

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 DIPLOME

D'INGENIEUR D'ETAT EN AUTOMATIQUE

THEME

**Commande 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.....	15
1. Réseau électrique.....	18
1.1 Introduction.....	18
1.2 Structure générale des réseaux électriques.....	19
1.3 Types de structure des réseaux électriques.....	21
1.4 Problèmes survenant sur le réseau.....	22
1.4.1 Chute de tension.....	21
1.4.2 Déséquilibre de tension.....	22
1.4.3 Creux de tension.....	22
a. Source de creux de tension et de coupures brèves.....	22
b. Effets de creux de tension et coupures brèves.....	22
1.4.4 Surtension.....	23
1.4.5 Variation de fréquence.....	23
a. Sources de variation de fréquence.....	23
b. Effets des variations de fréquence.....	23
1.4.6 Défaits de ligne.....	23
1.5 Les techniques traditionnelles de contrôle du transit de puissance (Solutions classiques aux problèmes de tension).....	24
1.5.1 Compensateur de puissance réactive rotatif	24
1.5.2 Le transformateur déphaseur.....	25
1.5.3 L'autotransformateur survolteur-dévolteur	25
1.5.4 La compensation série traditionnelle	25
1.5.5 La compensation parallèle traditionnelle	26
1.6 Techniques basées sur les systèmes FACTS.....	26
1.6.1 Les compensateurs séries.....	26
a. Le TCSC.....	27
b. Le TCSR	28
c. Le SSSC	28
1.6.2 Les compensateurs parallèles	28
a. Le SVC	28
b. Le STATCOM	30
1.6.3 Les compensateurs hybrides	31
a. Le TCPAR.....	31

b. L'UPFC.....	31
1.7 Structure générale de l'UPFC.....	32
1.7.1 Présentation des différents blocs constitutifs de l'UPFC.....	33
a. Partie shunt de l'UPFC.....	33
b. Partie série de l'UPFC.....	34
c. Circuit de liaison à courant continu.....	34
d. Le bloc de commande.....	34
1.7.2 Analyse structuro fonctionnelle de l'UPFC.....	34
1.7.3 Performances de l'UPFC.....	35
1.7.4 Apport de l'UPFC à l'amélioration du transit de puissance.....	35
a. Amélioration du transit de la puissance.....	35
b. Variation de l'impédance de la ligne de transport.....	35
1.8 Conclusion.....	36
2. Modélisation du système.....	37
2.1 Introduction.....	38
2.2 Fonctionnement de L'UPFC.....	38
2.3 Modélisation.....	39
2.4 Transformation de Park.....	43
2.5 Modèle du système dans le repère de Park.....	44
2.6 Equations d'état.....	44
2.7 Calcul des puissances	46
2.8 Calcul des courants de références.....	46
2.9 Conclusion.....	47
3. Commande PI classique.....	48
3.1 Introduction	49
3.2 Reformulation du modèle	49
3.3 Principe de commande des courants	49
3.4 Génération des références en puissances shunts.....	52
3.5 Synthèse des correcteurs	52
3.6 Résultats de simulation et interprétation.....	53
3.6.1 Régulation du flux de puissance.....	53
3.6.2 Creux de tension	56

3.6.3	Surtension	58
3.6.4	Court-circuit	59
3.6.5	Incertitude paramétriques	60
3.7	Conclusion	62
4.	Logique Floue.....	63
4.1	Introduction	64
4.2	Concepts de base de la logique floue.....	65
4.2.1	Variables linguistiques et ensembles flous.....	65
4.2.2	Fonctions d'appartenances.....	67
4.2.3	Opérations logiques sur les ensembles flous.....	68
4.2.2.a	Inclusion ou sous-ensemble.....	69
4.2.2.b	Disjonction floue.....	69
4.2.2.c	Conjonction floue.....	69
4.2.2.d	Complément	69
4.2.4	Les règles floues	69
4.2.5	Description et structure d'une commande par la logique floue	70
4.2.10.a	Interface de fuzzification.....	71
4.2.10.b	Interface d'inférence floue.....	71
4.2.10.c	Interface de défuzzification.....	72
5.	Commande PI floue.....	74
5.2	Introduction	75
5.3	Application de la commande PI- floue sur l'UPFC.....	75
5.2.2	Régulateur PI floue à gain fixe.....	76
5.2.3	Synthèse du régulateur.....	76
5.2.1.a	Simulations et résultats.....	80
5.2.2	Régulateur PI floue à gains adaptatifs.....	87
5.2.2.a	Description du régulateur flou à gain de commande adaptatif	
5.2.2.b	Développement de la table de décision	88
5.3	Simulations	90
5.4	Conclusion.....	93

Conclusion générale.....	94
Bibliographie.....	96
Annexe A.....	99
Annexe B.....	101

Table des figures

Figure 1.1 : Réseau électrique simplifié	.....	20
Figure 1.2 : Compensation série : principe et diagramme de Fresnel	.....	25
Figure 1.3 : Structure d'un TCSC	.....	27
Figure 1.4 : Structure d'un TCSR	.....	27
Figure 1.5 : Structure du SVC	.....	29
Figure 1.6 Schéma du SVC accompagné d'un TCBR	.....	29
Figure 1.7 : Schéma de base du STATCOM	.....	30
Figure 1.8 : Schéma de base du TCPAR	.....	31
Figure 1.9 : Schéma de base de l'UPFC	.....	32
Figure 1.10 : schéma simplifié d'un UPFC connecté sur réseau	.....	33
Figure 2.1 : Schéma simplifié d'un UPFC connecté au réseau électrique	.....	39
Figure 2.2 : Modèle de l'UPFC à deux sources	.....	40
Figure 2.3 : Identification des références en courant	.....	47
Figure 3.1 : Schéma global de régulation du courant	.....	51
Figure 3.2 : Schéma d'identification des puissances shunts de référence	.....	52
Figure 3.3 : Résultats des simulations pour un changement de référence	.....	54
Figure 3.4 : Résultats des simulations pour un creux de tension	.....	56
Figure 3.5 : Résultats des simulations pour une surtension	.....	58
Figure 3.6 : Résultats des simulations pour un court-circuit	.....	59
Figure 3.7 : Résultats des simulations pour des incertitudes paramétriques	.....	61
Figure 4.1 : Exemple d'ensembles flous pour la variable température	.....	66
Figure 4.2 : formes usuelles des fonctions d'appartenance	.....	68
Figure 4.3 : Opération sur les ensembles flous	.....	69
Figure 4.4 : Structure interne d'un contrôleur flou	.....	71
Figure 5.1 : Régulateur PI floue à gain fixe	.....	75
Figure 5.2 : Fonctions d'appartenance Gaussiennes	.....	78
Figure 5.3 : Résultats des simulations pour un changement de référence	.....	81

Figure 5.4 : Résultats des simulations pour un creux de tension	.....	83
Figure 5.5 : Résultats des simulations pour un court-circuit	.....	85
Figure 5.6: Schéma de la commande floue à gain adaptatif	.....	87
Figure 5.7: Fonction d'appartenance pour le floue a gain adaptatif	.....	88
Figure 5.8 : Comparaison de la poursuite des références des deux régulateurs lors d'un changement de consigne	.....	92

Liste des tableaux

Tableau 2.1 : Significations des grandeurs électriques	.....	40
Tableau 3.1 : les consignes en puissances	.....	53
Tableau 5.1 : Tableau d'inférence de l'action proportionnelle Kp	.....	78
Tableau 5.2 : Tableau d'inférence de l'action intégrale Ki	.....	79
Tableau 5.3 : Changement de consigne de puissances	.....	80
Tableau 5.4 : Tableau d'inférence pour le floue a gain adaptatif	.....	89
Tableau 5.5 : Les consignes de puissances	.....	90

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

L'industrialisation et la croissance de la population sont les premiers facteurs pour lesquels la demande en énergie électrique ne cesse de croître. En effet, la solution pour avoir un équilibre entre la production et la consommation qui consiste à la construction de nouvelles centrales électriques et de nouvelles lignes de transport s'avère de plus en plus inappropriée. En effet, les coûts liés sont très élevés et cela contribue à la dégradation du milieu naturel. Il est donc important d'avoir des réseaux maillés et de travailler proche des limites de stabilité afin de satisfaire ces nouvelles exigences.

Par ailleurs, Les réseaux maillés subissent entre les zones interconnectées des surcharges de lignes, des problèmes de stabilité et des chutes de tension très élevées, ceci entraîne un mauvais approvisionnement des populations situées en bout de ligne et de toute manière un accroissement des pertes. Les moyens classiques de contrôle des réseaux (transformateurs à prises réglables en charge, transformateurs déphaseurs et compensateurs série ou parallèle commutés par disjoncteurs...etc.) ont montré leur insuffisance à répondre efficacement aux perturbations du réseau, compte-tenu notamment des nouvelles contraintes. Il faudra vraisemblablement, compléter leurs actions en mettant en œuvre des dispositifs électroniques de puissance à grande vitesse de réponse, connus sous l'appellation FACTS (Flexible Alternative Current Transmission Systems) pour le contrôle des réseaux [1].

Les FACTS est une technologie relativement nouvelle, ou le rôle principal est d'améliorer la contrôlabilité et la capacité de transfert de puissance dans les systèmes à courant alternatif, avec une variété de dispositifs semi-conducteurs puissants qui offrent l'avantage de la grande vitesse et la fiabilité de commutation. Le développement de ces dispositifs FACTS ouvre de nouvelles perspectives pour une exploitation plus efficace des réseaux par action continue sur les différents paramètres du réseau (déphasage, tension, impédance). Ainsi, les transits de puissance seront mieux contrôlés et les tensions mieux tenues, ce qui permettra d'augmenter les marges de stabilité des lignes.

Le présent travail est une contribution à l'amélioration du transit de puissance sur un réseau interconnecté par l'utilisation d'un dispositif de la famille des systèmes FACTS et le plus puissant d'entre eux, l'UPFC (Unified Power Flow Controller).

Dans le premier chapitre, les principaux problèmes affectant les réseaux électriques sont définis suivis de la présentation de l'état de l'art des techniques aussi bien traditionnelles que modernes utilisées dans la compensation des réseaux électriques. A l'issue de cette étude, les différentes structures de FACTS (parallèle, série et hybride) en particulier, l'UPFC seront présentées.

Dans le deuxième chapitre, le modèle mathématique de l'UPFC sera développé après avoir explicité son principe de fonctionnement, les méthodes d'identification des références seront également expliquées.

Dans le chapitre trois, le système sera commandé par des régulateurs PI et les simulations du flux de puissance dans différentes conditions seront réalisées, en mettant en considération les améliorations apportées par l'insertion de l'UPFC dans la ligne de puissance.

Le chapitre quatre sera consacré à la commande Floue en raison de sa capacité à traiter des variables floues et d'induire une loi de commande sur la base d'un raisonnement approximatif humain.

L'application de cette logique se fera dans le chapitre cinq par la mise au point d'un régulateur PI flou

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

Chapitre 1

Réseau électrique

1.1 Introduction

La planification et l'exploitation des réseaux électriques subissent des changements fondamentaux et radicaux afin de répondre à la demande croissante en énergie électrique. L'exploitant du réseau est prié de fournir un accès réseau à toute partie intéressée. Ainsi, alors que dans le passé, le flux d'énergie dans les réseaux de distribution était unidirectionnel, maintenant le système doit gérer les flux de puissance bidirectionnels. Cela permet au réseau de distribution d'assumer de plus en plus la fonction d'un réseau d'équilibrage. Au même temps, la capacité de chacun des éléments du réseau électrique peut ne pas être suffisante ce qui limite la quantité d'électricité à transporter ou à distribuer. Par conséquent, le fonctionnement des réseaux de transport et de distribution a été poussé plus vers ses limites techniques engendrant des problèmes de fonctionnement en raison de la tension, l'angle et les problèmes de stabilité de fréquence.

Afin de mieux maîtriser le transit de puissance dans les lignes électriques, un équipement opérationnel innovant basé sur l'électronique de puissance a été conçu pour offrir des solutions nouvelles et puissantes communément désignés par le terme «Flexible AC Transmission Systems» ou dispositifs «FACTS». Un tel équipement est disponible depuis 1988, depuis le lancement d'un projet d'étude d'une nouvelle génération de dispositif de contrôles rangés, par la compagnie américaine EPRI (Electric Power Research Institute).

Les systèmes FACTS ont un grand impact sur le fonctionnement d'une ligne électrique. En raison de leur utilisation des équipements de l'électronique de puissance, les dispositifs FACTS contrôlables fournissent toujours des actions de contrôle rapide et une transmission plus souple par rapport aux dispositifs conventionnels. Leurs principales fonctions sont la compensation de puissance réactive, tension de commande et de contrôle de flux d'énergie.

Dans ce chapitre nous allons étudier les systèmes FACTS afin d'envisager leurs applications pour améliorer la stabilité des réseaux électriques. A cet égard, les différents composants FACTS qui peuvent être classés en trois catégories seront étudiés: compensateurs parallèles, compensateurs séries et compensateurs hybrides "série – parallèle" [1].

Parmi les composants FACTS, l'UPFC du fait de ses avantages sera étudié plus en détail dans ce chapitre.

1.2 Structure générale des réseaux électriques

De façon très générique, un réseau électrique est toujours dissocié en quatre grandes parties :

- **La production** : Elle consiste en la génération de l'ensemble de la puissance active consommée par le réseau tout entier. En grande majorité, les tensions associées à cette production sont produites sous forme de système triphasé par l'intermédiaire d'alternateurs entraînés à partir de divers types de sources d'énergie dites « primaires ».

- **Le transport** : Il consiste à acheminer les puissances produites par les unités de production auprès des lieux de consommation. Les grandes centrales étant en général groupées autour des fleuves, des cours d'eau et des océans, le « grand transport » consiste à parcourir de longues distances en direction des extrémités des territoires nationaux. L'ordre de grandeur de ces distances impose, entre autre, le fait de véhiculer l'énergie électrique sous très haute tension.

- **La distribution** : Elle consiste en un maillage fin du territoire permettant à chaque utilisateur d'être à proximité d'une liaison au réseau. C'est l'ultime ramification des lignes et des installations qui permet également un passage progressif des très hautes tensions du transport aux basses tensions de la consommation.

Les réseaux de distribution ont pour but d'alimenter l'ensemble des consommateurs. Il existe deux sous niveaux de tension :

- les réseaux moyens tension (de 3 à 50 kV)
- les réseaux basse tension (de 110 à 600 V), sur lesquels sont raccordés les utilisateurs domestiques.

- **La consommation** : Chaque récepteur électrique connecté au réseau consomme une puissance active et une puissance réactive. La consommation domestique, qui est généralement majoritaire, est très ramifiée et se fait sous basse tension souvent monophasée (100 à 250 V). certains « clients » industriels (grosses usines, ferroviaire, ect.) sont directement reliés en moyenne, haute ou très haute tension.

La figure suivante présente, de façon très synthétique et symbolique, la structure d'un réseau et de ses grandes composantes.

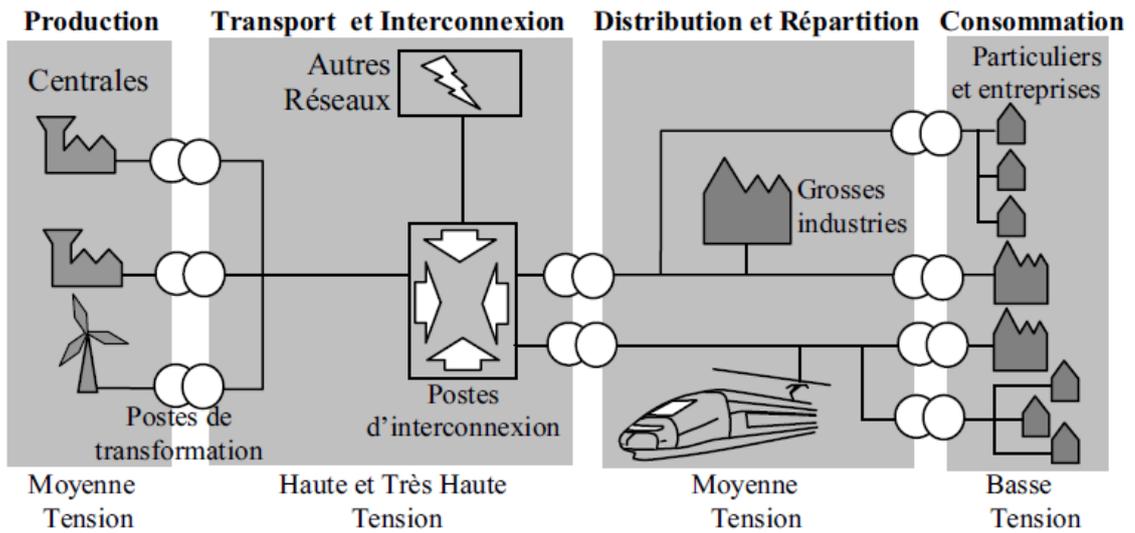
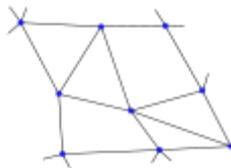


Figure 2.1 : Réseau électrique simplifié [2]

1.3 Type de structure des réseaux électriques

Les réseaux électriques peuvent être organisés selon plusieurs types de structures exposées ci-dessous :

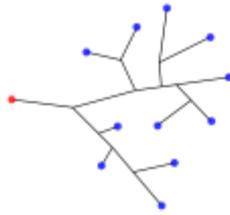
- *structure maillée* : les postes électriques sont reliés entre eux par de nombreuses lignes électriques, apportant une grande sécurité d'alimentation.



- *structure radiale ou bouclée* : la sécurité d'alimentation, bien qu'inférieure à celle de la structure maillée, reste élevée.



- *structure arborescente* : la sécurité d'alimentation est faible puisqu'un défaut sur la ligne ou sur le poste rouge coupe l'ensemble des clients en aval.



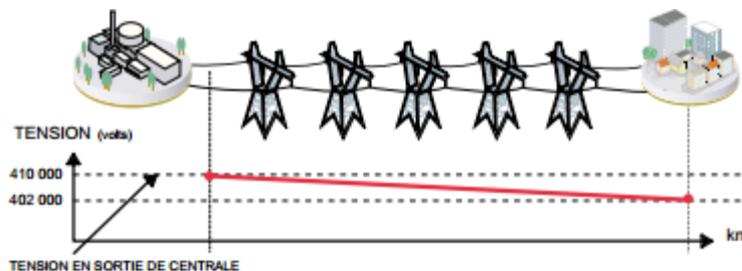
Chaque type de structure possède des spécificités et des modes d'exploitation très différents. Les grands réseaux d'énergie utilisent tous ces types de structure. Dans les niveaux de tension les plus élevés, on utilise la structure maillée : c'est le réseau de transport. Dans les niveaux de tension inférieurs, la structure bouclée est utilisée en parallèle de la structure maillée : c'est le réseau de répartition. Enfin, pour les plus bas niveaux de tension, la structure arborescente est quasiment exclusivement utilisée : c'est le réseau de distribution. [3]

1.4 Problèmes survenant sur le réseau

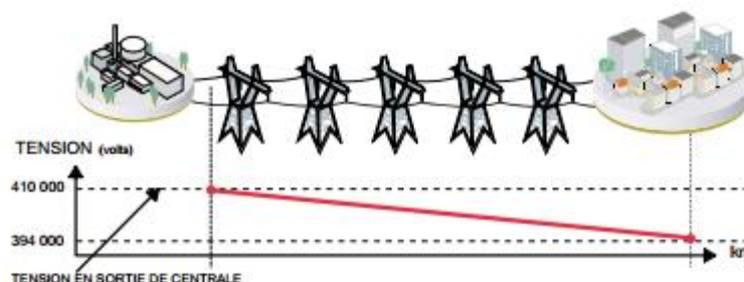
1.4.1 Chute de tension

Lorsque le transit dans une ligne électrique est assez important, la circulation du courant dans la ligne provoque une chute de la tension. La tension est alors plus basse en bout de ligne qu'en son origine et plus la ligne est chargée en transit de puissance, plus la chute de tension sera importante.

- a- Cas d'une consommation alimentée par une ligne depuis une centrale



- b- Cas d'une forte consommation alimentée par une ligne depuis une centrale Si la consommation double, la chute de tension double. [4]



1.4.2 Déséquilibre de tension

Le phénomène de déséquilibre de tension est la situation où les trois tensions du système triphasé ne sont pas égales en amplitude et/ou ne sont pas décalées normalement les unes par rapport aux autres de 120°.

Sources de déséquilibre

La cause majeure de déséquilibre est liée à la présence des charges monophasées de façon non équilibrée sur les trois phases du réseau. [5]

1.4.3 Creux de tension

Un creux de tension est une brusque réduction de la tension, en un point du réseau électrique, suivie de son rétablissement après une courte durée allant d'une demi-période à quelques secondes.

Il est essentiel de comprendre que l'on ne peut pas éviter un certain nombre de creux de tension sur les réseaux d'alimentation et qu'il est normal d'accepter, pour la plupart des appareils, le risque d'un nombre limité de fonctionnements incorrects dus à ce type de perturbation. [6]

a. Source de creux de tension et de coupures brèves

Un creux de tension peut être produit par des manœuvres d'enclenchement mettant en jeu des courants de forte intensité ou par le fonctionnement de protection consécutif à l'apparition de défauts dans le réseau. [6]

b. Effets de creux de tension et coupures brèves

Les creux de tension et coupures brèves peuvent perturber les appareils raccordés aux réseaux d'alimentation et provoquer les mauvais fonctionnements suivants :

- Extinction de lampes à décharge.
- Variation de vitesse ou arrêt de moteur.
- Retombée de contacteurs.
- Erreurs de calcul ou panne de calculateurs ou d'instruments de mesure munis de dispositifs électronique.
- Pertes de synchronisme d'alternateurs et de moteurs synchrones.
- Défaut de commutation pour les points à thyristors fonctionnant en onduleur. [6]

1.4.4 Surtension

Les surtensions sont des hausses soudaines de la valeur efficace de la tension de plus de 110% de la tension nominale, laquelle se rétablit après une courte durée. Les surtensions temporaires comprennent des durées entre 8 millisecondes et une minute. Les surtensions temporaires peuvent être attribuables à des défauts, à des délestages de charge ou à des phénomènes de résonance et de ferrorésonance. Le plus souvent, elles résultent des fluctuations qui se manifestent sur les phases saines lors de courts-circuits monophasés à la terre, par exemple. [7]

1.4.5 Variation de fréquence

La fréquence d'un réseau alternatif est directement liée à la vitesse de rotation des alternateurs. La fréquence dépend de l'équilibre dynamique entre la charge et la puissance des usines de production ainsi lorsque le point d'équilibre change de petites variations de fréquence se produisent. [5]

a. Sources de variation de fréquence

Dans les réseaux publics d'alimentation, la capacité de production est normalement excédentaire par rapport à la consommation. Cela permet de maintenir les variations de fréquence à l'intérieur de la plage de fréquence désirées. Toutefois, il peut arriver, qu'une partie importante de la production ou de la consommation disparaisse. Il s'ensuit des variations de fréquence qui sortent de la plage normalement tolérée.

Dans de tel cas, une partie de la production ou de la consommation doit être déconnectée pour rétablir l'équilibre aussi vite que possible.

b. Effets des variations de fréquence

Dans les limites généralement rencontrées, le principal effet du changement de fréquence est de modifier la vitesse des machines tournantes. Les moteurs fourniront alors plus ou moins de puissances. Les variations de fréquences peuvent avoir également pour effet de rendre moins opérants les filtres d'harmoniques. Tout appareil électronique utilisant la fréquence du réseau comme base de temps sera aussi affecté. [5]

1.4.6 Défauts de ligne

Les défauts (ou *courts-circuits*) sont des mises en connexion de deux points de tensions différentes par un conducteur de faible résistance. Cette connexion donne naissance à un courant de court-circuit.

Dans les réseaux électriques, les courts-circuits sont dus à un défaut d'isolement qui provoque l'apparition d'un arc électrique. Durant le court-circuit, l'impédance de la branche en défaut diminue. Cette diminution est fonction de la position du point de court-circuit.

Il existe trois types de défaut qui sont :

- le défaut unipolaire à la terre causé par la mise accidentelle à la terre d'un fil de phase du réseau.
- Le défaut entre phases appelé défaut bipolaire qui est le contact accidentel entre deux phases (avec ou sans contact avec la terre).
- Le défaut tripolaire dû à un court-circuit entre les trois phases de la ligne. C'est un défaut symétrique. [8]

1.5 Les techniques traditionnelles de contrôle du transit de puissance (Solutions classiques aux problèmes de tension)

Les techniques traditionnelles de contrôle du transit de puissance sont basées principalement sur les systèmes électromécaniques. Elles sont caractérisées par un temps de réponse plus ou moins lent. Autrement dit, face aux contingences nécessitant un bref temps de réaction ils deviennent de moins en moins adaptés. La présente section dresse un bref récapitulatif de quelques-unes de ces techniques traditionnelles.

