

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
DEPARTEMENT D'AUTOMATIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDE
EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME

DE MASTER EN AUTOMATIQUE

THEME

**Commande Adaptative Floue d'un dispositif UPFC
équipant une ligne HT d'un réseau électrique**

Réalisé par :

FETOUCHE Walid

TICHERFATINE Mounia

Encadré par :

Pr. CHEKIREB Hachemi

M.A.HAMACHE Amar

Promotion :

Juin 2013

ملخص

ساهم هذا العمل في تحسين تدفق القدرة في الخط الكهربائي باستعمال جهاز FACTS من نوع UPFC حيث تم تقديم مبدأ عمل جهاز UPFC ووضع نموذج رياضي للشبكة الكهربائية المزودة به، في المعلم ثلاثي الأطوار ومعلم Park المتزامن. تم استعمال هذا النموذج الرياضي لتطبيق تقنيات تحكم مختلفة. تتمثل التقنية الأولى هي التحكم PI تليها تقنية التحكم PI الغامض حيث تمت دراسة استجابة النظام لمختلف حالات العمل. في الأخير تم وضع تقنية تلاؤمية غامضة لتحسين النتائج خاصة عند وجود غموض في الأوسطة حين تغيرها بمرور الزمن .

كلمات مفتاحية: الانظمة الغامضة, تحكم الغامض التلاؤمي, دالة ليابونوف, تحكم PI, تحكم الغامض, تحكم التلاؤمي, جهاز FACTS, UPFC

Résumé Le présent travail est une contribution à l'amélioration du transit de puissance active et réactive via une interconnexion électrique THT (400 kV) par l'utilisation d'un dispositif FACTS (*Flexible AC Transmission Systems*) du type UPFC (*Unified Power Flow Controller*). Le système électrique englobant l'interconnexion et l'UPFC est représenté par un modèle mathématique sur une forme d'équations d'états en grandeurs triphasées puis transformé dans le repère de Park synchrone (d,q). Ce dernier modèle a servi pour synthétiser différentes lois de commande en vue de réguler les flux des puissances transitées dans la ligne. La première loi de commande et une commande classique de type PI, la seconde est la commande PI Floue et la troisième est de type adaptative floue. Des simulations sont faites pour ces commandes afin de bien visualiser le comportement du système dans différentes situations de fonctionnement. Les résultats de simulation obtenus ont montré l'efficacité de l'UPFC dans la gestion des flux de puissance même en présence de perturbations dans le réseau électrique.

Mot Clés : Commande Floue, Commande Adaptative Floue, UPFC, FACTS, Flux de puissance, fonction de Lyapunov, régulateur PI, transformation de Park, Régulateur PI Flou.

Abstract This work is a contribution to improve the transit of active and reactive power on an electrical interconnection (400 kV) by the use of a FACTS device (*Flexible AC Transmission Systems*) which is the UPFC device (*Unified Power flow Controller*). The electrical system including interconnection and UPFC is represented by a mathematical three-phase state space equations model, then transformed into the synchronous Park reference or (d,q). This model is used to synthesize different control laws to set the transited power flow through the line. The first control law is a conventional PI controller, the second one is the fuzzy PI controller and the third is an adaptive fuzzy controller. Simulations are made for these controllers to see the system behavior in different operating situations. The results showed the effectiveness of the UPFC in the management of the power flow even in the presence of disturbances in the power grid. Finally, a comparative study between these control laws is highlighted to illustrate the good performance of the fuzzy control compared to conventional PI control.

Keywords : Fuzzy logic control, Fuzzy adaptative control, UPFC, Facts, PI controller, Fuzzy PI controller, Park transform.

Remerciements

Ce travail a été effectué au sein de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger sous la direction de nos deux promoteurs Pr H. CHEKIREB et Mr A. HAMACHE Auxquels nous tenons à exprimer nos plus sincères remerciements pour leurs précieux conseils, leur disponibilité, leurs aide et leurs patience tout au long de notre travail.

Nous remercions les membres du jury Monsieur le président NEZLI Lazhari et Monsieur l'examineur Mr STIHI Omar qui nous ont fait l'honneur d'examiner notre travail.

Nous remercions nos enseignants de l'Ecole Nationale Polytechnique pour leurs efforts voués à nous transmettre le savoir, en particulier ceux du département d'Automatique.

Nous tenons à exprimer notre très grande gratitude, et notre profonde affection à nos chers parents pour leurs encouragements, leur patience et leur grand soutien, durant toutes ces années d'études.

Dédicaces

Je dédie ce travail de fin d'études à ma très chère mère et à mon père qui ont toujours été à mes côtés pour me soutenir et me conseiller, que dieu leurs donne longue vie et bonne santé.

A mes sœurs Radia, Lamia et Sara.

Aux petits anges Mayssane et Illyne.

A toutes mes amies: Nassima, Zineb, Fatima et Soumia.

A tous ceux que j'aime et qui m'aiment.

A tous ceux qui m'ont aidé, de près ou de loin, même qu'il soit un mot d'encouragement et de gentillesse.

Mounia

Je remercie Dieu de nous avoir accordé des connaissances et de nous avoir aidés à réaliser ce travail.

Je remercie ma binôme qui m'a supportée tout au long de cette année.

Je dédie ce modeste travail à celle qui m'a donné la vie, le symbole de tendresse, qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite, à ma mère ... Que Dieu la garde et la protège.

A mon père, qui avait toujours été là pour moi et qui aurait tant voulu être là aujourd'hui, que Dieu ait pitié de son âme.

Je remercie mon frère qui s'est toujours soucier de mes études et de l'avancement de ce projet, bien qu'il n'était pas toujours présent, mais son simple soutien a réussi à me redonner espoir.

Je remercie mes deux sœurs d'être toujours étaient présentes, de m'avoir aidées tout au long de mes études, je leurs demande de m'excuser pour toutes les fois où je les ai déranger par mes nuits blanches.

Je remercie la personne qui par son soutiens et son écoute, ma aider à voir mes erreurs, a les corriger et à progresser ... celle qui était débordée par ses études mais qui trouvait toujours le temps de me parler et partager une partie de son temps avec moi.

Je remercie tous mes amis, deux d'entre eux en particulier, qui mon toujours soutenu, et vers lesquelles je me suis toujours tourner...

...Walid

TABLE DES MATIERES

Introduction générale.....	10
1. Commande adaptative floue.....	11
1.1 Introduction	12
1.2 Commande floue adaptative	12
1.3 Approximation par les systèmes flous.....	12
1.4 Commande PI flou adaptatif direct	13
1.4.1 Formulation du problème.....	13
1.4.2 Approximation par les systèmes flous	14
1.4.3 Synthèse de la commande.....	15
1.4.4 Analyse de la stabilité	16
1.4.5 Simulation.....	19
1.5 Commande floue adaptative directe stable.....	22
1.5.1 Formulation du problème.....	22
1.5.2 Approximation par systèmes flous	23
1.5.3 Synthèse de la commande.....	23
1.5.4 Analyse de la stabilité.....	24
1.5.5 Simulation	26
1.6 Commande floue adaptative directe stable étendue	28
1.6.1 Formulation du problème.....	28
1.6.2 Approximation par les systèmes flous.....	29
1.6.3 Synthèse de la commande.....	29
1.6.4 Analyse de la stabilité	30
1.6.5 Simulation.....	32
1.7 Commande floue adaptative directe stable généralisée	34
1.7.1 structure de la commande	34
1.7.2 Analyse de la stabilité	35
1.7.3 Simulation.....	37
1.8 Conclusion.....	39
Conclusion générale.....	40
Bibliographie.....	41

Table des figures

Figure 1.1 : Schéma de la commande PI-floue adaptative directe	16
Figure 1.2: Résultat de simulation pour un creux de tension	19
Figure 1.3 : Résultats de simulation pour les erreurs paramétriques	21
Figure 1.4 : structure de la commande floue adaptative directe stabilisInte	24
Figure 1.5 : Résultat de simulation pour un creux de tension	26
Figure 1.6 : Résultats de simulation pour les erreurs paramétriques	27
Figure 1.7 : structure de la commande floue adaptative stable étendue	30
Figure 1.8 : Résultats de simulation pour un creux de tension	32
Figure 1.9 : simulations en présence des erreurs paramétriques	33
Figure 1.10 : structure de la commande floue adaptative directe stable généralisée	35
Figure 1.11 : Résultat de simulation pour un creux de tension	37
Figure 1.12 : Résultats de simulation en présence d'incertitudes paramétriques	38

Liste des tableaux

Tableau 1.1: Changement de consigne de puissances	20
---	----

Table d'abbreviations

Abbreviations

FACTS	Flexible Alternating Current Transmission Systems
TCR	Thyristor Controlled Reactor
TSR	Thyristor Switched Reactor
TSC	Thyristor Switched Capacitor
SVC	Static Var Compensator
TCBR	Thyristor Control Breaking Resistor
STATCOM	Static Compensator
TCSC	Thyristor Controlled Series Capacitor
TCSR	Thyristor Controlled Series Reactor
TSSR	Thyristor Switched Series Reactor
SSSC	Static Synchronous Series Compensator
TCPAR	Thyristor Controlled Phase Angle Regulator
IPFC	Interline Power Flow Controller
UPFC	Unified Power Flow Controller
MLI	Modulation de largeur d'impulsion
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
GTO	Gate Turn Off

Grandeurs et signaux

V_e	Tension du réseau en amont
V_s	Tension du réseau en aval
V_{SSSC}	Tension injectée par le SSSC
V_{stat}	Tension injectée par le STATCOM
$V_{SSSC,dq}$	Tension injectée par le SSSC représentée dans le repère de Park
$V_{stat,dq}$	Tension injectée par le STATCOM
V_t	Tension au point de raccordement
$V_{t,dq}$	Tension au point de raccordement Tension au point de raccordement
V_c	Tension de la capacité de couplage
P	Puissance active
Q	Puissance réactive
P_s	Puissance active de la ligne en sorite
Q_s	Puissance réactive de la ligne en sorite
P_{sh}	Puissance active délivrée par le STATCOM
Q_{sh}	Puissance réactive délivrée par le STATCOM
P_{SSSC}	Puissance active délivrée par le SSSC
P_p	Puissance active de la capacité de couplage et des pertes résistives
i_{sh}	Courant délivré par le STATCOM
i_s	Courant de ligne
φ	Déphasage courant tension de la ligne

Paramètres de modélisation

R_s	Résistance de la ligne
L_s	Inductance de la ligne
R_{sh}	Résistance Shunt
L_{sh}	Inductance Shunt
R	Résistance des pertes de convertisseur
C	Capacité du condensateur du couplage

Introduction générale

Le présent travail est un complément pour la partie ingénieur, dans lequel, une loi de commande non linéaire sera l'objet de notre étude, c'est la commande floue adaptative, ou quatre différentes méthodes seront étudiées ; la commande PI-floue adaptative directe, la commande floue adaptative direct stable étendue, la commande floue adaptative direct stable et la commande floue adaptative direct stable généralisée. Une solution au cas des variations paramétriques affectant le modèle, sera ainsi apporté. Cette dernière sera intégrée et simulée sous les mêmes conditions que celle des autres lois de commande afin de comparer les résultats et de voir l'apport de celle-ci.

Enfin, il ne nous restera plus qu'à conclure et à proposer des perspectives d'études futures permettant de compléter ce travail.

Chapitre 1

Commande floue adaptative

1.1 INTRODUCTION

Dans la partie précédente, les différentes commandes traitées ne garantissent pas la convergence de l'erreur de poursuite vers zéro en particulier lors des incertitudes paramétriques. Pour remédier à ces inconvénients, nous proposons quatre commandes floues adaptatives : PI flou adaptatif direct, Commande floue adaptative direct stable, étendu et généralisée.

Cette technique utilise la théorie de Lyapunov pour établir une loi d'adaptation paramétrique assurant la stabilité et la bornitude de tous les signaux de commande et de l'erreur de poursuite.

1.2 Commande floue adaptative

La commande adaptative est un ensemble de techniques utilisées pour l'ajustement en ligne des paramètres du contrôleur afin d'assurer les performances désirées quand les paramètres du procédé à commander sont soit inconnus soit variant dans le temps. [12]

1.3 Approximation par les systèmes flous

Nous considérons dans cette partie le problème d'approximation des fonctions non linéaires par les systèmes flous du type Sugeno $W_f(x, \theta)$; c'est-à-dire que la partie conclusion doit être ajustée.

La valeur de sortie globale $z(x)$ est la suivante:

$$z(x) = \frac{\sum_{k=1}^M \alpha_k a^k}{\sum_{k=1}^M \alpha_k}$$

$z(x)$ peut être réécrite comme:

$$z(x) = w(x) \cdot \theta$$

Où θ : est le vecteur des paramètres

Et

$$w(x) = \left[\frac{\alpha_1}{\sum_{k=1}^M \alpha_k} \quad \frac{\alpha_2}{\sum_{k=1}^M \alpha_k} \quad \dots \quad \frac{\alpha_M}{\sum_{k=1}^M \alpha_k} \right]$$

Dans cette commande, le rôle attribué au système flou est d'estimer en temps réel une fonction non linéaire $F(X)$ définie par l'équation du modèle ou une partie du modèle. Cette fonction est approximée par un système flou de la forme.

$$F(X) = W(X) \cdot \theta^*_{+\varepsilon}(X)$$

$$\text{Et } W(X) = \begin{bmatrix} w & 0 & 0 & 0 \\ 0 & w & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & w \end{bmatrix} ; \theta^* = [\theta^*_1 \quad \theta^*_2 \quad \dots \quad \theta^*_n]^T$$

$$\theta^*_i = [a_1 \quad a_2 \quad \dots \quad a_M]^T$$

1.4 Commande PI flou adaptatif direct

1.4.1 Formulation du problème

La commande de notre système avec un régulateur PI classique (chapitre 3) a prouvé ses performances lors des défauts de systèmes sauf lors de la présence des variations paramétriques ce qui est le cas dans notre système ou la valeur de l'inductance est en variation continue. Comme solution à ce problème une nouvelle méthode de calcul de la commande sera étudiée. Elle est le résultat d'une combinaison de 3 types de commandes qui sont la commande PI, Adaptative et flou, pour aboutir à une nouvelle commande – commande PI-Adaptative Flou.

