

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'enseignement Supérieur

Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued

Faculté de Technologie

Mémoire de Fin d'Étude

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Electrotechnique

Spécialité : commande Electrique

Thème

**Commande et modélisation de l'énergie
photovoltaïque interconnecté au réseau électrique**

Réalisé par :

Halouadji Ramzi

Gharmouli Fares

Deheb Noureddine

Encadré par :

D.r Lammouchi Zakaria

Soutenu en june 202

شكر و عرفان

بسم الله الرحمن الرحيم

نحمد الله عز وجل الذي وفقنا في اتمام هذا البحث العلمي والذي الهمنا الصحة والعافية والعزيمة، فالحمد لله حمدا كثيرا،

نتقدم بجزيل الشكر والتقدير الى الاستاذ الدكتور المشرف (لموشي زكرياء) على كل ما قدمه لنا من توجيهات ومعلومات قيمة ساهمت في اطراء موضوع دراستنا في جوانبها المختلفة كما نتقدم بجزيل الشكر الى اعضاء لجنه المناقشة الموقرة.

ولا ننسى تقديم الشكر الجزيل لكل الأساتذة المحترمين بجامعة الشهيد حمة لخضر الوادي

نقول لكم شكرا جزيلا على كل مجهوداتكم.

الإهداء

إلى إنسانة الروح إلى أميرة قلبي وعذبة السجايا إلى تلك التي المست بحنانها أوتار قلبي فألحن لحن الرضاء
والمودة والخضوع إلى التي يعجز اللسان أو القلم عن وصف تضحياتها....

إلى أمي الحبيبة حفظها الله ورعاها..

إلى الإنسان العظيم الذي تربع على عرش إعجابي.. إلى الرجولة المكتملة...إلى سندي وقدوتي.. إلى رمز
المحبة والعطاء.. إلى أبي الحبيب حفظه الله ورعاه أتمنى أن أكون أبنا يليق بك..

إلى عائلتي وأحباء قلبي ونور حياتي إلى من أرتاح أسعد بلفائهم إلى من تقاسمت معهم دفء العائلة إلى
إخوتي وأخواتي..

إلى أصدقائي والأحبة الذين تقاسمت معهم مشاق مشواري الدراسي وإعداد مذكرتي.. إلى جميع أقربائي
وأحبائي...إلى من يهتمهم أمرنا ومن لا يهتمهم ومن يحب النظر إلى وجوهنا ومن لا يطيقنا. إلى كل من
وسعهم قلبي وصدري ولم تسعهم ورقتي.. إلى كل من جمعتني بهم الكلمة الطيبة..

وصلت رحلتي الجامعية إلى نهايتها بعد تعب ومشق وها أنا ذا أختتم بحث تخرجي بكل همة ونشاط وأمتن لكل
من كان له فضل في مسيرتي

Résumé

Les énergies renouvelables se manifestent comme une solution potentielle à la réduction de la pollution. Parmi les moyens de production prometteurs (solaire, éolien, hydraulique...), le photovoltaïque (PV) apparaît aujourd'hui comme le plus approprié et le plus abouti à la production d'électricité d'origine renouvelable pour l'habitat.

. L'objectif de travail concerne le développement des stratégies de commande pour l'optimisation du fonctionnement de systèmes de production d'énergie photovoltaïque (système photovoltaïque connecté au réseau électrique). Récemment, la commande prédictive à ensembles finis fut une alternative très prometteuse pour la commande des convertisseurs statiques à cause des performances qu'elle offre par rapport aux autres techniques de modulation comme la modulation MLI.

Ce travail présente une commande prédictive à système photovoltaïques connectés au réseau basée sur un modèle d'états fini. L'algorithme de commande choisit l'état de commutation de convertisseur qui minimise l'erreur quadratique entre les courants ou les puissances prédits à leurs valeurs calculées pour tous les différents vecteurs de tension. Le vecteur de tension optimal qui minimise une fonction de coût est alors appliquée à système photovoltaïques (convertisseur statique DC/AC) connectés au réseau électrique avec un algorithme de poursuite du point de puissance maximale (MPPT).

Mots-clés : Réseau électrique, commande prédictive, MPPT, Système PV connecté au réseau

Abstract

Renewable energy emerges as a potential solution to reduce pollution. Among the most promising means of production (solar, wind, hydraulic, etc.), PV today appears to be the most suitable and successful in producing electricity from renewable sources of housing.

.The objective of the work is to develop control strategies to improve the operation of photovoltaic power production systems (electrical grid-related photovoltaic system). Recently, predictive control of the limited set has been a very promising alternative to fixed transformer control because of the performance it offers compared to other modification techniques such as PWM modification.

This work offers predictive control of network-connected photovoltaic systems based on the limited state model. The control algorithm chooses the transformer switching status that reduces the square error between currents or forces expected by their calculated values for all different voltage vectors.

The optimal voltage vector that reduces cost function is then applied to photovoltaic systems (DC/DAC converter) connected to the electrical grid using the Maximum Power Point Tracking Algorithm (MPPT).

Keywords : grid power, predictive control, MPPT, grid connected photovoltaic system

ملخص

تبرز الطاقة المتجددة كحل محتمل للحد من التلوث. من بين وسائل الإنتاج الواعدة (الطاقة الشمسية ، والرياح ، والهيدروليكية ، وما إلى ذلك) ، تبدو الطاقة الكهروضوئية (PV) اليوم هي الأنسب والأكثر نجاحًا في إنتاج الكهرباء من مصادر متجددة للإسكان.

يتعلق هدف العمل بتطوير استراتيجيات التحكم لتحسين تشغيل أنظمة إنتاج الطاقة الكهروضوئية (النظام الكهروضوئي المتصل بالشبكة الكهربائية). في الأونة الأخيرة ، كان التحكم التنبئي للمجموعة المحدودة بديلاً واعدًا للغاية للتحكم في المحولات الثابتة بسبب الأداء الذي يقدمه مقارنة بتقنيات التعديل الأخرى مثل تعديل PWM.

يقدم هذا العمل تحكماً تنبئياً للأنظمة الكهروضوئية المتصلة بالشبكة بناءً على نموذج الحالة المحدودة. تختار خوارزمية التحكم حالة تبديل المحول التي تقلل الخطأ التريبيعي بين التيارات أو القوى المتوقعة بقيمتها المحسوبة لجميع متجهات الجهد المختلفة. ثم يتم تطبيق متجه الجهد الأمثل الذي يقلل من دالة التكلفة على الأنظمة الكهروضوئية (محول التيار المستمر / التيار المتردد الثابت) المتصلة بالشبكة الكهربائية باستخدام خوارزمية تتبع نقطة الطاقة القصوى (MPPT).

الكلمات المفتاحية: قوة الشبكة ، التحكم التنبئي ، MPPT ، النظام الكهروضوئي المتصل بالشبكة

Sommaire

Tableau des matières :

شكر و عرفان	I
الإهداء	II
Résumé	VII
Abstract	VIII
ملخص	IX
Sommaire	X
Liste des figures	XI
Liste des tableaux	XII
Listes des acronymes et symboles	XIII
Introduction Générale.....	1
1. Introduction:.....	3
1-2 Système photovoltaïque	3
1-2-1 Effet photovoltaïque.....	3
1.2.2 Cellules photovoltaïques	4
1.2.2.1 Principe de fonctionnement	5
1.2.2.2 Différents types de cellules solaires	6
B) Cellule en silicium monocristallin.....	7
1.2.3/Modélisation électrique d'une cellule photovoltaïque	9
1-2-3-1/ Modèle à une diode.....	11
1-2-4/Poursuite de point de puissance maximale	12
1-3/ Configuration des systèmes photovoltaïque	12
1-3-1/Convertisseur DC-DC	13
1-3-2/ Convertisseur DC-AC	14
1-3-2-1/ D´définition des onduleurs.....	14
1-3-2-2/ L'onduleur à deux niveaux	15
1-4/Conclusion	15
2.1. Introduction :.....	16
2.2. Modélisation du générateur photovoltaïque :	16
2.2.1. Modèle de la cellule photovoltaïque :.....	16
2.3 La commande prédictive à base de modèle (MPC):.....	18

2.3.1 Méthodes de contrôle prédictif :.....	19
2.3.2 . Principes de base du contrôle prédictif basé sur le modèle	20
2.3.4Avantages de Contrôle prédictif MPC	21
2.3.5. Contrôle prédictif basé sur le modèle pour les systèmes de puissance :	22
2.3.6 Conception du contrôle prédictif :.....	22
2.3.7. Identification du nombre de commutation possibles des convertisseurs :	23
2.3.8 Fonction coût multi termes	25
2.3.9 Structure de l'Algorithme de commande	25
2.5. Modèle de convertisseur :	26
2.5.1 Modèle de la charge :.....	27
2.6 Dimensionnement du condensateur de bus continu :.....	28
2.8 Modèle de l'onduleur triphasé à deux niveaux :.....	28
2.9 Modélisation du filtre coté réseau :.....	31
2.10 Modélisation du réseau électrique:	32
2.11 Modèle sous Matlab Simulink :.....	33
2.12 Résultats de simulation :.....	34
2.12 /Conclusion :	35
APPLICATION DE LA COMMANDE PREDICTIVE AU SYSTEME PV	36
INTERCONNECTE AU RESEAU	36
3.1 Introduction :	36
3.2 Modèle du module PV:.....	37
3.3 Modèle du panneau PV	38
3.4 Les algorithmes de recherche du point de puissance maximale (MPPT) :	39
3.4.1 Algorithme Perturber et observer (P&O) :	39
3.5 Implémentation de la commande :.....	40
3.6. Résultats de simulation	42
3-7 /Conclusion :	46
CONCLUSION GÉNÉRAL	47
RÉFÉRENCES	48

Liste des figures

Chapitre -1: GENERALITES SUR LES SYSTEMES PHOTOVOLTAIQUES

figure 1 : Schéma de conversion photoélectrique	4
figure 2 : Principe de fonctionnement d'une cellule PV.....	6
figure 3 : Les différents types de cellules photovoltaïques	8
figure 4 : Schéma équivalent d'une cellule PV	11
figure 5 : Schéma de principe de la commande MPPT	12
figure 6 : Symbole d'un hacheur DC/DC.	14
figure 7 : Schéma de principe de la conversion Continu - Alternative (DC – AC)	15
figure 8 : Onduleur de tension triphasé à deux niveaux	15

Chapitre-2: MODELISATION DES ELEMENTS DU SYSTEME PV CONNECTE AU RESEAU

figure 9 : Structure de puissance du système étudié.....	16
figure 10 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.....	17
figure 11: Principe de fonctionnement d'un MPC.....	21
figure12 : Schéma général de la commande prédictive à états finis FS-MPC.	23
figure 13 : Relation liant les états de commutation et les vecteurs tensions de sortie pour un VSI-2L. ...	24
figure 14 : Algorithme de la commande MPC	26
figure 15: Schéma fonctionnel du système PV connecté au réseau avec un onduleur à deux niveaux	27
figure 16 : Schéma de l'onduleur triphasé en pont à deux niveaux.	29
figure 17: Représentation du filtre RL.	31
figure 18: Modèle sous Matlab Simulink de la commande FS-MPC association d'un onduleur à deux niveaux au réseau électrique.....	33
figure 19: résultats de simulation des courants de la commande FS-MPC association d'un onduleur à deux niveaux au réseau électrique.....	34

Chapitre-3: APPLICATION DE LA COMMANDE PREDICTIVE AU SYSTEME PV INTERCONNECTE AU RESEAU

figure 20 : le schéma général photovoltaïque interconnecté au réseau électrique.....	37
figure 21 : Caractéristiques (I-V) et (P-V) d'un panneau PV sous différents niveaux d'irradiation à 25°C.	39
figure 22 : organigrammes de P&O	40
figure 23 : Résultats de simulation du système dans les conditions des tests ($q_{ref}=0w$, $G=1000W/m$) ...	44
figure 24: Résultats de simulation du système dans les conditions des test ($q_{ref}=0w$, $G=1000/800 w/m$)	45

Liste des tableaux

Chapitre-1: GENERALITES SUR LES SYSTEMES PHOTOVOLTAIQUES

Tableau 1.1 Différents modèles électriques de cellule photovoltaïque 10

Chapitre-2: MODELISATION DES ELEMENTS DU SYSTEME PV CONNECTE AU RESEAU

Tableau2 .1 : Les états de commutation dans un onduleur triphasé..... 29

Chapitre-3: APPLICATION DE LA COMMANDE PREDICTIVE AU SYSTEME PV INTERCONNECTE AU RESEAU

Tableau 3.1 Caractéristiques Principales du Module pv 38

Listes des acronymes et symboles

Acronymes

PV : photovoltaïque

P&O : Perturbation et Observation

CIS : cuivre, indium, sélénium

CIGS : cuivre, indium, gallium et sélénium

MPPT : Maximum power point tracking (Suivi du point de puissance maximale)

IGBT: Insulated-Gate Bipolar Transistor. (Le **transistor bipolaire à grille isolée**)

DC : Courant Continu

AC : Courant Alternatif

CC: Courant Continu

MPC: Model Predictive Control.

FCS-MPC: Finite Control Set Model Predictive Control.

2L-VSI : 2 Level Voltage Source Inverter

MPP : Point de puissance maximale

P&O : Perturbation et Observation

Symboles

C_{cc} Capacité de l'élevateur (F)

C_{in} Capacité d'entrée de l'élevateur (F)

D Rapport cyclique de l'élevateur

E Valeur maximale de tension de crête du réseau(V)

e_b, e_c Tension de réseau (V)

F_c Fréquence de commutation de convertisseur survolteur (Hz)

I_{ph}	Photo courant d'une cellule PV (A)
I_0	Courant de saturation inverse de la diode (courant d'obscurité) (A)
I_{cc}	Courant de court-circuit d'un module PV (A)
I_{pv}	Courant à la sortie d'un module PV (A)
I_{ppm}	Courant du point de puissance maximale (A)
I_L	Courant de l'inductance de l'élévateur (A)
I_{inv}	Courant d'entrée de l'onduleur (A)
K	Constant de Boltzmann (J/K)
L	Inductance du convertisseur élévateur (H)
L_g	Inductance du filtre coté réseau(H)
n	Facteur d'idéalité de la diode
N_p	Nombre de cellules en parallèle dans un module PV
N_s	Nombre de cellules en série dans un module PV
N_{pp}	Nombre de modules en parallèle dans un panneau PV
N_{ss}	Nombre de modules en série dans un panneau PV
P_{max}	Puissance maximale du GPV (W)
q	Charge d'électron (C)
R_g	Résistance du filtre coté réseau (Ω)
R_p, R_s	Résistance parallèle et Résistance série d'une cellule PV (Ω)
S	Signal de commutation du convertisseur survolteur
S_a, S_b, S_c	Signaux de commutation de l'onduleur
T	Température absolue (K)

V_{cc} Tension de bus continu (V)

V_{co} Tension en circuit ouvert d'un module PV (V)

V_{ao}, V_{bo}, V_{co} Tension phase neutre de l'onduleur (V)

V_{an}, V_{bn}, V_{cn} Tension de sortie de l'onduleur (V)

V_{pv} Tension de sortie d'un module PV (V)

V_{th} Tension thermique de (V)

V_{ppm} Tension du point de puissance maximale (V)

Introduction Générale

L'énergie est indispensable à la vie de tout le monde, peu importe quand, et où ils sont. Cela est particulièrement vrai en ce nouveau siècle, où les gens continuent à poursuivre un haut niveau de vie. Parmi les différents types d'énergie que l'Homme a besoin au quotidien, l'électricité est la plus importante qui lui sert pour l'éclairage, le chauffage, la distraction, la communication et l'information, etc. Au cours du XXe siècle, on a abandonné d'utilisé les combustibles et les sources d'énergie à base d'hydrocarbures, ce qui s'est manifesté par le dégagement de grandes quantités de gaz notamment le dioxyde de carbone.

