

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Dr. Tahar Moulay de Saïda
Faculté de la Technologie
Département d'Electrotechnique



Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme de

Master (LMD)

Spécialité : RESEAUX ELECTRIQUES

Filière : ELECTROTECHNIQUE

Intitulé :

**Amélioration de l'influence des variables
paramétriques sur les performances de l'UPFC**

Présenté par : **Bakhtaoui Mohamed Amine**
Otmani Mohamed Sofiane

Devant le jury composé de :

Mr. Bensghir Kadda

Mr. Bouanane Abdelkrim

Mr. Bouazza Saad

Mr. Yahiaoui Merzoug

Président

Encadreur

Examineur

Examineur

Soutenu Le 30/09/2018
Promotion 2017-2018

Remerciement

En terminant notre mémoire de fin d'étude, il nous est agréable d'adresser nos vifs remerciements à tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin à élaborer ce mémoire.

Nous remercions en particulier notre encadreur Mr Dr Bouanane Abdelkrim.

Ainsi que tous nos professeurs qui nous ont enseigné durant nos études à la faculté de technologie.

A la fin nous tenons à remercier tous nos collègues d'étude, particulièrement notre promotion.

Table des matières

| | |
|---|----|
| Liste des symboles et abréviations | |
| Liste des figures | |
| Introduction générale | 1 |
| Chapitre I | |
| I.1. Introduction..... | 3 |
| I.2. Les causes d'un système instable | 4 |
| I.3. Les défauts dans les réseaux électriques | 4 |
| I.4. Stabilité des réseaux d'énergie électrique | 4 |
| I.5. Type de stabilité de réseaux électrique | 5 |
| I.5.1. Stabilité de fréquence | 5 |
| I.5.2. Stabilité angulaire | 6 |
| I.5.2.1. Stabilité angulaire aux petites perturbations..... | 6 |
| I.5.2.2. Stabilité angulaire aux grandes perturbations (transitoires) | 6 |
| I.5.3. Stabilité de tension | 6 |
| I.6. Différents méthode d'amélioration de la stabilité d'un réseau électrique | 7 |
| I.6.1. Méthode classique | 7 |
| I.6.1.1. Compensateurs synchrones | 7 |
| I.6.1.2. Batteries de condensateurs | 7 |
| I.6.1.2.1. Batteries de condensateurs HT | 7 |
| I.6.1.2.2. Batteries de condensateurs MT | 7 |
| I.6.1.3. Les inductances | 8 |
| I.6.2. Méthode moderne | 8 |
| I.6.2.1. Les dispositifs FACTS | 8 |
| I.7. Conclusion | 8 |
| Chapitre II | |
| II.1. Introduction | 9 |
| II.2. Le système FACTS (système de transmission flexible en courant alternatif) | 9 |
| II.3. Les différents systèmes FACTS | 10 |
| II.3.1. Compensateurs séries | 10 |
| II.3.1.1. Principe de fonctionnement | 11 |
| II.3.2. Compensateurs shunts | 12 |
| II.3.2.1. Principe de fonctionnement | 14 |
| II.3.3. Compensateurs hybrides série-shunt (variateur de charge universel) | 15 |
| II.3.3.1. Structure du variateur de charge universel (UPFC) | 17 |
| II.3.3.2. Principe de fonctionnement du système UPFC | 18 |
| II.4. Comparaison des FACTS les plus utilisés | 18 |
| II.5. Applications pratiques des dispositifs FACTS..... | 19 |
| II.6. Apports et avantages des dispositifs FACTS | 19 |
| II.7. Conclusion | 20 |
| Chapitre III | |
| III.1. Introduction..... | 21 |
| III.2. Modélisation du système UPFC | 21 |
| III.2.1. Modélisation de la branche série (UPFC série) | 22 |

| | |
|---|----|
| III.2.2. Modélisation de la partie shunt (UPFC shunt) | 24 |
| III.2.3. Modélisation de la branche continue de l'UPFC | 25 |
| III.3. Schéma de Principe de l'onduleur triphasé..... | 26 |
| III.3.1. Modulation de largeur d'impulsion..... | 29 |
| III.3.2. Commande de l'onduleur par MLI | 29 |
| III.4. Configuration du circuit de réglage | 29 |
| III.4.1. Description du système de commande de l'UPFC série | 30 |
| III.4.2. Les schémas de contrôle du système UPFC..... | 31 |
| III.4.2.1. Le Schéma de contrôle de la branche série | 32 |
| III.4.2.2. Le schéma de contrôle de la branche shunt et la branche continue de l'UPFC | 32 |
| III.4.3. Les schémas de contrôle avec régulateur PI-Découplé..... | 33 |
| III.5. Structure et choix des paramètres de régulateur PI..... | 34 |
| III.6. conclusion | 37 |

Chapitre IV

| | |
|--|----|
| IV.1. Résultats de simulation | 38 |
| IV.1.1. Paramètres du modèle UPFC..... | 38 |
| IV.1.2. simulation PI-D..... | 39 |
| IV.1.3. Erreur d'estimation | 45 |
| IV.1.4. Test de stabilité | 46 |
| IV.1.5. Test de robustesse | 48 |
| IV.2. Conclusion | 49 |
| Conclusion générale | 50 |
| Bibliographie..... | 52 |

Liste des symboles et abréviations

P: Puissance active

V: Tension d'une valeur efficace

I : Courant d'une tension efficace

U : Tension sinusoïdal de valeur efficace

T : La période

ϵ : L'angle de déphasage

S : Puissance apparente

I^* : Nombre complexe conjugué de l'intensité complexe

Φ : La différence entre le déphasage de la tension et du courant

Q : Puissance réactive

R : Résistance de la ligne de transport

Z : Impédance complexe

X : L'inductance

F_p : Facteur de puissance

FACTS: Flexible alternative courant transmission systems

SVC: Static var composator

V_{pq} : Source de tension alternatif

I_q : Source de courant alternatif

V_s : L'amplitude de tension du source du réseau

V_r : L'amplitude de tension de la charge

δ : L'angle de phase entre V_s et V_r (angle de charge)

V_m : Tension de milieu

GTO: Gate-Turn-Off

IGBT: Insulated Gate Bipolar Transistors

IGCT: Insulated Gate Commutated Thyristors

MLI: Modulation par largeur d'impulsion

UPFC: Unified Power Flow Controller

STATCOM: Static Synchronous Compensator

SSSC: Static Synchronous Series Compensator

TCSC: Thyristor controller series compensator

V_c : Tension additionnelle

V_s : Tension du départ de la ligne

V_r : Tension de l'arrivée de la ligne

MSR: Mechanically Controlled Reactor

TCR: Thyristor-Controlled Reactor

Liste des symboles et abréviations

CSPR: Compensateur statique de puissance réactive

TSC : Thyristor-Switched Capacitor

MSC : Mechanically Switched Capacitor

D-STATCOM : Idem mais pour les réseaux de distribution

V_{dr} : Tension continue

PST : Phase-shifting-transformer

L : L'impédance

K_p : Le gain de régulateur

Liste des figures

Chapitre I

| | |
|--|---|
| Figure (I.1) : Transport et Distribution de l'énergie Electrique | 3 |
| Figure (I.2) : Classification des types de stabilité des réseaux électriques | 5 |

Chapitre II

| | |
|--|----|
| Figure (II.1) : Classification des systèmes FACTS..... | 10 |
| Figure (II.2) : Structure d'un TCSC | 10 |
| Figure (II.3) : Structure d'un SSSC | 11 |
| Figure (II.4) : Compensateur série | 11 |
| Figure (II.5) : Schéma d'un SVC | 12 |
| Figure (II.6) : Schéma de principe d'un TCR/TSC)..... | 13 |
| Figure (II.7) : Structure du STATCOM..... | 14 |
| Figure (II.8) : Compensateur parallèle..... | 15 |
| Figure (II.9) : Structure d'un PST | 16 |
| Figure (II.10):Structure de l'IPFC | 16 |
| Figure (II.11) : Schéma représentatif d'un UPFC..... | 17 |
| Figure (II.12) : Unified Power Flow Controller (UPFC)..... | 17 |
| Figure (II.13) : Schéma de principe de l'UPFC..... | 18 |

Chapitre III

| | |
|--|----|
| Figure (III.1) : Circuit équivalent de l'UPFC | 22 |
| Figure (III.2) : Modèle mathématique du système de l'UPFC série..... | 24 |
| Figure (III.3) : Modèle mathématique du système de l'UPFC parallèle..... | 25 |
| Figure (III.4) : Schéma de principe de l'onduleur à MLI | 27 |
| Figure (III.5) : Schéma de contrôle de l'UPFC..... | 30 |
| Figure (III.6) : Schéma de contrôle de la branche série de l'UPFC..... | 31 |
| Figure (III.7) : Schéma de contrôle de la branche shunt et la branche continue de l'UPFC | 32 |
| Figure (III.8) : Commande PI-Découplé de l'UPFC série..... | 33 |
| Figure (III.9) : Commande PI-Découplé de l'UPFC shunt..... | 33 |
| Figure (III.10) : Structure de réglage de type PI..... | 34 |
| Figure (III.11) : Circuit de commande du système de l'UPFC..... | 36 |

Chapitre IV

| | |
|---|----|
| Figure (IV.1) : Le courants de référence I_{ds}^* I_{qs}^* | 39 |
| Figure (IV.2) : Le courants I_{ds} | 40 |
| Figure (IV.3) : Le courants I_{qs} | 40 |
| Figure (IV.4) : les allures des courants I_{ds} et I_{ds}^* | 41 |
| Figure (IV.5) : les allures des courants I_{qs} et I_{qs}^* | 41 |
| Figure(IV.6):Signale de tension V_{cd} | 42 |
| Figure(IV.7):Signale de tension V_{cq} | 42 |
| Figure(IV.8):La puissance active de référence P^* et la puissance active P | 43 |
| Figure(IV.9) : Zoom de la puissance active à $t=0.75s$ | 43 |
| Figure(IV.10):La puissance réactive de référence Q^* et la puissance active Q | 44 |

| | |
|---|----|
| Figure(IV.11) : Zoom de la puissance réactive à $t=0.35s$ | 44 |
| Figure (IV.12):La puissance active P et réactive Q | 45 |
| Figure(IV.13) : Erreur d'estimation | 45 |
| Figure (IV.14) : Les puissances active P*et P avec une perturbation..... | 46 |
| Figure(IV.15) : Zoom sur la perturbation | 46 |
| Figure (IV.16) : Les puissances réactive Q*et Q avec une perturbation | 47 |
| Figure(IV.17) : Zoom sur la perturbation | 47 |
| Figure (IV.18) : Les puissances active P*et P avec test de robustesse | 48 |
| Figure (IV.19) : Les puissances réactive Q*et Q avec test de robustesse | 48 |

Liste des tableaux

| | |
|--|----|
| Tableau I: tableau Bénéfices techniques des dispositifs FACTS..... | 19 |
| Tableau II : Les dispositifs FACTS installés dans le monde et leurs puissances totales | 19 |

Introduction

Générale

Introduction générale

Durant les dix dernières années, l'industrie de l'énergie électrique est confrontée à des problèmes liés à de nouvelles contraintes qui touchent différents aspects de la production, du transport et de la distribution de l'énergie électrique. On peut citer entre autres les restrictions sur la construction de nouvelles lignes de transport, l'optimisation du transit dans les systèmes actuels, la cogénération de l'énergie, les interconnexions avec d'autres compagnies d'électricité et le respect de l'environnement. Plusieurs techniques de compensation traditionnelle du réseau ont été utilisées. Cela comprend la technique de compensation shunt qui consiste en un groupe de condensateurs en parallèle avec l'inductance équivalente de la ligne de transport qui intervient sur la tension à chaque barre, par contre la compensation série consiste en un groupe de condensateurs en série avec l'inductance équivalente de la ligne de transport qui intervient sur l'impédance équivalente de la ligne de transport. L'importance de la compensation série dans le but d'améliorer la capacité de transport des lignes, a été reconnue et n'a fait que croître au cours des dernières années.

Le maintien de l'équilibre entre la production et la consommation nécessite alors une surveillance permanente du système afin d'assurer la qualité du service (problème de conduite), garantir sa sécurité (problème de protection) et sa stabilité (problème de réglage). La stabilité fut reconnue comme élément important du bon fonctionnement d'un système électrique à partir des années 1920. Depuis, les chercheurs ont eu recours à des approches dites traditionnelles

Par le passé, ces problèmes ont été résolus (anticipé) en ayant des marges de stabilité, le problème d'augmentation de la charge ne se posé plus, avec l'utilisation des moyens classiques (transformateurs déphaseur, compensation série ou parallèle d'énergie réactive, modification des consignes de production, action sur l'excitation des générateurs). Mais ces techniques s'avèrent actuellement trop lentes et insuffisantes pour répondre efficacement aux perturbations du réseau sous l'effet des nouvelles contraintes. Pour répondre a ces nouvelles contraintes et résoudre les problèmes de la qualité d'énergie, notamment l'amélioration du facteur de puissance il y a tendance d'utilisé des nouvelles techniques les FACTS.liées à la théorie de la commande, pour régler les problèmes de stabilité

Le développement récent des dispositifs FACTS ouvre de nouvelles perspectives pour une exploitation plus efficace des réseaux par action continue et rapide sur les différents paramètres du réseau (déphasage, tension, impédance). Ainsi, les transits de puissance seront

Introduction générale

mieux contrôlés et les tensions mieux tenues, ce qui permettra d'augmenter les marges de stabilité ou de tendre vers les limites thermiques des lignes.

L'UPFC (Unified Power Flow Controller) est un récent dispositif des systèmes FACTS, qui est capable de contrôler les différents paramètres de la ligne de transmission. Il n'accomplit pas uniquement les fonctions du STATCOM, TCSC, mais offre aussi une flexibilité additionnelle en combinant certaines fonctions de ces contrôleurs. Afin d'étudier le comportement du dispositif UPFC et la synthèse de la loi de commande, le troisième chapitre développe le modèle choisi de l'UPFC. La conception, les principes de fonctionnement, le modèle mathématique, l'identification de références et les blocs de commande de base de l'UPFC. Nous utiliserons une stratégie de commande PI-D classique pour contrôler les deux parties (série et parallèle) de ce dispositif. Différents réglages sont à prévoir pour ce compensateur : réglage pour le courant triphasé (onduleurs parallèle et série) et un réglage pour la tension continue. Notre intérêt porte sur le réglage des courants de chacun des deux onduleurs pour pouvoir gérer le flux des puissances active et réactive à travers la ligne de transmission d'un réseau d'énergie.

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres :

Un rappel sur la stabilité des réseaux électriques est abordé au premier chapitre. Les différentes méthodes d'évaluation et d'amélioration de la stabilité transitoire a été présenté en fin de chapitre.

Dans le deuxième chapitre, on présente des concepts de base sur les dispositifs FACTS, leurs nécessités d'application dans les réseaux électriques et leurs différentes structures de base, puis on présente quelques ouvrages comprenant des dispositifs FACTS autour du monde, et on discute l'avantage apporté par ces dispositifs au réseau électrique.

Dans le cadre du troisième chapitre, un réglage et modélisation appliqué à l'UPFC avec des régulateurs classiques (PI-Découplé,) sera présenté tout en présentant l'intérêt de de réglage pour la compensation des puissances active et réactive.

À l'issue du quatrième chapitre, nous présentons les résultats de simulation du système UPFC pour un band d'essai de base tension. Cette théorie s'affirme comme une technique opérationnelle dans le domaine de contrôle afin d'évaluer la robustesse et la stabilité du contrôle de notre système

Nous terminons par une conclusion générale de ce mémoire et nous proposons des perspectives de ce travail.

Chapitre I

Stabilité des réseaux
électriques

I.1. Introduction

Au cours des dernières années, la consommation, la production et le transport de l'énergie électrique n'ont cessé d'augmenter en raison de l'industrialisation, la croissance démographique et l'urbanisation. Par ailleurs, les limites économiques et écologiques rendent difficile la construction de nouvelles lignes électriques. C'est pourquoi les réseaux doivent aujourd'hui travailler proches de leurs limites de stabilité afin de satisfaire ces nouvelles exigences. Il s'agit donc d'améliorer la stabilité du réseau et ainsi sa capacité de transfert.

Dans l'évaluation de la stabilité, la plus grande attention est portée au comportement du réseau face à de petites ou de grandes perturbations. Les variations continues de charge sont un exemple de petites perturbations, les défauts et la perte du synchronisme d'un grand générateur du réseau sont des exemples de grandes perturbations. Après l'élimination d'une perturbation, le réseau sera stable s'il continue à fonctionner en satisfaisant ses limites d'exploitation et en alimentant ses consommateurs. L'instabilité d'un réseau peut avoir différentes origines et se manifester de plusieurs façons. Dans l'analyse des réseaux électriques, l'identification des causes d'instabilité et la connaissance des méthodes qui peuvent améliorer l'exploitation stable du réseau sont très importantes.

