

Étude d'une chaîne photovoltaïque connectée à un réseau à travers un onduleur multi niveaux

Mémoire présenté

dans le cadre du programme de maîtrise en ingénierie en vue de l'obtention du grade de maître ès sciences appliquées

> PAR KAHINA MAIDI

> > Octobre 2021

Composition du jury :

Mohamed Yasser Hayyani, président du jury, UQAR

Adrian Ilinca, directeur de recherche, UQAR

Richard Lekene, examinateur externe, Kraft Heinz Canada

Dépôt initial le 12 octobre 2021

Dépôt final le 26 octobre 2021

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI Service de la bibliothèque

Avertissement

La diffusion de ce mémoire ou de cette thèse se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire « *Autorisation de reproduire et de diffuser un rapport, un mémoire ou une thèse* ». En signant ce formulaire, l'auteur concède à l'Université du Québec à Rimouski une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de son travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, l'auteur autorise l'Université du Québec à Rimouski à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de son travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits moraux ni à ses droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, l'auteur conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont il possède un exemplaire.

Je dédie ce travail :

A la mémoire de ma mère et ma grand-mère

A mon papa qui n'a jamais cessé de me soutenir

A toute ma famille et amies et a tous ceux qui ont cru en moi.

viii

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, je remercie Dieu le tout puissant pour nous avoir donné la santé, le courage et la volonté, pour réaliser ce modeste travail. Je remercie Monsieur Adrian Ilinca, pour avoir accepté d'encadrer ce travail, pour sa confiance, sa disponibilité, ses encouragements et ses précieux conseils au cours de la réalisation de ce mémoire.

RÉSUMÉ

Le développement et l'intégration des énergies renouvelables dans les réseaux de production et de distribution électrique posent aujourd'hui des défis techniques majeurs. Ces réseaux doivent supporter une forte demande, être capables de réagir de façon rapide et sure aux variations de la charge électrique et des changement météorologiques, prévues et non anticipées, ainsi que d'adapter ses nouveaux moyens de production aux contraintes des utilisateurs et de l'environnement.

Dans le cadre du projet de maîtrise, l'intérêt de notre recherche est porté sur l'étude du fonctionnement d'un panneau et d'un générateur photovoltaïques ainsi que la modélisation du système photovoltaïque connecté aux réseaux à travers un onduleur multi-niveaux.

Nous suivons dans cette étude le cheminement ci-dessous :

Nous allons modéliser la chaîne photovoltaïque en utilisant Matlab-Simulink. Nous commençons par la modélisation d'un panneau photovoltaïque à une et à deux diodes.

Ensuite, nous avons étudié l'influence de ces paramètres sur les performances du panneau photovoltaïque. Les performances du panneau photovoltaïque dépendent directement des paramètres internes de ce dernier ainsi que des paramètres météorologiques.

La revue de littérature scientifique suscite souvent des problèmes d'optimisation de puissance électrique c'est-à-dire extraire le maximum d'énergie du générateur photovoltaïque nommée aussi « *Point de Puissance Maximale* » ou en anglais « Maximum PowerPoint Tracking » (MPPT). Pour obtenir un rendement maximum du panneau à tout instant, et indépendamment des variations météorologiques. Pour un meilleur suivi du point de puissance maximale nous avons étudié par la suite le

fonctionnement d'un convertisseur statique DC/DC *hacheur Buck-Boost*, et nous avons opté pour un contrôleur de poursuite du point de puissance maximale qui utilisation de la théorie de la logique floue, cette dernière a démontré une efficacité pour un bon suivie du point optimum de puissance maximale, et assure un compromis entre la rapidité en transitoire et la stabilité en régime permanent.

D'après nos recherches bibliographiques nous avons constaté que les changements météorologiques influent sur le fonctionnement permanent des générateurs photovoltaïques, causant ainsi une instabilité de la production d'énergie. Afin d'assurer un service d'alimentation continu, avons besoin d'installer des batteries de stockage, dont le schéma équivalent a été modélisé.

Puis nous avons porté intérêt au système photovoltaïque connecté au réseau, à travers un onduleur triphasé de tension à cinq niveaux NPC. Les résultats de simulation démontrent un déséquilibre entre les tensions d'entrée de l'onduleur à cinq niveaux : Uc1, Uc2, Uc3, et Uc4, qui entraîne l'instabilité des tensions de sortie, qui impacte les performances du réseau.

Enfin, pour résoudre ce problème nous avons proposé un asservissement adapté à l'onduleur par différentes techniques, en mettant en valeur la technique PI, Floue et PI-Floue.

ABSTRACT

The development and integration of renewable energies into the electrical production and distribution networks poses major technical challenges today. These networks must support a high demand, be able to react quickly and safely to variations, both expected and unanticipated, as well as adapt to the constraints of users and the environment.

Within the framework of the master project, the interest of our research is focused on the study of the operation of a photovoltaic panel and generator as well as the modeling of the photovoltaic system connected to the networks through a multi-level inverter.

In this study, we follow the path below:

We will model the photovoltaic chain using Matlab-Simulink. We start with the modeling of a one and two diode photovoltaic panel.

Then we studied the influence of these parameters on the performance of the photovoltaic panel. The performance of the photovoltaic panel directly depends on the internal parameters of the panel as well as the meteorological parameters.

The review of scientific literature often raises problems of optimization of electrical power, i.e., extracting the maximum energy from the photovoltaic generator, also called "Maximum Power Point Tracking" (MPPT). To obtain maximum yield from the panel at all times, and regardless of weather variations. For a better tracking of the maximum power point we have studied the operation of a static DC/DC chopper Buck-Boost converter, and we have opted for a tracking controller of the maximum power point that uses the fuzzy logic theory, the latter has demonstrated a robustness efficiency, and provides a compromise between the speed in transient and stability in steady state

From our literature research we found that weather changes affect the steady-state operation of photovoltaic generators, causing instability in energy production. In order to ensure a continuous power supply service, we need to install storage batteries, whose equivalent scheme has been modeled

Then we focused on the photovoltaic system connected to the grid, through a three-phase voltage inverter with five NPC levels. The simulation results show an imbalance between the input voltages of the five-level inverter: Uc1, Uc2, Uc3, and Uc4, which leads to the instability of the output voltages, which impacts the performance of the grid.

Finally, to solve this problem we proposed a suitable servo control for the inverter by different techniques, highlighting the PI, Fuzzy and PI-Fuzzy technique.

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	IX
RÉSUMÉ	XI
ABSTRACT	XIII
TABLE DES MATIERES	XV
LISTE DES TABLEAUX	XVIII
LISTE DES FIGURES	XIX
LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLESET DES ACRONYMES	XXI
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
CHAPITRE 1 : MODÉLISATION D'UN GÉNÉRATEUR PHOTOVOLTAÏQUE AVEC SUIVI DU P	OINT DE PUISSANCE
MAXIMUM	5
1.1 INTRODUCTION	5
1.2 GÉNÉRALITÉS	6
1.3 L'ÉNERGIE PHOTOVOLTAÏQUE	6
1.3.1 La cellule photovoltaïque	6
1.3.2 L'effet photovoltaïque	7
1.3.3 Le module photovoltaïque	8
1.4 MODÈLE MATHÉMATIQUE D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE	9
1.4.1 Modèle à une seule diode	9
1.4.2 Modèle électrique d'un générateur à une seule diode	
1.4.3 Modèle à deux diodes	
1.4.4 Modèle électrique d'un générateur photovoltaïque à deux diodes	
1.5 SIMULATIONS ET INTERPRÉTATIONS	15
1.5.1 Influence des paramètres météorologiques sur les caractéristiques (I-V) et (P-	V) d'un
photovoltaïque	
1.5.1.1 Influence de l'éclairement	
1.5.1.2 Influence de la température	
1.5.1.3Influence de la variation simultanée de la température et de l'éclairement	
1.6 MODÉLISATION D'UN CHAMP PHOTOVOLTAÏQUE	

	1.6.1 Association en série	21
	1.6.2 Association en parallèle	21
1.	7 STOCKAGE D'ÉNERGIE	22
1.	8 ÉTUDE SYSTÈME DE POURSUITE DU POINT MAXIMUM DE PUISSANCE	25
1.	9 CONVERTISSEUR DC/DC	26
	1.9.1 Convertisseur Buck-Boost	27
	1.9.2 Principe de fonctionnement du hacheur Buck-Boost	28
	1.9.3 Modèle mathématique du hacheur Buck-Boost	28
	1.9.4 Rapport de conversion	31
1.	10 LE CONTRÔLEUR FLOUE APPLIQUÉÀ LA POURSUITE DU POINT DE PUISSANCE MAXIMAL	31
	1.10.1 Poursuite du point de puissance maximal par un contrôleur logique floue	31
	1.10.2 Commande par la logique floue	32
	1.10.2.1 Fuzziffication	33
	1.10.2.2 Fonction d'appartenances	33
	1.10.2.3 Définition des variables d'inférences flous	34
	1.10.2.4 Défuzzification	36
	1.10.3 Tests de robustesse vis-à-vis de la variation des paramètres météorologiques	36
	1.10.3.1 Robustesse vis-à-vis des variations de l'éclairement	36
	1.10.3.2 Robustesse vis-à-vis des variations de la température	39
1.	11 CONCLUSION	41
СНА	PITRE 2 : ÉTUDE DU SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE CONNECTE AU RÉSEAU À TRAVERS UN ONDUL	EUR
MUL	TI-NIVEAUX	43
2.	1 INTRODUCTION	43
2.	2 PRÉSENTATION DU SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE ÉTUDIÉ CONNECTE AU RÉSEAU	43
2.	3 MODÉLISATION ET STRATÉGIES DE COMMANDE DE L'ONDULEUR DETENSION A CINQ NIVEAUX A	
ST	RUCTURE NPC	44
	2.3.1MODÉLISATION DU RÉSEAU ÉLECTRIQUE (ÉQUATIONS ÉLECTRIQUES DANS L'AXE ABC)	44
	2.3.2RÉSULTATS DES SIMULATIONS DU SYSTÈME PV CONNECTE AU RÉSEAU	45
2.	4 INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS	48
2.	5 CONCLUSION	48
<u></u>		N
CHAI	TIRE 3 : REGULATION DESTENSIONS D'ENTREE D'UN ONDULEUR À CINQ NIVEAUX NPC DANS U	N
2121	EIVIE 🗗 V	49

3.1 INTRODUCTION	49
3. 2 MODÉLISATION DE LA BOUCLE DE TENSION DANS LE REPÈRE ABC	49
3.3 RÉGULATION DES TENSIONS D'ENTRÉE DU BUS CONTINU DE L'ONDULEUR A CINQ NIVEAUX NPC PAR	
UN ASSERVISSEMENT PI	51
3.4RÉGULATIONS DES TENSIONS D'ENTRÉE DU BUS CONTINU DE L'ONDULEUR A CINQ NIVEAUX NPC PAR	ł
UN ASSERVISSEMENT PAR UN RÉGULATEUR FLOU	53
3.4.1 Contrôleur flou :	53
3.4.1.1 Choix des entrées et sorties	54
3.4.1.2 Univers de discours des variables d'entrée	54
3.4.1.3. Univers de discours de la variable de sortie	55
3.4.1.4 Définition du comportement du contrôleur floue	56
3.5AMÉLIORATION DE LA RÉGULATION DES TENSION D'ENTRE(Uc1,Uc2, Uc3,Uc4)PAR L'ÉLECTRONIQUE DE	:
PUISSANCE	59
3.5.1 Modélisation du pont de Clamping	59
3.5.2 Résultats de simulations du système photovoltaïque continent d'un GPV - Pont de Clamping -	
Onduleur de tension à cinq niveaux à structure NPC-Réseau infini	61
3.6 CONCLUSION	64
CONCLUSIONGÉNÉRALE	85
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	87

LISTE DES TABLEAUX

Tableau1.1 Paramètres du BPSOLAR (BP585L Saturn). Rapporté du logiciel PV Syst	16
Tableau 1.2 Matrice d'inférences (Hatti, M. 2008)	35
Tableau 3.1 Table de règles (Belkhama, A. Daas, A. 2007)	57

