

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique

Département d'Automatique



Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention
du diplôme de Master en Automatique

Thème :

Etude et comparaison des algorithmes MPPT dans les
systèmes photovoltaïques

Réalisé par :

Mr. CHERKI Mohamed Souheil

Mr. LABRAOUI Mohamed

Proposé et encadré par :

Dr. CHOUDER Aissa

Dr. HEMICI Boualem

Promotion 2013

E.N.P- 10, Avenue Hassen Badi, 16200 El Harrach, Alger

Résumé:

Le développement du marché photovoltaïque nécessite de connaître parfaitement la production électrique de ces systèmes sur différents sites en particulier pour estimer sa rentabilité économique. Cette estimation précise ne peut se faire qu'en prenant en compte les effets d'ombrage qui ont des conséquences dramatiques sur la puissance électrique délivrée. En effet, sous l'effet de l'ombrage, la courbe puissance-tension (P-V) peut posséder plusieurs pics de puissance, et par conséquent pouvoir pointer vers le point de puissance maximale global devient un enjeu très important.

Ainsi, nous avons procédé à une étude comparative entre plusieurs algorithmes MPPT. Nous montrons grâce à des études de simulations sous MATLAB® leurs capacités à localiser le point de puissance maximale global.

Mots-clés :

Système photovoltaïque, modélisation, simulation, MPPT, énergie renouvelable, ombrage.

Abstract:

The development of PV market requires perfect knowledge of these power generation systems at different sites in particular to estimate its profitability.

The accurate estimation can't be made without taking into account the effects of shading which have dramatic consequences on the electrical power delivered. Indeed, under the effect of shading, power-voltage curve (PV) can have multiple power peaks, and therefore able to point to the point of global maximum power becomes a very important issue.

So, we undertook a comparative study between several MPPT algorithms. The simulation run on MATLAB® and the results of their capacities to track the global maximum power point are shown in this work.

Keywords:

Photovoltaic system, modeling, simulation, MPPT, renewable energy, shading.

ملخص:

تطوير سوق PV يتطلب معرفة كاملة من هذه الأنظمة توليد الطاقة في مواقع مختلفة على وجه الخصوص إلى تقدير ربحيتها. ويمكن إجراء تقدير دقيق دون الأخذ بعين الاعتبار آثار التظليل التي لها عواقب وخيمة على الطاقة الكهربائية تسليمها. في الواقع، تحت تأثير التظليل، منحنى القوة قد يكون قمم السلطة متعددة، وبالتالي قادرة على الإشارة إلى نقطة الطاقة القصوى العالمي يصبح مسألة في غاية الأهمية.

وبالتالي أجرينا دراسة مقارنة لعدة خوارزميات MPPT. برهنا بمساعدة دراسة محاكاة بواسطة MATLAB® قدرتهم على تحديد نقطة الاستطاعة القصوى العامة.

الكلمات المفتاحية :

نظام كهروضوئية، التمثيل النموذجي ، والطاقة المتجددة ,تظليل, MPPT .

Remerciements

Ce travail a été effectué au sein du laboratoire de la centrale photovoltaïque connectée au réseau du CDER, sous la direction de mes deux promoteurs Mr. A.Chouder et Mr. B.Hemici auxquels je tiens à exprimer mes vifs remerciements pour leur aide, leur disponibilité et leurs conseils lors de l'élaboration de ce mémoire.

A tous les chercheurs du Centre de Développement des énergies renouvelables. En particulier les membres de la division photovoltaïque que nous j'ai côtoyé et apprécié durant toute la durée de notre projet.

J'exprime ma sincère gratitude à Mr. MS.Boucherit pour ses précieux conseils tout le long de notre travail.

Je suis particulièrement sensible à l'honneur que me fait les membres du jury qui ont accepté d'évaluer ces travaux et ce document.

Enfin, je ne pourrai terminer ces remerciements sans une pensée à l'ensemble de mes enseignants, qui sont à l'origine de tout mon savoir.

Dédicaces

Je dédicace ce travail à :

Ma très chère famille,

Mes chers amis,

Aux membres de la famille de l'Ecole Polytechnique.

Mohamed

Table des matières

Introduction générale	6
.1 Introduction	8
.2 Structures d'étages d'adaptation pour GPV sans isolement galvanique	8
.2.1 Etage d'adaptation abaisseur (buck)	9
.2.2 Etage d'adaptation survolteur (boost)	10
.2.3 Etage d'adaptation abaisseur/survolteur (Cuk)	11
.3 Couplage direct générateur-charge	12
.4 Principe de la recherche du point de puissance maximale(MPPT)	13
.5 Classification des techniques MPPT	15
.5.1 Les premiers types de technique MPPT	15
.5.2 Les techniques MPPT à algorithmes performants	16
.5.2.1 Principe des techniques "Perturb and Observe" (P&O)	17
.5.2.2 MPPT à pas auto-adaptatif	18
.5.2.3 Principe des techniques "Incrément de conductance" (Inc.CoN)	19
.5.2.4 Principe des techniques Hill Climbing (H.C)	21
.5.3 Les techniques MPPT basées sur des relations de propor- tionnalité	22
.5.3.1 La techniques de la tension de circuit ouvert du générateur	22
.5.3.2 La techniques de court-circuit	23
.5.4 La techniques de différenciation	23
.5.5 Les techniques MPPT basées sur le principe de la logique floue	24
.5.6 Les techniques MPPT de réseaux de neurones artificiels . . .	26
.6 Critères d'évaluation d'une commande MPPT	27
Conclusions générales et perspectives	30
Références bibliographiques	31

Introduction générale

Au cours des dix dernières années, le marché du photovoltaïque a connu une croissance très remarquable grâce notamment aux différents facteurs stimulants : réduction des coûts de production et politiques de soutien. Ces facteurs rendent le retour sur investissement d'une installation photovoltaïque de plus en plus intéressant. Or, comme tous les autres processus industriels, un système photovoltaïque peut être soumis, au cours de son fonctionnement, à différents défauts et anomalies conduisant à une baisse de la performance du système, voire à son indisponibilité totale. Toutes ces conséquences défavorables vont évidemment réduire la productivité de la centrale, et donc son profit.

De nombreuses études ont porté sur l'évaluation de l'impact des différents défauts sur la caractéristique statique P-V. Ombrager une partie d'un module PV a de dramatiques conséquences sur sa courbe puissance - tension (P-V) et ce, même si une très faible partie du module ou de la cellule est à l'ombre, une diminution importante de la puissance produite en est alors la conséquence. Cet ombrage partiel peut être dû à des cheminées, à des arbres ou à d'autres parties de construction.

Une attention toute particulière doit être portée sur ce problème sous peine d'une forte réduction de la productivité des systèmes rendant moins attractif le photovoltaïque d'un point de vue économique et ce en particulier dans le cas de systèmes PV intégrés dans le bâti.

Dans ce mémoire, nous procédons à une étude comparative entre plusieurs algorithmes MPPT. Nous montrons, grâce à des études de simulations sous environnement MATLAB, leurs capacités à localiser le point de puissance maximale global lorsque le système photovoltaïque est soumis à un ombrage. Pour finir, une conclusion générale donne une synthèse sur le travail effectué et résume les principaux résultats obtenus ainsi que les perspectives envisagées.

Techniques de maximisation de la puissance

.1 Introduction

Un generateur photovoltaïque peut fonctionner dans une large gamme de tension et de courant de sortes mais il ne peut delivrer une puissance maximale que pour des valeurs particulieres du courant et de la tension. En effet la caracteristique $I(V)$ du generateur depend de l'éclairement solaire et de la temperature. ces variations climatiques entrainent la fluctuation du point de puissance maximale. A cause de cette fluctuation, on intercale souvent entre le generateur et le recep-teur un ou plusieurs convertisseurs statiques commandes permettant de rattraper a chaque fois le point de puissance maximale. Ces convertisseurs connus sous le nom de MPPT (maximum power point tracking) assurent le couplage entre le ge-nerateur PV et le recep-teur en forçant le premier a delivrer sa puissance maximale.

