

EXTENSION DE L'APPROCHE MULTIMODÈLE APPLIQUÉE AU SMIB A UN RESEAU ELECTRIQUE MULTIMACHINE

RAFANOTSIMIVA Liva Falisoa¹, SAMBATRA Eric Jean Roy¹, RAZAFIMAHENINA Jean Marie²

¹Groupe de Recherche pour le Développement Durable de Diégo-Suarez (GR3D), Institut Supérieur de Technologie D'Antsiranana, B.P. 509, (201) Antsiranana

²Ecole Supérieure Polytechnique, Université d'Antsiranana, B.P. O, (201) Antsiranana

Auteur correspondant : liva.rafanotsimiva@ist-antsiranana.mg / liva.rafanotsimiva@gmail.com

Tél. 0320268171 / 0344322486

Résumé

Les multimodèles sont reconnus pour leur capacité à prendre en compte les changements dans le mode de fonctionnement du système et à reproduire son comportement avec précision dans une large plage de fonctionnement. A la lumière du nombre de travaux ces dernières années, ils ont connu un regain d'intérêt, notamment dans des applications telles que la prédiction de séries temporelles, l'estimation d'état, la conception et la synthèse d'observateurs, la commande ou la simulation. Ils peuvent aussi être vus comme un certain type de modélisation floue, correspondant à l'approche dite de Takagi et Sugeno. Par ailleurs, assurer de bonnes performances en fonctionnement normal, comme la stabilité en présence de perturbations imprévues ou de défauts dans le réseau électrique, reste un enjeu important dans la gestion de l'énergie. Dans ce contexte, plusieurs outils de commande « avancée » ont été étudiés, notamment sur la base du cas d'étude le plus simple d'une seule machine connectée à un bus infini, correspondant au modèle habituellement désigné, selon la terminologie anglaise, SMIB (Single Machine Infinite Bus). Dans nos précédents travaux, l'approche multimodèle à états couplés de Takagi et Sugeno obtenu par transformation par secteurs non linéaires, et plus précisément sa commande PDC (Parallel Distributed Compensation), ont été utilisées pour la régulation d'un système SMIB, et illustrées lors d'une chute de tension provoquée par un enclenchement brusque d'une forte charge, ou à l'apparition d'un défaut de type court-circuit. La simulation et la résolution des LMIs (Linear Matrix Inequalities) ont été faites avec le logiciel MATLAB. Nous avons comparé les résultats avec ceux obtenus par la commande classique PID (Proportionnelle Intégrale Dérivée) et nous avons constaté que le PDC pilote bien mieux le système que le PID. Dans le cadre de ce travail, Il s'agit d'étendre ce résultat au cas des réseaux multimachines qui sont plus représentatifs du système réel avec les interconnexions. Différents résultats de simulations sur MATLAB seront présentés.

Mots clés : Multimodèles, réseaux électriques multimachines, commande, stabilisation, PDC, PID.

Abstract

Multiple models are recognized for their ability to account for changes in the way the system operates and reproduce its behavior accurately over a wide range of operations. In light of the number of works in recent years, they have experienced a renewed interest, especially in applications such as time series prediction, state estimation, observer design and synthesis, control or simulation. They can also be seen as some type of fuzzy modeling, corresponding to the so-called Takagi and Sugeno approach. Ensuring good performance in normal operation, such as stability in the presence of unforeseen disturbances or faults in the power grid, remains an important issue in energy management. In this context, several "advanced" control tools have been studied, notably on the basis of the simplest case study of a single machine connected to an infinite bus, corresponding to the model usually designated, according to the

English terminology, SMIB (Single Machine Infinite Bus). In our previous work, the Takagi and Sugeno coupled-state multiple model approach obtained by non-linear sector transformation, and more precisely its PDC (Parallel Distributed Compensation) control, were used for the regulation of a SMIB system, and illustrated during a voltage drop caused by a sudden engagement of a heavy load, or the occurrence of a short circuit-type fault. The simulation and resolution of LMIs (Linear Matrix Inequalities) were done with the MATLAB software. We compared the results with those obtained by the classical control Proportional Integral Derivative (PID) and we found that the PDC controls the system much better than the PID. It is in the context of this work to extend this result to the case of multimachine power systems which are more representative of the real system with the interconnections. Different simulation results on MATLAB will be presented.

Keywords: Multiple models, multimachine power systems, control, stabilization, PDC, PID

Introduction

La structure multimodèle permet de simplifier et d'étudier aisément la stabilité d'un système non linéaire, grâce à l'outil numérique LMI qui permet de trouver des solutions aux équations de Lyapunov, la synthèse des correcteurs est constituée par exemple d'un retour d'état pour chaque modèle local.