LISTE DES FIGURES

Figure1.1Panneaux solaires (ici.radio-canada.ca, 4 février 2020)6
Figure 1.2Schéma de principe du fonctionnement d'une cellule photovoltaïque (Angel Cid Pastor, M.2006)
Figure 1.3Schéma du modèle équivalent à une diode (Zaouche, K. 2009) (Issaadi, S. 2006)
Figure 1.4Schéma électrique équivalent pour un générateur photovoltaïque (Issaadi, S. 2006)
Figure 1.5 Schéma électrique équivalent du modèle à deux diodes de la cellule solaire (Issaadi, S. 2006)
Figure 1.6Schéma électrique équivalent d'un GPV du modèle à deux diodes (Issaadi, S. 2006)
Figure 1.7 Caractéristiques (I-V) et (P-V) d'un GPV à une et à deux diodes Matlab/Simulink15
Figure1.8 Influence de l'éclairement sur la caractéristique I-V et P-V d'un <i>PV</i> (logiciel « Pvsyst »)17
Figure 1.9L'influence de la température sur la caractéristique I-V et P-V d'un <i>PV</i> logiciel « Pvsyst »
Figure 1.10 Influence de la variation simultanée de la température et de l'éclairement sur les caractéristiques (<i>I-V</i>) et (<i>P-V</i>) d'un <i>PV</i> Matlab- Simulink19
Figure 1.11 Champ de deux générateurs photovoltaïques associés en série21
Figure 1.12 Champ de cinq générateurs photovoltaïques associés en parallèle
Figure 1.13 Modèle équivalent de la batterie (Zaouche, K. 2009 Issaadi, S. 2006)23
Figure 1.14 Le dispositif de la poursuite du Point de Puissance Maximale (Arezki, S. décembre 2017)
Figure1.15. Principe d'un hacheur (Soltani A. juin 2016)26

Figure 1.16 Allure de la tension de commande de l'interrupteur (Talha, A. & Boumaaraf, H. July 2010)
Figure 1.17 Schéma de base du convertisseur Buck-Boost (Boumaaraf, H. 2010) 2'
Figure1.18 Schéma équivalent du hacheur <i>Buck-Boost</i> pour <i>K</i> fermé (Talha, A. & Boumaaraf, H. July 2010)
Figure1.19 Schéma équivalent du hacheur <i>Buck-Boost</i> pour <i>K</i> ouvert (Talha, A. & Boumaaraf, H. July 2010)
Figure 1.20 Variation du rapport de conversion en fonction de rapport cyclique
Figure 1.21 Structure générale d'un régulateur par logique floue (Arezki,S.décembre 2017)
Figure1.22 Fonctions d'appartenances des variables <i>E</i> , <i>CE</i> et dα. ©logiciel Matlab- Simulink
Figure 1.23 Variations de l'ensoleillement en fonction du temps
Figure 1.24 Évolution de la puissance du GPV pour une variation de l'ensoleillement 3'
Figure 1.25 Évolution de la tension du GPV pour une variation de l'ensoleillement
Figure 1.26 Évolution de rapport cyclique du <i>GPV</i> pour une variation de l'ensoleillement
Figure 1.27 Variations de la température en fonction du temps
Figure 1.28 Évolution de la puissance du GPV pour une variation de la température 40
Figure 1.29 Évolution de la tension du GPV pour une variation de la température 40
Figure 1.30 Évolution du rapport cyclique du <i>GPV</i> pour une variation de la température
Figure 2.1Schéma global de la chaine PV connecté au réseau(Arezki, S. 2017) 44
Figure 3.10 Structure de la cellule du pont d'équilibrage
Figure 3.11Structure de la Cascade d'un GPV- pont de Clamping - Filtre capacitif

LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLESET DES ACRONYMES

GPV Générateur photovoltaïque

- I Courant délivré par la cellule photovoltaïque
- V Tension délivré par la cellule photovoltaïque
- VG Tension du générateur photovoltaïque
- IG Courant du générateur photovoltaïque
- Iph Courant photon généré
- I_0 Courant de saturation de la diode dépendant de la température

Io1 Courant de saturation de la première diode

Io2:Courant de saturation de la deuxième diode

- I_{0ref} Courant de saturation de la diode dans les conditions standard [A].
- Id : Courant de diode

 $I_{d\,1}$ Courant traversant la première diode de la cellule photovoltaïque

Id2 Courant traversant la deuxième diode de la cellule photovoltaïque

Ish Courant dérivé par la résistance shunt de la cellule photovoltaïque

Rs Résistance série de la cellule photovoltaïque

R_{sh} Résistance shunt de la cellule photovoltaïque

 I_{d1G} Courant traversant la première diode du générateur photovoltaïque

Id2GCourant traversant la deuxième diode du générateur photovoltaïque

RsG Résistance série du générateur photovoltaïque

RshG Résistance shunt du générateur photovoltaïque

T Température de la cellule en Kelvin(K).

q Charge de l'électron = 1.60° -19 (C).

K Constante de Boltzmann 1.38e-23 (J/K).

E Eclairement solaire (W/m^2) .

 E_0 Eclairement solaire dans les conditions standard =1000 (W/m²).

n_sNombre de cellules en séries.

n_pNombre de cellules en parallèles.

N_s Nombre de générateurs en séries

N_p Nombre de générateurs en parallèles

E Eclairement solaire $[W/m^2]$.

 E_0 Eclairement solaire dans les conditions standard =1000 [W/m²].

 T_0 Température de fonctionnement dans les conditions de référence [K].

n Facteur de diode idéale de la cellule solaire.

- *K* Constante de Boltzmann 1.38e-23 [J/K].
- q Charge de l'électron = 1.60^{e} -19 [C].

- E_{g} Energie de gap du semi-conducteur.
- μ_{Isc} Coefficient de température du courant de court-circuit =4.10⁻³ [A/K].
- ΔV_{oc} Coefficient de température de la tension de circuit (V/°C).
- ns Nombre de cellules en séries.
- $\mathbf{n}_{\mathbf{p}}$ Nombre de cellules en parallèles.
- Ns Nombre de générateurs en séries
- N_p Nombre de générateurs en parallèles.
- n₁ Facteur d'idéalité de la première diode
- n₂ Facteur d'idéalité de la première diode
- a Rapport cyclique
- Vi Tension d'entrée d'hacheur
- V₀ Tension de sortie d'hacheur
- $M(\alpha)$ Le rapport de conversion
- RI Résistance parasite
- C1 Capacité d'entrée d'hacheur
- C₂ Capacité de sortie d'hacheur
- Z Charge de convertisseur
- K Transistor bicommandable
- L Inductance du convertisseur

 $V_{\rm L}$ Tension aux bornes de l'inductance L

 I_L Courant traversant la l'inductance L

Ic1 Courant traversant la capacité d'entrée du hacheur

*I*_{C2} Courant traversant la capacité de sortie du hacheur

E(k) Erreur pour un échantillon k

CE(k) Changement d'erreur pour un échantillon k

P(k)Puissance du générateur photovoltaïque

V(k) Tension de sortie générateur photovoltaïque

Ucmoy Tension moyen d'entrée de l'onduleur à cinq niveaux

Uci Tensions d'entrée de l'onduleur à cinq niveaux

Ucref Tension de référence

 I_{d1} Courant d'entrée de l'onduleur à cinq niveaux

*I*_{d2} Courant d'entrée de l'onduleur à cinq niveaux

Id 3 Courant d'entrée de l'onduleur à cinq niveaux

 I_{d4} Courant d'entrée de l'onduleur à cinq niveaux

 $I_{d\theta}$ Courant d'entrée de l'onduleur à cinq niveaux

fp Fréquence de la porteuse [Hz]

f Fréquence de réseau

r Taux de modélisation

Ire moy Courant redressé moyen

ichmoy Courant décharge moyen

Up Tension maximale de la porteuse

Vres 1,2,3 Tension de référence

Ires_{1,2,3} Courant de référence

V_{eft} Valeur efficace de la tension de référence du réseau

Ieff Valeur efficace du courant de référence du réseau

Kp Gain proportionnel du régulateur PI (proportionnel-intégral)

Ki Gain intégral du régulateur PI (proportionnel-intégral)

Vresi Tension de la phase i=1,2,3

Iresi Courant de la phase i=1.2.3

 V_{kn} Tension liée au bras i du redresseur qui est en série avec l'impédance du réseau

 V_A , V_b , V_c Tension d'entrée du redresseur

Rres Résistance du réseau

Lres Inductance du réseau

ic Courant du filtre capacitif intermédiaire total

icmoy Courant du filtre capacitif intermédiaire moyen

C' Capacité équivalente du filtre intermédiaire

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Très peu de pays arrivent à satisfaire totalement leurs besoins en énergie électrique. Une très grande partie de la production d'énergie électrique se fait par la combustion des produits hydrocarbures à émission des gaz toxiques et à effet de serre, tel que le CO et le CO₂.Autres technologies utilisent des réactions nucléaires qui nécessitent un niveau de sécurité très élevé, et un traitement des déchets nucléaires très délicats. Les sources hydrauliques se voient de plus en plus dégradées à cause de la sécheresse qui frappe de plus en plus fort la Terre. La recherche de nouvelles sources d'énergie durables et non polluantes est devenue vitale pour l'humanité, et un défi dans le domaine de l'ingénierie. Les recherches scientifiques s'orientent actuellement vert le développement des nouvelles méthodes, ou à améliorer les anciennes méthodes d'exploitation des énergies renouvelables, telles que l'énergie éolienne et solaire. Ces sources d'énergies inépuisables, représentent un secteur porteur permettant un développement durable tout en préservant l'environnement (Chancelier, L. Laurent, E, décembre, 1996) (ADEME, Septembre 2019).

Les panneaux solaires, bien qu'ils soient de plus en plus performants, ont des rendements assez faibles. Pour cette raison il est primordial d'exploiter le maximum de puissance qu'ils peuvent générer en réduisant les pertes d'énergie. Une caractéristique importante de ces panneaux, se manifeste à leurs puissances maximales disponibles qui est fournie seulement en un seul point de fonctionnement appelé « Maximum Power Point » (MPP), défini par une tension et un courant donné. Ce point se déplace en fonction des conditions météorologiques (ensoleillement, température) ainsi que des variations de la charge électrique. Extraire le maximum de puissance nécessite donc un mécanisme de poursuite de ce point qu'on appelle MPPT (Maximum Power Point Tracking). (Chancelier, L. Laurent, E, décembre, 1996) (ADEME, Septembre 2019)

Il existe plusieurs méthodes MPPT, allant de la plus simple qui utilise une adaptation manuelle aux plus complexes qui font appel à des algorithmes compliqués soit pour les développer ou les appliquer. Alors nous avons opté dans notre étude à la méthode « floue » qui est une logique qui permet de définir des valeurs intermédiaires entre les valeurs conventionnelles pour une théorie tout à fait adaptée au problème d'optimisation. Cette dernière a prouvé sa robustesse vis-à-vis des variations climatiques.

Un système photovoltaïque connecté au réseau est constitué de plusieurs éléments. Le premier est le générateur photovoltaïque PV qui permet de convertir l'énergie solaire en électricité continue. Le générateur PV est composé d'un champ de modules photovoltaïques. Chaque module est composé de plusieurs cellules solaires élémentaires connectées les unes aux autres pour former des chaînes. Le second est le dispositif de poursuite de point maximum de puissance il est constitué d'un convertisseur DC-DC, à base d'interrupteurs électroniques tels que le MOSFET ou l'IGBT et d'une commande qui permet de varier le rapport cyclique de ce convertisseur. Le troisième élément est l'onduleur triphasé, convertisseur statique qui permet la transformation du courant continu en courant alternatif. Plusieurs structures de ces convertisseurs ont été proposées telles que les onduleurs multiniveaux à diodes flottantes ou les cellules imbriquées et ceux à structure NPC. Dans le cas de notre travail, nous étudions un onduleur à cinq niveaux. Ce dernier permet d'augmenter la puissance délivrée à la charge. Ainsi, il permet de générer une tension la plus sinusoïdale possible.

Des études ont été faites sur différents onduleurs multiniveaux à structure NPC à savoir trois, cinq, sept et neuf. Néanmoins, la fluctuation du point milieu et l'instabilité des tensions d'entrée de l'onduleur reste une problématique qui a sollicité notre intérêt (Chancelier, L. Laurent, E, décembre, 1996) (ADEME, Septembre 2019). À partir de là, notre travail a consisté d'étudier les différentes méthodes de régulation des tensions d'entrée de l'onduleur à cinq niveaux à structure NPC. L'onduleur est appliqué à un générateur PV connecté au réseau électrique de tension composé 380V et de fréquence 50Hz, qui assure le transit de puissance de la centrale vers les différents consommateurs.

Le plan de notre mémoire, composé de trois chapitres, est le suivant :

Le premier chapitre concerne la modélisation du panneau et générateur PV et du dispositif de la poursuite du point de puissance maximale dans sa partie puissance. Il s'agit notamment du convertisseur DC/DC Buck-Boost ainsi que de la partie commande par la logique floue pour la poursuite du point maximum de puissance MPPT.

