

# EFFET DE PENETRATION D'ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE DANS UN RESEAU ELECTRIQUE

P. Botoronono<sup>1,2</sup>, L. F. Rafanotsimiva<sup>1,2</sup>, A. J. C. Rakotoarisoa<sup>1,3</sup>, N. J. Razafinjaka<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Ecole Doctorale Thématique Energies Renouvelables et Environnement, Université d'Antsiranana

<sup>2</sup>Groupe de Recherche pour le Développement Durable de Diégo-Suarez, Institut Supérieur de  
Technologie D'Antsiranana

<sup>3</sup>Ecole Supérieure Polytechnique, Université d'Antsiranana  
parfaitchu@gmail.com

## Résumé :

Les générateurs photovoltaïques transforment l'énergie solaire en énergie électrique, qui est variable en fonction de matériau de conversion photovoltaïque et aux paramètres extérieures comme la température, le site d'implantation et le problème d'ombrage. De ce fait, lors de leur connexion au réseau électrique, ils constituent une charge fluctuante qui peut conduire à des variations de tension et aussi à des variations de la puissance réactive. Si elles doivent être raccordées à un réseau existant de puissance finie, leur intégration n'est pas du tout gagnée d'avance. Une des raisons principales est la nature différente des sources. La taille du réseau de raccordement a vraiment une grande influence dans cette intégration. Dans ce présent travail, l'étude se fait à l'aide des modèles de connaissance qui s'apprentent au mieux à notre système que ce soit pour les éléments du réseau électrique ou le système photovoltaïque. Pour cela, la première étape est la simulation du réseau principal comprenant une machine synchrone, deux transformateurs, une ligne de transport et une charge. Puis, dans une deuxième étape, le système photovoltaïque seul est étudié. Et c'est dans une troisième étape que les deux systèmes de production sont interconnectés. Dans cet article, Ce travail les comportements de la machine et du réseau avant et après l'intégration de l'énergie photovoltaïque ont été présentés sans aborder la partie commande. Comme résultats de simulation, le constat révèle que l'insertion de l'énergie photovoltaïque ne présente pas aucun impact sur le fonctionnement du SMIB que ce soit au niveau de la tension interne transitoire en quadrature ( $E'q$ ) de la machine synchrone, de la vitesse de rotation ( $\omega$ ) et de l'angle de puissance ( $\delta$ ). Pourtant lors de la connexion, le côté photovoltaïque présente une sensibilité et à cet effet, en mode de fonctionnement déconnecté, il se stabilise subitement.

**Mots clés** : Réseaux électriques, intégration, stabilité, machine électrique, système photovoltaïque

## Abstract:

Photovoltaic generators convert solar energy into electrical energy, which is variable depending on the photovoltaic conversion material and external parameters such as temperature, site of implantation and shading problem. Connection to the electrical network, they constitute a fluctuating load which can lead to variations in voltage and also to variations in reactive power. If

they are to be connected to an existing finite power grid, their integration is not at all straightforward. One of the main reasons is the different nature of the sources. The size of the connection network really has a big influence on this integration. In this present work, the study is done with the help of knowledge models which are best suited to our system, whether for the elements of the electrical network or the photovoltaic system. For this, the first step is the simulation of the main network comprising a synchronous machine, two transformers, a transmission line and a load. Then, in a second step, the photovoltaic system alone is studied. And it is in a third step that the two production systems are interconnected. In this article, This machine and network work before and after the integration of photovoltaic energy have been presented without border with the control part. As simulation results, the observation reveals that the insertion of photovoltaic energy does not present any impact on the operation of the SMIB, whether at the level of the transient internal quadrature voltage ( $E'q$ ) of the synchronous machine, of the rotation speed ( $\omega$ ) and the power angle ( $\delta$ ). However, during connection, the photovoltaic side has a sensitivity and for this purpose, in disconnected operating mode, it stabilizes under-ment.

Keywords: Electrical networks, integration, stability, electrical machine, photovoltaic system

## I. Introduction

Avec le développement de divers types de ressources énergétiques renouvelables et l'augmentation mondiale de la pénétration du PV dans les lignes de distribution, la production d'électricité intermittente présente un impact dramatique sur le fonctionnement du système de distribution. À mesure que la pénétration du photovoltaïque dans les lignes d'alimentation augmente [1], la production d'électricité photovoltaïque devrait non seulement introduire des problèmes de flux d'énergie inverse, mais aussi compromettre la régulation de la tension par les changeurs de prises conventionnels des transformateurs de sous-station. La surtension est également problématique dans les départs de distribution lorsque de nombreux clients installent des systèmes PV [2], [-3].

