



Le 4^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et
Renouvelables
The 4th International Seminar on New and Renewable
Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Ghardaïa - Algeria 24 - 25 Octobre 2016



La Commande MPPT Basée sur les Algorithmes Intelligents Destinée aux Applications Photovoltaïques : Etude comparative et implémentation sur FPGA

GUELLAL Amar¹, MOKHTARI Abderrahmane², KHERCHI Mohamed¹

¹Centre de Développement des Energies Renouvelables, CDER,
BP 62 Route de l'Observatoire, Bouzaréah, 16340, Algiers, Algeria

²Département Électronique, Université Aamr Telidji-LAGHOUAT,
Laghouat 03000, Algérie

Abstract – Ce travail s'intéresse à l'étude et comparaison des différentes techniques de poursuite du point de puissance maximale (MPPT) des générateurs photovoltaïques (P&O, logique floue, réseaux de neurones artificiel). Des simulations effectuées sous MATLAB et SIMULINK permettent de tirer les avantages et les inconvénients de chaque technique. La méthode MPPT basée sur la théorie de réseau de neurones artificiel (ANN) sera implémentée sur le circuit FPGA en utilisant la carte de développement SPARTAN 3E.

Keywords: MPPT, P&O, logique floue, réseaux de neurones, FPGA.

I. Introduction

La demande sur l'énergie électrique ne cesse d'augmenter ces dernières années, dans ce sens il y a beaucoup de sources pour la produire mais il y a aussi des contraintes liées à sa production, tels que l'effet de pollution et de réchauffement climatique global...etc. Ces contraintes conduisent les recherches vers le développement des sources d'énergie renouvelables et non polluantes ; dont l'énergie solaire photovoltaïque représente certainement l'un des sources d'énergie renouvelable la plus adéquate [1]. Les panneaux solaires, bien qu'ils soient en plus performants, ont des rendements qui restent assez faibles. C'est pourquoi il faut exploiter le maximum de puissances qu'ils peuvent générer en réduisant au maximum les pertes d'énergie. Une caractéristique importante de ces panneaux est que la puissance maximale disponible est fournie seulement en un seul point de fonctionnement appelé le point de puissance maximale (MPP), définie par une tension et un courant donnés ; ce point se déplace en fonction des conditions météorologiques (ensoleillement, température, etc.). Extraire le maximum de puissance nécessite donc un mécanisme de poursuite de ce point qu'on appelle MPP Tracker (MPPT) [2-5].

Le but de cet article consiste de part à étudier trois commandes MPPT (P and O, floue, neuronal), d'autre

part, à implémenter la méthode MPPT basée sur la théorie de réseau de neurones artificiel (ANN) dans un circuit FPGA.

II. Poursuite Du Point De Puissance Maximal (MPPT)

Cette méthode permet au générateur PV de travailler à sa puissance maximale quel que soit les conditions météorologiques d'irradiations et de température. On utilise le hacheur Buck comme interface de puissance à contrôler par le régulateur MPPT, afin d'adapter la tension de sortie du hacheur à la tension requise par la charge.

A partir de cette règle et selon le type de contrôleur, on peut raisonner sur plusieurs et différentes méthodes, afin d'extraire le maximum de puissance d'un panneau solaire [2]. Plusieurs méthodes de poursuite du PPM ont été proposées, mais la plus en vue est le fameux algorithme P&O qui prédomine.

Dans cet article on fait l'étude et l'analyse de trois méthode MPPT ; P&O, MPPT basé sur la logique flou et MPPT basé sur les réseaux de neurones artificiels.

II.1. Méthode Perturbation et Observation P&O

1- Introduction

Comme son nom l'indique il est basé sur la perturbation du système à travers l'augmentation ou la diminution de



**Le 4^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et
Renouvelables**
**The 4th International Seminar on New and Renewable
Energies**

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Ghardaïa - Algérie 24 - 25 Octobre 2016



Vref. En agissant directement sur le rapport cyclique du convertisseur DC-DC et on observe la puissance de sortie du panneau, si la valeur de la puissance actuelle P_k du panneau est supérieure à la valeur précédente P_{k-1} alors on garde la même direction de perturbation sinon on inverse la perturbation du cycle précédent [6] tel qu'il est illustrer dans Figure. 1.

