

COMPORTEMENT D'UN RÉSEAU ÉLECTRIQUE FACE À L'INTÉGRATION D'UNE ÉOLIENNE

RAZAFINDRAKOTO Andriamanantsoa

Eliasy¹, TSARALAHY Zazad d'Edissack¹,

RAFANOTSIMIVA Liva Falisoa¹,

RAZAFINJAKA Nirinarison Jean²

1: Ecole Doctorale Thématique Energies Renouvelables et Environnement, Institut Supérieur de Technologie d'Antsiranana, Université d'Antsiranana, Groupe de Recherche pour le Développement Durable de Diégo-Suarez, Madagascar

2: Ecole Supérieure Polytechnique, Université d'Antsiranana, Madagascar

Correspondant : erazafindrakoto@ist-antsiranana.mg ; tél. : +261 32 85 012 80

Co-auteurs : zazad86@gmail.com; liva.rafanotsimiva@ist-antsiranana.mg; razafinjaka@yahoo.fr

Résumé

Les aérogénérateurs sont actionnés par des forces de pression dynamique du vent, qui sont variables. 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'approprient au mieux à notre système que ce soit pour les éléments du réseau électrique ou l'éolienne. 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, l'éolienne seule est étudiée. Et c'est dans une troisième étape que les deux systèmes de production sont interconnectés. Ce travail a pour but de voir le comportement de la machine et du réseau avant et après l'intégration de l'éolienne sans aborder la partie commande. Comme résultats de simulation, on a constaté que l'insertion de l'éolienne n'a

pas changé 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 (ω) et de l'angle de puissance (δ). Par contre lors de la connexion, il y a de changement du côté éolienne. Et aussi l'éolienne est beaucoup plus sensible et se stabilise plus vite que lorsqu'elle fonctionne seule.

Mots clés : Réseaux électriques, intégration, stabilité, machine électrique, éolienne

Abstract

Wind turbines are operated by dynamic wind pressure forces, which are variable. Therefore, when connected to power system, they constitute a fluctuating load which can lead to variations in voltages and also to variations in reactive power. If they are to be connected to an existing finite power system, their integration is not at all won in advance. One of the main reasons is the different nature of the sources. The size of the power system has really a big influence on this integration. In this present work, the study is done using the models which already exist and who are best suited to our system, whether it is for the elements of the power system or the wind turbine. In fact, in a first step, we started on the simulation of the main power system comprising a synchronous machine, two transformers, a transmission line and a load. Then, in a second step, we simulated the wind turbine alone. And it was in a third step that we considered the two, together. The aims of this work are then to see the behavior of the machine and the network before and after the integration of the wind turbine without addressing the control part. As simulation results, it was found that the insertion of the wind turbine did not change the functioning of the SMIB either at the level of the quadrature transient internal voltage ($E'q$) of the synchronous machine, of the speed of rotation (ω) and of the power angle (δ). By cons when connecting, it has change on the wind side. The wind turbine is much more sensitive and stabilizes faster than when it operates alone.

Keywords : Power systems, integration, stability, electrical machine, wind turbine

Introduction

Beaucoup de travaux ont été effectués concernant l'étude des éoliennes et leur intégration au réseau (Dong et al., 2017 ; Bedoud, et al., 2013 ; Briceno Vicente et al. 2017). Différents types d'aérogénérateurs sont abordés : génératrices asynchrones (EL Aimani et al., 2002), Génératrice synchrone à aimant permanent (Omar et al., 2011). Dong et al., (2017) traite par exemple une méthode de commande de la traversée BT (LVRT) pour la régulation de vitesse frontale (FESR) d'une éolienne de 2MW basée sur une commande robuste adaptative améliorée (IARC) pour trouver la solution de la variation des paramètres du générateur par creux de tension du réseau et améliorer la capacité LVRT du FESR. Les auteurs ont démontré que lorsqu'il y a un creux de tension dans le réseau, la plage de saturation du circuit magnétique du générateur change et le paramètre du générateur change en fonction des variations de la plage de saturation. Par conséquent, le paramètre du générateur est incertain.

