

Amélioration du fonctionnement des systèmes photovoltaïques suite aux brusques variations des conditions météorologiques et de la charge

T. Mrabti¹, M. El Ouariachi¹, K. Kassmi^{1*}, F. Olivie² et F. Bagui³

¹ Université Mohamed Premier, Faculté des Sciences,
Département de Physique, LEPAS, B.P. 524, Oujda, Maroc

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

³ Ecole d'Ingénieurs, Centre d'Etudes Supérieures Industrielles, 'CESI'
1 Rue G. Marconi, Parc de la Vatine, 76 130 Mont Saint Aignan, France

(reçu le 09 Février 2008 – accepté le 30 Mars 2008)

Résumé - Dans ce papier, nous analysons la conception et le fonctionnement dans l'environnement Orcad-Pspice d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT analogique. Nous proposons l'amélioration du fonctionnement d'un système photovoltaïque suite aux brusques variations des conditions météorologiques et la charge. Ceci est obtenu par l'association d'un circuit de détection de dysfonctionnement et de changement de sens 'CDCS' conçu au cours de ce travail. Le rôle de ce circuit 'CDCS' est de détecter un éventuel dysfonctionnement du système 'PV' puis converger le système vers les conditions optimales sans redémarrer le système photovoltaïque.

Abstract - In this paper we analyze in the Orcad-Pspice environment the design and functioning of a photovoltaic system adapted by an analogical MPPT command. We propose improving of the functioning of a photovoltaic system response to the sudden changes of meteorological condition and the charge. This is obtained by the association of a 'CDCS' circuit (detection of dysfunction and change of direction circuit) developed during this work. The role of this circuit 'CDCS' is to detect a possible dysfunction of the 'PV' system then the system converge towards the optimal conditions without restarting the PV system.

Mots clés: Energie photovoltaïque – Modules photovoltaïques - Systèmes photovoltaïques - Point de puissance maximale (PPM) - Commande MPPT - Circuit CDCS - Détection du dysfonctionnement et convergence vers le PPM.

1. INTRODUCTION

La recherche des ressources d'énergie alternatives est devenue une question cruciale de nos jours [1-3]. 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 la transformation d'énergie solaire [4-7]. 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 [4-10]. Lors de la connexion directe des modules photovoltaïques à la charge (batteries,...), des pertes importantes d'énergie fournies peuvent avoir lieu, suite au fait que le générateur photovoltaïque ne fonctionne plus dans les conditions optimales [6, 7].

Actuellement, le problème majeur de la production d'énergie électrique par cette technique est, d'une part, la conception et la réalisation des systèmes photovoltaïques, permettant de faire fonctionner les modules photovoltaïques dans des conditions optimales [4-10], et d'autre part, la conception et la réalisation des circuits qui permettent de détecter un éventuel dysfonctionnement,

* khkassmi@yahoo.fr

suite aux brusques variations de l'éclairement ou de la charge, tout en assurant un fonctionnement optimal du système photovoltaïque.

Dans ce dernier cas, des circuits ont été proposés dans la littérature [4]. Leur inconvénient est qu'il fait redémarrer le système lors de la détection d'un dysfonctionnement. Ce redémarrage pourrait être nuisible pour le bon fonctionnement des applications utilisées (charges, batteries,...).

Dans ce papier, nous faisons l'analyse de la conception d'un système photovoltaïque de moyenne puissance (100 W) qui permet d'optimiser instantanément la puissance fournie par les modules photovoltaïques indépendamment des variations météorologiques et de la charge. Nous étudions, dans l'environnement Orcad-Pspice, la conception d'un tel circuit qui permet la détection du dysfonctionnement et la convergence (sans redémarrage) du système, à la suite des variations de l'éclairement ou de la charge, tout en assurant un fonctionnement optimal du système (circuit de détection de dysfonctionnement et de changement de sens, 'CDCS'). Le fonctionnement de ce circuit 'CDCS' est basé sur la détection du dysfonctionnement et ensuite le changement de sens de déplacement du point de fonctionnement du générateur photovoltaïque.

2. RESULTATS ET DISCUSSIONS

2.1 Système photovoltaïque

Pour qu'un générateur photovoltaïque fonctionne dans les conditions optimales, il doit être doté d'un quadripôle d'adaptation. Cette adaptation se réalise en cherchant de façon automatique le point de puissance maximale (PPM) du générateur [4-10]. Ce quadripôle peut être un convertisseur DC-DC de type survolteur ou dévolteur selon les applications. Le problème qui se pose est de concevoir et de réaliser une commande qui fasse converger le système photovoltaïque à des points optimums de fonctionnement, indépendamment des variations météorologiques et de la charge.