La particularité d'un modèle T-S de Takagi et Sugeno (1985), repris par Murray-Smith et Johansen (1997) est que les ensembles flous sont seulement utilisés dans la partie prémisse des règles. La partie conclusion est décrite par des modèles numériques. Cette particularité rend un modèle flou T-S équivalent à un multimodèle. La représentation des systèmes non linéaires constitue une alternative intéressante dans le domaine de la commande, de l'observation et du diagnostic des systèmes non linéaires. Un modèle T-S est composé d'un ensemble fini de modèles linéaires interconnectés grâce à des fonctions non linéaires vérifiant la propriété de somme convexe.

Dans la plupart des travaux, des modèles locaux de structure affine sont utilisés en raison de leur simplicité. Cependant, si le système comporte de fortes non linéarités, le

nombre de modèles locaux peut être très important, ce qui augmente la complexité du modèle.

Il a été démontré que cette approche peut donner un meilleur résultat pour la stabilisation d'un système SMIB suite à une surcharge modeste due à l'enclenchement brusque d'une forte charge ou une erreur paramétrique sur l'angle de puissance (Rafanotsimiva et al. 2013, Rafanotsimiva 2014).

Dans la suite, nous allons aborder directement l'extension de l'approche multimodèle appliquée au SMIB au réseau multimachine, ensuite les résultats de simulations et discussions et enfin, nous terminerons par une conclusion et perspectives.

Matériels et Méthodes : Application de l'approche multimodèle au système SMIB

Nous avons utilisé la méthode employée par Rafanotsimiva et al. (2013) pour étudier la stabilisation d'un réseau électrique simplifié, constitué d'une génératrice connectée à un réseau de puissance infinie par l'intermédiaire

d'un transformateur et de deux lignes de transmission en parallèle (système SMIB).

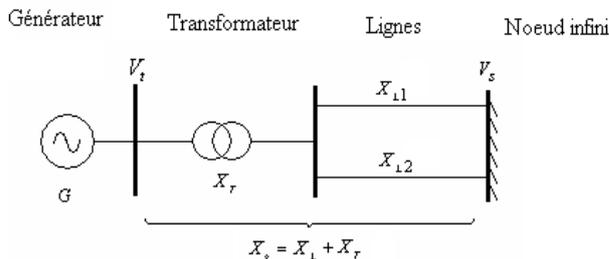


Figure 1 : Réseau électrique simplifié (SMIB)

Le modèle mathématique est décrit comme suit :

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

Le multimodèle à états couplés ou multimodèle T-S correspondant a été obtenu par linéarisation et par transformation par secteurs non linéaires, comme présenté par Ichalal et al. (2008). Ce qui fait qu'il représente de manière exacte le modèle non linéaire sur l'intervalle compact considéré. Les multimodèles utilisent la commande par compensation parallèle distribuée ou PDC introduit par Wang et al. (1996).

Beaucoup de travaux ont été faits par rapport à la commande non linéaire des systèmes SMIB. Citons en particulier les travaux de Besançon et al. (2012). Dans ce travail, nous avons repris le modèle utilisé par Roosta et al. (2001).

Nous avons d'abord remarqué qu'en ciblant une opération du générateur autour d'un

angle de référence δ_0 dans $]0, \pi[$, une première commande par retour d'état de la forme :

$$u_f = -\frac{P_{m0} T'_{d0} x'_{ds} \cos\delta}{k_c V_s (\sin\delta)^2} \omega + u$$

peut être appliquée au modèle (1) de telle sorte qu'il devient :

$$\begin{pmatrix} \dot{\delta}(t) \\ \dot{\omega}(t) \\ \dot{E}_q(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{D}{H} & -\frac{\omega_0}{2H} \frac{1}{x_{ds}} V_s \sin\delta(t) \\ 0 & \frac{x_d - x'_d}{x'_d} V_s \sin\delta(t) & -\frac{1}{T'_{d0}} \frac{x_{ds}}{x'_d} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta(t) \\ \omega(t) \\ E_q(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{x_{ds}}{x'_d} \frac{k_c}{T'_{d0}} \end{pmatrix} u \quad (2)$$

où $\bar{E}_q = E_q - \frac{P_{m0} x_{ds}}{V_s \sin\delta}$ et u est la nouvelle

variable de commande.