La pollution de l'air, les changements climatiques, les risques du nucléaire, les limites des réserves des énergies traditionnelles (uranium, pétrole, charbon et gaz naturel) qui sont épuisables et leurs répartitions non équitables sur le globe terrestre, l'augmentation des peuples du monde et l'accroissance des besoins énergétiques ont fait prendre conscience qu'un recours à d'autres moyens de production d'énergies respectueuses de la planète où nous vivons, s'impose.

La solution est de recourir aux énergies renouvelables qui offrent la possibilité de produire de l'électricité satisfaisante aux exigences écologiques. Malheureusement, cette issue rencontre des contraintes économiques ; coût élevé et rendement bas. Le photovoltaïque (PV) fait partie de ces énergies.

L'énergie solaire est une alternative intéressante à l'énergie des combustibles fossiles. La conversion directe du rayonnement solaire en électricité est connue sous le nom d'effet photovoltaïque. L'énergie PV se développe très rapidement. Elle est durable, propre et sans pollution de l'environnement. Elle est de nature multidisciplinaire, impliquant la mécanique, l'électronique de puissance, théorie de contrôle, et d'autres filières.

D'ailleurs, on prévoit, pour commander la puissance électrique débitée, diverses méthodes : l'action sur les propriétés physico-chimiques des cellules, l'action sur les trackers mécaniques d'orientation automatique des panneaux solaires, et l'action sur l'interface d'électronique de puissance qui relie le générateur PV avec sa charge. Cette dernière action est communément appelée la commande électrique des systèmes PV [1]

Ce mémoire est composé de trois chapitres présentés successivement : Dans le premier chapitre, généralités sur les systèmes photovoltaïques est discutée. Puis, le deuxième chapitre est modéliser des éléments du système PV connecte au réseau. En troisième chapitre est la mise au

point d'une stratégie de commande prédictive (FS-MPC) afin de l'appliquer sur le système PV connecté au réseau, Ce chapitre sera terminé par les résultats de simulation obtenus commande proposé pour atténuer l'effet de variation d'irradiation. Enfin, une conclusion générale résumera les résultats et les interprétations des travaux effectués dans ce travail.

CHAPITRE 01:

Généralités sur les systèmes photovoltaïques

1. Introduction:

Le soleil est une source énergétique quasiment illimitée, il pourrait couvrir plusieurs milliers de fois notre consommation globale d'énergie. C'est pourquoi, l'homme cherche depuis longtemps à mettre à profit cette énergie importante et diffusée sur l'ensemble de la planète, il est arrivé à réaliser ce but par le moyen dit cellule photovoltaïque. Un système photovoltaïque est un système d'alimentation électrique, constitué principalement d'un générateur photovoltaïque composé d'un seul ou de plusieurs modules solaires, d'un ensemble de batteries pour le stockage d'énergie électrique, d'un ou de plusieurs convertisseurs continu-continu pour fournir les tensions alternatifs pour l'alimentation des appareils à courant alternatif ou pour la connexion au réseau [2]

1-2 Système photovoltaïque

1-2-1 Effet photovoltaïque

A.C. Becquerel fut le premier à découvrir en 1839, l'effet photoélectrique. Il a trouvé que certains matériaux pouvaient produire une petite quantité de courant sous l'effet de la lumière. Par la suite, Albert Einstein a découvert, en travaillant sur l'effet photoélectrique, que la lumière n'avait pas qu'un caractère ondulatoire, mais que son énergie était portée par des particules (les photons). L'énergie d'un photon est donnée par la relation suivante :

$$E_{\text{photon}} = \frac{hc}{\lambda} \quad (1.1)$$

Où : h est la constante de Planck, C la vitesse de la lumière.

Ainsi, plus la longueur d'onde est courte, plus l'énergie du photon est grande. On peut dire que l'effet photovoltaïque est la conversion directe de l'énergie des photons constituant la lumière en énergie électrique. Cette conversion particulière de la lumière repose sur l'utilisation des propriétés électriques et optiques des matériaux semi-conducteurs sans avoir besoin d'utiliser d'autres dispositifs ou sources d'énergies extérieures d'où le nom conversion directe [3]

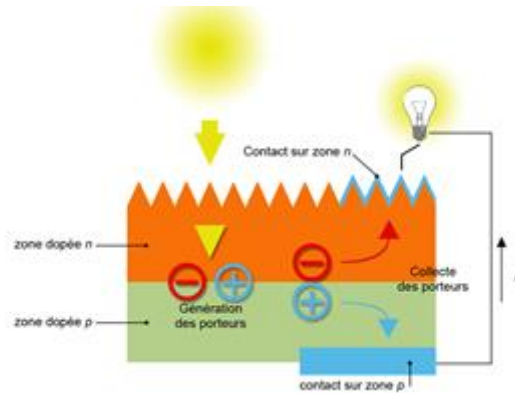


figure 1: Schéma de conversion photoélectrique

1.2.2 Cellules photovoltaïques

Il y a plusieurs types de cellules qui se différencient par les matériaux utilisés dans leur fabrication. En dehors du prix, le choix d'un type de cellule n'a que peu d'importance pour l'utilisateur, la principale différence sera la surface qui, à puissance égale, pourra varier du simple au double. L'élément de base, employé dans la construction des cellules PV, est dans la majorité des cas le silicium. Cette technologie constitue plus de 85% du marché mondial d'aujourd'hui, dont 29% pour le silicium monocristallin et 51% pour le silicium multi-cristallin. Selon le procédé de fabrication, on obtiendra des photopiles plus ou moins performantes, sous forme amorphe, polycristalline, ou mono cristalline. D'autres matériaux sont utilisables : Arséniure de Gallium (AsGa), Tellure de Cadmium (CdTe), Indium Gallium Phosphide (InGaP), et Cu(InGa)Se_2 . Le choix parmi ces différentes technologies dépend du prix et du rendement énergétique. Quelques rendements concernant les diverses photopiles existantes sont présentés ci-après

- ✓ Les cellules monocristallines font partie de la première génération de photopiles. Elles ont un taux de rendement excellent de 24,7% en laboratoire (record obtenu en 1999). SunPower commercialise une cellule de même nature avec un bon rendement qui peut atteindre 24,2%. Cependant, leur technique de production est laborieuse et difficile, et donc, très chère. Il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir du cristal pur.
- ✓ Les cellules polycristallines ont un coût de production moins élevé, et utilisant un procédé moins gourmand en énergie, avec un rendement de 11 à 15% (19,8% en laboratoire).
- ✓ Les cellules amorphes ont un coût de production bien plus bas, mais malheureusement avec un rendement faible 5 à 8% (13% en laboratoire). Cette technologie permet d'employer des couches très minces de silicium de 0,3 à 1,0 micromillimètres seulement (500 μ mm

pour les deux autres types). Les panneaux amorphes ont besoin d'environ deux fois plus de surface pour générer la même quantité d'énergie, et semblent se dégrader plus rapidement. Cependant, ils ont l'avantage de mieux réagir à la lumière diffusée et à la lumière fluorescente et d'être plus performants à des températures élevées.

- ✓ Les cellules en composite monocristallin (AsGa) avec un rendement de 18 à 20% (27,5% en laboratoire)
- ✓ Les cellules en composite polycristallin (CdS, CdTe, CuInGaSe₂, etc.) ont un rendement de 8% (16% en laboratoire). [4]

1.2.2.1 Principe de fonctionnement

La conversion photovoltaïque peut être simplement définie comme la transformation de l'énergie des photons en énergie électrique grâce au processus d'absorption de la lumière par la matière. Lorsqu'un photon interagit avec le matériau, il cède une partie de son énergie (ou toute) suite à la collision. Cette énergie permet d'arracher un électron à la matière, créant un déséquilibre électrique au sein du milieu. Généralement, toute l'énergie des photons, n'arrivant pas à se transformer en électricité, est absorbée par le matériau sous forme thermique. Même si le phénomène électrique est secondaire devant le phénomène thermique, récupérer tout, ou une partie de l'énergie électrique est le premier objectif des capteurs photovoltaïques. Cette récupération est possible par l'utilisation de cellules solaires confectionnées en associant un matériau semi-conducteur dopé N à un autre semi-conducteur dopé P comme le montre la Figure 2 [5]

L'énergie produite par l'absorption d'un photon dans un matériau se traduit du point de vue électrique par la création d'une paire électron-trou. Cette réaction entraîne une différence de répartition des charges générant une différence de potentiel électrique, c'est l'effet photovoltaïque. Le fait d'avoir associé deux types de matériaux pour créer une jonction permet de pouvoir récupérer les charges avant qu'elles ne se soient recombinaées dans le matériau redevenu alors neutre. La présence de la jonction PN permet ainsi de maintenir une circulation de courant jusqu'à ses bornes.

La plupart des cellules photovoltaïques utilisent des semi-conducteurs pour récolter les paires électron-trou créées par la collision des photons dans le matériau. Chaque matériau possède son propre gap énergétique (bande d'énergie interdite entre la bande de valence et la bande de conduction). Tout photon possédant une énergie inférieure à ce gap et arrivant à la surface du matériau n'aura pas assez d'énergie pour arracher un électron au matériau même s'il entre en collision avec l'un d'entre eux. Le courant produit par un capteur PV est donc beaucoup plus faible que la quantité de photons arrivant sur le matériau car plusieurs conditions doivent être réunies

pour que l'énergie d'un photon puisse réellement se traduire en courant. Si le gap du matériau est grand, peu de photons auront assez d'énergie pour créer du courant, mais aux bornes de la cellule, la tension en circuit ouvert sera grande et facilitera d'autant plus l'exploitation de l'énergie électrique. À l'inverse, un matériau avec un faible gap absorbe plus de photons mais présente une tension plus faible à ses bornes .

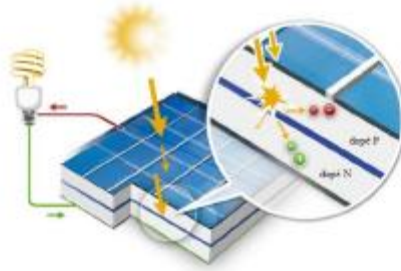


figure 2 : Principe de fonctionnement d'une cellule PV.

1.2.2.2 Différents types de cellules solaires

composée de semi-conducteurs, une cellule photovoltaïque absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique. Une cellule individuelle, unité de base d'un système photovoltaïque, ne produit qu'une très faible puissance électrique, typiquement de 1 à 3 W avec une tension de moins d'un volt. Pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées pour former un module (ou panneau).

Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension. Le courant de sortie, et donc la puissance, sera proportionnelle à la surface du module.[6]

- **A) Cellule en silicium polycristallin**

Pendant le refroidissement du silicium, il se forme plusieurs cristaux. Ce genre de cellule est également bleu, mais pas uniforme, on distingue des motifs créés par les différents cristaux.

Avantages :

- Bon rendement (environ 100 Wc/m²)
- Durée de vie importante
- Moins cher que le monocristallin

Inconvénients :

- Rendement faible sous un faible éclairement

B) Cellule en silicium monocristallin

Lors du refroidissement, le silicium fondu se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules. Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme.

Avantages :

- Meilleur rendement que le polycristallin (environ 150 Wc/m²)
- Durée de vie importante (30 ans)

Inconvénients :

- Plus cher que le polycristallin
- Rendement faible sous un faible éclairement

C) Cellule silicium amorphe en couche mince

Le silicium lors de sa transformation, produit un gaz, qui est projeté sur une feuille de verre. La cellule est gris très foncé ou marron. C'est la cellule des calculatrices et des montres dites "solaires".

Avantages :

- Fonctionnent avec un éclairement faible
- Bon marché par rapport aux autres types de cellules
- Moins sensible aux températures élevées
- Souple

Inconvénients :

- Rendement faible en plein soleil (environ 60 Wc/m²), les cellules en couche mince nécessite une surface plus importante pour atteindre les mêmes rendements que les cellules épaisses
- Durée de vie courte (+/- 10 ans), performances qui diminuent sensiblement avec le temps

D) Cellule sans silicium en couche mince CIS / CIGS

Les cellules CIS représentent une nouvelle génération de cellules solaires sous forme de films minces, de type CIS (cuivre, indium, sélénium) ou CIGS (cuivre, indium, gallium et sélénium). Les matières premières nécessaires à la fabrication de ces cellules sont plus faciles à se procurer que le silicium utilisé dans les cellules photovoltaïques classiques (bien que ce dernier soit déjà très abondant sur terre). De plus, leur efficacité de conversion énergétique est la plus élevée à ce jour pour des cellules photovoltaïques en couche mince.

Avantages :

- Meilleurs rendements par rapport aux autres cellules photovoltaïques en couche mince
- La cellule peut être construite sur un substrat flexible

Inconvénients :

Les cellules en couche mince ont un rendement plus faible que les cellules "épaisses"

E) Cellule multijonction :

Les cellules multi-jonction sont composées de différentes couches qui permettent de convertir différentes parties du spectre solaire et ainsi d'obtenir les meilleurs rendements de conversion.

Avantages:

- Rendement inégalé

Inconvénients

- Pas ou peu d'applications commerciales

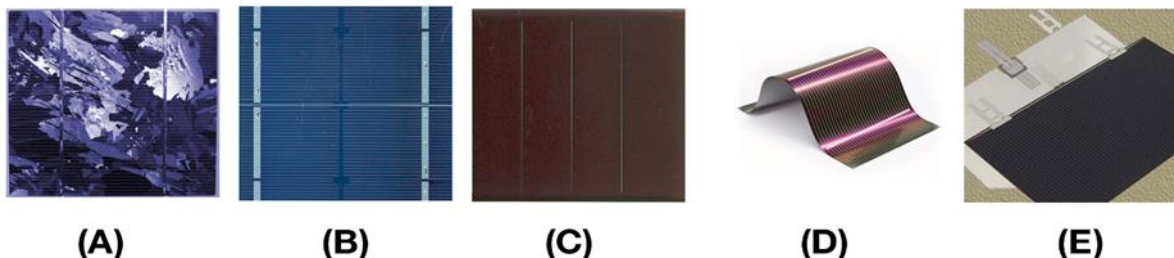


figure 3 :Les différents types de cellules photovoltaïques

1.2.3/Modélisation électrique d'une cellule photovoltaïque

Une évaluation de fonctionnement de modules PV et la conception de systèmes d'énergie sont basées sur la caractéristique électrique courant-tension des modules sous différents niveaux de rayonnement et différentes températures de la cellule PV. La modélisation des cellules PV et des modules peut être effectuée au moyen d'équations qui fournissent différents degrés d'approximation du dispositif réel.

Plusieurs modèles électriques ont été proposés dans la littérature afin de simuler les cellules PV opérant dans diverses conditions. La complexité des modèles dépend de nombre de paramètres($R_S, R_{Sh}, \dots$) à identifier.

Chaque modèle est essentiellement une amélioration du modèle idéal qui contient une source de courant représentant la puissance solaire incidente et une diode qui représente la jonction PN. Des éléments supplémentaires peuvent être ajoutés pour mieux rendre compte de la description du comportement de la cellule PV dans certains quadrants de fonctionnement]. Les modèles les plus courants sont présentés et comparés dans le tableau 1.1

Le modèle à une diode est le modèle le plus répandu. Il est utilisé pour les cellules PV et les modules PV en raison de sa simplicité et sa bonne précision dans le quadrant de production d'énergie. L'évolution du modèle à une diode a conduit à des modèles plus précis tels que le modèle de Bishop qui décrit le comportement d'une cellule PV en polarisation inverse.

Le modèle à deux diodes permet d'améliorer le modèle à une diode de fait qu'il prend en compte les pertes résistives et les mécanismes de recombinaison dans les différents composants électriques du circuit.