Briceno Vicente et al. (2017) présente l'étude d'une Génératrice Asynchrone à Double Alimentation (GADA) de 2MW injectée sur un réseau de 230kV et montre l'évolution des différentes grandeurs comme le taux de pénétration, le court-circuit triphasé, la perte de synchronisme, la vitesse de rotation de la turbine éolienne, ... Il donne un aperçu sur l'intégration d'une éolienne dans un réseau de grande puissance.

Dans le cadre de notre travail, nous nous intéressons à l'intégration d'une éolienne à base de Machine Synchrone à Aimant Permanent (MSAP) de 2MW sur un réseau SMIB de 15MW en vue de

visualiser le comportement de l'ensemble du système en régime permanent.

Pour se faire, en premier lieu on verra le fonctionnement d'une éolienne et ses modèles mathématiques pour la chaîne de conversion d'énergie, en deuxième on parle un peu de la machine synchrone plus précisément le réseau électrique simplifié (de l'anglais Single Machine Infinite Bus ou SMIB) et son modèle, puis juste à la fin on abordera l'intégration avec la simulation du domaine d'étude suivie de discussions.

Modélisation des éléments de la chaîne de conversion d'énergie

Héritiers des moulins à vent, les aérogénérateurs - plus souvent appelés éoliennes - utilisent la force du vent pour la transformer en électricité. C'est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. La figure 1 ci-dessous illustre le principe général d'un aérogénérateur avec ses principaux composants (turbine éolienne, arbres grande et petite vitesses, multiplicateurs de vitesse, machine électrique et ligne de départ) avec leurs grandeurs caractéristiques qui sont données dans les sections qui suivent.

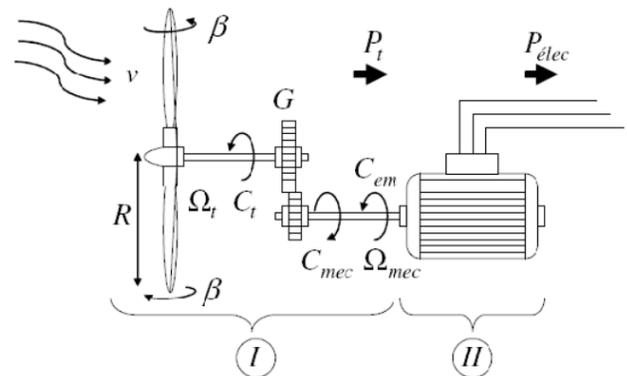


Figure 1 : Chaîne de conversion d'énergie éolienne

Modèle de la turbine éolienne

La puissance de la masse d'air qui traverse la surface équivalente à la surface active S de l'éolienne est donnée par les relations suivantes (Bellarbi, 2010) :

$$P = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot v^3 \cdot C_p \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega}{v} \quad (2)$$

ρ , v , P , R , Ω , C_p représentent respectivement la masse volumique de l'air, la vitesse locale du vent, la puissance maximale recueillie par l'éolienne, le rayon de la pale, la vitesse de rotation de la turbine et enfin le coefficient de puissance qui est fonction de λ .

L'équation mécanique du système est exprimée par (4), où J_t et J_m sont respectivement le moment d'inertie de la turbine et celui du générateur. f_v est le coefficient des frottements visqueux du générateur ; Ω_m est la vitesse de rotation du générateur, C_m et C_{em} sont les couples mécanique et électromécanique de la génératrice (Camara et al., 2014).

$$J = J_t + J_m \quad (3)$$

$$J \frac{d\Omega_m}{dt} + f_v \cdot \Omega_m = C_m - C_{em} \quad (4)$$

Le couple électromécanique est donné par la relation suivante (Youness, 2017) :

$$C_{em} = \frac{3}{2} p [(L_d - L_q) I_{sd} \cdot I_{sq} - I_{sq} \cdot \lambda m] \quad (5)$$

Modèle de la Machine Synchrones à Aimant Permanent (MSAP)

