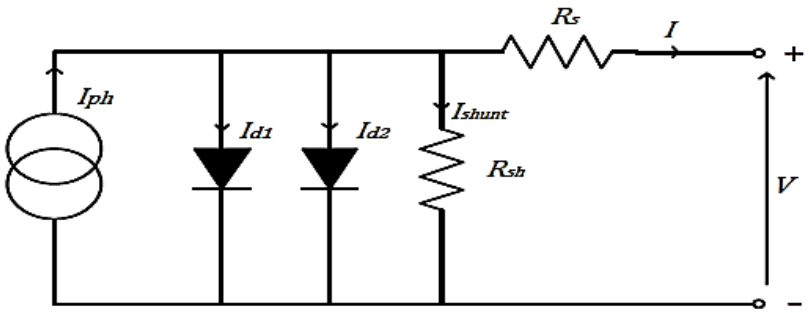


Figure I.10: Schéma équivalent du modèle à deux diodes.

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

$$I = I_{cc} - I_{d1}\ [e^{q\left(\frac{V+I*Rs}{n1*KT}\right)} - 1] - I_{d2}[e^{q\left(\frac{V+I*Rs}{n2*KT}\right)} - 1] - \frac{V + I * Rs}{Rp} \quad \text{(I.4)}$$

Avec :

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

$I_{d1}(A)$: Correspondant au courant de saturation de la diode1,

$I_{d2}(A)$: Correspondant au courant de saturation de la diode2,

$K(1{,}381 \times 10^{-23} {}^{J}/_{K}$: La constante de Boltzmann,

$T(k)$: La température effective de la cellule,

$q(1{,}602 \times 10^{-19} C)$: La charge de l'électron,

$n1$: Le facteur de non idéalité de la jonction de la diode1,

$n2$: Le facteur de non idéalité de la jonction de la diode2,

$I(A)$: Le courant fourni par la cellule,

$V(v)$: La tension aux bornes de la cellule,

$Rp(\Omega)$: La résistance de shunt caractérisant les courants de fuites de la jonction,

$Rs(\Omega)$: La résistance série représentant les diverses résistances des contacts et de connexions.

I.7 Paramètres d'une cellule photovoltaïque

Les paramètres des cellules photovoltaïques ($I_{CC}, V_{co} et\ FF$) extraits des caractéristiques courant-tension, permettent de comparer différentes cellules éclairées dans des conditions identiques [7] .

I.7.1 Courant de court-circuit (Icc)

C'est le courant pour laquelle la tension aux bornes de la cellule ou du générateur P_V est nulle.

Dans le cas idéal (R_{se} nulle et R_{sh} infinie).

$$I_{cc} = I_{ph} - I_{sat}[exp^{\left(\frac{e(Icc*Rse}{nKT}\right)} - 1] - (\frac{I_{CC} * R_{se}}{R_{sh}}) \quad \text{(I.5)}$$

Pour la plupart des cellules (dont la résistance série est faible), on peut négliger le terme :

$$I_{sat}[\exp(\frac{e(I_{pv}.R_{se})}{nKT}) - 1] \quad \text{(I.6)}$$

DevantI_{ph}, l'expression approchée du courant de court-circuit est alors :

$$I_{CC=}\frac{I_{ph}}{(1+\frac{R_{se}}{R_{sh}})} \quad \text{(I.7)}$$

Quantitativement, il a la plus grande valeur du courant généré par la cellule pratiquement ($I_{cc} = I_{ph}$) [1] .

I.7.2 Tension de circuit–ouvert (Vco)

La tension d'un circuit ouvert est la tension mesurée aux bornes d'une cellule solaire lorsque courant ne circule à travers celle-ci. Elle peut être calculée à partir de la relation suivante :

$$0 = I_{CC}[e\exp(\frac{eV_{pv}}{nKT}) - 1] - (\frac{V_{pv}}{R_{sh}}) \quad \text{(I.8)}$$

Dans le cas idéal, sa valeur est légèrement inférieure à [8] :

$$V_{co} = V_T.In[\frac{I_{ph}}{I_{sat}} + 1] \quad \text{(I.9)}$$

I.7.3 Puissance maximale

C'est la relation entre la tension maximale (V_{max}) et l'intensité maximale (I_{max}) et que sous les conditions normalisées d'ensoleillement standard (Température= 25℃ et un Eclairement =1000w/m2, elle est donnée par la relation [9] :

$$P_{max} = V_{max}.I_{max} \quad \text{(I.10)}$$

I.7.4 Facteur de forme

A l'aide de la caractéristique courant-tension d'une cellule dans l'obscurité et sous éclairement, il est possible d'évaluer les performances et le comportement électrique de la cellule photovoltaïque, donc le facteur de forme ou facteur de courbe, est définit comme le rapport entre la puissance maximale et le produit (I_{cc},V_{co}), d'où il est donné par la relation :

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc}.V_{co}} = \frac{I_{opt}.V_{opt}}{I_{cc}.V_{co}} \quad \text{(I.11)}$$

Généralement le facteur de forme prend des valeurs entre 0.6 et 0.85 [10] .

I.7.5 Le rendement

Il est défini comme le rapport entre la puissance maximale produite par la cellule et la puissance du rayonnement solaire qui arrive sur la cellule [7].

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}}$$

P_{inc} : Puissance incident. Où d'après **:** $P_{Max} = FF \times I_{CC} \times V_{cc}$

$$\eta = \frac{FF.I_{cc}.V_{co}}{P_{inc}} \quad \text{(I.12)}$$

I.8 Générateur photovoltaïque

Les cellules solaires sont habituellement regroupées en série et en parallèle, puis enfermées sous une couche de verre pour former un module photovoltaïque. Un générateur photovoltaïque est composé de modules interconnectés afin de créer une unité générant une puissance continue élevée compatible avec l'équipement électrique standard, comme illustré dans la Figure (I.11). Les modules photovoltaïques sont généralement connectés en série-parallèle pour accroître la puissance et la tensionV_{CO}, ainsi que le courant I_{cc} à la sortie du générateur. Ces modules interconnectés sont montés sur des supports métalliques et inclinés selon l'angle souhaité en fonction de l'emplacement, souvent appelé champ de modules. Dans diverses applications, le courant continu produit par le générateur photovoltaïque est converti en courant alternatif à l'aide d'un onduleur [11].

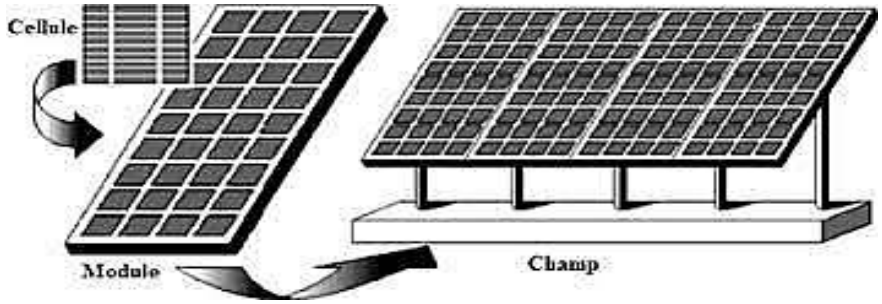


Figure I.11 : Composants d'un générateur PV.

I.8.1. Caractéristique d'un Générateur Pv

I.8.1.1 Caractéristique puissance-tension

On peut déterminer la puissance générée par une cellule solaire en effectuant le produit de la tension aux bornes de la cellule (V) par le courant qui la traverse (I). Par conséquent, l'expression de la puissance (P) peut être formulée comme P = V * I. Autrement dit, *P* est fonction de *V* selon l'équation $P = (V)$.

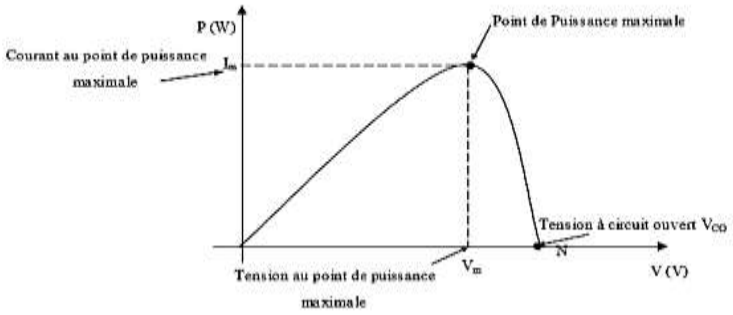


Figure I.12 : Courbe P = f(V) d'un module photovoltaïque.

I.8.1.2 Caractéristique courant-tension

Attribuer un caractère source de courant ou de tension à un panneau photovoltaïque sur l'ensemble de sa caractéristique courant-tension est une tâche complexe. Ainsi, il est plus approprié de considérer le panneau photovoltaïque comme une source de puissance. Dans ce contexte, il devient évident qu'il existe un point P_m où la puissance atteint son maximum. La figure représente la caractéristique réelle et le schéma équivalent de la cellule.

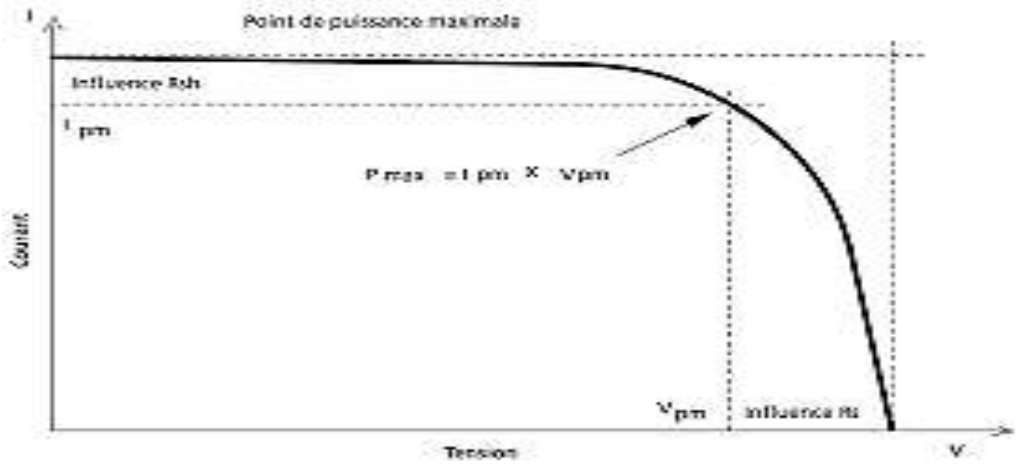


Figure I.13 : Caractéristique I = f(V) d'un module photovoltaïque.

La caractéristique peut être subdivisée en trois sections distinctes :

- **La zone (A)** : où le courant demeure constant, indiquant que le générateur photovoltaïque opère comme un générateur de courant.
- **La zone (b)** : représente la plage privilégiée pour le fonctionnement du générateur, où le point optimal (caractérisé par une puissance maximale) peut être identifié.
- **La zone (c)** : caractérisée par une variation de courant associée à une tension presque constante, signalant ainsi que dans ce cas, le générateur peut être assimilé à un générateur de tension.

I.9 Protection d'un PV

Lors de la conception d'une installation photovoltaïque, il est impératif d'assurer la protection électrique de l'ensemble pour prolonger sa durée de vie et prévenir des défaillances potentiellement destructrices liées à l'association des cellules et à leurs fonctionnements. À cette fin, deux types de protections sont couramment employés dans les installations actuelles :

- Une protection en cas de connexions en parallèle de modules PV, visant à éviter les courants négatifs dans les GPV (diode anti-retour).
- Une protection lors de la mise en série de modules PV, conçue pour prévenir la perte totale de la chaîne (diode by-pass) [12].

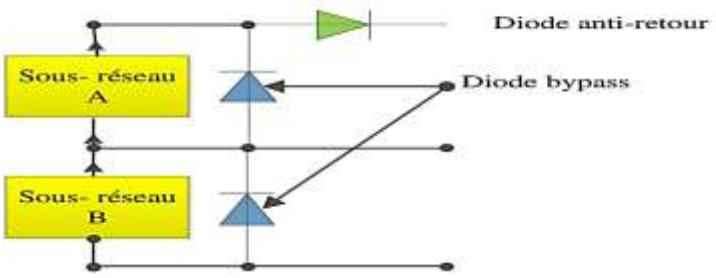


Figure I.14 : Protection des modules par les diodes anti retour by-pass.

I.10 Système de refroidissement

Basé sur le phénomène physique de l'effet photovoltaïque, ce chapitre étudie la production d'énergie directe par le rayonnement solaire, et établit le modèle mathématique de ce phénomène physique.

Cela permet de suivre les propriétés des cellules photovoltaïques. Les caractéristiques courant-tension I(V) et puissance-tension P(V) sont fortement influencé par les conditions climatiques, notamment le rayonnement solaire et la température du module.

I.11 Conclusion

Dans ce préambule initial, des informations générales sur la conversion photovoltaïque ont été présentées. Une explication de la conversion, les différentes catégories de cellules employées, les modélisations les plus couramment utilisées, ainsi que les principaux concepts les plus répandus ont également été exposés.

La généralisation de ma recherche dans le domaine de la photovoltaïque a permis d'explorer de manière approfondie les principes fondamentaux et les aspects pratiques liés à la conception des installations solaires. En examinant la caractéristique courant-tension, les zones de fonctionnement des générateurs photovoltaïques et les stratégies de protection électrique, j'ai contribué à une compréhension plus holistique de cette technologie. Les résultats de cette recherche offrent des perspectives essentielles pour optimiser la performance des installations, maximiser la production d'énergie et assurer la fiabilité à long terme. Cette généralisation fournit des bases solides pour la conception et la mise en œuvre de systèmes photovoltaïques efficaces, contribuant ainsi au développement durable et à l'exploitation efficiente de l'énergie solaire.