En outre, des modèles dynamiques ont été proposés par l'introduction d'une capacité an de modéliser le comportement dynamique de la cellule PV. Ces modèles diffèrent par le nombre de paramètres nécessaires pour le calcul de la caractéristique I-V. Dans cette thèse nous avons principalement utilisé le modèle à une diode et le modèle de Bishop que nous allons décrire plus en détail. [7]

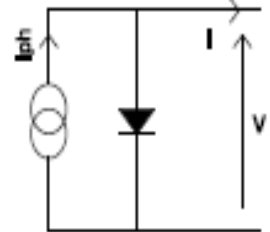
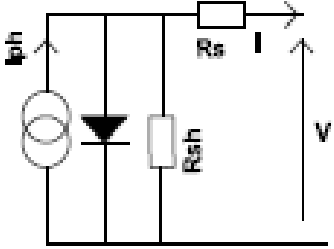
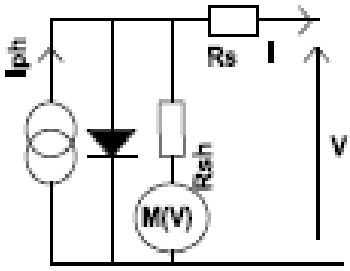
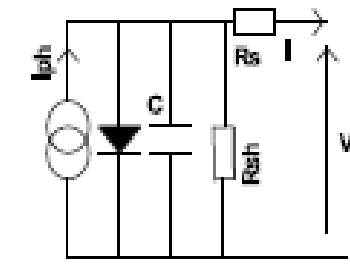
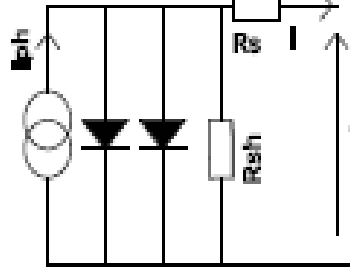
Modèle	Schéma	Nombre Paramètres.	Précision
Idéal		3	Faible
Une diode		5	Bien
Bishop		8	Bien, avec la représentation Régime inverse
Dynamique à une diode		6	Bien, avec la représentation Régime dynamique
Deux diodes		7	Très Bien

Tableau 1.1 Différents modèles électriques de cellule photovoltaïque

1-2-3-1/ Modèle à une diode

Le modèle à une diode a été largement utilisé grâce à sa simplicité et sa précision convenable pour la plupart des applications telles que l'analyse des performances d'une installation photovoltaïque, le dimensionnement d'un système photovoltaïque, l'étude de performance de l'algorithme de MPPT, l'étude de stabilité du raccordement au réseau. Le schéma équivalent d'un tel modèle est montré dans la Figure 1.4. Ce modèle contient une source de courant qui représente l'irradiation reçue par la cellule et une diode pour modéliser la jonction P-N de la cellule.

La résistance série représente la résistivité du matériau avec lequel sont fabriquées la cellule, la résistance de contact entre métal et semi-conducteur et la résistance d'interconnexion entre cellules. La résistance parallèle représente tous les chemins traversés par le courant de fuite, que ce soit en parallèle de la cellule ou au bord d'elle-même. Il résulte généralement des dommages dans le cristal ou d'impuretés dans ou à côté de la jonction [8]

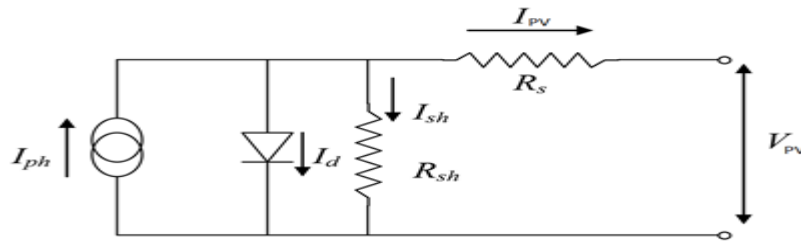


figure 4 Schéma équivalent d'une cellule PV

À partir de la figure 1.4 et la loi de Kirchhoff, on a la relation suivante :

$$i = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{v + I R_s}{A v_t}\right) - 1 \right] - \frac{v + I R_s}{R_{sh}} \quad (1.2)$$

Avec :

I_{ph} : Courant généré par la lumière (A),

I_s : Courant de saturation de la diode (A),

R_s : Résistance série (),

R_{sh} : Résistance shunt caractérisant les courants de fuite de la jonction (),

$V_t = KT/q$: représente la tension thermique du semi-conducteur (V),

T : Température de fonctionnement de la cellule (Kelvin),

K : Constante de Boltzmann

A : Facteur d'idéalité de la diode,

i, v : Courant et tension de la cellule PV.

Les courants I_{ph} et I_s sont donnés par :

$$I_{ph} = S[I_{sc} + K_i(T - T_{ref})] \quad (1.3)$$

$$I_s = I_{rs} \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^3 \exp \left[\frac{qEg}{KA} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (1.4)$$

Avec :

$$I_{rs} = \frac{I_{sc}}{\exp \left(\frac{qV_{oc}}{AKT} \right) - 6} \quad (1.5)$$

Où : I_{sc} , V_{co} : sont le courant de court-circuit et la tension de circuit-ouvert, respectivement.

1-2-4/Poursuite de point de puissance maximale

La technique de poursuite du point de puissance maximale délivrée par un générateur photovoltaïque est basée sur l'introduction d'un convertisseur continu/continu (hacheur) entre le générateur et la batterie de stockage ou entre le générateur et la charge directement. L'utilisation d'un convertisseur autorise une application de grande puissance, d'où l'intérêt d'un système de poursuite du point de puissance maximale, qui s'articule autour d'un étage de commande dédiée. Le principe de la commande est de faire varier la valeur du rapport cyclique en fonction du résultat de l'algorithme de commande, de manière à forcer le système à fonctionner au point de puissance maximale [9]

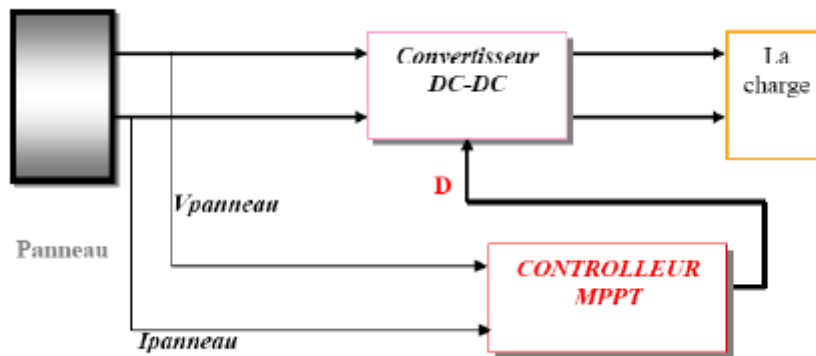


figure 5 : Schéma de principe de la commande MPPT

1-3/ Configuration des systèmes photovoltaïque

Les systèmes PV sont exploités en utilisant différents types de structures de configuration ; chaque configuration est reliée à un dispositif électronique de puissance pour connecter avec un MR ou le réseau principal. La structure de configuration la plus courante est l'installation

centralisée de l'onduleur. Plusieurs panneaux photovoltaïques sont reliés entre eux en série ou en parallèle à un onduleur centralisé, qui convertit le courant continu généré en courant alternatif.

Les caractéristiques non linéaires des panneaux photovoltaïques et les conditions environnementales imprévisibles ont un effet négatif sur le rendement d'un panneau PV. C'est pour cette raison que l'on doit ajouter un algorithme d'ajustement ; qui contrôle en temps réel le point de fonctionnement maximale MPPT (maximum power point tracking). Par conséquent, MPPT doit être implémenté sur le PV où il fait varier le point de fonctionnement de module avec l'intention que les modules fournissent la puissance maximale disponible.

L'énergie maximale du rayonnement solaire se produit lorsque la dérivée de puissance est égale à zéro ; Il existe une puissance de crête correspondant à une tension et à un courant particulier. Les différentes techniques de contrôle de l'MPPT seront présentées dans le chapitre suivant. [10]

1-3-1/Convertisseur DC-DC

Les dispositifs électroniques de technologie nouvelle doivent satisfaire certains critères tels que la haute qualité, la fiabilité, la dimension, le poids et le coût réduit. Les régulateurs de puissance linéaire, dont le principe de fonctionnement est basé sur un diviseur de courant ou de tension, peuvent fournir une tension de sortie de très haute qualité. Cependant, ce type de régulateurs restent inefficaces du fait que leur domaine principal d'application est à des niveaux de puissance faibles. Les régulateurs de commutation appelés convertisseurs DC/DC utilisent des interrupteurs électroniques, à base de semi-conducteurs tels que : le thyristor, transistor de puissance ou l'IGBT...etc , parce qu'ils engendrent une faible perte de puissance lors de basculement d'un état à un autre. Ces convertisseurs assurent des rendements élevés de conversion d'énergie et ils peuvent fonctionner à des fréquences élevées. Les caractéristiques dynamiques des convertisseurs DC/DC s'améliorent avec l'augmentation des fréquences de fonctionnement. Les fréquences de fonctionnement élevées permettent donc de parvenir à une réponse dynamique plus rapide aux changements rapides dans le courant de charge ou de la tension d'entrée.

• D : Rapport cyclique.

Figure 6 montre le convertisseur DC/DC qui lie la source de tension continue à la charge. Il est considéré comme un transformateur de grandeurs électriques continues. Les performances du convertisseur DC/DC lui permettent de réguler la tension de sortie DC malgré les variations de charge et de ligne et de réduire les harmoniques de la tension de sortie DC au dessous du niveau toléré. Il existe plusieurs types de hacheurs DC/DC sur le marché, dans ce chapitre, on va passer en revue les convertisseurs suivants :[11]

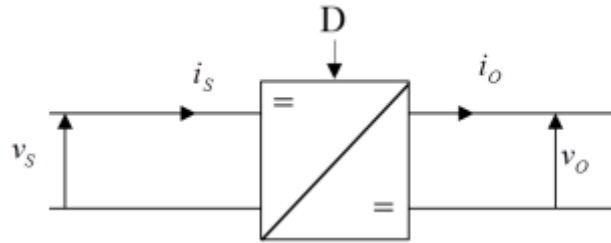


figure 7 : Symbole d'un hacheur DC/DC.

1-3-2/ Convertisseur DC-AC

Pour transformer la tension continue fournie par les panneaux photovoltaïques en une tension "sinusoïdale" on fait appel à un onduleur. Il peut être construit comme un pont intégral standard (onduleurs avec un transformateur) ou suivant une topologie APN, H5 ou HERIC (sans transformateur).

La tension de sortie de l'onduleur étant toujours inférieure à sa tension d'entrée , il peut être nécessaire d'utiliser au préalable un hacheur élévateur (convertisseur DC/DC) permettant d'élever la tension délivrée par les panneaux photovoltaïques . Nous verrons dans la partie 1.3.4 qu'il existe différentes stratégies d'association des hacheurs et onduleurs avec les panneaux photovoltaïques. [12]

1-3-2-1/ D´définition des onduleurs

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion d'énergie électrique de la forme continue (DC) à la forme alternative (AC). En fait, cette conversion d'énergie est satisfaite au moyen d'un dispositif de commande (semi-conducteurs). Il permet d'obtenir aux bornes du récepteur une tension alternative réglable en fréquence et en valeur efficace, en utilisant ainsi une séquence adéquate de commande. figure 7 représente schéma de principe de l'onduleur. Cette tension peut comporter un ou plusieurs créneaux par alternance suivant qu'il s'agit d'une commande à un créneau par alternance ou d'une commande par Modulation de Largeur d'Impulsions.[13]

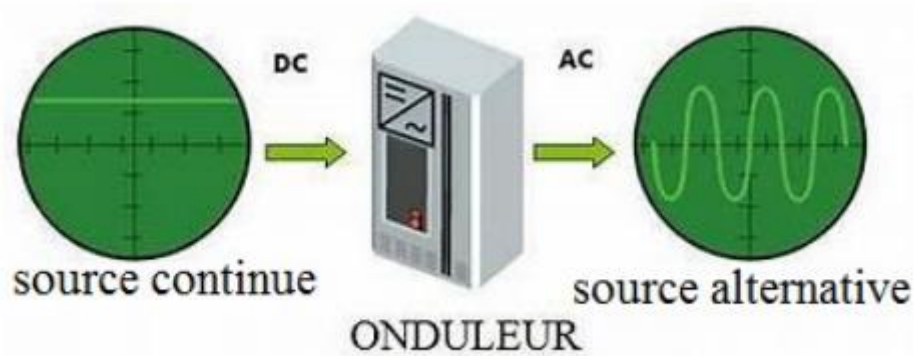


figure 8 : Schéma de principe de la conversion Continu - Alternative (DC – AC)

1-3-2-2/ L'onduleur à deux niveaux

L'onduleur de tension triphasé à deux niveaux est constitué de trois bras de commutation, où chaque bras est composé de deux interrupteurs bidirectionnels, qui fonctionnent de manière complémentaire pour éviter le court-circuit de la source de tension continue à l'entrée de l'onduleur. L'interrupteur bidirectionnel peut être réalisé par une diode et un IGBT montés en tête bêche comme montre la figure 8. [14]

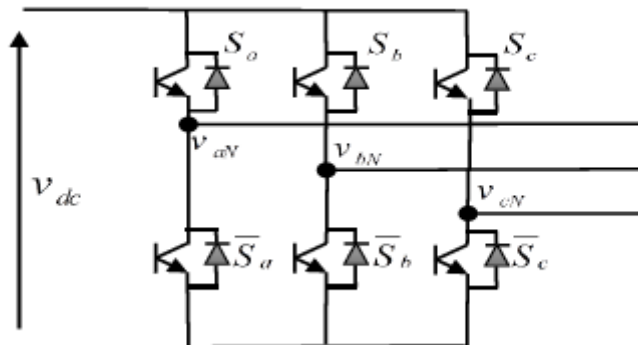


Figure 9 : Onduleur de tension triphasé à deux niveaux

1-4/Conclusion

À travers ce premier chapitre on a présenté l'énergie solaire PV pour les smart grids, ce type d'énergie renouvelable est le plus connu dans le monde actuel. Pour cela, nous avons commencé par définir le smart grid et le principe de la conversion de l'énergie solaire en électricité. Cela conduit à définir l'élément de base de cette conversion. La modélisation de la cellule PV et ses caractéristiques électriques ont été abordé. Ensuite, nous avons présenté les éléments d'une chaîne de conversion PV. Pour terminer, les configurations des systèmes PV ont été présenté.

CHAPITRE 02

Modélisation des éléments du système PV connecté au réseau

2.1. Introduction :

La modélisation d'un système quelconque est indispensable pour l'étude et la maîtrise de son fonctionnement et lorsqu'on souhaite lui appliquer une commande particulière. D'autre part, elle est une phase primordiale dans le développement de la conception des systèmes. Le progrès de l'informatique et du génie des logiciels permet de réaliser des modélisations performantes et d'envisager l'optimisation de la conception. L'étude et la modélisation des systèmes présentent un grand intérêt en raison des impératifs techniques et économiques et conduisent à concevoir et à exploiter le matériel au voisinage des limites technologiques.

On présentera dans ce chapitre la modélisation du système photovoltaïque connecté au réseau (Figure 9), constitué d'un panneau photovoltaïque, un convertisseur CC-CC survolteur (Boost) et un onduleur triphasé à deux niveaux, raccordé au réseau par l'intermédiaire d'un filtre RL. [4]

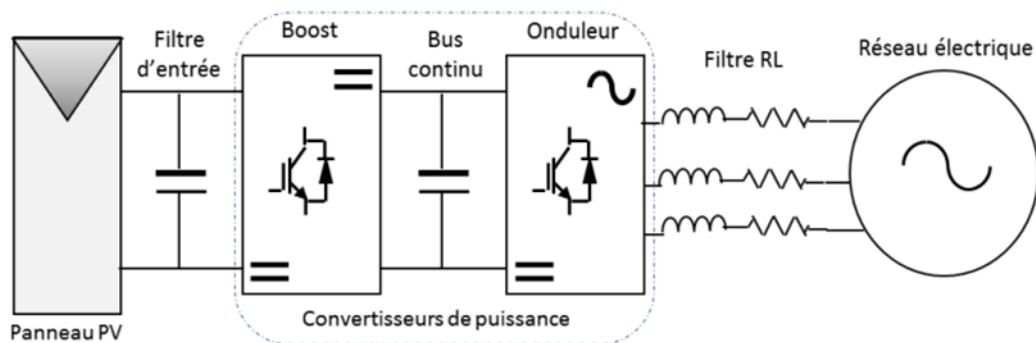


figure 10 : Structure de puissance du système étudié.