Dans le deuxième chapitre, on s'intéresse à l'étude du système PV connecté au réseau infini après la modélisation et commande de l'onduleur à cinq niveaux à structure NPC et du réseau utilisé. Nous élaborons le modèle mathématique du filtre intermédiaire du bus continu. Nous mettons en évidence le problème d'instabilité des tensions aux bornes des condensateurs d'entrée de l'onduleur à cinq niveaux.

Dans le troisième chapitre, nous appliquons des algorithmes de commande énumérés cidessous pour contrôler les tensions du bus continu de l'onduleur à cinq niveaux NPC :

- L'asservissement de la tension d'entrée globale moyenne de l'onduleur à cinq niveaux par la technique classique PI
- L'asservissement de la tension d'entrée globale moyenne de l'onduleur à cinq niveaux par la technique de la logique floue.
- L'asservissement de la tension d'entrée globale moyenne de l'onduleur à cinq niveaux par la technique PI adaptée à la logique floue

Pour finaliser ce manuscrit, une conclusion générale résumera les résultats notre travail et présentera les perspectives sur les travaux futurs.

CHAPITRE 1 : MODÉLISATION D'UN GÉNÉRATEUR PHOTOVOLTAÏQUE AVEC SUIVI DU POINT DE PUISSANCE MAXIMUM

1.1 INTRODUCTION

A travers les temps, l'homme a cherché à utiliser l'énergie émise par le soleil, l'étoile la plus proche de la terre (Chancelier, L. Laurent, E, décembre, 1996). L'énergie solaire est une énergie facilement accessible qui valorise la lumière du soleil. Elle est aussi disponible partout dans le monde. De plus, les technologies solaires sont en progrès constant, avec des équipements de plus en plus efficaces, fiables et faciles à installer, un fonctionnement sans intervention ou presque (ADEME, Septembre 2019).

L'hélio électricité, qui traite de la transformation directe de l'énergie solaire en énergie électrique, est apparue en 1939 avec les cellules à oxyde de cuivre puis au sélénium. Mais ce n'est qu'à partir de 1954, avec la réalisation des premières cellules photovoltaïques au silicium dans les laboratoires de la compagnie Bell Téléphone, que l'on entrevoit la possibilité de fournir de l'énergie (Confort & Domotique, Avril 2012).

Ce chapitre consiste à établir et à étudier en premier lieu la modélisation, principe de fonctionnement d'un panneau et d'un générateur photovoltaïque pour passer en second lieu à l'extraction du point maximum de puissance du système PV par la technique MPPT (maximum power point tracking).

Le système photovoltaïque est constitué de plusieurs parties, allant d'un ensemble de cellules solaires jusqu'à la batterie (Boumaaraf, H. 2010).

1.2 GÉNÉRALITÉS

Les panneaux photovoltaïques sont un moyen connu de convertir directement la lumière en énergie électrique. Les cellules photovoltaïque ou photopiles sont réalisées à l'aide de matériaux semi-conducteurs. Le matériau de base est le silicium (Maouedj, R. 2005).



Figure1.1 Panneaux solaires (ici.radio-canada.ca, 4 février 2020)

L'énergie photovoltaïque est adaptée à une large gamme d'applications comme l'électrification rurale, l'éclairage, les télécommunications, le radiotéléphone, le pompage, la signalisation routière, aérienne et maritime, la détection, la protection (commandes de vannes de sécurité, système d'alarme...), les stations de mesures (stations automatiques météorologiques, mesures de débit de niveau, comptage de trafic) (Atersa, 2017).

1.3 L'ÉNERGIE PHOTOVOLTAÏQUE

1.3.1 La cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est composée de deux types de matériaux semiconducteurs, l'un présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit d'électrons. Ces deux parties sont respectivement dites « dopées » de type n et de type p. Le dopage des cristaux de silicium consiste à leur ajouter d'autres atomes pour améliorer la conductivité du matériau (Connaissance des énergies, mars 2017).

- Si l'atome d'impureté contient plus d'électrons que le silicium, le matériau contiendra des électrons libres en excès : il sera dit de type N (exemple : silicium dopé au phosphore)
- Si au contraire, l'atome d'impureté contient moins d'électrons que le silicium, le matériau sera déficitaire en électrons : il sera dit de type P (exemple : silicium dopé au bore)

La fabrication des cellules s'effectue à partir de lingots de silicium. Ces lingots sont découpés en fines couches de type P ou N, sont créés en y diffusant du brome ou du phosphore. Une cellule solaire est alors obtenue en constituant une jonction de deux zones de type opposé (jonction PN) (Maouedj, R. 2005).

1.3.2 L'effet photovoltaïque

Une différence de potentiel électrique apparaît dans les deux côtés N et P. le dispositif devient donc générateur électrique sous l'effet de la lumière en parle alors de l'effet photovoltaïque. La collecte de courant se fait par les contacts métalliques (électrodes). Si ces électrodes sont reliées à un circuit extérieur, un courant continu circule (Belhachat, F. 2007).

Toute l'énergie de la lumière solaire ne se transforme pas en électricité car certains photons sont réfléchis sur la face avant des photopiles, et d'autres ne sont pas assez énergétiques pour arracher un électron. Seulement les photons d'énergie suffisante sont absorbés et créent des paires électrons / trous, et enfin de nombreux électrons rencontrent des charges positives et se recombinent avant d'avoir fourni un courant utile (Angel Cid Pastor, M. 2006).



Figure 1.1Schéma de principe du fonctionnement d'une cellule photovoltaïque (Angel Cid Pastor, M.2006)

1.3.3 Le module photovoltaïque

Le module photovoltaïque est formé de cellules connectées en séries en soudant les bornes avant de chaque cellule au contact arrière de la suivante. Ces ensembles de cellules sont encapsulés dans des modules étanches qui les protègent de l'humidité, des chocs et des nuisances : il s'agit du module photovoltaïque. La face avant du module est généralement en verre et la face arrière en tedlar. Des modules bi-verre (deux faces en verre) existent, essentiellement pour l'intégration aux bâtiments.

Le nombre de cellules qui composent le module dépend de la tension et de la puissance que le module doit avoir. Ainsi l'association de plusieurs modules constitue un panneau photovoltaïque. Pour les gros générateurs, le panneau est également appelé "champ photovoltaïque" (Boumaaraf, H. 2010).
1.4 MODÈLE MATHÉMATIQUE D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE

Plusieurs modèles sont disponibles pour étudier une cellule photovoltaïque, dont le but est de décrire son fonctionnement et son comportement sous différentes conditions météorologiques (éclairement et température). Les modèles les plus utilisés sont (Abbassen, L. 2011) :

- Modèle à une seule diode
- Modèle à deux diodes

1.4.1 Modèle à une seule diode

Le modèle de la cellule photovoltaïque présenté dans la Figure 1.3 comporte une seule diode représentant la jonction PN, et une source de courant modélise la conversion de flux lumineux en courant électrique. Pour tenir compte des phénomènes physiques dissipatifs au niveau de la cellule, le modèle est complété par deux résistances : série R_s modélise les diverses résistances des différentes couches de la cellule, R_{sh} shunt caractérise le courant de fuite dans la diode et effets de bords de la jonction (Zaouche, K. 2009).



Figure 1.1Schéma du modèle équivalent à une diode (Zaouche, K. 2009) (Issaadi, S. 2006) Nous appliquons la loi de Kirchhoff aux différents nœuds on aura (Issaadi, S. 2006) :

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \tag{1.1}$$

Avec :

$$I_{ph} = \frac{E}{E_0} \left(I_{phref} + \mu_{Isc} \left(T - T_{ref} \right) \right)$$
(1.2)

Le courant de la diode est donné par : $I_d = I_0 . [\exp\left(\frac{q.(V+R_s.I)}{nkT}\right) - 1]$ (1.3)

Et:
$$I_0 = I_{0ref} \cdot (T/T_0)^3 \cdot \exp(-\frac{qE_g}{kT})$$
 (1.4)

Le courant de la résistance shunt est : $I_{sh} = \frac{V + R_s \cdot I}{R_{sh}}$ (1.5)

Nous remplaçons la valeur des courant dans l'équation (1.1) donc nous obtenons :

$$I = I_{ph} - I_0 [\exp (\frac{q.(V + R_s.I)}{nkT}) - 1] - \frac{V + R_s.I}{R_{sh}}$$
(1.6)

Comme $R_s \ll R_{sh} \Rightarrow R_s \approx 0$ et en court-circuit on aura :

$$I_0\left(\exp\left(\frac{q(I_{sc}R_s)}{nkT_0}\right) - 1\right) \cong 0 \Longrightarrow I_{ph0} = I_{sc}\left(1 + R_s / R_{sh}\right)$$
(1.7)

Pour le circuit ouvert on aura :

$$I_{0ref} = \frac{I_{ph0} - \frac{V_{oc}}{R_{sh}}}{\exp(\frac{qV_{oc}}{nkT}) - 1}$$
(1.8)

La tension du circuit ouvert sera :

$$V_{oc} = V_{ocs} + \Delta V_{oc} \left(T - T_0 \right) \tag{1.9}$$

 ΔV_{oc} : Coefficient de température de la tension de circuit (V/°C).

 I_0 : Courant de saturation de la diode [A].

 I_{0ref} : Courant de saturation de la diode dans les conditions standard [A].

- E : Eclairement solaire [W/m²].
- E_0 : Eclairement solaire dans les conditions standard =1000 [W/m²].
- T_0 : Température de fonctionnement dans les conditions de référence [K].
- *n* : Facteur de diode idéale de la cellule solaire.
- K : Constante de Boltzmann 1.38 e^{-23} [J/K].
- q : Charge de l'électron = 1.60^{e-19} [C].
- E_{σ} : Energie de gap du semi-conducteur.
- μ_{Isc} : Coefficient de température du courant de court-circuit =4.10⁻³ [A/K].

1.4.2 Modèle électrique d'un générateur à une seule diode

On peut assimiler une cellule photovoltaïque à un générateur électrique, mais avec une puissance maximale fournie faible et insuffisante pour une alimentation domestique ou industrielle. Nous avons testé différentes associations en séries et parallèles pour former un générateur (panneau), ce dernier nous fournit la puissance maximale demandée selon nos besoins. Le modèle électrique du (panneau) photovoltaïque est représenté dans la figure 1.4 (Issaadi, S. 2006).



Figure 1.2Schéma électrique équivalent pour un générateur photovoltaïque (Issaadi, S. 2006)

L'équation 1.10 résume les caractéristiques électriques d'une association en parallèle n_p branches, où chaque branche est constituée de n_s cellules élémentaires identiques.

$$\begin{cases} V_{ocG} = n_s . V_{oc} \\ I_{scG} = n_p . I_{sc} \end{cases}$$
(1.10)

ns: Nombre de cellules en séries.

 n_p : Nombre de cellules en parallèles.

Pour déterminer la l'intensité du courant électrique généré par cette cellule et en se basant sur la figure 1.4. Nous pouvons appliquer la loi de Kirchhoff au niveau des nœuds (Issaadi, S. 2006): .

$$I_{G} = I_{phG} - I_{dG} - I_{shG}$$
(1.11)

Avec :

$$\begin{cases} V_{G} = n_{s} . V \\ I_{G} = n_{p} . I \\ I_{phG} = n_{p} . I_{ph} \\ I_{dG} = n_{p} . I_{d} \\ I_{RshG} = n_{p} . I_{Rsh} \\ V_{dG} = n_{s} . V_{d} \\ R_{sG} = \frac{n_{s}}{n_{p}} . R_{s} \\ R_{shG} = \frac{n_{s}}{n_{p}} . R_{sh} \end{cases}$$
(1.12)

L'équation 1.10 sera présentée ainsi :

$$I_{G} = n_{P}I_{ph} - n_{P}I_{0} \left(\exp\left(\frac{q\left(\left(\frac{V}{n_{S}}\right) + \left(\frac{I}{n_{P}}\right)\left(\frac{n_{P}}{n_{S}}R_{S}\right)\right)}{nkT}\right) - 1\right) - n_{P}\frac{\left(\left(\frac{V}{n_{S}}\right) + \left(\frac{I}{n_{P}}\right)\left(\frac{n_{P}}{n_{S}}R_{S}\right)\right)}{\left(\frac{n_{P}}{n_{S}}R_{sh}\right)}$$
(1.13)

Après simplifications, on aura :

$$I_G = n_P I_{ph} - n_P I_0 \left(\exp\left(\frac{q \left(V + IR_s\right)}{n_s nkT}\right) - 1 \right) - \frac{\left(V + IR_s\right)}{R_{sh}}$$
(1.14)

1.4.3 Modèle à deux diodes

Le modèle a deux diodes, représenté dans la Figure 1.5, est composé d'une source de courant modélisant l'éclairement solaire. Les pertes par effet Joule sont modélisées par les résistances R_{sh} et R_s et les deux diodes : soit une qui caractérise la jonction PN et l'autre modélise le phénomène de recombinaison des porteurs minoritaires (Issaadi, S. 2006).



