الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR**
**ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA**
**FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE**

**Département du Génie Électrique et de l'Informatique**



**Mémoire de Fin d'Études**

Pour l'obtention du Diplôme

**de MASTER en Electrotechnique**

Option : **Energies Solaire et Eolienne**

# THEME

# Techniques de commande d'un système photovoltaïque connecté au réseau utilisant deux contrôleurs MPPT

**Proposé et dirigé par :**

Mr. MORSLI Abdelkader

Mr. OULD CHERCHALI Noureddine

**Préparé et présenté par :**

Mr. KHOUALED Karim

# *Remerciements*

De prime d'abord, je remercie Allah pour m'avoir donné la santé, le courage et la patiente nécessaires pour l'aboutissement de ce travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude ainsi que toute ma reconnaissance à mon directeur de mémoire Docteur MORSLI Abdelkader, qui m'a fait bénéficier de son savoir-faire, de ses conseils appréciables, de sa disponibilité, de son soutien moral, de ses directives pertinentes et pour l'intérêt manifeste qu'il a porté à ce projet.

J'exprime aussi mon respect et mes remerciements à mon codirecteur Docteur OULD CHERCHALI Noureddine qui n'a épargné aucun moyen pour me soutenir, et aussi pour ses conseils précieux.

J'adresse mes vifs remerciements à tout le personnel du département du génie électrique de l'Université de Médéa.

Enfin et à travers ce mémoire, j'exprime mes sincères remerciements à toute la promotion 2015-2016 de Master Génie Electrique de la spécialité Energies Solaire et Éolienne.

# *Dédicaces*

*Je dédie ce travail :*

*A ma mère, pour ses sacrifices et encouragements,*

*A mon défunt père,*

*Et à tous mes amis.*

## ملخص

يصف هذا المشروع مولد الطاقة الكهروضوئية متصلة مباشرة بالشبكة الكهربائية بإشراك وظائف المحولات الثابتة.

النظام المقترح يتكون من حقل لألواح شمسية، محول التيار المستمر (DC/DC) مرفع، مموج التوتر ثلاثي الطور (DC/AC) لحقن الطاقة الشمسية الفعالة نحو الشبكة الكهربئية.

طريقتان مختلفتان للتحكم طبقتا على المحولين (DC/DC) و (DC/AC) من أجل البحث عن النقطة القصوى للطاقة (MPPT).

من أجل ذلك اقترحنا استعمال الطريقتين التاليتين : الإرتياب و الملاحظة (P&O) و التوصيل التدريجي (IncCond).

المحاكاة للنظام باستخدام الأداة (Matlab) و النتائج المتحصل عليها، تثبت نجاعة الطريقتين اللمستعملتين اللذان يضمنان أحسن الأعمال.



**كلمات مفتاحية** : مولد كهروضوئي، الشبكة الكهربائية، الطاقة الاعظمية، مموج ، الصلة بالشبكة الكهربائية.



## Résumé

Ce projet décrit un générateur photovoltaïque connecté directement au réseau électrique en associant les fonctionnalités des convertisseurs statiques.

Le système proposé est constitué d'un champ de panneaux solaires, un hacheur élévateur, un onduleur de tension triphasé pour injecter la puissance active solaire vers le réseau électrique. Deux commandes différentes sont appliquées sur le hacheur et l'onduleur afin de maitriser la recherche du point de fonctionnement maximum de la puissance (MPPT). Pour cela, deux méthodes de types incrémentation de la conductance (IncCond) et perturbation et observation (P&O) sont proposées.

La simulation du système sous l'environnement Matlab/SimPowerSystems et les résultats obtenus, prouvent l'efficacité des deux méthodes MPPT qui garantissent un meilleur fonctionnement des systèmes photovoltaïques.



**Mots clés** : Générateur photovoltaïque, Réseau électrique, Commande MPPT, Connexion au réseau, Hacheur, Onduleur.



## Abstract

This project describes a photovoltaic generator connected to a grid by associating the functionality of static converters.

The proposed system consists of a solar array, a boost converter, a three-phase voltage inverter to inject the solar active power to the grid. Two different controls are applied to the chopper and inverter to search and track the maximum operating point of power. For that, two methods -the Incremental Conductance (IncCond) method and perturb and observe (P & O) method - are used to track Maximum Power Point (MPP) of the PV generator.

System is simulated under Matlab/SimPowerSystems and the results prove the efficiency of both MPPT methods that ensure a better performance of photovoltaic systems.

**Key words** : Photovoltaic generator, Grid network, Command MPPT, Grid connection, Chopper, Inverter.

# Table des matières

**Introduction Générale.....01**

## Chapitre I : L'énergie solaire photovoltaïque

**I.1 .Introduction .....03**
**I.2. Principe du photovoltaïque .....03**
**I.3. L'effet photovoltaïque .....04**
**I.4. Modélisation d'une cellule photovoltaïque .....05**
**1.5. Le module photovoltaïque .....06**
**1.5.1. Modélisation d'un module photovoltaïque .....06**
**1.5.2. Caractéristiques I-V et P-V du module photovoltaïque .....06**
**1.6. Générateur photovoltaïque .....07**
**1.7. Effet de l'éclairement sur le générateur photovoltaïque. .....08**
**1.8. Association des modules solaires photovoltaïques avec batteries .....08**
**1.9. Conclusion .....09**

## Chapitre II : Convertisseurs statiques DC-DC & DC-AC et leurs commandes

**II.1. Introduction .....10**
**II.2. Convertisseur statique DC-DC (Hacheur) .....11**
**II.2.1. Intégration du régulateur MPPT dans système photovoltaïque .....11**
**II.2.2. Adaptation du système par un convertisseur élévateur DC-DC (Hacheur Boost).....12**
**II.2.3. Convertisseur de type DC-DC hacheur Boost .....14**
**II.2.4. Modèle du circuit équivalent .....14**
**II.2.5. Caractéristiques de l'état d'équilibre et rapport de conversion M(D) .....16**

**II.3. La commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) ..... 17**
**II.3.1. Méthode MPPT de P&O (Perturbation et Observation) ..... 17**
**II.3.2. Méthode MPPT de IncCond (Incrémentation de la conductance) ..... 18**
**II.3.3. Description de la méthode de l'incrémentation de la conductance (IncCond) ..... 20**
**II.4. Convertisseur statique DC-AC (Onduleur) ..... 22**
**II.4.1. Principe de fonctionnement ..... 23**
**II.4.2. Onduleur triphasé ..... 24**
**II.4.3. Modélisation de l'onduleur triphasé ..... 24**
**II.5. Classification des onduleurs ..... 26**
**II.5.1. Onduleur autonome ..... 26**
**II.5.2. Onduleur non autonome ..... 26**
**II.6. Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI) ..... 27**
**II.6.1. Théorie des techniques de commande MLI ..... 27**
**II.6.2. MLI Sinusoïdale échantillonnée basée sur la dispersion de la tension triphasée ..... 28**
**II.7. Conclusion ..... 29**

## Chapitre III : Système photovoltaïque connecté au réseau

**III.1. Introduction ..... 30**
**III.2 Les types des onduleurs couplés au réseau ..... 30**
**III.2.1 Onduleurs modulaires ..... 30**
**III.2.2 Onduleurs centralisés ..... 31**
**III.2.3. Onduleurs Rangés ou " String " ..... 31**
**III.3. Les centrales photovoltaïques connectées au réseau ..... 32**
**III.3.1 Centrales de petite taille (Pw = 1 à 10 KW) ..... 32**
**III.3.2 Centrales de taille moyenne (Pw = 10 à 500 KW) ..... 32**
**III.3.3. Centrales de grande taille (Pw ≥ 500 KW) ..... 32**
**III.4. Structure d'un système photovoltaïque ..... 32**
**III.4.1 Le système à connexion directe au réseau ..... 32**
**III.4.2 Le système à bus continu intermédiaire ..... 33**
**III.5. Caractéristiques des onduleurs compatibles avec le réseau ..... 33**
**III.6. Problèmes de connexion des systèmes photovoltaïques au réseau ..... 33**
**III.7. Etude de la partie contrôle et commande ..... 34**
**III.7.1 Régulateur proportionnel-Intégral ..... 34**

**III.7.2 Régulateur PI avec compensation de pôle .....35**
**III.7.3. Régulateur (PI) sans compensation de pôle .....36**
**III.8. Etude de la synchronisation du convertisseur sur le réseau .....37**
**III.8.1. PLL triphasé dans le domaine de Park .....37**
**III.8.2 Elaboration et réglage des correcteurs d'une PLL triphasée .....38**
**III.9. Modélisation du filtre LC et la charge .....39**
**III.9.1. Fonction de transfert du filtre .....39**
**III.9.2. Modèle d'état de l'ensemble (onduleur, filtre LC et la charge RL) .....39**
**III.10. Conclusion .....42**

## Chapitre IV : Résultats de simulation et discussions

**IV.1.Introduction .....43**
**IV.2. Simulation de la méthode IncCond .....43**
**IV.3. Simulation de la méthode P & O .....45**
**IV.4. Caractéristiques du champ PV Type SunPower - SPR305.....47**
**IV.5. Caractéristiques du champs PV Type Kyocera- DD205GX -LP .....48**
**IV.6. Convertisseurs statiques .....48**
**IV.6.1. Convertisseur Hacheur Boost .....48**
**IV.6.2. Convertisseur Onduleur .....48**
**IV.7 Analyse des résultats .....49**
**IV.7.1 Méthode IncCond .....49**
**IV.7.2 Méthode P and O .....53**
**IV.8. Conclusion .....57**
**Conclusion Générale .....58**
**Annexe.....**
**Bibliographique.....**

# Liste des figures

**Figure I.1 : Schéma électrique du principe photovoltaïque .....03**
**Figure I.2 : Effet photovoltaïque .....04**
**Figure I.3 : Schéma équivalent électrique de la cellule photovoltaïque réelle .....05**
**Figure I.4 : Caractéristiques I(V) et P(V) d'un module PV .....07**
**Figure I. 5 : Effet de l'éclairement sur le générateur PV avec T=25°C .....08**
**Figure I.6 : Association série des cellules photovoltaïques .....09**
**Figure I.7 : Association parallèle des cellules photovoltaïques .....09**
**Figure II. 1 : Schéma synoptique du système PV contrôlé par une commande MPPT .....11**
**Figure II.2 : Modèle du système PV .....12**
**Figure II. 3 : Circuit électrique du convertisseur Boost .....14**
**Figure II. 4 : Circuit équivalent d'un hacheur boost, commutateur fermé T∈[0, DTs] .....14**
**Figure II. 5 : Circuit équivalent d'un hacheur boost, commutateur ouvert T∈ [ DTs, Ts] .....15**
**Figure II.6 : Caractéristiques de l'état d'équilibre et rapport de conversion M(D) .....17**
**Figure II.7 : Algorithme de la méthode de la Perturbation et de l'Observation .....18**
**Figure II.8 : Caractéristique P(V) d'un générateur photovoltaïque .....20**
**Figure II.9 : Algorithme de la méthode de l'incrémentation de la conductance .....21**
**Figure II.10 : Principe de conversion de l'onduleur .....23**
**Figure II.11 : Symbole et signal d'un onduleur .....23**
**Figure II.12 : Montage d'un onduleur triphasé .....24**
**Figure II.13 : Circuit de fonctionnement de l'onduleur triphasé .....25**
**Figure II.14 : Principe de la MLI sinusoïdale échantillonnée basée sur la dispersion de la tension triphasée .....28**
**Figure III.1 : Classification des onduleurs PV connectés au réseau .....31**
**Figure III.2 : Schéma de la régulation des courants de l'onduleur .....34**
**Figure III.3 : Schéma bloc du régulateur (PI) .....35**
**Figure III.4 : Schéma bloc de la régulateur PI sans compensation de pôle .....36**
**Figure III.5 : Principe de la PLL dans le domaine de Park .....37**
**Figure III.6 : Schéma de régulateur de la PLL .....38**
**Figure III.7 : Fonctionnement de la PLL triphasée .....38**
**Figure III.8 : Schéma monophasé équivalent du filtre LC .....39**
**Figure III.9 : Schéma du filtre LC et de la charge RL .....39**

**Figure IV.1 : Le modèle général IncCond .....44**
**Figure IV.2 : Le modèle général P and O .....46**
**Figure IV.3 : Caractéristiques I-V et P-V du champ photovoltaïque .....47**
**Figure IV.4 : Tensions Vdc moyenne et Vdc référence .....49**
**Figure IV.5 : Puissance, Tension, Rapport cyclique, Irradiations et la MPPT .....50**
**Figure IV.6 : La tension Va(V) et le courant Ia(A) .....51**
**Figure IV.7 : La tension Vmoy et m ( Taux de modulation ) .....53**
**Figure IV.8 : Irradiations, Puissance, Tension et Rapport cyclique .....54**
**Figure IV.9 : Tension Va (V) et Ia(A)**

# Nomenclature

**Ir** : Eclairement (irradiations) (W/m²).

**Iph**: Le photo courant (A).

**Isat**: Courant de saturation (A).

**Rp**: Résistances parallèle shunt(Ω) .

**RS** : Résistance série (Ω).

**D** : le rapport de cyclique .

**Tc** : Température de jonction (°K).

$\cos\alpha$ : Le facteur de puissance.

**Icc**: Le courant de court-circuit (A).

**Vco**: La tension de circuit ouvert (V).

**Ns** : Nombre de modules dans le panneau en série.

**Np**: Nombre de modules dans le panneau en parallèle.

**Pmax**: La puissance maximale produite PV (W).

**Vmax**: Tension qui correspond à la puissance maximale (V).

**Vmoy :** Tension moyenne (V)

**Imax**: Courant qui correspond à la puissance maximale (A).

**Vopt**: Tension optimale (V).

**Iopt**: Courant optimum (A).

**Vco**: Tension à circuit ouvert (V).

**Icc**: Courant de court-circuit (A)

**k** : coefficient de Boltzmann ($1{,}38.10^{-23}$ J /° K)

# Liste des acronymes

**PV**: Photovoltaïque.

**GPV**: Générateur Photovoltaïque.

**MPPT**: Maximum Power Point Tracking.

**P&O**: Perturbation et Observation.

**DC**: Courant Continu (Direct Curent).

**AC**: Courant Alternatif (Alternative Curent).

## Introduction Générale

En raison de la crise énergétique mondiale, les sources classiques sont devenues incapables de faire face à la demande croissante d'énergie et l'évolution démographique et du développement de certaines zones géographiques.

Par conséquent, les systèmes des énergies renouvelables et alternative devraient augmenter l'évolution de la production. Ainsi, il est important d'explorer mieux les moyens des sources des énergies alternatives comme les énergies solaire, éolienne, thermique, biomasse, hydraulique et d'autres.

L'énergie photovoltaïque est une source intéressante, elle est renouvelable, inépuisable et non polluante, et elle est de plus en plus vivement utilisée dans applications diverses. En ce qui concerne l'importance de l'énergie solaire, il convient de dire que l'énergie solaire est une solution en perspective unique pour la crise énergétique. Cependant, et en dépit de tous les avantages de l'énergie solaire, on n'a pas présenté son efficacité souhaitable [1][2].

L'efficacité des cellules solaires dépend beaucoup de plusieurs facteurs tels que la température, l'ensoleillement, les caractéristiques spectrales de la lumière du soleil, la poussière et l'ombrage, qui se traduisent par des mauvaises performances. En abordant la faible efficacité des systèmes photovoltaïques, divers procédés ont été proposés parmi lesquels: une conception appelée «Poursuivre du point de puissance maximale "(MPPT) est imploré.

Le photovoltaïque présente un point de fonctionnement optimal pour extraire la puissance maximale appelée le point de puissance maximale (MPP), qui varie en fonction de la température des cellules, le degré de rayonnement solaire, la nature de la charge et la technologie des cellules photovoltaïques[3].

Les variations des irradiations solaire et de la température provoque le poursuit qui dévie le point de puissance maximale, donc le poursuit doit répondre dans un court laps de temps à ces variations afin d'éviter la perte de l'énergie. Suite à une variété de point de puissance maximale, la méthode (MPPT) est développée. Les méthodes varient selon leurs complexité d'implémentation, paramètres détectés, vitesse de convergence, coût, plage de fonctionnement et la popularité de ses applications [4].

Actuellement, les algorithmes les plus répondus sont la méthode de perturbation et d'observation ( P et O ) et la méthode incrémentale de conductance (IncCond).

Pour mettre en œuvre la technique MPPT, il est nécessaire d'inclure le convertisseur continu-continu dans le système PV. Le convertisseur DC-DC peut être soit Buck ou Boost. Le convertisseur buck est dévolteur, et le Boost est survolteur. Ils sont populaires en raison de leur rendement élevé et leur taille compacte [5].

Dans ce travail, le convertisseur élévateur est choisi où le rapport cyclique du convertisseur continu-continu est commandé par les contrôleurs incrémental de conductance, perturbation et observation ainsi le régulateur intégral. Comme, on traite aussi la commande des onduleurs connectés au réseau.

En conséquence, l'objectif de ce travail est quel que soient les irradiations, le système de contrôle du convertisseur (hacheur) assure l'optimisation du point de fonctionnement maximum de la puissance.

Cependant, quatre chapitres ont été mis à l'œuvre :

- ✓ Le premier chapitre, décrit l'énergie solaire photovoltaïque et le principe de conversion des photons en électricité;
- ✓ Le deuxième chapitre, présente la modélisation des composants du système PV et les commandes utilisées des convertisseurs statiques;
- ✓ Le troisième chapitre, établit le raccordement du système PV au réseau électrique;
- ✓ Et le quatrième chapitre, expose la simulation du système et l'évaluation du MPPT.

# I L'énergie solaire photovoltaïque

## I.1 Introduction

Le développement de la technologie s'est évolué avec la volonté des entreprises des télécommunications d'installer des systèmes fonctionnant dans des endroits éloignés des centre urbains (et de là des réseaux électriques). Le deuxième booster a été (la course à l'espace). La cellule solaire a été et reste le meilleur moyen (à moindre coût et de poids) de fournir la quantité d'énergie redemandée pendant de longues périodes de séjour dans l'espace. Enfin, la crise énergétique de 1973, a élargi l'intérêt pour les applications terrestres [6].

## I.2 Principe du photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque est l'énergie obtenue par la conversion de la lumière en électricité. Cette énergie est obtenue grâce au phénomène physique appelé l'effet photovoltaïque.

Rapporté par Edmond Becquerel en 1839, le principe est assez simple et consiste en l'apparition d'une différence de potentiel aux extrémités d'une structure de matériel semi-conducteur, produit par l'absorption de la lumière [6].

Le principe photovoltaïque expliqué peut être modélisé sous la forme d'un schéma électrique équivalent (figure I.1) représenté à la base en plusieurs modèles sous Matlab-Simulink.

Le principe de l'effet photovoltaïque n'est autre que celui d'une diode, lorsque on éclaire la jonction PN, la cellule étant chargée par une résistance, on observe l'apparition d'un courant inverse I sous une tension V en sens direct.

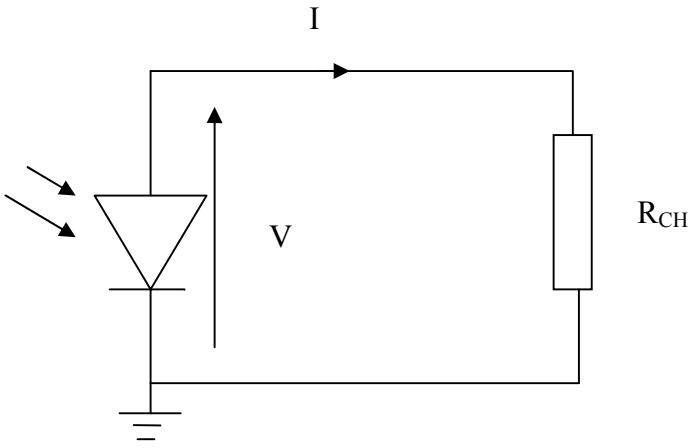



**Figure I.1 : Schéma électrique du principe photovoltaïque**

Le générateur photovoltaïque est l'élément de base de toutes les installations photovoltaïques, c'est un convertisseur instantané qui reçoit une énergie sous forme de rayonnement solaire de nature intermittente et fournit une énergie sous forme électrique.

## I.3 L'effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque est un phénomène physique propre à certains matériaux appelés "semi-conducteurs" (le plus connu est le silicium utilisé pour les composants électroniques).

Cet effet voltaïque a été constaté lorsque les photons heurtent une surface mince de ces matériaux, ils transfèrent leur énergie aux électrons de la matière. Ceux-ci se mettent alors en mouvement dans une direction particulière, créant ainsi un courant électrique recueilli par des fils métalliques très fins. Il suffit d'assembler des courants provenant de d'autres dispositifs similaires afin d'atteindre la puissance désirée pour des utilisations quelconques.[7]

Plus précisément, comme le montre la figure I.2 et comme cela est expliqué, l'effet photovoltaïque est propre à la cellule (unité fondamentale de conversion). Dans le cas des panneaux photovoltaïque, les cellules sont réalisées a partir de deux couches de silicium, une dopée P (en général dopée au bore) et l'autre dopée N (en général dopée au phosphore).

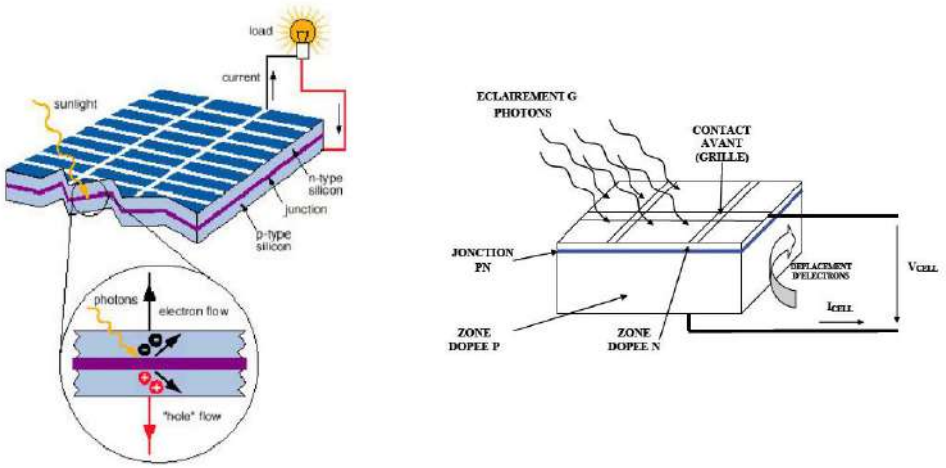



**Figure I.2: Effet photovoltaïque**

Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches.

Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule. La tension ainsi générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température et du vieillissement de la cellule.

On note que d'autres formes de capteurs peuvent être utilisées pour la conversion photovoltaïque, notamment les jonctions Schottky et les cellules multicouches [7].

## I.4 Modélisation d'une cellule photovoltaïque

Lorsque la jonction est éclairée, elle présente la particularité de pouvoir fonctionner en générateur, en produisant un courant de court-circuit proportionnel à l'éclairement [7]. Ce comportement en statique peut être décrit par l'équation électrique suivante:

$$I_{PV} = I_{cc} - I_{Sat}\left[\exp\left(\frac{V_{PV}+(I_{PV}\times R_{ser})}{neTK}\right) - 1\right] - \frac{V_{PV}+(I_{PV}\times R_{ser})}{R_{shu}} \quad \text{(I-1)}$$

Avec :

eT K=VT: représentant le potentiel thermodynamique,

$I_{sat}$: le courant de saturation (A),

K: la constante de Boltzman ($1{,}38110^{-23}$ J/K),

T: la température effective des cellules (°K),

e: la charge d'un électron (C),

n: le facteur de non idéalité de la jonction,

$I_{pv}$ : le courant fourni par la cellule lorsqu'elle fonctionne en générateur (A),

$V_{pv}$: la tension aux bornes de cette même cellule (V),

$I_{cc}$: le photo courant de la cellule dépendant de l'éclairement et de la température (ou bien courant de court circuit) (A),

$R_{shu}$: la résistance shunt caractérisant les courants de fuite de la jonction (n),

$R_{ser}$: la résistance série représentant les diverses résistances de contacts et de connexions (n).

Le modèle électrique correspondant à l'équation (I-1) est décrit ci-dessous (Figure I.3).

