

Modélisation multimodèle et commande par Compensation Parallèle Distribuée d'un système SMIB

Liva Falisoa RAFANOTSIMIVA¹, Gildas BESANCON², Didier GEORGES³,
Eric Jean Roy SAMBATRA⁴ et Jean Marie RAZAFIMAHENINA⁵

^{1,4}Direction du Génie Industriel
Groupe de Recherche en Développement Durable de Diégo-Suarez
Institut Supérieur de Technologie D'ANTSIRANANA
BP 509, Antsiranana 201, MADAGASCAR

^{2,3}Département Automatique
Laboratoire Grenoble Image Parole Signal Automatique
GRENOBLE Institut National Polytechnique
BP 46, Saint-Martin d'Hères 38402, FRANCE

⁵Ecole Supérieure Polytechnique d'Antsiranana
Laboratoire des Réseaux Electriques
Université d'ANTSIRANANA
BP 0, Antsiranana 201, MADAGASCAR

liva.rafanotsimiva@ist-antsiranana.mg, gildas.besancon@gipsa-lab.grenoble-inp.fr,
didier.georges@gipsa-lab.grenoble-inp.fr, ericsambatra@ist-antsiranana.mg,
razafimaheninajeanmarie@yahoo.fr

<http://www.ist-antsiranana.mg>, <http://www.gipsa-lab.fr>, <http://www.univ-antsiranana.mg>

Résumé : - Les multimodèles sont un moyen de ramener les problèmes de commande à un contexte linéaire, tout en assurant la précision de la reproduction du comportement du système dans une large plage de fonctionnement. Dans ce papier, nous avons mis en œuvre le *multimodèle à états couplés* par transformation par secteurs non linéaires, et sa commande par *compensation parallèle distribuée* pour la stabilisation de l'angle de puissance d'un générateur électrique connecté à un bus infini (modèle SMIB). Nous avons comparé les résultats avec ceux obtenus par la commande classique PID.

Mots clés : - Multimodèle, Commande PDC, SMIB, LMI, Fonction de Lyapunov

Abstract : - Multiple models are a way to bring control problems to the linear context, while accurately reproducing the behavior of the system in a wide operating range. In this paper, a *multiple model with coupled states* and its *Parallel Distributed Compensation* control have been implemented to stabilize the power angle of a *Single-Machine-Infinite-Bus* (SMIB) system. Comparisons with simulation results obtained by classical PID control are given.

Keywords : - Multiple models, PDC control, SMIB, LMI, Lyapunov function

1 Introduction

Le multimodèle est une technique de modélisation des systèmes non linéaires qui peut permettre de parvenir à un bon compromis entre la précision et la complexité du modèle. A la lumière du nombre de travaux ces dernières années [1], [2], [3], elle a connu un regain d'intérêt, notamment dans des applications telles que la commande, la simulation,...

Elle peut aussi être vue comme un certain type de modélisation floue [4], [5], correspondant à *Takagi et Sugeno (T-S en abrégé)* [6]. 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. Il peut alors permettre de résoudre des problèmes dans des domaines aussi divers que la commande, l'observation ou encore le diagnostic des systèmes non linéaires, mais avec des techniques de type linéaire. En commande notamment, une approche associée est celle dite de *Compensation Parallèle Distribuée (PDC)* [7]. Cette méthode est basée sur des contrôleurs linéaires conçus pour chacun des modèles linéaires interconnectés, et la stabilité en boucle fermée de l'ensemble est garantie par l'intermédiaire d'une fonction de Lyapunov commune à tous les sous-modèles.

Dans cet article, en remarquant qu'un modèle simplifié de réseau électrique (correspondant au cas classique de machine unique connectée à un bus infini *SMIB* [8]) peut facilement être ré-écrit sous forme multimodèle de type T-S, et au vu des enjeux devenus évidents autour de la gestion de l'énergie, on propose une étude de commande de ce type de système par l'approche PDC.

2 Formulation du problème

2.1 Le multimodèle

Les multimodèles présentent trois structures : celle à états couplés, ou T-S, celle à états découplés [9] et celle à structure hiérarchisée. La structure T-S est la plus répandue aussi bien dans l'analyse que dans la synthèse des multimodèles.

