

INJECTION DE PUISSANCE PHOTOVOLTAIQUE AU RÉSEAU ELECTRIQUE FAIBLE

Diaw Nogoye ^{*}, Diop Moustapha, Ngom Ibrahim, Ba Oumar, Thiaw Lamine

Laboratoire Eau, Energie, Environnement et Procédés Industriels, Université Cheikh Anta Diop, Dakar, Sénégal

^{*} nogoyediaw@gmail.com

INFOS SUR L'ARTICLE

Historique de l'article:

Reçu le : 24 novembre 2020

Réçu en format révisé le : 09 février 2021

Accepté le : 16 février 2021

Mots-Clés: Puissance Photovoltaïque, Réseau faible, injection, simulation.

Keywords : Photovoltaic System, Weak Grid, injection, simulation.

RESUME

Cet article étudie l'intégration de la production photovoltaïque au réseau électrique faible. Les objectifs de cet article sont d'intégrer le système PV au réseau électrique faible et proposer une stratégie de contrôle pour l'injection au réseau.

Dans ce travail, une stratégie de limitation des fluctuations de puissance est proposée. La simulation de l'ensemble système photovoltaïque, onduleur triphasé, réseau faible a été réalisé dans matlab/simulink. Le contrôle de la puissance injectée a été implémenté et simulé. Les résultats de simulation ont montré que la stratégie de contrôle implémentée permet de fournir la puissance maximale et d'injecter l'énergie au réseau à un facteur de puissance unitaire avec un faible taux de distorsion harmonique.

ABSTRACT

This article studies the integration of photovoltaic production a weak grid. This paper investigates the integration of PV generation into the weak power grid. The objectives of this paper is to integrate the PV system into the weak power grid and propose a control strategy for grid injection.

In this work, a strategy to control power fluctuations is proposed. The simulation of the photovoltaic system, three-phase inverter and weak grid was carried out in matlab/simulink. The control of the injected power was implemented and simulated. The simulation results showed that the inverter control scheme provides the maximum power and injects the energy to the grid at unity power factor with low harmonic distortion.

I. INTRODUCTION

La pollution harmonique devient un problème important dans les systèmes de distribution d'énergie en raison du nombre croissant de systèmes d'électronique de puissance et de charges non linéaires. Les courants harmoniques peuvent entraîner de nombreux problèmes de stabilité et de fiabilité, tels que la surchauffe du transformateur, le dysfonctionnement des dispositifs de protection, la résonance harmonique, des pertes accrues et des interférences avec les réseaux de communication [1]. Dans le cas d'un réseau faible, la fréquence du réseau, la tension, puis les courants harmoniques varient rapidement avec les perturbations. Dans le système électrique conventionnel, la faiblesse du réseau est évaluée avec le rapport de court-circuit (RCC) au point de connexion [1]. Elle est définie par le rapport de la puissance de court-circuit (Scc), au point de couplage commun, sur la puissance nominale de la source d'énergie renouvelable installée (Sn). Quand le RCC est en dessous de 10, le réseau est faible et quand il est au-dessus de 20 le réseau est robuste [2].

La puissance électrique ainsi produite présente des fluctuations importantes qui rendent délicate la problématique d'intégration au réseau. Une solution consiste à lisser cette production avant l'injection au réseau de distribution tout en respectant les contraintes imposées par les normes.

Plusieurs types de systèmes de contrôle différents ont été proposés dans la littérature pour répondre à cette exigence. Les plus remarquables de ces schémas de contrôle de l'intégration PV sont la théorie de la trame synchrone, la boucle à verrouillage de phase améliorée, la théorie de la puissance réactive instantanée, la technique de contrôle en mode glissant basé sur l'observateur étendu, le contrôle basé sur la logique floue, le filtre généralisé du quatrième ordre, le filtre coupe-bande adaptatif, et un schéma de contrôle adaptatif [3].

$$\begin{pmatrix} \frac{di_a}{dt} \\ \frac{di_b}{dt} \\ \frac{di_c}{dt} \end{pmatrix} = \frac{1}{L} \begin{pmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} + \frac{1}{L} \begin{pmatrix} u_a - ea \\ u_b - eb \\ u_c - ec \end{pmatrix} \quad (3)$$

Où R et L sont les éléments du filtre. Par ailleurs, E représente la valeur efficace de la tension simple du réseau et ω la pulsation du réseau telle que $\omega = 2\pi f$ ($f = 50\text{Hz}$).