Chapitre II :Les convertisseurs statiques dans les systèmes Photovoltaïques .

II.1 Introduction

Les convertisseurs DC-DC (hacheurs) et les convertisseurs DC-AC (onduleurs) représentent des éléments fondamentaux de l'électronique de puissance, jouant un rôle crucial dans la gestion efficace de l'énergie électrique dans une multitude d'applications. Ces dispositifs sont essentiels pour la conversion et le contrôle précis de la tension et du courant électrique, que ce soit pour alimenter des systèmes autonomes, des réseaux électriques ou des équipements industriels.

Dans cette étude, nous explorerons en profondeur les principes de fonctionnement, les différentes topologies, ainsi que les applications clés des convertisseurs DC-DC et DC-AC. Nous mettrons en lumière les défis de conception, les avancées technologiques récentes et les opportunités futures dans ces domaines cruciaux de l'électronique de puissance.

L'objectif principal de cette recherche est de fournir une analyse approfondie des performances, de l'efficacité énergétique et de la fiabilité des convertisseurs DC-DC et DC-AC, tout en examinant leur intégration dans des systèmes complexes tels que les énergies renouvelables, les véhicules électriques, et les réseaux électriques intelligents.

En outre, cette étude vise à identifier les tendances émergentes et les innovations clés qui façonneront l'avenir de ces technologies, en mettant en évidence leur rôle crucial dans la transition vers une infrastructure énergétique plus durable et efficace.

II.2 Les convertisseurs DC-DC (Hacheurs)

Les convertisseurs statiques DC-DC, également connus sous le nom de hacheurs, sont des dispositifs cruciaux utilisés pour générer une tension continue variable à partir d'une source de tension fixe. Leur structure inclut généralement des éléments tels que des condensateurs, des inductances et des commutateurs. Dans des conditions idéales, ces composants ne dissipent aucune puissance, ce qui contribue à rendre les hacheurs hautement efficaces.

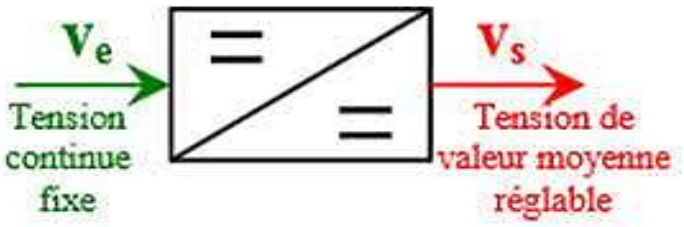


Figure II.1 : Symbole d'un Convertisseurs DC/DC 'Hacheur'.

II.3 Type de convertisseurs

Il existe plusieurs topologies des convertisseurs DC-DC. Il est caractérisé en pratique par deux topologies principales : notamment la topologie dite isolée et le Fly Back. Concernant la topologie isolée, elle nécessite un transformateur d'isolement fonctionnant à haute fréquence et

elle est principalement utilisée pour les alimentations à découpage.

Par contre, la topologie Fly Back qui est non isolée et n'utilise pas de transformateur d'isolement, est principalem ent utilisée dans les entrainements des machines à courant continu et les chaines des systèmes d'alimentation photovoltaïque.

Les convertisseurs de topologie non isolée sont classés en trois catégories : abaisseur, élévateur et mixte et sont respectivement, appelés en anglais Buck, Boost [7].

II.3.1 Hacheur survolteur (Boost)

Le hacheur survolteur (Boost) ou hacheur parallèle connu par le nom d'élévateur de tension, est donné par la (figure II.2), il est généralement utilisé dans la conversion d'une tension d'entrée basse en une tension de sortie haute**.**

Il se compose d'une source de tension d'entrée continue (Vi), d'une inductance (L), d'un interrupteur (K), d'une diode(D), et deux condensateurs (C_1etC_2)

En premier temps $[0, \alpha Ts]$le transistor est fermé, d'une part le courant dans l'inductance croit progressivement, d'autre part elle emmagasine de l'énergie, jusqu'à la fin de la première période, le transistor s'ouvre et l'inductance (L) s'oppose à la diminution du courant (I) ainsi elle génère une tension qui s'ajoute à la tension de source, qui s'applique sur la charge (R)à travers la diode[8].

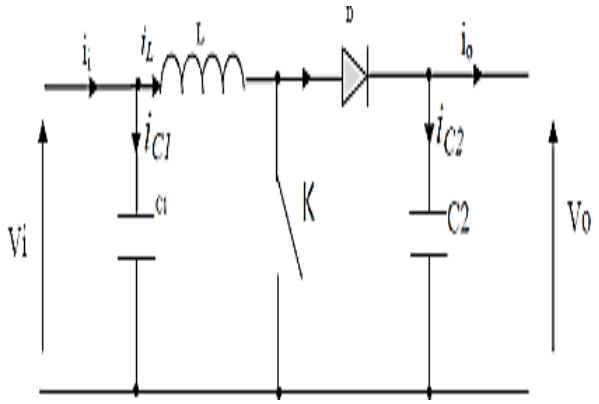


Figure II.2 : Schéma électrique du convertisseur Boost.

II.3.1.1 Modèle mathématique équivalent

L'application des lois de Kirchhoff sur les deux circuits équivalents du convertisseur survolteur des deux phases de fonctionnement donne :

Pour la première période αTs :

α : Le rapport cyclique des impulsions qui commandent l'interrupteur.

T_s : La période des impulsions.

$$I_{c1} = C_1.\frac{dv_i}{dt} = I_i - I_L$$
$$I_{c2} = C_2.\frac{dv_0}{dt} = I_0 \qquad \text{(II.1)}$$
$$V_L = L.\frac{dv_l}{dt} = V_i$$

Pour la deuxième période $(1-\alpha)T_s$:

$$I_{C1} = C_1.\frac{dv_i}{dt} = I_i - I_L$$
$$I_{C2} = C_2.\frac{dv_0}{dt} = I_L - I_0 \qquad \text{(II.2)}$$
$$V_L = L.\frac{dv_L}{dt} = V_i - V_0$$

Pour simplifier l'étude de convertisseur Boost, on s'intéresse au régime continu qui est obtenu en éliminant les dérivées des variables dynamiques, et en remplaçant ces signaux par leurs valeurs moyennes. On obtient les équations suivantes :

$$\begin{aligned} I_L &= I_i \\ I_0 &= (1-\alpha)V_L \\ V_e &= (1-\alpha)V_0 \end{aligned} \qquad \text{(II.3)}$$

Avec IL: le courant dans l'inductance.

Comme le présente la (figure II.3), lorsque l'interrupteur du transistor (K) est sur la position (on), le courant de l'inductance du hacheur augmente linéairement et à cet instant la diode (D) est bloquée (off) et lorsque (k) tourne sur la position (off), l'énergie emmagasinée par l'inductance est dissipée dans le circuit (Rc) bien que la diode (D) est passante.

Les caractéristiques de tension et du courant de charge du convertisseur Boost dans le cas de la conduction continue sont décrites par la (figure II.3), comme suit : [13]

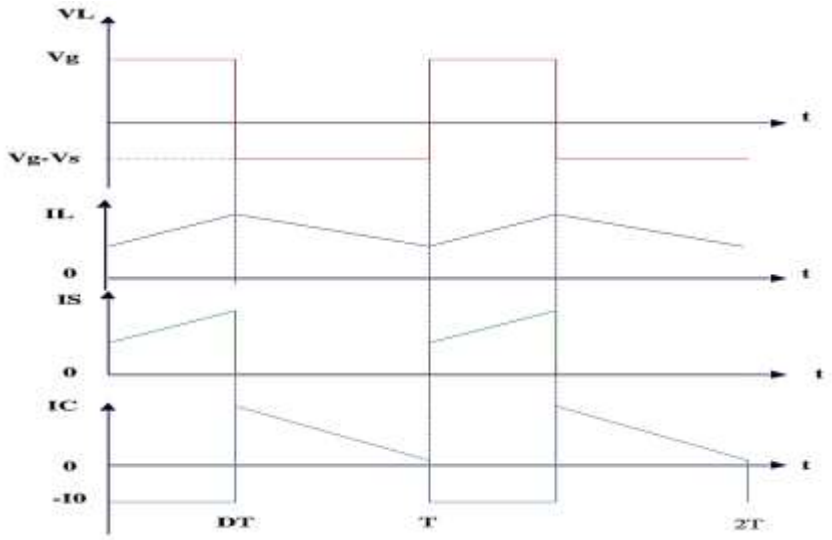


Figure II.3 : Caractéristique de la tension et du courant du hacheur survolteur

II. 3.2 Hacheur dévolteur (Buck)

Le dispositif de conversion appelé convertisseur dévolteur est souvent mentionné dans la littérature sous les termes de hacheur Buck (abaisseur) ou hacheur série. Le hacheur série, agissant comme un interrupteur, est spécifiquement conçu pour connecter deux sources de courant/tension différentes, ou leurs équivalents. L'usage du hacheur Buck dans les systèmes de conversion

photovoltaïques est approprié, car le générateur photovoltaïque produit un courant continu, tandis que le récepteur, généralement une batterie, fonctionne comme une source de tension. Son application typique est de réduire la tension d'entrée à une tension de sortie inférieure, où le rapport de conversion $M = {Vo}/{Vi}$ est déterminé par le rapport cyclique α du commutateur.

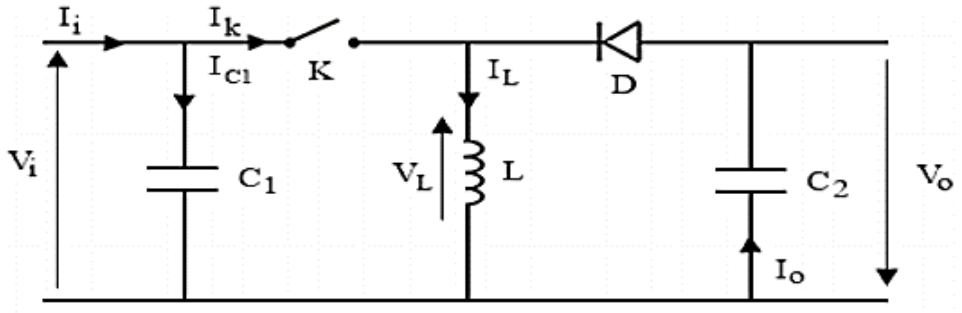


Figure II.4 : Circuit électrique de base du hacheur dévolteur.

Habituellement, les interrupteurs sont des transistors MOSFET ou IGBT, qui sont des composants semi-conducteurs fonctionnant en mode blocage-saturation. [13]

L'expression mathématique qui décrit le courant circulant dans l'inductance est formulée comme suit :

$$\frac{\delta I}{\delta t} = \frac{v_i - V_s}{L} \qquad \text{(II.4)}$$

Le processus de commutation est décrit par la position de l'interrupteur (S). Pendant la première période de temps (αT), le transistor est en état de saturation, ce qui permet à l'inductance (L) de stocker de l'énergie avec une augmentation du courant. Pendant la deuxième période de temps (1 − α) T, l'inductance libère cette énergie à la charge, entraînant une diminution du courant. En négligeant la chute de tension à travers la diode, le taux de variation du courant est exprimé par :

$$\frac{\delta I}{\delta t} = \frac{v_i}{L} \qquad \text{(II.5)}$$

Quand le courant de l'inductance ne diminue pas jusqu'à zéro avant que le transistor ne commute, le convertisseur opère en mode de conduction continue. Dans cette situation, si la tension de charge dépend uniquement de la tension de la source et du rapport cyclique $\alpha = \frac{T_{on}}{T}$, alors la tension aux bornes de la charge est:

$$V_s = \alpha V_i \quad \text{(II.6)}$$

Exhibe comment la tension de charge fluctue en fonction du courant de charge, c'est-à-dire les caractéristiques des courants et des tensions illustrant le fonctionnement du hacheur dévolteur[13].

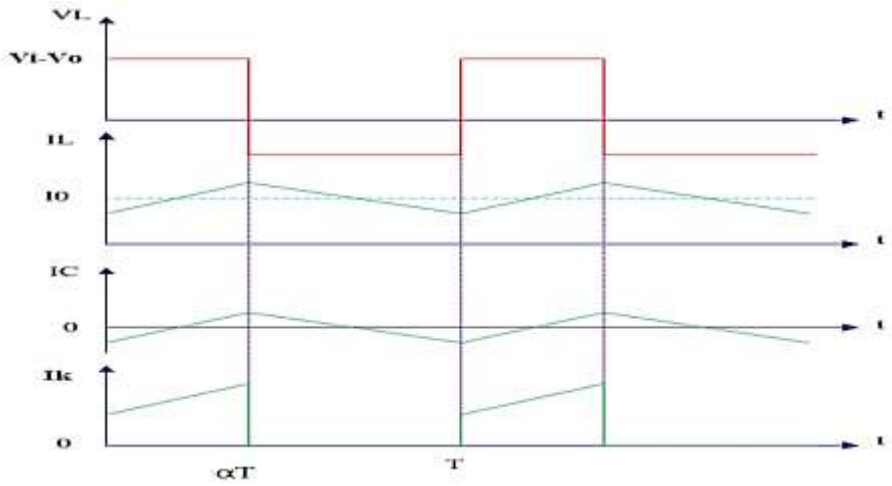


Figure II.5 : Caractéristique de la tension et des courants d'un convertisseur Buck.