En continu, elle se présente sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \sum_{i=1}^M \mu_i(z(t))(A_i x(t) + B_i u(t)) \\ y(t) = \sum_{i=1}^M \mu_i(z(t)) C_i x(t) \end{cases} \quad (1)$$

où $x \in R^n$ est le vecteur d'état, $u \in R^m$ le vecteur de commande et $y \in R^p$ le vecteur de mesures. Les matrices $A_i \in R^{n \times n}$, $B_i \in R^{n \times m}$ et $C_i \in R^{p \times n}$, $\forall i = 1, \dots, M$ sont constantes et supposées connues.

La fonction $\mu_i(z(t))$ dite d'activation détermine le degré d'activation du i -ème modèle local associé. Elle autorise un passage progressif de ce modèle aux modèles locaux voisins. Ces fonctions dépendent par exemple, des variables mesurables du système (le signal d'entrée ou de sortie du système) ou des variables non mesurables (l'état du système par exemple). Elles peuvent être de forme triangulaire, sigmoïdale ou gaussienne, et satisfont les propriétés de *somme convexe* suivantes :

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^M \mu_i(z(t)) = 1, \forall t \\ 0 \leq \mu_i(z(t)) \leq 1, \forall i = 1, \dots, M, \forall t \end{cases} \quad (2)$$

Les multimodèles présentent comme intérêts le fait qu'ils constituent des approximateurs universels, n'importe quel système non linéaire pouvant être approximé avec une précision imposée en augmentant le nombre de sous-modèles. En pratique, un nombre relativement réduit de sous-modèles peut même suffire à l'obtention d'une approximation satisfaisante, et dans le cas de sous-modèles linéaires, les outils d'analyse des systèmes linéaires peuvent être utilisés.

On peut citer trois approches largement utilisées dans la littérature permettant d'obtenir un modèle T-S : par identification, par linéarisation, ou bien par transformation par secteurs non linéaires [10]. Dans le cadre de ce travail, on s'intéresse à cette dernière.

C'est une transformation polytopique convexe d'un système linéaire affine en la commande, plus précisément de fonctions scalaires origine de la nonlinéarité. L'avantage d'une telle méthode est de ne pas engendrer d'erreur d'approximation

et de réduire le nombre de modèles par rapport à la méthode de linéarisation. La méthode présentée est basée uniquement sur la bornitude des termes non linéaires (c'est-à-dire des fonctions continues). On l'utilise lorsqu'un modèle analytique est disponible.

Considérons le cas d'un système continu non linéaire sous la forme suivante :

$$\dot{x}(t) = f(x(t)) + Bu(t) \quad (3)$$

Avec $x(.) \in R^n$; $u(.) \in R^m$; $f(.) \in R^n$ et $B \in R^{n \times m}$.

On s'appuie essentiellement sur le résultat suivant :

Lemme 2.1 [7] Soit $h(x(t))$ une fonction bornée de $[a, b] \rightarrow R$, avec $(a, b) \in R^{+2}$. Alors, il existe deux fonctions :

$$F^i(.) : [a, b] \rightarrow [0, 1] ; \quad i = 1, 2$$

$$x(t) \rightarrow F^i(x(t)) \quad (4)$$

avec $F^1(x(t)) + F^2(x(t)) = 1$ et deux scalaires α, β tels que :

$$h(x(t)) = F^1(x(t)).\alpha + F^2(x(t)).\beta \quad (5)$$

Une décomposition de h sur $[a, b]$ peut en effet être obtenue par :

$$\beta = \min_{x \in [a, b]}(h(x)); \alpha = \max_{x \in [a, b]}(h(x))$$

$$F^1(x(t)) = \frac{h(x(t)) - \beta}{\alpha - \beta}; F^2(x(t)) = \frac{\alpha - h(x(t))}{\alpha - \beta} \quad (6)$$

Sous les hypothèses de continuité et bornitude de la fonction $f(x(t))$ dans le modèle (3) avec $f(0) = 0$, elle peut être réécrite sous la forme suivante :

$$f(x(t)) = \sum_{i=1}^2 F^i(x(t)) A_i x(t) ; \quad (7)$$

et le modèle devient finalement :

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^2 F^i(x(t)) (A_i x(t) + B_i u(t)) \quad (8)$$

Dans ce cas, la représentation multimodèle obtenue correspond *exactement* au modèle non linéaire sur l'intervalle compact considéré.