En considérant que l'axe d est aligné avec le réseau (la composante e_d et en phase avec la tension u_a), l'équation (11) peut être écrite sous la forme suivante :

$$\begin{pmatrix} \frac{di_d}{dt} \\ \frac{di_q}{dt} \end{pmatrix} = \frac{1}{L} \begin{pmatrix} -R & \omega L \\ -\omega L & -R \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} - \frac{1}{L} \begin{pmatrix} e_d \\ e_q \end{pmatrix} + \frac{1}{L} \begin{pmatrix} u_d \\ u_q \end{pmatrix} \quad (4)$$

En appliquant les transformations du cadre de référence (dq) le modèle devient selon le système d'équation (2) :

$$\begin{cases} L \frac{di_d}{dt} + Ri_d - L\omega i_q = U_d - e_d \\ L \frac{di_q}{dt} + Ri_q + L\omega i_d = U_q - e_q \end{cases} \quad (2)$$

Où i_d et i_q sont les courants injectés au réseau dans le cadre de référence (dq), U_d et U_q sont les tensions de sortie de l'onduleur sur les axes d et q, e_d et e_q sont les tensions du réseau sur les axes d et q, respectivement, et ω est la fréquence du système.

Pour calculer les correcteurs, il faut tenir compte du modèle découplé dans le référentiel de Park. Pour ce faire, on se propose de réguler i_d et i_q non par U_d et U_q mais par U_d^* et U_q^* donné par le système d'équation (3) :

$$\begin{cases} U_d^* = U_d + L\omega i_q - e_d \\ U_q^* = U_q - L\omega i_d - e_q \end{cases} \quad (3)$$

Le modèle de la boucle de régulation du courant après la modification peut alors être réécrit (4) :

$$\begin{cases} L \frac{di_d}{dt} + Ri_d = U_d^* \\ L \frac{di_q}{dt} + Ri_q = U_q^* \end{cases} \quad (4)$$

En conséquence, les fonctions de transfert en fonction des tensions de références et des courants de sortie peuvent être obtenues dans la relation (5) :

$$\frac{i_d(s)}{U_d^*(s)} = \frac{i_q(s)}{U_q^*(s)} = \frac{1}{Ls + R} \quad (5)$$

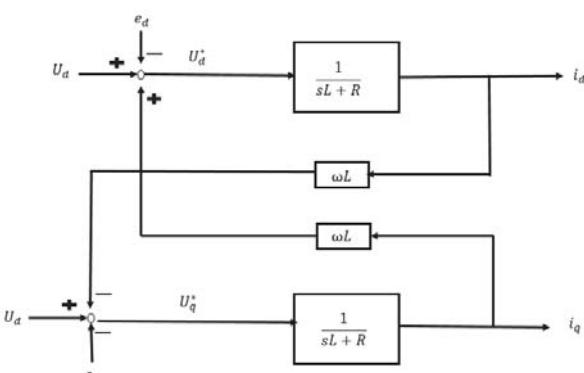


Fig.3 : Représentation schématique du système côté AC de l'onduleur triphasé dans le cadre de référence dq.

ii) Contrôle externe de la boucle de tension

Une alternative pour contrôler la puissance de sortie du convertisseur DC/AC est à travers la régulation de la tension du bus continu. Le maintien de la tension du bus continu à une valeur constante (valeur nominale) garantit que toute la puissance extraite de la source DC peut être fournie à la charge AC. Ce schéma de contrôle est largement utilisé dans les systèmes photovoltaïques (PV), où la puissance d'entrée est continuellement alimentée par les panneaux photovoltaïques. En outre, dans le cas de systèmes de conversion d'énergie, la tension moyenne du bus continu est aussi couramment contrôlée à un niveau désiré. Cela permet également d'assurer une injection de puissance appropriée à la charge, par exemple, la tension du bus continu doit être au moins supérieure à la tension crête du réseau dans le cas de l'application des systèmes photovoltaïques connectés au réseau.