En considérant que $\sin\delta$ peut varier d'un certain $\varepsilon > 0$ à $+1$ comme valeurs extrêmes (dans la pratique, par exemple $\varepsilon = 0,001$), un multimodèle peut facilement être obtenu sous la forme :

$$\dot{x}(t) = \mu_1(z(t)) A_1 x(t) + \mu_2(z(t)) A_2 x(t) + B u, \quad (3)$$

avec

$$\mu_1(z(t)) = \frac{1}{1-\varepsilon} (1 - \sin\delta(t))$$

$$\mu_2(z(t)) = \frac{1}{1-\varepsilon} (-\varepsilon + \sin\delta(t)) \quad (4)$$

Et

$$A_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{D}{H} & -\varepsilon \frac{\omega_0}{2H} \frac{1}{x_{ds}} V_s \\ 0 & \varepsilon \frac{x_d - x'_d}{x'_d} V_s & -\frac{1}{T'_{d0}} \frac{x_{ds}}{x'_d} \end{pmatrix}$$

$$A_2 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{D}{H} & -\frac{\omega_0}{2H} \frac{1}{x_{ds}} V_s \\ 0 & \frac{x_{d'} - x'_{d'}}{x'_{ds}} V_s & -\frac{1}{T'_{d0}} \frac{x_{ds}}{x'_{ds}} \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{x_{ds}}{x'_{ds}} \frac{k_c}{T'_{d0}} \end{pmatrix}$$

Le problème du contrôle se réduit alors à résoudre deux LMIs, respectivement fonctions de A_1 et A_2 . Numériquement :

$$B = B_1 = B_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 73.6984 \end{pmatrix}; \varepsilon = 0.001;$$

$$A_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1.25 & -0.0171846 \\ 0 & 0.0019479 & -0.36849 \end{pmatrix};$$

$$A_2 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1.25 & -17.1846 \\ 0 & 1.9479 & -0.36849 \end{pmatrix};$$

et

$$\sum_{i=1}^2 \mu_i(z(t)) (XA_i^T - M_i^T B_i^T + A_i X - B M_i) < 0. \quad (6)$$

En outre, afin de garantir un certain taux de convergence, nous pouvons également considérer un paramètre $\tau > 0$ et changer cette inégalité en :

$$\sum_{i=1}^2 \mu_i(z(t)) (XA_i^T - M_i^T B_i^T + A_i X - B M_i + \frac{\tau}{2} X) < 0. \quad (7)$$

Nous avons noté également que pour la compensation des perturbations basse fréquence - et la possible comparaison avec un régulateur PID standard, la même approche peut être utilisée en outre avec une action intégrale dans la commande. En effet, étant donné un angle de référence δ_0 , cela signifie simplement étendre le modèle (2) avec une équation :

$$\dot{\delta}_i(t) = \delta(t) - \delta_0 \quad (8)$$

qui n'affecte pas la structure du multimodèle.

La mise en œuvre de la méthode et les calculs connexes ont été réalisés en utilisant l'outil MATLAB ©.

Par exemple, avec $\tau = 1$, les résultats suivants pour les gains sont obtenus :

$$F_1 = [-0.4747 \quad -1.1297 \quad -0.6109 \quad 0.0459],$$

$$F_2 = [-84.1463 \quad -188.5225 \quad -98.0521 \quad 6.6294],$$

à partir desquels la commande PDC peut être calculée.

Elle a été testée en simulation avec différents types de défauts, et les résultats comparés avec ceux obtenus en utilisant un PID réglé comme suit :

$$u(t) = 0.12(\delta(t) - \delta_0) + 0.001 \int_0^t (\delta(\tau) - \delta_0) d\tau + \frac{d(\delta(t) - \delta_0)}{dt}.$$

Les simulations considérées correspondent à des fonctionnements à partir des conditions initiales suivantes :

$$[\delta_0 \quad \omega_0 \quad E_{q0}]^T = [1.18 \quad 0 \quad 2.224]^T,$$

et $u_0 = 0.0111$; et deux situations :

Cas (a) : la simulation d'une chute de tension d'une amplitude de 15%, par exemple provoquée par une forte charge, à $t = 12s$ pour 500ms;

Cas (b) : la simulation d'une erreur initiale de 1,64% par rapport à l'angle de puissance ($\delta_0 = 1.12rad$ au lieu de 1.18rad).

Nous avons pu remarquer qu'en présence d'une chute de tension de 15%, les deux systèmes de régulation PID et PDC maintiennent le point de fonctionnement du réseau, mais en comparant les pics de valeurs ainsi que les oscillations lors des différentes simulations, il apparaît que la commande PDC

pilote mieux le système que le PID. Elle agit aussi plus rapidement.