Le principe de cette commande est basé sur l'utilisation de la première commande PI classique déjà calculée à qui sera ajouté un terme de robustesse pour améliorer ces performances. Le calcul de ce terme se fait par l'utilisation des systèmes flous adaptatifs

Pour ce fait considérant la commande virtuelle U vue dans le chapitre 3 représentée par l'équation (3.2) :

$$\dot{X} = \dot{\Lambda}X_p + U$$

Avec :

$$\begin{bmatrix} U_{s,d} \\ U_{s,q} \\ U_{sh,d} \\ U_{sh,q} \end{bmatrix} = A_{pp}X_p + B_p U_p - W_p \quad (6.1)$$

Et :

$$A_{pp} = \begin{bmatrix} 0 & w & 0 & 0 \\ -w & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & w \\ 0 & 0 & -w & 0 \end{bmatrix} \quad (6.2)$$

La commande virtuelle est calculée par un régulateur PI comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{s,d}(t) = K_{p,sd} e_{s,d}(t) + K_{i,sd} \int_0^t e_{s,d}(\tau) d\tau \\ U_{s,q}(t) = K_{p,sq} e_{s,q}(t) + K_{i,sq} \int_0^t e_{s,q}(\tau) d\tau \\ U_{sh,d}(t) = K_{p,shd} e_{sh,d}(t) + K_{i,shd} \int_0^t e_{sh,d}(\tau) d\tau \\ U_{sh,q}(t) = K_{p,shq} e_{sh,q}(t) + K_{i,shq} \int_0^t e_{sh,q}(\tau) d\tau \end{array} \right. \quad (6.3)$$

La commande réelle est exprimée par :

$$\begin{bmatrix} V_{sssc,d} \\ V_{sssc,q} \\ V_{stat,d} \\ V_{stat,q} \end{bmatrix} = B_p^{-1} (U - A_{pp} X_p + W_p) \quad (6.4)$$

1.4.2 Approximation par les systèmes flous

Récrivons l'équation (3.3) d'une manière plus détaillée :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{sssc,d} = \frac{U_{s,d}}{b_{11}} - \frac{w}{b_{11}} i_{s,q} - \frac{b_{d11}}{b_{11}} V_{s,d} - \frac{b_{d12}}{b_{11}} V_{e,d} = \frac{U_{s,d}}{b_{11}} - \frac{w}{b_{11}} i_{s,q} + W_{p,1} \\ V_{sssc,q} = \frac{U_{s,q}}{b_{11}} + \frac{w}{b_{11}} i_{s,d} - \frac{b_{d11}}{b_{11}} V_{s,q} - \frac{b_{d12}}{b_{11}} V_{e,q} = \frac{U_{s,q}}{b_{11}} + \frac{w}{b_{11}} i_{s,d} + W_{p,2} \\ V_{stat,d} = \frac{U_{sh,d}}{b_{22}} - \frac{w}{b_{22}} i_{sh,q} - \frac{b_{d22}}{b_{22}} V_{e,d} = \frac{U_{sh,d}}{b_{22}} - \frac{w}{b_{22}} i_{sh,q} + W_{p,3} \\ V_{stat,q} = \frac{U_{sh,q}}{b_{22}} + \frac{w}{b_{22}} i_{sh,d} - \frac{b_{d22}}{b_{22}} V_{e,q} = \frac{U_{sh,q}}{b_{22}} + \frac{w}{b_{22}} i_{sh,d} + W_{p,4} \end{array} \right. \quad (6.5)$$

$$W_p = [W_{p,1} \quad W_{p,2} \quad W_{p,3} \quad W_{p,4}]^T \quad (6.6)$$

Pour remédier au problème de robustesse de cette commande linéaire un terme ΔR est introduit.

La commande réelle sera donc sous la forme suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{sssc,d}^{réel} = \frac{U_{s,d}}{b_{11}} - \frac{w}{b_{11}} i_{s,q} + W_{p,1} + \Delta R_1 \\ V_{sssc,q}^{réel} = \frac{U_{s,q}}{b_{11}} + \frac{w}{b_{11}} i_{s,d} + W_{p,2} + \Delta R_2 \\ V_{stat,d}^{réel} = \frac{U_{sh,d}}{b_{22}} - \frac{w}{b_{22}} i_{sh,q} + W_{p,3} + \Delta R_3 \\ V_{stat,q}^{réel} = \frac{U_{sh,q}}{b_{22}} + \frac{w}{b_{22}} i_{sh,d} + W_{p,4} + \Delta R_4 \end{array} \right. \quad (6.7)$$

On suppose qu'il existe un système flou ; $F = [F_1 \quad F_2 \quad F_3 \quad F_4]^T$

$$\begin{cases} V^{réel}_{sssc,d} = \frac{U_{s,d}}{b_{11}} - \frac{w}{b_{11}} i_{s,q} + F_1 \\ V^{réel}_{sssc,q} = \frac{U_{s,q}}{b_{11}} + \frac{w}{b_{11}} i_{s,d} + F_2 \\ V^{réel}_{stat,d} = \frac{U_{sh,d}}{b_{22}} - \frac{w}{b_{22}} i_{sh,q} + F_3 \\ V^{réel}_{stat,q} = \frac{U_{sh,q}}{b_{22}} + \frac{w}{b_{22}} i_{sh,d} + F_4 \end{cases} \quad (6.8)$$

Les termes F_i avec $i = \overline{1,4}$ sont des fonctions continues supposées inconnues. Elles sont définies par :

$$F_i = W_i(X) * \theta_{Fi} + \varepsilon_{Fi} \quad (6.9)$$

Avec : $|\varepsilon_{Fi}| < \bar{\varepsilon}_i$

(6.10)

L'estimation générée par le système flou est donnée par :

$$\hat{F}_i = W_i(X) * \hat{\theta}_{Fi} \quad (6.11)$$

Où $\hat{\theta}_{Fi}$ est le vecteur des paramètres estimés par un algorithme d'adaptation approprié.

1.4.3 Synthèse de la commande

A partir de la fonction floue estimée, l'expression de la commande devient :

$$\begin{cases} V^{estimé}_{sssc,d} = \frac{U_{s,d}}{b_{11}} - \frac{w}{b_{11}} i_{s,q} + \hat{F}_1 + k_{d,1}s_1 + k_1sgn(s_1) \\ V^{estimé}_{sssc,q} = \frac{U_{s,q}}{b_{11}} + \frac{w}{b_{11}} i_{s,d} + \hat{F}_2 + k_{d,2}s_2 + k_2sgn(s_2) \\ V^{estimé}_{stat,d} = \frac{U_{sh,d}}{b_{22}} - \frac{w}{b_{22}} i_{sh,q} + \hat{F}_3 + k_{d,3}s_3 + k_3sgn(s_3) \\ V^{estimé}_{stat,q} = \frac{U_{sh,q}}{b_{22}} + \frac{w}{b_{22}} i_{sh,d} + \hat{F}_4 + k_{d,4}s_4 + k_4sgn(s_4) \end{cases} \quad (6.12)$$

Où $K_i sgn(s_i)$ est un terme de mode de glissement qui compense l'effet de l'erreur de reconstruction avec :

$$e_i = x_{d,i} - x_i = s_i \quad (6.13)$$

$$K_i = \bar{\varepsilon}_i \quad (6.14)$$

$$\hat{\theta}_{Fi} = \gamma_i W_i^T(X) s_i \quad (6.15)$$

Ou γ_i est une constante positive.

La structure de la commande :

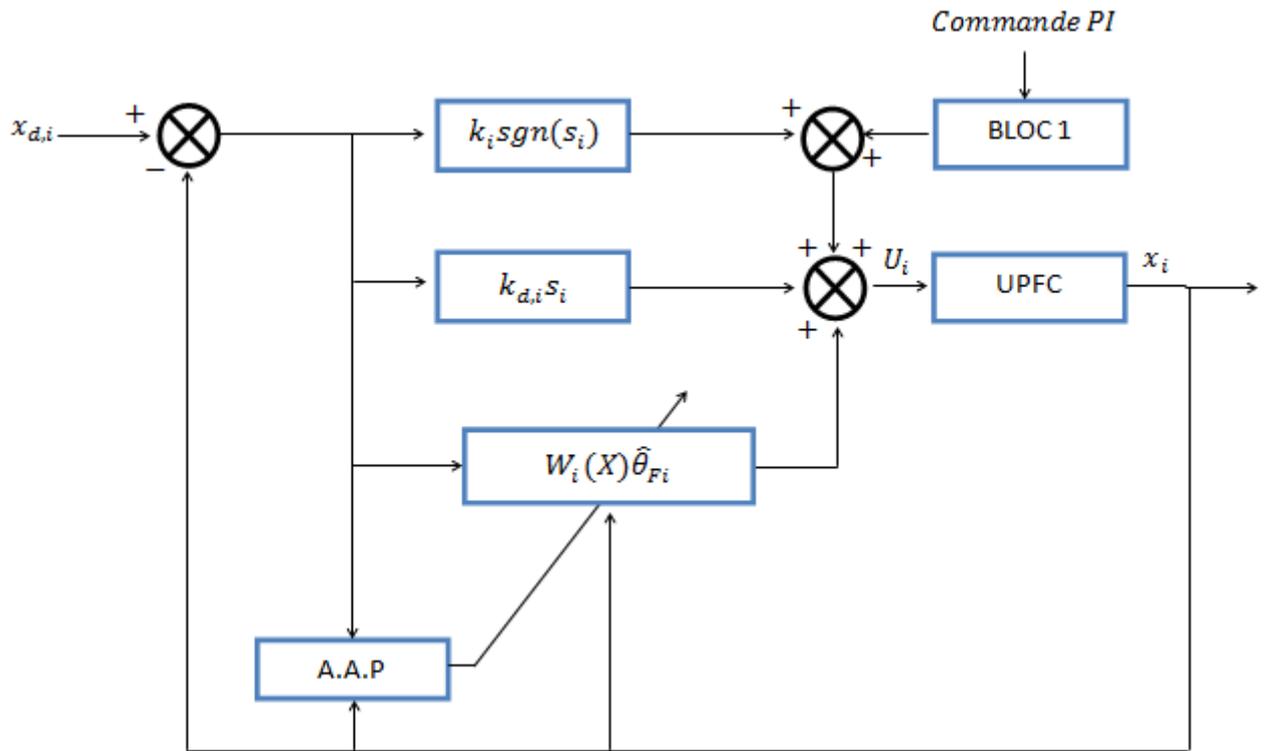


Figure 1.1 : Schéma de la commande PI-floue adaptative directe

1.4.4 Analyse de la stabilité

Dans cette section l'approche de Lyapunov sera utilisée pour prouver la stabilité du système bouclé.

On définit l'erreur paramétrique comme suit :

$$\tilde{\theta}_{Fi} = \hat{\theta}_{Fi} - \theta_{Fi}, \text{ ainsi } \dot{\tilde{\theta}}_{Fi} = \dot{\hat{\theta}}_{Fi} \quad (6.16)$$

Le système peut être mit sous la forme suivante :

$$\begin{cases} V_{sssc,d} = \frac{1}{b_{11}} \left[\dot{x}_1 - \frac{a_{11}}{b_{11}} x_1 \right] - \frac{w}{b_{11}} x_2 + F_1 = A_1(X) \dot{x}_1 + G_1(X) + F_1 \\ V_{sssc,q} = \frac{1}{b_{11}} \left[\dot{x}_2 - \frac{a_{11}}{b_{11}} x_2 \right] + \frac{w}{b_{11}} x_1 + F_1 = A_2(X) \dot{x}_2 + G_2(X) + F_1 \\ V_{stat,d} = \frac{1}{b_{22}} \left[\dot{x}_3 - \frac{a_{22}}{b_{22}} x_3 \right] - \frac{w}{b_{22}} x_4 + F_1 = A_3(X) \dot{x}_3 + G_3(X) + F_1 \\ V_{stat,q} = \frac{1}{b_{22}} \left[\dot{x}_4 - \frac{a_{22}}{b_{22}} x_4 \right] + \frac{w}{b_{22}} x_3 + F_1 = A_4(X) \dot{x}_4 + G_4(X) + F_1 \end{cases} \quad (6.17)$$

En utilisant les lois de commandes précédentes ainsi que la commande approximée, la dynamique de l'erreur filtrée s es donnée par :

$$\begin{cases} A_1 \dot{s}_1 = F_1(X) - \hat{F}_1(X) - K_1 \text{sgn}(s_1) - k_{d,1} s_1 \\ A_2 \dot{s}_2 = F_2(X) - \hat{F}_2(X) - K_2 \text{sgn}(s_2) - k_{d,2} s_2 \\ A_3 \dot{s}_3 = F_3(X) - \hat{F}_3(X) - K_3 \text{sgn}(s_3) - k_{d,3} s_3 \\ A_4 \dot{s}_4 = F_4(X) - \hat{F}_4(X) - K_4 \text{sgn}(s_4) - k_{d,4} s_4 \end{cases} \quad (6.18)$$

$$\text{Avec : } F_i(X) - \hat{F}_i(X) = -W_i(X) \check{\theta}_{Fi} + \varepsilon_{Fi}(X) \quad (6.19)$$

$$\begin{cases} A_1 \dot{s}_1 = -W_1(X) \check{\theta}_{F1} + \varepsilon_{F1}(X) - K_1 \text{sgn}(s_1) - k_{d,1} s_1 \\ A_2 \dot{s}_2 = -W_2(X) \check{\theta}_{F2} + \varepsilon_{F2}(X) - K_2 \text{sgn}(s_2) - k_{d,2} s_2 \\ A_3 \dot{s}_3 = -W_3(X) \check{\theta}_{F3} + \varepsilon_{F3}(X) - K_3 \text{sgn}(s_3) - k_{d,3} s_3 \\ A_4 \dot{s}_4 = -W_4(X) \check{\theta}_{F4} + \varepsilon_{F4}(X) - K_4 \text{sgn}(s_4) - k_{d,4} s_4 \end{cases} \quad (6.20)$$

Considérant les fonctions candidates de Lyapunov :

$$V_i = \frac{1}{2} A_i s_i^2 + \frac{1}{2\gamma_i} \tilde{\theta}_{Fi}^2 \quad (6.21)$$

La dérivée temporelle de ces fonctions sont données par la relation suivante :

$$\dot{V}_i = A_i s_i \dot{s}_i + \frac{1}{\gamma_i} \tilde{\theta}_{Fi} \dot{\tilde{\theta}}_{Fi} \quad (6.22)$$

En utilisant (6.20),

$$\dot{V}_i = -k_{d,i} s_i^2 - W_i(X) \check{\theta}_{Fi} s_i + \varepsilon_{Fi}(X) s_i - K_i \text{sgn}(s_i) s_i + \frac{1}{\gamma_i} \tilde{\theta}_{Fi} \dot{\tilde{\theta}}_{Fi} \quad (6.23)$$