En supposant un onduleur sans perte, la puissance d'entrée du courant continu CC et la puissance active de sortie doit être équilibrée en fonction de la puissance instantanée théorique. Dans ce cas, nous obtenons :

$$V_{dc} C_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{3}{2} (e_d i_d + e_q i_q) \quad (6)$$

Puissance d'entrée DC Puissance active de sortie

Où C_{dc} est la capacité du bus continu. Comme indiqué à la Fig.1 et i_{dc} est le courant de sortie de la source DC. Si l'axe d du cadre de référence dq est aligné avec le vecteur de tension de charge (par la PLL), la composante dans l'axe q de la tension du réseau devient zéro (c'est-à-dire $V_q = 0$). En appliquant l'analyse des petits signaux à l'équation (6), on peut linéariser le modèle. Ainsi, la fonction de transfert en fonction de la tension du bus continu et du courant de sortie dans l'axe d peut être simplifiée comme suit :

$$\frac{V_{dc}(s)}{i_d(s)} = \frac{3}{2} \frac{V_m}{V_{dc} C_{dc} s} \quad (7)$$

Où V_{dc} et i_{dc} étant la tension moyenne et le courant de la source continu respectivement. Il convient de noter que, bien que le modèle de l'équation (7) montre le contrôle du courant dans l'axe d à travers la régulation de la tension du

bus continu, une injection de puissance réactive est encore possible si nécessaire. Dans ce cas, la puissance réactive peut être commandée séparément selon l'équation (10) pour générer le courant dans l'axe q. Le découplage des deux courants sur le repère (dq) permet également assurer le contrôle individuel.

Dans le repère (dq), la puissance active instantanée P et la puissance réactive Q peuvent être calculées comme suit :

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2}(e_d i_d + e_q i_q) \\ Q = \frac{3}{2}(e_q i_d - e_d i_q) \end{cases} \quad (8)$$

En supposant que la boucle à verrouillage de phase PLL est alignée avec le vecteur de tension du réseau sur l'axe d dans le repère (dq) (c'est-à-dire $V_q = 0$), les fonctions de transfert dans l'axe d et dans l'axe q des courants de sortie sur les puissances active et réactive peuvent être calculées respectivement comme suit :

$$\frac{P(s)}{i_d(s)} = \frac{3}{2} e_d(s) = \frac{3}{2} V_m \quad (9)$$

$$\frac{Q(s)}{i_q(s)} = -\frac{3}{2} e_d(s) = -\frac{3}{2} V_m \quad (10)$$

Avec V_m étant l'amplitude de la tension de sortie du réseau.

c) L'analyse du réseau faible

La faiblesse du réseau est définie par le ratio de court-circuit (RCC), qui est défini par le rapport de la puissance de court-circuit (Scc), au point de couplage commun, sur la puissance nominale de la source d'énergie renouvelable installée (S_n) suivant l'équation (11).

$$R_{CC} = \frac{S_{CC}}{S_n} \quad (11)$$

Quand le ratio R_{CC} est en dessous de 10 le réseau est faible and quand il est au-dessus de 20 le réseau est robuste.

Dans notre système, nous travaillerons avec un ratio $R_{CC}=1,5$. Les paramètres de simulation sont donnés dans le tableau 1.