Dans le contexte de la synthèse de régulateurs par analyse convexe, le multimodèle peut permettre d'obtenir des lois de commande par résolution simultanée d'*Inégalités Linéaires Matricielles* (LMI). Dans ce cas, le nombre de contraintes LMI est polynomial par rapport au nombre de modèles locaux. Ainsi, il convient de minimiser

le nombre de modèles locaux pour limiter le conservatisme de la méthode.

Dans le cas de multimodèle de type T-S, cette technique de synthèse de régulateurs correspond à la méthode PDC, qui admet aussi une interprétation floue non détaillée ici [7]. Elle suppose que tous les sous-modèles linéaires soient au moins stabilisables. Dans toute la suite, on les supposera commandables.

Soit le modèle T-S continu donné par l'équation (1), une loi de commande issue d'une synthèse PDC sera donc la combinaison de lois pour chaque sous-modèle, de la forme :

$$u(t) = -\sum_{i=1}^M \mu_i(z(t)) F_i x(t)$$

Donc en l'appliquant au modèle, la boucle fermée prend la forme suivante :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = (A_z - B_z F_z) x(t) \\ y(t) = C_z x(t) \end{cases} \quad (9)$$

ou, de façon plus explicite :

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M \mu_i(z(t)) \mu_j(z(t)) (A_i - B_i F_j) x(t) \quad (10)$$

Les conditions de stabilité du système en boucle fermée reviennent à chercher les gains de commande F_j tels que la dérivée d'une fonction candidate quadratique de Lyapunov soit négative. Stabiliser le modèle revient donc à résoudre le problème suivant :

Trouver une matrice P définie positive et des matrices $F_i, i = 1, \dots, M$ telles que :

$$(A_z - B_z F_z)^T P + P (A_z - B_z F_z) < 0 \quad (11)$$

On remarque que l'inégalité n'est pas linéaire en les variables P et F_i . En utilisant la propriété de congruence avec la matrice symétrique de rang plein

$$X = P^{-1}, \quad (12)$$

on obtient :

$$X A_z^T + A_z X - X F_z^T B_z^T - B_z F_z X < 0 \quad (13)$$

En effectuant le changement de variable bijectif

$$M_i = F_i X, \quad i = 1, \dots, M, \quad (14)$$

le problème devient LMI en les variables X et M_i .

$$\gamma_{ij} = X A_i^T - M_j^T B_i^T + A_i X - B_i M_j < 0 \quad (15)$$

On se retrouve donc avec les quantités

$$\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M \mu_i(z(t)) \mu_j(z(t)) \gamma_{ij} \quad (16)$$

et tous les résultats peuvent en être déduits.

Théorème 2.2 [7] Soient un modèle T-S continu, la loi de commande PDC et les γ_{ij} , s'il existe une matrice X définie positive et des matrices M_i , $i = 1, \dots, M$, telles que les conditions ci-avant soient vérifiées, alors la boucle fermée est globalement asymptotiquement stable. De plus, si le problème a une solution, les gains de la commande PDC sont donnés par :

$$F_i = M_i X^{-1} \quad (17)$$

et la commande PDC par :

$$u(t) = -\sum_{i=1}^M \mu_i(z(t)) F_i x(t) \quad (18)$$

Si $F_i = F$, $\forall i = 1, \dots, M$, on retrouve une loi de commande linéaire en l'état. En pratique, déterminer la matrice P et les gains de commande F_j , $j = 1, \dots, M$ revient à résoudre simultanément un ensemble de LMIs.

Dans le cas particulier où les multimodèles vérifient la propriété de colinéarité positive des matrices d'entrée

$$B_i = B, \forall i \in I_n, \quad (19)$$

le système multimodèle en boucle fermée s'écrit sans termes croisés :

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^M \mu_i(z(t)) (A_i - B_i F_i) x(t) \quad (20)$$

Les conditions de stabilité obtenues au théorème 2.2 se réduisent alors à la stabilité des modèles dominants :

$$P > 0, (A_i - B_i K_i)P + P(A_i - B_i K_i) < 0, \forall i \quad (21)$$

En substituant B_i par B , la loi de commande aboutit, elle aussi, à des conditions similaires.