.2 Structures d'étages d'adaptation pour GPV sans isolement galvanique

Pour connaitre les performances des etages d'adaptation de GPV de type Convertisseur DC bases sur differentes structures sans isolement galvanique (buck, boost et Cuk), nous avons effectue des etudes systematiques. Pour tous les essais, nous avons utilise un generateur PV, un ou plusieurs panneaux PV et comme charge, des batteries au plomb de tension nominale 12V, 24V puis 48V. Les conver-tisseurs statiques fonctionnent a frequence de decoupage fixe en mode MLI analogique (Modulateur a Largeur d'Impulsion).

.2.1 Etage d'adaptation abaisseur (buck)

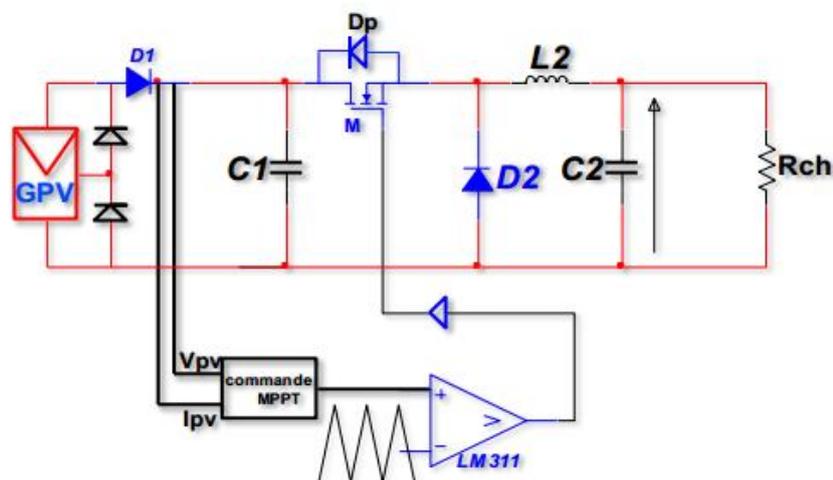


FIGURE 1 – Schéma de principe d'un étage d'adaptation abaisseur d'un GPV avec fonction MPPT

La (figure 1) montre un GPV avec son etage d'adaptation constitue d'un convertisseur abaisseur (buck). Pour assurer la protection du GPV, nous devons inclure la diode anti-retour D1, celle-ci empechant la batterie de se decharger pendant la nuit.

Par la commande MLI, le convertisseur buck genere des courants pulses sur le port d'entree. Afin d'eviter que les courants pulses affectent le GPV et pour assurer que le courant delivre par le GPV soit continu, il est necessaire de placer un condensateur de filtrage C1 entre le GPV et le convertisseur. Un compromis doit etre fait sur la valeur de ce condensateur devant assurer d'un cote un filtrage suffisant et, de l'autre, ne devant pas avoir une valeur trop elevee pour ne pas ralentir trop la reponse du systeme.

Pour eliminer completement la presence des courants pulses lies au fonctionnement du convertisseur statique et pouvant perturber le GPV, nous pouvons inserer un filtre de deuxieme ordre de type LC a l'entree du buck.

Pour que le buck puisse transfere de la puissance electrique instantanement de l'entree vers la sortie, la tension de sortie doit etre inferieure a la tension d'entree ou, de maniere equivalente, le courant de sortie doit etre superieur au courant d'entree (condition du devolteur). Nous pouvons trouver une situation ou le convertisseur ne transfere pas de puissance quand, par exemple, une des cellules du GPV est completement ombree. Alors, la puissance fournie par le GPV sera nulle malgre la mise en conduction de la diode by-pass du sous reseau de cellules auquel appartient la diode ombree. En effet, la mise en conduction de cette diode

donne lieu au fonctionnement de la moitié du module restant sans défaut pouvant fournir jusqu'à la moitié de la puissance nominale d'un panneau, mais comme la tension de ce sous-reseau sera inférieure à la tension de la batterie, le convertisseur ne transférera pas de puissance à la batterie. Alors, le circuit de commande MPPT peut avoir des problèmes de recherche de point optimal quand la tension optimale V_{opt} correspondante est inférieure à la tension de la batterie. Ceci peut arriver quand la batterie est en fin de charge et la tension optimale V_{opt} est faible à cause par exemple d'une température de fonctionnement des cellules trop élevée [1].

.2.2 Etage d'adaptation survolteur (boost)

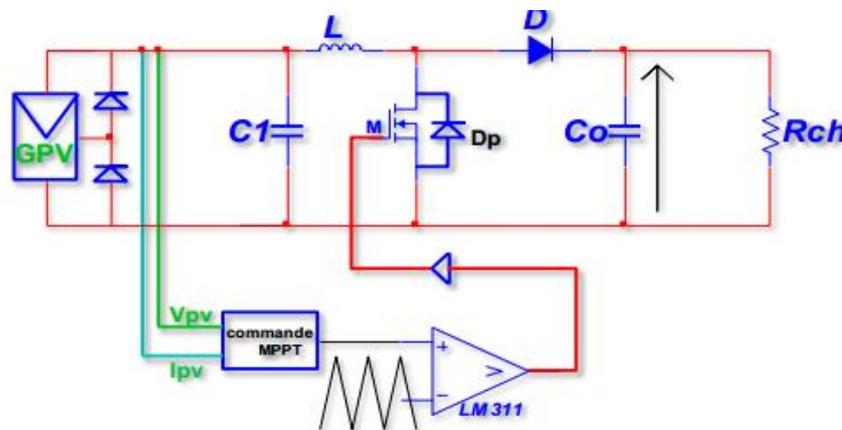


FIGURE 2 – Schéma de principe d'un étage d'adaptation survolteur d'un GPV avec fonction MPPT

Le schéma de réalisation de l'étage d'adaptation d'un GPV à partir d'un convertisseur de type boost est présentée en (figure 2). Cette structure élévatrice est plutôt destinée aux applications où la tension de la batterie est supérieure à la tension de circuit ouvert V_{oc} du générateur. Il peut être remarqué que la protection anti-retour du courant de la batterie sur le GPV peut être directement assurée par la diode jouant le rôle de roue libre au sein de la structure. L'utilisation de cette structure permet donc de faire des économies par rapport à la structure abaisseur. En effet, la réduction de composants réduit d'autant le coût de l'étage d'adaptation mais permet également d'augmenter le rendement global de la chaîne par l'élimination des pertes dues à la conduction directe de la diode anti-retour.

Pour le convertisseur boost, théoriquement, le transfert de puissance n'est possible que si la tension de sortie est supérieure à la tension d'entrée. Toutefois, en réalité, si on considère le cas où la tension de batterie peut devenir inférieure à

la tension du GPV, lorsque par exemple l'état de charge de la batterie est très faible ou proche d'une dégradation définitive, la structure boost peut fonctionner en mode dégrade. En effet, le passage de courant du générateur vers la batterie est possible à travers la diode de roue libre permettant ainsi la récupération d'une partie de l'énergie du GPV. Dans ce mode de fonctionnement dégrade, aucune régulation n'est possible et l'étage d'adaptation ne fonctionne pas à proprement parler.

Le point de fonctionnement de l'ensemble est alors lié directement à la valeur de la tension de la batterie. Ceci peut représenter un avantage important de cette structure par rapport à la structure abaisseur qui dans le cas d'une tension de batterie supérieure à celle de V_{oc} , ne permet aucun transfert de puissance [2] [3].