Table 1 : Paramètres de simulation

Paramètres	Valeur
Tension du bus continu (V)	720
Tension du réseau U_g (V)	400
Capacité du bus continu C_{DC} (F)	0.0005
Inductance du filtre L_f (H)	0.02
Résistance du filtre R_f (ohm)	0.45
Boucle de contrôle de la tension DC (K_p ; K_i)	(0,4082 ; 54,4331)
Boucle de contrôle du courant actif (K_p ; K_i)	(133,33 ; 3000)
Boucle de contrôle du courant réactif (K_p ; K_i)	(133,33 ; 3000)

III. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Nous avons simulé le système photovoltaïque connecté au réseau faible en utilisant la structure montrée dans la figure 1. Les modèles Simulink sont présentés dans les figures 4 à 10.

Afin d'étudier l'efficacité des algorithmes de contrôle, une simulation est faite en réduisant soudainement l'irradiance de 1000 à 600 W/m² à $t = 1$ s comme le montre la figure 4. Cette figure montre le comportement des caractéristiques du générateur photovoltaïque pendant la simulation.

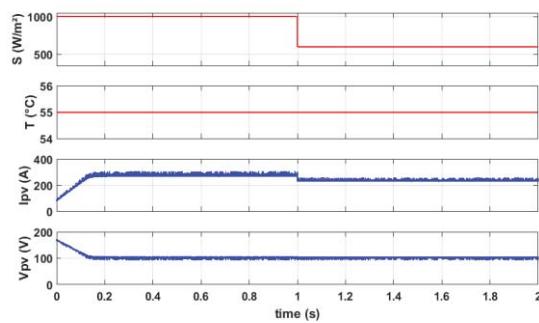


Fig.4 : Évolution de la tension V_{PV} , du courant I_{PV} avec une variation de l'irradiance.

A température constante, nous constatons que l'effet de l'irradiance solaire sur la tension de sortie du PV est faible par rapport à son effet sur le courant de sortie du générateur photovoltaïque comme le montre la Fig.4.

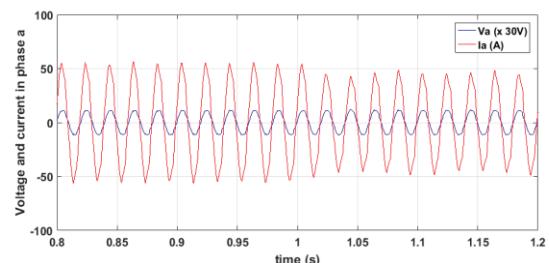


Fig.5 : Évolution de la tension du réseau et du courant de sortie de l'onduleur dans la phase a avec une variation de l'irradiance

La figure 5 montre la tension de la ligne côté réseau et le courant sont en phase. Cela montre une bonne performance de la boucle de courant. D'où l'importance de la boucle PLL pour le système photovoltaïque connecté au réseau.

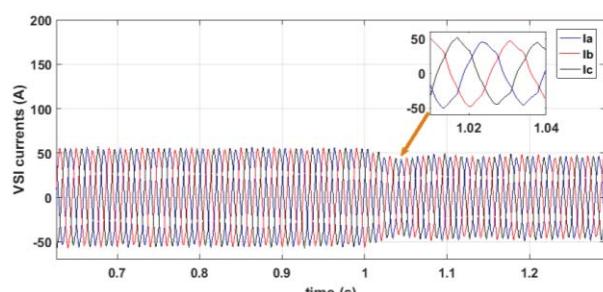


Fig.6 : Évolution des courants de sortie de l'onduleur dans les trois phases

La figure 6 montre l'évolution des courants dans les trois phases. Ces courants deviennent parfaitement sinusoïdaux et diminuent lorsque l'irradiance diminue à $t=1s$ correspondant au temps de la perturbation. Ce qui montre la bonne performance du contrôle proposé.