La figure 1 représente le schéma synoptique d'un système photovoltaïque alimentant une charge résistive R_S . Dans notre cas:

- le module photovoltaïque 'SP75', implanté dans l'environnement Orcad-Pspice [6, 7], est un module en silicium monocristallin et constitué de 36 cellules. Il délivre sous des conditions standard de test 'CST' une puissance de 75 W, un courant de 4.41 A sous une tension optimale de 15 V [3, 6].
- le quadripôle d'adaptation est un convertisseur d'énergie de type survolteur 'Boost' (Fig. 2) pour des applications nécessitant des tensions supérieures à 15 V. Les éléments constitutifs de ce quadripôle, à savoir: inductance L avec sa résistance série R_L , capacités C_E et C_S , diode de roue libre DI , transistor Mosfet, sont dimensionnés pour que le convertisseur fonctionne à une fréquence de hachage de 10 kHz.
- la commande MPPT 'Maximum Power Point Tracking' permet de chercher le point de fonctionnement optimal du module photovoltaïque dans les conditions météorologiques et de la charge stables. Ceci est basé sur la variation automatique du rapport cyclique α , du signal qui commande le convertisseur d'énergie, à une valeur adéquate de manière à maximiser la puissance à la sortie du module. Dans un article précédent, une étude d'analyse a été effectuée sur une commande analogique en fonctionnement de l'éclairement et de la charge [7]. Comme nous allons le montrer dans ce papier que l'inconvénient de cette commande est qu'elle diverge vers les conditions du circuit fermé ou ouvert, suite aux variations de l'éclairement ou de la charge.
- le circuit 'CDCS' est le circuit qui permet la détection de dysfonctionnement du module photovoltaïque et le changement de sens du déplacement du point de fonctionnement du module. Son rôle se manifeste, lorsque le système diverge suite à une variation de l'éclairement ou de la charge.

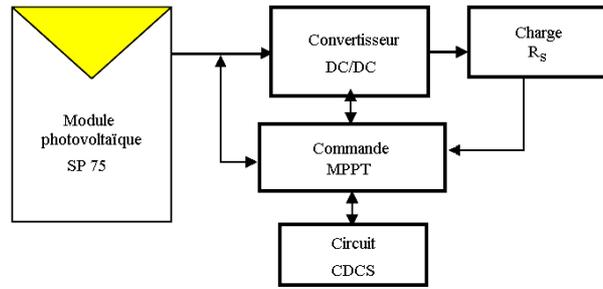


Fig. 1: Schéma synoptique du système photovoltaïque
Fonctionnement contrôlé par une commande MPPT muni d'un circuit CDCS

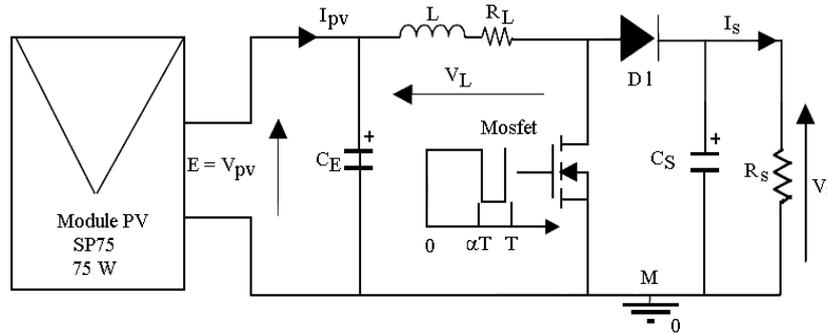


Fig. 2: Système PV formé par un module, convertisseur d'énergie 'survolteur' et une charge R_s
Interrupteur Mosfet commandé par un signal de période T et de rapport cyclique α

2.2 Commande MPTT

2.2.1 Structure de la commande MPPT analogique

Sur la figure 3, est représenté le schéma synoptique de la commande MPPT analogique répondant à notre cahier de charge [6, 7]. Le fonctionnement de cette commande est déjà analysé dans un article précédent [7]. Un rappel de la structure de cette commande est donné ci-après.

La commande MPPT analogique de la figure 3 utilise directement la tension (pont de résistances R_1 et R_2) et le courant (résistance shunt R_{sh}) du module photovoltaïque pour chercher le point de fonctionnement correspondant à la puissance maximale [4-7]. Elle peut s'appliquer aussi bien à des convertisseurs abaisseurs qu'à des élévateurs. Aussi, sur la figure 4, est représentée la forme du signal, généré par la commande MPPT (sortie du Comparateur 2). Les différents blocs du système photovoltaïque de la figure 3, qui permettent de réguler le fonctionnement du système global sont:

- 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 module photovoltaïque. 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_r et l'autre lent de constante de temps τ_l . A un instant t quelconque, l'intégrateur rapide produit à sa sortie, une tension P_r homogène à la puissance fournie par le module 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 module.

- 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 module augmente (diminue), le comparateur bascule vers son 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 (R_0, C_0), de constante de temps τ_0 , 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) (Fig. 4). Comme le montre la figure 3, lorsque la tension V_{ref} , générée à la sortie du comparateur, augmente (diminue), le rapport cyclique α augmente (diminue).
- 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.