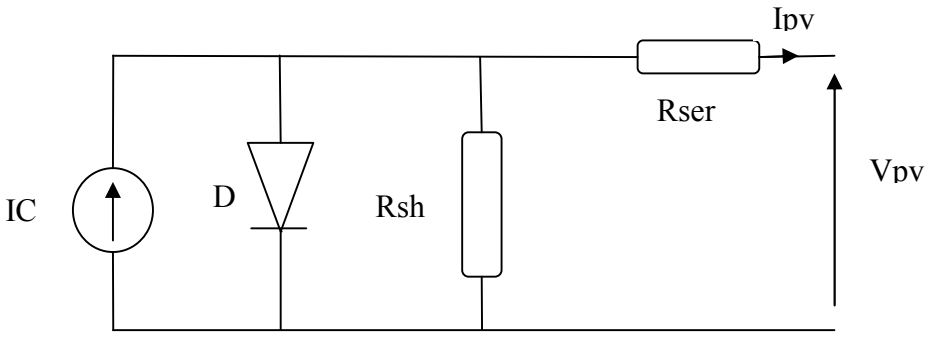



**Figure I.3: Schéma électrique équivalent de la cellule photovoltaïque réelle**

Ce modèle a l'avantage d'être simple et implantable sur bon nombre de simulateurs. Il permet d'obtenir le comportement statique d'une cellule photovoltaïque sous polarisation.

Toutefois, pour l'étude du comportement d'un générateur photovoltaïque en conditions réelles de fonctionnement, ce modèle permet de reproduire les principaux comportements interagissant avec le reste du système.

## I.5. Le module photovoltaïque

### *I.5.1 Modélisation d'un module photovoltaïque*

En associant les cellules photovoltaïques en série (somme des tensions de chaque cellule) ou en parallèle (somme des intensités de chaque cellule), on peut constituer un module photovoltaïque selon les besoins des applications visées. Les deux types de regroupement sont en effet possibles et souvent utilisés afin d'obtenir en sortie des valeurs de tension et intensité souhaitées. Ainsi, pour $N_s$ cellules en série, constituant des branches ($N_p$) elles-mêmes en parallèle, la puissance disponible en sortie du générateur photovoltaïque est donnée par :

$$P_{pv} = N_s.N_p.V_{pv}.I_{pv} \qquad \text{(I-2)}$$

Si l'on désire avoir un générateur photovoltaïque ayant un courant de sortie plus intense, on peut soit faire appel à des cellules photovoltaïques de plus grande surface et de meilleur rendement, ou associer en parallèle plusieurs modules photovoltaïques de caractéristiques similaires. Ainsi, le générateur photovoltaïque constitué peut fonctionner de façon autonome.

### *I.5.2 Caractéristiques I-V et P-V du module photovoltaïque*

Le module solaire photovoltaïque étant une association de cellules solaires individuelles, sa caractéristique I-V est directement liée à la caractéristique de la cellule solaire de base. De même pour la cellule, la tension présentée, lorsqu'il ne circule aucun courant est appelée tension en circuit ouvert ($Vc_o$). À l'opposé, le courant présent lorsqu'il n'y a aucune tension est appelé courant de court-circuit ($I_{cc}$). Dans ces deux situations, aucune puissance n'est extraite du panneau photovoltaïque.

La meilleure combinaison s'appelle le point de puissance maximale du panneau solaire photovoltaïque. La tension et le courant correspondants sont appelés tension à puissance maximale ($V_{pmax}$) et courant à puissance maximale ($I_{pmax}$). Le point de puissance maximale sert à déterminer le rendement nominal du panneau solaire et la puissance en ce point est exprimée en $W_c$ (watt crête).

En cas de stockage de l'électricité solaire produite par les panneaux photovoltaïques dans des batteries stationnaires, ce sont celles-ci qui vont fixer la tension de fonctionnement du système,

selon leur état de charge c.à.d par exemple entre 10,8 V et 14 V pour une batterie de 12 V nominal (tension différente de $V_{pmax}$).

Alors, le courant solaire généré est certainement différent de Ipmax et la puissance solaire extraite du panneau photovoltaïque n'est pas égale à la puissance maximale.

Ceci reste toujours vrai, même si l'ensoleillement est de 1000W/m$^2$ et la température des cellules de 25°c (conditions STC).

La figure I-4 représente les caractéristiques I-V et P-V du module ou du générateur PV utilisé.

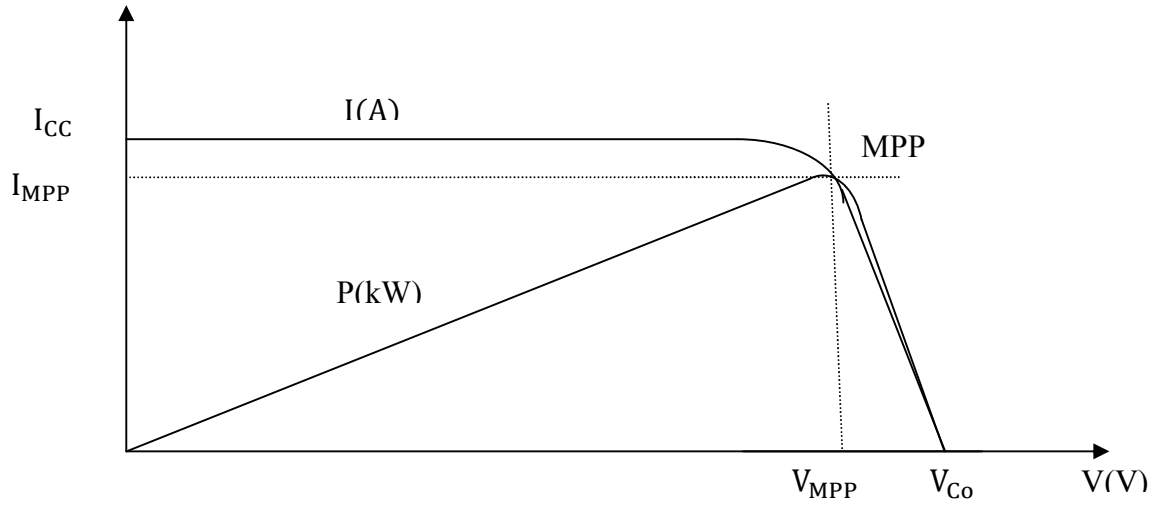



**Figure I.4: Caractéristiques I-V et P-V d'un module PV**

## I.6 Générateur photovoltaïque

La cellule solaire, unité de base d'un panneau solaire photovoltaïque, produit typiquement une puissance de 1,3 W pour une surface de 10 cm$^2$. Pour produire plus de puissance, des cellules solaires identiques sont assemblées pour former un module solaire (ou panneau photovoltaïque). La mise en série de plusieurs cellules solaires somme les tensions pour un même courant, tandis que la mise en parallèle somme les courants en conservant la tension.

## I.7 Effet de l'éclairement sur le générateur photovoltaïque

Une baisse de l'ensoleillement provoque une diminution de la création de paires électron-trou avec un courant à l'obscurité inchangé. Le courant du panneau solaire étant égal à la soustraction du photo courant et du courant de diode à l'obscurité, il y a une baisse du courant solaire $I_{cc}$ proportionnelle à la variation de l'ensoleillement accompagnée d'une très légère

diminution de la tension $V_{co}$ et donc un décalage du point $P_{max}$ du panneau solaire vers les puissances inférieures (Figure I.5).

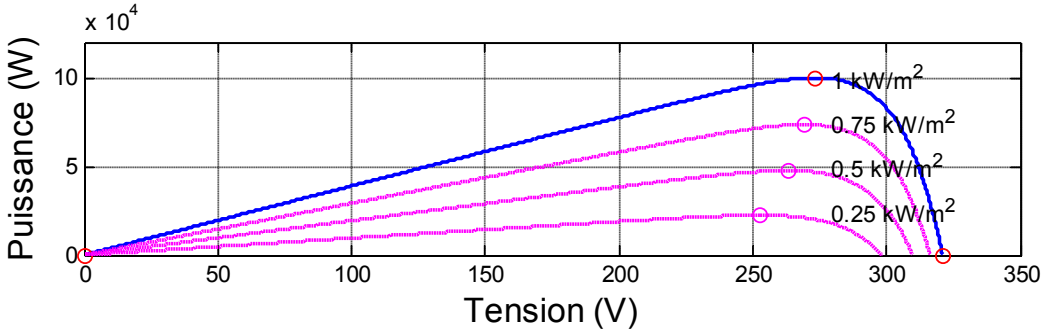



**Figure I.5 : Effet de l'éclairement sur le générateur PV avec T=25°C**

## I.8 Association des modules solaires photovoltaïques avec batteries

On associe fréquemment les panneaux solaires photovoltaïques en série pour obtenir des tensions multiples de 12 Volts (24V, 48V) et en parallèle pour augmenter le courant solaire. Les associations élémentaires des panneaux photovoltaïques se réalisent directement dans les boîtes de jonction des modules solaires. Dans les conditions standard STC (l000W/$m^2$; 25°C; AM 1.5), la puissance maximale pour une cellule au silicium de 10 $cm^2$ serait d'environ 1.25 W.

La cellule photovoltaïque élémentaire constitue donc un générateur électrique de très faible puissance insuffisant pour la plupart des applications domestiques ou industrielles. Les générateurs photovoltaïques sont, de ce fait, réalisés par association, en série et/ou en parallèle d'un grand nombre de cellules élémentaires. Cette association doit être réalisée en respectant des critères précis, en raison des déséquilibres existant dans un réseau de photopiles en fonctionnement. En effet, bien que, les nombreuses cellules choisies, théoriquement identiques constituent le générateur présentent des caractéristiques différentes du fait des dispersions de construction inévitables, mais aussi d'un éclairement et d'une température non uniformes sur l'ensemble du réseau [8].

Les connexions en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant pour une même tension. La plupart des modules commercialisés sont composés de 36 cellules en silicium cristallin connectées en série pour des applications en 12 volts.

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par l'addition des tensions à courant donné (Figure I.6).

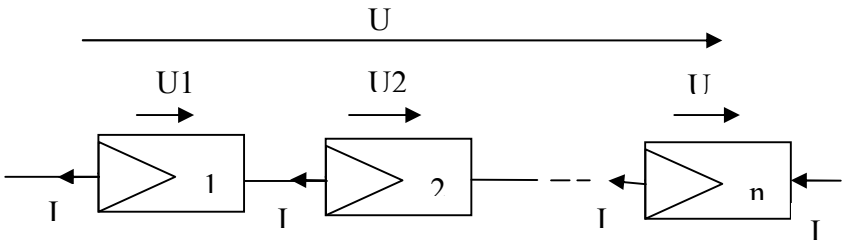



**Figure I.6 : Association série des cellules photovoltaïques**

Dans un groupement de cellules connectées en parallèle, les cellules étant soumises à la même tension, les intensités s'additionnent : la caractéristique résultante est obtenue par addition de courants à tension donnée (Figure I.7).

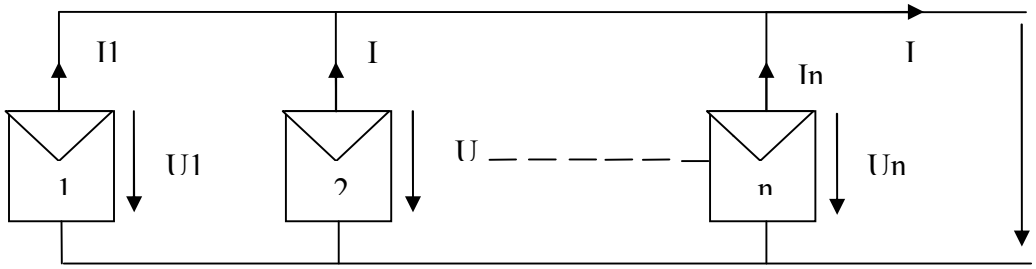



**Figure I.7: Association parallèle des cellules photovoltaïques**

## I.9 Conclusion

Ce chapitre décrit l'énergie solaire photovoltaïque et le principe de conversion des photons en électricité, l'effet photovoltaïque et la modélisation des capteurs solaires.

Les systèmes photovoltaïques générateurs d'électricité peuvent être exploités dans différents lieux : électrification des sites isolés, installation dans les bâtiments ou raccordement direct au réseau d'électricité telle que notre cas ou d'autres...

## II Convertisseurs statiques DC-DC & DC-AC et leurs commandes

### II.1 Introduction

Les convertisseurs statiques constituent, au même titre que les machines à courant continu, un fonctionnement à partir du réseau alternatif, Celles alimentées par une source de tension continue, éventuellement créée par redressement à partir du réseau.

L'énergie électrique est surtout distribuée sous forme de tensions alternatives sinusoïdales. L'électronique de puissance permet de modifier la présentation de l'énergie électrique pour l'adapter aux différents besoins. L'électronique de puissance utilise des convertisseurs statiques. Ces derniers utilisent des interrupteurs électroniques.

Exemples**:**

Maillon fondamental des systèmes d'entraînement à vitesse variable. Ceux des machines à courant continu sont spécifiques et peuvent être classés en quatre grandes familles:

- Conversion AC - DC : redresseur.
- Conversion DC - AC : onduleur.
- Conversion DC - DC : hacheur.

Dans cette partie on présente une brève description des convertisseurs statiques et description de type de convertisseur statique.

Avec le développement de l'automatique, de l'électronique et de l'informatique, on peut dire que les convertisseurs statiques remplacent les «machines» utilisant des composants électroniques en commutation [9].

Parmi les avantages de ces convertisseurs:

- Transfert de puissance peut-être contrôlé et même régulé.

- Système moins encombrant et moins lourd.

- Un rendement excellent.

- Grâce à l'automatisation et la facilité de mise œuvre.

- Protections plus efficaces.

- Grâce aux progrès dans la fabrication et le montage des composants, un coût relatif en baisse.

## II.2 Convertisseur statique DC-DC (Hacheur)

Une commutation d'un convertisseur est constituée de condensateurs, des inductances et des interrupteurs. Tous ces dispositifs idéalement ne consomment pas d'énergie, qui est la raison de la haute efficacité de commutation des convertisseurs. L'interrupteur est réalisée avec un dispositif à semi-conducteurs en mode commuté, généralement un MOSFET.

Dans cette partie, le principe de la conversion de la puissance de commutation est introduit et ses détails sont discutés. Le modèle mathématique pour le convertisseur boost est dérivé de représenter l'état stable du circuit et du comportement dynamique.

### *II.2.1 Intégration du régulateur MPPT dans système photovoltaïque*

Pour qu'un générateur photovoltaïque (PV) fonctionne dans les conditions optimales, il doit être doté d'un quadripôle d'adaptation qui cherche de façon automatique le point de puissance maximale (PPM) du générateur PV. Ceci est réalisable quand le système est placé dans un environnement où les conditions météorologiques (ensoleillement, température) et charge sont stables.

Le problème qui se pose est la conception et la réalisation d'une commande qui converge le système PV vers les conditions optimales indépendamment des variations météorologiques et de la charge.

La figure II.1, représente la description symbolique du schéma synoptique d'un système PV alimentant une charge résistive ( RS ).

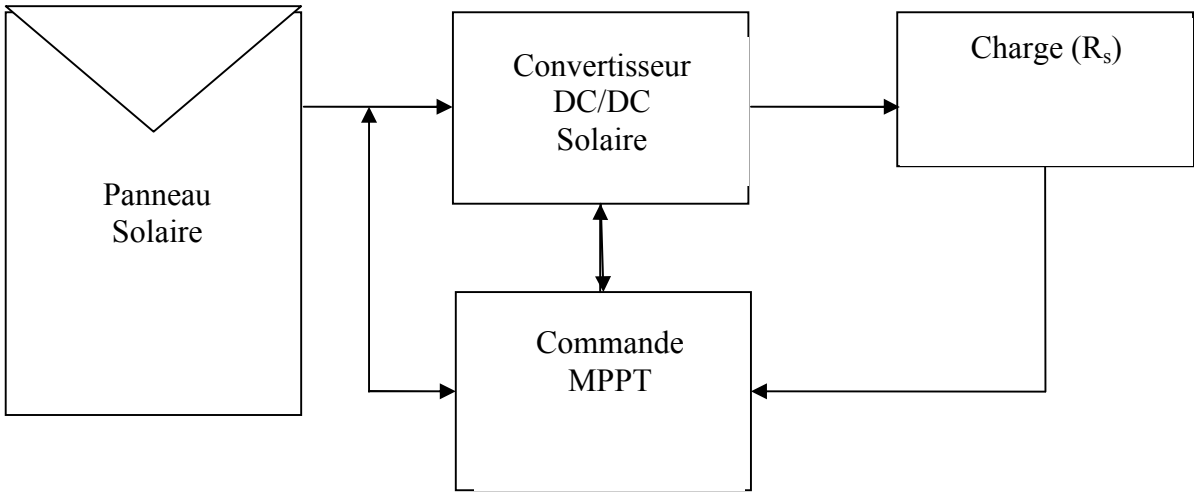



**Figure II.1: Schéma synoptique du système PV contrôlé par une commande MPPT**

Le quadripôle d'adaptation est un convertisseur d'énergie de type survolteur. Les différents éléments du quadripôle (inductance L avec sa résistance série $R_L$, capacités $C_E$ et $C_S$, diode de roue libre D1 , transistor Mosfet).

Le convertisseur fonctionne toujours en régime continu, lorsque la fréquence du signal modulé en largeur d'impulsion (MLI) permet la commande de l'interrupteur du convertisseur. Ce signal est délivré par la commande MPPT.

Le rôle principal du convertisseur statique est de faire une adaptation d'impédance de sorte que le panneau délivre le maximum d'énergie.

Ce quadripôle peut être un convertisseur DC-DC survolteur ou dévolteur selon les applications.

La commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) est un organe fonctionnel du système PV, elle permet de chercher le point de fonctionnement optimal du générateur PV dans les conditions météorologiques et de la charge stables.

Que ce soit une commande analogique ou digitale, le principe de régulation est basé sur la variation automatique du rapport cyclique D à la valeur adéquate de manière à maximiser la puissance à la sortie du panneau PV.

### *II.2.2 Adaptation du système par un convertisseur élévateur DC-DC (Hacheur Boost)*

Le système PV est formé par un générateur PV, convertisseur d'énergie (survolteur) et une charge ($R_S$). L'interrupteur Mosfet est commandé par un signal de période T et de rapport cyclique D.

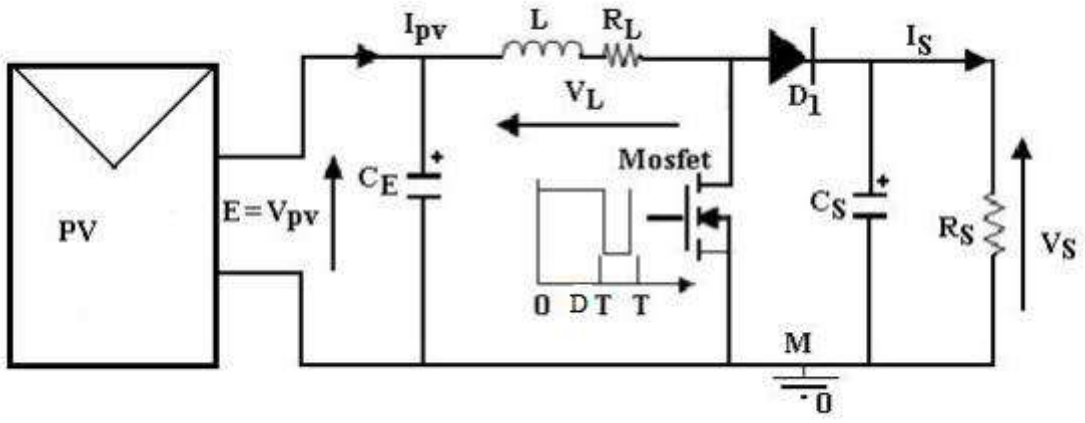



**Figure II.2: Modèle du système PV**

Les grandeurs électriques des sorties ( VS et IS ) dans le convertisseur élévateur sont liées à celles d'entrées ( E et Ipv ) en fonction du rapport cyclique du signal qui commande l'interrupteur du convertisseur (Figure II.2) par les relations:

$$Vs = E / (1- D) \quad \text{(II-3)}$$

$$Is = (1 - D)\, Ipv \quad \text{(II-4)}$$

A partir des équations (II-3) et (II-4), nous pouvons déduire la résistance à la sortie du panneau PV ( Rpv ) en fonction de D et RS :

$$Rpv = Rs\,(1 - D)^2 \quad \text{(II-5)}$$

Le rapport cyclique D s'écrit en fonction des résistances Rpv et RS :

$$D = 1 - \sqrt{\frac{Rpv}{Rs}} \quad \text{(II-6)}$$

Ou bien

$$\frac{V_0}{V_{pv}} = \frac{T}{t_{off}} = \frac{1}{1-D}$$

$$D = 1 - \frac{V_{pv}}{V_{ch}}$$

Puisque le rapport D est inférieur à 1 ( D < 1), le convertisseur ne joue le rôle d'un élévateur que si la charge RS remplit la condition suivante:

$$Rs > Rpv \quad \text{(II-7)}$$

Dans les conditions optimales et pour une charge Rs donnée, la résistance interne du panneau ( $R_{pv} = R_{opt}$ ) et le rapport cyclique ( $D = D_{opt}$ ) obéissent donc à l'équation:

$$R_{opt} = (1 - D_{opt})^2 \,.\, R_S \quad \text{(II-8)}$$

La relation (II-6) montre que, pour une puissance incidente W, la puissance optimale transférée à la charge ne pourrait être maximale que pour un rapport cyclique bien défini ( $D_{opt}$ ) point PPM.

### *II.2.3 Convertisseur de type DC-DC hacheur Boost*

Les principes de l'approximation des petites ondulations, inducteur volt-second et capacité charge peuvent être utilisés dans tous les convertisseurs de commutation pour trouver les tensions et les courants de son état d'équilibre.

Le convertisseur boost, comme le montre dans la figure (II.3), est aussi connu comme le convertisseur élévateur "step-up". Le nom implique son application typique de la conversion d'une faible tension d'entrée à une haute tension de sortie, son fonctionnement est l'inverse d'un convertisseur buck (dévolteur). [33]

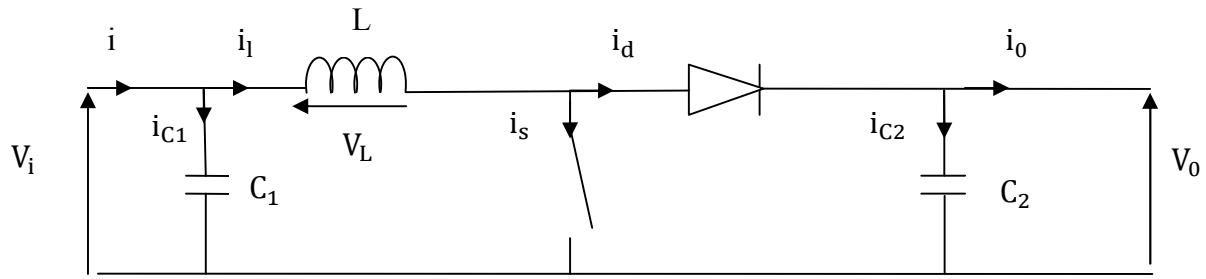



**Figure II.3: Circuit électrique du convertisseur Boost [10]**

### *II.2.4 Modèle du circuit équivalent*

En premier temps $DT_S$ , figure (II.4), le transistor est fermé, le courant dans l'inductance croit progressivement, au fur et à mesure elle emmagasine de l'énergie, jusqu'à la fin de la première période, le transistor s'ouvre et l'inductance L s'oppose à la diminution du courant $I_l$, ainsi elle génère une tension qui s'ajoute à la tension de source, qui s'applique sur la charge a travers la diode**.** [33]

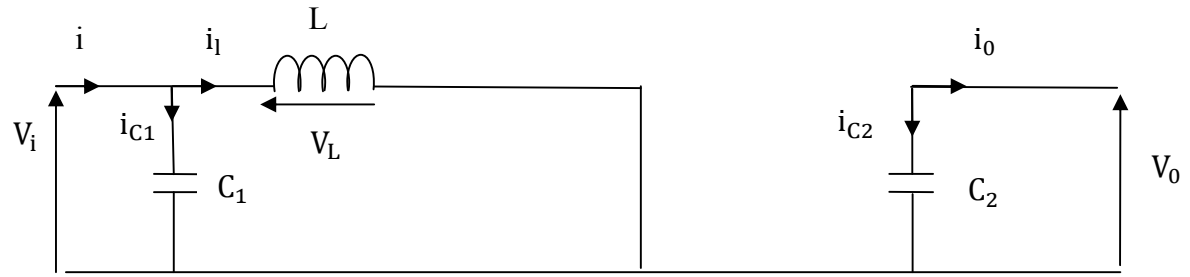



**Figure II.4: Circuit équivalent d'un hacheur boost, commutateur fermé T∈[0, DTs]**

Après que le commutateur est ouvert dans le deuxième intervalle de temps D'Ts de la période de commutation figure (II.4), la nature des objets de l'inductance de la discontinuité dans la circulation du courant, et le courant élevé à travers d'une diode de roue libre placée en avant à une haute tension qui est appliquée dans l'ensemble du chargement.