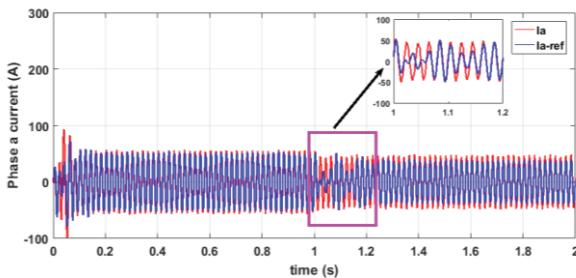


Fig.7 : Évolution du courant et sa référence dans la phase a

La figure 7 montre le courant dans une phase et sa référence. Lorsqu'on fait un zoom avant sur la figure, on voit clairement la réponse au changement de pas du régulateur du courant à $t=1s$. Cela montre que le régulateur de courant a la capacité de modifier rapidement le courant de sortie de 55.8 A à 45.3 A (valeurs crêtes).

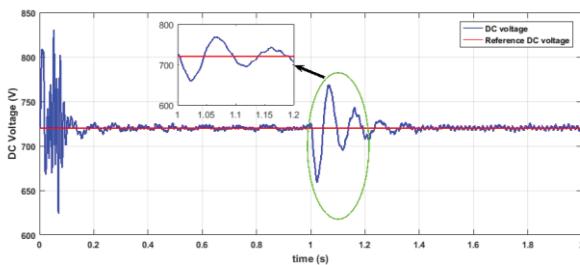


Fig.8 : Régulation de la tension du bus continu

La figure 8 montre la réponse transitoire du signal de sortie du régulateur de la tension du bus continu à une diminution de 60 % de la puissance PV suite à une perturbation. Ainsi la tension V_{dc} suit sa référence après la perturbation. La sortie du régulateur est continue ce qui conduit à une minimisation du taux de distorsion harmonique du courant.

Les tensions triphasées du réseau restent sinusoïdales et déphasées de $2\pi/3$ qu'elle que soit avec ou sans régulation voir figure 9.

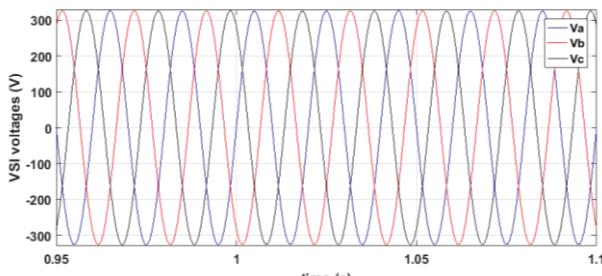


Figure 9 : Évolution des tensions du réseau.

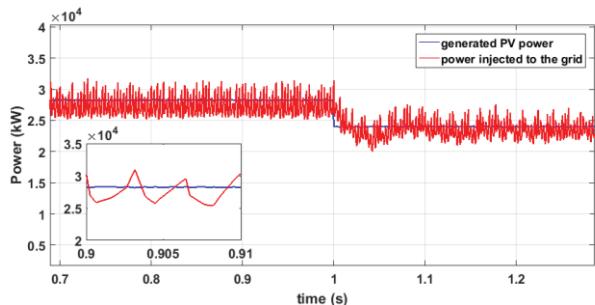


Fig.10 : Variation de la puissance PV produite et de la puissance active injectée au réseau.

La figure 10 montre la variation de puissance de sortie du système PV et celle de la puissance injectée au réseau. On constate que la puissance maximale du générateur PV est de 28.2 kW tandis que celle injectée est de 25 kW avant la perturbation, et diminue de 24 kW et 22 kW pour la puissance de sortie du PV et celle injectée au réseau respectivement. En raison de la perturbation à $t=1s$, la puissance injectée passe de 25 kW à 22 kW.

Le taux de distorsion harmonique ainsi obtenu est 5.81% (figure 11).