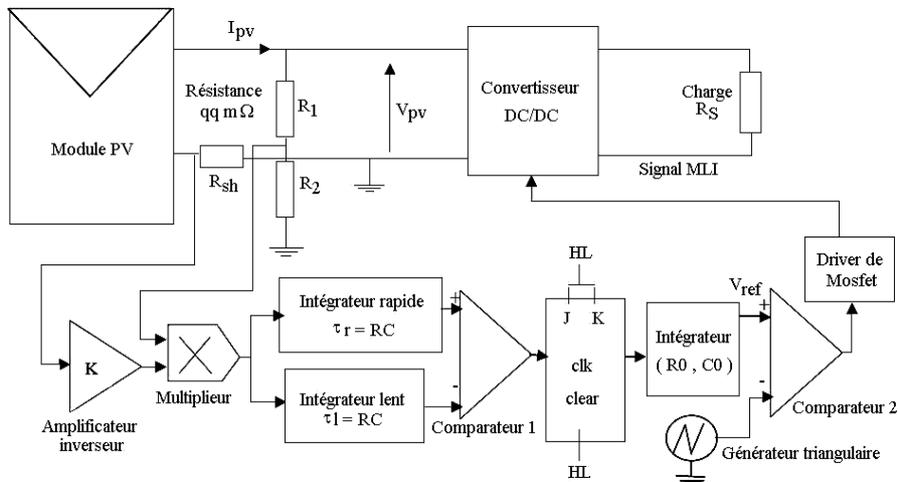


Fig. 3: Schéma synoptique de la commande MPPT analogique

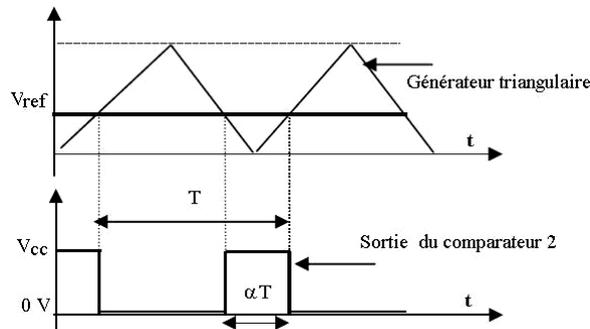


Fig. 4: Génération d'un signal carré à la sortie du comparateur (2)

2.2.2 Fonctionnement normal dy système photovoltaïque

Nous avons analysé le fonctionnement du système photovoltaïque de la figure 3 en fonction de l'éclairement L_e , des constantes de temps des intégrateurs (RC) lents et rapides, et des constantes de temps de l'intégrateur (R_0, C_0). Dans ce cas l'intégrateur (R_0, C_0) est relié à la sortie Q de la bascule JK . Les résultats typiques de simulations (Fig. 5) montrent que la puissance électrique à l'entrée (P_{pv}) et à la sortie (P_s) du convertisseur Boost oscille autour des caractéristiques optimales au bout d'un temps inférieur 60 ms. Le même comportement est obtenu sur les courants et les tensions à l'entrée et à la sortie du convertisseur.

Par ailleurs, nous avons montré que l'amplitude des oscillations dépend des constantes de temps: lorsque les constantes du temps des intégrateurs (RC) lents et rapides sont rapprochées (éloignées) ou la constante du temps de l'intégrateur (R_0, C_0) augmente l'amplitude des oscillations diminue (augmente).

2.2.3 Divergence du système photovoltaïque

Comme le montre la figure 6.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 varie (W_2), alors ce point de puissance maximale est le point PPM2 et le point de fonctionnement du générateur photovoltaïque est le point Pf (Fig. 6.a). Pour faire converger vers le nouveau point PPM2, il faudra ajuster le rapport cyclique α à la valeur α_{2opt} .

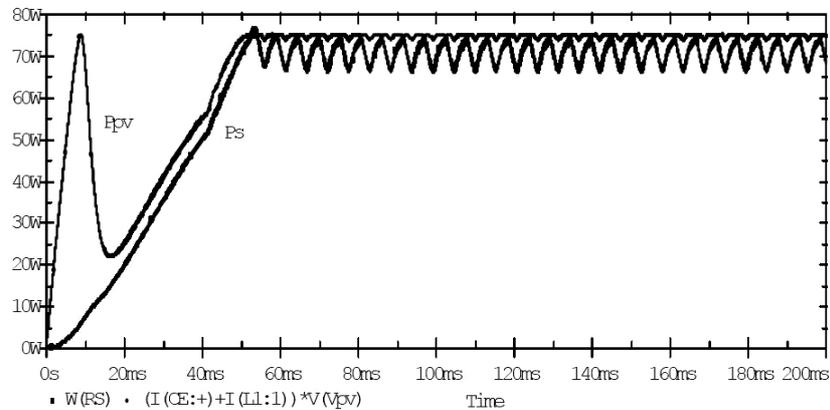


Fig. 5: Simulation de la puissance à l'entrée (P_{pv}) et à la sortie (P_s) du convertisseur Boost

