

Modélisation Et Simulation D'un Système PV Intégré À Un Réseau BT Par La Méthode Du Watt-Var découplé

Asma MESKANI^{*1}, Ali HADDI^{*2}, Oualid KAMACH^{*3}

1) Laboratoire des Technologies Innovantes (LTI)
Université ABDELMALEK ESSAADI, (ENSA) Tanger, Maroc

¹meskani.asma@gmail.com

²haddi.ensat@gmail.com

³okamach@ensat.ac.ma

Résumé — L'industrie photovoltaïque est présente partout dans le monde, mais il y existe une nette concentration dans les pays industrialisés.

Dans le cadre de sa stratégie énergétique, et vue sa forte dépendance vis-à-vis de l'extérieur pour son approvisionnement énergétique, le Maroc accorde une priorité au développement des énergies renouvelables et au développement durable, notamment l'Energie Photovoltaïque.

Ce travail a pour but de faciliter l'approche de cette technique fascinante et pleine d'avenir: il concerne le couplage des systèmes photovoltaïques (PV) au réseau de distribution du point de vue contrôle/commande.

Dans ce but, ce travail présente le contrôle dit en « Tangente phi », pour les productions photovoltaïques. Celui-ci vise à injecter au réseau une puissance active maximale et une puissance réactive nulle.

Mots clés Key— Photovoltaïque, Couplage, Distribution, Contrôle/Commande, Tangente-Phi.

I. INTRODUCTION

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) est en forte croissance depuis quelques années car c'est une source inépuisable, non polluante pour l'environnement, silencieuse et non dérangeante pour les riverains.^[1]

Pour cette raison, et dans le but d'un développement rapide de l'énergie solaire, il est nécessaire de réaliser des installations permettant de raccorder des sources photovoltaïques aux réseaux de distribution.^[2]

II. PRESENTATION DU SYSTEME

La modélisation de structure de production d'énergie interfacée par de l'électronique de puissance est un problème complexe.

En effet dans ce type de structure un grand nombre d'éléments entre en jeu comme la source primaire de puissance (panneaux solaire), l'onduleur de tension et la commande et le contrôle de tout ce système. La structure

d'électronique de puissance assurant la conversion DC/AC est un onduleur de tension triphasé.

Le système que nous proposons d'étudier est le suivant :

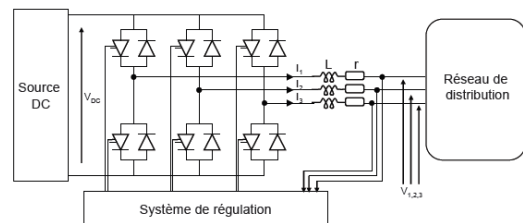


Fig. 1 Système de production avec onduleur de tension

Le modèle globale de la centrale photovoltaïque est constitué de:

- Un générateur PV
- Un convertisseur continu alternatif (onduleur de tension)

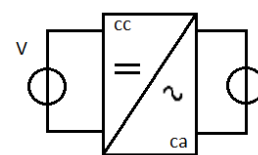


Fig.2 Onduleur de tension

- La charge: La charge coté AC est une charge équilibrée RL (élément consommateur de puissance).
- Le réseau électrique: Il représente le réseau de distribution publique de tension $v=220v$ et de fréquence $f= 50 \text{ Hz}$.^[3]

III. CONTROLE DE PRODUCTION EN PUISSANCE (P/Q)

III.1. PRINCIPE DE LA COMMANDE

Le but de ce type de commande est d'imposer les valeurs de puissances active et réactive injectées au réseau. Le circuit de contrôle (boucles de régulation), en agissant sur la commande MLI, doit imposer la valeur instantanée du courant débité par l'onduleur ($i_{o1,2,3}$) de telle sorte que le courant fourni par le réseau ($i_{r1,2,3}$) soit sinusoïdal et en phase avec la tension simple correspondante ($V_{1,2,3}$).