Le modèle dynamique de la machine synchrone dans le repère d-q est donné par les formules suivantes (Muftau, 2019) :

$$V_{sd} = L_d \frac{dI_{sd}}{dt} + R_s \cdot I_{sd} - L_q \cdot \omega_r \cdot I_{sq} \quad (6)$$

$$V_{sq} = L_q \frac{dI_{sq}}{dt} + R_s \cdot I_{sq} + L_d \cdot \omega_r \cdot I_{sd} + \lambda m \cdot \omega_r \quad (7)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega_r \quad (8)$$

Où V_{sd} , V_{sq} , I_{sd} , I_{sq} , L_d , L_q , R_s , λm , ω_r et θ_r représentent respectivement les composantes d-q des tensions terminales, le courant et les auto-inductances, la résistance statorique, le flux, la vitesse de rotation du rotor.

Modélisation du SMIB à base de machine synchrone

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) (Rafanotsimiva, 2008). La figure suivante illustre les éléments et principe de base d'un système SMIB :

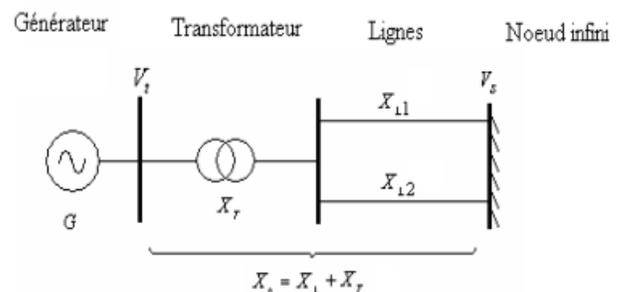


Figure 2 : Système SMIB

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 (Rafanotsimiva, 2008):

$$\begin{cases} \dot{\delta}(t) = \omega(t) \\ \dot{\omega}(t) = -\frac{\omega_0}{2H} \frac{x_d' - x_d}{x_d' x_d} V_s^2 \cos(\delta(t)) \sin(\delta(t)) - \frac{D}{H} \omega(t) - \frac{\omega_0}{2H} \frac{V_s}{x_d' x_d} E'q(t) \sin(\delta(t)) + \frac{\omega_0}{2H} P_{m0} \\ \dot{E}'q(t) = -\frac{1}{T_{d0}} \frac{(x_d' - x_d)}{x_d' x_d} V_s \cos(\delta(t)) - \frac{1}{T_{d0}} \frac{x_d}{x_d' x_d} E'q(t) + \frac{1}{T_{d0}} k_c u_f(t) \end{cases} \quad (9)$$

Où δ , ω , $E'q$, 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.

Résultats

Cas étudié

Pour effectuer la simulation, on a considéré le réseau de la ville de Diégo-Suarez dont la puissance de pointe est d'environ 12MW, on a alors utilisé une génératrice de 15MVA. Puis, on a inséré une éolienne de 2MW c'est-à-dire avec un taux de pénétration d'à peu près de 16% si on suppose un fonctionnement à plein régime de l'éolienne. Le schéma de principe de la connexion est comme suit :

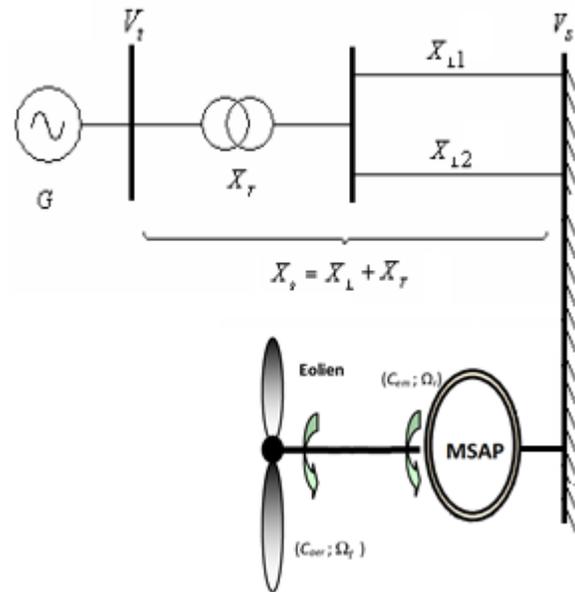


Figure 3 : Connexion d'une éolienne au réseau

Les principaux paramètres du générateur synchrone (Anger et al., 2015) sont :