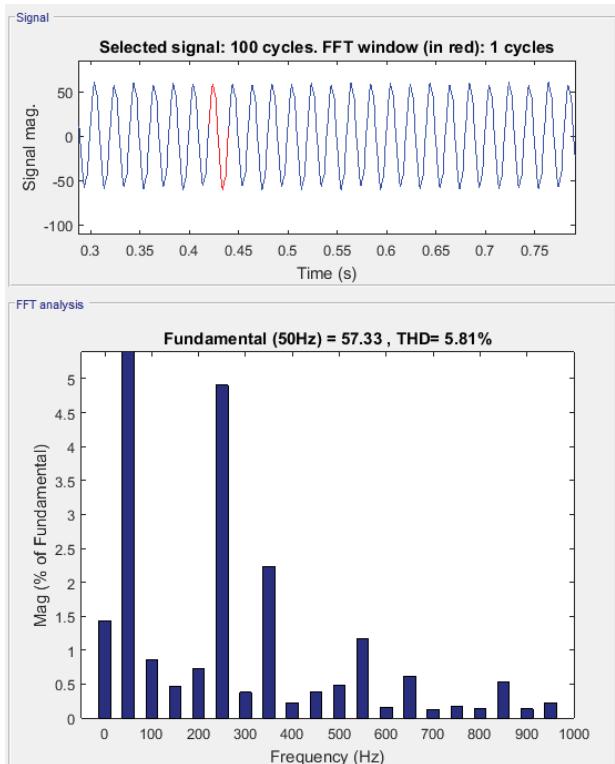


Fig.11 : Analyse du Taux de distorsion harmonique du courant injecté.

IV. CONCLUSION

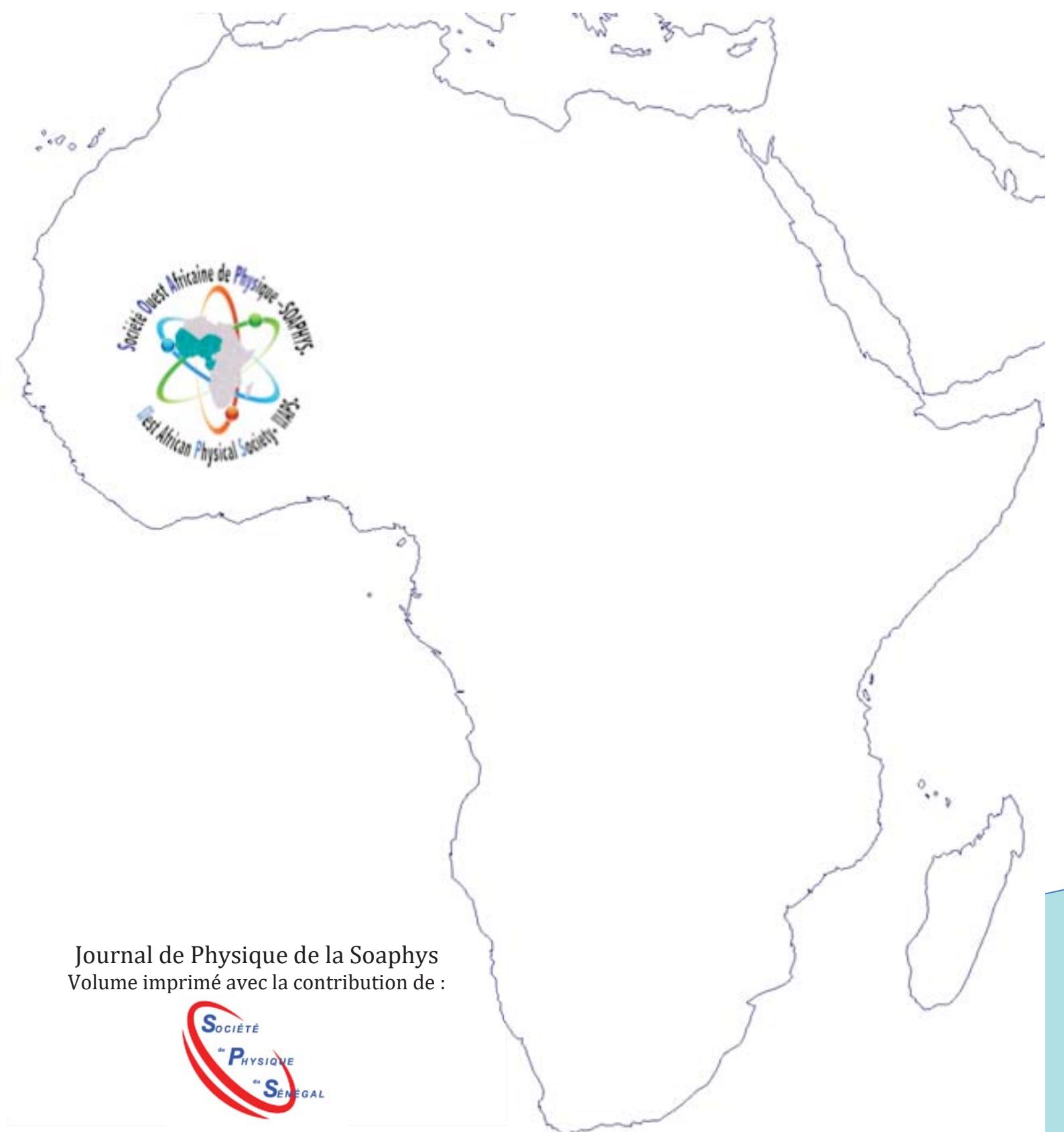
L'objectif de cet article était d'intégrer le système PV au réseau électrique faible et proposer une stratégie de contrôle pour l'injection au réseau. Le système proposé comporte deux boucles de contrôle : boucle de contrôle tension du bus continu et boucle de courant de l'onduleur. Les deux boucles sont calculées autour de l'onduleur et ont pour objectif d'obtenir un facteur de puissance unitaire et

