

Dispositif d'optimisation de la production décentralisée de l'électricité photovoltaïque

Khelil ZAOUCHE^{1,2}, Abdelaziz TALHA², El Madjid BERKOUK³

¹ESI - Ecole Nationale Supérieure en Informatique, BP 68M - Oued Smar 16270 Alger, Algérie, k_zaouche@esi.dz

² Laboratory of Instrumentation, Faculty of Electronics and Computer Engineering, University of Sciences and Technology Houari Boumediene, BP 32 El-Alia 16111 Bab-Ezzouar Algiers, Algeria.

³ Laboratory of Process Control, Polytechnics National School, University of Algiers, Algiers, #10, Hassen Badi Road, El Harrach, BP 182, Algiers, Algeria

RESUME -Nous présentons dans ce papier un système d'intégration de l'énergie photovoltaïque au réseau électrique. Ledit système est axé autour d'un onduleur sept niveaux, alimentant une charge non-linéaire. Afin d'assurer l'équilibrage des tensions continues de l'onduleur, on utilisera un hacheur élévateur à trois niveaux. Le dispositif présenté permet l'extraction de toute la puissance photovoltaïque disponible. Cette énergie extraite, alimente la charge locale, le surplus d'énergie est injecté dans le réseau électrique. Lors de faibles conditions météorologiques, où les panneaux photovoltaïques n'arrivent pas à satisfaire les besoins énergétiques de la charge, la puissance manquante est fournie par le réseau électrique. Au point de raccordement commun, le courant du réseau possède d'excellentes performances spectrales.

Mots-clés—Onduleur Sept Niveaux ; Hacheur Elévateur Multiniveaux ; Photovoltaïque ; Charge Non-Linéaire.

1. INTRODUCTION

Nous observons ces dernières années, une prolifération sans précédent des systèmes décentralisés de production d'énergies dites nouvelles et renouvelables [1]. L'exploitation de ce type d'installations n'est pas planifiée de manière centralisée, ni coordonnée et n'assure généralement pas de services système. L'intérêt de tels dispositifs est de produire de la puissance à l'endroit même de la demande. Ce papier porte sur l'emploi d'une cascade : Hacheur trois niveaux-Onduleur sept niveaux, pour l'optimisation de la production de l'énergie photovoltaïque ; figure 1. Ce dispositif sera chargé, au niveau du point de raccordement commun, de satisfaire la demande énergétique des charges locales, et de garantir un facteur de puissance proche de 1. L'excès de la production photovoltaïque est injecté dans le réseau électrique. En période de faible ensoleillement, la puissance nécessaire à l'alimentation des charges locales est prélevée sur le réseau.

L'onduleur, adopté ici, est de type T. il permet, à partir de trois tensions continues (V_1 , V_2 , et V_3 de la figure 1), de synthétiser un signal de sortie à sept niveaux distincts. La commande rapprochée de l'onduleur est effectuée par une Modulation à Largeur d'Impulsions (MLI) à porteuses décalées en phase. Cette technique de modulation offre, à fréquence de commutation modérée, d'excellentes

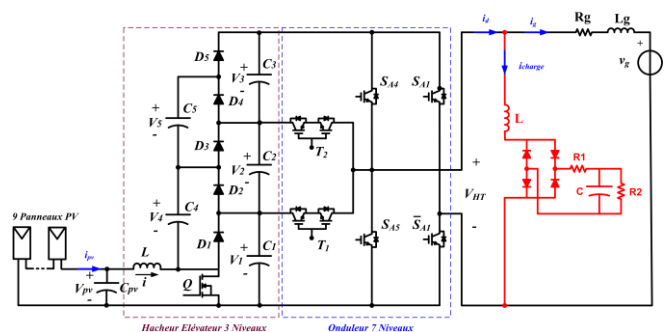


Fig. 1. Schéma Global.

performances spectrales [2]. Nous proposons, dans le cadre de ce travail, l'emploi du Hacheur élévateur multiniveaux, proposé dans [3]. Ce dernier possède la faculté d'équilibrer, intrinsèquement, les tensions formant le bus continu (V_1 , V_2 , et V_3). Le convertisseur DC/DC assurera, également, la poursuite du point de puissance maximale.