1.5.1 Compensateur de puissance réactive rotatif

Un compensateur rotatif de puissance réactive ou compensateur synchrone est un moteur synchrone qui tourne à vide et dont la seule fonction est de fournir ou d'absorber de la puissance réactive sur une ligne de transport ou sur un réseau. [9]

En effet, pour régulariser la tension sur un réseau électrique, on doit lui fournir de la puissance réactive pendant les heures de forte consommation. Inversement, pendant les heures de faible consommation, l'excès de puissance réactive générée par les lignes doit être absorbé. [2]

Le compensateur agit comme une énorme capacitance ou une inductance variable dont la valeur est réglable en faisant varier le courant d'excitation de son rotor. Les délais de mise en service sont très lents, pour cela ils ne peuvent pas être utilisés pour une compensation dynamique des réseaux. Ils sont délaissés pour des systèmes plus rapides de contrôle de la tension.

1.5.2 Le transformateur déphaseur

La puissance active P transitée entre deux réseaux de tensions respectives V_1 et V_2 présentant un angle de transport δ (Déphasage entre V_1 et V_2), et connectés par une liaison d'impédance X est donnée par la formule suivante. [10]

$$p = \frac{V_1 V_2}{X} \sin \delta \quad (1.1)$$

Cette équation montre qu'il est possible de réguler le transit de la puissance électrique entre deux systèmes en agissant sur l'angle de transport. C'est ce que fait le transformateur déphaseur. Les transformateurs déphaseurs sont des machines statiques dont les caractéristiques constructives sont proches de celles des transformateurs classiques. De par leurs connexions internes, ils permettent d'obtenir un déphasage entre les tensions en entrée et en sortie. [10].

1.5.3 L'autotransformateur survolteur-dévolteur

Sur le réseau, la tension est une grandeur locale fortement influencée par les variations de consommation et les transits de puissance réactive [11]. Celle-ci se transporte mal et au prix des chutes de tension importantes. Cette tension peut être réglée à partir des sources de puissance réactive réparties sur le réseau. Cependant, lorsqu'il faut augmenter ou diminuer la tension dans une gamme plus importante (comprise entre 20% et 50% de la valeur nominale), il est avantageux d'utiliser un autotransformateur. En effet, pour une même puissance transformée, l'autotransformateur est beaucoup plus petit et coûte moins cher qu'un transformateur conventionnel. [9]

1.5.4 La compensation série traditionnelle

L'équation (1.1) montre que la puissance active échangée entre deux systèmes peut être augmentée si on réduit l'impédance de la liaison électrique dont le comportement est essentiellement inductif [12]. C'est ce que réalise la compensation série par l'adjonction en série avec la ligne d'un banc de condensateurs d'impédance X_c ; ainsi, l'impédance de la ligne est artificiellement réduite passant de X à $(X-X_c)$. Ceci a pour conséquence l'augmentation de la puissance active transitée à travers la ligne.

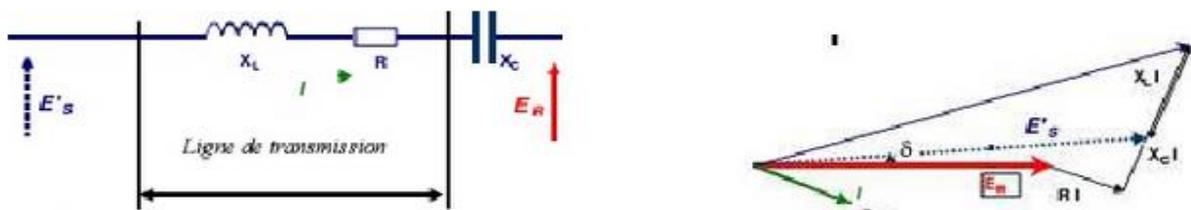


Figure 2.2 : Compensation série : principe et diagramme de Fresnel [12].

On observe sur le diagramme de Fresnel que le profil de tension est amélioré tout au long de la ligne ($E's - E_r$ plus petit) et l'angle de transport δ est réduit, ce qui améliore la stabilité dynamique de la liaison.

1.5.5 La compensation parallèle traditionnelle

La compensation parallèle (compensation shunt) consiste en l'installation des réactances inductives ou banc de condensateurs connectés entre les phases du réseau et la terre en général par le biais des disjoncteurs [12]. Ces éléments permettent de compenser le réseau en puissance réactive et de maintenir la tension dans les limites contractuelles. Pour réduire la tension en bout de ligne, on peut connecter une ou plusieurs réactances inductives en parallèle. Cependant, compte tenu du nombre limité des opérations et des délais de fermeture/ouverture des disjoncteurs, les techniques traditionnelles de contrôle de transit de puissance n'apportent pas une souplesse dans la gestion des réseaux. Avec l'avènement des semi-conducteurs de puissance, d'autres techniques ont vu le jour : celles basées sur les systèmes FACTS.

1.6 Techniques basées sur les systèmes FACTS

Le programme FACTS a été lancé pour résoudre les problèmes de transit de puissance sur les réseaux électriques. Le concept de FACTS regroupe tous les dispositifs à base d'électronique puissance qui permettent d'améliorer l'exploitation des réseaux électriques. Leur technologie bâtie, autour des interrupteurs statiques leur assure une vitesse supérieure à celle des systèmes électromécaniques traditionnels [1]. Les FACTS peuvent être classés en trois catégories :

- Les compensateurs séries
- Les compensateurs parallèles
- Les compensateurs hybrides (série/parallèles)

1.6.1 Les compensateurs séries

Ces compensateurs sont connectés en série avec le réseau et peuvent être utilisés comme impédance variable (inductive, capacitive) ou une source de tension variable. Ils modifient l'impédance des lignes de transport en insérant des éléments en série avec celle-ci. Nous présentons ci-dessous quelques-uns de ces compensateurs.

a. Le TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitors)

Dans un TCSC une inductance est installée en parallèle avec un banc de condensateurs et le courant à travers l'inductance est contrôlé par thyristor. Le contrôle de la compensation permet de s'adapter en temps réel aux besoins du réseau et donc de contrôler le transit de puissance sur la ligne [12].

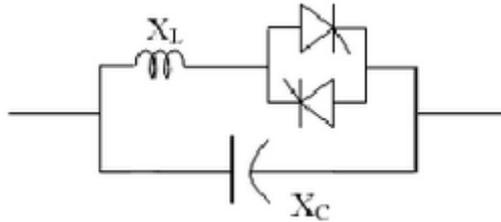


Figure2.3 : Structure d'un TCSC [1]

Si les thyristors sont bloqués, le TCSC a une impédance fixe qui est celle du condensateur. Si les thyristors sont commandés en interrupteurs électroniques et en pleine conduction, l'impédance du TCSC est encore fixe et équivalente à l'impédance de l'inductance en parallèle avec le condensateur [1]. Les modules TCSC sont de plus en plus associés aux compensateurs séries classiques afin de réduire les risques de résonance hyposynchrone. En effet le TCSC présente une impédance série qui est inductive à basse fréquence et élimine les risques de SSR avec les unités de production [12].

b. Le TCSR (Thyristor Controlled Series Reactors)

Le TCSR est un compensateur inductif qui se compose d'une inductance en parallèle avec une autre inductance commandée par thyristor afin de fournir une réactance en série variable.

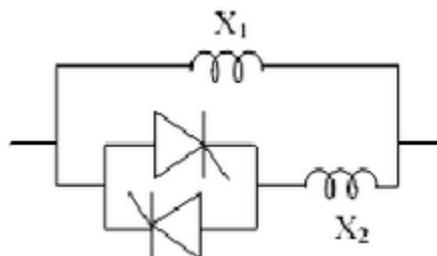


Figure 2.4 : Structure d'un TCSR [7]

Le fonctionnement du TCSR est analogue à celui du TCSR. Lorsque les thyristors sont bloqués, l'impédance du TCSR est fixe et égale à celle de l'inductance X1. Lorsque les thyristors sont en pleine conduction, l'impédance du TCSR est encore fixe et égale à celle de l'inductance X1 en parallèle avec l'inductance X2.

c. Le SSSC (Static synchronous Series Capacitors)

Il est constitué d'un onduleur triphasé couplé en série avec la ligne électrique à l'aide d'un transformateur. Le rôle du SSSC est d'introduire une tension triphasée, à la fréquence du réseau en série avec la ligne de transport. L'avantage de ce compensateur est de ne pas introduire physiquement une inductance ou un condensateur, mais de simuler leurs fonctions. Cela évite l'apparition des oscillations dues à la résonance avec les éléments inductifs du réseau [13].

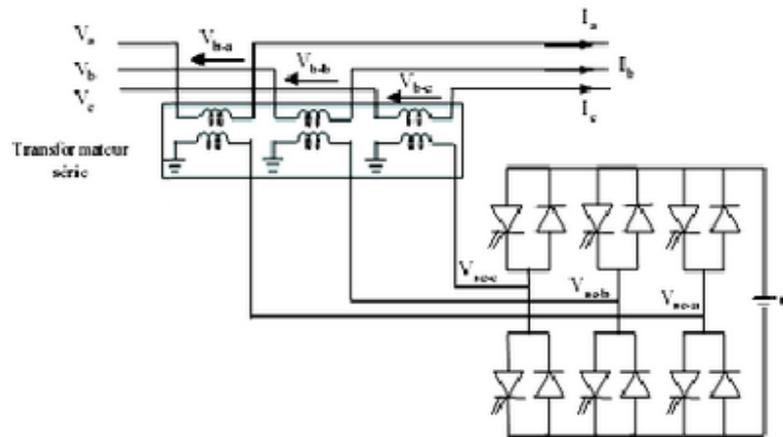


Figure 1.5 Schéma de base du SSSC[1]

1.6.2 Les compensateurs parallèles

Les compensateurs parallèles injectent du courant au réseau via le point de raccordement, en effet, quand une impédance variable est connectée en parallèle sur le réseau, elle consomme ou injecte un courant variable. Cette injection de courant modifie les puissances actives et réactive qui transitent sur la ligne. Nous présentons ici quelques compensateurs parallèles.

a. Le SVC (Static Var Compensator) :

Le Static Var Compensator encore appelé Compensateur Statique de Puissance Réactive (CSPR) est un équipement de compensation parallèle à base d'électronique de puissance capable de réagir en quelques cycles aux modifications du réseau. Il est généralement constitué d'un ou de plusieurs bancs de condensateurs fixes ou commutables soit par disjoncteur soit par thyristors (TSC : Thyristor Switched Capacitors) et d'une réactance réglable (TCR: Thyristor Controlled Reactor) [12].

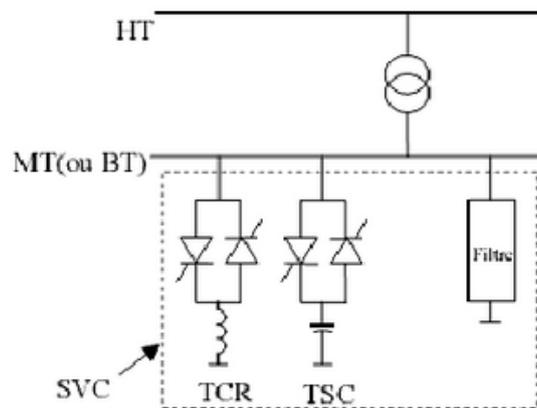


Figure 2.6 : Structure du SVC [12]

Le réglage de l'angle d'amorçage des thyristors permet d'adapter l'injection ou l'absorption du courant en fonction des sollicitations du réseau.

On branche souvent en parallèle au SVC une TCBR (Thyristor Controlled Breaking Resistor) afin d'améliorer la stabilité du réseau pendant la présence des perturbations [13].

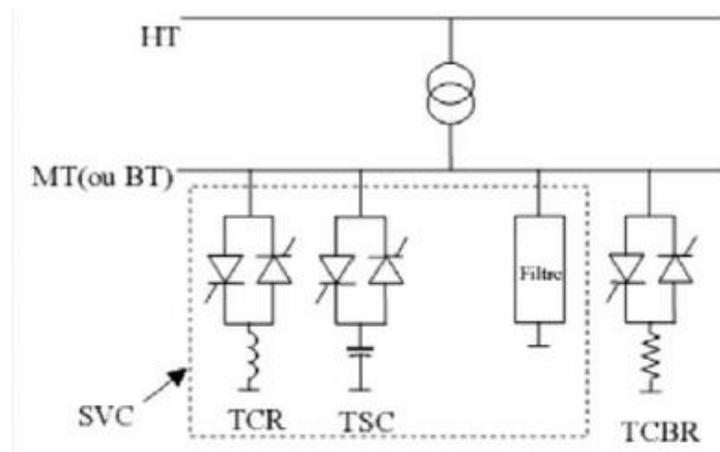


Figure 2.6 Schéma du SVC accompagné d'un TCBR [13].

b. Le STATCOM (STATIC Synchronous COMPensator)

Le STATCOM est un convertisseur à source de tension (VSC: Voltage Source Converter) connecté en parallèle à un réseau alternatif, en général par le biais d'un transformateur abaisseur. En réglant le déphasage du VSC égal à celui de la tension au point de connexion, le flux de courant dans l'impédance du réseau est parfaitement réactif [14].

Si l'on règle la tension du VSC de façon à ce qu'elle soit supérieure à celle du réseau, de la puissance réactive est fournie au réseau et la tension au point de connexion se trouve augmentée. Si on règle tension du VSC de façon à ce qu'elle soit inférieure à celle du réseau, de l'énergie réactive est absorbée au réseau et la tension au point de connexion se trouve diminuée.

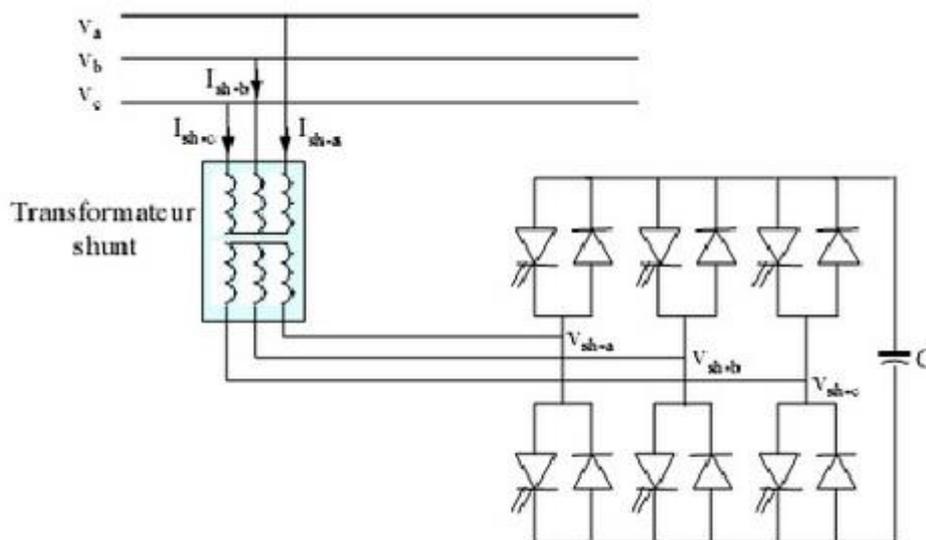


Figure 2.7 : Schéma de base du STATCOM

L'avantage du STATCOM est de pouvoir échanger de l'énergie de nature inductive ou capacitive uniquement à l'aide d'une inductance. Contrairement au SVC, il n'y a pas d'élément capacitif qui puissent provoquer des résonances avec les éléments inductifs du réseau [15]. Le STATCOM peut fournir le maximum de sa puissance réactive pour des tensions de réseau très faibles.

1.6.3 Les compensateurs hybrides

Les compensateurs hybrides intègrent dans leurs structures une partie shunt et une partie et une partie série. Nous présentons ici deux des structures hybrides les plus étudiées : le TCPAR et l'UPFC

a. Le TCPAR (Thyristor Controlled Phase Angle regulator)

Le TCPAR est un transformateur déphaseur à base de thyristor. Ce dispositif a été créé pour remplacer les transformateurs à régleurs en charge qui sont commandés mécaniquement.

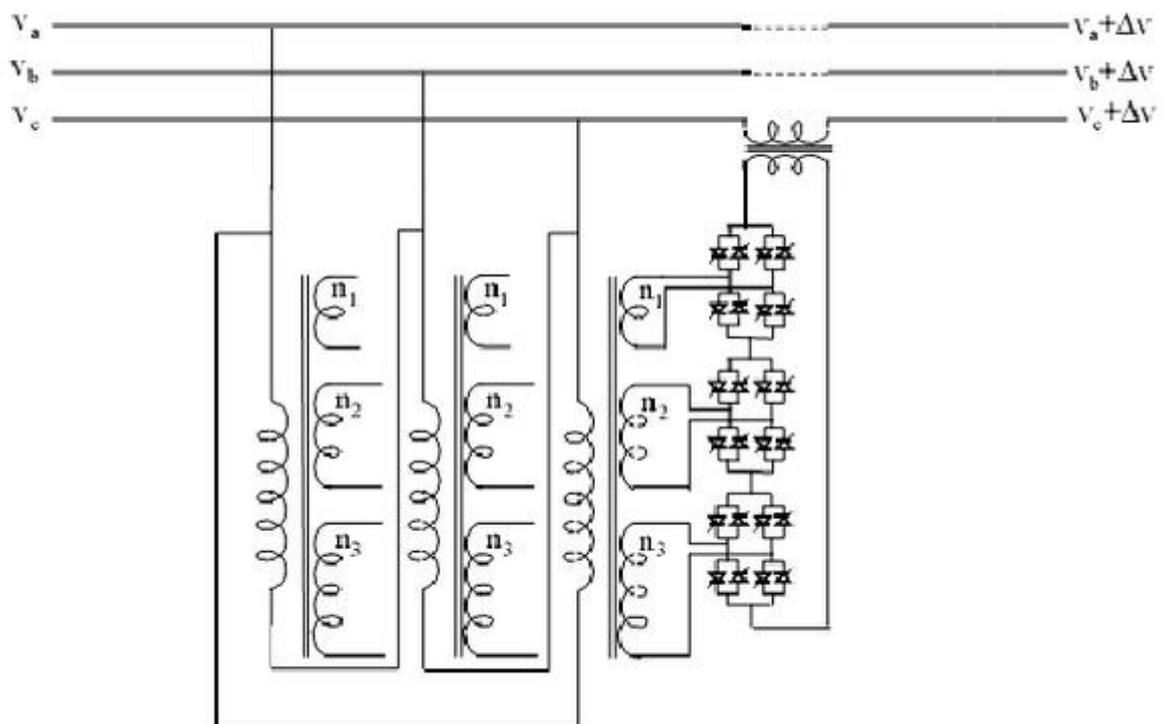


Figure 2.8 : Schéma de base du TCPAR [12].

b. L'UPFC (Unified Power Flow Controller)

L'UPFC est constitué de deux convertisseurs connectés à la même source de tension continue, l'un étant connecté en parallèle avec le réseau, l'autre en série avec la ligne de transmission [16].

L'originalité de ce compensateur est de pouvoir contrôler les trois paramètres associés au transit de puissance dans une ligne électrique : la tension, l'angle de transport et l'impédance de la ligne.

L'UPFC est capable d'accomplir les fonctions des autres dispositifs FACTS à savoir le réglage de la tension, la répartition des flux d'énergie, l'amélioration de la stabilité et l'atténuation des oscillations de puissance [14].

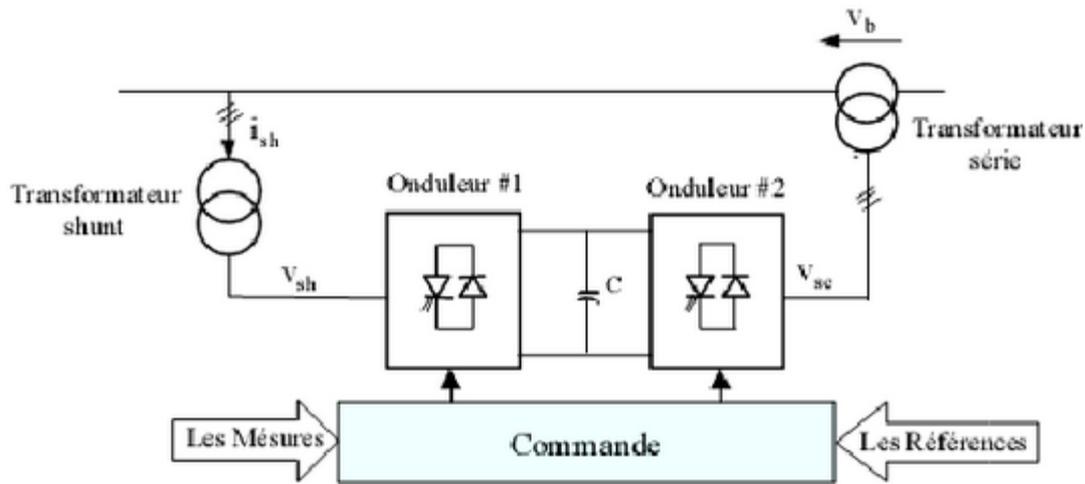


Figure 2.9 : Schéma de base de l'UPFC

Le grand avantage de l'UPFC est la flexibilité qui lui permet de contrôler les trois paramètres associés au transit de puissance en un seul dispositif comprenant seulement deux onduleurs de tension triphasés. De plus, il peut instantanément basculer de l'une à l'autre de ces fonctions en changeant la commande des onduleurs, ce qui permet de faire face à des défauts ou des modifications du réseau en privilégiant temporairement l'une des fonctions. Nous procéderons à une étude plus approfondie de ce dispositif dans le prochain chapitre.

1.7 Structure générale de l'UPFC

Le dispositif UPFC est un compensateur hybride (série- parallèle) qui a été présenté par Gyugyi en 1990 [17]. Il est constitué de deux onduleurs triphasés de tension connectés à la même réserve de tension continue [12]. L'un est connecté en parallèle avec le réseau et l'autre en série avec la ligne de transmission comme le montre la figure (1.9)

L'originalité de ce dispositif FACTS qu'est l'UPFC est son pouvoir de contrôler les trois paramètres associés au transit de puissance (tension, impédance, déphasage) et d'accomplir les fonctions des autres dispositifs FACTS à savoir le réglage de la tension, la répartition de flux d'énergie et l'amélioration de la stabilité du réseau électrique [17].

1.7.1 Présentation des différents blocs constitutifs de l'UPFC

Une vue plus détaillée de l'UPFC faisant ressortir les différents composants de cet ensemble peut se voir sur la figure ci- dessous :

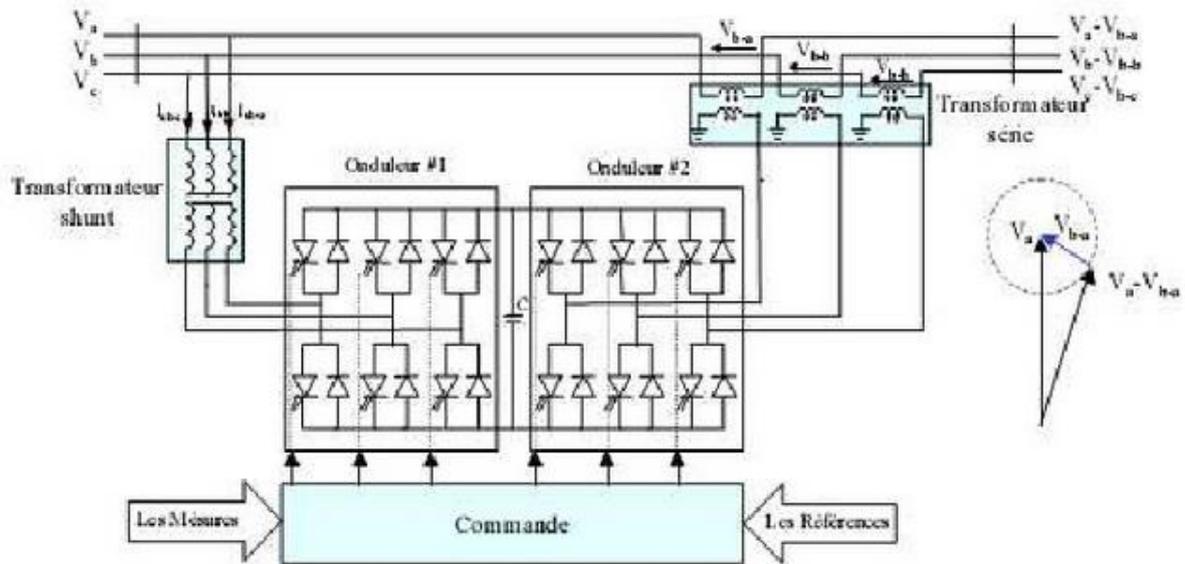


Figure 2.10 : schéma simplifié d'un UPFC connecté sur réseau

a. L'onduleur n° 1 ou partie shunt de l'UPFC

L'onduleur n°1 n'est rien d'autre que le FACTS STATCOM qui est un convertisseur de tension triphasé constitué de 3 bras d'interrupteurs et relié au réseau via un transformateur triphasé [13]. Chaque bras d'interrupteur est constitué d'une association de deux blocs ayant chacun un interrupteur commandable (GTO) monté en antiparallèle avec une diode et ayant pour rôle de bloquer les tensions inverses. Son rôle est de redresser la puissance à courant alternatif provenant du transformateur et de l'envoyer au circuit à courant continu [17], [18]. En plus de cela il réalise aussi la fonction de compensation de la puissance réactive puisqu'il peut fournir ou absorber de la puissance réactive, indépendamment de la puissance active, au réseau [12].

b. L'onduleur n° 2 ou partie série de l'UPFC

L'onduleur n°2 est le FACTS SSSC qui est également un convertisseur de tension triphasé constitué de 3 bras d'interrupteurs et relié au réseau par l'intermédiaire de trois transformateurs monophasés dont les primaires sont couplés en étoile [1]. Tout comme le STATCOM, chaque bras d'interrupteur est constitué d'une association de deux blocs ayant chacun un interrupteur commandable (GTO) monté en antiparallèle avec une diode et ayant pour rôle de bloquer les tensions inverses [12]. Sa fonction est de retransformer la puissance continue provenant du bloc de liaison du circuit à courant continu en puissance alternative et de l'injecter dans la ligne de transport sous une

tension E [9]. Cette tension est injectée à la même fréquence que celle du réseau et dont l'amplitude et la phase sont ajustables [1].

c. Circuit de liaison à courant continu

Ce circuit est essentiellement constitué d'un condensateur de filtrage C ayant pour fonction principal de se charger et de se décharger jusqu'à une certaine valeur en fonction des exigences du réseau.

d. Le bloc de commande

Ce module est un système asservi qui permet de générer des ordres d'ouverture et de fermeture des interrupteurs des différents bras de convertisseurs en fonction de l'écart observé entre les valeurs de référence et les valeurs mesurées. Le but de cette commande est de faire en sorte que la tension générée par le convertisseur soit la plus proche de la tension de référence [13].