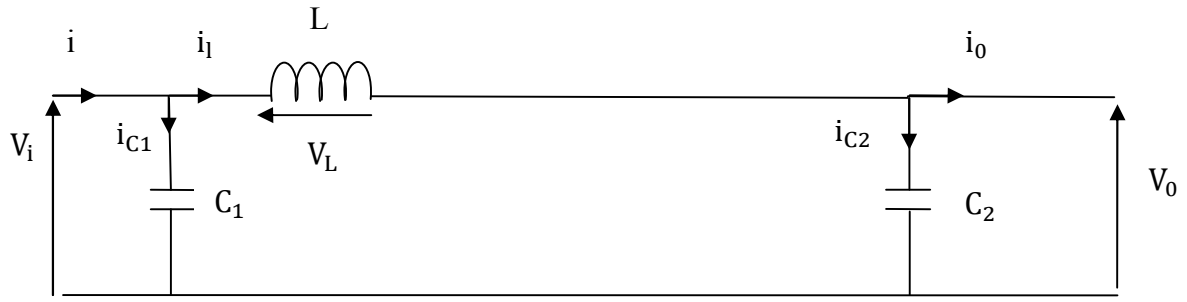



**Figure II.5: Circuit équivalent d'un hacheur boost, commutateur ouvert T∈ [ DTs, Ts] [33]**

Pour obtenir l'état d'équilibre l'impulsion des fonctions de transfert d'un hacheur boost et l'expression de son rapport de conversion M(D), les deux différents intervalles du temps DTs et D'Ts pour la période de commutation Ts doivent être considérés.

La figure (II-5) montre le circuit équivalent d'un convertisseur boost pendant l'intervalle de temps DTs, lorsque l'interrupteur est fermé. L'application de la loi de kirchhoff des équations du circuit mène à la série suivante des expressions de DTs : [33]

$$ic1(t) = C1\frac{dvi(t)}{dt} = i(t) - i1(t)$$

$$ic2(t) = C2\frac{dv0(t)}{dt} = -i0(t) \qquad \text{(II-9)}$$

$$v1(t) = L\frac{di1(t)}{dt} = vi(t)$$

Pour la période de temps de l'interrupteur est ouvert D'Ts montré à la figure (II.5), une deuxième série d'équations peut être obtenue :

$$ic1(t) = C1\frac{dvi(t)}{dt} = i(t) - i1(t)$$

$$ic2(t) = C2\frac{dv0(t)}{dt} = i1(t) - i0(t) \qquad \text{(II-10)}$$

$$v1(t) = L\frac{di1(t)}{dt} = vi(t) - v0(t)$$

### *II.2.5 Caractéristiques de l'état d'équilibre et rapport de conversion M(D)*

L'approximation des petites ondulations comme expliquée avant, il est possible de négliger l'ondulation de commutation dans les signaux de convertisseur et de les remplacer par leurs valeurs moyennes. Cela simplifie les équations (II-9) à :

$$\begin{aligned} ic_1 &= I\text{-}I_l \\ ic2 &= -I_o \\ v_l &= V_i \end{aligned} \tag{II-11}$$

et (II-10) à :

$$\begin{aligned} ic_1 &= I\text{-}I_l \\ ic2 &= I_l\text{-}I_o \\ v_l &= V_i\text{-}V_o \end{aligned} \tag{II-12}$$

Pour trouver les valeurs moyennes de ic1, ic2, et I pendant toutes les périodes de commutation Ts, les équations (II-11) et (II-12) sont remplacées en (II-13):

$$\begin{aligned} &< x(t) >= \frac{1}{\mathrm{Ts}} \int_{\mathrm{t}}^{\mathrm{t+Ts}} \mathrm{x}(\tau)\mathrm{d}\tau \\ &= \tfrac{1}{\mathrm{Ts}} [\textstyle\int_{\mathrm{t}}^{\mathrm{t+DTs}} \mathrm{x}[0, \mathrm{DTs}](\tau)\mathrm{d}\tau + \int_{\mathrm{t+DTs}}^{\mathrm{t+Ts}} \mathrm{x}[\mathrm{DTs}, \mathrm{Ts}](\tau)\mathrm{d}\tau] \end{aligned} \tag{II-13}$$

En appliquant le principe d'inductor volt-second balance et capacitor charge balance de l'inductance, enfin, les moyennes d'un modèle en courant continu d'un convertisseur boost sont :

$$\begin{aligned} &< ic1(\mathrm{t}) \geq D(\mathrm{I} - \mathrm{I1}) + \mathrm{D}'(\mathrm{I} - \mathrm{I1}) = 0 \\ &< ic2(\mathrm{t}) >= D(-\mathrm{I0}) + \mathrm{D}'(\mathrm{I1} - \mathrm{I0}) = 0 \\ &< vi(\mathrm{t}) >= Dvi + \mathrm{D}'(\mathrm{vi} - \mathrm{v0}) = 0 \end{aligned} \tag{II-14}$$

Avec D' = 1-D, ce peut être encore simplifiée pour une dernière série d'équations décrivant les caractéristiques de l'état d'équilibre en composant continu :

$$I = I_l \tag{II-15}$$

$$I_o = D'I_l \tag{II-16}$$

$$V_i = D'V_o \tag{II-17}$$

où (II-18) donne le rapport de conversion M (D) d'un convertisseur boost l'idéal :

$$M(D) = \frac{v0}{vi} = \frac{1}{D'} = \frac{1}{1-D} \qquad \text{(II-18)}$$

La figure (II.6) illustre cette relation pour le convertisseur boost. [33]

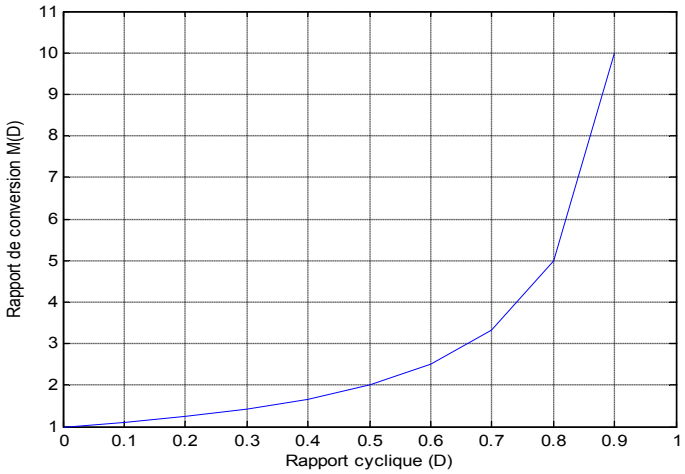



**Figure II.6 : Rapport de conversion M(D) en fonction de D pour un hacheur boost**

## II.3 La commande MPPT (Maximum Power Point Tracking)

La commande MPPT est un organe fonctionnel du système PV et permet de chercher le point de fonctionnement optimal du générateur PV dans les conditions météorologiques et de la charge stables.

### *II.3.1 Méthode MPPT de P&O (Perturbation et Observation)*

L'algorithme de la méthode P&O est donné par la figure (II.7). La tension aux bornes du générateur photovoltaïque est volontairement perturbée (augmentée ou diminuée d'une quantité( I/V) puis la puissance délivrée par le générateur photovoltaïque est comparée à celle obtenue avant la perturbation. Précisément, si la puissance aux bornes du générateur photovoltaïque est augmentée du fait de la perturbation, la perturbation suivante est faite dans la même direction. Réciproquement, si la puissance diminue, la nouvelle perturbation est réalisée dans le sens opposé. Cette opération se répète de façon itérative, jusqu'à ce que l'on se rapproche alors dans chaque cas du point de puissance maximale.

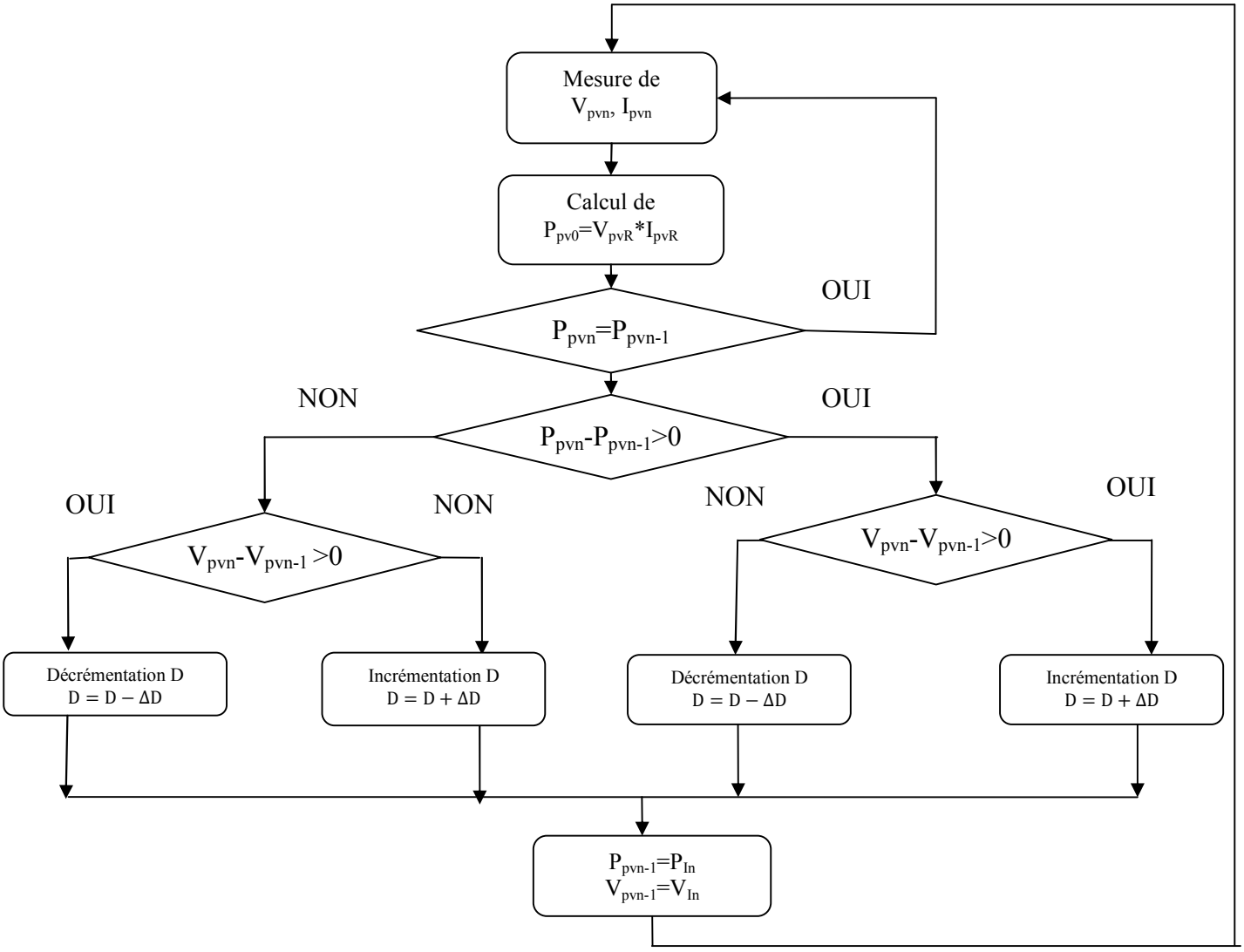



**Figure II.7 : Algorithme de la méthode de la Perturbation et de l'Observation[33]**

### *II.3.2 Méthode MPPT de IncCond (Incrémentation de la conductance)*

Cette méthode se base directement sur l'évaluation de la conductance et la variation de la conductance du générateur photovoltaïque.

La conductance est une grandeur physique relativement connue: il s'agit du quotient de l'intensité par la tension ($G = \frac{I}{V}$).

La variation de la conductance est beaucoup plus rarement définie, il s'agit du quotient de la variation, entre deux instants, de l'intensité Pat: celle de la tension ($dG = \frac{dI}{dV}$). En comparant la conductance G à l'incrémentation de la conductance dG, on va chercher le maximum de la puissance délivrée par le générateur photovoltaïque.

Précisément, la puissance en sortie de la source peut s'écrire:

$$P = I \times V \tag{II-19}$$

D'où en dérivant:

$$\frac{dI}{dV} = I \times \frac{dV}{dV} + V \times \frac{dI}{dV} \tag{II-20}$$

$$\frac{dP}{dV} = I + V \times \frac{dI}{dV} \tag{II-21}$$

Donc,

$$\left(\frac{I}{V}\right) \frac{dP}{dV} = \frac{I}{V} + \frac{dI}{dV} \tag{II-22}$$

Soit:

$$\left(\frac{I}{V}\right) \frac{dP}{dV} = G + dG \tag{II-23}$$

En général, la tension issue de la source est positive, c'est pourquoi, nous pouvons déduire les résultats clés de la méthode de la conductance incrémentielle.

$$\frac{dP}{dV} > 0 \text{ donc, } G > -dG \tag{II-24}$$

$$\frac{dP}{dV} = 0 \text{ donc, } G = -dG \tag{II-25}$$

$$\frac{dP}{dV} < 0 \text{ donc, } G < -dG \tag{II-26}$$

L'équation (II-24) est utilisée pour repérer le point de puissance maximale. Les équations (II-25) et (II-26) sont employées pour déterminer la direction dans laquelle une perturbation doit se produire pour diriger le point de fonctionnement vers le point de puissance maximale, et la perturbation est répétée jusqu'à ce que l'équation (II-24) soit satisfaite. Une fois que le point de puissance maximale est atteint, le système continue à fonctionner en ce point jusqu'à ce qu'un changement du courant soit mesuré.

Ce changement du courant se corrélera avec un changement d'irradiation solaire du générateur photovoltaïque. À mesure que l'irradiation solaire sur le générateur photovoltaïque augmente, le point de puissance maximale se déplace vers la droite sur la caractéristique P(V). Pour compenser ce mouvement du point de puissance maximale, le système doit augmenter la tension de

fonctionnement du générateur photovoltaïque. L'opposé est vrai quand une diminution d'irradiation solaire est détectée. On déduit facilement les actions à faire dans les différents cas sur le schéma de la figure (II.8).

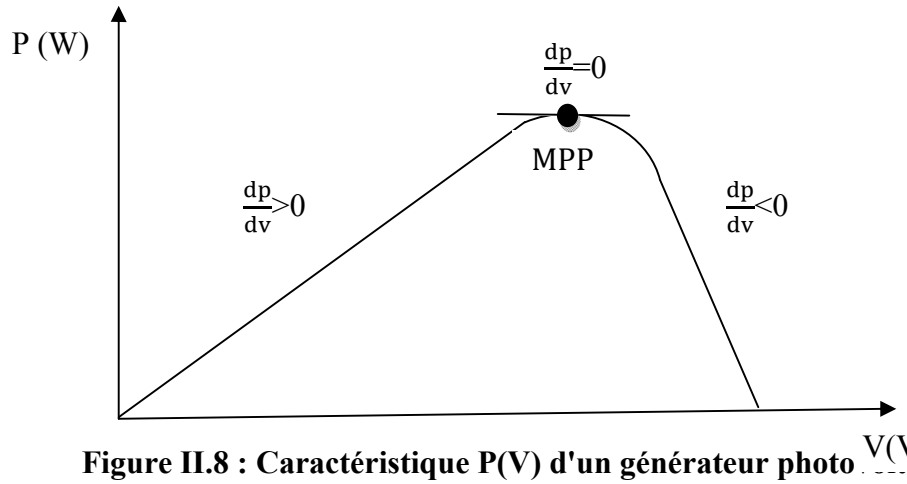



**Figure II.8 : Caractéristique P(V) d'un générateur photovoltaïque**

### *II.3.3 Description de la méthode de l'incrémentation de la conductance (IncCond)*

La figure (II.9) donne l'organigramme de la méthode de l'incrémentation de la conductance. La valeur actuelle et la valeur précédente de la tension et du courant du générateur photovoltaïque sont utilisées pour calculer les valeurs de dl et de dV.

Si dV =0 et dI =0, alors les conditions atmosphériques n'ont pas changé et le système fonctionne toujours au point de puissance maximale.

Si dI>O et dV=0, alors la quantité de l'irradiation solaire a augmenté, soulevant la tension du point de puissance maximale.

Ceci exige du système d'augmenter la tension de fonctionnement du générateur photovoltaïque pour repérer de nouveau point de puissance maximale. Réciproquement, si dI<O, la quantité de l'irradiation solaire a diminué, abaissant ainsi la tension de point de puissance maximale et exigeant du système de diminuer la tension de fonctionnement du générateur photovoltaïque.

Si les changements de la tension et du courant ne sont pas zéro, les rapports des équations (II-25) et (II-26) sont employés pour déterminer la direction dans laquelle la tension doit être changée afin d'atteindre le point de puissance maximale.

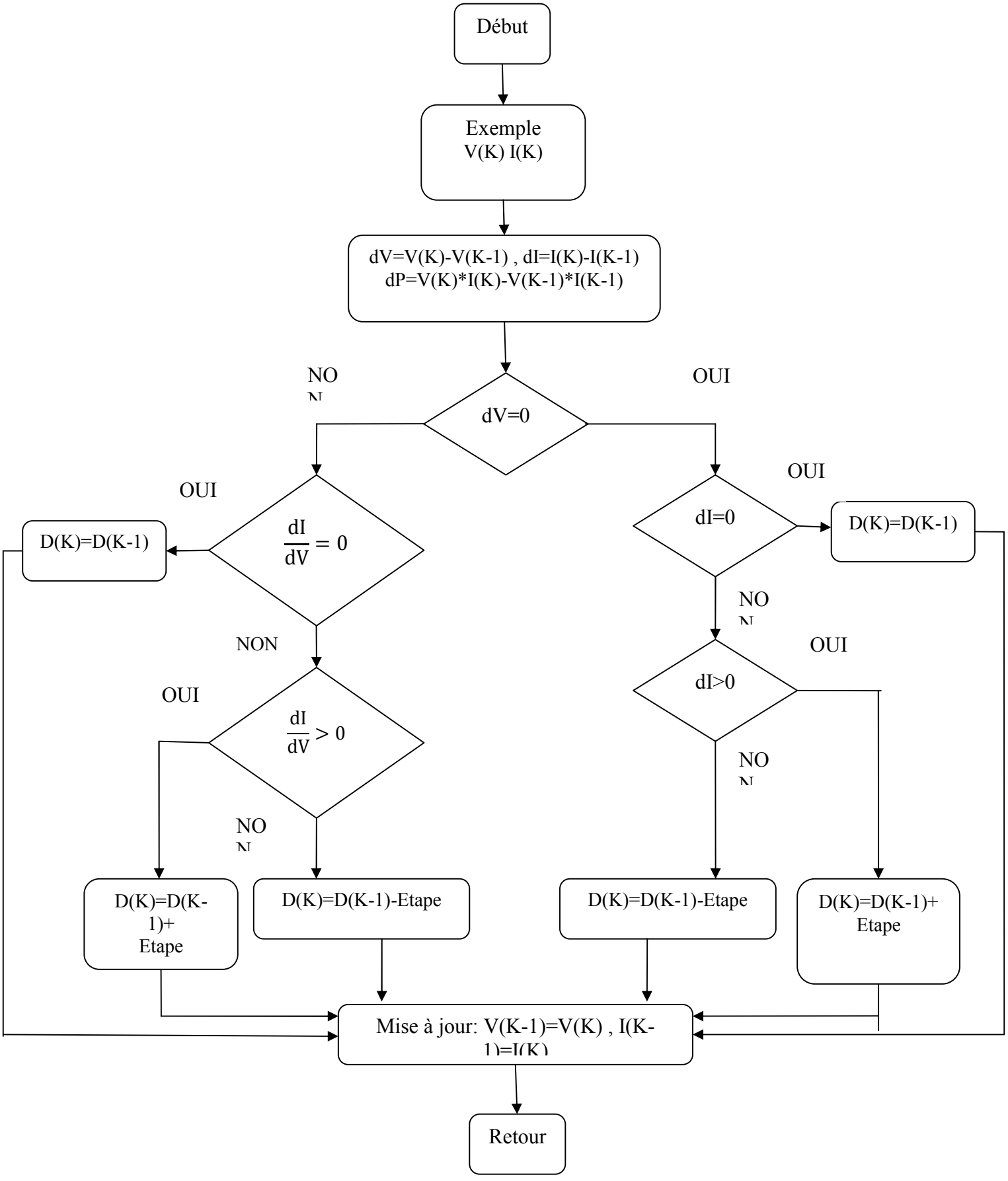



**Figure II.9 : Algorithme de la méthode de l'incrémentation de la conductance [33]**

## II.4 Convertisseur statique DC-AC (Onduleur)

Un convertisseur continu-alternatif permet d'obtenir une tension alternative (éventuellement réglable en fréquence et en amplitude) à partir d'une source de tension continue.

Exemple d'utilisation d 'onduleur :

L'onduleur de secours pour le matériel informatique permet d'assurer la continuité de l'alimentation en cas de coupures sur le réseau. Il permet aussi de filtrer les éventuels défauts de la tension du réseau (parasites ou surtensions).

En ce qui concerne les applications industrielles, nous rencontrerons l'onduleur en sortie des variateurs de fréquence pour alimenter les moteurs asynchrones [11].

Les convertisseurs de courant continu en courant alternatif sont appelés des onduleurs.

La fonction d'un onduleur est de convertir une tension continue d'entrée en une tension de sortie alternative symétrique d'amplitude et de fréquence désirée. La tension de sortie variable peut être obtenue en variant la tension continue d'entrée et en maintenant le gain de l'onduleur constant. D'autre part, si la tension d'entrée est fixe et qu'elle est non contrôlable, une tension de sortie variable peut être obtenue en variant le gain de l'onduleur.

Le gain de l'onduleur peut être défini comme le rapport entre la tension alternative de sortie et la tension continue d'entrée.

Pour des applications de faibles et moyennes puissances, les tensions de forme d'onde carrée ou quasi carrée pourront être acceptables; alors que pour les applications de fortes puissances une forme d'onde sinusoïdale avec un faible taux de distorsion des harmoniques sont exigées. Avec la disponibilité des dispositifs semi-conducteurs de puissance à haute vitesse, l'harmonique contenue dans la tension de sortie peut être minimisée ou réduite significativement par des techniques de commande.

Les onduleurs sont largement utilisés dans les applications industrielles par exemple : variateur de vitesse des moteurs à courant alternatif, chauffage par induction, les alimentations de secours, les alimentations non interrompues. L' entrée d'un onduleur peut être une batterie, une tension continue issue des panneaux solaires, ou d'autre source de courant continu obtenu à partir d'un redressement monophasé ou triphasé comme le montre la figure II.10 ci-dessous [12].

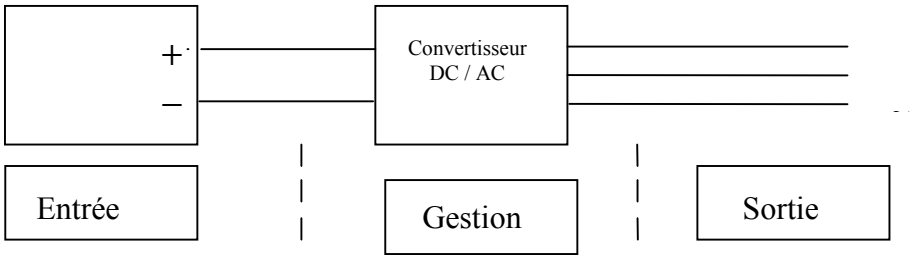



**Figure II.10 : Principe de conversion de l'onduleur**

De façon générale, les onduleurs peuvent être classifiés en deux types : les onduleurs monophasés et les onduleurs triphasés. Chaque groupe peut utiliser les dispositifs de commande comme : BJT, MOSFET, MCT, SIT ou commande forcée des thyristors en fonction des applications.

Généralement, ces onduleurs utilisent la commande MLI pour produire une tension de sortie alternative. Un onduleur est appelé un «current-fed-inverter», (CFI) s'il est alimenté par une source de courant continu (le courant d'entrée est maintenu constant), un «voltage-fed-inverter» (VFI) s'il est alimenté par une source de tension continue (la tension d'entrée est maintenue constante), et un « variable dc linked inverter », si la tension d'entrée est contrôlable [12] .

### *II.4.1 Principe de fonctionnement*

Le principe de fonctionnement d'un onduleur est basé sur l'électronique de commutation, on génère une onde de tension alternative à partir d'une tension continue comme le montre la figure II.11, on peut dire qu'il existe deux moyens pour réaliser cette conversion.