2.2 Modèle du réseau SMIB considéré

Beaucoup de travaux ont été faits par rapport à la commande non linéaire des réseaux électriques [11], [12], [13], [14], [15]. Un réseau SMIB est constitué d'une machine synchrone qui alimente un réseau infini au travers de lignes et d'un transformateur comme indiqué par la figure 1 ci-dessous.

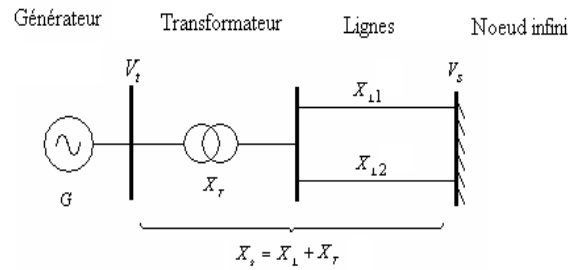


Fig. 1. Modèle d'une machine connectée à un nœud infini

Le modèle mathématique du réseau SMIB est défini par :

$$\begin{cases} \delta(t) = \omega(t) \\ \dot{\omega}(t) = -\frac{D}{H} \omega(t) - \frac{\omega_0}{2H} \frac{1}{x_{ds}} V_s \sin \delta(t) E_q(t) + \frac{\omega_0}{2H} P_{m0} \\ \dot{E}_q(t) = \frac{x_d - x'_d}{x'_d} V_s \sin \delta(t) \omega(t) - \frac{1}{T'_{do}} \frac{x_{ds}}{x'_d} E_q(t) + \frac{x_{ds}}{x'_d} \frac{k_c}{T'_{do}} u_f(t) \end{cases} \quad (22)$$

avec les sorties d'intérêts suivantes (tension et puissance) :

$$\begin{aligned} V_t^2(t) &= \frac{x_s^2}{x_{ds}^2} \left[E_q^2(t) + V_s^2 + \frac{2x_d}{x_s} V_s \cos \delta(t) E_q(t) \right] \\ P_e(t) &= \frac{1}{x_{ds}} V_s \sin \delta(t) E_q(t) \end{aligned} \quad (23)$$

Notons que l'on utilise ici le modèle original (δ, ω, E_q) , qui est valable pour des perturbations modérées et dont on va voir qu'il se prête bien à l'application de multimodèle, au lieu du modèle plus communément considéré en (δ, ω, E'_q) comme dans [16].

Les entrées connues du système sont les signaux de commande, les entrées inconnues sont les perturbations, le bruit de mesure, les erreurs ou incertitudes de modélisation, les défauts, etc. Dans le modèle (22), la variable d'entrée de commande U est la tension d'excitation u_f du générateur ; les variables d'état X du réseau sont l'angle de puissance δ , la vitesse relative de rotation électrique ω et la tension interne E_q du générateur. Dans le cadre de ce travail, nous allons considérer la puissance mécanique P_{m0} constante, et les variables d'état utilisables pour la commande (l'extension avec observateur en cas contraire étant facilement envisageable). Enfin, tous les autres paramètres du modèle représentent les caractéristiques électriques du

réseau [8] et sont supposés connus et constants en fonctionnement normal.

Pour les applications numériques, on considèrera l'exemple de [17] :

$$\begin{aligned} \omega_0 &= 314.159 \text{ rad/s} ; D = 5 \text{ pu} ; H = 4 \text{ pusec} ; \\ T'_{d0} &= 8 \text{ sec} ; k_c = 200 \text{ pu} ; x_d = 1.81 \text{ pu} ; \\ x'_d &= 0.3 \text{ pu} ; x_T = 0.15 \text{ pu} ; x_{L1} = 0.5 \text{ pu} ; \\ x_{L2} &= 0.93 \text{ pu} ; x_{ds} = x_T + x_d + \frac{x_{L1}x_{L2}}{x_{L1}+x_{L2}} = \\ &2.28518 ; x'_{ds} = x_T + x'_d + \frac{x_{L1}x_{L2}}{x_{L1}+x_{L2}} = 0.77518 ; \\ x_s &= x_T + \frac{x_{L1}x_{L2}}{x_{L1}+x_{L2}} = 0.47518 ; \max|k_c u_f(t)| = \\ &7 \text{ pu} ; P_{m0} = 0.9 \text{ pu} ; V_s = 1.0 \text{ pu}. \end{aligned}$$