Ce contrôle est aussi connu par le nom de « tangente phi » ou « la méthode du watt var découplée », son principe est présenté sur la figure suivante (figure 3): [1]

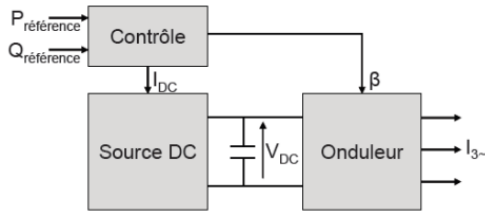


Fig. 3 Principe de Régulation P/Q

III.2. HYPOTHESES DE MODELISATION

Afin de créer des modèles simples, plusieurs hypothèses sont faites sur la dynamique des différents éléments du système.

On considère que la dynamique des convertisseurs (onduleurs) est très rapide par rapport à la dynamique de l'élément de production. La dynamique retenue pour les convertisseurs est de l'ordre du dixième de seconde. Quant à la dynamique de l'unité de production, elle peut être de plusieurs secondes voire plusieurs minutes, selon le type de production considérée.

Dans ces conditions, la seule dynamique à prendre en compte est celle du système le plus lent, à savoir la dynamique de l'onduleur pour la régulation de la puissance réactive ou la dynamique de l'unité de production pour la régulation de la puissance active. Pour rendre compte de ces dynamiques, des systèmes du premier ordre dont la constante de temps τ est choisie de manière adéquate sont insérés au sein du système de régulation et de commande de l'onduleur. [4]

III.3. PRESENTATION DU MODELE

Les différentes simplifications réalisées après analyse du système nous ont permis de conclure que les courants de consignes en sortie du contrôle amont seront injectés au point de connexion de la production PV. Ces courants sont calculés grâce aux références de puissances et à la mesure de tension au point de connexion ; ceux-ci vont être calculés dans le référentiel de Park selon Les équations (1) et (2):

$$P = \frac{3}{2} (V_d \cdot I_d + V_q \cdot I_q) \quad (1)$$

$$Q = \frac{3}{2} (V_q \cdot I_d - V_d \cdot I_q) \quad (2)$$

On en déduit

$$I_{dref} = \frac{2(P \cdot V_d + Q \cdot V_q)}{3(V_d^2 + V_q^2)} \quad (3)$$

$$I_{qref} = \frac{2(P \cdot V_q - Q \cdot V_d)}{3(V_d^2 + V_q^2)} \quad (4)$$

Où:

- P et Q : sont les puissances de référence de la production PV.
- Vd et Vq : sont les composantes directe et quadratique de la tension, mesurée au point de connexion de la production PV, dans le référentiel de Park.
- Id et Iq : sont les composantes directe et quadratique du courant produit par la production PV sur le réseau ou elle est connectée. Ces courants dépendent donc des puissances demandées ainsi que de la tension mesurée au point de connexion de la production. Cette tension mesurée est transformée dans le référentiel de Park avant le calcul des courants. [3]

Une boucle à verrouillage de phase ou PLL (Phase Locked Loop) est utilisée pour synchroniser la transformation de Park sur la pulsation de la tension mesurée sur le réseau. Ainsi, lorsque le système est dans un régime établi, la composante directe Vden sortie de la transformation de Park est une image de l'amplitude de la tension mesurée, et la composante quadratique Vq est nulle. Ainsi, les équations (II - 2) font apparaître Id comme une image directe de la puissance active et Iq comme une image de la puissance réactive.

D'après ces hypothèses le schéma de commande peut être modélisé comme suit : [7]

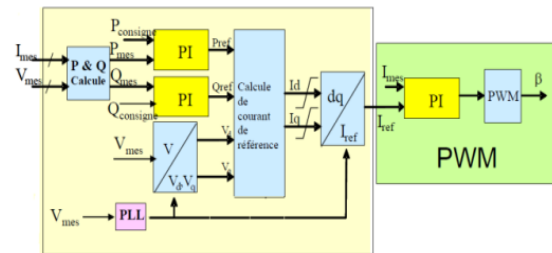


Fig. 4 Schéma de commande avec la méthode watt var découplée

III.4. ETUDE DE LA SYNCHRONISATION DU CONVERTISSEUR SUR LE RESEAU

Une PLL, ou boucle à phase asservie, ou encore boucle à verrouillage de phase, est un montage électronique permettant d'asservir la phase instantanée de sortie sur la phase instantanée d'entrée, mais elle permet aussi d'asservir une fréquence de sortie sur un multiple de la fréquence d'entrée.

