

Contrôle Intelligent du variateur de charge universel (UPFC) dans les Réseaux Electriques

M. Bouhamida, M. Benyamina, T. Allaoui
Université des Sciences et de la Technologie d'Oran (USTO), Algérie.
Email: m_bouhamida@yahoo.com
Reçu le : 12/06/2005 Accepté le : 11/03/2006

Résumé:

Le variateur de charge universel (UPFC) est capable de contrôler simultanément et indépendamment, la puissance active et la puissance réactive, aussi bien que compenser des conditions transitoires et dynamiques du système. L'efficacité de ces compensateurs dépend du choix de la stratégie locale de commande. Cet article traite l'application de la technique robuste de la théorie de commande H_∞ et de la logique floue à la conception d'UPFC. L'efficacité de la structure de ces commandes est démontrée sous différentes conditions de fonctionnement du système d'UPFC.

Mots-clés contrôle robuste, H_∞ , Flou, UPFC.

Abstract:

The Unified Power Flow Controller (UPFC) is capable of directing the real and reactive power flows within a power system, as well as compensating for transient and dynamic system conditions. The effectiveness of these compensators depends on the choice of the local control strategy.

This paper deals with the application of robust control theory H_∞ technique and Fuzzy logic to the design of UPFC. The effectiveness of these controls structure is demonstrated under different operating conditions of the UPFC system.

Key words: robust control, H_∞ , Fuzzy, UPFC.

1- Introduction

Les systèmes, désignés par l'acronyme général FACTS (Flexible Alternating Current Transmission Systems), permettent d'améliorer l'exploitation des réseaux électriques en leur offrant une fiabilité supérieure à celle des systèmes électromécaniques classiques. L'intérêt de ces systèmes est de pouvoir contrôler les transits de puissance dans les réseaux, d'augmenter la capacité effective de transport jusqu'à leur limite thermique maximale tout en maintenant, voire en améliorant, la stabilité des réseaux. L'UPFC (Unified Power Flow Controller) ou variateur de charge universel utilisant deux onduleurs à source de tension à éléments entièrement commutables (GTO, IGBT) possède à la fois, la fonctionnalité des trois compensateurs (parallèle, série et déphaseur). Il est capable de contrôler simultanément et

indépendamment, la puissance active et la puissance réactive. Comparativement à d'autres types de FACTS, l'UPFC est le plus puissant dans la mesure où il permet de régler les trois paramètres associés au transit de puissance à savoir la tension de la ligne, l'impédance de la ligne et l'angle de transport afin d'améliorer la stabilité et les performances du réseau électrique.

L'efficacité de l'UPFC pour améliorer les performances et la stabilité du réseau en présence de perturbations inévitables telles que les courts-circuits, les indisponibilités momentanées de lignes, de générateurs ou de transformateurs ainsi que les pertes dans les lignes dépend de la technique de réglage utilisée. Des dispositifs de contrôle rapide des réseaux utilisant les ressources offertes par l'électronique de puissance et la micro-électronique de commande ont été récemment

étudiés et réalisés, et sont actuellement pour certains en application, pour d'autres, à l'état de prototypes. L'objectif de ce papier est de développer et d'évaluer des techniques de commande robuste de l'UPFC. L'approche de synthèse introduite est fondée sur la combinaison des techniques de contrôle classiques avec les outils de la commande avancée qui est la logique floue. Une étude comparative avec celle de la commande robuste H_∞ , sera présentée.

L'approche classique, bien qu'elle traite les systèmes linéaires et non linéaires par des méthodes précises, efficaces et cohérentes, souffre malheureusement d'handicap freinant sérieusement ses capacités quand elle se trouve devant des problèmes où il est impossible d'obtenir avec précision les modèles des processus et des bruits comme dans le cas des réseaux électriques. L'approche basée sur la théorie de la logique floue nous mène à l'élaboration des algorithmes performants et robustes pour l'UPFC. Le compensateur basé sur la commande H_∞ prend en considération les incertitudes dans le système tel que les erreurs de modélisation et changement du point de fonctionnement du système et introduit une loi de commande robuste.