Mais :

$$\dot{\tilde{\theta}}_{Fi} = \dot{\hat{\theta}}_{Fi} \quad (6.24)$$

$$\dot{V}_i = -k_{d,i}s_i^2 - W_i(X) \check{\theta}_{Fi}s_i + \varepsilon_{Fi}(X)s_i - K_i \text{sgn}(s_i)s_i + \frac{1}{\gamma_i} \tilde{\theta}_{Fi} \dot{\hat{\theta}}_{Fi} \quad (6.25)$$

le premier terme : $-k_{d,i}s_i^2$ avec $k_{d,i}$ positif pour $i = \overline{0,4}$ est ≤ 0

le deuxieme terme : $-W_i(X) \check{\theta}_{Fi}s_i + \frac{1}{\gamma_i} \tilde{\theta}_{Fi} \dot{\hat{\theta}}_{Fi}$ est nul, **car**: (6.14)

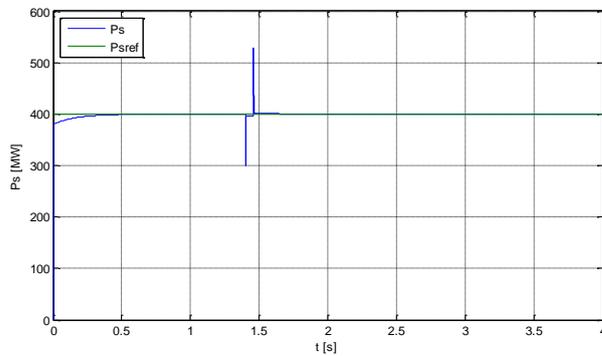
le troisieme terme : $\varepsilon_{Fi}(X)s_i - K_i \text{sgn}(s_i)s_i \leq 0$ **car**: (6.9) et (6.13)

Ce qui entraine $\dot{V}_i \leq 0$ par conséquent, s_i tend vers zéro et d'après (6.13), e_i tend vers zéro. [36]

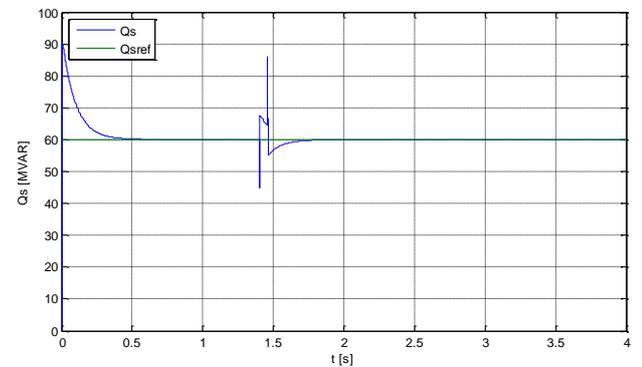
1.4.5 Simulation

▪ Creux de tension

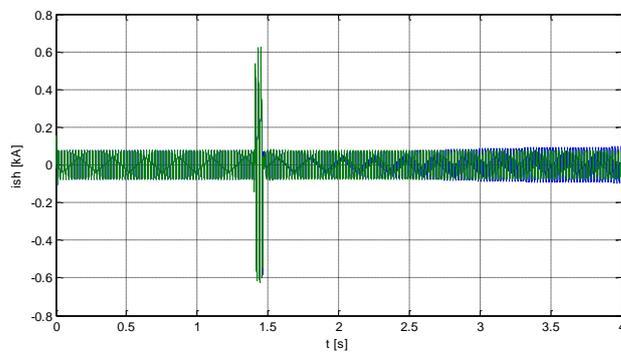
Un creux de tension est supposé survenir sur le réseau en sortie d'une diminution de 25% de la valeur nominale de la tension en sortie à l'instant $t = 1.4$ s et dure 60ms. Les simulations ont montrées les graphes suivant :



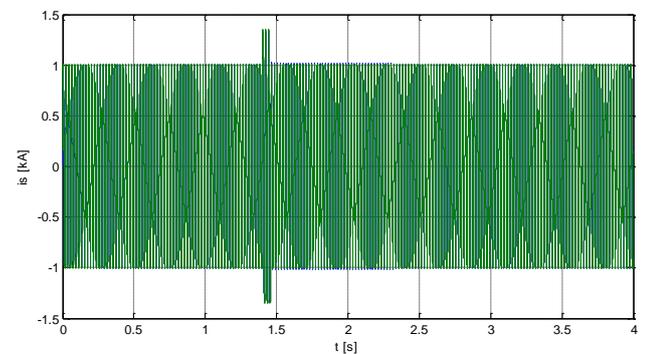
Puissance active en aval



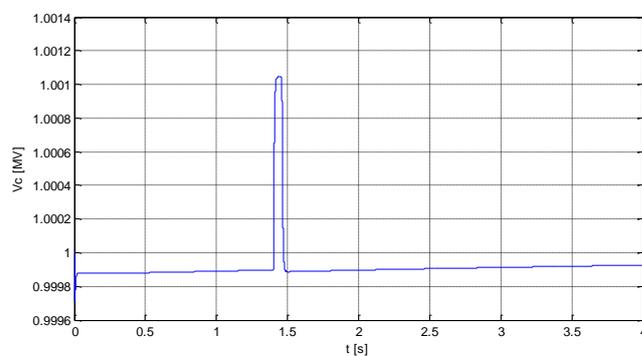
Puissance réactive en aval



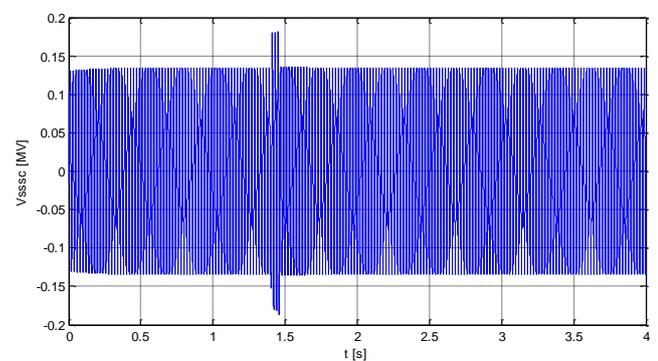
Courant injecté par le STATCOM



Courant de la ligne



Tension aux bornes du condensateur de couplage



Tension injectée par le SSSC

Figure 1.2: Résultat de simulation pour un creux de tension

On remarque l'apparition des pics de puissance (faible valeur par rapport à la commande PI)

Les tensions et les courants injectées augmentent d'une façon douce par rapport à la au commandes brusques du PI classique.

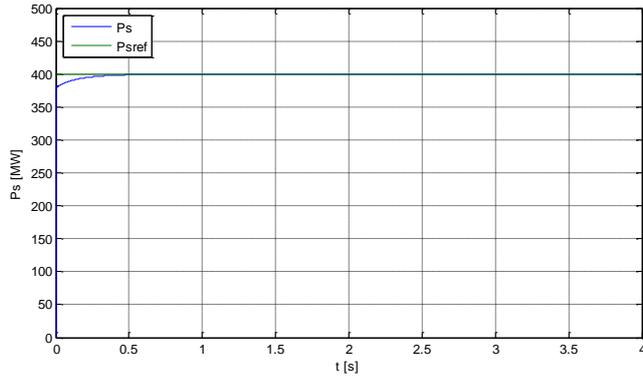
▪ **Erreurs paramétriques**

Le tableau suivant indique les instants de changement des paramètres et le taux de variation :

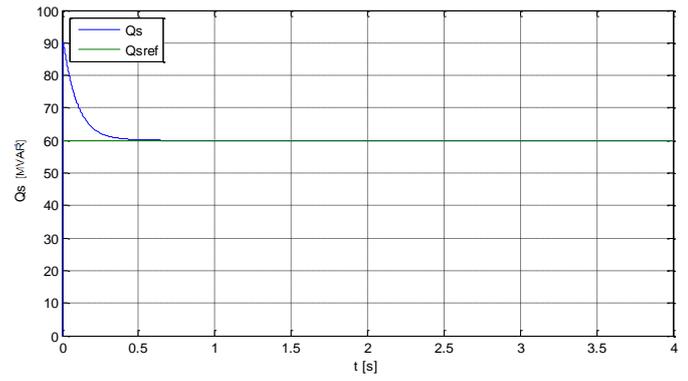
<i>L'instant t</i>	L_s	R_s
$t = 0.0 \text{ s}$	$L_s = 102$	$R_s = 11.34$
$t = .40 \text{ s}$	$L_s = 102w * 0.7$	$R_s = 11.34 * 0.9$
$t = 0.50 \text{ s}$	$L_s = 102w * 1.3$	$R_s = 11.34 * 1.2$
$t = 0.65 \text{ s}$	$L_s = 102w * 0.7$	$R_s = 11.34 * 1.2$
$t = 0.74 \text{ s}$	$L_s = 102w * 0.9$	$R_s = 11.34 * 0.9$
$t = 0.82 \text{ s}$	$L_s = 102w * 1.3$	$R_s = 11.34 * 1.2$
$t = 0.93 \text{ s}$	$L_s = 102w * 0.7$	$R_s = 11.34 * 1.2$
$t = 1.0 \text{ s}$	$L_s = 102w$	$R_s = 11.34$
$t = 1.4 \text{ s}$	$L_s = 102w * 0.95$	$R_s = 11.34 * 0.9$
$t = 1.5 \text{ s}$	$L_s = 102w * 1.3$	$R_s = 11.34 * 1.2$
$t = 1.65 \text{ s}$	$L_s = 102w * 0.7$	$R_s = 11.34 * 1.2$
$t = 1.74 \text{ s}$	$L_s = 102w * 0.7$	$R_s = 11.34 * 0.9$
$t = 1.82 \text{ s}$	$L_s = 102 * 1.3$	$R_s = 11.34 * 1.2$
$t = 1.93 \text{ s}$	$L_s = 102 * 0.7$	$R_s = 11.34 * 1.2$

Tableau 1.1: Changement de consigne de puissances

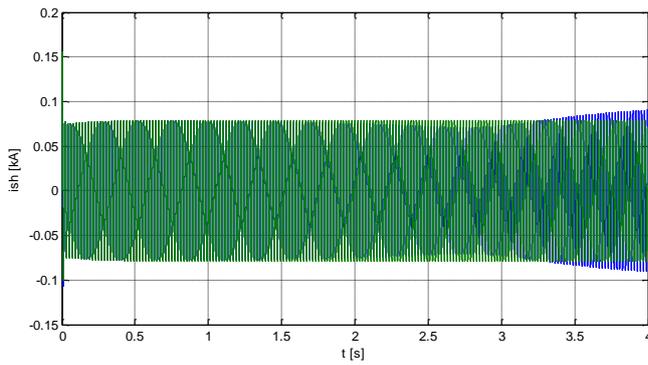
Les résultats de simulations en présence d'incertitudes paramétriques sont présentés sur la figure (1.3).



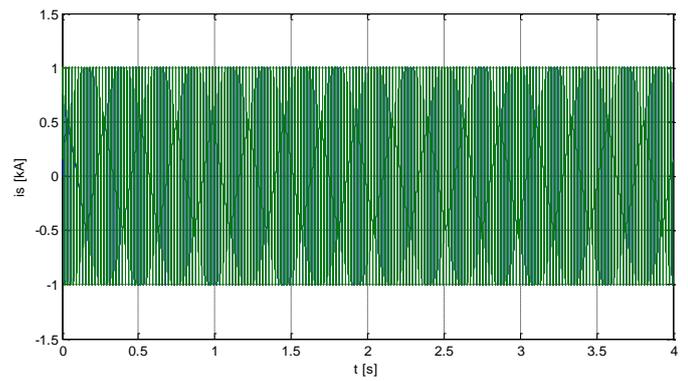
Puissance active en aval



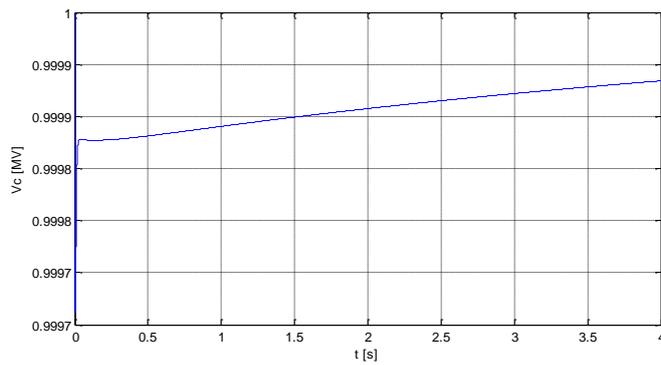
Puissance réactive en aval



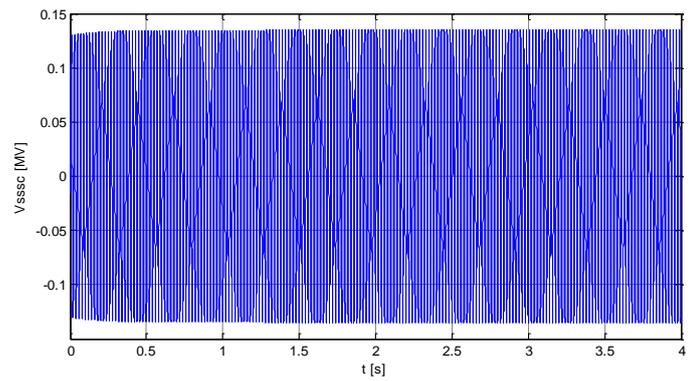
Courant injecté par le STATCOM



Courant de la ligne



Tension aux bornes du condensateur de couplage



Tension injectée par le SSSC

Figure 1.3 : Résultats de simulation pour les erreurs paramétriques

1.5 Commande floue adaptative directe stable

1.5.1 Formulation du problème

Considérons la classe des systèmes dynamiques non linéaires MIMO dont l'équation dynamique est écrite sous la forme :

$$U_i = F_i(X)y_i^{(n)} + G_i(X) \quad (6.26)$$

Nous supposons que $F_i(X)$ est une matrice définie positive, telle que sa dérivée temporelle vérifie la condition :

$$\left| \dot{F}_i(X) \right| \leq F_{i_0} \|X\| \quad (6.27)$$

Lorsque tous les termes (6.26) sont exactement connues, la loi de commande qui permet d'avoir une poursuite asymptotique d'une référence est donnée par :

$$U_i = k_{d,i} s_i + F_i(X)y_i^{(n)} + G_i(X) \quad (6.28)$$

$$\begin{aligned} e_i &= x_{d,i} - x_i \\ s_i &= e_i \\ y_i^r &= \dot{x}_{d,i} + \lambda_i e_i \end{aligned} \quad (6.29)$$

$k_{d,i}$ et λ_i sont des constantes positives.