3 Mise en œuvre de la méthode et résultats

Remarquons d'abord qu'en ciblant une opération du générateur autour d'un angle de référence δ_0 dans $]0, \pi[$ (voir [16] pour une prise en compte explicite d'une telle contrainte), 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 (22) de telle sorte qu'il devient :

$$\begin{pmatrix} \dot{\delta}(t) \\ \dot{\omega}(t) \\ \dot{\bar{E}}_q(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{D}{H} & -\frac{\omega_0}{2H} \frac{1}{x_{ds}} V_s \sin \delta(t) \\ 0 & \frac{x_d - x'_d}{x'_{ds}} V_s \sin \delta(t) & -\frac{1}{T'_{d0}} \frac{x_{ds}}{x'_{ds}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta(t) \\ \omega(t) \\ \bar{E}_q(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{x_{ds}}{x'_{ds} T'_{d0}} k_c \end{pmatrix} u \quad (24)$$

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 :

$$\dot{x}(t) = \mu_1(z(t)) A_1 x(t) + \mu_2(z(t)) A_2 x(t) + B u, \quad (25)$$

avec

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

$$\mu_2(z(t)) = \frac{1}{1-\varepsilon} (-\varepsilon + \sin \delta(t)) \quad (26)$$

et

$$\begin{aligned} A_1 &= \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{D}{H} & -\varepsilon \frac{\omega_0}{2H} \frac{1}{x_{ds}} V_s \\ 0 & \varepsilon \frac{x_d - x'_d}{x'_{ds}} V_s & -\frac{1}{T'_{d0}} \frac{x_{ds}}{x'_{ds}} \end{pmatrix} \\ A_2 &= \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{D}{H} & -\frac{\omega_0}{2H} \frac{1}{x_{ds}} V_s \\ 0 & \frac{x_d - x'_d}{x'_{ds}} V_s & -\frac{1}{T'_{d0}} \frac{x_{ds}}{x'_{ds}} \end{pmatrix} \\ B &= \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{x_{ds}}{x'_{ds} T'_{d0}} k_c \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (27)$$

Le problème du contrôle se réduit alors à résoudre deux LMI, 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

$$\sum_{i=1}^2 \mu_i(z(t)) (X A_i^T - M_i^T B_i^T + A_i X - B M_i) < 0. \quad (28)$$

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

$$\sum_{i=1}^2 \mu_i(z(t)) (X A_i^T - M_i^T B_i^T + A_i X - B M_i + \frac{\tau}{2} X) < 0. \quad (29)$$

Notez 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 (25) avec une equation :

$$\dot{\delta}_I(t) = \delta(t) - \delta_0$$

qui n'affecte pas la structure du multimodèle.

Les résultats présentés ci-après correspondent à cette dernière situation.

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).

Les évolutions de l'angle de puissance résultant sont présentées dans les figures 2 et 3 ci-après, pour le cas (a) et (b) respectivement, tandis que la vitesse relative est présentée dans les figures 4 et 5 pour les mêmes cas.

Les évolutions des commandes correspondantes peuvent être vues dans les figures 6 et 7, et la tension de sortie résultant dans les figures 8 et 9.

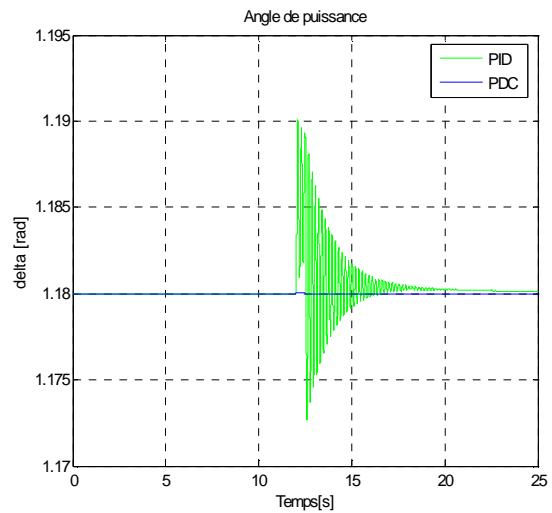


Fig. 2. Evolution de l'angle de puissance δ du générateur du réseau SMIB, cas (a).