2. STRATEGIE DE CONTROLE

Les principaux objectifs que le processus de commande doit satisfaire sont :

- La tension du bus continu, représentée par le condensateur C_{pv} sur la figure 1, doit être réglée aussi proche que possible de sa valeur de référence. Ceci permettra d'extraire la totalité de la puissance photovoltaïque disponible.
- Synthétiser au niveau de la sortie de l'onduleur une onde sinusoïdale de forme MLI multiniveaux.
- Le courant et la tension du réseau doivent être en phase, les contenus harmoniques des ondes de sortie doivent satisfaire les normes en vigueur.
- L'énergie photovoltaïque extraite doit alimenter la charge, le surplus d'énergie sera injecté dans le réseau. Si les panneaux photovoltaïques n'arrivent pas à satisfaire les besoins énergétiques de la charge, la puissance manquante sera fournie par le réseau électrique.

Deux dispositifs indépendants de contrôle sont utilisés ici. Le premier est réservé à la poursuite du point de puissance

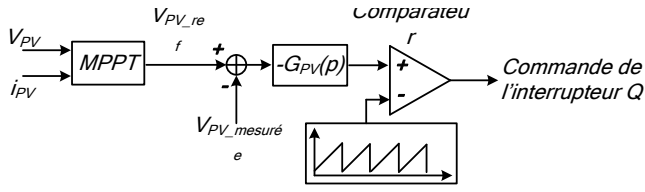


Fig. 2. Boucles de Poursuite du Point de Puissance Maximal

Maximal, (Maximum Power Point Tracking, MPPT). Il s'agit d'une boucle d'asservissement de la tension au niveau de la sortie de la chaîne photovoltaïque. Le cœur de ce premier dispositif de régulation, est un contrôleur de type PI (Proportionnel et Intégrale), $G_{PV}(p)$ sur la figure 2.

Le deuxième dispositif de contrôle est de type cascadié avec deux boucles de réglage.

La Figure 3 représente un schéma synoptique de ce deuxième système de contrôle, qui contient une boucle d'asservissement

de la somme des tensions formant le bus continu de l'onduleur ($V_1 + V_2 + V_3$), et une boucle de contrôle du courant réseau.

La sortie de la boucle de régulation de tension est une grandeur continue. A cette grandeur, qu'on nommera I_M , est soustraite l'amplitude de la composante fondamentale du courant absorbé par la charge; notée I_1 . La référence du courant réseau sera générée en multipliant cette nouvelle entité, $(I_M - I_1)$, par un gabarit sinusoïdal issu d'une boucle à verrouillage de phase (PLL, Phase-Locked Loop). En imposant cette référence au courant réseau, On force ainsi, l'onduleur à extraire toute la puissance photovoltaïque disponible, et à réaliser en même temps une compensation d'harmoniques.

En effet, le courant absorbé par la charge peut se mettre sous la forme :

$$i_{Load}(t) = I_1 \sin(2\pi f_g t) + \sum_{k=2}^{\infty} I_k \sin(k \times 2\pi f_g t) \quad (1)$$

f_g étant la fréquence du réseau électrique.

L'algorithme de commande forcera, donc, le courant à la sortie de l'onduleur à prendre la forme suivante:

$$i_d(t) = I_M \sin(2\pi f_g t) + \sum_{k=2}^{\infty} I_k \sin(k \times 2\pi f_g t) \quad (2)$$

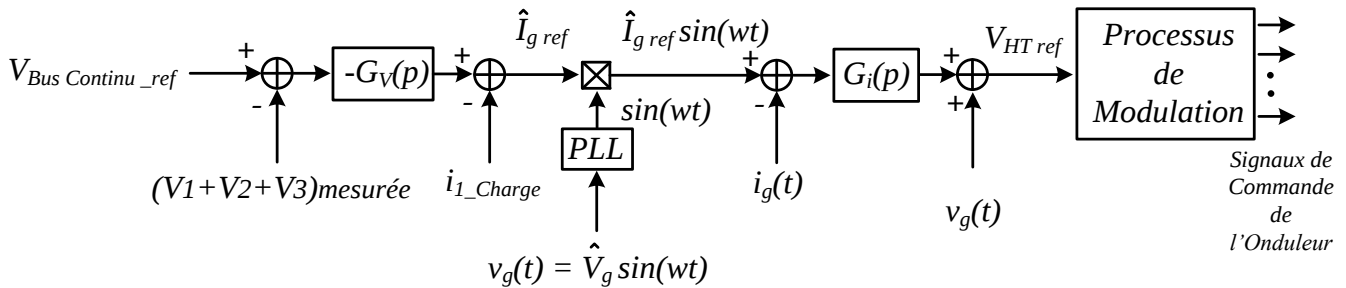


Fig. 3. Deuxième Dispositif de Réglage

Notons que lors de la poursuite d'une trajectoire sinusoïdale un correcteur de type PI (Proportionnel et Intégrale) présenterait une erreur permanente non nulle. Cette dernière peut être réduite en augmentant la rapidité du système, donc sa bande passante. Malheureusement, ceci renvoi également le système vers sa limite de stabilité. Pour annuler l'erreur en régime permanent tout en gardant une marge de stabilité confortable, la boucle de régulation du courant sera axée autour du régulateur PR (Proportionnel et Résonant) donné par l'équation:

$$G_i(p) = k_p + \frac{k_i \omega_C p}{p^2 + 2\omega_C p + \omega_0^2} \quad (3)$$

