MODÉLISATION ET CONTRÔLE D'UN SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE CONNECTÉ À UN RÉSEAU

BOTORONONO P.[1], RAFANOTSIMIVA L. F.[2], RAKOTOARISOA A. J. C.[3], RAZAFINJAKA N. J. [3],

1: Ecole Doctorale Thématique Energies Renouvelables et Environnement, Université d'Antsiranana
2: Groupe de Recherche pour le Développement Durable de Diégo-Suarez, Institut Supérieur de Technologie D'Antsiranana
3: Ecole Supérieure Polytechnique, Université d'Antsiranana
parfaitchu@gmail.com

Résumé

Cet article présente l'analyse, la modélisation et le modèle de contrôle de la partie électrique d'un système de génération photovoltaïque connecté au réseau. Le modèle contient une représentation détaillée des principaux composants du système que sont le panneau solaire et l'onduleur de source de tension à point neutre à plusieurs niveaux neutre fixé côté réseau. Afin d'extraire la quantité maximale de générateur photovoltaïque, nous proposons une méthode de contrôle intelligent pour le suivi du point de puissance maximale (MPPT) d'un système photovoltaïque dans des conditions de température et d'isolation variables. Cette méthode utilise un contrôleur à logique floue. Dans le cadre de nos travaux, nous nous concentrerons sur les onduleurs de tension à trois niveaux de la structure. Ces derniers peuvent augmenter la tension fournie à la charge (réseau) grâce à leur topologie. Ainsi, ils peuvent générer plus de tension sinusoïdale possible et améliorer la distorsion harmonique totale grâce aux niveaux de tension élevés fournis par la structure de ce nouveau convertisseur. L'onduleur d'interface réseau transfère l'énergie tirée du module PV dans le réseau en maintenant une tension continue commune constante. L'approche de contrôle PQ a été présentée pour l'onduleur multiniveau. Les résultats de simulation sous Matlab/Simulink montrent les performances de contrôle et le comportement dynamique d'un système photovoltaïque connecté au réseau.

Mots-clés : système photovoltaïque, réseau de connexion, contrôle intelligent, logique floue

Abstract

This article presents the analysis, modeling and control model of the electrical part of a photovoltaic generation system connected to the network. The model contains a detailed representation of the main system components, the solar panel and the neutral multi-level neutral point voltage source inverter fixed on the grid side. In order to extract the maximum quantity of photovoltaic generator, we propose an intelligent control method for monitoring the maximum power point (MPPT) of a photovoltaic system under variable temperature and insulation conditions. This method uses a fuzzy logic controller. As part of our work, we will focus on voltage inverters at three levels of the structure. These can increase the voltage supplied to the load (network) thanks to their topology. Thus, they can generate as much sinusoidal voltage as possible and improve the total harmonic distortion thanks to the high voltage levels provided by the structure of this new converter. The grid interface inverter transfers the energy drawn from the PV module into the grid while maintaining a constant common DC voltage. The PQ control approach was presented for the multilevel inverter. The simulation results in Matlab / Simulink show the control performance and the dynamic behavior of a photovoltaic system connected to the network.

Keywords: photovoltaic system, connection network, intelligent control, fuzzy logic

Introduction

La production d'électricité photovoltaïque à l'aide de cellules solaires capables de convertir l'énergie solaire directement en électricité CC promet d'être une source d'énergie renouvelable propre et largement applicable. Les chercheurs ont montré un grand intérêt pour la technologie photovoltaïque (PV) au cours des dernières décennies. Les progrès

de l'efficacité des cellules et de la fiabilité du système ont permis une large acceptation de la technologie de l'énergie photovoltaïque pour la production d'électricité autonome et interactive. La croissance durable de la production d'énergie photovoltaïque dans le monde réduit également considérablement la dépendance et la pression sur les combustibles fossiles. La courbe courant de sortie / tension d'une cellule photovoltaïque présente une caractéristique non linéaire. De cette relation non linéaire, on peut observer qu'il existe un point unique, sous un éclairage et une température donnés, auquel la cellule produit une puissance maximale, ce que l'on appelle le point de puissance maximale (MPP). Ce point se produit lorsque le taux de variation de la puissance par rapport à la tension est égal à zéro. La puissance de sortie de la cellule PV varie en fonction principalement du niveau de rayonnement solaire et de la température ambiante correspondant à une condition météorologique spécifique. Le MPP changera avec l'environnement externe de la cellule PV. Une considération importante pour atteindre une efficacité élevée dans un système de production d'énergie PV est de faire correspondre la source PV et l'impédance de charge correctement pour toutes les conditions météorologiques, obtenant ainsi une production d'énergie maximale. Le processus de suivi du point de puissance maximale est appelé suivi du point de puissance maximale (MPPT). En raison d'une caractéristique de tension de courant non linéaire des cellules PV, il est difficile de suivre le MPP. La situation s'aggrave lorsque l'irradiance solaire et / ou la température de fonctionnement des cellules changent. De nombreuses techniques ont été proposées jusqu'à présent pour réaliser le MPP. Ces méthodes MPPT varient en complexité, en capteurs requis, en vitesse de convergence, en coût, en plage d'efficacité, en matériel de mise en œuvre, en popularité et à d'autres égards. Parmi eux, la méthode à tension constante (http://www.renewableenergyworld.com), la méthode à perturbation et observation (P&O) (CIGRE, 2000), la méthode de conductance incrémentielle (CIGRE, 2000), etc. sont les plus courantes. L'algorithme P&O MPPT est principalement utilisé, en raison de sa facilité de mise en œuvre. Un inconvénient de la technique P&O MPPT est qu'à l'état d'équilibre, le point de fonctionnement oscille autour du MPP, ce qui entraîne le gaspillage d'une certaine quantité d'énergie disponible et la précision du système est faible. La méthode de conductance incrémentale a des paramètres de mesure identiques à la méthode P&O. Cependant, à partir de la dérivation de cette méthode, on peut voir qu'elle ne tient pas compte du changement de température. En résumé, dans un environnement en évolution rapide, ces méthodes MPPT conventionnelles rencontrent beaucoup de difficultés pour suivre le MPP réel. Pour surmonter les difficultés des méthodes MPPT couramment utilisées, un contrôleur de logique floue unique est proposé dans cet article. Le contrôleur proposé peut suivre le MPP non seulement avec précision, mais aussi sa réponse dynamique est très rapide en réponse au changement des paramètres environnementaux par rapport aux algorithmes MPPT conventionnels.