.2.3 Etage d'adaptation abaisseur/survolteur (Cuk)

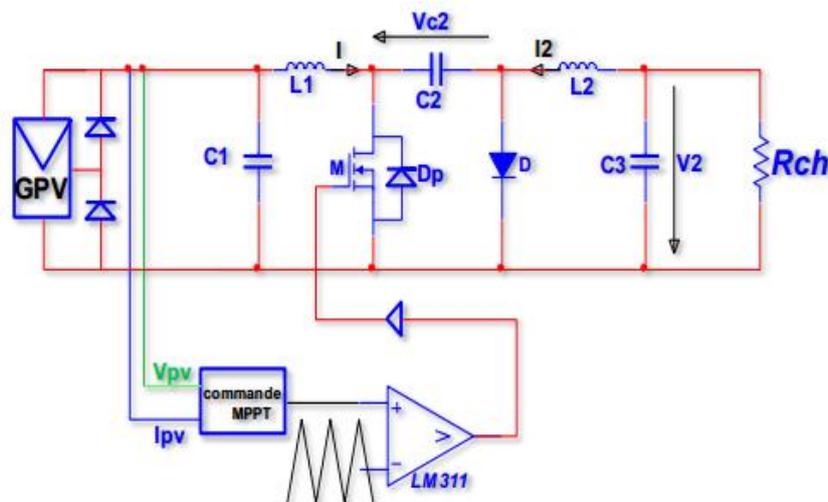


FIGURE 3 – Schema de principe d'un étage d'adaptation Cuk d'un GPV avec fonction MPPT

Parmi les différents convertisseurs abaisseur-élevateur c'est le convertisseur Cuk (figure 3) que nous avons choisi d'étudier ce choix a principalement été dicté par la présence d'une inductance en série sur les ports d'entrée et de sortie conférant à la structure des niveaux d'interférences électromagnétiques inférieurs à ceux présents dans le convertisseur buck-boost ou bien même dans le convertisseur SEPIC. Un inconvénient subsiste concernant l'inversion de signe de la tension de sortie par

rapport a celle d'entree par sa structure, le convertisseur Cuk peut travailler avec des tensions de sortie plus petites ou plus grandes que la tension d'entree [2].

.3 Couplage direct générateur-charge

C'est le systeme le plus simple et minimal, ou le generateur photovoltaïque est couple directement a une charge susceptible de fonctionner a puissance variable. Ce fonctionnement est dit "au fil du soleil". Le generateur et la charge ne sont plus adaptes (figure 4) ce qui implique un fonctionnement non optimal du generateur. Trois types de charges DC typiques existent :

- une charge purement resistive
- une charge de type source de tension
- une charge de type source de courant.

Sur la (figure 4), nous avons represente les caracteristiques $I(V)$ et $P(V)$ d'un GPV ainsi que les caracteristiques $I(V)$ des trois types de charges. Tout d'abord, nous pouvons identifier le point de fonctionnement ou la puissance fournie par le generateur est maximale (P_{max}) pour un courant optimal (I_{opte}) et une tension optimale (V_{opte}), point nomme PPM. Ensuite, nous pouvons trouver le point d'intersection entre les caracteristiques $I(V)$ du generateur et celles des trois types de charges :

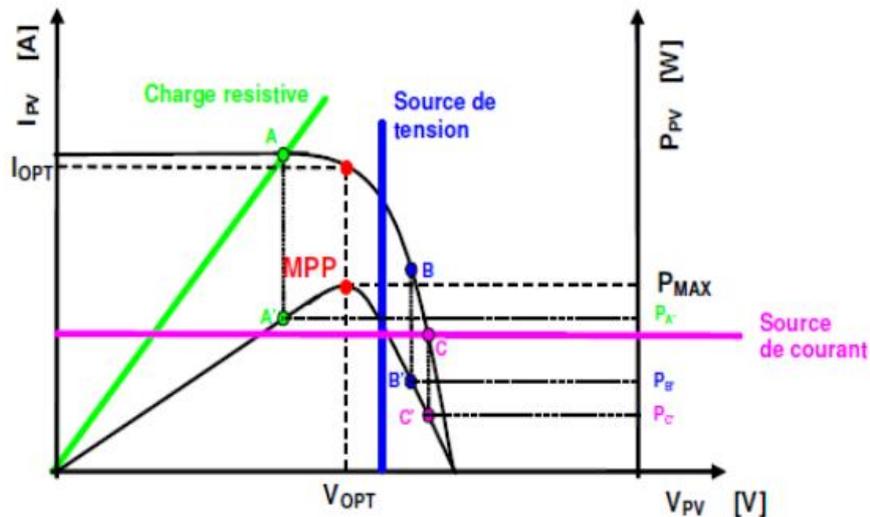


FIGURE 4 – Points de fonctionnement d'un GPV en fonction de la charge en connexion directe

- point A pour une charge resistive,
- point B pour une charge de type source de tension,
- point C pour une charge en source de courant.

Pour ces trois points, la puissance fournie par le generateur est respectivement P_A , P_B . et P_C ., que comme l'illustre la (figure 4) correspondant a des valeurs de puissance inferieures a la puissance maximale disponible P_{max} .

Donc, une perte d'une partie de la puissance delivable aux bornes du generateur PV implique a la longue des pertes de production energetiques importantes [4] [5].

.4 Principe de la recherche du point de puissance maximale(MPPT)

Il existe un point de fonctionnement ou la puissance debitee est maximale. L'optimisation consiste a realiser ce point en permanence en agissant de facon automatique sur la charge vue par le generateur cette adaptation de charge dans le principe s'effectue en generale a l'aide d'un convertisseur statique dans les pertes doivent etre aussi faibles que possible et qui peut, par ailleurs, assurer une fonction de mise en forme d'une generateur de sortie, differentes attitudes peuvent etre envisagees quant a la commande de l'adaptateur.

Ce type de commande est souvent nomme Recherche du Point de Puissance Maximum ou bien Maximum Power Point Tracking (MPPT). La (figure 5) represente une chaine elementaire de conversion photovoltaïque elementaire associee a une commande MPPT.

Pour simplifier les conditions de fonctionnement de cette commande, une charge DC est choisie. Comme nous pouvons le voir sur cette chaine, dans le cas de la conversion solaire.

L'adaptateur peut etre realise a l'aide d'un convertisseur DC-DC de telle sorte que la puissance fournie par le GPV corresponde a la puissance maximale (P_{max}) qu'il genere et qu'elle puisse ensuite etre transferee directement a la charge [6] [7] [8].

La technique de controle communement utilisee consiste a agir sur le rapport cyclique de maniere automatique pour amener le generateur a sa valeur optimale de fonctionnement qu'elles que soient les instabilites meteorologiques ou variations brutales de charges qui peuvent survenir.

La (figure 6) illustre trois cas de perturbations. Suivant le type de perturbation, le point de fonctionnement bascule du point de puissance maximal PPM1 vers un nouveau point P1 de fonctionnement plus ou moins eloigne de l'optimum.

- Pour une variation d'ensoleillement (cas a) : Il suffit de reajuster la valeur du

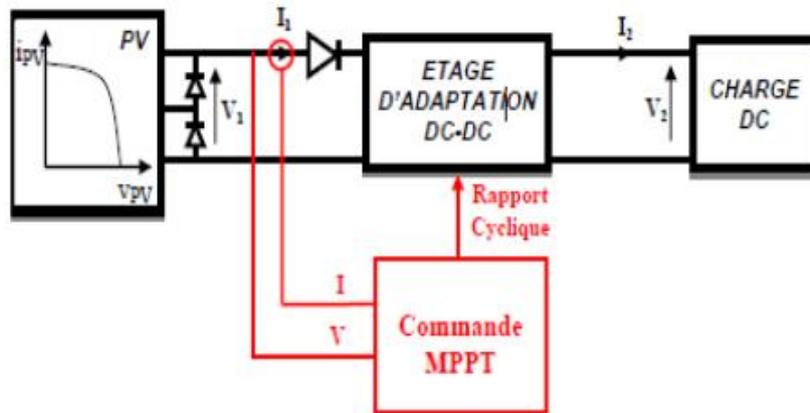


FIGURE 5 – Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque

rapport cyclique pour converger vers le nouveau point de puissance maximum PPM2.

- Variations de température de fonctionnement du G PV (cas b) : Bien qu'il faille également agir au niveau de la commande.
- Pour une variation de charge (cas c) : On peut également constater une modification du point de fonctionnement qui peut retrouver une nouvelle position optimale grâce à l'action d'une commande.

En resumé, le suivi du PPM est réalisé au moyen d'une commande spécifique nommée MPPT qui agit essentiellement sur le rapport cyclique du convertisseur statique (CS) pour rechercher et atteindre le PPM du GPV. Il existe plusieurs principes de fonctionnement des commandes MPPT plus ou moins performantes basées sur les propriétés du GPV [7] [10].