un faible taux de distorsion harmonique du courant de sortie de l'onduleur environ 5.81%.

Des solutions sont introduites pour les deux contrôleurs du système. La régulation du courant annule l'effet de la tension du bus continu sur la distorsion harmonique totale du courant de sortie afin de transférer la puissance produite au réseau. Il a été démontré que le schéma de contrôle basé sur les contrôleurs classiques, présente une bonne performance suivant les variations des conditions climatiques. La variation des conditions climatiques n'a pas d'influence sur la tension du bus continu. Les résultats de simulation ont montré que la stratégie de contrôle permet de fournir la puissance maximale et d'injecter l'énergie au réseau à un facteur de puissance unitaire et un courant avec un faible taux de distorsion harmonique. Dans la suite de ce travail, l'optimisation énergétique en utilisant l'algorithme de la colonie d'abeilles sera faite.

RÉFÉRENCES

- [1] H. Geng, Z. Z. T. Z. B. C. a. A. C., «Fast Repetitive Control With Harmonic Correction Loops for Shunt Active Power Filter Applied in Weak Grid,» *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS*, vol. 55, n° %13, 2020.
- [2] S. L. Lorenzen, A. B. N. a. L. B., «Control of A Grid Connected Converter During Weak Grid Conditions,» *IEEE*, 2016.
- [3] F. UI Nazir, N. K. B. S. a. B. K. P., «Enhanced SOGI Controller for Weak Grid Integrated Solar PV System,» *IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION*, vol. 0, n° %10, 2020.
- [4] L. Wang, R. Y. T. K. S., «Voltage Management for Large Scale PV Integration into Weak Distribution Systems,» *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2017.
- [5] F. Grumm M. P. M. F. M. M. J. G. K. a. D. S., «Influence of PV-Systems on Short-Circuit Currents in Low-Voltage Distribution Grids in Structurally Weak Areas,» *International Conference on Environment and Electrical Engineering and IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/ I& CPS Europe)*, 2018.
- [6] J. C. Gonzales, A. B. P., «Wind and PV Farms Integration Limit in Weak Power Systems Using Static and Dynamic Simulations,» *UMSS IEEE Latin America Transactions*, vol. 16, n° %11, 2018.



Journal de Physique de la Soaphys
Volume imprimé avec la contribution de :