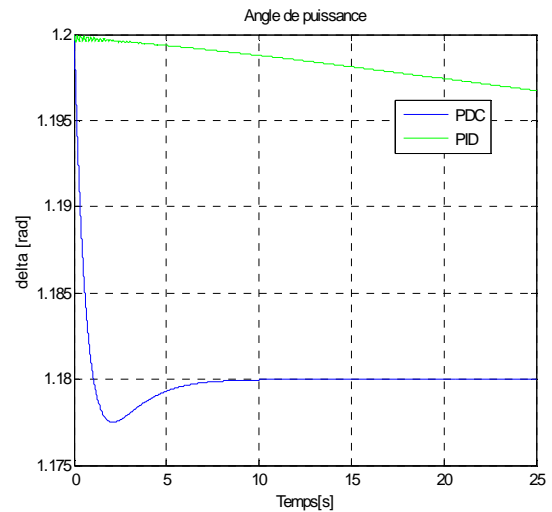


Fig. 3. Evolution de l'angle de puissance δ du générateur du réseau SMIB, cas (b).

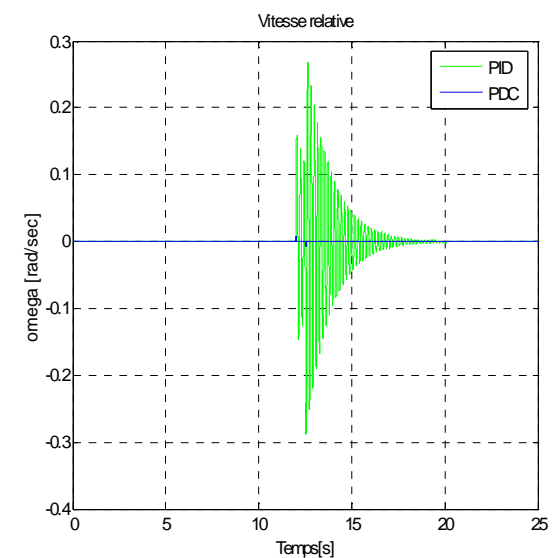


Fig. 4. Evolution de la vitesse relative de rotation électrique ω du générateur, cas (a).

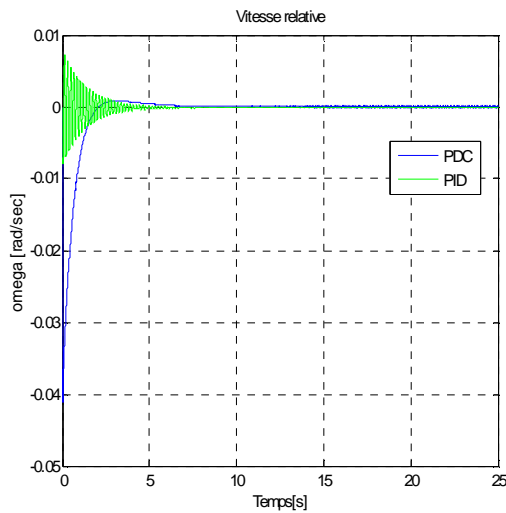


Fig. 5. Evolution de la vitesse relative de rotation électrique ω du générateur, cas (b).

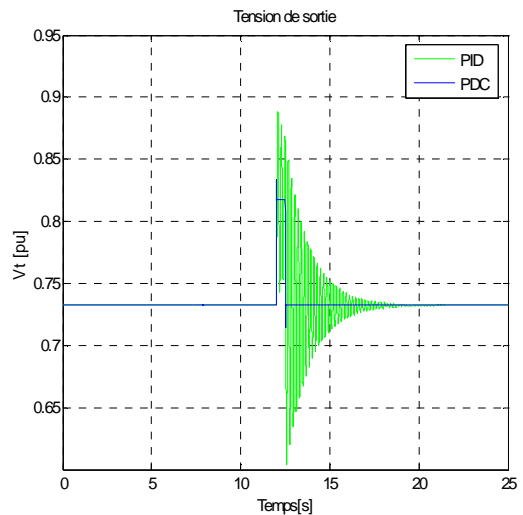


Fig. 8. Evolution de la tension de sortie V_t du générateur, cas (a).