II.3.3 Convertisseur Buck-Boost

Le convertisseur buck-boost combine les propriétés des configurations de buck et de boost. Il peut être utilisé pour transformer idéalement n'importe quelle tension d'entrée continue en n'importe quelle tension de sortie continue désirée. En pratique, l'usage de l'idéalité est naturellement limité par les pertes des composants.

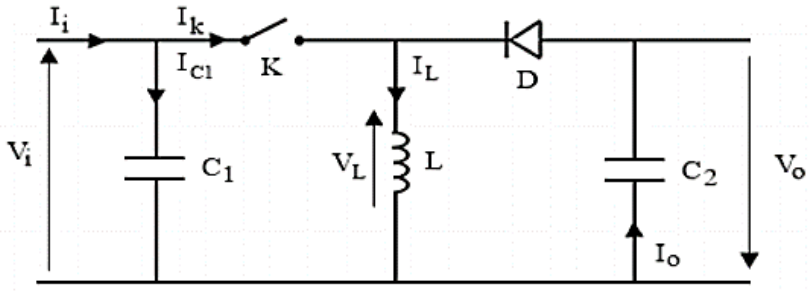


Figure II.6 : Circuit électrique de base de le hacheur dévolteur /survolteur

Dans ce dispositif, la tension peut être augmentée ou diminuée selon le mode de commutation. Cependant, La tension de sortie est de signe opposé à la tension d'entrée. Lorsque le transistor est sur la position (on) le courant dans l'inductance augmente, l'énergie est stockée,

et quand le commutateur tourne sur la position (off). La tension à travers l'inductance est renversée et l'énergie stockée se transfert vers la charge via la diode. Dans ce cas, l'équation de la tension aux bornes de la charge décrivant le fonctionnement en conduction continue est donnée comme suit [13] :

$$V_s \frac{\alpha}{1-\alpha} V_i \tag{II.7}$$

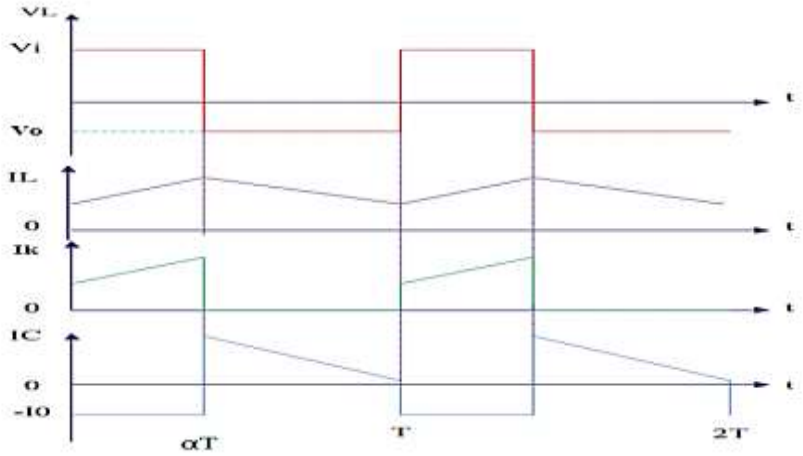


Figure II.7 : Caractéristique de la tension et du courant du Buck-Boost.

II.4 Les onduleurs photovoltaïques

Les dispositifs d'onduleurs photovoltaïques font partie de la catégorie des convertisseurs statiques dans le domaine de l'électronique de puissance. Leur fonction principale consiste à transformer l'énergie en courant continu en énergie en courant alternatif. Selon les exigences, l'onduleur peut être alimenté soit par un courant, soit par une tension, et en sortie, il permet de réguler à la fois l'amplitude et la fréquence du courant ou de la tension.

II.5 Définition onduleurs

Les onduleurs sont les dispositifs ayant pour but d'obtenir une source de tension de courant alternatif, sinusoïdal ou non, à fréquence fixe ou à fréquence variable ; à partir d'un générateur de tension continue, d'où leur nom usuel "les onduleurs". Nous classons toutefois deux types importants des onduleurs :

- Les onduleurs autonomes : Un onduleur autonome (ou oscillateurs) est un convertisseur statique continu-alternatif, il permet de générer leur propre fréquence et leur propre tension alternative. Dans ces onduleurs la commutation est forcée.
- Les onduleurs non autonomes (ou pilotés) : les onduleurs non autonomes dont la fréquence et la tension alternative sont exigées par le réseau qu'ils alimentent. Dans ces onduleurs la commutation est naturelle. Elle est naturelle en ce sens que ce sont les tensions alternatives du réseau qui effectuent le transfert du courant d'un thyristor à l'autre.

II.6 Principe de fonctionnement

L'approvisionnement continu en énergie à l'entrée de l'onduleur, tandis que celle en sortie est alternée, indique que son mode de fonctionnement repose sur le principe de commutation. Cette opération de commutation est effectuée au moyen d'interrupteurs qui alternent de manière régulière (figure II.8).

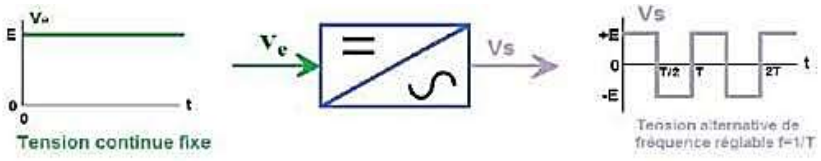


Figure II.8 : Principe de fonctionnement d'un onduleur.

Lorsqu'ils sont opérationnels, les onduleurs suivent un principe similaire, mais ceux utilisés dans les systèmes photovoltaïques présentent quelques variations par rapport aux autres onduleurs de puissance électronique. L'objectif principal d'un onduleur photovoltaïque est d'optimiser 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 à 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 = Udc (figure II.9).
- lorsque les interrupteurs S1-S3 sont ouverts et S2-S4 fermés, on obtient la partie

négative de l'alternance de la tension ou u = -Udc (figure II.10).

La somme de ces deux signaux donne le signal complet sur une période [13] .

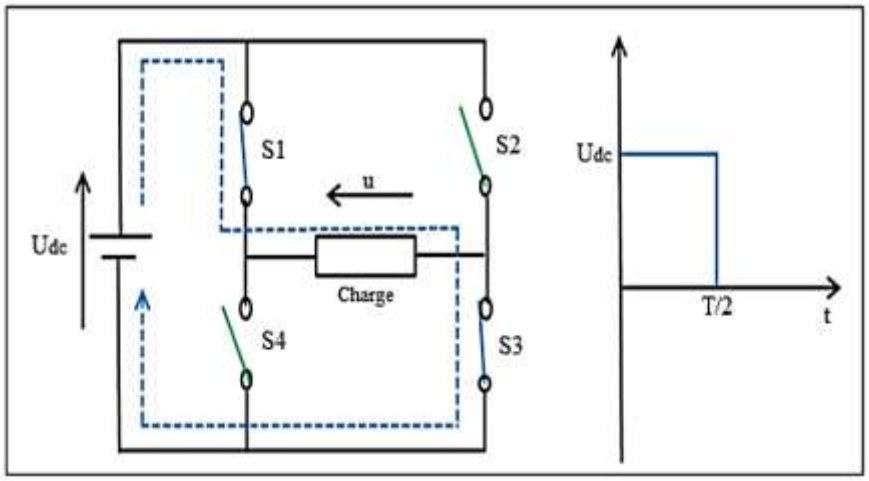


Figure II.9 : Cas ou S1-S3 sont fermés et S2-S4 ouverts et signal obtenu.

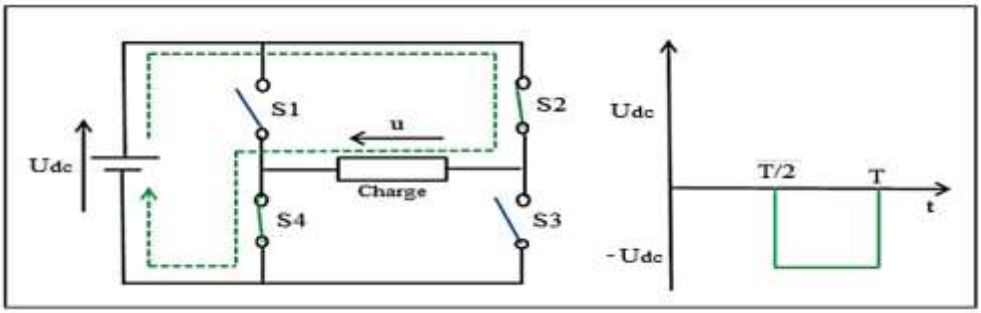


Figure II.10 : Cas ou S1-S3 sont ouverts et S2-S4 fermés et signal obtenu.

II.7 Onduleur Monophasé

Un convertisseur monophasé représente un élément indispensable dans les domaines de l'électronique et de l'électricité. Il occupe une fonction essentielle dans la préservation des équipements électriques contre les variations de tension et les interruptions de courant. Sa fonction consiste à transformer le courant continu (DC) en courant alternatif (AC), garantissant ainsi une alimentation électrique stable et fiable pour les appareils résidentiels et industriels.

II.8 Onduleur triphasé

L'onduleur triphasé représente un composant indispensable dans le domaine de l'électronique de puissance, étant crucial dans le processus de conversion de l'électricité. Il s'agit d'un dispositif qui transforme un courant continu (CC) en un courant alternatif triphasé (CA), destiné à alimenter des équipements nécessitant un système triphasé dans des environnements industriels et commerciaux. Cette transformation revêt une importance capitale pour garantir le bon fonctionnement des machines et des équipements qui dépendent d'une alimentation électrique stable et fiable**.**

Il comporte un point neutre n flottant à partir duquel les tensions de phases seront mesurées. La tension continue de la source est notée Udc et S1, S2, …, S6 désignent les états des interrupteurs[13].

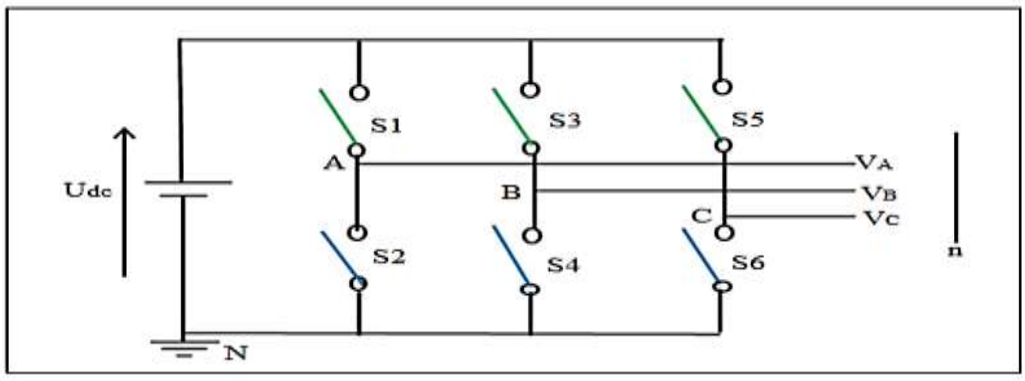


Figure II.11 : Schéma de modélisation de l'onduleur triphasé.

II.9 Effets harmoniques

Un harmonique est une perturbation observée sur un signal tel que le courant ou la tension. Il s'agit d'une composante sinusoïdale périodique dont la fréquence est un multiple de la fréquence fondamentale. En effet, les harmoniques présents dans le réseau de distribution proviennent majoritairement 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, etc. Les fréquences de ces harmoniques sont de rangs impairs (3, 5, 7, 9, 11, 13, etc.). Concernant 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 autant que possible (Krein et Balog Jr, 2010).

II.9.1 Taux de distorsion harmonique

Le taux de distorsion harmonique (ou total harmonic distorsion, 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 :

$$THD = \frac{H_2^2 + H_{3+\ldots}^2 H_n^2}{H_1} \quad \text{(II.8)}$$

n : l'ordre de l'harmonique, n≥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) [13].

II.9.2 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, …
- 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 [13].

II.10 Rendement des onduleurs photovoltaïques

Pratiquement, l'efficacité d'un onduleur est influencée à la fois par la tension continue DC en entrée et la tension alternative AC en sortie (Jantsch et al, 1997). Étant donné que la caractéristique I-V du générateur photovoltaïque est affectée par des facteurs tels que la température et l'intensité lumineuse, l'onduleur est conçu pour optimiser la puissance délivrée malgré ces variations. Ainsi, le rendement de l'onduleur est déterminé en comparant la puissance continue fournie par le générateur photovoltaïque avec la puissance alternative en sortie de l'onduleur (Haeberlin et Borgna, 2004), soit [13] :

$$\eta = \frac{P_{AC}}{P_{pv}} \qquad \text{(II.9)}$$

Conclusion

Après une étude approfondie sur les convertisseurs (hacheurs-onduleurs), il est clair que le choix du bon dispositif revêt une importance capitale pour garantir l'efficacité et la fiabilité du système électrique. En considérant les besoins spécifiques en termes de tension, de fréquence, de puissance et d'applications, il est essentiel de sélectionner un convertisseur capable de répondre à ces exigences tout en maintenant un rendement optimal. De plus, en tenant compte des aspects tels que la régulation de la tension, la protection contre les surtensions et les court-circuits, ainsi que la gestion de l'énergie, on peut garantir une exploitation sûre et efficace du système. En conclusion, investir dans un convertisseur (hacheur-onduleur) adapté à ses besoins est un choix stratégique pour assurer le bon fonctionnement et la durabilité de l'installation électrique.