1.7.2 Analyse structuro fonctionnelle de l'UPFC

L'UPFC est constitué de deux convertisseurs de tension connectés à une même réserve de tension continue, l'un étant connecté en série avec la ligne de transmission, l'autre en parallèle [1]. Le convertisseur connecté en parallèle avec la ligne est un STATCOM et celui relié en série est un SSSC; la réserve de tension continue est constituée par un condensateur [9]. Nous nous proposons dans la présente section :

- D'étudier la structure et le fonctionnement des deux convertisseurs qui entrent dans la constitution de l'UPFC.
- De donner l'apport de chacun de ces convertisseurs en vue de la réalisation des différentes fonctions de l'UPFC

1.7.3 Performances de l'UPFC

Les multiples performances dont regorge le dispositif UPFC font de lui l'un des dispositifs FACTS le plus utilisés. Cette section explicitera les performances de l'UPFC sous trois principaux angles à savoir : l'amélioration du transit de puissance, l'amélioration de la stabilité statique et dynamique et l'amélioration de la stabilité en tension.

1.7.4 Apport de l'UPFC à l'amélioration du transit de puissance

L'action sur les différents paramètres de l'UPFC peut permettre d'améliorer le transit aussi bien de la puissance active que de la puissance réactive.

a. Amélioration du transit de la puissance

Considérons à nouveau deux régions A et B entre lesquelles doivent de faire un transit de puissance active. Nous rappelons que la puissance transitée entre les deux régions est donnée par la formule (1.3), (1.4) suivante :

$$P = \frac{\overline{(E_A)}\overline{(E_B)}}{X} \sin \delta \quad (1.3)$$

:

$$Q = \frac{E_A(E_A - E_B \cos \delta)}{X} \quad (1.4)$$

Cela signifie que pour améliorer le transit de la puissance active, l'UPFC devra être capable d'agir sur au moins l'un des trois paramètres régissant ce transit à savoir :

- L'impédance X de la ligne.
- L'angle de transport δ .
- Les tensions aux extrémités de la ligne.

b. Variation de l'impédance de la ligne de transport

L'UPFC insère grâce à sa composante série qu'est le SSSC une tension V_{SSC} . En faisant varier l'angle de transport, l'UPFC fera varier de façon virtuelle l'impédance de la ligne, augmentant ainsi la puissance transitée sur la ligne de transport [9].

L'angle de transport δ peut prendre aussi bien des valeurs positives que négatives. Ceci implique la possibilité du transit de puissance dans les deux sens.

1.8 Conclusion

Ce chapitre offre une présentation des différents problèmes survenant dans le réseau électrique. Les équipements à base de l'électronique de puissance, y compris leurs commandes appropriées, offrent des solutions efficaces à ces problèmes.

En effet les systèmes FACTS ont la capacité d'améliorer la stabilité transitoire en utilisant une commande appropriée. Elles peuvent également contrôler la puissance transmissible de la ligne en utilisant deux méthodes : la compensation série et la compensation parallèle.

Dans ce chapitre, nous avons présenté les systèmes FACTS en général. Nous avons choisi d'étudier l'UPFC pour améliorer la stabilité transitoire d'un réseau électrique. L'UPFC est un compensateur qui est plus complet que les autres, grâce à sa caractéristique spéciale.

Chapitre 2

Modélisation du système

2.1 Introduction

La simulation de l'UPFC est essentiellement basée sur son modèle, pour cela ce chapitre sera consacré à l'établissement d'un modèle dynamique nécessaire à la synthèse des lois de commande pour l'UPFC.

Dans le chapitre précédent, il a été présenté les différentes problématiques de l'amélioration de la flexibilité et la maîtrise de la stabilité des systèmes de transport d'électricité. D'emblé, la solution consiste à utiliser les différents types de systèmes FACTS (série, parallèle et/ou hybrides). L'UPFC (*Unified Power Flow Controler*) est le dispositif FACTS le plus sophistiqués. En effet, il est **capable de commander simultanément et indépendamment les puissances active et réactive transitant dans la ligne** et ce en contrôlant les trois paramètres associés au transit de puissance à savoir : la tension, l'impédance et l'angle de transport de la ligne.

Ce dispositif sera étudié en décrivant le fonctionnement, ensuite un modèle mathématique du système sera établi englobant la ligne de puissance et l'UPFC.

2.2 Fonctionnement de L'UPFC

L'UPFC est un dispositif placé entre deux nœuds dénommés nœud émetteur et nœud récepteur. Il est composé de deux sources de tension concrétisées par deux convertisseurs : un convertisseur de courant raccordé au système d'alimentation par le biais d'un transformateur shunt et un autre inséré dans la ligne de transmission par l'intermédiaire d'un transformateur série. Ces deux convertisseurs de tension et de courant sont couplés côtés DC à travers une capacité de stockage. [19] La figure (2.1) illustre ce montage.

Le fonctionnement de l'UPFC peut être résumé comme suit : La branche shunt qui est une source de courant opère comme un STATCOM et sert à injecter un courant i_{sh} dans le nœud de connexion shunt, et la branche série qui est une source de tension opère comme un SSSC en injectant une tension V_{SSC} dans la ligne d'interconnexion via un transformateur de courant [14]

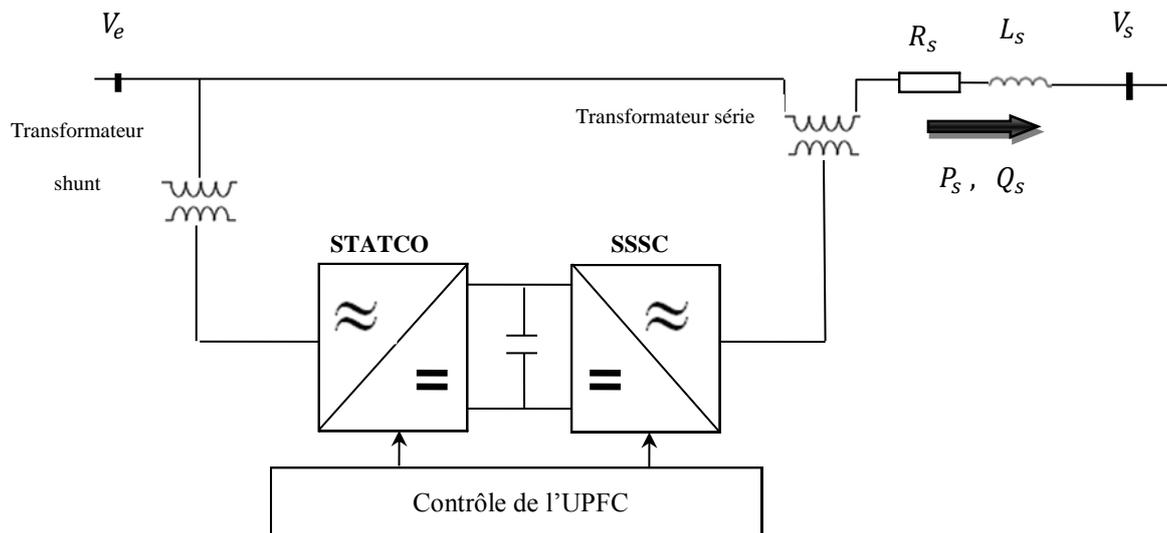


Figure 2.4 : Schéma simplifié d'un UPFC connecté au réseau électrique.

L'UPFC sera donc utilisé pour contrôler la tension au nœud de connexion shunt en générant ou absorbant la puissance réactive, par le biais du STATCOM. Tandis que l'objectif principal du convertisseur série (SSSC) est de produire une tension alternative de grandeur et **angle de phase contrôlables à la fréquence fondamentale** et de l'injecter dans la ligne de transmission à travers le transformateur série pour **modifier l'écoulement de puissance**.

La puissance active peut circuler librement dans les deux sens entre les bornes AC des convertisseurs. D'autre part la puissance réactive ne peut pas s'écouler à travers le circuit intermédiaire. Elle est absorbée ou générée localement par chaque convertisseur [15]

2.3 Modélisation

Le principe de base du fonctionnement de l'UPFC a été décrit précédemment. Il en ressort que le circuit équivalent est constitué de deux sources de tension et de courant qui devraient représenter l'UPFC. Un tel circuit équivalent est illustré à la figure (2.2).

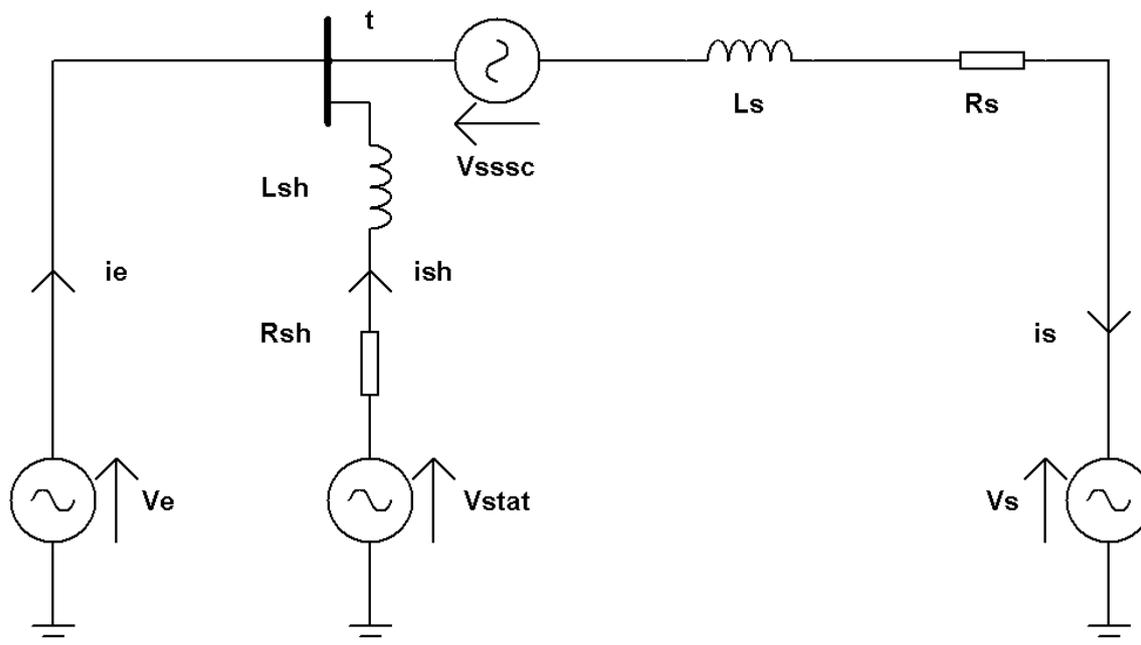


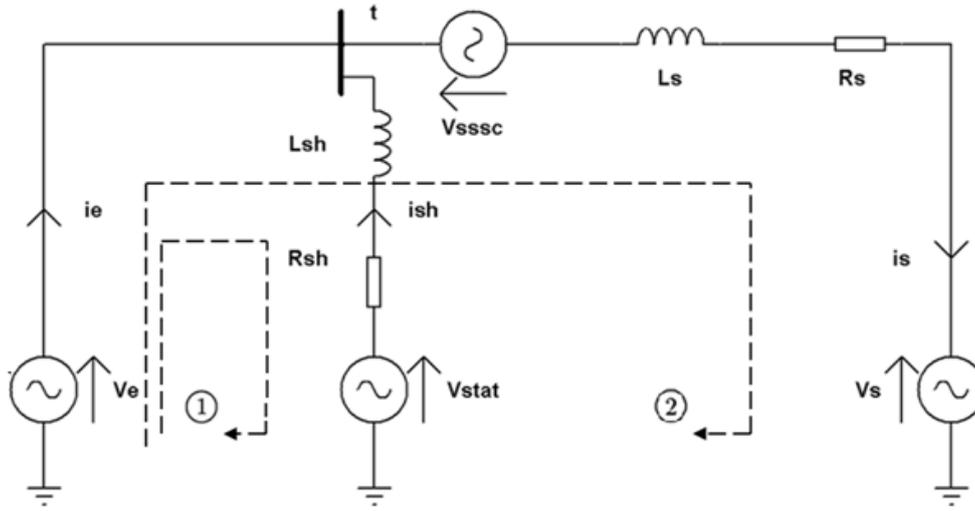
Figure 2.5 : Modèle de l'UPFC à deux sources.

Le tableau (2.1) résume les paramètres représentés sur le schéma de la figure (2.2) et leurs significations.

V_e	Tension de la ligne en amont
V_s	Tension de la ligne en aval
V_{stat}	Tension appliquée en shunt
V_{sssc}	Tension injectée par le SSSC
$L_{sh} R_{sh}$	Impédance des pertes du transformateur Shunt ramenées au secondaire
$L_s R_s$	Impédance du réseau en aval augmentée des pertes du transformateur série ramenées au secondaire
C	Capacité de stockage entre les deux convertisseurs série et shunt.

Tableau 2.1 : Significations des grandeurs électriques

En se basant sur le circuit équivalent représenté sur la figure (2.2) et en appliquant les lois de KIRCHHOFF en courant alternatif, les équations du système sont les suivantes :



$$\text{Maille 1 : } L_{sh} \frac{di_{sh}}{dt} + R_{sh}i_{sh} = V_{stat} - V_e \quad (2.1)$$

$$\text{Maille 2 : } -L_s \frac{di_s}{dt} - R_s i_s = V_{sssc} + V_s - V_e \quad (2.2)$$

A noter que les grandeurs $i_e, i_{sh}, i_s, V_{stat}, V_e$ et V_s sont des grandeurs triphasées telles que:

$$i_{sh} = \begin{bmatrix} i_{sh,a} \\ i_{sh,b} \\ i_{sh,c} \end{bmatrix} ; i_s = \begin{bmatrix} i_{s,a} \\ i_{s,b} \\ i_{s,c} \end{bmatrix} ; i_e = \begin{bmatrix} i_{e,a} \\ i_{e,b} \\ i_{e,c} \end{bmatrix} ;$$

$$V_{stat} = \begin{bmatrix} V_{stat,a} \\ V_{stat,b} \\ V_{stat,c} \end{bmatrix} ; V_e = \begin{bmatrix} V_{e,a} \\ V_{e,b} \\ V_{e,c} \end{bmatrix} ; V_s = \begin{bmatrix} V_{s,a} \\ V_{s,b} \\ V_{s,c} \end{bmatrix}$$

L'UPFC a pour rôle principale la commande du flux de puissance, il peut donc être considéré que les sorties du système sont la puissance active P_s et réactive Q_s . La commande de ce flux se fait à travers les tensions V_{stat} et V_{sssc} des convertisseurs, elles sont donc utilisées comme entrées de commande.

Les équations 1 et 2 s'écrivent sous forme matricielle comme suit :

$$\begin{bmatrix} -L_s I_3 & 0 \\ 0 & L_{sh} I_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{di_s}{dt} \\ \frac{di_{sh}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s I_3 & 0 \\ 0 & -R_{sh} I_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ i_{sh} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{sssc} \\ V_{stat} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_s - V_e \\ -V_e \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} -L_s I_3 & 0 \\ 0 & L_{sh} I_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{di_s}{dt} \\ \frac{di_{sh}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s I_3 & 0 \\ 0 & -R_{sh} I_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ i_{sh} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{sssc} \\ V_{stat} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_3 & -I_3 \\ 0 & -I_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_s \\ V_e \end{bmatrix}$$

Soient les matrices:

$$L = \begin{bmatrix} -L_s I_3 & 0 \\ 0 & L_{sh} I_3 \end{bmatrix} ; R = \begin{bmatrix} R_s I_3 & 0 \\ 0 & -R_{sh} I_3 \end{bmatrix} ; D = \begin{bmatrix} I_3 & -I_3 \\ 0 & -I_3 \end{bmatrix} ;$$

Alors,

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_s \\ i_{sh} \end{bmatrix} = L^{-1} R \begin{bmatrix} i_s \\ i_{sh} \end{bmatrix} + L^{-1} \begin{bmatrix} V_{sssc} \\ V_{stat} \end{bmatrix} + L^{-1} D \begin{bmatrix} V_s \\ V_e \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Où:

$$L^{-1} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L_s} I_3 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_{sh}} I_3 \end{bmatrix} ;$$

En tenant en compte que les courants i_s et i_{sh} sont les images de la puissance active P et réactive Q , le vecteur $X = [i_s \ i_{sh}]^T$ peut être choisi comme vecteur d'état.

L'équation (2.3) conduit à la forme d'état suivante :

$$\dot{X} = AX + BU + W \quad (2.4)$$

Le vecteur d'état X est composé des courants série et shunt : $X = [i_s \ i_{sh}]^T$ tel que :

$$i_s = [i_{s,a} \ i_{s,b} \ i_{s,c}]^T ; i_{sh} = [i_{sh,a} \ i_{sh,b} \ i_{sh,c}]^T$$

$U = [V_{sssc} \ V_{stat}]^T$ est le vecteur d'entrées du système tel que :

$$V_{sssc} = [V_{sssc,a} \ V_{sssc,b} \ V_{sssc,c}]^T ; V_{stat} = [V_{stat,a} \ V_{stat,b} \ V_{sssc,c}]^T$$

$W = B_d V_{sys}$ est considéré comme une perturbation et est donné par:

$$V_{sys} = [V_s \ V_e]^T ; V_s = [V_{s,a} \ V_{s,b} \ V_{s,c}]^T ; V_e = [V_{e,a} \ V_{e,b} \ V_{e,c}]^T$$

Les matrices A , B et B_d sont définies comme suit :

$$A = L^{-1} R = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_s} I_3 & 0 \\ 0 & -\frac{R_{sh}}{L_{sh}} I_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} I_3 & 0 \\ 0 & a_{22} I_3 \end{bmatrix}$$

$$B = L^{-1} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L_s} I_3 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_{sh}} I_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} I_3 & 0 \\ 0 & b_{22} I_3 \end{bmatrix}$$

$$B_d = -L^{-1}D = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L_s} I_3 & \frac{1}{L_s} I_3 \\ 0 & -\frac{1}{L_{sh}} I_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{d11} I_3 & b_{d12} I_3 \\ 0 & b_{d22} I_3 \end{bmatrix}$$

2.4 Transformation de Park

Le modèle dynamique du circuit d'alimentation d'un UPFC et un modèle décrit par des grandeurs triphasées représentées dans le repère abc. La poursuite d'une référence sinusoïdale n'est pas toujours possible, pour cela la transformation de Park est nécessaire pour générer des grandeurs continues à partir des grandeurs triphasées du système tout en conservant les puissances. [20]

La transformation de Park d'une grandeur triphasée V_{abc} est une grandeur triphasée donnée par :

$$V_{dqo} = \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_o \end{bmatrix} = T V_{abc} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Le vecteur \vec{V} est la somme vectorielle des trois vecteurs V_a, V_b, V_c portés respectivement par les trois axes $\vec{O}_a, \vec{O}_b, \vec{O}_c$ ce même vecteur \vec{V} peut être décomposé sur deux axes perpendiculaire d et q ainsi sur un axe o orthogonal au plan d,q. Ces trois axes forment un repère tournant à la vitesse w la pulsation des signaux du système.

Remarque :

La composante V_o dite homopolaire s'écrit comme : $V_o = K(V_a + V_b + V_c)$. Elle est nulle quand le système est triphasé équilibré ; la raison pour laquelle elle ne sera pas prise en compte par la transformation de Park qui retournera par conséquent des grandeurs biphasées V_d, V_q .

Pour revenir aux grandeurs triphasées, on utilise la transformation de Park inverse. Elle est définie par :

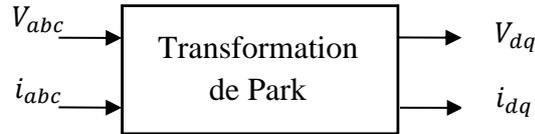
$$V_{abc} = T^{-1}V_{dq} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_o \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

T est une matrice orthogonale alors,

$$T^{-1} = T^T$$

2.5 Modèle du système dans le repère de Park

Dans ce qui suit l'écriture du modèle du système se fera dans le repère de Park dq.



Le modèle d'état constitué des courants dans les deux branches série et parallèle, sera donc exprimé dans le repère d,q. Bien entendu, ces courants sont commandés par les tensions générées par les deux convertisseurs et qui doivent être exprimées aussi dans le repère d,q.

2.6 Equations d'état

Le modèle est sous la forme :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_s \\ i_{sh} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11}I_3 & 0 \\ 0 & a_{22}I_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ i_{sh} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11}I_3 & 0 \\ 0 & b_{22}I_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{sssc} \\ V_{stat} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{d11}I_3 & b_{d12}I_3 \\ 0 & b_{d22}I_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_s \\ V_e \end{bmatrix}$$

Soit alors : $V_{abc} = T^{-1}V_{dq}$
(2.7)

En introduisant l'équation (2.4) dans les équations d'état,

$$\frac{d}{dt} (T^{-1}i_{s,dq}) = a_{11}I_3 T^{-1}i_{s,dq} + b_{11}I_3 T^{-1}V_{sssc,dq} + b_{d11}I_3 T^{-1}V_{s,dq} + b_{d12}I_3 T^{-1}V_{e,dq} \quad (2.8)$$

$$\frac{d}{dt} (T^{-1}i_{sh,dq}) = a_{22}I_3 T^{-1}i_{sh,dq} + b_{22}I_3 T^{-1}V_{stat,dq} + b_{d22}I_3 T^{-1}V_{e,dq} \quad (2.9)$$

Avec :

$$\frac{d}{dt}(T^{-1}i_{s,dq}) = \frac{d}{dt}(T^{-1})i_{s,dq} + T^{-1}\frac{di_{s,dq}}{dt}$$

$$\frac{d}{dt}(T^{-1}i_{sh,dq}) = \frac{d}{dt}(T^{-1})i_{sh,dq} + T^{-1}\frac{di_{sh,dq}}{dt}$$

Le remplacement de ces dernières équations dans les équations (2.8), (2.9) conduit à :

$$\frac{di_{s,dq}}{dt} = (a_{11}I_2 - T\frac{d}{dt}(T^{-1}))i_{s,dq} + b_{11}I_2V_{sssc,dq} + b_{d11}I_2V_{s,dq} + b_{d12}I_2V_{e,dq}$$

(2.10)

$$\frac{di_{sh,dq}}{dt} = (a_{22}I_2 - T\frac{d}{dt}(T^{-1}))i_{sh,dq} + b_{22}I_2V_{stat,dq} + b_{d22}I_2V_{e,dq}$$

(2.11)

Le modèle d'état du système dans le repère de *Park* s'écrit comme suit:

$$\dot{X}_p = A_p X_p + B_p U_p + W_p \quad (2.12)$$

Avec : $W_p = B_{d,p}D_p$;

$$X_p = \begin{bmatrix} i_{s,p} \\ i_{sh,p} \end{bmatrix} ; i_{s,p} = [i_{s,d} \quad i_{s,q}]^T ; i_{sh,p} = [i_{sh,d} \quad i_{sh,q}]^T$$

$$U_p = \begin{bmatrix} V_{sssc,p} \\ V_{stat,p} \end{bmatrix} ; V_{sssc,p} = [V_{sssc,d} \quad V_{sssc,q}]^T ; V_{stat,p} = [V_{stat,d} \quad V_{stat,q}]^T$$

$$D_p = \begin{bmatrix} V_{s,p} \\ V_{e,p} \end{bmatrix} ; V_{s,p} = [V_{s,d} \quad V_{s,q}]^T ; V_{e,p} = [V_{e,d} \quad V_{e,q}]^T$$

Soit :

$$H = T \left(\frac{d(T^{-1})}{dt} \right) = \begin{bmatrix} 0 & -\omega \\ \omega & 0 \end{bmatrix} ; \text{ avec } \omega = 2\pi f : \text{ Pulsation fondamentale du réseau.}$$

alors :

$$A_p = \begin{bmatrix} a_{11}I_2 - H & 0 \\ 0 & a_{22}I_2 - H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & \omega & 0 & 0 \\ -\omega & a_{11} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{22} & \omega \\ 0 & 0 & -\omega & a_{22} \end{bmatrix}$$

$$B_p = \begin{bmatrix} b_{11}I_2 & 0 \\ 0 & b_{22}I_2 \end{bmatrix}$$

$$B_{d,p} = \begin{bmatrix} b_{d11}I_2 & b_{d12}I_2 \\ 0 & b_{d22}I_2 \end{bmatrix}$$

2.7 Calcul des puissances

Les puissances dans le repère de *Park* sont exprimées come suit :

$$P_s = V_{s,q}i_{s,q} + V_{s,d}i_{s,d}$$

$$Q_s = V_{s,q}i_{s,d} - V_{s,d}i_{s,q}$$

$$P_{sh} = V_{t,q}i_{sh,q} + V_{t,d}i_{sh,d}$$

$$Q_{sh} = V_{t,q}i_{sh,d} - V_{t,d}i_{sh,q}$$

V_t^T : est la tension au point de raccordement du nœud de connexion shunt.