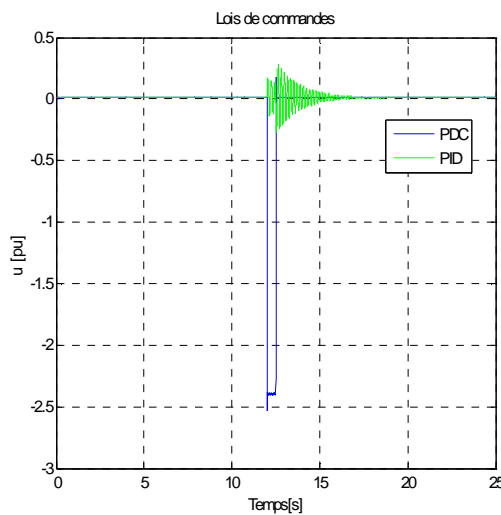


Fig. 6. Evolution des commandes PDC et PID, cas (a).

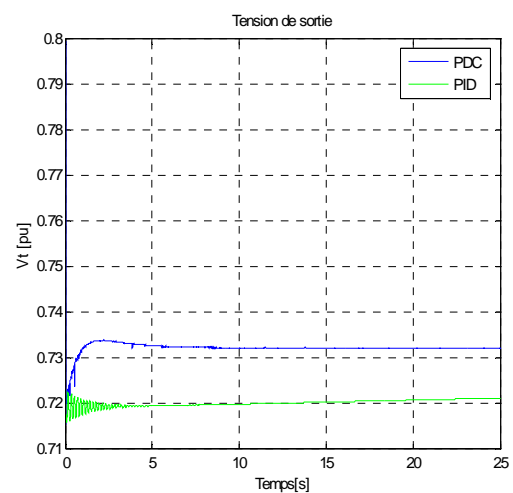


Fig. 9. Evolution de la tension de sortie V_t du générateur, cas (b).

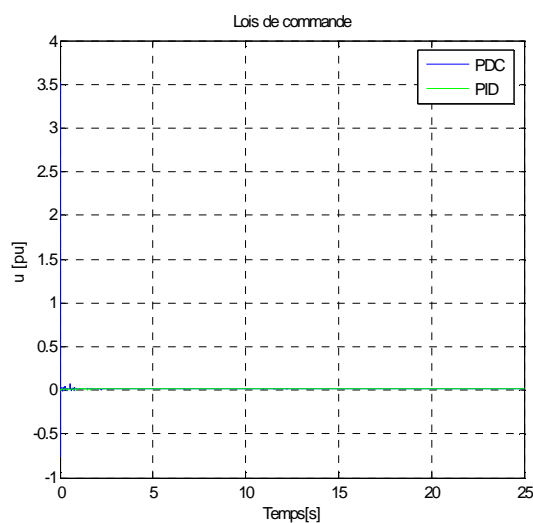


Fig. 7. Evolution des commandes PDC et PID, cas (b).

4 Discussions

Les oscillations indiquées en couleur verte sont beaucoup plus rapides que la gamme typique des modes électromécaniques qui sont dues à la composante continue du courant de court-circuit, et ceci du fait de l'utilisation du modèle (δ, ω, E_q) . On peut remarquer sur ces courbes des figures 2, 4, 6 et 8 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, 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. Ceci est montré par les figures 3, 5, 7 et 9.

5 Conclusions

Dans cet article, le multimodèle T-S obtenu par transformation par secteurs non linéaires a été utilisé pour la régulation d'un système SMIB et illustré lors d'une chute de tension provoquée par un enclenchement brusque d'une forte charge, ou à des perturbations directes de l'angle de puissance. Nous nous sommes limités aux équations d'états et nous avons pu réduire le nombre de sous-modèles à deux. Nous avons constaté que la loi de commande PDC permet toujours de ramener le système aux points de fonctionnement en régime nominal dans les simulations considérées. Il apparaît aussi que les résultats obtenus sont meilleurs par rapport à ceux donnés par une approche classique de type PID, pour une méthode qui n'est pas beaucoup plus compliquée : meilleur maintien des points de fonctionnement, moins d'oscillations et plus de rapidité. Une extension de ce travail peut être envisagée pour le cas d'un réseau multi-machines, ou en tenant en compte de la présence des dispositifs FACTS comme dans [8] et [18] par exemple.