2- Le Fonctionnement de l'Algorithme P&O

D'abord la tension V et le courant I sont mesurés pour calculer la puissance P_k . Cette valeur P_k est comparée à la valeur de la puissance obtenue durant la dernière mesure P_{k-1} . Si la puissance fournie par le panneau a augmenté depuis la dernière mesure, l'incrémementation ou décrémentation du rapport cyclique d continuera dans le même sens que lors du dernier cycle et ceci est fait par le test sur dV . Si $dV > 0$ cela veut dire qu'on a incrémenté V durant le dernier cycle c'est-à-dire $D_{k+1} = D_k + \Delta D$ Si $dV < 0$ cela veut dire qu'on a décrémenté V durant le dernier cycle c'est-à-dire qu'on va mettre $D_{k+1} = D_k - \Delta D$. Donc on termine dans le chemin où P continue à augmenter. Si la puissance fournie par le panneau a diminué depuis la dernière mesure, l'incrémementation ou la décrémentation du rapport cyclique d sera en sens inverse par rapport au dernier cycle et ceci est fait aussi par le test sur dV . Avec cet algorithme la tension de fonctionnement V est perturbée à chaque cycle. Dès que le MPP sera atteint, V oscillera autour du point de fonctionnement idéal V_{mp} . Mais ceci cause des pertes de puissances qui dépendent de la largeur du pas d'une simple perturbation ΔD . Si la largeur du pas est grande, l'algorithme de MPPT répondra rapidement aux changements soudains mais occasionnera des pertes dans des conditions changeantes lentement et dans les états stables. Si la largeur du pas est très petite les pertes dans les états stables ou les conditions changeantes lentement seront réduites, mais le système aura une réponse lente aux changements rapides de la température ou d'insolation. La valeur pour la largeur idéale du pas du système ne peut être déterminée qu'expérimentalement où par simulation, est ainsi satisfaire un compromis entre la réponse rapide et perte de puissance dans les états stables.

II.2. MPPT À Base De Logique Floue

La logique floue a fait son apparition en 1965 avec les travaux de L. Zadeh. La commande floue a les mêmes objectifs de régulation et de poursuite qu'une commande réalisée en automatique classique. Cependant, il est possible de se passer d'un modèle explicite du procédé à commander. C'est le plus souvent, le savoir-faire d'un expert ou d'opérateurs qualifiés manipulant le procédé qui est pris en compte pour l'élaboration de la loi de commande.

La poursuite du point MPP par la logique floue est divisée en deux phases, la première sera la recherche rapide, avec un pas important, la seconde sera une phase fine avec un pas très petit, ce qui assure une stabilité du système en diminuant les oscillations autour du point MPP. Le contrôleur flou comporte les trois blocs Suivants :

Fuzzification des variables d'entrées par l'utilisation des fonctions trapèze et triangulaire, ensuite l'inférence où ces variables fuzzifiées sont comparées avec des ensembles prédéfinis pour déterminer la réponse appropriée. Et enfin la défuzzification pour convertir les sous-ensembles fuzzifiés en valeurs en utilisant la défuzzification centroïde. La structure de base de notre contrôleur flou est donnée par Figure. 2. Cette figure, montre aussi la configuration du contrôleur flou qui se compose des : Entrées-Sortie d'échelle, fuzzification, décision floue, et la défuzzification. Les facteurs d'échelle : SE, SCE et SdD font changer les valeurs des entrées et de sorties du contrôleur proportionnellement. La sortie dD est déduite par les deux variables E et CE , où cette dernière est dérivée du signal actuel par la division avec le facteur d'échelle correspondant.

