

MODÉLISATION LINÉAIRE ET COMMANDE DANS LE RÉFÉRENTIEL SYNCHRON D'UN ONDULEUR DE TENSION POUR GÉNÉRATEUR PHOTOVOLTAÏQUE CONNECTÉ AU RÉSEAU

Kadri RIAD, Mostefaï MOHAMED

Université Ferhat ABBAS de Sétif
Faculté des sciences de l'ingénieur département d'électrotechnique
Laboratoire d'automatique de Sétif (LAS).
Kadri_Riad@yahoo.fr

Résumé :

Les interfaces de puissance entre le générateur photovoltaïque et le réseau électrique peuvent devenir plus efficace en choisissant une commande appropriée. Ils sont souvent conçus à base d'onduleur de tension (Voltage Source Inverter) (VSI) à Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI). L'onduleur de tension doit être commandé de telle sorte qu'il maintienne sa tension continue constante et qu'il injecte dans le réseau des courants de forme sinusoïdale et avec un facteur de puissance unitaire à tout moment. La non linéarité du modèle de VSI constitue le problème majeur de la commande. Nous avons présenté dans cet article, un modèle linéaire de cette interface de puissance, en se basant sur le bilan de puissance, que nous avons représenté dans un espace d'état. Les courants de référence sont extraits à partir du contrôleur MPPT (Maximum Power Point Tracking) en appliquant la méthode de référentiel synchrone. Des correcteurs calculés par placement de pôles sont ajoutés dans les boucles de courant et de tension afin d'améliorer la dynamique du système, ainsi d'éliminer les erreurs statiques dues à l'incertitude de paramètres de système. La validité du modèle linéaire et les performances de la commande sont évaluées par simulation sous MATLAB/SIMULINK.

Mots Clés : Photovoltaïque, modèle linéaire, VSI, référentiel synchrone, Contrôleur MPPT.

1. Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque a attiré l'intérêt croissant ces dernières années comme une importante alternative ou sources d'énergies fossiles à l'avenir. Ceci conduit à un lancement rapide au développement des interconnexions appropriées pour les GPV connectés au réseau, de sorte que l'énergie du GPV puisse être injectée dans le réseau réellement et efficacement.

