RSTE
Revue des Sciences, de Technologies et de l'Environnement Volume 3
Édition spéciale, Université d'été 2ème édition Mahajanga, novembre 2020

AMÉLIORATION DE LA STABILITÉ TRANSITOIRE D'UN RÉSEAU ÉLECTRIQUE PAR L'UTILISATION DU DISPOSITIF FACTS TYPE STATCOM

VELOTSANGANA Ndalana Davida[1], RAFANOTSIMIVA Liva Falisoa[2], RAZAFIMAHENINA Jean Marie[3]

1: Ecole du Génie Civil/Génie Naval, Institut Supérieur de Technologie d'Antsiranana, Madagascar
2: Ecole du Génie Industriel, Institut Supérieur de Technologie d'Antsiranana, Madagascar
3: Ecole Doctorales Thématiques Energies Renouvelables et Environnement, Université d'Antsiranana, Madagascar
Correspondant : v.davidndalana@gmail.com ; Mobile : 032 69 585 79 / 034 46 491 30

Résumé

Depuis très longtemps les combustibles fossiles sont utilisés par l'Homme, aujourd'hui les énergies renouvelables sont des sources d'énergie propre et durable. Pour cela, la plupart des pays du monde ont pensés d'augmenter le taux énergétique via les sources renouvelables, notamment, l'Europe, l'Amérique ainsi, Madagascar, au cours de dernières années, dans le cadre du projet Présidentiel sur l'investissement aux énergies renouvelables comme les énergies éolienne et photovoltaïque autonome ou raccordé au réseau. Il est difficile pour les exploitants des réseaux électriques de répondre efficacement au besoin des utilisateurs de l'énergie électrique, dans les conditions anormales en présence de perturbations et surtout lorsque le réseau électrique est en hybride avec autre source d'énergie renouvelable. Puisque le dispositif (Flexible AC Transmission System) FACTS est utilisé pour assurer la stabilité d'un réseau électrique à partir de la technique de Lyapunov basé sur le modèle flou de Takagi-Sugeno pour la stabilité et la stabilisation des systèmes non linéaires. L'objectif de ce présent papier consiste à mettre en œuvre un dispositif FACTS shunt type compensateur synchrone statique (STATCOM), inséré dans le réseau électrique en vue de concevoir des nouvelles lois de commandes non linéaires pour l'ensemble pour assurer sa stabilité et de respecter l'environnement. La méthodologie adaptée est l'application des modèles de FACTS et ses lois de commande qui seront implantés dans un logiciel destiné à l'étude dynamique des réseaux. Ceci nous amène aux résultats suivants: les FACTS shunt stabilisent la tension mais ils doivent être placés sur le nœud de la zone le plus fragile ayant la plus basse tension, ils stabilisent aussi le réseau de façon globale alors que les FACTS séries ont un meilleur comportement local. D'après les résultats, le FACTS shunt implantée en milieu de la ligne échange uniquement la puissance réactive avec le réseau. On peut simplement observer que le compensateur shunt, au point milieu, augmente d'une manière significative la puissance maximale transmissible d'une ligne électrique jusqu'au double. Les puissances injectées par le STATCOM sont la puissance réactive calculée en fonction de la chute de tension qui présente la tension d'une ligne compensée et la puissance active. Nous avons aussi donne un modèle du dispositif FACTS qui est le STATCOM comme un élément essentiel pour la compensation de l'énergie réactive lorsque le système subit un défaut avec son système de commande à travers ces équations correspondantes comme la régulation de la tension par compensation de l'énergie réactive en utilisant la commande.

Mots-clés : Énergies renouvelables, réseaux électriques, dispositif FACTS, technique de Lyapunov, systèmes non linéaires, stabilité et la stabilisation.