Chapitre III : Les filtres

III.1 Introduction

Dans ce troisième chapitre, nous aborderons les principes fondamentaux des condensateurs ainsi que l'analyse approfondie des filtres LCL. Les condensateurs, éléments passifs largement utilisés dans les circuits électroniques, jouent un rôle crucial dans le stockage et la régulation de l'énergie électrique. Quant aux filtres LCL, ils constituent des éléments essentiels pour garantir la qualité de l'alimentation électrique en atténuant les harmoniques et en améliorant la régulation de tension dans les systèmes électriques.

Dans cette section introductive, nous présenterons un aperçu général des condensateurs, en mettant l'accent sur leur fonctionnement, leurs types et leurs applications courantes dans les domaines de l'électronique et de l'électrotechnique. Ensuite, nous introduirons les filtres LCL, en expliquant leur importance dans la suppression des harmoniques et leur rôle dans l'amélioration de la stabilité des systèmes électriques.

Afin de faciliter la compréhension de ces concepts, nous adopterons une approche pédagogique, en fournissant des explications claires et des exemples concrets. Nous discuterons également des méthodes d'analyse et de conception des condensateurs et des filtres LCL, ainsi que de leurs applications pratiques à travers des études de cas.

En explorant ce chapitre, les lecteurs acquerront une compréhension approfondie des condensateurs et des filtres LCL, ce qui leur permettra d'appréhender leur importance dans la conception et le fonctionnement des systèmes électriques modernes.

III.2 Condensateurs

Un dispositif électronique de base connu sous le nom de condensateur se compose de deux électrodes conductrices, appelées armatures, qui sont totalement influentes et séparées par un matériau isolant polarisable, souvent appelé diélectrique. Sa fonction principale réside dans sa capacité à emmagasiner des charges électriques opposées sur ses armatures. La quantité de ces charges est directement proportionnelle à la tension appliquée au condensateur**.**

Les utilisations principales des condensateurs sont les suivantes :

- Stabilisation de l'alimentation électrique : en se déchargeant lors de chutes de tension et se chargeant lors de pics de tension.

- Traitement de signaux périodiques, par exemple, à des fins de filtrage.
- Séparation du courant alternatif et du courant continu, où ce dernier est bloqué par le condensateur.
- Stockage d'énergie, dans ce cas, on parle souvent de super condensateurs.

III.3 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 III.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).

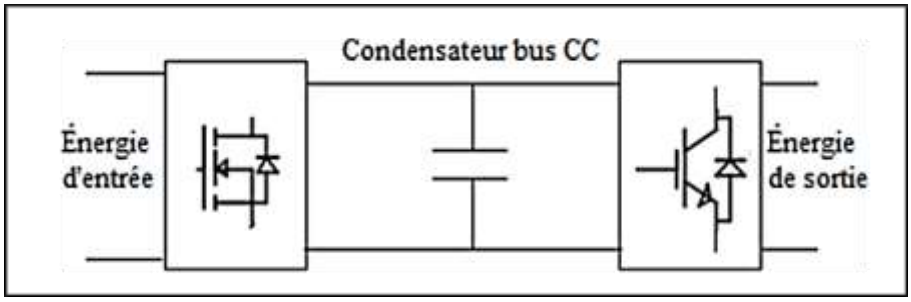


Figure III.1 : Emplacement du condensateur du bus cc dans le circuit.

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 [13] .

III.3.1 les types condensateur

III.3.1.1 Condensateurs électrolytiques

Les condensateurs présentent une particularité notable : ils possèdent une polarité, avec un pôle positif et un pôle négatif. Cette caractéristique doit être prise en compte lors de leur connexion

à un circuit. Pour éviter toute erreur, la polarité est généralement indiquée sur le corps du condensateur. Une inversion de polarité pourrait endommager voire faire exploser le condensateur. À l'origine, les condensateurs sont fabriqués en enroulant deux couches d'aluminium autour d'un matériau imprégné d'électrolyte. Ensuite, une tension est appliquée à la structure, ce qui forme le condensateur par oxydation de l'anode due à l'électrolyse. Ce type de condensateur présente l'avantage d'avoir une grande capacité par unité de volume et est généralement utilisé pour les basses fréquences, typiquement en dessous de 20 kHz. Les condensateurs électrolytiques les plus répandus sont en aluminium, bien que des modèles en tantale soient également disponibles. Ces derniers offrent des caractéristiques supérieures mais sont également plus coûteux.



Figure III.2 : CONDENSATEUR ÉLECTROLYTIQUE MONACOR 22UF LSC-220NP.

III.3.1.1.1 Condensateurs électrolytiques à l’aluminium

À l’aluminium Le condensateur électrolytique en aluminium est polarisé et offre une capacité importante. Sa borne positive, appelée anode, est constituée d'une bande d'aluminium recouverte d'une couche d'alumine, tandis que sa borne négative, ou cathode, est formée d'une bande d'aluminium sans revêtement. Il utilise un diélectrique à base d'alumine et un papier spécifique imprégné d'un électrolyte approprié.

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).

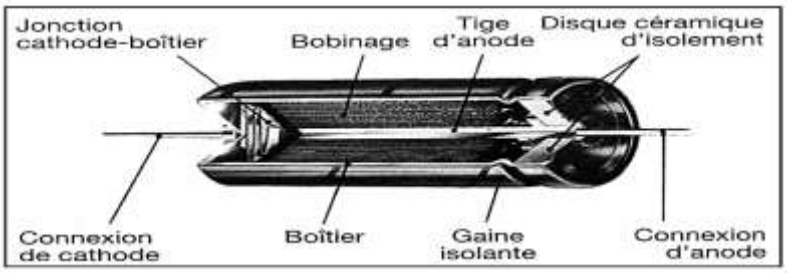


Figure III.3 : Schéma condensateur électrolytique à l'aluminium (Condensateurs, 2015)

III.3.1.1.2 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 boitier en argent qui résiste à l'électrolyte solide de bioxyde de manganèse (Condensateurs, 2015).

La figure III.4 est celle de la coupe transversale d'un condensateur électrolytique au tantale dans laquelle les bornes, l'électrolyte, le boitier, les connexions, … sont représentés.

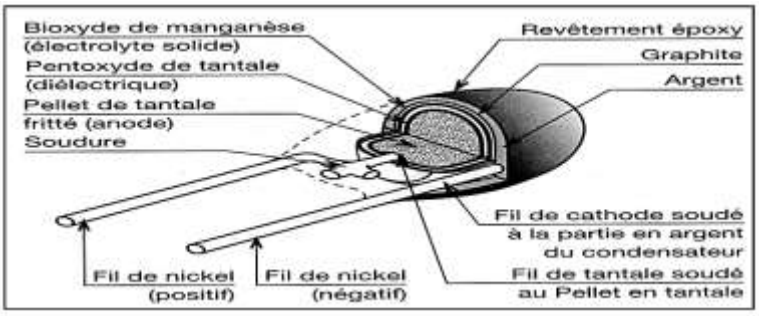


Figure III.4 : Schéma d'un condensateur électrolytique au tantale (Condensateurs, 2015)

III.3.1.2 Condensateurs céramiques

Le condensateur céramique utilise une céramique comme diélectrique, caractérisée par sa nature inorganique et non métallique, et mise en œuvre grâce à la technologie céramique. Les condensateurs céramiques de faible capacité ou monocouche se composent généralement d'une pastille, d'un tube ou d'un disque céramique, recouvert d'une métallisation argentée sur les deux faces. Pour augmenter la capacité, on peut réduire l'épaisseur du diélectrique et augmenter le nombre de couches, ce qui conduit à des condensateurs multicouches. Cette configuration est visible dans le schéma d'un

Condensateur céramique, mettant en évidence le diélectrique, la couche métallique, l'emballage ainsi que les pattes de connexion.

III.3.1.3 Condensateurs à film plastiques métallisés

Les condensateurs à films plastiques métallisés sont des dispositifs dont le diélectrique est constitué d'un film plastique, avec des propriétés qui varient selon le matériau utilisé. Ce film plastique est revêtu d'une métallisation en aluminium ou en zinc, ce qui permet de réduire la taille du condensateur et de former ses électrodes. La structure du condensateur à film plastique métallisé est illustrée dans la figure III.5, avec l'aluminium comme métal utilisé dans ce cas.

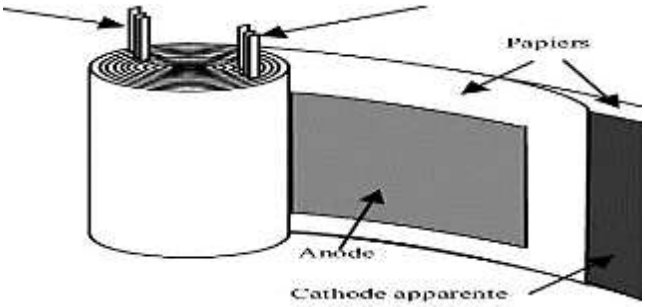


Figure III.5 : Structure des condensateurs à films polypropylène métallisés.

III.4 Impact d'une défaillance du condensateur sur l'onduleur

L'onduleur étant un élément à rôle capital et de surcroit 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 III.6:

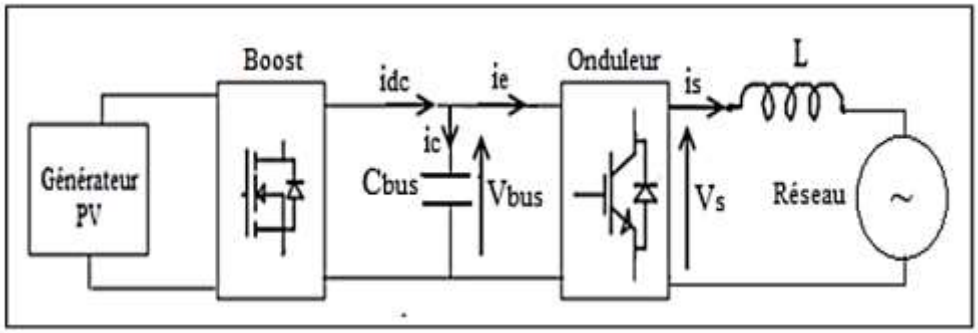


Figure III.6 : Système photovoltaïque connecté au réseau.

A partir du circuit de la figure III .6, il est possible d'écrire les équations des tensions et des courants comme suit :

$$V_s = V_L + V_{Rés} \qquad \text{(III.1)}$$

$$i_{e=}i_{dc-}i_c$$

La tension U_{ds} 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 :

$$i_c = i_{dc} \qquad \text{(III.2)}$$

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 [13] .

III.5 Durée de vie et fin de vie d'un condensateur

En règle générale, la défaillance d'un composant d'électronique de puissance découle souvent d'une insuffisance de marge dans sa conception, des conditions de fonctionnement auxquelles il est exposé, des défauts de fabrication ou de l'usure normale. Plus spécifiquement, la défaillance des condensateurs est principalement liée à leur dimensionnement, aux conditions environnementales auxquelles ils sont soumis, ainsi qu'à d'autres défaillances aléatoires.

III.5.1 Durée de vie d'un condensateur

Dans la littérature spécialisée, il est établi que les grands condensateurs chimiques présentent un niveau de risque plus élevé par rapport à leurs homologues de plus petite taille, les condensateurs solides. Cette observation suggère que les condensateurs solides offrent une meilleure résistance aux conditions opérationnelles que les condensateurs chimiques. La longévité d'un condensateur électrolytique est intrinsèquement liée à des facteurs tels que sa température de fonctionnement, la tension appliquée à ses bornes et le courant d'ondulation qu'il subit. Ainsi, la durée de vie d'un condensateur est généralement exprimée en heures de fonctionnement, en tenant compte de variables telles que la température, la tension et le courant [13].

III.5.2 Fin de vie d'un condensateur

En considérant la durée de vie du condensateur et les différentes causes de ses défaillances, la fin de vie d'un condensateur est principalement déterminée par la modification de certains de ses paramètres. Les simulations réalisées indiquent que la fin de vie du condensateur est principalement associée à des altérations de sa capacité ou de sa résistance série équivalente. Lorsque la capacité du condensateur diminue jusqu'à 20 % ou que sa résistance équivalente série augmente, on considère qu'il a atteint sa fin de vie car il entre alors en état de défaillance.

III.6 Le filtre LCL

Dans le contexte des onduleurs, l'incorporation d'un filtre de sortie passe-bas est indispensable pour obtenir une sortie de fréquence fondamentale. Traditionnellement, quatre types de filtres sont couramment utilisés dans les onduleurs : les filtres L, LC, LCL et LLCL. Parmi ceux-ci, le filtre LCL (voir topologie en Figure 1-6) est devenu prédominant ces dernières années dans les onduleurs connectés au réseau en raison de son excellente capacité d'atténuation au-delà de la fréquence de résonance.