2.2. Modélisation du générateur photovoltaïque :

L'élément de base d'un générateur photovoltaïque est la cellule, donc il faut d'abord passer par la modélisation de la cellule photovoltaïque.

2.2.1. Modèle de la cellule photovoltaïque :

Pour établir le modèle mathématique de la cellule photovoltaïque, il faut tout d'abord retrouver son circuit électrique équivalent. Le circuit équivalent, le plus utilisé, d'une cellule photovoltaïque est composé d'une source de courant en parallèle avec une diode, une résistance shunt R_p et une résistance série R_s (Figure 10) [15]

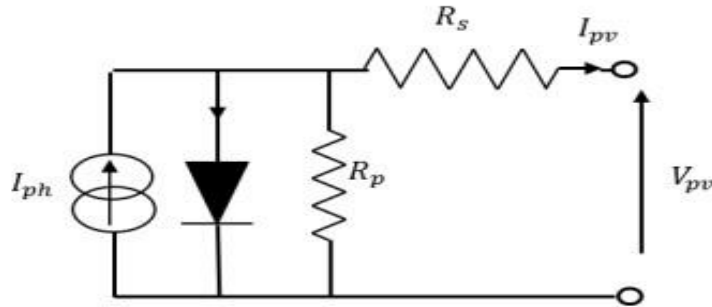


figure 11 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.

Le courant de sortie de la cellule est donné par l'équation (2.1)

$$I_{PV} = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{V_{PV} + R_s I_{PV}}{n V_{th}}} - 1 \right) - \frac{V_{PV} + R_s I_{PV}}{R_p} \quad (2.1)$$

Où:

I_{PV} : est le courant de sortie de la cellule (A).

I_{ph} : est le photo courant de la cellule (A).

I_0 : est le courant de saturation inverse de la diode (courant d'obscurité) (A).

V_{PV} : est la tension de sortie de la cellule (V).

n : est le facteur d'idéalité de la diode (Coefficient dépendant du matériau de la cellule PV, en général : $1 < n < 2$)

V_{th} : est la tension thermique donné par :

$$V_{th} = \frac{kT}{q} \quad (2.2)$$

Où :

k : est la Constante de Boltzman (1.38×10^{-23} J/°K).

T : est la température de la cellule (°K).

q : est la charge électrique (1.6×10^{-19} c).

La résistance parallèle a une valeur assez élevée. Et peut être considéré comme un circuit ouvert.

L'expression $\exp\left(\frac{V_{PV}+R_S I_{PV}}{n_{Vth}}\right) \gg 1$. Par conséquent, l'équation (2.1) s'écrit:

$$I_{PV} = I_{Ph} - I_0 e^{\left(\frac{V_{PV}+R_S I_{PV}}{n_{Vth}}\right)} \quad (2.3)$$

- Le courant de court-circuit : $I_{CC} = I_{Ph}$, il est la plus grande valeur de courant générée par la cellule sous les conditions de court-circuit ou $V_{PV} = 0$.
- La tension à circuit ouvert V_{CO} : est la tension de cellule à travers la jonction/diode PN où $I_{PV} = 0$ et $I_D = I_{Ph}$, elle représente la tension de cellule lorsque elle est à l'ombre et peut être exprimée comme suit [16]

$$V_{CO} = n_{Vth} I_n \left(\frac{I_{Ph}}{I_0}\right) \quad (2.4)$$

L'équation (2.1) peut être simplifier donc comme suit :

$$I_{PV} = I_{CC} \left(1 - e^{\frac{V_{PV}-V_{CO}+R_S I_{Ph}}{n_{Vth}}}\right) \quad (2.5)$$

2.3 La commande prédictive à base de modèle (MPC):

Compte tenu de la demande croissante en performance et en efficacité des convertisseurs et variateurs de puissance, le développement de nouveaux systèmes de contrôle doit tenir compte de la nature réelle de ces types de systèmes. Les convertisseurs et les variateurs de puissance sont des systèmes non linéaires de nature hybride, y compris des éléments linéaires et non linéaires et un nombre fini de dispositifs de commutation. Les signaux d'entrée pour les convertisseurs de puissance sont des signaux discrets qui commandent les transitions d'ouverture et de fermeture de chaque composant. Plusieurs contraintes et restrictions doivent être considérées par le contrôle, dont certaines sont inhérentes au système, comme la tension de sortie maximale de l'onduleur, tandis que d'autres sont imposées pour des raisons de sécurité, comme les limitations de courant pour protéger le convertisseur et ses charges .

De nos jours, pratiquement toutes les stratégies de contrôle sont mises en œuvre dans des plates-formes de contrôle numérique exécutées à des étapes de temps discrètes. La conception de tout système de contrôle doit tenir compte du modèle du système pour ajuster les paramètres du contrôleur, ce qui, dans le cas des convertisseurs de puissance et des variateurs, est bien connu.

Apparue en 2004, grâce aux travaux du Chilien J. Rodriguez et son équipe, la commande prédictive à ensemble finis FS-MPC (Finite States Model Predictive Control) fut une alternative très intéressante pour le contrôle numérique des systèmes de puissance intégrant des convertisseurs statiques.

A contrario de la commande prédictive généralisée GPC à plusieurs paramètres de réglage et utilisant des temps de calculs prohibitifs et des algorithmes complexes pour la prise en compte des contraintes. La commande prédictive FS-MPC utilise un modèle du système permettant de prédire son comportement futur à un ou deux pas de prédiction seulement. Cette prédiction est utilisée par l'algorithme de contrôle pour obtenir la commande optimale, selon un critère d'optimisation prédéfinie. Le principal avantage de la méthode FS-MPC réside en sa simplicité de mise en œuvre. Le procédé n'a pas besoin des contrôleurs linéaires ou non linéaires dans les boucles internes, pas besoin de modulateur pour la porteuse comme dans le cas de la modulation MLI. En plus, les contraintes sont prises en compte grâce à sa flexibilité ce qui réduit nettement le coût global du système d'entraînement.[17]

2.3.1 Méthodes de contrôle prédictif :

Le contrôle prédictif couvre un très large éventail de contrôleurs qu'on retrouve dans les récentes applications des convertisseurs de puissance. Les méthodes de contrôle prédictif sont en général classer comme suit, [18] [19] :

- Contrôle apériodique.
- Contrôle basé sur la bande d'hystérésis.
- Contrôle basé sur la trajectoire.
- Contrôle basé sur le modèle.

La caractéristique principale de contrôle prédictif est l'utilisation d'un modèle du système pour la prédiction du comportement futur des grandeurs réglées. Cette information est utilisée par le contrôleur pour obtenir la commande optimale souhaitée, bien sûr en prenant compte le critère d'optimisation prédéfini auparavant.

Dans la commande basée sur l'hystérésis, le critère d'optimisation consiste en une conservation des variables contrôlées dans une bande d'hystérésis, tandis que dans la commande basée sur la trajectoire, les variables contrôlées sont forcées de suivre une trajectoire prédéfinie. En commande apériodique, la commande optimale tend l'erreur vers zéro dans chaque intervalle de commutation. Une approche plus souple est utilisée dans le contrôle prédictif basé sur le modèle. Elle est exprimée sous forme d'une fonction de coût à minimiser.

Un des avantages du contrôle prédictif est que les concepts sont très simples et intuitifs, dépendamment du type de contrôle prédictif et particulièrement pour un convertisseur à deux niveaux avec un horizon de prédiction égale à 1. D'autre part, la non-linéarité du système peut être incluse dans le contrôle prédictif basé sur le modèle (MPC), cela nous évite la linéarisation du modèle pour un régime de fonctionnement donné et l'amélioration du fonctionnement du système pour tous les régimes de fonctionnement. Dans ce sens, il est possible d'inclure des restrictions sur certaines variables lors de la conception des contrôleurs prédictifs. Tous ces avantages peuvent être facilement obtenus avec certains schémas du contrôle prédictif comme le MPC, mais difficilement avec d'autres comme le contrôle prédictif basé sur la bande d'hystérésis. Dans ce qui suit, nous allons nous focaliser sur la méthode de contrôle prédictif basé sur le modèle (MPC).

2.3.2 . Principes de base du contrôle prédictif basé sur le modèle

Les idées du MPC ont été développées dans les années 1960, comme des applications de contrôle optimal dans le domaine des théories de contrôle, l'intérêt industriel de ces idées a commencé vers la fin des années 1970 [20]. Dès lors, le MPC a été appliqué avec succès dans l'industrie de procédés chimiques par exemple, où les constantes de temps sont assez longues pour effectuer tous les calculs nécessaires. Les premières applications de MPC ont été dans le domaine de l'électronique de puissance et d'entraînements des systèmes électriques avec des fréquences de commutation relativement basses [21], l'intérêt pour les applications du contrôle MPC a considérablement explosé aux cours des dernières décennies .

Le MPC comporte une grande famille de régulateurs [HOL83], et l'élément commun entre tous ces contrôleurs c'est qu'ils utilisent le modèle du système à réguler, pour la prédiction du comportement futur des grandeurs réglées sur un horizon de prédiction prédéfini et la sélection du contrôle optimal en minimisant la fonction de coût.

Le modèle discret utilisé pour la prédiction, peut être exprimé comme un modèle d'espace d'état :

$$\begin{cases} x(K + 1) = Ax(k) + Bu(k) \\ Y(k) = Cx(k) + Du(k) \end{cases} \quad (2.6)$$

Et la fonction de coût qui représente le comportement souhaité du système contrôlé sera définie en considérant les variables de références, les futurs états des variables régulées et leurs futures valeurs optimales. De manière générale, la fonction de coût, pour N horizons de prédiction, se présente sous la forme suivante:

$$F = f(X(k), u(k), \dots u(k + N)) \quad (2.7)$$

La minimisation de cette fonction nous permet de sélectionner le contrôle optimal qu'il faut appliquer par le contrôleur prédictif. Donc, le contrôleur n'applique que l'élément optimal de contrôle où la fonction de coût est minimisée sur une période d'échantillonnage.

Le principe de fonctionnement de contrôle MPC est résumé dans la figure 11. Les valeurs futures des états du système sont prédites jusqu'à un horizon prédéfini dans le temps $k + N$, en utilisant le modèle du système et les informations disponibles (mesures) jusqu'à l'instant k . La séquence de résolution optimale est obtenue en minimisant la fonction de coût et le premier élément optimal de cette séquence est appliqué. Ce processus est répété pour chaque pas d'échantillonnage en tenant compte les nouvelles données mesurées.

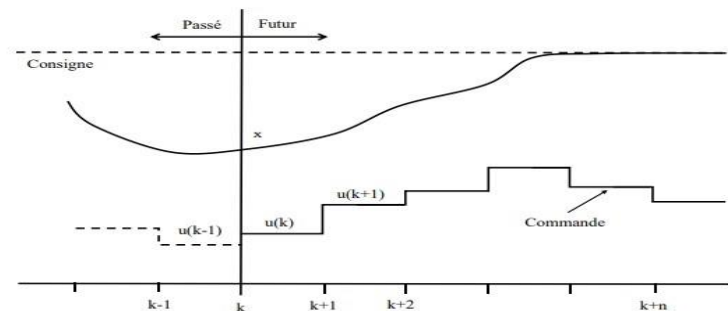


figure 12: Principe de fonctionnement d'un MPC

2.3.4 Avantages de Contrôle prédictif MPC

Le contrôle prédictif basé sur le modèle a plusieurs avantages :

- Le concept est très intuitif, facile à comprendre et à mettre en œuvre.
- Il peut être appliqué à une large variété de systèmes.
- Les systèmes multi-variables peuvent être considérés ainsi que les contraintes extérieures.

- Intégration facile de la non-linéarité dans le modèle.
- Cette méthode est appropriée pour l'incorporation des modifications et des extensions en fonction des applications particulières.

2.3.5. Contrôle prédictif basé sur le modèle pour les systèmes de puissance :

Bien que la théorie de contrôle prédictif fût développée dans les années 1970, son utilisation dans les applications des systèmes de puissance est plus récente en raison des constantes de temps rapides qui sont nécessaires dans ces systèmes. Mais les microprocesseurs plus performants sur le marché cette dernière décennie ont favorisé des créneaux recherche vers de nouveaux systèmes de contrôle, comme le MPC, autant pour les systèmes de puissance et l'entraînement électrique.

Le problème d'optimisation du MPC est résolu hors ligne en tenant compte du modèle du système, les contraintes et les objectifs à atteindre. Les résultats d'optimisation sont sauvegardés dans une table de consultation contenant la solution optimale en fonction de l'état du système. Le MPC hors ligne a été appliqué pour le contrôle de convertisseurs de puissance continu-continu, les onduleurs triphasés et pour la commande de moteurs électriques [19] , [20]] [22].

Toutefois, cette simplification ne tient pas compte de la nature discrète des convertisseurs de puissance. En incluant la nature discrète des convertisseurs de puissance, il est possible de simplifier le problème d'optimisation, ce qui permet sa mise en œuvre en ligne compte tenu du nombre fini d'états de commutation et des microprocesseurs disponibles aujourd'hui.

2.3.6 Conception du contrôle prédictif :

Dans la phase de conception du MPC pour le contrôle des convertisseurs de puissance, les étapes suivantes sont indispensables :

- La modélisation du convertisseur de puissance et l'identification de tous les états de commutation possibles et leur relation avec les tensions ou les courants d'entrée ou de sortie
- La définition d'une fonction de coût qui représente le comportement souhaité du système
- Le développement du modèle discret qui permet de prédire le comportement futur des variables à contrôler.

Pour obtenir un modèle à temps discret, il est nécessaire d'utiliser des méthodes de discrétisation. Afin d'approximer les dérivées, on utilise la méthode d'Euler, dont la dérivée d'une variable x peut être exprimée par :

$$\frac{dx}{dt} = \frac{(x(k+1)-x(k))}{T_s} \quad (2.8)$$

Où T_s est la période d'échantillonnage.

Un schéma général de MPC dédié au contrôle des systèmes de puissance et entraînements électriques est présenté à la figure 12.

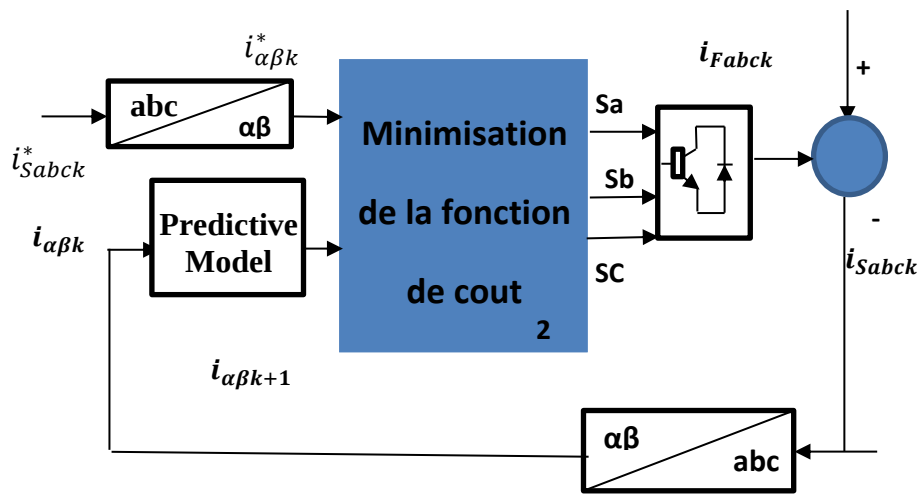


figure13 : Schéma général de la commande prédictive à états finis FS-MPC.