Ainsi, des efforts considérables ont été consacrés pour atténuer le problème de surtension introduit par l'injection de production d'électricité intermittente. Le cas de réseau électrique simplifié à l'occurrence de Single Machine Infinite Bus (SMIB) et son modèle été utilisé pour analyser la stabilité.

Cet article a pour but d'étudier l'impact de la pénétration de l'énergie solaire photovoltaïque dans le réseau électrique simplifié. A cet effet il est organisé comme suit. Premièrement, la section II décrit brièvement le système photovoltaïque et ses modèles. La machine synchrone plus précisément le réseau électrique simplifié (de l'anglais Single Machine Infinite Bus ou SMIB) et son modèle est présenté dans la section III. La section IV présente la simulation du domaine d'étude suivie de discussions. Enfin, des conclusions sont données dans la section V.

## II. Modélisation des éléments de la chaîne de conversion d'énergie solaire photovoltaïque

Le fonctionnement de la cellule PV est basé sur un phénomène physique appelé l'effet photovoltaïque convertissant l'irradiation en électricité. La Figure 1 modélise la cellule PV dans le 1er et 4ème quadrants. Pour simuler la caractéristique de la cellule dans le 2ème quadrant une quatrième branche est rajoutée en parallèle (cf. Figure 1). Cette branche est constituée d'un générateur de tension  $U$  et d'une diode mise en série.

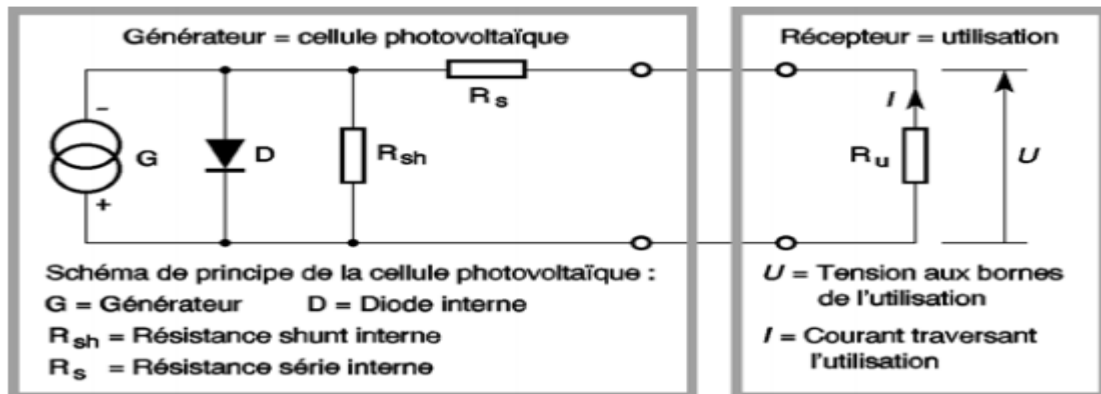


Figure 1 : Chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque

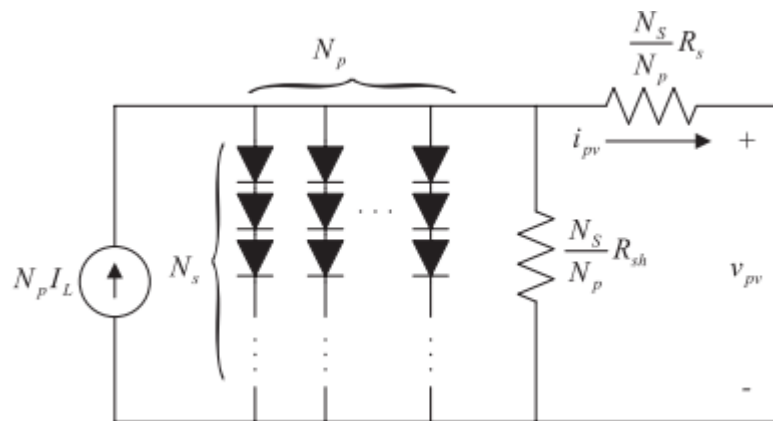


Fig. 2. Schéma de principe équivalent du générateur photovoltaïque.