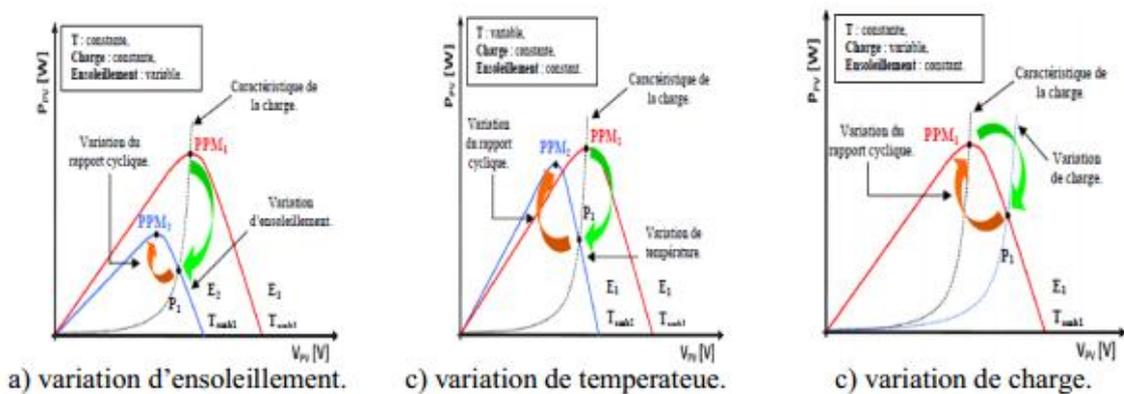


FIGURE 6 – Recherche et recouvrement du point de puissance maximale

.5 Classification des techniques MPPT

Diverses publications sur les commandes assurant un fonctionnement de type commande MPPT apparaissent régulièrement dans la littérature depuis 1968, date de publication de la première loi de commande de ce genre, adaptée à une source d'énergie renouvelable de type photovoltaïque.

Étant donné le grand nombre de publications dans ce domaine, nous avons fait une classification des différentes MPPT existantes en les regroupant selon leur principe de base. La classification, en plus du principe, s'est effectuée selon des critères comme la précision de la recherche ou sa rapidité pour en faire une évaluation comparative [10] [11].

.5.1 Les premiers types de technique MPPT

L'algorithme mis en œuvre dans les premières commandes MPPT était relativement simple. En effet, les capacités des microcontrôleurs disponibles à l'époque étaient faibles et les applications, surtout destinées au spatial avaient beaucoup moins de contraintes en variation de température et d'éclairement que les applications terrestres appliquées initialement.

Au photovoltaïque, son principe a d'abord été décrit par A.F. Bohringer. Cette commande est basée sur un algorithme de contrôle adaptatif, permettant de maintenir le système à son point de puissance maximum (PPM).

Ce dernier est décrit en (figure 7) et peut être implanté entièrement en numérique [11].

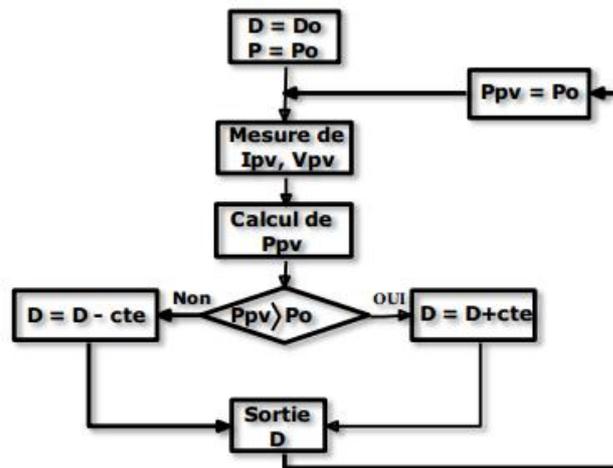


FIGURE 7 – Principe de la première technique MPPT numérique

Il consiste a calculer la puissance a l'instant t_n a partir des mesures de IPV et VPV, et de la comparer a celle stockee en memoire, correspondant a l'instant t_{n-1} de la, un nouveau rapport cyclique D est calcule et est applique au convertisseur statique. Ce principe est toujours valable du point de vue theorique et applique de nos jours sur des algorithmes numeriques plus performants. Cependant, le temps de reaction a ete ameliore ainsi que la precision de la recherche du PPM associee a un certain nombre de precautions pour ne pas perdre le PPM meme temporairement [11].

.5.2 Les techniques MPPT à algorithmes performants

Dans notre cas, ce dernier est constitue d'un hacheur dont la commande integre le systeme MPPT (Maximum Power Point Tracking). Cette commande a base d'un microcontrolleur controle les variations de l'intensite du courant I et de la tension V et calcule la puissance P. afin d'optimiser le transfert d'energie electrique fournie par les panneaux.

Le systeme MPPT cherche a faire debiter ces panneaux a leur puissance maximale en agissant sur le rapport cyclique D.

Le principe du contrôleur MPPT est souvent basé sur une méthode par tâtonnement, comme le montre la (figure 8) suivante qui illustre le principe de recherche du MPP.

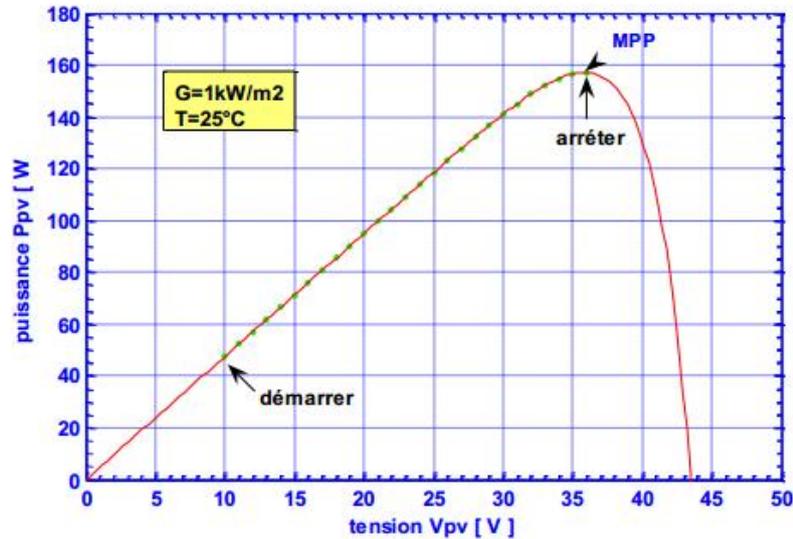


FIGURE 8 – recherche du MPP

La charge va imposer son point de fonctionnement (P1) par exemple. Le programme developpe choisit un sens d'ajustement de D par pas $+(d=cte)$ ou $.(d=cte)$.

Il compare si la valeur du point suivant en puissance est supérieure ou non à celui qui précède.

Si oui, on se déplace au point suivant (P2) avec le même sens de variation de , jusqu'au moment où le terme suivant (Pn) devienne inférieur au précédent (P n -1). A ce moment, on prend le sens opposé d'ajustement et l'on recommence la même procédure, jusqu'à obtenir un système qui va basculer entre trois points qui englobent le MPP (Popt).

.5.2.1 Principe des techniques "Perturb and Observe" (P&O)

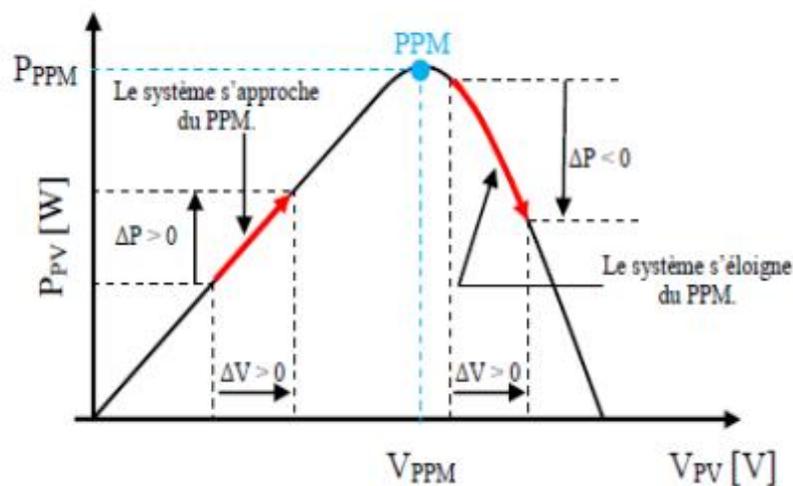


FIGURE 9 – Caractéristique P(V) d'un panneau solaire

Le principe des commandes MPPT de type P&O consiste à perturber la tension V_{PV} d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance P_{PV} qui en résulte ainsi, comme l'illustre la (figure 9), on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension V_{PV} engendre un accroissement de la puissance P_{PV} , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM.

Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le PPM. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. À partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique $P_{PV}(V_{PV})$, il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire alors converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié. En résumé, si suite à une perturbation

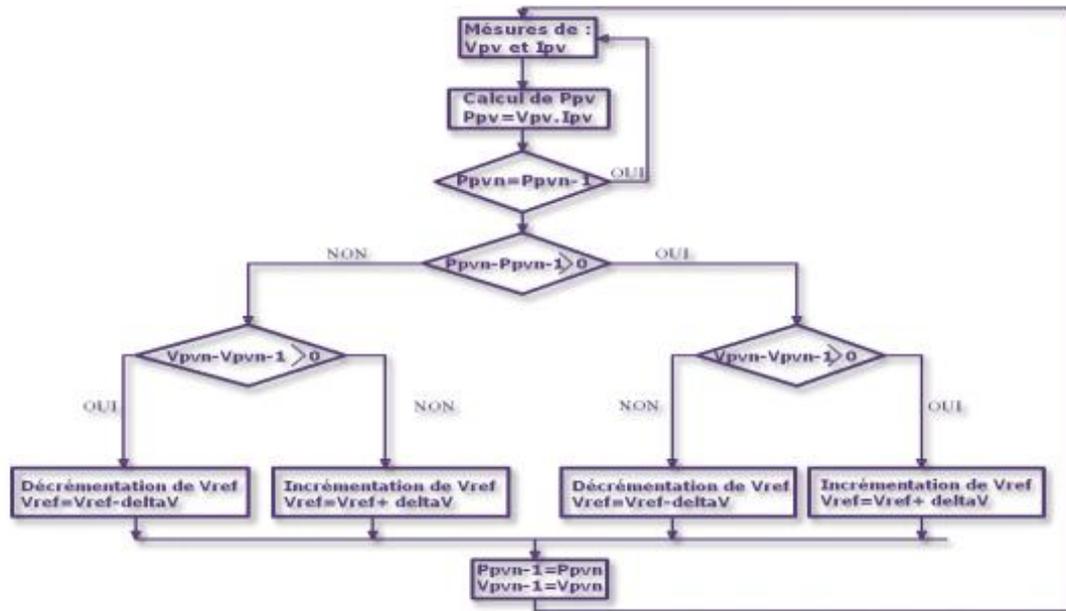


FIGURE 10 – Algorithme MPPT perturbation and observation (P&O)

de tension, la puissance P_{pv} augmente, la direction de perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau PPM. La (figure 10) représente l'algorithme classique associé à une commande MPPT de type (P&O), où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension [12].

.5.2.2 MPPT à pas auto-adaptatif

Le principe fondamental de notre algorithme est la variation du pas d'incrémentation, ceci permettant de converger plus rapidement vers le MPP mais aussi de réduire les oscillations autour de ce point.

En effet, afin de converger rapidement vers le MPP, nous définissons, suivant un critère de variation de puissance, une région (r) de recherche à pas variable. En dehors de la région (r), l'algorithme se comporte comme un P&O normal avec un pas fixe noté C , mais lorsque l'on entre dans la région (r), le pas s'auto-adapte et se réduit au fur et à mesure que l'on approche du MPP. Les équations (3.1) à (3.7) détaillent le calcul du pas auto adaptatif, nous supposons qu'autour du MPP, la tension reste constante et donc seul le courant varie.

$$\frac{dP_{pv}}{dt} = 0 \quad (1)$$

P_{pv} étant la puissance aux bornes des panneaux photovoltaïques ; V_{pv} et I_{pv} ,

respectivement leurs tension et courant. Le coefficient k est un coefficient correcteur (k, [0.1, 1]) qui permet de converger dans de bonnes conditions et résulte d'un réglage par itération basé sur le compromis (temps de Convergence / stabilité).

L'algorithme MPPT est représenté à la (figure 11) [12].

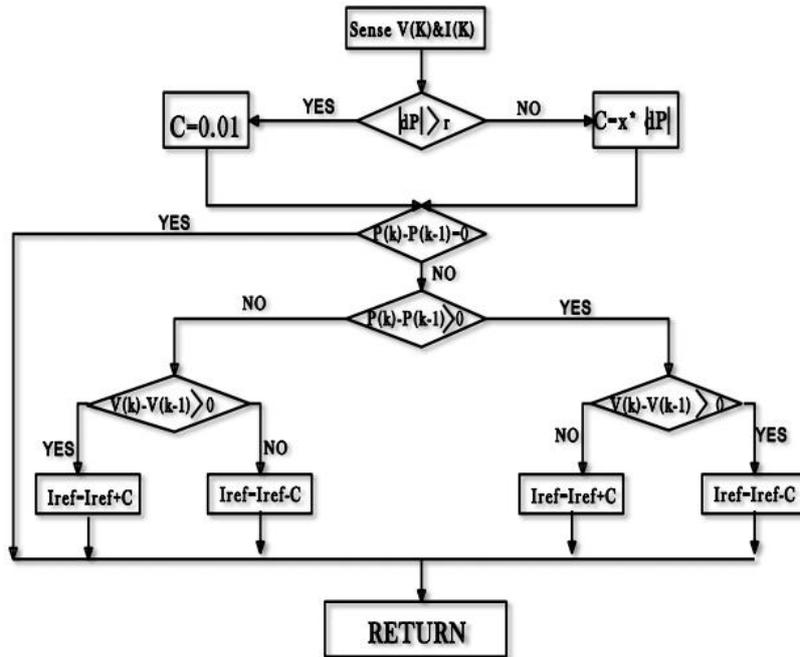


FIGURE 11 – Algorithme MPPT à pas auto-adaptatif

.5.2.3 Principe des techniques "Incrément de conductance" (Inc.CoN)

Pour rechercher les PPM, cette autre technique se base sur la connaissance de la variation de conductance du GPV et des conséquences sur la position du point de fonctionnement par rapport à un PPM.

Ainsi, la conductance du module photovoltaïque est définie par le rapport entre le courant et la tension du GPV comme indiqué ci-dessous.

$$G = \frac{I_{pv}}{V_{pv}} \quad (2)$$

Et une variation élémentaire (incrément) de conductance peut être définie par :

$$\Delta G = \frac{\Delta I_{pv}}{\Delta V_{pv}} \quad (3)$$

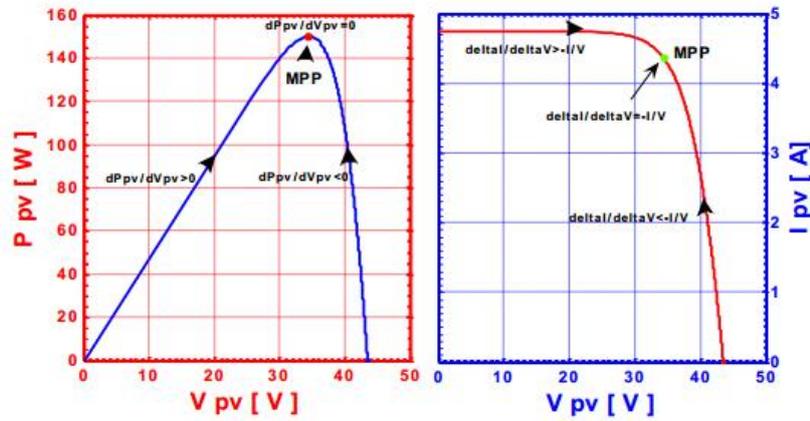


FIGURE 12 – Positionnement du point de fonctionnement ($G=1\text{kW}/\text{m}^2$, $T=25\text{C}^\circ$)

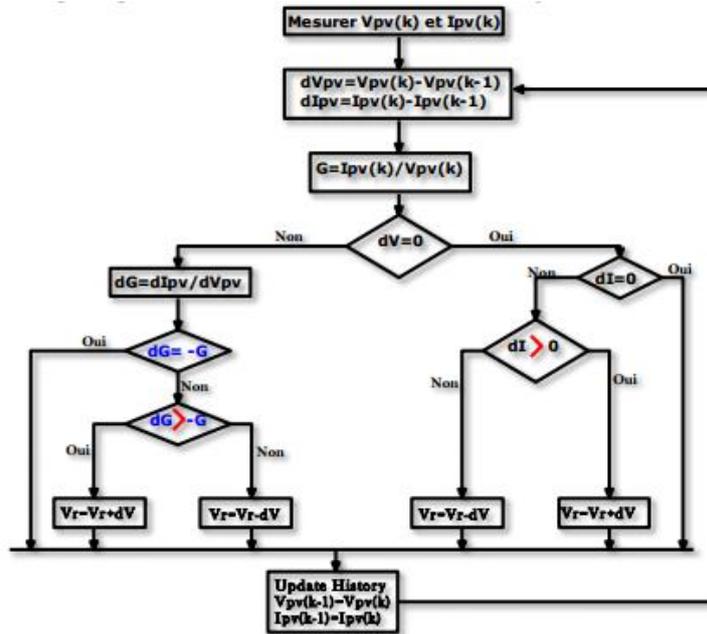


FIGURE 13 – Algorithme MPPT Incrément de Conductance (Inc.CoN)

5.2.4 Principe des techniques Hill Climbing (H.C)

La technique de controle nommee Hill Climbing consiste a faire monter le point de fonctionnement le long de la caracteristique du generateur presentant un maximum.