Abstract

Fossil fuels have been used by humans for a very long time, today renewable energies are sources of clean and sustainable energy. For this, most countries of the world have thought of increasing the energy rate via renewable sources, in particular, Europe, America as well, Madagascar, in recent years, as part of the Presidential project on the investment in renewable energies such as wind and photovoltaic energy, autonomous or connected to the grid. It is difficult for power system operators to respond effectively to the needs of power users, under

ISSN: 2709-8192-1. https://portal.issn.org/resource/ISSN/2709-8192

abnormal conditions in the presence of disturbances and especially when the power grid is in hybrid with another renewable energy source. Since the FACTS (Flexible AC Transmission System) device is used to ensure the stability of an electrical network using the Lyapunov technique based on the fuzzy Takagi-Sugeno model for the stability and stabilization of nonlinear systems. The objective of this paper is to implement a STATCOM-type FACTS shunt device inserted into the electrical network with a view to designing new non-linear control laws for the assembly to ensure its stability and to respect the environment. The adapted methodology is the application of FACTS models and its control laws which will be implemented in software intended for the dynamic study of networks. This brings us to the following results: the FACTS shunt stabilize the tension but they must be placed on the node of the most fragile zone having the lowest tension, they also stabilize the network in a global way whereas the FACTS series have a better behavior local. According to the results, the FACTS shunt located in the middle of the line only exchanges reactive power with the network. We can simply observe that the shunt compensator, at the midpoint, significantly increases the maximum transmissible power of an electric line to double. The powers injected by the STATCOM are the reactive power calculated according to the voltage drop which presents the voltage of a compensated line and the active power. We also give a model of the FACTS device which is the STATCOM as an essential element for the compensation of reactive energy when the system undergoes a fault with its control system through these corresponding equations such as voltage regulation by compensation of reactive energy using the command.

Keywords: Renewable energies, electrical networks, FACTS device, Lyapunov technique, nonlinear systems, stability and stabilization.

Introduction

La demande en énergie électrique augmente de plus en plus à Madagascar engendre les contraintes économiques de construire de nouveaux ouvrages conduisent à l'exploitation des réseaux électriques prés de leurs limites de stabilité ainsi sa sécurité. En effet, le problème majeur dans le bon fonctionnement de ces derniers est causé par l'instabilité des réseaux électriques.

Pour faire face à ce problème, les stabilisateurs de puissance PSS (Power System Stabilizers) implantés depuis les années 60, ne peuvent assurer seuls l'amortissement de ces oscillations. Des nouveaux dispositifs appelés FACTS (Flexibles AC Transmission Systems), sont placés dans le réseau, qui ont bénéficié de l'évolution de la technologie de l'électronique de puissance. Ces dispositifs sont insérés dans un réseau électrique pour satisfaire plusieurs besoins, tels que la répartition des puissances, la compensation de la puissance réactive, et le renforcement de la stabilité des réseaux électriques.

Le but de ce travail est d'améliorer la stabilité transitoire et l'amortissement des oscillations des systèmes de puissance Pour atteindre cet objectif, on utilise un dispositif FACTS shunt (STATCOM). L'utilisation de la technique de Lyapunov basé sur le modèle flou de Takagi-Sugeno pour la stabilité et la stabilisation des systèmes non linéaires a été proposée (Lendek et al., 2015)..

Les résultats de simulations obtenus pour un réseau mono machine afin de vérifier la performance de la méthode proposée sur un réseau multi machine, comprenant trois générateurs situés dans deux zones différentes. La stabilité transitoire a été améliorée par l'intégration d'un STATCOM pour l'amortissement des oscillations locales et interrégionales d'un réseau électrique considéré.

Compensateur statique synchrone (STATCOM)

Par définition le STATCOM (Static Synchronous Compensator) est un dispositif shunt la plus avancée des FACTS, qui contient des convertisseurs de sources de tension à base des interrupteurs statiques sophistiqués IGBT (Insulatd Gate Bipolar Transistors).