Le paramètre k_p détermine fondamentalement la dynamique du système en termes de bande passante, de marge de phase et de gain. ω_C sert à contrôler la largeur de la bande passante du correcteur PR, soit donc la sensibilité de système. Alors que k_i peut être réglé pour déplacer verticalement la réponse en amplitude, sans influencer la bande passante du système. ω_0 est la pulsation de résonance du correcteur, elle est égale à celle du réseau électrique.

Le régulateur du bus continu, $G_V(p)$ sur la figure 3, est de type Proportionnel et Intégral.

3. TECHNIQUE DE MODULATION

On utilise dans ce travail, une modulation en largeur d'impulsions à porteuses décalées en phase.

Pour générer au niveau de la sortie de l'onduleur, une tension à sept niveaux, on comparera l'onde de référence avec six porteuses : $U_{p1}, U_{p2}, \dots, U_{p6}$, de forme triangulaire symétrique [4]. Les six porteuses possèdent la même fréquence et la même amplitude, et sont décalées l'une par rapport à l'autre de $\Delta\phi = \frac{2\pi}{6}$.

On définit, également, six grandeurs intermédiaires : $V_1, V_2, \dots, V_6$, définies par :

$$V_k = \begin{cases} 0 & \text{si } V_{HT,ref} < U_{pk} \\ 1 & \text{si } V_{HT,ref} \geq U_{pk} \end{cases} \quad \text{avec } k = 1, 2, 3 \quad (4)$$

et :

$$V_k = \begin{cases} -1 & \text{si } V_{HT,ref} < U_{pk} \\ 0 & \text{si } V_{HT,ref} \geq U_{pk} \end{cases} \quad \text{avec } k = 4, 5, 6 \quad (5)$$

Rappelons que l'onde de référence $V_{HT, ref}$, est la sortie du processus de commande, figure2.

U_A , l'image de la sortie du modulateur est donnée par :

$$U_A = \sum_{k=1}^6 V_k \quad (6)$$

Finalement, les signaux de commande des interrupteurs : $S_{A1}, \bar{S}_{A1}, S_{A4}, S_{A5}, T_1$ et T_2 , seront élaborés à partir du signal U_A et de la table des commutations de l'onduleur, Table I.

Table I: Matrice de commutation pour l'Onduleur Sept Niveaux

U_A	S_{A1}	$\bar{S}_{A1}$	S_{A4}	S_{A5}	T_1	T_2
-3	0	1	1	0	0	0
-2	0	1	0	0	1	0
-1	0	1	0	0	0	1
0	0	1	0	1	0	0
	1	0	1	0	0	0
1	1	0	0	0	1	0
2	1	0	0	0	0	1
3	1	0	0	1	0	0

4. TESTS D'ÉVALUATION ET DISCUSSIONS

Afin d'évaluer l'efficacité du système proposé, une série de test à été menée dans l'environnement de développement *Psim* de chez *Powersimtech*. Les principales caractéristiques du circuit de puissance sont : réseau électrique : 220V-50Hz. Une valeur de 500μF fut adoptée pour les condensateurs. Une fréquence porteuse de 10kHz est retenue pour la modulation MLI. La chaîne photovoltaïque est constituée de neuf panneaux connectés en série. Une charge, absorbant un courant fortement non-linéaire, est placée entre l'onduleur et le réseau électrique (figure1).

Dans un premier lieu, on impose un ensoleillement de 200W/m² et une température de 25°C, pour l'ensemble des panneaux PV. La figure 4 représente l'évolution de la tension au niveau de la sortie de la chaîne PV, notée V_{pv} . On constate que la tension photovoltaïque, V_{pv} , se stabilise autour de la ligne imposée par le régulateur MPPT. Ce qui est une claire indication du fait que la chaîne photovoltaïque fonctionne dans des conditions de puissance maximale. Toute la puissance photovoltaïque disponible est donc extraite. Sur la figure 4 on reporte, également, les trois tensions V_1 , V_2 , et V_3 . Ces tension se stabilisent et s'équilibrent après une courte période transitoire. L'équilibrage des tensions formant le bus continu, est une propriété intrinsèque au hacheur multiniveau utilisé.