Dans le deuxième cas, la simulation d'une erreur initiale de 1,64% par rapport à l'angle de puissance, on constate que pour l'erreur sur δ_0 simulée, la commande PID n'arrive plus à ramener le système au point de fonctionnement voulu alors que le PDC y arrive sans trop de problème, moyennant quelques pics transitoires.

Résultats

Extension des résultats obtenus au cas du réseau électrique multimachine

La configuration multimachine se rencontre généralement dans les grands réseaux électriques interconnectés. De nombreux travaux ont déjà abordé ce cas comme celui de Wang et al. (1997).

Dans le cadre de ce travail, nous allons étudier un réseau à 3 machines, 3 nœuds, de référence 100MVA, 400kV comme indiqué sur la figure 2.

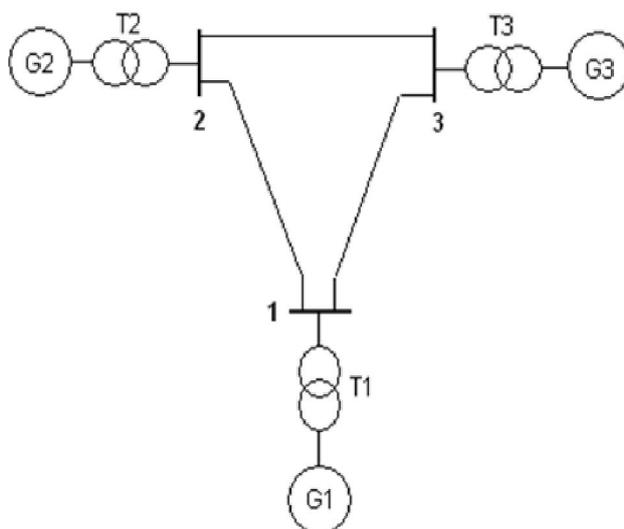


Figure 2 : Réseau électrique à trois machines

En exploitant les résultats obtenus par Besançon et al. (2012), chaque génératrice a une vision agrégée des deux autres restantes à un bus infini. Ceci est tenu compte par un remplacement des impédances d'avant, pendant et après défaut par leur équivalente. Chaque circuit équivalent est calculé du point de vue de chaque nœud de chaque génératrice, comme présenté par Roosta (2003). Nous nous sommes intéressé à une commande décentralisée PDC, ainsi tous les paramètres intervenant dans chaque loi de commande sont locaux à chaque génératrice.

Ainsi, nous pouvons appliquer les résultats précédents relatifs au modèle SMIB présenté par Rafanotsimiva et al. (2012), avec les données dans le tableau 1 suivant.

Tableau 1 : Données des génératrices

Génératrice	G1	G2	G3
ω_0	314,159	314,159	314,159
H	6,4	23,26	3,1
D	2	2	2
x_d	0,8958	0,146	1,3125
x'_d	0,1198	0,0608	0,1813
x_s	0,05	0,06	0,058
x_{ds}	0,91	0,206	1,371
x'_{ds}	0,11	0,120	0,239
V_s	1	1	1
T_{d0}	6	8,96	5,89
V_{t0}	1,0	1,025	1,025
P_{m0}	0,7	0,9	0,852
$\delta_0 [rad]$	0,0	1,171	0,946
ω_{g0}	0	0	0
ε	0,0	0,001	0,001

Avec :

$$x_{ds} = x_d + x_s \quad (9) ; \text{ et}$$

$$x'_{ds} = x'_d + x_s \quad (10)$$

Nous avons ainsi obtenu les gains suivants pour un paramètre de réglage $\tau = 0,1$:

Génératrice G1 :

$$F_{11} = (-0,0670 \quad -0,5501 \quad -1,2496 \quad 0,0312),$$

$$F_{21} = (-52,5807 \quad -425,8005 \quad -945,6758 \quad 39,1545)$$

Génératrice G2 :

$$F_{12} = (-0,0679 \quad -0,5157 \quad -1,5880 \quad 0,0685),$$

$$F_{22} = (-69,0 \quad -515,8 \quad -1510,1 \quad 54,7).$$

Génératrice G3 :

$$F_{13} = (-0,3071 \quad -2,7480 \quad -3,7567 \quad 0,1579),$$

$$F_{23} = (-201,9 \quad -1801,5 \quad -2458,6 \quad 112,7).$$

Les simulations concernent les deux cas (a) avec une chute de tension de 5% et (b) avec une erreur paramétrique de 0,5% (le réseau devient plus compliqué et donc plus exigeant). Les cas (a) et (b) sont appliqués pour toutes les génératrices, les résultats obtenus sont donnés par les figures suivantes.

