

Conception et modélisation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT analogique

K. Kassmi^{1*}, M. Hamdaoui¹ et F. Olivie²

¹ Université Mohamed Premier, Faculté des Sciences,
Département de Physique, LEPAS, Oujda, Maroc

² Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes, 'LAAS/CNRS'
7 Avenue du Colonel Roche, 31 077, Toulouse, France

(reçu le 15 Octobre 2007 – accepté le 30 Décembre 2007)

Résumé - Dans cet article, nous analysons la conception et la simulation du fonctionnement électrique d'un système photovoltaïque (PV) adapté par une commande analogique (commande MPPT) assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le générateur PV. Les résultats obtenus montrent que le système PV ainsi conçu converge au bout d'un temps de l'ordre de 50 ms vers les conditions optimales indépendamment des conditions météorologiques et de la variation de la charge. Dans notre analyse, nous avons conçu un système PV où le générateur PV est le module SP75 produisant, dans les conditions standard de test (CST), une puissance crête de 75 W, un courant optimal de 4.41 A et une tension optimale de 17 V.

Abstract - In this paper we analyze the design and the simulation of the electric operation of a photovoltaic (PV) system adapted by an analogical control (control MPPT) ensuring the tracking of the maximum power provided by the PV generator. The obtained results show that the PV system thus designed converges at about time of 50 ms towards the optimal conditions independently of the weather conditions and the load variation. In our analysis, we conceived a PV system where the PV generator is the panel SP75, this panel gives under the test standard conditions (CST), a power peak of 75 W, an optimal current of 4.41 A and an optimal voltage of 17 V.

Mots clés: Système PV – Commande MPPT – Conception – Simulation.

1. INTRODUCTION

Actuellement, la production de l'énergie domestique et dans l'industrie est basée, en grande partie, sur une ressource limitée: le pétrole. Les sources du pétrole deviennent de plus en plus rares, pendant que les demandes énergétiques du monde s'élèvent continuellement. Il est estimé que les réserves mondiales seront épuisées vers 2030 si la consommation n'est pas radicalement modifiée, et au maximum vers 2100 si des efforts sont produits sur la production et la consommation. Etant donné que cette forme d'énergie couvre une grosse partie de la production énergétique actuelle, il s'avère nécessaire de trouver une autre solution pour prendre le relais, la contrainte imposée est d'utiliser une source d'énergie économique et peu polluante car la protection de l'environnement est devenue un point important [1].

La recherche des ressources d'énergie alternatives est devenue donc une question cruciale de nos jours. Beaucoup de recherches scientifiques ont été menées, non seulement, dans le domaine de la production d'énergie nucléaire, mais également dans le secteur des sources d'énergie illimitées, telles que la production d'électricité par le vent et la transformation d'énergie solaire [2]. Dans ce dernier cas, la conception, l'optimisation et la réalisation des systèmes photovoltaïques sont des problèmes d'actualité puisqu'ils conduisent sûrement à une meilleure exploitation de l'énergie solaire. Pour une installation photovoltaïque, la variation de 50 % de l'éclairement ou de la charge induit une dégradation de la puissance fournie par le générateur PV de l'ordre de 50 %; en plus le générateur PV ne fonctionne plus dans les conditions optimums [3].

* khkassmi@yahoo.fr

Ces systèmes photovoltaïques générateurs d'électricité peuvent être exploités dans différents lieux: électrification des sites isolés, installation dans les bâtiments ou raccordement direct au réseau d'électricité,...

Dans ce cadre, notre travail consiste à concevoir, modéliser et réaliser un système PV de moyenne puissance (100 W) fonctionnant en régime continu dans les conditions optimales indépendamment des conditions météorologiques et de la variation de la charge. Dans cet article, nous présentons les résultats concernant la conception et la modélisation, dans l'environnement Orcad - Pspice, d'un système PV dont le fonctionnement est régulé par une commande analogique. Les résultats de la réalisation et la caractérisation électrique seront présentés dans d'autres travaux.

Plus particulièrement, nous concevons un système photovoltaïque (générateur PV, convertisseur d'énergie CC-CC et charge connectée), de moyenne puissance (100 W), adapté par une commande MPPT analogique travaillant à une fréquence de 10 kHz [3]. Cette commande est caractérisée par sa simplicité de réalisation et son faible coût comparativement à d'autres commandes MPPT digitales [4-9]. En plus, elle pourrait fonctionner à des fréquences de découpage élevées (supérieures à 10 kHz). Dans notre cas, le générateur PV est le générateur SP75 [10] symbolisé dans l'environnement Orcad - Pspice [10, 11]. Le convertisseur d'énergie est un hacheur de type survolteur ou dévolteur selon les applications [4-6]. Dans ce travail, nous présentons les résultats concernant le hacheur survolteur.

2. RESULTATS ET DISCUSSIONS

2.1 Système photovoltaïque

Dans [3], nous avons montré pour qu'un générateur photovoltaïque (PV) fonctionne dans les conditions optimales, il doit être doté d'un quadripôle d'adaptation. Cette adaptation se réalise en cherchant de façon automatique [6] le point de puissance maximale (PPM) du générateur PV et ceci lorsque le système est placé dans un environnement où les conditions météorologiques (ensoleillement, température) et charge sont stables [3, 5]. Ce quadripôle peut être un convertisseur CC-CC survolteur ou dévolteur selon les applications. Le problème qui s'oppose est la conception et la réalisation d'une commande qui converge le système PV vers les conditions optimales indépendamment des variations météorologiques et de la charge.