La figure 5, représente le courant réseau, le courant absorbé par la charge, ainsi que l'allure du courant délivré par l'onduleur. On note que le courant réseau possède une allure quasi-sinusoidale, cela en dépit de la forme très distordue du courant absorbé par la charge. Les déformations étant ici compensées par l'onduleur. Le courant débité par ce dernier est plus faible que celui absorbé par la charge. Ceci explique le déphasage du courant réseau. En effet, pour cette valeur de la puissance PV, le réseau fournit de l'énergie à la charge. Le

déphasage entre courant et tension réseau est clairement visible sur la figure 6.

Dans une deuxième phase de nos tests, on soumet les panneaux PV à un ensoleillement de 1000W/m² et une température de 25°C.

La figure 7 représente le courant réseau, le courant absorbé par la charge, ainsi que l'allure du courant délivré par l'onduleur. On observe que pour ce deuxième cas, le système fournit du courant au réseau électrique. Ce courant est, toujours, de forme quasi-sinusoidale et en phase avec la tension réseau. La figure 8 représente le courant et la tension du réseau électrique.

Lorsque l'ensoleillement est de 200W/m², toute la puissance PV disponible est extraite puis injectée dans la charge. Pour ce faible niveau d'ensoleillement, le réseau électrique et les panneaux PV, travaillent conjointement afin de satisfaire les besoins énergétiques de la charge. En revanche, lorsque l'ensoleillement est de 1000W/m², la puissance PV extraite est fournie à la charge, le surplus d'énergie est injecté dans le réseau électrique.

La figure 9 représente l'allure de la tension au niveau de la sortie de l'onduleur ; où on observe une onde MLI à sept niveaux de tension distincts.

Les performances spectrales sont analysées à partir de l'outil FFT de la bibliothèque *Psim*. La figure 10 représente le contenu harmonique du courant réseau, relevé pour les conditions météorologiques de 1000W/m² et 25°C. On constate, que grâce à la technique de modulation choisie, les composantes harmoniques sont poussées vers les hautes fréquences ; conférant, ainsi, d'excellentes performances spectrales au courant réseau. Pour tous les tests effectués, on relève, pour le courant réseau, un THD de l'ordre de 0.5%.

Les panneaux photovoltaïques étant principalement sensibles aux variations de l'ensoleillement, l'effet de la variation de la température n'a pas été discuté ici.