ISSN: 2709-8192-1. https://portal.issn.org/resource/ISSN/2709-8192

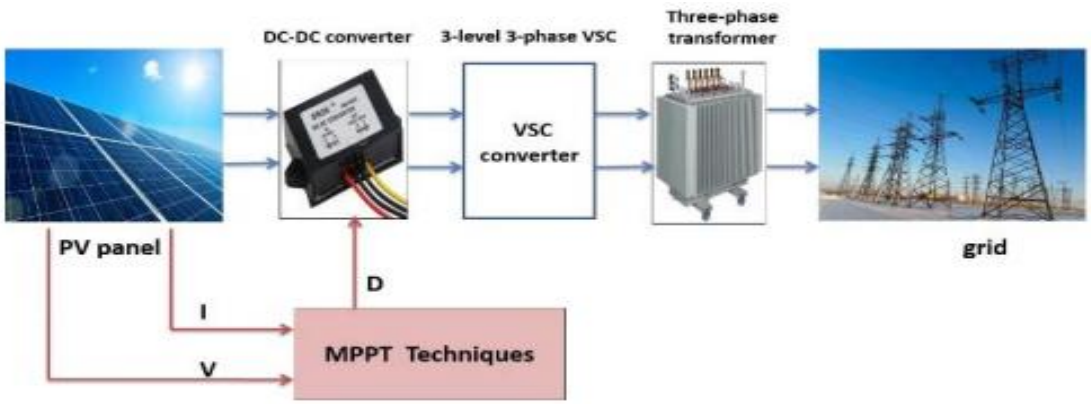


Figure 1 : Structure typique d'un générateur PV connecté au réseau (CIGRE, 2000).

Modélisation du systeme PV

Notre système photovoltaïque se compose de quatre blocs comme indiqué (Fig.1). Le premier bloc est la source d'énergie renouvelable (panneau photovoltaïque). Le deuxième bloc selon les applications est un amplificateur convertisseur DC-DC statique ou un onduleur connecté à un convertisseur de source de tension triphasé à trois niveaux et à un transformateur triphasé (NERC special report, 2010), le troisième bloc représente le réseau électrique tandis que le quatrième est le système de contrôle. Le rôle principal du convertisseur statique est de faire une adaptation d'impédance pour assurer l'énergie maximale indépendamment des variations météorologiques et de la charge.

Modélisation du panneau photovoltaïque

Généralement les modules PV sont connectés en série en parallèle pour augmenter la tension et le courant électrique à la sortie du générateur, les caractéristiques (IV) du générateur PV sont basées sur la cellule élémentaire modélisée par le circuit équivalent (Fig.2) qui se compose d'une source de courant, d'une diode en parallèle, les pertes sont modélisées par deux résistances, une résistance (shunt) Rp, et une résistance Rs (Yazdani & Dash, 2009).

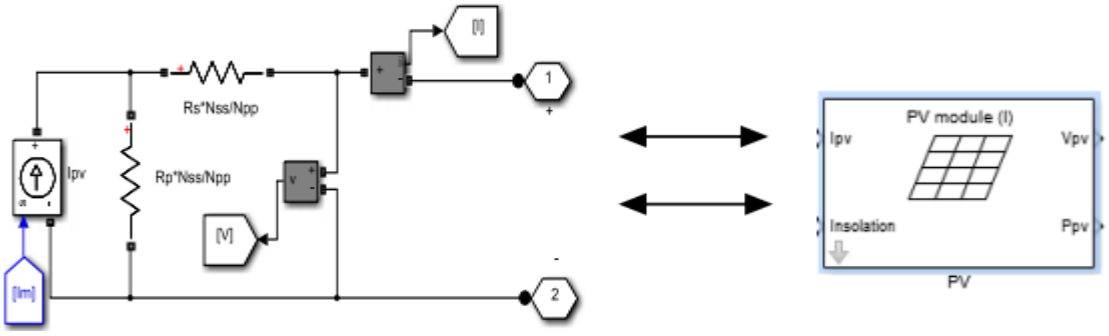


Figure 2 : Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque

Ipv = Iph – Id – Ish (1)

Les expressions résultantes correspondant à une caractéristique courant-tension pour une température et un rayonnement donnés sont:

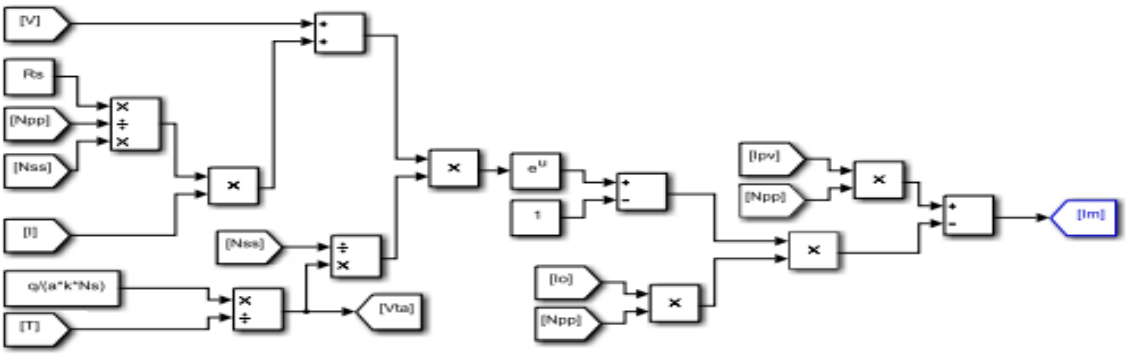
$$I_{pv} = I_{ph} - I_0\left(e^{\frac{q\times(V+I\times R_S)}{K\times T}} - 1\right) - \frac{(V+I\times R_S)}{R_p} \quad (2)$$