Figure 1.3 Schéma électrique équivalent du modèle à deux diodes de la cellule solaire (Issaadi, S. 2006)

Alors, pour calculer le courant dans ce cas, nous appliquons la loi de Kirchhoff aux différents nœuds on aura :

$$I = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} - I_{sh}$$
(1.15)

$$I = I_{ph} - I_{01} [\exp\left(\frac{q (V + R_s.I)}{n_1 kT}\right) - 1] - I_{02} [\exp\left(\frac{q (V + R_s.I)}{n_2 kT} - 1\right] - \frac{V + R_s.I}{R_{sh}}$$
(1.16)

Avec:

$$I_{01} = K_1 \cdot T^3 \cdot \exp(\frac{-qEg}{K \cdot T})$$
(1.17)

$$I_{02} = K_2 \cdot T^{5/2} \cdot \exp(\frac{-qEg}{K \cdot T})$$
(1.18)

Avec: $K_1 = 1.2 \text{ A/cm}^2 \cdot \text{K}^3$, $K_2 = 2.9 \cdot 10^5 \text{ A/cm}^2 \cdot \text{K}^{5/2}$.

1.4.4 Modèle électrique d'un générateur photovoltaïque à deux diodes

Le modèle électrique d'un générateur panneau photovoltaïque à deux diodes est représenté sur la Figure 1.6 (Issaadi, S. 2006) :



Figure 1.4Schéma électrique équivalent d'un GPV du modèle à deux diodes (Issaadi, S. 2006)

En appliquant la loi de Kirchhoff aux différents nœuds on aura :

$$I_{G} = I_{phG} - I_{d1G} - I_{d2G} - I_{shG}$$
(1.19)

La simplification de l'équation donne (Issaadi, S. 2006) :

$$I = n_p I_{ph} - n_p I_{01} \cdot \left[\exp\left(\frac{q \cdot (V + R_s \cdot I)}{n_s n_1 \cdot K \cdot T}\right) - 1\right] - n_p I_{02} \cdot \left[\exp\left(\frac{q \cdot (V + R_s \cdot I)}{n_s n_2 \cdot K \cdot T} - 1\right) - \frac{V + R_s \cdot I}{R_{sh}}$$
(1.20)

1.5 SIMULATIONS ET INTERPRÉTATIONS

Pour le choix de panneau solaire, on a opté pour BP SOLAR [BP585L, Saturn]. Le panneau est composé de 36 cellules connectées en série et qui génère une puissance maximale de 85 W. En utilisant Matlab/Simulink dans les conditions standard (T=25 °C et $E=1000 \text{ W/m}^2$) pour $R_s = 0.46 \Omega$ et $R_{sh} = 300 \Omega$. Nous avons établi nos modèles de référence décrivant les différentes caractéristiques *I-V*et *P-V* pour une diode et à deux diodes respectivement (Arezki, S. décembre 2017) (Figure 1.7). Ceci va servir pour la comparaison que nous allons effectuer plus loin dans ce travail.



Figure 1.1 Caractéristiques (I-V) et (P-V) d'un GPV à une et à deux diodes Matlab/Simulink

Afin de valider le modèle de notre générateur photovoltaïque, une étude comparative entre ce dernier et celui du modèle réel obtenue à l'aide du logiciel « PV syst ». On a comparé notre résultat de simulation avec le tableau suivant donné par « PVsyst » ce qui nous a permis de valider notre panneau.

Paramètre	Unité	Valeurs
Cod.de référence	Gref [W/m ²]	1000
Courant de court-circuit	Isc [A]	5
Point de puissance max	Impp [A]	4.27
Coefficient de température	muIsc [ma/°C]	1.2
coenteient de temperature	muIsc [%/°C]	0.024
Circuit ouvert	Voc [V]	22
μVoc	[mV/°C]	-69
Resistance en série	Rs [ohm]	0.46
Resistance en parallèle	Rp [ohm]	300
Nbrde cellules	En série	36
Vmmp	[V]	18

Tableau1.1 Paramètres du BPSOLAR (BP585L Saturn). Rapporté du logiciel PV Syst

1.5.1 Influence des paramètres météorologiques sur les caractéristiques (I-V) et (P-V) d'un photovoltaïque

Les caractéristiques du *PV* dépendent des conditions météorologiques. Dans cette partie, nous étudions l'influence de ces conditions sur les caractéristiques de sortie du générateur photovoltaïque. Les figures suivantes représentent le modèle du PV à une diode obtenue par le logiciel « Pvsyst ».

1.5.1.1 Influence de l'éclairement

La Figure1.8 représente les caractéristiques courant-tension, puissance-tension d'un photovoltaïque pour différentes valeurs de l'éclairement, à une température constante.



Figure1.2 Influence de l'éclairement sur la caractéristique I-V et P-V d'un *PV* (logiciel « Pvsyst »).

On constate que le courant de court-circuit produit par la photopile augmente proportionnellement à l'éclairement solaire, par contre la tension varie légèrement. Ceci veut dire que le point de puissance maximale (*PPM*) est proportionnel à l'éclairement pour la valeur de tension correspondante.

1.5.1.2 Influence de la température

Nous présentons à la Figure 1.9 les caractéristiques (*I-V*) et (*P-V*) pour différentes températures de fonctionnement d'un PV à une irradiation constante($E=1000W/m^2$).



Figure 1.3L'influence de la température sur la caractéristique I-V et P-V d'un *PV* logiciel « Pvsyst ».

Ce résultat a permis de constater que la température a une influence négligeable sur le courant de court-circuit I_{sc} . Par contre, elle a un effet direct sur la tension du circuit ouvert V_{oc} puisque cette dernière baisse assez fortement lorsque la température augmente et par conséquent, la puissance diminue.

1.5.1.3Influence de la variation simultanée de la température et de l'éclairement

Dans les conditions réelles, la température et l'éclairement varient simultanément. Alors, il est primordial d'étudier le comportement de la cellule photovoltaïque en fonction de ces variations simultanées (Figure 1.10).



Figure 1.4 Influence de la variation simultanée de la température et de l'éclairement sur les caractéristiques (*I-V*) et (*P-V*) d'un *PV* Matlab- Simulink

On remarque que la variation simultanée des paramètres météorologiques induit une variation simultanée de la tension V_{oc} et du courant I_{sc} ce qui engendre une variation aléatoire du point de puissance maximale.

Par ailleurs, on constate que le modèle à une diode nous a permis d'obtenir des caractéristiques très proches de celles du générateur photovoltaïque réel. Par conséquent, pour la suite de notre travail on utilisera le modèle à une seule diode(Arezki, S. décembre 2017).

1.6 MODÉLISATION D'UN CHAMP PHOTOVOLTAÏQUE

La cellule photovoltaïque élémentaire constitue un générateur électrique de très faible puissance au point de vue des besoins de la plupart des applications domestiques ou industrielles. Par conséquent, les panneaux photovoltaïques sont réalisés par association de plusieurs cellules élémentaires dans le but d'augmenter leur puissance. Ces cellules sont commercialisées sous la forme de modules photovoltaïques associant, généralement en série pour élever la tension, un certain nombre de cellules élémentaires de caractéristiques identiques.

Suivant les besoins de l'utilisation, ces modules sont ensuite associés en réseau sérieparallèle de façon à obtenir un champ photovoltaïque de tension et le courant désirés. Cette association doit être réalisée en respectant des critères précis, en raison des déséquilibres apparaissant dans un réseau de photopiles au coure de son fonctionnement. Le courant et la tension de sortie du champ de modules photovoltaïques utilisant le modèle à une diode sont liés par les deux relations 1.21 et 1.22 (Issaadi, S. *2006)* :

$$I = n_p N_p I_{ph} - n_p N_p I_0 \left(\exp\left(\frac{q\left(\frac{V}{N_s} + \frac{I.R_s}{N_p}\right)}{n_s \ n \ k \ T}\right) - 1\right) - n_p N_p \frac{\left(\frac{V}{N_s} + \frac{I.R_s}{N_p}\right)}{R_{sh}}$$
(1.21)

Ou bien :

$$I = n_{p} N_{P} I_{ph} - n_{p} N_{P} I_{0} \left(\exp\left(\frac{q(V+I.R_{s})}{n_{s} N_{s} k n T}\right) - 1\right) - n_{p} N_{P} \frac{(V+I.R_{s})}{R_{sh}}$$
(1.22)

Avec :

Ns : Nombre de générateurs en séries.

 N_p : Nombre de générateurs en parallèles.

1.6.1 Association en série

Pour augmenter la tension dans un champ de module photovoltaïque, on monte une association série des modules car la tension augmente proportionnellement avec le nombre de modules en série (Issaadi, S. 2006) (Figure 1.11).



Figure 1.1 Champ de deux générateurs photovoltaïques associés en série

1.6.2 Association en parallèle

Pour augmenter l'intensité du courant, on monte en parallèle des modules car l'intensité du courant augmente proportionnellement avec le nombre de modules en parallèle dans une branche, et la tension d'une branche sera égale à la tension de chaque module, comme le démontre la figure ci-dessous (Issaadi, S. 2006).



Figure 1.2 Champ de cinq générateurs photovoltaïques associés en parallèle

1.7 STOCKAGE D'ÉNERGIE

A cause de l'intermittence de l'énergie solaire, l'utilisation des batteries pour le stockage d'énergie est nécessaire pour garantir une disponibilité permanente et constante de l'énergie, quelles que soient les variations des paramètres météorologiques.

Le système de stockage utilise généralement les batteries d'accumulateurs électrochimiques. Elles sont des générateurs "réversibles" c'est à dire pouvant stocker l'énergie électrique sous forme chimique (pendant la charge), puis la restituer à tout moment sur demande (pendant la décharge) grâce à la réversibilité des réactions mises en jeu (Abbassen, L. 2011, Zaouche, K Issaadi, S. *200)*. Ces réactions consistent en des oxydations et des réductions au niveau des électrodes.

Il existe plusieurs types de batteries, nous citons par exemple, les batteries avec accumulateurs au plomb-acide (*Pb-acide*) et au nickel-cadmium (*Ni-Cd*). Dans ce qui suit on va étudier le modèle le plus utilisé dans le domaine photovoltaïque, c'est les batteries au

plomb-acide (Zaouche, K. 2009 Issaadi, S. 2006). La Figure (1.13) représente le modèle équivalent de la batterie au plomb-acide.



Figure 1.1 Modèle équivalent de la batterie (Zaouche, K. 2009 Issaadi, S. 2006)

L'expression générale de l'énergie s'exprime comme suit :

$$E_{c} = \frac{1}{2} C V_{c}^{2}$$
(1.23)

Avec C la capacité et V_C la tension du condensateur.

Les batteries à accumulateur plomb-acide ne se déchargent jamais complètement (Abouchabana, N. 2009), à cause du fonctionnement des deux condensateurs qui basculent toujours entre deux niveaux d'énergie E_{Cmin} et E_{Cmax} (le niveau maximal ne peut pas être audessus de 95 % et le niveau minimal ne peut pas être au-dessous de 40%). Ceci est indiqué par l'équation suivante :

$$E_{b} = E_{C \max} - E_{C \min} = \frac{1}{2} C_{2} \left(V_{oc}^{2} \max - V_{oc}^{2} \min \right)$$
(1.24)

Avec :

 E_b : L'énergie de la batterie donnée par le constructeur [kWh].

V_{ocmin}: Niveau de tension minimal de la batterie.

Vocmax: Niveau de tension maximale de la batterie.