Le convertisseur de puissance peut avoir n'importe quelle topologie et nombre de phases, tandis que la charge représentée sur la figure peut être une machine électrique, un réseau ou de toute autre charge active ou passive. Dans ce schéma les variables mesurées $x(k)$ sont utilisées dans le modèle pour calculer les prédictions $X_{(k+1)}$ des variables commandées pour chacune des itérations possibles («), c'est-à-dire l'état de commutation, les tensions et les courants. Ces prédictions sont évaluées en utilisant une fonction de coût qui tient compte des valeurs de référence $X_{ref(k)}$ et aussi les restrictions imposées par le type du contrôle appliqué. Ainsi, l'état optimal de commutation S est sélectionné et appliquée au convertisseur de puissance.

2.3.7. Identification du nombre de commutation possibles des convertisseurs :

Lors de la modélisation du convertisseur, l'élément de base est l'interrupteur d'alimentation. Il peut être un transistor IGBT, un thyristor, un GTO ...etc. La modélisation la plus simple

considère le convertisseur comme un commutateur avec seulement deux états de commutation : fermé et ouvert.

Le nombre total d'états de commutation possibles dépend de la configuration du convertisseur. Certains états de commutation ne sont pas autorisés du tout, comme ceux conduisant à des courts-circuits des sources de tension et le circuit ouvert des sources de courant. En règle générale, le nombre d'états de commutation possible N d'un convertisseur est :

$$N = x^y \quad (2.9)$$

x étant le nombre d'états possibles de chaque bras du convertisseur, y étant le nombre de phase (ou de bras) [Flo07]. Il vient alors qu'un onduleur de tension triphasé à deux niveaux possède $2^3 = 8$

états, $3^3 = 27$, états possibles pour un onduleur triphasé à trois niveaux, $4^3=64$, états pour un onduleur quatre niveaux, $2^5 = 32$ états pour un onduleur à deux niveaux penta phase (5 phases)...

Un autre aspect du modèle du convertisseur est la relation entre les états de commutation et les niveaux de tension, En effet, chaque état de commutation produit à la sortie du convertisseur soit un vecteur tension pour les convertisseurs à sources de tension soit un vecteur courant pour les convertisseurs à sources de courant [Pat10]. La figure 11 illustre les différents vecteurs tensions générées par un onduleur de tension à 2 niveaux (VSI-2L).

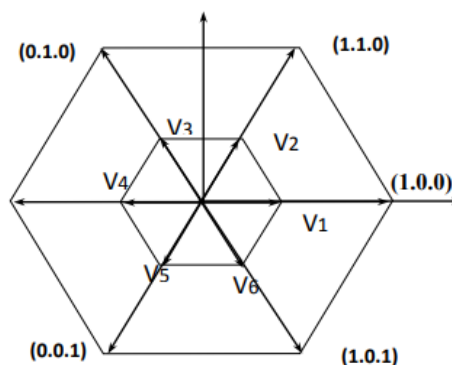


figure 14 : Relation liant les états de commutation et les vecteurs tensions de sortie pour un VSI-2L.

Le volume de calcul est directement lié au nombre d'états de commutation possibles. Dans le

Cas de trois phases et un onduleur à deux niveaux dans ce chapitre, le calcul des prédictions correspondant aux huit états de commutation possibles ne cause pas de problème, mais dans le cas d'un onduleur multi-niveaux,

2.3.8 Fonction coût multi termes

Si les principales variables contrôlées du système sont de l'ordre de deux et plus, on distingue deux options différentes pour la formulation de la fonction de coût :

- Si toutes les variables contrôlées ont la même nature ou unité, la fonction de coût résultante sera la somme de leurs erreurs entre leurs valeurs prédites et leurs valeurs de référence :
-

$$F = |x_a^*(k+1) - x_a(k+1)| + |x_b^*(k+1) - x_b(k+1)| \quad (2.10)$$

Ou bien sous la forme :

$$F = (x_a^*(k+1) - x_a(k+1))^2 + (x_b^*(k+1) - x_b(k+1))^2 \quad (2.11)$$

Ou bien sous la forme :

$$F = (x_a^*(k+1) - x_a(k+1))^2 + (x_b^*(k+1) - x_b(k+1))^2 + (x_c^*(k+1) - x_c(k+1))^2 \quad (2.12)$$

2.3.9 Structure de l'Algorithme de commande

Le principe de la commande prédictive peut être résumé par les étapes suivantes :

- Mesurer les variables à l'instant k
- Les mesures précédentes seront utilisées leur prédiction à l'instant (k+1).
- Formulation d'une fonction de cout à minimiser en fonction des grandeurs de commande souhaitées
- Pour chaque période d'échantillonnage, la fonction cout est évaluée pour les vecteurs des tensions différents de l'onduleur.
- l'état de commutation optimale S_{opt} minimisant la fonction de cout sera choisi pour que le vecteur de tension qui lui correspond V_{opt} puisse être appliqué durant la période d'échantillonnage suivante.

- Toutes les étapes citées ci-dessus sont répétées à chaque période d'échantillonnage pour les nouvelles références et mesures. [23]

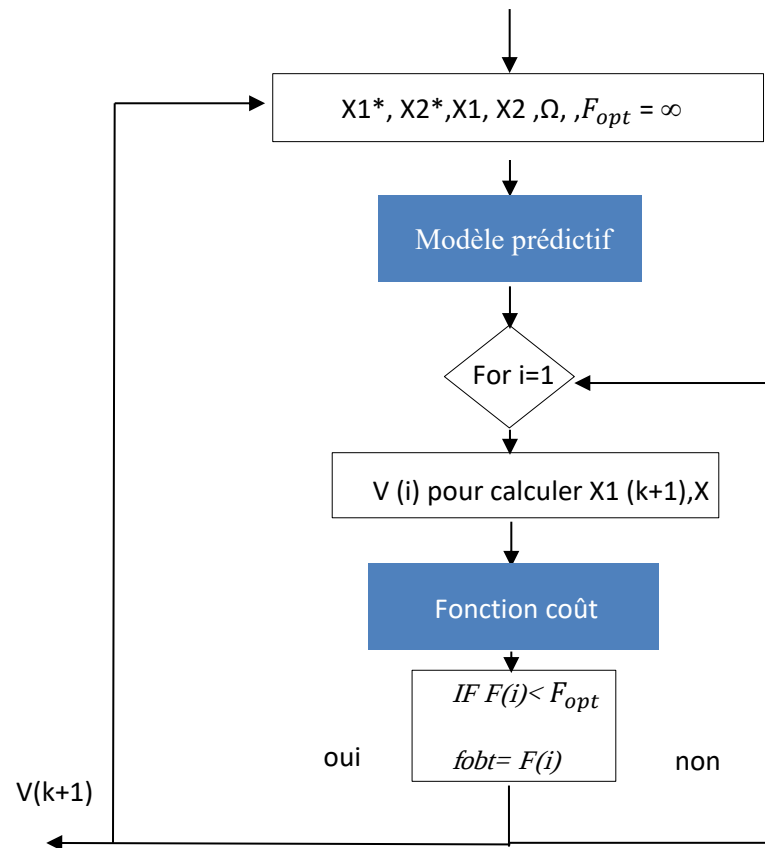


figure 15 :Algorithme de la commande MPC

2.5. Modèle de convertisseur :

Le schéma de principe du système PV connecté au réseau avec un onduleur à deux niveaux, qu'on le note dans cette thèse par 2L-VSI (2 Level Voltage Source Inverter), soumis à une commande MPC est représenté à la figure 15. (22)

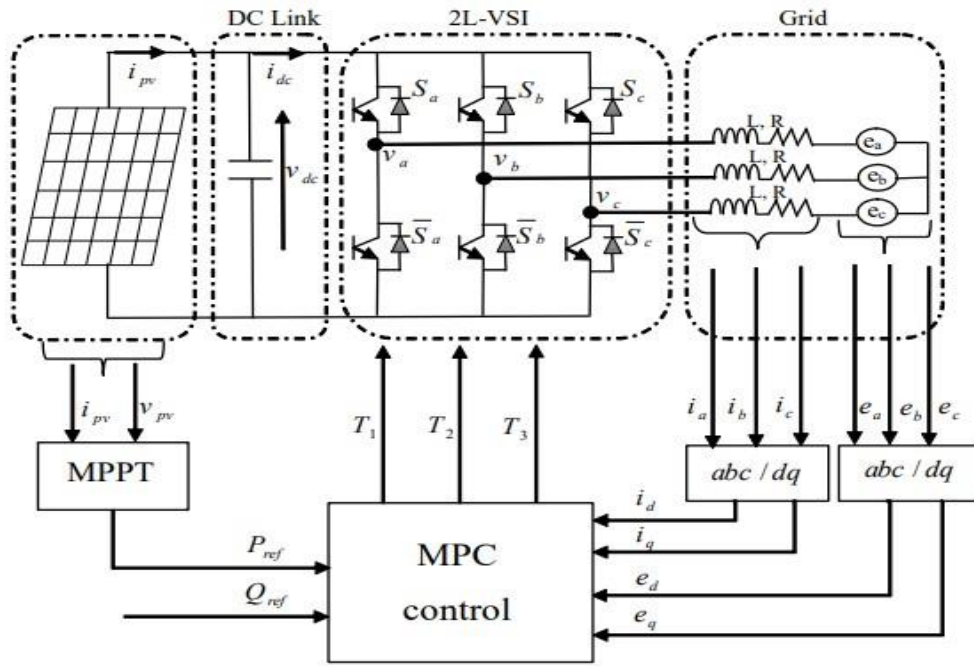


figure 16: Schéma fonctionnel du système PV connecté au réseau avec un onduleur à deux niveaux

2.5.1 Modèle de la charge :

En référence à la figure 2.2, le côté AC de l'onduleur est caractérisé par les équations différentielles suivantes :

$$\begin{aligned} \frac{di_a}{dt} &= -\frac{R}{L} i_a + \frac{1}{L} V_{AN} - \frac{1}{L} e_a N \\ \frac{di_b}{dt} &= -\frac{R}{L} i_b + \frac{1}{L} V_{BN} - \frac{1}{L} e_b N \\ \frac{di_c}{dt} &= -\frac{R}{L} i_c + \frac{1}{L} V_{CN} - \frac{1}{L} e_c N \end{aligned} \quad (2.14)$$

D'autre part, le côté AC de l'onduleur est caractérisé par les équations suivantes :

$$C \frac{dv_{dc}}{dt} = i_{PV} - i_{dc} = i_{PV} - \frac{e_d i_d + e_q i_q}{V_{dc}} \quad (2.15)$$

Où e_d , e_q et i_d , i_q sont les composants des tensions et des courants de réseau dans le plan d-q, respectivement.

2.6 Dimensionnement du condensateur de bus continu :

Premièrement, la tension du bus continu doit être régulée à une valeur souhaitée supérieure à la tension de crête du réseau pour assurer le transfert de la puissance PV produite dans le réseau, la référence est estimée comme suit :

$$V_{cc}^* = \mu \sqrt{3} V_m V_m \quad (2.16)$$

Où : $\mu > 1$

Ensuite, le condensateur du bus continu peut être dimensionné selon l'équation suivante [24-25]

$$C_{cc} = \frac{P_{PV}}{2 \cdot \omega \cdot V_{cc}^* \cdot \Delta_V} \quad (2.17)$$

Où:

Δ_V : est l'amplitude de l'ondulation de tension, alors égale à 10% de la tension de crête du réseau (V_m)

P_{pv} : est la puissance nominale des modules PV,

ω : est la fréquence de rotation de l'onde sinusoïdale générée,

V_{cc}^* : est la tension moyenne aux bornes du condensateur.

2.8 Modèle de l'onduleur triphasé à deux niveaux :

L'onduleur photovoltaïque est l'élément clé des systèmes PV connecté au réseau. Son rôle principal est de convertir la puissance photovoltaïque produite de la forme CC en une forme CA synchronisée au réseau et de contrôler le flux de puissance entre le convertisseur élévateur CC-CC et le réseau en contrôlant le courant injecté dans le réseau. Selon la configuration de la centrale photovoltaïque, il existe certaines topologies et catégories d'onduleurs ; un onduleur de source de tension à deux niveaux (VSI) en fait partie. Où, six commutateurs sont utilisés dans le circuit principal, chacun composé traditionnellement d'un transistor bipolaire à grille isolée (IGBT) et

d'une diode à roue libre pour fournir un flux de courant bidirectionnel et une capacité de blocage de tension unidirectionnelle, comme le montre la Figure 16. Pour éviter le court-circuit du bus continu ; les deux interrupteurs d'un même segment doivent être tournés dans un mode complémentaire [23- 26].

L'onduleur a huit états de commutation indiqués dans le Tableau 2.2, deux de ces états de commutation fournissent une tension de ligne CA nulle à la sortie. Dans ce cas, le courant alternatif circule en roue libre à travers les composants supérieurs ou inférieurs. Les autres états ne fournissent aucune tension de ligne de sortie CA nulle. Afin de générer une forme d'onde de tension donnée, l'onduleur passe d'un état à un autre. Ainsi, les tensions de ligne de sortie CA résultantes sont constituées de valeurs discrètes de tensions, qui sont " $-v_{cc}$ ", " 0 " et " v_{cc} " [26]

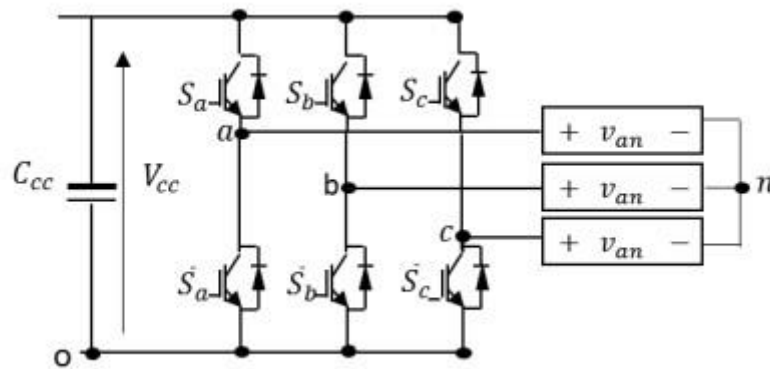


figure 17 : Schéma de l'onduleur triphasé en pont à deux niveaux.

Sa	Sb	Sc	V_{ab}	V_{bc}	V_{ca}
0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	$-V_{cc}$	V_{cc}
0	1	0	$-V_{cc}$	V_{cc}	0
0	1	1	$-V_{cc}$	0	V_{cc}
1	0	0	V_{cc}	0	$-V_{cc}$
1	0	1	V_{cc}	$-V_{cc}$	0
1	1	0	0	V_{cc}	$-V_{cc}$
1	1	1	0	0	0

Tableau2 .1 : Les états de commutation dans un onduleur triphasé

En supposant que les interrupteurs et les diodes sont idéaux, les tensions composites (V_{ab} , V_{bc} , V_{ca}) sont obtenues à partir de ces relations :

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{ao} - V_{bo} \\ V_{bc} = V_{bo} - V_{co} \\ V_{ca} = V_{co} - V_{ao} \end{cases} \quad (2.18)$$

Où: V_{ao} , V_{bo} , V_{co} sont les tensions phase-neutre de l'onduleur. Le point "O" est pris comme référence pour ces dernières tensions.

Les trois tensions à l'entrée continue sont données par les relations suivantes :

$$\begin{cases} V_{an} = V_{ao} - V_{no} \\ V_{bn} = V_{bo} - V_{no} \\ V_{cn} = V_{co} - V_{no} \end{cases} \quad (2.19)$$

Où : V_{an} , V_{bn} , V_{cn} sont les tensions de sortie de l'onduleur (tensions de phase) et V_{no} est la tension neutre de la charge liée au point "O."