Avec

$$I_{ph} = (I_{cc} + K_1 \times \Delta T) \times G / G_n \quad (3)$$

$$I_d = I_o \times N_{pp} \left(e^{\frac{q \times \left(V + I \times R_s \times \left(\frac{N_{ss}}{N_{pp}}\right)\right)}{K \times T}} - 1 \right) \quad (4)$$

Calcul de Im = Ipv. Id (Nss x Npp modules)



$$I_{sh} = \left(\frac{V_{pv} + R_S \times I_{pv}}{R_P}\right) \quad (6)$$

Où Iph, Io, Vpv, VT = (K.T)/q

Notons respectivement le photo-courant, le courant de saturation inverse de la diode, la puissance délivrée par le panneau, et la tension thermique, avec: q la charge d'électrons égale à 1,6.10-19 C, k la constante de Boltzman égale à 1,38. 10-23 J / K, T la température de la cellule qui varie en fonction de l'éclairage et de la température ambiante.

Convertisseur boost DC / DC

Le hacheur ou le convertisseur CC-CC est un dispositif de circuit électronique qui convertit une énergie d'entrée continue d'un niveau de tension donné en une énergie de sortie CC supérieure. Il s'agit d'un type de convertisseur de puissance électrique. Le principe de base du convertisseur DC-DC est illustré dans (Fig.3).

Im = Ipv – Id(Nss/Npp) ***(5)***

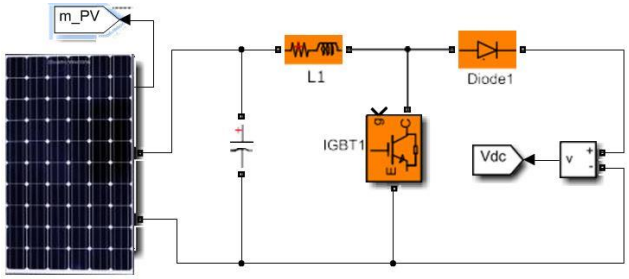


Figure 3 : Modélisation du convertisseur boost

Dans ce travail, la diode est prévue pour protéger le module PV contre les courants négatifs qui pourraient l'endommager. Et le V limite les composantes harmoniques haute fréquence.

Extraction Maximale de Puissance (MPPT)

Principe de fonctionnement du MPPT

La commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) (Kundur et al., 2004) est une commande essentielle pour faire fonctionner un générateur PV afin de toujours produire une puissance maximale.

Pour cette raison, nous présenterons et étudierons les trois algorithmes de contrôle les plus populaires:

- Perturber et observer (P&O)
- Incrément de conductance (INC)
- Logique floue (FLC)

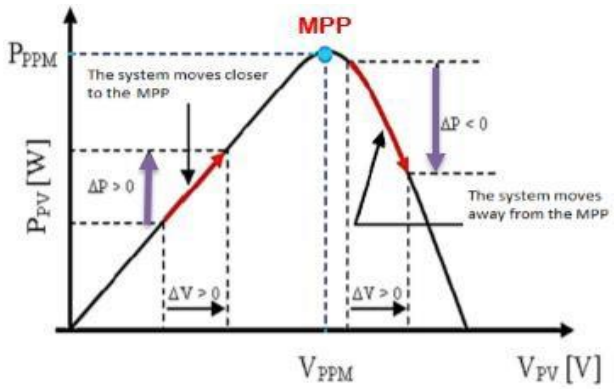


Figure 4 : Principe de fonctionnement du MPPT

Application de l'algorithme "Perturber and Observer" (P&O)

Principe de P&O

C'est le contrôle de suivi Power Point (PPM) le plus largement utilisé, et comme son nom l'indique, il est basé sur la perturbation du système en augmentant ou en diminuant la tension de référence à la suite de cette perturbation, la puissance fournie par le panneau PV au temps k est calculé puis comparé au précédent de l'instant (k-1).

Si la puissance fournie par le panneau a diminué depuis la dernière mesure, l'incrémentation ou la décrémentation du rapport cyclique D sera dans le sens opposé au dernier cycle (Ueda et al., 2009) afin de générer le prochain cycle de perturbation et force le fonctionnement point se déplaçant vers le point de puissance maximale.

Modélisation

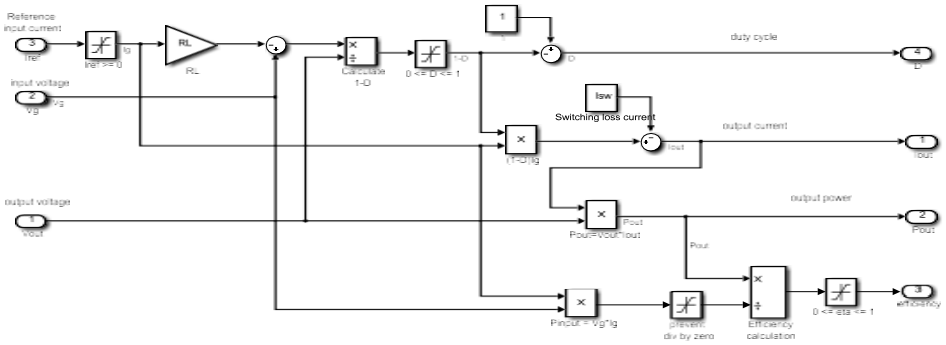


Figure 5 : Schéma fonctionnel de l'algorithme de perturbation P&O et observation

Résultats des simulations:

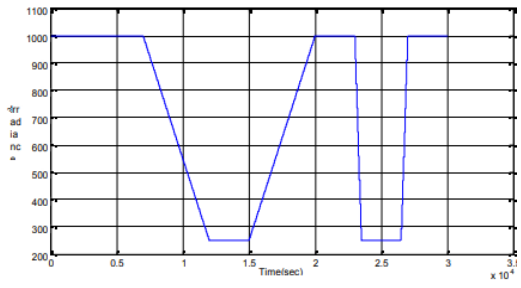


Figure 6 : Courbe de variation de l'irradiation de (P&O, INC, FLC)