Les études de stabilité concernent surtout la stabilité statique, dynamique et transitoire du réseau. Les études de stabilité statique et dynamique concernent un petit groupe de machines sur lesquelles on effectue de lents ou légers changements des conditions d'exploitation. Ces études se préoccupent de la réponse du réseau suite à des variations incrémentales autour d'un point d'équilibre. Les études de stabilité transitoire s'occupent des grandes perturbations [01]. Ces perturbations peuvent être d'origines diverses : pertes de groupes, de lignes, branchement, débranchement de charges, défaut shunt (court-circuit), franc ou via une impédance de défaut. Ces grandes perturbations ne permettent pas la linéarisation des équations autour d'un point de fonctionnement comme c'est le cas pour les études de stabilité statique et dynamique.

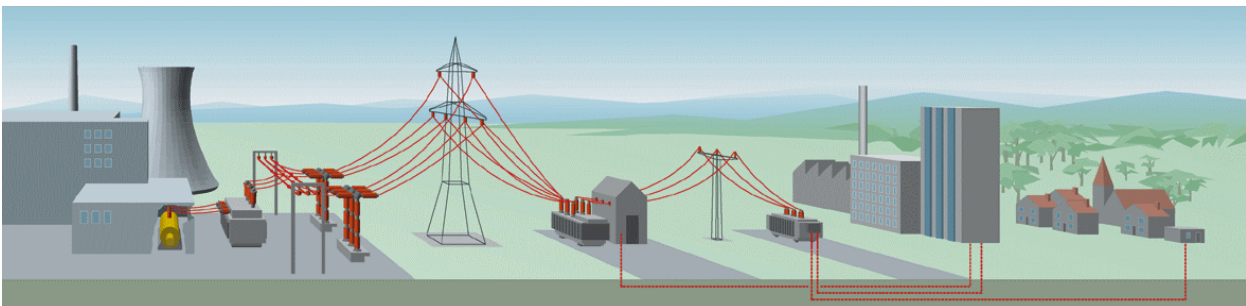


Figure (I.1) : Transport et Distribution de l'énergie Electrique

I.2. Les causes d'un système instable

Les phénomènes électriques qui influencent la stabilité d'un réseau sont généralement liés à des variations de puissance. Naturellement, toutes les perturbations liées à l'exploitation d'un réseau peuvent devenir source d'instabilité du fait des impacts de tension ou de courant qu'ils produisent. Néanmoins, d'autres causes plus "structurelles" peuvent augmenter les risques de départs d'instabilités.

Une perturbation sur un réseau peut être une manoeuvre prévue, comme l'enclenchement d'une inductance shunt, ou non prévue comme un court-circuit causé par la foudre entre une phase et la terre par exemple. Lors de la perturbation, l'amplitude de la tension aux différentes barres du réseau peut varier ainsi que la fréquence.

I.3. Les défauts dans les réseaux électriques

Ainsi, les courts circuits peuvent avoir diverses origines :

a) Electriques : C'est l'altération des isolants des matériels de réseau, par exemple. En effet, les matériels électriques que l'on trouve sur le réseau ou dans

Les postes comportent des isolants (solides, liquides ou gazeux) constitués d'assemblages plus ou moins complexes placés entre les parties sous tension et la masse. Ces isolants subissent des dégradations au cours du temps qui conduisent à des défauts d'isolement et donc des courts-circuits.

b) Atmosphériques : Les lignes aériennes sont soumises aux perturbations extérieures telles que la foudre, les tempêtes ou le givre.

c) Mécaniques : C'est la chute d'un corps sur un conducteur ou la dégradation mécanique de conducteurs consécutive à des agressions extérieures par des engins de terrassement par exemple.

d) Humaines : Ce sont les fausses manoeuvres telles l'ouverture d'un sectionneur en charge par exemple.

I.4. Stabilité des réseaux d'énergie électrique

La stabilité d'un système de puissance est la capacité d'un système d'énergie électrique, pour une condition de fonctionnement initiale donnée, de retrouver le même état ou un autre état d'équilibre après avoir subi une perturbation physique, en gardant la plupart des variables du système dans leurs limites, de sorte que le système entier reste pratiquement intact. La stabilité d'un réseau électrique est la propriété qui lui permet de rester dans un état d'équilibre, pour des conditions de fonctionnement normales, et de retrouver un état d'équilibre acceptable, suite à une perturbation.

Selon la nature physique de l'instabilité, la plage de temps des phénomènes et l'amplitude de perturbations

Un système est stable s'il a tendance à continuer à fonctionner dans son mode normal (celui pour lequel il a été conçu) en régime permanent et s'il a tendance à revenir à son mode de fonctionnement à la suite d'une perturbation. Un réseau d'énergie électrique est stable s'il est capable, en régime permanent à la suite d'une perturbation, de fournir la puissance qu'exigent les consommateurs tout en maintenant constantes et près des valeurs nominales de la fréquence, donc la vitesse de rotation des alternateurs, et l'amplitude de la tension aux différents barres du réseau.

L'instabilité peut prendre plusieurs formes dépendamment des conditions d'opération et de la configuration du réseau mais le maintien du synchronisme sur le réseau demeure un but primordial [02] [03].

Il faut donc suivre la dynamique des générateurs à travers les angles du rotor et les puissances.

I.5. Type de stabilité de réseaux électrique

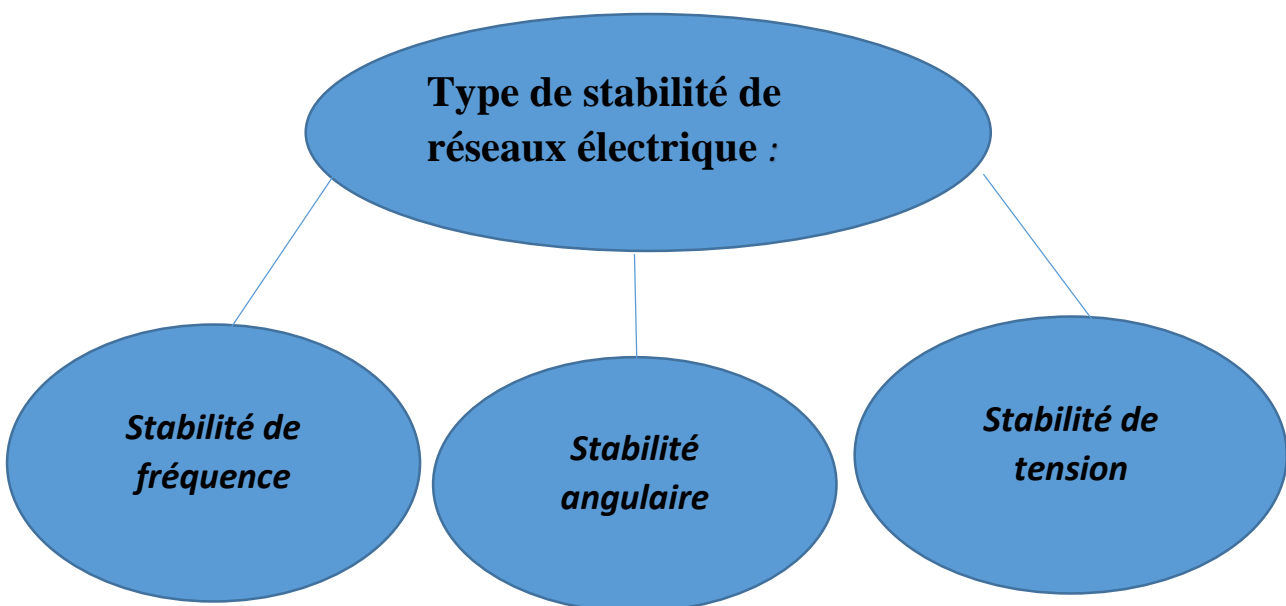


Figure (I.2) : Classification des types de stabilité des réseaux électriques

I.5.1. Stabilité de fréquence

La stabilité de fréquence concerne la capacité du système à maintenir sa fréquence proche de la valeur nominale, suite à un incident sévère ayant ou non conduit à un morcellement du système. La stabilité de fréquence est étroitement liée à l'équilibre global entre la puissance active produite et consommée.

I.5.2. Stabilité angulaire

La stabilité angulaire est définie comme la capacité des générateurs synchrones d'un réseau à maintenir le synchronisme après avoir été soumis à une ou des perturbations. L'instabilité se traduit par des oscillations angulaires de certains générateurs menant à la perte de leur synchronisme avec les autres générateurs. La stabilité angulaire est classifiée dans deux catégories : la stabilité des angles de rotor aux petites perturbations et la stabilité des angles de rotor aux grande perturbations, encore appelée stabilité transitoire.

Une machine qui a perdu le synchronisme sera déclenchée par une protection de survitesse ou par une protection de perte de synchronisme, ce qui met en danger l'équilibre production consommation du système. Selon l'amplitude de la perturbation, on parle de la stabilité angulaire aux petites perturbations ou de la stabilité transitoire.

I.5.2.1. Stabilité angulaire aux petites perturbations

La stabilité angulaire aux petites perturbations concerne la capacité du système à maintenir le synchronisme en présence de petites perturbations comme : une petite variation de la charge ou de génération, manœuvre d'équipement.

I.5.2.2. Stabilité angulaire aux grandes perturbations (transitoires)

La stabilité transitoire concerne la capacité du réseau à maintenir le synchronisme suite à une perturbation sévère comme un court-circuit, arrêt d'un générateur, etc. La réponse du système comporte de grandes variations des angles rotoriques et est influencée par la relation non linéaire entre couples et angles.

I.5.3. Stabilité de tension

La stabilité de tension concerne la capacité d'un système de puissance à maintenir des tensions acceptables à tous ses nœuds, dans des conditions du fonctionnement normales ou suite à une perturbation. L'instabilité de tension résulte de l'incapacité du système production-transport à fournir la puissance demandée par la charge. Elle se manifeste généralement sous forme d'une décroissance monotone de la tension. Selon l'amplitude de la perturbation, on distingue la stabilité de tension de petites perturbations et celle de grandes perturbations

I.6. Différents méthode d'amélioration de la stabilité d'un réseau électrique

Il existe différent méthode de la stabilité d'un réseau électrique parmi ces méthode on cite des méthodes classique et des méthodes moderne :

I.6.1. Méthode classique

I.6.1.1. Compensateurs synchrones

Les compensateurs synchrones sont des machines tournantes branchées sur le tertiaire du transformateur THT/HT qui peut fournir ou absorbé de l'énergie réactive sans mettre en jeu de puissance active. La fourniture de la puissance réactive est limitée par l'échauffement des enroulements et l'absorption par des problèmes de stabilité statique.

Ces machines qui sont constituées de 20 à 60 MVAR posent des problèmes de maintenance et leur installation nécessite des ouvrages de génie civil important et le coût est élevé tant en investissement qu'en exploitation. Leur emploi est de plus en plus abandonné principalement à cause de leur entretien trop onéreux.

I.6.1.2. Batteries de condensateurs

Elles ont pour rôle de fournir une partie de l'énergie réactive fixe consommée par les charges ou le réseau. On distingue deux types de matériels :

I.6.1.2.1. Batteries de condensateurs HT

Ces batteries raccordées aux jeux de barres HT des postes THT/HT compensent les pertes réactives sur les réseaux HT et THT et les charge. Leur puissance est de 20 à 30 MVAR.

I.6.1.2.2. Batteries de condensateurs MT

Raccordées aux jeux de barres MT des postes HT/MT et THT/MT, elles compensent l'appel global de l'énergie réactive des réseaux de distribution aux réseaux de transport.

Ces batteries sont fractionnées en gradins de 2.4 ou 3 MVAR (selon la puissance du transformateur HT/MT). Chaque gradin commandé séparément est dimensionné pour limiter à 5% la variation de la tension maximale sur le jeu de barre MT au moment de la manœuvre d'un gradin.

I.6.1.3. Les inductances

Elles sont utilisées pour compenser la puissance réactive fournie par les lignes et les réseaux de câbles souterrains en heures creuses. Elles sont raccordées soit directement au réseau, soit branchées sur les tertiaires des auto-transformateurs. Toutefois, ces inductances engendrent des harmoniques importants dont le filtrage nécessite des installations importantes où les pertes peuvent ne pas être négligeables. Compte tenu de ces problèmes, elles sont en cours de déclassement.

I.6.2. Méthode moderne

I.6.2.1. Les dispositifs FACTS

La définition du terme FACTS est la suivante : Systèmes de Transmission en Courant Alternatif comprenant des dispositifs basés sur l'électronique de puissance et d'autres dispositifs statique utilisés pour accroître la contrôlabilité et augmenter la capacité de transfert de puissance du réseau.

Avec leurs aptitudes à modifier les caractéristiques apparentes des lignes, les FACTS sont capables d'accroître la capacité du réseau dans son ensemble en contrôlant les transits de puissances. Les dispositifs FACTS ne remplacent pas la construction de nouvelles lignes. Ils sont un moyen de différer les investissements en permettant une utilisation plus efficace du réseau existant.

I.7. Conclusion

Ce chapitre a traité la stabilité et l'instabilité d'un réseau électrique on a étudié les différentes méthodes d'améliorer la stabilité parmi c'est méthode on a trouvé que les FACTS sont la meilleure solution alors Les systèmes FACTS ont la capacité d'améliorer la stabilité transitoire en utilisant une commande appropriée. Les systèmes FACTS peuvent contrôler la puissance transmissible de la ligne en utilisant deux méthodes : la compensation série et la compensation parallèle. Grâce aux avancées récentes dans la technologie des thyristors GTO, le temps de réaction des dispositifs FACTS est diminué de quelques milli secondes. Comme nous le verrons avec des simulations numériques dans les chapitres précédents, ce délai ne dégrade pas les performances de la commande de stabilité transitoire en boucle fermée. Dans ce mémoire, nous avons choisi d'étudier l'UPFC.

Chapitre II

Généralité sur les systèmes

FACTS

II.1. Introduction

Avec le développement technologique et industriel que vit le monde entier la demande en énergie électrique est en augmentation continue et sans cesse. Pour satisfaire ces besoins et acheminer cette énergie aux points de consommation dispersés sur un large espace géographique ; les réseaux électriques, ayant des capacités de transit limitées à cause des limites thermiques des lignes, doivent s'élargir et de nouvelles lignes d'extension seront ajoutées.

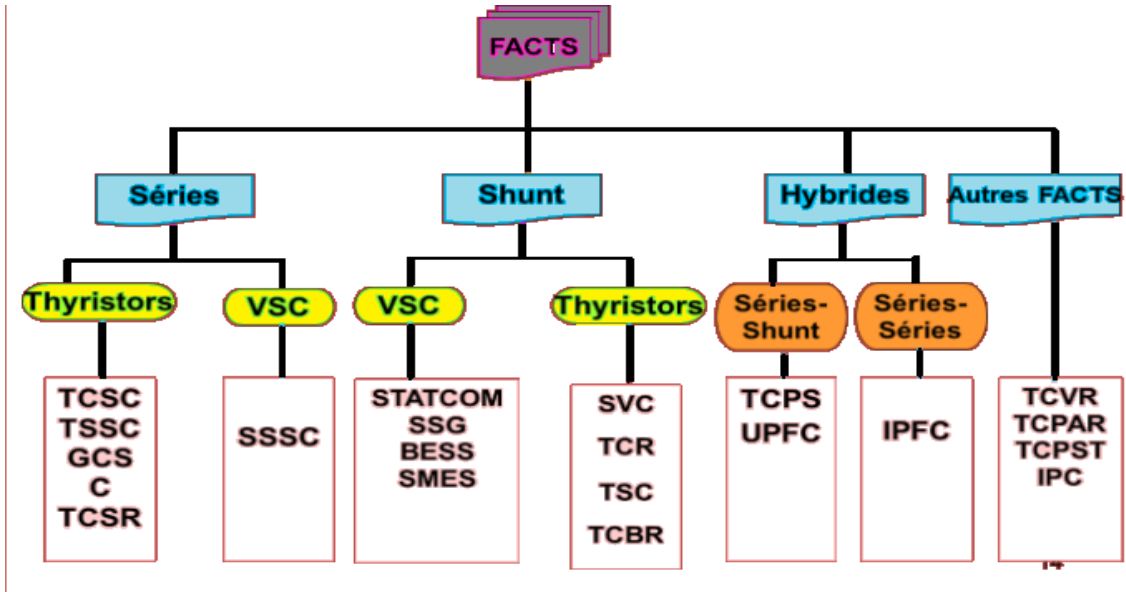
Les dispositifs FACTS (Flexible Alternative Current Transmission System) peuvent contribuer à faire face aux problèmes rencontrés dans l'exploitation des réseaux électriques le concept FACTS introduit en 1986 par Electric Power Research Institute (EPRI) regroupe l'ensemble des dispositifs basés sur l'exploitation d'un réseau électrique son développement est étroitement lié aux progrès réalisés dans le domaine des semi-conducteurs de puissance et plus particulièrement des éléments commandables tels que le thyristor et le thyristor GTO [04]. Ces éléments jouent aux dispositifs FACTS une vitesse et une fiabilité bien supérieures à celles des systèmes électromécaniques classiques. Cette partie est consacrée pour l'étude théorique générale des dispositifs FACTS, nous présenterons les différentes classifications ainsi que les propriétés de ces dispositifs.