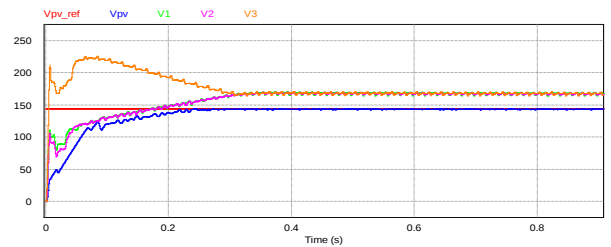


Fig. 4. Tensions PV, et Bus Continu

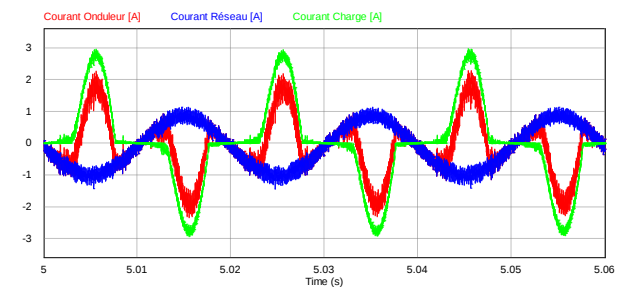


Fig. 5. Courants : Réseau, Onduleur, et de Charge pour 200W/m², 25°C

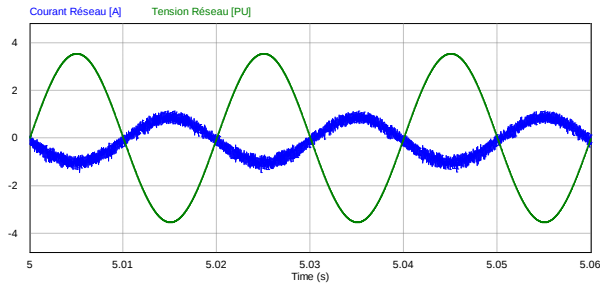


Fig. 6. Courant et Tension Réseau, pour 200W/m^2 , 25°C

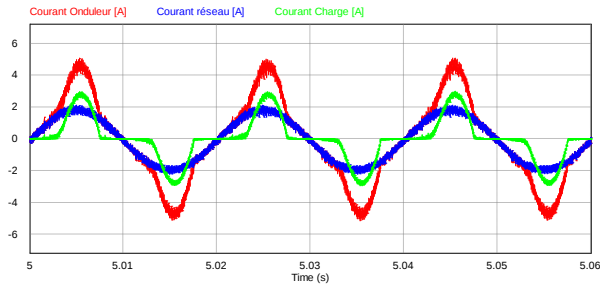


Fig. 7. Courants : Réseau, Onduleur, et de Charge pour 1000W/m^2 , 25°C

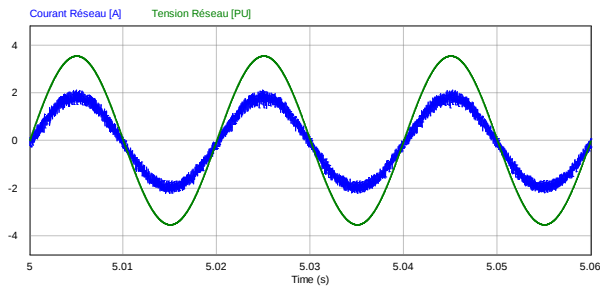


Fig. 8. Courant et Tension Réseau, pour 1000W/m^2 , 25°C

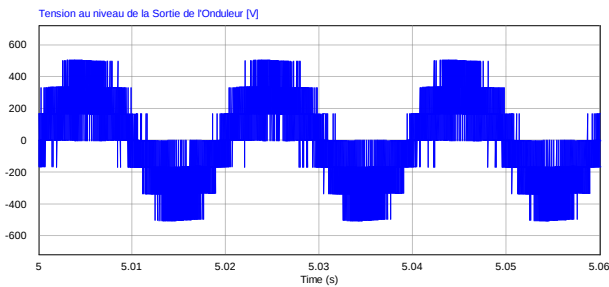


Fig. 9. Tension au niveau de la sortie de l'onduleur

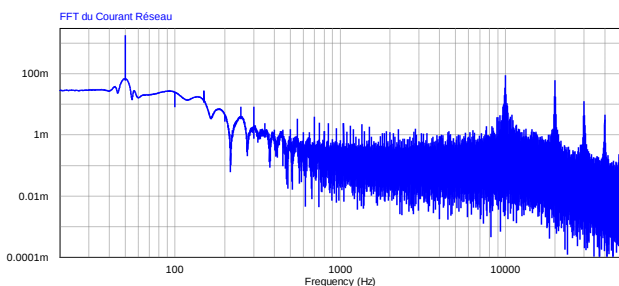


Fig.10. FFT du Courant Réseau pour 1000W/m^2 , 25°C

5. CONCLUSION

Dans ce papier nous avons présenté un dispositif d'optimisation de la production décentralisée de l'électricité photovoltaïque. Ledit dispositif est axé autour d'un onduleur à sept niveaux, connecté au réseau électrique, et alimentant une charge non-linéaire. L'équilibrage des tensions du bus continu de l'onduleur, fut assuré par un hacheur élévateur multiniveaux. Ce dernier est, également, chargé de la poursuite du point de puissance maximale. Une loi de commande a été élaborée afin d'assurer un fonctionnement optimal du système proposé. Les résultats ont été présentés et discutés.

6. REFERENCES

- [1] F. Blaabjerg, Y. Yang, D. Yang and X. Wang, "Distributed Power-Generation Systems and Protection", *Proceedings of the IEEE*, vol. 105, no. 7, pp. 1311-1331, 2017.
- [2] G. Carrara, S. Gardella, M. Marchesoni, R. Salutati and G. Sciutto, "A new multilevel PWM method: a theoretical analysis", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 7, no. 3, pp. 497-505, 1992.
- [3] J. Rosas-Caro, J. Ramirez, F. Peng and A. Valderrabano, "A DC-DC multilevel boost converter", *IET Power Electronics*, vol. 3, no. 1, p. 129, 2010.
- [4] A. Talha, E. M. Berkouk, and M. S. Boucherit, "Study and control of two two-level PWM rectifier—clamping bridge—seven-level NPC VSI cascade: application to PMSM speed control, " in *Euro. Trans. Electr. Power*, vol. 16, no. 1, pp. 93–107, Jan. 2016.