2. Modélisation et réglage de l'UPFC

2.1 Modélisation de l'UPFC

Le variateur statique de charge universel (Unified Power Flow Controller ou UPFC) est constitué de deux onduleurs à source de tension (Voltage Source Converter ou VSC) qui sont connectés à travers un circuit continu commun (Dc Link) [1], [2] et [3]. L'un est connecté en parallèle et l'autre en série avec la ligne de transmission comme illustré par la Figure 1. Pour dériver le modèle mathématique de l'UPFC, on considère séparément la partie série et la partie shunt. On suppose que les onduleurs séries et shunt sont des sources de tension contrôlables idéales que l'on peut décrire par le circuit électrique équivalent de la figure 2. Où i_s est le courant de la ligne de transmission, et r et L_s sont respectivement sa résistance et son inductance. Pour simplifier les calculs, l'impédance du transformateur T_2 a été négligée. L'onduleur série génère la tension de compensation V_c à l'arrivée de la ligne de transmission. Les sources de tension V_p et V_c représentent respectivement les onduleurs shunt et série du système UPFC.

On pose $L = L_L + L_r$

L'UPFC est défini par trois systèmes d'équations qui sont détaillés dans les paragraphes suivants :

- les équations dynamiques du compensateur série.
- les équations dynamiques du compensateur parallèle.
- les équations du circuit continu.

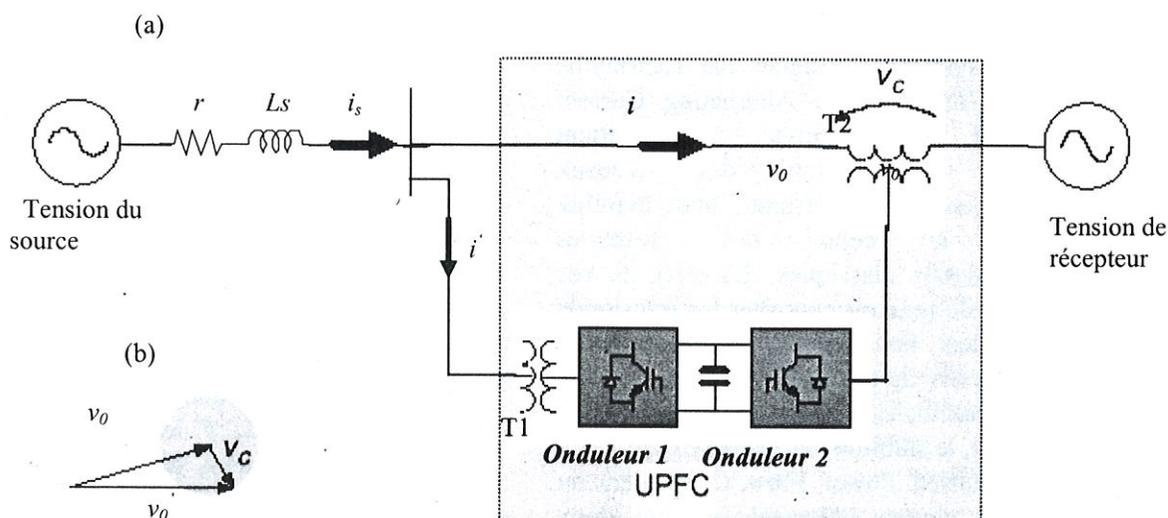


Figure 1 Variateur statique de charge universel à l'aide de deux onduleurs à pulsation :
 (a) montage (b) diagramme vectoriel.

$$i_q - C_L \frac{du_{cq}}{dt} + \omega C_L u_{cd} = 0 \quad (16)$$

Avec $L_T = L + L_s$

Les puissances active et réactive instantanées générées et absorbées sont définies comme suit dans le repère $d-q$:

- puissances active et réactive générées :

$$P_s = \frac{3}{2} (V_{sd} i_{sd} + V_{sq} i_{sq}) \quad (17)$$

$$Q_s = \frac{3}{2} (V_{sq} i_{sd} - V_{sd} i_{sq}) \quad (18)$$

- puissances active et réactive absorbées :

$$P_r = \frac{3}{2} (V_{rd} i'_{d'} + V_{rq} i'_{q'}) \quad (19)$$

$$Q_r = \frac{3}{2} (V_{rq} i'_{d'} - V_{rd} i'_{q'}) \quad (20)$$

Avec $i_{sd} = i_d + i'_d$ et $i_{sq} = i_q + i'_q$

Les paramètres du modèle de l'UPFC étudié sont donnés en annexe

Le système peut s'écrire forme matricielle en espace d'état :

$$\dot{x} = Ax(t) + Bu(t) \quad (21)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t)$$