Nous avons présenté dans le chapitre II les différents types de compensateurs du système FACTS série, parallèle, hybride.

II.2. Le système FACTS (système de transmission flexible en courant alternatif)

L'acronyme FACTS qui est l'abréviation de «Flexible AC Transmission System» est défini comme suit: Les systèmes de transmission du courant alternatif incorporant des contrôleurs à base d'électronique de puissance et autres contrôleurs statiques afin d'améliorer la contrôlabilité des réseaux électriques ainsi que la capacité de transfert des lignes [05],[06]. La technologie FACTS n'est pas limitée en un seul dispositif mais elle regroupe une collection de dispositifs à base d'électronique de puissance implantés dans les réseaux électriques afin de mieux contrôler le flux de puissance et augmenter la capacité de transit de leurs lignes. Par action de contrôle rapide de ces systèmes sur l'ensemble des paramètres du réseau : tension, impédance, déphasage ...etc. Ils permettent d'améliorer les marges de stabilité et assurer une meilleure flexibilité du transfert d'énergie.

II.3. Les différents systèmes FACTS



Figure(II.1) : Classification des systèmes FACTS

II.3.1. Compensateurs séries

Ces compensateurs sont connectés en série avec le réseau comme une impédance variable (inductive ou capacitive) ou une source de tension variable utilisée pour la compensation série de la puissance réactive et par leur influence sur l'impédance effective des lignes ils interviennent dans le contrôle du flux de puissance et la stabilité de ce dernier. En général ces dispositifs séries injectent une tension en série avec la ligne de transmission. Ces compensateurs série sont aussi appelés compensateurs d'impédance, car par l'ajustement de l'impédance de la ligne, ce type de compensateur est capable de contrôler le transit de puissance active dans la ligne [07] . On a comme exemple :

- Compensateur série TCSC (Thyristor Controller Séries Compensator)

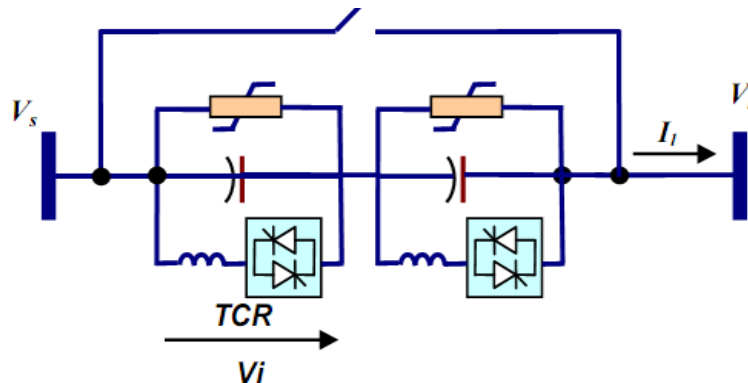


Figure (II.2) : Structure d'un TCSC

- Compensateur série synchrone statique SSSC (Static Synchronous Series Compensator)

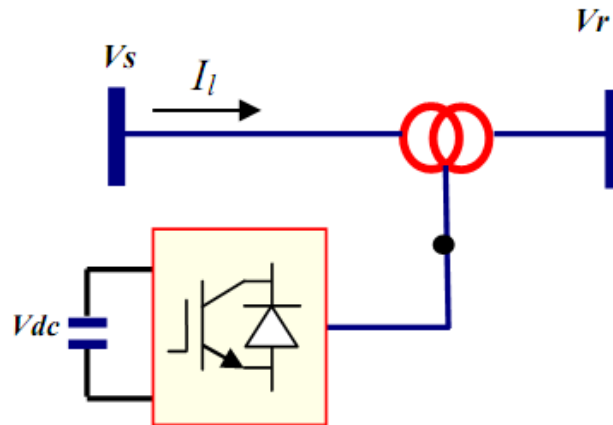


Figure (II.3) : Structure d'un SSSC

II.3.1.1. Principe de fonctionnement

L'onduleur série injecte par l'intermédiaire d'un transformateur série T_2 une tension additionnelle V_c entre la tension V_s du départ de la ligne de transmission et la tension V_r de l'arrivée. En variant la tension additionnelle V_c en module, il est possible de varier dans une certaine mesure la tension V_s en module. Ainsi, on peut modifier statiquement les puissances active et réactive transmises par la ligne de transmission.

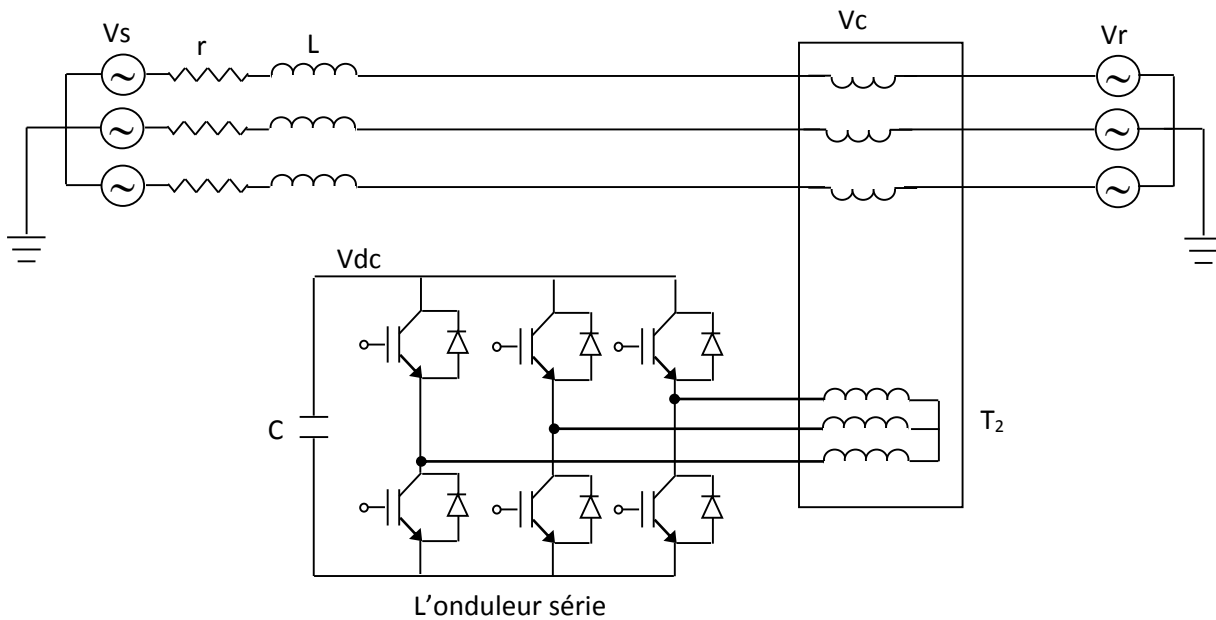


Figure (II.4) : Compensateur série

II.3.2. Compensateurs shunts

Ils consistent en une impédance variable, source variable ou une combinaison des deux. Ils injectent un courant dans le réseau à travers le point de connexion. Ils sont principalement pour la compensation de la puissance réactive et par conséquent contrôler de tension des nœuds, Cette compensation est basée sur les dispositifs suivants :

➤ **SVC (Static VAR Compensator) :**

Le premier exemple d'un compensateur statique SVC a été installé en 1979 en Afrique du sud [08]. Il sert à maintenir la tension en régime permanent et en régime transitoire à l'intérieur de limites désirées. Le SVC injecte ou absorbe de la puissance réactive dans la barre où il est branché de manière à satisfaire la demande de puissance réactive de la charge ce dispositif utilise le thyristor comme composant électronique de puissance.

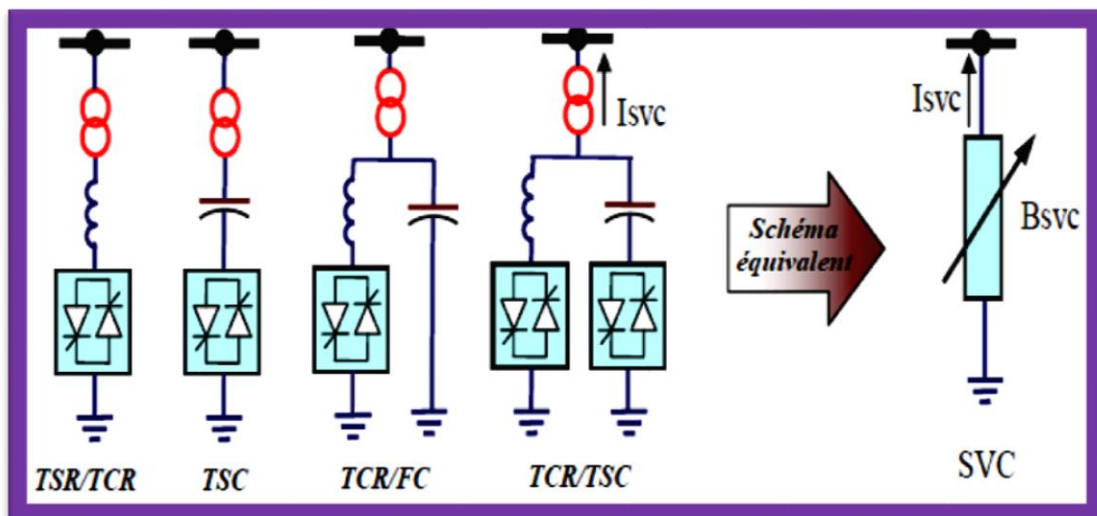


Figure (II.5) : Schéma d'un SVC

➤ **TCBR (Thyristor Control Breaking Resistor):**

Le compensateur TCBR (résistance de freinage contrôlée par thyristors) est connecté en parallèle et utilisée pour améliorer la stabilité du réseau ou pour diminuer l'accélération des générateurs en cas de la présence des perturbations.

➤ **TSC (Thyristor Switched Capacitor) :** ou TSR (Thyristor Switched Reactor) Un circuit TCR est composé d'une impédance placée en série avec deux thyristors montés en antiparallèle, la valeur de l'impédance est continuellement changée par l'amorçage des thyristors.

➤ **TCR (Thyristor Controlled Reactor) :**Le circuit TSC est composé d'une réactance placée en série avec deux thyristors montés en antiparallèle, Pour un TSC les thyristors fonctionnent en pleine conduction.

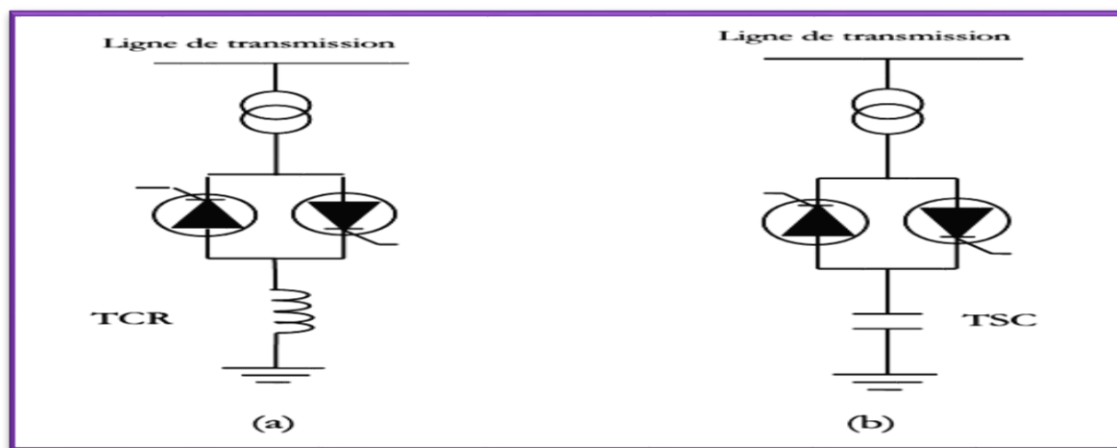


Figure (II.6): Schéma de principe d'un TCR/TSC

➤ **STATCOM (Static Compensator)** est connecté en parallèle avec la ligne de transmission, lequel son courant de sortie inductif ou capacitif peut être contrôlé indépendamment du réseau. Le STATCOM est constitué d'un transformateur de couplage, un convertisseur de tension, et une source de stockage pour le côté DC. Il est capable de fournir son courant nominal, même lorsque la tension est faible

Ce type de compensateur shunt (compensateur statique synchrone) a connu jusqu'à présent différentes appellations :

- ✚ ASVC (Advanced Static Var Compensator)
- ✚ SVG (Static Var Generator)
- ✚ SVC light
- ✚ SVC plus

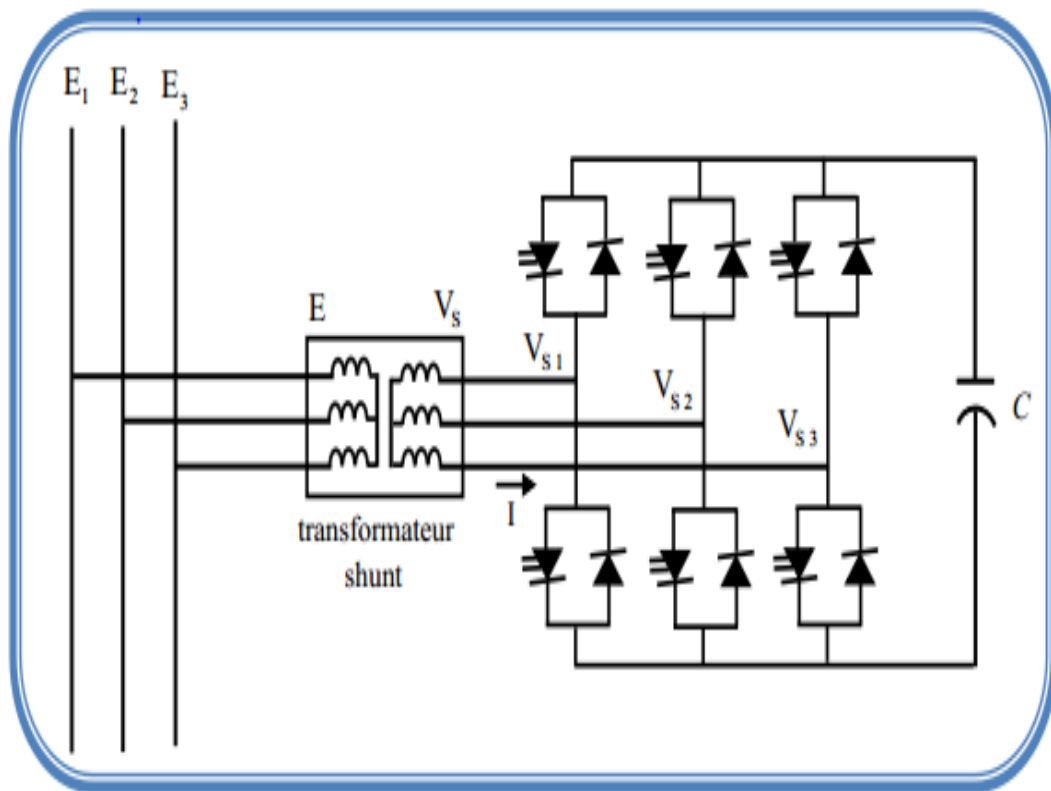


Figure (II.7) : Structure du STATCOM

II.3.2.1. Principe de fonctionnement

La figure ci-dessous présente le principe d'un compensateur statique de puissance réactive. Un onduleur parallèle à pulsation est branché par l'intermédiaire du transformateur T_1 à la tension V_s du départ de la ligne de transmission. Il produit trois tensions sinusoïdales à la fréquence fondamentale, avec des amplitudes et des angles de phase réglables. La puissance réactive est variée par l'ajustement de l'amplitude de la tension de sortie de convertisseur. Afin de garantir un bon fonctionnement de l'onduleur shunt, on doit prévoir plusieurs circuits de réglage. Avec un réglage interne, on contrôle le courant triphasé. Les consignes sont fournies par deux circuits de réglage superposés qui fonctionnent en parallèle. D'une part, il y a un réglage de la tension continue V_{dc} qui est maintenue avec le condensateur C .