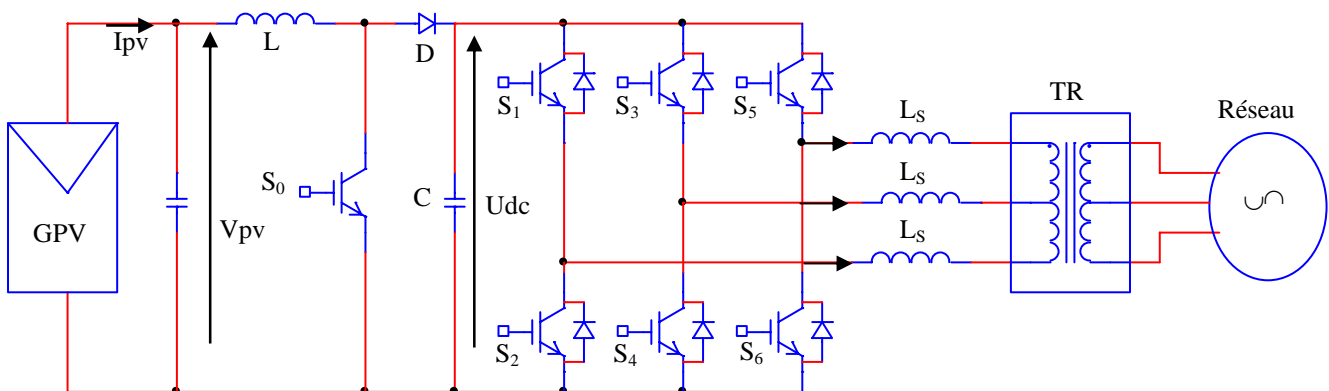


Figure 1 schéma de principe de l'interconnexion

Les particularités souhaitables de telles interconnexions doivent être indiquées encore par l'acquéreur. Cependant on souhaite que l'interconnexion injecte l'énergie photovoltaïque dans le réseau sans l'injection des harmoniques indésirables. En outre, afin de réduire au minimum la taille des éléments de l'installation, on souhaite que l'interconnexion garantisse que le courant débité dans le réseau sera en phase avec la tension appliquée. Ces deux conditions devraient garantir également un facteur de puissance unitaire conformément à la nouvelle norme IEC555. L'insertion d'un transformateur est obligatoire suivant les normes, en plus de fournir l'isolement galvanique, soulève la tension de sortie de l'onduleur au niveau de la tension du réseau il assure la suppression de la composante continue du courant injecté. Puisque ce transformateur fonctionne à la fréquence du réseau et pour des puissances plus importantes, ce transformateur devient encombrant et coûteux.

Un modèle dynamique du système entier et de ses contrôleurs inclut le contrôleur de point de puissance maximale ont été développé. Ce modèle peut être employé pour concevoir l'interconnexion et pour étudier son exécution pour les différents états d'opération, comme se produisent avec les panneaux solaires et pour les différentes valeurs de puissances et les différents paramètres du système de contrôleur. Des étapes de modélisation importante concernant le régime dynamique et permanent de l'interface ont été présentés dans les sections suivantes. L'ensemble des résultats de simulation est également inclus montrant les formes d'onde importantes à des diverses parties de l'interconnexion. En conclusion, une pleine évaluation de l'interconnexion en termes de son exécution est présentée.

2. Description de la topologie

La structure de la topologie d'interconnexion proposée est montrée dans la figure 1. Cette topologie est constituée de trois blocs :

- 1- générateur photovoltaïque
- 2- hacheur survolteur et sa commande
- 3- onduleur MLI triphasé et sa commande

L'hacheur survolteur soulève la tension du générateur photovoltaïque, typiquement de 78-100 Volts, à une tension au-dessus de 120V qui est le potentiel maintenu au bus continu par l'onduleur MLI triphasé. Ce hacheur survolteur, qui force également la circulation du courant dans le bus continu, remplit en fait également la fonction du contrôleur de point de puissance maximale, dont la sortie est le rapport cyclique du signal MLI appliqué à l'interrupteur commandable du hacheur survolteur. La structure de commande pour l'hacheur survolteur qui utilise l'algorithme de perturbation et d'observation est donnée au paragraphe 3.3. Le circuit de commande pour l'onduleur MLI triphasé est indiqué sur la figure 6. La tension du bus continu est comparée à une tension de référence et l'erreur passe par un régulateur de type PI pour compensé la chute de tension, puis deux boucles de régulation de type PI sont utilisés pour assuré la forme d'onde du courant désiré.

3. Modélisation du système

3.1. Modélisation du générateur photovoltaïque

Dans la littérature, une cellule photovoltaïque est souvent présentée comme un générateur de courant électrique dont le comportement est équivalent à une source de courant shuntée par une diode. Pour déterminer la caractéristique de cette cellule solaire, on part de la caractéristique connue d'une diode au silicium dans l'obscurité :

$$I = I_d = I_0 \left(e^{\frac{V}{n \cdot V_T}} - 1 \right)$$

Avec : I_d = courant de la diode, I_0 = courant de saturation de la diode, n = facteur d'idéalité de la photopile, V = tension imposée à la diode, V_T = tension thermique.
Sous illumination, cette relation devient :

$$I = I_{ph} - I_d = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{V}{n \cdot V_T}} - 1 \right)$$

Avec : I_{ph} = photo-courant de la cellule, proportionnel à l'éclairement.

Pour tenir en compte les phénomènes physiques au niveau de la cellule, le modèle est complété par deux résistances série et shunt comme le montre le schéma électrique équivalent de la figure 2. La résistance série est due à la contribution des résistances de base et du front de la jonction et des contacts face avant et arrière.