2.8 Calcul des courants de références

Les références de puissances active et réactive de la ligne $P_{s,ref}$ et $Q_{s,ref}$ sont imposées par les exploitants du réseau afin de satisfaire des clients particuliers voire même les contrats avec les pays voisins.

La puissance $P_{sh,ref}$ est la grandeur de commande obtenue à partir du réglage de la tension V_c du bus continu tandis que la puissance $Q_{sh,ref}$ injectée par le STATCOM est déterminée par la régulation de la tension au point de raccordement V_t où dans le cas échéant, elle est déterminée en imposant un facteur de puissance pour le STATCOM.

Les courants de référence $i_{s,ref}$ et $i_{sh,ref}$ sont calculés à partir de ces puissances de références. En effet, pour une tension V et un courant i :

$$\begin{cases} P = V_q i_q + V_d i_d \\ Q = V_q i_d - V_d i_q \end{cases} ; \quad \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \Lambda^{-1} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix}$$

Il en découle l'expression des courants de référence à partir des références de puissance active et réactive souhaités:

$$\begin{cases} i_d = \frac{V_d P + V_q Q}{V_q^2 + V_d^2} \\ i_q = \frac{V_q P - V_d Q}{V_q^2 + V_d^2} \end{cases} ; \quad \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \Lambda \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix}$$

Cela se résume par le schéma suivant:

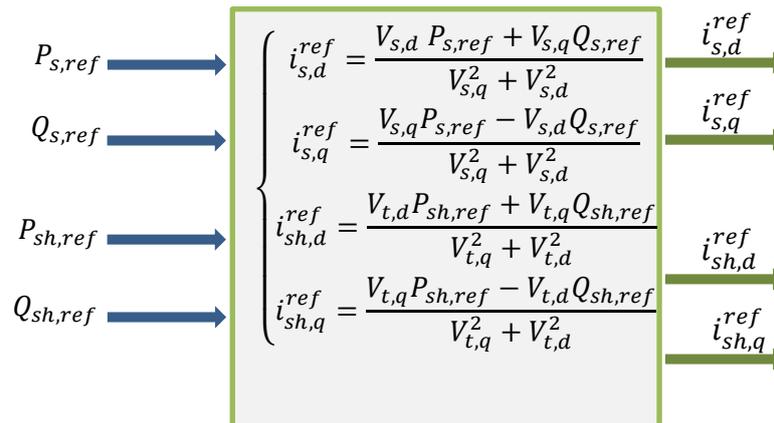


Figure 2.6 : Identification des références en courant.

2.9 Conclusion

Dans ce chapitre, il a été décrit le circuit de base de l'UPFC équipant une liaison électrique. Le principe de fonctionnement du système a été explicité ce qui a permis d'avoir un circuit équivalent sur la base duquel a été développé un modèle d'état, en exploitant le formalisme de Kirchhoff en courant alternatif triphasé. Les références du système de commande ont été également identifiées.

Il y a lieu de rappeler que toutes les grandeurs électriques sont exprimées dans le repère synchrone à l'aide de la transformation de Park qui est un outil nécessaire à la modélisation des systèmes électriques alternatifs afin de synthétiser des lois commandes qui, le plus souvent, exigent des grandeurs continues.

Chapitre 3

Commande PI classique

3.1 Introduction

Pour l'UPFC, la gestion du flux de puissance active et réactive transitant dans la ligne électrique est réalisée d'une façon découplée (*Decoupled Watt-Var*) par l'injection d'une tension en série et d'un courant en parallèle ayant des amplitudes et angles de phase appropriés. En commandant ces grandeurs correctement, les différents objectifs du cahier des charges peuvent être accomplis.

Afin de satisfaire ces objectifs de commande, un régulateur *PI* est synthétisé. D'abord, il est utilisé pour la poursuite des références en puissance en situation normale ; celles-ci sont dictées, en général, par l'opérateur du système électrique (OS dans le cas du système électrique national). Ensuite, à la régulation des grandeurs électriques dans les situations de défaillance.

3.2 Reformulation du modèle

Les équations d'état du système écrites précédemment dans le repère de *Park* sont regroupées sous la forme suivante :

$$\dot{X}_p = A_p X_p + B_p U_p + W_p \quad (3.1)$$

L'écriture éclatée équivalente de l'équation (3.1) est telle que :

$$\frac{di_{s,d}}{dt} = a_{11}i_{s,d} + w i_{s,q} + b_{11}V_{sssc,d} + b_{d11}V_{s,d} + b_{d12}V_{e,d}$$

$$\frac{di_{s,q}}{dt} = a_{11}i_{s,q} - w i_{s,d} + b_{11}V_{sssc,q} + b_{d11}V_{s,q} + b_{d12}V_{e,q}$$

$$\frac{di_{sh,d}}{dt} = a_{22}i_{sh,d} + w i_{sh,q} + b_{22}V_{stat,d} + b_{d22}V_{e,d}$$

$$\frac{di_{sh,q}}{dt} = a_{22}i_{sh,q} - w i_{sh,d} + b_{22}V_{stat,q} + b_{d22}V_{e,q}$$

Ces quatre sous-systèmes peuvent être découplés en considérant les commandes virtuelles *U* telles que :

$$U_{s,d} = w i_{s,q} + b_{11}V_{sssc,d} + b_{d11}V_{s,d} + b_{d12}V_{e,d}$$

$$U_{s,q} = -w i_{s,d} + b_{11}V_{sssc,q} + b_{d11}V_{s,q} + b_{d12}V_{e,q}$$

$$U_{sh,d} = w i_{sh,q} + b_{22}V_{stat,d} + b_{d22}V_{e,d}$$

$$U_{sh,q} = -w i_{sh,d} + b_{22}V_{stat,q} + b_{d22}V_{e,q}$$

Cela permet d'écrire :

$$\frac{di_{s,q}}{dt} = a_{11}i_{s,d} + U_{s,d}$$

$$\frac{di_{s,q}}{dt} = a_{11}i_{s,q} + U_{s,q}$$

$$\frac{di_{sh,d}}{dt} = a_{22}i_{sh,d} + U_{sh,d}$$

$$\frac{di_{sh,q}}{dt} = a_{22}i_{sh,q} + U_{sh,q}$$

Ou sous la forme compacte ci-dessous :

$$\dot{X}_p = \bar{A}X_p + U \quad (3.2)$$

Où :

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{11} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{22} \end{bmatrix}$$

Les commandes virtuelles linéarisant le système s'écrivent sous la forme :

$$\begin{bmatrix} U_{s,d} \\ U_{s,q} \\ U_{sh,d} \\ U_{sh,q} \end{bmatrix} = A_{pp}X_p + B_p U_p + W_p \quad (3.3)$$

Où :

$$A_{pp} = \begin{bmatrix} 0 & w & 0 & 0 \\ -w & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & w \\ 0 & 0 & -w & 0 \end{bmatrix}$$

Les tensions $V_{SSC,dq}$ et $V_{stat,dq}$ sont les commandes réelles du système dans le référentiel synchrone, elles doivent donc être calculées en fonction des commandes virtuelles en utilisant la relation suivante :

$$\begin{bmatrix} V_{sssc,d} \\ V_{sssc,q} \\ V_{stat,d} \\ V_{stat,q} \end{bmatrix} = B_p^{-1} (U - A_{pp}X_p - W_p) \quad (3.4)$$

3.3 Principe de commande des courants

Le schéma de régulation des courants est donné à la figure (3.1).

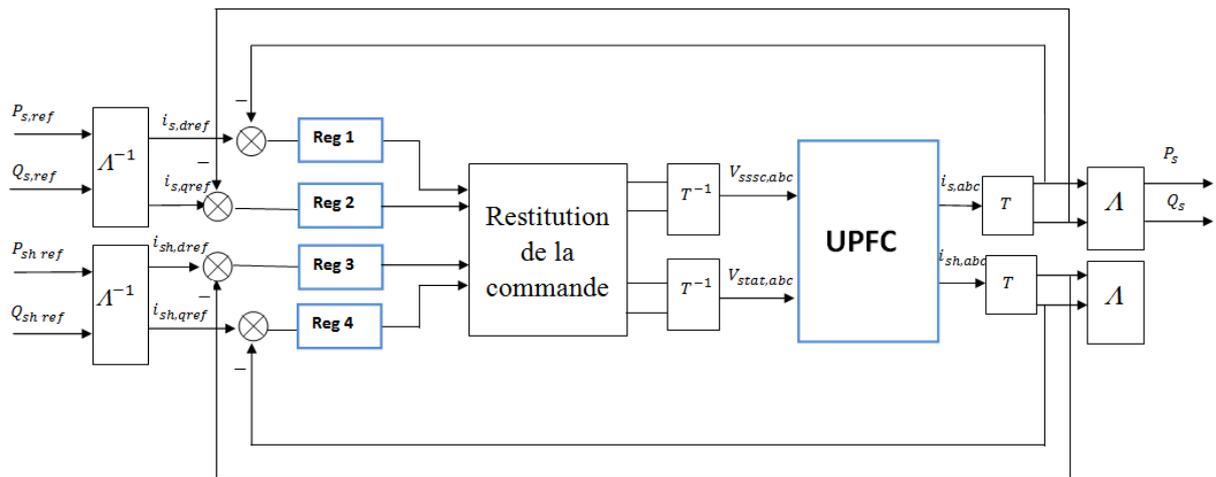


Figure 3. 3 : Schéma global de régulation du courant

D'après cette figure, des régulateurs PI sont utilisés pour réguler les courants séries et shunts à leurs références calculées en fonction des puissances actives et réactives de référence.

Les valeurs instantanées des courants sont comparées à leurs références et les écarts sont traduits par les régulateurs PI en tensions de commande tels que indiqué à la figure (3.1). Ici, les commandes réelles du système sont directement fournies par le bloc de restitution des commandes à partir des sorties des régulateurs de courant, ce qui donne en sortie les composantes d-q de la tension. Celles-ci sont transformées, en exploitant la transformation de Park inverse, dans le repère triphasé pour donner les tensions de commande réelles qui à leur tour sont générées par les dispositifs électroniques de puissance utilisant une technique de modulation appropriée (les techniques PWM ou PAM sont les plus utilisées) [14].

Il est à noter que toutes les lois de commande, utilisées dans la boucle interne relative à la régulation des courants, sont synthétisées dans le référentiel synchrone.

3.4 Génération des références en puissances shunts

Dans le cas général, la partie parallèle de l'UPFC compense la puissance réactive au point de raccordement et régule la tension aux bornes du condensateur. La régulation de la tension continue compense la puissance active demandée par la partie série et les pertes de conduction dans la cascade STATCOM-SSSC. Il faudrait pour cela déterminer les références en puissances shunts servant de consignes pour le système de commande de la tension du bus continu [1].

La puissance active de référence $P_{sh,ref}$ est obtenue à partir de la régulation de la tension continue quant à la puissance réactive de référence $Q_{sh,ref}$, elle est calculée de façon à ce que le STATCOM tire une puissance sous un facteur de puissance $\cos(\varphi)$ bien choisi. Une telle régulation est illustrée par le schéma suivant :



Figure 3.4 : Schéma d'identification des puissances shunts de référence

3.5 Synthèse des correcteurs

Pour la régulation des courants de ligne et shunts, les erreurs de poursuite e_s, e_{sh} sont définies comme suit :

$$\begin{cases} e_s = i_{sp,ref} - i_{sp} \\ e_{sh} = i_{shp,ref} - i_{shp} \end{cases} \quad (3.5)$$

La régulation de la tension continue est détaillée en *annexe B*.

Pour une régulation de type PI, les lois de commandes dans chaque axe sont données par :

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

3.6 Résultats de simulation et interprétation

Des programmes Matlab ont été élaborés pour simuler le fonctionnement de la ligne électrique équipée du dispositif UPFC en utilisant les correcteurs synthétisés précédemment. Pour intégrer les équations d'état du modèle, l'algorithme de Runge-Kutta a été utilisé avec une fréquence de simulation de 10 kHz.

3.6.1 Régulation du flux de puissance

Soit la puissance active de la ligne égale à 200MW et la puissance réactive égale à 20MVAR

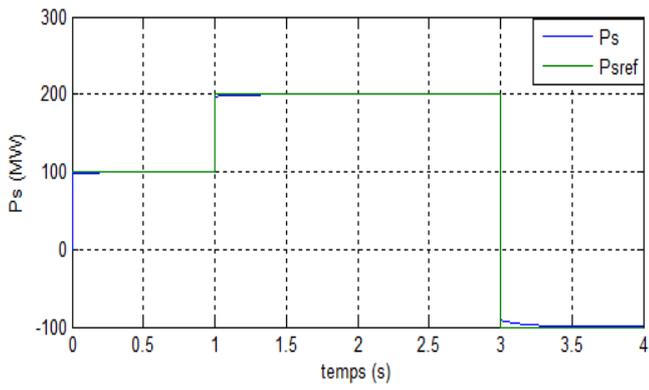
Le tableau (3.1) donne les consignes en puissance et les instants de changement correspondants :

<i>Instant t</i>	<i>Puissances de références</i>	
t = 1s	$P_{s,ref} = 200MW$	$Q_{s,ref} = 20MVAR$
t = 2s	$P_{s,ref} = 200MW$	$Q_{s,ref} = 0MVAR$
t = 3 s	$P_{s,ref} = -100MW$	$Q_{s,ref} = 0MVAR$

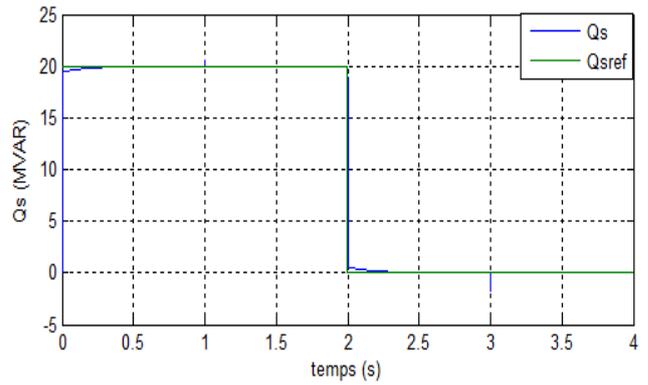
Tableau 3.1 : les consignes en puissances

Les signaux suivants sont visualisés: La puissance active transitée dans la ligne P_s

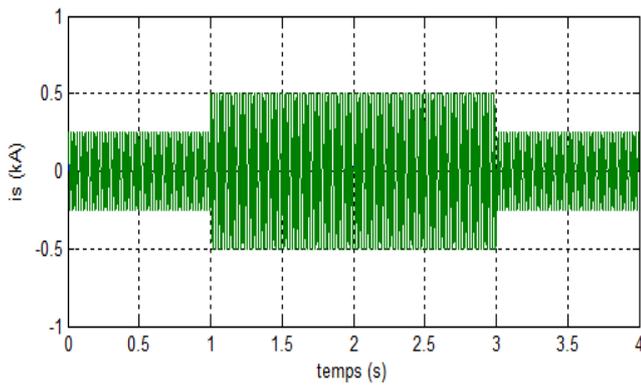
- La puissance réactive transitée dans la ligne Q_s
- Le courant de la ligne i_s
- La tension continue aux bornes du condensateur C, V_c
- Le courant shunt injecté par le STATCOM i_{sh}
- La tension série injectée par le SSSC V_{SSSC}



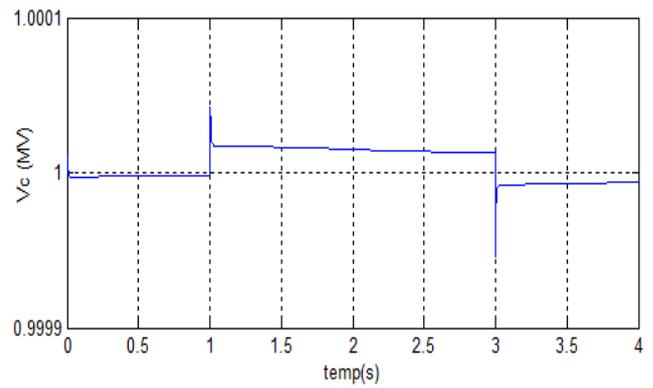
Puissance active de la ligne



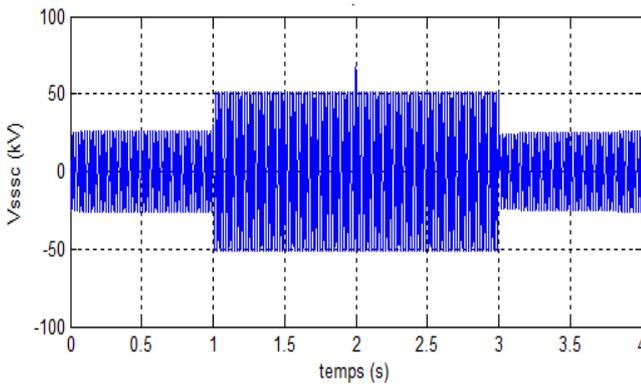
Puissance réactive de la ligne



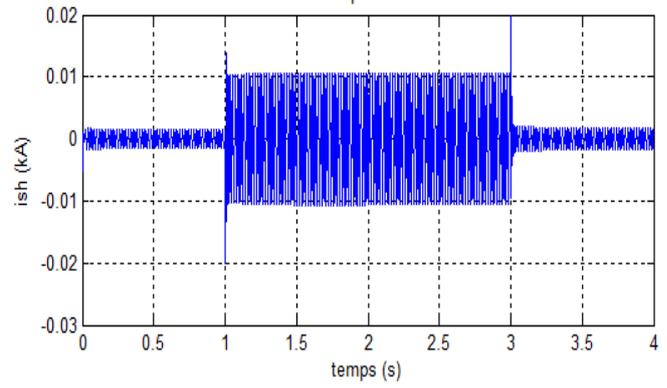
Courant de la ligne phase(a)



Tension du bus continu



Tension série injectée phase(a)



Courant shunt injecté phase(a)

Figure 3.3 : Résultats des simulations pour un changement de référence

À l'instant $t = 1 \text{ s}$, la référence en puissance active bascule de 100MW à 200MW .

La simulation montre une excellente poursuite des puissances de ligne.

Avec l'augmentation de la demande en puissance active, le SSSC injecte une forte tension afin d'augmenter l'angle de transport de la ligne et par conséquent, répondre au besoin. Le courant délivré par le STATCOM augmente à son tour pour assurer ainsi la régulation de la tension continue V_C .

À l'instant $t = 2 \text{ s}$, la puissance réactive de référence est diminuée jusqu'à 0VAR .

A l'absence de la demande en puissance réactive dans la ligne, la tension V_{SSC} diminue et le transfert de puissance du *STATCOM* au SSSC diminue cela se traduit par une baisse du courant de la partie shunt.

À l'instant $t = 3 \text{ s}$, la référence en puissance devient $P_{s,ref} = -100\text{MW}$

La tension injectée par le SSSC diminue pour ramener la puissance active à sa référence. Le courant shunt diminue ainsi pour assurer la régulation de la tension aux bornes du condensateur.

3.6.2 Creux de tension

Un creux de tension de 25% survient sur le réseau aval à l'instant $t = 1.4$ s durant 60 ms. Les simulations sont données ci-dessous:

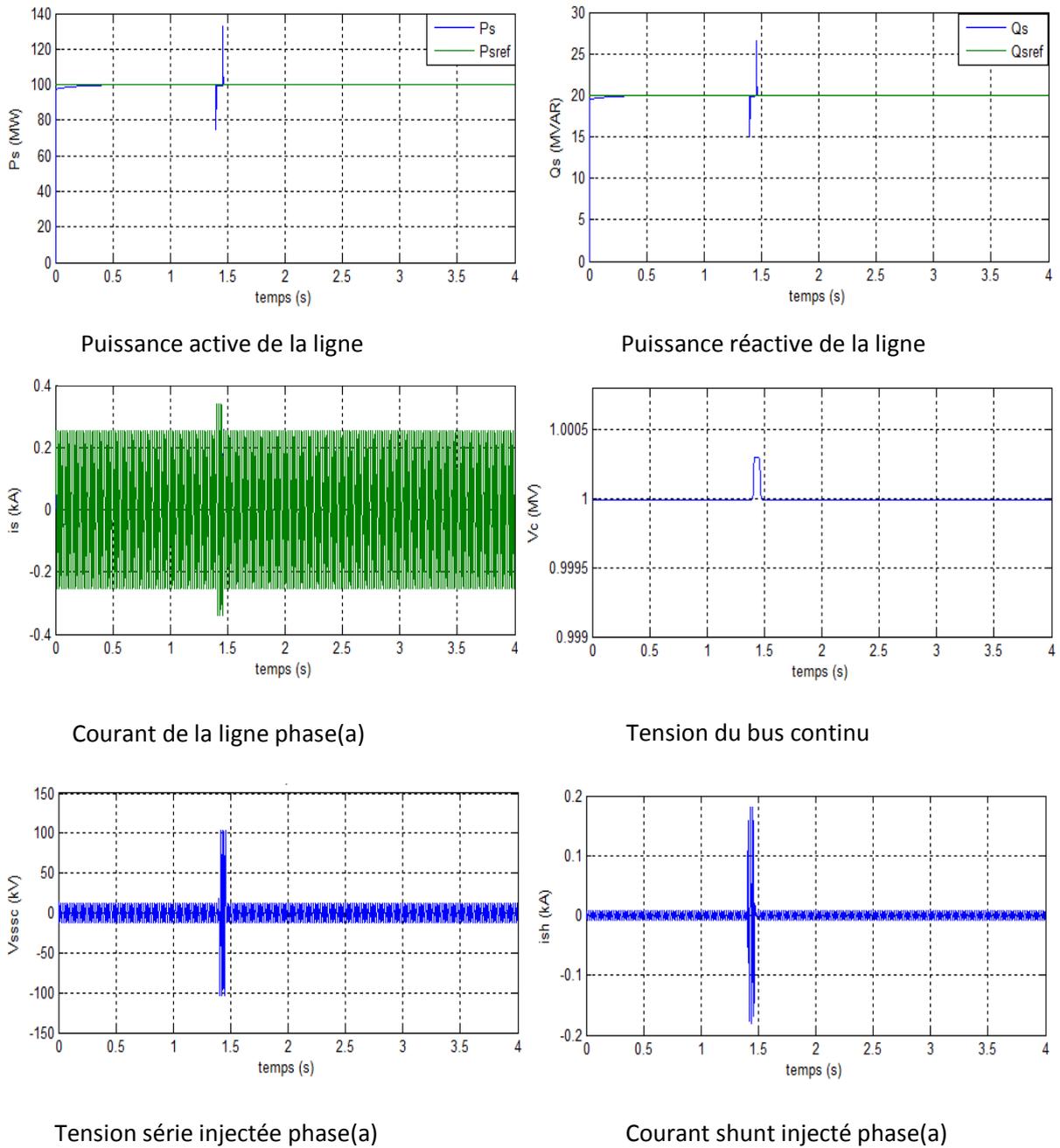


Figure 3.4 : Résultats des simulations pour un creux de tension

Dans cette situation, il y a apparition de deux pics de puissance active, le premier à l'instant $t = 1.4 \text{ s}$ où la puissance a brusquement chuté puis régulée pour suivre la référence, le deuxième pic apparaît à l'instant $t = 1.46 \text{ s}$ suite au rétablissement de la tension de sortie à sa valeur nominale. Cependant, la poursuite de la référence reste effective.