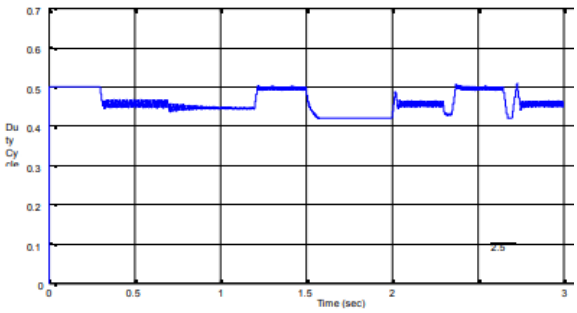


Figure 7 : le rapport cyclique D

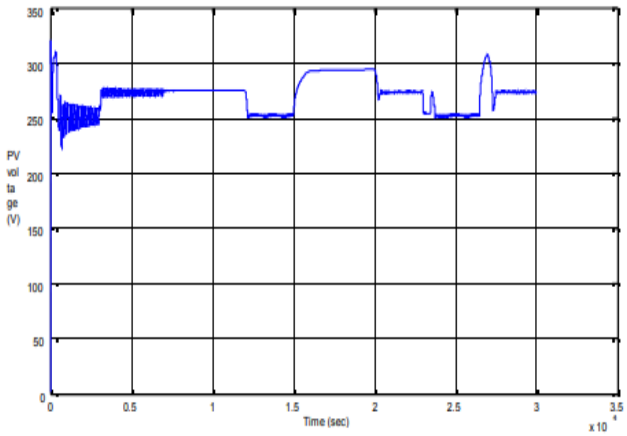


Figure 8 : Courbe de variation de puissance PV

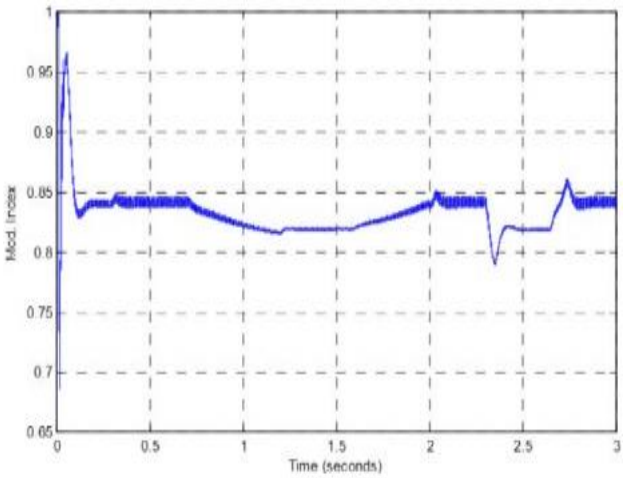


Figure 9 : Modulation d'index en fonction du temps

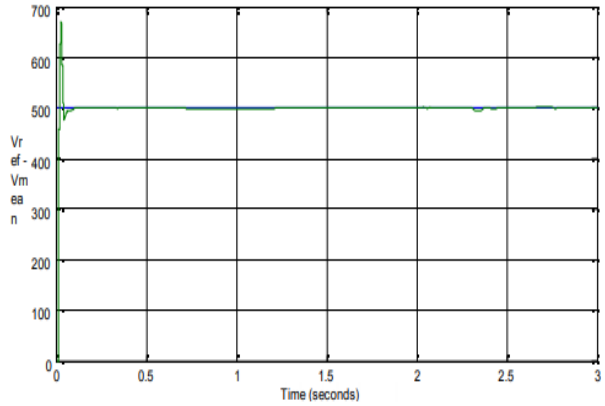


Figure10 : Courbe de variation du Ic mesuré et de référence

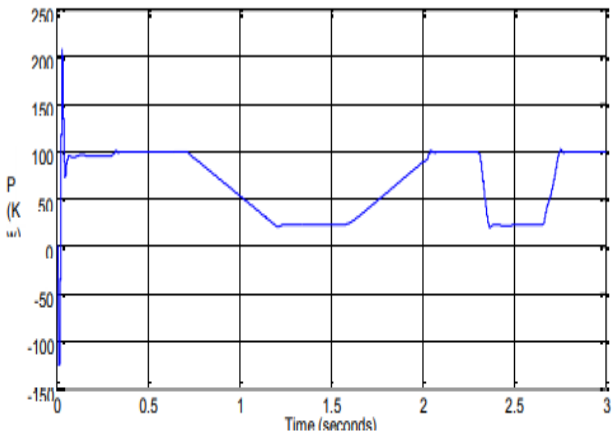


Figure 11 : Variation de la puissance PV

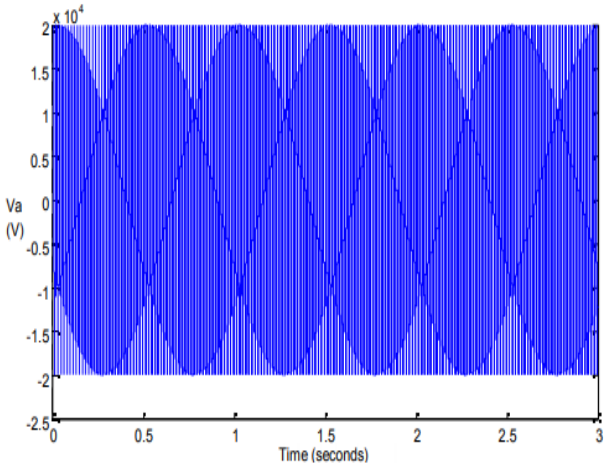


Figure 12 : Courbe de variation de la tension de sortie du réseau électrique

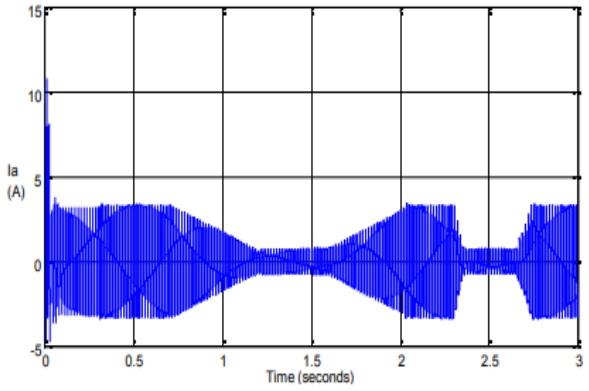


Figure 13 : variation de la puissance de sortie du réseau électrique

Application de l'algorithme Incrément de conductance (INC)

Principe de l'algorithme INC

La puissance maximale peut être suivie en faisant des comparaisons à chaque instant de la valeur de la conductance () avec la valeur d'incrément de conductance (Δ Δ), si l'incrément de conductance (dG) est inférieur à l'opposé de la conductance (-G), le le rapport cyclique est augmenté. En revanche, si l'incrément de conductance est supérieur à l'opposé de la conductance, le rapport cyclique diminue.

