الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
RépubliqueAlgérienneDémocratiqueetPopulaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'EnseignementSupérieuretdelaRecherche Scientifique
جامعة غرداية
Université de Ghardaïa
كلية العلوم والتكنولوجيا
FacultédesSciencesetde la Technologie
قسم الآية والكهروميكانيك
Départementded'automatiqueetd'électromécanique

N° d'enregistrement

…./……./……

Mémoiredefind'étude,envuedel'obtentiondudiplôme

Master

Domaine: Sciences et Technologies
Filière: Electrotechnique
Spécialité: EnergieRenouvelable en Electrotechnique

Thème

Etude et commande d'un convertisseur élévateur a trois niveaux intégrés dans un système PV-Batterie

Présenté par :
RECIOUI NOUR EL HOUDA

Soutenue publiquement le : …./06/2026

Devant le jury composé de:

ZEGOUI Abdallah	**FROFESSEUR**	Univ. Ghardaïa	**Président**
SELLAH Mourad	**MCB**	Univ. Ghardaïa	**Examinateur**
BOUCHELGHA Fatima	**MCA**	Univ. Ghardaïa	**Examinateur**
BAHRI Ahmed	**MCA**	Univ. Ghardaïa	**Encadreur**

Année universitaire 2025/2026

Dédicace

JE DÉDIE CE MÉMOIRE À:

- MES TRÈS CHERS PARENTS QUI ME SOUTIENNENT DANS TOUS LES MOMENTS DE LA VIE, ET SURTOUT ILS CROIENT À MES CAPACITÉS, JE LEUR E/PRIME MA PROFONDE RECONNAISSANCE.

- MON ENCADREUR DONT LES CONSEILS PERTINENTS ONT ÉTÉ D'UNE VALEUR INESTIMABLE, JE LUI E/PRIME MON PROFOND RESPECT.

- MA GRANDE FAMILLE, TANTES, ONCLES, COUSINES, COUSINS, MERCI POUR LEURS PRIÈRES QUI M'ACCOMPAGNENT TOUJOURS.

- MES DEU/ CHERS FRÈRES YASSINE ET SOUFIANE.

- MES COLLÈGUES DURANT MON CURSUS.

- TOUS CEU/ QUI ŒUVRENT POUR LE PROGRÈS DE NOTRE CHER PAYS L'ALGÉRIE.

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire de fin d'études.

Mes premiers remerciements s'adressent à mes chers parents, ma mère et mon père, pour leur soutien indéfectible, leurs encouragements constants et les sacrifices consentis tout au long de mon parcours universitaire. J'adresse également mes sincères remerciements à mes frères et sœurs pour leur présence et leur appui moral.

Je tiens aussi à remercier chaleureusement Monsieur ***BAHRI Ahmed****, mon encadreur, pour ses précieux conseils, sa disponibilité, son accompagnement et ses orientations pertinentes qui ont grandement contribué à l'aboutissement de ce travail.*

Enfin, je remercie toutes les personnes qui m'ont apporté leur aide et leur soutien durant l'élaboration de ce mémoire.

Abstract

This work focuses on the study, modeling, and control of a PV–Battery hybrid system based on a three-level boost converter. The main objective is to ensure efficient management of the energy generated by photovoltaic panels and stored in the battery while maintaining a stable DC-link voltage and providing reliable power supply to the load.

The three-level boost converter represents an advanced alternative to the conventional two-level boost converter due to its reduced switching losses, improved efficiency, and lower voltage and current ripples. A control strategy based on a PI controller combined with a Maximum Power Point Tracking (MPPT) algorithm was developed to maximize the extracted photovoltaic power and ensure DC-link voltage regulation.

Simulation results obtained using MATLAB/Simulink demonstrate the effectiveness of the proposed system under varying irradiance and load conditions. The results also confirm that the three-level boost converter provides superior performance compared with the conventional two-level converter in terms of voltage stability, power quality, and overall system efficiency.

Keywords: PV/Battery system, three-level boost converter, MPPT, PI controller, DC-link voltage, photovoltaic energy, MATLAB/Simulink.

Résumés

Ce travail porte sur l'étude, la modélisation et la commande d'un système multi-sources PV/Batterie intégrant un convertisseur élévateur à trois niveaux. L'objectif principal est d'assurer une gestion optimale de l'énergie produite par les panneaux photovoltaïques et stockée dans la batterie tout en garantissant une tension stable au niveau du bus continu (DC-Link) et une alimentation fiable de la charge.

Le convertisseur hacheur élévateur à trois niveaux constitue une amélioration du convertisseur conventionnel à deux niveaux grâce à la réduction des pertes de commutation, à l'amélioration du rendement énergétique et à la diminution des ondulations de tension et de courant. Une stratégie de commande basée sur un régulateur PI associée à un algorithme MPPT a été développée afin d'extraire la puissance maximale disponible du générateur photovoltaïque et de maintenir la stabilité du bus continu.

Les simulations réalisées sous MATLAB/Simulink ont permis d'évaluer le comportement dynamique du système dans différentes conditions d'irradiance et de charge. Les résultats obtenus démontrent l'efficacité de la structure proposée et mettent en évidence la supériorité du convertisseur élévateur à trois niveaux par rapport au convertisseur classique à deux niveaux en termes de stabilité de tension, de qualité de l'énergie et de performances globales.

Mots-clés : Système multi-sources PV/Batterie, convertisseur Boost à trois niveaux, MPPT, régulateur PI, bus DC-Link, énergie photovoltaïque, MATLAB/Simulink.

ملخ ص

تهدف هذه الدراسة إلى نمذجة والتحكم في نظام متعدد المنابع يتكون من مولد كهروضوئي (PV) وبطارية تخزين طاقة مرتبطين بمحول رافع للجهد ثلاثي المستويات. يهدف هذا النظام إلى إدارة الطاقة المنتجة من الألألواح الشمسية والمخزنة في البطارية بكفاءة عالية، مع ضمان استقرار جهد الناقل المستمر (DC-Link)وتوفير تغذية موثوقة للحمل.

يعتمد العمل على استخدام محول رافع للجهد ثلاثي المستويات، والذي يمثل تطويرًرًا للمحول التقليدي ثنائي المستويات، حيث يساهم في تقليل خسائر التبديل، وتحسين المردود الطاقوي، والحد من تموجات الجهد والتيار، مما يؤدي إلى تحسين جودة الطاقة الكهربائية. كما تم تطوير استراتيجية تحكم تعتمد على منظم PI وخوارزمية تتبع نقطة الالاستطاعة العظمى (MPPT) لضمان استخراج أكبر استطاعة ممكنة من المولد الكهروضوئي والحفاظ على استقرار جهد الناقل المستمر .

أظهرت نتائج المحاك اة باستخدام برنامج MATLAB/Simulink فعالية النظام المقترح وقدرته على التكيف مع تغيرات الإإشعاع الشمسي والحمل، كما بينت أن المحول ثلاثي المستويات يوفر أداءًءً أفضل مقارنة بالمحول التقليدي ثنائي المستويات من حيث استقرار الجهد والكفاءة الطاقوية.

الكلمات المفتاحية: الطاقة الشمسية الكهروضوئية، البطارية، المحول الرافع للجهد ثلاثي المستويات، MPPT، منظمPI ، الناقل المستمر ، .MATLAB/Simulink

Table du matières

Dédicace .....
Abstract iv
Résumés v
ملخص vi
Table du matières vii
Liste des Figures ix
Liste des abréviations xii
Liste des acronymes xiii
Introduction générale 1
Chaptre 01: Génialité et modélisations des système multi-sources 3
1.1. Introduction 3
1.2. Les systèmes multi-sources 3
1.3. Pourquoi un système multi-sources. 4
1.4. Différentes configurations des systèmes photovoltaïques hybrides 5
1.5. Classification des système multi-sources. 5
1.6. Energie solaire photovoltaïque 7
1.6.3.1. Circuit équivalent et modèles mathématique. 9
1.7. Système de stockage (Banc de batteries) 12
1.8. Conclusion 15
Chapitre 02 : Modélisation et commandes des convertisseurs statiques 16
2.1. Introduction 16
2.2. Convertisseurs statiques 16
. 2.3 Modélisation et commande de la première chaîne de conversion 16
2.3.1. Convertisseur DC-DC hacheur élévateur a trois niveaux. 16

2.3.1.1. Modélisation hacheur élévateur a trois niveaux 17
2.3.1.2. Méthode MPPT proposé. 19
2.3.1.3. Contrôle de l'équilibrage des tensions. 19
. 2.4 Modélisation et Commande de la deuxième chaine conversion. 21
2.4.1. Modélisation du convertisseur DC/DC bidirectionnel. 21
2.4.2. Contrôle de la tension du Bus continu Vdc-link. 21
2.4.3. Régulateur PID–(Proportionnel-Intégral-Derivative) 22
2.4.4. Structure globale de la commande 23
2.5. Modélisation l'onduleur à trois niveaux (NPC) 24
2.5.1. Modélisation du fonctionnement d'un bras d'onduleur à trois niveaux 24
2.5.2. Commande complémentaire 26
2.6. Conclusion 28
Chapitre 03 : Simulation et discussion des résultats 29
3.1 Introduction 29
3.2 Description du système 29
3.3 Paramètres du système multi-sources. 30
3.4 Simulation et discussion des résultats. 31
3.5 Conclusion. 40
Conclusion générale 41
Bibliographie 42
Annexes 46

Liste des Figures

Chapitre 01: Génialité et modélisations des système multi-sources

Figure 1-1:Schéma général du système énergétique hybride multi-sources, charges et stockage..... 3
Figure 1- 2: **S**tructure à bus DC d'un système hybride 6
Figure 1- 3: Structure à bus AC d'un système hybride. 6
Figure 1- 4: Structure à bus mixte (DC&AC) d'un système hybride 7
Figure 1- 5: Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque. 8
Figure 1- 6: Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque. 10
Figure 1- 7: Modèle d'un GPV en présence de deux résistances R_P et R_S 11
Figure 1- 8: Modèle électrique de la batterie Plomb-Acide. 13

Chapitre 02: Modélisation et commandes des convertisseurs statiques

Figure 2- 1:Convertisseur élévateur à trois niveaux 17
Figure 2- 2:Formes d'onde 3LBC, (a) D<0,5, (b) D>0,5 18
Figure 2- 3: Schéma bloc du MPPT avec contrôle de l'équilibre de tension 20
Figure 2- 4: Principe de commande du convertisseur DC/DC bidirectionnel 21
Figure 2- 5: Boucle de régulation de la tension du bus continu Vdc-link. 22
Figure 2- 6: Schéma bloc d'un régulateur PID. 23
Figure 2- 7: Structure globale de la commande de la deuxième chaine 23
Figure 2- 8: Onduleur triphasé à trois niveaux à structure NPC 24
Figure 2- 9: Onduleur triphasé à trois niveaux à structure NPC 25
Figure 2- 10: Commande MLI d'un onduleur à trois niveaux 25

Chapitre 03 : Simulation et discussion des résultats

Figure 3- 1: Le système énergétique multi-sources 29

Figure 3- 2: Variations d'irradiance solaire 32

Figure 3- 3: Profile de charge 33

Figure 3- 4: Signal de commande du hacheur élévateur a trois niveaux 33

Figure 3- 5: Zoom sur signal de commande Sb1 & Sb2 34

Figure 3- 6: Tension du bus continue Vdc1 34

Figure 3- 7: Tension du bus continue Vdc2 35

Figure 3- 8: Tension et courant du PV array 35

Figure 3- 9: Tension Vdc-link avec HE2N & HE3N 36

Figure 3- 10: Puissances du système PV/Banc de batterie/charge 36

Figure 3- 11: Signal de commande du hacheur buck-boost 37

Figure 3- 12: L'état de charge du banc de batterie 37

Figure 3- 13: Tensions de phase de charge V_{abc} 38

Figure 3- 14: Spectre harmonique de la tension de ligne. 38

Figure 3- 15: Courants de phase de charge i_{abc}. 39

Figure 3- 16: Spectre harmonique du courant de ligne 39

Liste des Tableaux

Chapitre 02: Modélisation et commandes des convertisseurs statiques

Tableau 2-1: La table d'excitation associée à la commande complémentaire N°1. 26

Tableau 2-2: La table d'excitation associée à la commande complémentaire N°2 27

Tableau 2-3: La table d'excitation associée à la commande complémentaire proposée..... 27

Chapitre 03: Simulation et discussion des résultats

Tableau 3- 1: Grandeurs électriques du GPV 30

Tableau 3- 2: Paramètres du module HIP-225HDE 31

Tableau 3- 3: Paramètres du tableau PV Array. 31

Tableau 3- 4: Paramètres de la batterie 31

Liste des abréviations

AC : Alternative Current

BB : Banc de batteries.

BBDC : Buck-boost bidirectionnel converter.

DC : Direct Current

DCC : Deuxième chaine de conversion.

ER : Energie renouvelable.

GPV: Générateurs photovoltaïques.

IGBT : Insulated Gate Bipolar Transistor

MLI: Modulation à Largeur d'Impulsion

MOSFET : Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor.

MPPT : Maximum Power Point Tracking

NPC : Neutral Point Clamped.

P&O : Perturbation et observation.

PI: Proportionnelle-Intégrale

PID : Proportionnelle-Intégrale-Dérivée.

PPM : Point de puissance maximale

PV: Photovoltaïques.

SCEM : Système de conversion d'énergie multi sources.

SEH : Système d'énergie hybride.

SOC : State of Charge

SOC_{max} : État de charge maximum

SOC_{min} : État de charge minimum

THD : Total harmonic distortion

Liste des acronymes

A (V) : Tension exponentielle

A : Coefficient d'idéalité de la cellule dépendant du matériau.

ac : Le potentiel thermique.

B (Ah^{-1}) : Capacité exponentielle.

E (V) : Tension non linéaire de la batterie.

E, E_{ref} (W/m^2) : Eclairement réel et éclairement dans les conditions normales

E0 (V) : Tension constante de la batterie.

I1, I_2 ; I_3 (A) : Courants alternatifs de l'onduleur.

IBatt (A) : Courant de batterie.

Icc (A) : Courant de court-circuit.

Id1, I_{d2} ; I_{d0} (A) : Courants s continues d'entrée de l'onduleur.

Imp (A) : Courant au point de puissance maximale.

Isat (A) : Courant de saturation.

Isr (A) : Courant de saturation réversible.

it (Ah): Capacité extraite.

K (J/K.) : Constant de Boltzmann = 1.3806503×10^{-23}

Pmax (W) : Puissance maximale.

Q (Ah): Capacité maximale de la batterie.

q (C): Charge électrique élémentaire 1.607×10^{-19}

Rin (Ω): Résistance série interne de batterie.

RP : (Ω) Résistance parallèle

Rs (Ω): Resistance Série.

T : Temps de charge ou de décharge.

T(K°) : Température de la cellule

T_{ref} : Température dans les conditions normale en kelvin (T_{ref} =298 K)

VABC (V): Tension des nouds de l'onduleur.

VBatt (V): Tension de la batterie.

Vc1 (V): Tension demi bras supérieur.

Vc2 (V): Tension demi bras inférieur.

Vco (V) : tension du circuit ouvert.

Vdc (V) : Tension du bus DC.

*Vdc** (V) : Tension désirée du bus DC.

Vdc-simu (V) :Tension du Bus DC de sortie.

Ve (V): Tension d'entrée du boost.

Vmp (V): Tension au point de puissance maximale.

Vref (V): Tensions de référence.

Vs (V): Tension de sortie du boost.

IPV(A): Courant de la sortie de la cellule ou le GPV.

I_p(A): Courant traversant la résistance parallèle.

Iph(A): Photocourant ou le courant généré par l'éclairement.

Introduction générale

Face à l'augmentation continue de la demande énergétique mondiale et aux préoccupations croissantes liées aux changements climatiques, le recours aux énergies renouvelables est devenu une nécessité incontournable. Parmi ces sources d'énergie, l'énergie solaire photovoltaïque occupe une place privilégiée grâce à son caractère propre, abondant et largement disponible. Toutefois, la nature intermittente de cette source d'énergie constitue un défi majeur pour assurer une alimentation stable et fiable des charges électriques.

Afin d'améliorer la continuité de service et la qualité de l'énergie fournie, l'intégration de systèmes de stockage, notamment les batteries, est devenue une solution largement adoptée. L'association d'un générateur photovoltaïque avec un système de stockage permet de constituer un système multi-sources capable de compenser les variations de production liées aux conditions météorologiques et de répondre efficacement aux fluctuations de la demande énergétique.

Dans ce contexte, les convertisseurs statiques jouent un rôle essentiel dans l'adaptation et la gestion des flux d'énergie entre les différentes sources et la charge. Parmi les différentes structures existantes, le convertisseur (Hacheur) élévateur à trois niveaux apparaît comme une solution particulièrement intéressante grâce à sa capacité à réduire les contraintes électriques sur les composants, à diminuer les pertes de commutation et à améliorer la qualité de la tension délivrée. Ces avantages contribuent à l'augmentation du rendement global du système et à une meilleure stabilité du bus continu.

L'objectif principal de ce travail est l'étude, la modélisation et la commande d'un système multi-sources PV/Batterie basé sur un convertisseur élévateur à trois niveaux. Une stratégie de commande adaptée est développée afin d'assurer l'extraction optimale de la puissance photovoltaïque, le maintien de la tension du bus continu Vdc-link à sa valeur de référence et une gestion efficace de l'énergie stockée dans la batterie, même en présence de variations d'irradiance solaire et de charge.

Pour atteindre ces objectifs, des modèles mathématiques des différents éléments du système ont été élaborés et implantés sous l'environnement MATLAB/Simulink. Les performances du système proposé ont ensuite été évaluées à travers plusieurs scénarios de fonctionnement afin d'analyser son comportement dynamique et de valider l'efficacité de la stratégie de commande adoptée.