Sur la figure 1, est représenté le schéma synoptique d'un système PV alimentant une charge résistive (R_S).

- Le générateur PV (SP75) est implanté dans l'environnement Orcad - Pspice, selon la procédure de symbolisation décrite dans [11]. Ce panneau SP75 en silicium monocristallin est constitué de 36 cellules photovoltaïques élémentaires. Il peut délivrer dans les conditions standard de test (CST) une puissance de 75 W, un courant de 4.41 A sous une tension optimale de 17 V.
- Le quadripôle d'adaptation est un convertisseur d'énergie [6, 12] de type survolteur pour des applications nécessitant des tensions supérieures à 17 V. Les différents éléments du quadripôle (inductance L avec sa résistance série R_L , capacités C_E et C_S , diode de roue libre DI , transistor Mosfet) sont dimensionnés suivant le cahier de charge [3]:
 - le convertisseur fonctionne toujours en régime continu, lorsque la fréquence du signal modulé en largeur d'impulsion (MLI) permettant la commande de l'interrupteur du convertisseur est de 10 kHz. Ce signal est délivré par la commande MPPT [5, 6, 12].
 - les différents composants du convertisseur peuvent être traversés par un courant de l'ordre de 4.8 A.
 - l'ondulation de la tension d'entrée (sortie) ne dépasse pas 100 mV (10 mV).
- La commande MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) est un organe fonctionnel du système PV et permet de chercher le point de fonctionnement optimal du générateur PV dans les

conditions météorologiques et de la charge stables. Que ce soit une commande analogique ou digitale [4-9, 13], le principe de régulation est basé sur la variation automatique du rapport cyclique α à la valeur adéquate de manière à maximiser la puissance à la sortie du panneau PV.

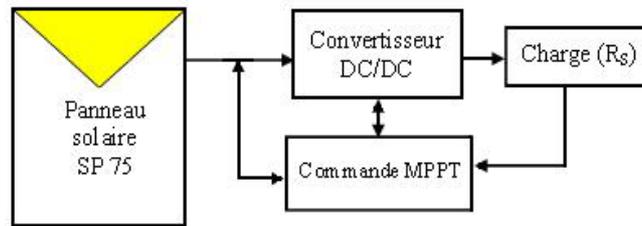


Fig. 1: Schéma synoptique du système PV dont le fonctionnement est contrôlé par une commande MPPT

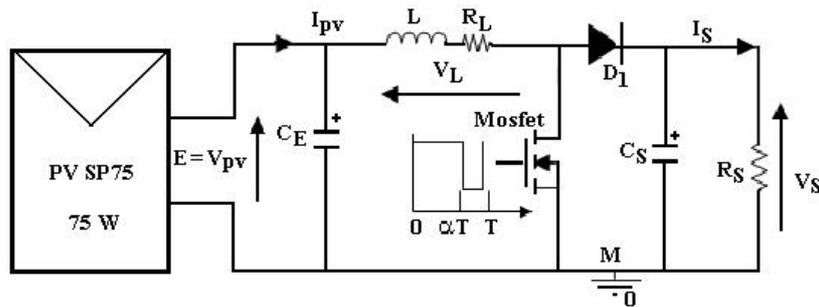


Fig. 2: Système PV formé par un générateur PV, convertisseur d'énergie 'survolteur' et une charge (R_S). L'interrupteur Mosfet est commandé par un signal de période T et de rapport cyclique α .

2.2 Adaptation par le convertisseur DC-DC

Les grandeurs électriques de sorties (V_S et I_S) dans le convertisseur élévateur sont liées à celles d'entrées (E et I_{pv}) en fonction du rapport cyclique du signal qui commande l'interrupteur du convertisseur (Fig. 2) par les relations:

$$V_S = \frac{E}{1 - \alpha} \quad (1)$$

$$I_S = (1 - \alpha) I_{pv} \quad (2)$$

A partir des équations (1) et (2), nous pouvons déduire la résistance à la sortie du panneau PV (R_{pv}) en fonction de α et R_S :

$$R_{pv} = R_S (1 - \alpha)^2 \quad (3)$$

Aussi, le rapport cyclique α s'écrit en fonction des résistances R_{pv} et R_S :

$$\alpha = 1 - \sqrt{\frac{R_{pv}}{R_S}} \quad (4)$$

Puisque le rapport α est inférieur à 1 ($\alpha < 1$), le convertisseur ne joue le rôle d'un élévateur que si la charge R_S remplit la condition suivante:

$$R_S > R_{pv} \quad (5)$$

Dans les conditions optimales et pour une charge R_S donnée, la résistance interne du panneau ($R_{pv} = R_{opt}$) et le rapport cyclique ($\alpha = \alpha_{opt}$) obéissent donc à l'équation:

$$R_{opt} = (1 - \alpha_{opt})^2 \cdot R_S \quad (6)$$

La relation (6) montre que, pour une puissance incidente W , la puissance optimale transférée à la charge ne pourrait être maximale que pour un rapport cyclique bien défini (α_{opt}) (point PPM) [13]. Comme le montre la figure 3-A, pour une puissance incidente W_1 , la puissance optimale transférée à la charge est obtenue pour un rapport cyclique α_{1opt} (point PPM₁). Si la puissance incidente change (W_2), alors ce point de puissance maximale est le point PPM₂ et le point de fonctionnement du générateur PV est le point Pf (Fig. 3-A). Pour converger vers le nouveau point PPM₂, il faut ajuster le rapport cyclique α à la valeur α_{2opt} . Il en sera de même que lorsque la charge R_S change (Fig. 3-B): le point de puissance maximale dévie de sa position optimale (PPM₁); pour converger vers ce PPM₁, il faut agir sur le rapport cyclique (α). Donc, dans un système photovoltaïque indépendant et autonome, cette régulation doit être réalisée automatiquement afin de poursuivre le point de fonctionnement optimal. En plus, nous avons vérifié que lorsque la charge ou l'éclairement varie de 25 % la puissance électrique fournie à la charge diminue de 50 % par rapport à la puissance maximale que peut fournir le générateur PV.

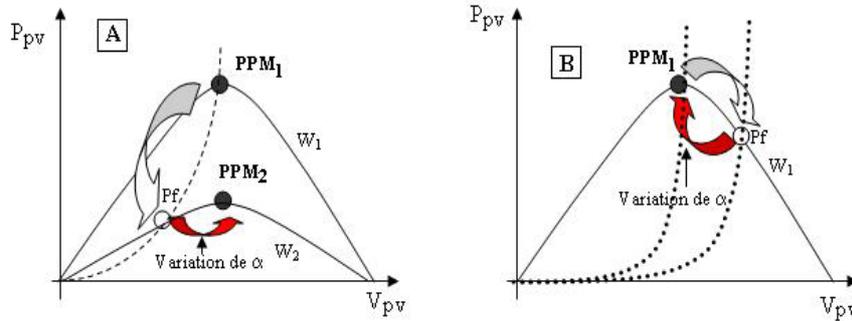


Fig. 3: Fluctuation du point de puissance maximale avec l'intensité d'éclairement et la charge R_S

A: Variation de l'éclairement et B: Variation de la charge

W_1, W_2 : puissances de l'éclairement, Pf : point de fonctionnement du générateur PV,

(—) puissance à la sortie du générateur PV,

(-----) puissance fixée par la charge R_{pv} du générateur PV ($P_{pv} = V_{pv}^2 / R_{pv}$)

Donc, pour une installation photovoltaïque, la connaissance des conditions optimales (tension (V_{opt}), courant (I_{opt}), la puissance optimale (P_{max}) et la résistance équivalente à la sortie du générateur PV (R_{opt}) est indispensable afin de choisir la valeur de la charge adéquate (expression (5)). Dans notre cas, à partir de la symbolisation du module SP75 dans l'environnement Orcad - Pspice, nous avons déduit les différentes grandeurs électriques du générateur PV (V_{opt} , I_{opt} , P_{max} et R_{opt}) en fonction de la température et de l'éclairement. Les résultats obtenus sont représentés sur la figure 4. Il apparaît que:

- le courant I_{opt} est très sensible à l'éclairement: lorsque l'éclairement varie de 100 W/m^2 le courant I_{opt} varie de 11 %.
- la tension V_{opt} varie très peu avec l'éclairement et diminue légèrement avec la température. Pour un éclairement de 1000 W/m^2 et autour de la température ambiante ($25 \text{ }^\circ\text{C}$): lorsque la température varie de $10 \text{ }^\circ\text{C}$, la tension V_{opt} varie de 3.5 %. Ces résultats montrent que la tension V_{opt} varie assez peu au cours de la journée. Aussi, on considère en première approximation que le fonctionnement optimal du générateur PV correspond sensiblement à un fonctionnement à tension optimale constante.
- la puissance maximale P_{max} est très sensible à l'éclairement: lorsque l'éclairement diminue de 100 W/m^2 , la puissance P_{max} diminue de 10 %. Par contre, cette puissance maximale (P_{max}) diminue légèrement avec la température en particulier pour les forts éclairements. Lorsque la température augmente de $10 \text{ }^\circ\text{C}$ autour de la température ambiante et pour un éclairement de 1000 W/m^2 la puissance P_{max} diminue de 4 %.
- la résistance R_{opt} est très sensible à l'éclairement en particulier pour les faibles éclairements. A température ambiante et autour d'un éclairement de 300 W/m^2 (800 W/m^2) lorsque l'éclairement augmente de 100 W/m^2 , la résistance R_{opt} diminue de 17.5 % (11.6 %). Par contre, la température influe très peu sur cette résistance. Pour un éclairement de 1000 W/m^2 et autour de la température ambiante, lorsque la température augmente de $10 \text{ }^\circ\text{C}$, la résistance R_{opt} diminue de 3.3 %.

Il est à noter que dans le cas de notre module (SP75), la résistance optimale à sa sortie varie de $22 \text{ } \Omega$ à $3.85 \text{ } \Omega$ lorsque l'éclairement varie de 100 W/m^2 à 1000 W/m^2 . Donc, pour une installation photovoltaïque, il faut s'assurer que lorsque l'éclairement varie, la valeur de la charge doit être supérieure à cette gamme de résistances optimales ($22 \text{ } \Omega$ - $3.85 \text{ } \Omega$) pour faire fonctionner le panneau dans les conditions optimales.