Ils injectent un courant dans le réseau depuis le point de raccordement. Son rôle principal est la compensation de la puissance réactive et le contrôle de tension au bus.

Le STATCOM fourni ou absorbe de l'énergie réactive grâce aux condensateurs shunts incorporés dans le dispositif en luttant contre la chute de tension ou la surtension.

En effet tous les compensateurs parallèles injectent du courant au réseau à travers les points de raccordement. La connexion d'une impédance variable en parallèle sur le réseau électrique résulte en une consommation ou une injection d'un courant variable, cette injection de courant modifie les puissances actives et réactives qui transitent dans la ligne (Alibi et al., 2011).

Structure et principe de fonctionnement

Le STATCOM génère une tension alternative triphasée en phase avec la tension du réseau à partir d'une source de tension continue.

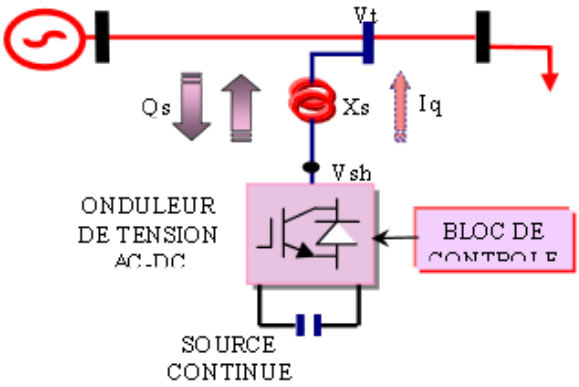

Figure 1: Structure de base du STATCOM

Le schéma équivalent suivant nous montre le transit du courant injecté par le STATCOM :

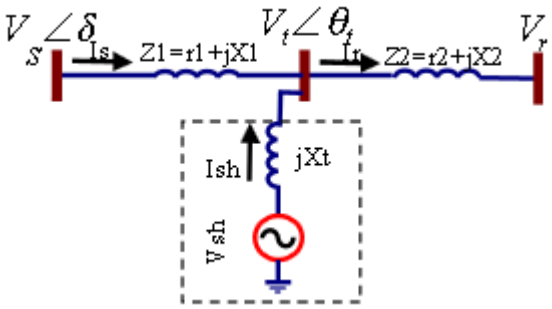

Figure 2: Schéma équivalent du STATCOM connecté au réseau électrique

$$\bar{I}sh = \frac{\bar{V}sh - \bar{V}t}{jXt} \quad (1)$$

Et la puissance réactive échangée est donnée par :

$$Q_{sh} = V_{sh}.I_{shq} = \frac{V^2_{sh}}{X_t}\left(1 - \frac{V_t}{V_{sh}}\right) \quad (2)$$

L'équation (2) se traduit sous trois formes grâce aux conditions suivantes :

Si V_{sh}= V_t la puissance réactive Q_{sh}=0, aucun transfert de l'énergie n'est effectué.

Si $V_{sh} > V_t$ Alors Q_{sh}>0, le STATCOM fourni une puissance réactive au réseau, car il fonctionne en mode capacitif.

ISSN: 2709-8192-1. https://portal.issn.org/resource/ISSN/2709-8192

Si $V_{sh} < V_t$ Alors Q_{sh}<0, le STATCOM absorbe une puissance réactive au réseau, car il fonctionne en mode inductive.

Modélisation mathématique d'un STATCOM

Le STATCOM est représenté par un schéma équivalent qui contient une source de tension sinusoïdale connectée à un nœud à l'aide d'une inductance L_{sh} du transformateur de couplage.