Ce mémoire est structuré en trois chapitres :

Le premier chapitre, intitulé « Généralités et modélisation des systèmes multi-sources », présente les concepts fondamentaux relatifs aux systèmes multi-sources, aux générateurs photovoltaïques, aux systèmes de stockage par batteries ainsi qu'à leurs modèles mathématiques.

Le deuxième chapitre, intitulé « Modélisation et commande des convertisseurs statiques », est consacré à l'étude des principaux convertisseurs DC/DC et plus particulièrement au convertisseur élévateur à trois niveaux. Les stratégies de commande, notamment l'algorithme MPPT et les techniques de régulation du bus continu, y sont également développées.

Le troisième chapitre, intitulé « Simulation et discussion des résultats », présente le modèle global du système PV/Batterie réalisé sous MATLAB/Simulink. Les résultats obtenus sont analysés et discutés afin d'évaluer les performances du convertisseur à trois niveaux en termes de stabilité de tension, de qualité de l'énergie et d'efficacité énergétique.

Enfin, une conclusion générale récapitule les principaux résultats obtenus et présente quelques perspectives de recherche pouvant être envisagées pour l'amélioration future du système étudié.

Chaptre 1: Génialité et modélisations des système multi-sources

1.1. Introduction

Les systèmes multi-sources constituent aujourd'hui une solution technologique essentielle dans le domaine de la conversion et de la gestion de l'énergie électrique. L'évolution croissante des besoins énergétiques, combinée à l'intégration massive des énergies renouvelables, a conduit au développement de systèmes capables d'exploiter simultanément plusieurs sources d'énergie. Ces systèmes permettent d'assurer une continuité de service optimale, d'améliorer la qualité de l'énergie fournie et de garantir une meilleure flexibilité opérationnelle. Dans un contexte industriel et académique, l'étude des systèmes multi-sources représente un axe de recherche majeur en électrotechnique et en électronique de puissance

1.2. Les systèmes multi-sources

1.2.1. Définition un Systèmes multi-sources.

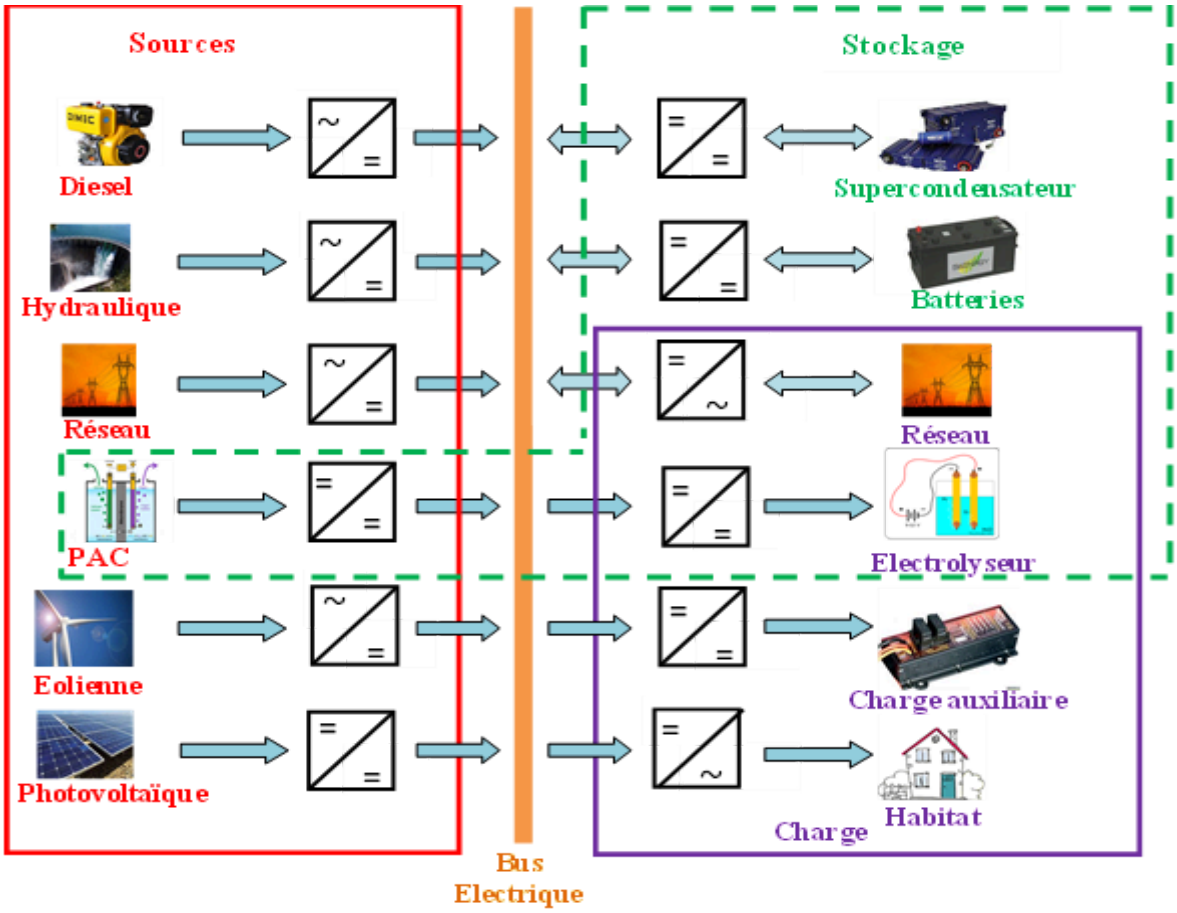


Figure 1-1:Schéma général du système énergétique hybride multi-sources, charges et stockage

Un système multi-sources d'énergie est un système électrique, comprenant plus d'une source d'énergie, parmi lesquelles une au moins est renouvelable. Le système multi-sources peut comprendre un dispositif de stockage. D'un point de vue plus global, le système énergétique d'un pays donner peut-être considère comme un système hybride [1].

1.3. Pourquoi un système multi-sources.

Dans les zones rurales, le coût élevé de l'extension du réseau électrique oblige les institutions à envisager d'autres solutions alternatives. Parmi elles, on trouve l'utilisation de groupes électrogènes (GE) diesel souvent considérés comme une solution économique et fiable, mais générant quelques nuisances d'ordre environnementale et pratique pour l'usager :

- ✓ Coûts élevés de fonctionnement,
- ✓ Dépendance énergétique (pays de l'OPEP),
- ✓ Problème d'approvisionnement en carburant (éloignement des fournisseurs de carburants)
- ✓ Maintenance compliquée et coûteuse,
- ✓ Faible durée de vie (environ 5 ans et parfois moins),
- ✓ Impossibilité d'une production électrique continue sur 24 heures (ou nécessité de disposer de plusieurs GE),
- ✓ Nuisances sonores et problèmes de gestion des huiles de vidange.

Les systèmes photovoltaïques (PV) fournissent de l'électricité de manière ininterrompue, sans bruit, ni nuisances environnementales (excepté la présence des accumulateurs électrochimiques difficiles à recycler). Faciles à installer, ils nécessitent peu de maintenance et font preuve d'une grande fiabilité. Leurs problèmes résident dans le coût d'investissement élevé nécessaire à leur installation et la limitation de la charge électrique à satisfaire.

Les systèmes photovoltaïques (PV) peuvent être associés à d'autres sources d'énergie, la plupart du temps contrôlable comme un groupe électrogène, mais parfois aléatoires (association PV-éolien). Dans cette configuration, association de plusieurs sources, les avantages de chacune des sources d'énergie sont ainsi ajoutés :

- ➢ Le système photovoltaïque réduit la consommation, le temps de fonctionnement et donc de la maintenance du groupe,
- ➢ La présence du stockage par batteries réduit la puissance nominale du groupe,

- La présence du groupe réduit la taille du champ photovoltaïque et la capacité de stockage des batteries diminuant ainsi le coût du système,
- La fiabilité du système global est augmentée,
- Les puissances et les énergies mises en jeu sont plus importantes et la charge à alimenter plus élevée.

1.4.Différentes configurations des systèmes photovoltaïques hybrides

Le champ photovoltaïque génère du courant continu, mais la consommation domestique exige le plus souvent du courant alternatif, c'est pourquoi il est souvent nécessaire d'adjoindre au système un onduleur. De cette façon, le générateur photovoltaïque travaille en parallèle ou en alternance avec le générateur diesel. On distingue les configurations suivantes [2] :

- Système hybride PV - Diesel série
- Système hybride PV - Diesel commuté
- Système hybride PV - Diesel parallèle.

1.5. Classification des système multi-sources.

Les systèmes multi-sources peuvent être classés selon plusieurs critères : - Selon la nature des sources : renouvelables, conventionnelles ou hybrides. - Selon la structure de conversion : couplage DC, couplage AC ou architecture hybride. - Selon la stratégie de commande : commande centralisée ou décentralisée. Chaque configuration présente des avantages spécifiques en termes de rendement, coût et fiabilité [2].

1.5.1. Architecture à bus DC

La figure (1.2) représente la structure à bus DC d'un système hybride. Dans cette architecture, l'énergie fournie par chaque source du système alimente un bus continu DC à travers des convertisseurs DC/DC ou AC/DC. Ce type d'assemblage est adapté pour les sites isolés, à charge continue ou alternative, reliée au bus DC via un onduleur. L'avantage de cette topologie est la simplicité de la commande par rapport aux autres configurations.

L'avantage d'une telle architecture réside dans sa simplicité, ce qui permet de simplifier le système de commande. Cependant, le rendement de l'ensemble du système est faible, parce qu'une certaine quantité d'énergie est perdue à cause des batteries et des pertes dans les convertisseurs.

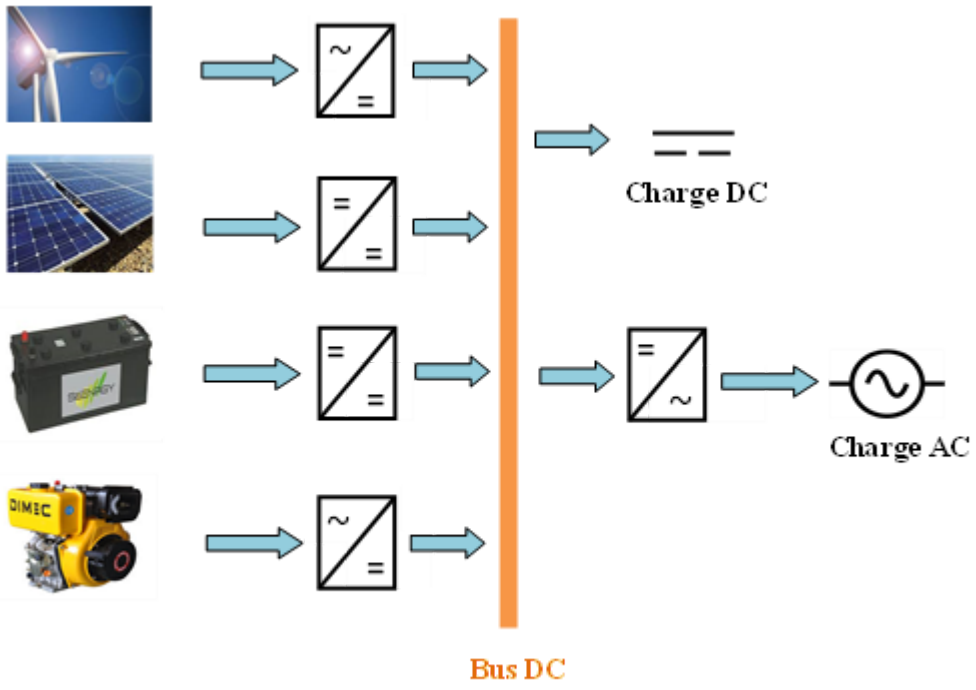


Figure 1- 2: **S**tructure à bus DC d'un système hybride

1.5.2. Architecture à bus AC

Dans la topologie à bus AC, toutes les sources de productions sont reliées au bus AC via des convertisseurs comme montrée dans la figure (1.3).

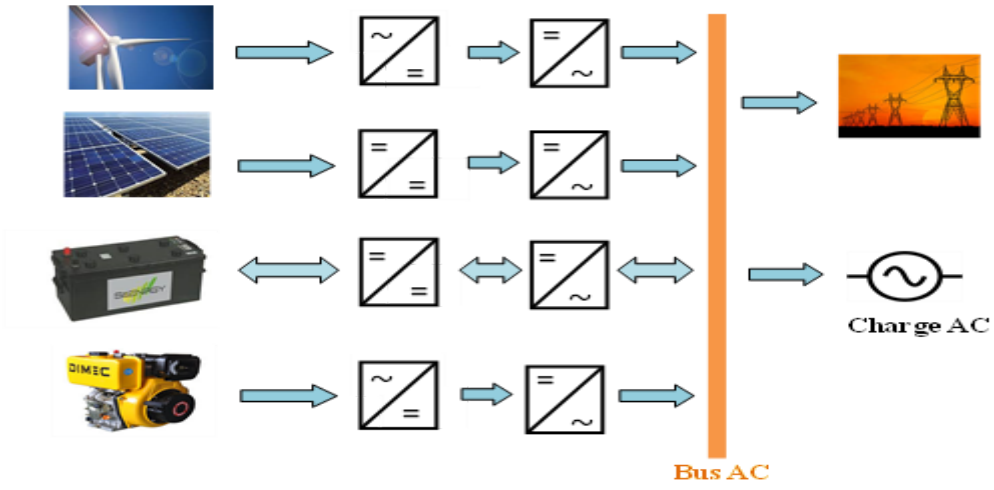


Figure 1- 3: Structure à bus AC d'un système hybride.

Cette configuration offre des performances supérieures par rapport à la configuration précédente, puisqu'un découplage de différentes sources de production permettrait à celles-ci d'agir de façon assez indépendante les unes des autres. Cependant, le rendement de l'ensemble du système est faible, parce qu'une certaine quantité d'énergie est perdue à cause de l'utilisation

des convertisseurs statiques et ce type d'association complique le système de commande. L'architecture à bus AC est plus adaptée à une génération distribuée (c.-à-d. raccordée au réseau électrique) [3].

1.5.3. Architecture mixte (DC&AC)

La figure (1.3) représente la structure à bus mixte (DC&AC) d'un système hybride. Dans cette configuration, les sources d'énergie peuvent alimenter une charge alternative AC ou une charge continue DC par un convertisseur bidirectionnel qui réalise la conversion continue-alternative et vice versa[4].

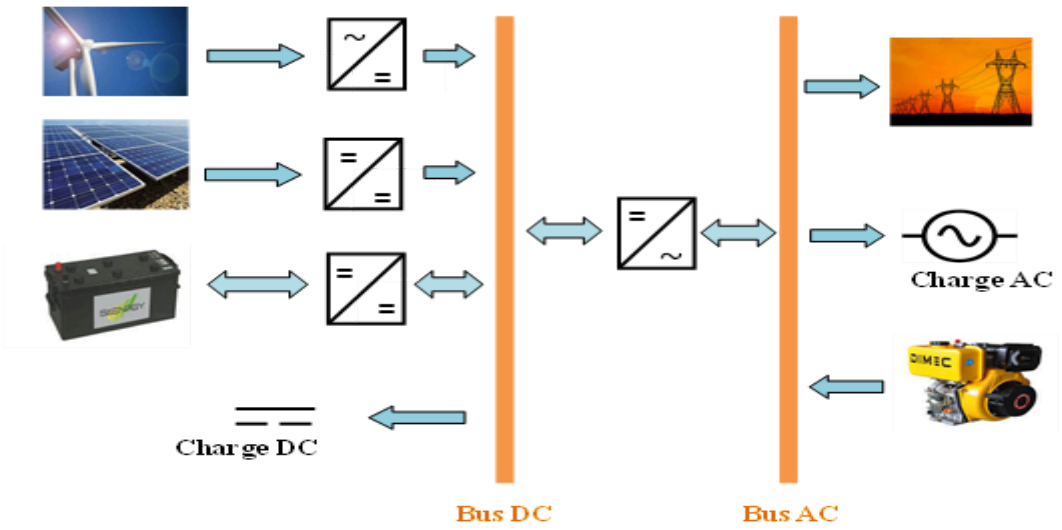


Figure 1- 4: Structure à bus mixte (DC&AC) d'un système hybride

1.6. Energie solaire photovoltaïque

Le terme photovoltaïque est formé de deux mots Photon, qui signifient lumière et le mot Volta, du nom du physicien Alessandro Volta (1745-1827). L'effet photovoltaïque constitue à la conversion directe de l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique au moyen de cellules généralement à base de silicium [5] [6].

1.6.1. Principe de fonctionnement.

Le fonctionnement de la cellule photovoltaïque est fondé sur les propriétés de semi-conducteurs qui, percutés par les photons, mettent en mouvement un flux d'électrons . Les photons sont des particules élémentaires qui transportent l'énergie solaire à 300 000 km/s et qu'Albert Einstein appelait dans les années 1920 les « grains de lumière ». Lorsqu'ils frappent un élément semi-conducteur comme le silicium , ils arrachent des électrons à ses atomes . Ces

électrons se mettent en mouvement, de façon désordonnée, à la recherche d'autres « trous » où se repositionner [7].

Mais pour qu'il y ait un courant électrique, il faut que ces mouvements d'électrons aillent tous dans le même sens. Pour les y aider, on va associer deux types de silicium. La face exposée au soleil est « dopée » avec des atomes de phosphore qui comportent plus d'électrons que le silicium, l'autre face est dopée avec des atomes de bore qui comportent moins d'électrons. Cette double face devient une sorte de pile : le côté très chargé en électrons devient la borne négative (N), le côté avec moins d'électrons devient la borne positive (P). Entre les deux il se crée un champ électrique. Voir figure (1.5).