$f = 10 \text{ kHz}$, $L = 200 \text{ } \mu\text{H}$, $C_E = 2200 \text{ } \mu\text{F}$, $C_S = 200 \text{ } \mu\text{F}$, $L_e = 1000 \text{ W/m}^2$, $R_S = 50 \text{ } \Omega$,
 $\tau_r = 1 \text{ k}\Omega * 0.1 \text{ } \mu\text{F} = 0.1 \text{ ms}$, $\tau_l = 1 \text{ k}\Omega * 1 \text{ } \mu\text{F} = 1 \text{ ms}$, $\tau_0 = 5 \text{ k}\Omega * 7.5 \text{ } \mu\text{F} = 37.5 \text{ ms}$

Il en sera de même que lorsque la charge R_S varie (Fig. 6.b): le point de puissance maximale dévie de sa position optimale (PPM1). Pour faire 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 effet, lorsque le système photovoltaïque de la figure 3 subit des brusques variations de l'éclairement ou de la charge, la commande MPPT diverge vers les conditions du circuit ouvert ($Q = 0$) ou du circuit fermé ($Q = 1$) (Fig. 6).

Nous avons analysé le fonctionnement du système photovoltaïque en faisant subir à ce système, une brusque variation de la charge ou de l'éclairement.

Sur la figure 7, nous représentons l'influence typique de l'éclairement sur la puissance à l'entrée et à la sortie du convertisseur. Il apparaît une divergence du système vers les conditions du circuit fermé dans ce cas ($Q = 1$) lorsque l'éclairement varie à l'instant 100 ms.

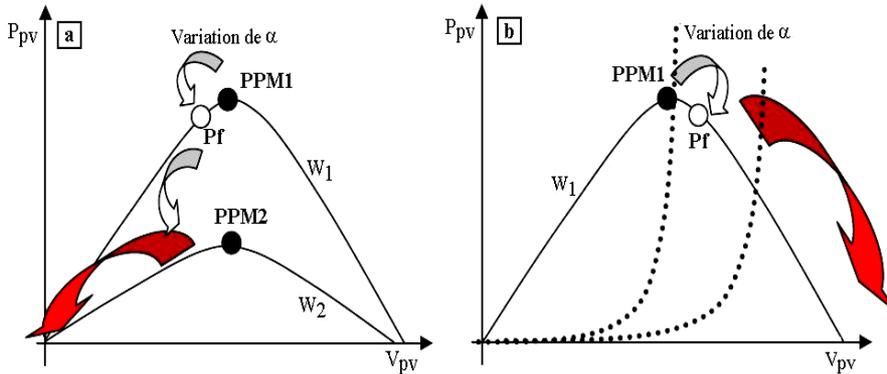


Fig. 6: Divergence du point de fonctionnement du générateur photovoltaïque suite aux variations de l'éclairement et de la charge
 (a) Variation de l'éclairement, (b) Variation de la charge

W_1, W_2 : Puissances de l'éclairement, P_f : Point de fonctionnement du générateur PV, (—) Puissance à la sortie du générateur PV, (----) Puissance fixée par la charge R_{pv} du générateur PV ($P_{pv} = V_{pv}^2 / R_{pv}$)

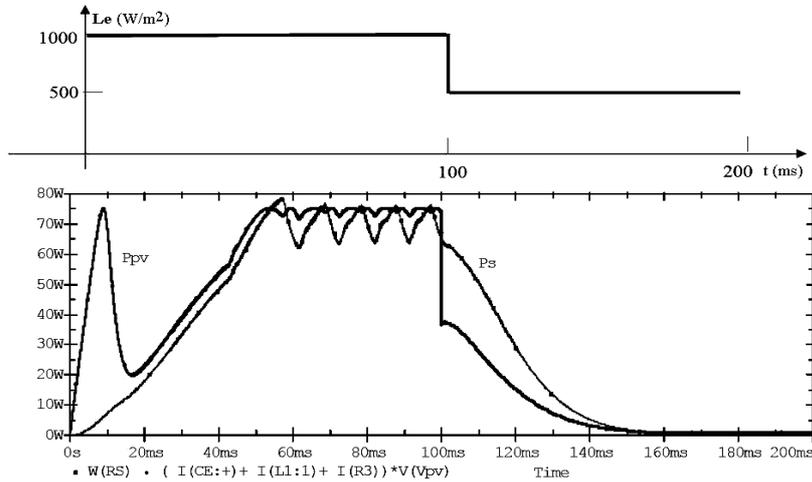


Fig. 7: Simulation de l'influence de la variation de l'éclairement sur la puissance à l'entrée (P_{pv}) et à la sortie (P_s) du convertisseur Boost