Le courant du STATCOM est donné par :

$$V_t - V_{sh} = R_{sh} I_{sh} + L_{sh} \frac{dI_{sh}}{dt} \quad (3)$$

Les équations dynamiques du STATCOM dans le repère (d, q):

$$\begin{cases} V_{td} - V_{shd} = R_{sh} I_{shd} + L_{sh} \frac{dI_{shd}}{dt} - L_{sh}\, \omega\, I_{shq} \\ V_{td} - V_{shd} = R_{sh} I_{shd} + L_{sh} \frac{dI_{shq}}{dt} - L_{sh}\, \omega\, I_{shq} \end{cases} \quad (4)$$

Synthèse de loi de commande d'un réseau électrique

L'objectif d'un contrôleur flou qui garantit le suivi de trajectoire est de satisfaire la condition suivante :

$$\bar{y}(t) - r(t) \to 0, t \to \infty \quad (5)$$

Où $r(t)$ représente la trajectoire désirée ou le signal de référence. Afin de convertir le problème de suivi de trajectoire en un problème de stabilisation, on introduit un ensemble de variables virtuelles désirées xd qui doivent être suivies par les variables d'états x telle que :

$$\bar{y}(t) = \varphi(x) \quad (6)$$

$$r(t) = \varphi(xd) \quad (7)$$

La sortie inférée par le contrôleur PDC est déterminée par la somme suivante :

$$\tau(t) = -\sum_{i=1}^{r} hi\,(z(t))Fi\tilde{x}(t) \quad (8)$$

Pour obtenir enfin la boucle fermée suivante :

$$\dot{\tilde{x}}(t) = \sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{r} hi\,(z(t))hj(z(t))Gij\tilde{x}(t) \quad (9)$$

Avec

Gij = Ai - Bi Fi (10)

Application au système SMIB

Dynamique mécanique de la génératrice synchrone

Un réseau SMIB est constitué d'une machine synchrone qui alimente un réseau infini au travers de lignes et d'un transformateur

Equations électriques

Eq (t)= $\frac{Xds}{X'ds}$E'q (t) - $\frac{Xd-X'd}{X'ds}$Vs $\cos\delta(t)$; Xds= Xd+ Xs et $X'ds = X'd + X's$ (11)

Ef (t)= Kc Uf(t) (12)

Pe(t)= $\frac{Vs\ Eq(t)}{Xds}\sin\delta(t)$ (13)

Iq(t)= $\frac{Vs}{Xds}\sin\delta(t)$ = Pe (t)/ Xad If (14)

Q(t)= $\frac{Vs\ Eq(t)}{Xds}\cos\delta(t)$ - $\frac{V^2s}{Xds}$ (15)

E_q (t)= Xad If(t) (16)

Vt(t)= $\frac{1}{Xds}\{X^2sE^2q(t) + X^2s.V^2s + 2Xd.Xs.Xds\,Pe(t)\cos\delta(t)\}^{\frac{1}{2}}$ (17)

Auxquelles on ajoute les équations de la turbine :

$$\dot{P}m(t) = -\frac{1}{Tt}Pm(t) + \frac{Kt}{Tt}\,Xe(t) \quad (18)$$

$$\dot{X}e(t) = -\frac{1}{Tg}Xe(t) + \frac{Kg}{Tg}\left[Pc(t) - \frac{1}{R\omega 0}\omega(t)\right] \quad (19)$$

ISSN: 2709-8192-1. https://portal.issn.org/resource/ISSN/2709-8192

Modèle (δ,ω,E'_q)

Modèle non linéaire d'ordre 3 peut être représenté comme suit :

$$\begin{cases} \dot{\delta}(t) = \omega(t) \\ \dot{\omega}(t) = -\frac{\omega 0(X_d - X'_d)}{2HX_{ds}X'_{ds}} V_s^2 \cos(\delta(t)) \sin(\delta(t)) - \frac{D}{H}\omega(t) - \frac{\omega_0 V_s}{2HX'_{ds}} E'q(t) \sin(\delta(t)) - \frac{\omega_0}{2H} P_{m0} \\ \dot{E}'_q(t) = -\frac{1}{T_{d0}} \frac{(X_d - X'_d)}{X'_{ds}} V_s \cos(\delta(t)) - \frac{1}{T_{d0}} \frac{(X_{ds})}{X'_{ds}} E'q(t) + \frac{1}{T_{d0}} k_c u_f(t) \end{cases} \quad (20)$$