Modélisation:

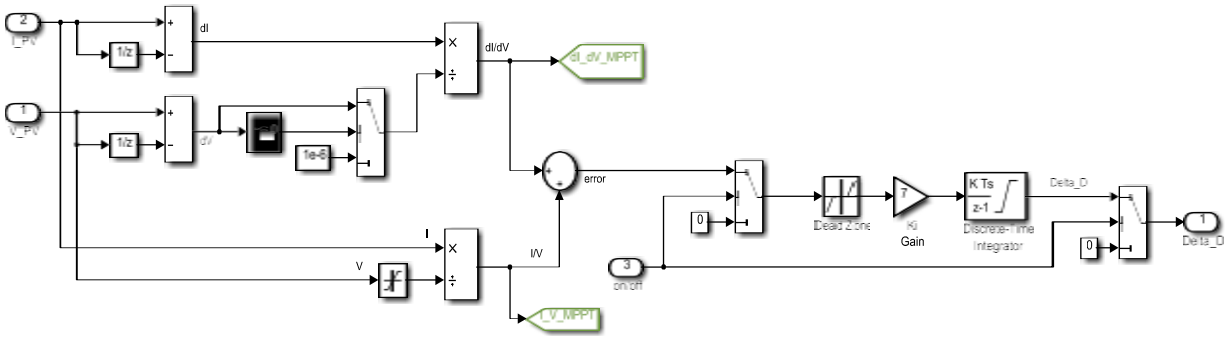


Figure 14 : Schéma fonctionnel de l'incrément de conductance (INC)

Résultats:

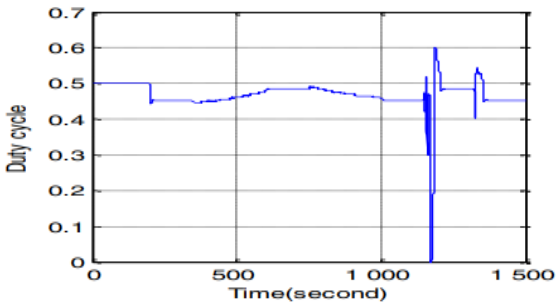


Figure 15 : Le rapport cyclique D

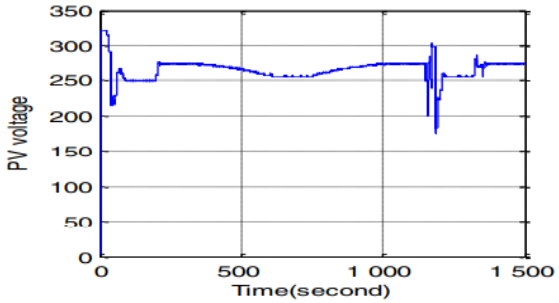


Figure 16 : Courbe de variation de tension PV

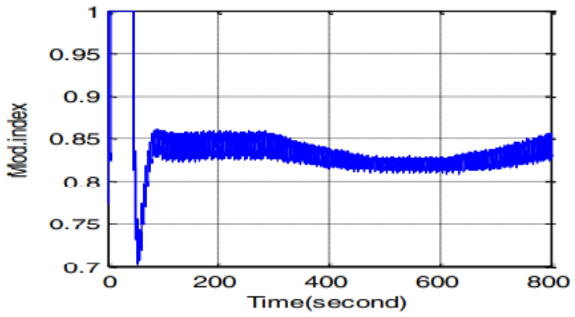


Figure 17 : Modulation d'index en fonction du temps

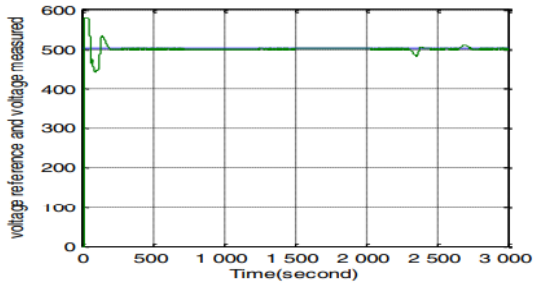


Figure 18 : Courbe de variation des tensions mesurées et de référence du panneau PV

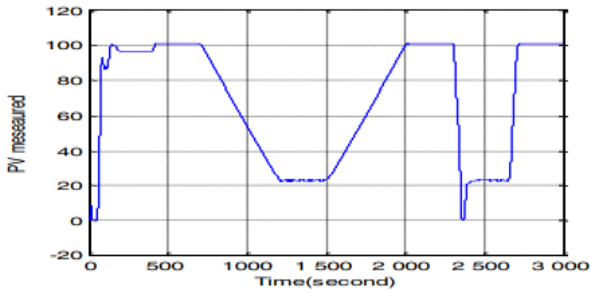


Figure 19 : Variation de la puissance PV

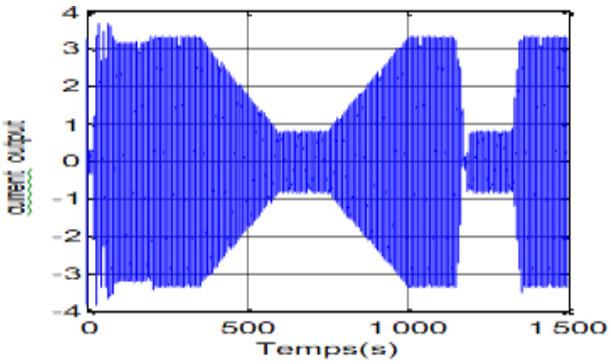


Figure 20 : Variation de la sortie de courant sur le réseau public en fonction du temps