Deux autres pics apparaissent concernant la puissance réactive et sont dus à la variation brusque de la tension en sortie.

La tension V_{SSC} augmente d'une valeur importante afin de compenser cette chute de tension. Suite à cette augmentation, le courant de la partie shunt augmente pour délivrer de la puissance active shunt à la partie SSSC et assurer ainsi le maintien de la tension aux bornes du condensateur.

3.6.3 Surtension

La simulation d'une surtension survenant en avale avec une augmentation de 10% à l'instant $t=1.4s$ d'une durée de 60 ms donné les résultats suivants :

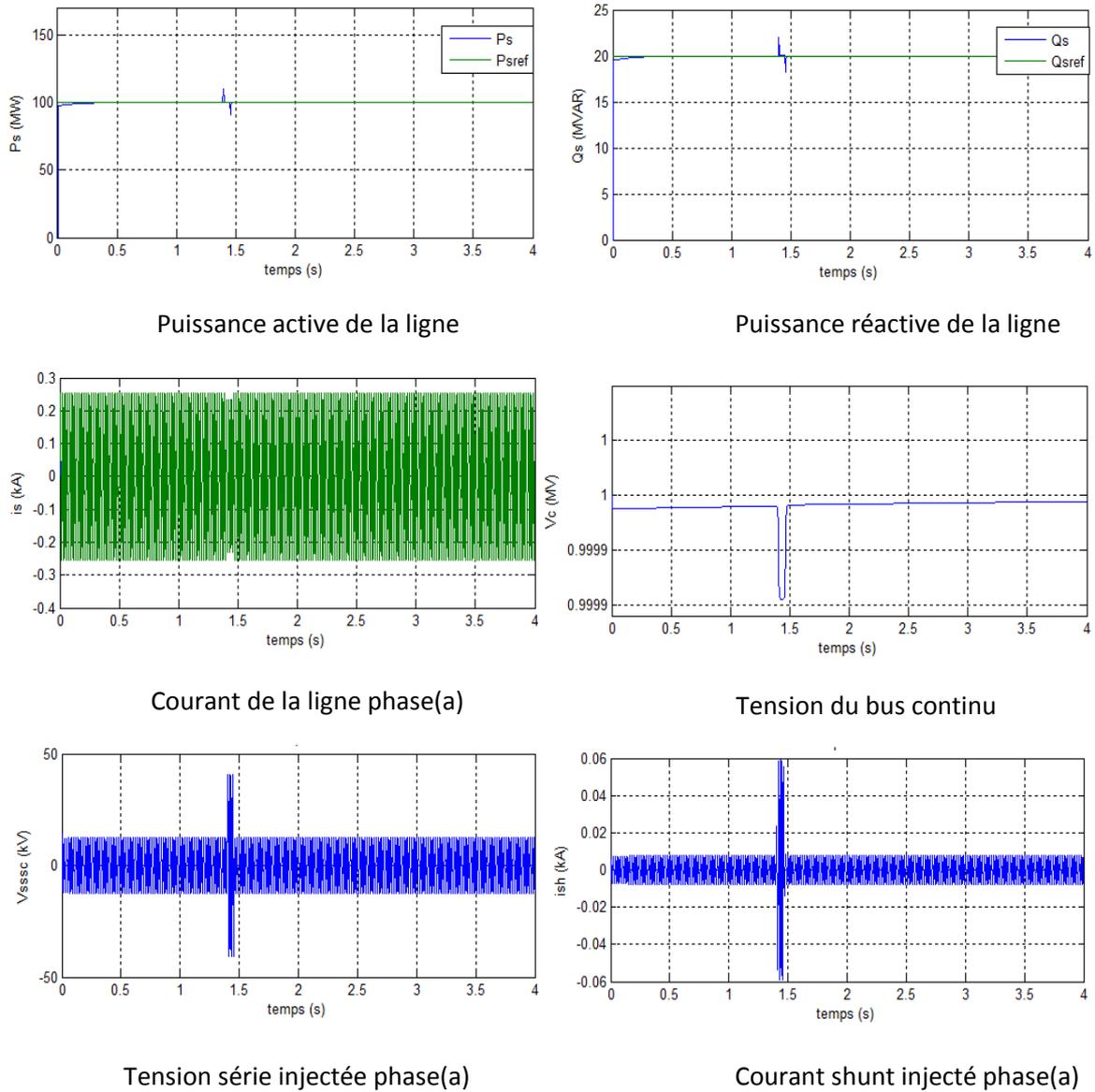


Figure 3.5 : Résultats des simulations pour une surtension

Au moment de l'apparition de la surtension le condensateur tends à se décharger ce qui amène le courant shunt à augmenter pour empêcher cette décharge en fournissant de la puissance active à la partie SSSC.

3.6.4 Court-circuit

Un court-circuit impédant est causé par la mise à la terre de ligne à l'instant 2 s et il dure 40ms.

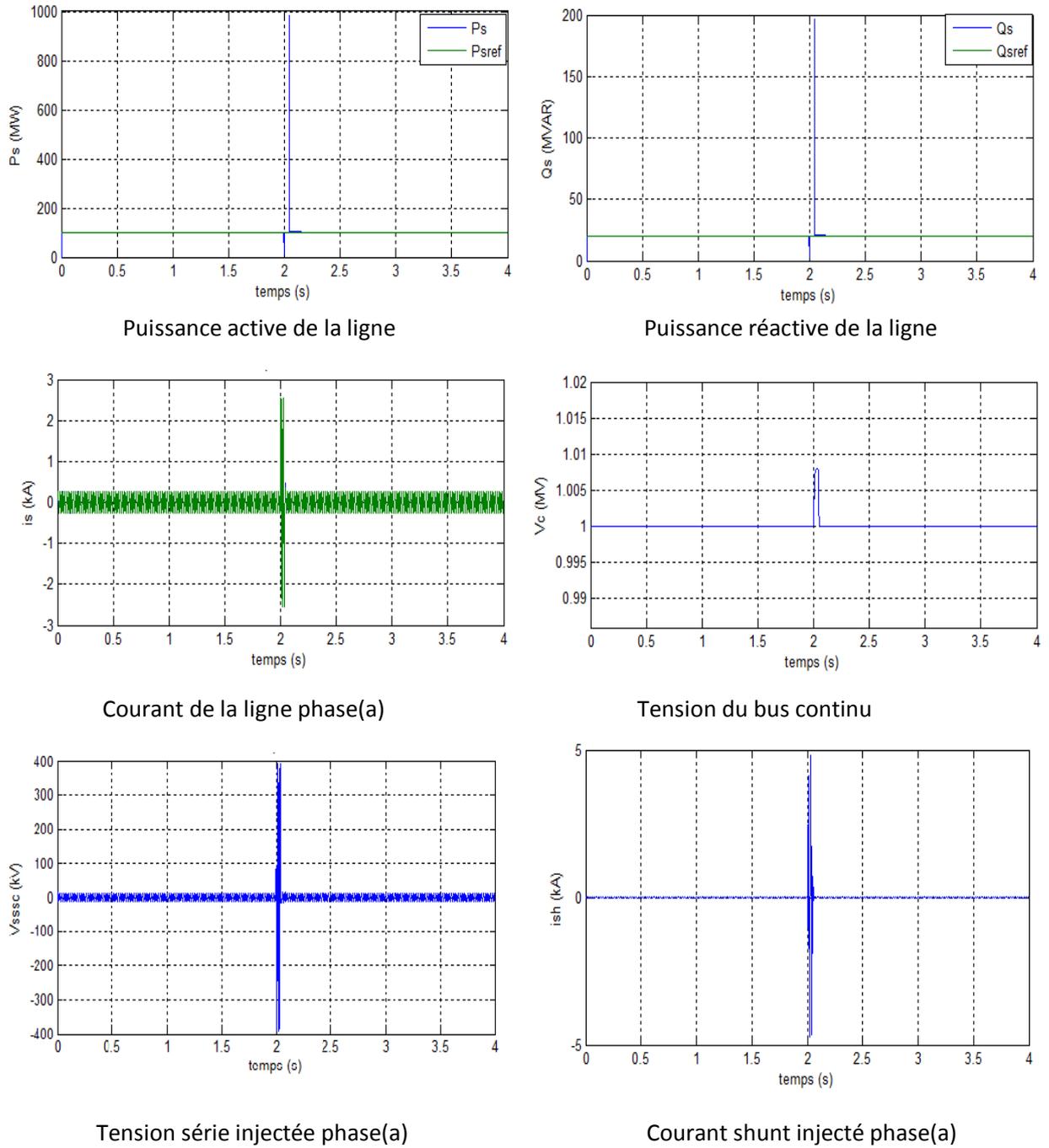


Figure 3.6 : Résultats des simulations pour un court-circuit

L'apparition de pics de puissance active et réactive d'une amplitude importante est due à la circulation d'un courant de court-circuit de grande amplitude (2.5 kA) dans la ligne. A la disparition du court-circuit, les grandeurs électriques sont ramenées à leurs références grâce aux différentes régulations.

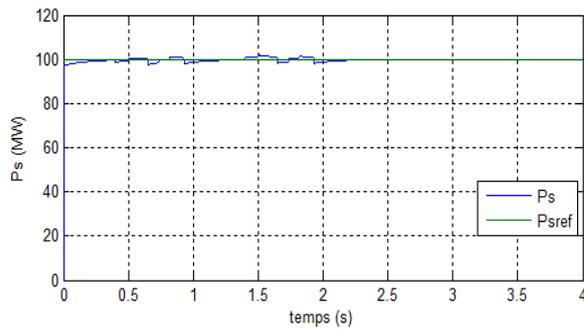
Remédier au problème du défaut triphasé (court-circuit) est réalisé par l'action conjointe du SSSC en insérant une tension de l'ordre 400 kV et du STATCOM en injectant un courant shunt de 5 kA pour compenser la chute de puissance à l'apparition du court-circuit.

La tension aux bornes du condensateur monte jusqu'à atteindre une valeur max de 1.008 MV , cependant elle reste constante (variation $< 0.8\%$).

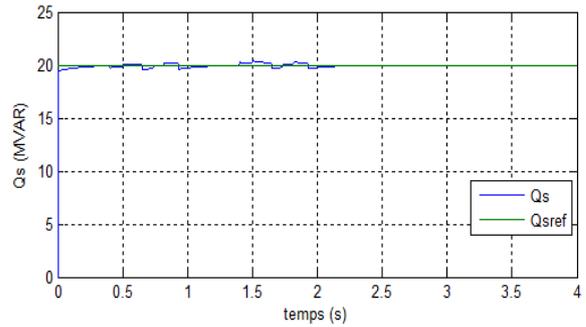
3.6.5 Incertitude paramétriques

Pour tester la robustesse de notre commande, des variations de 30 % sur la valeur de l'inductance et 10% sur celle de la résistance est introduite à partir de l'instant $t=0.4s$.

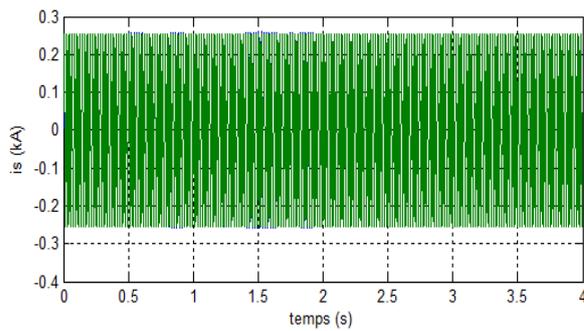
Les résultats de simulation sont représentés dans la figure (3.7)



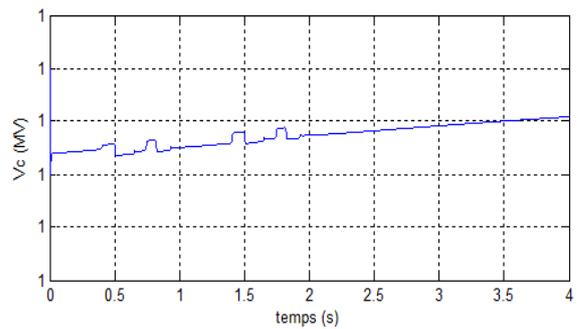
Puissance active de la ligne



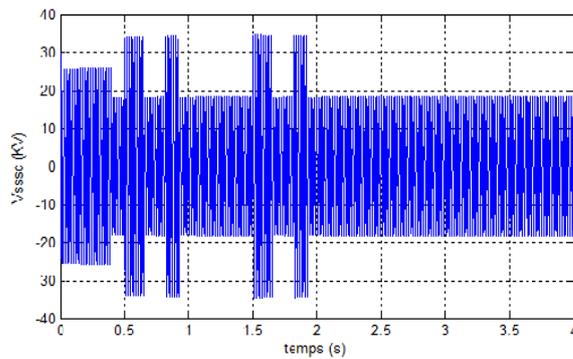
Puissance réactive de la ligne



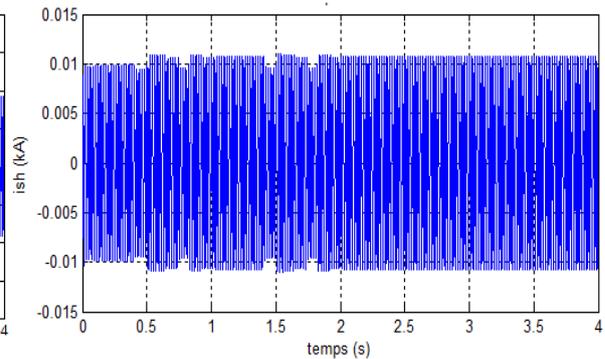
Courant de la ligne phase(a)



Tension du bus continu



Tension série injectée phase(a)



Courant shunt injecté phase(a)

Figure 3.7 : Résultats des simulations pour des incertitudes paramétriques

On remarque que cette variation paramétrique influe directement sur la commande. Le système est devenu sensible à cette variation qui se traduit par des dépassements de consigne de 2%. Cependant, les régulateur PI arrivent à ramener la puissance autour de sa référence.

3.7 Conclusion

Dans ce chapitre, une version découplée du modèle du système a été développée à partir du modèle de Park et à servi à la synthèse de lois de commande **classique** de type PI pour imposer les consignes en courant images des puissances. Les puissances de références représentent les directives du gestionnaire du réseau électrique pour la partie série, quant à la partie shunt, c'est la sortie du régulateur de la tension continue qui constitue la puissance active et la puissance réactive en est la conséquence en imposant un facteur de puissance au STATCOM.

Du point de vue rejet de perturbation et poursuite de référence en puissance, Le fonctionnement du système de commande est satisfaisant. En effet, les régulateurs sont parvenus à suivre les changements des références dans les situations normales et défailantes.

Dans le chapitre suivant, une technique de commande **moderne** basée sur l'intelligence artificielle, sera exposée et appliquée à la conduite du système électrique en présence de l'UPFC.

Chapitre 4

Logique floue

4.1 Introduction

Depuis l'apparition du formalisme de la logique floue, la philosophie de commande mal définie ou complètement inconnue qui ne peut pas être modélisée soigneusement d'une manière mathématique, a connu un changement radical. Ceci est due au fait que la loi de commande conventionnelles sont remplacées par une série de règles linguistiques de type : [22]

SI (condition) **ALORS** (action)

Son but est, comme en automatique classique, de traiter des problèmes de commande de processus c'est-à-dire de gérer un processus en fonction d'une consigne donnée, par action sur les variables qui décrivent le processus, mais son approche est différente de celle de l'automatique classique. Elle se sert le plus souvent des connaissances des experts ou d'opérateurs qualifiés travaillant sur le processus [23]

La logique floue suscite actuellement un intérêt général auprès des chercheurs et des industriels, mais plus généralement auprès de tous ceux qui éprouvent le besoin de formaliser des méthodes empiriques, de généraliser des modes de raisonnement naturels, d'automatiser la prise de décision dans leur domaine, de construire des systèmes artificiels effectuant les tâches habituellement prises en charge par l'être humain [24] En effet, la logique floue a été introduite pour approcher le raisonnement humain à l'aide d'une représentation adéquate des connaissances. Son intérêt réside dans sa capacité à traiter l'imprécis, l'incertain et le vague. Elle est issue de la capacité de l'homme à décider et agir de façon pertinente malgré le flou des connaissances disponibles [24].

La théorie de la logique floue établie par Zadeh [25] au milieu des années soixante à l'université de Berkeley en Californie a été le point de départ des recherches étendues dans divers domaines de l'ingénierie, avec l'application des algorithmes flous, en raison de la simplicité, de leur mise au point et de la non nécessité de la modélisation du processus.

La commande est l'un des principaux domaines d'application de la logique floue. En effet, le premier contact entre cette nouvelle théorie et la commande a été établi au début des années 70.

C'est en 1974, que le premier régulateur flou a été conçu par E. Mamdani [26], qui était inspiré de l'article de Zadeh [27].

La commande floue produit un moyen efficace pour convertir la commande linguistique issue des connaissances d'un expert en un algorithme de commande automatique. Le régulateur flou est utilisé pour la commande des systèmes complexes ou mal définis et ceci sans avoir de données précises ou de modèles pour les représenter. En effet la commande floue est pratique dans le cas où le modèle

mathématique du processus est à obtenir ou bien ne peut pas être obtenu sous forme d'équations préétablies. D'un autre côté, la commande floue est une technique à coût bas et facile à implémenter.

Le but de ce chapitre est de représenter un bref rappel sur les ensembles flous et un aperçu général sur la logique floue, ainsi que son application pour la commande de l'UPFC.

4.2 Concepts de base de la logique floue

La plupart des systèmes non linéaires sont modélisables sous des hypothèses parfois très restrictives. Ces hypothèses, rendent difficiles la mise en œuvre des schémas de commande résultants et leur application. Il est donc nécessaire de prendre en compte toutes les informations imprécises et incertaines relatives au système. La théorie des sous-ensembles flous développée par Lotfi A. Zadeh en 1965, a permis de traiter les imprécisions et les incertitudes. De nombreuses applications sont alors développées dans divers domaines, là où aucun modèle déterministe n'existe ou n'est possible d'obtenir.

L'avantage d'un système flou est que seules les connaissances du comportement du procédé à commander sont suffisantes pour la synthèse de la loi de commande, et ils soulèvent un large intérêt, tant théorique que pratique, dans l'identification est la commande des processus complexes et non linéaires. Cela est dû essentiellement à trois traits principaux :

- Le premier est que les systèmes flous permettent une simple inclusion d'informations qualitatives dans la conception du contrôleur;
- Le second est que les systèmes flous n'exigent pas l'existence d'un modèle analytique du processus à contrôler, et peu d'information est suffisant pour mettre en œuvre la boucle de commande;
- Le troisième est que les systèmes flous sont des systèmes non linéaires et de ce fait plus adaptés à la commande des processus non linéaires.

4.2.1 Variables linguistiques et ensembles flous

La description imprécise d'une certaine situation, d'un phénomène ou d'une grandeur physique ne peut se faire que par des expressions relatives ou floues. Ces différentes classes d'expressions floues dites ensembles flous forment ce qu'on appelle des variables linguistiques. Afin de pouvoir traiter numériquement ces variables linguistiques qui sont normalisées généralement sur un intervalle bien déterminé appelé univers de discours, il faut les soumettre à une définition mathématique à base de fonctions d'appartenance qui montrent le degré de vérification de ces variables linguistiques relativement aux différents sous-ensembles flous de la même classe.

La figure (4.1) montre un exemple de variable linguistique associée au concept de température, représentée par les sous-ensembles flous où les termes linguistiques sont définis par : {Froide, moyenne, chaude} sur l'univers de discours représenté par les températures comprises dans l'intervalle [0,70].

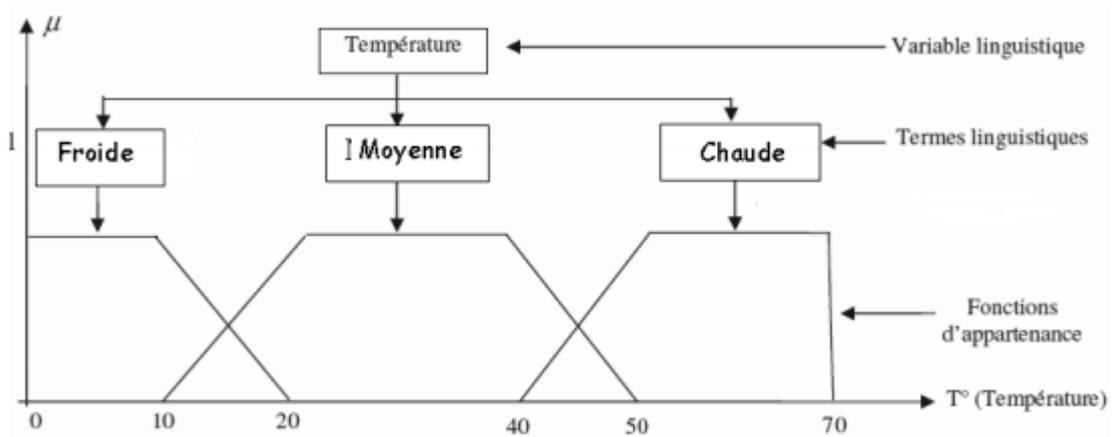


Figure 4.5 : Exemple d'ensembles flous pour la variable température

Une variable linguistique permet donc, d'une part de synthétiser l'information manipulée grâce aux sous-ensembles flous, et d'autre part de représenter des concepts imprécis tels que l'homme en manipule quotidiennement. La détermination de la forme et de la position de ces sous-ensembles flous sont définis a priori par des experts du domaine afin qu'ils représentent exactement leurs connaissances. Cependant, il n'est pas toujours possible d'obtenir une telle expertise, que ce soit à cause de la complexité du problème ou bien parce que les experts sont trop rares voire inexistants. Dans ces conditions, des algorithmes peuvent être mis en œuvre pour extraire automatiquement les sous-ensembles flous. Une expertise du résultat peut éventuellement être faite par la suite afin de déterminer la signification des sous-ensembles flous obtenus.

4.2.2 Fonctions d'appartenances

Une fonction d'appartenance d'un ensemble flou A définie sur l'univers de discours X, notée $\mu_A(x)$ tel que $x \in X$, est une courbe qui définit comment chaque point dans l'univers de discours est tracé avec une valeur d'appartenance comprise dans l'intervalle [0, 1] ,[28]:

$$\begin{aligned} \mu_A(x) &: X \rightarrow [0,1] \\ &: x \rightarrow \mu_A(x) \end{aligned}$$

La valeur $\mu_A(x)$ mesure l'appartenance ou le degré avec lequel un élément x appartient à l'ensemble A. Il n'y a pas de règle précise pour la définition de fonction d'appartenance. Alors, chaque

ensemble flou peut être représenté par sa fonction d'appartenance. Les fonctions d'appartenance peuvent être symétriques, régulièrement distribuées ou avoir une distribution non uniforme. En général, la forme des fonctions d'appartenance dépend de l'application et de la grandeur à modéliser et peuvent avoir différentes formes :

- la fonction triangulaire, elle est définie par les paramètres (a, b, c) (Figure 4.2 : (a))

$$\mu(x) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b}\right), 0\right)$$

- la fonction trapézoïdale (Figure 4.2 : (b)) : elle est liée aux paramètres (a, b, c, d) par

$$\mu(x) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{d-x}{d-c}\right), 0\right)$$

- la fonction gaussienne (Figure 4.2 : (c)) : elle est définie par son centre c et sa variance σ

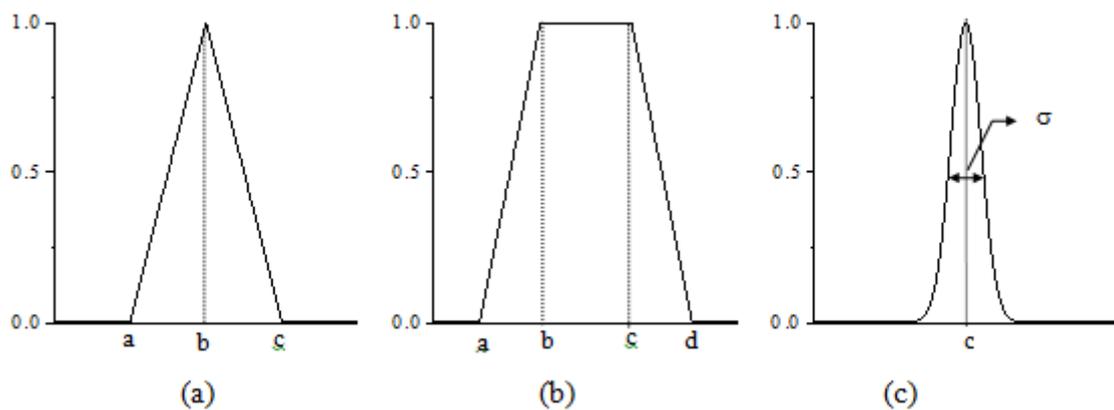
$$\mu(x) = \exp\left(-\frac{(x-c)^2}{2\sigma}\right)$$

- la fonction en forme de cloche (Figure 4.2 : (d)) : elle dépend des paramètres $(a, b$ et $c)$

$$\mu(x) = \frac{1}{1 + \left|\frac{x-c}{a}\right|^{2b}}$$

- la fonction sigmoïde (Figure 4.2 : (e) et (f)) : elle dépend des paramètres (a, c)

$$\mu(x) = \frac{1}{1 + \exp(-a(x-c))}$$



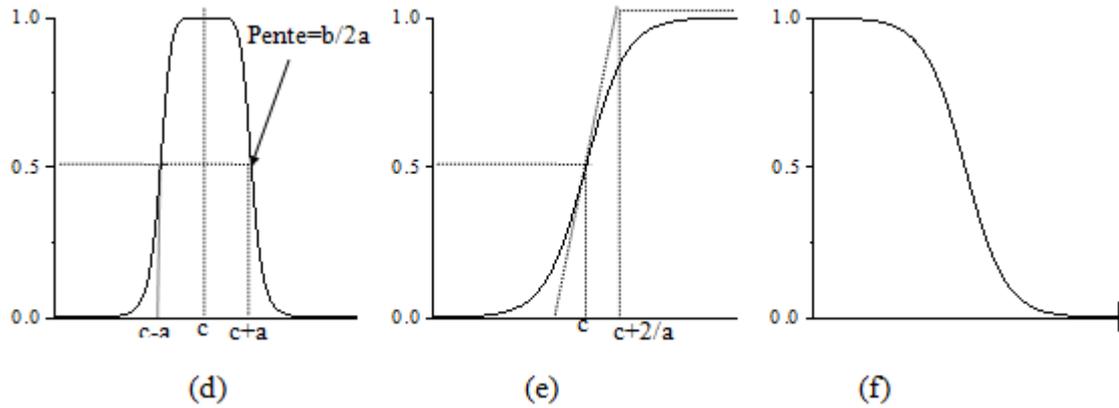


Figure 4. 6 : formes usuelles des fonctions d'appartenance

4.2.3 Opérations logiques sur les ensembles flous

Il est naturel de chercher une extension, des opérations de la logique classique (union, intersection, complément), aux ensembles flous en utilisant leur représentation par les fonctions d'appartenance.