Avec

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L_T} & \omega & -\frac{1}{L_T} & 0 \\ -\frac{R}{L_T} & -\omega & 0 & -\frac{1}{L_T} \\ \frac{1}{C_L} & 0 & 0 & \omega \\ 0 & \frac{1}{C_L} & -\omega & 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L_T} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{L_T} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$\text{où } x = [\Delta i_d \quad \Delta i_q \quad \Delta u_{cd} \quad \Delta u_{cq}]^T$$

$$u = [\Delta V_{cq} \quad \Delta V_{cd}]^T ; y = [\Delta P \quad \Delta Q]^T$$

3. Synthèse des réglages de l'UPFC

3.1 Réglage de l'UPFC par H_∞

La méthode de contrôle H_∞ est considérée comme une technique très puissante de conception qui, aussitôt a suscité de très grands intérêts dans l'engineering de l'énergie électrique récemment [4]. Le rôle majeur du contrôleur H_∞ est qu'il peut assurer la stabilité

des systèmes en boucle fermée avec des performances satisfaisantes quand ces derniers sont soumis aux perturbations. La commande H_∞ est appliquée pour rejet de perturbation. Elle consiste à minimiser l'effet des perturbations sur le comportement du système.

L'UPFC peut être représenté par une matrice de transfert nominale $G_0(s)$ bouclé par les incertitudes de modèle $\Delta(s)$ illustré par la figure 3.

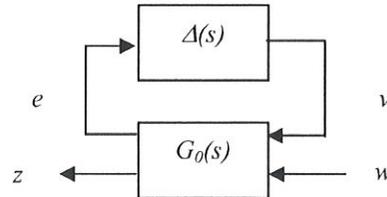


Figure 3 Représentation linéaire fractionnaire (LFT) de l'UPFC.

Une des méthodes la plus utilisée est H_∞ à sensibilité mixte ou on introduit des pondérations qui peuvent être associées à des contraintes beaucoup plus précises et destinées à synthétiser des lois de commandes répondant à des critères spécifiques. Donc le problème de sensibilité mixte consiste à trouver un contrôleur $K(s)$ qui assure la stabilité interne de la boucle et satisfait

$$J = \min_{K(s)} \left\| \begin{bmatrix} W_1(j\omega).S(j\omega) \\ W_2(j\omega).R(j\omega) \\ W_3(j\omega).T(j\omega) \end{bmatrix} \right\|_\infty \quad (23)$$

Où W_1 est une pondération qui améliore l'erreur statique, W_3 est choisi de sorte que la propriété de robustesse de la condition suivante soit satisfaite [4]:

$$\left\| \Delta(s).T(s) \right\|_\infty = \text{Sup}(\bar{\sigma}_m(s).T(s)) \leq 1 \quad (24)$$

Où $\bar{\sigma}_m$ représente la valeur singulière maximale $T(s)$ est la fonction de sensibilité complémentaire donnée par l'expression suivante :

$$T(s) = G_0(s).K(s)[I + G_0(s).K(s)]^{-1} \quad (25)$$

$S(s)$ est la fonction de sensibilité du système en boucle fermée, donnée par la relation suivante :

$$S(s) = [I + G_0(s)K(s)]^{-1}$$

$$R(s) = K(s).S(s).$$

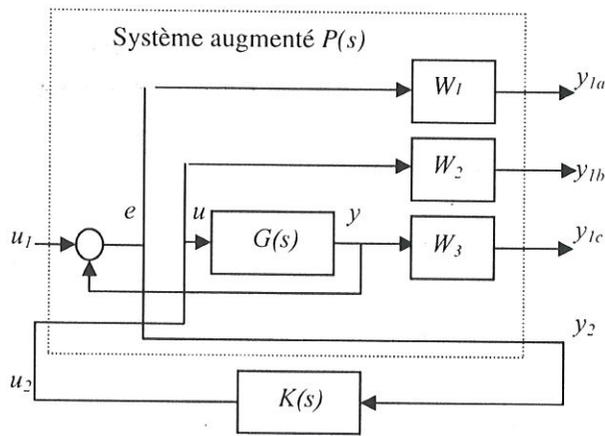


Figure 4 Problème de sensibilité mixte.

Le contrôleur d'un UPFC, doit réaliser les performances suivantes (objectifs):

- (i) Obtenir une réponse rapide avec une erreur statique nulle, traduit par bande passante en boucle fermée d'environ 70 rad/s (0,186 pu), un temps de réponse indiciaire environ 50 ms.
- (ii) bon découplage entre puissance active et réactive.
- (iii) bonne atténuation sur les résonances.
- (iv) maintenir la stabilité en boucle fermée quand les paramètres du système changent de -20% à +20%.