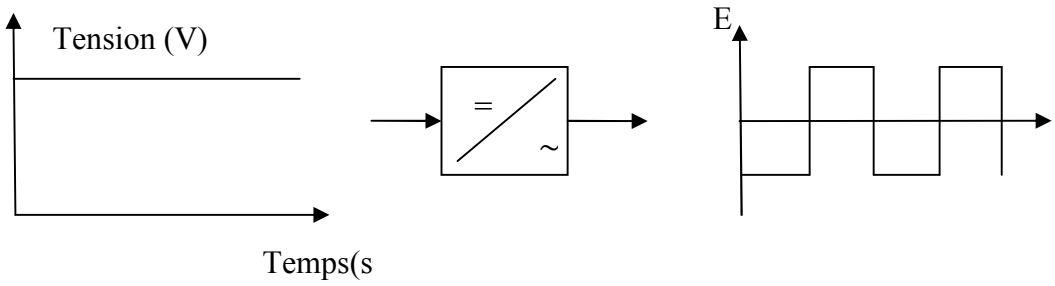



**Figure II.11 : Symbole et signal d'un onduleur**

L'utilisation directe d'une paire d' interrupteurs de base qui consiste à régler la fréquence et la durée des interconnexions de la source avec la sortie. Il est donc plutôt temporel et débouche sur les techniques de modulation de largeur d' impulsion.

Contrôler l'amplitude soit de façon continue en créant une source réglable (ce qui suppose l'existence d'un autre étage de conversion), soit de façon discrète en disposant d'un nombre suffisant de sources [13].

### *II.4.2 Onduleur triphasé*

L'onduleur triphasé est constitué de trois cellules de commutation figure II.12.

On retrouve évidemment une structure différentielle dans laquelle les tensions triphasées sont obtenues de façon composée sur les trois bornes de sortie.

L'onduleur triphasé doit évidemment, en régime normal, délivrer un système de tension dont les composantes fondamentales forment un système équilibré [12].

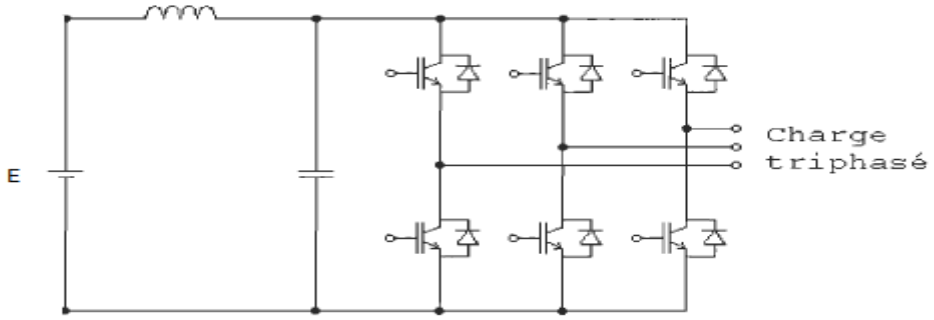



**Figure II.12: Montage d'un onduleur triphasé**

### *II.4.3 Modélisation de l'onduleur triphasé*

L'onduleur triphasé dit deux niveaux est illustré par son circuit de puissance de la figure II.13. On doit distinguer d'une part les tensions de branche $V_{AN}$ $V_{BN}$ et $V_{CN}$ mesurées par rapport à la borne négative de la tension continue Vpv , d'autre part, il ya les tensions de phases $V_{AN}$ $V_{BN}$ et $V_{CN}$ mesurées par rapport à un point neutre flottant n représentant une charge équilibrée montée en étoile. Des tensions simples on peut tirer facilement les tensions composées $V_{AN}$ $V_{BN}$ et $V_{CN}$. [12]

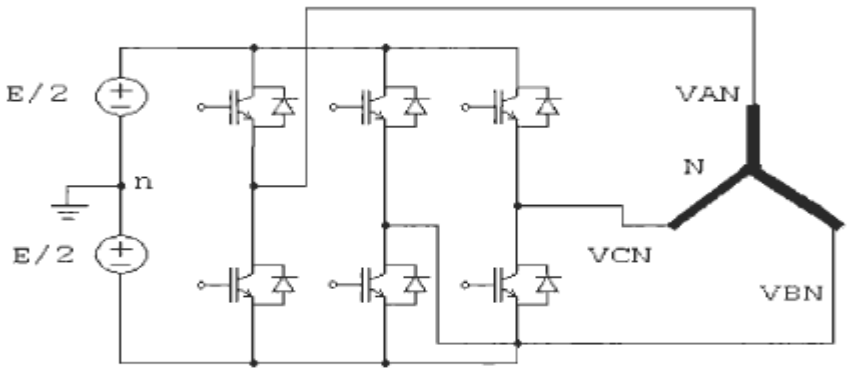



**Figure II.13 : Circuit de fonctionnement de l'onduleur triphasé**

Dans le circuit de puissance de l'onduleur triphasé de la figure ci-dessus, il est à noter que les états des interrupteurs d'un même bras sont complémentaires.

En utilisant ces états des interrupteurs, nous pouvons obtenir les tensions de branche de sortie de l'onduleur mesurées par rapport à la borne négative de la tension du côté continu comme suit:

$$\begin{aligned} V_{AN} &= S_1 Vpv \\ V_{Bn} &= S_2 Vpv \\ V_{CN} &= S_3 Vpv \end{aligned} \quad \text{(II-28)}$$

Où $S_1$ $S_2$ et $S_3$ désignent les états des interrupteurs des phases A, B et C respectivement.

Les tensions composées sont [12]:

$$\begin{aligned} V_{AB} = V_{AN} + V_{NB} = V_{AB} - V_{BN} = (S_1 - S_2)V_{pv} \\ V_{BC} = V_{BN} + V_{NC} = V_{BN} - V_{CN} = (S_2 - S_3)V_{pv} \\ V_{CA} = V_{CN} + V_{NA} = V_{CN} - V_{AN} = (S_3 - S_1)\,)V_{pv} \end{aligned} \quad \text{(II-29)}$$

On peut écrire l'équation (II-29) sous la forme matricielle:

$$\begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad \text{(II-30)}$$

Les tensions simples sont:

$$\begin{aligned} V_{AN} &= \frac{2}{3}V_{AN} - \frac{1}{3}(A_{BN} + V_{CN}) \\ V_{BN} &= \tfrac{2}{3}V_{BN} - \tfrac{1}{3}(A_{AN} + V_{CN}) \\ V_{CN} &= \frac{2}{3}V_{CN} - \frac{1}{3}(A_{AN} + V_{BN}) \end{aligned} \quad \text{(II-31)}$$

$$\begin{bmatrix} V_{AN} \\ V_{BN} \\ V_{CN} \end{bmatrix} = \tfrac{V_{pv}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad \text{(II-32)}$$

avec : $V_{pv} = \frac{E}{2}$

## II.5 Classification des onduleurs

II existe plusieurs schémas d'onduleurs, chacun correspondant à un type d'application déterminé ou permettant des performances recherchées. Les onduleurs sont en général classés selon les modes de commutation de leurs interrupteurs [34].

### *II.5.1 Onduleur autonome*

C'est un système qui nécessite des composants commandés à la fois à la fermeture et à l'ouverture, de fréquence variable, dont les instants de commutation sont imposés par des circuits externes. La charge est quelconque. Cet onduleur n'est pas réversible.

### *II.5.2 Onduleur non autonome*

Dans ce cas, les composants utilisés peuvent être de simples thyristors commandés uniquement à la fermeture et la commutation est "naturelle" contrairement à l'onduleur autonome.

L'application principale de ce type d'onduleur se trouve dans les variateurs pour moteurs synchrones de très forte puissance où les thyristors sont souvent les seuls composants utilisables.

On peut conclure que l'alimentation par un réseau triphasé ne permet pas ces commandes une fréquence constante, alors on fait recours à l'alimentation par un convertisseur statique délivrant une tension d'amplitude et de fréquence variables.

Dans ce chapitre on a exposé une étude sur les différents convertisseurs statiques, les techniques de commande et la technologie des interrupteurs. Les machines à courant continu en fonctionnement moteur s'adaptent bien à l'association avec des convertisseurs« continu-continu », qui permettent, une variation de vitesse du fait de leur souplesse de fonctionnement.

## II.6 Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI)

À l'âge de la révolution des interrupteurs semi-conducteurs de puissance à commutation très rapide, l'utilisation des convertisseurs de fréquence de type onduleur de tension à MU, trouve énormément d'intérêt, en particulier dans l'entraînement des machines à courant alternatif. Dans la littérature se présentent différentes méthodes de commande de ces convertisseurs. Parmi elles, deux variantes de commande se distinguent [34].

La modulation sinusoïdale échantillonnée basée sur la dispersion de la tension triphasée [13], [14] et la modulation vectorielle basée sur la dispersion de la tension triphasée [15], [16].

Dans ce chapitre nous exposons les techniques de la commande MU avec la modélisation de la commande MLI vectorielle basées sur la dispersion de la tension triphasée d' un onduleur triphasé.

### *II.6.1 Théorie des techniques de commande MLI*

Au cours de ces dernières années, différentes techniques de modulation de largeur d'impulsion ont été développées. Dans ce mémoire on se base sur deux variantes de cette stratégie de commande (MLI sinusoïdale échantillonné basée sur la dispersion de la tension triphasée et MLI vectorielle basée sur la dispersion de la tension triphasée).

Plusieurs techniques de contrôle à MLI ont été développées. Les plus utilisées sont les suivantes [12] :

- MLI Simple;
- MLI Multiple;
- MLI Sinusoïdale modifiée;
- MLI sinusoïdale échantillonnée basée sur la dispersion de la tension triphasée;
- MLI vectorielle basée sur la dispersion de la tension triphasée.

### *IV.6.2 MLI Sinusoïdale échantillonnée basée sur la dispersion de la tension triphasée*

La technique de modulation sinusoïdale échantillonnée basée sur la dispersion de la tension triphasée (figure II.14) est une technique très utilisée en industrie et est largement passée en revue dans la littérature.

Cette technique de modulation, encore appelée modulation par échantillonnage uniforme, a été introduite pour la première fois par Bowes [14]. En effet, les instants de commutation par échantillonnage naturel ne sont pas répartis à des intervalles équidistants et, par conséquent, non appropriés à une implémentation par un processeur numérique.

Ces difficultés ont mené, au début des années 70, au développement des techniques de modulation par échantillonnage régulier. Quand la modulante est échantillonnée à chaque sommet de l'onde triangulaire de période $T_e$ chaque transition de l' impulsion de commande est définie à partir d'une valeur différente du signal échantillonné [15],[16].

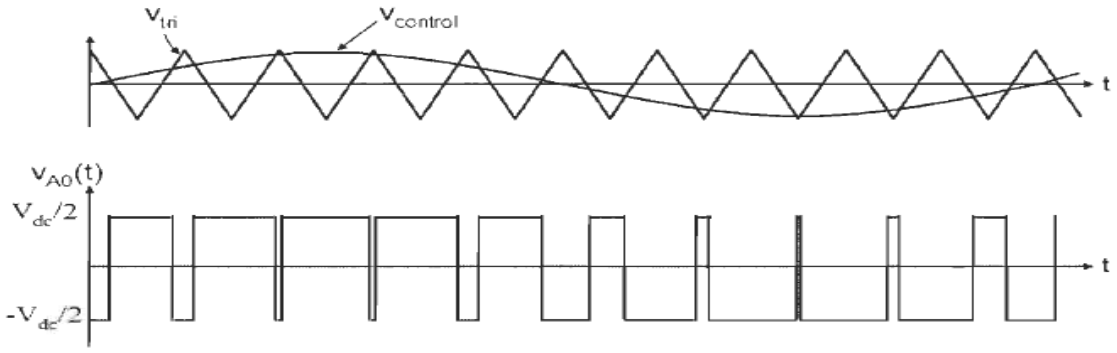



**Figure II.14 : Principe de la MLI sinusoïdale échantillonnée basée sur la dispersion de la tension triphasée**

La technique de modulation sinusoïdale échantillonnée basée sur la dispersion de la tension triphasée présente plusieurs avantages tels que la réduction des pertes de commutation, l'augmentation des tensions en sortie, et l' amélioration des performances harmoniques.

Cette technique présente l'avantage d'être facilement réalisable en temps réel par un processeur numérique. Elle entraîne une amélioration importante pour les harmoniques de faible fréquence et élimine les fréquences de rang supérieur [14], [17], [18].

## II.7 Conclusion

L'alimentation par un réseau triphasé ne permet pas une fréquence constante, alors on fait recours à l'alimentation par un convertisseur statique délivrant une tension d'amplitude et de fréquence variable.

Dans ce chapitre on a exposé une étude sur les différents convertisseurs statiques, les techniques de commande et la technologie des interrupteurs.

On a fait aussi une brève description de quelques techniques de la commande MLI finissant avec la modélisation de la commande d'un onduleur triphasé.

Le contenu des harmoniques généré par une onde MLI entraîne des pertes dans le réseau (pertes fer dans les transformateurs, pertes joule dans la ligne et le convertisseur) et dans la charge (pertes joule, pertes fer et pertes par courant de Foucault). Elle génère dans les machines tournantes des oscillations du couple, des bruits acoustiques et des résonances électromagnétiques.

Elles injectent du bruit sur la commande et introduisent des non-linéarités qui peuvent déstabiliser le système d'où, il est impératif de minimiser les harmoniques.

# III Système photovoltaïque connecté au réseau

## III.1 Introduction

La croissance de la consommation en particulier et la tarification des ressources fossiles provoquent des difficultés au niveau mondial. L'énergie électrique et une tendance à la libéralisation sont à l'origine de changements considérables, tant dans le domaine des réseaux d'alimentation que pour le remplacement du parc des centrales électriques. Les conséquences, les moins inquiétantes, se répercutent sur la disponibilité et la qualité de l'énergie [19]. C'est pourquoi les solutions recherchées doivent être réalisables techniquement tout en répondant aux exigences en matière de durabilité.

Dans ce chapitre, une étude descriptive générale des systèmes photovoltaïques reliés au réseau électrique est présentée. Cette étude comprend : la conception des systèmes photovoltaïques, leurs types, les problèmes produits, les techniques et les conditions des normes d'interconnexions [20].

## III.2 Les types des onduleurs couplés au réseau

L'onduleur couplé au réseau est utilisé pour les installations photovoltaïques. Il permet de transformer la tension continue produite par les modules solaires, en une tension ondulée conforme à celle du réseau figure III.1. Il adapte également le courant produit à la fréquence et à la tension du réseau. Dans les installations d'habitation, le courant solaire produit est d'abord utilisé par l'habitation elle-même, si le courant produit pour l'habitation est excédentaire, l'excédent est injecté dans le réseau.

L'installation d'un onduleur couplé au réseau électrique se fait avec l'accord de l'organisme de distributeur de d'énergie électrique.

Pour des raisons de sécurité, un onduleur couplé au réseau doit constamment surveiller ces perturbations et interrompre immédiatement l'injection en cas de défaillance ou de coupure.

Ceci est absolument nécessaire pour permettre une intervention sans danger sur le réseau [21].

### *III.2.1 Onduleurs modulaires*

Suivant ce concept, chaque module solaire dispose d'un onduleur individuel.

Pour les installations plus importantes, tous les onduleurs sont connectés en parallèle côté courant alternatif. Les onduleurs modulaires sont montés à proximité immédiate du module solaire correspondant [22].

### *III.2.2 Onduleurs centralisés*

Un onduleur centralisé de forte puissance transforme l'ensemble du courant continu produit par un champ de cellules solaires en courant alternatif.

Le champ de cellules solaires est en règle générale constitué de plusieurs rangées connectées en parallèle.

Chaque rangée est elle-même constituée de plusieurs modules solaires connectés en série.

Pour éviter les pertes dans les câbles et obtenir un rendement élevé, on connecte le plus possible de modules en série. [22]

### *III.2.3 Onduleurs Rangés ou " String "*

L'onduleur String est le plus utilisé. Le plus souvent, huit (ou plus) de modules solaires sont connectés en série.

Comme une seule connexion série est nécessaire, les coûts d'installation sont réduits. Il est important de noter qu'en cas d'ombrage partiel des modules solaires, il n'y a pas de perte, l'emploi de diodes de by-pass est fortement recommandé. [22]

Les installations jusqu'à 3 Kilowatt de puissance sont fréquemment réalisées avec un onduleur String. Pour une puissance plus élevée, il est possible de connecter plusieurs onduleurs string en parallèle, côté courant alternatif. L'intérêt dans ce concept est d'utiliser un plus grand nombre d'onduleurs du même type. Cela réduit les coûts de production et apporte un intérêt supplémentaire : si un onduleur tombe en panne, seule la production de la rangée concernée est défaillante.

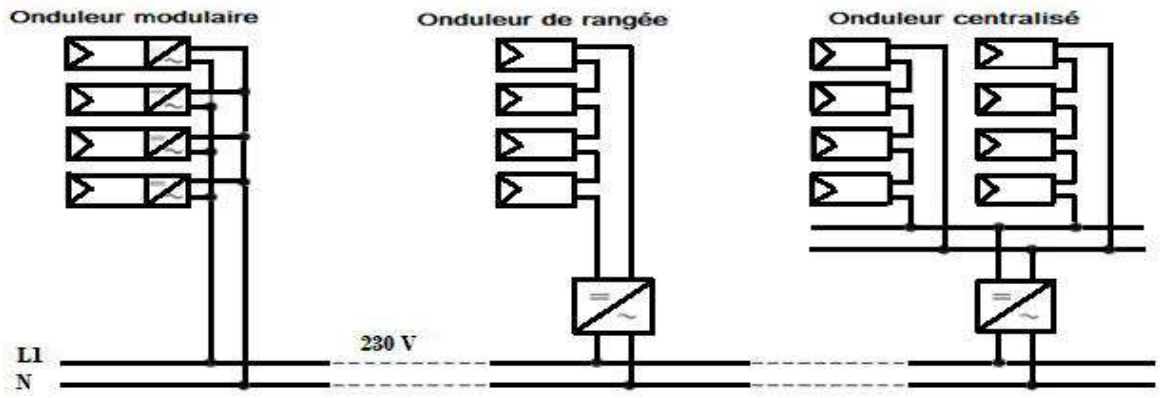



**Figure III.1 : Classification des onduleurs PV connectés au réseau [33].**

Ils sont toujours conçus en triphasé. La plupart du temps, les systèmes (PV) sont installés dans les réseaux de distribution basse tension avec une puissance allant jusqu'à 30 KVA.

Le type du réseau choisi au raccordement détermine la possibilité du choix des systèmes de surveillance, et la détection en cas d'islanding (défaut).

## III.3 Les centrales photovoltaïques connectées au réseau

Une première classification des centrales photovoltaïques connectées au réseau en fonction de leurs tailles peut être faite de la manière suivante **:**

### *III.3.1 Centrales de petite taille (Pw = 1 à 10 KW)*

Pour des applications sur les toits de maisons individuelles ou d'institutions publiques telles que les écoles, parkings,... Elles se connectent au réseau basse tension.[23]

### *III.3.2 Centrales de taille moyenne (Pw = 10 à 500 KW)*

Ce type de système peut se trouver installé et intégré sur un édifice, sur un toit ou une façade. Il peut être connecté à la basse ou à la moyenne tension du réseau de distribution électrique selon sa taille. [23]

### *III.3.3 Centrales de grande taille (Pw ≥ 500 KW)*

Ce sont des systèmes centralisés et sont de la propriété de compagnies d'électricité. On peut également classer ces systèmes selon qu'ils soient munis de batteries de stockage ou non. [23].

## III.4 Structure d'un système photovoltaïque

Il existe deux types de structures de système photovoltaïque [24] :

### *III.4.1 Le système à connexion directe au réseau*

Cette installation est constituée d'un générateur photovoltaïque connecté directement, à l'aide d'un onduleur au réseau électrique.

### *III.4.2 Le système à bus continu intermédiaire*

Le générateur photovoltaïque est connecté par l'intermédiaire d'un convertisseur continu-continu. Un onduleur délivre une tension modulée, celle-ci est filtrée pour réduire le taux d'harmonique, on obtient alors en sortie de ce dispositif une tension utilisable pouvant être injectée dans le réseau.

Il existe plusieurs architectures pour les dispositifs permettant de convertir la tension continue issue du générateur photovoltaïque en une tension sinusoïdale utilisable (230V).

Dans la suite de cette partie, différents montages seront décrits, en précisant leurs avantages et inconvénients.

## III.5 Caractéristiques des onduleurs compatibles avec le réseau

Les critères de compatibilité de l'onduleur avec le réseau sont [25]:

- Temps de réponse
- Facteur de puissance
- Commande de fréquence
- Rendement harmonique
- Synchronisation
- Contribution de courant de défaut
- Injection de courant continu
- Protection

## III.6 Problèmes de connexion des systèmes photovoltaïques au réseau

Les problèmes concernant l'interconnexion du système photovoltaïque au réseau sont [26][27] :

- Le débrochage de système photovoltaïque si le réseau présente une défaillance (le problème d'islanding).
- La protection contre la foudre.
- La qualité de puissance fournie au réseau.

- Les effets des systèmes multiples sur une partie du réseau, en particulier monophasé non équilibré.

- Le dosage fiable des flux de puissance.

- Risques techniques et financiers.

## III.7 Etude de la partie contrôle et commande

La structure du système de commande de l'onduleur peut être séparée en deux sous-systèmes ayant des dynamiques différentes : l'une dite rapide qui est liée aux courants, et une autre dite lente qui est associée à la tension continue.

Pour le réglage de la tension continue, l'utilisation des commandes classiques, en particulier du type proportionnel intégral (PI), semble être suffisante pour obtenir des performances acceptables.

### *III.7.1 Régulateur proportionnel-Intégral*

Nous utilisons simplement pour chacune des phases un régulateur proportionnel Intégral suivi d'un filtre passe bas du premier ordre.

Le rôle de ce filtre est d'atténuer les signaux hautes fréquences venant de la MLI.

Le schéma de régulation du courant est représenté par la Figure III.2 :

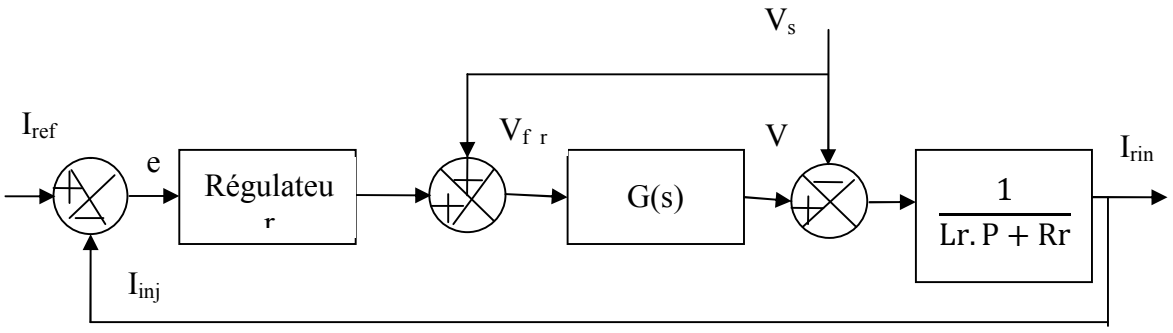



**Figure III.2 : Schéma de la régulation des courants de l'onduleur**

Notant par (Δi) la différence entre le courant de référence et le courant mesuré à partir de la relation suivante [28]:

$$\Delta i = I_{ref} - Ir_{inj} \quad \text{(III-42)}$$

$$Rr.\, Ir_{inj} + Lr.\frac{dIr_{inj}}{dt} = Vs - Vf \quad \text{(III-43)}$$

D'après (III-42) et (III-43), et le schéma de la figure IV.3 nous obtenons l'expression suivante :

$$Rr.\,\Delta i + Lr\frac{d\Delta i}{dt} = \left(Vs + Lr\frac{dIref}{dt} + Rr.\,Iref\right) + Vf \quad \text{(III-44)}$$

Le premier terme de la partie droite de la relation (III-44) peut être défini comme tension de référence (Vf_ref), ce qui nous donne l'expression suivante :

$$Vf_ref = Vs + Lr\frac{dIref}{dt} + Rr.\,Iref \quad \text{(III-45)}$$

L'onduleur de tension à commande MLI est modélisé par un gain Go:

$$Go = \frac{Udc}{Up} \quad \text{(III-46)}$$

Où :

Udc: Tension côté continu de l'onduleur

Up : Amplitude de la porteuse

Pour que (Vf) soit égale à Vf_ref, nous choisissons Go égal à 1.

Rr et Lr Respectivement la résistance et l'inductance de raccordement intermédiaire entre l'onduleur et le réseau.