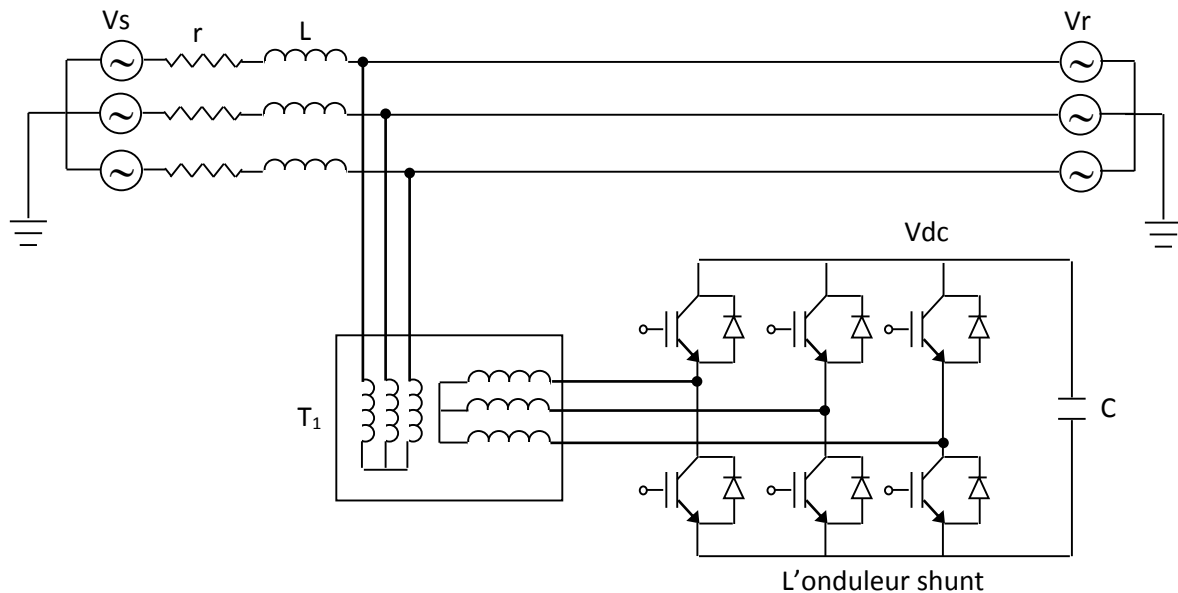


Figure (II.8) : Compensateur parallèle

Cette tension doit être réglée à une valeur constante, afin de permettre une modulation sinusoïdale de l'onduleur dans toute la plage de fonctionnement. D'autre part, il y a un réglage de la puissance réactive. Puisque l'onduleur à pulsation permet de travailler dans les quatre quadrants, on peut absorber ou fournir de la puissance réactive au réseau de transmission.

II.3.3. Compensateurs hybrides série-shunt (variateur de charge universel)

C'est une combinaison des dispositifs séries et shunts commandé d'une manière coordonné afin d'accomplir un contrôle prédéfini. Ils permettent un contrôle multi variables, ils servent à contrôler le flux de puissance active et réactive, la tension et l'angle de transport de l'énergie.

La technologie de ces systèmes (interrupteurs statiques) leur assure une vitesse et une fiabilité supérieures à celle des systèmes électromécaniques classiques. L'intérêt de ces dispositifs est non seulement de pouvoir contrôler l'écoulement de puissance dans les réseaux mais aussi d'augmenter la capacité effective de transport jusqu'à leur limite thermique maximale tout en maintenant, voire en améliorant la stabilité des réseaux.

Ces compensateurs modifient le flux de puissance, active et réactive sur une ligne en changeant seulement son angle électrique de transport. Les dispositifs les plus courants sont les suivant :

- Transformateur déphaseur à thyristor PST (phase –shifting transformer).

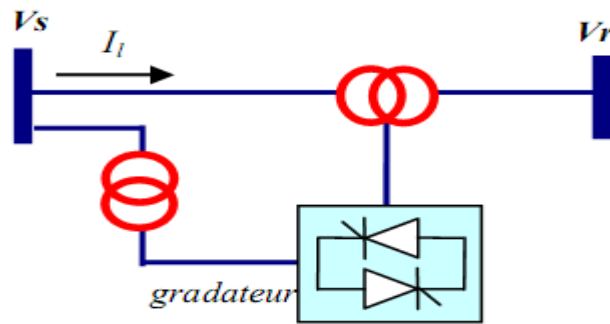


Figure (II.9) : Structure d'un PST

➤ **IPFC (Interline Power Flow Controller)**

L'IPFC a été proposé par Gyugyi, Sen et Schauder en 1998 afin de compenser un certain nombre de lignes de transmission. Sous sa forme générale, l'IPFC utilise des convertisseurs DC-DC placés en série avec la ligne à compenser. En d'autres termes, L'IPFC comporte un certain nombre de SSSC

La fonction principale pour laquelle a été conçu le compensateur hybride connu sous le nom IPFC est la compensation d'un certain nombre de lignes de transmission d'une sous station, il utilise des convertisseurs DC-AC placés en série avec la ligne à compenser. En d'autres termes, l'IPFC comporte un certain nombre de SSSC .Il est utilisé également afin de conduire des changements de puissances entre les lignes du réseau.

- ✚ Déphaseur statique.

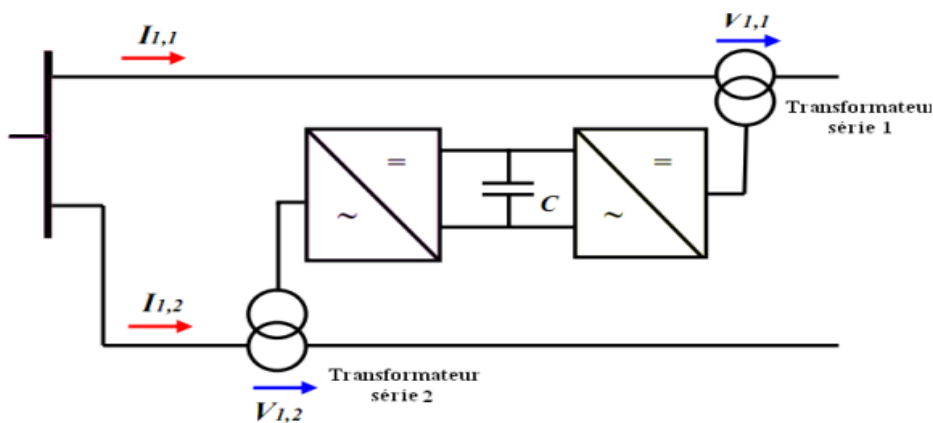


Figure (II.10):Structure de l'IPFC

Il existe un nouveau dispositif des systèmes FACTS, appelé **UPFC (Unified Power Flow Controller)** ou variateur de charge universel. Ce système combine à la fois la fonctionnalité de compensateur

parallèle et le compensateur série. Il est capable de contrôler simultanément et indépendamment, la puissance active et la puissance réactive. Il peut donc contrôler les trois paramètres associés au transit de puissance à savoir la tension de la ligne, l'impédance de la ligne et l'angle de transport. La configuration de l'UPFC est illustrée par la Figure.

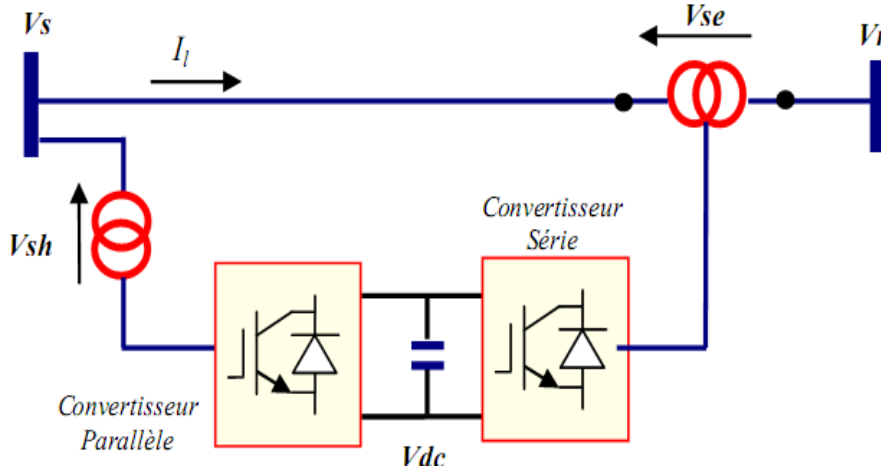


Figure (II.11) : Schéma représentatif d'un UPFC

II.3.3.1. Structure du variateur de charge universel (UPFC)

L'UPFC est constitué de deux transformateurs T_1 et T_2 utilisés pour assurer une isolation galvanique et ajuster les niveaux de tension entre le système d'alimentation et est composé de deux onduleurs à MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion) qui sont connectés à travers un circuit continu commun. L'un est connecté en parallèle et l'autre en série avec la ligne de transmission, comme illustré par la figure.

On suppose que chaque onduleur est constitué de six thyristors (GTO: Gate-Turn-Off) avec des diodes antiparallèles correspondantes.



Figure (II.12): Unified Power Flow Controller (UPFC)

II.3.3.2. Principe de fonctionnement du système UPFC

L'UPFC est connecté dans un système de transmission simplifié comme le montre la figure. Il est installé à l'arrivée de la ligne de transmission. Deux transformateurs T_1 (V_{sh}) et T_2 (V_{se}) sont utilisés pour assurer une isolation galvanique et ajuster les niveaux de tension entre le système d'alimentation et les onduleurs. Dans la figure, les tensions V_s et V_r représentent respectivement les sources de tension sinusoïdales triphasées du départ et d'arrivée de la ligne de transmission. L'UPFC est composé de deux onduleurs à MLI (PWM) placés dos-à-dos et connectés à un condensateur C . Le convertisseur série fournit la tension de compensation V_c à travers le transformateur série T_2 , tandis que le convertisseur parallèle fournit ou absorbe de la puissance réactive ainsi que la puissance active demandée par l'onduleur série et règle la tension continue V_{dc} au niveau du condensateur. Les puissances active et réactive sont générées/absorbées indépendamment par chaque onduleur.

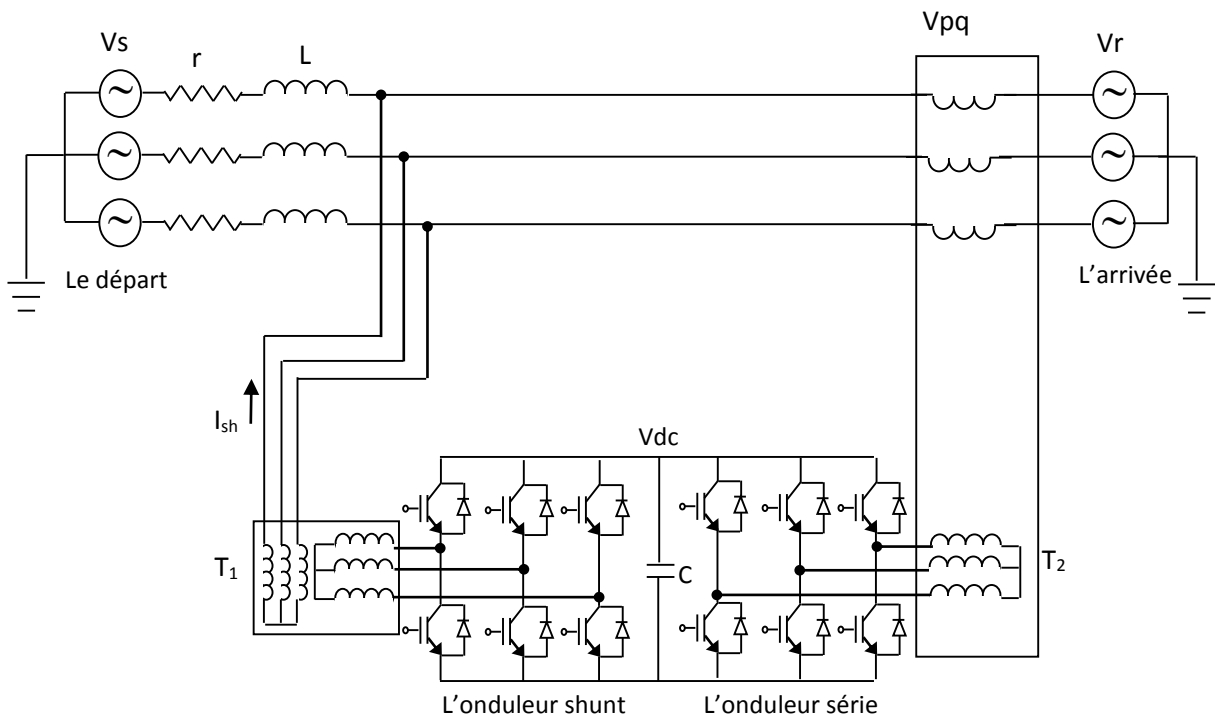


Figure (II.13) : Schéma de principe de l'UPFC

II.4. Comparaison des FACTS les plus utilisés

Le tableau suivant montre les performances qui guident l'utilisateur dans son choix pour chaque compensateur :

Tableau I: tableau Bénéfices techniques des dispositifs FACTS

| Dispositif | Contrôle du transit de puissance | Contrôle de La tension | Stabilité transitoire | Stabilité statique |
|----------------------------|----------------------------------|------------------------|-----------------------|--------------------|
| SVC STATCOM | + + | + + + + + + | + + + | + + + + |
| TCSC/GCSC SSSC TCPST | + + + + + + + | + + + | + + + + + + + + | + + + + + + |
| UPFC IPFC | + + + + + + | + + + + | + + + + + + | + + + + + |

II.5. Applications pratiques des dispositifs FACTS

Les systèmes FACTS sont habituellement connus comme nouvelle technologie, Le tableau suivant montre des chiffres approximatifs des dispositifs FACTS installés dans le monde avec les puissances totales installées [09].

Tableau II : Les dispositifs FACTS installés dans le monde et leurs puissances totales

| Type | Nombre | Puissance installée en MVA |
|--------------------|--------|----------------------------|
| SVC | 600 | 90.000 |
| STATCOM | 15 | 1.200 |
| TCSC | 10 | 2.000 |
| Série compensation | 700 | 350.000 |
| UPFC | 2-3 | 250 |
| HVDC B2B | 41 | 250 |

II.6. Apports et avantages des dispositifs FACTS

L'intérêt majeur de la technologie FACTS pour les opérateurs de l'énergie électrique est d'ouvrir plus d'opportunités pour le contrôle de la puissance et d'augmenter les capacités utilisables des présentes lignes sous les conditions normales. Ces possibilités résultent par l'habilité des contrôleurs FACTS de contrôler les paramètres intervenant dans l'équations , qui gouverne la fonction de transmission de l'énergie dans une ligne telles que les impédances séries, impédances shunts, courant,

tension angle de phase. Par cette action, les contrôleurs FACTS permettent dans un système énergétique d'obtenir :

Un Contrôle du flux de puissance qui est la principale fonction des dispositifs FACTS et qui doit être réalisé selon un cahier de charge prédéfini pour satisfaire les besoins des consommateurs :

- Améliorer la stabilité dynamique et transitoire du système et atténuer les oscillations de puissances
- Contrôler des tensions aux jeux de barres
- Augmenter les capacités de charge des lignes vers leurs limites thermiques
- Contrôler la puissance réactive donc augmenter la puissance active transportée et minimiser les pertes
- Améliorer de la qualité de l'énergie.

II.7. Conclusion

Ce chapitre présente aussi une vue globale sur les nouveaux dispositifs de contrôle et de commande des systèmes énergétiques FACTS, ainsi les différentes type et leurs principe de fonctionnement.

Aujourd'hui cette technologie "FACTS" occupe une place privilégiée pour la gestion de systèmes énergétiques vis-à-vis ces atouts qu'elle offre tout en augmentant la capacité de transport, renforcement de stabilité de tension et le maintien d'une qualité meilleure de l'énergie.

Parmi les structures qui en découlent de ce système, le contrôleur de flux de puissance (UPFC), qui est un dispositif d'électronique de puissance à base des convertisseurs classiques dans sa structure mais original dans son cahier de charge (compensateur d'énergie réactive shunt STATCOM, condensateurs série réglable SSSC).

La fiabilité d'un UPFC est consacrée sur l'analyse mathématique et son réglage, ce qui va être démontré dans le troisième chapitre.

Chapitre III

Modélisation et réglage de
système UPFC

III.1. Introduction

L'UPFC (Unified Power Flow Controller), appelé aussi Déphaseur Régulateur Universel, (DRU) ou variateur de phase universel, est l'un des plus performants des composants FACTS. Il est capable de contrôler, simultanément et indépendamment, la puissance active et réactive de la ligne. Il peut contrôler les trois paramètres associés au transit de puissance ; la tension, l'impédance et l'angle de transport de la ligne.

Afin d'étudier le comportement du système et la synthèse des lois de commande, il est nécessaire d'avoir un modèle adéquat du dispositif. Nous avons utilisé le modèle de l'UPFC dans un réseau [10]. Le modèle mathématique de l'UPFC et le réglage de ce système sont expliqués dans ce chapitre.