La tension de batterie peut s'exprimer en fonction de sa tension en circuit ouvert V_{oc} et des autres composants internes R_1 , R_2 , R_3 et C_1 comme suit (Zaouche, K. 2009):

$$V_{b} = V_{oc} + R_{1} \left(1 - e^{-t/\tau} \right) i_{b} + R_{2} i_{b}$$
(1.25)

Avec: $\tau = R_1 C_1$

L'impédance de sortie équivalente d'une batterie plomb-acide en utilisant la transformée de Laplace est donnée par :

$$Z(s) = Z_{R_2}(s) + Z_{R_1}(s) / / Z_{C_1}(s) + Z_{R_3}(s) / / Z_{C_2}(s)$$
(1.26)

Alors :

$$Z(s) = R_2 + \left(\frac{R_1}{R_1C_1s + 1}\right) + \left(\frac{R_3}{R_3C_2s + 1}\right)$$
(1.27)

Après développement et simplification on aura :

$$Z(s) = \frac{a_2 s^2 + a_1 s + a_0}{b_2 s^2 + b_1 s + b_0}$$
(1.28)

Les coefficients représentants les composants de l'impédance d'entrée du circuit équivalent de la batterie plomb-acide s'exprime comme suit :

$$\begin{cases} a_{2} = R_{2}b_{2} \\ a_{1} = R_{2}b_{1} + R_{1}R_{3}(C_{1} + C_{2}) \\ a_{0} = R_{1} + R_{2} + R_{3} \\ b_{2} = R_{1}R_{3}C_{1}C_{2} \\ b_{1} = R_{1}C_{1} + R_{3}C_{2} \\ b_{0} = 1 \end{cases}$$

$$(1.29)$$

Ces équations peuvent être implémentées directement dans un bloc *Simulink* pour être utile dans la simulation.

1.8 ÉTUDE SYSTÈME DE POURSUITE DU POINT MAXIMUM DE PUISSANCE

Pour remédier à ces problèmes, des lois de commandes spécifiques ont été conçues et mises au point afin de permettre à ces dispositifs de produire leur maximum de puissance électrique, quelle que soit la charge. Ce type de commande est souvent nommé dans la littérature 'Recherche du Point de Puissance Maximale' ou bien 'Maximum Power Point Tracking en anglo-saxon (MPPT). Le principe de base, comme l'indique son nom, commun à toutes ces commandes est d'effectuer une recherche permanente du point de puissance maximale (PPM).

Ainsi, la principale fonction effectuée par ces commandes est d'assurer, à tout instant, une parfaite adaptation entre le générateur PV et sa charge fonctionnant au point de puissance maximale (Issaadi, S. 2006).

L'adaptation entre la source et la charge est réalisée par l'insertion d'un convertisseur DC-DC (hacheur) contrôlé par un mécanisme de poursuite (*Maximum Power Point Tracking*) pour extraire le maximum de la puissance fournie par le générateur photovoltaïque, cela est fait par la variation du rapport cyclique *d* (Tsamad, A. Mahmoud, K., 2007).

Dans cette partie, nous allons étudier la commande MPPT avec la méthode intelligente logique floue, cette dernière va nous permettre d'améliorer les performances du control du MPPT Figure (1.14).



Figure 1.1 Le dispositif de la poursuite du Point de Puissance Maximale (Arezki, S. décembre 2017)

1.9 CONVERTISSEUR DC/DC

Les convertisseurs statiques DC/DC (continu-continu) dits aussi hacheurs, permettent d'obtenir une source de tension continue variable à partir d'une source de tension continue fixe. La Figure 1.15 représente le principe d'un hacheur.



Figure 1.1. Principe d'un hacheur (Soltani A. juin 2016)

Les composants électroniques constituant le hacheur sont (Boumaaraf, H. 2010) : condensateurs, inductance et commutateur. Le commutateur est réalisé avec un dispositif semi-conducteur qui peut être un transistor, *MOSFET* ou un *IGBT*.

Pendant le fonctionnement du hacheur, le commutateur sera commuté à une fréquence constante *f*, avec un temps de fermeture égal à αT et un temps d'ouverture égal $(1-\alpha) T$, où :

> T : est la période de commutation qui est égale à 1/f.

> α : le rapport cyclique du commutateur ($\alpha \in [0 \ 1]$) figure 1.16



Figure 1.2 Allure de la tension de commande de l'interrupteur (Talha, A. & Boumaaraf, H. July 2010)

Il existe trois types de convertisseur continu-continu (DC/DC);

- ➤ Convertisseurs Buck (abaisseur);
- Convertisseurs *Boost* (élévateur) ;
- Convertisseurs *Buck-Boost* (abaisseur-élévateur).

Dans notre travail, on s'intéressera ou convertisseur Buck-Boost.

1.9.1 Convertisseur Buck-Boost

Le convertisseur *Buck-Boost*, caractérisé par une fonction de transfert qui peut être, soit supérieur soit inférieur à l'unité (tension d'entrée) (Wichert, B. 2000) (Beriber, D.2010, Talha, A. &Boumaaraf, H. July 2010).



Figure 1.3 Schéma de base du convertisseur Buck-Boost (Boumaaraf, H. 2010)

Les composants C_I , C_2 et L ont, comme rôle, de filtrer le courant et minimiser l'ondulation de la tension, par contre la diode sert à l'évacuation de l'énergie au niveau de l'inductance L emmagasiné lors de la fermeture de l'interrupteur (Issaadi, S. (2006). Ce sont des éléments réactifs, dans le cas idéal, ils ne consomment aucune énergie, ce qui augmente le rendement.

1.9.2 Principe de fonctionnement du hacheur Buck-Boost

Le principe de fonctionnement du hacheur *Buck-Boost* est basé essentiellement sur la position du commutateur K ouvert/fermé. Lorsque ce dernier est fermé, la diode est bloquée alors, une tension va s'appliquée au niveau de l'inductance L qui emmagasine une énergie. Cette opération va durer jusqu'à l'ouverture de l'interrupteur K. Quand cette action sera faite, la diode sera passante, et l'énergie emmagasinée ce fait dissipée dans la charge, où le courant circule dans le sens inverse d'une aiguille de montre à travers la diode, et ainsi la tension de sortie sera négative (Beriber, D. 2010).

1.9.3 Modèle mathématique du hacheur Buck-Boost

Pour bien comprendre le comportement réel de ce convertisseur, une étude détaillée de son modèle mathématique est nécessaire. Les figures 1.18 et 1.19 représentent respectivement les deux schémas des circuits équivalents d'un convertisseur *Buck-Boost* pour les deux périodes de fonctionnement. Les variables dynamiques I_L , V_0 et V_i sont associées aux composants dynamiques L, C_1 et C_2 (Beriber, D. 2010).



Figure 1.4 Schéma équivalent du hacheur *Buck-Boost* pour *K* fermé (Talha, A. & Boumaaraf, H. July 2010)

Première phase : $0 < t < \alpha T$: *K* est fermé et la diode est bloquée.

En appliquant les lois de Kirchhoff, on obtient le système d'équations différentielles illustre le fonctionnement du hacheur *Buck-Boost* suivant :

$$\begin{cases} I_{c_{1}} = c_{1} \frac{dV_{i}}{dt} = I_{i} - I_{L} \\ I_{c_{2}} = c_{2} \frac{dV_{0}}{dt} = -I_{0} \\ V_{L} = L \frac{dI_{L}}{dt} = V_{i} \end{cases}$$
(1.30)

Deuxième phase : $\alpha T < t < T : K$ est ouvert et la diode passante.



Figure 1.5 Schéma équivalent du hacheur *Buck-Boost* pour *K* ouvert (Talha, A. & Boumaaraf, H. July 2010)

Le système d'équations différentielles qu'illustre le fonctionnement du hacheur *Buck-Boost* s'exprime comme suit :

$$\begin{cases}
I_{c_{1}} = c_{1} \frac{dV_{i}}{dt} = I_{i} \\
I_{c_{2}} = c_{2} \frac{dV_{0}}{dt} = -I_{0} - I_{L} \\
V_{L} = L \frac{dI_{L}}{dt} = V_{0}
\end{cases}$$
(1.31)

Les valeurs moyennes, de la tension et du courant en régime permanent, où la continuité est maintenue pendant la commutation de transistor seront exprimé comme suit :

$$\begin{cases} V_{L,moy} = \frac{1}{T} \int_{0}^{T} V_{L}(t) \ dt = 0 \\ I_{L,moy} = \frac{1}{T} \int_{0}^{T} I_{L}(t) \ dt = 0 \end{cases}$$
(1.32)

Pour simplifier l'étude de notre hacheur nous adoptons les hypothèses suivantes (Issaadi, S. 2006) :

- ◆ La période de hachage (commutation du l'interrupteur K) est largement inférieure aux différentes constantes de temps du système
- Le courant traversant l'inductance ne s'annule pas durant toute la période de hachage.

Dans ces conditions, on peut écrire l'équation1.33, qui est une représentation dynamique approximée valable sur toute la période de hachage.

$$\begin{cases} I_{c1} = C_1 \frac{dV_i}{dt} = I_i - \alpha \ I_L \\ I_{c2} = C_2 \frac{dV_0}{dt} = (\alpha - 1) \ I_L - I_0 \\ V_L = L \frac{dI_L}{dt} = \alpha \ V_i + (1 - \alpha) \ V_0 \end{cases}$$
(1.33)

En réarrangeant les termes du système d'équation 1.33, on obtient le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} I_L = \frac{1}{\alpha} \left(I_I - c_1 \frac{dV_i}{dt} \right) \\ I_0 = (\alpha - 1) I_L - C_2 \frac{dV_0}{dt} \\ V_i = L \frac{dI_L}{dt} = \frac{1}{\alpha} \left(L \frac{dI_L}{dt} + (\alpha - 1) V_0 \right) \end{cases}$$
(1.34)

Le système d'équations1.34 représente le model final de simulation du convertisseur statique *Buck-Boost*.

1.9.4 Rapport de conversion

Le rapport de conversion M est défini comme étant le rapport entre la tension de sortie et la tension d'entrée.

$$M(\alpha) = \frac{V_0}{V_i} = \frac{\alpha}{\alpha - 1}$$

La figure 1.20 montre la variation du rapport de conversion M en fonction du rapport cyclique.



Figure 1.6 Variation du rapport de conversion en fonction de rapport cyclique

1.10 LE CONTRÔLEUR FLOUE APPLIQUÉÀ LA POURSUITE DU POINT DE PUISSANCE MAXIMAL

1.10.1 Poursuite du point de puissance maximal par un contrôleur logique floue

Dans notre travail on utilise le contrôleur flou pour extraire et poursuivre le point de puissance maximal lors des variations climatiques (Talha, A. & Boumaaraf, H. July 2010) (Feroui, M. Achour, A. 2009) (Arezki, S. décembre 2017).

1.10.2 Commande par la logique floue

La commande par la logique floue d'après la revue de littérature est une méthode robuste et efficace, utilisée dans les systèmes de poursuite du point de puissance maximale des panneaux solaires (Talha, A. &Boumaaraf, H. July 2010) (Feroui, M. Achour, A. 2009) (Arezki, S. décembre 2017). Différemment de la logique classique, l'approche adoptée par la logique floue est basée sur la décomposition des variables qui permet de définir des valeurs intermédiaires entre les valeurs conventionnelles par exemple : *Vrais/faux, oui/non* (Soubaihi, K. 2008) (Arezki, S. décembre 2017). La commande par logique floue est constituée de trois blocs (Figure 1.21) :

- Bloc de fuzzification : Désigne le processus de détermination du degré d'appartenance à chaque partition floue.
- Bloc d'inférences : Désigne l'utilisation des règles déclenchées par les différentes entrées fuzziffiées.
- Bloc de défuzzification : Désigne le passage des valeurs floues de sorties à une valeur finale nette.

Dans notre système, on a choisi comme variables d'entrées l'erreur *E* et le changement d'erreur *CE*, et comme sortie la variation du rapport cyclique α . Chacune de ces variables a ses propres valeurs linguistiques et son propre univers de discours qui est, entre -0.02 et 0.02 pour *E*, entre -200 et 200 pour *CE* et entre -0.02 et 0.02 pour α .





1.10.2.1 Fuzziffication

Dans cette partie, on suppose que le contrôle doit satisfaire deux critères relatifs à deux variables d'entrées du contrôleur flou proposé, qui sont l'erreur E(k) et le changement de l'erreur CE(k) à des instants échantillonnés k.

Les variables *E* et *CE* sont présenté comme suit : (Wichert, B. 2000) (Talha, A. &Boumaaraf, H. July 2010) (Arezki, S. décembre 2017) :

$$E(k) = \frac{P(k) - P(k-1)}{V(k) - V(k-1)}$$
(1.36)

$$CE(k) = E(k) - E(k-1)$$
 (1.37)

A l'instant d'échantillonnage k, la puissance du générateur photovoltaïque et sa tension de sortie sont définies par les valeurs P(k) et V(k), et respectivement l'erreur et le changement d'erreur sont définies par E(k), CE(k) au même instant d'échantillonnage k.

L'erreur E(k) nous permet la localisation du point de fonctionnement s'il est à gauche ou à droite du point de puissance maximale de la courbe (*P-V*), tandis que l'entrée CE(k)montre la direction de ce point de fonctionnement.