Avant d'introduire ces trois opérations sur les ensembles flous, nous définissons en premier lieu la notion d'inclusion, qui joue un rôle central aussi bien pour les ensembles ordinaires que pour les ensembles flous.

Soient deux ensemble flous A et B définis sur l'ensemble de référence U ayant les fonctions d'appartenance respectives μ_A et μ_B .

4.2.3.a Inclusion ou sous-ensemble

Le sous-ensemble flou A est inclus dans l'ensemble flou B (ou, A est un sous-ensemble de B , ou A est plus petit ou égal à B) si et seulement si :

$$\mu_A(x) \leq \mu_B(x) \quad \forall x \in U$$

$$\text{Donc si } A \subseteq B \Leftrightarrow \mu_A(x) \leq \mu_B(x) \quad \forall x \in U$$

4.2.3.b Disjonction floue

La disjonction de deux ensembles flous A et B est un ensemble flou C (Figure 4.3 : (c)), dénoté par :

$$C = A \cup B$$

Dont la fonction d'appartenance est liée à celle de A et B par:

$$\mu_C(x) = \mu_A(x) \oplus \mu_B(x)$$

Le symbole « \oplus » représente la co-norme triangulaire [29] qui est le plus grand des degrés avec lesquels il appartient à A et à B, qui est la plus utilisé dans le domaine de la commande.

4.2.3.c Conjonction floue

La conjonction de deux ensembles flous A et B est l'ensemble flou C (Figure 4.3 : (d)), noté par :

($C=A \dot{\cap} B$) dont la fonction d'appartenance est liée à celle de A et B par :

$$\mu_C(x) = \mu_A(x) * \mu_B(x)$$

Le symbole « * » représente la norme triangulaire [30]La norme triangulaire caractérise le plus petit des degrés avec lesquels il appartient à A et à B. Les normes les plus utilisés dans le domaine de la commande sont:

$$\mu_A(x) * \mu_B(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x))$$

$$\mu_A(x) * \mu_B(x) = \mu_A(x) \times \mu_B(x)$$

4.2.3.d Complément (négation)

Le complément de l'ensemble flou A, noté par \bar{A} ou encore not(A) est défini comme suit (Figure 4.3: (b)) :

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x)$$

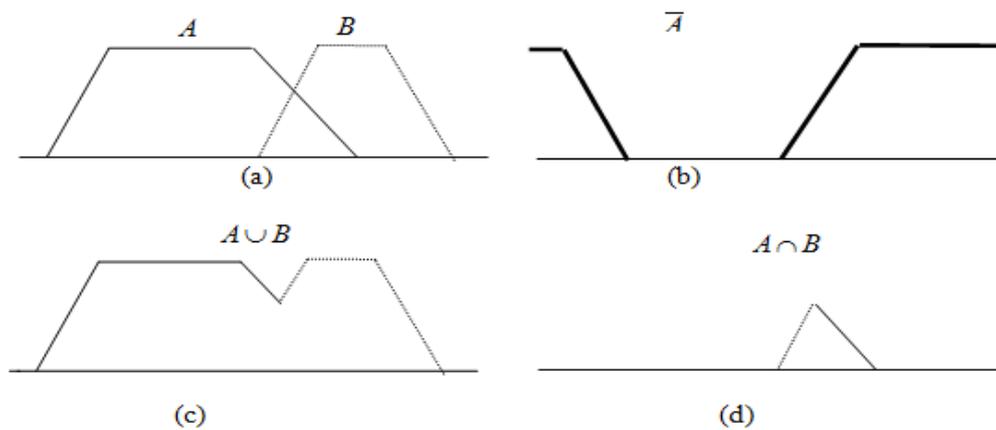


Figure 4. 7 : Opération sur les ensembles flous.

4.2.4 Les règles floues

Une règle floue R : si x est A Alors y est B est une relation entre deux propositions floues ayant chacune un rôle particulier. La première (x est A) est appelée prémisse de la règle alors que la seconde (y est B) est la conclusion.

Dans le cas de propositions floues élémentaires, la prémisse et la conclusion sont définies à partir de deux variables linguistiques A et B décrivant les connaissances relatives aux univers de discours X_A et X_B de manière à prendre en compte l'imprécision relative aux modalités de A et B. Une proposition floue élémentaire est souvent insuffisante pour représenter l'ensemble des informations à manipuler. Plusieurs propositions floues peuvent alors être combinées pour enrichir et détailler la représentation.

La relation R entre la prémisse et la conclusion de la règle est déterminée par une implication floue dont le degré de vérité est défini par une fonction d'appartenance μ_R qui dépend du degré de vérité μ_A et μ_B de chacune des deux propositions élémentaires. Les implications les plus courantes permettant la détermination de la fonction d'appartenance résultante décrivant la proposition floue R sont donnés par :

L'implication de Mamdani : $\mu_R(x, y) = \min(\mu_A(x); \mu_B(y))$

L'implication de Larsen : $\mu_R(x, y) = \mu_A(x) \cdot \mu_B(y)$

$$x \in X_A \text{ et } y \in X_B$$

4.2.5 Description et structure d'une commande par la logique floue

Contrairement aux techniques de réglage classique, le réglage par la logique floue n'utilise pas des formules ou des relations mathématiques bien déterminées ou précises. Mais, il manipule des inférences avec plusieurs règles floues à base des opérateurs flous ET, OU, ALORS,.

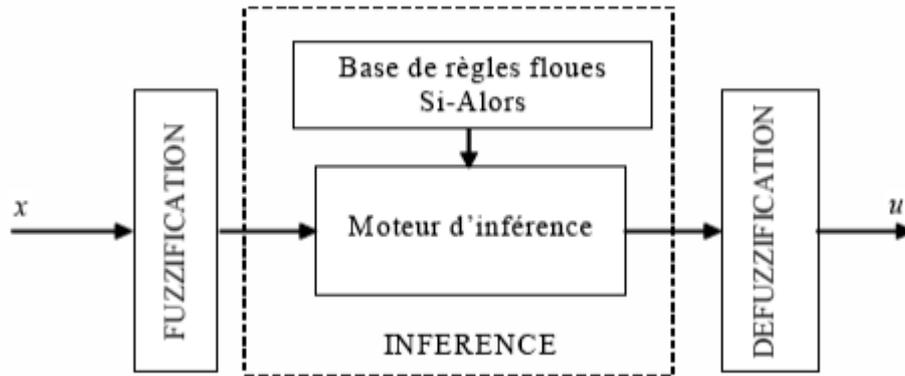


Figure 4.8 : Structure interne d'un contrôleur flou.

On peut distinguer trois parties principales constituant la structure d'un régulateur flou :

- Une interface de fuzzification,
- Un mécanisme d'Inférence,
- Une interface de défuzzification.

La figure (4.4) représente, à titre d'illustration, la structure d'un régulateur flou à une entrée x et une sortie u .

4.2.5.a Interface de fuzzification

La fuzzification proprement dite consiste à définir des fonctions d'appartenance pour les différentes variables linguistiques. Ceci a pour but la conversion d'une grandeur physique en une linguistique. Il s'agit d'une projection de la variable physique sur les ensembles flous caractérisant cette variable. Cette opération permet d'avoir une mesure précise sur le degré d'appartenance de la variable d'entrée à chaque ensemble flou.

D'une autre manière, l'entrée x varie dans l'univers de discours qui est partagé en un nombre fini d'ensembles flous de telle sorte que dans chaque zone il y ait une situation dominante.

Afin de faciliter le traitement numérique et l'utilisation de ces ensembles, on les décrit par les fonctions d'appartenance. Elles admettent comme argument la position de x dans l'univers de discours, et comme sortie le degré d'appartenance de x à la situation décrite par la fonction.

4.2.5.b Interface d'inférence floue

L'interface d'inférence est formée de deux blocs :

- La base de règles, composé d'un ensemble de relations liant les variables d'entrées aux variables de sorties du système à régler. Chaque relation est composée d'une condition précédée du symbole Si appelée prémisse, et d'une conclusion (action, décision, opération ou commande) précédée du symbole Alors.

- Le moteur d'inférence réalise le traitement numérique des règles d'inférence, décrites par des opérateurs flous, pour obtenir la sortie linguistique ou floue du régulateur. Cette opération est faite par différentes méthodes, on cite principalement :

La méthode d'inférence max-min : L'opérateur ET est réalisé par la formation du minimum, l'opérateur OU est réalisé par la formation du maximum, et l'implication (ALORS) est réalisée par la formation du minimum.

La méthode d'inférence max-produit : L'opérateur ET est réalisé par la formation du produit, l'opérateur OU est réalisé par la formation du maximum, et l'implication (ALORS) est réalisée par la formation du produit.

La méthode d'inférence somme-prod : On réalise au niveau de la condition, l'opérateur OU par la formation de la somme (valeur moyenne), et l'opérateur ET par la formation du produit. Pour la conclusion, l'opérateur ALORS est réalisé par un produit.

4.2.5.c Interface de défuzzification

La transformation d'une information floue en une information déterminée est la défuzzification (concrétisation). Pendant cette étape se fait la déduction de la grandeur de sortie numérique à partir de l'inférence floue. Il s'agit de calculer, à partir des degrés d'appartenance à tous les ensembles flous des variables d'entrées et des ensembles flous de la variable de sortie, une valeur numérique de la variable de sortie en utilisant un ensemble de règles. Parmi les stratégies de défuzzification, on cite la méthode du centre de gravité, la méthode du maximum et la méthode de la moyenne des maximums.

La technique du maximum : elle est la plus simple. Elle consiste à ne considérer, pour chaque sortie, que la règle présentant le maximum de validité. Cette règle, ignore les règles secondaires qui peuvent néanmoins être importantes pour le fonctionnement et la stabilité du système. Elle est par conséquent peu employée.

La technique de la moyenne des maximums : elle considère, comme valeur de sortie, la moyenne de toutes les valeurs pour lesquelles la fonction d'appartenance issues de l'inférence est maximale.

La technique du centre de gravité : plus performante, elle consiste à tracer, sur un même diagramme représentant les ensembles flous de sortie, les différentes zones correspondantes à chacune des règles et à calculer le centre de gravité de la zone consolidée. La méthode de défuzzification la plus mentionnée dans la littérature est celle de la détermination de l'abscisse μ_{Gr} du centre de gravité de la fonction d'appartenance résultante $\mu_r(u)$.

Nous avons introduit les notions de base de la théorie des ensembles flous et de la logique floue. Nous pouvons dire que la logique floue ouvre des possibilités remarquables d'exploitation des connaissances des experts. Les applications utilisant la logique floue sont faciles à réaliser et à utiliser.

Dans le cas des situations plus complexes, la capacité de l'être humain à produire une représentation et une description de ces systèmes est devenue primordiales. C'est ainsi que de nouvelles méthodologies ont été développées combinant la logique floue, les techniques de modélisations et les approches de commandes.

Chapitre 5

Commande PI floue

5.1 Introduction

Ce chapitre sera consacré à l'étude d'un régulateur PI flou et à la simulation afin d'apporter des améliorations à la commande PI classique précédemment mise au point.

Deux types de régulateurs PI-flous seront présentés.

- Le premier est un régulateur PI floue à gains fixes.
- Le deuxième est un régulateur PI-floue à gains adaptatifs.

5.2 Application de la commande PI- floue sur l'UPFC

5.2.1 Régulateur PI floue à gains fixes

Le régulateur synthétisé suivant utilise une régulation de type Mamdani.

5.2.1.a Synthèse du régulateur

Le schéma du régulateur PI-Floue à gains fixes est un système SISO mono-entrée/ mono-sortie représenté par la figure suivante [13]:

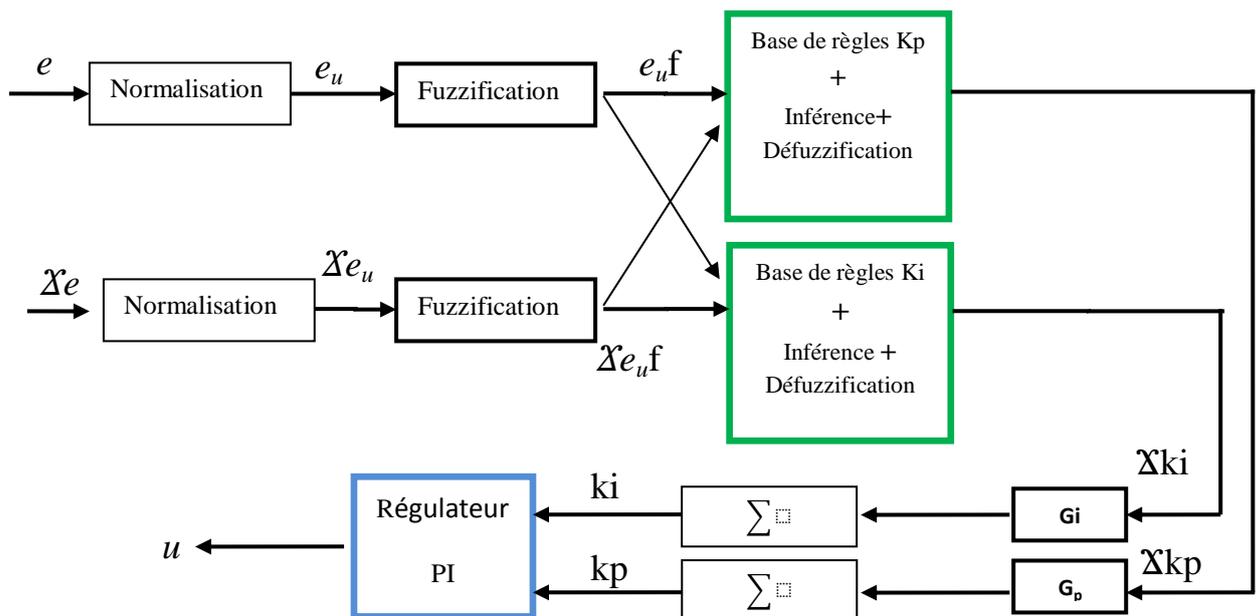


Figure 5.1 : Régulateur PI floue à gains fixes

D'après ce schéma, le système de commande est composé de:

- Deux blocs de normalisation de l'erreur et de sa dérivée.
- Deux blocs de fuzzification utilisés pour convertir l'erreur et sa variation en variable floues.
- Deux blocs composés par les règles de l'action proportionnelle (i.e. : intégrale) + inférence + défuzzification.
- Un régulateur de type sugeno est utilisé pour éviter la partie défuzzification.
- Deux blocs intégrateurs.

Il faut noter que les deux régulateurs possèdent la même structure et les fonctions d'appartenance identiques, la différence réside seulement au niveau de la partie base de règles.

Les méthodes choisies pour le succès des algorithmes flous permettent de formuler un ensemble de décisions en termes linguistiques, utilisant les ensembles flous pour décrire l'amplitude de l'erreur, de sa variation et de la commande appropriée. En combinant ces règles, on peut dresser des tables de décisions permettant de donner les valeurs de la sortie du régulateur correspondant aux situations d'intérêt.

Les facteurs d'échelle doivent être choisis sur la base de l'étude du système de sorte que, lors de petits phénomènes transitoires, le domaine admissible pour l'erreur et sa variation ne soit pas dépassé [14], [15], [16].

Le calcul de la commande pour les deux régulateurs est le même. Il se déroule comme suit:

- **Calcul des entrées du régulateur flou**

L'erreur de poursuite et sa variation sont calculées puis normalisée par des gains :

$$e_{ui} = e_i * G_{ei} \quad (5.1)$$

$$\dot{e}_{ui} = \dot{e}_i * G_{ei} \quad (5.2)$$

- **Calcul des sorties du régulateur flou**

Pour cela on parcourt les étapes suivantes :

Fuzzification : Calcul des degrés d'appartenance de e_i et \dot{e}_i pour les différentes classes à l'aide de leurs fonctions d'appartenance.

Inférence floue : Calcul des fonctions d'appartenance résultante de la variable linguistique Δ_{ui} à chacune de ces classes.

Défuzzification:

Il s'agit de calculer, à partir des degrés d'appartenance à tous les ensembles flous de la variable de sortie, l'abscisse qui correspond à la valeur de cette sortie. Dans notre cas la valeur de sortie du régulateur correspond au résultat du calcul du centre de gravité :

$$\Delta K_p = \frac{\sum_{i=1}^m w_i c_i}{\sum_{i=1}^m w_i} \quad \text{et} \quad \Delta K_i = \frac{\sum_{i=1}^m w_i c_i}{\sum_{i=1}^m w_i}$$

Où c_i est le centre de gravité de l'ensemble C_i conséquence de la $i^{\text{ème}}$ règle et w_i le degré d'activation de cette même règle.

Cette méthode est très simple à implémenter, du fait que le centre de gravité de la fonction d'appartenance de la conséquence de chaque règle est connu a priori.

- Calcule des paramètres du régulateur PI par:

$$K_{p,i} = K_{p,i-1} + G_p * \Delta K_p$$

$$K_{I,i} = K_{I,i-1} + G_I * \Delta K_I$$

Ou :

G_p, G_I : Gains associés à la commande Kp et Ki respectivement

ΔK_p et ΔK_I : Variation de la commande Kp et Ki respectivement

Enfin **la commande** :

$$u = K_p * e + K_I * \int e \, d\tau$$

Fonctions d'appartenance des différentes variables linguistiques :

Pour effectuer les simulations des fonctions d'appartenance Gaussiennes ont été choisi comme présenté sur la figure (5.2) :

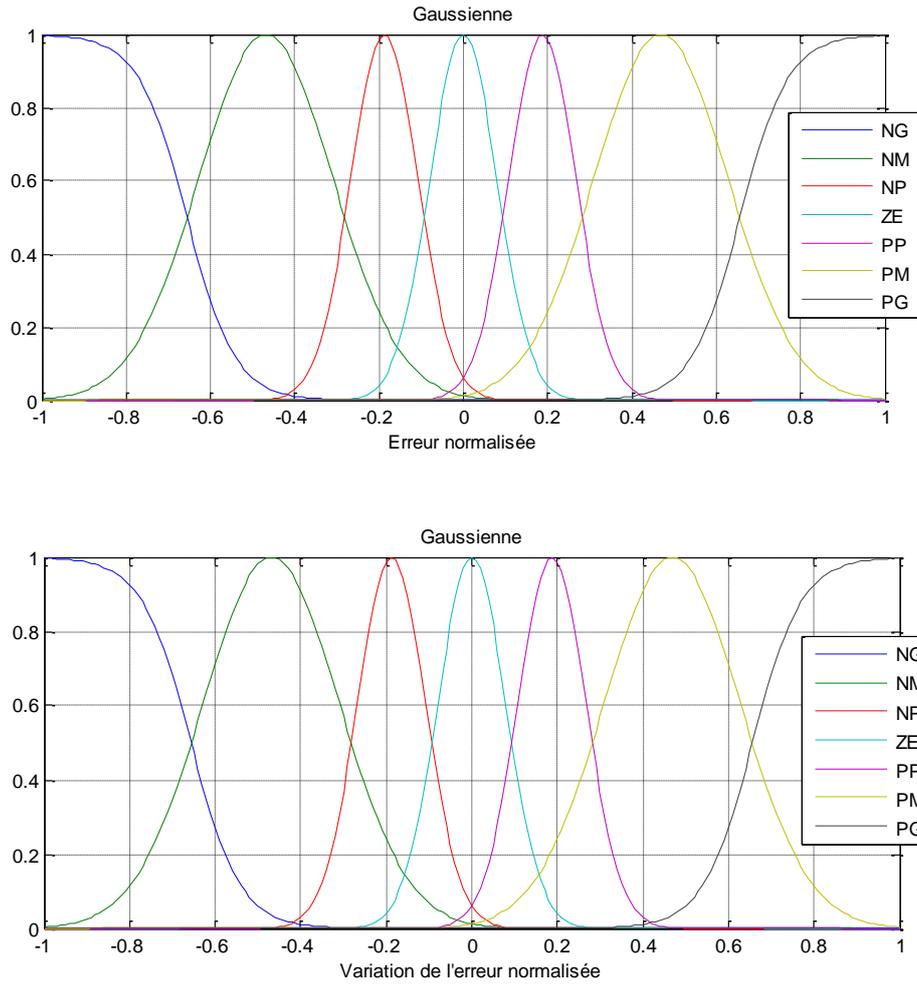


Figure 5. 1 : Fonctions d'appartenance Gaussiennes.

Les deux matrices d'inférence obtenues sont décrites par les deux tableaux suivant [17]:

ΔK_p		Variation de l'erreur Δe						
		NG	NM	NP	ZE	PP	PM	PG
L'erreur e	NG	PG	PM	PP	NP	NM	NM	NG
	NM	PM	PP	PM	PP	NP	PP	PM
	NP	ZE	NP	NP	PP	PP	PP	PP
	ZE	PP	PP	ZE	ZE	ZE	NP	PP
	PP	PP	PM	PM	PP	NP	NP	ZE
	PM	PM	PM	PP	PM	PP	PP	PM
	PG	PG	NP	NM	NP	PP	PM	PG

Tableau 5.1 : Tableau d'inférence de l'action proportionnelle K_p .

ΔK_i		Variation de l'erreur Δe						
		NG	NM	NP	ZE	PP	PM	PG
L'erreur e	NG	PG	PM	PM	PP	PM	PG	PG
	NM	PM	PP	PP	ZE	ZE	PP	PG
	NP	PP	ZE	ZE	NP	NM	PP	PM
	ZE	ZE	ZE	NP	ZE	NP	ZE	NP
	PP	ZE	ZE	NM	N ^o P	ZE	PP	PM
	PM	PP	PM	ZE	NM	PP	PM	PM
	PG	PM	PG	PM	ZE	PM	PM	PM

Tableau 5.2 : Tableau d'inférence de l'action intégrale K_i .