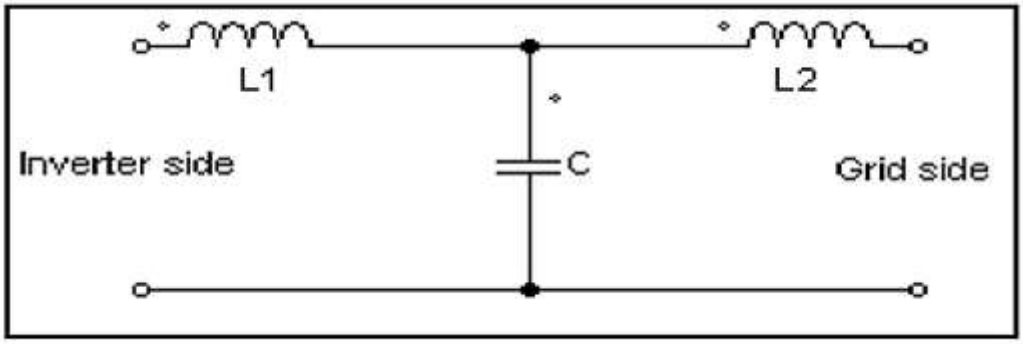


Figure III.7 : Schéma du filtre LCL.

Malgré la vaste documentation existante sur les filtres LCL, la méthodologie de conception varie d'une étude à l'autre. De plus, la modélisation mathématique sous forme de modèle d'état diffère selon les recherches. Par exemple, l'idée d'ajouter une résistance en série aux deux inductances et au condensateur pour améliorer la réalité de la modélisation est sujette à débat. Les critères de dimensionnement varient également selon les sources. Cependant, il est généralement admis que ces filtres offrent des performances très intéressantes, notamment en termes de découplage entre le filtre et l'impédance du réseau. Il est crucial, lors du processus de conception d'un filtre LCL, de prendre en compte la résonance du filtre et l'ondulation du courant circulant dans les inductances, soulignant ainsi l'importance du dimensionnement. Dans notre cas, nous avons opté pour une taille de filtre LCL spécifiée dans le Tableau III-1. Ce dimensionnement a été réalisé par l'entreprise d'énergie et a démontré de bonnes performances après des tests approfondis.

Tableau III.1 : Taille du filtre LCL [14] .

L_c	$240^{-6}H$
L_g	$90^{-6}H$
C	$42^{-6}F$

III.7 Modélisation en représentation d'état du filtre LCL

Le schéma suivant Figure III.8 simplifie le circuit LCL connecté au réseau électrique, le décomposant en deux boucles, m1 et m2 (Vinicius F. Montagner, 2015). Dans ce système, U(t) représente la tension générée par le convertisseur et vg(t) la tension du réseau. L'inductance Lg est considérée comme la somme de l'inductance du réseau et celle du filtre ($L_g = L_{g_grid} + L_{g_filtre}$) .En appliquant la loi des mailles à la boucle m1, nous obtenons :

$$U = U_{rc} + U_{LC} + v_c + U_{rz} \quad \text{(III.3)}$$

Avec :

$U_{rc} = i_c r_c \quad ; \quad U_{Lc} = L_C \frac{d_{ic}}{dt} \quad ; \quad U_{rz} = (i_c - i_g) r_z$

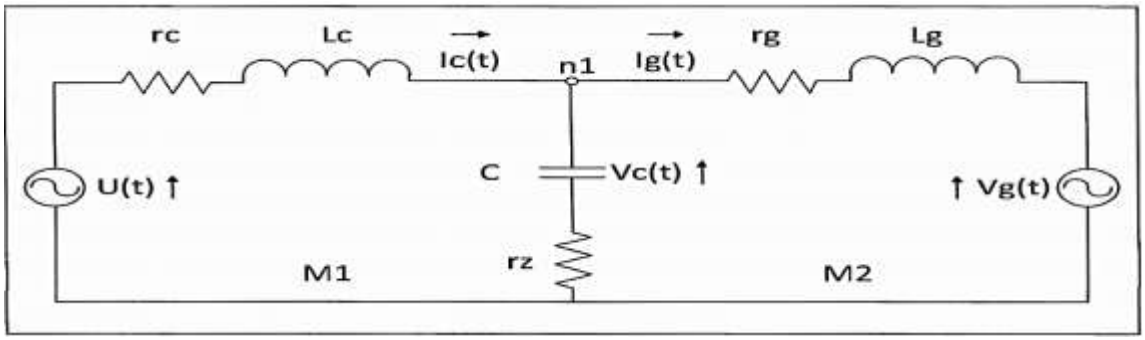


Figure III.8 : Filtre LCL connecté au réseau.

Nous avons alors:

$$\frac{d_{ic}}{dt} = -\frac{(r_c + r_z)}{L_c} i_c - \frac{1}{L_c} v_c + \frac{r_z}{L_c} i_g + \frac{1}{L_c} u \quad \text{(III.4)}$$

De même pour la maille m_2 :

$$V_c + U_{rz} = U_{rg} + U_{Lg} + v_g \quad \text{(III.5)}$$

Avec:

$$U_{rg} = i_g r_g \quad ; \; U_{Lg} = L_g \frac{d_{ig}}{dt} \quad ; \quad U_{rz} = (i_c - i_g) r_z$$

De même:

$$\frac{d_{ig}}{dt} = \frac{r_z}{L_g} i_c + \frac{1}{L_g} v_c - \frac{(r_g + r_z)}{L_g} i_g + \frac{1}{L_g} v_g \tag{III.6}$$

Et, en appliquant la loi des nœuds sur n_1, on obtient:

$$i_c = i_{VC} + i_g \tag{III.7}$$

Avec:

$$i_{VC} = C \frac{dv_c}{dt}$$

Ce qui mène à :

$$\frac{d_{vc}}{dt} = \frac{i_c}{C} + \frac{i_g}{C} \tag{III.8}$$

D'après les formules (2.3), (2.6) et (2.10), nous pouvons construire le modèle en représentation d'état comme suit (Friedland, 2005):

- On pose la variable d'état X comme étant :

$$X = \begin{bmatrix} i_c \\ v_c \\ i_g \end{bmatrix} \tag{III.9}$$

- Le modèle en représentation d'état est de la forme :

$$\dot{X}(t) = A_c X(t) + B_c U(t) + B_\alpha v_g \tag{III.10}$$

$$Y(t) = C_C X(t) \tag{III.11}$$

III.8 Fonctions de transfert d'un filtre LCL

Dans cette partie, nous allons définir et tracer les fonctions de transfert ($\frac{i_g(s)}{U(s)}$ et $\frac{i_g(s)}{v_g(s)}$) du système filtre LCL à l'aide du théorème de superposition appliqué au circuit schématisé à la Figure III.8. Et ensuite, nous effectuons l' extraction de ces mêmes fonctions de transfert à partir du modèle en représentation d'état. Le but étant de pouvoir comparer les méthodes et ainsi, de valider le modèle en représentation d' état développé précédemment [14] .

III.8.1 Fonction de transfert $\frac{i_g(s)}{U(s)}$ avec la méthode de superposition

Comme relevé dans (X. Ruan, 2018) et également dans (Zong, 2011), les résistances r_c et r_g, en série avec les inductances, peuvent être considérées comme négligeables et omises lors de la détermination des fonctions de transfert. Cela simplifie grandement les calculs. La Figure III.9 illustre le schéma équivalent à celui de la Figure III.8. Ce schéma, exprimé sous forme d'impédance, nous permet d'appliquer le théorème de superposition, où [14] :

$$Z_C = \mathrm{j}\omega L_c \;\; ; \;\; Z_z = \frac{1}{\mathrm{j}\omega C} + r_z \quad ; \quad Z_g = \mathrm{j}\omega L_g \qquad \text{(III.12)}$$

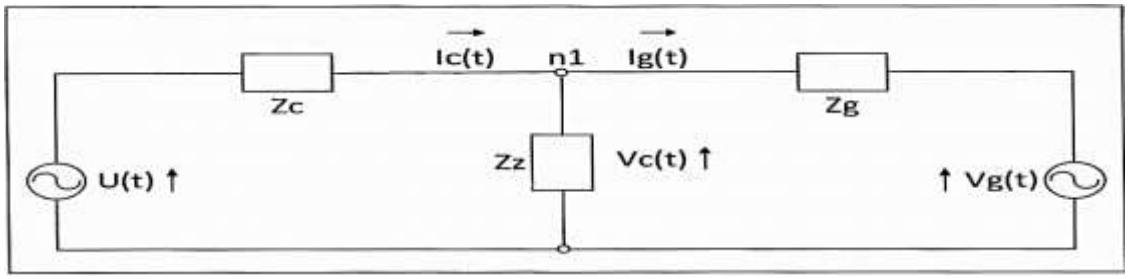


Figure III.9 : Circuit impédance du filtre LCL.

Dans un premier cas, lorsque nous posons $v_g = 0$, nous avons d'après le théorème de superposition :

$$v_c = \frac{\frac{Z_z Z_g}{Z_z + Z_g} U}{Z_C + \frac{Z_z Z_g}{Z_Z + Z_g}} \qquad \text{(III.13)}$$

On pose aussi :

$$v_c = (\frac{U}{Z_z} - i_g) Z_z \qquad \text{(III.14)}$$

Au passage dans le domaine de Laplace et après quelques développements mathématiques, nous obtenons la fonction de transfert suivante:

$$\frac{i_g}{U} = \frac{sCr_z+1}{S^3L_cL_gC+S^2(L_c+L_g)Cr_z+s(L_c+L_g)} \quad \text{(III.15)}$$

III.8.2 Fonction de transfert $\frac{i_g(s)}{V_g(s)}$ avec la méthode de superposition

Nous suivons la même démarche que précédemment, mais cette fois avec $U = 0$. Après l'application du théorème de superposition et la transformation dans le domaine de Laplace, nous obtenons [14] :

$$\frac{i_g}{v_g} = -\frac{S^2L_cC+sCr_z+1}{S^3L_cL_gC+S^2(L_c+L_g)Cr_z+S(L_c+L_g)} \quad \text{(III.16)}$$

Conclusion

Les condensats et les filtres LCL sont des composants essentiels des systèmes électroniques, remarquables pour la consommation d'énergie et la réduction des interactions. Les condensateurs, grâce à la plus faible capacité du stockeur et de l'éditeur d'énergie, servent à stabiliser les tensions et à filtrer les signaux. Les filtres LCL, qui combinent inductances (L) et condensats (C) dans une configuration spécifique, ont des effets significatifs pour relier les harmonies et électromagnétiques dans les systèmes de conversion d'énergie. Leur conception et leur utilisation optimisées ont optimisé les performances et la fiabilité des systèmes électroniques modernes.

Chapitre VI : Résultats de simulation

IV.1 Introduction :

Le système solaire photovoltaïque est reconnu comme l'une des sources d'énergie renouvelable les plus écologiques, offrant des avantages à long terme pour les générations futures. Malgré ses avantages, son efficacité actuelle reste limitée en raison du rapport coût-production. Néanmoins, les progrès de la recherche laissent entrevoir une amélioration imminente de cette efficacité. L'optimisation des panneaux solaires repose principalement sur la recherche du point de puissance maximale, où le générateur photovoltaïque fournit son rendement optimal. Pour faciliter le transfert de puissance, un convertisseur boost CC/CC est utilisé en tant qu'interface entre le générateur et la charge. Cependant, l'utilisation d'un onduleur pour la conversion de l'énergie continue en énergie alternative entraîne des perturbations sous forme d'harmoniques de second ordre, affectant le point de puissance maximale. Pour résoudre ce problème, des condensateurs de grande capacité ou des circuits additionnels sont souvent employés pour compenser les fluctuations (Krein et Balog, 2009). Dans ce contexte, le chapitre présent propose une solution combinant un circuit additionnel pour corriger les harmoniques. La commande associée à ce circuit permet de réduire la taille des condensateurs requis, rendant possible l'utilisation de condensateurs de plus petite taille mais de longue durée de vie.

IV.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 [13].

IV.2.1 Schéma complet du circuit proposé :

L'arrangement de ce circuit additionnel ainsi que son contrôle autorisent l'emploi de condensateurs de dimensions réduites capables de tolérer une tension fluctuante importante ainsi que d'autres contraintes. La représentation schématique de la configuration générale du circuit proposé en mode connecté au réseau est présentée dans la figure IV.1, tandis que la figure IV.2 illustre le mode autonome.

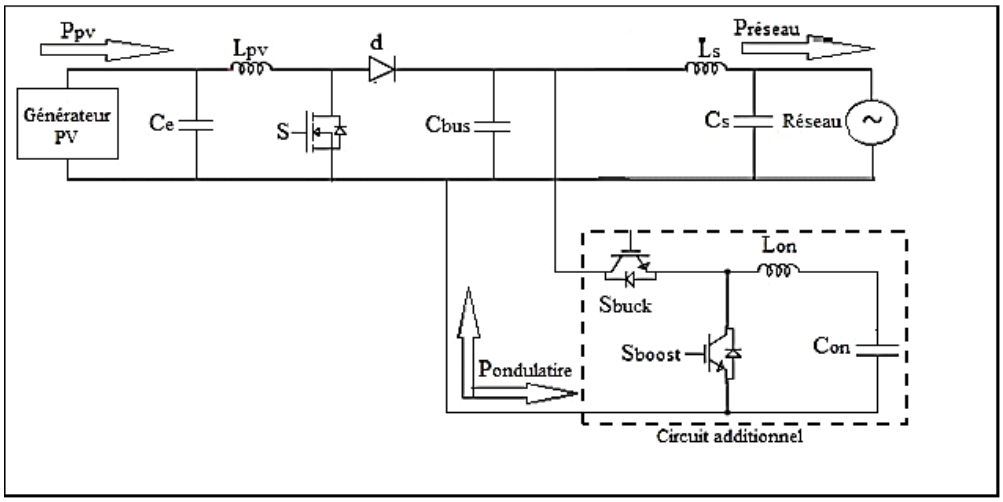


Figure IV.1 : Configuration générale du circuit proposé connecté au réseau.