La résistance shunt est une conséquence de l'état de surface le long de la périphérie de la cellule ; elle est réduite à la suite de pénétration des impuretés métalliques dans la jonction (surtout si elle est profonde), lors du dépôt de la grille métallique ou des prises de contacts sur la face diffusée de la cellule. Donc le courant de la cellule a pour expression :

$$I = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{V + R_s I}{n V_T}} - 1 \right) - \frac{V + R_s I}{R_{sh}}$$

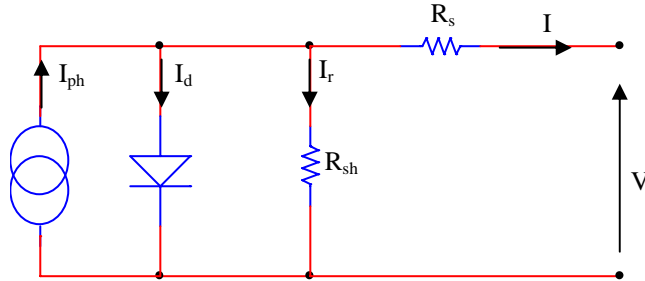


Figure 2 Schéma équivalent d'une cellule

Avec : R_s = résistance série, R_{sh} = résistance shunt, I_r = courant dérivé par la résistance shunt.

La puissance débitée par la cellule dépend du point de fonctionnement de cette dernière, c'est le produit de l'intensité du courant débité et la tension entre ses bornes. A partir de ces différentes équations, on peut en tirer la caractéristique courant-tension I-V et la caractéristique puissance tension P-V d'une cellule photovoltaïque.

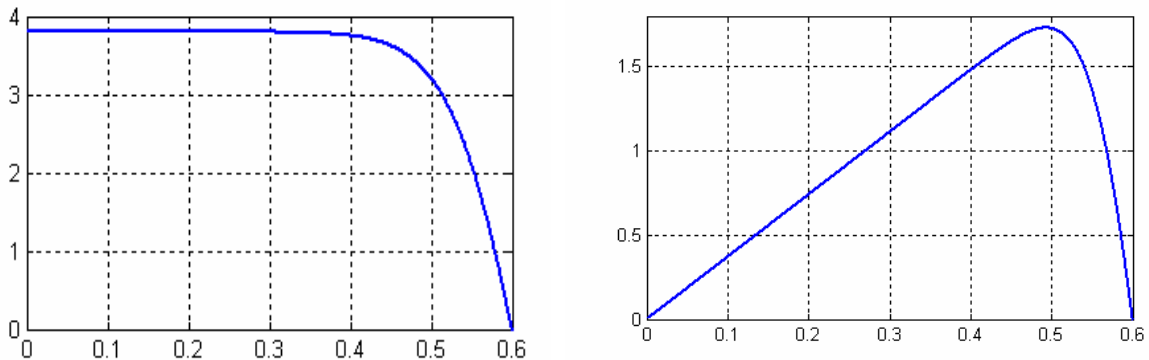


Figure 3 caractéristiques I – V et P - V d'une cellule solaire

3.2. L'hacheur survolteur

Le schéma de principe de l'hacheur survolteur est montré dans la figure 4. Dans cette application le mode de fonctionnement est de conduction continu. Il est utilisé premièrement pour adopté les niveaux de tension et deuxièmement pour faire fonctionner le générateur photovoltaïque au point de puissance maximale.