Pour cela, deux pentes sont possibles. La recherche s'arrete theoriquement quand le point de puissance maximal est atteint. Cette methode est basee sur la relation entre la puissance du panneau et la valeur du rapport cyclique applique au CS. Mathématiquement, le PPM est atteinte lorsque $(\frac{dP_{pv}}{dD})$ est forcé à zéro par la commande.

Le slope correspond a une variable qui prend la valeur suivant la direction que l'on doit donner a la recherche pour augmenter la puissance en sortie du panneau. D et PPV representent respectivement le rapport cyclique et la puissance du generateur, a symbolise la variable d'increment du rapport cyclique. Periodiquement, la puissance PPVn est comparee a la valeur determinee precedemment PPVn-1, en fonction du resultat de la comparaison, le signe de la valeur slope change ou reste identique. Ce qui a pour effet d'incrementer ou de decrementer.

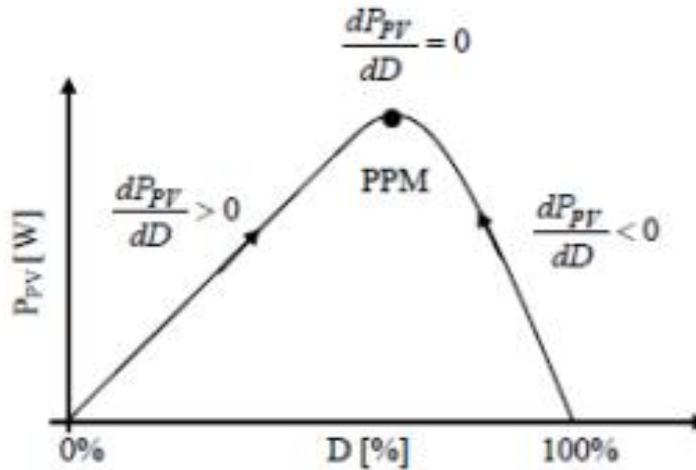


FIGURE 14 – Relation entre PPV et le rapport cyclique D du CS

.5.3 Les techniques MPPT basées sur des relations de proportionnalité

Le mode de fonctionnement de ces commandes est basé sur des relations de proportionnalité entre les paramètres optimaux caractérisant le point de puissance maximal (V_{opt} et I_{opt}) et les paramètres caractéristiques du module PV (V_{oc} et I_{sc}). Suivant le paramètre contrôlé, on parle alors de commande en régulation de courant ou de tension.

.5.3.1 La techniques de la tension de circuit ouvert du générateur

Cette technique de recherche du PPM est tres simple. Elle consiste a comparer la tension du panneau (VPV) avec une tension de reference qui correspond a la tension optimale(V_{opt}). L'erreur de tension est alors utilisee pour ajuster le rapport cyclique du CS, afin de faire coincider les deux tensions. La tension de reference est obtenue a partir de la connaissance de la relation lineaire existante entre V_{opt} et V_{OC} d'un module PV :

$$V_{opt} = K_v * V_{oc} \quad (4)$$

Avec k_v correspondant a un facteur de tension dont sa valeur depend du GPV utilise et de la temperature de fonctionnement .Generalement, pour des GPV en Si, il est compris entre 0.71 et 0.78. A partir de (11) et connaissant k_v , il faut cependant mesurer la tension de circuit ouvert (VOC) afin d'en deduire la tension de reference (V_{opt}) a appliquer au PV.

L'inconvenient majeur de cette technique reside dans la necessite d'effectuer la mesure de VOC de temps en temps et l'obligation de deconnecter la charge du PV durant cette mesure impliquant une perte de transfert de puissance a chaque mesure.

Un autre inconvenient est l'hypothese faite sur l'evolution de k_v dans un GPV suivants les differents points de fonctionnement des caracteristiques de puissance. Beaucoup d'auteurs font l'hypothese que ce coefficient est constant pour un generateur donne. Ceci est loin d'etre vrai pour la plupart des GPV en si qui affichent une variation d'au moins 10 % de ce facteur en fonction de la temperature de fonctionnement. Ces commandes sont tres simples et tres robustes mais aujourd'hui ne presentent pas assez de precisions inherentes a leur principe meme de fonctionnement pour etre retenues dans des systemes de conversion recents [13].

.5.3.2 La techniques de court-circuit

Cette nouvelle methode est basee sur la connaissance de la relation lineaire en premiere approche entre I_{opt} et ICC comme le montre l'equation :

$$I_{opt} = Ki * I_{sc} \quad (5)$$

Avec Ki correspondant a un facteur de courant qui depend la aussi du GPV utilise et est generalement compris entre 0.78 et 0.92. A L'equation (5) montre que le courant I_{opt} peut etre determine par une mesure d' ICC et que le PPM peut etre atteinte en appliquant un courant de reference egal a I_{opt} a la regulation en courant du convertisseur. La mesure de ICC implique une perte de transfert de puissance du a la mise en court circuit du GPV.

Cependant, cette methode peut s'averer plus precise que la precedente car la temperature n'influence pas trop ce coefficient ces types de commandes ayant besoin uniquement d'un seul capteur, elles ont ete tres utilisees dans les annees 80.

Elles s'avereraient alors plus faciles a mettre en oeuvre et un peu moins couteux que les commandes extremales citees au debut de ce document. Par contre, la precision de ces commandes est faible notamment a cause des procedes d'estimation des parametres caracteristiques du module (ICC et VCO) qui ne peuvent pas se faire trop souvent. L'echelle temporelle de reaction est en effet de la minute. De plus, a chaque fois qu'une mesure de courant ou de tension est faite, cela entraine un arret obligatoire de transfert de puissance et donc des pertes energetiques qui ne sont pas negligeables au cours d'une journee.

.5.4 La techniques de différenciation

Cette methode est basee sur la propriete de la derivee d'une fonction qui s'annule en un de ses extrema. La resolution de l'equation (3.13) permet d'obtenir le point de puissance maximale :

Cependant, afin d'atteindre reellement le point de puissance maximale, cette equation doit etre resolue rapidement. Cette operation est longue et complexe car exigeant au moins huit calculs et mesures : mesures de la tension V_{pv} des panneaux, du courant I_{pv} , de la variation de la tension dV_{PV} , de la variation du courant dI_{pv} , permettant le calcul de la variation de la puissance dP_{pv} puis sa comparaison a (0). Si la variation de la puissance n'est pas nulle, son signe permet de determiner la direction de la recherche du MPP. Cette methode necessite donc des moyens de calcul qui soient tres efficaces [14].

.5.5 Les techniques MPPT basées sur le principe de la logique floue

Les commandes basées sur la logique floue (dans la littérature anglo-saxonne Fuzzy Logic Control) sont de plus en plus populaires grâce à l'évolution des microcontrôleurs.

L'avantage de ces techniques est qu'elles peuvent fonctionner avec des valeurs d'entrées peu précises et qu'elles n'ont pas besoin de modèle mathématique de grande précision. De plus, elles peuvent traiter des non linéarités. Le principe d'une commande floue se base sur deux variables d'entrées qui sont l'erreur E et le changement d'erreur DE et une variable de sortie DE (variation du rapport cyclique).