Modèle (δ,ω,E_q)

Ce système est classiquement représentable par un modèle non linéaire d'ordre 3 de la forme : (Rafanotsimiva, 2013).

$$\begin{cases} \dot{\delta}(t) = \omega(t) \\ \dot{\omega}(t) = -\frac{D}{H}\omega(t) - \frac{\omega_0 V_s}{2Hx_{ds}} V_s \sin\delta(t) E_q(t) - \frac{\omega_0}{2H} P_{m0} \\ \dot{E}_q(t) = \frac{(X_d - X'_d)}{X'_{ds}} V_s \sin\delta(t)\omega(t) - \frac{1}{T'_{d0}} \frac{X_{ds}}{X'_{ds}} E_q(t) + \frac{X_{ds}}{X'_{ds} T'_{d0}} k_c u_f(t) \end{cases} \quad (21)$$

$$V^2_t(t) = \frac{x_s^2}{x'_{ds}} \left[x_q^2(t) + V_s^2 + \frac{2X_d}{x_s} - V_s \cos\delta(t) E_q(t) \right] \quad (22)$$

$$Pe(t) = \frac{1}{x_{ds}} V_s \sin\delta(t) E_q(t) \quad (23)$$

Avec :

Variable d'entrée de commande u :

La tension d'excitation $u_f(t)$du générateur

$$(u(t) = u_f(t)) \quad (24)$$

Le modèle utilisé (δ, ω, Eq) est valable pour des perturbations modérées et compatible aussi sur l'application de l'approche multimodèle au lieu du modèle plus communément considéré en (δ, ω, E'q) (Rafanotsimiva, 2013 ; Bouarar, 2009).

Résultat et discussion de la simulation

L'ensemble du système est simulé dans Simulink de l'environnement MATLAB. Il se compose d'un STATCOM situé au secondaire d'un transformateur d'une ligne de transmission moyenne nominal. La réactance d'un STATCOM a d'abord été variée de -0.2pu ; 0 et 0.2pu entre 0 à 10s, 10s à 20s et 20s à 40s, comme présenté dans la figure 3. La puissance réactive Qe augmente de 2.58pu au lieu de 2.5pu, figure (4) et figure (6), du fait qu'il y a une injection de la puissance réactive en compensation grâce à l'insertion de FACTS shunt type STATCOM.