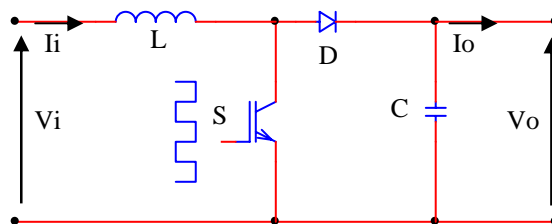


Figure 4 hacheur survolteur

3.3 Contrôleur de point de puissance maximale

La méthode utilisée pour contrôler le point de puissance maximale est la méthode de perturbation et d'observation (P&O). Cette dernière est une approche largement répandue pour la détermination du point PPM. La méthode est une méthode numérique, elle utilise un système à base de microprocesseur. Ce dernier utilise comme entrée les valeurs de la tension V du panneau et le courant I du panneau, et comme sortie soit la valeur de la tension de référence V_{ref} soit le rapport cyclique [4].

Comme son nom indique la méthode de P&O, fonctionne par la perturbation du système soit par l'augmentation ou la diminution de la tension de fonctionnement et d'observer son impact sur la puissance de sortie du panneau.

3.4. l'onduleur MLI triphasé

L'onduleur utilisé pour la connotation au réseau diffère de celui du système autonome parce qu'il peut fonctionner seulement si le réseau de distribution est en service. En effet, il arrange l'interface entre le générateur photovoltaïque et le réseau. L'onduleur du système connecté au réseau conditionne non seulement la puissance de sortie du générateur photovoltaïque, mais il aide également à la commande du système pour assurer une réelle injection de la puissance produite par le générateur photovoltaïque dans le réseau.

En raison de cette situation, l'onduleur doit être soigneusement conçu pour permettre à la sortie du générateur photovoltaïque (hacheur survolteur pris en considération) et les paramètres du réseau d'interfacer [3]. L'onduleur MLI triphasé développé dans cet article, adopte le type de commande en courant d'un onduleur de tension pour assuré une réponse en régime transitoire rapide et des caractéristiques satisfaisantes en régime permanent. Et également la prise en considération de l'information provenant du contrôleur PPM.

Dans notre cas (onduleur triphasé MLI), des contrôleurs de courant tels que commande par hystérésis, commande prédictif (par exemple dead-beat) et la commande dans le référentiel synchrone par régulateur PI avec compensation ont été rapportées. Parmi eux, l'arrangement le plus répandu pour des performances élevées est la commande dans le référentiel synchrone d-q [5], où les deux axis d et q sont séparément commandés. Dans cet article, on propose l'utilisation de ce dernier contrôleur vis a vis les performance citer précédemment.

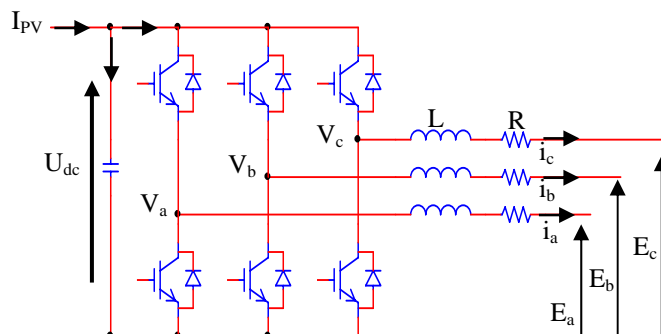


Figure 5 Onduleur MLI triphasé avec filtre de sortie

La figure 5 montre le modèle de cet onduleur, et la modélisation du système est comme suit :

$$V_a = L \frac{di_a}{dt} + i_a R + E_a$$

$$V_b = L \frac{di_b}{dt} + i_b R + E_b$$

$$V_c = L \frac{di_c}{dt} + i_c R + E_c$$

On suppose que la tension du réseau est équilibrée, la fréquence est ω et Prenant la phase (a) comme référence. Les équations des courants dans le référentiel stationnaire d-q sont exprimés par :