Dans la plus part des applications pratiques, les termes $F_i(X)$ et $G_i(X)$ ne sont pas précisément connus. La solution est de rendre la commande adaptative. Pour synthétiser la loi de commande, le modèle est paramétré de la manière suivante

$$U_i = F_i(X)y_i^{(n)} + G_i(X) = W_i(X)\theta_i \quad (6.30)$$

Où $W_i(X)$ est un vecteur de fonctions non linéaires connues et θ_i est un vecteur des paramètres.

SLOTINE et LI ont proposé les lois de commande et d'adaptation suivantes :

$$\begin{aligned} U_i &= k_{d,i} s_i + W_i(X)\hat{\theta}_i \\ \dot{\hat{\theta}}_i &= \gamma_i W_i s_i \end{aligned} \quad (6.31)$$

Où $\hat{\theta}_i$ est une estimation adaptative des constantes physiques θ_i , et γ_i est une constante définie positive contrôlant la vitesse d'adaptation.

Cette loi de commande exige une connaissance parfaite du modèle dynamique du système avec simplement des connaissances insuffisantes sur les paramètres. De plus, la convergence des erreurs

n'est pas assurée en présence des incertitudes non structurelles. Pour résoudre tels problèmes, une approche de commande floue est proposée. Dans ce cas, l'équation (6.26) est mise sous la forme suivante :

$$F_i(X)y_i^{(n)} + G_i(X) = f_i(X) \quad (6.32)$$

1.5.2 Approximation par systèmes flous

L'architecture de commande présentée dans cette partie utilise les systèmes flous de Sugéno pour approximer les fonctions $f_i(X)$. Ainsi, nous supposons qu'il existe des systèmes flous de la forme $W_{fi}(X)\theta_i$ tel que :

$$f_i(X) = W_{fi}(X)\theta_i + \varepsilon_{fi} \quad (6.33)$$

Ou $W_{fi}(X)$ est un vecteur de fonctions floues de base , θ_i est un vecteur de paramètres optimaux, et ε_f est l'erreur de reconstruction de la fonction $f_i(X)$ tel que [37]

$$|\varepsilon_{fi}| < \bar{\varepsilon}_i \quad (6.34)$$

L'estimation de $\hat{f}_i(X)$ générée par le système flou est donnée par :

$$\hat{f}_i(X) = W_{fi}(X)\hat{\theta}_i \quad (6.35)$$

Ou $\hat{\theta}_i$ est le vecteur des paramètres à estimer par un algorithme d'adaptation approprié.

1.5.3 Synthèse de la commande

A partir de la fonction floue estimée, l'expression de la commande devient :

$$U_i = k_{d,i}s_i + \frac{1}{2}F_{0,i}||x||s_i + W_{fi}(X)\hat{\theta}_i + k_i sgn(s_i) \quad (6.36)$$

Ou $K_i sgn(s_i)$ est un terme de mode de glissement qui compense l'effet de l'erreur de reconstruction avec :

$$K_i = \bar{\varepsilon}_i \quad (6.37)$$

$$\hat{\theta}_i = \gamma_i W_{fi}(X) s_i \quad (6.38)$$

Ou γ_i est une constante positive.

La structure de la commande :

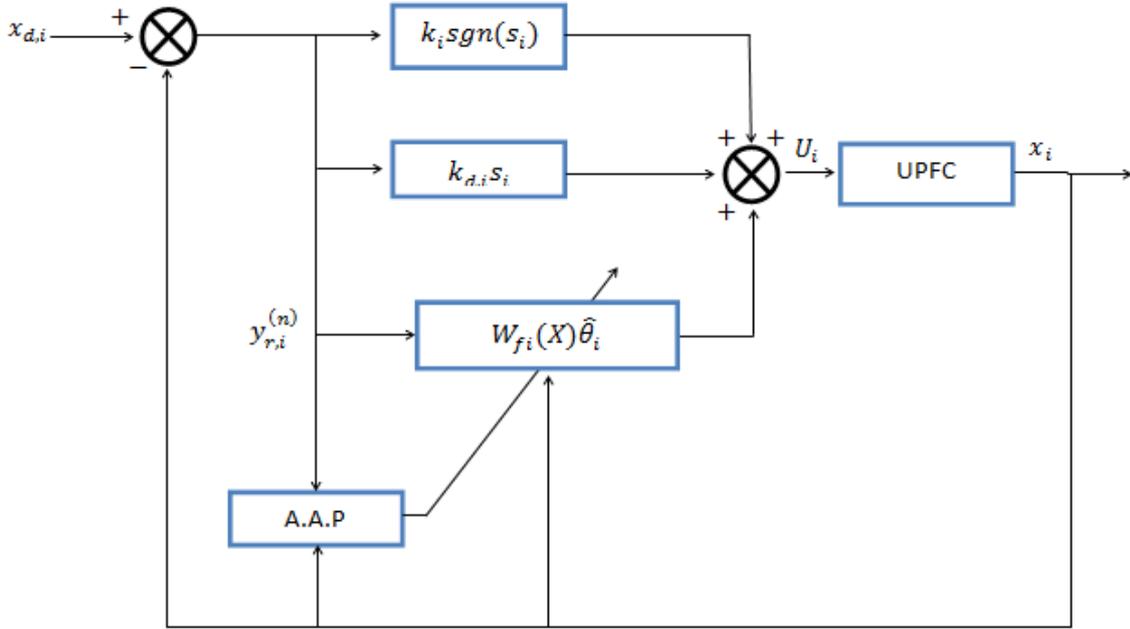


Figure 1.4 : structure de la commande floue adaptative directe stabilisante

1.5.4 Analyse de la stabilité

Dans cette section l'approche de Lyapunov sera utilisée pour prouver la stabilité du système bouclé.

On définit l'erreur paramétrique comme suit :

$$\tilde{\theta}_i = \hat{\theta}_i - \theta_i, \text{ ainsi } \dot{\tilde{\theta}}_i = \dot{\hat{\theta}}_i \quad (6.39)$$

En utilisant les lois de commandes précédentes, la dynamique de l'erreur filtrée s es donnée par :

$$F_i \dot{s}_i = f_i(X) - \hat{f}_i(X) - k_i \text{sgn}(s_i) - k_{d,i} s_i - \frac{1}{2} F_{0,i} \|x\| |s_i| \quad (6.40)$$

$$\text{Avec : } F_i(X) - \hat{F}_i(X) = -W_{f_i}(X) \check{\theta}_i + \varepsilon_{f_i}(X) \quad (6.41)$$

$$F_i \dot{s}_i = -W_{f_i}(X) \check{\theta}_i + \varepsilon_{f_i}(X) - K_i \text{sgn}(s_i) - k_{d,i} s_i - \frac{1}{2} F_{0,i} \|x\| |s_i| \quad (6.42)$$

Considérant les fonctions candidates de Lyapunov :

$$V_i = \frac{1}{2} F_i s_i^2 + \frac{1}{2\gamma_i} \tilde{\theta}_{F_i}^2 \quad (6.43)$$

La dérivée temporelle de ces fonctions sont données par la relation suivante :

$$\dot{V}_i = \frac{1}{2} \dot{F}_i s_i^2 + F_i s_i \dot{s}_i + \frac{1}{\gamma_i} \tilde{\theta}_i \dot{\tilde{\theta}}_i \quad (6.44)$$

En utilisant (6.42) ;

$$\dot{V}_i = \frac{1}{2} \dot{F}_i s_i^2 - W_{f_i}(X) \tilde{\theta}_i s_i + \varepsilon_{f_i}(X) s_i - k_{d,i} s_i^2 - \frac{1}{2} F_{0,i} \|x\| s_i^2 - k_i \text{sgn}(s_i) s_i + \frac{1}{\gamma_i} \tilde{\theta}_i \dot{\tilde{\theta}}_i \quad (6.45)$$

Mais :

$$\dot{\tilde{\theta}}_{F_i} = \hat{\tilde{\theta}}_{F_i} \quad (6.46)$$

$$\dot{V}_i = \frac{1}{2} \dot{F}_i s_i^2 - W_{f_i}(X) \tilde{\theta}_i s_i + \varepsilon_{f_i}(X) s_i - k_{d,i} s_i^2 - \frac{1}{2} F_{0,i} \|x\| s_i^2 - k_i \text{sgn}(s_i) s_i + \frac{1}{\gamma_i} \tilde{\theta}_i \hat{\tilde{\theta}}_i \quad (6.47)$$

le premier terme : $-k_{d,i} s_i^2$ avec $k_{d,i}$ positif pour $i = \overline{0,4}$ est ≤ 0

le deuxieme terme : $\frac{1}{2} \dot{F}_i s_i^2 - \frac{1}{2} F_{0,i} \|x\| s_i^2$ est ≤ 0 **car**: (6.27)

le troisieme terme : $-W_{f_i}(X) \tilde{\theta}_i s_i + \frac{1}{\gamma_i} \tilde{\theta}_i \hat{\tilde{\theta}}_i$ est nul, **car**: (6.38)

le quatrieme et dernier terme : $-s_i k_i \text{sgn}(s_i) + \varepsilon_{f_i} s_i$ est ≤ 0 **car**: (6.34) et (6.37)

Alors, la dérivée temporelle de la fonction de Lyapunov vérifie :

$$\dot{V}_i \leq -k_{d,i} s_i^2 \quad (6.48)$$

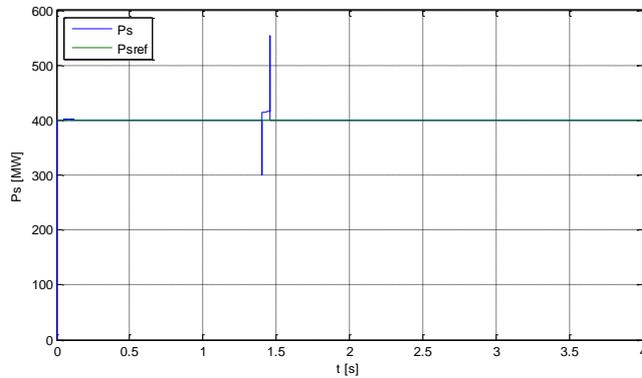
Donc s converge asymptotiquement vers zéro et que tous les signaux du système sont bornés, cependant, comme e étant la sortie d'un système linéaire stable, il vient que,

$$s^{(j)} \rightarrow 0; j = 0, \dots, n-1.$$

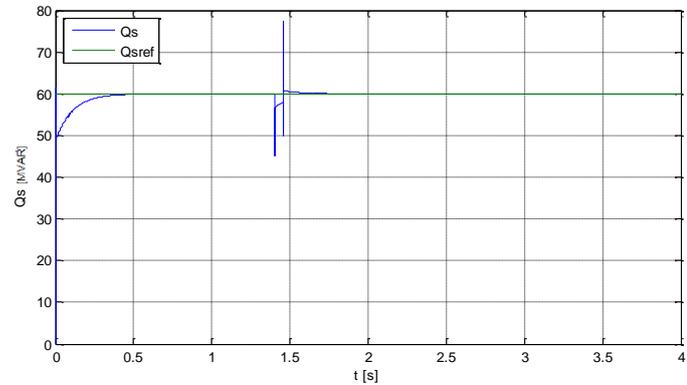
1.5.5 Simulation

○ Creux de tension

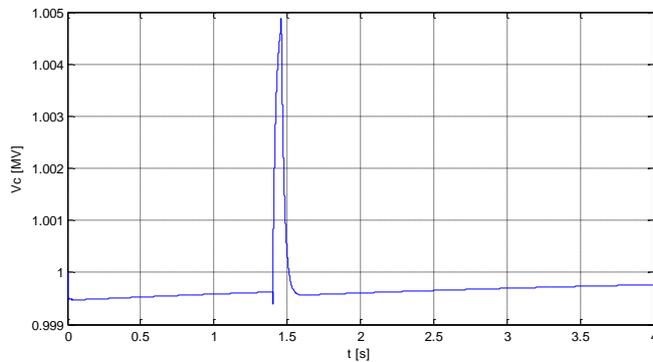
Un creux de tension est supposé survenir sur le réseau en sortie d'une diminution de 25% de la valeur nominale de la tension en sortie à l'instant $t = 1.4$ s et dure 60ms. Les simulations ont montrées les graphes suivant :



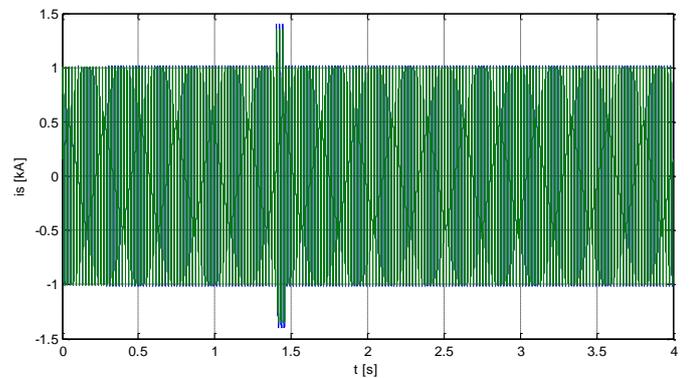
Puissance active en aval



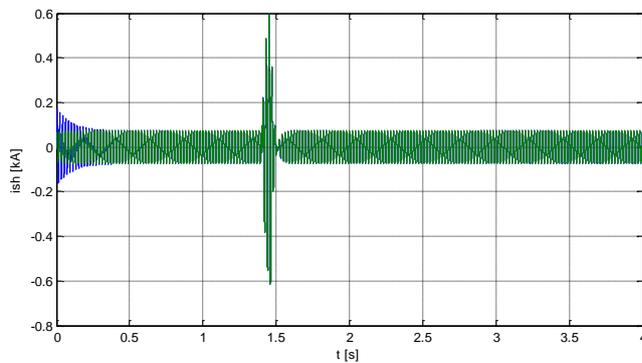
Puissance réactive en aval



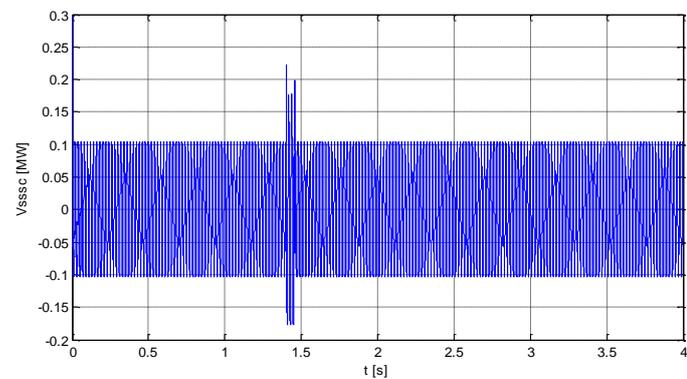
Tension aux bornes du condensateur de couplage