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

Les principaux paramètres de l'éolienne sont :

$P=2\text{MW}$, $\cos\phi=0.8967$, $R_s=0.0034\text{pu}$,
 $L_d=0.4026\text{pu}$, $L_q=0.7685\text{pu}$, $p=30$, $C_{pmax}=0,4412$,
 $\rho=1.205$, $\lambda_{opt}=7.07$, $R=38\text{m}$

Simulations

SMIB avant et après intégration de l'éolienne

Dans cette partie de simulation, nous avons simulé et comparé les grandeurs de sorties avant et après l'intégration pour voir de près le changement du comportement de la machine. Les grandeurs visualisées ici sont les grandeurs d'état ($E'q$, ω et δ) 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.

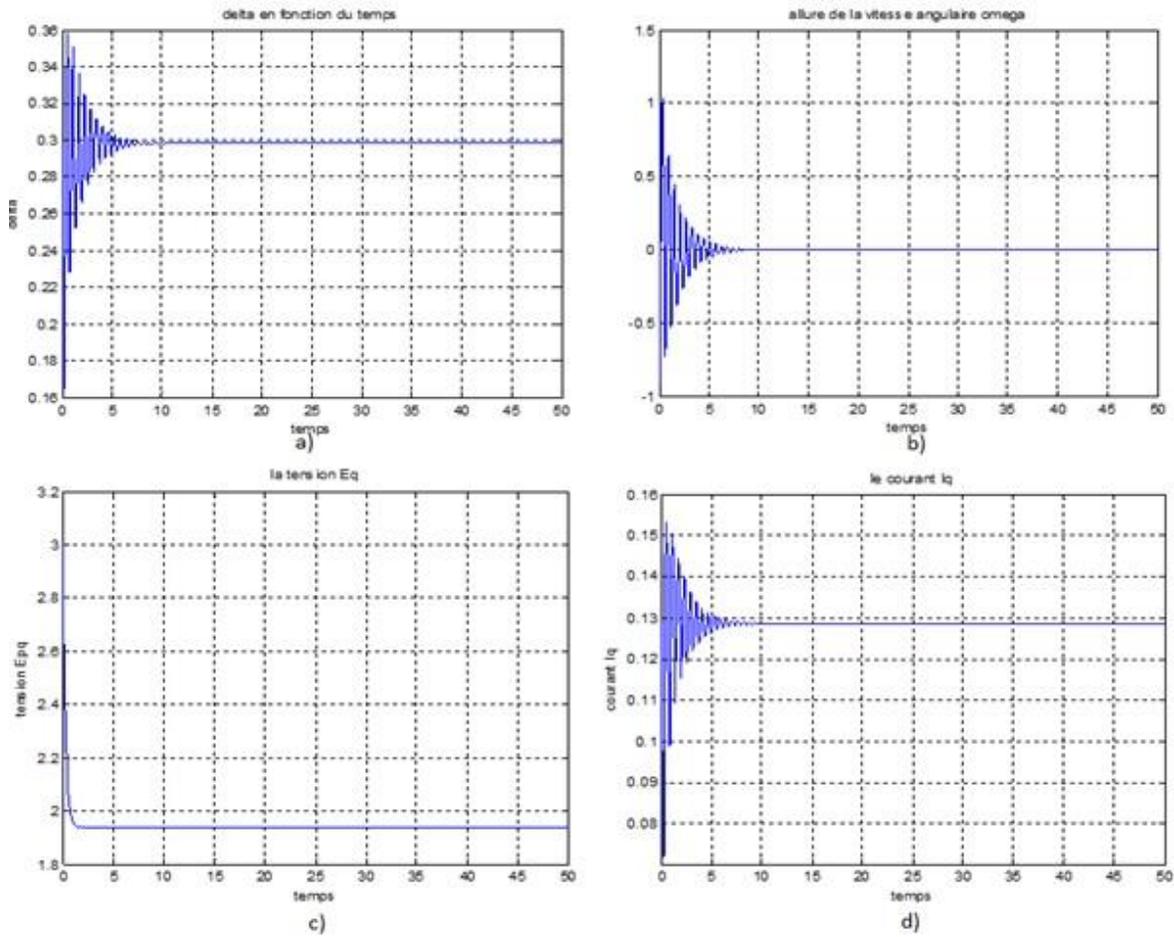


Figure 4 : Allure de l'angle de puissance δ (a), de la vitesse de rotation ω (b), de la tension en quadrature $E_{q'}$ (c) et du courant I_q (d)