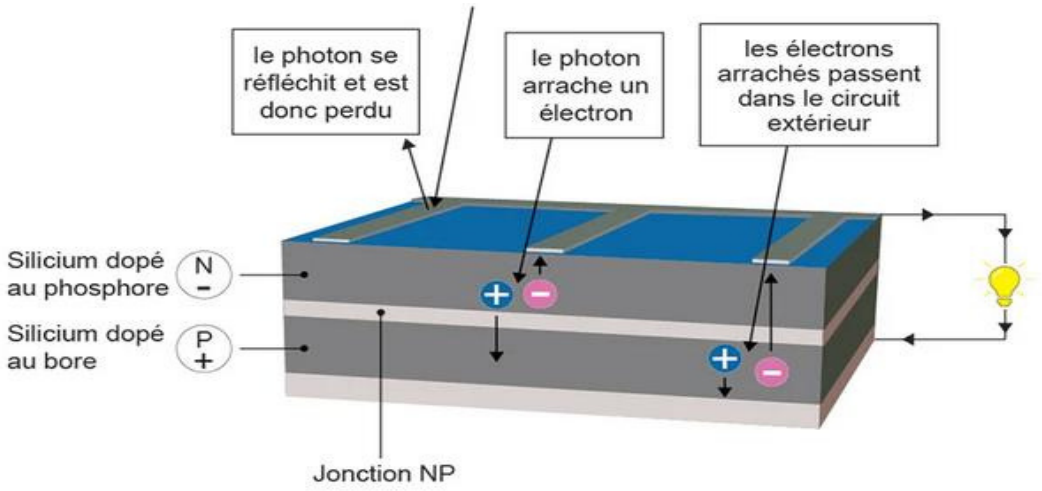


Figure 1- 5: Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.

Quand les photons viennent exciter les électrons, ceux-ci vont migrer vers la zone N grâce au champ électrique, tandis que les « trous » vont vers la zone P. Ils sont récupérés par des contacts électriques déposés à la surface des deux zones avant d'aller dans le circuit extérieur sous forme d'énergie électrique. Un courant continu se créé. Une couche anti-reflet permet d'éviter que trop de photons se perdent en étant réfléchis par la surface [8][9].

1.6.2. Les filières technologiques.

Une cellule photovoltaïque peut être réalisée avec de nombreux semi-conducteurs. En réalité, il existe aujourd'hui trois principales filières technologiques : le silicium cristallin, les couches minces. La filière silicium représente aujourd'hui l'essentiel de la production mondiale des panneaux photovoltaïques. Cette filière est elle-même subdivisée en plusieurs technologies distinctes de par la nature du silicium employé et/ou sa méthode de fabrication. Cette filière comporte deux technologies : le silicium monocristallin et le silicium poly cristallin [9].

1.6.2.1. Les cellules monocristallines.

Lors du refroidissement, le silicium fondu se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules. Le rendement du silicium monocristallin est le plus élevé, il est compris entre 12 et 20% pour les cellules industrielles [10][11].

1.6.2.2. Les cellules Poly cristallines.

Le silicium Poly cristallin est devenu aujourd'hui la technologie la plus utilisée. Elle représente près de 50% du marché. Ces cellules sont obtenues par coulage de cristaux de silicium, ce qui rend sa structure hétérogène. Son rendement est légèrement inférieur au silicium monocristallin il est compris entre 10 et 14%

1.6.2.3. Les cellules amorphes.

Ces cellules sont composées d'un support en verre ou en matière synthétique sur lequel est disposé une fine couche de silicium (l'organisation des atomes n'est plus régulière comme dans un cristal). Leur rendement est de l'ordre de 5 à 10%, plus bas que celui des cellules cristallines mais le courant produit est relativement bon marché.

1.6.3. Modélisation du système photovoltaïque

Le modèle mathématique d'un générateur photovoltaïque se base sur la modélisation de l'élément de base constituant ce dernier c'est à dire la cellule photovoltaïque.

1.6.3.1. Circuit équivalent et modèles mathématique.

Le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque représenté un générateur de courant I_{PV} monté en parallèle avec une diode, deux résistances parasites sont introduites dans ce schéma [12] [6]. Ces résistances ont une influence sur la caractéristique $I_{PV}\ (V_{PV})$ de la cellule.[10][11] [13]

- Résistance série R_s : C'est la résistance interne de la cellule qui représente la résistance du semi- conducteur utilisé et les résistances de contact.
- Résistance parallèle ou Shunt R_p: C'est la résistance due à un courant de fuite au niveau de la jonction, donc elle dépend de la façon de réalisation de la cellule.

La figure 1.6 représente le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque [1].

A partir ce schéma électrique on peut faire sortir les différentes formules caractéristiques d'une cellule, d'un module ou d'un panneau *PV* ainsi que sa modélisation. En appliquant la loi du Kirchhoff sur le circuit du schéma équivalent d'une cellule *PV*, on trouve[7][14].

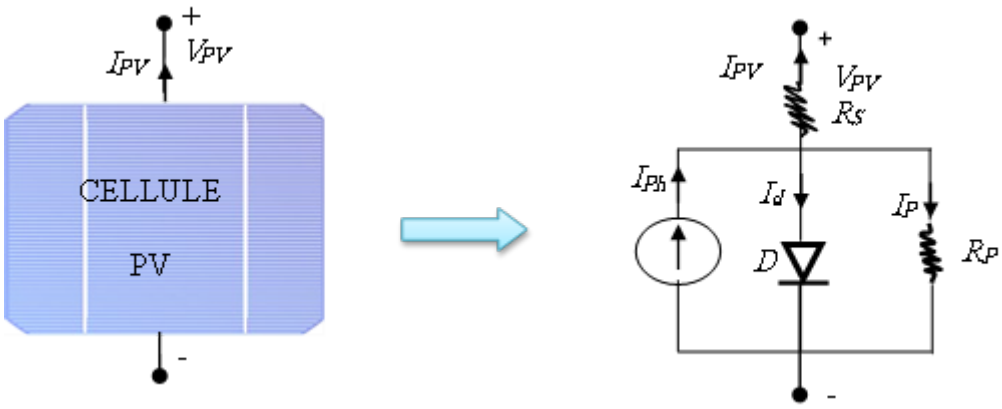


Figure 1- 6: Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.

$$I_{PV} = I_{ph} - I_d - I_p \tag{1.1}$$

Ou

$$I_P = \frac{V_d}{R_P} \tag{1.2}$$

$$V_{PV} = V_d - R_s . I^{PV} \tag{1.3}$$

Dans le cas d'un module constituéde *Ns* cellules on obtient :

$$V_{PV} = N_s \square (V_d - R_s I_{PV}) \tag{1.4}$$

I_{PV}: Courant de la sortiedelacelluleou le GPV.

ph: Photocourant oulecourantgénéré par l'éclairement.

Ip: Courant traversantlarésistanceparallèle.

Vd : Tension aux bornesdeladiode.

Rs : Résistance série

R_p : Résistance parallèle

Le modèle en présence de deux résistances représente le cas réel. Le schéma équivalent complet est représenté dans la figure ci-dessous[14][10] [15].

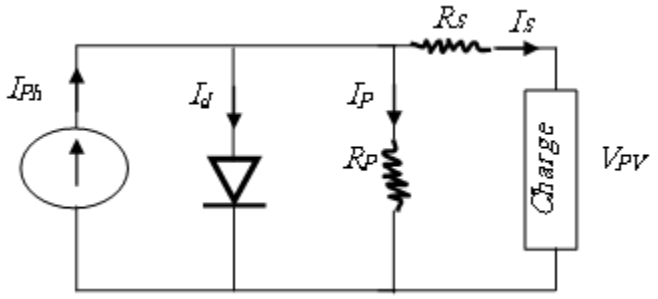


Figure 1- 7: Modèle d'un GPV en présence de deux résistances $R_P$et R_S

L'équation (1.1) devient une formule qui relie le courant d'entrée à latension de sortie comme le suivant. En remplaçant le courant I_d traversant la diode, I_p traversant la résistance parallèle et I_s le courant circulant dans la résistance série par ses expressions on obtient [16][17].

$$I_{PV} = I_{Ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{q(V_{PV} + R_S I_{PV})}{ac} \right) - 1 \right] - \frac{V_{PV} + R_S I_{PV}}{RP} \quad (1.5)$$

$$I_{Ph} = \frac{E}{Eref} \left(I_{cc} + K_i (T - T_{ref}) \right) \quad (1.6)$$

$$I_0 = I_{Sr} \times \left[\frac{T}{T_{ref}} \right]^3 \times \left(exp\left(\left(\frac{q.E_g}{A.K} \right) \times \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right) \right) \quad (1.7)$$

$$I_{Sr} = \frac{I_{CCref}}{\left[\exp\left(\frac{qV_{co}}{N_s AKT} \right) - 1 \right]} \quad (1.8)$$

ac : le potentiel thermique; $ac=N_sKAT$

I0 : Courant de saturation de la diode.

A : coefficient d'idéalité de la cellule dépendant du matériau.

q : Charge électrique élémentaire 1.607×10^{-19} C

K : Constant de Boltzmann = 1.3806503×10^{-23} J/K.

T : Température de la cellule en Kelvin

T_{ref} : Température dans les conditions normale en kelvin (T_{ref} =298 K)

E, E_{ref} : Eclairement réel et éclairement dans les conditions normales

Isr : Courant de saturation réversible [18].

A partir les équations (1.2)… (1.5) on peut faire la simulation de notre générateur photovoltaïque.

Pour un générateur photovoltaïque composé de Ns cellules montées en série et de N_p cellules montées en parallèle les équations caractéristiques d'un GPV sont données par [17] [19] [20] :

$$I_{PV} = N_P I_{Ph} - N_P I_0 \left[\exp\left(\frac{q\left(\frac{V_{PV}}{N_s} + \frac{R_S I_{PV}}{N_P}\right)}{NsAKT} \right) - 1 \right] - \frac{\frac{N_s}{NP} VPV + R_S I_{PV}}{RP} \quad (1.9)$$

Puisque R_p est très grande pour un générateur comprenant plusieurs cellules PV, l'équation (1.10) devient[11] [19] [21]

$$I_{PV} = N_P I_{Ph} - N_P I_0 \times \left(exp^{\frac{q\left(\frac{N_P V_{PV}}{N_S} \times I_{PV}\right)}{Ns A K T}} - 1 \right) \quad (1.11)$$

1.7. Système de stockage (Banc de batteries)

La deuxième source de conversion de notre système est composée d'un banc de batteries solaires associé à un convertisseur élévateur abaisseur DC/DC, le tout relié au bus continu commun.

Ces batteries ont à supporter des conditions de fonctionnement tel que les taux variables de charge et de décharge, la fréquence et la profondeur de décharge, les fluctuations de température, etc. Ces variations rendent très difficile de prédire avec précision les performances de la batterie dans le système à d'énergies renouvelables [22] [23]. Les taux de charge et de décharge élevés et la température sont les principales sources de défaillance de la batterie. Compte tenu de ces paramètres, un bon contrôleur de charge et de décharge est exigé pour la fiabilité et la sécurité de fonctionnement de la batterie [24]. Par conséquent, la modélisation de la batterie devient très nécessaire afin d'améliorer ces performances en intégrant un dispositif de commande [1].

Il existe deux types d'accumulateurs utilisés actuellement dans les systèmes d'énergies renouvelables : les accumulateurs au Plomb-Acide et les accumulateurs au Nickel-Cadmium. La batterie au plomb-acide est la forme la plus courante, en raison de son coût qui est relativement faible et de sa large disponibilité. Par contre, les batteries Nickel-Cadmium sont plus chères, elles sont utilisées dans les applications ou la fiabilité est vitale [25]. Dans le cadre de ce travail, nous avons choisi la batterie au Plomb-Acide compte tenu de l'avantage offert pour les systèmes isolés de production d'énergie.

1.7.1. Le modèle électrique de la batterie Plomb-Acide

Le modèle de la batterie au plomb utilisé est composé d'une source de tension contrôlée et d'une résistance série R_{in}, comme illustré à la figure 1.8.

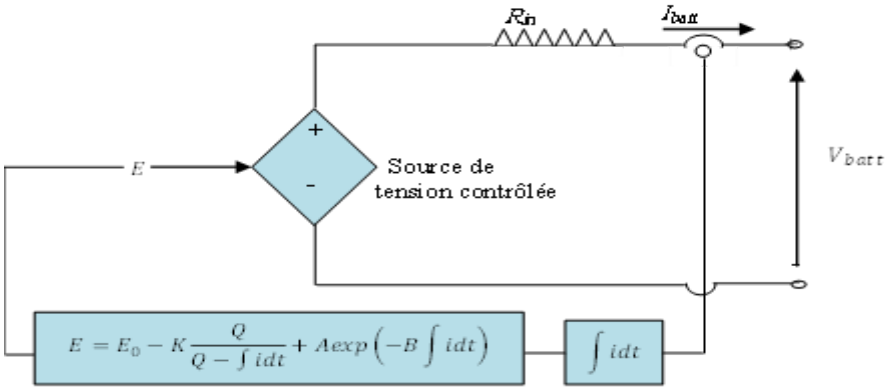


Figure 1- 8: Modèle électrique de la batterie Plomb-Acide.

L'entrée de commande E dépend non seulement du courant mais aussi del'état de charge de la batterie (SOC). Connaissant ces caractéristiques techniques données par lefabricant, il est très facile de trouver les valeurs de paramètres comme E_o et K. La tension à ces auxbornes est décrite par l'équation suivante. [11] [10]

$$E=E_0-K\ \frac{Q}{Q-\int idt}+Aexp(-B\int idt) \tag{1.12}$$

$$VBatt=E-R_{in}I_{Batt} \tag{1.13}$$

La tension interne delabatterie E peutêtredécrite de la manière suivante

- **Pendant la charge i^*<0.**

$$E=E_0-k.\ \frac{Q}{Q-i_t}\ .i_t-k\ .\ \frac{Q}{Q-it}.i^*+\alpha(t) \tag{1.14}$$

i^*>0.

- **Pendant la décharge**

$$E=E_0-k.\quad \frac{Q}{Q-i_t}.i_t-k.\quad \frac{Q}{it-0.1Q_t}.i^*+\alpha(t) \tag{1.15}$$

Où la variable $\alpha(t)$ est définie parl'équationci-dessous :

$$\alpha(t)=\int_0^T \frac{B}{t.(A.I_{Batt}-\alpha(t-1)}.dt \tag{1.16}$$

Avec :

VBatt : Tension de la batterie (V).

IBatt : Courant de batterie (A).

*R*in : La résistance interne de la batterie (Ohms).

E : Tension non linéaire (V).

E0 : Tension constante (V).

k : Constante de polarisation (Ah^{-1}).

*i** : Dynamique du courant a basse fréquence (A).

it : Capacité extraite (Ah).

Q : Capacité maximale de la batterie (Ah).

T : Temps de charge ou de décharge.

A : Tension exponentielle (V)

B : Capacité exponentielle (Ah^{-1})

L'état de charge de la batterie (*SOC* en anglais) est décrit comme étant le rapport entre la capacité totale de la batterie et la capacité de la batterie après une décharge temporelle [26]. Deux
batteries conçues pour fournir la même énergie ont des tailles différentes si elles sont utilisées pour différents *SOC*. Par exemple, une batterie utilisée entre 80% et 30% de *SOC* devrait être plus petite qu'une autre utilisée entre 100% et 50% de *SOC* [27][28].

Afin d'éviter la dégradation de la batterie et prolonger sa durée de vie, son état de charge doit être maintenu dans un certain intervalle défini comme suit [3] :

$$SOC_{min}(t)\quad SOC(t)\quad SOC_{max}(t) \tag{1.17}$$

SOC_{max}: Etat de charge maximale de la batterie et SOC_{min}: Etat de charge minimale de la batterie L'état de Charge *SOC* de la batterie est exprimée par :

$$SOC(t)=100\left(1-\frac{1}{Q}\int i\,dt\right) \tag{1.18}$$

1.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les concepts fondamentaux des systèmes multi-sources ainsi que leur rôle dans l'amélioration de la fiabilité, de la continuité de service et de l'efficacité énergétique. Les principales sources d'énergie renouvelable et les éléments de stockage ont été étudiés, puis leurs modèles mathématiques ont été développés afin de décrire leur comportement et de faciliter leur intégration au sein d'un système énergétique hybride.

Les analyses présentées constituent une base essentielle pour la conception et l'évaluation des systèmes multi-sources. Dans le chapitre suivant, nous nous intéresserons à la modélisation et à la commande des convertisseurs statiques assurant l'adaptation, le transfert et la gestion de l'énergie entre les différentes sources et la charge.

Chapitre 02 : Modélisation et commandes des convertisseurs statiques

2.1. Introduction

Les systèmes multi-sources associant plusieurs sources d'énergie renouvelable, comme le photovoltaïque et le stockage par batteries, nécessitent une gestion intelligente et flexible de l'énergie. Cette gestion repose en grande partie sur l'utilisation des convertisseurs statiques, qui assurent l'interfaçage électrique entre les différentes sources, les systèmes de stockage, la charge et éventuellement le réseau.

Dans ce contexte, la modélisation précise et la commande efficace de ces convertisseurs sont essentielles pour garantir le bon fonctionnement du système, optimiser le rendement énergétique et assurer une alimentation électrique fiable et de qualité. Les convertisseurs tels que le Hacheur élévateur DC-DC à trois niveaux, le convertisseur bidirectionnel DC/DC, le redresseur triphasé à diodes, et le convertisseur NPC à trois niveaux sont au cœur de cette architecture.

Ce chapitre vise donc à présenter les modèles mathématiques de ces convertisseurs ainsi que les stratégies de commande associées, en tenant compte des interactions dynamiques dans un environnement multi-sources.