Aucune des deux perturbations n'a d'influence significative sur les angles de puissance des génératrices δ , les tensions internes en quadrature E_q , les tensions de sortie V_t et les puissances de sortie P_e . Ainsi, nous ne les avons pas représentées.

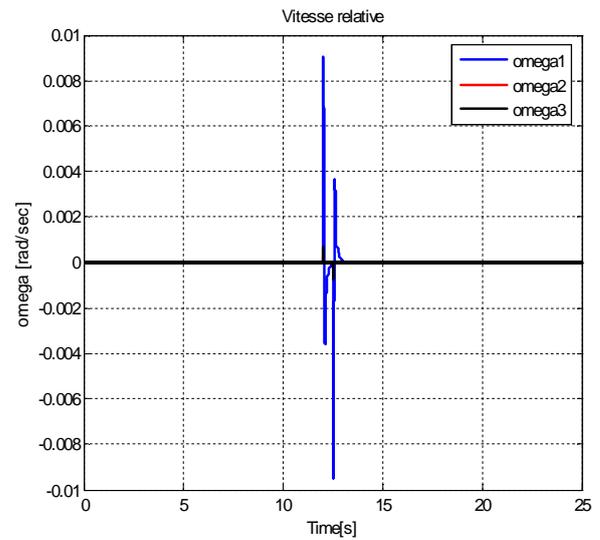


Figure 3a. Evolution des vitesses relatives de rotation électrique ω , cas (a)

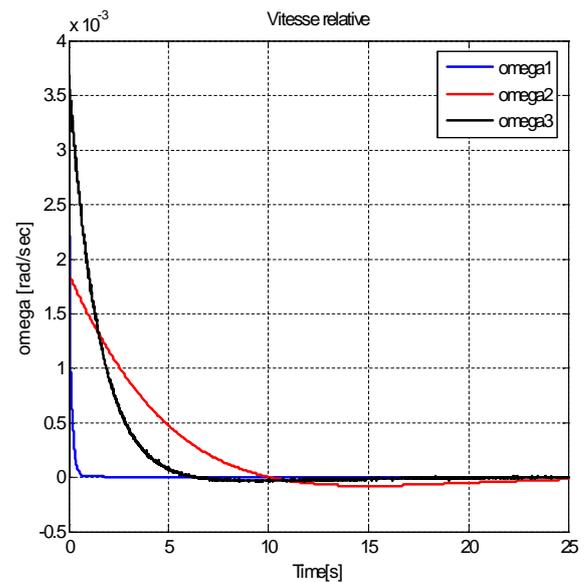


Figure 3b. Evolution des vitesses relatives de rotation électrique ω , cas (b)

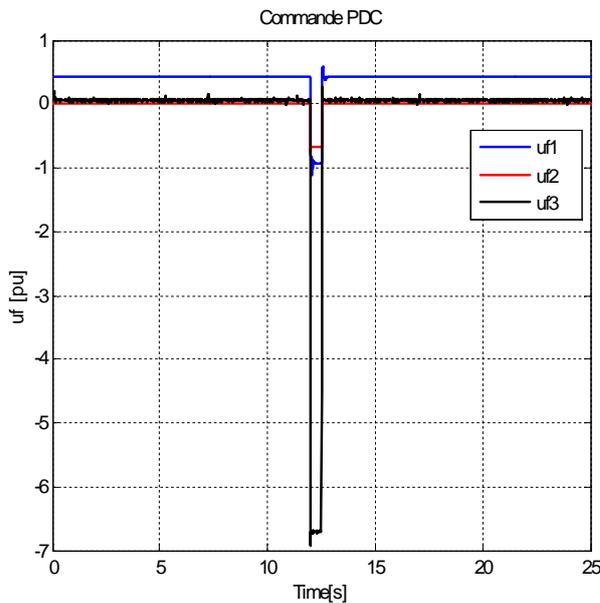


Figure 4a. Evolution des commandes u_f

PDC, cas (a)