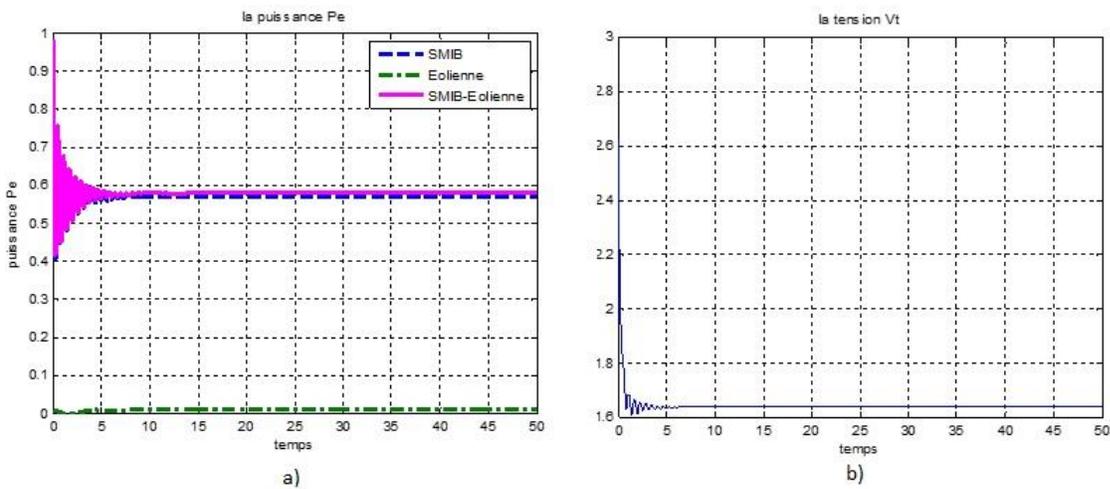


Figure 5 : a) Puissance fournie par le SMIB (trait interrompu bleu) et celle délivrée par l'éolienne (trait mixte vert), Puissance totale en violet, b) la tension de sortie V_t

La figure 5 ci-dessus illustre la tension de sortie V_t du SMIB, la comparaison de la puissance fournie par le SMIB (trait discontinu bleu) et celle délivrée par l'éolienne (trait mixte vert) ainsi que la puissance totale (trait continu violet).

Éolienne avant et après son intégration au réseau SMIB

Comme celui du SMIB, nous allons aussi voir le changement du côté éolienne. Les allures de la

figure 6 montrent respectivement les courants I_{sd} et I_{sq} , la vitesse de rotation de la turbine éolienne ω et l'angle θ dans les deux cas (éolienne seule et son interconnexion au SMIB). Les courbes en trait mixte vert correspondent à l'évolution des grandeurs de l'éolienne en fonctionnement seule et celles en trait continu bleu représentent le fonctionnement en interconnexion.