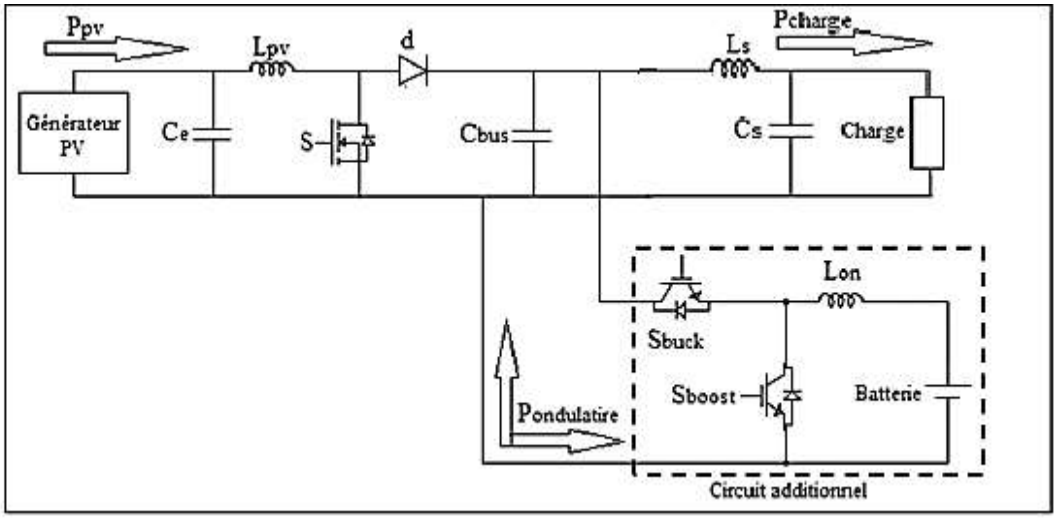


Figure IV.2 : Configuration générale du circuit proposé en mode autonome.

Le fonctionnement de ce circuit présenté ci-dessus est assez simple. Il est associé à la fois à une source continue et à une source alternative.

Le rôle du condensateur du bus CC et du circuit supplémentaire est d'assurer simultanément le découplage de puissance.

IV.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.

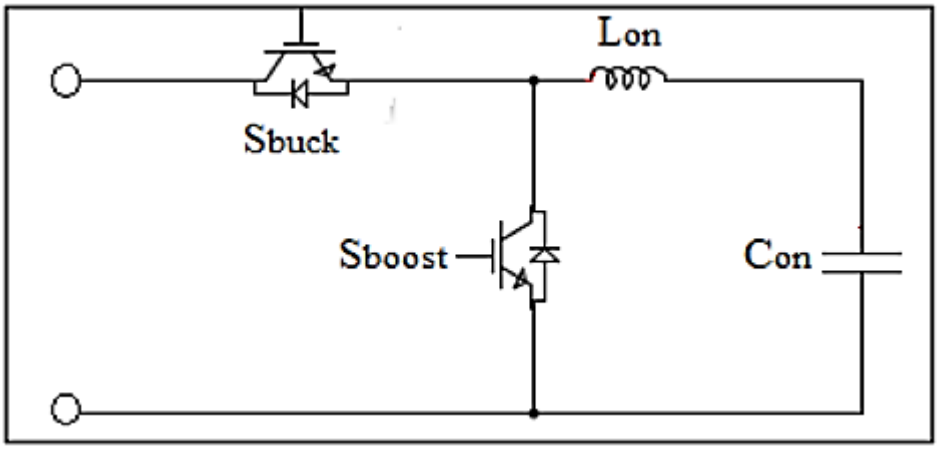


Figure IV.3 : Circuit additionnel de découplage.

Comme l'indique la figure IV.3, le circuit additionnel de découplage comprend deux éléments de gestion d'énergie : une bobine Lon et un condensateur Con. 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})¨[13].

IV.3 Principe de fonctionnement du circuit additionnel de découplage :

La disposition générale du schéma proposé est illustrée dans les figures 4.1 et 4.2 ci-dessus. Ce schéma de découplage, fonctionnant comme un convertisseur buck-boost auxiliaire, est un élément clé. Dans cette configuration, la tension du bus CC est régulée par le contrôle de l'onduleur tandis que la puissance ondulatoire produite par celui-ci est gérée par le circuit de découplage supplémentaire (Wang et al., 2011).

Ce circuit de découplage auxiliaire est constitué de manière simple, comprenant deux commutateurs, une bobine et un condensateur. Notamment, le condensateur joue un rôle crucial en stockant de l'énergie destinée à équilibrer ultérieurement les différences de puissance entre les diverses sources. Quant à la bobine, elle assure le transfert d'énergie entre le condensateur du circuit de découplage et le bus CC de l'onduleur.

Le circuit supplémentaire, agissant tel un buck-boost, peut être décrit selon deux phases distinctes : une phase de charge, correspondant au mode buck, et une phase de décharge, correspondant au mode boost, du condensateur auxiliaire.

IV.3.1 Mode Buck :

Le mode Buck ou phase de charge du condensateur du circuit auxiliaire est schématisé par la figure IV.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 phénomènepermet au bus CC de charger la bobine et le condensateur du circuit auxiliaire de découplage de puissance. [13]

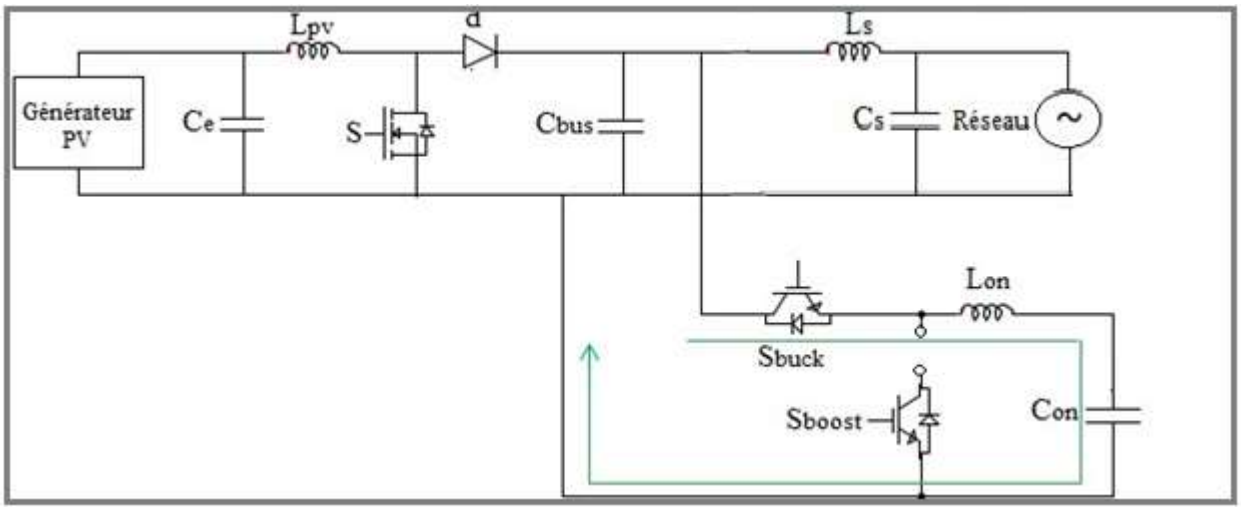


Figure IV.4 : Configuration du circuit en mode buck

IV.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 IV.5.

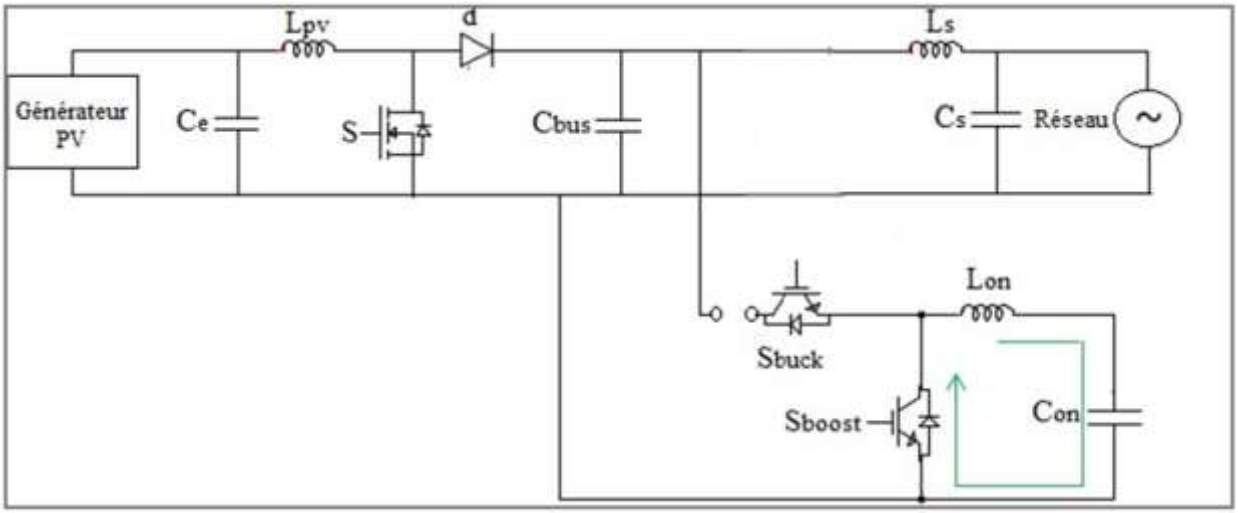


Figure IV.5 : Configuration du circuit en mode boost

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 CCde l'onduleur et durant cette période, la bobine L_{on}transfère son énergie au condensateur Con. Au même moment, dès que le

commutateur S_{bosst}est activé, le condensateur C_{on} recharge la bobineL_{on}. A la fin de cette période un cycle reprend et ainsi de suite [13].

IV.4 Modèle du circuit proposé :

La proposition développée dans cette étude constitue une solution complète pour aborder efficacement les défis posés par les fluctuations de tension et les harmoniques de courant. En intégrant des sources d'énergie et des unités de conversion de puissance, ce circuit offre une approche globale pour résoudre ces problématiques. Ainsi, sa modélisation sera effectuée en détaillant chaque composante qui le constitue.

IV.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 IV.6 où S est un commutateur contrôlé par une commande [13] .

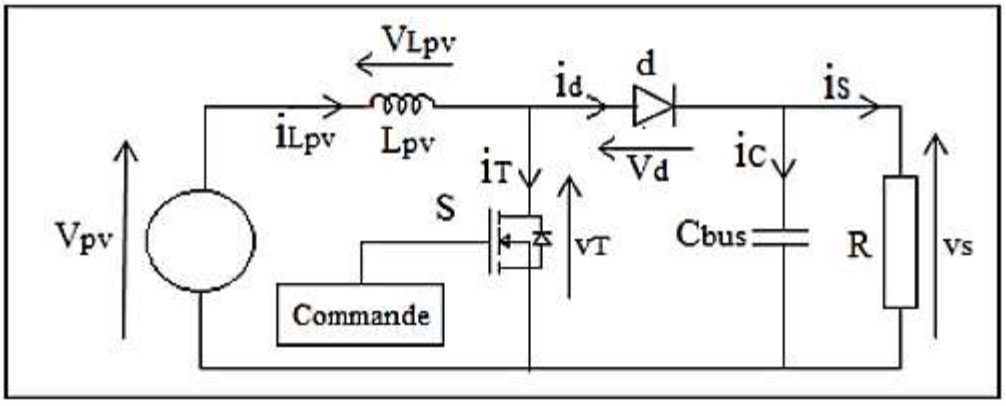


Figure IV.6 : Schéma classique du convertisseur boost (Ferrieux et Forest, 1987)

IV.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}estΘ. En supposant

aussi que les convertisseurs sont sans pertes, alors la tension, le courant et la puissance sont obtenus par les expressions suivantes :

$$v_s(t) = v_s \sin(\omega) \qquad (IV.1)$$
$$i_s(t) = I_s \sin(\omega - \Theta)$$

La puissance instantanée est alors :

$$p_{rés}(t) = \frac{V_s I_s}{2} cos\Theta - \frac{V_S I_S}{2} \cos(2\omega t - \Theta) \qquad (IV.2)$$

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

$$E_L = \frac{1}{2} L i_{s^2} = \frac{1}{2} L I_{S^2} sin^2(\omega t - \Theta)$$
$$P_L = \frac{dE_L}{dt} = \frac{1}{2} \omega L I s^2 \sin(2\omega t - 2\Theta) \qquad (IV.3)$$

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

$$p_s(t) = \frac{V_s I_s}{2} \cos(\Theta) - (\frac{V_s I_S}{2} \cos(2\omega t - \Theta) + \frac{\omega L I_{S^2}}{2} \sin(2\omega - 2\Theta) \qquad (IV.4)$$

Selon l'équation (IV.4), la puissance de sortie instantanée est constituée d'une partie constante et d'une partie ondulatoire notée s

$$P = \frac{V_S I_S}{2} \cos(\Theta)$$
$$p_{on(t)} = -\left(\frac{V_S I_s}{2} \cos(2\omega t - \Theta) + \frac{\omega L I s^2}{2} \sin(2\omega t - 2\Theta)\right) \qquad (IV.5)$$

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

$$P_{on}(t) = \sqrt{\frac{V_s {I_s}^2}{2} + (\frac{\omega L I s^2}{2} - \frac{V_s I_s}{2} \sin(2\omega t - 2\Theta)^2 \sin(2\omega t - 2\Theta + \alpha)} \qquad (IV.6)$$

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 [13] .