2.2. Convertisseurs statiques

Les convertisseurs statiques sont des dispositifs électroniques de puissance permettant de transformer une forme d'énergie électrique en une autre, sans partie mobile, d'où le qualificatif "statique". Ils assurent la conversion entre différentes natures ou niveaux de tension et de courant (AC/DC, DC/AC, AC/AC, ou DC/DC), en utilisant principalement des composants semi-conducteurs (tels que les diodes, transistors IGBT, MOSFET, etc.).

Ces convertisseurs jouent un rôle essentiel dans les systèmes de production, de transport et de gestion de l'énergie, en particulier dans les systèmes hybrides utilisant des sources renouvelables comme le solaire photovoltaïque, l'éolien, et le stockage par batteries. Ils permettent d'adapter l'énergie produite par les sources aux besoins du réseau ou des charges.

2.3. Modélisation et commande de la première chaîne de conversion

2.3.1. Convertisseur DC-DC hacheur élévateur a trois niveaux.

Les hacheurs élévateurs sont fréquemment utilisés dans les systèmes de conversion d'énergie en raison de leur topologie simple et de leur mécanisme de contrôle. Le TLBC est particulièrement avantageux dans les applications de forte puissance grâce à la réduction des pertes de commutation et de recouvrement inverse de la diode.[29][30]

De plus, le TLBC peut fonctionner avec une inductance plus petite que les convertisseurs boost classiques grâce à une ondulation réduite du courant d'inductance [31].

2.3.1.1. Modélisation hacheur élévateur a trois niveaux

La figure3.1 illustre la configuration du convertisseur élévateur à trois niveaux, composé de deux convertisseurs élévateurs connectés au milieu des transistors (Sb1, Sb2) et des condensateurs (Cd1, Cd2). Les transistors sont commandés avec un décalage de Ts/2 [4].

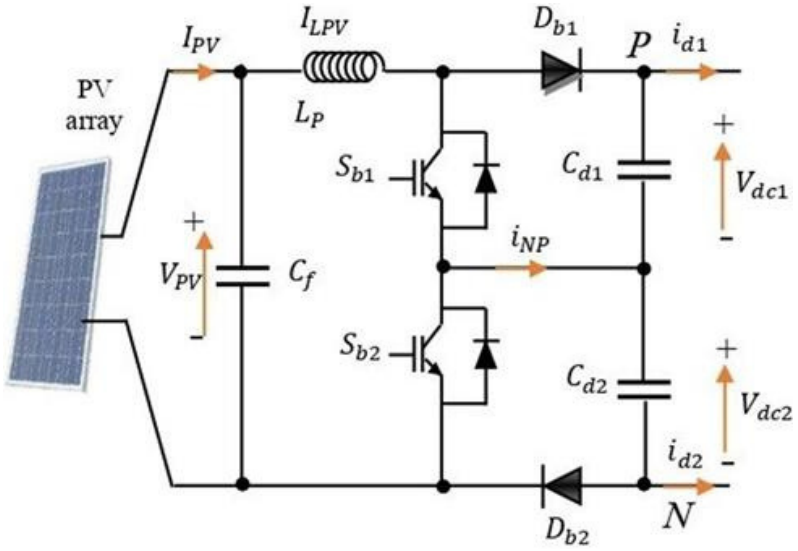


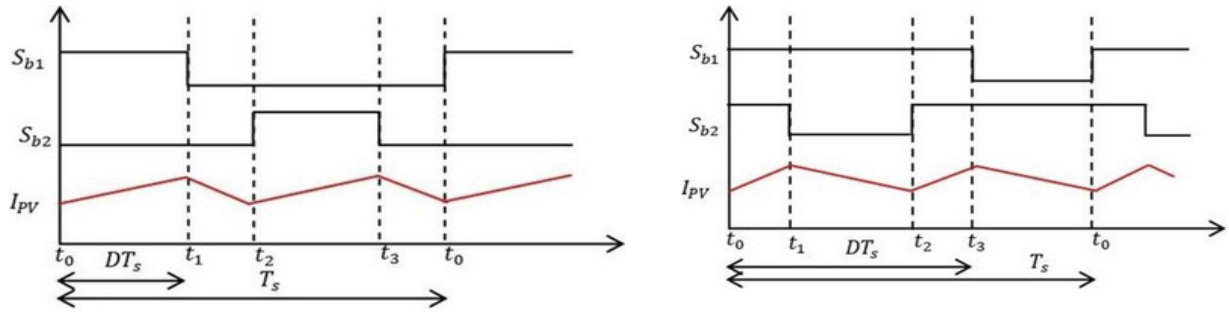
Figure 2- 1:Convertisseur élévateur à troisniveaux

Le modèle moyenné constitue un outil d'analyse efficacepermettant de modéliser le comportement dynamique des grandeurs électriques clés telles que la tension d'entrée Vpv, le courant traversant l'inductance Ipv, ainsi que le courant circulant au point neutre NPi [29]

$$\begin{cases} Lb = \frac{diLpv}{dt} = Vpv - (1-D)V_{dc1} - (1-D_2)V_{dC2} \\ Cf\frac{dvPv}{dt} = ipv - iLpv \\ iNp = (D_1 - D_2)i_Lpv \end{cases} \quad (2.1)$$

D1 : Cycle de service du commutateur Sb1

D2 : Cycle de service du commutateur Sb2



(a) (b)

Figure2-2:Formesd'onde3LBC,(a)D<0,5,(b)D>0,5

La figure 2-2 (a) montre les formes d'onde du convertisseur 3LBC lorsque D < 0,5. Avant l'instant t_0, les deux interrupteurs Sb1 et Sb2 restent ouverts. À t_0, l'interrupteur Sb1 est activé, et le courant circule à travers Lb, Sb1, Cd2 et Db2.Cela provoque une augmentation du courant du générateur photovoltaïque Ipv, comme exprimé dans l'équation)3.2)[29].

$$I_{p_v}(t) = I_{pv}(t_0) + \frac{Vpv - \frac{Vdc}{2}}{Lb}(t - t_0) \quad (2.2)$$

Où,

$$V_{d_c} = V_{dc} + V_{dc_2} \quad (2.3)$$

Lorsque le temps atteint t_1, l'interrupteur Sb1 est ouvert, et le courant circule à travers Lb, Db1, Cd1, Cd2 et Db2.Par conséquent, le courant du générateur photovoltaïque Ipv diminue.

$$Ip_v(t) = Ip_v(t) - \frac{V d_c - Vp_v}{L_b}(t - t)_1 \quad (2.4)$$

Pendant l'intervalle de temps t_2, lorsque l'interrupteur Sb2 est fermé, le courant circule à travers Lb, Db1, Cd1 et Sb2, ce qui entraîne une augmentation du courant du générateur photovoltaïque Ipv. En revanche, à l'instant t_3, l'interrupteur Sb2 est ouvert, les deux interrupteurs sont ouverts, et le courant passe par Lb, Db1, Cd1, Cd2 et Db2, provoquant une diminution du courant du générateur PV Ipv, comme indiqué dans l'équation)3.4) [29].

La figure 2-2 (b) montre les formes d'onde théoriques du convertisseur 3LBC lorsque le rapport cyclique dépasse 0,5. Avant l'instant t_0, l'un des interrupteurs, Sb1, est ouvert tandis que l'autre, Sb2, est fermé. À t_0, Sb1 se ferme, et les deux interrupteurs deviennent conducteurs. En conséquence, le courant traversant le générateur photovoltaïque augmente, comme indiqué dans l'équation)3.5) [32].

$$Ip_{v}(t)=I_{pv}(t_0)+\frac{V_{pv}}{L_b}(t-t_0) \quad (2.5)$$

À l'instant t_1, l'interrupteur Sb2 est ouvert, et le courant circule à travers Lb, Sb1, Cd2 et Db2.

Par conséquent, le courant traversant le générateur photovoltaïque (Ipv) diminue, comme indiqué dans l'équation)3.6).

$$I\rho_{v}(t)=I_{pv}(t_2)-\frac{\frac{Vdc}{2}-Vp}{L_b}(t-t)_1 \quad (2.6)$$

À l'instant t_2, l'interrupteur Sb2 est fermé, permettant aux deux interrupteurs de conduire le courant.

En conséquence, le courant traversant le générateur photovoltaïque (Ipv) augmente, comme indiqué dans l'équation)3.5) .À l'instant t_3, Sb1 est ouvert, et le courant circule à travers Lb, Db1, Cd1 et Sb2.Cela entraîne à son tour une diminution du courant traversant le générateur photovoltaïque (Ipv), comme indiqué dans l'équation)3.6) [29].

2.3.1.2. Méthode MPPT proposé.

La méthode P&O, également connue sous le nom de Perturbation et Observation, est largement utilisée pour maximiser la puissance photovoltaïque et équilibrer les tensions des condensateurs en assurant le suivi du point de puissance maximale (MPPT) des systèmes photovoltaïques. Cette technique s'adapte aux variations de l'irradiance solaire, comme discuté dans les sources [33][34].

2.3.1.3. Contrôle de l'équilibrage des tensions.

Les condensateurs Cd1 et Cd2 sont chargés alternativement aux tensions Vdc1 et Vdc2. Bien qu'ils aient la même capacité, un déséquilibre de tension apparaît en raison des différences réelles entre les condensateurs et leur résistance série équivalente (ESR). Un contrôleur d'équilibrage de tension est donc nécessaire pour égaliser les tensions des condensateurs en ajustant le rapport cyclique, comme illustré dans la Figure (2. 3). Sb1 et Sb2 représentent les impulsions de commande des interrupteurs. Dans les convertisseurs DC-DC à trois niveaux à cellules volantes (3LBC), le rapportcyclique détermine la relation entre la tension d'entrée et la tension de sortie.

$$\frac{V_{dc}}{V_{pv}} = \frac{1}{1-0,5D_1-0,5D_2} \quad (2.7)$$

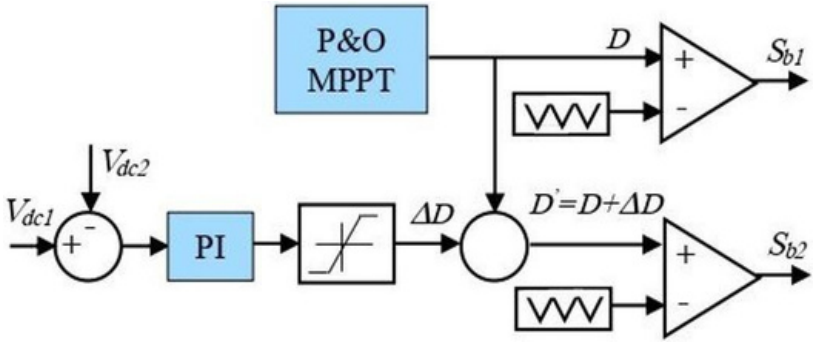


Figure 2- 3: Schéma bloc du MPPT avec contrôle de l'équilibre de tension

Si D1=D2=D Alors

$$\frac{Vdc}{Vpv} = \frac{1}{1-D} \qquad (2.8)$$

La tension Vpv générée par le champ photovoltaïque est sujette à des fluctuations dues aux variations des conditions environnementales telles que l'irradiance solaire et la température. Pour maximiser la puissance extraite, un contrôleur de suivi du point de puissance maximale (MPPT) est intégré. Celui-ci calcule le rapport cyclique D pour l'interrupteur hacheur élévateur Sb1

Cependant, dans une architecture multi-convertisseurs où plusieurs branches partagent le même bus CC, un déséquilibre de tension entre les condensateurs de sortie peut survenir. Pour pallier à cela, un contrôleur PI supplémentaire est mis en œuvre afin de réguler le rapport cyclique D′ de l'interrupteur Sb2, en fonction de l'erreur de tension (Vdc1−Vdc2) Ce mécanisme vise à équilibrer les tensions aux bornes des condensateurs de sortie.

$$\Delta D = k_P^i + \frac{k}{s}(V_{dc1} - V_{dc2}) \qquad (2.9)$$

La fonction de transfert du régulateur PI est exprimé par :

$k_P^i + \frac{k}{s}$ Le rapport cyclique corrigé $D' = D + \Delta D$ permet d'ajuster dynamiquement la commande de Sb2, assurant ainsi une égalisation précise des tensions.

Un déséquilibre des tensions entre les condensateurs de sortie peut induire une distribution asymétrique de la puissance entre les branches, entraînant une augmentation des pertes par commutation et par conduction dans les convertisseurs. Cela se traduit par une dégradation du rendement global du système, d'où l'importance d'un contrôle efficace du déséquilibre de tension.

2.4. Modélisation etCommande de la deuxième chaine conversion.

2.4.1. Modélisation duconvertisseur DC/DC bidirectionnel.

L'hacheur utilisé pour effectuer la charge et la décharge de la batterie ainsi que le transfert de puissance (courant) doit être réversible. Le schéma électrique équivalent est illustré par la figure (2.4) Afin d'effectuer la réversibilité du flux de puissance, les commutateurs du convertisseur doivent idéalement transférer le courant dans les deux directions. La première direction correspond au mode décharge où le convertisseur transfère l'énergie de la batterie vers le bus DC lorsque la production d'énergie renouvelable est déficitaire. Le second représente le mode charge. Quand il y a un excès de production d'énergie renouvelable où le convertisseur bidirectionnel transfère l'excès de puissance du bus DC vers la batterie. Le convertisseur bidirectionnel fonctionne comme convertisseur élévateur (Boost) pendant la décharge de la batterie et comme convertisseur abaisseur
(Buck) pendant la charge de la batterie [35].

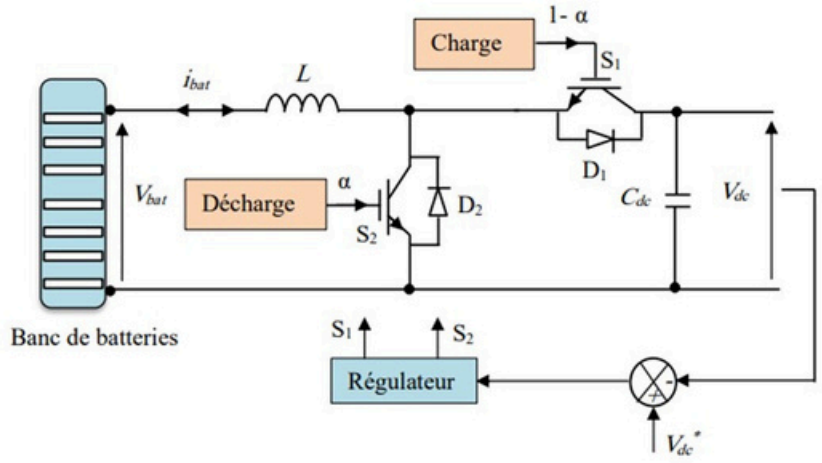


Figure 2- 4: Principe de commande du convertisseur DC/DC bidirectionnel

Le convertisseur bidirectionnel joue le rôle d'interface entre la batterie et le bus à DC, il admet deux modes de fonctionnements : charger et décharger la batterie.

2.4.2. Contrôle de la tension du Bus continu Vdc-link.

Le régulateur de la tension du bus continu a pour objectif de maintenir cette tension à une valeur de référence vd^*_c ,en contrôlant le processus de charge et de décharge de la batterie. Dans un premier temps, le bus continu est considéré comme étant piloté par le courant injecté dans le condensateur *ic* ce qui permettra de déterminer les coefficients du correcteur à adopter pour le système.

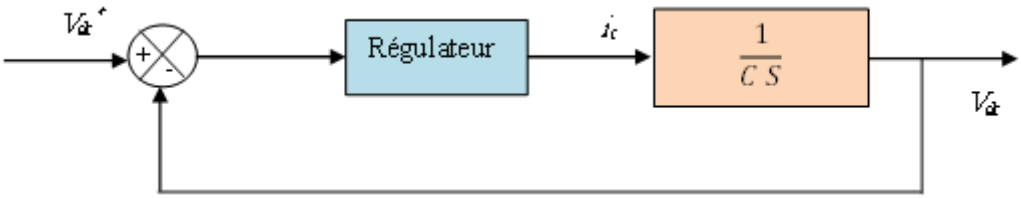


Figure 2- 5: Boucle de régulation de la tension du bus continu Vdc-link.

Dans cette partie, nous utilisons un type de régulateur, à savoir le régulateur PID (Proportionnel-Intégral-Derevative)

2.4.3. Régulateur PID–(Proportionnel-Intégral-Derivative)

Le régulateur PID est un type de contrôleur utilisé dans les systèmes de régulation automatique pour améliorer la stabilité et la précision du système. Il est composé de deux termes :

Terme proportionnel (P) : agit en fonction de l'erreur instantanée entre la consigne et la sortie du système.

Terme intégral (I) : agit sur l'accumulation de l'erreur dans le temps afin d'éliminer l'erreur statique permanente.

Terme dérivé (D) : agit en fonction de la vitesse de variation de l'erreur afin d'anticiper les variations du système et de réduire les oscillations.

La fonction de transfert d'un régulateur PID est généralement exprimé comme suit :

$$Kp+ \frac{Ki}{s} +K_d s=C(s) \qquad (2.\ 10)$$

Où :

Kp : Gain proportionnel.

Ki : Gain intégral.

Kd : Gain dérivé.

S : est la variable de Laplace.

Le régulateur PID est largement utilisé en raison de sa simplicité et de son efficacité dans de nombreux systèmes industriels où une réponse rapide sans dépassement excessif est souhaitée.

Le contrôle par PID est la méthode la plus simple à programmer sur un processeur et elle est souvent employée pour les asservissements. Cette méthode est basée sur une structure qui

délivre un signal de commande à partir de l'erreur existante entre la référence et la mesure voire la figure 2.6.