$f = 10 \text{ kHz}, L = 200 \mu\text{H}, C_E = 2200 \mu\text{F}, C_S = 200 \mu\text{F}, R_S = 50 \Omega,$
 $\tau_r = 1 \text{ k}\Omega * 1 \mu\text{F} = 1 \text{ ms}, \tau_l = 1 \text{ k}\Omega * 2.2 \mu\text{F} = 2.2 \text{ ms}, \tau_0 = 5 \text{ k}\Omega * 7.5 \mu\text{F} = 37.5 \text{ ms}$

2.3 Circuit de détection de dysfonctionnement et de changement de sens 'CDCS'

2.3.1 Structure et fonctionnement du circuit CDCS

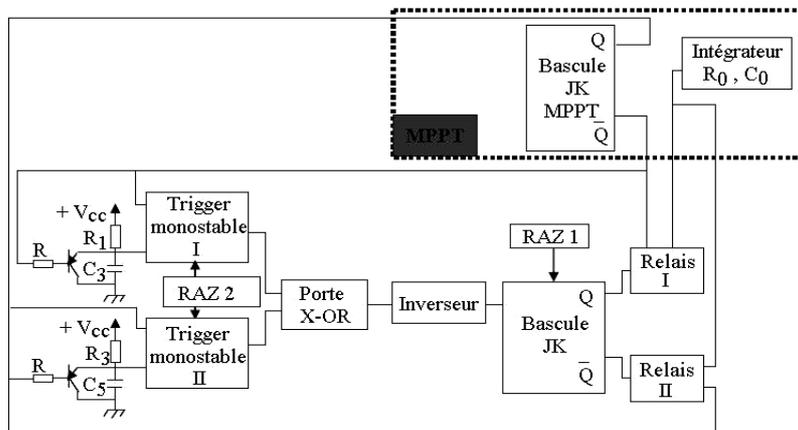
La structure du circuit 'CDCS' implanté dans Orcad-Pspice est représentée sur la figure 8. Dans ce schéma:

- deux monostables (NE555) (I et II) dont les entrées (Trigger, Discharge) sont reliées aux sorties \bar{Q} et Q de la bascule JK de la commande MPPT de la figure 3. Ils permettent de détecter la divergence du système photovoltaïque: les deux sorties Q et \bar{Q} ne change pas d'état. Si la sortie Q est à l'état '0' ('1'), alors le monostable I (II) (Fig. 8) détecte le dysfonctionnement et la période du monostable T_1 (T_2) est donnée par:

$$T_1 = 1.1 \times R_1 \times C_3 \quad T_2 = 1.1 \times R_3 \times C_5 \quad (1)$$

Ces monostables ne sont fonctionnels que lorsque la puissance du module oscille autour du PPM. Dans les simulations, nous avons fixé un 'Stimulus' (Fig. 8) qui bloque cette bascule pendant 60 ms (RAZ2, remise à zéro, des deux monostables qui sont à l'état '0' pendant 60 ms).

- les deux sorties des deux monostables sont reliées à une porte logique de type ou exclusif (X-OR). Si le système perd son point de fonctionnement optimal, l'un des monostables change d'état et la sortie de la porte logique X-OR change d'état, montrant ainsi la détection de dysfonctionnement du système.
- l'état correspondant à la sortie de la porte X-OR est ensuite inversé par un inverseur logique,
- la sortie de l'inverseur est reliée à l'horloge de la bascule JK montée en T. Cette bascule n'est fonctionnelle que lorsque la puissance du module photovoltaïque oscille autour du PPM. Dans les simulations, nous avons fixé un 'Stimulus' (Fig. 8) qui bloque cette bascule pendant 70 ms (RAZ1 de la bascule est à l'état '0' pendant 70 ms). Si l'un des monostables détecte un dysfonctionnement, alors le signal d'horloge (sortie de l'inverseur) change d'état. S'il s'agit d'un basculement à l'état '0' alors les sorties Q et \bar{Q} changent d'état.
- les deux sorties de cette bascule commandent deux relais qui relient les sorties \bar{Q} et Q de la bascule T de la commande MPPT à l'intégrateur (R0, C0) de la même commande MPPT. Si la sortie Q de la bascule JK du circuit CDCS est à l'état '0' ('1') alors le relais II (I) connecte l'intégrateur (R0, C0) à la sortie Q (\bar{Q}) de la commande MPPT. Donc, si le système détecte un dysfonctionnement, alors le changement d'état des sorties Q (\bar{Q}) de la bascule JK du circuit CDCS inverse le rôle des relais I et II, et par conséquent le changement de sens du déplacement du point de fonctionnement du générateur photovoltaïque.