IV.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 connaitre 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 :

$$C_{bus} = \frac{\sqrt{P^2 + [\frac{2\omega L P^2}{Vs^2 cos^2\theta} - P\frac{\sin(2\omega - 2\theta)}{\cos(\theta)}]^2}}{2\pi f V_{bus}\Delta V_{bus}} \qquad \text{(IV.7)}$$

Le rôle du circuit additionnel de découplage de puissance étant d'annuler les ondulations, D'où la capacité du condensateur C_{on}est :

$$C_{on} = \frac{\sqrt[2]{P^2 + \left[\frac{2\omega LP^2}{{V_s}^2 cos^2\theta} - P\frac{\sin(2\omega - 2\theta)^2}{\cos(\theta)}\right]}}{{V_{con}}^2 C_{on}\omega(1 - \omega^2 L_{on}C_{on})} \frac{\sin(2\omega t - 2\theta + \alpha)}{\sin(2\omega t + 2\varphi)} \quad \text{(IV.8)}$$

Cette expression de la capacité du condensateur est indépendante de la tension ondulatoire et permet d'avoir une capacité faible pour le condensateur [13].

IV.5 Schéma global de system:

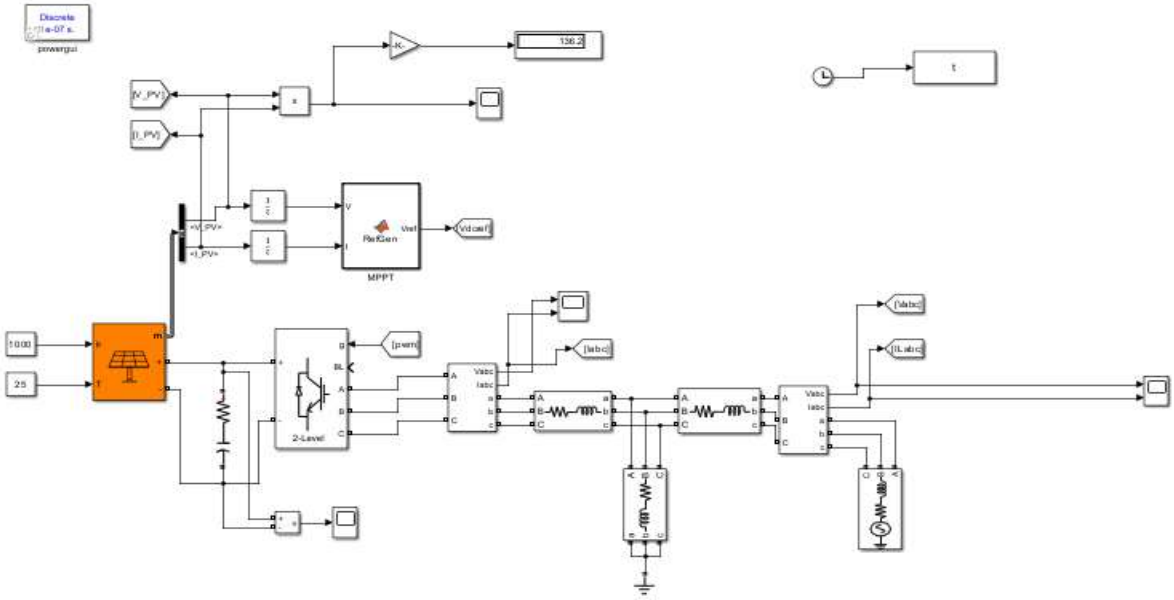


Figure IV.7: Le schéma global de system.

Le schéma est un modèle Simulink d'un système de génération d'énergie solaire photovoltaïque (PV) avec suivi du point de puissance maximale (MPPT). Voici une explication des composants et de leurs fonctions :

- **Panneau Photovoltaïque (bloc orange) :** Ce bloc représente l'ensemble des panneaux photovoltaïques qui convertissent la lumière solaire en énergie électrique.
- **Contrôleur MPPT :** L'algorithme MPPT (Maximum Power Point Tracking) optimise la production d'énergie des panneaux PV en ajustant le point de fonctionnement. Ce contrôleur ajuste le cycle de travail du convertisseur pour assurer l'extraction maximale de puissance des panneaux PV.

- **Convertisseur DC-DC :** La sortie du panneau PV est envoyée à un convertisseur DC-DC (souvent un convertisseur boost) pour augmenter ou diminuer la tension au niveau souhaité.
- **Contrôleur PI :** Un contrôleur Proportionnel-Intégral (PI) régule la tension de sortie du convertisseur DC-DC en contrôlant le cycle de travail.
- **Onduleur :** L'énergie DC du convertisseur DC-DC est envoyée à un onduleur, qui convertit l'énergie DC en énergie AC.
- **Filtre (Branche RLC Série) :** Le filtre lisse la sortie AC de l'onduleur pour s'assurer qu'elle a une faible distorsion harmonique.
- **Charge et Réseau :**a sortie AC finale peut être utilisée par une charge ou connectée au réseau électrique.
- **Blocs de Mesure :** Divers blocs de mesure sont inclus pour surveiller le courant, la tension et la puissance à différents points du système.
- **Commutateurs et Logique de Contrôle :** Divers commutateurs et composants de logique de contrôle gèrent le flux d'électricité et le fonctionnement des systèmes MPPT et de l'onduleur.
- **Blocs de Visualisation (Scopes) :** Ces blocs sont utilisés pour visualiser les signaux dans le système, tels que les formes d'onde de courant, de tension et de puissance.

Le système global vise à convertir efficacement l'énergie solaire en énergie électrique, à optimiser la production d'énergie à l'aide du MPPT et à garantir la qualité de la sortie d'énergie pour l'utilisation par les charges ou l'injection dans le réseau.

IV.5.1 Panneau Photovoltaïque (bloc orange) avec Contrôleur MPPT :

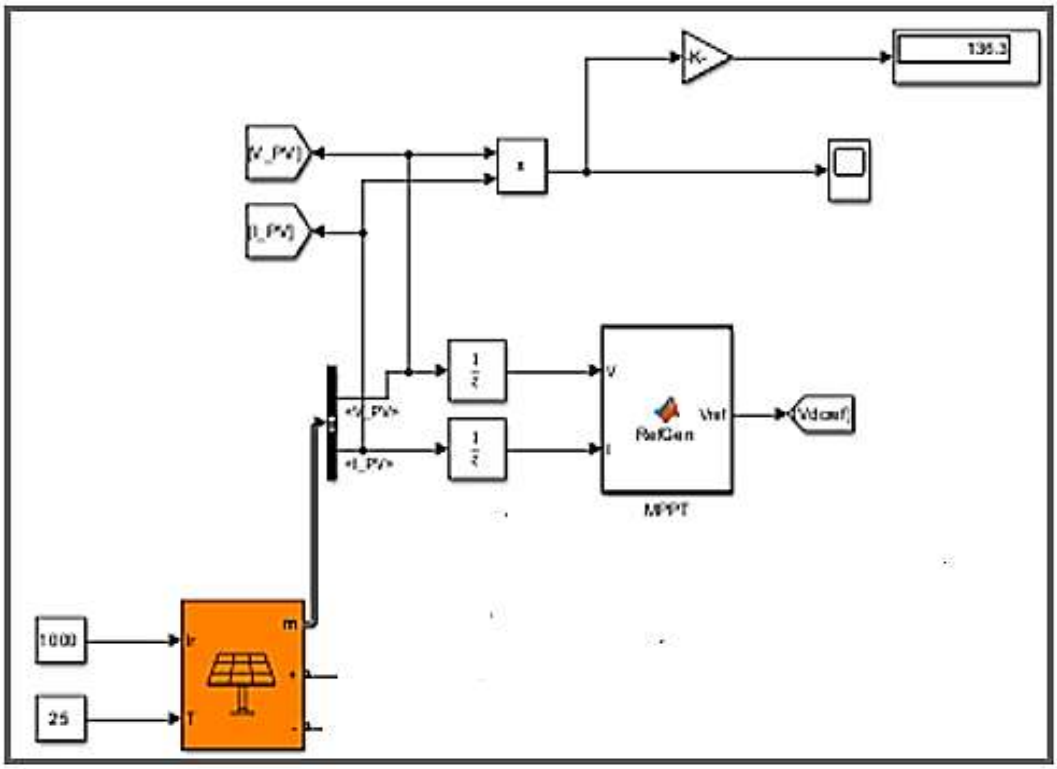


Figure IV.8 : Panneau Photovoltaïque (bloc orange)avec Contrôleur MPPT.

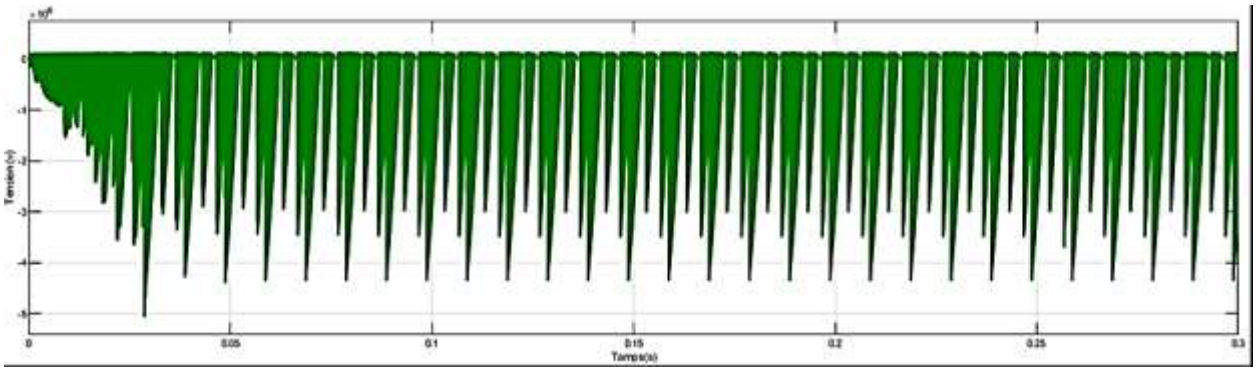


Figure IV.9 : la réponse transitoire d'un signal dans un système de conversion d'énergie photovoltaïque.

La figure IV.9 montre la réponse transitoire d'un signal dans un système de conversion d'énergie photovoltaïque. L'axe des x représente le temps en secondes, et l'axe des y l'amplitude du signal. Le signal oscille avec des pics réguliers, diminuant en amplitude initialement avant de se

stabiliser. Cette atténuation initiale indique une stabilisation après une perturbation. Le comportement observé est typique des systèmes de conversion d'énergie, où le contrôle et la stabilisation sont essentiels pour une performance optimale.

IV.5.2 Filtre de bus continu (Branche RC Série) :

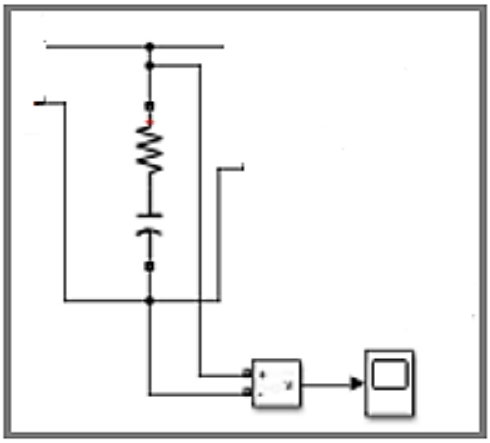


Figure IV.10 : Filtre de bus continu (Branche RC Série).

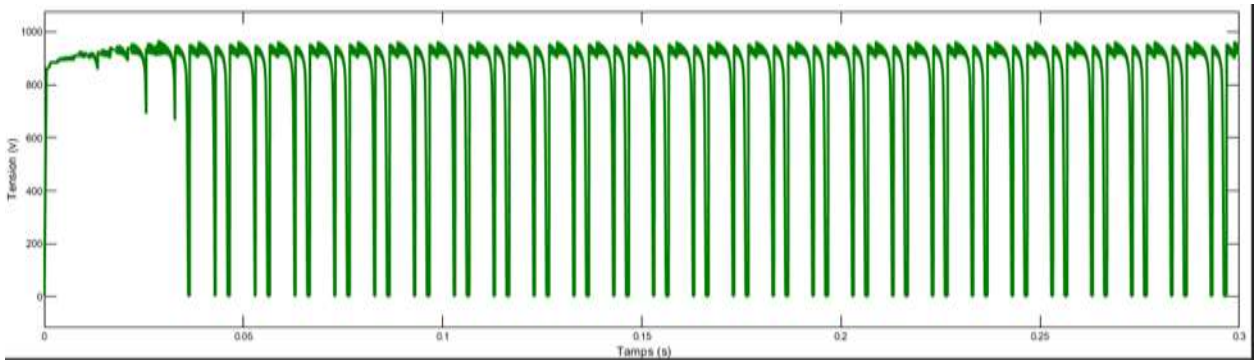


Figure IV.11 : la réponse transitoire de la tension de sortie de filtre dans un système de conversion d'énergie photovoltaïque.

La figure IV.11 montre la réponse transitoire de la tension de sortie de filtre dans un système de conversion d'énergie photovoltaïque. L'axe des x représente le temps en secondes, et l'axe des y la tension en volts, atteignant environ 800 V. Le signal de tension oscille périodiquement avec des pics réguliers, diminuant en amplitude initialement avant de se stabiliser. Les oscillations initiales, dues à la commutation ou à l'activation de l'onduleur, s'atténuent progressivement.