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

Par conséquent, l'équation d'état de l'onduleur MLI triphasé dans le référentiel stationnaire d-q est :

$$V_{dq}^s = L \frac{di_{dq}^s}{dt} + i_{dq}^s R + E_{dq}^s$$

L'équation d'état dans le référentiel tournant d-q est donnée par :

$$TE_{dq}^s = LT \frac{di_{dq}^s}{dt} + RTi_{dq}^s + TV_{dq}^s$$

Avec: $T = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$

$$E_{dq}^e = L \frac{di_{dq}^e}{dt} + \omega L \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} i_{dq}^e + Ri_{dq}^e + V_{dq}^e$$

En utilisant l'expression matricielle, l'équation d'état dans le référentiel tournant d-q est la suivante :

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\omega L & L_s + R \\ L_s + R & \omega L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_d \\ E_q \end{bmatrix}$$

En outre, l'équation ci-dessus est écrite comme suit :

$$L \frac{di_d}{dt} = -i_d R + V_d - E_d - \omega L i_q \quad \text{Et:} \quad L \frac{di_q}{dt} = -i_q R + V_q - E_q - \omega L i_d$$

Afin d'obtenir un facteur de puissance unitaire, il est nécessaire que le courant de l'axe q devrait être régulier à zéro ($i_q^* = 0$). L'algorithme de commande de l'onduleur MLI triphasé en utilisant la transformation 3Φ/ d-q est montrée sur la figure 6.

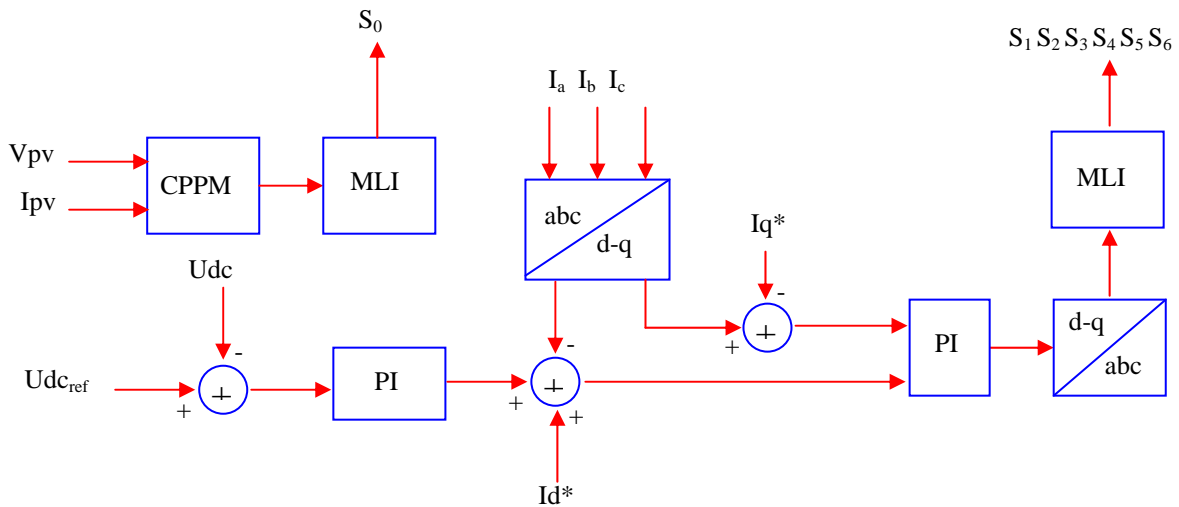


Figure 6 Algorithme de commande

4. Résultats de simulation

Les figures 7 et 8 montrent les résultats de simulation obtenus de la tension du bus continu et le courant injecté pour des conditions de fonctionnement constantes.