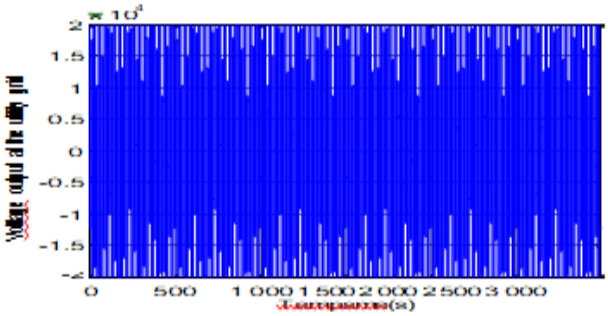
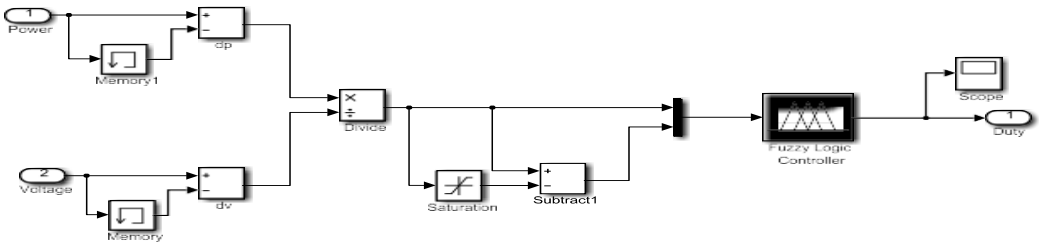


Figure 21 : Variation de la tension de sortie du réseau public en fonction du temps

Modélisation:



Application de la base de logique floue (FLC)

Principe de l'algorithme FLC

Le contrôle à logique floue est un contrôle simple et robuste qui ne nécessite pas une connaissance exacte du modèle mathématique du système, il peut fonctionner avec des valeurs d'entrée inexactes (Muljadi & Ellis, 2010). Récemment, il a été utilisé dans les systèmes de suivi MPPT. La mise en œuvre d'un contrôleur flou réalisé en trois étapes, qui sont: fuzzification, inférence et défuzzification

La fuzzification permet de transformer les variables d'entrée en variables linguistiques ou en variables floues. Les paramètres des entrées E et ΔE sont liés aux équations suivantes:

$$E(n) = \frac{P_{pv}(n) - P_{pv}(n-1)}{V_{pv}(n) - V_{pv}(n-1)}$$

$$\Delta E(n) = E(n) - E(n-1)$$

À l'étape de l'inférence, nous prenons des décisions. En effet, il établit des relations logiques entre les entrées et le paramètre de sortie tout en définissant les règles d'appartenance.

Enfin, en défuzzification, les sous-ensembles flous en sortie sont convertis en une valeur numérique.

Résultats

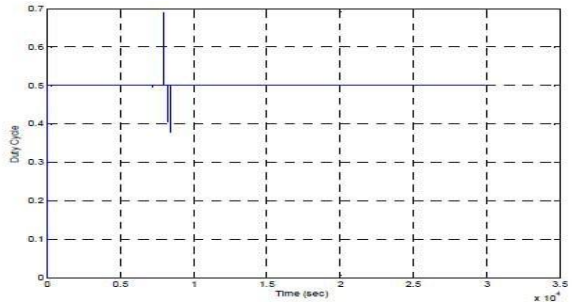


Figure 23 : Le rapport cyclique D

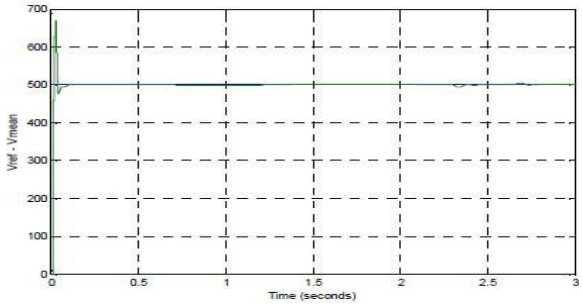


Figure 24 : Courbe de variation des tensions mesurées et de référence du panneau PV