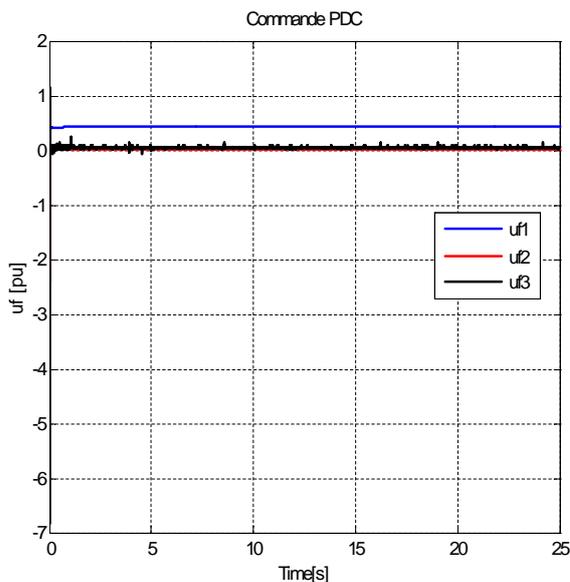


Figure 4b. Evolution des commandes u_f

PDC, cas (b)

Discussion

Nous pouvons voir que pour le cas (a), on constate des variations modestes sur les

vitesse relative ω (Figure 3a). On peut voir sur cette figure que G1 est la plus sollicitée par rapport aux deux autres du fait qu'elle a la puissance la plus faible. Ce qui n'est pas le cas pour les lois de commandes u_f (Figure 4a).

Concernant l'erreur paramétrique sur les angles de puissance, cas (b), elle génère des pics de valeurs sur la vitesse relative ω (Figure 3b) de G1 et les commandes u_f (Figure 4b) surtout sur G3.

Conclusion et perspectives

Une extension de l'approche multimodèle T-S obtenu par transformation par secteurs non linéaires utilisée pour la stabilisation d'un système SMIB lors d'une surcharge et d'une erreur paramétrique sur l'angle de puissance a été abordée dans ce papier pour un réseau avec trois machines interconnectées. Que ce soit pour le premier ou le second cas, on a pu constater que le système est toujours revenu à son état stable après les perturbations, ce qui traduit la performance de cette approche multimodèle et de sa commande PDC. On peut donc conclure qu'il est possible d'utiliser les techniques de synthèse des lois de commande sur un SMIB pour assurer la commande décentralisée d'un réseau multimachine en tenant compte des adaptations nécessaires dans ce cas. Une extension de ce travail peut être envisagée pour la prise en compte des dispositifs FACTS, pour la compensation de la puissance réactive et l'amélioration de la stabilité.

Références bibliographiques

- Takagi T. and Sugeno M. (1985), Fuzzy identification of systems and its applications to modelling and control, IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetic. Vol.15. pp. 116–132.
- Murray-Smith R. and Johansen T. A. (1997), Multiple model Approaches to Modelling and Control. Taylor & Francis, London.
- Rafanotsimiva L. F., Besancon G., Georges D., Sambatra E. J. R. et Razafimahenina J. M. (2013), Modélisation multimodèle et commande par Compensation Parallèle Distribuée d'un système SMIB, Mada-ENELSA, Vol.1, pp. 18–26.
- Rafanotsimiva L. F. (2014), Etude de commandes non linéaires pour réseaux électriques : Application à un système SMIB, Ed. Presses Académiques Francophones, ISBN 978-3-8381-4384-2.
- Ichalal D., Marx B., Ragot J. et Maquin D. (2008), Diagnostic des systèmes non linéaires par approche multimodèle, Workshop Surveillance, Sécurité et Sécurité des Grands Systèmes, 3SGS'08, Troyes, France.
- Wang H. O., Tanaka K. and Griffin M. F. (1995), Parallel Distributed Compensation on nonlinear systems by Takagi-Sugeno fuzzy model, Proceedings of the FUZZY-IEEE/IFES'95.
- Besançon G., Georges D., Rafanotsimiva L. F. and Razafimahenina J. M. (2012), Simple strategy for constrained backstepping design with application to SMIB system, American Control Conference, ACC2012, Montréal, Canada.
- Roosta A. R., Georges D. et Hadj-Said N. (2001), Non-linear control of power systems based on a backstepping method. Proceedings of 40th IEEE Conference on Decision and Control, Orlando, FL, USA.
- Wang Y., Gou G. and Hill D. J. (1997), Robust decentralized nonlinear controller design for multimachine power systems. Automatica, Vol.33, N°9. pp. 1725-1733.
- Roosta A. R. (2003), Contribution à la commande décentralisée non linéaire des réseaux électriques. Thèse de Doctorat en Automatique de l'INPG, Grenoble, France.