Le principe de base de la PLL triphasée consiste à appliquer une transformation inverse de Park sur les tensions triphasées du réseau. La composante d'axe q générée par cette transformation est asservie à zéro par action sur l'angle du repère de Park afin de générer l'angle de synchronisation θ . [5]

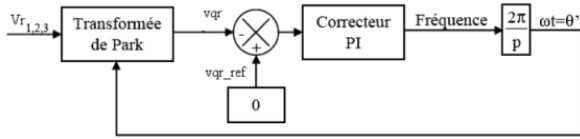


Fig. 5 Schéma de régulation de la PLL

Le schéma de simulation sous Matlab est présenté dans la figure ci-dessous :

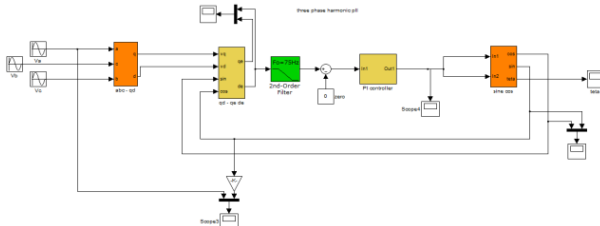


Fig. 6 Simulation de la PLL sous Matlab

La sortie de la PLL est sous forme de sinus et cosinus de l'angle mesuré à partir des tensions à la sortie de l'onduleur. Pour retrouver la valeur réelle de cet angle, on ne peut pas utiliser la fonction Artangente puisqu'elle donne des valeurs comprises entre $[-\pi/2, \pi/2]$. C'est pourquoi on utilise la méthode des quatre quadrants qui consiste à calculer les valeurs instantanées de l'angle à partir de son sinus et cosinus et ainsi trouver les valeurs réelles de $\theta \in [0, 2\pi]$.

Pour valider le schéma de la PLL, on utilise la sortie de la PLL ($\sin \theta$, $\cos \theta$) pour générer un signal sinusoïdal avec la même amplitude que celui de l'entrée afin de visualiser la synchronisation entre les deux signaux, la figure 7 montre la superposition des deux signaux :

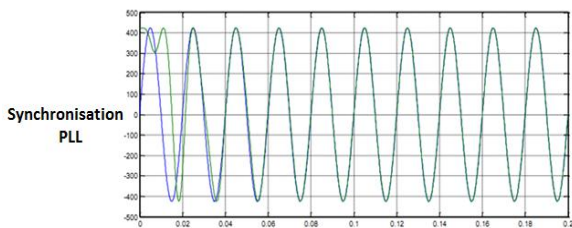


Fig. 7 Synchronisation entre le signal d'entrée et celui de sortie

Remarque :

Diverses perturbations peuvent survenir sur le réseau électrique (creux de tension, saut de phase, harmonique, déséquilibre); le système de synchronisation a pour objectif de reconstituer une information sur la composante directe de la tension fondamentale. [6]

III.5. SCHEMA SYNOPTIQUE DE CONNEXION DE LA PRODUCTION PV AU RESEAU

Le schéma de la figure 4, en utilisant une commande par MLI sinusoïdale, contient :

- Schéma de la méthode watt-var découplée : les composantes du courant à la sortie de l'onduleur sont comparées avec ses références. Les écarts entre elles passent par les régulateurs, les sorties des régulateurs donnent les composantes de la tension de référence de la MLI dans le repère (dq). En passant par la transformée inverse de Park, nous obtenons les références du signal de commande (MLI).
- Schéma de la PLL : qui assure la synchronisation de la commande par rapport à l'évolution des tensions du réseau.