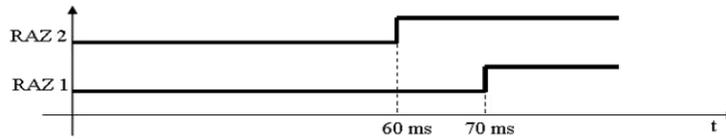


Fig. 8: Schéma synoptique du circuit CDCS implanté dans Orcad-Pspice et signaux RAZ2 et RAZ1 des entrées 'Clear' des monostables (I et II) et de la bascule JK

R , R_1 et R_3 : résistances, C_3 et C_5 : capacités, V_{CC} : tension de polarisation (5 V)

2.3.2 Fonctionnement du circuit CDCS

Dans le système photovoltaïque (Fig. 1), le circuit 'CDCS' a pour rôle de détecter un éventuel dysfonctionnement du système et de faire converger vers des conditions optimales, suite à des variations de l'éclairement ou de la charge. Dans notre cas, le circuit 'CDCS' a été implanté (Fig. 8), et nous avons analysé le fonctionnement du système photovoltaïque au complet tout en tenant compte des paramètres de la commande MPPT et du circuit 'CDCS'. Les constantes du temps (τ_H et τ_L) des monostables haut et bas du circuit 'CDCS' reste un choix fixé par l'utilisateur.

Dans ce cas, il faut tenir compte du temps de variation des tensions et courants du système photovoltaïque, lorsque celui ci subit des brusques variations de l'éclairement ou de la charge.

Pour analyser le fonctionnement du circuit 'CDCS', nous avons pris la situation de la divergence du système de la figure 7. Nous avons représenté sur la figure 9, les tensions, courants et puissances à l'entrée et à la sortie du convertisseur Boost, lorsque au bout de 100 ms l'éclairement a diminué de 50 % (Fig. 9).

Il apparaît que le circuit 'CDCS' détecte au bout de 22 ms, la divergence du système puis, sans démarrer le système, fait converger vers des conditions optimales correspondantes à l'éclairement de 500 W/m^2 . La détection du dysfonctionnement du système est signalée à l'instant 120 ms par le basculement de l'horloge à l'état '0' (Fig. 9). Lorsque le même signal bascule à l'état '1', alors le système retrouve de nouveau le PPM. Donc, la durée de la détection de dysfonctionnement et la convergence vers le nouveau PPM est de l'ordre de 140 ms.

Afin de suivre le déplacement du point de fonctionnement du système, nous avons représenté sur les figures 10 et 11, les formes d'ondes des sorties Q et \bar{Q} des bascules JK de la commande MPPT et du circuit 'CDCS'. Il apparaît:

- avant divergence du système (temps inférieur à 100 ms), le relais II connecte l'intégrateur (R_0, C_0) à la sortie Q de la bascule JK de la commande MPPT. Par contre, le relais I est désactivé (circuit ouvert).
- à partir de 100 ms, la commande MPPT diverge vers les conditions du circuit fermé ($Q = 1$) (Fig. 11).
- lorsque le circuit 'CDCS' détecte le dysfonctionnement (temps de l'ordre de 120 ms), alors les relais I et II changent de rôle. L'intégrateur (R_0, C_0) est relié à la sortie \bar{Q} (état '0') de la commande MPPT par l'intermédiaire du relais I.

Par conséquence, le rapport cyclique du convertisseur diminue et le point de fonctionnement change de sens en se déplaçant vers les conditions du circuit ouvert. La forme du signal d'horloge de la commande MPPT (Fig. 11) montre alors le changement de rôle des relais à l'instant 122 ms: les puissances rapide et lent se croisent puisque le signal d'horloge bascule à l'état '1' à cet instant.