Les ensembles flous sont notés comme suit:

- NG: Négatif grand
- NM : Négatif moyen
- NP: Négatif petit
- ZE : Environ zéro
- PP : Positif petit
- PM : Positif moyen
- PG : Positif grand

5.2.1.b Simulation et résultats

- *Poursuite d'une référence de puissance*

Les simulations sont effectuées sous le logiciel MATLAB. L'objectif consiste à simuler le comportement du système en en poursuite de références en puissance :

Soit les puissances de références transitées dans la ligne :

$$P_{s,ref} = 100\text{MW} , Q_{s,ref} = 20\text{MVAR} .$$

Le tableau suivant indique les instants de changement des consignes en puissance et les consignes correspondantes :

<i>L'instant t</i>	<i>Les puissances de références</i>	
t = 1.3 s	$P_{s,ref} = 200\text{MW}$	$Q_{s,ref} = 60\text{MVAR}$
t = 2.7 s	$P_{s,ref} = -200\text{MW}$	$Q_{s,ref} = 60\text{MVAR}$
t = 3.5 s	$P_{s,ref} = -200\text{MW}$	$Q_{s,ref} = 0\text{MVAR}$

Tableau 5.3 : Changement de consigne de puissances

On visualise les signaux suivants :

La puissance active transitée dans la ligne P_s

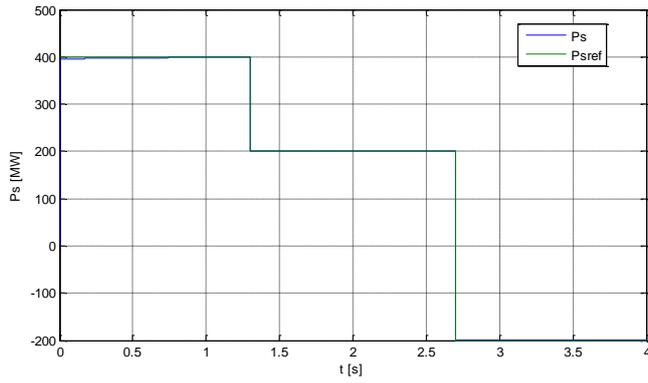
La puissance réactive transitée dans la ligne Q_s

Le courant shunt injecté par le STATCOM i_{sh}

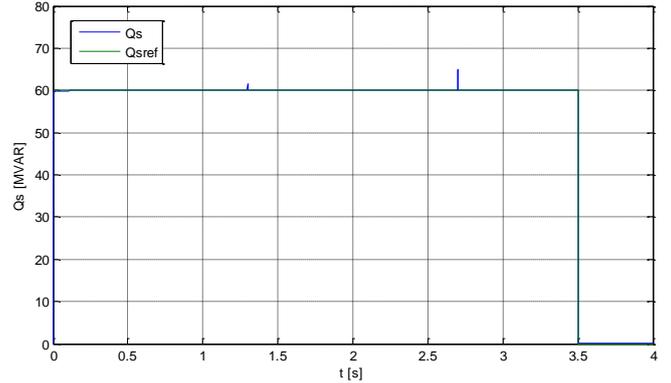
Le courant de la ligne i_s

La tension série injectée par le SSSC V_{sssc}

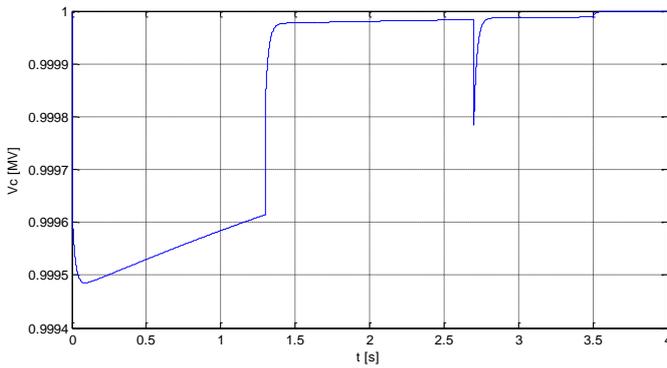
La tension continue aux bornes du condensateur C, V_c



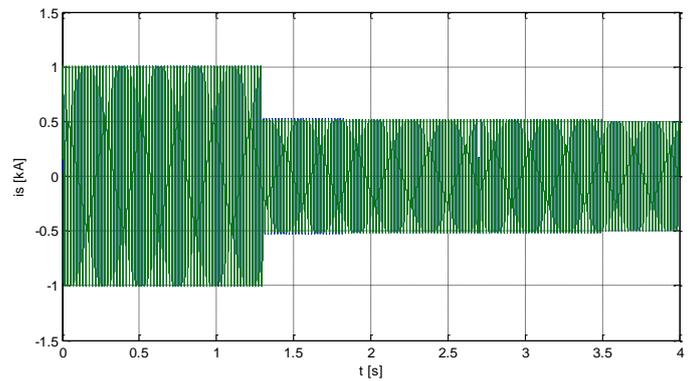
Puissance active en aval



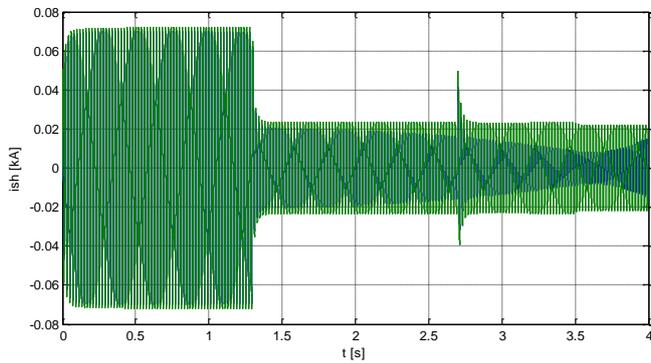
Puissance réactive en aval



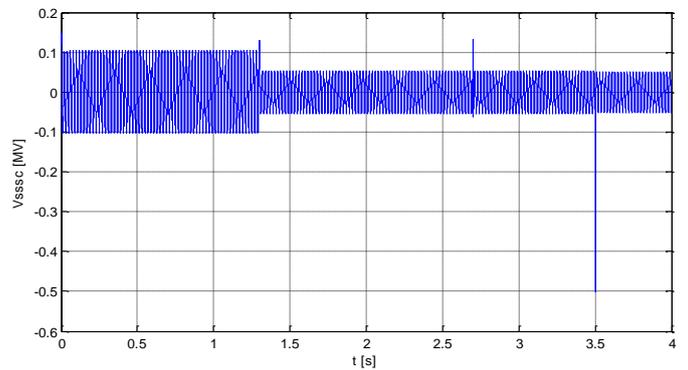
Tension aux bornes du condensateur
de couplage



Courant de la ligne



Courant injecté par le STATCOM



Tension injectée par le SSSC

Figure 5.3 : Résultats des simulations pour un changement de référence

A l'instant $t = 1.3$ s la référence en puissance active bascule de 400MW à 200MW .

La simulation montre clairement que les puissances de la ligne suivent parfaitement leurs références, ce qui valide le bon fonctionnement des régulateurs de la partie série.

A la diminution de la demande en puissance active à la sortie, la tension injectée par le SSSC diminue pour diminuer l'angle de transport δ . Le courant délivré par le STATCOM diminue à son tour suite à la diminution de la demande en puissance active par le SSSC.

A l'instant $t = 3.5$ s , la puissance réactive de référence est diminuée jusqu'à 0 VAR .

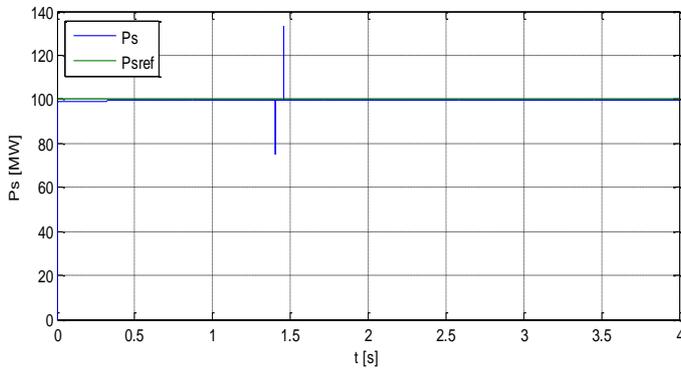
La tension V_{sssc} diminue brusquement pour assurer cette consigne de puissance réactive

Les puissances active et réactive suivent leurs consignes, cela valide le bon fonctionnement des régulateurs de la partie série.

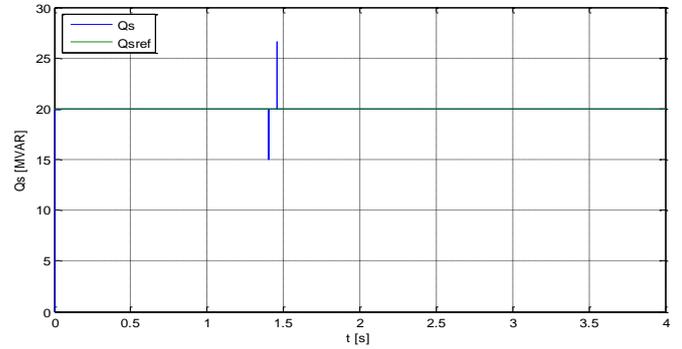
Grâce aux régulateurs de la partie parallèle, la tension aux bornes du condensateur reste constante. En effet, la partie parallèle injecte (ou consomme) de la puissance réactive de manière à ce que la tension du condensateur reste constante.

• *Creux de tension*

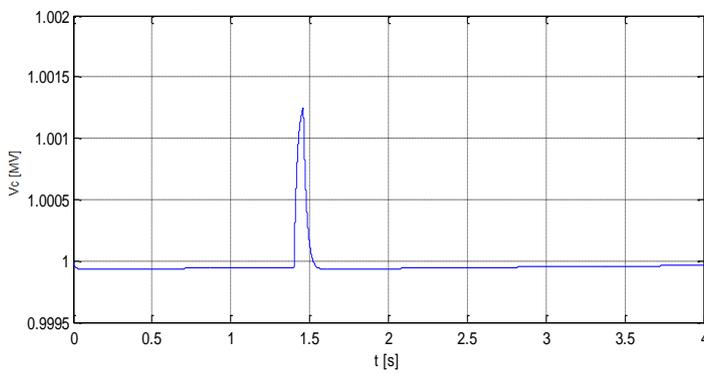
Un creux de tension est supposé survenir sur le réseau en sortie d'une diminution de 25% sur la valeur nominale de la tension en sortie à l'instant $t = 1.4$ s et dure 60ms. Les simulations ont donné les graphes suivants :



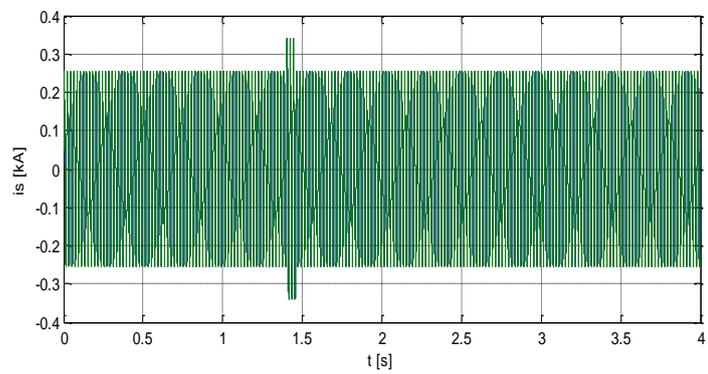
Puissance active en aval



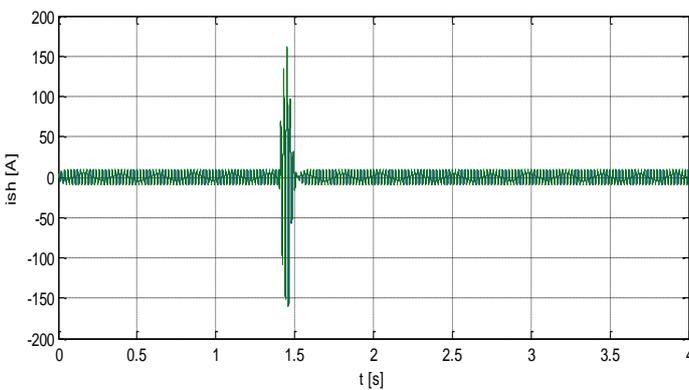
Puissance réactive en aval



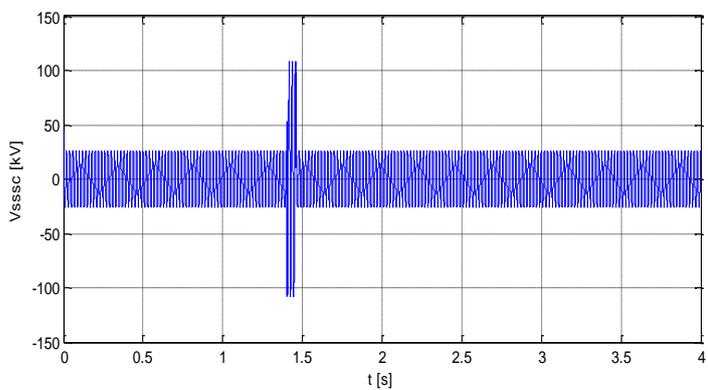
Tension aux bornes du condensateur de couplage



Courant de la ligne



Courant injecté par le STATCOM



Tension injectée par le SSSC

Figure 5. 4 : Résultats des simulations pour un creux de tension

On remarque une apparition de deux pics de puissance active, le premier à l'instant $t = 1.4 s$ ou la puissance a brusquement chuté puis régulée pour suivre la puissance nominale, le deuxième pic apparaît à l'instant $t = 1.46 s$ suite au rétablissement de la tension de sortie à sa valeur nominale. La poursuite de la référence est vérifiée.

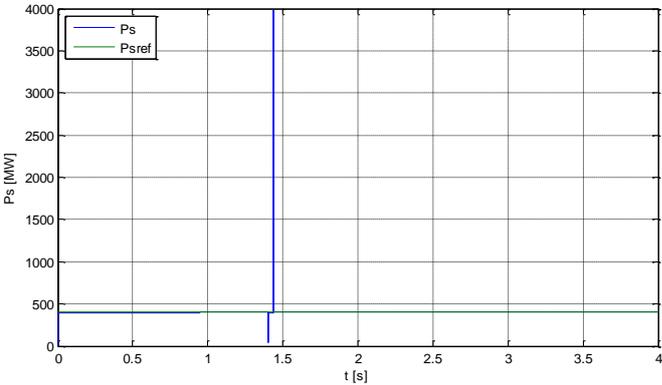
Deux autres pics apparaissent dans la figure 5.4 (Puissance réactive en aval) qui sont dus à la variation brusque de la tension en sortie.

Le courant de la partie shunt augmente afin d'injecter de la puissance réactive dans la ligne et d'assurer le maintien de la tension au point de raccordement.

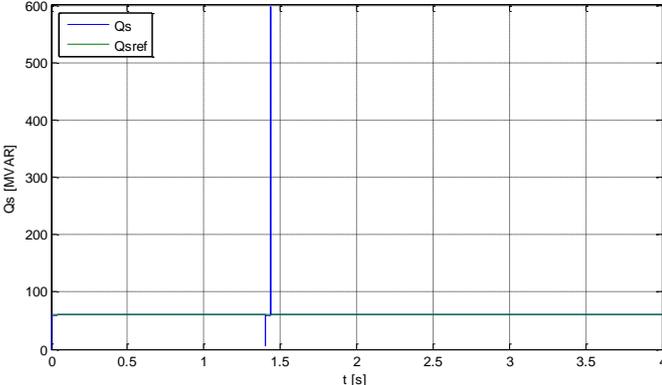
La tension V_{sssc} injectée par le SSSC augmente d'une valeur importante mais d'une façon douce par rapport à la réponse du régulateur PI, afin de compenser cette chute de tension. La tension continue aux bornes du condensateur reste maintenue constante.

- *Court-circuit*

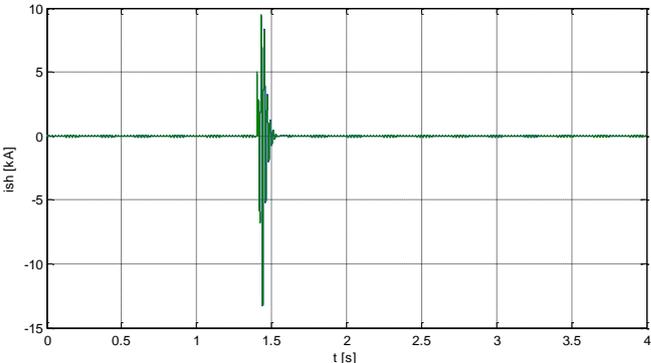
Simulation d'un court-circuit provenant de la mise à la terre de la ligne à l'instant 1.4s et qui dure 40ms. On visualise les signaux suivants :



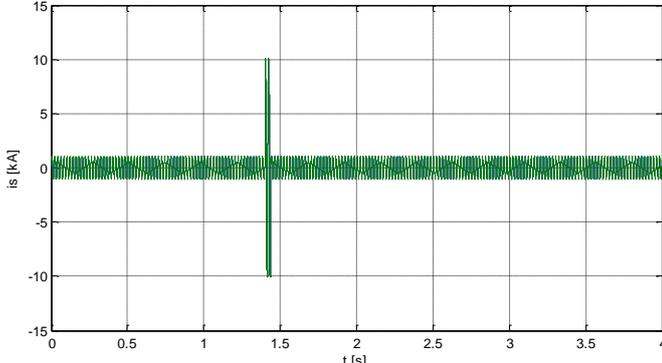
Puissance active en aval



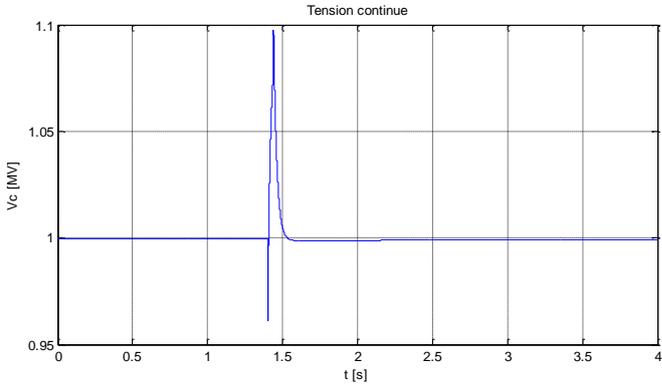
Puissance réactive en aval



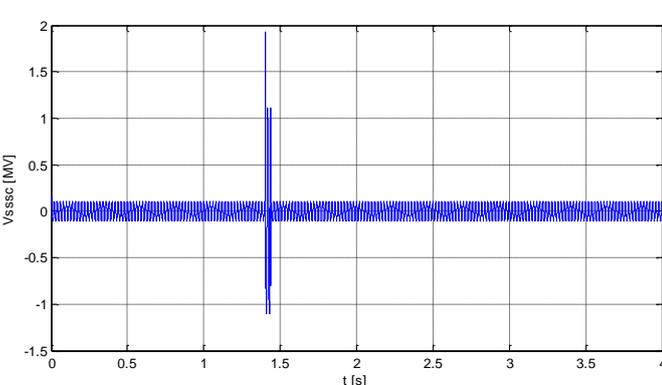
Courant injecté par le STATCOM



Courant de la ligne



Tension aux bornes du condensateur de couplage



Tension injectée par le SSSC

Figure 5.5 : Résultats des simulations pour un court-circuit

Apparition de pics de puissance active et réactive d'une amplitude importante dus à la circulation d'un courant de court-circuit de grande intensité (880 A) dans la ligne. A la disparition du court-circuit les grandeurs sont ramenées à leurs références grâce aux régulateurs.

Le courant de la partie parallèle connaît une augmentation importante pour assurer le maintien de la tension continue. La partie *STATCOM* fourni également de la puissance shunt active à la *partie SSSC*.

La tension injectée par le SSSC augmente pour compenser la chute de puissance à l'apparition du court-circuit.

5.2.3 Régulateur PI floue à gains adaptatifs

Dans la plupart des études effectuées sur la régulation floue, le gain associé à la sortie de la commande est constant et le plus faible possible dans le but d'éviter le problème d'instabilité.

Cela augmente, en général, considérablement le temps de réponse du système.

Prenant l'exemple de la commande floue précédente, le choix des gains des deux régulateur a été très délicat car pour un changement de consigne ou un creux de tension important le système risque de s'effondrer, ce qui entraîne l'instabilité.

Pour résoudre ce problème, on considère le gain de sortie comme étant une variable floue.

Une table de décision pour le gain est nécessaire pour augmenter les performances dynamiques du système.

5.2.2.a Description du régulateur floue à gains de commande adaptatifs

Le schéma de la commande floue à gain adaptatif est représenté par la figure suivante :

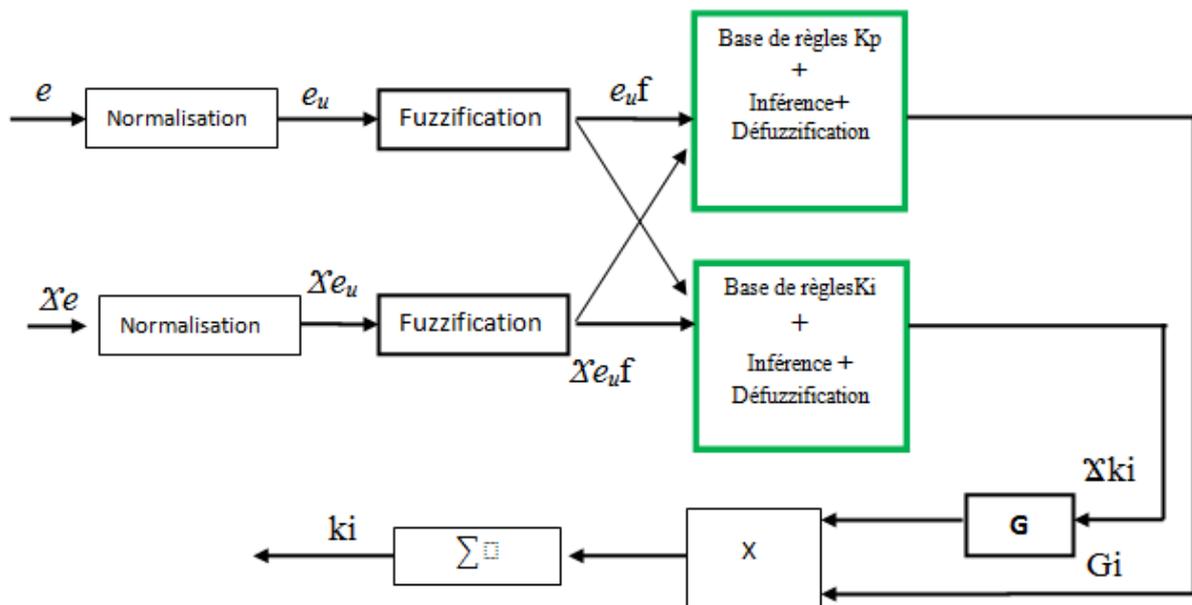


Figure 5.6: Schéma de la commande floue à gains adaptatifs.

5.2.2.b Développement de la table de décision

A partir de la table de décision de la commande, la variation de la commande entre les instants i , $i-1$ est donnée par :

$$K_{pi} = K_{p(i-1)} + G_{kp} * \Delta k_p \quad \text{et} \quad K_{Ii} = K_{I(i-1)} + G_{kI} * \Delta k_I$$

L'intérêt d'avoir un gain variable est :

- Assurer une bonne stabilité du système.
- Adapter l'algorithme flou à chaque situation du système.

Pour se faire, il faut considérer le gain comme étant une variable floue dont il faut définir les différents ensembles flous. Ceci nous amène à définir une table de décision pour le gain basée sur l'erreur et la variation de l'erreur.

Sachant que le développement des règles de décision se fait sur la base de l'expérience. D'après les résultats obtenus précédemment, la table de décision sur la commande donne de bons résultats du point de vue raisonnement flou. Pour l'améliorer, un gain proportionnel au module de la décision de la commande sera utilisé.

C'est pourquoi, on fait correspondre pour chaque ensemble flou de la commande, l'ensemble flou du gain, de même genre mais toujours strictement positive [18].

Les ensembles flous du gain adaptatif dont la fonction d'appartenance correspondante est représentée comme suit :

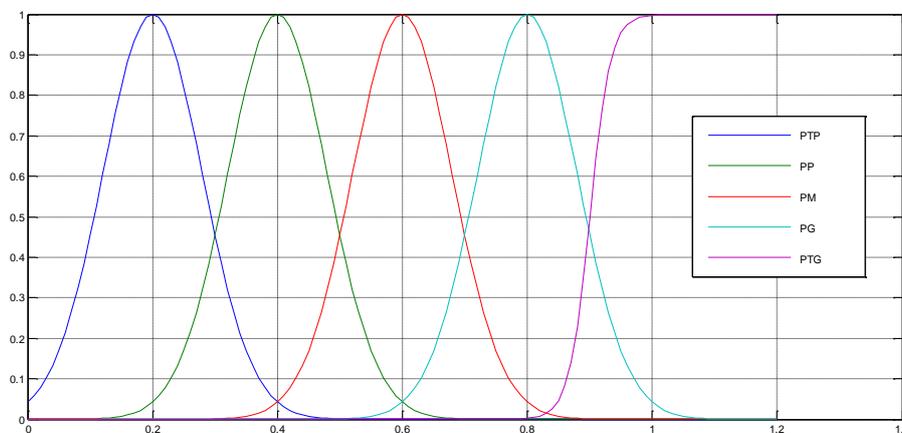


Figure 5.7: Fonction d'appartenance pour le floue a gain adaptatif.