Courant de la ligne



Courant injecté par le STATCOM

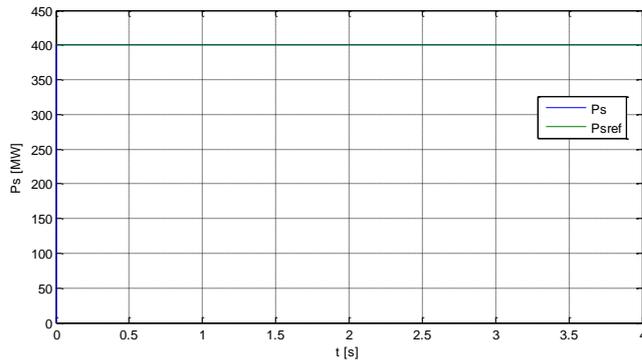


Tension injectée par le SSSC

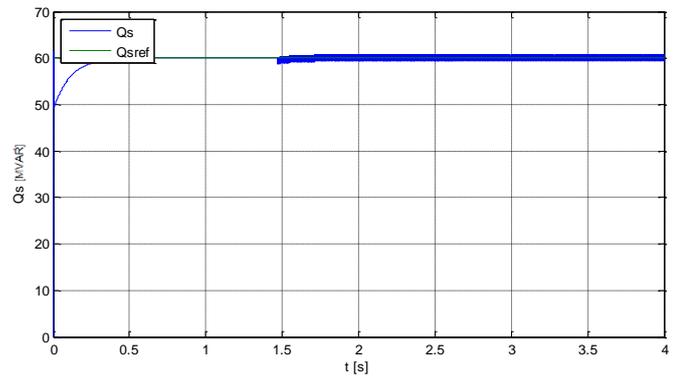
Figure 1.5 : Résultat de simulation pour un creux de tension

○ Erreurs paramétriques

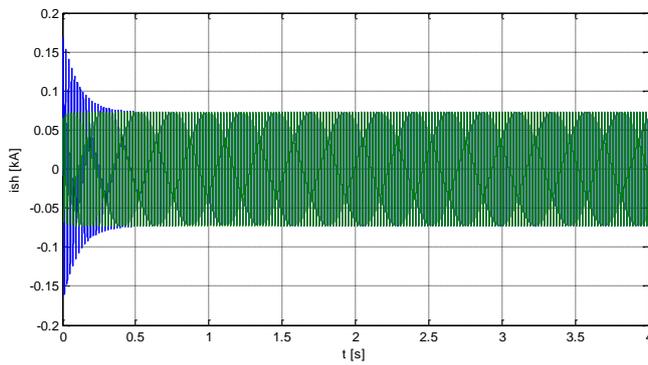
Cette simulation se base sur les perturbations décrites précédemment par le tableau 6.1.



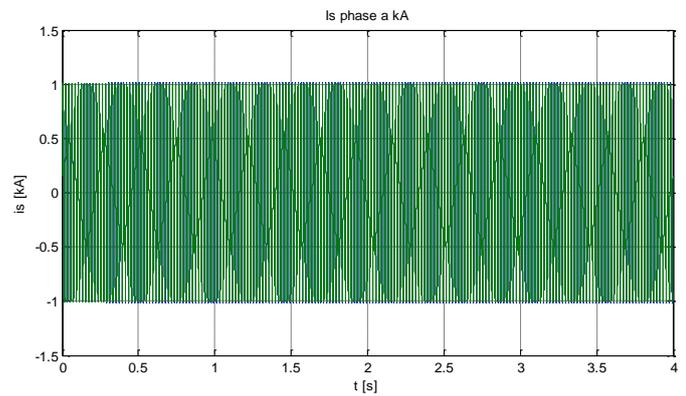
Puissance active en aval



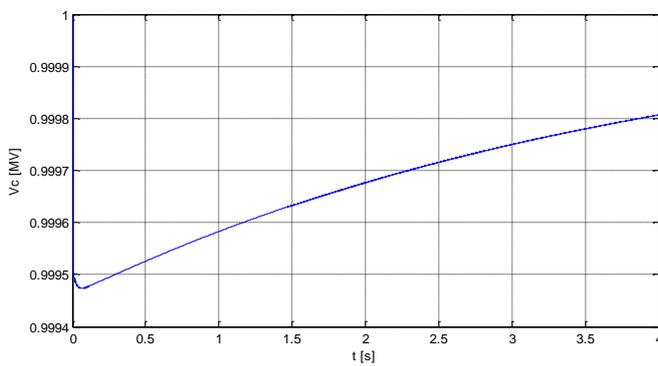
Puissance réactive en aval



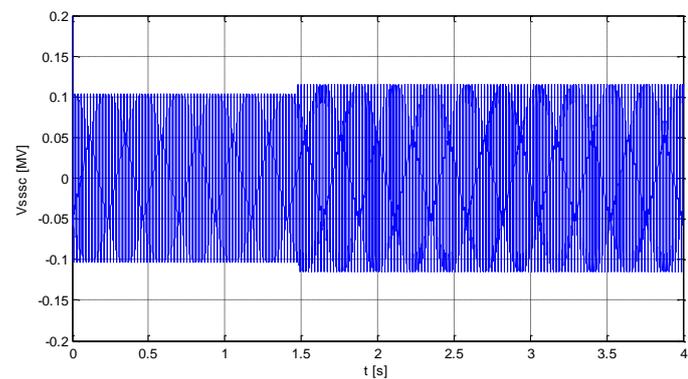
Courant injecté par le STATCOM



Courant de la ligne



Tension aux bornes du condensateur de couplage



Tension injectée par le SSSC

Figure 1.6 : Résultats de simulation pour les erreurs paramétriques

1.6 Commande floue adaptative directe stable étendue

1.6.1 Formulation du problème

Considérons la classe des systèmes dynamiques non linéaires MIMO dont l'équation dynamique est écrite sous la forme (6.26):

$$U_i = F_i(X)y_i^{(n)} + G_i(X)$$

Où X est le vecteur d'état, U_i, y_i sont l'entrée et la sortie du système, $F_i(X)$ et $G_i(X)$ sont des fonctions non linéaires. Nous supposons que $F_i(X)$ est un vecteur défini positif, telle que sa dérivée temporelle vérifie la condition (6.27) :

$$\left| \dot{F}_i(X) \right| \leq F_{i0} \|X\|$$

On définit comme suit:

- Le vecteur de l'erreur de poursuite :

$$e_{i,0} = [e_i \dot{e}_i \dots e_i^{(n-1)}]^T \quad (6.49)$$

Avec

$$e_i = y_{d,i} - y_i \quad (6.50)$$

- L'erreur de poursuite filtrée:

$$s_i = \left(I \frac{d}{dt} + \lambda_i \right)^{n-1} e_i \quad (6.51)$$

Qui peut être écrite sous la forme :

$$s_i = C_i e_{0,i} \quad (6.52)$$

Où

$$C_i = [\lambda_i^{n-1} (n-1)\lambda_i^{n-2} \dots I] \quad (6.53)$$

- Le signal de référence :

$$y_{r,i}^{(n)} = y_{d,i}^{(n)} + C_{r,i} e_{0,i} \quad (6.54)$$

Avec :

$$C_{r,i} = [0 \lambda_i^{n-1} (n-1)\lambda_i^{n-2} \dots (n-1)\lambda_i] \quad (6.55)$$

1.6.2 Approximation par les systèmes flous

Les fonctions non linéaires $F_i(X)$ et $G_i(X)$ sont inconnues, les systèmes flous sont utilisés pour la construction de ces fonctions. Nous supposons qu'il existe des systèmes flous de la forme $W(X) \theta$, tel que :

$$\begin{aligned} F_i(X) &= W_{F,i}(X) \theta_{F,i} + \varepsilon_{F,i} \\ G_i(X) &= W_{G,i}(X) \theta_{G,i} + \varepsilon_{G,i} \end{aligned} \quad (6.56)$$

Avec $\varepsilon_{F,i}$ et $\varepsilon_{G,i}$ sont les erreurs de reconstruction des fonctions $F_i(X)$ et $G_i(X)$ tel que :

$$\begin{aligned} |\varepsilon_{F,i}| &\leq \bar{\varepsilon}_{F,i} \\ |\varepsilon_{G,i}| &\leq \bar{\varepsilon}_{G,i} \end{aligned} \quad (6.57)$$

Les fonctions estimées générées par les systèmes flous sont données par :

$$\begin{aligned} \hat{F}_i(X) &= W_{F,i}(X) \hat{\theta}_{F,i} \\ \hat{G}_i(X) &= W_{G,i}(X) \hat{\theta}_{G,i} \end{aligned} \quad (6.58)$$

Ou $\hat{\theta}_{F,i}$ et $\hat{\theta}_{G,i}$ sont les paramètres à calculer par un algorithme d'adaptation approprié.

1.6.3 Synthèse de la commande

Notre système est d'ordre $n = 1$, et $i = \overline{1,4}$

A partir des fonctions floues estimées, nous choisissons la loi de commande suivante :

$$U_i = k_{d,i} s_i + \frac{1}{2} F_{0,i} ||x|| s_i + W_{F,i}(X) \hat{\theta}_{F,i} y_{r,i}^{(n)} + W_G \hat{\theta}_{G,i} + k_i \text{sgn}(s_i) \quad (6.59)$$

Ou k_i est le gain du terme du mode de glissement donné par :

$$k_i = \bar{\varepsilon}_{F,i} |y_{r,i}^{(n)}| + \bar{\varepsilon}_{G,i} \quad (6.60)$$

Les paramètres du contrôleur flou sont ajustés par la loi d'adaptation suivante :

$$\begin{aligned} \hat{\theta}_{F,i} &= \gamma_{F,i} W_{F,i}(X) s_i y_{r,i}^{(n)} \\ \hat{\theta}_{G,i} &= \gamma_{G,i} W_{G,i}(X) s_i \end{aligned} \quad (6.61)$$

Ou $\gamma_{F,i}$ et $\gamma_{G,i}$ sont des constantes positives.

La structure de la commande :

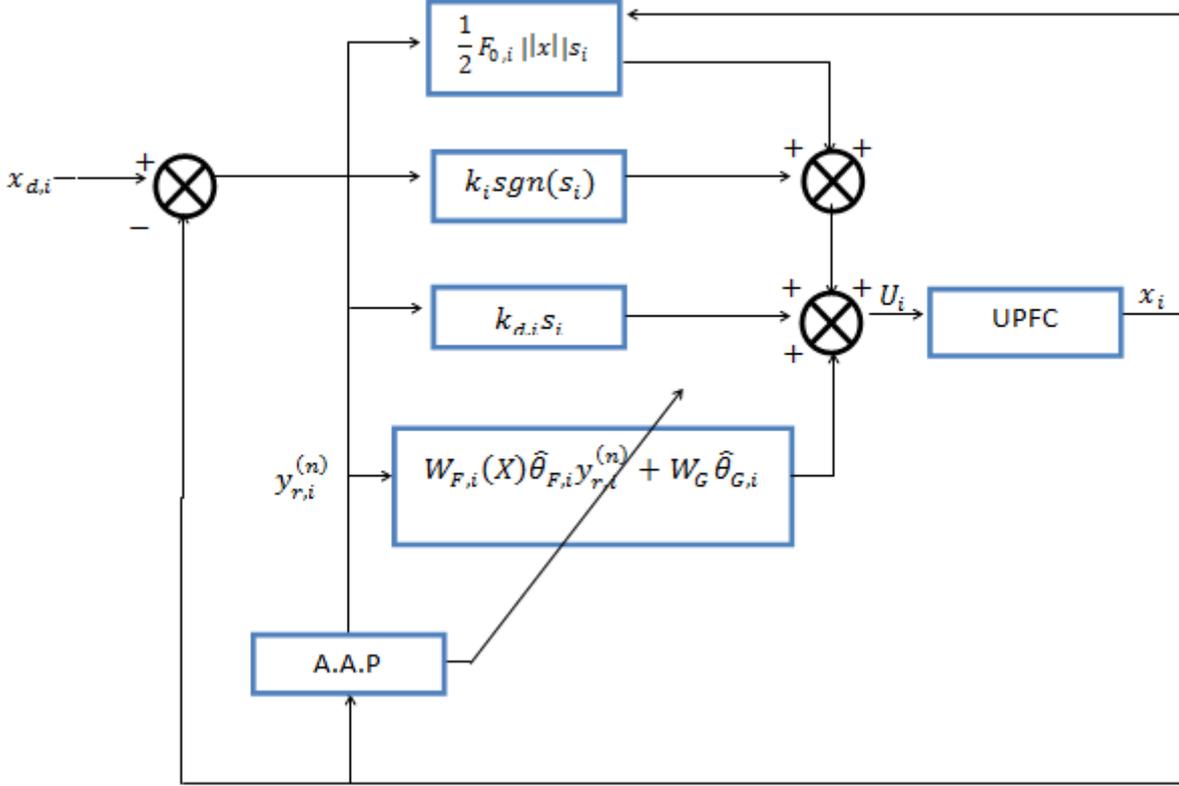


Figure 1.7 : structure de la commande floue adaptative stable étendue

1.6.4 Analyse de la stabilité

Considérons la fonction de Lyapunov suivante :

$$V_i = \frac{1}{2}F_i s_i^2 + \frac{1}{2\gamma_{F,i}}\tilde{\theta}_F^2 + \frac{1}{2\gamma_{G,i}}\tilde{\theta}_G^2 \quad (6.62)$$

$$\tilde{\theta}_{F_i} = \hat{\theta}_{F_i} - \theta_{F_i} \text{ et } \tilde{\theta}_{G_i} = \hat{\theta}_{G_i} - \theta_{G_i} \quad (6.63)$$