La modélisation du processus nous a permis de mettre en équations les différents paramètres des différentes parties du système et nous a permis d'avoir selon PARK un modèle adéquat, où on peut faire apparaître les paramètres d'un tel réglage approprié. Le circuit équivalent du système de l'UPFC est représenté sur la figure III.5, où les deux parties série et shunt de l'UPFC sont représentés respectivement par deux sources de tension V_c et V_p . La ligne de transmission est modélisée par une résistance r en série avec une inductance L . Les paramètres r_p et L_p représentent la résistance et l'inductance de fuite du transformateur de la partie shunt. La non-linéarité du système est négligée.

III.2. Modélisation du système UPFC

Le circuit simplifié du système de contrôle et de compensation de l'UPFC est représenté sur la figure la modélisation de ce circuit est basé sur les hypothèses suivantes [11] [12] :

1. tous les interrupteurs sont supposés idéals.
2. les trois tensions de la source alternative sont équilibrées.
3. toutes les chutes de tension dans la compensateur série sont représentées par la résistance r .
4. toutes les chutes de tension dans le compensateur parallèle sont représentées par la résistance r_p .
5. les harmoniques causées par l'action d'ouverture et de fermeture des interrupteurs sont négligées.
6. l'inductance de la ligne L_s plus l'inductance de fuite du transformateur série L_s sont représentés par l'inductance L .

7. L'inductance de fuite du transformateur shunt est représentée par l'inductance L_p .

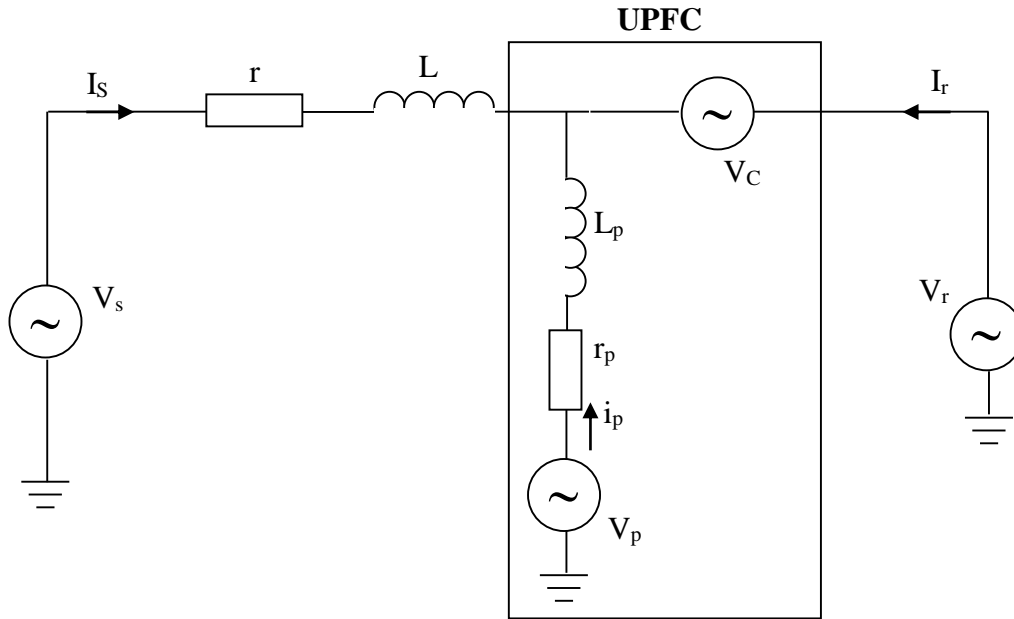


Figure (III.1) : Circuit équivalent de l'UPFC

Les équations dynamiques de l'UPFC sont divisées en trois systèmes d'équations : les équations de la branche série, les équations de la branche parallèle et celles du circuit de courant continu [13],[14], [15],[16].

En appliquant les lois de KIRCHOFF on aura les équations suivantes de chaque branche :

III.2.1. Modélisation de la branche série (UPFC série)

On suppose que les onduleurs séries et shunt sont des sources de tension contrôlables idéales.

Donc, à partir de la figure (III.1) on pourra déduire l'équation (III.1):

$$\begin{aligned} \frac{di_{sa}}{dt} &= -\frac{r}{L} \cdot i_{sa} + \frac{1}{L} \cdot (v_{sa} - v_{ca} - v_{ra}) \\ \frac{di_{sb}}{dt} &= -\frac{r}{L} \cdot i_{sb} + \frac{1}{L} \cdot (v_{sb} - v_{cb} - v_{rb}) \\ \frac{di_{sc}}{dt} &= -\frac{r}{L} \cdot i_{sc} + \frac{1}{L} \cdot (v_{sc} - v_{cc} - v_{rc}) \end{aligned} \quad (III.1)$$

Ou i_{sa} , i_{sb} et i_{sc} sont les courants de la ligne de transmission, et r et L sont respectivement sa résistance et son inductance. Pour simplifier les calculs, l'impédance du transformateur T_2 a été négligée. L'onduleur série génère la tension de compensation V_c à l'arrivée de la ligne de transmission.

En utilisant la représentation matricielle sur le système d'axes a,b et c. Le modèle mathématique de l'UPFC est donné par le système d'équation suivant :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r/l & 0 & 0 \\ 0 & -r/l & 0 \\ 0 & 0 & -r/l \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} v_{sa} - v_{ca} - v_{ra} \\ v_{sb} - v_{cb} - v_{rb} \\ v_{sc} - v_{cc} - v_{rc} \end{bmatrix} \quad (III.2)$$

La source de tension V_c représente respectivement l'onduleur du système UPFC série. La transformation de Park des courants triphasés i_{sa} , i_{sb} et i_{sc} et des tensions v_{ra} , v_{rb} et v_{rc} , est calculée comme suit:

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_o \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & -\sin(\omega t) & 1/2 \\ \cos(\omega t - 120^\circ) & -\sin(\omega t - 120^\circ) & 1/2 \\ \cos(\omega t + 120^\circ) & -\sin(\omega t + 120^\circ) & 1/2 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (III.3)$$

Où x peut être une tension ou un courant.

Dans notre cas, la composante x_o n'existe pas vu que le système d'alimentation est supposé symétrique. Après **la transformation de Park**, l'équation (III.1) se traduit dans le repère d-q selon les équations (III.4) et (III.5).

$$\frac{di_{sd}}{dt} = \omega \cdot i_{sq} - \frac{r}{L} \cdot i_{sd} + \frac{1}{L} (v_{sd} - v_{cd} - v_{rd}) \quad (III.4)$$

$$\frac{di_{sq}}{dt} = -\omega \cdot i_{sd} - \frac{r}{L} \cdot i_{sq} + \frac{1}{L} (v_{sq} - v_{cq} - v_{rq}) \quad (III.5)$$

La forme matricielle de l'axe d-q peut être réécrite sous la forme suivante :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r/l & +\omega \\ -\omega & -r/l \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} v_{sd} - v_{cd} - v_{rd} \\ v_{sq} - v_{cq} - v_{rq} \end{bmatrix} \quad (III.6)$$

Le schéma de simulation de la ligne de transmission avec la partie série du système UPFC selon le repère d-q est donné par la figure III.2.

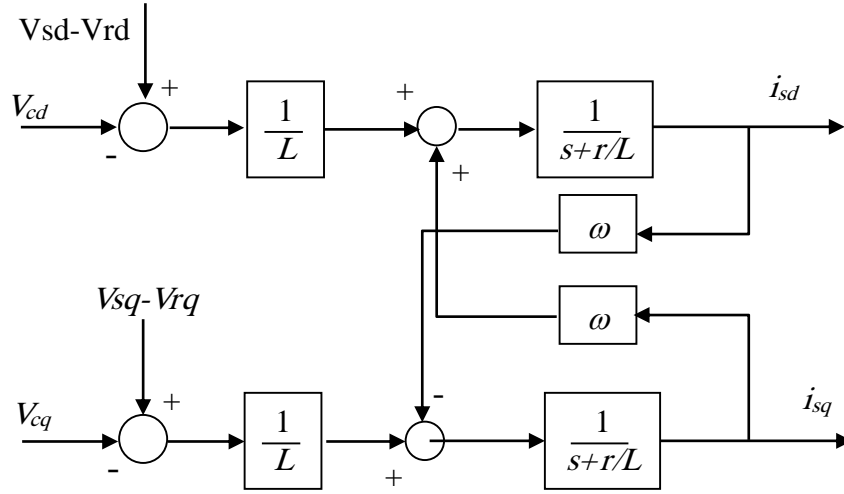


Figure (III.2) : Modèle mathématique du système de l'UPFC série

III.2.2 Modélisation de la partie shunt (UPFC shunt)

Le modèle mathématique de l'UPFC shunt est donné dans l'équation (III.7).

$$\begin{aligned}
 \frac{di_{pa}}{dt} &= -\frac{r_p}{L_p} \cdot i_{pa} + \frac{1}{L_p} \cdot (v_{pa} - v_{ca} - v_{ra}) \\
 \frac{di_{pb}}{dt} &= -\frac{r_p}{L_p} \cdot i_{pb} + \frac{1}{L_p} \cdot (v_{pb} - v_{cb} - v_{rb}) \\
 \frac{di_{pc}}{dt} &= -\frac{r_p}{L_p} \cdot i_{pc} + \frac{1}{L_p} \cdot (v_{pc} - v_{cc} - v_{rc})
 \end{aligned}
 \tag{III.7}$$

Où $i_{pa, b, c}$ sont les courants de l'UPFC shunt, $v_{pa, b, c}$ sont les tensions générées par l'onduleur L , r_p et L_p sont respectivement la résistance et l'inductance de l'UPFC shunt .

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{pa} \\ i_{pb} \\ i_{pc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r_p/L_p & 0 & 0 \\ 0 & -r_p/L_p & 0 \\ 0 & 0 & -r_p/L_p \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{pa} \\ i_{pb} \\ i_{pc} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_p} \cdot \begin{bmatrix} v_{pa} - v_{ca} - v_{ra} \\ v_{pb} - v_{cb} - v_{rb} \\ v_{pc} - v_{cc} - v_{rc} \end{bmatrix}
 \tag{III.8}$$

Le modèle d-q de l'équation. (III.6) est donné par les équations (III.8) et(III.9).

$$\frac{di_{pd}}{dt} = \omega \cdot i_{pq} - \frac{r_p}{L_p} \cdot i_{pd} + \frac{1}{L_p} (v_{pd} - v_{cd} - v_{rd}) \tag{III.9}$$

$$\frac{di_{pq}}{dt} = -\omega \cdot i_{pd} - \frac{r_p}{L_p} \cdot i_{pq} + \frac{1}{L_p} (v_{pq} - v_{cq} - v_{rq}) \tag{III.10}$$

La forme matricielle est donnée comme suite :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{pd} \\ i_{pq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r_p/l_p & -\omega \\ -\omega & -r_p/l_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{pd} \\ i_{pq} \end{bmatrix} + \frac{1}{l_p} \begin{bmatrix} v_{sd} - v_{cd} - v_{rd} \\ v_{sq} - v_{cq} - v_{rq} \end{bmatrix} \tag{III.11}$$

Le diagramme de bloc de l'UPFC shunt est donné par la figure III.3 ci -dessous :

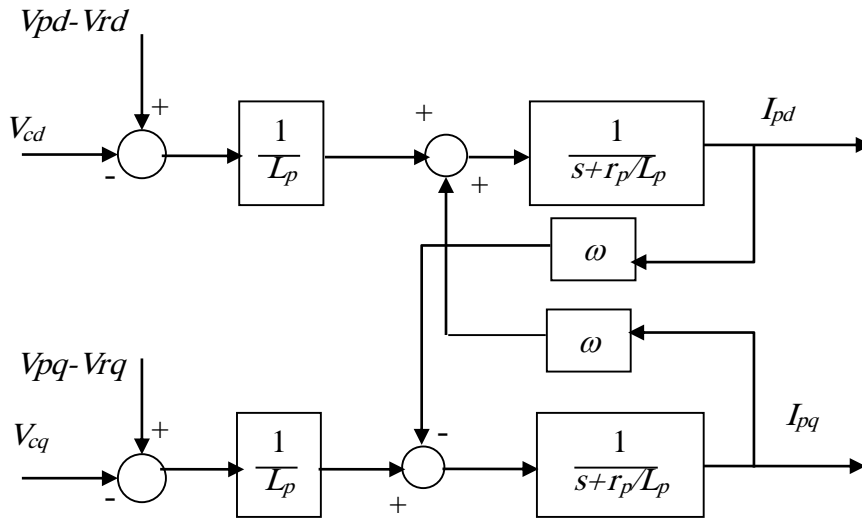


Figure (III.3) : Modèle mathématique du système de l'UPFC parallèle

III.2.3. Modélisation de la branche continue de l'UPFC

En se passant sur le principe d'équilibre des puissances et en négligeant les pertes des convertisseurs. La tension continue V_{dc} est déduite de la figure III.3 et est décrite par l'équation (III.11).

$$\frac{dv_c}{dt} = \frac{1}{C v_c} (p_e - p_{ep}) \tag{III.12}$$

D'où

$$p_e = v_{ca} i_{sa} + v_{cb} i_{sb} + v_{cc} i_{sc} \quad (\text{III.13})$$

$$p_{ep} = v_{pa} i_{pa} + v_{pb} i_{pb} + v_{pc} i_{pc} \quad (\text{III.14})$$

Avec :

p_e : la puissance active absorbée du système AC

p_{ep} : la puissance active injectée par l'onduleur shunt en système AC

En appliquant la transformation de PARK (équation III.3) sur l'équation (III.12), on obtient :

$$\frac{dv_{dc}}{dt} = \frac{3}{2 C v_{dc}} \left(v_{pd} i_{pd} + v_{pq} i_{pq} - v_{cd} i_d - v_{cq} i_q \right) \quad (\text{III.15})$$

L'UPFC série et L'UPFC shunt sont identiques à tout point de vue. Les commandes utilisées pour l'onduleur série sont aussi les mêmes pour l'onduleur shunt.

La modélisation du processus nous a permis de mettre en équation les différents paramètres d'un système. A l'issue de cette opération on se trouve face au problème suivant : plus le modèle se rapproche de la réalité qu'on ne pourra jamais atteindre, plus le contrôle devient complexe et demande un moyen de calcul très important. Par contre si le système est simplifié ; les calculs deviennent faciles mais on s'éloigne de la réalité. Un choix judicieux consiste à idéaliser le processus et par conséquent garder les phénomènes les plus importants et négliger les phénomènes secondaires. Il importe donc que les modèles soient utilisables aussi bien en régime statique que dynamique. Le but de ce chapitre est d'appliquer les lois de commande et de régulation d'un tel système. Les différentes techniques de réglage proposées pour l'UPFC sont évaluées en simulation puis comparées en terme de leurs performances vis-à-vis des variations des caractéristiques de la ligne.

III.3. Schéma de Principe de l'onduleur triphasé

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion continue alternative. Pour obtenir une tension alternative à partir d'une tension continue, il faut découper la tension d'entrée et l'appliquer tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre, au récepteur par une séquence adéquate de commande des semi-conducteurs. Il est donc possible de produire à la sortie du convertisseur une tension alternative de valeur moyenne nulle. Cette tension peut comporter un ou plusieurs créneaux par alternance suivant qu'il s'agit d'une commande à un créneau par alternance ou d'une commande par modulation de largeur d'impulsion (M.L.I) [17].

Les structures des convertisseurs conduit à distinguer deux types d'onduleurs :

- Les onduleurs de tension

- Les onduleurs de courant

Les semi – conducteurs les plus couramment utilisés pour réaliser les interrupteurs sont les transistors de puissance (MOSFET, IGBT) et les thyristors rapides (principalement les GTO).

La Figure donne le schéma de principe de l’ondeur de tension triphasé, il est placé entre une source de tension triphasée parfaite, donc de tension constante et une charge triphasée équilibrée parcourue par des courants i_a, i_b et i_c formant un système triphasé sinusoïdale équilibré.

L’ondeur est un assemblage de trois ponts monophasés formés chacun de deux interrupteurs en série (K_1 et K_1' , K_2 et K_2' , K_3 et K_3'). Les interrupteurs d’un même demi- pont doivent être complémentaires pour que la source de tension ne soit jamais en court-circuit, et pour que les circuits des courants i_a, i_b et i_c ne sont jamais ouverts. Pour que les six interrupteurs puissent imposer les tensions de sortie, quels que soient les courants i_a, i_b et i_c . Il faut que ces interrupteurs soient bidirectionnels en courant. Chacun d’eux est formé d’un semi-conducteur à ouverture et fermeture commandées.