La matrice de décision sur le gain de la commande est représentée comme suit :

$\Delta e \backslash e$	NG	NM	NP	ZE	PP	PM	PG
NG	PTG	PTG	PG	PM	PP	PTP	PTP
NM	PTG	PG	PM	PP	PTP	PTP	PTP
NP	PG	PM	PP	PTP	PTP	PTP	PP
ZE	PM	PP	PTP	PTP	PTP	PP	PM
PP	PP	PTP	PTP	PTP	PP	PM	PG
PM	PTP	PTP	PTP	PP	PM	PG	PTG
PG	PTP	PTP	PP	PM	PG	TG	PTG

Tableau 5.4 : Tableau d'inférence pour le floue a gain adaptatif

Les commandes floues sont notées comme suit:

- PTG: Positif très grand
- PG : Positif grand
- PM: Positif moyen
- PP: Positif petit
- PTP : Positif très petit

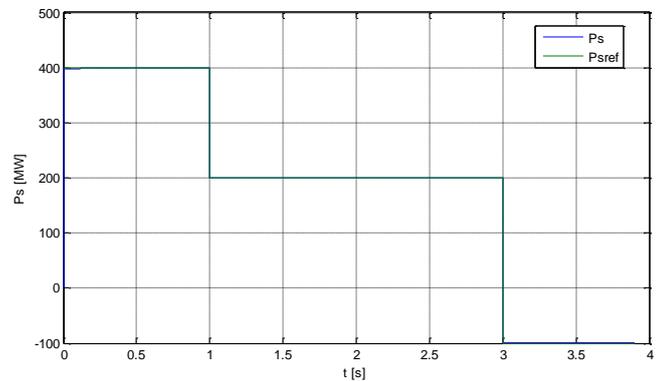
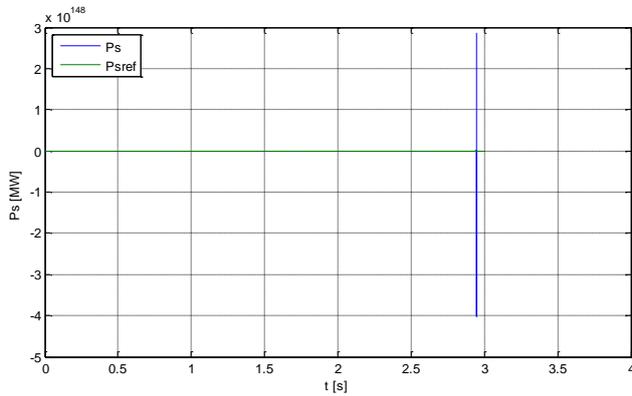
5.3 Simulations

Pour le changement de consigne suivant :

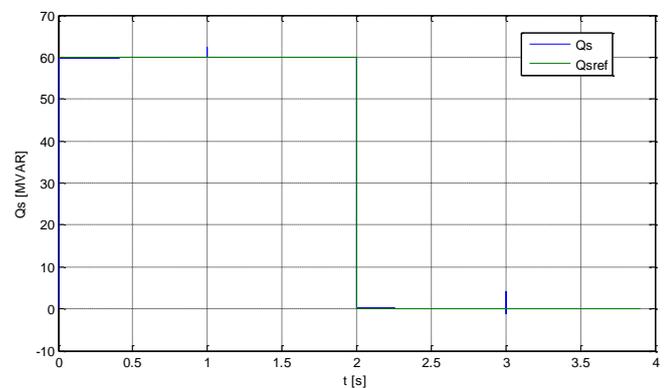
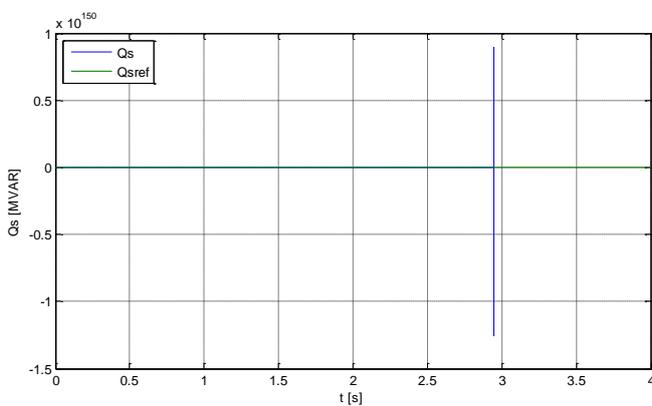
<i>L'instant t</i>	<i>Les puissances de références</i>	
$t = 1.0 \text{ s}$	$P_{s,ref} = 200\text{MW}$	$Q_{s,ref} = 60\text{MVAR}$
$t = 2.0 \text{ s}$	$P_{s,ref} = 200\text{MW}$	$Q_{s,ref} = 0\text{MVAR}$
$t = 3.0 \text{ s}$	$P_{s,ref} = -100\text{MW}$	$Q_{s,ref} = 0\text{MVAR}$

Tableau 5.5 : Les consignes de puissances

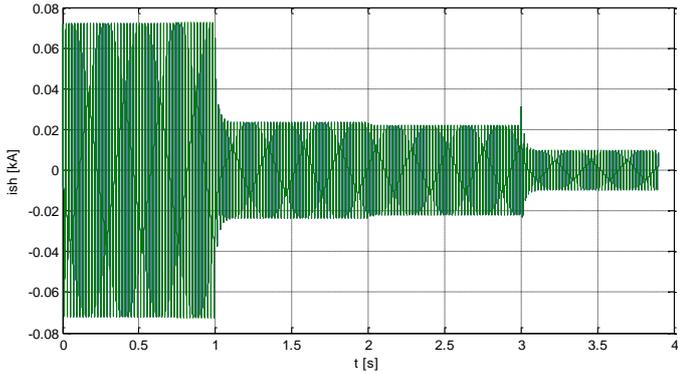
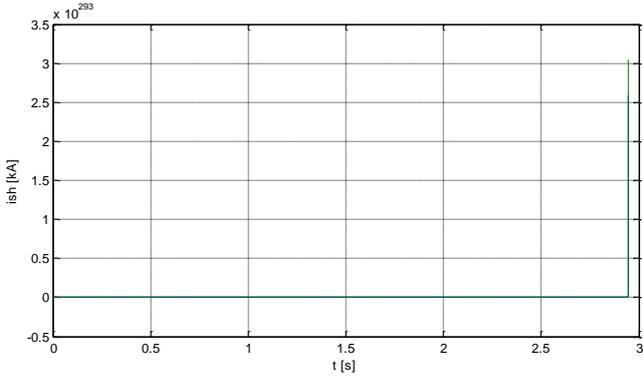
Les réponses du système aux deux commandes ; PI floue a gain fixe et PI floue a gain adaptatif qui sont représentées respectivement de gauche à droite par la figure suivantes :



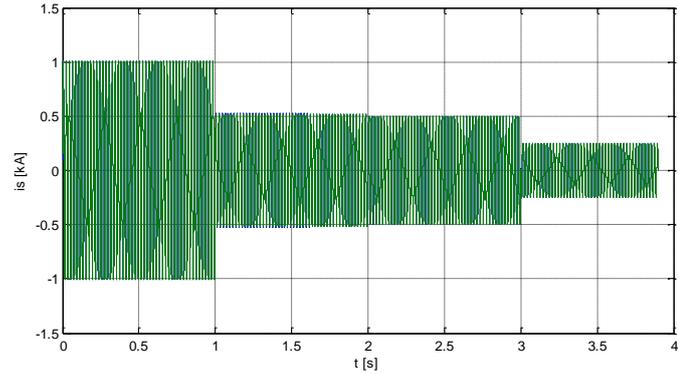
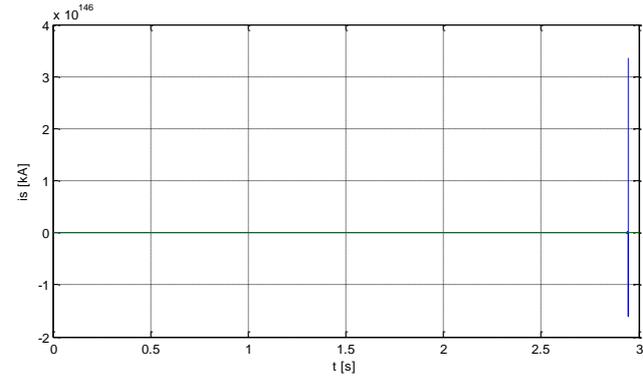
Puissance active en aval



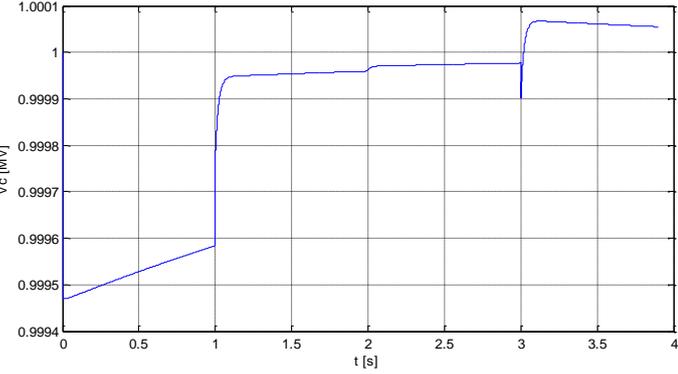
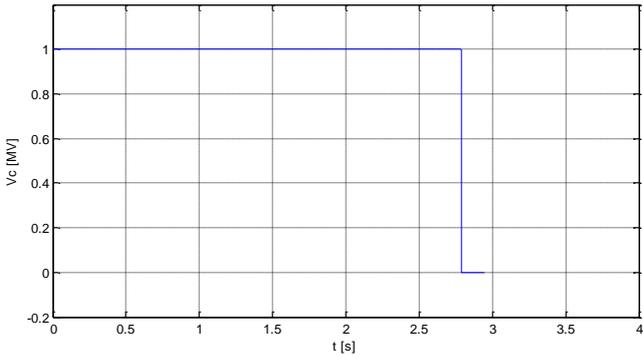
Puissance réactive en aval



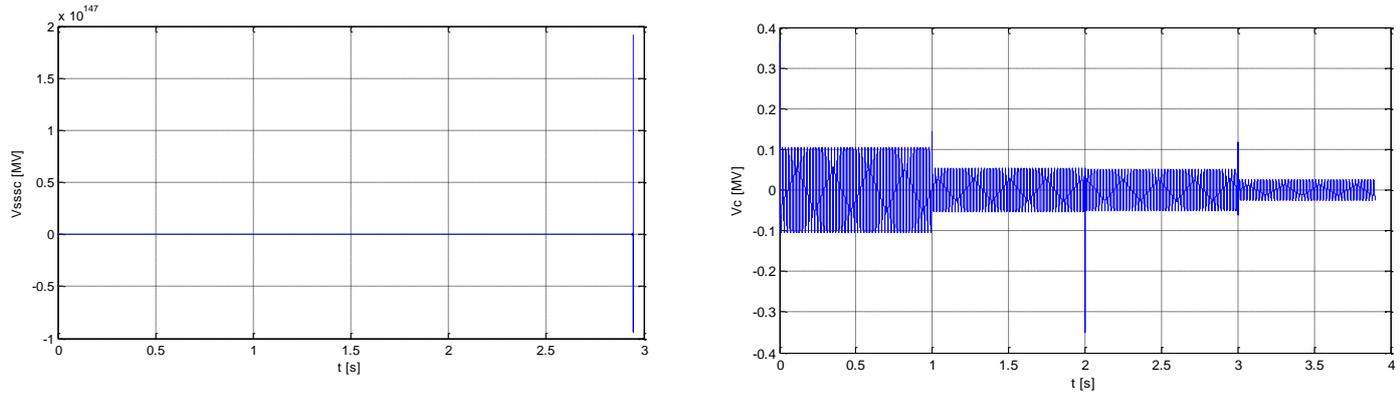
Courant injecté par le STATCOM



Courant de la ligne



Tension aux bornes du condensateur de couplage



Tension injectée par le SSSC

Figure 5. 8 : Comparaison de la poursuite des références des deux régulateurs lors d'un changement de consigne

Les simulations ont montrés que le régulateur PI à gain fixe rencontre des problèmes d'instabilité lors des variations importantes en consignes cela est dû essentiellement aux choix des gains des deux régulateurs.

Ce problème a été résolu lors de la considération des gains de sortie comme étant une variable floue qui changent automatiquement pour assurer la stabilité.

Le régulateur PI Flou à gain adaptatif a montré des résultats très satisfaisants en termes de poursuite et de rejet de perturbation.

5.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé des méthodes variées de la commande par logique floue pour la commande de l'UPFC dont le but d'obtenir de bonnes performances.

Le choix de la commande par logique floue présente plusieurs avantages : raisonnement proche de celui de l'homme c'est-à-dire traite l'imprécis, l'incertain et le vague, sa capacité à commander des systèmes non linéaire, obtention de meilleures performances dynamiques et ses qualités intrinsèques de robustesse.

Pour ce fait, en premier lieux une commande floue a gain fixe a été étudiée, et elle a montrée des performances de poursuite de la consigne satisfaisantes et un rejet de perturbations très rapide, hors mis quelques problèmes d'instabilité lors d'un changement de consigne important. Afin de résoudre ce problème, le gain de la sortie est considéré comme étant une variable floue.

Cette dernière commande – commande floue a gain adaptatif, a montré que l'adaptation des gains assure la stabilité du système, surtout en présence des perturbations.

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire a consisté en la mise en évidence de l'apport de l'UPFC à l'amélioration du transit de puissance sur un réseau électrique. Pour arriver à cette fin, une présentation de l'état de l'art sur les systèmes FACTS a été faite. Une comparaison des atouts de chacun de ces dispositifs a conduit à choisir l'UPFC comme étant le FACTS le plus approprié pour faciliter le contrôle des flux de puissance active et réactive et l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique.

Une étude détaillée de l'UPFC a permis d'identifier l'influence de l'UPFC sur le sens de transit des puissances actives et réactives entre les régions interconnectés et d'évaluer les échanges énergétiques entre les différentes branches de l'UPFC (*SSSC* et *STATCOM*) et le réseau électrique.

Un modèle mathématique du réseau électrique muni d'un dispositif UPFC a été établi sous forme d'équations d'états suivi d'une projection de ce modèle dans le repère de Park afin de faciliter la commande.

Une étude de différentes stratégies de commande de l'UPFC a été également faite. Sur ce point, il a été établi au premier lieu, une commande classique à base de régulateurs PI. Les simulations du comportement du système dans différentes situations ont été menées sous le logiciel MATLAB ou les résultats ont montrés que les régulateurs arrivent à réguler les puissances actives et réactives à leurs valeurs de références. En présence de creux de tension, de surtension ou de court-circuit les régulateurs ont assuré le maintien de la stabilité du réseau et le transit de puissance demandé.

Enfin, un contrôleur PI flou a été développé pour le réglage des courants de ligne et shunt au lieu du régulateur classique *PI*. Les améliorations apportées par ce régulateur, par rapport au régulateur *PI*, sont très significatives surtout du point de vue temps de réponse et compensation des effets de perturbations et incertitudes paramétriques.

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. Crappe, 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.

Annexe A

Modélisation du réseau électrique étudié

Pour réaliser les simulations présentées nous avons considéré une interconnexion électrique THT, 400 kV reliant les postes de transformation de Bourdim côté marocain et de Sidi Ali Boussidi côté algérien, cette ligne est exploitée à 800 MVA.

Le flux de puissance à travers cette interconnexion est géré par l'intermédiaire d'un dispositif FACTS (*Flexible AC Transmission Systems*) du type UPFC (*Unified Power Flow Controller*) installé en amont de la ligne. Le système électrique englobant l'interconnexion et l'UPFC est représenté par la figure (A.1)

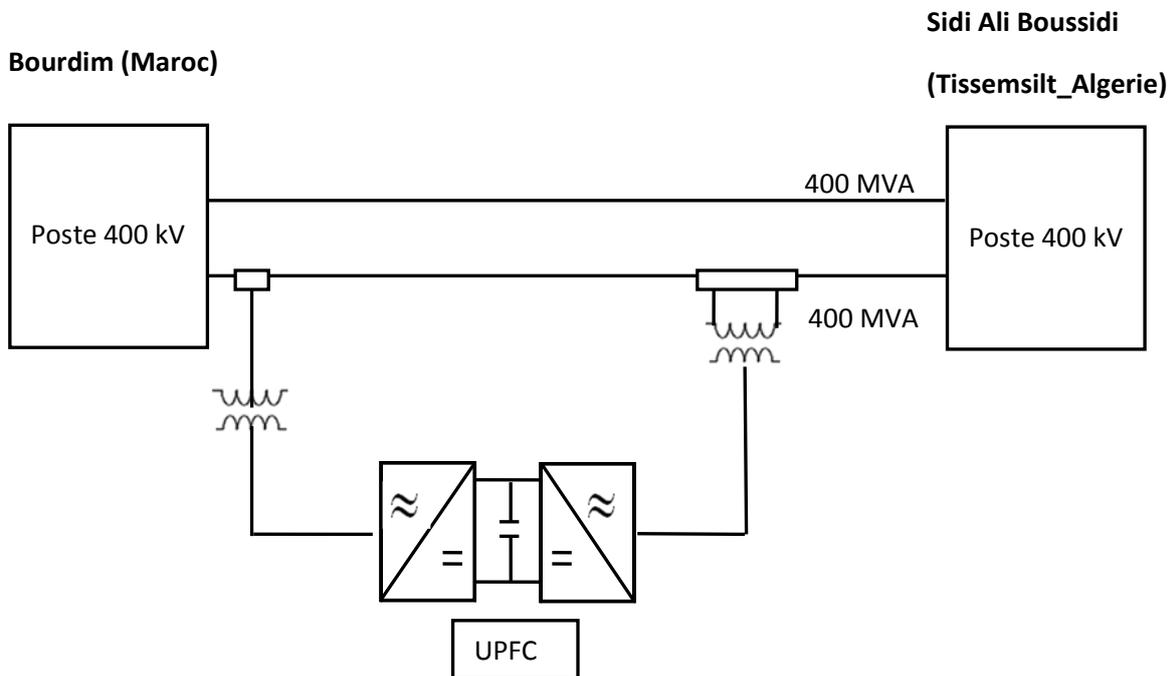


Figure.A.1 : Schéma global de l'interconnexion équipée de l'UPFC.

En fonctionnement normal, une puissance de 400MVA transite dans chacune des lignes. En cas de défaut sur la ligne principale, cette dernière sera automatiquement déconnectée du réseau grâce aux relais ampérométriques. La deuxième ligne doit supporter alors un report de flux de 800 MVA, par conséquent, la ligne sera exploitée en dehors de ses limites de stabilité et dans ce cas, l'UPFC prend le relais pour assurer ce transit tout en préservant la ligne.

Le modèle équivalent et les grandeurs paramétriques du système utilisés lors de la simulation sont présentés par la figure (A.2)

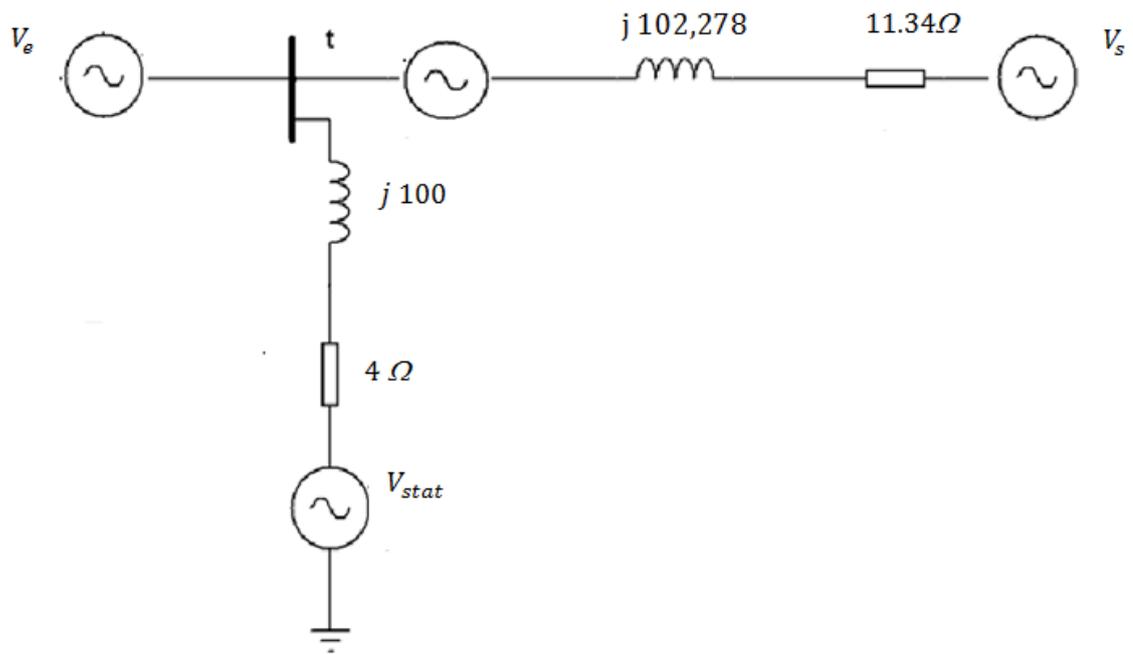


Figure A.2 : Circuit modèle du système.

Annexe B

Régulation de la tension continue V_c

Le transformateur shunt fournit la puissance active nécessaire à l'alimentation du bus continu constitué du condensateur de stockage qui absorbe les fluctuations de puissance occasionnées par la compensation du réactif, la présence des harmoniques, la régulation de l'actif et aussi par les pertes des convertisseurs [3].

Le bus continu peut être modélisé par une capacité de stockage C en parallèle avec une résistance R représentant les pertes des convertisseurs (figure.B.1).

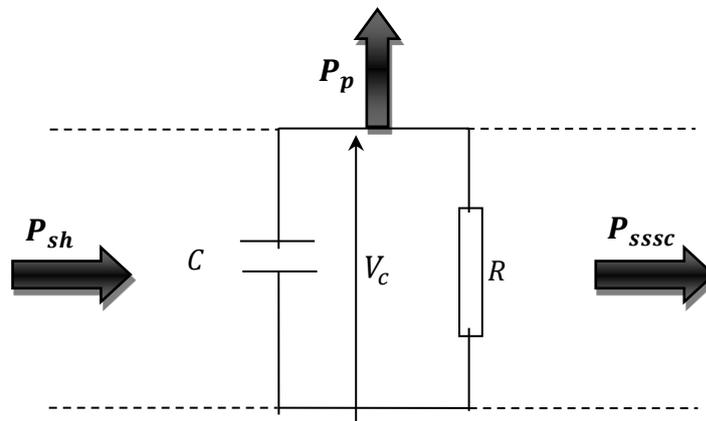


Figure B.1 Schéma de répartition des puissances au bus continu.

C : Capacité de stockage $C = 0.0005 F$.

R : Résistance de perte des convertisseurs $R = 10^6 \Omega$.

Le terme P_p désigne la somme des puissances de la capacité et des pertes par effet joule.

Le bilan de puissance donne :

$$P_{sh} = P_p + P_{ssc} \quad (\text{B.1})$$

Soit E_c l'énergie emmagasinée par le condensateur C :

$$E_c = \frac{1}{2} C V_c^2 \quad (\text{B.2})$$

D'où :

$$P_p = \frac{dE_c}{dt} + \frac{V_c^2}{R}$$

L'équation (B.1) devient :

$$\frac{1}{2} C \frac{dV_c^2}{dt} + \frac{V_c^2}{R} = P_{sh} - P_{SSC} \quad (\text{B.3})$$

La fonction de transfert reliant V_c^2 à P_{sh} s'écrit donc comme suit :

$$F(s) = \frac{R}{1 + \frac{RC}{2}s} \quad (\text{B.4})$$

La tension moyenne aux bornes du condensateur doit être régulée à une valeur constante. Cette régulation s'effectue en absorbant ou en fournissant de la puissance active sur le réseau. [17] Afin d'obtenir le signal P_{sh} , un régulateur proportionnel intégral a été choisi. Ce dernier est souvent préférable du fait qu'il permet d'annuler l'erreur statique. Le schéma suivant illustre le principe de la commande.

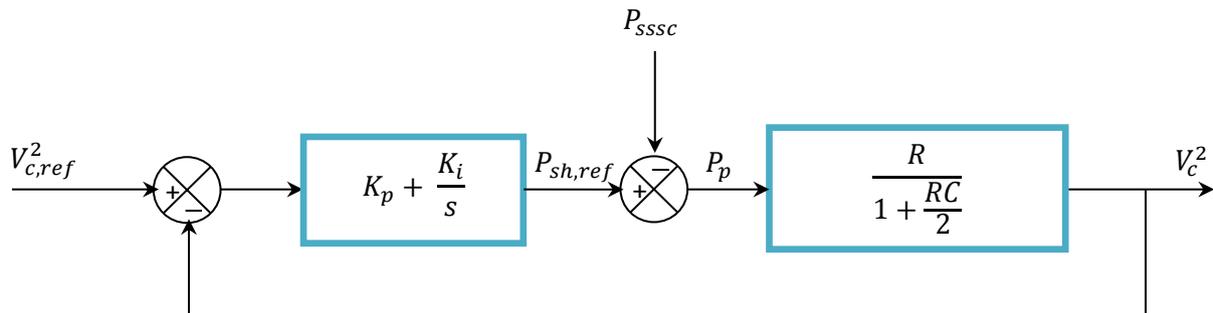


Figure B.2 Schéma de régulation de la tension du bus continu.

A la sortie du régulateur, $P_{sh,ref}$ s'ajoute à la puissance active P_{SSC} et donne lieu à un courant fondamental actif corrigeant ainsi la tension V_c .