Comme nous avons affaire à des tensions équilibrées, ce qui signifie :

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad (2.20)$$

En remplaçant l'équation (2.20) par l'équation (2.19), nous obtenons :

$$V_{no} = \frac{1}{3} (V_{ao} + V_{bo} + V_{co}) \quad (2.21)$$

En remplaçant ensuite l'équation (2.19) par l'équation (2.21), nous obtenons :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{1}{3} (2V_{ao} - V_{bo} - V_{co}) \\ V_{bn} = \frac{1}{3} (2V_{bo} - V_{co} - V_{ao}) \\ V_{cn} = \frac{1}{3} (2V_{co} - V_{ao} - V_{bo}) \end{cases} \quad (2.22)$$

Les tensions de sortie de l'onduleur peuvent être exprimées en termes de tension du bus continu et d'états de commutation comme suit (27)

$$\begin{cases} V_{ao} = S_a V_{cc} \\ V_{bo} = S_b V_{cc} \\ V_{co} = S_c V_{cc} \end{cases} \quad (2.23)$$

En remplaçant l'équation précédente par l'équation (2.22), l'équation (2.23) devient,

$$\begin{pmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{pmatrix} = \frac{V_{cc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

2.9 Modélisation du filtre coté réseau :

L'onduleur ne peut pas être directement couplé au réseau, car l'onduleur est basé sur des dispositifs de commutation et des signaux de déclenchement sous forme d'impulsions doivent être fournis pour les commutateurs, ce qui a entraîné une perturbation harmonique importante du courant de sortie qui dégrade la qualité de l'énergie. Pour cette raison, dans cette conception, la connexion de l'onduleur au réseau se fait à travers un filtre LR de premier ordre afin de réduire les harmoniques présentes dans le courant comme le montre la Figure 17, de respecter l'alternance des sources et de prévenir les composants, de sorte qu'il soit dans les limites fixées par les normes en vigueur pour le raccordement au réseau du système PV [28]

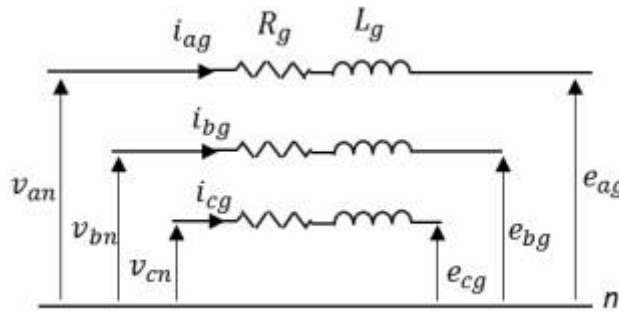


figure 18: Représentation du filtre RL.

En appliquant la loi de tension de Kirchhoff (KVL), à chaque phase au point de connexion du filtre, les équations qui relient les tensions modulées par le convertisseur et les courants traversant le filtre sont :

$$\begin{cases} V_{an} = R_g \cdot i_{ag} + L_g \frac{dia_g}{dt} + e_{ag} \\ V_{bn} = R_g \cdot i_{bg} + L_g \frac{dib_g}{dt} + e_{bg} \\ V_{cn} = R_g \cdot i_{cg} + L_g \frac{dic_g}{dt} + e_{cg} \end{cases} \quad (2.25)$$

D'où ;

$$\begin{cases} \frac{dia_g}{dt} = \frac{1}{L_g} (V_{an} - R_g \cdot i_{ag} - e_{ag}) \\ \frac{dib_g}{dt} = \frac{1}{L_g} (V_{bn} - R_g \cdot i_{bg} - e_{bg}) \\ \frac{dic_g}{dt} = \frac{1}{L_g} (V_{cn} - R_g \cdot i_{cg} - e_{cg}) \end{cases} \quad (2.26)$$

Pour calculer les valeurs de l'inductance « L_g », étant donné que tous les calculs sont effectués pour une seule phase, l'inductance côté onduleur est estimée comme suit [28]

$$L_g = \frac{\sqrt{3} \cdot m \cdot V_{cc}}{12 \cdot h \cdot f_s \cdot \Delta_i L_g} \quad (2.27)$$

Ensuite, " $\Delta_i L_g$ " désigne un courant d'ondulation de 5% du courant nominal.

Où ;

L_g : est l'inductance du filtre (mH),

R_g : est la résistance interne du filtre (Ω),

f_s : est la fréquence de commutation de l'onduleur (Hz)

V_c : est la tension du bus continu souhaitée (V),

h : est le facteur de surcharge, dont la valeur est égale à 1.2 ,

m : est les indices de modulation choisis entre [0.5 - 1].

2.10 Modélisation du réseau électrique:

Dans tout système électrique, les charges sont les éléments qui consomment de l'énergie électrique. Ensuite, la consommation de cette puissance électrique dépend des caractéristiques de la charge. Une modélisation correcte de ces caractéristiques est essentielle pour représenter

finement le comportement de la charge connectée à l'onduleur. Dans notre travail, le réseau électrique est considéré comme une charge et un modèle mathématique de source de tension triphasée peut être exprimé par les équations suivantes [29]

$$\begin{cases} e_a = \sqrt{2}E\sin(\omega t) \\ e_b = \sqrt{2}E\sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ e_c = \sqrt{2}E\sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (2.28)$$

Où:

E : est la valeur maximale de la tension de crête du réseau (V).

w : est la pulsation du réseau(rad/s).

2.11 Modèle sous Matlab Simulink :

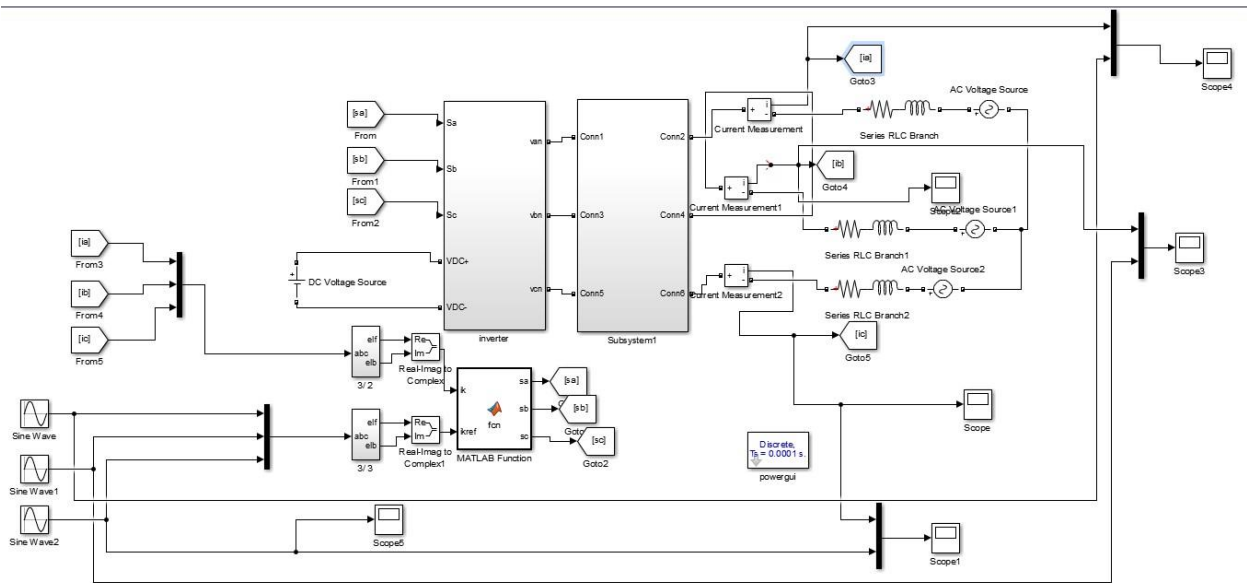


figure 19: Modèle sous Matlb Simulink de la commande FS-MPC association d'un onduleur à deux niveaux au réseau électrique

2.12 Résultats de simulation :

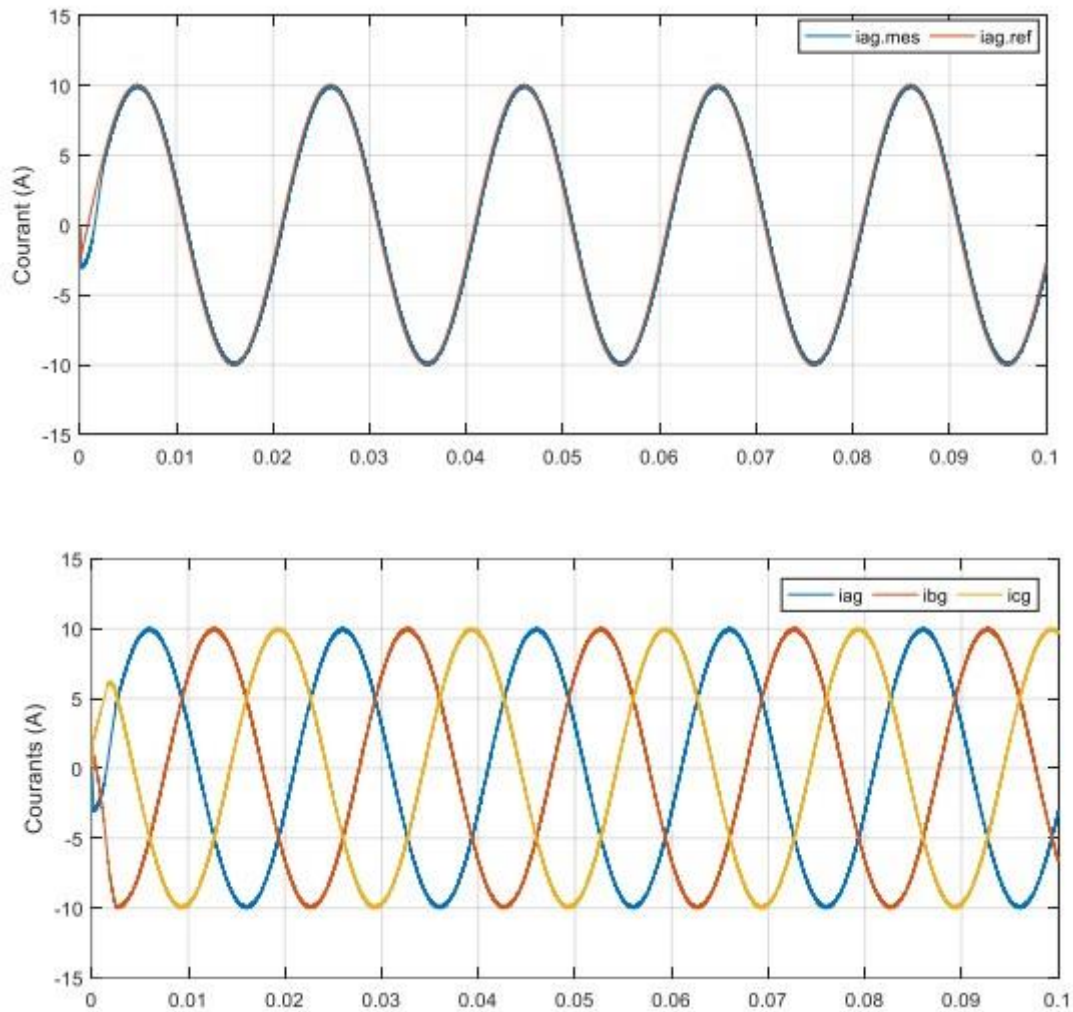


figure 20: résultats de simulation des courants de la commande FS-MPC association d'un onduleur à deux niveaux au réseau électrique

Les résultats obtenus d'après les figures (19) montrent ce qui suit :

- ✓ meilleure poursuite de leurs références
- ✓ Faibles oscillations sur les courants
- ✓ Les deux composantes du courant du stator (i_{sa} , i_{sb} , i_{sc}) apparaissent sinusoïdales et décalées de $2\pi/3$.

2.12 /Conclusion :

Dans ce chapitre, les différents composants d'un système photovoltaïque connecté au réseau sont modélisés. Tout d'abord, un modèle de la cellule photovoltaïque, du module et du panneau est donné. Ensuite, les transducteurs utilisés sont présentés pour illustrer leurs circuits électriques et leurs modèles mathématiques, Ensuite, nous avons parlé en détail du contrôle prédictif (MPC), et Enfin le réseau électrique et le filtre RL sont modélisés afin de simplifier la commande d'injection de courant.

Chapitre 03

APPLICATION DE LA COMMANDE PREDICTIVE AU SYSTEME PV

INTERCONNECTE AU RESEAU

3.1 Introduction :

Le photovoltaïque a trouvé son utilité dans des applications à petites échelles et pour des systèmes de transmissions isolés. L'énergie photovoltaïque est une source d'énergie intéressante. Elle est renouvelable, inépuisable et non polluante. Pour qu'elle soit utilisée sur une large plage d'applications et pour satisfaire les contraintes du coût, le système devrait présenter une bonne exploitation des cellules photovoltaïques. Pour cela, il faut extraire le maximum de puissance du générateur PV.

La conception de systèmes photovoltaïques optimisés est par nature difficile. En effet, côté source, pour un générateur photovoltaïque, la production de puissance varie fortement en fonction de l'éclairement, de la température, mais aussi du vieillissement global du système.

Ces variables influençant le comportement du système présentent des fluctuations quotidiennes et saisonnières. Pour ces raisons, le panneau photovoltaïque ne peut fournir une puissance maximale que pour une tension particulière et un courant bien déterminé ; ce fonctionnement à puissance maximale dépend de la charge à ses bornes, que ce soit de nature continue, ou bien alternative.

Pour que le générateur fonctionne le plus souvent possible dans son régime optimal, la solution communément adoptée est alors d'introduire un convertisseur statique qui jouera le rôle d'adaptateur source-charge. Pour des conditions données, c'est au point de puissance maximale de la caractéristique puissance en fonction de la tension que l'on exploite au mieux la puissance crête installée. Ces points correspondent donc au point de puissance optimale, terme traduisant le caractère relatif aux conditions d'éclairement et de température de la puissance fournie [30].

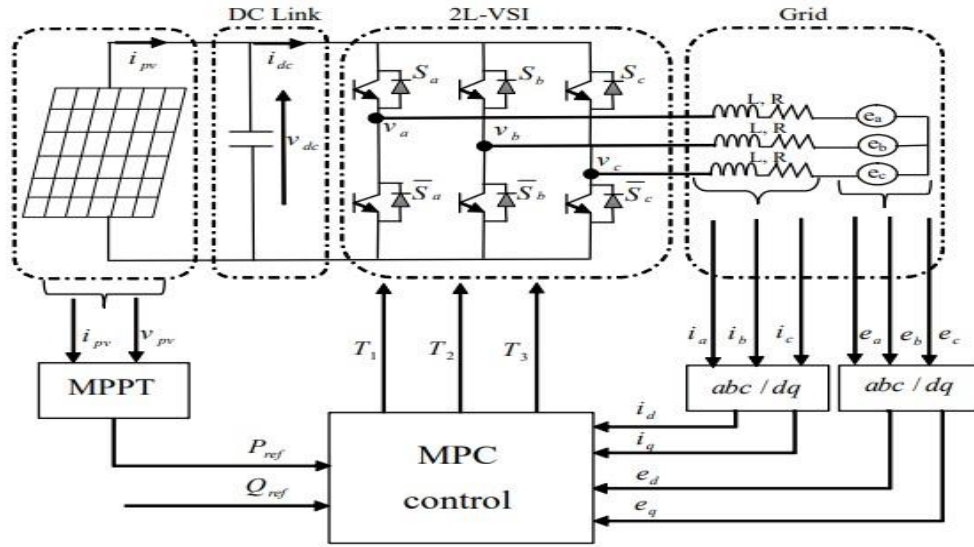


figure 21 : le schéma général photovoltaïque interconnecté au réseau électrique

3.2 Modèle du module PV:

Le modèle cité précédemment concerne une seule cellule PV, pour le modèle du module il faut intégrer le nombre de cellules en parallèle/série, formant un module. Donc le courant du module photovoltaïque est donné par l'équation (3.1) [31]

$$I_{PV} = N_P \left[I_{CC} \left(1 - e^{-\frac{\frac{I_{PV}}{N_S} V_{oc} + R_S \frac{I_{PV}}{N_P}}{nV_{th}}} \right) \right] \quad (3.1)$$

Où :

I_{PV} : est le courant de sortie du module (A).