Le schéma de simulation sous Matlab de ce type de commande se présente comme suit: [8] [9]

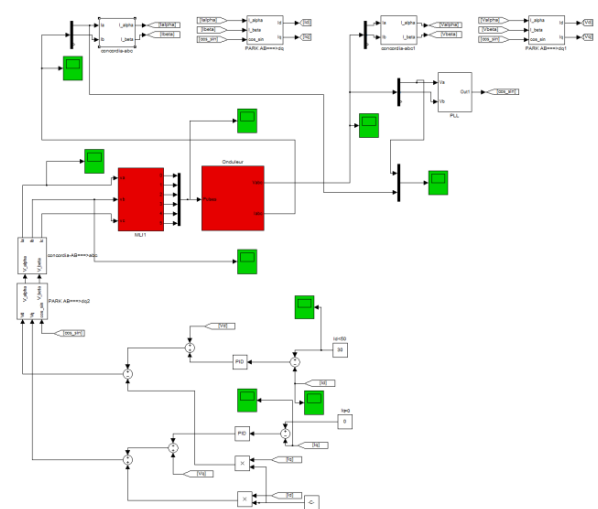


Fig. 9 Schéma de simulation de commande du système par MLI

Les résultats de simulation caractérisant les tensions et les courants sont donnés par les figures suivantes (figure 9, 10):

- Tension à la sortie de l'onduleur :

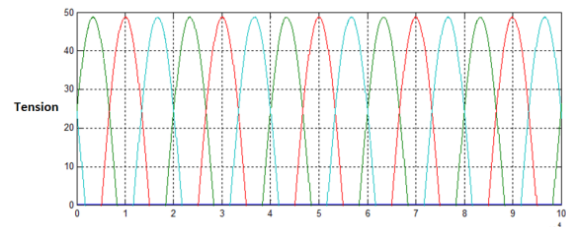


Fig. 9 Tension délivrée par l'onduleur

○ Courant à la sortie de l'onduleur :

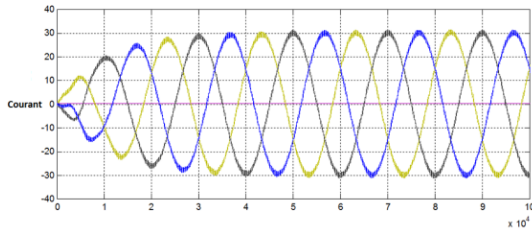


Fig. 10 Caractéristique du courant à la sortie de l'onduleur

Pour pouvoir connecter l'onduleur de tension en parallèle avec le réseau et le faire travailler comme une source de courant, il est nécessaire d'utiliser un filtre de raccordement de nature capacitive (LC).

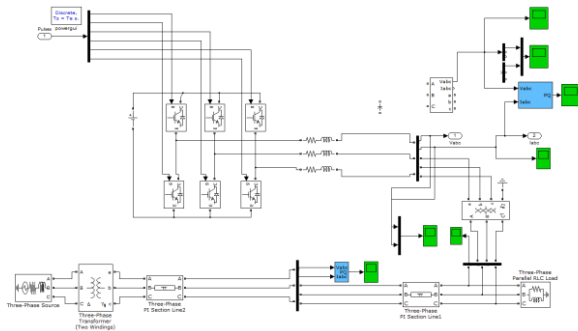


Fig. 11 Schéma de l'onduleur avec filtre LC sous Matlab/Simulink

Les résultats de simulation par rapport à l'injection de la totalité de la puissance active au réseau, ainsi que la puissance réactive nulle sont donnés par les figures suivantes :

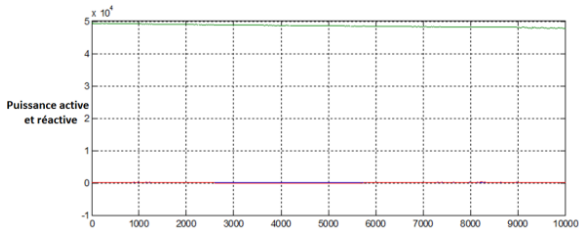


Fig. 12 Caractéristique des puissances active et réactive injectées dans le réseau