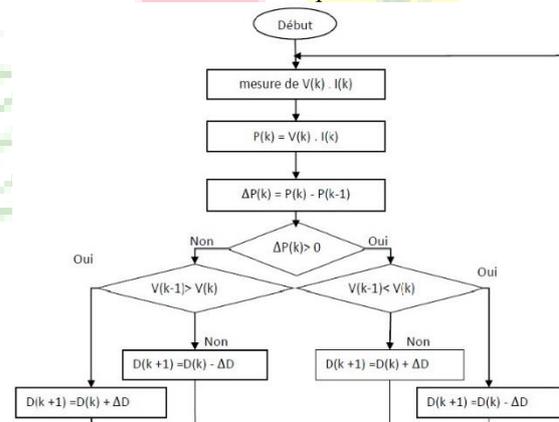


Figure. 1 Organigramme de l'algorithme perturbation et observation

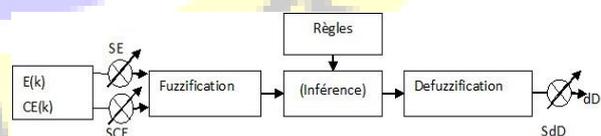


Figure. 2 Structure de base d'un contrôleur MPPT flou

Les variables E et CE sont exprimées comme suit :

$$E(k) = \frac{P_{pv}(k) - P_{pv}(k-1)}{V_{pv}(k) - V_{pv}(k-1)} \quad (2)$$

$$CE(k) = E_{pv}(k) - E_{pv}(k-1) \quad (3)$$



**Le 4^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et
Renouvelables**
**The 4th International Seminar on New and Renewable
Energies**

**Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Ghardaïa - Algérie 24 - 25 Octobre 2016**



Où $P_{ph}(k)$ et $V_{ph}(k)$ sont respectivement : la puissance et la tension du générateur photovoltaïque.

La variable linguistique assignée à dD , dépend des différentes combinaisons entre $E(k)$ et $CE(k)$. Les variations du rapport cyclique dépendent de la différence de position entre le point de fonctionnement et un MPP. Ainsi, dès que ce dernier s'approche du MPP, les incréments appliqués à dD s'affinent jusqu'à atteindre le MPP.

On prend comme exemple de règle de commande la Table 1 ci-dessous, nous avons choisi la méthode de Mamdani pour l'inférence floue avec opération MAX-MIN, qui consiste à utiliser l'opérateur MIN pour le ET et l'opérateur MAX pour le OU.

II.3. MPPT A BASE DE RESEAUX DE NEURONES ARTIFICIELLE

Un réseau de neurones artificiel est un modèle de calcul dont la conception est très schématiquement inspiré du fonctionnement de vrais neurones humains. Pour la commande MPPT neuronale, les variables d'entrées sont des données atmosphériques qui sont la température (T) et l'éclairement (E), avec la tension de la batterie (V_b), tel que la sortie est le rapport cyclique (D) permettant de commander le convertisseur pour fonctionner le plus souvent possible au MPP Figure. 3.

TABLE I
TABLE DE VERITE POUR UNE COMMANDE LOGIQUE FLOUE DESTINE A
UN HACHEUR DEVOLTEUR

E EC	NG	NP	ZE	PP	PG
NG	PG	PG	PG	PG	PG
NP	PP	PP	PP	PP	PP
ZE	NP	ZE	ZE	ZE	PP
PP	NG	NP	PP	ZE	NG
PG	NG	NG	NG	NG	NG

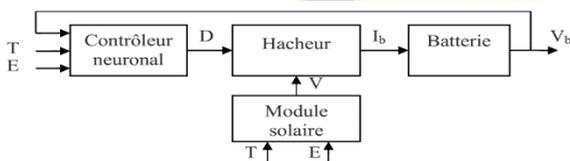


Figure. 3 Structure du système commandé par réseau de neurones artificielle

1- L'Apprentissage du Contrôleur Neuronal

Le bon fonctionnement d'un contrôleur neuronal est basé sur le bon apprentissage des neurones artificiels. Après avoir dressé la base de données composée de

l'éclairement, la température comme entrées (E,T), avec le rapport cyclique désiré comme une sortie (D_{des}), notons que tout contrôleur entraîné sur cette base de données, ne peut être utile dans le contrôle MPPT, que pour les modules PV ayants les mêmes caractéristiques.

2- Choix de la Structure des Réseaux de Neurones

Un problème que l'on doit impérativement résoudre avant d'utiliser un réseau de neurones est la définition de la structure du réseau. Dans le cadre de notre travail on a choisi une structure à trois couches : une couche d'entrée qu'il contient seulement deux neurones l'un pour acquérir l'éclairement et l'autre pour acquérir la température, une couche caché contenue trois neurone et une couche de sortie a un neurone.