Le choix du nombre des sous-ensembles flous utilisé pour chaque variable linguistique influe sur la performance du contrôleur, en effet on a choisi cinq sous-ensembles floues qui sont : PG: (positif grand) ; PP: (positif petit) ; ZE: (Zéro équivalent) ; NP: (négatif petit) ; NG: (négatif grand)(Arezki, S. décembre 2017).

1.10.2.2 Fonction d'appartenances

La méthode standard pour la localisation des fonctions d'appartenances optimales s'avère être difficile car les performances du contrôleur restent sensibles aux petits changements dans la base des règles ou dans les fonctions d'appartenances. Ce contrôle devient plus difficile lorsqu'il doit être appliqué en temps réel.

La génération de fonctions d'appartenance s'effectue de manière itérative, ou avec la méthode d'essai et d'erreur ou encore en se basant sur des anciennes expériences. Il n'existe jusqu'à présent aucune méthode généralisée pour la formulation des stratégies de la logique floue. Les fonctions d'appartenances que nous avons utilisées sont représentées sur la figure 1.22 (Arezki, S. décembre 2017) :



Figure 1.2 Fonctions d'appartenances des variables E, CE et d α . ©logiciel Matlab-Simulink

1.10.2.3 Définition des variables d'inférences flous

Les variables d'inférences et les grandeurs mesurées dont l'erreur E et le changement d'erreur CE avec la variable de sortie qui est le changement du rapport cyclique α par des règles linguistiques, doivent être désignées de sorte que la variable d'entrée E doit être toujours Zéro, et elles sont combinées en utilisant les connections ET et OU (AND & OR). Après les variables d'inférences on définit notre méthode de travail qui est méthode d'inférence floue « la méthode de Mamdani ». Cette méthode consiste à utiliser l'opérateur MIN pour le ET et l'opérateur MAX pour le OU (Hatti, M. 2008) (Arezki, S. décembre 2017).

Le Tableau 2 présente les règles d'inférences utilisées pour le contrôleur logique floue (Wichert, B. 2000) (Talha, A. &Boumaaraf, H. July 2010).

	CE					
dE	NG	NP	ZE	РР	PG	
NG	NG	NG	NG	NP	ZE	
NP	NG	NG	NP	ZE	PP	
ZE	NG	NP	ZE	PP	PG	
PP	NP	ZE	PP	PG	PG	
PG	ZE	PP	PG	PG	PG	

Tableau 1.2 Matrice d'inférences (Hatti, M. 2008)

La variable linguistique assignée à α dépend des différentes combinaisons entre E et CE. Par exemple, si les variables d'entrée (E et CE), ont comme valeur ZE et PG correspondant à un point de fonctionnement très éloigné du PPM, d'après la table de vérité, la valeur donnée à la variable de sortie α est NG, ce qui implique une forte variation négative du rapport cyclique pour atteindre le PPM. En résumé, les variations du rapport cyclique dépendent de la différence de position entre le point de fonctionnement et un PPM. Ainsi, dès que ce dernier s'approche du PPM, les incréments appliqués à α s'affinent jusqu'à atteindre le PPM.

1.10.2.4 Défuzzification

La défuzziffication est une étape nécessaire pour faire la conversion des valeurs floues en valeurs physiques. Pour pouvoir définir la loi de commande, le contrôleur flou doit être accompagné d'une procédure de défuzziffication jouant le rôle de convertisseur de la commande floue en valeur physique, nécessaire pour un tel état du processus. Il s'agit de calculer, à partir des degrés d'appartenance à tous les ensembles flous de la variable de sortie, l'abscisse qui correspond à la valeur de cette sortie. Plusieurs stratégies de défuzziffication existent, les plus utilisées sont (GulFiliz, O.T.K. 2006) :

- Méthode du maximum ;
- Méthode de la moyenne des maximas ;
- Méthode du centre de gravité ;
- Méthode des hauteurs pondérées.

Pour notre étude nous nous sommes limités à la méthode du centre de gravité.

1.10.3 Tests de robustesse vis-à-vis de la variation des paramètres météorologiques

Les caractéristiques électriques d'un panneau photovoltaïque varient en fonction de la température et de l'éclairement. Ces propriétés sont en effet nécessaires pour comprendre le comportement d'un générateur PV et ensuite effectuer l'optimisation de son fonctionnement.

1.10.3.1 Robustesse vis-à-vis des variations de l'éclairement

Pour une température interne constante T=25°C, on a l'éclairement qui décroit de 1000W/m² pendant 2 secondes à 600W/m², on refait le même test dans l'autre sens après une stabilisation de 2 secondes en diminuant l'éclairement de 1000 à 600W/m² comme le montre la Figure 1.23.



Figure 1.3 Variations de l'ensoleillement en fonction du temps

Les Figures 1.24, 1.25, 1.26, représentent le comportement de l'algorithme lors de cette variation de l'éclairement



Figure 1.4 Évolution de la puissance du GPV pour une variation de l'ensoleillement



Figure 1.5 Évolution de la tension du GPV pour une variation de l'ensoleillement



Figure 1.6 Évolution de rapport cyclique du GPV pour une variation de l'ensoleillement

On constate que le régulateur poursuit parfaitement l'évolution du *PPM*, il est précis et direct dans la poursuite du point de puissance maximale, et le temps de réponse des régulateurs à base de la logique floue est rapide est robuste.

1.10.3.2 Robustesse vis-à-vis des variations de la température

Sous un ensoleillement fixé à 1000W/m², nous simulerons une évolution de la température interne du *GPV* de 25°C à 50°C pendant 2 secondes. On refait le même test dans l'autre sens, en diminuant la température de 50°C à 25°C durant le même laps de temps (Figure 1.27).



Figure 1.7 Variations de la température en fonction du temps

Les Figures 1.28, 1.29 et 1.30 représentent le comportement de l'algorithme lors de cette variation de la température.



Figure 1.8 Évolution de la puissance du GPV pour une variation de la température



Figure 1.9 Évolution de la tension du GPV pour une variation de la température



Figure 1.10 Évolution du rapport cyclique du GPV pour une variation de la température

Les résultats de simulation montrent le bon fonctionnement de l'algorithme de la commande avec une bonne poursuite de PPM les contrôleurs flous est rapide est robuste aux conditions météorologiques.

1.11 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons modélisé un panneau photovoltaïque en utilisant le modèle à une et à deux diodes ainsi que la variation avec les conditions météorologiques.

Une étude de l'influence de ces conditions sur les caractéristiques du PV a été complétée. Les performances dépendent directement des paramètres internes du PV et des paramètres météorologiques. Les résultats obtenus permettent de conclure que le modèle à une seule diode est proche de celui du panneau photovoltaïque réel.

Par ailleurs, nous n'avons constaté que l'influence de la variation des paramètres météorologiques sur les caractéristiques du PV est importante. Afin d'assurer une

disponibilité permanente et constante de l'énergie quelles que soient les variations météorologiques, un system de stockage a été également modélisé.

Pour obtenir un rendement maximum du panneau à tout instant, quel que soit les variations des paramètres météorologiques, nous avons étudié le fonctionnement d'un hacheur *Buck-Boost* qui permet de suivre efficacement le point de puissance maximale. Les dispositifs de poursuite du point de puissance maximale basés sur la théorie des ensembles flous offrent une solution efficace car ils assurent un compromis entre rapidité en transitoire et stabilité en régime permanent.

CHAPITRE 2 : ÉTUDE DU SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE CONNECTE AU RÉSEAU À TRAVERS UN ONDULEUR MULTI-NIVEAUX

2.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous présenterons le système PV étudié utilisant un onduleur de tension à cinq niveaux NPC comme pont intermédiaire connectée à un réseau infini (Arezki, S. 2017). La topologie NPC des convertisseurs multi-niveaux utilise un bus continu composé de plusieurs condensateurs en série. En effet, la structure NPC de l'onduleur de tension à cinq niveaux permet d'utiliser une, deux ou quatre sources de tensions continues (Arezki, S. 1999).

Dans notre cas, les quatre sources de tension sont obtenues grâce à un générateur PV de 811V. L'objectif de ce chapitre est de présenter les résultats de simulation en mettant en évidence le problème de déséquilibre des tensions continues du convertisseur multi-niveau. Comme application, nous présentons les performances du réseau électrique.

2.2 PRÉSENTATION DU SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE ÉTUDIÉ CONNECTE AU RÉSEAU

Notre chaine de production PV est constituée de 45 panneaux en série commandées par MPPT et d'un onduleur de tension à cinq niveaux à structure NPC, commandé par la stratégie de la modulation vectorielle connectée à un réseau électrique infini.



Figure 2.1Schéma global de la chaine PV connecté au réseau(Arezki, S. 2017)

2.3 MODÉLISATION ET STRATÉGIES DE COMMANDE DE L'ONDULEUR DETENSION A CINQ NIVEAUX A STRUCTURE NPC

2.3.1MODÉLISATION DU RÉSEAU ÉLECTRIQUE (ÉQUATIONS ÉLECTRIQUES DANS L'AXE ABC)

Le réseau est modélisé par une source de tension en série avec une inductance, se comportant comme une source de courant. Vu que l'inductance du réseau est faible et mal connue, elle est généralement insuffisante pour atténuer l'ondulation du courant. Il est donc nécessaire d'ajouter une inductance L et une résistance R plus importantes en série, afin de négliger celles du réseau mal connu et de réduire l'effet de leurs variations (Rioual, P. 1993) (Pawel, S. Linke, M. Kennel, R. (2003) (Suh, Y. .Vtijeras, Lipo, T.A..June 2002).

En appliquant la loi des mailles au modèle de la Figure 2.5, on trouve :

$$V_{resi} = Ri_i + L\frac{di_i}{dt} + V_{KN}$$
(2.14)


Figure 2.5 Modélisation d'une phase du réseau électrique

Avec :

Vresiet ii: respectivement la tension et le courant de la phase i(i = 1,2,3) du réseau triphasé.

V_{kN}: La tension liée au bras i du redresseur qui est en série avec l'impédance du réseau (R-L).

On applique la transformation de Laplace sur le système prédéfini et en obtient la forme matricielle suivante (Rioual, P. 1993) (Pawel, S. Linke, M. Kennel, R. 2003):

$$\begin{bmatrix} V_{res1} \\ V_{res2} \\ V_{res3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + LS & 0 & 0 \\ 0 & R + LS & 0 \\ 0 & 0 & R + LS \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{AN} \\ V_{BN} \\ V_{CN} \end{bmatrix}$$
(2.15)

2.3.2RÉSULTATS DES SIMULATIONS DU SYSTÈME PV CONNECTE AU RÉSEAU

Nous présentons les résultats de simulation avec un GPV qui délivre une tension de 811V sous des conditions standard (1000W/m², 25°C) et la puissance délivrée est maximisée par la technique MPPT (logique floue). Les capacités du filtre intermédiaire ont la même valeur (C1= C2= C3= C4= 20mF), Pour le réseau infini, on a pris R=43.3 Ω , Lw=25 Ω et f=50Hz.



Figure 2.6.1 Tensions du filtre capacitif intermédiaire



Figure 2.6.2 Tensions du filtre capacitif intermédiaire



Figure 2.7 Les performances du réseau électrique



Figure 2.8 Tension, Courant et puissance du GPV

2.4 INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

Les résultats de simulation de cette structure sont exposés, pour des capacités de C= 20mF, sur les Figures 2.6.1, 2.6.2. Nous notons que les tensions d'entrée du bus continu (U_{c1}, U_{c2}) et (U_{c3}, U_{c4}) sont instables, de valeurs différentes et leurs écarts sont très importants. L'influence de cette instabilité sur la conduite du réseau est illustrée sur la Figure 2.7 on observe une forte ondulation, et une croissance des amplitudes de la tension et du courant et de la puissance active et réactive.

2.5 CONCLUSION

Nous avons étudié dans ce chapitre un système PV ayant l'onduleur triphasé de tension à cinq niveaux NPC comme pont intermédiaire. Le réseau est utilisé comme application à notre système. La simulation numérique nous a montré le déséquilibre entre les tensions U_{c1} , U_{c2} , U_{c3} , U_{c4} d'entrée de l'onduleur de tension à cinq niveaux et par la suite l'instabilité des tensions de sortie, donc les performances du réseau. Pour résoudre ce problème on fait appel à l'asservissement par différentes techniques en mettant en valeur la technique PI-floue qui fera l'objet d'étude dans le chapitre suivant.