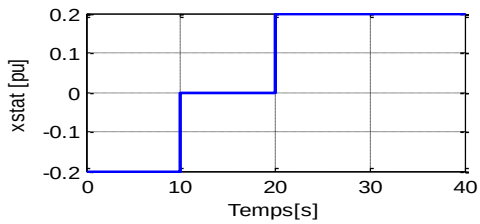

Figure 3: Réactance variable d'un STATCOM

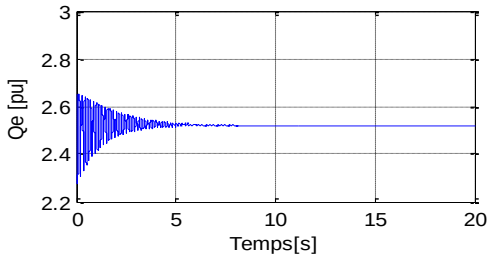

Figure 4: Puissance réactive, réseau seul

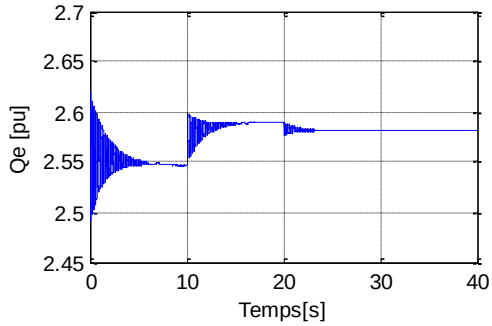

Figure 5: Puissance réactive, réseau avec STATCOM

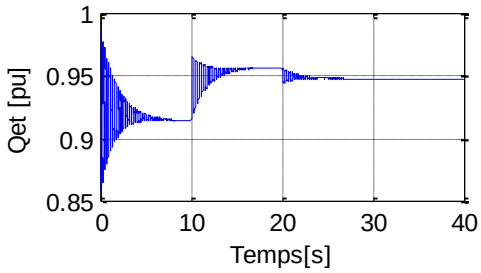

Figure 6: Puissance réactive totale

ISSN: 2709-8192-1. https://portal.issn.org/resource/ISSN/2709-8192

Les paramètres du système étudié sont :

Pour la simulation, nous avons pris les paramètres de système suivant :

La puissance mécanique Pmo est supposée et ω_0 est la vitesse de rotation nominale du générateur, D et H sont les coefficients d'inertie et d'amortissement, xd, x'd, xt, xL, xds, x'ds sont les réactances du générateur, de la ligne et du transformateur. T'do est la constante de temps axe d et D ouvert.

Les paramètres électriques, toutes ces grandeurs étant supposées constantes en régime de fonctionnement normal.

Avec :

ω_0=314,159 rad/s ; D= 5pu ; H= 4pu ; T'do=6.9s ; K_c=200pu ; x_d=1.89pu ; x'_d=0.257pu ; x_T=0.127pu ; x_l=0.4853pu ; P_{mo}=0.9pu ; V_{to}=1.0pu ;

Conclusion

Dans cet article, le FACTS shunt type STATCOM améliore la puissance maximale transmissible dans une ligne. Le compensateur STATCOM est connecté sur le réseau à travers un transformateur monté en parallèle aux bornes de la génératrice.

Le STATCOM génère une puissance réactive pour redresser la tension du système pendant la période de défaut. Le résultat de la simulation montre que le système utilisé est stable par la présence STATCOM qui est inséré pour la compensation de puissance et l'amortissement de l'oscillation de fréquence qui stabilise rapidement le système dans le cas de défaut.

Il en ressort alors un comportement acceptable du compensateur parallèle compte tenu du fait que la tension est mieux régulée par le STATCOM. Notons que la simulation a été faite avec un système à faible perturbation et on peut aussi évaluer les performances aussi dans un système déséquilibré à forte perturbation.

Quant aux puissances actives et réactives au niveau du système étudié, il est à noter que même si les puissances actives diminuent progressivement par rapport au temps, les puissances réactives augmentent à chaque connexion de charge ; ce qui permet de magnétiser davantage pour la production de l'énergie dont a besoin la charge.

Références bibliographiques

Alibi, A., H. Laib et L. Delendi, (2011). Apport des FACTS pour la compensation shunt dans un réseau électrique : Modélisation et commande d'un STATCOM. *Revue des Sciences de la Technologie, RST*, **Vol. 2***(1)* : 111-120.

Rafanotsimiva, L.F., (2013). Etude de commandes non linéaires pour réseaux électriques – application à un système SMIB. Sciences de l'ingénieur. Université d'Antsiranana.

Bouarar, T., (2009). Contribution à la synthèse de lois de commande pour les descripteurs de type Takagi-Sugeno incertains et perturbés. Thèse de Doctorat. Université de Reims - Champagne Ardenne, France

Takagi, T. & M. Sugeno, (1985). Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, **1**: 116-132.

Lendek, Zs., T.M. Guerra, and J. Lauber (2015). Controller design for TS models using delayed nonquadratic Lyapunov functions. *IEEE Transactions on Cybernetics*, **45***(3)*:453-64.

ISSN: 2709-8192-1. https://portal.issn.org/resource/ISSN/2709-8192