### *III.7.2 Régulateur PI avec compensation de pôle*

On utilise un régulateur (PI) représenté par la Figure III.3 :

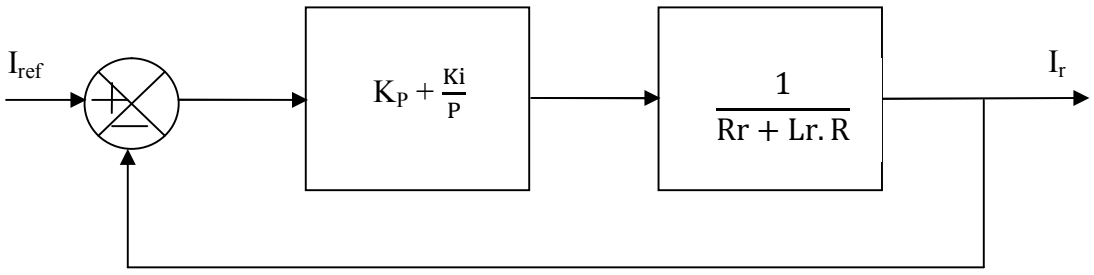



**Figure III.3 : Schéma bloc du régulateur (PI)**

La fonction de transfert de la boucle fermée et les cœfficients du correcteur (PI) sont donnés par les équations suivantes [29]:

$$\frac{\mathrm{Ir}}{\mathrm{Iref}} = \frac{1}{1+\frac{\mathrm{Lr}}{\mathrm{Kp}}.\mathrm{P}} = \frac{1}{1+\tau.\mathrm{P}} \qquad \text{(III-47)}$$

avec

$$\frac{\mathrm{Ki}}{\mathrm{Kp}} = \frac{\mathrm{Rr}}{\mathrm{Lr}} \qquad \text{(III-48)}$$

### *III.7.3 Régulateur (PI) sans compensation de pôle*

Cette méthode consiste à utiliser un régulateur (PI) comme représenté sur la Figure III.4. Il en résulte la fonction de transfert de la boucle fermée [29]:

$$\frac{\mathrm{Ir}}{\mathrm{Iref}} = \left(\frac{\mathrm{Ki}+\mathrm{Kp}.\mathrm{P}}{\mathrm{P}}\right) \frac{\frac{\mathrm{Ki}}{\mathrm{Lr}}}{\mathrm{P}^2+\left(\frac{\mathrm{Kp}+\mathrm{Rr}}{\mathrm{Lr}}\right).\mathrm{P}+\frac{\mathrm{Ki}}{\mathrm{Lr}}} \qquad \text{(III-49)}$$

Nous remarquons la présence d'un zéro en boucle fermée, nous pouvons l'éliminer en ajoutant un filtre passe-bas du premier ordre sur la consigne du courant comme indiqué sur la figure suivante :

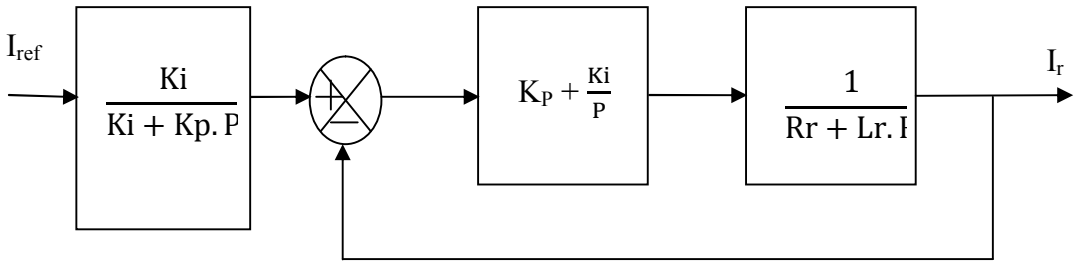



**Figure III.4 : Schéma bloc de la régulateur PI sans compensation de pôle**

La réponse du système en boucle fermée peut être identifiée à celle d'un système du second ordre [29] :

$$\frac{\mathrm{Ir}}{\mathrm{Iref}} = \frac{\mathrm{wi}^2}{\mathrm{P}^2+(2.\zeta.\mathrm{wi}).P+wi^2} \qquad \text{(III-50)}$$

Où :

$$\mathrm{Ki} = \mathrm{wi}^2.\mathrm{Lr} \qquad \text{Et} \qquad \mathrm{Kp} = 2.\zeta.\mathrm{wi}.\mathrm{Lr} - \mathrm{Rr}$$

Dans cette étude, on a choisi le régulateur PI avec compensation de pôle avec les paramètres de réseaux suivants :

$$Rr = 0.002\ \Omega \qquad \text{et} \qquad Lr = 0.250\ mH$$

En appliquant ces valeurs dans la relation III.48, $K_i$ et $K_p$ peuvent s'écrit :

$$Ki = 800 \qquad \text{et} \qquad Kp = 7$$

## III.8 Etude de la synchronisation du convertisseur sur le réseau

### *III.8.1 PLL triphasé dans le domaine de Park*

Le principe de la PLL dans le domaine de Park est rappelé sur la figure III.5.

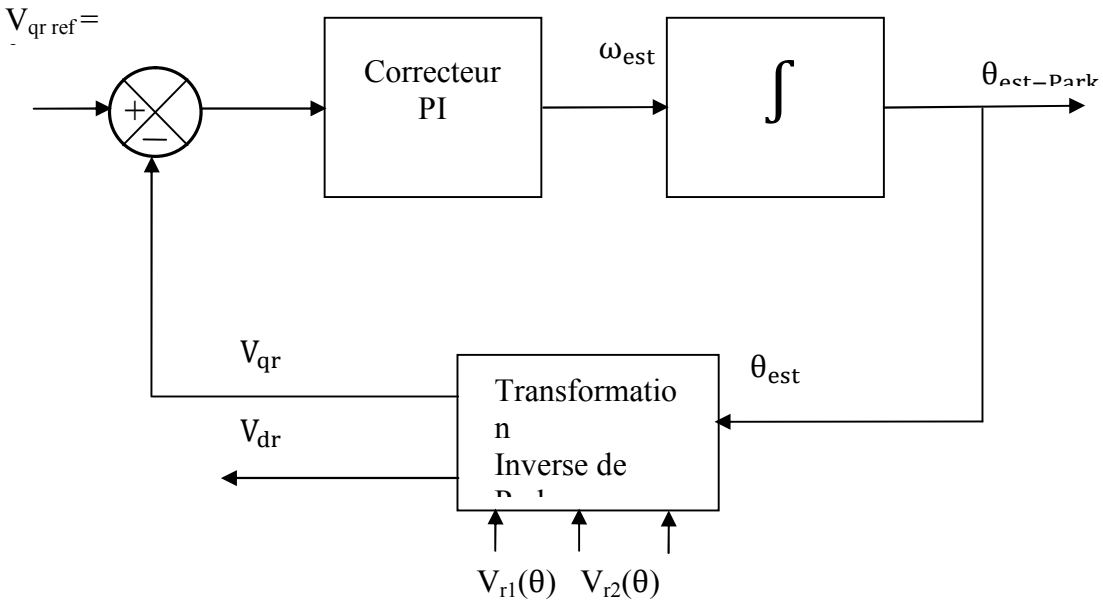



**Figure III.5 : Principe de la PLL dans le domaine de Park**

Dans le cas d'un système équilibré, la tension du système triphasé s'exprime de la manière suivante [30] :

$$\begin{cases} Vr1(t) = Vm.\sin(\theta) \\ Vr2(t) = Vm.\sin\left(\theta - \frac{2.\pi}{3}\right) \\ Vr3(t) = Vm.\sin\left(\theta - \frac{4.\pi}{3}\right) \end{cases} \qquad \text{(III-51)}$$

Le principe de base de la PLL triphasée consiste à appliquer une transformation inverse de Park sur les tensions triphasées du réseau. La composante d'axe q générée par cette transformation

est asservie à zéro par action sur l'angle du repère de Park ($\theta_{est}$) . En régime établi l'angle ($\theta_{est}$) est égal à l'angle ($\theta_{\gamma}$) du réseau.

$v_{qr} = 0, v_{dr} = |V_m|$ et $\theta_{\gamma} = \theta_{est}$.

### *III.8.2 Elaboration et réglage des correcteurs d'une PLL triphasée*

La PLL triphasée développée dans le cadre de ce projet utilise une transformée de Park comme indiquée dans la figure III.6. [30]

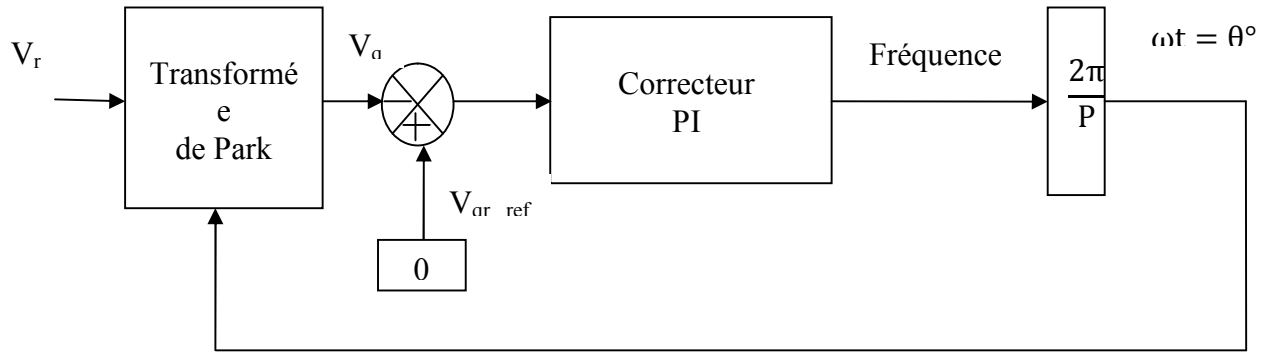



**Figure III.6 : Schéma de régulateur de la PLL**

La transformée de Park a le rôle de comparateur de phase. Cette PLL a pour avantage de pouvoir également mesurer la fréquence du signal d'entrée. La figure suivante (figure III.7) montre le fonctionnement de la PLL triphasée. En régime permanent, lorsque la PLL « est accrochée »,

$\delta = 0$ et $V_{qr} = 0$. On a alors $V_{dr} = V_r$

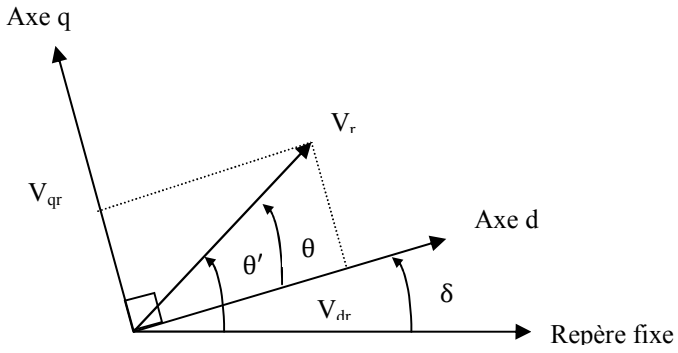



**Figure III.7 : Fonctionnement de la PLL triphasée**

## III.9 Modélisation du filtre LC et la charge

### *III.9.1 Fonction de transfert du filtre*

Afin de déterminer plus facilement la transmittance du filtre, on utilise le schéma monophasé équivalent suivant figure III.8. [31]

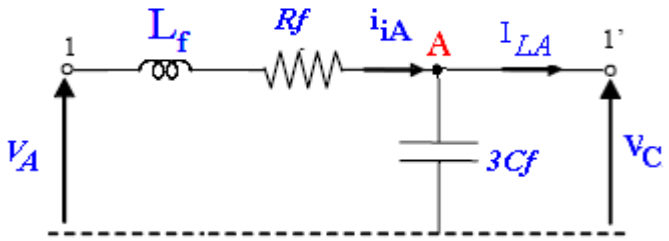



**Figure III.8 : Schéma monophasé équivalent du filtre LC**

la fonction de transfert du filtre est donnée par l'expression suivante :

$$H(p) = \frac{Vc}{Va} = \frac{1}{1+3.Cf.Rf.P+3.Cf.Lf.P^2} \qquad \text{(III-52)}$$

Et la pulsation :

$$\omega o = \frac{1}{\sqrt{3.Cf.Lf}}$$

### *III.9.2 Modèle d'état de l'ensemble (onduleur, filtre LC et la charge RL)*

Le modèle d'état de l'ensemble onduleur, filtre LC et la charge RL est donnée par la Figure III.9.

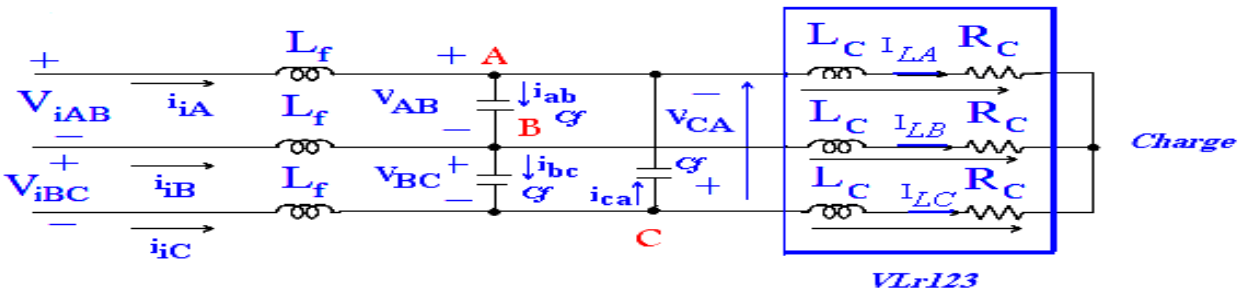



**Figure III.9 : Schéma du filtre LC et de la charge RL [32]**

En appliquant la loi de Kirchhoff aux nœuds A, B, et C, les équations des courants et des tensions du filtre LC décrites par la figure III.9, sont données comme suit :

- Nœud (A) :

$$i_{iA} + i_{ca} = i_{ab} + i_{LA} \Longrightarrow i_{iA} + Cf.\frac{dV_{CA}}{dt} = Cf.\frac{dV_{AB}}{dt} + i_{LA} \qquad \text{(III–53)}$$

- Nœud (B) :

$$i_{iB} + i_{ab} = i_{bc} + i_{LB} \Longrightarrow i_{iB} + Cf.\frac{dV_{AB}}{dt} = Cf.\frac{dV_{BC}}{dt} + i_{LB} \qquad \text{(III–54)}$$

- Nœud (C) :

$$i_{ic} + i_{bc} = i_{ca} + i_{LC} \Longrightarrow i_{iC} + Cf.\frac{dV_{BC}}{dt} = Cf.\frac{dV_{CA}}{dt} + i_{LC} \qquad \text{(III-55)}$$

Avec :

$$i_{ca} = Cf.\frac{dV_{CA}}{dt}\ , i_{ab} = Cf.\frac{dV_{AB}}{dt} \quad \text{et} \quad i_{bc} = Cf.\frac{dV_{BC}}{dt}$$

En substituant (III-54) dans (III-53), on trouve :

$$i_{iA} - i_{iB} + Cf.\left(\frac{dV_{CA}}{dt} - \frac{dV_{AB}}{dt}\right) = Cf.\left(\frac{dV_{AB}}{dt} - \frac{dV_{BC}}{dt}\right) + i_{LA} - i_{LB} \qquad \text{(III-56)}$$

$$\Rightarrow Cf.\left(\frac{dV_{CA}}{dt} + \frac{dV_{BC}}{dt} - 2.\frac{dV_{AB}}{dt}\right) = -i_{iA} + i_{iB} + i_{LA} - i_{LB}$$

En substituant (III-55) dans (III-54), on trouve :

$$i_{iB} - i_{iC} + Cf.\left(\frac{dV_{AB}}{dt} - \frac{dV_{BC}}{dt}\right) = Cf.\left(\frac{dV_{BC}}{dt} - \frac{dV_{CA}}{dt}\right) + i_{LB} - i_{LC} \qquad \text{(III-57)}$$

$$\Rightarrow Cf.\left(\frac{dV_{AB}}{dt} + \frac{dV_{CA}}{dt} - 2.\frac{dV_{BC}}{dt}\right) = -i_{iB} + i_{iC} + i_{LB} - i_{LC}$$

En substituant (III-53) dans (III-55), on trouve :

$$i_{iC} - i_{iA} + Cf.\left(\frac{dV_{BC}}{dt} - \frac{dV_{CA}}{dt}\right) = Cf.\left(\frac{dV_{CA}}{dt} - \frac{dV_{AB}}{dt}\right) + i_{LC} - i_{LA} \qquad \text{(III-58)}$$

$$\Rightarrow Cf.\left(\frac{dV_{BC}}{dt} + \frac{dV_{AB}}{dt} - 2.\frac{dV_{CA}}{dt}\right) = -i_{iC} + i_{iA} + i_{LC} - i_{LA}$$

Afin de simplifier les équations (III-56) et (III-58), nous utilisons le rapport de la somme des tensions algébriques égales à zéro entre les phases de la charge, tel que :

$$V_{AB} + V_{BC} + V_{CA} = 0 \qquad \text{(III-59)}$$

D'après l'équation (III-59), les équations (III-56) et (III-58) peuvent être écrites respectivement comme suit :

$$\begin{cases} \frac{dV_{AB}}{dt} = \frac{1}{3.Cf}.i_{iAB} - \frac{1}{3.Cf}.(i_{LAB}) \\ \frac{dV_{BC}}{dt} = \frac{1}{3.Cf}.i_{iBC} - \frac{1}{3.Cf}.(i_{LBC}) \\ \frac{dV_{CA}}{dt} = \frac{1}{3.Cf}.i_{iCA} - \frac{1}{3.Cf}.(i_{LCA}) \end{cases} \quad \text{(III-60)}$$

Avec :

$$i_{iAB} = i_{iA} - i_{iB}, i_{iBC} = i_{iB} - i_{iC}, i_{iCA} = i_{iC} - i_{iA}$$

$$\text{Et } i_{LAB} = i_{LA} - i_{LB},$$
$$i_{LBC} = i_{LB} - i_{LC},$$
$$i_{LCA} = i_{LC} - i_{LA}$$

En appliquant la loi des mailles aux tensions du côté de l'onduleur, les équations des courants peuvent être écrites comme suit :

$$\begin{cases} \frac{di_{iAB}}{dt} = -\frac{1}{Lf}.V_{LAB} - \frac{1}{Lf}.(V_{iAB}) \\ \frac{di_{iBC}}{dt} = -\frac{1}{3.Cf}.V_{LBC} - \frac{1}{Lf}.(V_{iBC}) \\ \frac{di_{iCA}}{dt} = -\frac{1}{3.Cf}.V_{LCA} - \frac{1}{Lf}.(V_{iCA}) \end{cases} \quad \text{(III-61)}$$

En appliquant la loi des mailles du côté charge, les équations des tensions peuvent être décrites comme suit :

$$\begin{cases} V_{AB} = L_r.\frac{di_{LA}}{dt} + R_c.i_{LA} - L_c.\frac{d_{LB}}{dt} - R_c.i_{LB} \\ V_{BC} = L_r.\frac{di_{LB}}{dt} + R_c.i_{LB} - L_c.\frac{d_{LC}}{dt} - R_c.i_{LC} \\ V_{CA} = L_r.\frac{di_{LC}}{dt} + R_c.i_{LC} - L_c.\frac{d_{LA}}{dt} - R_c.i_{LA} \end{cases} \quad \text{(III-62)}$$

L'équation (III-62) peut être récrite comme suit :

$$\begin{cases} \frac{di_{LAB}}{dt} = -\frac{R_c}{L_c}.i_{LAB} + \frac{1}{L_c}.V_{LAB} \\ \frac{di_{LBC}}{dt} = -\frac{R_c}{L_c}.i_{LBC} + \frac{1}{L_c}.V_{LBC} \\ \frac{di_{LCA}}{dt} = -\frac{R_c}{L_c}.i_{LCA} - \frac{1}{L_c}.V_{LCA} \end{cases} \quad \text{(III-63)}$$

Par conséquent, nous pouvons écrire les équations (III-60), (III-61) et (III-63) sous forme matricielle, respectivement :

$$\begin{cases} \frac{dV_C}{dt} = \frac{1}{3.Cf}.I_i - \frac{1}{3.Cf}.I_L \\ \frac{dI_i}{dt} = \frac{1}{Lf}.V_C + \frac{1}{Lf}.V_i \\ \frac{dI_L}{dt} = -\frac{1}{L_r}.V_C + \frac{R_r}{L_r}.I_L \end{cases} \quad \text{(III-64)}$$

### III.10 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à quelques notions et définitions relatives aux systèmes photovoltaïques connecté au réseau où, on a cité le régulateur PI avec et sans compensation de pôle (on utilise une régulation avec compensations de pole dans travail), et l'étude de la synchronisation des convertisseurs sur le réseau par le PLL.

## IV Résultats de simulation et discussions

### IV.1 Introduction

Le modèle du système PV sous une température de 25° et des différentes irradiations est simulé et testé. Le point de fonctionnement du champ sur la courbe I-V est dynamiquement modifié par le contrôleur afin que la MPPT obtient le point de puissance maximale sous les conditions de la lumière du soleil et maintient la puissance du PV aux alentours de ce point pour produire de l'énergie avec un rendement plus élevé.

Les deux simulations décrivent l'utilisation de l'environnement Matlab/SimPowerSystems pour modéliser un réseau de champs PV raccordé à un réseau électrique.

### IV.2 Simulation de la méthode IncCond

La première simulation d'un Générateur PV contrôlé par la méthode IncCond est un modèle d'un champ de 100 kW connecté à un réseau de 25 kV par l'intermédiaire d' un convertisseur élévateur continu-continu et un convertisseur de tension triphasé à trois niveaux (Onduleur).

Maximum Power Point Tracking ( MPPT ) est mis en œuvre dans le convertisseur élévateur au moyen d'un modèle Simulink en utilisant la technique " incrémental conductance + régulateur intégré" .

Le modèle IncCond présenté sur la figure IV.1 contient :

- Un champ PV délivrant un maximum de puissance de 100 kW à 1000 W / $m^2$ des irradiations solaire.

- Un convertisseur 5 kHz Boost ( bloc orange ) augmentation de la tension de PV tension naturelle ( 272 V DC à la puissance maximale ) à 500 V DC. Le rapport cyclique D (Cycle de fonctionnement de commutation) est optimisé par le contrôleur MPPT qui utilise la technique " Incrémental Conductance + régulateur intégré" .

- Un onduleur de 3 niveau triphasés ( Les blocs bleus ). Il convertit la tension 500 V CC en tension 260 V CA et maintient l'unité du facteur de puissance ($\cos\alpha=1$).

- 10 kvar d'harmoniques produites par l'onduleur (filtrage par condensateurs).

- 100 kVA, 260V/25kV couplage de transformateur triphasé .

- Un modèle utilitaire du réseau ( 25 kV d'alimentation de distribution + système de transmission équivalent de 120 kV ) .

Pour ce modèle, le circuit électrique est discrétisé au temps de l'échantillon de 1 μs , alors que le temps échantillon utilisé pour les systèmes de contrôle est de 100 μs.