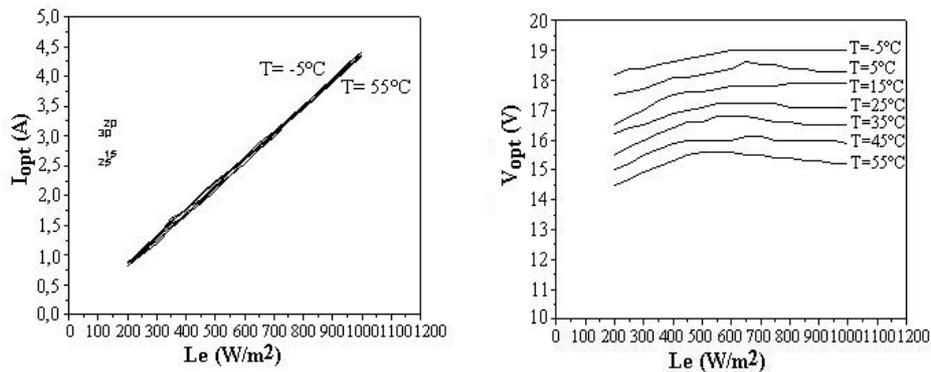


Fig. 4: A- Influence de la température et de l'éclairement sur la tension (V_{opt}) et le courant (I_{opt})

2.3 Structure de la commande MPPT analogique

Sur la figure 5, est représenté le schéma synoptique de la commande MPPT analogique répondant à notre cahier de charge. Cette commande MPPT analogique utilise directement la tension et le courant du panneau photovoltaïque pour chercher le point de fonctionnement correspondant à la puissance maximale [12-14]. Aussi, sur la figure 6 est représenté la forme du signal, généré par la commande MPPT (sortie du Comparateur 2).

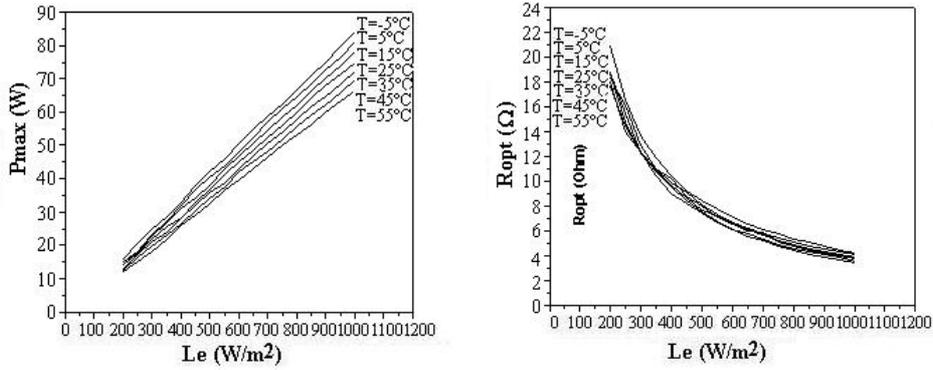


Fig. 4: B- Influence de la température et de l'éclairement sur la puissance (P_{max}) et la résistance (R_{opt}) optimum du générateur PV SP75

L'implantation de cette commande ne fait intervenir que des composants analogiques et logiques sans aucun calcul ne soit nécessaire. La dynamique du système ne dépend que du temps de retard des composants analogiques qui est généralement très faible. Nous tenons à préciser que la conception de cette commande est indépendante de la structure du convertisseur statique utilisé. Elle peut s'appliquer aussi bien à des convertisseurs abaisseurs qu'à des éleveurs.

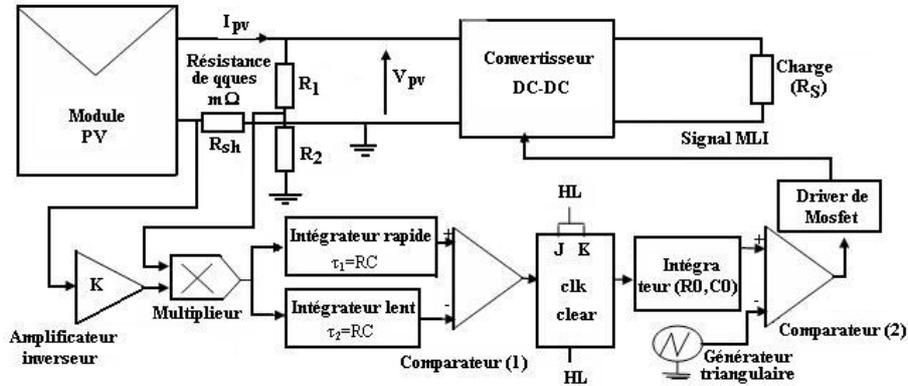


Fig. 5: Schéma synoptique de la commande MPPT analogique

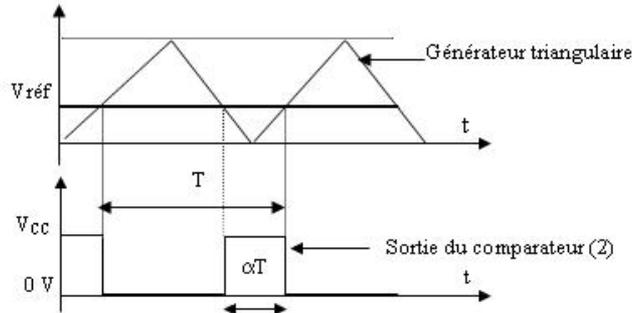


Fig. 6: Génération d'un signal carré à la sortie du comparateur (2)
 Les différents composants qui constituent cette commande MPPT sont les suivants:

- une résistance shunt de quelques milliohms connectée entre la masse et le pôle (-) du panneau. Cette résistance doit supporter un courant de 4.41 A. La puissance dissipée à ses bornes est alors de quelques milliwatts. La tension à ses bornes est l'image du courant I_{pv} fourni par le générateur PV. Vu la faible valeur de cette résistance, la chute de la tension à ses bornes est très faible. D'où la nécessité d'utiliser un amplificateur opérationnel pour amplifier cette chute de tension.
- un amplificateur opérationnel monté en inverseur de gain k de l'ordre 20, pour ramener la tension V presque à 1V pour qu'elle soit accessible à l'entrée du multiplieur analogique.
- un pont de deux résistances R_1 et R_2 qui permettent de prélever une fraction de la tension V_{pv} du générateur PV (une fraction de 1 V est généralement suffisante). La tension maximale du panneau ne peut dépasser 22 V. Nous prenons donc le pont diviseur dans un rapport $1/12$.
- un multiplieur analogique qui délivre à sa sortie, à une constante près C , le produit du courant I_{pv} et de la tension V_{pv} . Ce produit est donc l'image de la puissance instantanée du panneau PV. Ce multiplieur doit être choisi de façon qu'il soit de bonne réfection des deux signaux d'entrée et que seul le produit apparaisse à la sortie,
- deux intégrateurs RC: un rapide de constante de temps τ_1 et l'autre lent de constante de temps τ_2 . A un instant t quelconque, l'intégrateur rapide produit à sa sortie une tension P_r homogène à la puissance fournie par le panneau et l'intégrateur lent produit à sa sortie la puissance P_l qui est la même que P_r mais à un instant $t + dt$ (puissance retardée). Donc, à un instant t quelconque, la puissance P_r est supérieure (inférieure) à P_l lorsque qu'il s'agit d'une augmentation (diminution) de puissance à la sortie du panneau.
- un comparateur (1) qui compare à chaque instant t la puissance P_r à celle retardée P_l . Si la puissance à la sortie du panneau augmente (diminue), le comparateur bascule vers sont état haut (bas),
- une bascule JK montée en bascule T (flip-flop) dont la sortie Q change d'état à chaque front descendant du signal d'horloge qui est la sortie du comparateur. Dans l'environnement Orcad - Pspice, l'amplitude de la tension de sortie des circuits numériques n'atteint pas la valeur d'alimentation ($+V_{CC}$). Pour ce faire, nous avons intercalé à la sortie de la bascule un amplificateur opérationnel en montage non-inverseur pour que la tension de sortie varie entre 0 et $+V_{CC}$.
- un intégrateur (R0, C0) dont le condensateur se charge et se décharge lentement. Lorsque la bascule T bascule à l'état haut (bas), la tension à la sortie de l'intégrateur augmente (diminue) lentement.
- un comparateur (2) permettant de générer à sa sortie une tension rectangulaire modulée en largeur (rapport cyclique variable: signal MLI). Ceci est le résultat de la comparaison (Fig. 6) entre le signal à la sortie de l'intégrateur (V_{ref}) et celui généré par un générateur triangulaire, ou en dent de scie, de fréquence fixée par le fonctionnement du convertisseur (dans notre cas 10 kHz). Lorsque la tension V_{ref} augmente (diminue), le rapport cyclique α augmente (diminue). Les variations de la tension V_{ref} induisent, pour un éclairage et température donnés, le déplacement du point de fonctionnement sur la caractéristique puissance – tension (Fig. 3).
- un driver dont le rôle est de transmettre, sans déformation, le signal modulé en largeur à l'interrupteur (transistor Mosfet) commandant le convertisseur d'énergie.

2.4 Simulation du fonctionnement électrique du système photovoltaïque

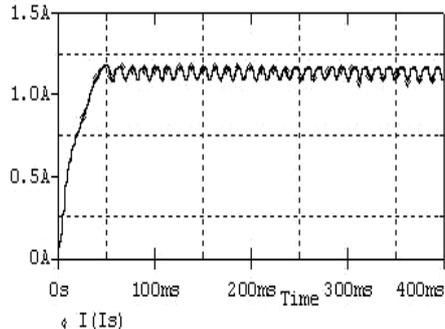
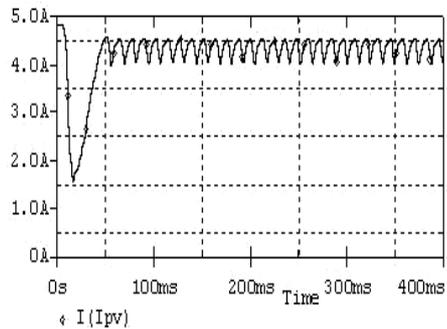
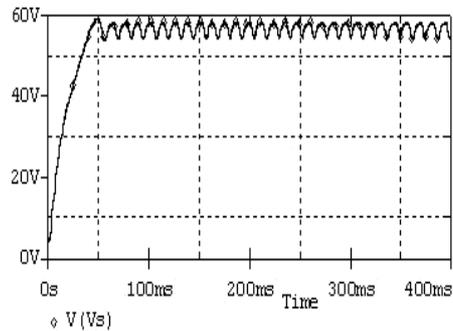
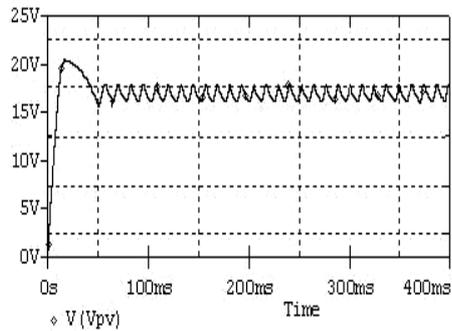
2.4.1 Résultats de simulation