La condition (i) implique la réduction au minimum la valeur singulière de la sensibilité, $[S(j\omega)]$, au-dessus de la bande de fréquence de la perturbation. La pondération $W_1(s)$ est choisit en tant que matrice diagonale de la forme :

$$W_1 = \text{diag}\left(\frac{10s + 1}{10\left(\frac{1}{70}s + 1\right)}\right) \quad (26)$$

La condition (iii) se traduit par la minimisation des hautes fréquences de $\sigma(R(j\omega))$ et de $\sigma(T(j\omega))$ qui améliore la robustesse de système aux perturbations additives et multiplicatives. En outre, la réduction de $[R(j\omega)]$ assure un gain de faible d'amplitude des signaux de commande appliqués à l'UPFC. On note que la réduction de $T(j\omega)$ cause la réduction de bruit. Les fonctions de pondérations $W_2(s)$ et $W_3(s)$ sont choisies comme suit :

$$W_2 = 2.10^{-4}.1 \quad (27)$$

$$W_3 = \text{diag}\left(\frac{278}{0.01s + 0.01}\right) \quad (28)$$

L'implémentation de l'algorithme H_∞ [4], nous a permis de découpler le système (bon découplage des variables de sorties à savoir ΔP_e , ΔQ et d'atteindre les objectifs cités plus haut). Les résultats de simulations sont illustrés par les figures 5 et 6.

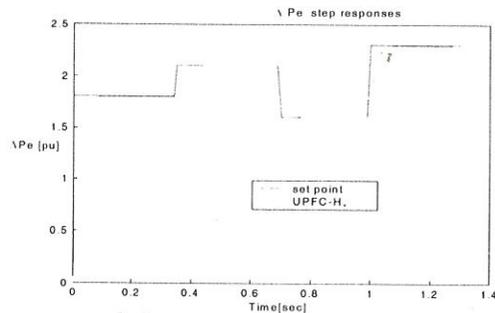


Figure 5 Réponse temporelle de la puissance active pour une variation de la consigne.

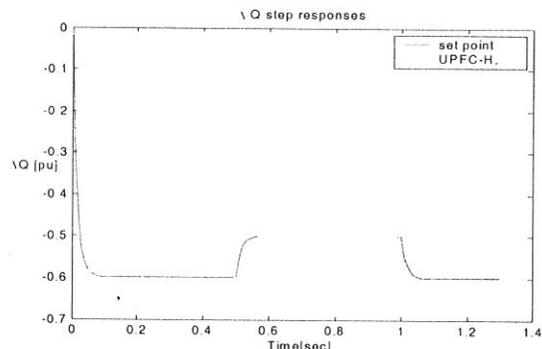


Figure 6 Réponse temporelle de la puissance réactive pour une variation de la consigne.

Test de robustesse :

- On considère que l'inductance de la ligne de transmission L varie de +20 % de la valeur nominale. L'introduction d'un régulateur conventionnel ne répond pas à cette exigence (variation des paramètres du système) d'où l'utilité d'introduire un contrôleur plus robuste basé sur la technique H_∞ . La figure 7 représente la réponse temporelle de l'UPFC pour une référence variable P_{ere} , on note une bonne poursuite ainsi qu'un bon découplage des deux puissances.
- Deuxième test on suppose que L varie de -20 % de la valeur nominale. Les réponses temporelles sont illustrées par les figures 8 et 9. Le contrôleur conçu est insensible aux

variations de l'inductance de la ligne, de plus le temps de réponse est assez rapide.

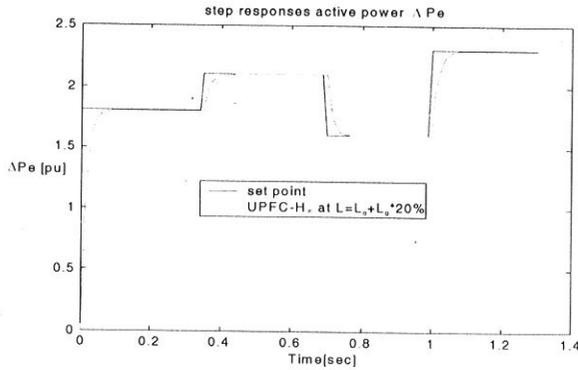


Figure 7 Réponse temporelle de la puissance active pour une variation de la consigne et de l'inductance de la ligne L de +20%.