CHAPITRE 3 : RÉGULATION DES TENSIONS D'ENTRÉE D'UN ONDULEUR A CINQ NIVEAUX NPC DANS UN SYSTÈME PV

3.1 INTRODUCTION

Dans le chapitre précédent, on a étudié un système PV à pont intermédiaire l'onduleur à cinq niveaux à structure NPC et comme application un réseau, où on a mis en évidence le problème d'instabilité des tensions d'entrée de l'onduleur triphasé à cinq niveaux, dont la fluctuation du potentiel du point milieu.

Afin de stabiliser les tensions d'entrée de l'onduleur triphasé à cinq niveaux à structure NPC en éliminant le déséquilibre entre les tensions d'entrée par rapport au point milieu d'une part et de les rendre presque constantes, on propose d'utiliser :

- Un asservissement de la tension totale moyenne par un régulateur classique PI.
- Un asservissement de la tension totale moyenne par un régulateur à base de la logique floue.
- Un asservissement de la tension totale moyenne par un régulateur PI-floue.

3.2 MODÉLISATION DE LA BOUCLE DE TENSION DANS LE REPÈRE ABC

La modélisation de cette boucle est basée sur le principe de la conservation de puissance instantanée avec l'hypothèse d'un générateur sans pertes. Cette boucle impose la valeur efficace du courant de référence du réseau (Ghedamsi, K. 2001) (Yakoub, K. 2005).

Puissance d'entrée :

$$P_{GPV} = U_{Cmoy} \left(ich_{moy} + ic_{moy} \right)$$
(3.1)

Puissance de sortie :

$$P_{\rm res} = \sum_{k=1}^{3} (v_{\rm resk} \ i_{\rm resk} - R \ i_{\rm resk}^2 - \frac{L_{\rm res}}{2} \frac{di_{\rm resk}^2}{dt})$$
(3.2)

En définissant les grandeurs i_{cmoy} , i_{chmoy} , i_{GPVmoy} et U_{cmoy} comme suit :

$$ic_{moy} = \frac{ic_1 + ic_2 + ic_3 + ic_4}{4} \qquad I_{GPV_{moy}} = (ich_{moy} + ic_{moy})$$

$$Uc_{moy} = \frac{Uc_1 + Uc_2 + Uc_3 + Uc_4}{4}$$
 ich_{moy} = $\frac{ich_1 + ich_2 + ich_3 + ich_4}{4}$

En utilisant le principe de la conservation de la puissance et en négligeant les pertes joules dans la résistance R_{res}, on peut écrire :

$$\sum_{k=1}^{3} \left(V_{\text{resk}} \, i_{\text{resk}} \right) = \frac{L}{2} \frac{\text{d}i_{\text{resk}}^2}{\text{d}t} + 4Uc_{moy} \left(\text{ic}_{moy} + ich_{moy} \right)$$
(3.3)

En supposant les courants du réseau sinusoïdaux sont en phase avec leurs tensions V_{resi} correspondantes, on peut écrire alors :

$$3V_{eff} J_{eff} = 4Uc_{moy} \left(ic_{moy} + ich_{moy} \right) \quad (3.4)$$

Le modèle de la boucle de tension est illustré à la Figure 3.1 avec C', la capacité équivalente du filtre intermédiaire.



Figure 3.1 Modèle de la boucle de tension dans le repère ABC

3.3 RÉGULATION DES TENSIONS D'ENTRÉE DU BUS CONTINU DE L'ONDULEUR A CINQ NIVEAUX NPC PAR UN ASSERVISSEMENT PI

Le schéma bloc de l'asservissement de la tension est donné par la Figure 3.2.



Figure 3.2 Algorithme d'asservissement de la tension de sortie Uc_{moy} du GPV dans le repère ABC (Arezki, S. décembre 2017)

On utilise un correcteur proportionnel intégral PI pour réguler la valeur moyenne de la somme des tensions d'entrée avec une valeur de référence moyenne. Le correcteur PI classique a la forme suivante :

$$G_{PI}(S) = \frac{K_P \cdot S + K_i}{S} (3.5)$$

où Kp est le coefficient proportionnel et K_i le coefficient intégral du correcteur. Ainsi, les coefficients des correcteurs vont être dimensionnés de telle façon que la dynamique du système sera conservée (Arezki, S. décembre 2017).

Résultats des simulations :

Les conditions de simulation sont : Le GPV délivre une tension de 811V sous les conditions standards. Les capacités du filtre intermédiaire ont la même valeur (C1= $C2=C3=C_4=20$ mF), l'onduleur à cinq niveaux à structure NPC commandé par la stratégie de la modulation vectorielle, Ucref=200V.

25 25 2 25 3 25 19 15 2 25 35 15 5 25 25 何 Uen (Uemes(Y) i i 25 10 1 Ø ガ編

Coté onduleur :

Figure 3.3 Les tensions du filtre capacitif intermédiaire et la tension moyenne d'entrée

3.4RÉGULATIONS DES TENSIONS D'ENTRÉE DU BUS CONTINU DE L'ONDULEUR A CINQ NIVEAUX NPC PAR UN ASSERVISSEMENT PAR UN RÉGULATEUR FLOU

Le schéma de principe d'asservissement de la tension moyenne d'entrée U_{cmoy} de l'onduleur triphasé cinq niveaux est donné dans la figure ci-dessous :



Figure 3.4 Algorithme d'asservissement de la tension d'entrée de l'onduleur triphasé cinq niveaux par logique floue.

La boucle du régulateur de la tension identique à celle élaborée dans l'asservissement PI (Arezki, S. décembre 2017).

3.4.1 Contrôleur flou :

La figure 3.5 montre le schéma principal d'un régulateur flou :



Figure3.5 Schéma principal d'un régulateur flou

Devant le choix infini des combinaisons et de variantes pour la constitution d'un contrôleur flou, notre démarche sera dictée par la simplicité de mise en œuvre. Nous avons limité le nombre de sous-ensembles flous à cinq pour chaque variable (Yakoub, K.2005).

Les fonctions d'appartenances sont choisies de forme triangulaire. Comme on a vu précédemment, un contrôleur flou comporte trois parties distinctes : la fuzzification, caractérisée par les fonctions d'appartenance des variables d'entrée, la défuzzification, caractérisée par les fonctions d'appartenance des variables de sortie. Le contrôleur flou que nous utilisons est de type Mamdani, avec une méthode de fuzzification de type MIN-MAX et une méthode de défuzzification de type centre de gravité.

Il est possible d'appliquer en entrée et en sortie du régulateur flou des gains appelés « facteurs d'échelle » *qui* affinent la sensibilité du régulateur sans intervenir ni sur les règles, ni sur les sous-ensembles flous (Arezki, S. décembre 2017).

3.4.1.1 Choix des entrées et sorties

Dans notre cas, nous choisissons l'erreur de tension d'entrée $(E = U_{Cref} - U_{Cmoy})$ et sa dérivée (*de*) comme des variables d'entrée, et la valeur de courant de référence $I_{réf}$ comme sortie de régulateur) (Arezki, S. décembre 2017).

3.4.1.2 Univers de discours des variables d'entrée

Après plusieurs essais et en se basant sur le modèle de l'onduleur, nous avons fixé l'univers de discours de la variable d'entrée « E » entre -0.25 et +0.25 et nous avons retenu cinq sous-ensembles flous de formes triangulaires pour le caractériser : NG (erreur négative, grande), NP (erreur négative, petite), ZE (erreur proche de zéro), PP (erreur positive, petite) et PG (erreur positive, grande)) (Arezki, S. décembre 2017) à la Figure 3.6.

De la même manière nous avons fixé l'univers de discours de la variable d'entrée « dE » comme l'indique (Arezki, S. décembre 2017) à la Figure 3.7.



Figure 3.6 Univers de discours de la variable erreur (Arezki, S. décembre 2017)



Figure 3.7 Univers de discours de la variable dérivée de l'erreur (Arezki, S. décembre 2017)

3.4.1.3. Univers de discours de la variable de sortie

L'univers de discours de la variable de sortie représentant la commande $I_{réf}$ est également divisée en cinq sous-ensembles flous, visible sur la Figure 3.8.



Figure 3.8 Univers de discours de la variable de commande Iréf (Arezki, S. décembre 2017)

3.4.1.4 Définition du comportement du contrôleur floue

La stratégie de réglage dépend essentiellement des inférences adoptées. Ces dernières lient les grandeurs mesurées qui sont des variables d'entrée (exprimées comme variables linguistiques) à la variable de sortie (également exprimée comme variable linguistique) par l'intermédiaire des règles. Chaque règle possède une condition, précédée par du symbole SI et une conclusion, action ou opération, précédée du symbole ALORS. Cet ensemble des règles regroupe toutes les situations possibles du système évaluées pour les différentes valeurs attribuées à «e» et à «de» et en conséquence les valeurs correspondantes de « $I_{réf}$ » (Belkhama, A. Daas, A. 2007).

Description linguistique des inférences de réglage :

La description linguistique des inférences peut être représentée par une table, appelée matrice d'inférence. Cette matrice est basée sur les principes suivants :

- Si la sortie diverge de la valeur désirée, alors l'action à prendre dépend du signe et de la valeur de l'erreur et de sa dérivée ;
- Si la sortie a la valeur désirée, et sa dérivée est nulle, nous laissons la sortie du régulateur constante ;
- Si les conditions sont telles que l'erreur peut être corrigée rapidement d'elle-même, nous laissons la sortie du contrôleur constante ou presque.

Nous prenons point par point le comportement du processus et l'action de variation de la commande à appliquer, et nous obtenons les deux tables suivantes, qui correspondent à la table de règles très connue de Mac Vicar-Whelan (Belkhama,A. Daas,A. 2007).

dE	Ε				
	NG	NP	ZE	PP	PG
NG	NG	NG	NG	NP	ZE
NP	NG	NG	NP	ZE	PP
ZE	NG	NP	ZE	PP	PG
PP	NP	ZE	PP	PG	PG
PG	ZE	РР	PG	PG	PG

Tableau 3.1 Table de règles (Belkhama, A. Daas, A. 2007)

Résultats des simulations

Notre système PV connecté au réseau dans ce cas est soumis aux mêmes conditions que pour le réglage PI. Les résultats sont illustrés à la Figure 3.9 :



Figure 3.9 Les tensions du filtre capacitif intermédiaire et la tension moyenne d'entrée

• Interprétation des différents résultats (asservissement avec PI et logique floue) :

On remarque d'après les résultats obtenus lors de l'asservissement de la tension moyenne de l'onduleur par les régulateurs flou et PI que les différentes tenions d'entrée $Uc_i(1,2,3,4)$ restent toujours instables et leurs différences ΔUci non nulles malgré que la régulation de la tension moyenne soit assurée (Arezki,S.décembre 2017).

3.5AMÉLIORATION DE LA RÉGULATION DES TENSION D'ENTRE(U_{C1},U_{C2}, U_{C3} ,U_{C4})PAR L'ÉLECTRONIQUE DE PUISSANCE

Afin d'améliorer les tensions d'entrée de l'onduleur triphasé à cinq niveaux à structure NPC en minimisant le déséquilibre entre les tensions U_{c1} et U_{c4} , U_{c2} et U_{c3} , on doit passer à la l'étape de régulation par l'utilisation du pont de Clamping.

Cela consiste à introduire dans la cascade un hacheur à base de transistor. Ainsi, ce composant d'électronique de puissance, on le nomme généralement un pont d'équilibrage, le pont de Clamping (Belkhama,A. Daas,A. 2007)(Talha,A.1999).

3.5.1 Modélisation du pont de Clamping

Le pont d'équilibrage (pont de Clamping) est constitué d'un transistor et d'une résistance aux bornes de chaque capacité du filtre intermédiaire, comme l'indique la Figure 3.10, où chaque transistor est commandé de telle façon à conserver l'égalité des différentes tensions.