Sur la figure 7, sont représentés, pour un éclairement constant de 1000 W/m^2 et une température de $25 \text{ }^\circ\text{C}$, les résultats typiques de simulation, dans l'environnement Orcad, des caractéristiques électriques à la sortie du panneau et à la sortie du hacheur de type élévateur contrôlé par la commande MPPT analogique de la figure 5. Il apparaît que:

- après un régime transitoire de durée 50 ms, la commande MPPT fait osciller le point de fonctionnement autour du point du PPM.
- les différentes grandeurs électriques (puissances, tensions et courants) se stabilisent autour des valeurs fixées par notre cahier de charge:
 - La puissance fournie par le générateur PV se stabilise autour de 75 W et celle fournie à la charge autour de 68 W;
 - A la sortie du panneau, la tension et le courant se stabilisent respectivement autour de 17 V et 4.4 A;
 - Au niveau de la charge, la tension et le courant se stabilisent respectivement autour de 58 V et 1.1 A.

Notons que la différence entre la puissance à la sortie du panneau et celle fournie à la charge reste dans la limite de 6 Watts. Ces pertes sont attribuées aux pertes par commutation et par conduction dans le transistor Mosfet [3, 15], dans la diode et dans les différents composants de la commande MPPT.

L'ensemble des résultats obtenus montre que le convertisseur CC-CC et la commande MPPT effectuent correctement leurs rôles. Le convertisseur fournit dans les conditions optimales une tension à sa sortie supérieure à celle fournie par le générateur PV. La commande MPPT adapte le générateur PV à la charge: transfert de la puissance maximale fournie par le générateur PV.



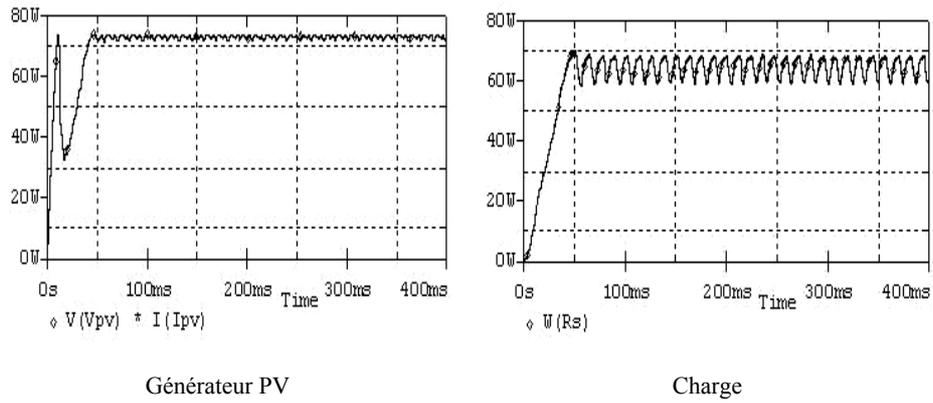


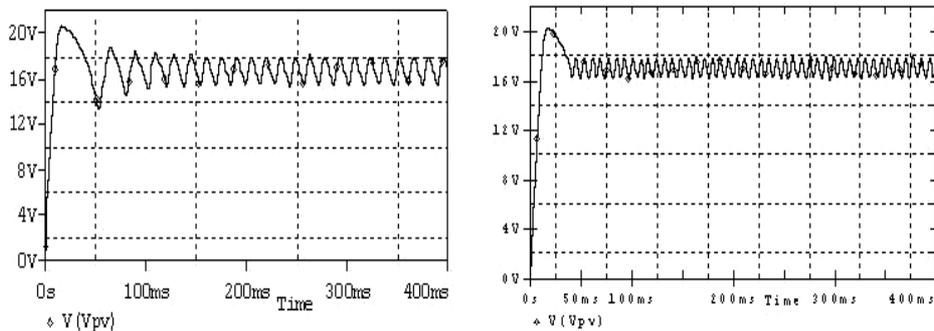
Fig. 7: Tensions, courants et puissances typiques, simulés dans l'environnement Orcad, en fonction du temps dans le cas d'un convertisseur élévateur contrôlé par la commande MPPT $R_S = 50 \Omega$, $C_S = 200 \mu\text{F}$, $C_E = 2200 \mu\text{F}$, $L = 300 \mu\text{H}$, $f = 10 \text{kHz}$, $\tau_1 = 1 \text{ms}$, $\tau_2 = 0.22 \text{ms}$

2.4.2 Incertitude précision - stabilité

Le choix des deux constantes de temps (τ_1 et τ_2) des deux intégrateurs lent et rapide, de la commande MPPT (Fig. 5), est un compromis fondamental entre la stabilité et la précision de convergence autour du PPM du système. Plus les constantes de temps τ_1 et τ_2 sont rapprochées, plus il y a de précision sur le point PPM et qu'il y a de faibles oscillations autour de celui-ci. Mais si elles deviennent tellement rapprochées, le système peut devenir instable. Par ailleurs, si les deux constantes de temps sont trop éloignées, le système est très stable mais il devient moins précis. Ceci se traduit par la présence de fortes oscillations autour du PPM [3, 14-16].