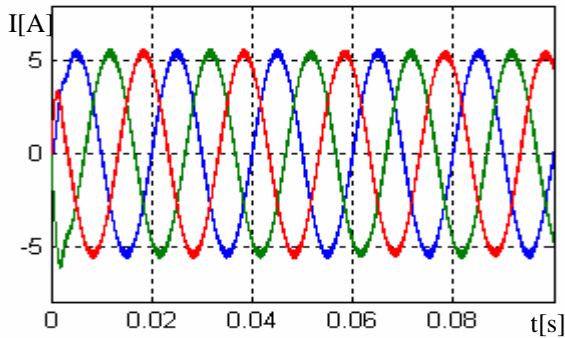


Figure 7 caractéristiques I-V du GPV

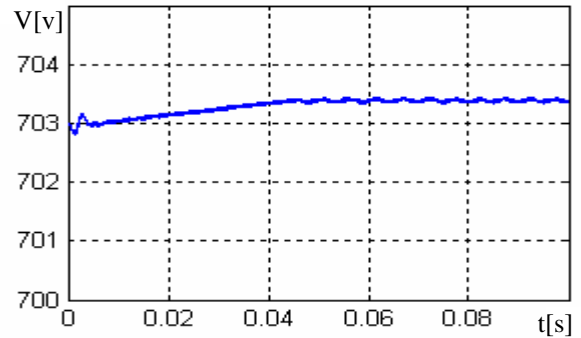


Figure 8 tension du bus continu

Ces simulations sont commencées quand la capacité du bus continu est chargée entièrement par les diodes de l'onduleur. Pendant le régime permanent et quand le point de puissance maximale est localisé, la tension du bus continu est confinée à une petite perturbation autour de point de puissance maximale.

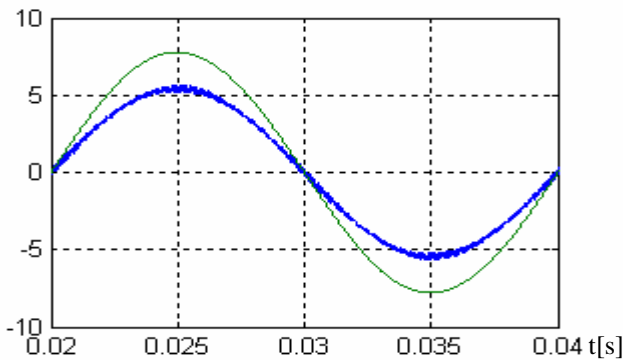


Figure 9 tension et courant de l'onduleur

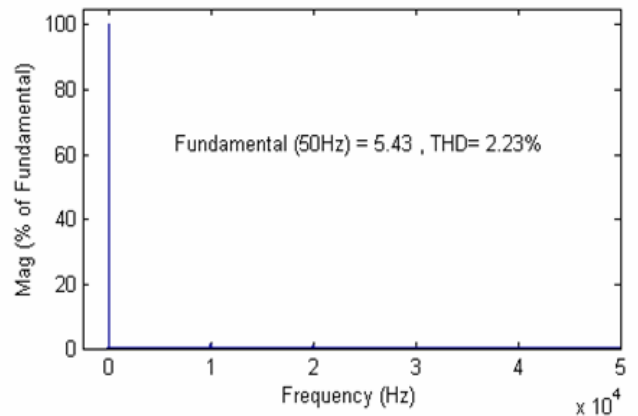


Figure 10 THD du courant injecté

Afin de montrer la crédibilité des contrôleurs développés, la tension du réseau et le courant de l'onduleur sont présentés sur la même figure (la figure 9 : la forme d'onde du courant injecté, est clairement sinusoïdale et en phase avec la tension du réseau). D'après la figure 10 on voit nettement que le THD est très inférieur à 5%.