III. RESULTATS DE SIMULATION ET COMMENTAIRES

Dans cette section, on commence par évaluer le système solaire sans régulateur par simulation avec l'outil de simulation MATLAB/Simulink. Ensuite, les trois méthodes de poursuite MPPT sont étudiées ; la méthode (P&O), la méthode utilisant le contrôleur floue et le réseau de neurones. Les trois systèmes sont simulés sous les conditions environnementales stables et de nombreux changements des conditions météorologiques.

III.1. Fonctionnement sous des Conditions Constantes

Dans ce test la température et l'ensoleillement sont maintenus constants. On prend les valeurs des conditions standards : la température $T = 25^\circ\text{C}$ et l'ensoleillement = $1000\text{W}/\text{m}^2$. Le but de ces simulations est de visualiser le décalage du point de fonctionnement par rapport au point MPP. Il sert aussi à évaluer les pertes dues aux oscillations autour de ce point.

III.2. Comportement du Système Face à un Changement de l'Eclairement et de température

Afin d'évaluer le temps de réponse des trois mécanismes de poursuite, ces derniers sont soumis à des variations des conditions météorologiques. Pour voir le comportement du système face aux changements climatiques on va lui faire subir les tests suivants : d'abord on maintient une température constante (25°C) et on varie l'éclairement solaire à une valeur fixe ($1000\text{W}/\text{m}^2$) et on varie la valeur de la température.

Figure. 4 montrent que le phénomène d'oscillation apparait au niveau de la commande MPPT P&O, par contre la commande neuronale et à logique floue



Le 4^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et
Renouvelables
The 4th International Seminar on New and Renewable
Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Ghardaïa - Algeria 24 - 25 Octobre 2016



réagissent avec finesse en déminant toute oscillation possible.

Une diminution rapide de la température de 50°C à 25°C durant un temps de 30 secondes a été effectuée et les résultats sont présentés sur la Figure.5. Cette diminution rapide produit une augmentation de la puissance mais avec une poursuite qui est parfaite dans la zone transitoire pour le contrôleur MPPT Neuronal.

Différents résultats de sortie du générateur photovoltaïque et de la charge, pour différentes valeurs d'éclairement et de température, ont été obtenus en simulant les contrôleurs MPPT flou, neuronal et P&O. Ces résultats confirment le bon fonctionnement du contrôleur (P&O). Le contrôleur flou présente un temps de réponse rapide et une erreur à l'état permanent très faible, et qu'il est robuste aux différentes variations des conditions atmosphériques. La poursuite du point maximum avec le contrôleur MPPT neuronal a un taux d'ondulation de la tension et de la puissance minimale face aux différentes variations, les pertes de puissance sont moindres dans le régime transitoire.

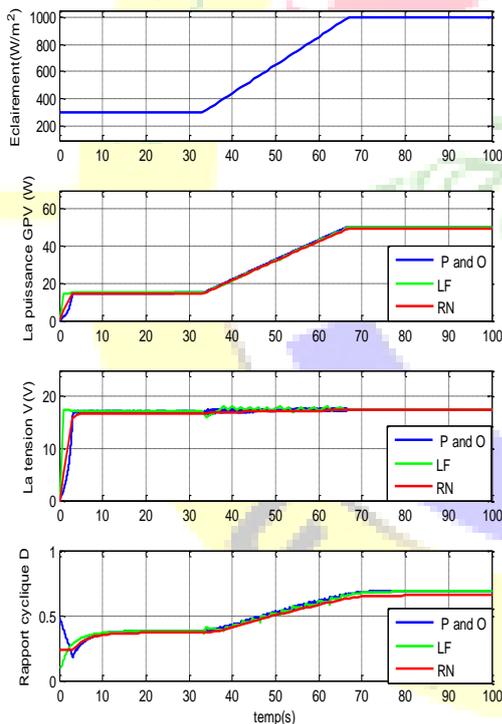


Figure. 4 Réponses des trois contrôleurs pour une augmentation d'ensoleillement à température constante $T = 25^{\circ}\text{C}$