Sur la figure 8, nous avons représenté les résultats de la simulation des différentes tension et courant à la sortie du panneau et à la sortie du convertisseur dans les deux cas extrêmes des constantes de temps τ_1 et τ_2 (τ_1 et τ_2 éloignées et rapprochées). Les résultats obtenus montrent une forte oscillation dans le premier cas et une faible oscillation dans le second cas.

Dans les deux cas, la convergence vers les conditions est obtenue durant un temps inférieur à 50 ms.



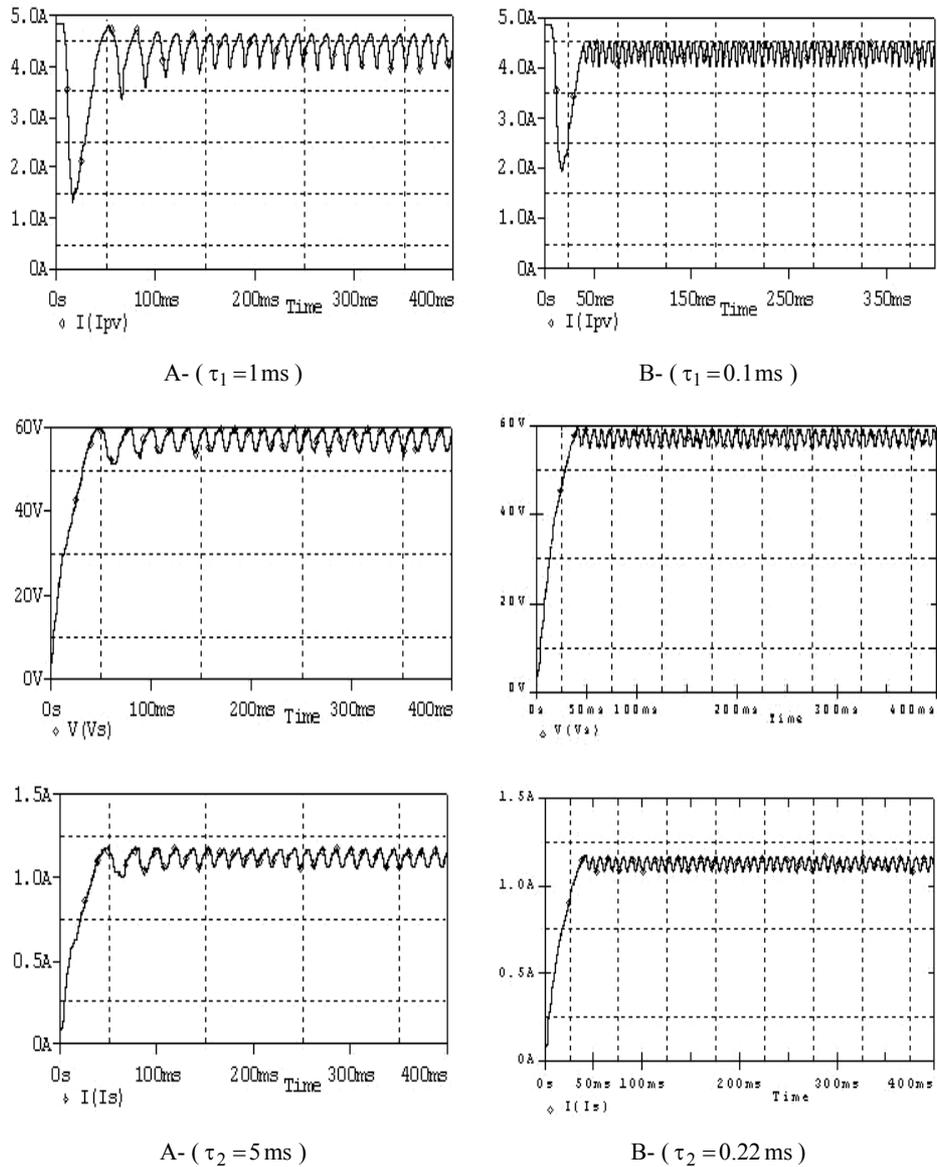


Fig. 8: Amplitude d'oscillations autour du PPM des différentes grandeurs électriques (tensions et courants à l'entrée et à la sortie du convertisseur) pour un éclairement de 1000 W/m^2 , une charge de $R_S = 50 \Omega$ et deux couples de constantes de temps différents.

$$C_S = 200 \mu\text{F}, C_E = 2200 \mu\text{F}, L_1 = 300 \mu\text{H}, f = 10 \text{ kHz},$$

$$\text{A: } (\tau_1 = 1 \text{ ms}, \tau_2 = 5 \text{ ms}),$$

$$\text{B: } (\tau_1 = 0.1 \text{ ms}, \tau_2 = 0.22 \text{ ms})$$

3. CONCLUSION

Dans ce papier, nous avons analysé dans l'environnement Orcad-Pspice le fonctionnement électrique d'un système PV, adapté par des convertisseurs d'énergie CC-CC (hacheur), régulé par

une commande MPPT analogique. Les résultats obtenus montrent que pendant une durée inférieure à 50 ms et en variant d'une manière automatique le rapport cyclique du signal qui commande l'interrupteur du convertisseur d'énergie le système converge vers les conditions optimales indépendamment des conditions météorologiques et de la variation de la charge. Ces résultats, forts intéressants, montrent que l'utilisation de la commande MPPT permet d'améliorer d'une manière considérable le rendement des installations photovoltaïques. La validation de l'ensemble de ces résultats est présentée dans des travaux en cours.