La stabilisation montre l'efficacité du système de contrôle pour atteindre un état stable, crucial pour une alimentation électrique fiable et de qualité.

IV.5.3 Filtre LCL avant:

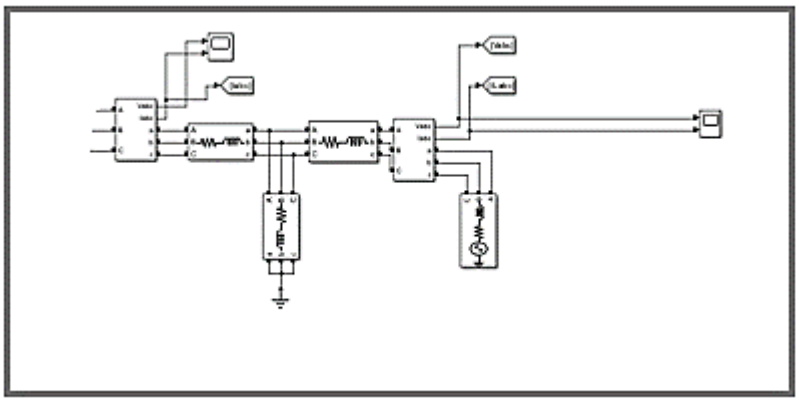


Figure IV.12 : Filtre LCL avant.

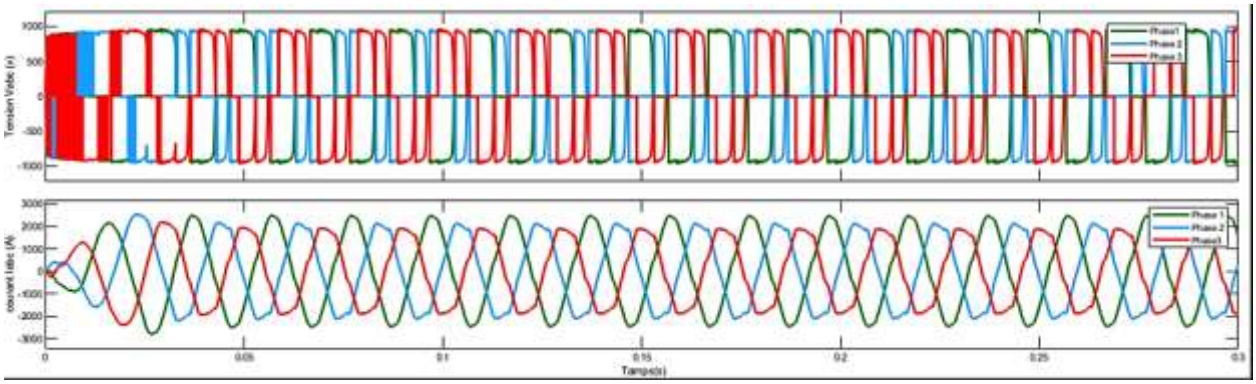


Figure IV.13 : les caractéristiques électriques avant l'application des filtres LCL. La première figure illustre les tensions et les courants pour trois phases.

La figure IV.13 montre les caractéristiques électriques avant l'application des filtres LCL. La première figure illustre les tensions et les courants pour trois phases. Les tensions présentent une commutation haute fréquence typique des signaux MLI avec une amplitude d'environ ±1000 V et une forme en escalier, tandis que les courants sont plus sinusoïdaux et lisses, indiquant un certain filtrage inductif avec une amplitude d'environ ±3000 A. La deuxième figure présente un schéma Simulink du circuit, montrant les composants utilisés pour le conditionnement des signaux avant le filtrage. Un bloc surligné affiche des), suggérant des déséquilibres ou des états transitoires dans le circuit. Ces observations mettent en évidence l'importance du filtre LCL pour lisser les

tensions et conditionner les courants, afin d'atteindre les performances électriques souhaitées dans un système triphasé.

IV.5.4 Filtre LCL après :

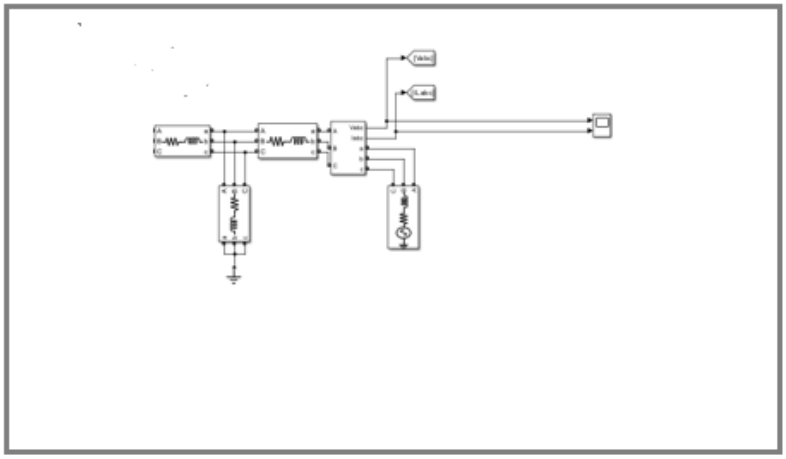


Figure IV.14 : Filtre LCL après.

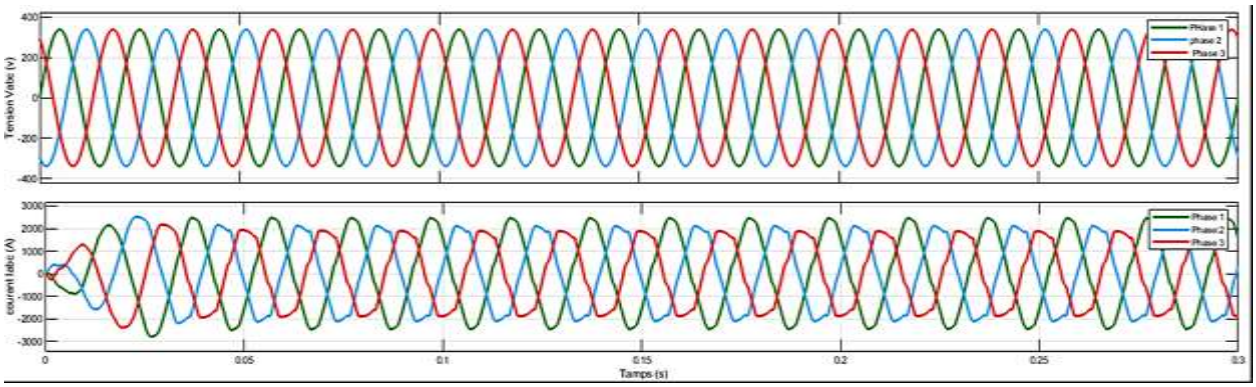


Figure IV.15 : les caractéristiques électriques après l'application des filtres LCL.

Après application des filtres LCL, les formes d'onde de tension et de courant pour les trois phases montrent une amélioration significative. Les tensions, initialement marquées par une commutation haute fréquence et des variations en escalier, deviennent sinusoïdales et lisses avec une amplitude d'environ ±400 V. Les courants, déjà relativement sinusoïdaux avant le filtrage, sont encore plus lisses après filtrage, avec une nette réduction des bruits et des oscillations indésirables, et maintiennent une amplitude d'environ ±3000 A. Les formes d'onde de tension et de courant sont bien équilibrées entre les phases, avec une séparation de 120 degrés typique des systèmes triphasés.

Les filtres LCL jouent un rôle crucial dans l'amélioration de la qualité des signaux, assurant un fonctionnement optimal des systèmes triphasés.

Conclusion :

Dans cette recherche, le circuit proposé et tous ses composants ont été présentés. Ce circuit est similaire au circuit classique utilisant un condensateur chimique de grande capacité sur le bus CC, mais il est équipé d'un circuit additionnel de découplage de puissance monté en parallèle avec le condensateur du bus CC. Ce circuit additionnel fonctionne comme un buck-boost, chargeant son condensateur en mode buck et le déchargeant en mode boost.

La modélisation du circuit proposé a été effectuée de manière détaillée, chaque composant et son contrôle étant modélisés. Pour le convertisseur boost, une commande MPPT par perturbation a été utilisée, connue pour sa simplicité et son efficacité selon la littérature. Pour l'onduleur, sa commande régule la tension du condensateur du bus CC et assure la synchronisation au réseau grâce à une boucle à verrouillage de phase (PLL) en mode connecté au réseau. En mode autonome, la commande régule la tension et le courant de la charge, tandis que la commande du circuit additionnel de découplage de puissance régule la tension et le courant du condensateur du bus CC. Dans le mode connecté au réseau, la commande du circuit additionnel continue également à réguler la tension et le courant de son condensateur.

La réduction de la taille des banques de condensateurs dans les systèmes photovoltaïques (PV) par l'optimisation du contrôle des onduleurs représente une avancée significative pour améliorer l'efficacité, la compacité et la rentabilité des installations solaires. Mes études se concentrent sur le développement de stratégies de commande avancées qui permettent de minimiser la capacité de stockage nécessaire tout en maintenant, voire en améliorant, la performance globale du système.

En explorant des techniques telles que la commande prédictive, la commande adaptative et les méthodes de modulation avancées, on a pu démontrer que ces approches peuvent réduire efficacement les fluctuations de tension et de courant, stabilisant ainsi le système sans nécessiter de grandes banques de condensateurs. La modélisation mathématique et les simulations informatiques ont été des outils clés pour tester et valider ces stratégies avant leur mise en œuvre pratique.

Les résultats obtenus montrent une réduction substantielle de la taille des condensateurs, une amélioration de la qualité de l'alimentation électrique et une meilleure intégration des systèmes PV dans les réseaux électriques existants. Ces améliorations permettent non seulement de réduire les coûts et l'encombrement des systèmes solaires, mais aussi de contribuer à une plus grande adoption de l'énergie photovoltaïque, soutenant ainsi la transition vers des sources d'énergie renouvelables et durables.

En conclusion, l'optimisation de la commande des onduleurs pour réduire la taille des banques de condensateurs est une approche prometteuse pour améliorer les systèmes photovoltaïques. Ces recherches apportent des solutions innovantes et méthodologiques qui peuvent transformer la manière dont nous concevons et intégrons les installations solaires, ouvrant la voie à des systèmes plus performants et économiquement viables. Ce projet souligne l'importance de l'ingénierie et de l'innovation dans le développement des technologies renouvelables, contribuant ainsi à un avenir énergétique plus propre et plus durable.

[1] Chikh, Abdelkader. (2023). COMMANDE MPPT-SSO D'UN SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE ALIMENTANT UNE MAS. Mémoire de maîtrise, Université Dr. Yahia Farès de Médéa, Faculté de Technologie, Département du Génie Électrique, Spécialité : Commande électrique

[2] Guettari, Anissa Hafsia. (2018). Étude et dimensionnement d'un système d'énergie électrique mixte : photovoltaïque et éolien. Projet de fin d'études, Master Instrumentations, Faculté de Technologie, Département de Génie Électrique et Électronique, Université Aboubakr Belkaïd-Tlemcen, Année universitaire 2017-2018

[3] Zairi, Soufiane et Boubiada, Slimane. (2020). *Étude et dimensionnement d'une centrale photovoltaïque*. Projet de fin d'études, Sciences et Technologies, Electrotechnique, Energies Renouvelables, Université [Nom de l'Université], Année universitaire 2019-2020.

[4] A. BORNI, « Etude et régulation d'un circuit d'extraction de la puissance maximale d'une panneau solaire «Mémoire Ingénieur d'Etat en Electrotechnique université MENTOURI de Constantine. 05/052009

[5] S. ABOUDA, « Contribution à la commande des systèmes photovoltaïques: application aux systèmes de pompage » Thèse de doctorat, co-tutelle de l'Université de Reims Champagne-Ardenne et de l'Université de Sfax, Avril 2015.

[6] H. KAMELIA ," Modélisation d'une cellule photovoltaïque", Mémoire de Magistère, Université Tizi-Ouzou, 2012.

[7] I.BELHADJER, "Amélioration des performances d'un système de pompage photovoltaïque par la logique floue Médéa ,2019.

[8]M.HANOU "Systéme de pompage photovoltaïque basé sur MPPT-P&O et MPPT-PSO ", Mémoire de master, Université Dr Yahia Farès, Médéa, 2021.

[9] H. BERREZZOUG," Principe de fonctionnement et mesure des caractéristiques d'une cellule photovoltaïque», Mémoire de master, Université Dr Moulay Tahar, Saida, 2016.

[10] N. OLEKSIY, "Simulation, fabrication et analyse de cellule a contacté arrière inter digités ", Thèse de Doctorat, L'institut nationale des sciences appliquéesde Lyon, 2005.

[11] HARRAG, "Etude et simulation d'une commande MPPT pour système PV",Mémoire de master, Université Mohamed Boudiaf, Msila, 2016

[12] L.GHERDAOUI, "Etude et simulation de la poursuite du point de puissance maximale d'un générateur photovoltaïque base sur l'intelligence artificielle".

[13] Zemane, W.-A. A. (Année de soutenance). Titre du mémoire. Mémoire de maîtrise, École de technologie supérieure, Université du Québec.

[14] El Ajjouri, T. (2018). Méthode avancée de contrôle commande d'un onduleur monophasé pour une réduction de la banque de condensateurs, en vue d'accroître la durée de vie du convertisseur [Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Montréal].