La dynamique de l'erreur filtrée s en boucle fermée est donnée par :

$$F_i \dot{s}_i = -k_{d,i}s_i - \frac{1}{2}F_{0,i}|x||s_i| - W_{F,i}(X)\tilde{\theta}_{F,i}y_{r,i}^{(n)} - W_G\tilde{\theta}_{G,i} - k_i \text{sgn}(s_i) + \varepsilon_{F,i}y_{r,i}^{(n)} + \varepsilon_{G,i} \quad (6.64)$$

En dérivant la fonction de Lyapunov nous obtenons :

$$\dot{V}_i = \frac{1}{2}\dot{F}_i s_i^2 + F_i s_i \dot{s}_i + \frac{1}{\gamma_{F,i}}\tilde{\theta}_F \dot{\tilde{\theta}}_F + \frac{1}{\gamma_{G,i}}\tilde{\theta}_G \dot{\tilde{\theta}}_G \quad (6.64)$$

$$\begin{aligned} \dot{V}_i = & \frac{1}{2} \dot{F}_i s_i^2 - k_{d,i} s_i^2 - \frac{1}{2} F_{0,i} \|x\| s_i^2 - W_{F,i}(X) \tilde{\theta}_{F,i} y_{r,i}^{(n)} s_i - W_G \tilde{\theta}_{G,i} s_i - s_i k_i \text{sgn}(s_i) + \varepsilon_{F,i} y_{r,i}^{(n)} s_i + \\ & \varepsilon_{G,i} s_i + \frac{1}{\gamma_{F,i}} \tilde{\theta}_F \hat{\theta}_F + \frac{1}{\gamma_{G,i}} \tilde{\theta}_G \hat{\theta}_G \end{aligned} \quad (6.66)$$

le premier terme : $-k_{d,i} s_i^2$ avec $k_{d,i}$ positive pour $i = \overline{0,4}$ est ≤ 0

le deuxieme terme : $\frac{1}{2} \dot{F}_i s_i^2 - \frac{1}{2} F_{0,i} \|x\| s_i^2$ est ≤ 0 car: (6.27)

le troisieme terme : $-W_{F,i}(X) \tilde{\theta}_{F,i} y_{r,i}^{(n)} s_i + \frac{1}{\gamma_{F,i}} \tilde{\theta}_F \hat{\theta}_F - W_G \tilde{\theta}_{G,i} s_i + \frac{1}{\gamma_{G,i}} \tilde{\theta}_G \hat{\theta}_G$

est nul, car: (6.61)

le quatrieme et dernier terme : $-s_i k_i \text{sgn}(s_i) + \varepsilon_{F,i} y_{r,i}^{(n)} s_i + \varepsilon_{G,i} s_i$ est ≤ 0

car (6.57) et (6.60)

Alors, la dérivée temporelle de la fonction de Lyapunov vérifie :

$$\dot{V}_i \leq -k_{d,i} s_i^2$$

Donc s converge asymptotiquement vers zéro et tous les signaux du système sont bornés.

1.6.5 Simulation

○ Creux de tension

Un creux de tension est supposé survenir sur le réseau en sortie d'une diminution de 25% de la valeur nominale de la tension en sortie à l'instant $t = 1.4$ s et dure 60ms. Les simulations ont montrées les graphes suivant :

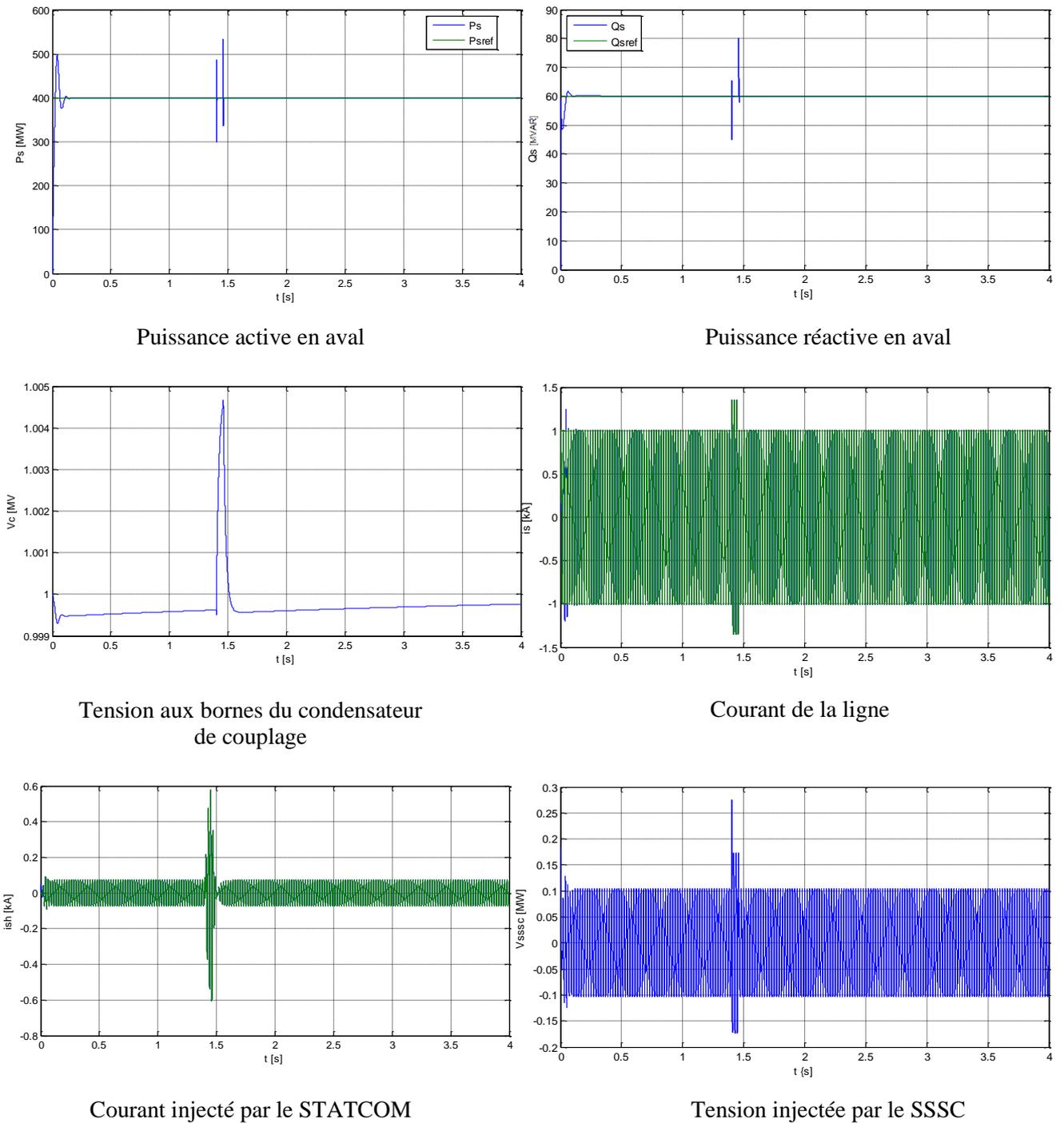
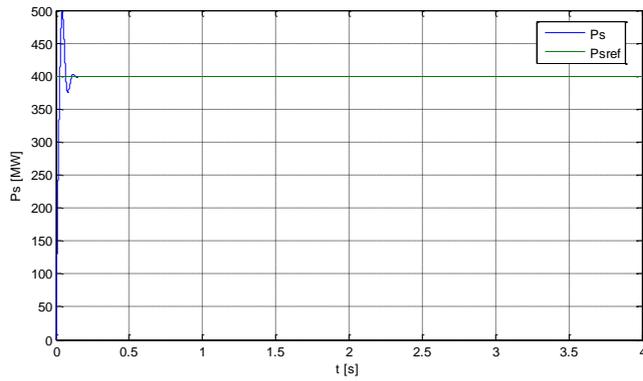


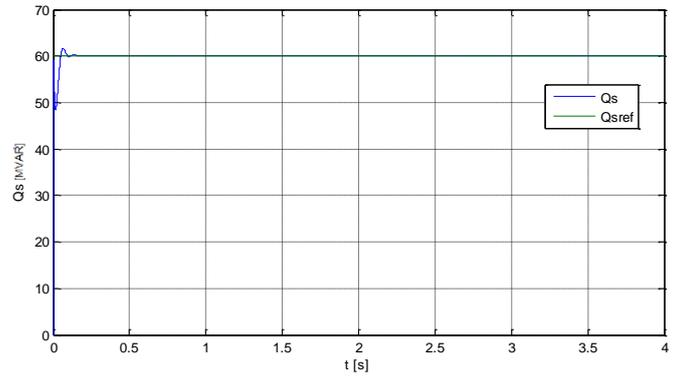
Figure 1.8 : Résultats de simulation pour un creux de tension

○ **erreurs paramétriques**

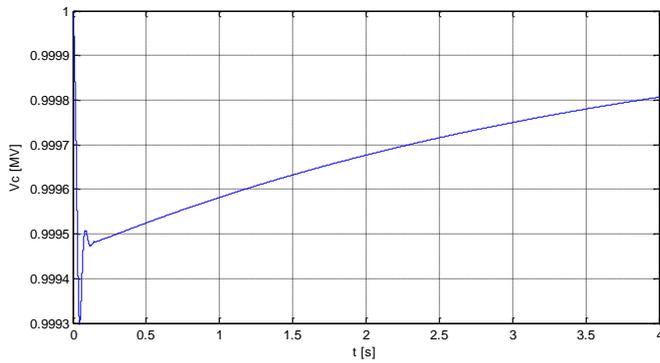
Cette simulation se base sur les perturbations décrites précédemment par le tableau 6.1.



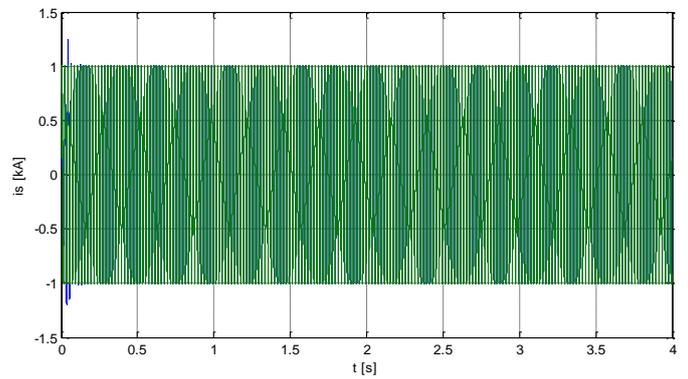
Puissance active en aval



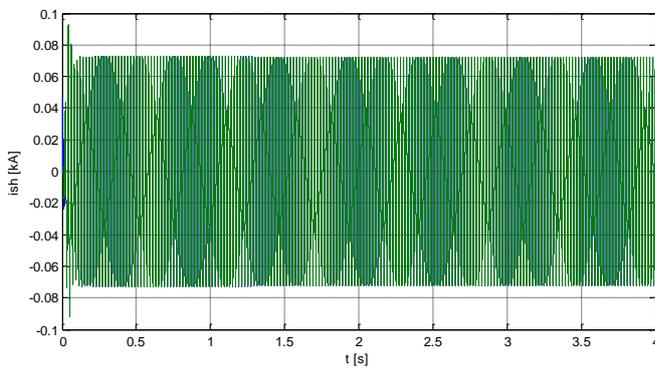
Puissance réactive en aval



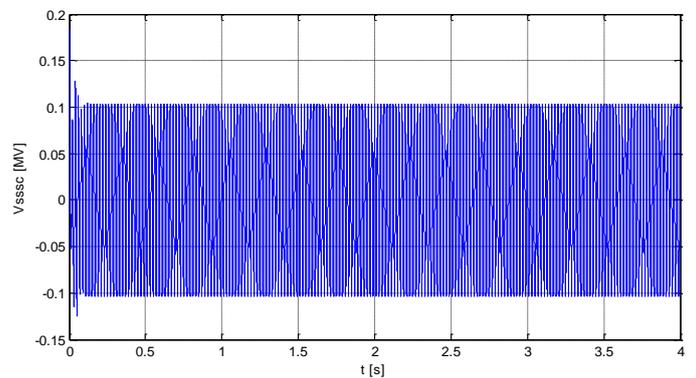
Tension aux bornes du condensateur de couplage



Courant de la ligne



Courant injecté par le STATCOM



Tension injectée par le SSSC

Figure 1.9 : simulations en présence des erreurs paramétriques

1.7 Commande floue adaptative directe stable généralisée

La méthode de commande étudiée dans les sections précédentes nécessitent la spécification de quelques paramètres de synthèse telles que les bornes des erreurs de reconstruction. Afin de résoudre de tels problèmes, un autre type de commande floue adaptative est synthétisé dans cette section qui permet l'estimation en ligne de ces paramètres.

1.7.1 structure de la commande

Dans le cas précédent, la loi de commande adaptative développée pour le système (6.26) la limite $F_{0,i}$ de la fonction $||\hat{F}_i(X)||$ et les limites de l'erreur de reconstruction $\bar{\epsilon}_{F,i}$ et $\bar{\epsilon}_{G,i}$ associées respectivement à la fonction $F_i(X)$ et $G_i(X)$ sont fixes. Dans cette section, nous supposons que les paramètres $F_{0,i}$, $\bar{\epsilon}_{F,i}$ et $\bar{\epsilon}_{G,i}$ sont inconnus et nous proposons une loi adaptative pour ces paramètres qui force le système à suivre la trajectoire désirée.

La commande appliquée au système (6.26), utilisant les fonctions floues estimées est calculées selon la relation suivante [37]

$$U_i = k_{d,i}s_i + \frac{1}{2}\hat{F}_{0,i} ||x||s_i + W_{F,i}(X)\hat{\theta}_{F,i}y_{r,i}^{(n)} + W_G\hat{\theta}_{G,i} + (\bar{\epsilon}_{F,i} ||y_{r,i}^{(n)}|| + \bar{\epsilon}_{G,i})\text{sgn}(s_i) \quad (6.67)$$

$$\begin{aligned} \hat{F}_{0,i} &= \gamma_i ||x_i|| \cdot ||s_i|| \\ \hat{k}_{F,i} &= \gamma_i ||y_{r,i}^{(n)}|| \cdot ||s_i|| \\ \hat{k}_{G,i} &= \gamma_i ||s_i|| \end{aligned} \quad (6.68)$$

γ_i est une constante positive contrôlant la vitesse d'adaptation des coefficients.