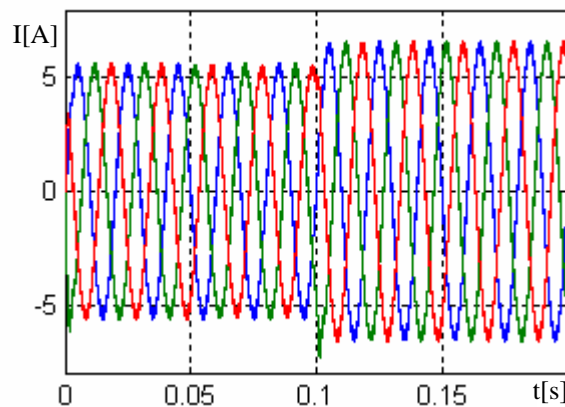


Figure 11 courant injecté pendant des changements d'ensoleillement

Pendant les changements de la caractéristique I-V de la figure 12, Le contrôleur de point de puissance maximale du générateur photovoltaïque décale du point de puissance maximale réel pendant la commutation à des niveaux de puissance plus élevés. La réponse dynamique du contrôleur de courant injecté pour les divers niveaux de puissance indiqués sur la figure 12 sont montrées sur la figure 11.

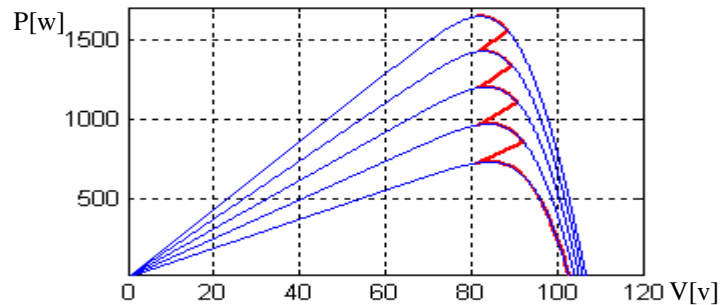


Figure 12 Trajectoire de CPPM

Les changements de la caractéristique I-V du générateur photovoltaïque sont simulés par des changements brusques d'ensoleillement, Le contrôleur de PPM s'ajuste sur ces derniers (changement) en injectant la puissance maximale appropriée à chacune de ces caractéristiques comme indiqué sur la figure 12. Les réponses dynamiques obtenues montrent clairement que l'opération de cette l'interconnexion est stable même pour des conditions de fonctionnements variables.

5. CONCLUSION

Cet article présente la modélisation, la commande et l'analyse des performances d'une interface pour relier un générateur photovoltaïque au réseau. Le convertisseur de puissance se compose d'un hacheur survolteur et d'un onduleur MLI triphasé de tension commandée en courant. L'hacheur survolteur fonctionne comme contrôleur de point de puissance maximale selon l'information fournie à partir de l'algorithme de perturbation et d'observation. Le système entier a été simulé dans l'environnement MATLAB/SIMULINK. Ce modèle fournit des moyens pour l'évaluation détaillée de l'interconnexion proposée. Avec l'hacheur utilisé, il est difficile d'élever la tension de sortie des modules plus de 4 à 5 fois pour obtenir une tension continue suffisamment grande, en raison de la résistance de l'inductance. On joint à la sortie de l'onduleur un transformateur pour élever cette tension au niveau désiré et pour assurer l'isolation entre la partie production et la partie utilisation.

REFERENCES

- [1] Steigerwald R. L. et al, "Investigation of a Family of Power Conditioners Integrated into the Utility Grid", Sandia National Laboratories Report, Sand 81-7031, 1981.
- [2] Steigerwald R. L., Bose, B. K., and Szczesny, "Design and Construction of an Advanced Power Conditioning System for Small Photovoltaic Applications", Sandia Report, SAND83-7037, 1985.
- [3] Gawabata, et. al., " Digital Control of Three-phase PWM Inverter with LC Filter ", IEEE Trans. On Power Electronics, vol. 6 no 1, pp. 62-72, 1991.
- [4] Arcidiacono, S. Corsi, and L. Lambri, " Maximum power point tracker for photovoltaic power plants ", in Conf. Rec. IEEE Photovoltaic Specialists Conf., 1982, pp. 507-512..
- [5] T. M. Rowan and R. J. Kerkman, "A New Synchronous Current Regulator and Analysis of Current-Regulated Inverters", IEEE Trans. On Power Electronics, IA-22, pp. 678-690, 1986.