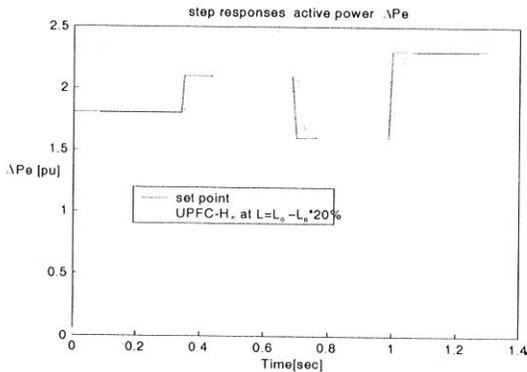


Figure 8 Réponse temporelle de la puissance active pour une variation de la consigne et de l'inductance de la ligne L de -20%.

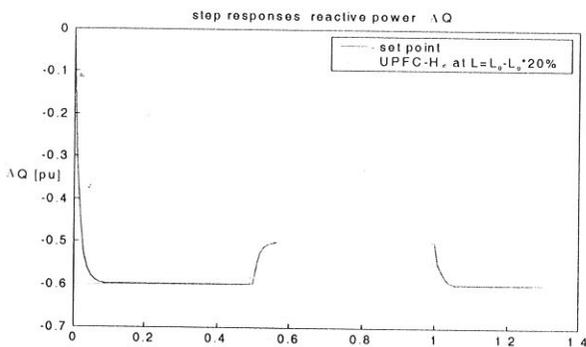


Figure 9: Réponse temporelle de la puissance réactive pour une variation de la consigne et de l'inductance de la ligne L de -20%.

3.2 Réglage par logique floue

Le modèle de l'UPFC est multivariable avec deux entrées et deux sorties. Pour découpler ce système nous proposons un algorithme basé sur la commande *PI-floue* [5].

Le découplage entre les deux composantes de puissance utilisant un régulateur *PI-floue* est illustré par la figure 10.

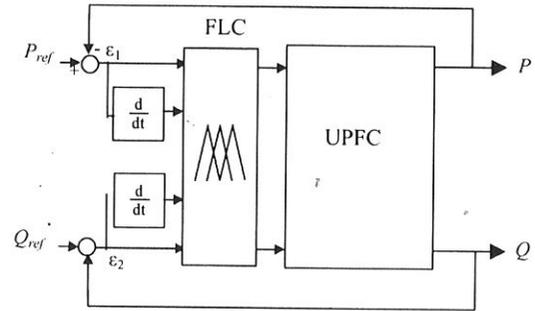


Figure 10 Schéma bloc de la commande et découplage par la logique-floue

La commande floue est bien adaptée à notre application car elle permet de traiter les problèmes liés aux interactions.

Soit $\Delta \varepsilon = \varepsilon_k - \varepsilon_{k-1}$ la variation de l'erreur. les règles induites par la commande sont du type :

$$\Delta u_k = K_p \cdot (\varepsilon_k - \varepsilon_{k-1}) + K_p \frac{T}{\tau_I} \varepsilon_k \quad (29)$$

Où k_p et τ_i sont les composantes proportionnelles et intégrales choisies, Δu_k est l'incrément de commande. Les paramètres k_p et τ_i sont choisis en fonction des prédicats associés à ε et $\Delta \varepsilon$.

On considère pour chaque variable de mesure (l'erreur et la variation de l'erreur) deux sous-ensemble flous notés $\{N, Z, P\}$ avec N : Négative, Z : zéro, P : positif. Ils sont définis sur l'ensemble des réels. De plus, on admet trois actions possibles pour la variation de la sortie de la commande floue définies par les sous-ensembles flous $\{N, Z, P\}$ sur l'univers de discours $[-\Delta u, \Delta u]$.

3.2.1 Base de règles

Pour réaliser le découplage entre les deux composantes du courant on utilise une base de règles. Le nombre de règles tirées à partir du plan de phase est égale à $(4 \times 4) = 16$.

Les résultats obtenus lors d'une variation des deux puissances active et réactive. La figure 11 montre la réponse échelon de la puissance active pour un contrôleur flou. On remarque que le contrôleur flou donne une meilleure réponse transitoire par rapport au *PI* avec un temps de réponse inférieur et un dépassement réduit. Ceci on a permis de dire que le contrôle par un la

logique flou qu'on a proposé permet de résoudre complètement le problème de L'interaction et améliorer la réponse dynamique du système.