V_{PV} : est la tension de sortie du module (V).

N_S : est le nombre des cellules connectées en série par module.

N_P : est le nombre des cellules connectées en parallèle par module.

Dans ce travail, les unités solaires ont été sélectionnées selon les caractéristiques suivantes

Voltage at, M_{pp} V_{mp} (V_{pv})	160v
Power at M_{pp} P_{mp} (P_{pv})	1100w
Current at M_{pp} , $I_{mp}=P_{mp}/V_{mp}$	7A
No. of series connected module, $N_{ser}=V_{mp}/V_{mpp}$	9
No. of parallel connected module, $N_{par}=I_{mp}/I_{mpp}$	12
Open circuit voltage V_{co}	21.6
Short circuit voltage, I_{sca}	0.64
Voltage at maximum power point (M_{PP}) , V_{mpp}	17.6
Current at maximum power point (M_{PP}) , I_{mpp}	0.58

Tableau 3.1 Caractéristiques Principales du Module pv

3.3 Modèle du panneau PV

Un panneau photovoltaïque est constitué d'un certain nombre de modules photovoltaïques connectés en série/parallèle pour obtenir la tension, le courant et la puissance désirés. La taille d'un panneau varie d'un seul module à un nombre quelconque de modules. Le courant et la tension de sortie du panneau photovoltaïque peuvent être calculée à partir les équations suivantes [32]

$$I_{p_{vt}} = N_{PP} I_{p_v} \quad (3.2)$$

$$V_{p_{vt}} = N_{SS} V_{p_v} \quad (3.3)$$

Où :

$I_{p_{vt}}$: est le courant de sortie du panneau (A).

$V_{p_{vt}}$: est la tension de sortie du panneau (V).

I_{p_v} : est le courant de sortie du module (A).

V_{p_v} : est la tension de sortie du module (V).

N_{SS} : est le nombre des modules connectés en série par panneau.

N_{PP} : est le nombre des modules connectés en parallèle par panneau.

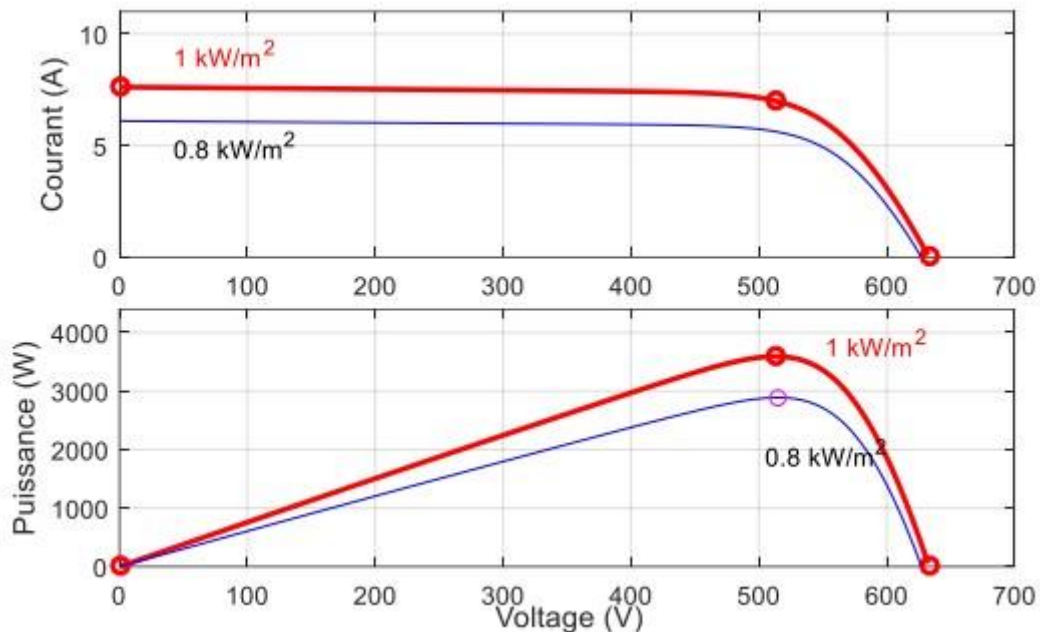


figure 22 : Caractéristiques (I-V) et (P-V) d'un panneau PV sous différents niveaux d'irradiation à 25°C.

3.4 Les algorithmes de recherche du point de puissance maximale (MPPT) :

La commande MPPT, (Maximum Power Point Tracking), est une commande essentielle pour un fonctionnement optimal du système photovoltaïque. Le principe de cette commande est basé sur la variation automatique du rapport cyclique α en l'amenant à la valeur optimale de manière à maximiser la puissance délivrée par le panneau PV. Pour cette raison, on va présenter les algorithmes de commande les plus populaires. [33]

3.4.1 Algorithme Perturber et observer (P&O) :

Le principe de cet algorithme est basé sur la connaissance de la valeur de la conductance $G = I/V$ et sur l'incrément de la conductance (dG) pour en déduire la position du point de fonctionnement par rapport au point de puissance maximale, (MPP). Si l'incrément de conductance (dG) est supérieur à l'opposé de la conductance ($-G$), on diminue le rapport cyclique. Par contre, si l'incrément de conductance est inférieur à l'opposé de la conductance, on augmente le rapport cyclique. Ce processus est répété jusqu'à atteindre le point de puissance maximale, (MPP) [34], comme elle représentée dans l'organigramme de figure 22

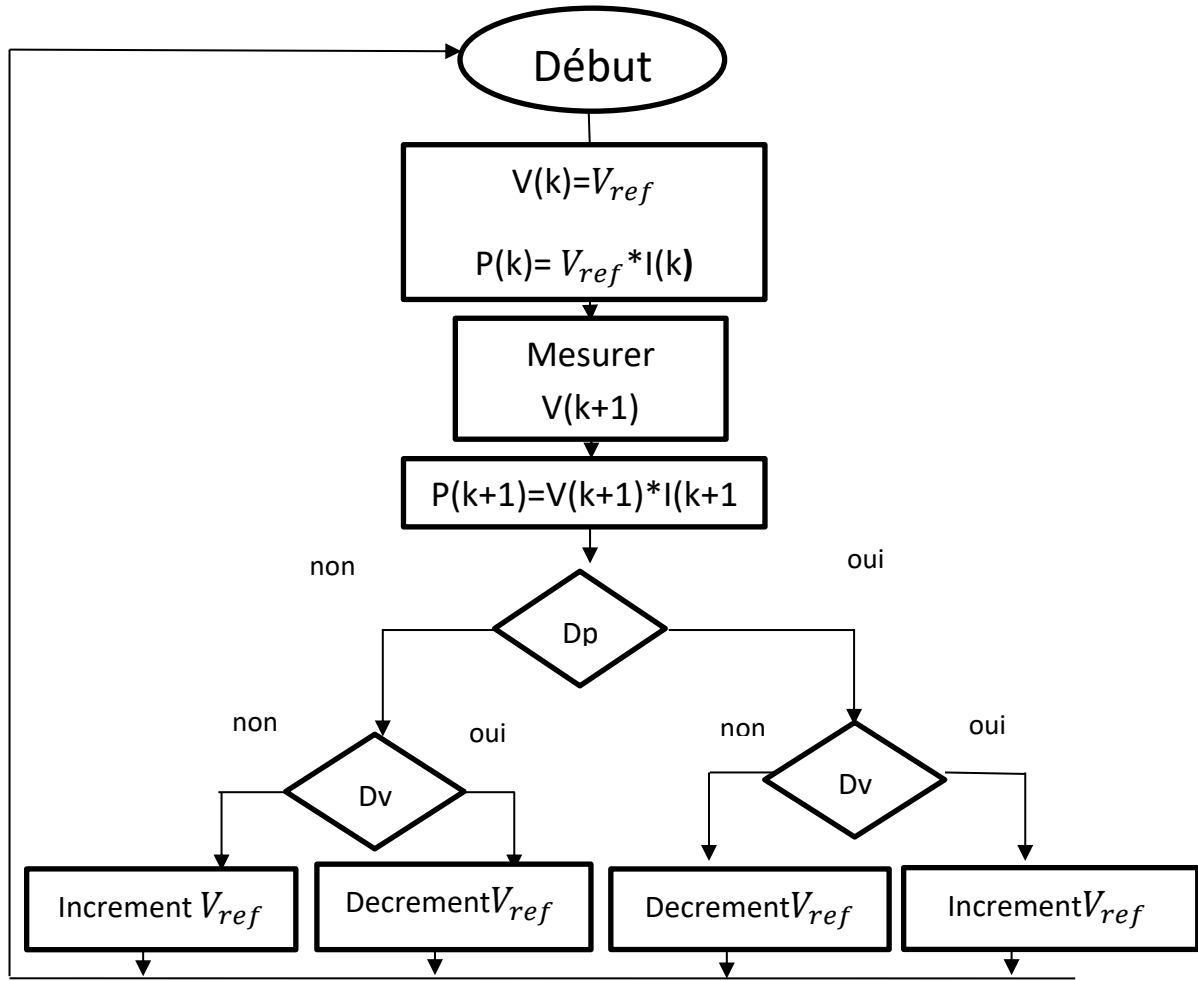


figure 23 : organigrammes de P&O

3.5 Implémentation de la commande :

Le modèle discret sera utilisé pour prédire la valeur future (K + 1) du courant de charge à partir des tensions et des courants mesurés à l'instant K. Pour cela, on utilise l'approximation d'Euler pour un temps d'échantillonnage T_s :

$$\frac{di_l}{dt} = \frac{1}{T_s} (i_l(k+1) - i_l(k)), l = a, b, c \quad (3.4)$$

Alors, les courants du réseau peuvent être exprimés comme suit :

$$i_l(k+1) = \left(1 - \frac{R_{TS}}{L}\right) i_l(k) + \frac{T_s}{L} (V_l - e_l), l = a, b, c \quad (3.5)$$

Ainsi, la prédiction des courants dans le plan d-q est écrite par l'équation suivante :

$$i_l(k+1) = i_{ld}(k+1) + ji_{lq}(k+1), l = a, b, c \quad (3.6)$$

Par conséquent,

$$i_d(k+1) = \left(1 - \frac{R_{TS}}{L}\right) i_d(k) + \frac{T_s}{L} (V_d - e_d) \quad (3.7)$$

$$i_q(k+1) = \left(1 - \frac{R_{TS}}{L}\right) i_q(k) + \frac{T_s}{L} (V_q - e_q) \quad (3.8)$$

D'autre part, les expressions des puissances dans le plan (d – q) sont données par

$$\begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_d & e_q \\ e_q & -e_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Par suite, la puissance prédite pour chaque vecteur d'état est :

$$P(k+1) = e_d i_d(k+1) + e_q i_q(k+1) \quad (3.10)$$

$$Q(k+1) = e_q i_d(k+1) - e_d i_q(k+1) \quad (3.11)$$

La détermination de la fonction de coût joue un rôle important dans le comportement du MPC, dans notre cas la fonction de coût J à optimiser, en utilisant la puissance active et réactive sur l'horizon de prédiction est donnée par :

$$J = |P_{ref}(k+1) - P(k+1)| + |Q_{ref}(k+1) - Q(k+1)|, \quad (3.12)$$

Où :

P_{ref} et Q_{ref} sont les valeurs de référence correspondantes aux puissances actives et réactives, respectivement.

En outre, puisque la technique MPC fournit la capacité de prédire le comportement du système pour une période future de n instants d'échantillonnage en obtenant les actions de contrôle nécessaires à l'instant actuel, nous utilisons deux étapes de prédiction future [35] :

$$i_d(k+2) = \left(1 - \frac{R_{TS}}{L}\right) i_d(k+1) + \frac{T_s}{L} (V_d - e_d) \quad (3.13)$$

$$i_q(k+2) = \left(1 - \frac{R_{TS}}{L}\right) i_q(k+1) + \frac{T_s}{L} (V_q - e_q) \quad (3.14)$$

Dans ce cas, les puissances actives et réactives sont prédites par :

$$P(k + 2) = e_d i_d(k+2) + e_d i_q(k+2) \quad (3.15)$$

$$Q(k + 2) = e_d i_d(k + 2) - e_d i_q(k + 2) \quad (3.16)$$

Et la fonction de coût est donnée par :

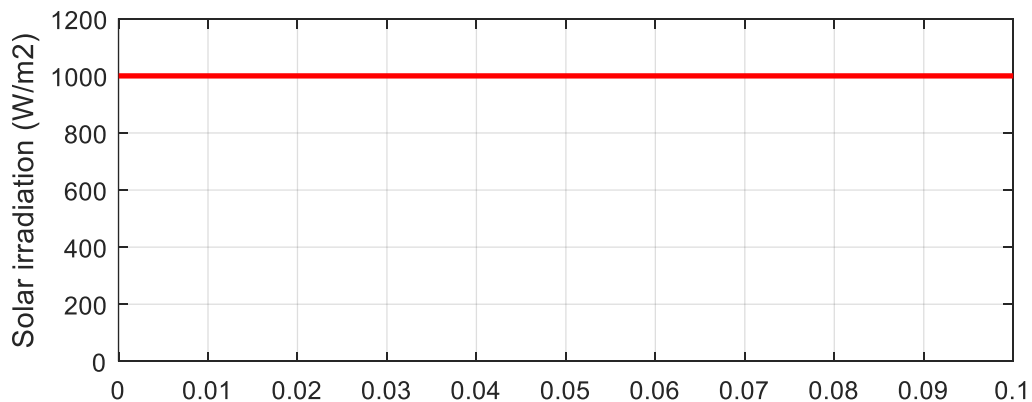
$$g = |Pref(k + 2) - P(k + 2)| + |Qref(k + 2) - Q(k + 2)| \quad (3.17)$$

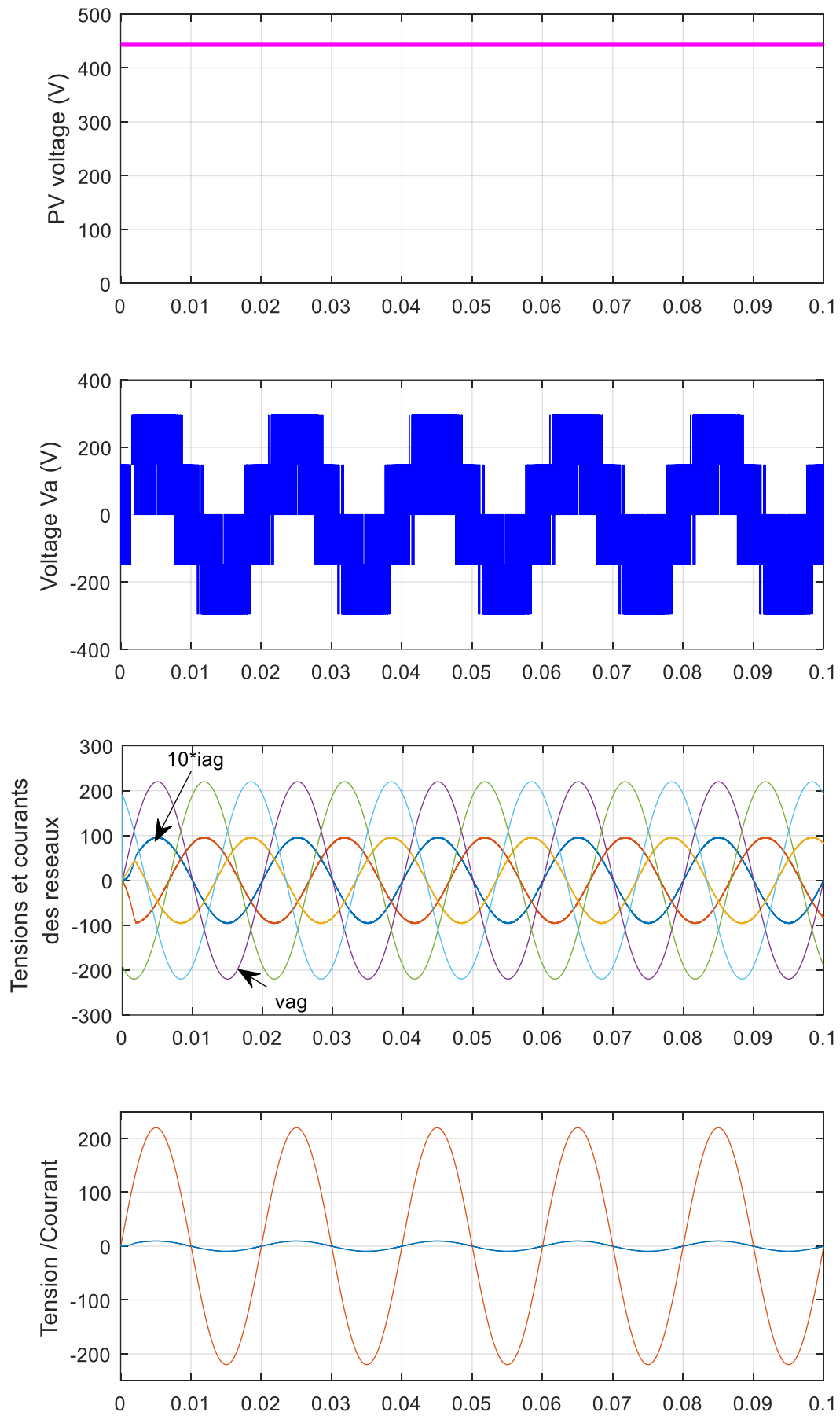
Avec : J est la fonction de coût à l'instant (k + 1) défini par Eq. (3.12).