En appliquant la loi du courant de Kirchhoff sur la figure 2, le courant de sortie ( $i_{pv}$ ) généré par une cellule PV peut être écrit comme

$$i_{pv} = I_L - I_s [\exp [\alpha (v_{pv} + R_s i_{pv})] - 1] - (v_{pv} + R_s i_{pv})/R_{sh} . \quad (1)$$

Le courant lumineux généré  $I_L$  dépend de l'irradiation solaire qui peut être liée par l'équation suivante :

$$I_L = [I_{sc} + k_i(T_C - T_{ref})] s/1000 \quad (2)$$

où  $I_{sc}$  est le courant de court-circuit,  $s$  est le rayonnement solaire,  $k_i$  est le coefficient de courant de court-circuit de la cellule et  $T_{ref}$  est la température de référence de la cellule. Le courant de saturation  $I_s$  de la cellule varie avec la température selon l'équation suivante [8] :

$$I_s = I_{RS} [T/T_{ref}]^3 \exp[q.E_g.(1/T_{ref} - 1/T_C)/Ak] \quad (3)$$

où  $E_g$  est l'énergie de la bande interdite du semi-conducteur utilisé dans la cellule, et  $I_{RS}$  est le courant de saturation inverse de la cellule à la température de référence et à l'irradiation solaire.

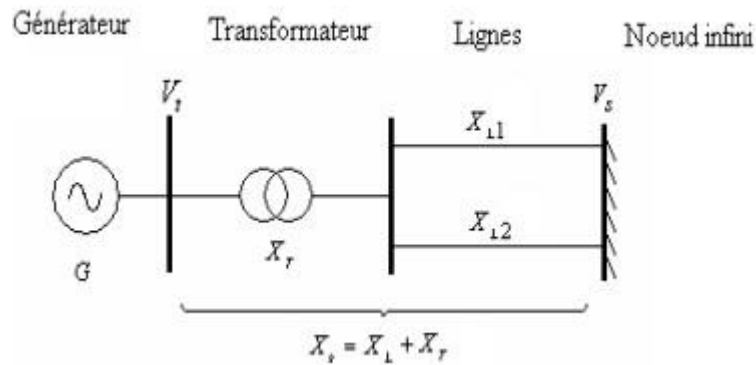
Étant donné que la tension de sortie d'une cellule PV est très faible, un certain nombre de cellules PV sont connectées ensemble en série afin d'obtenir des tensions plus élevées. Ensuite, ils sont encapsulés avec du verre, du plastique et d'autres matériaux transparents pour les protéger des environnements difficiles et s'appellent un module PV. Pour obtenir la tension et la puissance requises, un certain nombre de modules sont connectés en parallèle pour former un générateur photovoltaïque. La figure 2 montre un schéma de circuit électrique équivalent d'un générateur photovoltaïque, où  $N_s$  est le nombre de cellules en série et  $N_p$  est le nombre de modules en parallèle. Dans ce cas, le tableau  $i_{pv}$  peut être écrit comme

$$i_{pv} = N_p I_L - N_p I_s [\exp [\alpha(v_{pv}/N_s + R_s.i_{pv}/N_p)] - 1] - N_p (v_{pv}/N_s + R_s.i_{pv}/N_p)/R_{sh} . \quad (4)$$

### III. Modélisation du SMIB à base de machine synchrone

#### III.1. Principe de base du système SMIB

Un système SMIB est constitué d'une machine synchrone qui alimente un réseau électrique de puissance infinie (c'est-à-dire la puissance est largement supérieure à celle de la génératrice synchrone) au travers de lignes et d'un transformateur. La machine synchrone est modélisée par une force électromotrice constante derrière une réactance. Le nœud infini est un point où la tension est constante et fixée en module et en phase (inertie très grande des autres machines) [10]. La figure suivante illustre les éléments et principe de base d'un système SMIB :



**Figure 3 : Système SMIB**

### III.2. Equations électriques de la machine synchrone

Sur cette partie, nous nous limitons au modèle à un axe de la machine synchrone et le système peut être représenté par le modèle  $(\delta, \omega, E'_q)$  non linéaire d'ordre 3 de la forme [10] :

$$\begin{cases} \dot{\delta}(t) = \omega(t) \\ \dot{\omega}(t) = -\frac{\omega_0}{2H} \frac{x_d - x'_d}{x_{ds} x'_{ds}} V_s^2 \cos(\delta(t)) \sin(\delta(t)) - \frac{D}{H} \omega(t) - \frac{\omega_0}{2H} \frac{V_s}{x'_{ds}} E'_q(t) \sin(\delta(t)) + \frac{\omega_0}{2H} P_{m0} \\ \dot{E}'_q(t) = -\frac{1}{T_{d0}} \frac{(x_d - x'_d)}{x'_{ds}} V_s \cos(\delta(t)) - \frac{1}{T_{d0}} \frac{x_{ds}}{x'_{ds}} E'_q(t) + \frac{1}{T_{d0}} k_c u_f(t) \end{cases} \quad (5)$$