Les paramètres $\theta_{F,i}$ et $\theta_{G,i}$ du correcteur flou sont ajustés par la loi d'adaptation suivante :

$$\begin{aligned} \hat{\theta}_{F,i} &= \gamma_{F,i} W_{F,i}(X) s_i y_{r,i}^{(n)} \\ \hat{\theta}_{G,i} &= \gamma_{G,i} W_{G,i}(X) s_i \end{aligned} \quad (6.69)$$

Avec $\gamma_{F,i}$ et $\gamma_{G,i}$ sont des constantes positives.

La structure de la commande :

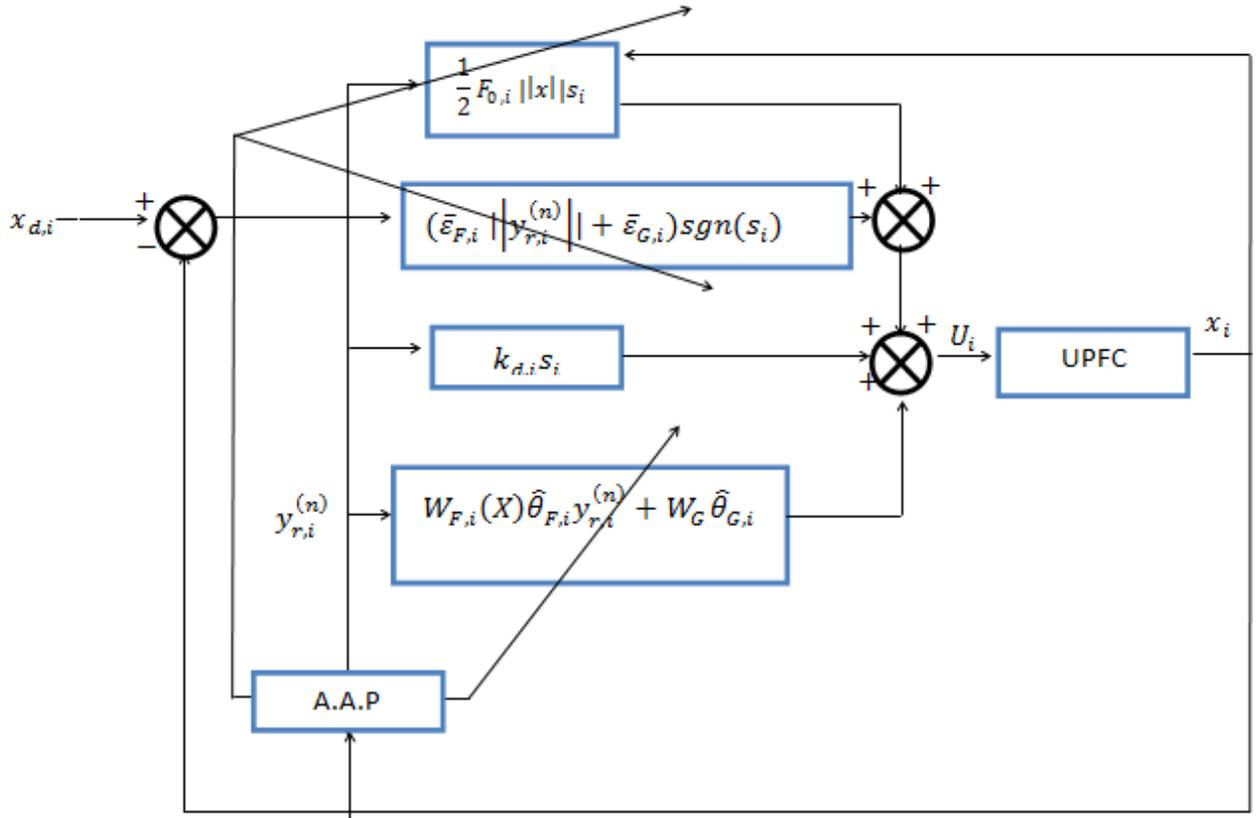


Figure 1.10 : structure de la commande floue adaptative directe stable généralisée

1.7.2 Analyse de la stabilité

Dans le but de démontrer la stabilité du système bouclé, nous choisissons la fonction de Lyapunov suivante :

$$V_i = \frac{1}{2} F_i s_i^2 + \frac{1}{2\gamma_{F,i}} \tilde{\theta}_F^2 + \frac{1}{2\gamma_{G,i}} \tilde{\theta}_G^2 + \frac{1}{2\gamma_i} \tilde{F}_{0,i}^2 + \frac{1}{2\gamma_i} \tilde{k}_{F,i}^2 + \frac{1}{2\gamma_i} \tilde{k}_{G,i}^2 \quad (6.70)$$

$$\tilde{\theta}_{Fi} = \hat{\theta}_{Fi} - \theta_{Fi} \text{ et } \tilde{\theta}_{Gi} = \hat{\theta}_{Gi} - \theta_{Gi}$$

$$\tilde{F}_{0,i} = \hat{F}_{0,i} - F_{0,i}, \tilde{k}_{F,i} = \hat{k}_{F,i} - k_{F,i} \text{ et } \tilde{k}_{G,i} = \hat{k}_{G,i} - k_{G,i}$$

$$k_{F,i} = \bar{\epsilon}_{F,i}, k_{G,i} = \bar{\epsilon}_{G,i} \quad (6.71)$$

La dynamique de l'erreur filtrée s en boucle fermée est donnée par :

$$F_i \dot{s}_i = -k_{d,i} s_i - \frac{1}{2} F_{0,i} \|x\| |s_i - W_{F,i}(X) \tilde{\theta}_{F,i} y_{r,i}^{(n)} - W_G \tilde{\theta}_{G,i} - (\bar{\varepsilon}_{F,i} \|y_{r,i}^{(n)}\| + \bar{\varepsilon}_{G,i}) \operatorname{sgn}(s_i) + \varepsilon_{F,i} y_{r,i}^{(n)} + \varepsilon_{G,i} \quad (6.72)$$

En dérivant la fonction de Lyapunov nous obtenons :

$$\dot{V}_i = \frac{1}{2} \dot{F}_i s_i^2 + F_i s_i \dot{s}_i + \frac{1}{\gamma_{F,i}} \tilde{\theta}_F \dot{\hat{\theta}}_F + \frac{1}{\gamma_{G,i}} \tilde{\theta}_G \dot{\hat{\theta}}_G + \frac{1}{\gamma_i} \tilde{F}_{o,i} \dot{\hat{F}}_{o,i} + \frac{1}{\gamma_i} \tilde{k}_{F,i} \dot{\hat{k}}_{F,i} + \frac{1}{\gamma_i} \tilde{k}_{G,i} \dot{\hat{k}}_{G,i} \quad (6.73)$$

En utilisant l'équation de la dynamique de l'erreur filtrée, la dérivée de V_i devient :

$$\dot{V}_i = \frac{1}{2} \dot{F}_i s_i^2 - k_{d,i} s_i^2 - \frac{1}{2} F_{0,i} \|x\| |s_i^2 - W_{F,i}(X) \tilde{\theta}_{F,i} y_{r,i}^{(n)} s_i - W_G \tilde{\theta}_{G,i} s_i - s_i (\bar{\varepsilon}_{F,i} \|y_{r,i}^{(n)}\| + \bar{\varepsilon}_{G,i}) \operatorname{sgn}(s_i) + \varepsilon_{F,i} y_{r,i}^{(n)} s_i + \varepsilon_{G,i} s_i + \frac{1}{\gamma_{F,i}} \tilde{\theta}_F \dot{\hat{\theta}}_F + \frac{1}{\gamma_{G,i}} \tilde{\theta}_G \dot{\hat{\theta}}_G + \frac{1}{\gamma_i} \tilde{F}_{o,i} \dot{\hat{F}}_{o,i} + \frac{1}{\gamma_i} \tilde{k}_{F,i} \dot{\hat{k}}_{F,i} + \frac{1}{\gamma_i} \tilde{k}_{G,i} \dot{\hat{k}}_{G,i} \quad (6.74)$$

le premier terme : $-k_{d,i} s_i^2$ avec $k_{d,i}$ positive pour $i = \overline{0,4}$ est ≤ 0

le deuxieme terme : $\frac{1}{2} \dot{F}_i s_i^2 - \frac{1}{2} F_{0,i} \|x\| |s_i^2 + \frac{1}{\gamma_{F,i}} \tilde{\theta}_F \dot{\hat{\theta}}_F$ est ≤ 0 **car**: (6.68)

le troisieme terme: $-W_{F,i}(X) \tilde{\theta}_{F,i} y_{r,i}^{(n)} s_i + \frac{1}{\gamma_{F,i}} \tilde{\theta}_F \dot{\hat{\theta}}_F - W_G \tilde{\theta}_{G,i} s_i + \frac{1}{\gamma_{G,i}} \tilde{\theta}_G \dot{\hat{\theta}}_G$ est nul, **car**: (6.68)

le quatrieme et dernier terme: $-s_i (\bar{\varepsilon}_{F,i} \|y_{r,i}^{(n)}\| + \bar{\varepsilon}_{G,i}) \operatorname{sgn}(s_i) + \varepsilon_{F,i} y_{r,i}^{(n)} s_i + \varepsilon_{G,i} s_i + \frac{1}{\gamma_i} \tilde{k}_{F,i} \dot{\hat{k}}_{F,i} + \frac{1}{\gamma_i} \tilde{k}_{G,i} \dot{\hat{k}}_{G,i}$ est ≤ 0 **car**: (6.68)

Alors, la dérivée temporelle de la fonction de Lyapunov vérifie :

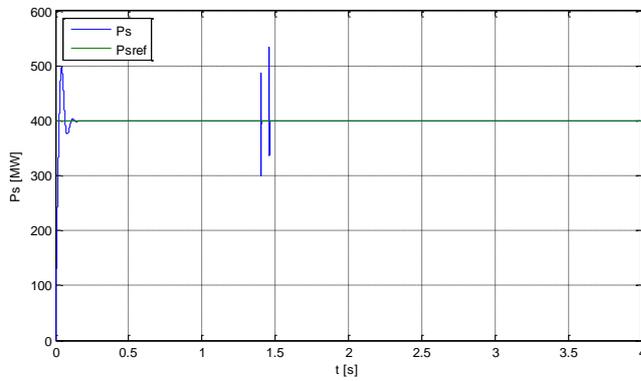
$$\dot{V}_i \leq -k_{d,i} s_i^2$$

Par conséquent, s converge asymptotiquement vers zéro et tous les signaux du système sont bornés.

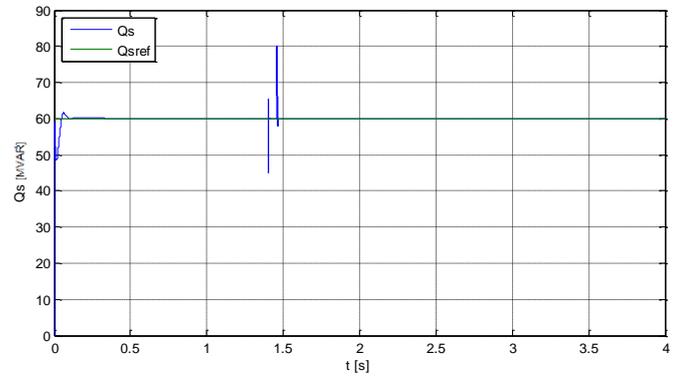
1.7.3 Simulation

o Creux de tension

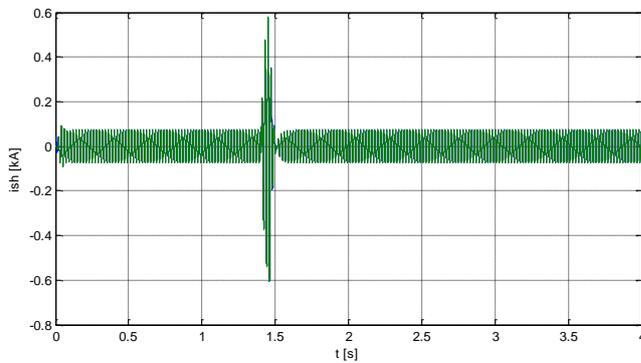
Un creux de tension est supposé survenir sur le réseau en sortie d'une diminution de 25% de la valeur nominale de la tension en sortie à l'instant $t = 1.4$ s et dure 60ms. Les simulations ont montrées les graphes suivant :



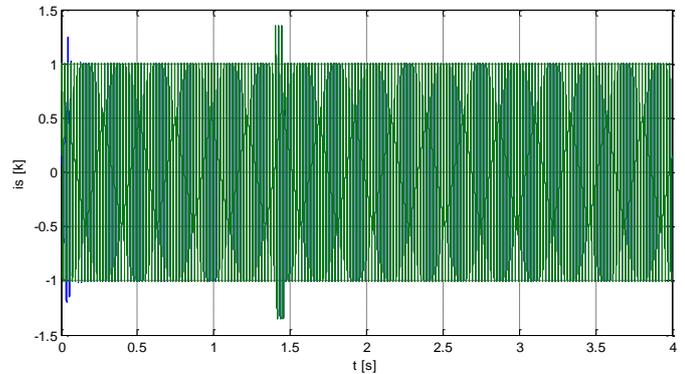
Puissance active en aval



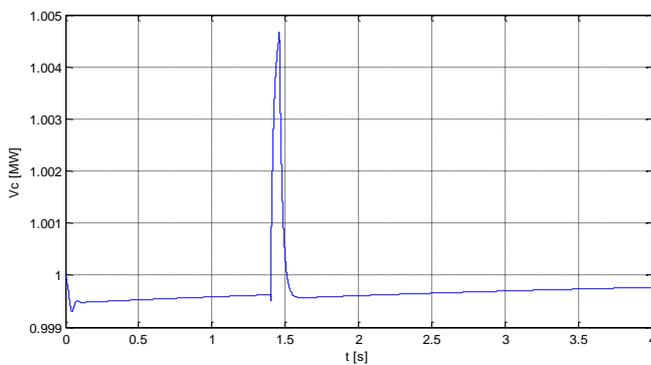
Puissance réactive en aval



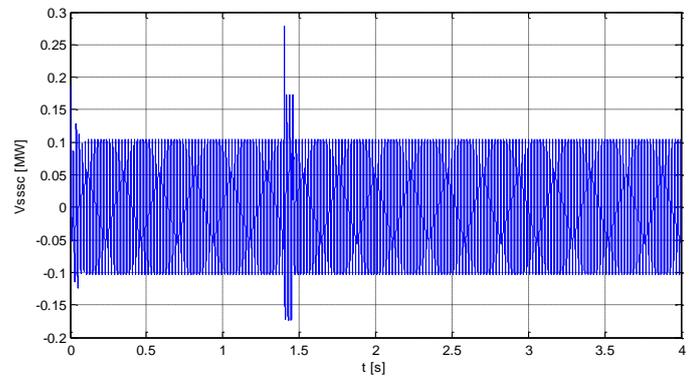
Courant injecté par le STATCOM



Courant de la ligne



Tension aux bornes du condensateur de couplage

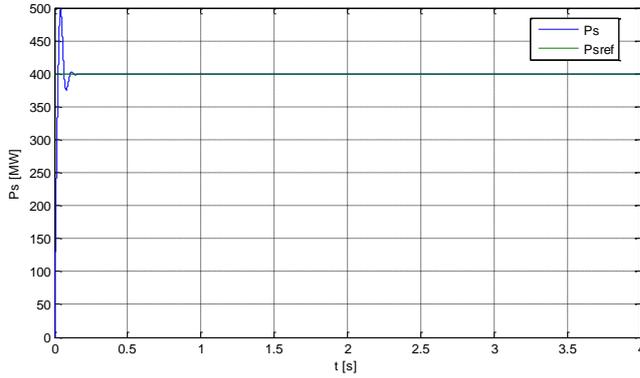


Tension injectée par le SSSC

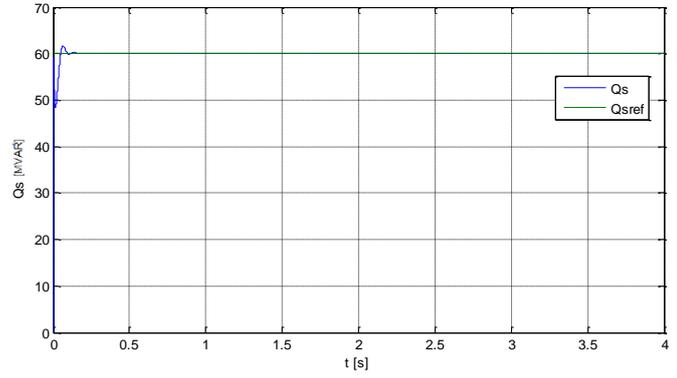
Figure 1.11 : Résultat de simulation pour un creux de tension