Ce travail a été réalisé lors d'une visite du 1er auteur à GIPSA-lab financée par l'ambassade de France à Madagascar, numéro 700797C (BGF 2010).

Références

[1] R. MURRAY-SMITH and T. A. JOHANSEN. Multiple model Approaches to Modelling and Control, Taylor & Francis, London, 1997.

[2] D. ORJUELA, B. MARX, J. RAGOT and D. MAQUIN. Conception d'observateurs robustes pour

des systèmes non linéaires incertains : une stratégie multimodèle, Conférence Internationale Francophone d'Automatique, CIFA 2008.

[3] D. ICHALAL, B. MARX, J. RAGOT and D. MAQUIN. Diagnostic des systèmes non linéaires par approche multimodèle, Workshop Surveillance, Sécurité et Sécurité des Grands Systèmes, 3SGS'08, Troyes, France, 2008.

[4] T. TAKAGI and M. SUGENO. Fuzzy identification of systems and its applications to modelling and control, IEEE Trans. on Systems Man and Cybernetic, Volume 15, 1985, pp.116-132.

[5] H. O. WANG, K. TANAKA and M. F. GRIFFIN. An approach to fuzzy control of nonlinear systems : stability & design issues, IEEE Trans. on Fuzzy Systems, Volume.4, N°1, 1996, pp.14-23.

[6] T.-M. GUERRA and L. VERMEIREN. LMI-based relaxed nonquadratic stabilization conditions for nonlinear systems in the Takagi-Sugeno's form, Automatica, Volume 40, N°5, 2004, pp.823-829.

[7] H. O. WANG, K. TANAKA and M. F. GRIFFIN. Parellel Distributed Compensation on nonlinear systems by Takagi-Sugeno fuzzy model, Proc. of the FUZZY-IEEE/IFES'95, 1995.

[8] N. S. MANJAREKAR, R. N. BANAVAR and R. ORTEGA. Application of passivity-based control to stabilization of the SMIB system with controllable series devices, Proceedings of the 17th World Congress, IFAC, Seoul, Korea, 2008.

[9] R. ORJUELA, D. MAQUIN and J. RAGOT. Identification des systèmes non linéaires par une approche multi-modèle à états découplés, Journées Identification et Modélisation Expérimentale JIME, Poitiers, France 2006.

[10] D. ICHALAL. Estimation et diagnostic des systèmes non linéaires décrits par des modèles de Takagi-Sugeno, Thèse de doctorat, Centre de recherché en automatique de Nancy, INPL, France, 2009.

[11] P. KUNDUR. Power System Stability and Control, Mc Graw Hill, Inc., 1993.

[12] J. DE LEON-MORALES, G. ESPINOZA-PEREZ and I. MACIAS-CARDOSO. Observer-based control of a synchronous generator : a Hamiltonian approach, Elsevier, Electrical power and energy systems 24, 2002.

[13] M. GALAZ, R. ORTEGA, A. S. BAZANELLA and A. M. STANKOVIC. An energy shaping approach to the design of excitation control of synchronous generators, Automatica, Volume 39, 2003.

[14] Y. GOU, D. J. HILL and Y. WANG. Global transient stability and voltage regulation for power systems, IEEE transactions on power systems, Volume 16, N°4, 2001.

[15] Y. WANG and D. J. HILL. Robust nonlinear coordinated control of power systems, Pergamon, Automatica, Volume 32, N°4, 1996.

[16] G. BESANCON, 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.

[17] A. R. ROOSTA, D. GEORGES et N. HADJ-SAID. Non-linear control of power systems based on a backstepping method, In 40th IEEE Conf. Decision & Control, Orlando, USA, 2001.

[18] CONG L., Y. WANG and D. J. HILL. Transient stability and voltage regulation enhancement via coordinated control of generator excitation and SVC, Elsevier, Electrical power and energy systems 27, 2005.