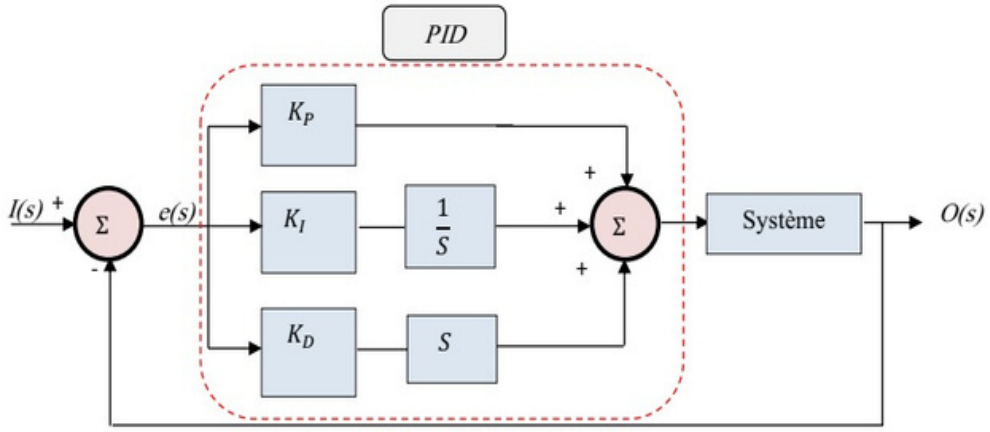


Figure 2- 6: Schéma bloc d'un régulateur PID.

Sur la base d'une fonction de transfert du bus continu $\frac{1}{C.S}$, le contrôleur PID est utilisée pour maintenir la tension dans une certaine valeur de référence.

2.4.4. Structure globale de la commande

La structure globale de la commande de la deuxième source de conversion est présentée par la figure (2.7). Les objectifs de cette boucle de contrôle sont[2] :

- Maintenir la tension globale du bus DC constante
- Protéger le banc de batteries solaires contre les surcharges et les décharges excessive.
- Satisfaire la demande de la charge tout en assurant une dynamique rapide.
- Faible sensibilité à la variation des paramètres.

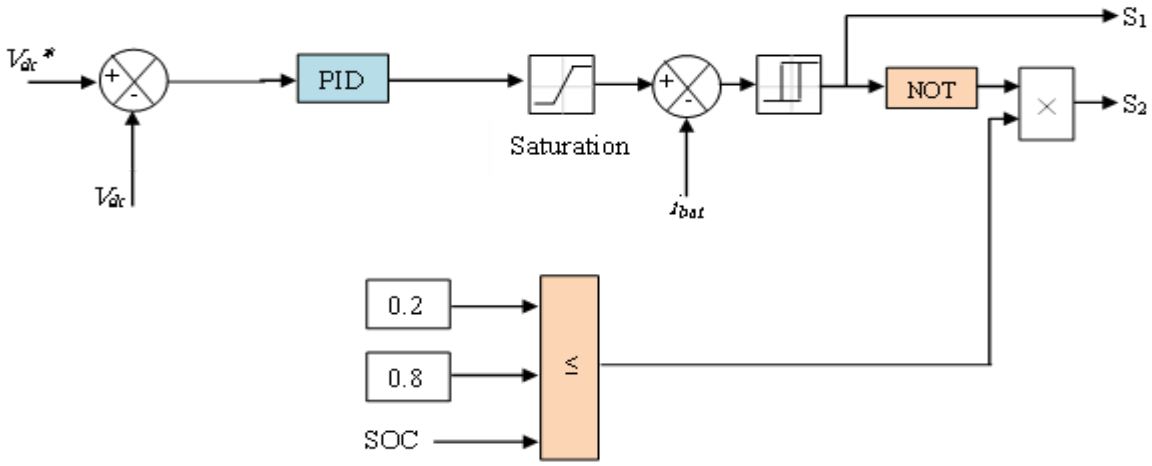


Figure 2- 7: Structure globale de la commande de la deuxième chaine

2.5. Modélisation l'onduleur à trois niveaux (NPC)

L'onduleur à trois niveaux (NPC), illustré à la figure (2.6), est composé de deux sources de tension continue et de trois bras. Chaque bras est équipé de quatre interrupteurs bidirectionnels à courant contrôlé et de deux diodes de point médian pour atteindre une tension de sortie nulle. Des interrupteurs contrôlables gèrent la mise en marche et l'arrêt de l'onduleur [2].

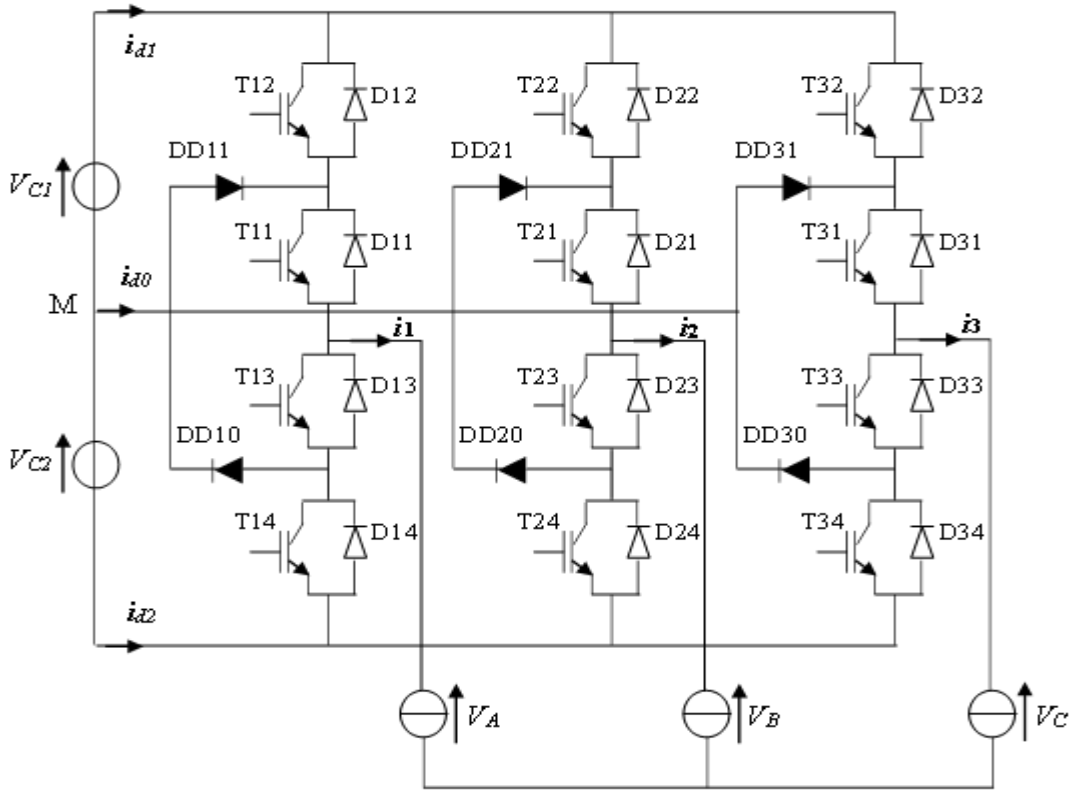


Figure 2- 8: Onduleur triphasé à trois niveaux à structure NPC

2.5.1. Modélisation du fonctionnement d'un bras d'onduleur à trois niveaux

Il est important de déterminer les différentes valeurs que peut prendre la tension simple V_{AM} mesurée entre la borne "A" de la charge et le point neutre M. Cette tension dépend directement de l'état (0 ou 1) des quatre interrupteurs du bras : TDk1, TDk2, TDk3 et TDk4[36].

La direction du transfert d'énergie au sein du convertisseur est déterminée par le sens des courant id_1,id_2 etid_3 .

Lorsque le réseau agit en tant que source d'énergie (génératrice) et que la source de courant en sortie se comporte comme une charge (réceptrice), le transfert d'énergie se fait à travers les transistors. En revanche, si l'énergie circule de la sortie vers l'entrée, ce sont les diodes qui permettent le passage du courant.

Pour analyser les différentes séquences de fonctionnement du convertisseur, il convient donc d'étudier d'abord les différentes valeurs que peut prendre la tension V_{AM}, définie exclusivement par l'étatdes quatre interrupteurs du bras concerné.

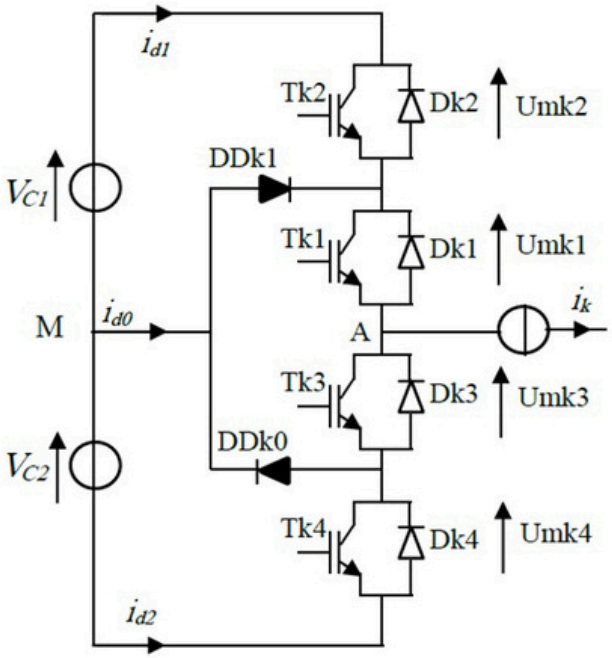


Figure 2- 9: Onduleur triphasé à trois niveaux à structure NPC

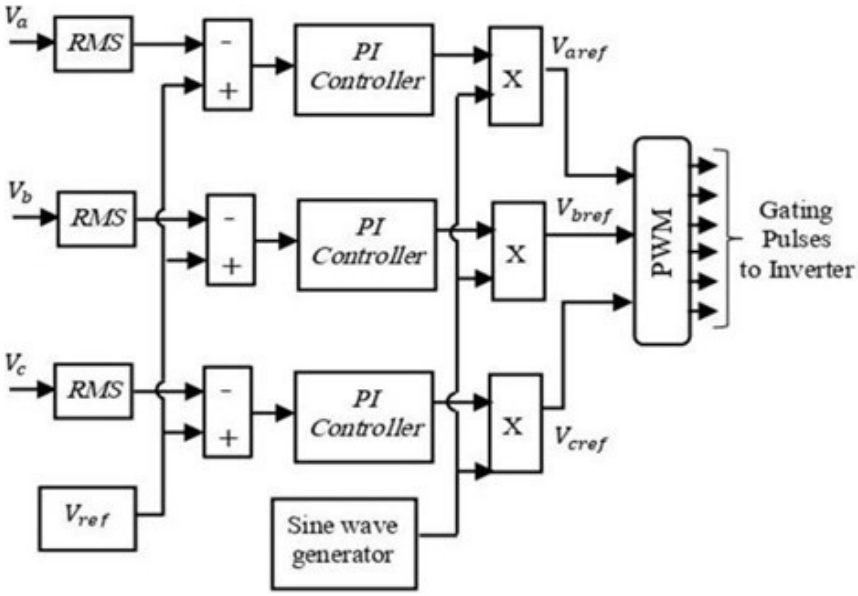


Figure 2- 10: Commande MLId'un onduleur à trois niveaux

Un onduleur triphasé côté charge fournit une tension et une fréquence stables. Dans les réseaux de distribution, les charges monophasées déséquilibrées créent des différences de courant de phase et des déséquilibres de tension. Pour réguler la tension de charge, un ajustement vectoriel de tension alimente un régulateur PI en fonction de l'erreur entre les tensions efficaces de phase et la tension de référence, comme illustré à la figure (2.10) Le régulateur multiplie la sortie par un générateur d'onde sinusoïdale unitaire afin d'obtenir les tensions de phase de référence (Varef, Vbref, Vcref) pour générer les impulsions PWM destinées à l'onduleur [37].

2.5.2. Commande complémentaire

Pour éviter le court-circuit des sources de tension par conduction de plusieurs interrupteurs, et pour que le convertisseur soit totalement commandable, on adopte une commande complémentaire.

Pour un bras k de l'onduleur triphasé à trois niveaux et en mode commandable, on définit les trois commandes complémentaires comme suit :

$$\begin{cases} Bk1=\bar{B}k2 \\ Bk_3=\bar{B}k_4 \end{cases}$$

$$\begin{cases} B_{k\bar{1}}=\bar{B}k_3 \\ Bk_2=\bar{B}k_4 \end{cases} \qquad (2.11)$$

$$\begin{cases} Bk_1=\bar{B}k_4 \\ Bk_2=\bar{B}k_3 \end{cases}$$

Commande N° 1.

- Soit la commande complémentaire suivante.
- B_km : Commande du transistor (T)_km du bras K.

La table logique correspondante à cette commande est définie dans le tableau.

Tableau 2-1: Latable d'excitation associéeàla commande complémentaire N°1.

B_{k1}	B_{k2}	B_{k2}	B_{k3}	$Tension\ de\ sortie\ du\ bras\ k\ "V_k"$
0	1	0	1	Inconnue (dépend de la charge)
0	1	1	0	V=0 ou I = 0 (inconnue)
1	0	0	1	V= 0 ou I = 0 (inconnue)
1	0	1	0	V=0

Cettecommande rendle systèmepratiquementincommandable.

Commande N°2

Soit la commande complémentaire suivante :

Tableau 2-2: La table d'excitation associée à la commande complémentaire N°2

B_{k_1}	B_{k_2}	B_{k3}	B_k^4	v_k
0	0	1	1	$-V_{c_2}$
0	1	1	0	Inconnue
1	0	0	1	Inconnue
1	1	0	0	$+Vc_1$

La commande dans ce cas n'est possible qu'à deux niveaux.

La même chose pour cette commande, le système est pratiquement incommandable.

Commande N°3

Soit lacommande complémentaire suivante :

La tablelogique correspondante à cette commande est définie dans le Tableaux 2 .3 :

Tableau2-3: La table d'excitation associéeàla commande complémentaire proposée.

B_{k_1}	B_{k_2}	B_{k3}	B_{k4}	V_k
0	0	1	1	$-Vc^2$
0	1	0	1	Inconnue
1	0	1	0	V=0
1	1	0	0	$+Vc_1$

Cette commande complémentaire rend le systèmetotalement commandable à trois niveaux. La commande N°3 est la seule qui permet d'exploiter les trois niveaux de tension de sortie possible pour un bras V_{c1} ,0,V_{c2}, avec V_{c1}=V_{c2}. C'est cette commande qui va être adopté pour la modélisation de l'onduleur à trois niveaux.

On commence par définir l'état de l'interrupteur. Elle vaut 1 si l'interrupteur est fermé et 0 dans le cas contraire, c'est-à-dire la fonction de connexion F_kmde l'interrupteur est :

$$fkm=\begin{cases} 1 & si\ TD_{km}\ est\ fermé \\ 0 & si\ TD_{km}\ est\ ouvert \end{cases} \quad (2.12)$$

En mode commandable, les fonctions de connexion de l'onduleur sont liées par cette relation :

$$\begin{cases} F_{k1} = 1 - F_{k4} \\ F_{k2} = 1 - F_{K3} \end{cases} \quad (2.13)$$

On définit la fonctiondeconnexion *Fbkm*bdu demi-bras comme suit :

$$\begin{cases} F_{k1}^b = F_{k1} \cdot F_{k2} \\ F_{k0}^b = F_{k3} \cdot F_{K4} \end{cases} \quad (2.14)$$

F^b_{k1} Est associée au demi-bras du haut (la paire (TD_{k1}, TD_{K2})) et F^b_{k0} au demi-bras du bas (la paire (TD_{k3}=TD_{k4}).

On désigne par :

$$m = \begin{cases} 1 \; pour \; le \; demi-bras \; du \; haut \\ 0 \; pour \; le \; demi-bras \; du \; bas \end{cases} \quad (2.15)$$

Le système d'équation (2.31) montre que la fonction de connexion du demi-bras F^b_{km} vaut **1** dans le cas où les deux interrupteurs du demi-bras associés à F^b_{km} sont tous fermés et nulle dans tous les autres cas.

2.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé la modélisation et la commande des différents convertisseurs statiques utilisés dans un système multi-sources combinant des sources photovoltaïques et un système de stockage par batterie. L'étude s'est concentrée sur le convertisseur DC-DC hacheur élévateur à trois niveaux, utilisé pour l'adaptation de la tension des panneaux solaires, le convertisseur DC/DC bidirectionnel permettant la gestion de l'énergie avec la batterie, le redresseur triphasé à diodes pour le couplage de la source éolienne, ainsi que le convertisseur NPC à trois niveaux, assurant un transfert d'énergie stable et de qualité vers la charge ou le réseau.

La modélisation mathématique de ces composants nous a permis de mieux comprendre leur comportement dynamique au sein d'un système multi-sources. Par ailleurs, des stratégies de commande adaptées ont été appliquées afin de garantir la stabilité du système, l'optimisation de l'énergie, ainsi qu'un fonctionnement coordonné entre les différentes sources et le stockage.

Le prochain chapitre portera sur la modélisation globale du système hybride, suivie par l'analyse des résultats issus de la simulation, afin d'évaluer les performances du système dans divers scénarios de fonctionnement.

Chapitre 03 : Simulation et discussion des résultats

3.1 Introduction

Ce chapitre présente l'étude et la simulation d'un système multi-sources PV–Batterie basé sur un convertisseur élévateur à trois niveaux. Le convertisseur est commandé par l'algorithme d'optimisation P&O associé à un régulateur PI afin d'assurer une extraction maximale de la puissance photovoltaïque, tandis qu'un régulateur PID est utilisé pour la régulation de la tension du bus continu (DC-Link) et l'amélioration de la stabilité du système face aux variations d'ensoleillement et de charge. Les résultats obtenus sous MATLAB/Simulink permettent d'évaluer les performances et l'efficacité du système proposé.