○ Erreurs paramétriques

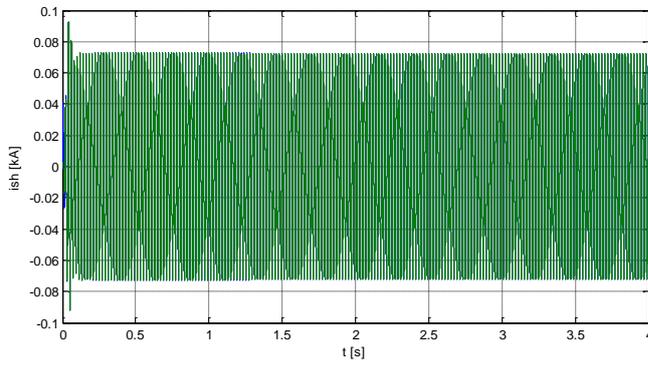
Cette simulation se base sur les perturbations décrites précédemment par le tableau 6.1.



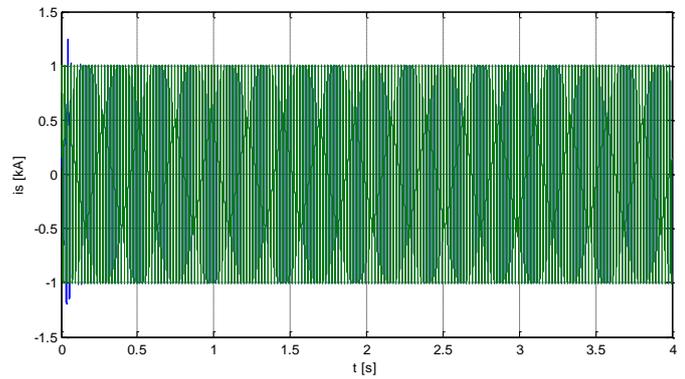
Puissance active en aval



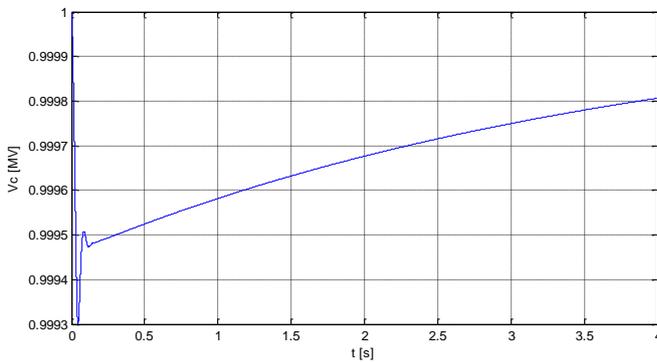
Puissance réactive en aval



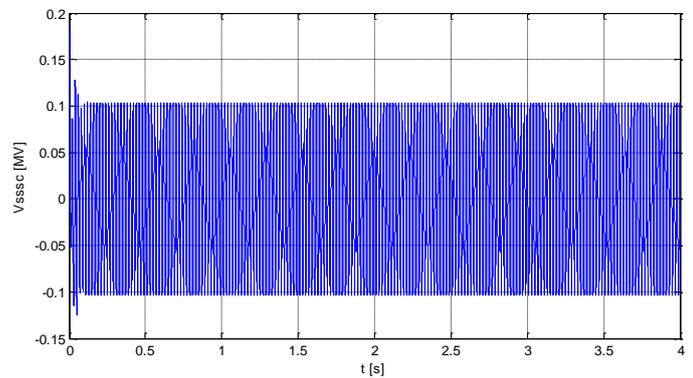
Courant injecté par le STATCOM



Courant de la ligne



Tension aux bornes du condensateur de couplage



Tension injectée par le SSSC

Figure 1.12 : Résultats de simulation en présence d'incertitudes paramétriques

Le système répond parfaitement aux défauts sur la ligne en injectant des commandes et avec une variation progressive acceptable.

Cette commande assure la stabilité sans la connaissance d'aucun des paramètres du système et assure parfaitement la poursuite de la référence sans être influencé par les variations paramétriques de la ligne.

1.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons investi les possibilités offertes par les systèmes flous de type sugeno, en termes de capacité d'approximation des fonctions non linéaires continues afin de développer des stratégies de commande adaptative directe pour l'UPFC. Ainsi, nous nous sommes intéressés à la commande PI floue adaptative, la commande floue adaptative directe stable, la commande floue adaptative directe stable étendue, la commande floue adaptative directe stable généralisée.

Ces techniques de commande utilisent la théorie de l'approximation et celle de Lyapunov pour établir une loi d'adaptation paramétrique assurant la bornitude de tous les signaux du système et de l'erreur des paramètres des systèmes flous. Afin de compenser les effets des erreurs de reconstruction, on introduit le terme du mode de glissement. A partir des résultats obtenus, les quatre techniques de commande présentent de bonnes performances. Néanmoins, la commande PI floue adaptative, nécessite la connaissance des paramètres du système.

Pour pallier ce problème nous avons proposés la commande floue adaptative directe stable et la commande floue adaptative directe stable étendue. Ces deux commandes nécessitent la spécification de certains paramètres de synthèse, telles que les bornes des erreurs de reconstruction. Pour éviter cela, nous avons fait recours à une dernière technique qui est la commande floue adaptative directe stable généralisée où les bornes des erreurs de reconstruction sont ajustées par des lois d'adaptation.

Les techniques de commande floue adaptative directe sont testées pour les variations paramétriques du système. Les résultats obtenus, nous ont permis de juger que ces techniques présentent une robustesse en présence des variations paramétriques.

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire de master a consisté en la mise au point de quatre commandes basées sur le flou adaptatif. Ces commandes garantissent la convergence asymptotique de l'erreur de poursuite. Pour atteindre cet objectif, des théories puissantes telles que la théorie d'approximation, la théorie de Lyapunov et celle des modes glissants. La commande PI floue adaptative était la première stratégie étudiée. La deuxième et la troisième stratégie étudiée sont la commande floue adaptative directe stable et la commande floue adaptative directe stable étendue. Ces trois dernières méthodes de commande nécessitent la spécification de certains paramètres de synthèse telle que les bornes de l'erreur de reconstruction. Le choix de ces paramètres est subjectif. Ainsi pour surmonter ce problème, une quatrième et dernière technique de commande a été étudiée sous le nom de commande floue adaptative directe stable généralisée, cette technique est plus générale que la troisième car, elle ne nécessite pas la spécification des termes de majoration et des bornes des erreurs de reconstruction. En effet, elle utilise un mécanisme d'adaptation pour estimer ces paramètres en ligne.

Dans ces types de commandes, le système flou est employé pour décrire directement la loi de commande et les paramètres du système flou sont directement ajustés pour atteindre les objectifs de commande.

Comme perspectives, il serait intéressant d'étendre l'étude au cas d'une interconnexion reliant un système de production à un réseau infini et de voir l'apport de l'UPFC dans l'amortissement des oscillations hypo-synchrones limitant dans certaines situations le transit de puissance en affaiblissant les lignes.

Bibliographie

- [1] E. G. SHAHRAKI, "Apport de l'UPFC à l'amélioration de la stabilité," Nancy, Octobre 2003.
- [2] L.Lasne, Electrotechnique, Dunod, 2008.
- [3] "Réseau électrique," in *Wikipedia*.
- [4] h.-t.-c.-m.-m.-3.-3.-4. Le réglage de la tension.
- [5] F. C. L. P. Eric Labouré, Compatibilité électromagnétique.
- [6] D. M. Mputu, Analyse statistique et critique des pannes survenant dans un réseau de distribution électrique, Institut supérieur de technique appliquée - en électricité,, 2004.
- [7] F. Kouadra, . Étude des variations rapides de tension pour le raccordement d'une production décentralisée dans un réseau mt, Mentouri de Constantine, 2008.
- [8] M. Crape, Stabilité et sauvegarde des réseaux électriques, Lavoisier, 2006..
- [9] W. Théodore, Electrotechnique, Les presses de l'université Laval, Québec etOttawa, 2001.
- [10] E. G. SHAHRAKI, "Apport de l'UPFC à l'amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques," Nancy, 13 Octobre 2003.
- [11] R. J. P. F, Nouveaux matériels pour réguler les flux de puissance :transformateur déphaseur et réactance série..
- [12] R. /. D. E. d. S. É. (DESE), MÉMENTO DE LA SÛRETÉ, Paris, 2004.
- [13] C. Emmanuelle, Evolutions techniques du système de transport et de distributiond'électricité, in J3eA, Vol. 5, 2006.
- [14] A. H. e. H. CHEKIREB, Commande Linéarisante Centralisée d'une Interconnexion Electrique THT Equipée d'un UPFC, Alger.
- [15] A. Hasanovic, Modeling and Control of the Unified Power Flow Controller (UPFC), Morgantown, West Virginia, 2000.
- [16] L. G. Narain G. Hingoranl, "Understanding FACTS".*IEEE Press*.
- [17] K. CHIKHI, Contribution à l'analyse de la qualité de l'énergie électrique dans le cas de la stabilité de tension, l'université de El HadjLakbdar Batna, 14 novembre 2007.

- [18] E. Samuel, Identification, analyse des contrôleurs statiques de réseaux de transport d'énergie électrique, université de Douala, Cameroun. .
- [19] C. A. C. J. R. Edvina Uzunovic, EMTP Studies of UPFC Power Oscillation Damping, San Luis Obispo, California., October 1999.
- [20] M. I. A. Nabavi-Niaki, "STEADY-STATE AND DYNAMIC MODELS OF UNIFIED POWER FLOW CONTROLLER (UPFC) FOR POWER," *IEEE Transactions on Power Systems*, pp. Vol. 11, No. 4, November 1996.
- [21] M. Sugeno, Structure identification of fuzzy models, 1988.
- [22] B. M. Bernadette, La logique floue et ces application, France, 1995.
- [23] B. B. Meunier, La logique floue et ces application, addisonwesley wesley France, 1995.
- [24] H. Scholten, Logique floue et régulation PID, théorie et pratique de la régulation active avec interface à réaliser soi-même et programme d'expérimentation publitronec, 1995.
- [25] L. Zadeh, Fuzzy sets, Information and control, vol. 8, 1965.
- [26] E. Mamdani, Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant, IEEE, PP. 1585-1588, 1974.
- [27] L. Zadeh, Outline of new approach to the analysis of complex systems and decision, IEEE.Trans. SMC, vol.3, pp. 28-44, 1973.
- [28] S. Y. K.M. Passino, Fuzzy control, 1998.
- [29] S. Y. K.M. Passino, Fuzzy control, Addison-wesley, longman Inc, 1998.
- [30] E. Mamdani, Application of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic synthesis, IEEE, vol.30, PP. 1182-1191, 1977.
- [31] W. Z. G. Nagib, Application of fuzzy control to non-linear thermal process, proc.31st conf. Dec.contr,pp. 1154-1159, 1992.
- [32] J. S. H. H. M. Cao, Fuzzy logic based controller for induction motor drives, IEEE. Trans. Fuzzy systems, pp. 631-634, 2000.
- [33] W. H.A.F. Mohamed, A fuzzy logic vector of induction motor, IEEE.Trans. fuzzy systems, vol. 3, pp. 324-328, 2000.
- [34] L. D. M. Yang Jianqiang, A New Method of Gain Stabilization and its Fuzzy-PID Control Algorithm for Ring Laser Gyro, IEEE, pp 392-394.
- [35] A. G. a. S. Z. M.T. Benchouia, Modélisation et simulation d'un asservissement à vitesse variable

avec logique floue, 3eme conférence on electrical engineering, 2004.

[36] D. M. a. A. benallegue, a robust nonlinear controller using neural networks.

[37] L. Salim, commande adaptative par les système flou, application au robot manipulateur.

[38] G. M. Sugeno, Fuzzy identification of systems and its applications to modeling control, IEEE trans. Syst, Man, cybern,, 1985.

[39] G. M. Sugeno, Structure identification of fuzzy models, Fuzzy sets and systems, vol.28, pp. 15-33, 1988.

[40] M. Sugeno, Industrial applications of fuzzy control, édition Amesterdam, 1985.

[41] K. Self, Designing with fuzzy logic, IEEE Specterum, pp.42-45, 1990.

[42] L. Wang, Adaptive fuzzy systems and control, design and analysis Prentice-hall, englewood clifs, Nj, 1994.