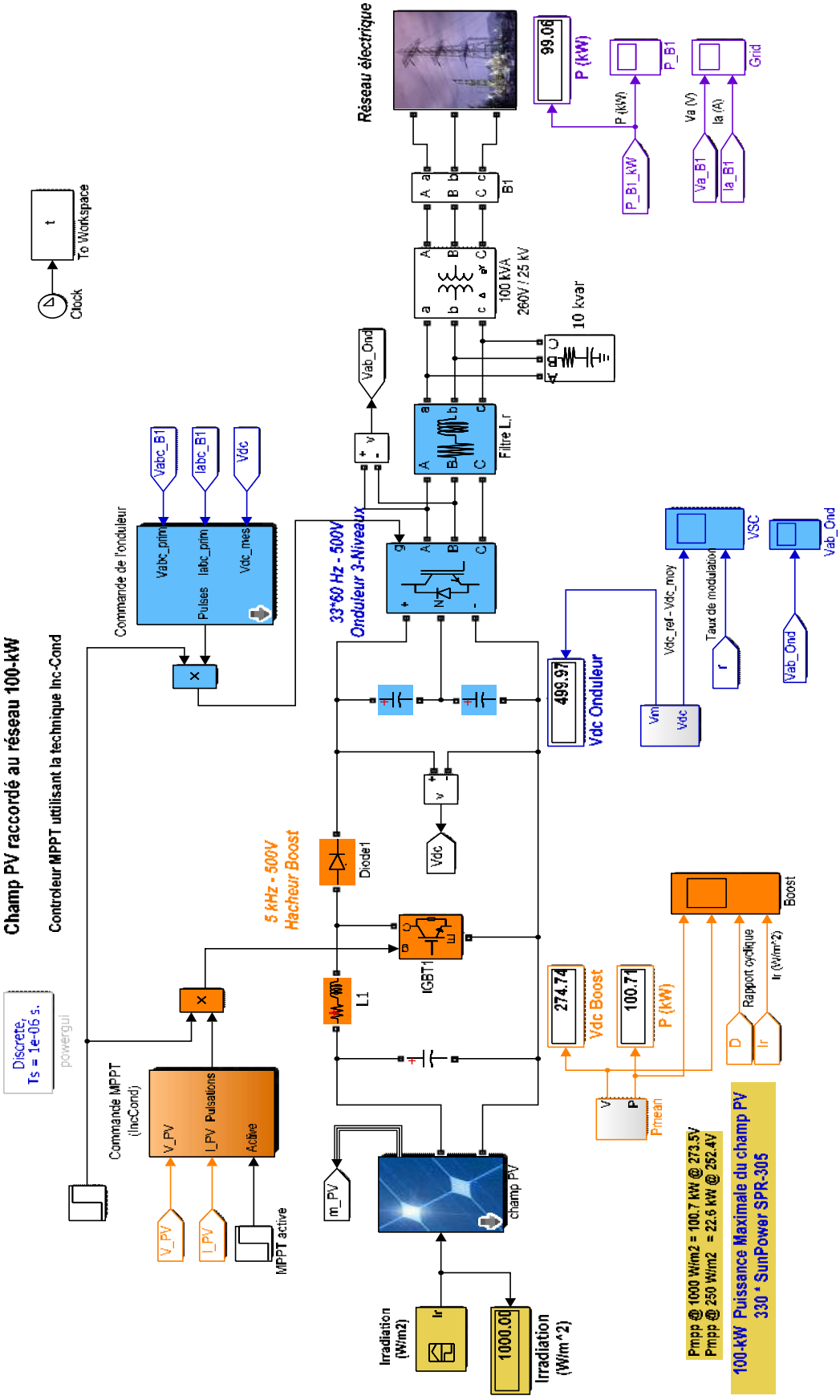



**Figure IV.1 : Le modèle général IncCond**

## IV.3 Simulation de la méthode P & O

La deuxième simulation des deux Générateurs PV contrôlés par la méthode PandO est un modèle d'un réseau de 200 kW connecté à un réseau de 25 kV par l'intermédiaire de deux convertisseurs élévateurs DC-DC (Hacheurs Boost) et un seul convertisseur (Onduleur de deux niveaux) triphasés. Le contrôleur MPPT basé sur la technique " Perturbez et Observer " est mis en œuvre au moyen d'un bloc de fonction de MATLAB qui génère du code C intégrable.

Le modèle P & O présenté sur la figure IV.2 contient :

- Deux champs photovoltaïques différents délivrant chacun un maximum de 100 kW à 1000 W/$m^2$ des irradiations solaire.

- Deux modèles identiques de convertisseurs élévateurs, Hacheurs Boost (blocs oranges ).

- Des tensions croissantes PV1et PV2 égales à 500V CC. Les deux contrôleurs MPPT utilisent la technique " Perturbez et Observer ".

- Un onduleur de deux niveaux triphasés ( blocs bleus ) convertit le 500 V CC à 260 V CA et maintient l'unité du facteur de puissance (cosα=1).

- 20 kvar d'harmoniques produites par l'onduleur (filtrage par des condensateurs).

- 200 kVA, 260V/25kV couplage de transformateur triphasé .

- Un modèle utilitaire du réseau ( 25 kV d'alimentation de distribution + système de transmission équivalent de 120 kV ) .

Dans le modèle, les convertisseurs Boost et l'onduleur sont représentés par des sources de tension équivalentes générant la tension en courant alternatif sur un cycle de fréquence de commutation. Un tel modèle ne représente pas d'harmoniques, mais la dynamique résultante du système de commande et la puissance de l'interaction du système d'alimentation sont conservées. Ce modèle permet d'utiliser beaucoup plus des grandes périodes de temps (50 μs), ce qui entraîne une simulation beaucoup plus rapide.

Notant que, dans le modèle P & O, les deux types des panneaux photovoltaïques contiennent une boucle algébrique. Ces boucles algébriques sont nécessaires pour obtenir une solution itérative et précise des modèles PV, quand le temps d'échantillonnage utilisé est grand. Ces boucles algébriques sont facilement résolues par Simulink.

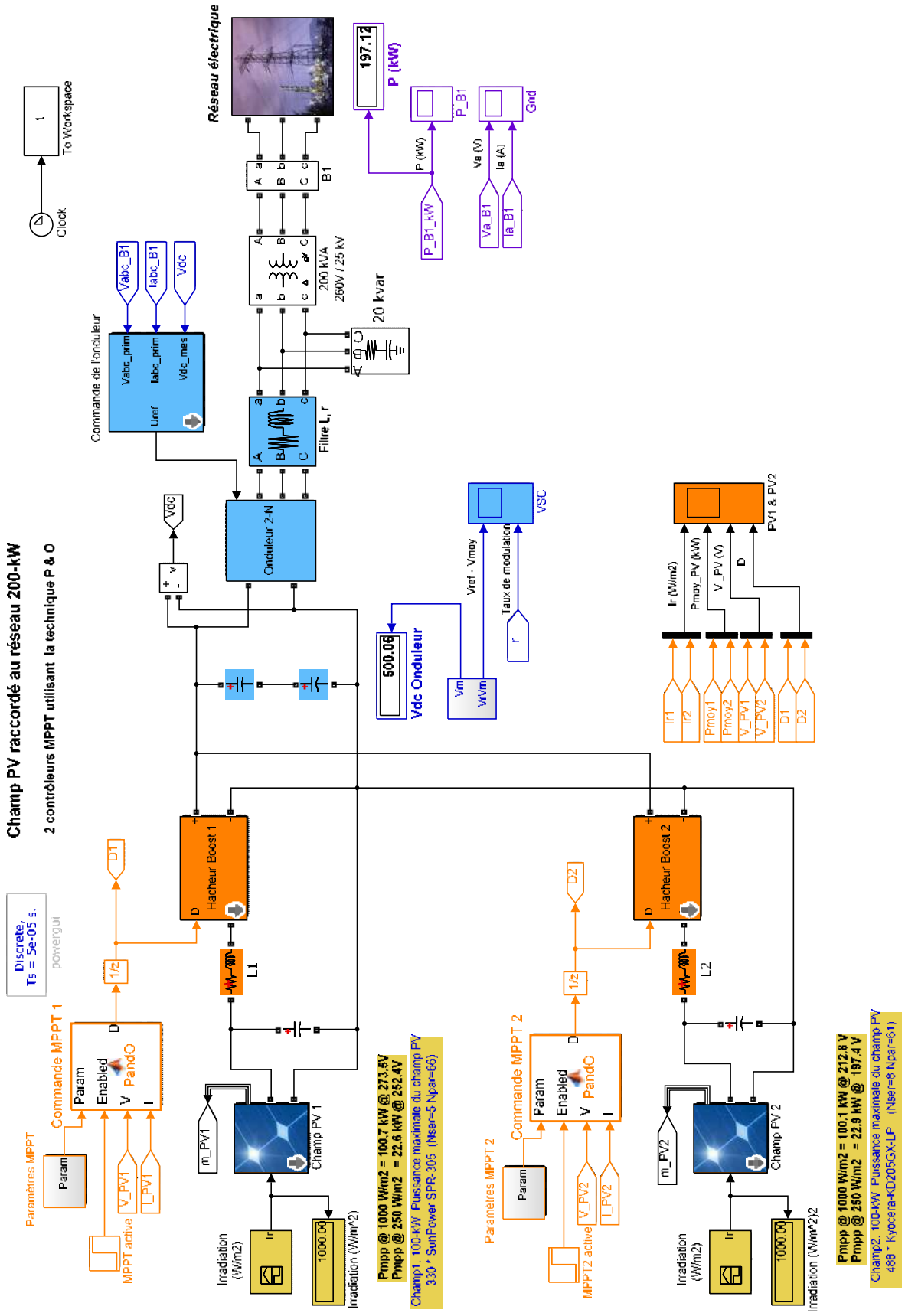



**Figure IV.2 : Le modèle général P and O**

### IV.4 Caractéristiques du champ PV Type SunPower - SPR305

Le modèle IncCond utilise un seul champ photovoltaïque de 100 kW de type SunPower (SPR - 305 ) qui comporte 330 modules, 66 Branches connectées en parallèle et de 5 modules connectés en série ( 66 * 5 * 305,2 W = 100,7 kW) .

On examine le menu de bloc champ PV et on regarde les paramètres du modèle.

Les spécifications du fabricant pour un module sont :

- Nombre de cellules connectées en série : 96

- Tension en circuit ouvert : Vco = 64,2 V

- Courant de court- circuit : Icc = 5,96 A

- Tension et courant à la puissance maximale : Vpm = 54,7 V , Ipm = 5,58 A

Le menu du bloc du champ photovoltaïque permet de tracer les caractéristiques I- V et P -V pour un module et pour l'ensemble du champ.

Les caractéristiques du champ PV SunPower - SPR305 sont reproduites dans la figure IV.3 ci-dessous.

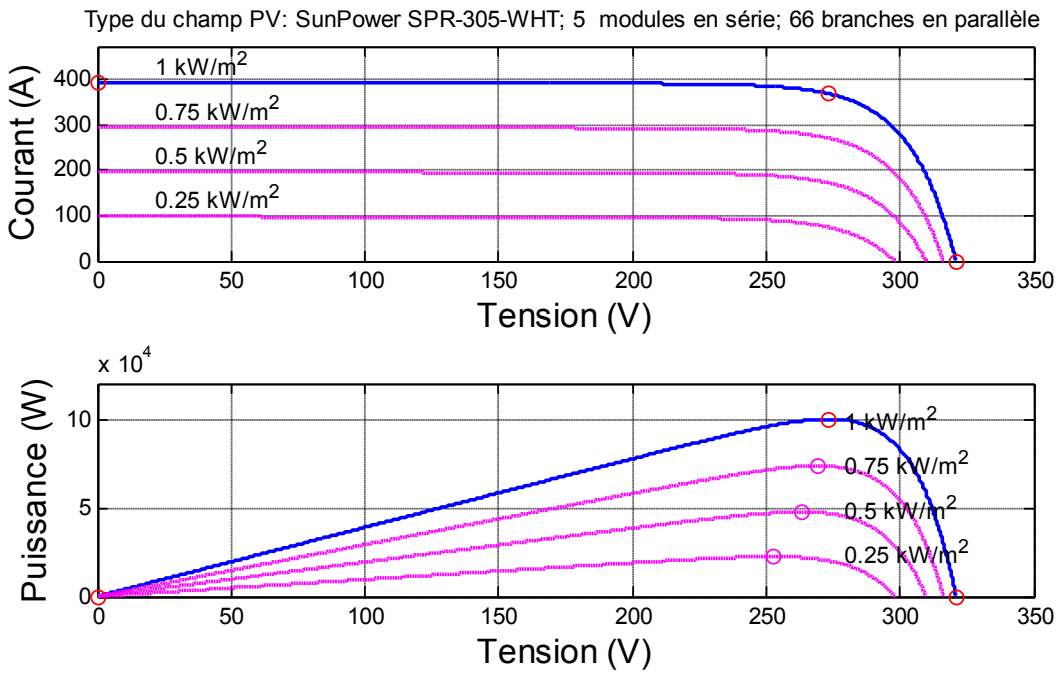



**Figure IV.3 : Caractéristiques I-V et P-V du champ photovoltaïque**

Les points rouges sur les courbes bleues indiquent les spécifications du module de fabricant (Vco, Icc, Vpm, Ipm) dans des conditions de test standard (25 degrés Celsius,1000 W/m$^2$).

Le modèle P & O comprend deux champs de 100 kW. PV1 (G1) contient des modules SunPower - SPR305 et PV2 (G2) utilise des modules Kyocera- DD205GX -LP .

## IV.5 Caractéristiques du champs PV Type Kyocera- DD205GX -LP

Le champ photovoltaïque 100 kW Kyocera- DD205GX -LP utilise 488 modules. Il est constitué de 61 Branches connectées en parallèle et de 5 modules connectés en série :

( 61 * 8 * 205 W = 100,04 kW) .

On peut vérifier le menu du bloc champ PV et on observe les paramètres du modèle.

Les spécifications du fabricant pour un module sont :

- Nombre de cellules connectées en série : 54

- Tension en circuit ouvert : Vco =33.19 V

- Courant de court- circuit : Icc = 8,36 A

- Tension et courant à la puissance maximale : Vpm = 26,6 V , Ipm = 7,70A

Le menu du bloc du champ photovoltaïque permet de tracer les caractéristiques I- V et P -V pour un module et pour l'ensemble du champ PV.

## IV.6 Convertisseurs statiques

### *IV.6.1 Convertisseur Hacheur Boost*

Dans le modèle IncCond, les convertisseurs élévateur (blocs oranges ) augmente la tension continue de 273,5 V à 500V. Ce convertisseur utilise un contrôleur MPPT qui fait automatiquement varier le rapport cyclique D, afin de générer la tension nécessaire pour extraire la puissance maximale.

### *IV.6.2 Convertisseur Onduleur*

L'onduleur triphasé à trois niveaux ( blocs bleus ) régule la tension continue à 500 V et maintient l'unité du facteur de puissance (cos $\alpha = 1$).

Le système de contrôle utilise deux boucles de régulation :

Une boucle de commande externe qui régule la tension continue à +/- 250 V.

Et une boucle de contrôle interne qui régule les courants Id et Iq du réseau (les composantes active et réactive du courant).

La référence du courant Id est la sortie du régulateur externe de courant continue (DC).

La référence du courant Iq est fixée à zéro, afin de maintenir l'unité du facteur de puissance.

Les sorties de tension Vd et Vq du régulateur de courant sont converties en 3 signaux de modulation Uref_abc utilisés par le générateur d'impulsions MLI (PWM) à trois niveaux.

Le système de contrôle utilise un échantillon de 100 µs, pour les contrôleurs de tension et pour l'unité de synchronisation PLL.

Dans le modèle IncCond, les générateurs d'impulsions des convertisseurs Boost et l'onduleur utilisent un temps d'échantillonnage rapide de 1µs, afin d'obtenir une résolution appropriée de formes d'onde PWM .

## IV.7 Analyse des résultats

### *IV.7.1 Méthode IncCond*

Après exécution du modèle IncCond et cela pour une durée de 3 secondes on observe les séquences suivantes des événements sur les oscilloscopes.

- ✓ De t = 0 s à t = 0.05 s , les convertisseurs Boost et l'onduleur sont bloqués. La tension PV correspond à la tension du circuit ouvert ( Nser * Vco = 5 * 64.2 = 321 V , voir le graphe de la tension V sur l'oscilloscope du hacheur Boost) . Le pont à trois niveaux fonctionne comme un redresseur à diodes et les condensateurs sont chargés au-dessus de 500 V (voir la figure IV.4 de la tension Vdc_mean sur l'oscilloscope de l'onduleur).

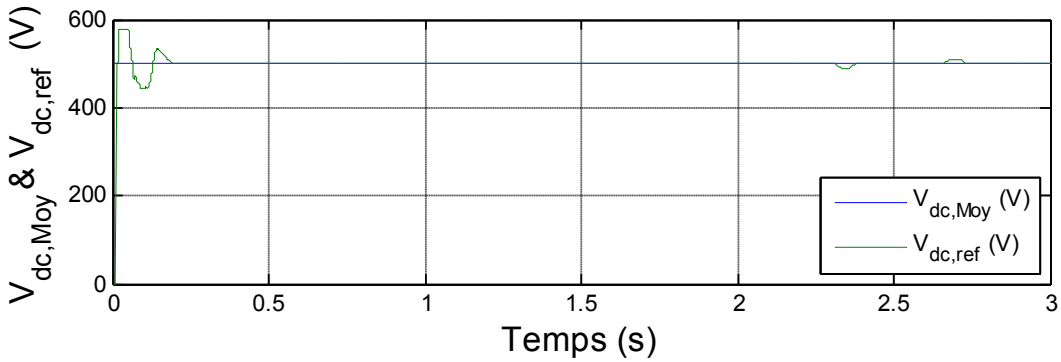



**Figure IV.4 : Tensions Vdc moyenne et Vdc référence**

- ✓ A t = 0.05 s , les convertisseurs Boost et l'onduleur sont débloqués. La tension du court-circuit est régulée à Vcc = 500V.

- Le rapport cyclique du convertisseur élévateur Boost est fixé ( D = 0.5 , comme indiqué sur l'oscilloscope du Boost) et les irradiations du soleil sont réglées à 1000 W / $m^2$.

L'état d'équilibre est atteint à t = 0.25s.

- La tension résultante du PV est donc V_PV = ( 1 - D ) * Vcc = ( 1-0.5 ) * 500 = 250 V (voir la figure de la tension V sur l'oscilloscope du Boost).

- La puissance de sortie du générateur photovoltaïque est de 96 kW (voir la figure de la puissance moyenne Pmoy sur l'oscilloscope du Boost ), tandis que la puissance maximale des irradiations de 1000 W/m$^2$ est de Pmax 100.7 kW (à cause du régulateur MPPT IncCond D=0.5) voir la figure IV.5 ci-après :

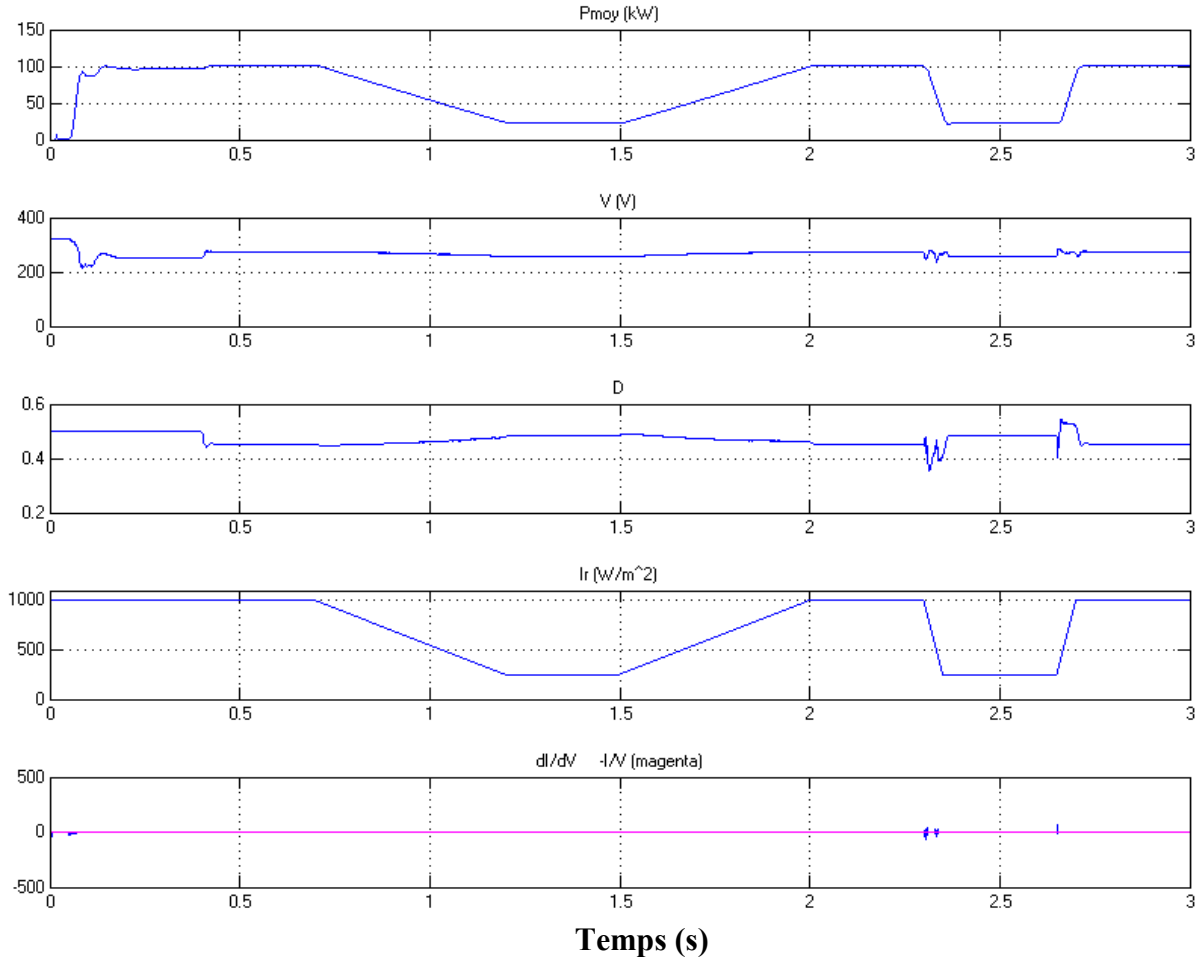



**Figure IV.5 : Puissance, Tension, Rapport cyclique, Irradiations et la MPPT**

On observe de la figure IV.6 de l'oscilloscope du réseau que la tension et le courant de la phase (a) dans la ligne de 25 kV sont en phase ( facteur de puissance de l'unité cosα=1).

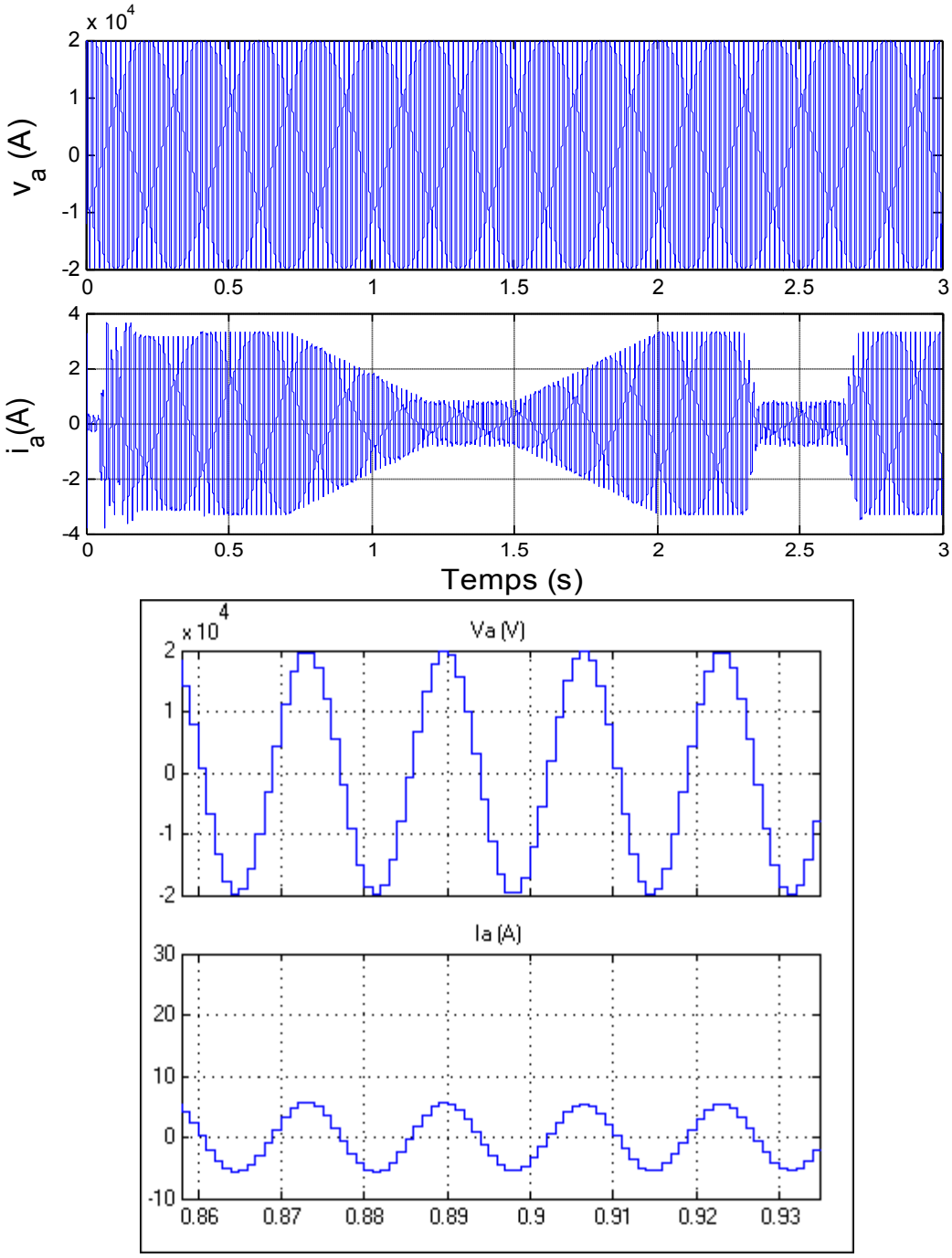



**Figure IV.6 : La tension Va(V) et le courant Ia(A)**

- ✓ A t = 0.4 s, la MPPT est activée. Le régulateur MPPT commence la régulation de tension PV en variant rapport cyclique D, afin d'en extraire la puissance maximale.