La valeur de la variable de sortie, qui pilote le convertisseur statique pour rechercher le PPM, est déterminée à l'aide d'une table de vérité et de l'évolution des paramètres d'entrée.

En général, la commande logique floue comprend donc trois étapes communément nommées dans la littérature

- la fuzzification,
- la lecture de la table de vérité,
- la defuzzification

Durant la fuzzification, les variables d'entrées numériques sont converties en variable Linguistique pouvant prendre les cinq valeurs suivantes

- NB : Negative Big.
- NS : Negative Small.
- ZE : Zero.
- PS : Positive Small.
- PB : Positive Big.

Comme le montre la structure de base de la commande logique floue illustrée en (figure 15).

La variable linguistique assignée à D , dépend des différentes combinaisons entre E et DE . Par exemple, si les variables d'entrée (E et DE), ont comme valeur PB et ZE correspondant à un point de fonctionnement très éloigné du PPM, d'après la table de vérité la valeur donnée à la variable de sortie DE est PB, ce qui implique une forte variation positive du rapport cyclique pour atteindre le PPM.

En résumé, les variations du rapport cyclique dépendent de la différence de position entre le point de fonctionnement et un PPM. Ainsi, dès que ce dernier s'approche du PPM, les incréments appliqués à DE s'affinent jusqu'à atteindre le PPM. La defuzzification, consiste à convertir cette fois, une variable linguistique en variable numérique. Cette étape ne s'applique qu'à la variable de sortie D , afin de pouvoir piloter le convertisseur de puissance pour atteindre le PPM. Noppadol Khaehintung a démontré en 2004 que l'emploi d'une commande MPPT basée sur le principe de la logique floue permet d'améliorer d'un facteur 8 le temps de re-

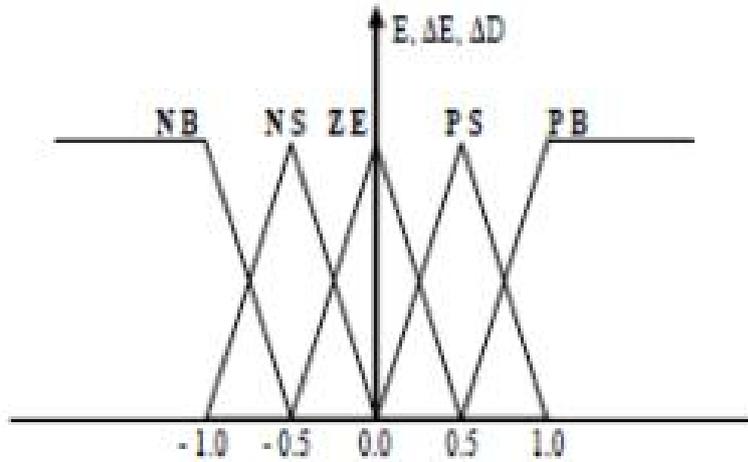


FIGURE 15 – Structure de base de la commande floue

$E \backslash \Delta E$	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	ZE	ZE	NB	NB	NB
NS	ZE	ZE	NS	NS	NS
ZE	NS	ZE	ZE	ZE	PS
PS	PS	PS	PS	ZE	ZE
PB	PB	PB	PB	ZE	ZE

FIGURE 16 – Exemple d’une table de vérité pour une commande logique floue

ponse par rapport a une commande P&O classique.

Dans cet article, aucune indication n’est donnée sur la variable d’incrémentation, mais après analyse des relevés, on en déduit que celle-ci est relativement petite car les oscillations autour du PPM. Sont très faibles expliquant la différence en termes de réponse dynamique. Un phénomène secondaire à prendre en compte est le temps mis par cette commande pour se stabiliser sur un nouveau PPM. La commande floue met 1,75 s pour s’immobiliser sur le PPM, alors que la commande P&O s’y positionne au bout de 1,25s, c’est-à-dire dès qu’elle l’a atteint. Une comparaison plus fine est donc nécessaire pour affirmer les gains de ce nouveau type de commande à l’algorithme de base très complexe.

La commande logique floue est comparée directement à la méthode Hill Climbing. Les différents oscillogrammes montrent que le temps de réponse est lége-

rement ameliore, par contre l'erreur statique obtenue est relativement faible. Ici, contrairement a l'exemple cite ci-dessus, la valeur de l'increment est importante. Malheureusement la qualite des releves ne permettent pas de determiner avec precision le gain en termes de temps de recouvrement ainsi que le rendement de cette commande a cause d'une echelle de temps et des calibres de mesures trop grands. En resume, cette methode s'avere etre tres performante lors de changement des conditions climatiques, cependant sa precision en statique est fortement liee a la complexite. De la table de verite employee entrainant la necessite du choix obligatoire d'un microcontrolleur ayant une grande capacite de calculs tenant compte des nombreuses disparites des parametres electriques du panneau.

Ici, typiquement, cette commande peut presenter les meilleures performances en termes de precision et de rapidite de recouvrement de PPM. Mais elle entraine obligatoirement une consommation energetique non negligeable liee au microprocesseur ainsi qu'un surcout [13] [15].

.5.6 Les techniques MPPT de réseaux de neurones artificiels

La technique de reseaux de neurones est, elle aussi, de plus en plus utilisee, car elle offre une grande alternative pour resoudre des problemes complexes. Ces dernieres annees, l'utilisation de cette methode dans divers domaines d'application ne cesse d'augmenter car elle fonctionne a partir d'une boite noire qui n'exige pas d'informations detaillees sur le fonctionnement du systeme. Elle etablit des relations entre les variables d'entree et de sortie en analysant les precedentes donnees memorisees. Un autre avantage est qu'elle peut traiter des problemes d'une grande complexite grace a des parametres interdependants.

Les reseaux de neurones sont composes generalement de trois couches differentees, nommees :

- Couche d'entree (Input layer).
- Couche cachee (Hidden layer).
- Couche de sortie (Output layer).

Comme le montre la (figure 16).

Le nombre de noeuds au niveau des differentes couches est variable en fonction du degre d'apprentissage souhaite et de la precision de la commande souhaitee. Pour une commande MPPT, les variables d'entrees peuvent donc etre les parametres caracteristiques d'un GPV (VOC, ICC) associees ou non a des donnees atmospheriques comme la temperature. Ou plusieurs signaux de reference comprenant au moins le rapport cyclique permettant de commander le CS pour fonctionner le plus souvent possible au PPM. La qualite de la recherche du PPM depend

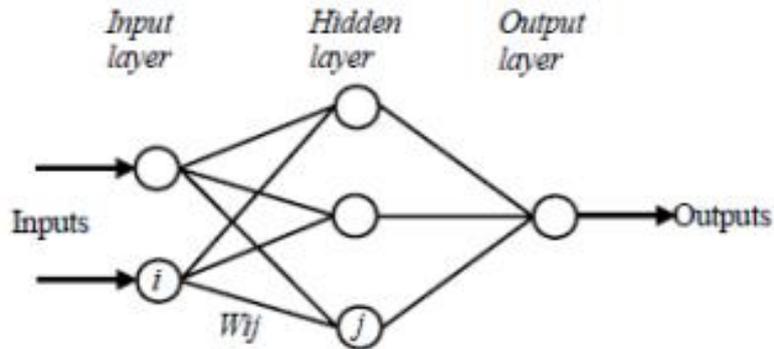


FIGURE 17 – exemple d'un reseau de neurones

essentiellement de l'algorithme utilise dans la couche cachee et de la construction proprement dite du reseau. Ainsi, L'importance entre deux noeuds de la valeur du poids choisi W_{ij} est a prendre en compte. Pour identifier avec precision les differents PPM.

Eventuels, les poids W_{ij} doivent etre initialement determines avec le plus de soin possible a travers des procedures d'apprentissage laborieuses et specifiques a chaque GPV, chaque site d'implantation et chaque type de charge. De plus, cet apprentissage doit etre revise regulierement (typiquement chaque mois) pour mettre a jour les relations entre les entrees et les sorties du reseau. Ce qui rend cette commande fastidieuse en entretien et en maintenance.

Bien qu'il existe une grande quantite de ces commandes MPPT dans la litterature, nous ne connaissons pas d.application industrielle les utilisant [13].