Où  $\delta$ ,  $\omega$ ,  $E'_q$ ,  $T_{d0}$ ,  $P_m$ ,  $D$ ,  $H$ ,  $V_t$  et  $V_s$  sont respectivement angle de puissance du générateur, vitesse de rotation, tension interne transitoire en quadrature du générateur, constante de temps de l'excitation des enroulements axe d et D ouvert, puissance mécanique du générateur, coefficient d'amortissement mécanique, coefficient d'inertie, tension terminale du générateur et tension du bus infini.

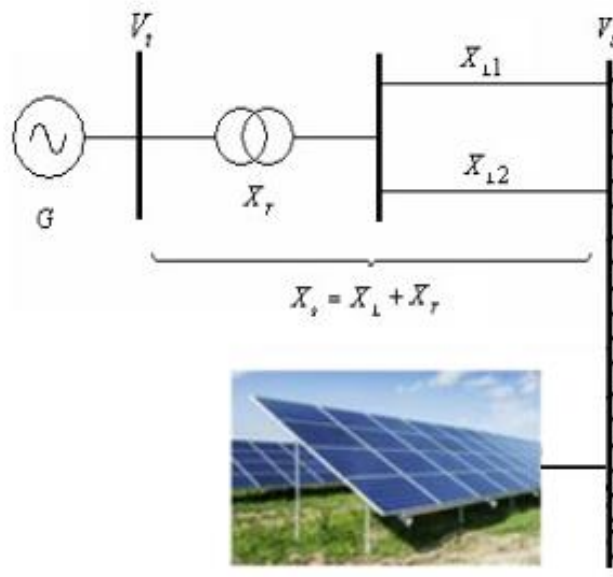
$x_d$ ,  $x'_d$ ,  $x_{ds}$ ,  $x'_{ds}$  sont les paramètres électriques traduisant les différentes réactances du générateur, des lignes et du transformateur.

## IV. Résultats

### IV.1. Cas étudié

Pour effectuer la simulation, une puissance de distribution de 15MW a été prise en compte. Et ce, un générateur photovoltaïque de 2MW a été intégré avec un taux de pénétration moyennant de 16% en plein ensoleillement.

Ci-dessous (cf. fig.3) le schéma de principe de l'interconnexion qu'a été travaillé :



**Figure 4** : Interconnexion photogénérateur - réseau

Les principaux paramètres du générateur synchrone [10] sont :

$S=15\text{MVA}$ ,  $x_d=1.25\text{pu}$ ,  $x_d'=0.205\text{pu}$ ,  $x_d''=0.134\text{pu}$ ,  $T_{d0}'=0.7080\text{s}$ ,  $T_{d0}''=0.022\text{s}$

## IV.2. Simulations

Dans cette partie de simulation, nous avons simulé et comparé les grandeurs de sorties pour voir de près le changement du comportement de la machine. Les grandeurs visualisées ici sont les grandeurs d'état ( $E'q$ ,  $\omega$  et  $\delta$ ) et les grandeurs de sortie (la tension  $V_t$  et la puissance  $P_e$ ). Les figures 4-5 suivantes montrent les allures de ces grandeurs.