3.2 Description du système

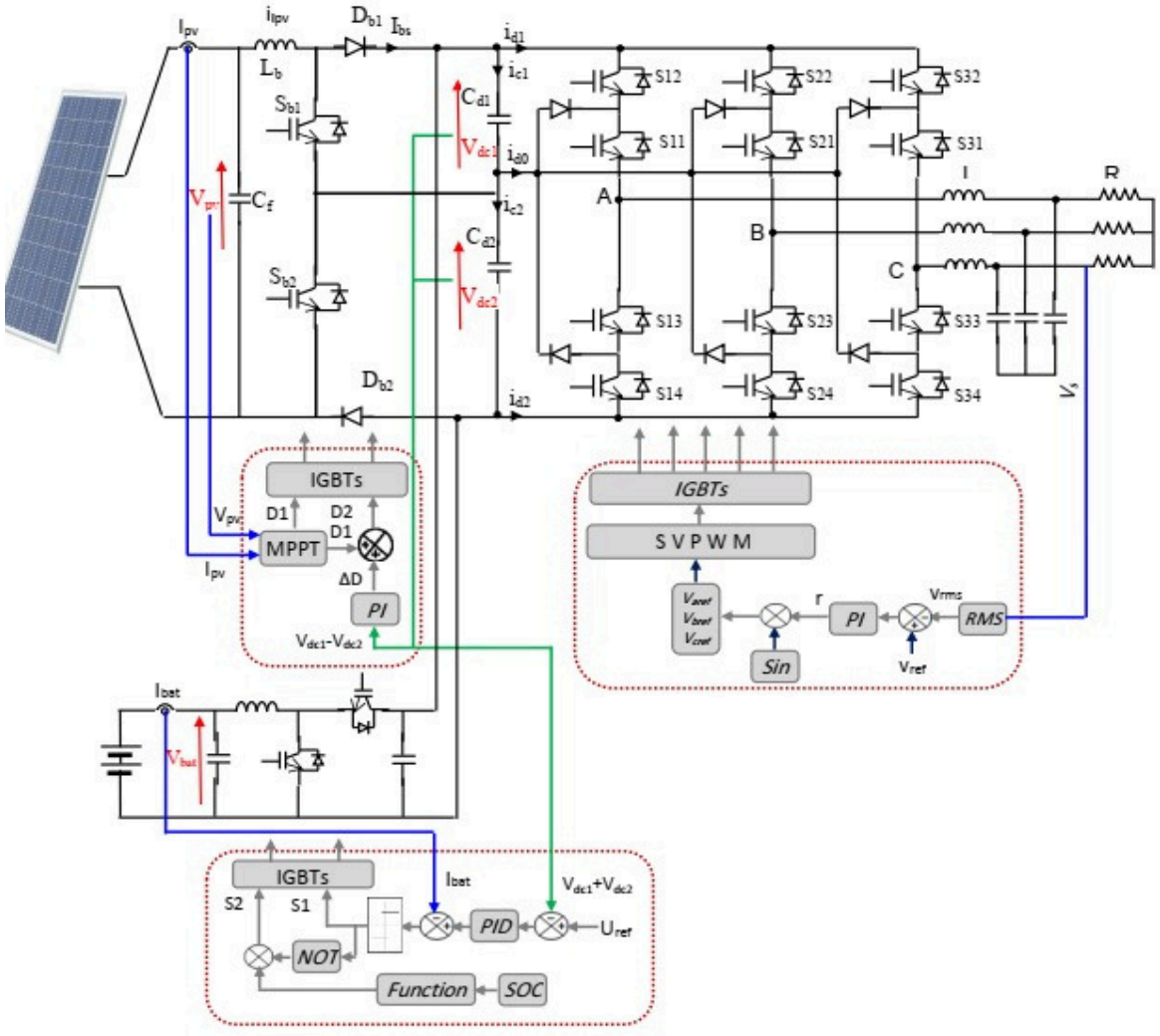


Figure 3- 1: Le système énergétique multi-sources

Le système d'énergie multi-sources présenté dans la Figure 3.1 repose sur une architecture PV–Batterie intégrant un convertisseur élévateur à trois niveaux. La commande du convertisseur est assurée par un algorithme MPPT de type P&O associé à un régulateur PI, tandis que la tension du bus continu (DC-Link) est stabilisée à l'aide d'un régulateur PID. L'objectif est d'améliorer l'exploitation de l'énergie solaire, de renforcer la stabilité et d'optimiser les performances globales du système.

3.3 Paramètres du système multi-sources.

Les paramètres du générateur photovoltaïque et le banc de batterie utilisée dans notre étude est résumé dans les Tableaux 3.1, 3.2,3.3 et 3.4 :

Tableau 3- 1: Grandeurs électriques du GPV

Paramètre	**Identification de la quantité (unité)**	**Valeur correspondante**
Voc	Tension du circuitouvert (V)	41.7984
Isc	Courant de court-circuit (A)	7.13383
Vmp	Tension au point de puissance maximale (V)	33.9
Imp	Courant au point de puissance maximale (A)	6.63419
Pmm	Puissance maximale (W)	224.9
Rs	Résistance série (Ω)	0.2043
R	Résistance parallèle (Ω)	1830.7
Isat	Courant de saturation (A)	3.0815e-07
Iph	Photon courant (A)	7.145
Qd	Facteur d'idéalité	1.6
Q	Charge élémentaire (c)	1.6*10 -19
K	Constante de Boltzmann (J/K)	1.38*10-23
Vg	L'énergie de gap (e-V)	1.2

Tableau 3- 2: Paramètres du module HIP-225HDE

Paramètres	**Valeurs**
Nombre de cellules par module	60
Nombre de modules connectés en série	6 6
Nombre de panneau connectés parallèles	

Tableau 3- 3: Paramètres du tableau PV Array.

Composants	**Valeurs de notation**
Type de module	Sanyo HIP-225HDE1
Number de cellules	60
Module série	06
Module parallèle	06
Voc, Isc, Vmmp, Immp	41.79V, 7.13A, 33.9V, 6.63A
Rs, Rp, Isoat, Iph,	00.204Ω, 1830.7Ω, 3.0815e-07A, 7.145A,

Tableau 3- 4: Paramètres de la batterie

Type de batterie	**Valeurs de notation**
Type de batterie	Lead-Acid
Tension nominal	300 V
Capacité nominale	6.5 Ah
État de charge initial	60%

3.4 Simulation et discussion des résultats.

La stratégie de contrôle du système inverse PV/Banc de batterie utilisant un 3LBC et un 3LI avec stockage, illustrée à la figure 3.1, comprend :

- Un contrôleur MPPT de type P&O est utilisé pour optimiser l'extraction d'énergie solair, tandis qu'un contrôleur PI est employé dans le convertisseur élévateur à trois niveaux (3LBC) pour stabiliser la tension du bus continu. La fonction *pidtool* de Matlab

est appliquée pour déterminer les deux paramètres du contrôleur PI. Les paramètres obtenus sont $KP = 1.02$, $KI = 355.5$,

- Un régulateur PID associé à l'algorithme de gestion de la batterie pour contrôler le convertisseur abaisseur-élévateur. La fonction *pidtool* de Matlab est appliquée pour déterminer les trois paramètres du contrôleur PID. Les paramètres obtenus sont $KP = 1.042$, $KI = 225.5$, $KD = 1.2$

La figure 3.2 illustre le profil d'irradiance solaire utilisé lors de la simulation. On observe que l'irradiance varie de manière créneau entre plusieurs paliers (1000 W/m², 700 W/m², 500 W/m²) afin de reproduire des conditions climatiques réalistes incluant le passage nuageux et les variations diurnes. Ces changements brusques d'ensoleillement permettent d'évaluer la réactivité de l'algorithme MPPT de type P&O et la robustesse du régulateur PI face aux perturbations extérieures. La réponse dynamique du système à ces transitions constitue un critère essentiel pour valider les performances globales du contrôleur proposé.

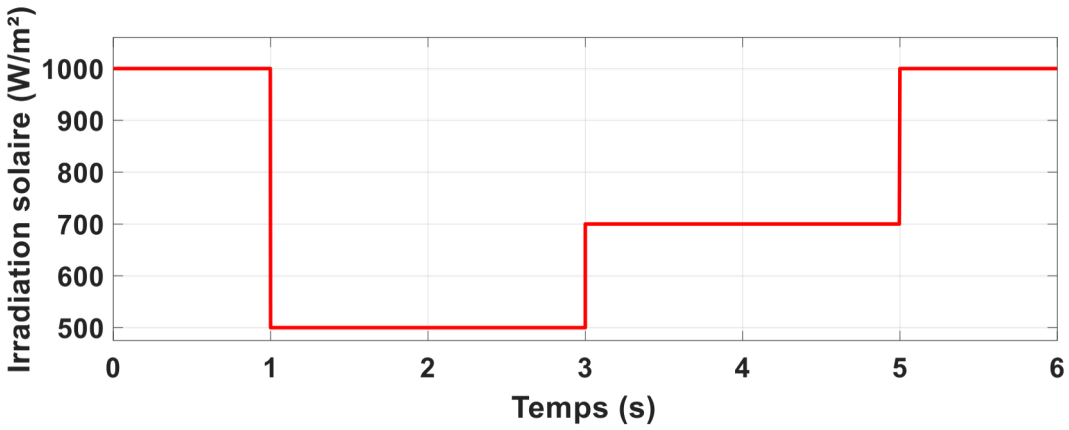


Figure 3- 2: Variations d'irradiance solaire

La Figure 3.3 illustre le profil de charge appliqué au système étudié. Celui-ci est caractérisé par plusieurs niveaux de puissance successifs permettant de reproduire les variations d'une charge réelle. Ce scénario de fonctionnement est adopté afin d'évaluer les performances du système hybride PV–batterie en termes de gestion énergétique et de stabilité. Les variations de charge permettent notamment d'examiner la capacité du régulateur PID à maintenir la tension du bus DC-link à sa valeur de référence, tout en mettant en évidence le rôle du banc de batteries dans la compensation des écarts entre la puissance produite et la puissance demandée.

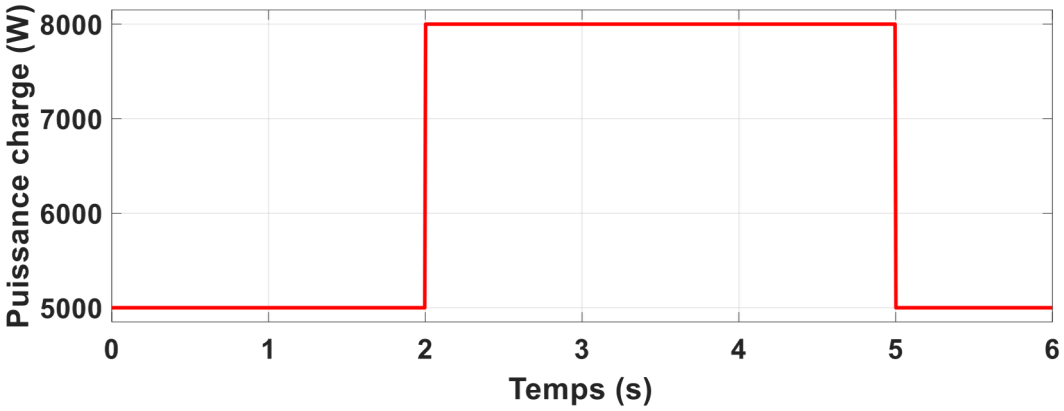


Figure 3- 3: Profile de charge

La figure 3.4 montre les signaux de commande générés pour les deux interrupteurs (Sb1 et Sb2) du hacheur élévateur à trois niveaux. Ces signaux constituent la caractéristique fondamentale du convertisseur trois-niveaux permettant de réduire l'ondulation du courant et d'augmenter la fréquence effective de commutation. Le rapport cyclique varie en fonction des conditions d'ensoleillement conformément aux consignes fournies par l'algorithme MPPT P&O et le régulateur PI, assurant ainsi l'extraction optimale de la puissance disponible du générateur photovoltaïque à tout instant.

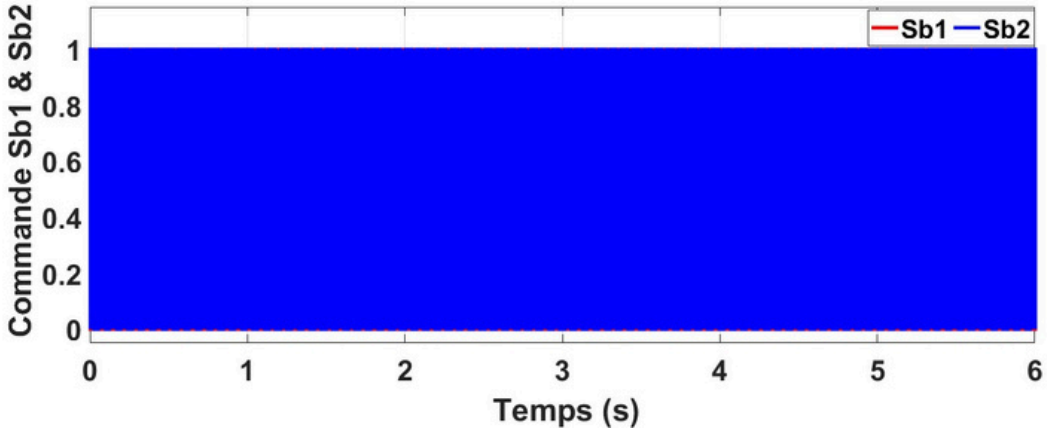


Figure 3- 4: Signal de commande du hacheur élévateur a trois niveaux

La figure 3.5 présente un zoom sur les signaux de commande Sb1 et Sb2 du hacheur élévateur à trois-niveaux. Ce grossissement permet de confirmer le déphasage entre les deux signaux de commande, qui est la condition nécessaire au fonctionnement correct du convertisseur trois-niveaux. On observe clairement que la fréquence de commutation est constante et que les fronts de montée et de descente sont nets, témoignant d'une génération correcte des signaux MLI par le contrôleur. Ce décalage temporel entre Sb1 et Sb2 engendre une réduction de l'ondulation de courant d'entrée et assure un partage équitable des contraintes de tension sur chaque interrupteur.

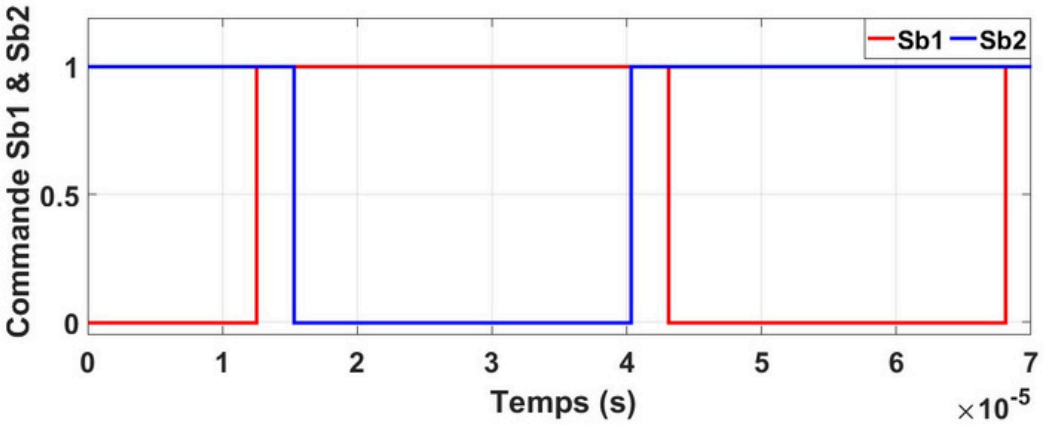


Figure 3- 5: Zoom sur signal de commande Sb1 & Sb2

La figure 3.6 représente l'évolution de la tension Vdc1, correspondant à la tension sur le premier condensateur du bus continu du hacheur élévateur à trois niveaux. Les résultats montrent que le hacheur élévateur à trois niveaux assure une meilleure stabilité de la tension Vdc1 et une réduction significative des ondulations par rapport au hacheur élévateur classique à deux niveaux.

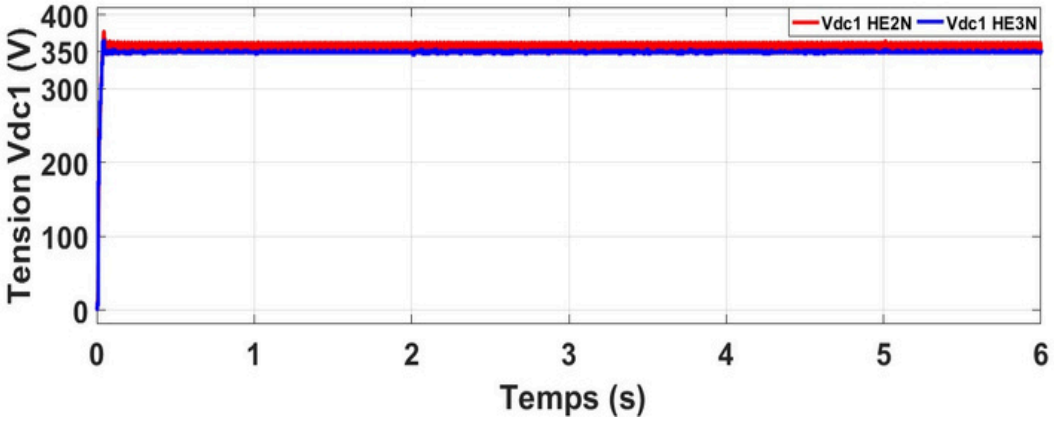


Figure 3- 6: Tension du bus continue Vdc1

La figure 3.7 présente l'évolution de la tension Vdc2, correspondant à la tension sur le deuxième condensateur du bus continu. Similairement à Vdc1, la tension Vdc2 est maintenue proche de sa valeur de référence. La comparaison entre Vdc1 et Vdc2 met en évidence l'équilibrage des tensions entre les deux condensateurs, ce qui est essentiel dans hacheur trois-niveaux pour éviter la saturation ou le déséquilibre de charge entre les étages. L'équilibre obtenu confirme la bonne conception du contrôleur d'équilibrage de tension.