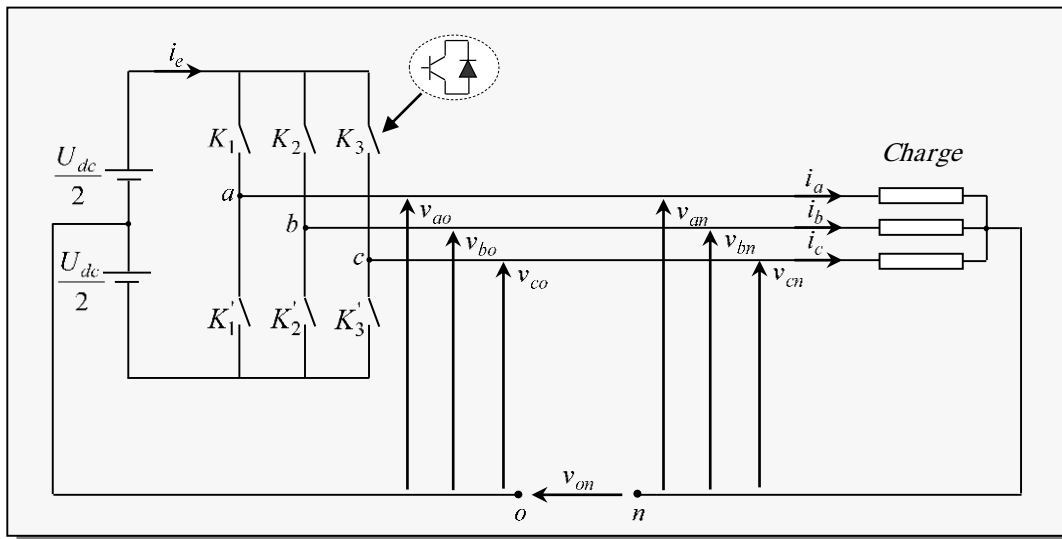


Figure (III.4) : Schéma de principe de l’ondeur à MLI

Sachant que dans un régime équilibré $v_{an} + v_{bn} + v_{cn} = 0$, nous pouvons écrire, selon la figure (III 4)

$$\begin{cases} v_{an} = v_{ao} + v_{on} \\ v_{bn} = v_{bo} + v_{on} \\ v_{cn} = v_{co} + v_{on} \end{cases} \tag{III.16}$$

En faisant la somme des équations du système (III.16), on obtient :

$$v_{an} + v_{bn} + v_{cn} = v_{ao} + v_{bo} + v_{co} + 3v_{on} = 0 \quad (\text{III.17})$$

D'où : $v_{ao} + v_{bo} + v_{co} = -3v_{on}$ (III.18)

Donc : $v_{on} = -\frac{1}{3}(v_{ao} + v_{bo} + v_{co})$ (III.19)

En substituant l'équation (III.19) dans le système (III.16), il vient alors :

$$\begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ao} \\ v_{bo} \\ v_{co} \end{bmatrix} \quad (\text{III.20})$$

Les deux interrupteurs de chaque branche de l'onduleur sont commandés de manière complémentaire, en appliquant une modulation de largeur d'impulsion.

À partir du schéma de l'onduleur, les tensions fournies par les demi-ponts sont:

$$v_i - v_o = \begin{cases} +\frac{V_{dc}}{2} & \text{si } K_i : \text{fermé} \\ -\frac{V_{dc}}{2} & \text{si } K'_i : \text{fermé} \end{cases} \quad \text{avec : } i = a, b, c \quad (\text{III.21})$$

Les tensions délivrées sont données par :

$$\begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{III.22})$$

Avec S_i est l'état de l'interrupteur K_i , supposé parfait, tel que pour le $i^{\text{ème}}$ bras de l'onduleur ($i = a, b, c$) :

- ◆ $S_i = 1$ si l'interrupteur en haut est fermé et l'interrupteur en bas est ouvert ;
- ◆ $S_i = 0$ si l'interrupteur en haut est ouvert et l'interrupteur en bas est fermé ;

Le courant d'entrée de l'onduleur est donné par:

$$i_e = S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c \quad (\text{III.23})$$

III.3.1. Modulation de largeur d'impulsion

Les grandeurs de sortie des commandes analogiques ou numériques de l'onduleur servent à obtenir les tensions ou courants désirés. La technique de modulation de largeur d'impulsions (M.L.I.) permet de reconstituer ces grandeurs à partir d'une source à fréquence fixe et tension fixe (en général une tension continue) par l'intermédiaire d'un convertisseur direct.

Celui-ci réalise les liaisons électriques entre la source et la charge. Le réglage est effectué par les durées d'ouverture et de fermeture des interrupteurs et par les séquences de fonctionnement.

Dans la majorité des cas, l'onde idéale est sinusoïdale. La M.L.I. permet de se rapprocher du signal désiré et de faire varier la valeur de la fondamentale de la tension de sortie, elle repousse les harmoniques de la tension de sortie vers les fréquences les plus élevées ce qui facilite le filtrage. Cependant, cette technique est imparfaite. Le contenu harmonique généré par une onde M.L.I. entraîne des pertes dans le réseau (pertes fer dans le transformateur, pertes Joule dans la ligne et le convertisseur), dans la charge (pertes Joule, fer et par courant de Foucault).

III.3.2 Commande de l'onduleur par MLI

L'objectif de la commande est de générer les ordres d'ouverture et de fermeture des interrupteurs de sorte que la tension créée par l'onduleur soit la plus proche de la tension de référence. Cette méthode basée sur la MLI met en œuvre d'abord un régulateur qui, à partir de l'écart entre le courant et sa référence, détermine la tension de référence de l'onduleur (modulatrice). Cette dernière est ensuite comparée avec un signal en dent de scie à fréquence élevée (porteuse). La sortie du comparateur fournit l'ordre de commande des interrupteurs.

III.4. Configuration du circuit de réglage

Théoriquement, L'UPFC devrait être traité comme un système multivariable car les deux convertisseurs série et shunt sont connectés d'un côté à la ligne de transmission et l'autre côté au circuit continu DC et donc comportent chacun deux entrées et deux sorties. Ce pendant pour faciliter la synthèse des réglages, le traitement des deux convertisseurs se fera séparément [19].

La possibilité de cette séparation est justifiée par deux facteurs principaux. Premièrement, le couplage entre les deux convertisseurs sur la ligne de transmission est assez faible. Deuxièmement, la variation dynamique de la tension du côté du continu DC est dominée par le convertisseur parallèle. Ceci est justifié par le fait que la variation de la tension du côté DC est beaucoup moins sensible au contrôle

du convertisseur série, pour cela, du point de vue dynamique, le convertisseur série peut être vu comme une source de tension pure dans le système de transmission.

Le contrôle du convertisseur parallèle dans l'UPFC est très similaire à celui du compensateur SVC. Donc pour contrôler le flux de puissance active dans la ligne de transmission, le régulateur de l'UPFC série doit ajuster l'angle de la phase de la tension de compensation V_c tandis que pour régler le flux de puissance réactive, l'amplitude de la tension injectée série doit être contrôlée.

La figure (III.6) illustre le mode choisi pour la branche série ainsi que pour la branche shunt. L'idée du schéma de contrôle se déduit du système d'équations (III.6) et (III.11).

Les entrées sont les composantes d-q des tensions à la sortie des branches série ou shunt et les sorties sont les composantes d-q des courants de ligne de transport I_d et I_q . Les références des courants de ligne sont dérivées des références de puissance active et réactive et les tensions de bus infini AC mesurés.

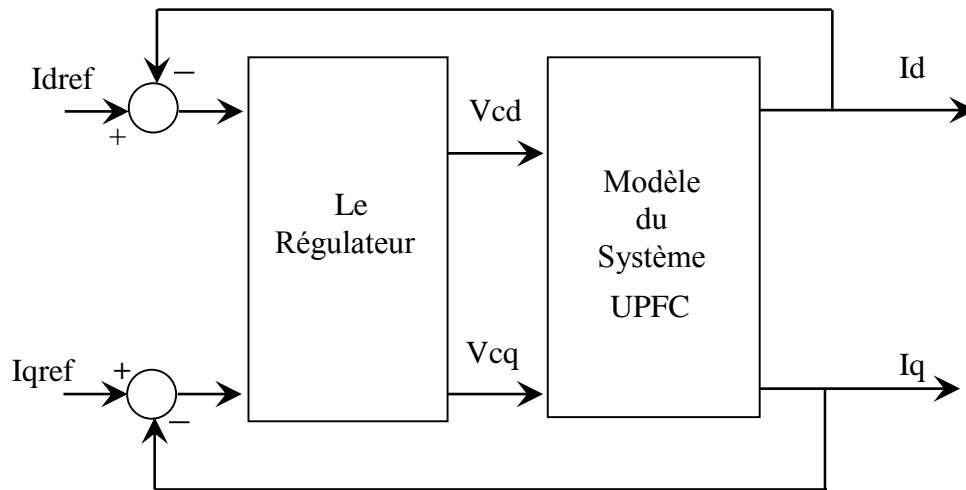


Figure (III.5) : Schéma de contrôle de l'UPFC

Pour assurer la stabilité du système, une chaîne de contrôle est implémentée avec le contrôle **PI**.

- Contrôle de la branche série
- Contrôle de la branche parallèle et la partie continue.

III.4.1. Description du système de commande de l'UPFC série

Les puissances actives et réactives P et Q , sont donnés par les équations (III.10) et (III.11)

$$P = \frac{3}{2} (V_{sd} \cdot i_{sd} + V_{sq} \cdot i_{sq}) \quad (III.24)$$

$$Q = \frac{3}{2} (V_{sd} \cdot i_{sq} - V_{sq} \cdot i_{sd}) \quad (III.25)$$

Où

$$i_{rd} = i_{sd} + i_{pd} \quad (III.26)$$

$$i_{rq} = i_{sq} + i_{pq} \tag{III.27}$$

Les puissances de référence active et réactive P^* et Q^* des puissances réelles désirées P et Q sont utilisées comme entrée au système de commande de l'UPFC.

A partir des équations (III.16) et (III.17), les courants de référence i_{sd}^* et i_{sq}^* peuvent être calculés comme suit:

$$i_d^* = \frac{2}{3} \left(\frac{P^* \cdot V_{sd} - Q^* \cdot V_{sq}}{\Delta} \right) \tag{III.28}$$

$$i_q^* = \frac{2}{3} \left(\frac{P^* \cdot V_{sq} + Q^* \cdot V_{sd}}{\Delta} \right) \tag{III.29}$$

Où

$$\Delta = V_{sd}^2 + V_{sq}^2 \tag{III.30}$$

III.4.2. Les schémas de contrôle du système UPFC

III.4.2.1. Le Schéma de contrôle de la branche série

Les courants de référence I_{rdref} et I_{rqref} sont calculés suivant les équations (III.28) et (III.29). Ces valeurs de référence I_{rdref} et I_{rqref} sont ensuite comparées aux courants de ligne réels du récepteur. Les sorties des correcteurs PI en courants fournissent les valeurs des tensions de commandes V_{cd} et V_{cq} figure III 6.

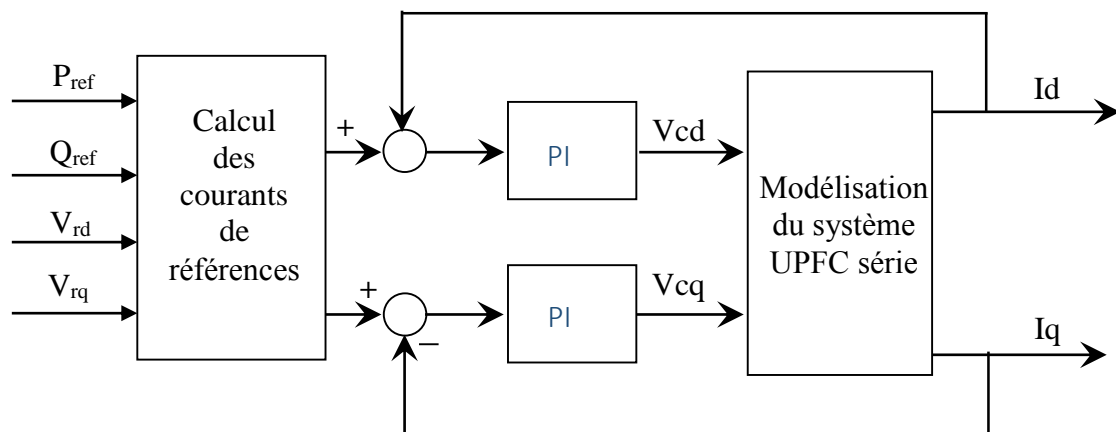


Figure (III.6) : Schéma de contrôle de la branche série de l'UPFC

III.4.2.2. Le schéma de contrôle de la branche shunt et la branche continue de l’UPFC

Le schéma de contrôle de l’UPFC shunt détermine les courants shunts I_{pd} et I_{pq} . Les courants de référence de la branche shunt sont déterminés à partir des puissances de référence et les tensions mesurées du côté du réseau. Le schéma de contrôle de l’UPFC shunt est présenté sur la figure (III 7).

Dans le contrôleur shunt la tension continue DC est utilisée pour déterminer la composante des pertes de puissance P_{loss} .

Les pertes de puissance P_{loss} et la référence de puissance de côté du récepteur P_{ref} ensemble avec la référence de puissance réactive du côté du réseau Q_{ref} sont utilisées pour calculer les courants du côté du réseau $I_{sd\ ref}$ et $I_{sq\ ref}$. Les courants de référence de l’UPFC shunt $I_{pd\ ref}$ et $I_{pq\ ref}$ sont alors déterminés par les courants de référence du côté du récepteur en arrangeant les équations (III 26) et (III 27). L’erreur entre le courant de référence I_{ref} et le courant I_p et ensuite utilisé par deux contrôleurs PI pour produire les signaux V_{pd} et V_{pq} .

En utilisant ces signaux de référence pour l’onduleur shunt, il est possible de contrôler le courant I_p .

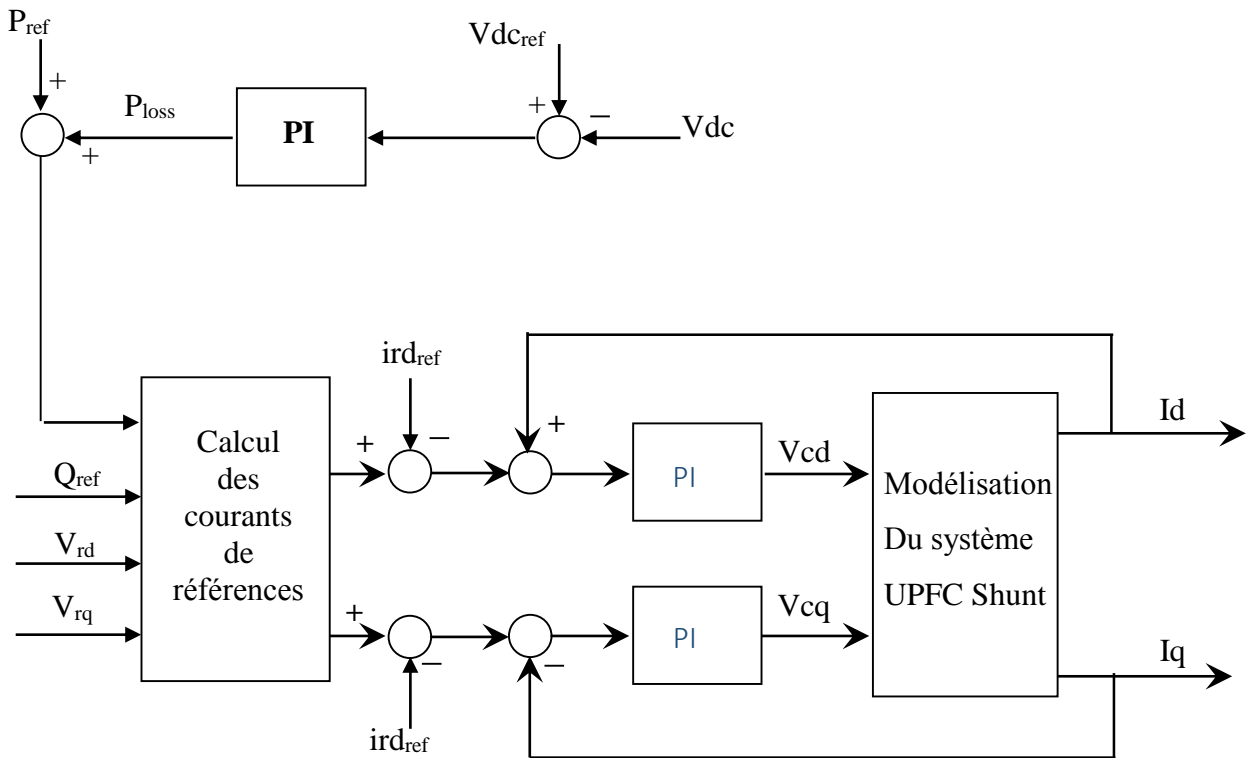


Figure (III.7) : Schéma de contrôle de la branche shunt et la branche continue de l’UPFC

III.4.3. Les schémas de contrôle avec régulateur PI-Découplé

D'après le système d'équation (III.6) ou (III.11), on peut voir que le système contient un couplage entre les courants actifs I_d et réactif I_q . L'interaction entre les boucles de courant est causée par le terme $(\omega \cdot i)$. Cela explique la déviation de la puissance réactive par rapport à la référence. Pour réduire l'interaction entre la puissance active et réactive, un découplage des deux boucles de courants est nécessaire. La fonction de découplage est de soustraire le produit de ωL et I_q du contrôleur selon l'axe d et d'ajouter le produit de terme ωL et I_d au contrôleur selon l'axe q.