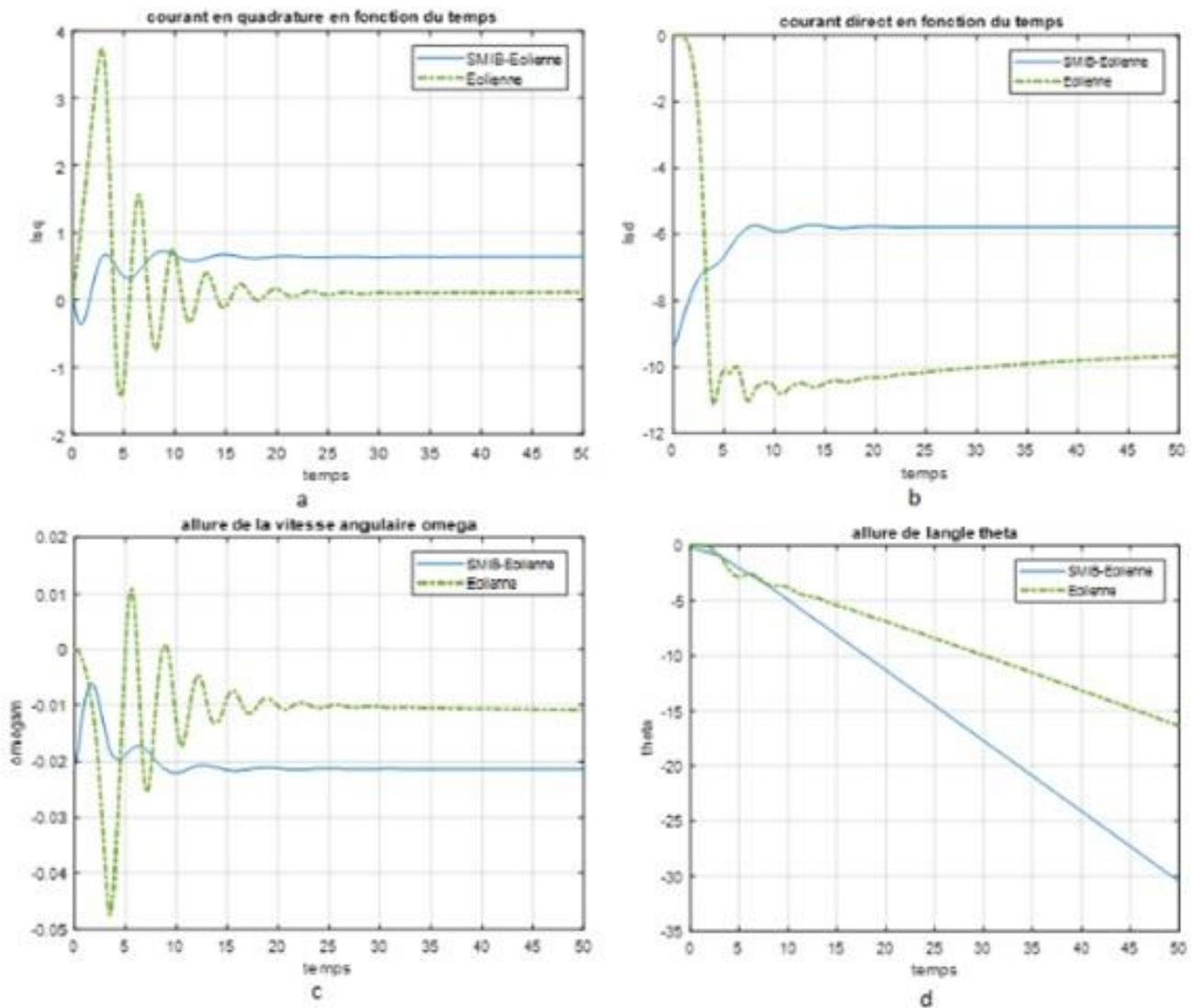


Figure 6 : Allure du courant I_{sq} (a), courant I_{sd} (b), vitesse de rotation ω (c) et l'angle θ (d)

Discussion

Les figures 4 montrent l'évolution des grandeurs caractéristiques du système SMIB en régime permanent : l'angle de puissance δ du générateur, sa vitesse de rotation ω , sa tension interne en quadrature $E'q$ et son courant en quadrature Iq . On voit bien que le réseau est stable sur un point de fonctionnement bien précisé.

Sur la figure 5, on a intégré l'éolienne et visualisé la répartition des puissances fournies à la charge par le SMIB et l'éolienne. L'insertion de l'éolienne n'as pas du tout changé le comportement du réseau principal vue que la puissance délivrée par le SMIB est largement supérieure à celle de l'éolienne.