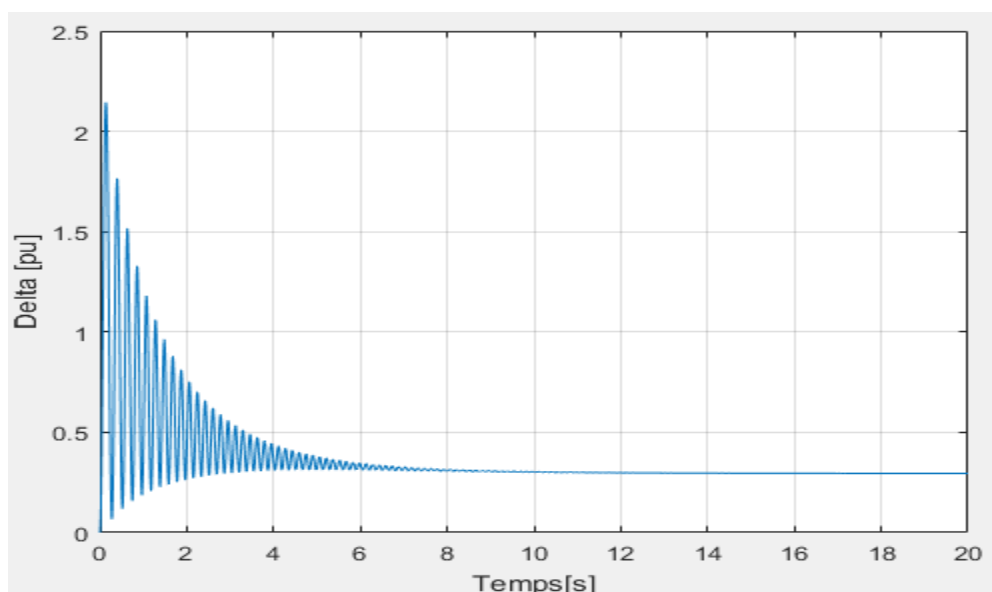


Fig. 5. Evolution de l'angle de puissance T du générateur du réseau SMIB, cas (a).

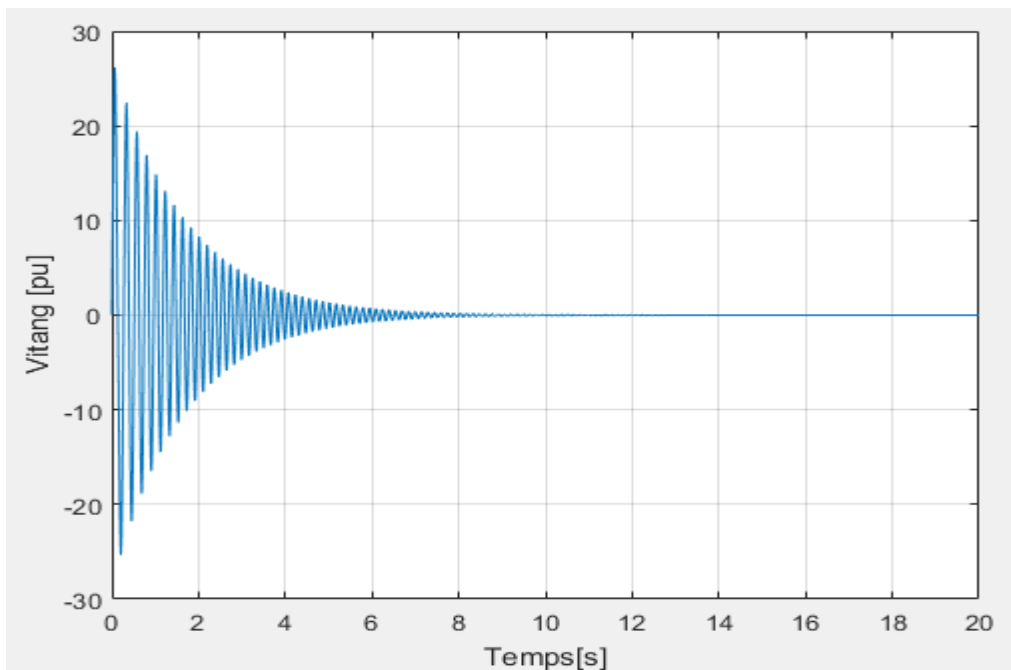


Fig. 6. Evolution de la vitesse relative de rotation électrique  $\omega$  du générateur.