Cette performance confirme la supériorité du hacheur élévateur à trois niveaux en termes de qualité de régulation et de stabilité du bus continu Vdc1 et Vdc2.

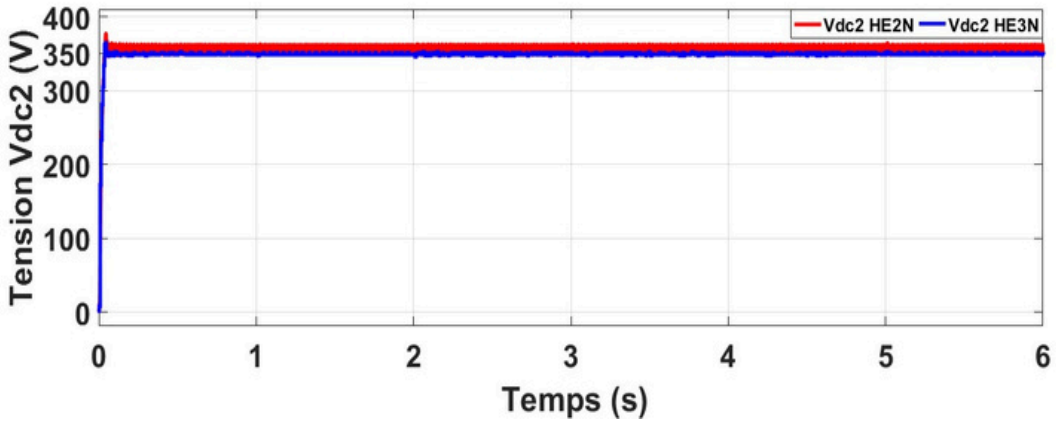


Figure 3- 7: Tension du bus continue Vdc2

La Figure 3.8 présente l'évolution simultanée de la tension Vpv et du courant Ipv fournis par le générateur photovoltaïque. Les résultats montrent que la tension Vpv reste relativement stable malgré les variations d'irradiance, tandis que le courant Ipv suit directement les fluctuations de l'ensoleillement. Grâce à l'algorithme MPPT de type P&O associé à un régulateur PI, le système maintient son fonctionnement au voisinage du point de puissance maximale (MPP). Ces résultats confirment l'efficacité de la stratégie de commande adoptée pour assurer une extraction optimale de l'énergie photovoltaïque sous différentes conditions de fonctionnement.

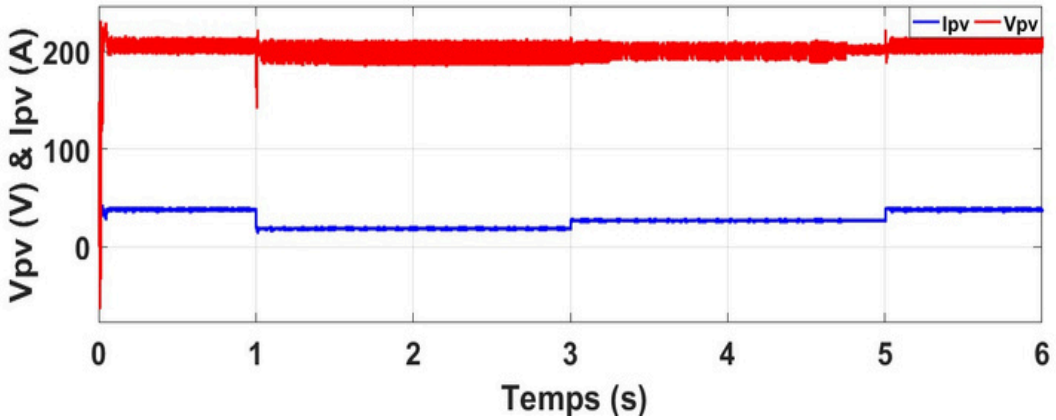


Figure 3- 8: Tension et courant du PV array

La figure III.9 présente l'évolution de la tension du bus continu Vdc-link obtenue avec le hacheur élévateur à deux niveaux HE2N et à trois niveaux HE3N. La comparaison directe des deux configurations met en évidence la supériorité du hacheur à trois niveaux, caractérisée par une réduction significative de l'ondulation de la tension et une meilleure stabilité du bus continu. En effet, la tension délivrée par le HE3N présente moins de fluctuations et un temps de rétablissement

plus rapide après perturbations. Ces résultats justifient le choix de la topologie à trois niveaux afin d'améliorer la qualité de l'énergie transmise à l'onduleur.

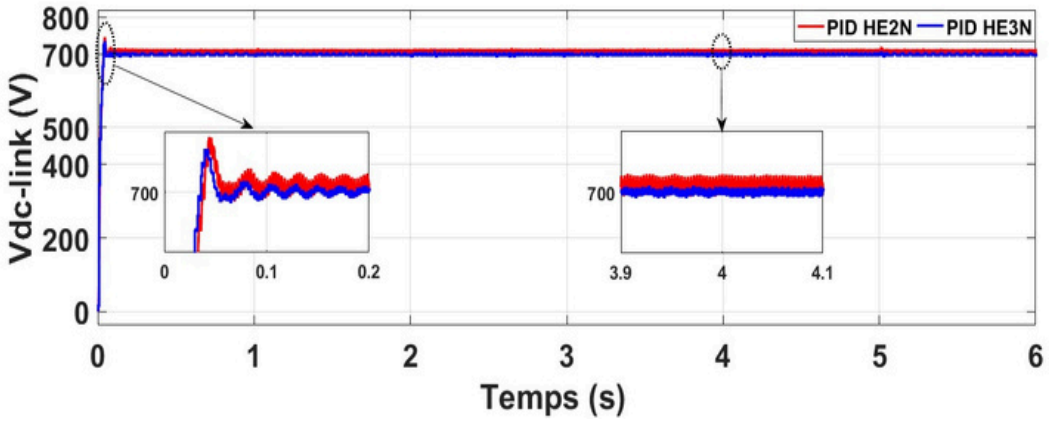


Figure 3- 9: Tension Vdc-link avec HE2N & HE3N

La figure 3.10 illustre l'évolution des puissances du système PV/Banc de batterie/Charge au cours du temps. On constate que la puissance photovoltaïque suit les variations d'irradiance tandis que la puissance de charge reste relativement stable. Le banc de batteries joue un rôle d'équilibrage en absorbant l'énergie excédentaire lors des périodes de forte production PV (énergie négative stocké dans la batterie) et en restituant de l'énergie lors des périodes déficitaires (énergie positive depuis la batterie). Ce comportement confirme la bonne gestion de l'énergie au sein du système hybride et valide la stratégie de gestion de la puissance imposée par l'algorithme de contrôle.

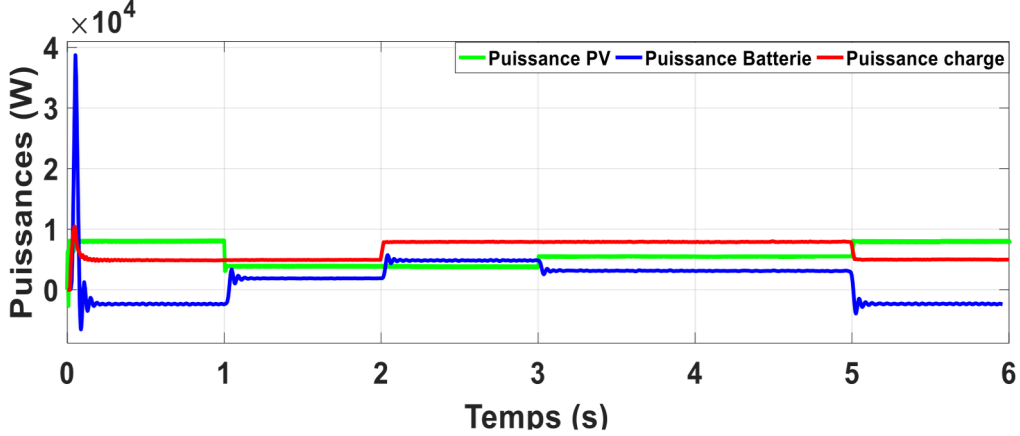


Figure 3- 10: Puissances du système PV/Banc de batterie/charge

La figure 3.11 présente le signal de commande du hacheur abaisseur-boost (S1 & S2) associé au banc de batteries. On observe que le rapport cyclique de ce signal varie dynamiquement en fonction de l'état de charge de la batterie et du bilan de puissance du système. Lorsque la production PV est supérieure à la demande, le hacheur fonctionne en mode hacheur abaisseur (charge de la batterie) ; dans le cas contraire, il fonctionne en mode hacheur élévateur (décharge).

La transition fluide entre les deux modes de fonctionnement témoigne de l'efficacité de l'algorithme de gestion de la batterie et du régulateur PID associé, garantissant une charge et décharge contrôlée de la batterie.

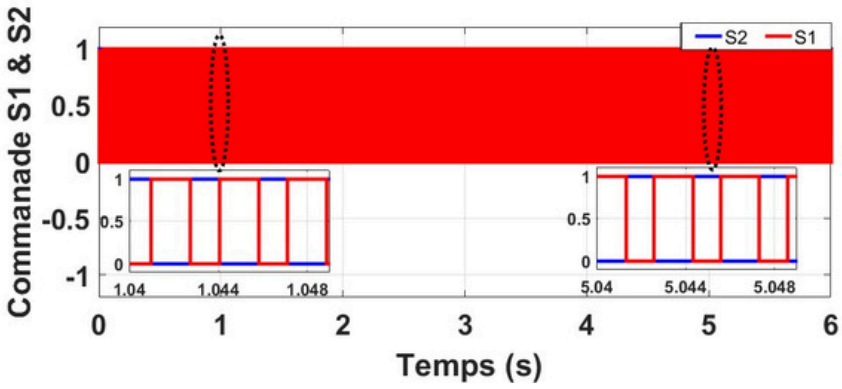


Figure 3- 11: Signal de commande du hacheur buck-boost

La figure III.12 montre l'évolution de l'état de charge SOC du banc de batteries au cours de la simulation. Le SOC varie entre les limites fixées (20% minimum, 80% maximum) en fonction du bilan énergétique du système. On constate une augmentation progressive du SOC lors des phases de forte irradiance où la production dépasse la consommation, et une diminution lors des phases de faible ensoleillement. Cette évolution contrôlée du SOC confirme que la stratégie de gestion de la batterie préserve sa durée de vie en évitant les surcharges et les décharges profondes, tout en assurant la continuité d'alimentation de la charge.

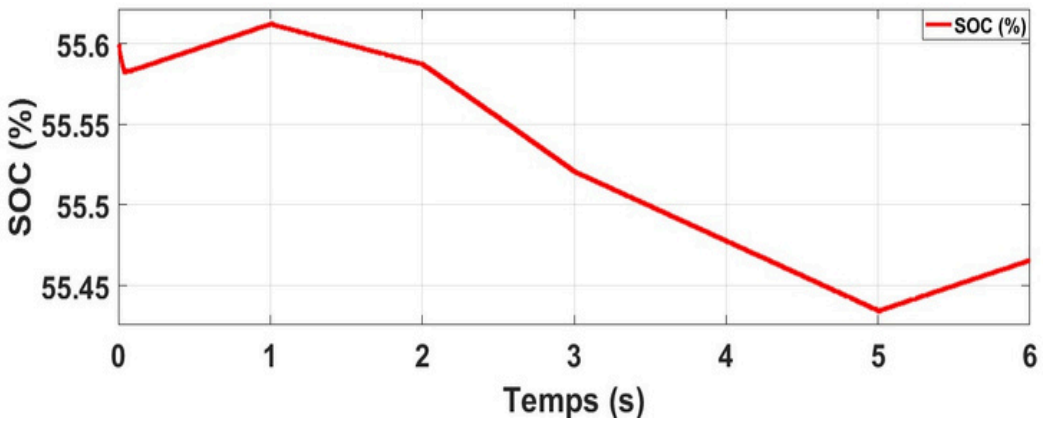


Figure 3- 12: L'état de charge du banc de batterie

La figure 3.13 présente les tensions de phase Vabc délivrées par l'onduleur NPC triphasé à la charge. On observe une forme d'onde sinusoïdale bien définie, caractéristique d'un onduleur trois-niveau a structure NPC. Les trois tensions sont déphasées de 120° l'une par rapport à l'autre.

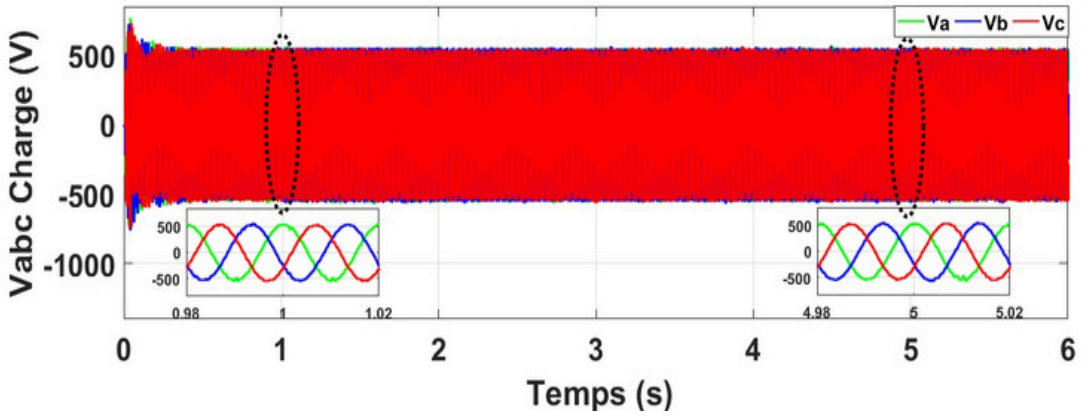


Figure 3- 13: Tensions de phase de charge V_{abc}

La figure 3.14 présente le spectre harmonique de la tension de ligne de l'onduleur NPC. L'analyse montre que le taux de distorsion harmonique acceptable (THD=1,61% < 5%), ce qui est conforme aux normes internationales (IEEE 519, CEI 61000) relatives à la qualité de l'énergie électrique injectée. Ce résultat confirme l'avantage des onduleurs trois-niveaux a structure NPC par rapport aux onduleurs conventionnels à deux-niveaux en termes de qualité de la tension de sortie.

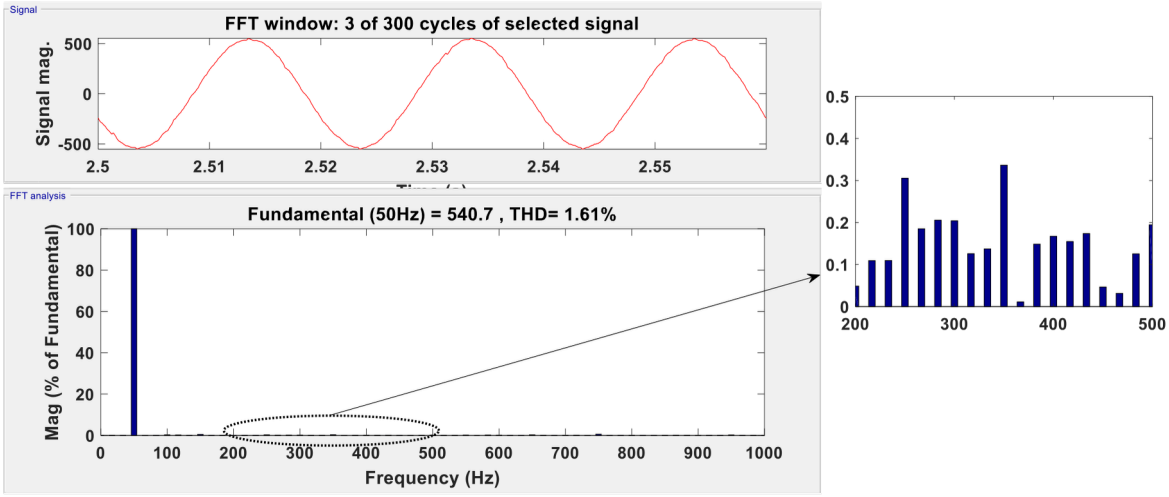


Figure 3- 14: Spectre harmonique de la tension de ligne.

La figure 3.15 montre les courants de phase iabc absorbés par la charge à travers l'onduleur a structure NPC. Les courants présentent une forme sinusoïdale satisfaisante avec un déphasage de 120°, indiquant un fonctionnement équilibré du système triphasé. L'amplitude des courants est proportionnelle à la puissance de la charge et varie cohéremment avec les fluctuations de la demande simulée. La bonne forme d'onde des courants de phase confirme l'efficacité de la stratégie de modulation adoptée pour minimiser la distorsion harmonique.