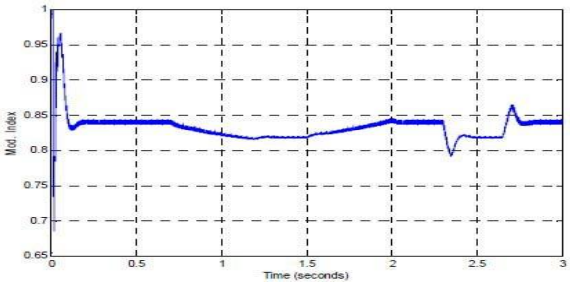


Figure 25.Modulation de l'indice en fonction du temps

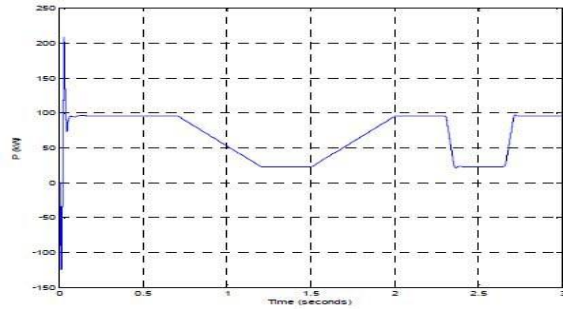


Figure 26 Courbe de variation de la puissance de sortie du réseau électrique

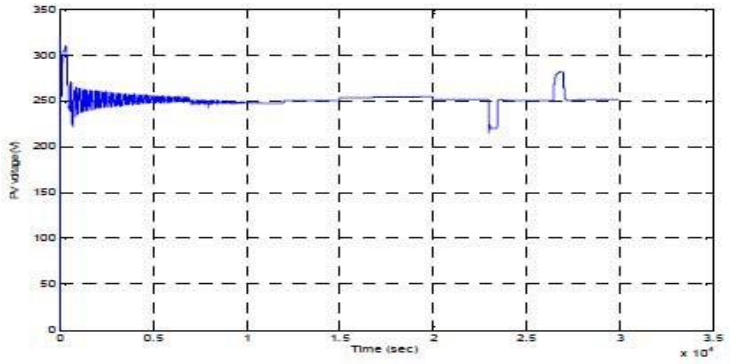


Figure 27 Variation de la tension du panneau PV

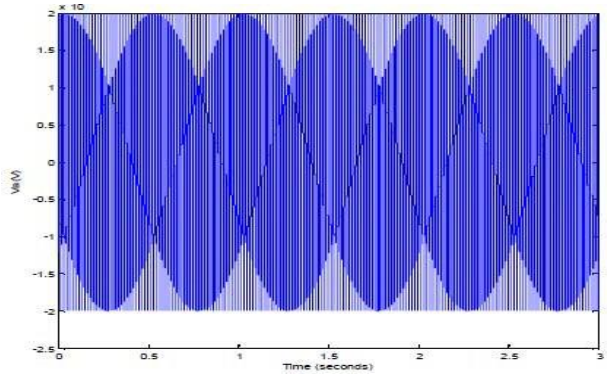


Figure 28 : Courbe de variation de la tension de sortie du réseau électrique

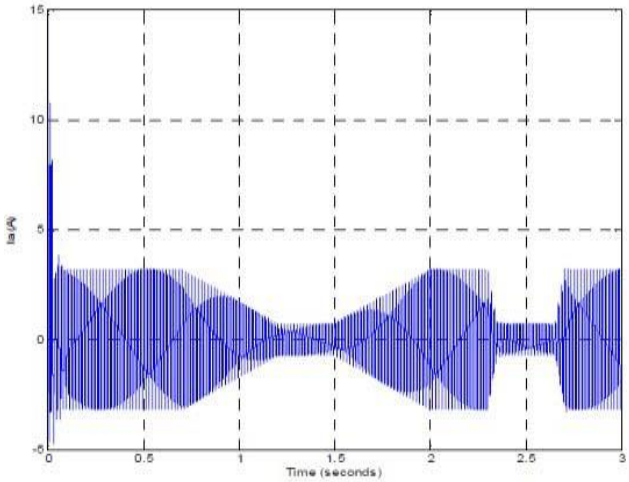


Figure 29 Variation de la puissance de sortie du réseau électrique

Résultats et Discussion

Les valeurs de température et de soleil sont maintenues constantes. Nous considérons les valeurs dans des conditions standard: valeur de température égale à 25 °C et valeur d'ensoleillement égale à 1000W / m^2,l'objectif de ce test est de visualiser les différents spectres de puissance P avec les trois méthodes de suivi du point de puissance maximale (MPPT), P&O, INC et FLC.

• Un panneau PV de 100KW, ces valeurs nominales

Npp	Nss	Voc	Icc	Pmax	Vmax	Imax	Module	K1	Rs	Rp
66	5	71,1 V	5,25 A	303 W	61,3 V	4,9A	5	0.00173A/° C	0.08 Ω	100 Ω

Les caractéristiques sont:

• Convertisseur boost DC-DC

• VSC triphasé à 3 niveaux : il permet de convertir la tension de la liaison V en V et de maintenir le facteur de puissance unitaire.

Notre modèle contient les composants suivants:

• 01 transformateur couplé en triphasé

Simulation de la méthode MPPT et discussion de la comparaison

Modèle de simulation :

Nous avons analysé les trois algorithmes P&O, INC et FLC sur le même modèle de simulation. Chaque fois que nous changeons le bloc MPPT pour chaque commande. La figure (Fig.30) montre le bloc SIMULINK de la commande de suivi MPPT.