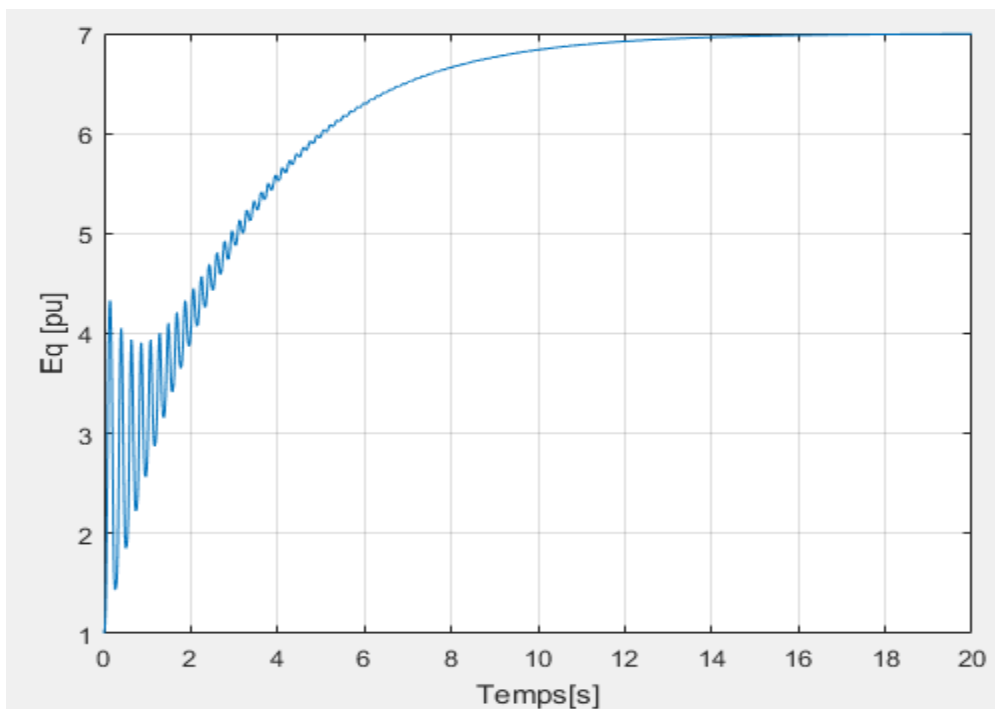


Fig. 7. Evolution de la tension de sortie  $E_q$  du générateur

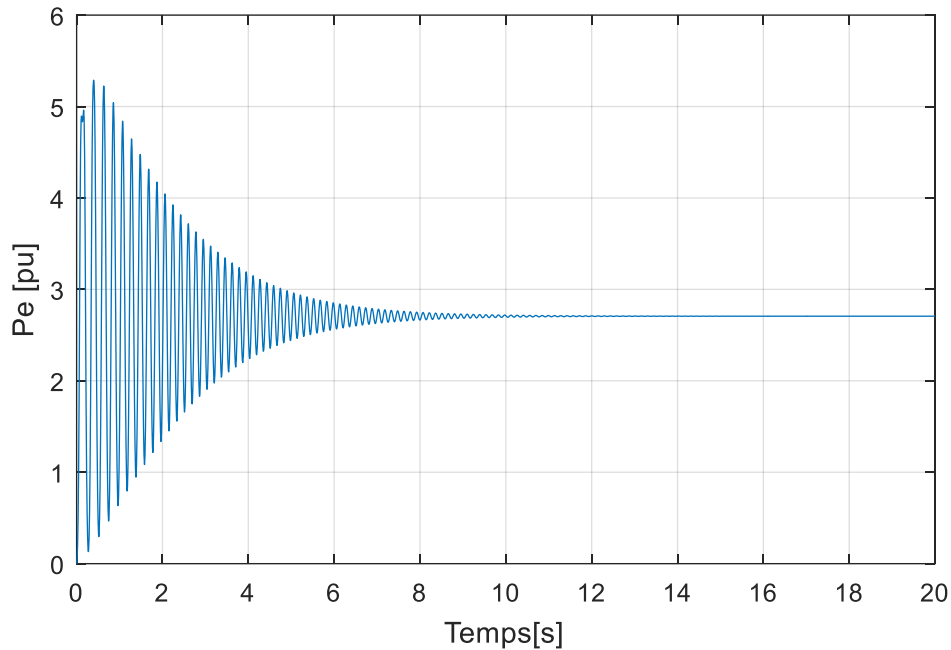


Fig. 8. Evolution de la puissance  $P_e$  du générateur

## V. Discussions

Les figures 5, 6, 7 et 8 montrent l'évolution des grandeurs caractéristiques du système SMIB en régime permanent : l'angle de puissance  $\delta$  du générateur, sa vitesse de rotation  $\omega$ , sa tension interne en quadrature  $E'_q$  et de la puissance  $P_e$  y afférent.