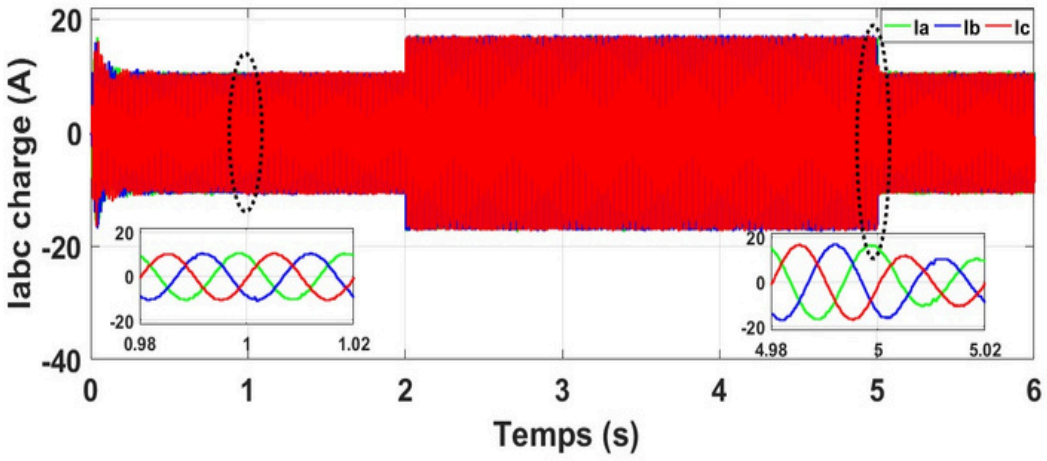


Figure 3- 15: Courants de phase de charge i_{abc}.

La figure 3.16 présente le spectre harmonique du courant de ligne délivré par l'onduleur NPC triphasé. L'analyse montre que le taux de distorsion harmonique (THD=1,61%) du courant est également inférieur à 5%, satisfaisant ainsi aux exigences des normes de qualité de l'énergie électrique. Ce résultat confirme l'efficacité de l'onduleur NPC à trois niveaux dans la production d'un courant de sortie de haute qualité, avec une distorsion harmonique minimale, ce qui le rend adapté aux applications d'injection réseau et d'alimentation de charges sensibles dans les systèmes d'énergie renouvelable.

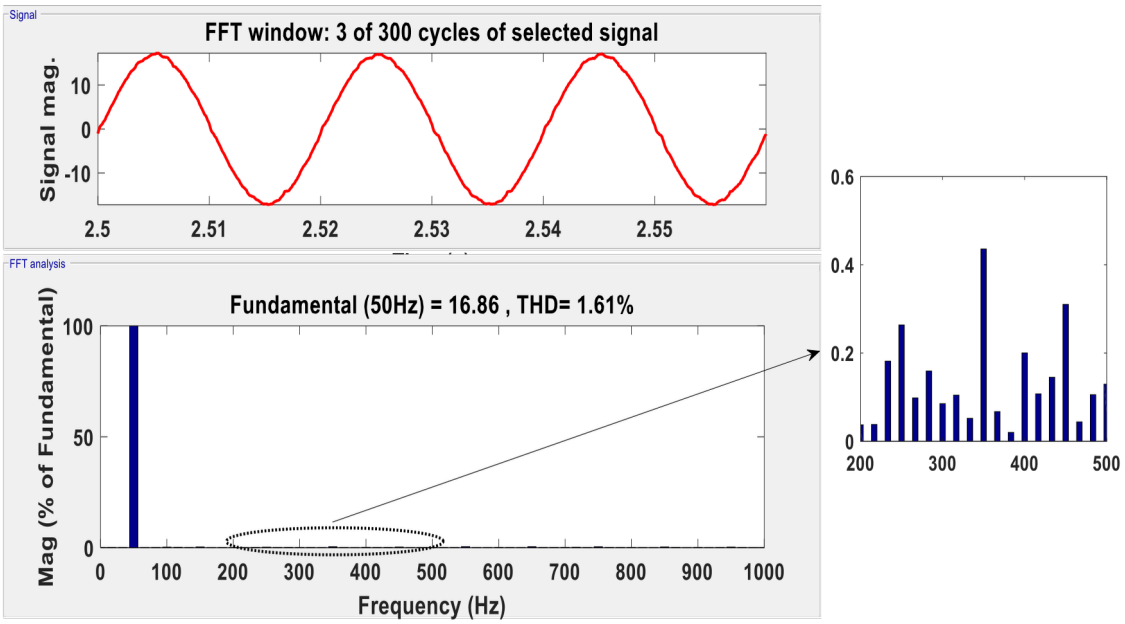


Figure 3- 16: Spectre harmonique du courant de ligne

3.5 Conclusion.

Les résultats de simulation obtenus montrent que le système multi-sources PV/Batterie basé sur un convertisseur élévateur à trois niveaux assure une gestion efficace de l'énergie photovoltaïque ainsi qu'une alimentation stable de la charge. L'intégration de l'algorithme MPPT de type P&O associé à un régulateur PI permet d'extraire efficacement la puissance maximale du générateur photovoltaïque malgré les variations des conditions d'ensoleillement.

De plus, l'utilisation d'un régulateur PID pour la régulation de la tension du bus continu (Vdc-Link) améliore la stabilité dynamique du système et réduit les fluctuations de tension. L'intégration d'un onduleur NPC triphasé côté charge contribue également à diminuer le taux de distorsion harmonique (THD) et à améliorer la qualité de l'énergie délivrée.

Conclusion générale

Dans ce mémoire, une étude approfondie d'un système hybride PV/Batterie basé sur un convertisseur élévateur à trois niveaux a été réalisée. L'objectif principal consistait à assurer une gestion efficace de l'énergie produite par le générateur photovoltaïque et stockée dans la batterie, tout en garantissant la stabilité de la tension du bus continu et la continuité de l'alimentation de la charge.

Après avoir présenté les concepts fondamentaux des systèmes multi-sources et leurs modèles mathématiques, une attention particulière a été portée à la modélisation et à la commande du convertisseur élévateur à trois niveaux. Une stratégie de commande intégrant un algorithme MPPT de type P&O et des régulateurs PI a été développée afin d'optimiser l'extraction de la puissance photovoltaïque et de maintenir la tension du bus continu à sa valeur de référence.

Les résultats de simulation obtenus sous MATLAB/Simulink ont démontré l'efficacité de la structure proposée. Le convertisseur élévateur à trois niveaux a permis d'améliorer significativement la stabilité des tensions du bus continu, de réduire les ondulations de tension et de courant, ainsi que d'augmenter les performances globales du système par rapport au convertisseur Boost conventionnel à deux niveaux. De plus, l'intégration du système de stockage a contribué à compenser les variations de production photovoltaïque et à assurer un fonctionnement fiable sous différentes conditions d'irradiance et de charge.

Comme perspective de recherche, il serait intéressant d'étendre cette étude à un système hybride multi-sources intégrant, en plus du générateur photovoltaïque et de la batterie, une source éolienne. Une telle configuration permettrait d'exploiter la complémentarité entre les ressources solaire et éolienne afin d'améliorer davantage la disponibilité énergétique et la fiabilité du système.

Par ailleurs, l'utilisation de méthodes de commande intelligentes, telles que la logique floue, les réseaux de neurones artificiels, les algorithmes génétiques ou encore les techniques d'optimisation basées sur l'intelligence artificielle, pourrait permettre d'améliorer les performances dynamiques du système, d'optimiser la gestion énergétique et d'accroître la robustesse de la commande face aux variations des conditions climatiques et des charges. Ces perspectives ouvrent la voie au développement de systèmes énergétiques intelligents, performants et adaptés aux exigences croissantes des réseaux électriques modernes

Bibliographie

[1] M. T. Vaïtchemé, "Modelisation et simulation d ' un système de stockage intégré dans un micro-réseau“ ,Thèse de doctorat, Université Du Québec En Abitibi Témiscamingue,2019. doi: Thèse de doctorat, Université Du Québec En Abitibi Témiscamingue,2019.

[2] B. Ahmed, “Optimisation d ’ un système de production d ’ énergie multi -sources,” Thèse de doctorat en electrotechnique, universuté 20 aout 1955 skikda 2022

[3] M. BOUTHAINA, “Architectures intégrées de gestion de l ’ énergie pour les multisystèmes autonomes utilisant le stockage par accumulateurs”, doi: Thèse de doctorat en electrotechnique, Université des Frères Mentouri Constantine, 2018.

[4] S. Diaf et al., “A methodology for optimal sizing of autonomous hybrid PV / wind system To cite this version,” Energy Policy, vol. 35, pp. 5708–5718, 2007.

[5] L. Merad, B. Benyoucef, and J. Charles, “Etude technico-économique d’un système hybride (aérogénérateur et moteur diesel) pour la production d’électricité.,” Afrique Sci. Rév. Int. des Sci. Technol., vol. 2, no. 2, pp. 187–197, 2010, doi: 10.4314/afsci.v2i2.61156.

[6] C. Tahar, “Modelisation et simulation d’un génerateur photovoltaïque”, doi: Mémoire Master 2, Université de Ghardaia, 2016.

[7] Lila Croci, “Gestion de l’ènergie dans un système multi-sources photovoltaique et éolien avec stockage hybride batteries/supercondensateurs”, doi: Thèse dedoctorat,Uuniversite de poitiers,France, d´ecembre 2013.

[8] “Cellule photovoltaïque – Principe de fonctionnement | Planète Énergies.” https://www.planete-energies.com/fr/medias/decryptages/la-cellule-photovoltaique-comment-ca-marche (accessed Aug. 24, 2021).

[9]

[10] Z. El Jouad, Z. El, and J. Réalisation, “Réalisation et caractérisation des cellules,” 2017.

[11] N. H. Samrat, N. Ahmad, I. A. Choudhury, and Z. Taha, “Technical Study of a Standalone Photovoltaic – Wind Energy Based Hybrid Power Supply Systems for Island Electrification in Malaysia,” pp. 1–35, 2015, doi: 10.1371/journal.pone.0130678.

S. M. and P. K. Priyabrata Shawl, Pradeep Kurnar Sahu, “Modeling and Control of a

Battery Connected Standalone Photovoltaic System", doi: 1s IEEE International Conference on Power Electronics. Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES),2016.

[12] T. Mambrini, "Caractérisation de panneaux solaires photovoltaïques en conditions réelles d'implantation et en fonction des différentes technologies", doi: Thèse de doctorat,Université paris-sud,France,Jun 2015.

[13] A. Mathematics, "An enhanced mppt method combining fractional-order and anfis control," vol. 118, no. 20, pp. 1773–1779, 2018.

[14] N. H. Samrat, N. Bin Ahmad, I. A. Choudhury, and Z. Bin Taha, "Modeling , Control , and Simulation of Battery Storage Photovoltaic-Wave Energy Hybrid Renewable Power Generation Systems for Island Electrification in Malaysia", doi: Hindawi Publishing Corporation,The Scientific World Journal Volume 2014, Article ID 436376, 21 pages,2020.

[15] B. Abdelhakim, "Conception et implémentation d ' une commande MPPT de haute performance pour une chaine de conversion photovoltaïque autonome", doi: Thèse de doctorat en science,Uuniversite Ferhat Abbas Setif 1,Octobre, 2015.

[16] N. H. Samrat, N. Ahmad, I. A. Choudhury, and Z. Taha, "Technical study of a standalone photovoltaic-wind energy based hybrid power supply systems for island electrification in Malaysia," PLoS One, vol. 10, no. 6, pp. 1–35, 2015.

[17] A. Bahri, "Modélisation et simulation d'un générateur photovoltaïque sous Matlab/Simulink," vol. 10, pp. 1–19, 2017, [Online]. Available: http://elwahat.univ-ghardaia.dz

[18] N. Rai and B. Rai, "Control of fuzzy logic based PV-battery hybrid system for stand-alone DC applications," J. Electr. Syst. Inf. Technol., vol. 5, no. 2, pp. 135–143, Sep. 2018, doi: 10.1016/J.JESIT.2018.02.007.

[19] N. Pandiarajan, R. Ramaprabha, and R. Muthu, "Application of circuit model for photovoltaic energy conversion system," Int. J. Photoenergy, vol. 2012, 2012, doi: 10.1155/2012/410401.

[20] P. Yadav, B. Tripathi, M. Lokhande, and M. Kumar, "Effect of temperature and concentration on commercial silicon module based low-concentration photovoltaic system," J. Renew. Sustain. Energy, vol. 5, no. 1, 2013, doi: 10.1063/1.4790817.

[21] N. Pandiarajan, “Photovoltaic génerator matlab/Simulink Model”, doi: 3rd International Conference on Electrical Energy Systems pp. 91–95, 2016.

[22] M. R. ROUAS, “Etude d’un système hybride éolien-photovoltaïque”, doi: Thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri De Tizi–Ouzou,2018.

[23] B. Boualam, “Supervision d’un système hybride éolienne- Photovoltaïque connecté au réseau électrique”, doi: Thèse de doctorat en science,Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene,2019.

[24] Q. Bajracharya, “Dynamic Modeling, Monitoring and Control of Energy Storage System”Thèse de doctorat , Faculty of Technology and Science, Université de Karistad, 2013. [Online]. Available: http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:608407/ATTACHMENT01.pdf

[25] A. karim Traoré, “Gestion d’un système autonome hybride photovoltaïque éolien pour applications agricoles.”, doi: Thèse de Doctorat,L’université Du Québec A Trois-Rivières,Juillet 2016.

[26] A. T. Çolak, M. Tümer, and S. Serin, “Analysis of Battery Lifetime Extension in a Small-ScaleWind-Energy System Using Supercapacitors,” Ieee Trans. Energy Conversion, vol. 25, no. 2, pp. 200–204, 2000.

[27] S. Butterbach, B. Vulturescu, C. Forgez, G. Coquery, and G. Friedrich, “Lead-acid battery model for hybrid energy storage,” 2011 IEEE Veh. Power Propuls. Conf. VPPC 2011, 2011, doi: 10.1109/VPPC.2011.6043091.

[28] B. Mohcene, “Commandes non linéaires des systèmes photovoltaïques,” Thèse de Doctorat de l’Université 8 MAI 1945 Guelma, 2018.

[29] K. Benamrane et al., “New optimized control of cascaded multilevel converters for grid tied photovoltaic power generation,” J. Eur. des Syst. Autom., vol. 54, no. 5, pp. 769– 776, 2021, doi: 10.18280/JESA.540512.

[30] R. Abdullah, N. A. Rahim, S. R. Sheikh Raihan, and A. Z. Ahmad, “Five-level diode-clamped inverter with three-level boost converter,” IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 61, no. 10, pp. 5155–5163, 2014, doi: 10.1109/TIE.2013.2297315.

[31] C. Balakishan, N. Sandeep, M. V. Aware, and P. Bauer, “Design and implementation of three-level DC-DC converter with golden section search based MPPT for the

photovoltaic applications," Adv. Power Electron., vol. 2015, 2015, doi: 10.1155/2015/587197.

[32] C. E. S. Feloups, A. I. M. Ali, and E. E. M. Mohamed, "Single-phase seven-level PWM inverter for PV systems employing multi-level boost converter," Proc. 2018 Int. Conf. Innov. Trends Comput. Eng. ITCE 2018, vol. 2018-March, no. Itce, pp. 403–409, 2018, doi: 10.1109/ITCE.2018.8316658.

[33] A. Borni, N. Bouarroudj, A. Bouchakour, and L. Zaghba, "P&O-PI and fuzzy-PI MPPT controllers and their time domain optimization using PSO and GA for grid-connected photovoltaic system: A comparative study," Int. J. Power Electron., vol. 8, no. 4, pp. 300–322, 2017, doi: 10.1504/IJPELEC.2017.085199.

[34] T. Abdelkrim, K. Benamrane, T. Benslimane, O. Abdelkhalek, and A. Borni, "Stability Study of Output Voltages of Two-Stage PV System Based Three Levels Inverter," Energy Procedia, vol. 139, no. February, pp. 658–663, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.11.268.

[35] A. Bahri, K. Benamrane, T. Abdelkrim, M. Bechouat, N. Mezhoud, and B. Ayachi, "Three-Level Boost Converter with Fuzzy Logic for PV-Battery Energy Systems in DC Voltage Control," J. Eur. des Syst. Autom., vol. 58, no. 1, pp. 1–12, 2025, doi: 10.18280/jesa.580101.

[36] B. ABDELHALIM, "Etude et optimisation d'un multi systeme hybride de conversion d'énergie électrique", doi: Thése de doctorat en sciences en electroetechnique, Université

[37] Constantine 1, 2015.

L. Carlos, D. O. S. Santos, P. Curricular, P. O. Curso, and D. E. L. Plena, "Université du quebec," Economia, vol. III, 1988.

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Université de Ghardaïa
Faculté des Sciences
et de la technologie

جامعة غرداية
كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم :الآلية والكهروميكانيك

غرداية في 2026/06/30

شعبة : الالكتروتكنيك
تخصص: طاقات متجددة في الالكتروتكنيك

شهادة ترخيص بالتصحيح والايداع:

انا الاستاذ(ة) : ZEGAOUI Abdallah

بصفتي المشرف المسؤول عن تصحيح مذكرة تخرج (ليسانس/ماستر/دكتورا) المعنونة بـ:

Étude et commande d'un Convertisseur élévateur à trois niveaux intégré dans un système PV-Batterie

من انجاز الطالب (الطلبة):

RECIOUI Noure-el-houda.

التي نوقشت بتاريخ : 2026/04/13

اشهد ان الطالب/الطلبة قد قام /قاموا بالتعديلات والتصحيحات المطلوبة من طرف لجنة المناقشة وقد تم التحقق من ذلك من طرفنا

وقد استوفت جميع الشروط المطلوبة.

Avis favorable pour le depot du mémoire de Master à la bibliothèque de faculté.

امضاء المسؤول عن التصحيح

Prof. Abdallah ZEGAOUI

مصادقة رئيس القسم

رئيس قسم الآلية والكهروميكانيك
عزاوي محمد

جامعة غرداية
قسم الآلية والكهروميكانيك
كلية العلوم و التكنولوجيا