Remerciements

Ce travail est supporté par:

- Le Comité Franco-Marocain 'Action Intégrée', N°MA/03/78.
- Le Programme Thématique d'Appui à la Recherche Scientifique (PROTARS III), Maroc, N°D43/06.
- La Coopération Marocco-Belge, 'Commission Universitaire pour le Développement, CUD', Activité OUI 03, 'Appui à la Recherche et Développement', Energies renouvelables.
- Le Programme Global de Recherche de l'Université Mohammed Premier d'Oujda (Maroc), PGR.

REFERENCES

- [1] C. Miller and P.N. Edwards, 'Changing the Atmosphere Expert Knowledge and Environmental Governance', Cloth / June 2001.
- [2] C. Iskander Yousif, 'Recent Developments of Applying Solar Photovoltaic Technologies in Malta', Proceedings of the 'Enemalta' 25th Anniversary Conference on Energy Efficiency, Mediterranean Conference Centre, 18th-19th October, Valetta, Malta, 2002.
- [3] A. Aziz, 'Propriétés Electriques des Composants Electroniques Minéraux et Organiques, Conception et Modélisation d'une Chaîne Photovoltaïque pour une Meilleure Exploitation de l'Energie Solaire', Doctorat en Sciences (Electronique), Université Mohamed Premier, N°86/06, 2006, Oujda, Maroc, Université Paul Sabatier, N°06234, Toulouse, France, 2006.
- [4] D. Tokushima, M. Uchida, S. Kanbei, H. Ishikawa and H. Naitoh, 'A New MPPT Control for Photovoltaic Panels by Instantaneous Maximum Power Point Tracking', Electrical Engineering in Japan, Vol. 157, N°3, pp. 73 - 80, 30 November 2006.
- [5] H.S. Bae, J.H. Park, B.H. Cho and G.J. Yu, 'New Control Strategy for 2-Stage Utility-Connected Photovoltaic Power Conditioning System with a Low Cost Digital Processor', Power Electronics Specialists Conference, PESC'05, IEEE 36th, September 11-14, pp. 2925 - 2929, 2005.
- [6] I. Kazutaka and M. Takeaki, 'A Current Sensorless MPPT Control Method for a Stand-Alone-Type PV Generation System', Electrical Engineering in Japan, Vol. 157, N°2, pp. 65 - 71, 17 Aug 2006.
- [7] C. Hua and J. Lin, 'An On-Line MPPT Algorithm for Rapidly Changing Illuminations of Solar Arrays', Renewable Energy, Vol. 28, N°7, pp. 1129 - 1142, June 2003.
- [8] S. Kasemsan, V.A. Caliskan and C.Q. Lee, 'Maximum Power Tracking in Parallel Connected Converters', IEEE Transactions on Aerospace and Electronics Systems, Vol. 29, N°3, July 1993.
- [9] A. Brambilla, M. Gambarara, A. Garutti and F. Ronchi, 'New Approach to Photovoltaic Arrays Maximum Power Point Tracking', Power Electronics Specialists Conference, PESC'99, 30th Annual IEEE, Vol. 2, pp. 632-637, 27 June-July 1999.
- [10] http://sunwize.com/info_center/pdfs/shell_SP75_PC.pdf
- [11] A. Aziz, K. Kassmi, R. Maimouni, F. Olivie, G. Sarrabayrouse and A. Martinez, 'Symbolization of the Electric Diagram of the Marketed Solar Panels in the Orcad-Pspice Environment', Moroccan Journal of Condensed Mater, Vol.7, N°1, pp. 38 - 41, Janvier 2006.

- [12] J. Soler, E. Daroqui, F.J. Gimeno, S. Seguí-Chilet and S. Orts, '*Analog Low Cost Maximum Power Point Tracking PWM Circuit for DC Loads*', ACTA Press, Ref. 468-058, Power and Energy Systems ~ EuroPES, 2005~.
- [13] B.H. Cho, '*Modeling, Analysis Design, and Simulation of PPT Spacecraft Power Systems*', Orbital Sciences Corporation Report, VPEC, pp. 34 - 38, April 7, 1993.
- [14] H. Knopf, '*Analysis, Simulation, and Evaluation of Maximum Power Point Tracking (MPPT) Methods for a Solar Powered Vehicle*', Thesis, Portland State University, 1999.
- [15] M.F. Shraif, '*Optimisation et Mesure de Chaîne de Conversion d'Energie Photovoltaïque en Energie Electrique*', Doctorat de l'Université Paul Sabatier de Toulouse (France), 2002,
- [16] K. Kassmi, M. Hamdaoui et F. Olivie, '*Caractérisation des Panneaux Photovoltaïques. Conception et Optimisation d'un Système Photovoltaïque pour une Meilleure Exploitation de l'Energie Solaire*', Revue des Energies Renouvelables, CER'07, Oujda, pp. 95 – 98, 2007.