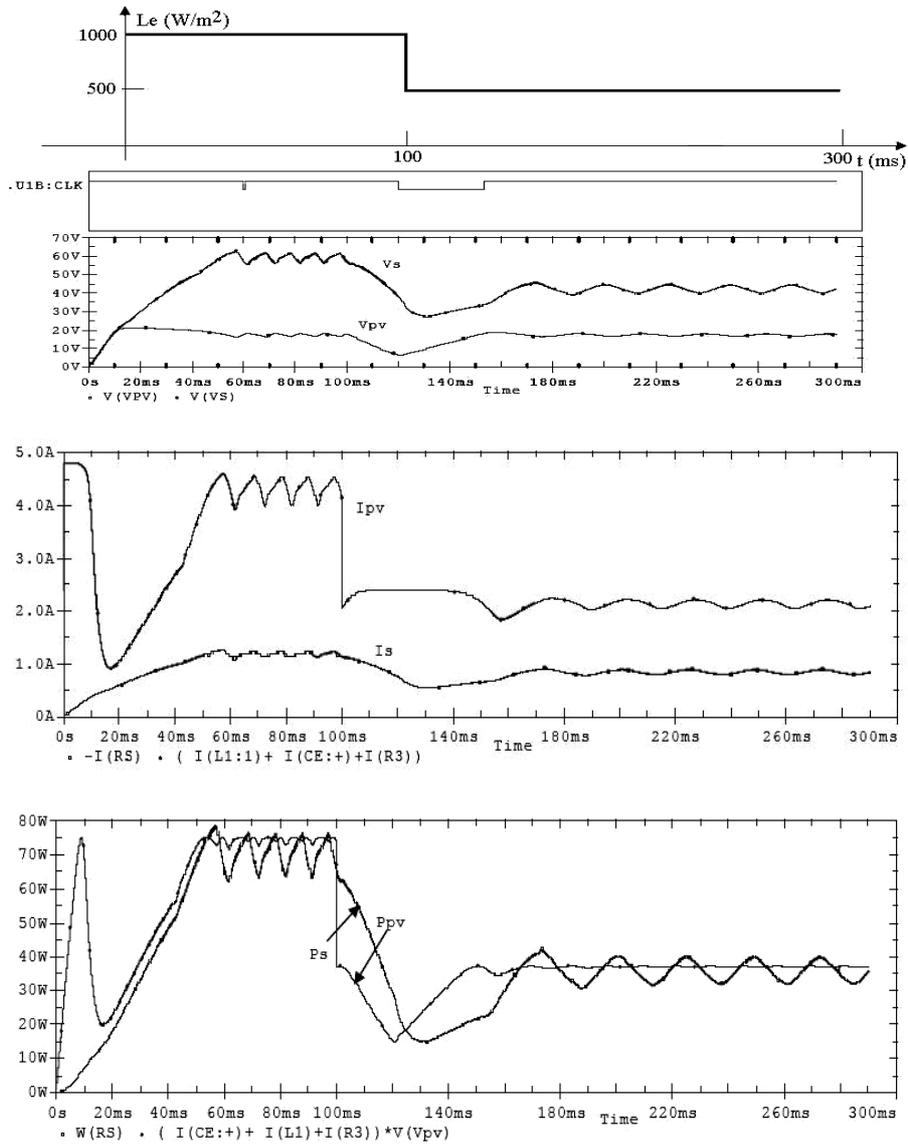


Fig. 9: Simulation de l'influence de la variation de l'éclairement sur les tensions (V_{pv} , V_s), courants (I_{pv} , I_s) et puissances (P_{pv} , P_s) à l'entrée et à la sortie convertisseur Boost, le signal d'horloge (U1B:CLK) de la bascule JK du circuit 'CDCS'

$$f = 10 \text{ kHz}, L = 200 \text{ } \mu\text{H}, C_E = 2200 \text{ } \mu\text{F}, C_S = 200 \text{ } \mu\text{F}, R_S = 50 \text{ } \Omega,$$

$$\text{'MPPT': } \tau_r = 1 \text{ k}\Omega * 1 \text{ } \mu\text{F} = 1 \text{ ms}, \tau_l = 1 \text{ k}\Omega * 2.2 \text{ } \mu\text{F} = 2.2 \text{ ms}, \tau_0 = 5 \text{ k}\Omega * 7.5 \text{ } \mu\text{F} = 37.5 \text{ ms}$$

$$\text{'CDCS': } \tau_H = 2.2 \text{ k}\Omega * 10 \text{ } \mu\text{F} = 22.0 \text{ ms}, \tau_L = 2.2 \text{ k}\Omega * 10 \text{ } \mu\text{F} = 22.0 \text{ ms}$$

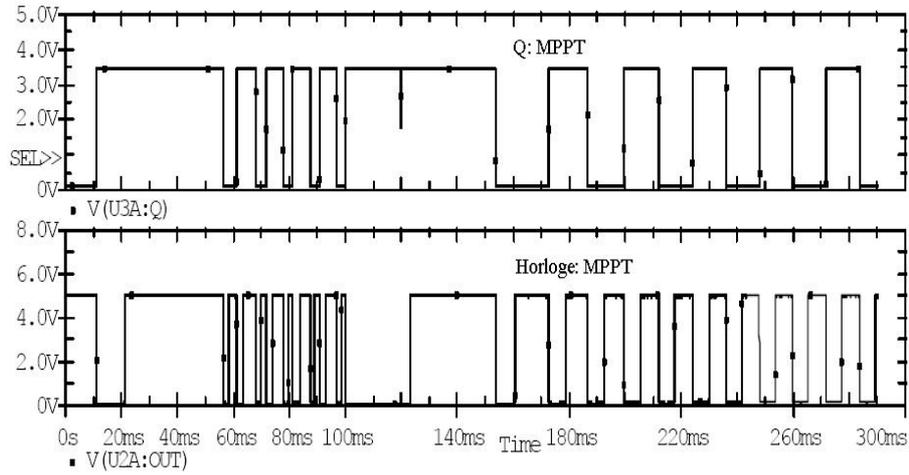


Fig. 10: Forme d'onde de l'horloge, des sorties Q de la bascule JK de la commande MPPT, lors du fonctionnement du système photovoltaïque, en présence de la commande MPPT et du circuit 'CDCS'