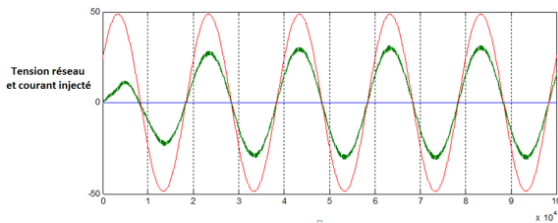


Fig. 13 Tension simple du réseau et courant injecté dans le réseau

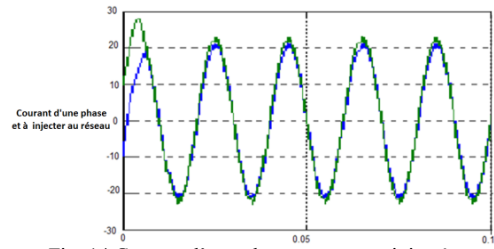


Fig. 14 Courant d'une phase et courant injecté

Les puissances active et réactive (P_{ref} , Q_{ref}) sont des références des courants, nous avons choisi une loi de commande afin de fournir et d'extraire le maximum de puissance active. Cette loi est basée sur le choix de référence des puissances.

Nous constatons d'après la figure 13 que l'allure du courant transité au réseau et de la tension du réseau sont en phase, ce qui explique l'injection unique de la puissance active, et selon la figure 12, on remarque que la puissance réactive est nulle et que la puissance active atteint une valeur maximale. De plus, les courants sont sinusoïdaux à la sortie de l'onduleur (figure 14). La simulation nous a donné les résultats attendus.

IV. CONCLUSION

Le problème de l'intégration de modules photovoltaïques au cadre bâti se pose différemment maintenant d'il y a quelques années, où les systèmes photovoltaïques ne s'imaginaient que dans des sites isolés. Le photovoltaïque arrive en ville, par la technique du raccordement au réseau électrique, et bouscule les habitudes de conception et fonction des bâtiments. Ce développement de l'usage de tels générateurs impose de préciser des commandes et méthodes de mise en œuvre.

Notre but dans cette étude était la simulation d'un système photovoltaïque et sa connexion au réseau électrique, et la mise en exergue d'un contrôle dit en « Tangente phi », pour les productions photovoltaïques. Les puissances active et réactive sont des références des courants, nous avons choisi une loi de commande afin de fournir le maximum de puissance active. Cette loi est basée sur le choix des références des puissances. La validation des résultats est obtenue par les réponses des tensions, des courants et des puissances.

L'intégration d'une production PV dans le réseau n'est pas sans impacts négatifs, c'est ce point qui doit être traité dans ce qui suit.

REFERENCES

- [2] Thi Minh Chau LE, Couplage Onduleurs Photovoltaïques et Réseau, aspects contrôle/commande et rejet de perturbations, le 07 août 2006.
- [3] H. Colin (CEA INES), C. Duvauchelle (EDF), Y. Tanguy (TransEnergie), Esprit - Raccordement des installations photovoltaïques au réseau public de distribution électrique à basse tension, Avril 2011.

- [4] Guillaume RAMI, Contrôle de tension auto adaptatif pour des productions décentralisées d'énergies connectées au réseau électrique de distribution, le 09 Novembre 2006.
- [5] Foued KOUADRA, Etude des variations rapides de tension pour le raccordement d'une production décentralisée dans un réseau MT.
- [6] Yann PANKOW, Etude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau Basse Tension. Application au générateur photovoltaïque, le 10 Décembre 2004
- [7] Lyes ABBASSEN, Mémoire de magister : Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque, Mai 2011.
- [8] Jianwu Cao Florida State University: Analysis and Implementation of Grid-Connected Solar PV with Harmonic Compensation, Thesis, le 04 Janvier 2011.
- [9] An Luo, Senior Member, IEEE, Yandong Chen, Zhikang Shuai, Member, IEEE, and Chunming Tu An, Improved Reactive Current Detection and Power Control Method for Single-Phase Photovoltaic Grid-Connected DG System, 2013.
- [10] Liming Liu, Senior Member, IEEE, HuiLi, Senior Member, IEEE, Zhichao Wu, Student Member, IEEE, and Yan Zhou, Student Member, IEEE, A Cascaded Photovoltaic System Integrating Segmented Energy Storages With Self-Regulating Power Allocation Control and Wide Range Reactive Power Compensation, December 2011.