La puissance maximale (Pmax 100,7 kW ) est obtenu lorsque le rapport cyclique est D=0.453.

- ✓ A t = 0.6 s, la tension PV, Vpv = 274 V comme prévu à partir des spécifications du module PV( Nser * Vpm = 5 * 54.7 = 273.5 V ).

- ✓ De t = 0.7 s à t = 1.2 s , les irradiations du soleil ont diminué de 1000 W/m$^2$ à 250 W/m$^2$.

La MPPT continue le suivi de la puissance maximale.

- ✓ De t = 1.2 s à t = 1.5 s, quand les irradiations ont diminué à 250 W/m$^2$, le rapport cyclique est D=0.485, ce qui correspond à une tension PV, Vpv_moy=252.4V et une puissance Pmoy=22.6 kW.

On note que la MPPT continue son suivi de la puissance maximale durant ce changement lent des irradiations.

- ✓ A t=2s, les irradiations ont repris leur état maximal 1000W/m$^2$.

- La puissance maximale a atteint la valeur 100.7 kW et le rapport cyclique D=0.453 et la tension moyenne V_moy=274V.

La MPPT continue son suivi durant cette période.

- ✓ De t=2.3s à t=2.35s, le système reçoit un changement soudain des irradiations (chute très rapide) une diminution jusqu'à 250 W/m$^2$ , ce qui a entrainé des oscillations de la tension ainsi du rapport cyclique durant ce temps, même une réduction de puissance jusqu'à 22.6 kW.
- ✓ De t= 2.35s à t=2.65s, la MPPT garde régulièrement son suivi de recherche de la puissance maximale.
- ✓ De t=2.65s à t=2.70s, le système reçoit un autre changement instantané des irradiations (accroissement très rapide) jusqu'à 1000 W/m$^2$. On remarque des oscillations importantes de la tension et du rapport cyclique sur cette période,

- Et une forte augmentation de la puissance de 22.6KW jusqu'à 100.7 kW.

La MPPT continue toujours son suivi durant cette période.

- ✓ De t=2.7s à t=3s, les irradiations sont stables et la MPPT fait constamment son suivi de la puissance maximale. D'où D=0.450 réellement depuis la figure IV.5, Correspondant exactement à sa valeur théorique suivante:

$$D = 1 - \frac{V_{pv}}{V_{ch}}$$

A.N:

$$D = 1 - \frac{27\ 47\ 4}{499.9}\ , \qquad D = 0.450$$

**Remarque:**

- ✓ De t = 0,05s à 3s, des différents changements des irradiations qui sont appliqués sur le système, montrent que le contrôleur MPPT illustre des meilleurs performances.

### *IV.7.2 Méthode P and O*

On exécute aussi le modèle P and O pendant 3 secondes et on observe les séquences des événements sur les oscilloscopes.

✓ De t = 0 s à t = 0,05 s , les convertisseurs Boost et l'onduleur sont bloqués .

- La tension du G1 PV (SunPower - SPR305) correspond à la tension du circuit ouvert

( Nser * Voc = 5 * 64,2 = 321 V, voir la courbe de la tension V sur l'oscilloscope du Boost1).

- Et la tension du G2 PV (Kyocera- DD205GX -LP) correspond à la tension du circuit ouvert

( Nser * Vco = 8 * 33,20 = 265.5 V), voir la courbe de la tension V sur l'oscilloscope du Boost2).

Le pont à deux niveaux fonctionne comme un redresseur à diodes et les condensateurs sont chargés au-dessus de 500 V (voir la figure IV.7, la courbe de la tension Vdc_moy et m ( Taux de modulation "r") sur l'oscilloscope de l'onduleur).

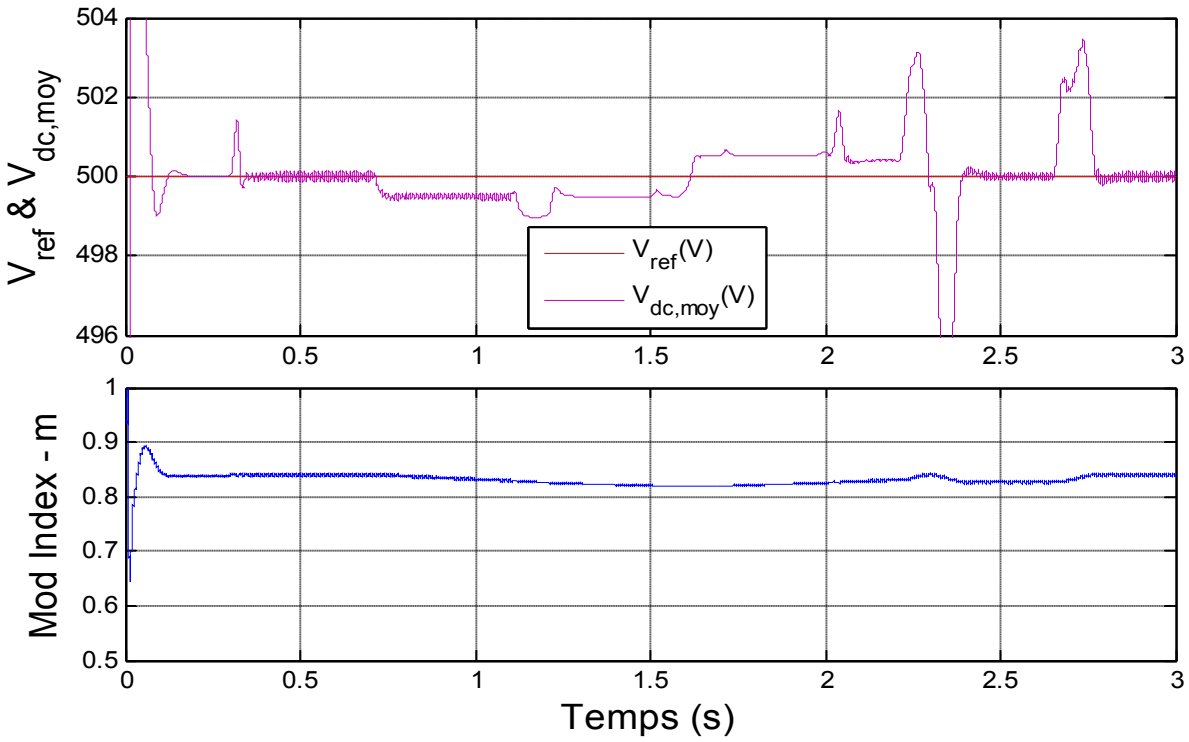



**Figure IV.7 : La tension Vmoy et m ( Taux de modulation )**

✓ A t = 0,05 s , les convertisseurs Boost et l'onduleur sont débloqués. La tension du court-circuit est régulée à Vcc = 500V.

- Les rapports cycliques des convertisseurs élévateurs Boost sont fixés ( D1=0.5 et D2 = 0.6, comme indiqué sur les oscilloscopes des Boosts 1,2 )

- Et les irradiations du soleil sont réglées à 1000 W/m$^2$.

Les états d'équilibre sont atteints à t = 0,05s pour G1 et à t= 0.08s pour G2 .

- La tension résultante PV est donc V1_PV = ( 1 - D1 ) * Vcc = ( 1-0,5 ) * 500 = 250 V et V2_PV=(1-D2)*500=(1-0.6)*500=200V (voir les figure des tensions sur les oscilloscopes Boost1,2).

- La puissance de sortie des générateurs photovoltaïques G1 est de 96 kW et G2 est 98 kwW (Voir les figures IV.8, des puissances moyennes Pmoy sur les oscilloscopes Boost1,2 ).

- Également que les puissances maximales des irradiations de 1000 W/m$^2$ des deux générateurs sont de Pmax = 100.7 kW.

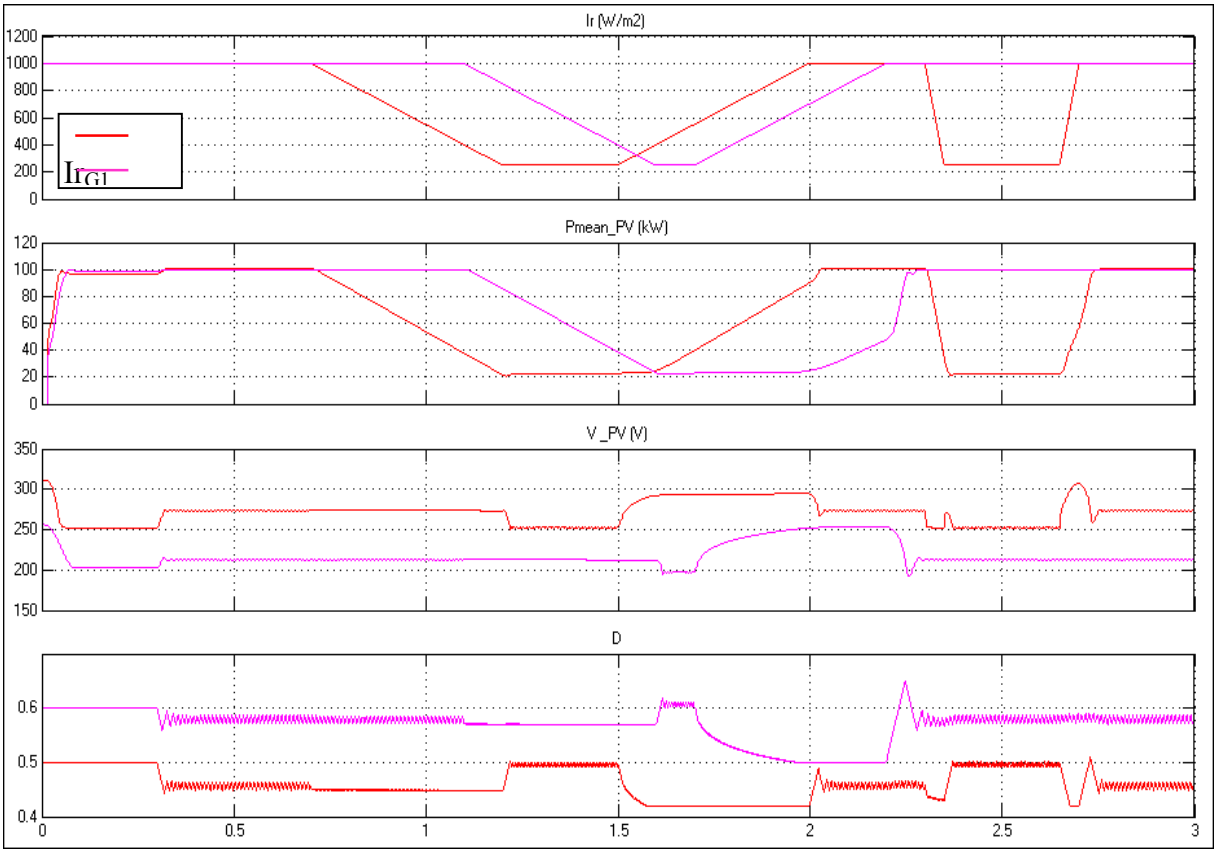
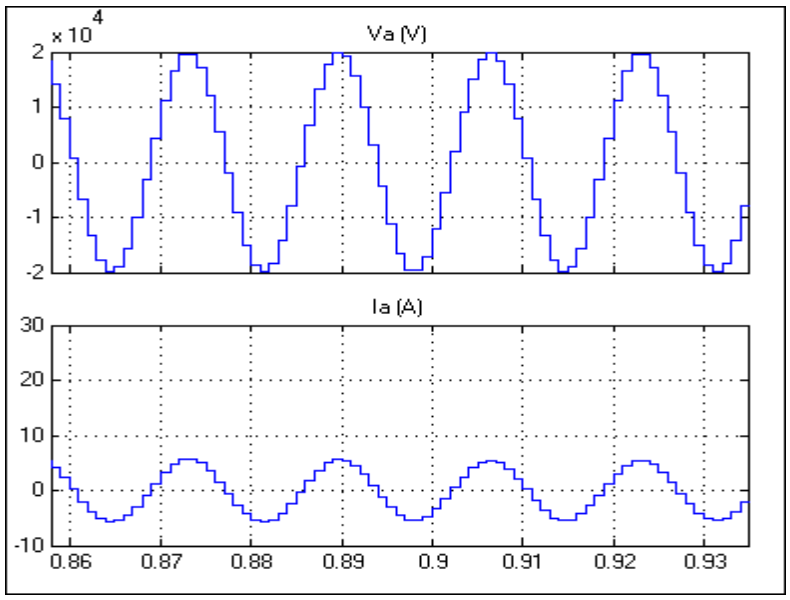



**Figure IV.8 : Irradiations, Puissance, Tension et Rapport cyclique**

On observe sur l'oscilloscope (figure IV.9) du réseau que la tension et le courant de la phase A dans la ligne de 25 kV sont en phase (facteur de puissance unitaire cosα=1).




**Temps (s)**

**Figure IV.9 : Tension Va (V) et le courant Ia (A)**

✓ A t = 0.3 s, les MPPT des deux contrôleurs sont activés. Le régulateur MPPT commence la régulation de tension PV en variant les rapports cycliques D1 et D2 afin d'en extraire les puissances maximales.

- Les puissances maximales (Pmax 100,7 kW ) sont obtenues, lorsque les rapports cycliques sont: D1 = 0.453 et D2=0.553.

✓ At =0.6 sec, la tension Vmoy_pv1 = 274 V, à partir des spécifications du module PV1 (G1)

( Nser * Vmp = 5 * 54.7 = 273.5 V ).

Et la tension Vmoy_pv2 = 274 V, à partir des spécifications du module PV2 (G2)

( Nser * Vmp = 8 * 26.6 = 212.8 V ).

✓ De t=0.7 s à t=1.2 s, les irradiations du soleil ont diminué de 1000 W/m$^2$ à 250 W/m$^2$ du G1.

- Et de t=1.1s à t=1.6 s, les irradiations du soleil ont diminué de1000W/m$^2$ à 250 W/m$^2$ du G2.

La MPPT continue aussi le suivi de la puissance maximale du G1 comme du G2.

✓ A t = 1.2 s, quand les irradiations ont diminué à 250 W/m$^2$ , le rapport cyclique est D1 = 0.5, qui correspond à une tension du G1, Vpv1_moy = 253.27 V et une puissance P1moy = 22,594 kW .

✓ A t= 1.6s, quand les irradiations ont diminué à 250 W/m$^2$, D2=0.574, qui correspond à une tension du G2, Vpv2_moy=211.5V et une puissance P2moy=22.6 kW

On note que les deux MMPT continuent le suivi de la puissance maximale durant ce changement rapide de l'irradiation.

- ✓ A t=2s, les irradiations de G1 ont repris leur état maximal 1000W/$m^2$.

- Et à t=2.2s, les irradiations de G2 aussi ont repris leur état maximal 1000W/$m^2$.

- La puissance maximale a atteint progressivement la valeur 100.7 Kw et le rapport cyclique D1=0.453 et la tension moyenne Vpv1_moy=274V. D2=0.5 et Vpv2_moy=260 V.

La MPPT continue son suivi durant cette période.

- ✓ De t=2.3s à t=2.35s, le système du G1 reçoit un autre changement subit des irradiations (chute très rapide) une diminution jusqu'à 250 W/$m^2$ , ce qui a entrainé des oscillations de la tension ainsi du rapport cyclique D1 durant cette temps.

- Même une réduction de puissance jusqu'à P1moy=22.6 kW et reste en baise jusqu'à t=2.65s.

- ✓ De t=3.5s à 3s, le système G2 reprend ses irradiations à 1000 W/$m^2$ et sa puissance maximale P2max=100.7 kW. avec D2=0.58.

- ✓ De t= 2.35s à t=2.65s, la MPTT garde toujours son suivi de recherche de la puissance maximale.

- ✓ De t=2.65s à t=2.70s, le système G1 reçoit encore un autre changement instantané des irradiations (accroissement très rapide) augmentation jusqu'à 1000 W/m2, des oscillations importantes de la tension et du rapport cyclique D1 sur cette période.

- Et augmentation de la puissance de P1moy=22.6KW jusqu'à P1moy=100.7 kW.

La MPPT continue son suivi durant cette période.

- ✓ De t=2.7s à t=3s, les irradiations sont stables D1=0.45.

La MPPT fait continuellement son suivi de la puissance maximale.

- ✓ De t = 0,7s pour G1 et de t=1.2 pour G2 à 3s, différents changements d'irradiations sont appliqués afin d'illustrer les bonnes performances du contrôleur MPPT.

## IV.8 Conclusion

Comparé au modèle (IncCond), le modèle (P and O) fonctionne beaucoup plus rapide.

On observe que les performances des deux MPPT de P and O sous divers changements d'irradiations sont meilleures.

On peut constater que ce type de contrôleur MPPT n'entraine une puissance maximale que lorsque l'éclairement (irradiations) reste constant.L'ensemble des résultats obtenus montre que le convertisseur DC-DC et la commande MPPT effectuent correctement leurs rôles. Le convertisseur (DC) fournit dans les conditions optimales une tension à sa sortie supérieure à celle fournie par le générateur PV.

Les résultats de simulation prouvent que ce système peut s'adapter aux incertitudes, donner une réponse rapide et une bonne performance en régime transitoire comme, il est peu sensible aux variations des perturbations externes.

La commande MPPT adapte le générateur PV à la charge (réseau électrique) en combinaison avec la commande de l'onduleur : ajuste le transfert de la puissance maximale fournie par le générateur PV.

## Conclusion générale

Avant de se pencher sur le font et la problématique de cette étude, d'abord on a étudié le contexte des systèmes d'énergie solaire photovoltaïque. Ceci s'avérer nécessaire pour acquérir à une connaissance approfondie du comportement d'une source photovoltaïque.

On a rapporté des généralités et des explications sur l'effet photovoltaïque et le principe de fonctionnement de la cellule ainsi du générateur photovoltaïque.

Par la suite, on a expliqué les évaluations des états du rapport cyclique, de la puissance délivrée par les générateurs PV, de la tension de sortie du hacheur et de la tension de l'onduleur injectée dans le réseau électrique aussi bien, l'état du suivi de la commande MPPT par rapport à l'influence du rayonnement solaire.

Ce travail présente primordialement, la conception et la simulation d'un suivi du point de puissance maximale (MPP) pour un système photovoltaïque qui comprend des générateurs d'énergie solaire (champs photovoltaïques), convertisseurs continu-continu (hacheur boost) à haut rendement avec deux commandes MPPT différentes : algorithmes incrémentale de la conductance et perturbation et observation.

Le convertisseur peut trainer la puissance maximale à partir du générateur PV pour un ensoleillement variable et une température fixe (25°C), en ajustant le rapport cyclique du convertisseur (hacheur), dont le fonctionnement du système PV est régulé par des commandes MPPT.

Le système MPPT a été testé avec des modules solaires "SunPower - SPR305" de 100 kW et des modules "Kyocera- DD205GX -LP" de100kW, aussi dans une condition d'exploitation qui est la variation des irradiations solaires.

La procédure de modélisation pour le modèle de circuit a été présenté en utilisant l'environnement MATLAB/Simulink/Sim-power-system.

Les résultats obtenus prouvent que les techniques MPPT étudiées, peuvent suivre la puissance maximale même dans les changements instantanés des conditions d'ensoleillement et la méthode P & O réagit plus rapidement que la méthode IncCond.

En perspective, d'autres techniques de commande MPPT sont appelés à intervenir pour but d'avoir plus de robustesse et de précision telles que les méthodes logique floue et réseaux de neurones.

## Bibliographie


**[1]** Abdulkadir M. "Modeling and Simulation based Approach of Photovoltaic system in Simulink model". ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences.7(5):616-623. 2012.

**[2]** Adbullah M.A. "A review of maximum power point tracking algorithms for wind energy systems". Renewable and Sustainable Energy Reviews. 16: 3220-3227, June. 2012.

**[3]** Safari and S. Mekhilef. "Simulation and Hardware Implementation of Incremental Conductance MPPT With Direct Control Method Using Cuk Converter". IEEE Transactions on Industrial Electronics. 58: 1154-1161, April. 2011.

**[4]** Zegaoui. "Comparison of two maximum power point trackers by simulating of PV generators", Science Direct. pp. 678-687. 2011.

**[5]** Walker G. "Evaluating MPPT converter topologies using a MATLAB PV model". Journal of Electrical and Electronics Engineering, Australia, IE Aust. 21(1): 49-56. 2001.

**[6]** Céline BERNARD, Carolina SEBRAO – OLIVEIRA, Bernard LAVAL, Clément VAUDOUER " Panneau photovoltaïque et algorithme MPPT a base de logique floue " Rapport rédigé dans le cadre de l'UV BA04 – Energie renouvelables. Université de Compiegne. France, 2009.

**[7]** A. Ricaud "Photopiles solaires: de la physique de la conversion photovoltaïque aux filières, matériaux et procédés", ed. Presses polytechniques et universitaires romandes, Suisse, 2001.

**[8]** A. Labouret, "Cellules solaires: les bases de l'énergie photovoltaïque", Ed. Dunod, Paris, 2001.

**[9]** Michel Pinard, "Convertisseurs et électronique de puissance commande, description, mise en oeuvre", Dunod, Paris, ISBN 978-10-049674-7, p.116. 2002.

**[10]** Hannes Knopf. "Analysis, simulation, and evaluation of maximum power point tracking (MPPT) methods for a solar powered vehicle. Master of Science in Electrical and Computer Engineering". Portland State University 1999.

**[11]** Michel Pinard, "Convertisseurs et électronique de puissance commande, description, mise en oeuvre", Dunod, Paris, ISBN 978-10-049674-7, p.118. 2002.

**[12]** Muhammad H.Rachid "Power Electronics, circuits, devices, and applications", Prentice Hall, Englewood CM s , New Jersey 1993.

**[13]** K-Taniguchiand Klrie "Trapezoidd modulatingsignai for tree-phase ML1 inverter D". IEEE Transistors on industrial Electronics, Vol. IE3, N"2, pp 193-200. 1986.

**[14]** B.K. Bose, "Power electronics drives". Printice Hall Edition, 1986.

**[15]** Sidney R. Bowes, Yen-Shin Lai, "The relation Between Space- Vector Modulation and Regular-Sampled PW" IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 44, no 5, October 1997.

**[16]** H. van der Broeck, H. Skudelny and G. Stanke, "Analysis and Realization of a Pulsewidth Modulator Based on Voltage Space Vectors" rEEE Transactions on Industry Applications, vol. 24, no. l, 1988.

**[17]** Bong-Hwan Kown, Tae-Woo Kim, Jang-Hyoun Youm, "A Novel SVM-Base Hysteresis Current Controller," IEEE Transactions on Power Electronics. Vol. 13. No. 2. March 1998.

**[18]** M. khafallah, "Etude comparative des performances de la modulation sinusoïdale régulière et la modulation vectorielle d'un onduleur à MU", CCECE/CCGEI, Saskatoon, May 2005.

**[19]** S. Aït cheikh. "Etude, Investigation et Conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques". Thèse de doctorat. Ecole National Polytechnique Elharach. 2007.

**[20]** DGEMP : Direction Générale de l'Energie et des Matières Premières textes officiels; "Installations solaires photovoltaïques raccordées au réseau". www.industrie.gouv.fr

**[21]** A. Oi, "Design and simulation of photovoltaic water pumping system". Partial Fulfillment of the Requirements for the degree of Master of Science in Electrical Engineering. Faculty of California Polytechnic State University. San Luis Obispo September 2005.

**[22]** Detlef Schulz, Mathias Jahn and Thomas Pfeifer " Grid Integration of Photovoltaics and Fuel Cells". Department of Electrical Engineering, Electrical Power Engineering, Helmut-Schmidt-University, Holstenhofweg 85, D-22043 Hamburg, Germany.

**[23]** F.Bouchtouche cherfa "Etude et réalisation d'une centrale photovoltaïque connectée au réseau de distribution électrique BT". Mémoire de magister. Ecole National Polytechnique Elharach. 2004.

**[24]** Y. Pankow, "Etude de l'intégration de la Production décentralisée dans un réseau basse tension", Thèse de doctorat de l'Institut National supérieure des sciences Appliquées de Toulouse, Septembre 2006.