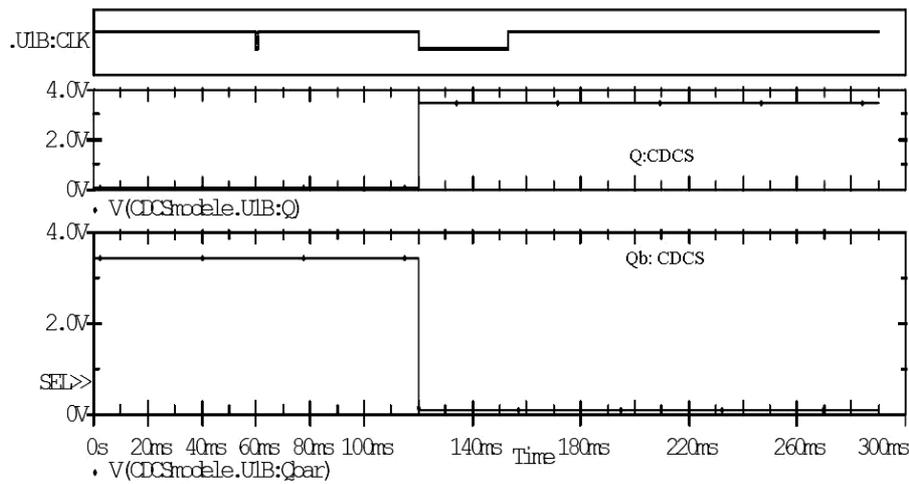


Fig. 11: Forme d'onde de l'horloge (UIb: CLK), sorties Q et \bar{Q} (dans Ppsice: Qb) de la bascule JK du circuit 'CDCS', lors du fonctionnement du système photovoltaïque en présence de la commande MPPT et le circuit 'CDCS'

3. CONCLUSION

Dans cet article, nous avons analysé la conception et l'optimisation d'un système photovoltaïque analogique, muni d'un circuit de détection de dysfonctionnement et de convergence vers les conditions optimales (circuit 'CDCS'). Nous avons montré que le circuit 'CDCS' contrôle le déplacement du point de fonctionnement du générateur photovoltaïque: si le point de fonctionnement diverge vers les conditions du circuit ouvert (fermé), le circuit 'CDCS' change le sens de déplacement de ce point de fonctionnement vers les conditions du circuit fermé (ouvert).

Les résultats obtenus montrent que le circuit 'CDCS' effectue correctement son rôle et améliore le fonctionnement des commandes MPPT et en conséquence les performances des modules photovoltaïques. Lors d'une divergence du système, le circuit 'CDCS' détecte le dysfonctionnement du système, puis le fait converger vers le point de puissance maximale (PPM) sans redémarrer le système global.

Remerciements

Ce travail entre dans le cadre:

- du Programme International de Coopération Scientifique PICS (CNRT-Maroc-CNRS-France
- du Programme Thématique d'Appui à la Recherche Scientifique (PROTARS III), Maroc, N°D43/06.
- de la Coopération Marocco-Belge, 'Commission Universitaire pour le Développement, CUD', Activité Ouj 03, 'Appui à la Recherche et Développement', Energies renouvelables.
- du Programme Global de Recherche de l'Université Mohammed Premier d'Oujda, 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] K. Kassmi, M. Hamdaoui et F. Olivie, '*Conception, Optimisation et Réalisation des Systèmes Photovoltaïques pour une Meilleure Exploitation de l'Energie Solaire*', Maîtrise de l'Energie dans la Construction et la Rénovation des Bâtiments, Centre d'Etudes Supérieures Industrielles, 'CESI', Rouen, France, 8 Novembre 2007.
- [4] 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,
- [5] Z.M. Salameh, F. Dagher and W.A. Lynch, '*Step-Down Maximum Power Point Tracker for Photovoltaic Systems*', Solar Energy, Vol. 46, N° 4, pp. 279 - 282, 1991.
- [6] 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*', Energies Renouvelables, Organisation des Nations Unies pour l'Education, la Science et la culture, Bureau de l'UNESCO à Rabat, Bureau Multi Pays pour le Maghreb, Les Energies Renouvelables au Maroc, Le débat est lancé. ISBN9954_8068_2_2, Rabat, Morocco.
- [7] K. Kassmi, M. Hamdaoui, et F. Olivie, '*Conception et Modélisation d'un Système Photovoltaïque Adapté par une Commande MPPT Analogique*', Revue des Energies Renouvelables, Vol.10, N°4, pp. 451 - 462, 2007.
- [8] K.H. Hussein, I. Muta, T. Hoshino and M. Osakada, '*Maximum Photovoltaic Power Tracking: an Algorithm for Rapidly Changing Atmospheric Conditions*', IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., Vol. 142, N°1, pp. 59 - 64, Jan. 1995.
- [9] 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.
- [10] J. Soler, E. Daroqui, F.J. Gimeno, S. Segui-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~.