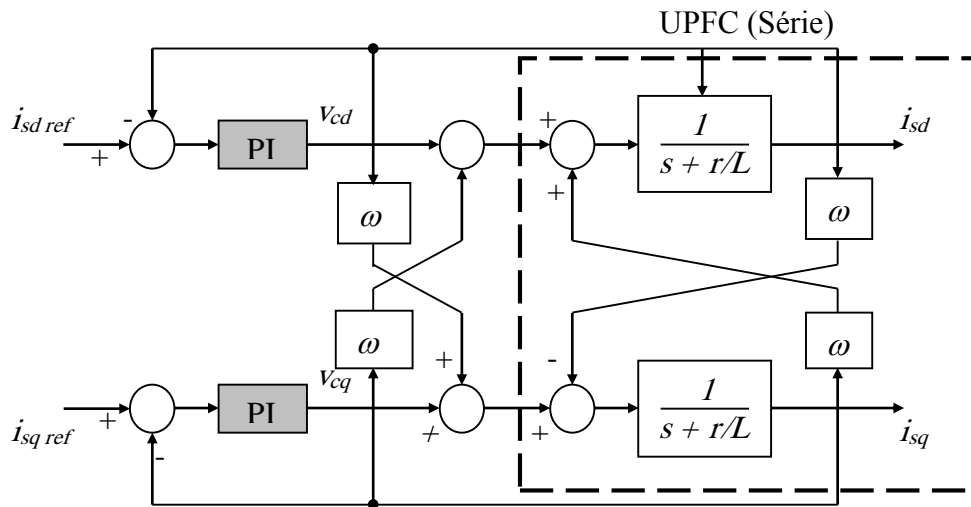


Figure (III.8) : Commande PI-Découplé de l'UPFC série

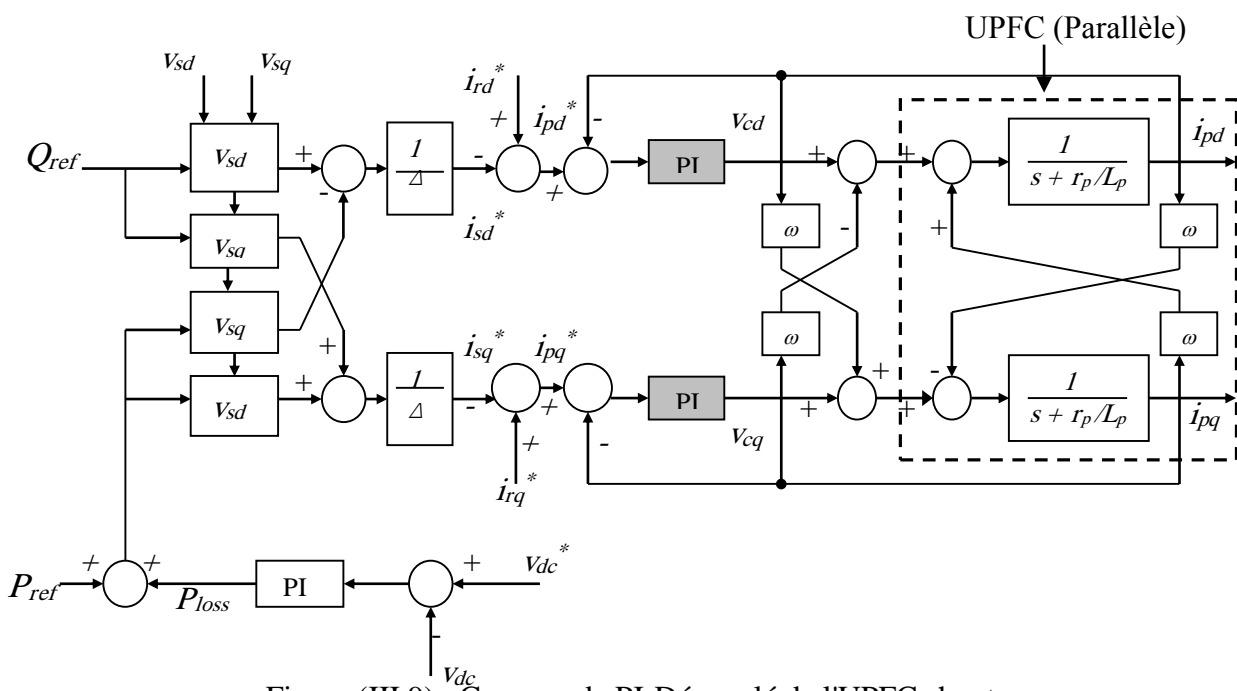


Figure (III.9) : Commande PI-Découplé de l'UPFC shunt

III.5. Structure et choix des paramètres de régulateur PI

La structure du correcteur PI est représentée par le schéma bloc de la figure suivante :

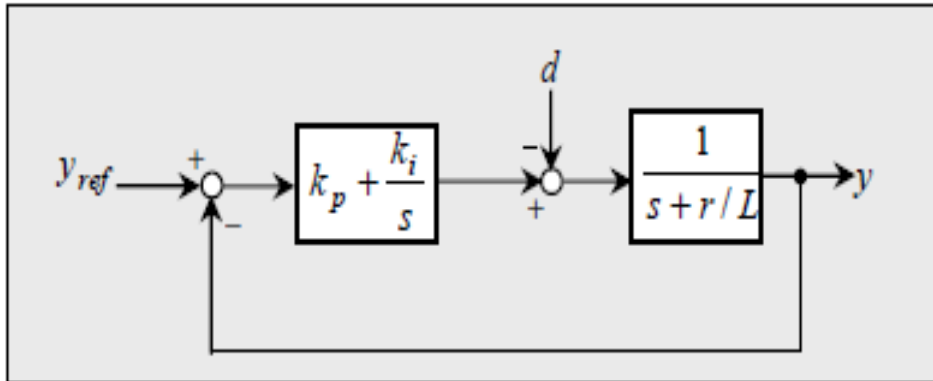


Figure (III.10) : Structure de réglage de type PI

Il existe différentes techniques d'ajustements bien adaptés au régulateur PI. Il existe deux approches empiriques bien connues proposées par *Ziegler* et *Nichols*, pour la détermination des paramètres optimaux du régulateur PI [18].

La méthode de Ziegler-Nichols, utilisée dans cette présente thèse, est basée sur un essai conduit en boucle fermée avec un simple régulateur proportionnel analogique. Le gain K_p de ce régulateur est graduellement augmenté jusqu'à la limite de stabilité, ce qui se manifeste par un régime permanent oscillatoire.

Sur la base des résultats ainsi obtenus, les paramètres du régulateur PI analogique sont donnés par la fonction de transfert suivante :

$$K(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (\text{III.31})$$

Par conséquent, l'introduction d'une condition simple $k_i = (r/L).k_p$

On obtient la fonction de transfert sous la forme $F(s) = k_p / (k_p + s)$ qui est de premier ordre avec une constante de temps $T = 1/k_p$.

D'où

$$F(s) = \frac{1}{1 + s.T} \quad (\text{III.32})$$

Ainsi, la détermination de la constante de temps dépend des changements admissibles maximaux des grandeurs de contrôle V_{cd} et V_{cq} pour le contrôleur série et de même pour le convertisseur shunt.

Donc d'après la méthode de Ziegler- Nichols, le gain critique K_{pc} et la période T_c des oscillations sont mesurés d'après le choix du tableau comme suit :

$$K_p = 0,45 K_{pc} \quad \text{et} \quad T_i = 0,83 T_c$$

Comme on l'a montré à la figure III.6, l'onduleur shunt et l'onduleur série sont liés au circuit intermédiaire à tension continue. Ils travaillent donc avec la même tension continue V_{dc} . On rappelle que cette dernière est réglée par l'intermédiaire de l'onduleur shunt.

L'onduleur shunt est capable de fournir aussi bien de la puissance active à l'onduleur série que de la puissance réactive au système d'alimentation.

La figure.III.11, illustre le schéma qui montre la puissance active à la fin de la ligne de transmission (départ) doit être fourni par le début de celle ci. Comme le montre la figure III.11, le contrôle de la tension continue V_{dc} est réalisé en utilisant un régulateur PI où la tension continue V_{dc} est comparée à sa tension de référence V_{dc}^* .

A la sortie du PI, les pertes de puissance P_{loss} sont ensuite ajoutées à la puissance de référence de départ P_s^* et avec la puissance réactive shunt de référence Q_p^* , les courants de référence shunt i_p^* d'arrivée et de départ sont déterminés.

Les tensions de commande des régulateurs série et parallèle génèrent les tensions de référence des onduleurs MLI série et shunt.

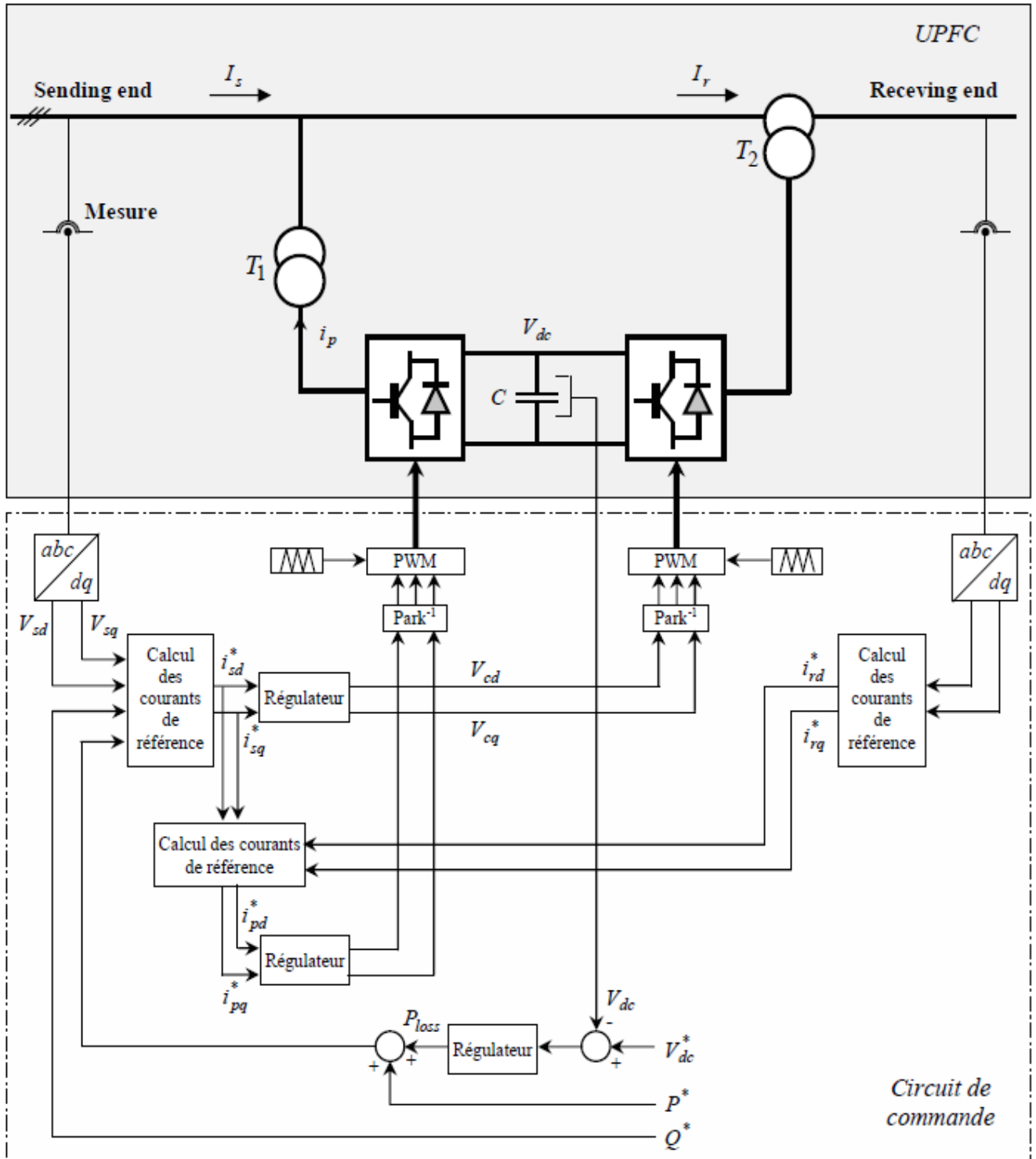


Figure (III.11) : Circuit de commande du système UPFC

III.6.conclusion

Dans ce chapitre nous avons d'abord montré la structure de base et nous avons pu présenter et définir la plupart des éléments constituant la structure générale d'un UPFC, nous avons développé le modèle mathématique du dispositif connecté au réseau de transport d'énergie électrique, la modélisation de l'onduleur puis nous avons vu ses différentes commandes et les paramètres qui caractérise le régulateur classique PI et son influence sur les puissances active et réactive qui transitent dans la ligne de transport, ensuite nous avons pris la méthode basée sur la MLI pour le contrôle des deux onduleurs de l'UPFC qui nous a permis de faire la simulation de ce système par logiciel Matlab / SUMILINK dans le prochain chapitre.

Chapitre IV

Résultats de simulation

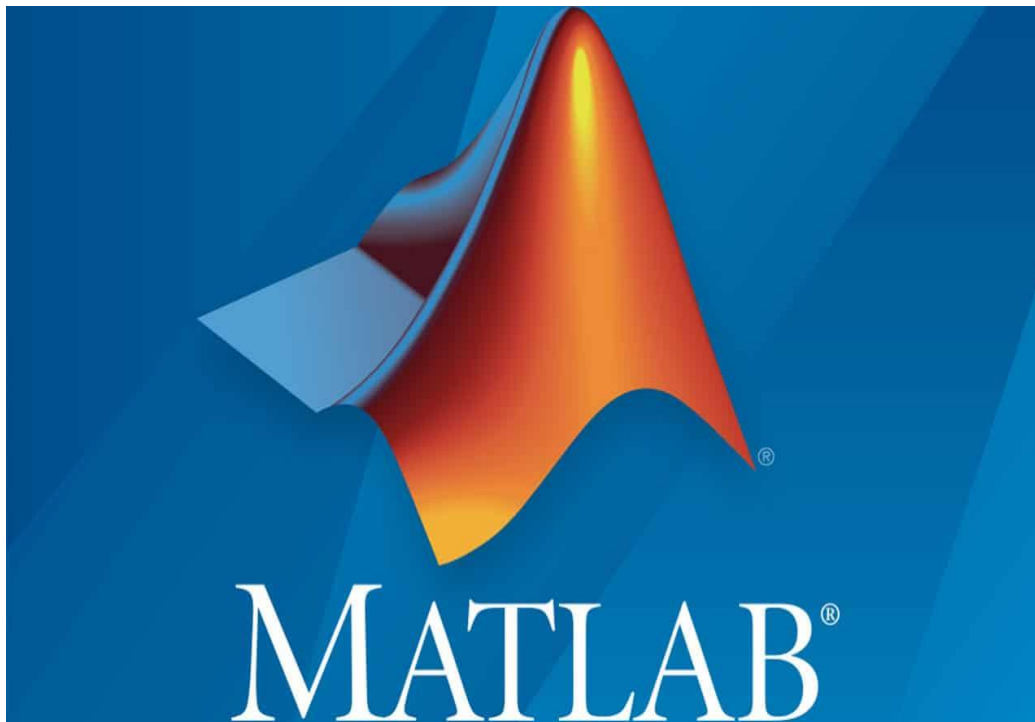
IV.1. Résultats de simulation:

IV.1.1 Paramètres du modèle UPFC :

Les paramètres du modèle UPFC de la simulation sont donnés comme suite [19]:

- Tension du réseau : $V_s = 220V$
- Tension du récepteur : $V_r = 220V$
- Tension continu : $V_{dc} = 280V$
- Fréquence du réseau : 50 HZ
- La résistance de la ligne : $r = 0.8\Omega$
- L'inductance de la ligne : $L = 10 \text{ mH}$
- Les chutes de tension du compensateur parallèle : $r_p = 0.4\Omega$
- L'inductance de fuite du transformateur parallèle : $L_p = 10 \text{ mH}$
- La capacité du circuit commun DC : $C = 2000 \mu F$

On peut maintenant simuler le comportement de notre système muni de son régulateur de puissances active et réactive. Cela a été réalisé avec l'outil MATLAB /SIMULINK [20].



La simulation est établie selon le procédé de la commande à MLI.

Cette simulation comporte un changement de la puissance active au moment où la puissance réactive passe de -500 VAR à +500 VAR (à l'instant $t = 0.35s$), et un changement de la puissance réactive au moment où la puissance active passe de -1000 W à +1000 W (à l'instant $t = 0.75s$).