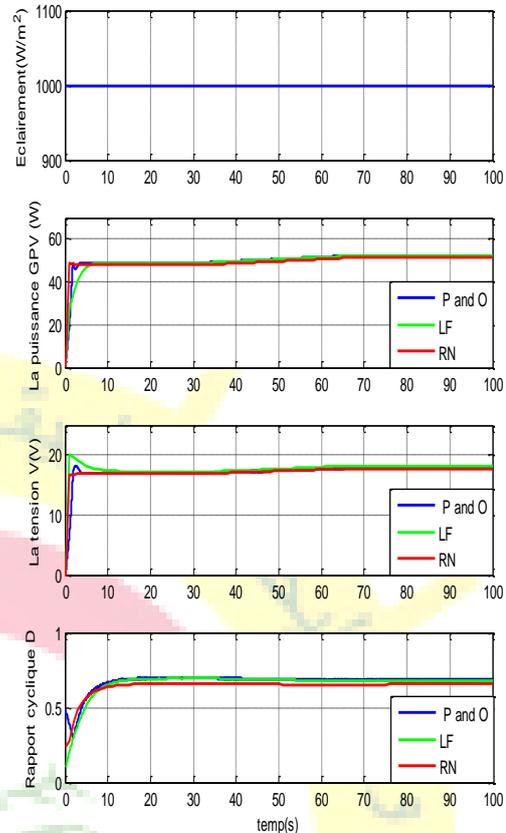


Figure. 5 Réponses des trois contrôleurs pour une augmentation de température à enssoleillement constant de 100 W/m^2

IV. Développement de l'Algorithme MPPT sur La Carte FPGA

Les FPGA (Field Programmable Gate Array) sont des circuits à architecture programmable et configurables qui ont été inventés par la société XILINX en 1985. Ils permettent d'implanter physiquement, par simple instructions, n'importe quelle fonction logique. Un autre avantage de ces circuits est leur grande souplesse qui permet de les réutiliser à volonté dans des algorithmes différents en un temps très court [2]. L'objet de cette partie est l'implémentation sur un circuit FPGA, en utilisant la carte de développement SPARTAN 3E [7-8], de la méthode MPPT neuronale déjà citée au-dessus.

IV.1. MPPT à Base de Réseaux de Neurones sous FPGA

La conception est écrite en VHDL conformément cette structure en divisant en quatre blocs principaux comme montre Figure. 5.



Le 4^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et
Renouvelables
The 4th International Seminar on New and Renewable
Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Ghardaïa - Algeria 24 - 25 Octobre 2016

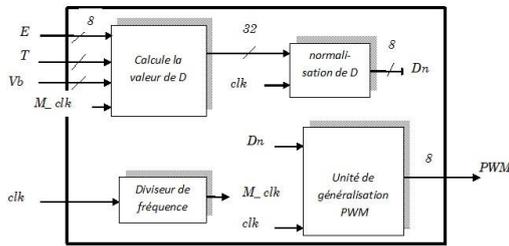


Figure. 5 Schéma synoptique de contrôleur MPPT neuronal sur FPGA

- Diviseur de fréquence pour la synchronisation du système à des fréquences convenables,
- Neuronale-Network il se compose de l'algorithme neurone avec : la normalisation de chaque entrée, les couches de réseau qui propagent les signaux d'entrées vers la sortie pour calculer le rapport cyclique, le codage de la fonction sigmoïde,
- Normalisation de D, c'est la normalisation de rapport cyclique,
- Unité de génération PWM, elle génère le signal de commande rapport cyclique D, qui peut prendre les valeurs 1 pour Ton ou 0 pour Toff avec la période T désirée ($T_{on} + T_{off} = T$).

Le schéma ci-dessous, Figure. 6, montre le fonctionnement de notre contrôleur neuronal. On remarque que la réponse du contrôleur à des variations des entrées est instantanée.

On donne quelques résultats des tests effectués dans le laboratoire pour des valeurs près de la base de données, et comparant la valeur de D calculée avec la valeur de D désirée. Ces tests donnent des bons résultats.