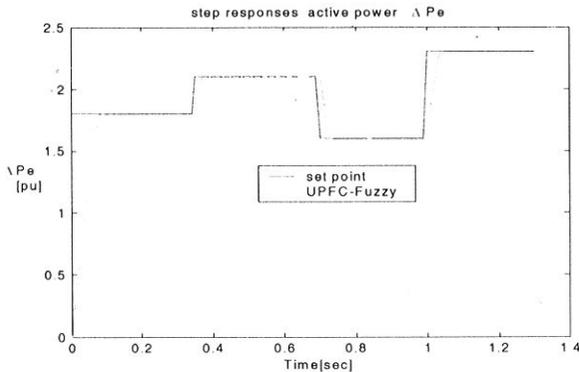


Figure 11 Réponse de la puissance active ΔP_a

Test de robustesse :

Pour vérifier la robustesse de ce contrôleur, deux tests différents ont été faits. Pour chaque test nous avons variés les paramètres de la ligne de la transmission, mais le contrôleur est insensible aux variations de la ligne. La figure 12 présentes la puissance active lors d'une variation de la ligne de 20 %.

Dans le test 2 l'inductance de la ligne de transmission est augmentée par 20% comparée avec le test1. Dans le test 3 l'inductance de la ligne de transmission est réduite par 20% comparés avec test1.

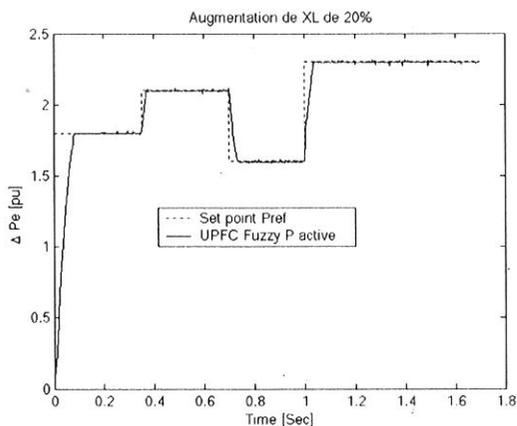


Figure 12 Robustesse du régulateur flou (Augmentation de X_L de 20%).

4. Conclusions

Ce papier a permis de vérifier en simulation les performances des algorithmes de commande avancée proposés en combinant la théorie de la commande classique avec les concepts de la logique floue comparée avec la commande robuste H_∞ appliqués à un système

UPFC. Les structures qui en résultent assurent une meilleure robustesse au système vis-à-vis des variations paramétriques.

Ce travail nous a permis de confirmer la faisabilité de fusion entre la théorie de la commande et les techniques de commande avancée. L'approche classique, bien qu'elle traite les systèmes linéaires et non linéaires par des méthodes précises, efficaces et cohérentes, souffre malheureusement d'handicap freinant sérieusement ses capacités quand elle se trouve devant des problèmes où il est impossible d'obtenir avec précision les modèles des processus et des bruits comme dans le cas des réseaux électriques.

Les algorithmes proposés ont été appliqués à un compensateur de réseaux électriques (UPFC) et les résultats montrent que les performances obtenues sont nettement meilleures que dans le cas des réglages classiques.

5. Références

- [1] Ying Jiang, *Active and Reactive Power Control For Transmission Systems With Voltage Source Converters*, PhD thesis (1998), Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- [2] Yu Q., Round S.D., Norum L., Undeland T.M., *A new control strategy for a unified power flow controller*, Proceedings of European Power Electronics Conference EPE'97, 1997, Vol. 2, pp. 901-906.
- [3] Yu Q., Round S.D., Norum L., Undeland T.M., *Dynamic Control of Unified Power Flow Controller*, Proceedings of IEEE/PESC'96, Baveno, Italy, June/1996, pp. 508-514.
- [4] Bouhamida M., Denai M.A., *Multivariable Robust Power System Stabilizer Design based on H_∞ (approach state space)*, Third International Power Electronics and Motion Control Conference IPEMC'2000, August 15-18, 2000 IEEE, Tsinghua University, Beijing, China.
- [5] Allaoui T., Denai M. A., Bouhamida M., *Decoupling Multivariable GPC Control of UPFC-Based Power Flow Compensation*, 10th International Conference (EPE-PEMC'02), 2002, Zagreb, Croatia.
- [6] Denai M.A., Attia S.A., *Fuzzy and Neural Control of an Induction Motor*, International Journal of Applied Mathematics and Computer Science, Vol. 12, No. 2, 2002, pp. 221-233.