Avec, i=1,2,3,4



Figure 3.10 Structure de la cellule du pont d'équilibrage

Dans ce cas, le modèle mathématique du filtre intermédiaire avec le pont Clamping est défini comme suit (3.6) (Bouchafaa,F. Berkouk,E.M. BoucheritM.S.October 2004):

$$C_{1} \frac{dUc1}{dt} = i_{GPV} - i_{d1} - i_{d2} - i_{r1}$$

$$C_{2} \frac{dUc2}{dt} = i_{GPV} - i_{d2} - i_{r2}$$

$$C_{3} \frac{dUc3}{dt} = i_{d3} + i_{d4} - i_{GPV} - i_{r3}$$

$$C_{4} \frac{dUc4}{dt} = i_{d4} - i_{GPV} - i_{r4}$$
(3.6)

L'algorithme de commande utilisé pour conserver une tension constante égale à la tension de référence aux bornes de chaque condensateur est le suivant (Talha, A.1999) (Bouchafaa,F. Berkouk,E.M. BoucheritM.S.October 2004):

$$(\mathbf{U}_{\mathrm{Ci}} - \mathbf{U}_{\mathrm{ref}}) = \xi$$

Si $\xi > \mathbf{0}$ on a Ti = 1 $\Rightarrow i_{\mathrm{ri}} = \mathbf{T}_{\mathrm{i}} \cdot \frac{\mathbf{U}_{\mathrm{Ci}}}{\mathbf{R}_{\mathrm{Pi}}}$
Si $\xi < \mathbf{0}$ on a Ti = 0 $\Rightarrow i_{\mathrm{ri}} = \mathbf{0}$ (3.7)

3.5.2 Résultats de simulations du système photovoltaïque continent d'un GPV - Pont de Clamping - Onduleur de tension à cinq niveaux à structure NPC-Réseau infini

La structure de cette cascade est donnée par le schéma suivant :



Figure 3.21Structure de la Cascade d'un GPV- pont de Clamping - Filtre capacitif

Le GPV délivre une tension de 811V. Les paramètres de pont de Clamping et du filtre intermédiaire sont : $C_1 = C_2 = C_3 = C4 = 20$ mF et Rp=10 Ω , **U**_{ref}=200V.

Les figures suivantes montrent les résultats de simulation de l'introduction du pont de Clamping dans la cascade avec onduleur de tension triphasé à cinq niveaux NPC-Réseau.



• Côté filtre intermédiaire

Figure 3.12 Tensions du nouveau filtre intermédiaire et leurs différences

• côté onduleur cinq niveaux NPC



Figure3.13 Lescourants d'entrée de l'onduleur id1, id2, id3, id4, id0

• côté réseau électrique



Figure 3.14 Les différentes grandeurs de la cascade côté réseau.

• côté générateur PV



Figure 3.15 Tension, Courant et puissance du GPV

On constate que les tensions du demi-bas du haut Uc1, Uc2 et du bras Uc3, Uc4 du bas du filtre intermédiaire deviennent constantes et parfaitement égales après un régime transitoire. Ainsi, leurs différences (Uc1-Uc4; Uc2-Uc3) deviennent nulles en régime permanent - Figure 3.12. Les différentes grandeurs d'entrée et de sortie de l'onduleur cinq niveaux NPC se stabilise après un court régime transitoire.

L'application d'un pont d'équilibrage dans le système étudié a pu donner ses performances en égalisant les tensions d'entrée de l'onduleur et que leur différence devient nulle.

3.6 CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons étudié l'apport des différentes techniques de régulation de la tension moyenne d'entrée globale de l'onduleur triphasé à cinq niveaux à structure NPC sur le système PV connecté au réseau. L'asservissement de la tension d'entrée de l'onduleur par l'introduction des boucles de régulation (PI, floue et PI-floue) nous a permis le contrôle de la tension moyenne Ucmoy et non pas les différentes tensions du bus continu Uc_i (1,2,3,4).

Néanmoins, la technique de PI adaptatif est la plus performante comme régulation coté précision et simplicité de régulation induisant un comportement stable du réseau malgré le non conservation de puissance entre P_{GPV} et P_{res} .

On constate que l'application d'un pont d'équilibrage dans le système étudié a pu donner ses performances en égalisant les tensions d'entrée de l'onduleur à leur tension de référence et que leur différence devient nulle après un régime transitoire trop court améliorant ainsi les performances au niveau du réseau.

CONCLUSIONGÉNÉRALE

Ce travail avait comme objectif primordial d'établir un système photovoltaïque connecté à un réseau à travers un onduleur triphasé cinq niveaux à structure NPC et s'assurer de la stabilisation des tensions d'entrée de ce dernier, par la technique de PI, FLOUE aussi PI-FLOUE. Une étude du système avec la régulation classique PI et la régulation floue a été aussi élaborée pour mettre en valeur la régulation par le PI-FLOUE.

Dans un premier temps, nous avons élaboré en détail le modèle mathématique de chaque organe constituant le système photovoltaïque, à savoir les cellules PV formant un module, l'élément de stockage, les hacheurs, ainsi que, le principe de MPPT. Pour cela, nous nous sommes attachés surtout à étudier complètement le contrôleur MPPT par logique floue. Dans ce contexte, la théorie de base de la commande par logique floue a été brièvement présentée.

Les simulations effectuées par l'utilisation de cette technique de commande sous différentes conditions atmosphériques nous ont permis de comprendre les performances liées au fonctionnement de la méthode MPPT.

Par la suite, nous avons présenté le modèle de connaissance et de commande de l'onduleur à cinq niveaux à structure NPC. Pour la commande de cet onduleur nous avons choisi la stratégie de modulation vectorielle, et on a connecté le système à un réseau infini.

Les résultats de simulation on a mis en évidence le déséquilibre entre les tensions d'entrée de l'onduleur de tension à cinq niveaux et par conséquent l'instabilité des tensions de sortie. Donc il a été recommandé de proposer une solution, qui consiste d'une part d'introduire un asservissement PI adapté à la logique floue pour réguler les tensions d'entrée de l'onduleur à partir de la régulation de la tension moyenne.

Le constat qui a été tiré des résultats de simulation c'est que l'instabilité des tensions persiste toujours avec moins d'ondulation coté réseau malgré la régulation presque parfaite de la tension moyenne d'entrée. Il a été recommandé de proposer une solution, qui consiste à introduire le pont de Clamping. Cette régulation a permis d'avoir des meilleurs résultats de stabilité au niveau des différentes grandeurs du système connecté au réseau.

Grâce à cette étude, nous avons pu acquérir des connaissances précieuses dans une branche très intéressante de l'électronique que nous n'avions pas eu l'occasion d'étudier (PI, logique floue, PI-floue, Matlab Simulink).

Pour améliorer la stabilité et la robustesse, la recherche de d'autres solutions est possible :

- Asservissement de la tension moyenne d'entrée de l'onduleur par un régulateur à base de réseaux de neurones.
- ✓ L'élaboration de nouveaux algorithmes de commande de l'onduleur NPC à cinq niveaux afin d'améliorer la tension de sortie.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Abouchabana, N. (2009) « Etude d'une nouvelle topologie d'un convertisseur Buck-Boost », Mémoire de Magister, ENP, Alger.

Abbassen, L. (2011) « Etude de la connexion au réseau électrique d'une central photovoltaïque », Mémoire de Magister, Université de Mouloud Mammeri, Tizi Ouzou.

ADEME, (Septembre 2019) « l'électricité solaire », mener à bien un projet photovoltaïque pour sa maison, France.

Arezki, S. (1999) « Contribution à l'étude et la commande d'une machine asynchrone double étoile alimentée par onduleur multi-niveau» Mémoire de Magister, ENP.

Arezki, S. (décembre 2017) « Contribution a l'étude et la commande d'une machine asynchrone double étoile alimentée par onduleur multi-niveau» Mémoire de Magister, ENP

Atersa, (2017) « Applications de l'énergie solaire photovoltaïque », Almussafes.Valencia,España.

https://www.atersa.com/fr/nous-connaitre/applications-energie-solairephotovoltaique

Angel Cid Pastor, M. (2006) « Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques », Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse.

Belhachat, F. (2007) « Commande neuro-floue d'un hacheur MPPT », Mémoire de Magister, ENP, Alger.

Belkhama, A. Daas, A. (2007) « Application de la logique floue à la Commande en vitesse de la machine synchrone à aimants permanents » Project de fin d'Etude, USTHB.

Beriber, D. (2010) « Optimisation et Gestion d'Energie de Système de production Photovoltaïque-Eolienne avec stockage », Thèse de Doctorat, USTHB, Alger.

Berkouk E.M., (Décembre 1995) « Contribution à la conduite des machines asynchrones monophasées et triphasées alimentées par des convertisseurs directes et indirectes. Application au gradateur et onduleur multi-niveaux ». Thèse de Doctorat du conservatoire national des arts et Métier.

Bouchafaa, F. Berkouk, E.M. Boucherit M.S. (October2004) "Analyse et Simulation d'une cascade de deux redresseurs à MLI-Onduleur Multi-niveaux NPC. Application à la conduite d'une MSAP". 3rd Conférence on Electrical Engineering, CEE'04,04-06 Batna, Algeria, PP.81-84.

Boulakhrachef, S. (2001) « Analyse et commande d'un onduleur à cinq niveaux à structure NPC. Application à la machine asynchrone commandée par logique floue ». Mémoire de Magister, ENP.

Boumaaraf, H. (2010) « Modélisation et Commande Numérique d'un Système Photovoltaïque Connecté au Réseau », Mémoire de Magister, USTHB.

Chancelier, L. Laurent, E, (décembre, 1996) « L'électricité Photovoltaïque », Les impressions Dumas, Paris France.

Chibani, R. (1999) « Modélisation et commande d'un onduleur de tension à cinq niveaux a structure NPC. Application à la conduite d'une machine synchrone a aimant permanent », Mémoire de Magister, ENP.

Confort&Domotique (Avril 2012) «Historique de la cellule photovoltaïque» tpe 1ère s lycée Ambroise paré, France.

Connaissance Des Energies, (mars 2017) « Solaire photovoltaïque», tpe 1ère s lycée Ambroise paré, France.

https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/solaire-photovoltaique

Feroui, M. Achour, A. (2009) « Etude des différentes techniques MPPT d'un système photovoltaïque », Mémoire d'ingénieur d'Etat, USTHB.

Ghedamsi, K. (2001) « Étude et réalisation de différents stratégies MLI de commande de l'onduleur triphasé a trois niveaux », Mémoire de Magister, E.M.P

Gheraia, H. (1999) « Modélisation et commande d'un onduleur NPC à sept niveaux. Application à la conduite d'une machine asynchrone triphasée ». Mémoire de Magister, ENP.

Guedouani, R. (1998) « Commande d'un onduleur de tension multiniveaux. Application à la conduite d'une machine synchrone à aimant permanent ». Mémoire de Magister, ENP

GulFiliz, O.T.K. (2006) « Commande des hacheurs MPPT par logique floue », Mémoire de Magister, ENP, Alger.

Hatti, M. (2008) « Contrôleur Flou pour la Poursuite du Point de Puissance Maximum d'un Système photovoltaïque », JCGE'08, Lyon, France.

Issaadi, S. (2006) « Commande d'une poursuite du point de puissance maximum (MPPT) par les réseaux de neurones », Mémoire de Magister, ENP, Alger.

Maouedj, R. (2005) « Application de l'énergie photovoltaïque au pompage hydraulique sur les site de Telemcen et de Bouzareah », Mémoire de Magister, Université Abou BekrBelkaid, Telemcen.

Oudjebour, Z. Berkouk, E.M. Sami, N. Belgasmi, S. Arezki, S. Messaif, I. 2004 « Indirect space vector control of a double star induction machine fed by two five- levels NPC VSI », International Conference on Electric Machine, ICEM'04, Pologne.

Pawel, S. Linke, M. Kennel, R. (2003) «Parameter Independent phase Tracking method for sensorless control of PWM rectifiers », EPE, Toulouse.

Rioual, P. (1993) « Modélisation et commande d'un redresseur à MLI alimenté par un réseau déséquilibré ». Thèse de Doctorat, Cachan.

Soubaihi, K. (2008) « Etude et réalisation d'un hacheur de Tracking du point de puissance maximale (MPPT) à contre réaction de tension », Mémoire de Magister, ENP Alger.

Suh, Y. .Vtijeras, Lipo, T.A. .(June 2002)« A Control method in dq synchronous frame for PWM boost rectifier under genelalizes unbalanced operating conditions » Proc. IEEE. Pesc. conference.Austrralia.

Talha, A. (1999) "Modélisation et commande d'un onduleur à sept niveaux à structure NPC Application à la conduite d'une machine synchrone à aimants permanents". Thèse de Magister,USTHB.

Talha, A. &Boumaaraf, H. (July 2010) « Comparison of MPPT strategies for solar modules », 2nd International Conference on Nuclear and Renewable Energy Resources, Ankara, Turkey

Tsamad, A. Mahmoud, K.(2007) « Développement d'un logiciel de dimensionnement des installations photovoltaïque », Mémoire d'ingéniorat, ENP, Alger.

Wichert, B. (2000) « Control of Photovoltaic-Diesel Hybrid Energy Systems », PhD Thesis, Curtin University of Technology.

Yakoub, K. (2005) « Réduction des effets de la tension homopolaire dans les associations onduleurs multi-niveaux moteur à induction », Mémoire de Magister, Université de Batna.

Zaouche, K. (2009) « Etude et développement de différentes méthodes MPPT pour un système photovoltaïque » Mémoire de Magister, USTHB.