- Pour $T = 25^{\circ}\text{C}$, $S = 800\text{W}/\text{m}^2$, $V_b = 10\text{V}$, $D_{des} = 60.6\%$, $D_{cal} = 61.2\%$,
- Pour $T = 25^{\circ}\text{C}$, $S = 800\text{W}/\text{m}^2$, $V_b = 11.2\text{V}$, $D_{des} = 67.7\%$, $D_{cal} = 67.9\%$,
- Pour $T = 25^{\circ}\text{C}$, $S = 100\text{W}/\text{m}^2$, $V_b = 10\text{V}$, $D_{des} = 55\%$, $D_{cal} = 54.8\%$,

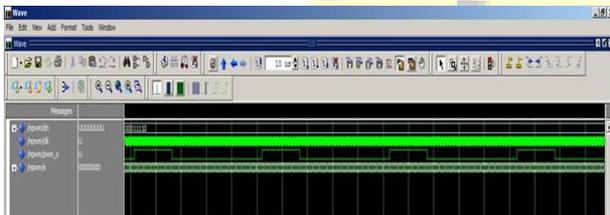


Figure. 7 Résultat de simulation du contrôleur neuronale implémenté sur FPGA

V. CONCLUSION

Les simulations effectuées par l'utilisation des techniques P&O, logique floue, réseau de neurones artificielle sous différents conditions météorologiques ont permis de dire que les résultats obtenus par le contrôleur MPPT Neuronal et MPPT Flou sont meilleurs que celle du contrôleur MPPT P&O, du point de vue robustesse et rapidité vis-à-vis des changements des paramètres météorologiques. La puissance de charge suit bien la puissance du GPV quelques soient les variations des paramètres météorologiques pour les trois contrôleurs. La méthode P&O, bien qu'elle soit efficace en termes de poursuite du PPM, présente des pertes de puissance dues à l'oscillation du point de fonctionnement du système autour de sa position optimale et un régime transitoire long. La poursuite du point maximum avec le contrôleur MPPT neuronal a un taux d'ondulation de la tension et de la puissance minimale face aux différentes variations, les pertes de puissance sont moindres dans le régime transitoire ; ce qui implique une amélioration du rendement du système. On a vu également que le contrôleur MPPT Flou a une vitesse de suivre plus rapide mais il provoque aussi des oscillations importantes au démarrage et à chaque phase de transition.

Les résultats de l'implémentation de la commande MPPT neuronale sur un circuit FPGA montre que les valeurs de rapport cyclique générées par le circuit sont très proches des valeurs calculées par simulation avec une réponse instantanée.

References

- [1] REN21, Renewable Energy Policy Network, Renewable. Global status report. Paris: REN21 Secretariat; 2010. www.map.ren21.net/. 2010.
- [2] Adel Mellit, Soteris A. Kalogirou "MPPT-based artificial intelligence techniques for photovoltaic systems and its implementation into field programmable gate array chips: Review of current status and future perspectives", Energy Volume 70, 1 June 2014, Pages 1–21
- [3] D.P. Hohm, M.E. Ropp "Comparative study of maximum power point tracking algorithms" Prog Photovolt Res Appl, 11 (2003), pp. 47–62
- [4] V. Salas, E. Olias, A. Barrado, A. Lazaro "Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems" Sol Energy Mater Sol Cells, 90 (2006), pp. 1555–1578
- [5] Chekired, F., Larbes, C., Mellit, A., 2012. Comparative study between two intelligent MPPT-controllers implemented on FPGA: application for photovoltaic systems. Int. J. Sustain. Energy, 742–896.
- [6] Dezso Sera, Laszlo Mathe, Tamas Kerekes, Sergiu Viorel Spataru and Remus Teodorescu, " On the Perturb-and-Observe and Incremental Conductance MPPT Methods for PV Systems" IEEE JOURNAL OF PHOTOVOLTAICS, VOL. 3, NO. 3, JULY 2013
- [7] Spartan-3E FPGA Family, Data Sheet, www.xilinx.com/support/documentation/data_sheets/ds312.pdf, July 2013.
- [8] Spartan-3E FPGA Starter Kit Board User Guide, www.xilinx.com/support/documentation/boards_and_kits/ug230.pdf, 2011