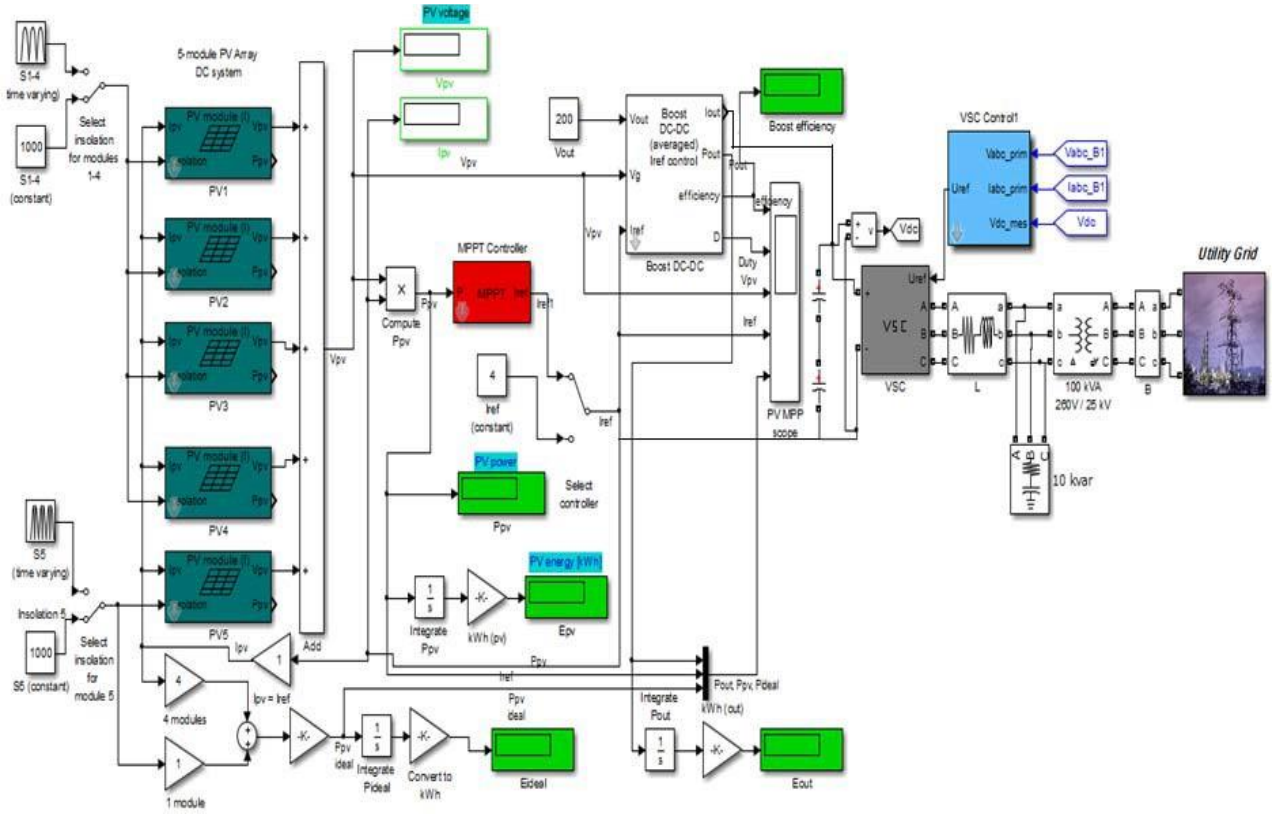


Figure 30 : Bloc Bloc Simulink de la commande MPPT

Discussion

L'algorithme P&O est souvent utilisé car il est facile à implémenter. Cela dépend fortement des conditions initiales et des oscillations autour du PPM car la recherche doit être répétée périodiquement pour forcer le système à osciller autour du PPM.

Le principal inconvénient de cet algorithme est son mauvais comportement dû à un changement d'éclairage inattendu car parfois l'algorithme fournit des erreurs d'interprétation dans la direction à suivre pour atteindre sa valeur optimale.

Comme l'algorithme précédent, l'algorithme INC donne des oscillations autour du PPM, cependant, l'avantage est que l'algorithme agit mieux lors d'un changement rapide des conditions météorologiques. En effet, il est plus complexe que le P&O, ce qui génère un temps d'exécution plus long.

L'algorithme basé sur la logique floue FLC fonctionne surtout lors du changement des conditions climatiques, la mise en œuvre de ce type d'algorithme est plus complexe que les algorithmes classiques, mais sa précision en statique est liée à la complexité du tableau, Inférence utilisée Cependant, simulation les résultats de cette étude indiquent que:

• Par rapport à la précision disponible, les efficacités MPPT des algorithmes (P&O et FLC) sont essentiellement les mêmes. Mais l'algorithme INC est légèrement meilleur.

• Comparé aux performances, l'algorithme FLC s'avère plus performant pour obtenir une faible oscillation, ce qui contribue à une grande stabilité de fonctionnement.

Le tableau suivant compare les principales spécifications des différents algorithmes MPPT précédemment étudiés:

Tableau 1. Résultats de comparaison des algorithmes MPPT étudiés

Algorithmes MPPT	P&O	INC	FLC
Temps de réponse	+	++	+++
Oscillation	+++	+++	++
Stabilité	+	++	+++
Complicité	++	+++	++++
Nombre d'itérations	++	+	++
Vitesse de convergence	++	++	+++
Efficacité	++	+++	++

Conclusion

Afin d'améliorer considérablement l'efficacité des installations photovoltaïques (PV), différents algorithmes de recherche de point de puissance maximale (MPPT) ont été étudiés dans cet article. A cet effet, la précision de l'un de ces modèles dépend généralement de l'emplacement où le système photovoltaïque est installé. Ainsi il est donc important de choisir un modèle adapté au cas considéré. Dans ce travail, l'objectif était de contrôler la tension du panneau solaire afin d'obtenir la puissance maximale possible d'un générateur PV, quelles que soient les conditions d'isolation solaire et de température.

Les résultats de la simulation confirment le bon fonctionnement du contrôleur (perturbation et observation) "P&O" ainsi que l'incrément de conductance "INC", mais le contrôleur flou "FLC" a prouvé qu'il a de meilleures performances par rapport aux autres. Par conséquent, il s'est avéré que c'était la meilleure stratégie à utiliser pour le contrôleur de courant dans un système PV connecté au réseau. Certes les technologies avancées des systèmes PV incluent les onduleurs, les contrôleurs, l'équilibre du système associé et le matériel de gestion de l'énergie sont nécessaires pour assurer des intégrations sûres et optimisées, en commençant par le réseau unidirectionnel d'aujourd'hui et en progressant vers le réseau

intelligent du futur. Finalement, les onduleurs multiniveaux présentent l'avantage de générer des tensions de sortie avec une distorsion extrêmement faible et de tirer du courant avec une très faible distorsion.

Références

Bill 150. "An Act to enact the Green Energy Act, 2009 and to build a green economy, to repeal the Energy Conservation Leadership Act, 2006 and the Energy Efficiency Act and to amend other statutes," Chapter 12 Statutes of Ontario, 2009 [online]. Available: http://www.ontla.on.ca/bills/bills-files/39_Parliament/Session1/b150ra.pdf

CIGRE, (2000). Technical Brochure CIGRE Task Force 38.01.10, "Modelling New Forms of Generation and Storage", Nov 2000.

Kundur, P., J. Paserba, V. Ajjarapu, G. Andersson, A. Bose, C. Canizares, N. Hatziargyriou, D. Hill, A. Stankovic, C. Taylor, T. Van Cutsem, and V. Vittal, (2004). Definition and classification of power system stability," IEEE Trans. Power Systems, **Vol. 19** *(2)* : 1387-1401.

Muljadi, E., A. Ellis, (2010). WECC wind generation development. Final project report. NREL,(2010)., March 2010.

NERC special report (2010). Standard models for variable generation. Draft, Feb. 2010.

Renewable Energy Network for News & Information, November 15, 2010, http://www.renewableenergyworld.com

Ueda Y., S. Suzuki, and T. Ito, (2009). Grid stabilization by use of an energy storage system for a large-scale PV generation plant," ECS Transactions, Vol. 16 (34): 17-25.

Yazdani, A., and P.P. Dash, (2009). "A control methodology and characterization of dynamics for a photovoltaic system interfaced with a distribution system," IEEE Trans. Power Delivery, pp. 1538 – 1551, Jul. 2009.