.6 Critères d'évaluation d'une commande MPPT

La qualite d'une commande MPPT peut etre definie comme la position du point de fonctionnement du systeme par rapport au PPM.

La puissance P_{in} effectivement delivree par le GPV depend de la commande utilisee au niveau du convertisseur (MPPT, asservissement de tension, connexion directe). Le rendement du point de fonctionnement qui en decoule et que nous noterons μ_{mpp} , permet de mesurer l'efficacite de la commande qui a en charge le controle du convertisseur de puissance.

En resume cela donne le % de pertes de puissance d'un module PV par rapport a la fourniture de la puissance maximale qu'il pourrait produire.

$$\mu_{mpp} = \frac{P_{in}}{P_{max}} \quad (6)$$

Les performances d'une commande MPPT ne se resument pas a ce seul parametre (MPPT). D'autres criteres, presentes dans la suite du document, tels que le temps de reponse et son aptitude a fonctionner sur une large gamme de puissance est importante pour evaluer les qualites de ce type de commande [16].

Simplicité et Coût

En plus de ses performances theoriques, il est important de connaitre le niveau de complexite de l'algorithme entrainant des difficultes d'implementation et des pertes liees directement au nombre De calculs necessaires. En resume, une commande MPPT doit avoir un niveau de simplicité important favorisant une faible consommation et donc un cout de developpement raisonnable pour que sa presence compense le surcout genere.

En effet, il ne faut pas oublier que dans un contexte energetique fortement concurrentiel, le fait d'insérer un étage d'adaptation avec une commande MPPT doit avoir un gain du point de vue energetique recouvrant le surplus économique. Sinon, cette solution ne sera jamais viable du point de vue industriel. Dans le cas contraire, la commande aussi performante qu'elle soit en termes de rendement, presente trop de contraintes pour etre choisie pour ce type d'application [16].

Réponse dynamique

Une commande MPPT doit avoir un bon comportement en dynamique afin de pouvoir piloter l'étage d'adaptation et assurer que la recherche du nouveau PPM, suite aux changements d'eclaircement ou de temperature, soit faite le plus rapidement possible [13].

Flexibilité

Une commande MPPT doit etre precise et stable quelles que soient ses conditions d'utilisation. C'est-a-dire qu'elle ne doit pas etre concue pour fonctionner pour un seul type de Panneau. Elle doit etre la plus universelle possible, capable de fonctionner avec des panneaux de differentes technologies sans trop de modifications, tout en gardant le meme taux de precision et de robustesse [13].

Compétitive sur une large gamme de puissance

Par définition, une commande MPPT, utilisée dans des applications photovoltaïques, est supposée traquer le PPM généré par un module PV, quel que soit le niveau d'ensoleillement. La commande MPPT est dite compétitive si le PPM est atteint avec une erreur statique, correspondant à la position du point de fonctionnement par rapport au PPM, relativement faible sur une large gamme de puissance [13].

Conclusions générales et perspectives

Les travaux présentés dans ce sujet concernent principalement la problématique de l'effet de l'ombrage sur la courbe puissance-tension (P-V) d'un système photovoltaïque. Une attention toute particulière doit être portée sur ce problème sous peine d'une forte réduction de la productivité des systèmes rendant moins attractif le photovoltaïque d'un point de vue économique. L'objectif était de proposer, à travers une étude comparative, un algorithme MPPT qui permet de réduire au mieux les pertes dues à l'ombrage.

Avant d'aborder la problématique, l'algorithme d'optimisation non linéaire de Levenberg-Marquard a été adopté pour la modélisation du champ photovoltaïque en identifiant, dans un premier temps, tous les paramètres du module PV utilisé. Une fois la partie générateur PV terminée, nous avons abordé l'étage de conversion DC/DC (Hacheur Boost).

Puis, nous avons étudié l'impact de quelques défauts les plus fréquents sur les performances globales d'une installation photovoltaïque. L'analyse a montré que même en fonctionnement sain, certains algorithmes MPPT présentent un dysfonctionnement quant à la poursuite du point de puissance maximale global. À partir de là, une étude comparative entre les différentes techniques MPPT a été réalisée afin de tester leur capacité à traquer le MPP. La technique d'optimisation par essaim de particules (PSO) a donné des résultats très satisfaisants dans le cas spécifique où la courbe caractéristique de puissance présente des multi pics.

Ce mémoire représentera une base pour d'éventuels travaux futurs. On propose les perspectives suivantes :

1. Implémentation de l'algorithme MPPT basé sur le PSO sur un banc d'essai.
2. Faire une étude afin de trouver la meilleure configuration des diodes bypass concernant leur positionnement dans les cellules photovoltaïques afin de réduire au mieux les pertes de puissance dues à l'ombrage.

Références bibliographiques

- [1] Carrasco, J.M.; Franquelo, L.G.; Bialasiewicz, J.T.; Galvan, E.; Guisado, R.C.P.; Prats, Ma.A.M.; Leon, J.I.; Moreno-Alfonso, N.; "Power-Electronic Systems for the Grid Integration of Renewable Energy Sources : A Survey", IEEE Trans. on Ind. Electron., vol.53, issue 4, pp. 1002 – 1016, June 2006
- [2] S. Vergura, G. Acciani, V. Amoruso, G. Patrono, F. Vacca, "Descriptive and Inferential Statistics for Supervising and Monitoring the Operation of PV Plants", IEEE Trans on INDUSTRIAL Electronics, 2009, pp. 4456-4464.
- [3] Edmundo Romàno, Ricardo Alonso, Pedro Ibanez et al. "Intelligent PV module for grid-connected PV systems", in IEEE Trans. On Industrial Electronics , vol. 53, No. 3, Aug. 2006, pp. 1066–1073.
- [4] <http://www.ncdc.noaa.gov/cdo-web/http://www.dicat.unige.it/meteo/http://cli-sun.casaccia.enea.it/Pagine/Index.htm>
- [5] Suri, M.; Huld, T.; Dunlop, E.D.; Cebecauer, T.; "Geographic Aspects of Photovoltaics in Europe : Contribution of the PVGIS Website" IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, vol. 1, issue 1, pp. 34 – 41, March 2008
- [6] CEI-IEC International Standard 61724- Photovoltaic system performance monitoring- Guidelines for measurement, data exchange and analysis, Ed. April 1998.
- [7] S. Vergura, E. Natangelo "Labview-Matlab integration for analyzing energy data of PV plants", ICREPQ 2010, March, 23-25, 2010, Granada, Spain (ISBN 978-84-613-7543-1).
- [8] S. Vergura, E. Natangelo, "Labview Interface for Data Analysis of PV Plants", IEEE-ICCEP 2009, 9-11 June, 2009, Capri, Italy, pp. 236-241.
- [9] C.-H. Li, X.-J. Zhu, G.-Y. Cao, S. Sui and M.-R. Hu, "Dynamic modeling and sizing optimization of stand-alone photovoltaic power systems using hybrid energy storage technology," Renewable Energy, vol. 34, pp. 815-826, 2009.
- [10] N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo and M. Vitelli, "Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method," Power Electronics, IEEE Transactions on, vol. 20, pp. 963-973, 2005.

- [11] Ch. Hua, J. Lin, Ch. Shen, "Implementation of a DSP-controlled PV system with peak power tracking", *IEEE Trans. Ind. Electron.* 45(1)(1998), pp. 99–107.
- [12] M.Hatti, "Contrôleur Flou pour la Poursuite du Point de Puissance Maximum d'un Système Photovoltaïque". *JCGE'08 LYON*, 16 et 17 décembre 2008.
- [13] L.A. Zadeh, "Information and Control, Fuzzy Sets", vol 8, pp 338-353, 1965.
- [14] H. Buhler, "Réglage Par Logique Floue", Presses Polytechniques et Universitaires Romandes CH-1015 Lausanne. 1994.
- [15] E. Ortiz-Rivera and F. Peng, "Analytical model for a photovoltaic module using the electrical characteristics provided by the manufacturer data sheet", in *Power Electronics Specialists Conference, 2005. PESC '05. IEEE 36th*, June 2005, pp. 2087–2091.
- [16] A. Cid bastor, "conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques", Thèse de doctorat l'institut national des sciences appliquées de Toulouse 2006.