**[25]** David Irwin. MUHAMMAD H. RASHID "Power electronics Handbooks". University of West Florida Joint Program and Computer Engineering. Copyright. by ACADEMIC PRESS. 2001.

**[26]** "Prescription techniques spécifiques de raccordement d'installations de production décentralisée fonctionnant en parallèle sur le réseau de distribution". Synergrid, Fédération des Gestionnaires de Réseaux électriques et Gaz en Belgique.

**[27]** Annexe de l'arrêté du 30 décembre 1999 relatif aux conditions techniques de raccordement au réseau public de transport des installations de production d'énergie électrique de puissance installée inférieure ou égale à 120 MW, EDF SN France.

**[28]** M. Boudjdaimi. " Commande d'un onduleur par des approches basées sur des réseaux de neurones artificiels". Mémoire de magister, UMMTO, 27/09/2009.

**[29]** E. Gholipour Shahraki, "Apport de l'UPFC à l'amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques ". Thèse de doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy-I, Octobre 2003.

**[30]** E. Florin Mogos, " Production décentralisé dans les réseaux de distribution ". Thèse de doctorat de l'Ecole National supérieure d'Art et métiers centre de Lille, France. Juillet 2005.

**[31]** A. Davigny, " Participation au service système de ferme d'éolienne à vitesse variable intégrant du stockage inertiels d'énergie ". Thèse de doctorat l'Université de Lille, France. Décembre 2007.

**[32]** JIN-WOO JUNG, PHD, " Mechatronic Systems Laboratory ". Department of electrical and computer engineering the Ohio State University. USA. 2008.

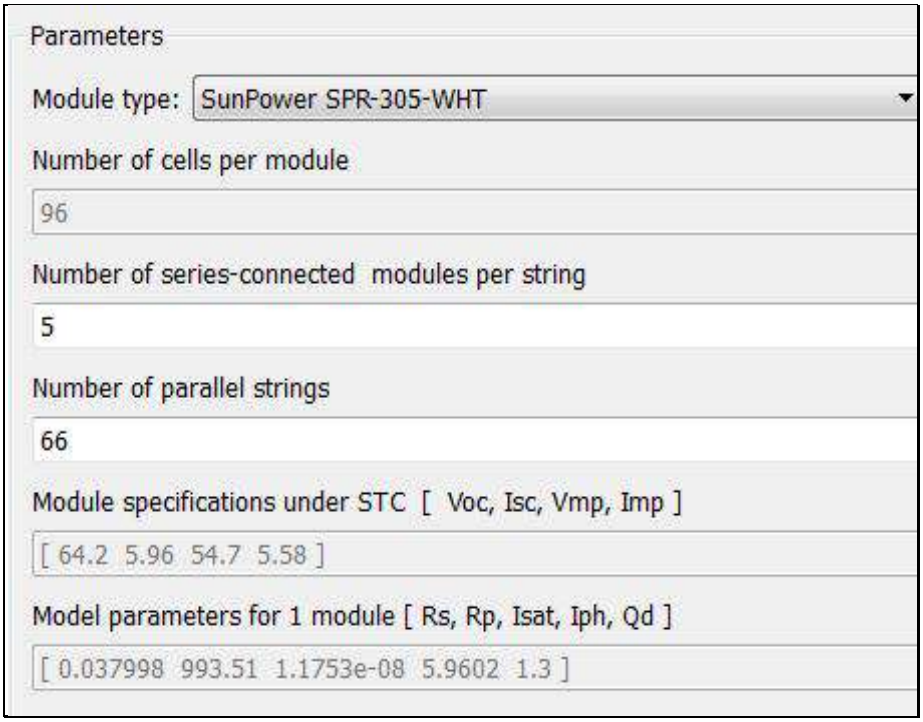
**[33]** Morsli Abdelkader "Etude d'un système solaire photovoltaïque utilisant des supercondensateurs", Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Algérie. 2010.

**[34]** BOULESNAME Rafik . GAHAM Ahcene "Etude d'une chaine, source photovoltaïque onduleur multi-niveaux reliée au réseau électrique" Mémoire de Master. Université de Médéa. Algérie 20015.

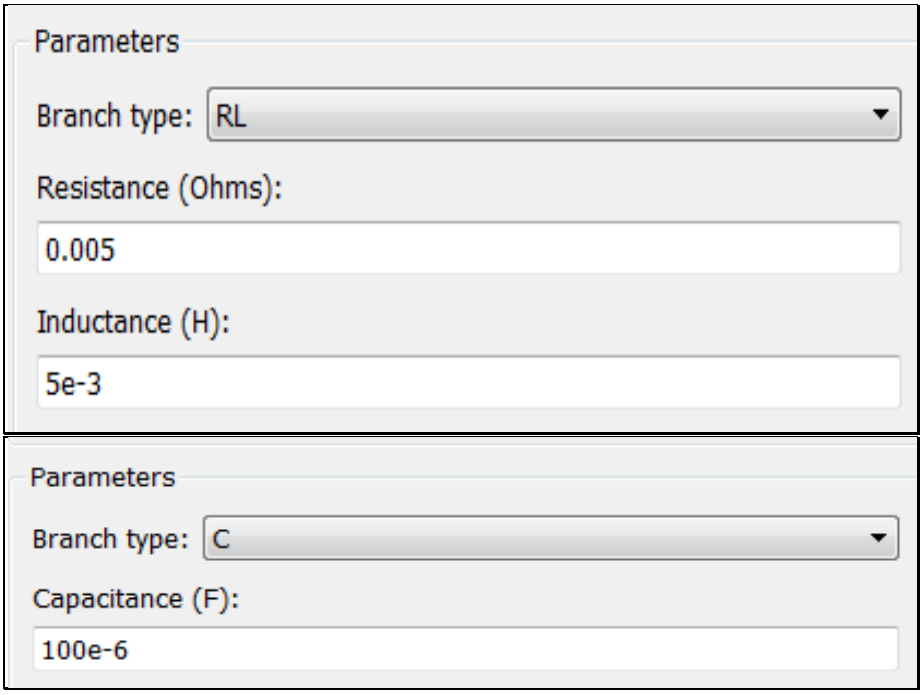
## Annexe

### A.1. Paramètres des composants utilisés

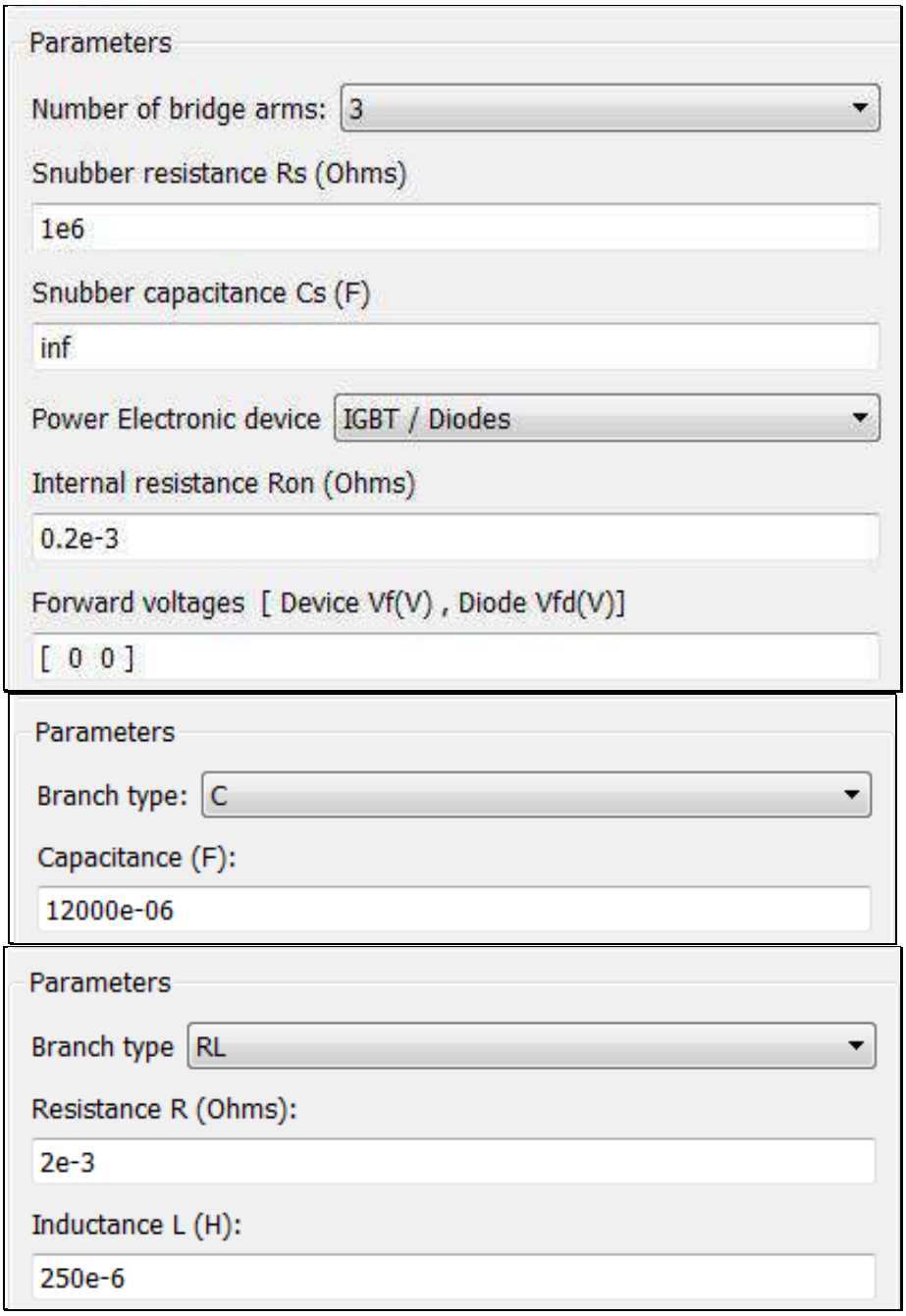
#### A.1.1 Les valeurs du champ PV




#### A.1.2 Les valeurs du hacheur boost



### A.1.3 Les valeurs de l'onduleur



*Paramètres de la commande de l'onduleur*

Parameters

Nominal power and frequency [ Pnom(VA) Fnom(Hz) ]:

[ 100e3 50 ]

Nominal primary and secondary voltages (Vrms LL) [ Vnom_prim Vnom_sec ]:

[ 25e3 260 ]

Nominal DC bus voltage (V):

500

Total transformer leakage impedance (pu/Pnom) [ Rxfo Lxf ]

[0.002 0.06 ]

Choke impedance [ R(ohm) L(H) ]

[2e-3 250e-6 ]

VDC regultator gains [ Kp Ki ]:

[7 800]

Current regulator gains [ Kp Ki ]:

[0.3 20]

## A.2. Champ PV

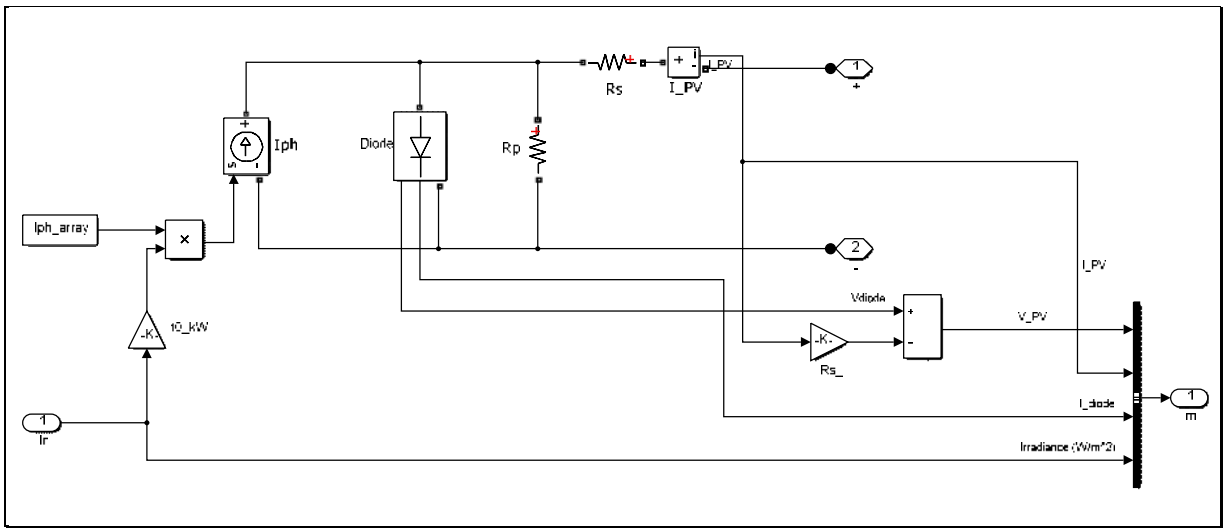



**Figure A.1.** *Block diagramme du champ PV.*

## A.3. Commande du Hacheur Boost

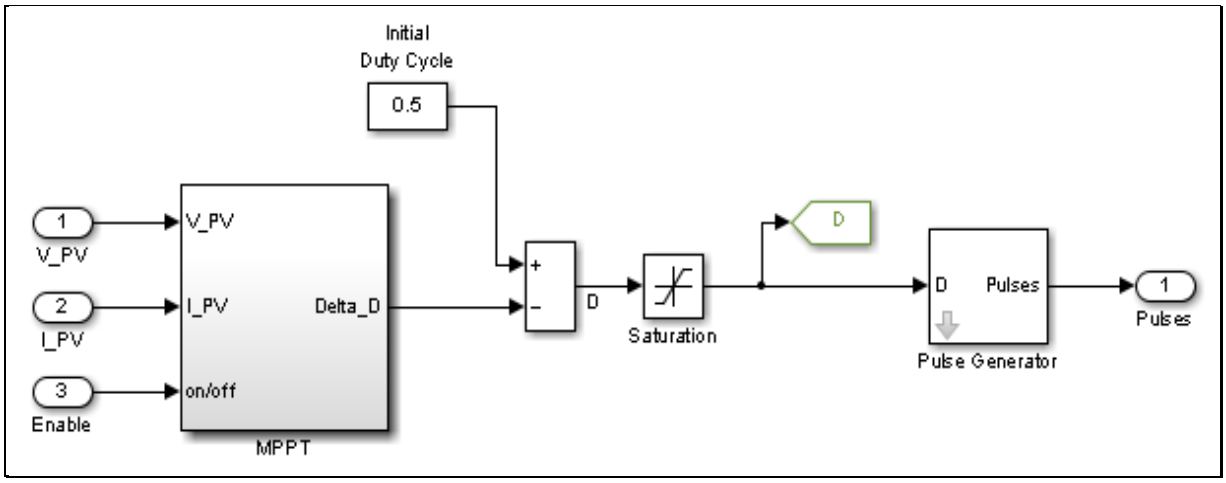



**Figure A.2.** *Block diagramme de la commande du hacheur boost.*

## A.4. Commande MPPT IncCond

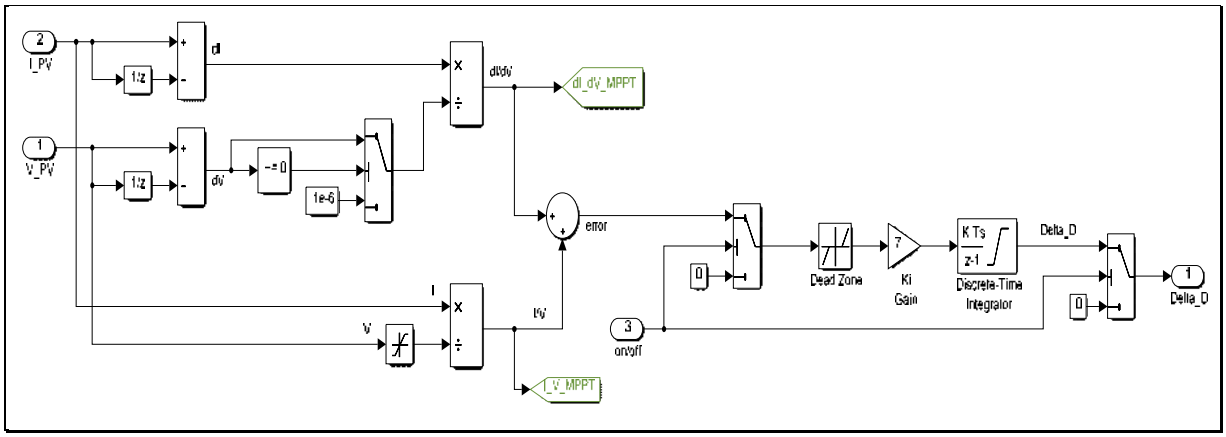



**Figure A.3.** *Block diagramme de la commande MPPT IncCond.*

## A.5. Commande de l'onduleur

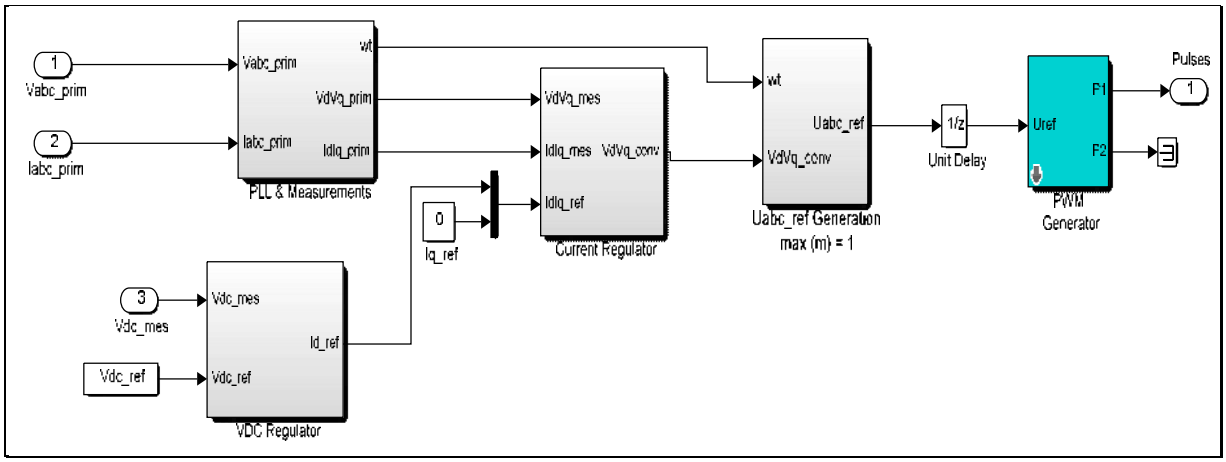



**Figure A.4.** *Block diagramme de la commande de l'onduleur.*

### *A.5. 1. Régulateur de tension*

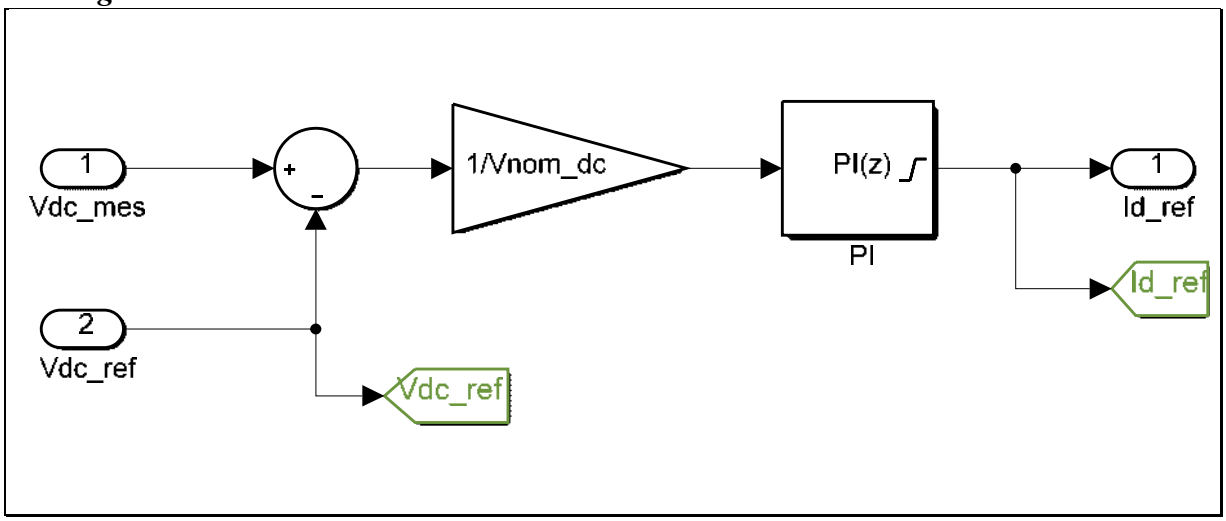



**Figure A.5.** *Block diagramme du régulateur de tension.*

### *A.5. 2. Régulateur de courant*

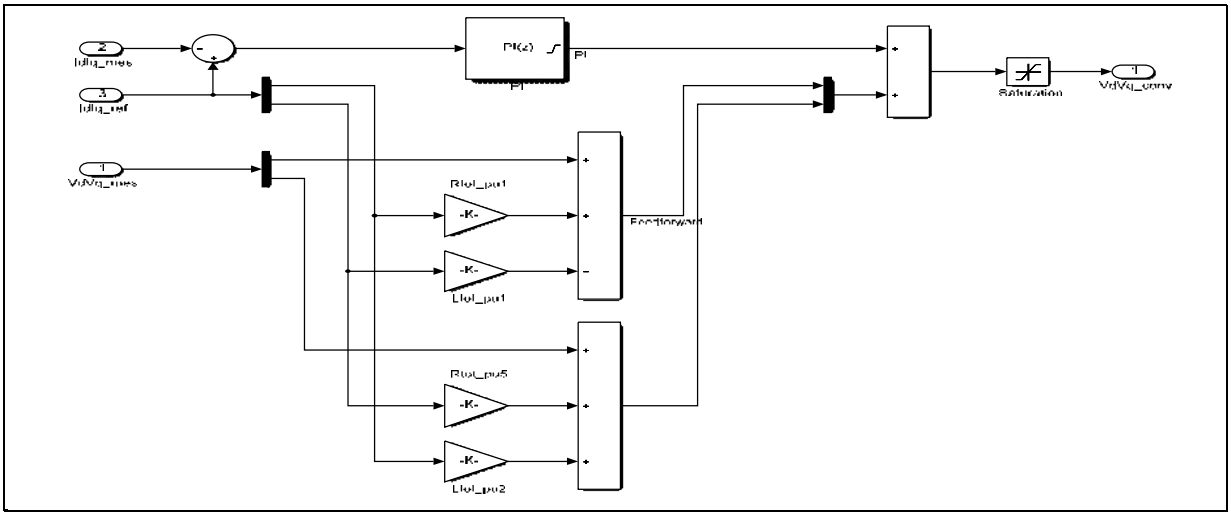



**Figure A.6.** *Block diagramme du régulateur de courant.*

## A.6. Réseau électrique

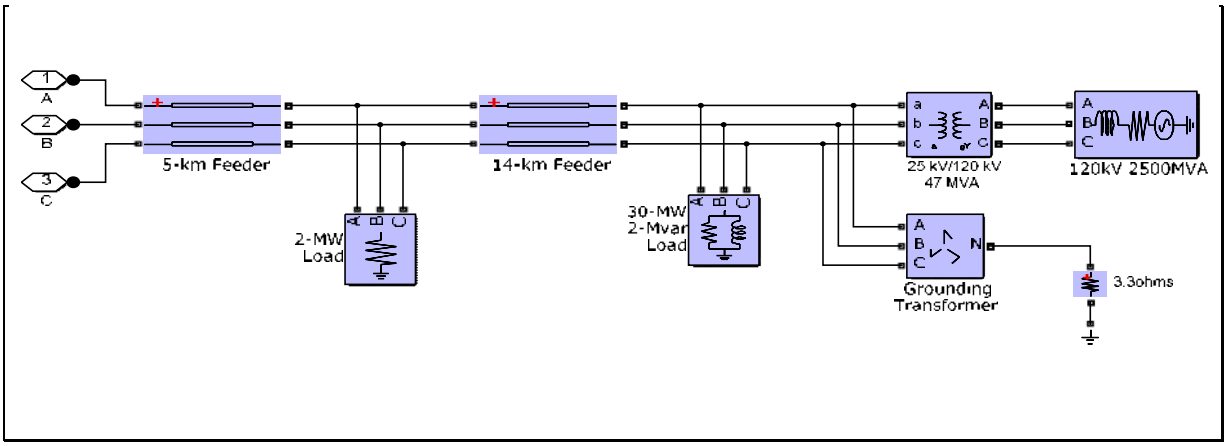



**Figure A.7.** *Block diagramme du réseau électrique.*