De ces courbes,

- **Fig.5** : L'angle de puissance  $\delta$  du générateur démontre, au tout début, une montée jusqu'à 2,3 rad pour être à son point de stabilité à partir de 8 [s] . Pour arriver à sa stabilité, il ne cesse de diminuer graduellement,
- **Fig 6** : La vitesse de rotation  $\omega$ , quant à lui, débute à 30 pu, sous l'effet de la demande en puissance lors de la mise en fonctionnement de l'ensemble. Elle se stabilise à partir de 8 [s] parallèlement à l'angle de puissance  $\delta$ .
- **Fig 7** : La tension interne y afférent est de l'ordre de 4 pu. Elle ne cesse de s'accroître pour être stable à partir au 7 pu
- La puissance  $P_e$  du générateur s'étend jusqu'à une valeur de 5,3 pu. Sa stabilité se fixe au 2,8 pu. Elle se stabilise à partir de 10 [s].

C'est-à-dire elle varie jusqu'à atteindre son point de fonctionnement plus précise pour que le réseau atteigne sa stabilité.

Avant l'atteinte de ce point de stabilité, des oscillations importantes se manifestent sur toutes les grandeurs susmentionnées, durant la simulation. Ces harmoniques sont souvent



néfastes au bon fonctionnement du système étudié. D'où l'intégration des stratégies de commande adéquate nous est une nécessité pour la suite du présent travail.

## **VI. Conclusion**

Dans cet article, le multimodèle T-S obtenu par transformation par secteurs non linéaires a été utilisé lors de la pénétration de l'énergie solaire photovoltaïque dans le réseau électrique. D'après les résultats de simulation, l'intégration de l'énergie photovoltaïque sur le SMIB étudié n'affecte pas son bon fonctionnement.

Par contre, la sensibilité de l'onduleur a été remarquée lors de l'interconnexion mais on a pu constater que le système se stabilise subitement en mode déconnecté à l'exception de l'angle  $\theta$  qui diverge. De cet angle, une commande est nécessaire pour pouvoir réguler toutes les perturbations existantes. Cette approche sera la suite logique de la présente étude.

## **Références**

- [1] R. Hara, H. Kita, T. Tanabe, H. Sugihara, A. Kuwayama, S. Miwa, Testing the technologies, IEEE Power and Energy Magazine, Vol. 7, No. 3, pp. 77-85, May/June 2009
- [2] S. Morozumi, S. Kikuchi, Y. Chiba, J. Kishida, S. Uesaka, Y. Arashiro, Distribution technology development and demonstration projects in Japan, 2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting, pp. 1-7, 20-24 July 2008
- [3] W. Wongsachua, W. J. Lee, S. Orintara, C. Kwan, F. Zhang, Integrated high-speed intelligent utility tie unit for disbursed/renewable generation facilities, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 41, No. 2, pp. 507-513, March/April 2005
- [4] Li Wang, T.H. Yeh, W. J. Lee, Z. Chen, Analysis of a commercial wind farm in Taiwan part II : different current-limit reactors and load tap changers on system performance, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 47, No. 2, pp. 954-964, March/April 2011
- [5] C. L. Masters, Voltage rise : The big issue when connecting embedded generation to long 11kV overhead lines, Power Engineering Journal, vol. 16, pp.5– 12, 2002
- [6] S. Toma, T. Senju, Y. Miyazato, A. Yona, T. Funabashi, A. Y. Saber and K. Chul-Hwan, Optimal coordinated voltage control in distribution system, in Proceedings on Power and Energy Society General Meeting— Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE, pp. 1–7, 2008
- [7] M. R. Salem, L. A. Talat, and H. M. Soliman, Voltage control by tapchanging transformers for a radial distribution network, in Proceedings Inst. Electrical Engineering, Generation Transmission and Distribution, vol. 144, pp. 517–520, 1997
- [8] D. N. Gaonkar, P. C. Rao and R. N. Patel, Hybrid method for voltage regulation of distribution system with maximum utilization of connected distributed generation source, in Proceedings on IEEE Power India Conference, p. 5, 2006

- [9] J. C. Vasquez, R. A. Mastromauro, J. M. Guerrero and M. Liserre, Voltage support provided by a droop-controlled multifunctional inverter, *IEEE Transactions Ind. Electron.*, vol. 56, no. 11, pp. 4510–4519, Nov. 2009
- [10] G. Besançon, D. Georges, L. F. Rafanotsimiva and J. M. Razafimahenina, Simple strategy for constrained backstepping design with application to SMIB control, *American Control Conference*, Montreal, Canada, 2012