Sur les figures 6, on a superposé l'évolution des grandeurs courant I_{sq} , courant I_{sd} , vitesse de rotation ω et l'angle θ sans et avec l'intégration de l'éolienne pour démontrer l'effet de l'intégration. On voit qu'au début de la simulation, toutes les grandeurs présentent des oscillations manifestes avant de se stabiliser. L'angle θ a toujours divergé dans les deux cas, ce qui démontre la nécessité de la commande qui est donc une suite logique à notre travail.

Conclusion

Ce présent article est basé sur l'intégration d'une éolienne à un réseau d'énergie électrique îloté. Pour l'accomplissement de ce travail, nous avons considéré le réseau de la ville de Diego-Suarez dont la puissance électrique de pointe est à peu près de 12MW en considérant un fonctionnement stable du réseau. Nous avons pris une génératrice synchrone de 15MVA pour le SMIB et une éolienne de 2MW pour l'intégration. Pour la

simulation, nous sommes partis sur les modèles mathématiques déjà existants que ce soit pour l'éolienne ou le SMIB et enfin les exécuter sur le logiciel de simulation Matlab. Les résultats obtenus montrent que l'insertion de l'éolienne n'a pas changé le fonctionnement du SMIB. Par contre lors de la connexion, l'éolienne est beaucoup plus sensible et se stabilise plus vite que lorsqu'elle fonctionne seule sauf pour l'angle θ qui diverge et nécessite une commande. Ce qui est donc la perspective à très court terme de notre travail.

Références

- Anger-Hong, N., H. Urbanek, D. Saemann, (2015). Safe power supply for oil rigs – how to select circuit-breakers for switching generators. **Conference Paper**, février 2015
- Dong, H., N. Chen, X. Li and H. Li, (2017). Improved Adaptive Robust Control for Low Voltage Ride-through of Front-End Speed Regulation Wind Turbine, VOL. **XX**, 2017 *Digital Object Identifier (DOI)* 10.1109/ACCESS.2020.2980889, *IEEE Access*.
- Bedoud, K., R. Lakel, M. Ali-Rachedi, S. Lekhchine, T. Bahi, (2013). Modélisation d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne basée sur une machine asynchrone à double alimentation, *21ème Congrès Français de Mécanique*, Bordeaux, 26 au 30 août 2013.
- Briceno Vicente, W.C., R. Caire, N. Hadjsaid, (2017). Stochastic simulations and stability to determine maximum wind power penetration of an island network. *IEEE Power & Energy Society General Meeting*: 1-5
- EL Aimani, S., B. François, B. Robyns, (2002). Modélisation de générateurs éoliens à vitesse variable connectés à un bus continu commun, *FIER' 2002*, Tétouan – Maroc.

- Omar, M.H.T., W.M. Ali, M.Z. Mostafa (2011). Auto Tuning of PID Controller Using Swarm Intelligence. *International Review of Automatic Control (I.R.E.A.CO.)*, **Vol. 4** (3): May 2011
- Bellarbi S., (2010). Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie pour un système éolien de petite puissance. Ecole Nationale Polytechnique, Département d'Electronique, El Harrach, Alger, Algérie.
- Camara, M.S., M.B. Camara, B. Dakyo, H. Gualous, (2014). Modélisation et commande d'une génératrice synchrone à aimant permanent pour la production et l'injection de l'énergie offshore dans un réseau, **Symposium de Genie Electrique (SGE'14) : EF-EPF-MGE 2014**, 8-10 Juillet 2014, ENS Cachan, France.
- Youness, El M., (2017). DTC-SVM Control for Permanent Magnet Synchronous Generator based Variable Speed Wind Turbine. Laboratory of Production Engineering, Morocco.
- Muftau, B., (2019). Stability analysis of a PMSG based Virtual Synchronous Machine. Electrical and Electronics Engineering Department, Swansea University. Swansea, UK.
- Rafanotsimiva, L.F., (2008). Etude de commandes non linéaires pour réseaux électriques – application a un système SMIB. Thèse pour l'obtention du Diplôme De Doctorat de l'Université d'Antsiranana Spécialité Sciences de l'Ingénieur, Option Génie Electrique.