Cette proposition de la prévision est prévue pour améliorer l'e-efficacité du système PV connecté au réseau soumis à des variations des conditions climatiques telles que le niveau d'irradiation solaire et la valeur de la température du module PV.

3.6. Résultats de simulation

Pour tester l'efficacité des algorithmes proposés, une simulation numérique du système présenté dans la Figure 22 développée et implémentée dans le logiciel MATLAB/Simulink® software. Le générateur photovoltaïque choisi est un module où les paramètres de ce module sont donnés dans Tableau 3.1 et ses courbes courant-tension et puissance-tension sont représentées sur la Figure 23. La simulation ce ra fait dans les conditions standard des tests (T=25°, G=1000W/m) :





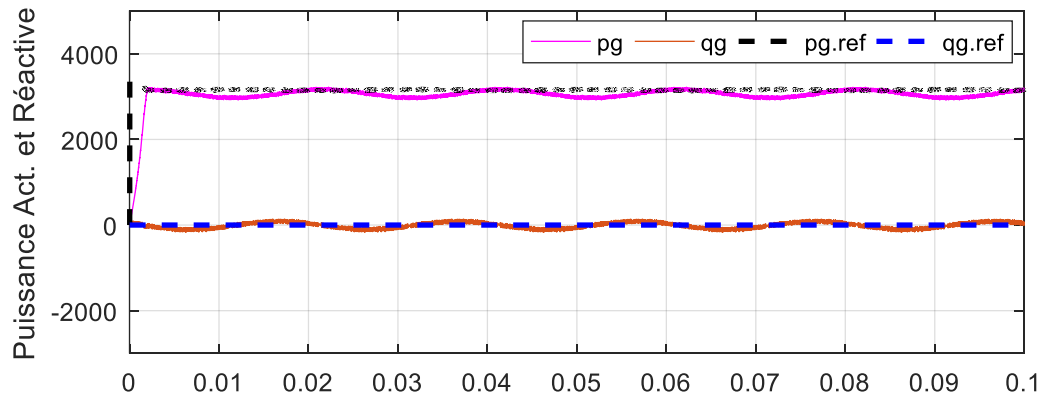


figure 24 : Résultats de simulation du système dans les conditions des tests ($q.ref=0w$, $G=1000W/m$)

Afin de simuler l'effet de variation d'irradiation ou variation de puissance réactive , un profil est introduit comme variation d'irradiation G . Le temps de décroissance de l'irradiation est établi à 0.033s, le changement d'irradiation varie entre 1000 et 800 W/m², la température est posée constante (25°C) dans tous les tests de simulation.

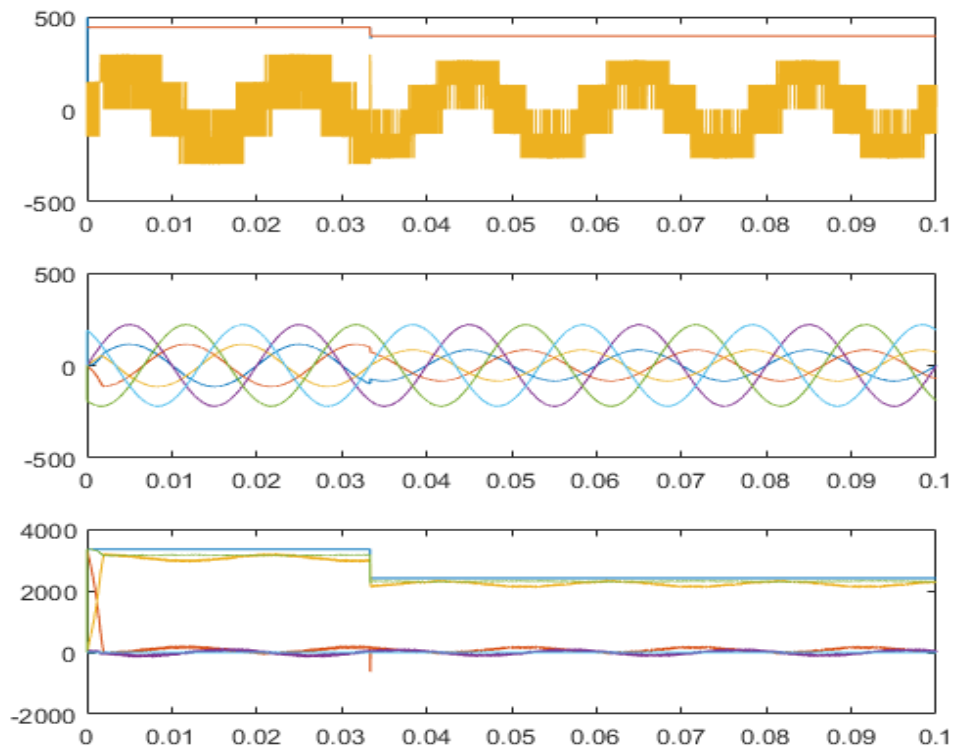


figure 25: Résultats de simulation du système dans les conditions des test
($q.ref=0w, G=1000/800 w/m$)

A partir de ces résultats, on note que le point de puissance maximale est atteint rapidement avec précision et une réponse transitoire lisse. Le courant injecté dans le réseau est sinusoïdal et en phase avec la tension du réseau si la puissance réactive de la référence est nulle, ce qui explique l'injection unique de la puissance active. Les variables contrôlées convergent asymptotiques vers les valeurs de référence. On constate aussi que les variables d'état estimées par l'observateur ont une bonne convergence vers les variables d'état réelles du système.

3-7 /Conclusion :

Dans ce chapitre, un modèle de cellule pour le module et le panneau photovoltaïque est présenté et les caractéristiques (I-V) et (P-V) sont extraites, nous définissons les algorithmes pour rechercher le point de puissance maximale (MPPT) et enfin extraire les résultats simulés. La commande prédictive appliquée à système PV connecté au réseau soumis à des variations des conditions climatiques telles que le niveau d'irradiation solaire, C'est une technique de commande complètement différente des autres techniques de modulation et donne de très bonnes performances.

CONCLUSION GÉNÉRAL

Dans ce travail nous avons fait l'étude des systèmes photovoltaïques qui se compose essentiellement d'un générateur pv (GPV), convertisseur (DC/DC boost), la commande (mppt) et une charge.

Dans notre travail nous avons présenté les systèmes photovoltaïques en se basant particulièrement au système photovoltaïque raccordés au réseau qui est constitué essentiellement d'un générateur photovoltaïque (GPV) et un convertisseur commandé. On a simulé ce système sous Matlab/Simulink, on a pris en compte l'influence de variation des conditions climatiques (l'éclairement) sur le MPPT où la puissance de fonctionnement du système est maximale. La commande MPPT permet la meilleure connexion entre le générateur photovoltaïque (GPV) et la charge et elle le force de fonctionner toujours au point de puissance maximale.

Le système qu'il se compose d'une charge triphasée équilibré sur les trois phases avec un générateur PV commander par la topologie le Filtre actif constitué d'un onduleur triphasé à trois bras relié avec les réseaux. La commande prédictive appliquée à système PV connecté au réseau soumis à des variations des conditions climatiques telles que le niveau d'irradiation solaire, C'est une technique de commande complètement différente des autres techniques de modulation et donne de très bonnes performances, C'est une commande dynamique, très flexible.

RÉFÉRENCES

- [1] SAID Islam , TICHABET Abdelhadi " Commande et modélisation de l'énergie photovoltaïque interconnecté au réseau électrique ", Mémoire Présenté pour obtenir LE DIPLOME DE MASTER, Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj , Soutenu le : 12./09./2021
- [2]- Badis LEKOUAHET, " Elaboration de nouvelles Approches pour la communication à base des systèmes électriques intelligents. Doctorat LMD en : Electronique Université Mohammed Seddik Benyahia -Jijel-
- [3]- S. Petibon, _Nouvelles architectures distribuées de gestion et conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques,_ Ph.D. dissertation, Universit é Paul Sabatier-Toulouse III, 2009.
- [4]- Abdellatif MAHAMMEDI " Contribution à la Commande d'un Convertisseur de Puissance aux Topologies Améliorées Associé à un Générateur Photovoltaïque Basée sur les Techniques Avancées" Towards the graduation of the Doctor of Sciences Degree: Automatic Applied and Industrial Diagnostics Specialty: Automatic , Publicly supported, on 01/ 07/ 2020
- [5]- C. Voyant, Prédiction de séries temporelles de rayonnement solaire global et de production d'énergie photovoltaïque à partir de réseaux de neurones articiels,Ph.D. dissertation, Université Pascal Paoli, 2011..
- [6]- Website: <https://www.ecosources.org/types-de-cellules-photovoltaïques>
- [7] Mohammed Telidjane , "Modélisation des panneaux photovoltaïques et adaptation de la cyclostationarité pour le diagnostic " , THESE OF THE UNIVERSITY OF LYON Publicly supported on 13/07/2017
- [8]- V. L. Brano, A. Orioli, and G. Ciulla, _On the experimental validation of an improved _ve-parameter model for silicon photovoltaic modules,_ Solar Energy Materials and Solar Cells, vol. 105, pp. 27_39, oct 2012.
- [9] W.Achim, Design issues of photovoltaic systems and their grid integration»,(Decembrer2003)
- [10] - Imane BENCHABANE "Elaboration de nouvelles approches pour la commande des systèmes électriques intelligents " Thesis submitted for award LMD Doctorate in: Electronics Option: Electronics and Systems Analysis

RÉFÉRENCES

- [11] - Nedjma Aouchiche" Conception d'une commande MPPT optimale à base d'intelligence artificielle d'un système photovoltaïque." University of Burgundy Franche-Comté, 2020 France
- [12] - Schimpf, F. et Norum, L. E. (2008). Grid Connected Converters for Photovoltaic, State of the Art, Ideas for Improvement of Transformerless Inverters. In Proceedings of Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics, page 6
- [13] OKBAOUI Sidiali & CHAIN Moncef (R'éalisation et commande d'un onduleur triphasé `a deux niveaux
- [14] D. Lalili, Mli vectorielle et commande non linéaire du bus continu des onduleurs multiniveaux. Ph.D. dissertation, Ecole Nationale Supérieure Polytechnique, 2009.
- [15] De Leone, R., Pietrini, M., Giovannelli, A., 2015. Photovoltaic energy production forecast using support vector regression. in: Neural Comput. Appl. vol. 26,issue 8, pp. 1955–1962.
- [16] HADJI Slimane, 2018. Optimisation de la conversion énergétique pour les systèmes à énergie Photovoltaïque. Thèse doctorat, Université de Sétif 1
- [17] Chikha Said " Contribution à l'optimisation de la commande prédictive des convertisseurs statiques intégrés dans les chaines de conversion d'énergie eolienne" Thèse présentée en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat en sciences , Université Larbi Ben M'hidi-Oum El Bouaghi , le 03/07/2017
- [18] Kennel, R., & Schöder, D. (1983). A Predictive Control Strategy for Converters. In Third IP AC Symposium, 415- 422
- [19] Kennel, R., Rodriguez, J., Espinoza, J., & Trincado, M. (1984). High Performance Speed Control Methods for Electrical Machines: An Assessment. Elsevier.
- [20] Rodriguez, J., Pontt, J., Silva, C. & al. (2004). Predictive Direct Torque Control of an Induction Machine. Riga, Latvia : EPE-PEMC.
- [21] Ammar Benzaïoua 'Contribution à la commande directe de couple d'une machine asynchrone triphasée' AVRIL 2014
- [22] Holtz, J., & Stadtfeldt, S. (1983). A Predictive Controller for the Stator Current Vector of AC Machines Fed from a Switched Voltage Source. In International Electronics Conference, IPEC, 2, 1665- 1675.

RÉFÉRENCES

- [23] TOUATI boubaker & HAMOUGA "omar Commande prédictive appliquée à une machine synchrone alimentée par un onduleur triphasé " , MASTER ACADEMIQUE En Commande Electrique , L'Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued , u le 27/05/2017.
- (24) Singh, A.K., Hussain, I. and Singh, B., 2018. Double-stage three-phase grid-integrated solar PV system with fast zero attracting normalized least mean fourth based adaptive control. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 65(5), 3921-3931.
- (25) Massawe, H.B., 2013. Grid Connected Photovoltaic Systems with SmartGrid functionality (Master's thesis, Institutt for elkraftteknikk).
- (26) Orłowska-Kowalska, T., Blaabjerg, F. and Rodríguez, J. eds., 2014. Advanced and intelligent control in power electronics and drives (Vol. 531). Springer.
- (27) Luo, F. L., Ye, H., 2004. Advanced DC-DC converters. CRC Press Boca Raton.
- (28) Singh, B., Chandra, A. and Al-Haddad, K., 2014. Power quality: problems and mitigation techniques. John Wiley & Sons.
- (29) Dwivedi, L.K., singh, V., Pareek, A., Yadav, P., 2016. MATLAB/ SIMULINK based study of series- parallel connected photovoltaic system under partial shaded condition. , in: International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), vol. 03, Issue 10, pp. 809-815
- [30] Soltane Belakehal « Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables ». Thèse de doctorat, Université de Constantine, 2010.
- [31] HADJI Slimane, 2018. Optimisation de la conversion énergétique pour les systèmes à énergie Photovoltaïque. Thèse doctorat, Université de Sétif 1.
- [32] Alajmi, B.. 2013. Design and control of photovoltaic systems in distributed generation. PhD. thesis, University of Strathclyde
- [33] SAID Islam, TICHABET Abdelhadi " Commande et modélisation de l'énergie photovoltaïque interconnecté au réseau électrique " LE DIPLOME DE MASTER , ELECTRONIQUE Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj , 12/09/2021

RÉFÉRENCES

- [34] Etude comparative de cinq algorithmes de commande MPPT pour un système photovoltaïque.
- [35] B. Lekouaghet, A. Boukabou, N. Lourci, and K. Bedrine, Control of PV grid connected systems using MPC technique and different inverter configuration models, Electric Power Systems Research, vol. 154, pp. 287-298, Jan 2018.