Sous forme d'un échelon initialement le système est dans l'état constant avec une puissance active à l'arrivée de la ligne de transmission égale à -1000 W, et une puissance réactive égale à -500 VAR.

IV.1.2. simulation PI-D :

En réglant les paramètres du régulateur PI de l'UPFC on donne :

Les variations des courants de référence I_{ds} et I_{qs} représentées dans la figure(IV.1)

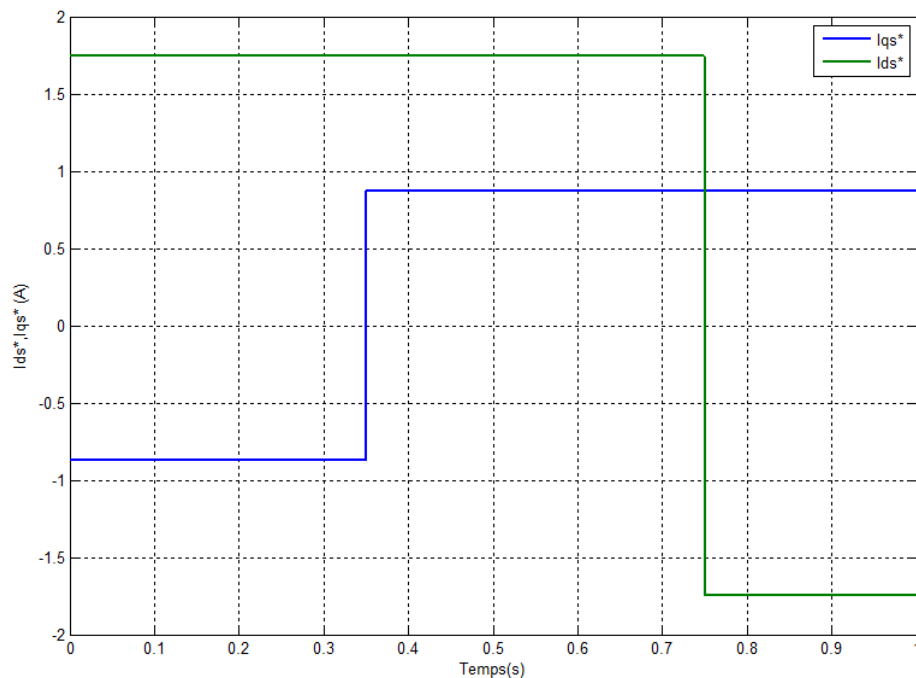


Figure (IV.1) : Le courants de référence I_{ds}^* I_{qs}^*

Les graphes de la figure (IV.2) et la figure (IV.3) il montre des changements des courants I_{ds} et I_{qs} .

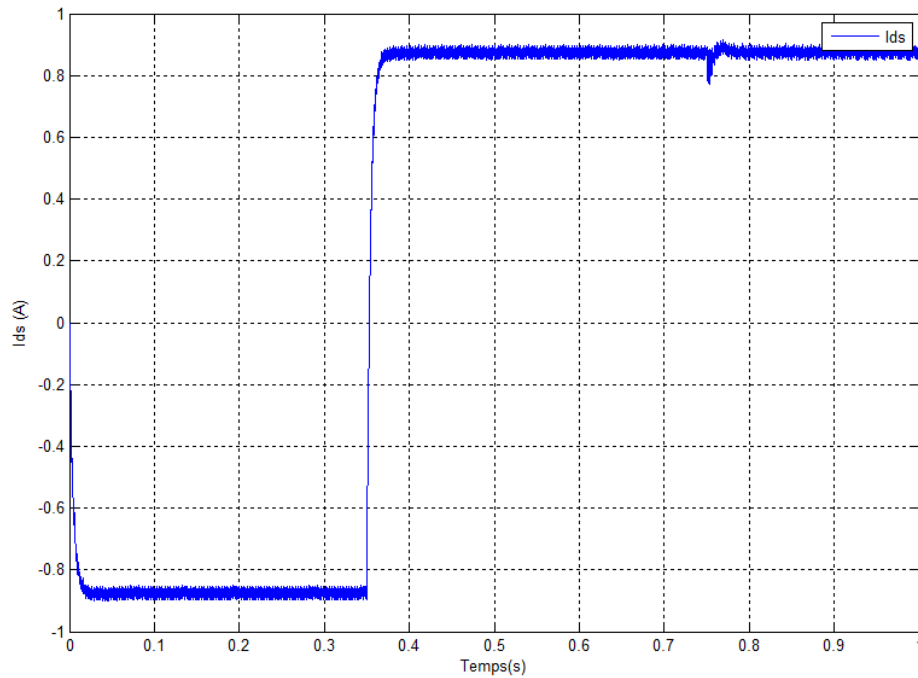


Figure (IV.2) : Le courants I_{ds}

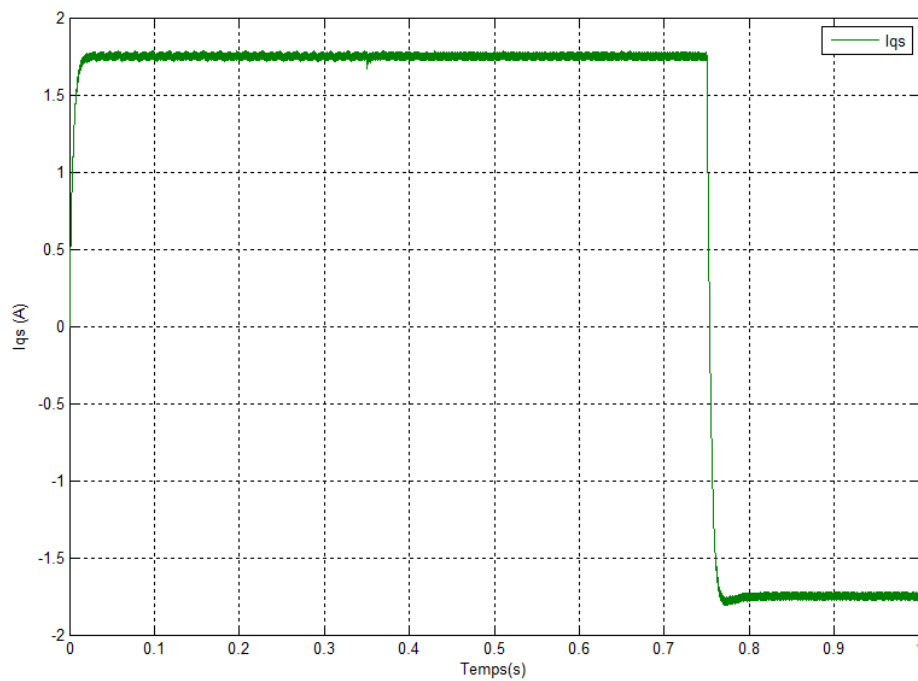


Figure (IV.3) : Le courants I_{qs}

Voir à travers les courbes des figures (IV.4) et (IV.5) qu'il y a une différence entre les variations des courants I_{ds} et I_{qs} et des courants de référence I_{ds}^* et I_{qs}^* avec légère perturbation à cause des interrupteurs de l'onduleur.

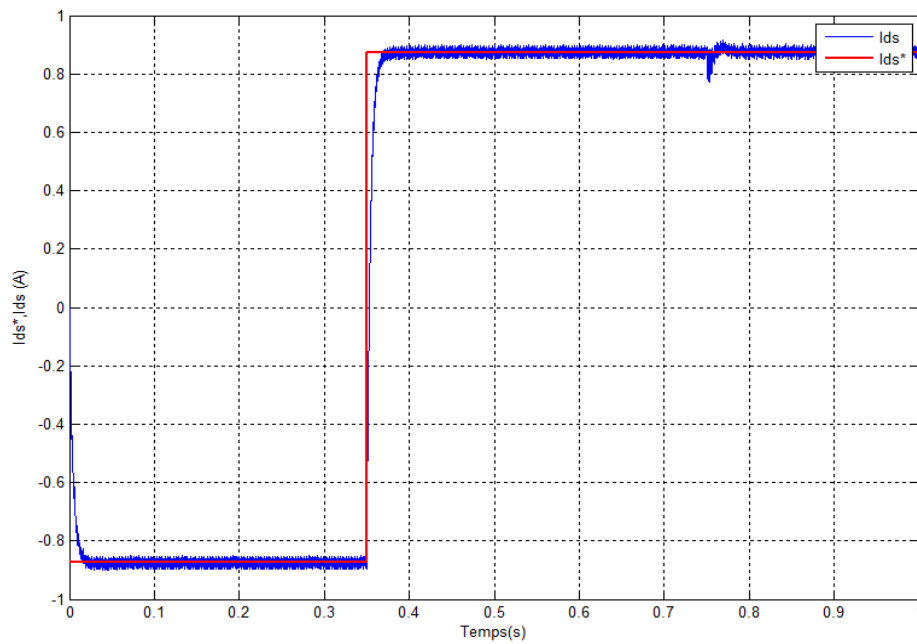


Figure (IV.4.) : les allures des courants I_{ds} et I_{ds}^*

La figure (IV.5) représente les allures des courants I_{qs} et I_{qs}^* :

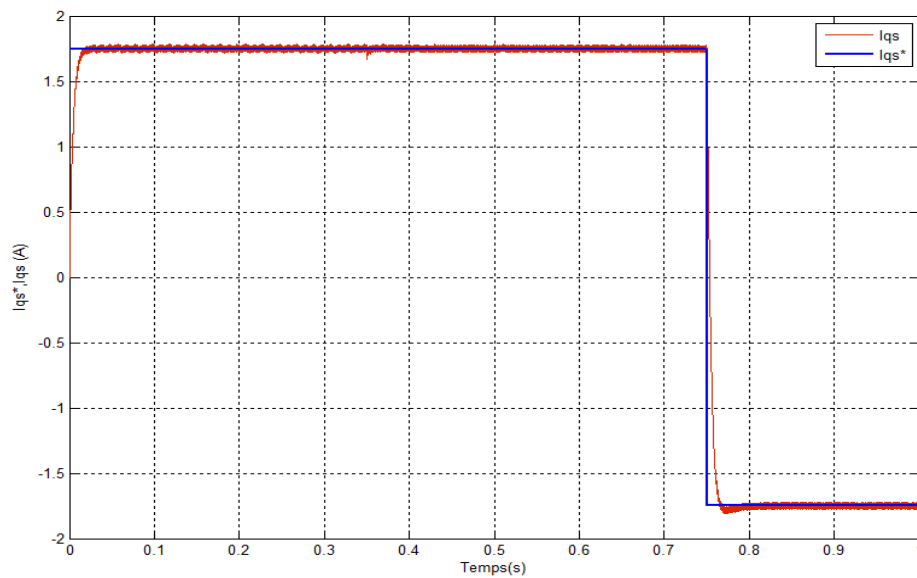
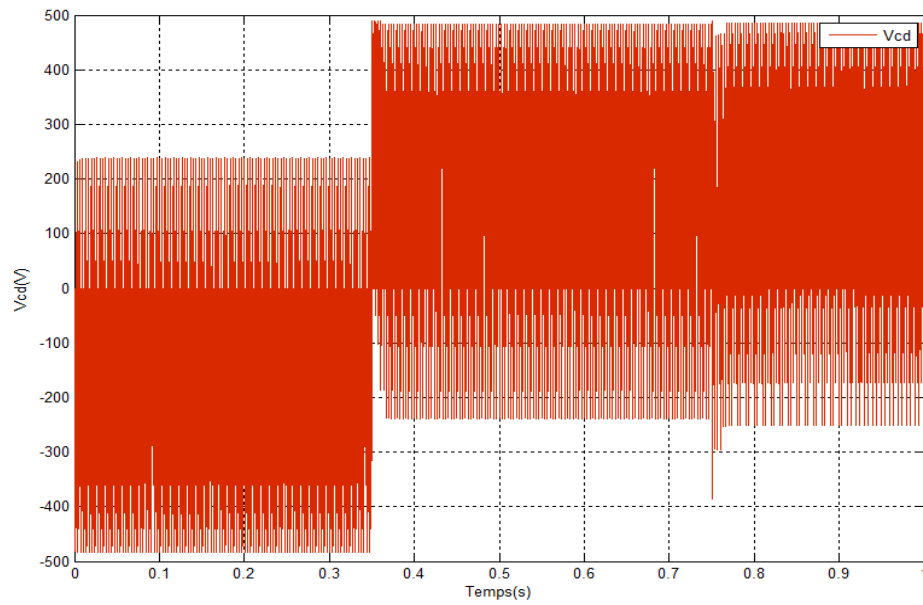


Figure (IV.5) : les allures des courants I_{qs} et I_{qs}^*

Les deux composants V_{dc} et V_{qc} dans les tensions représentées par les figures (IV.6) et (IV.7) :



Figure(IV.6):Signale de tension V_{cd}

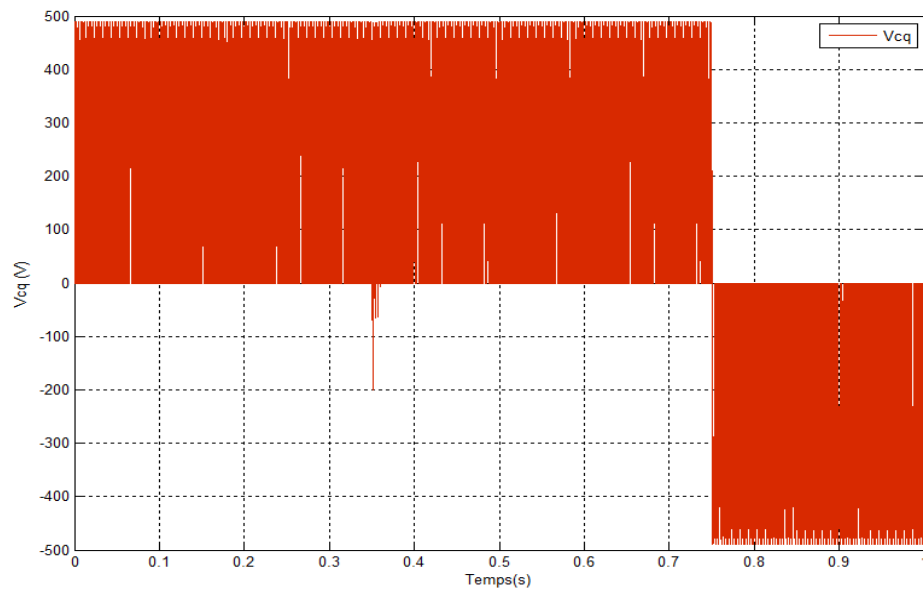


Figure (IV.7):Signale de tension V_{cq}

Les variations des puissances actives et réactives avec les référence des puissances (p & p^*) et (Q & Q^*) représentées dans les figures (IV.8), (IV.9):

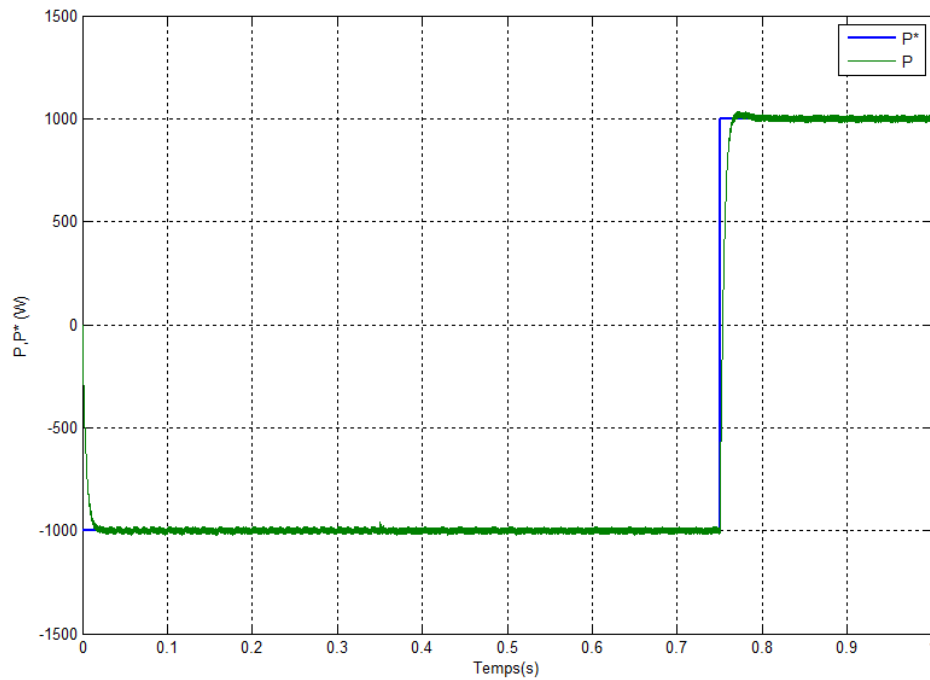


Figure (IV.8): La puissance active de référence P^* et la puissance active P

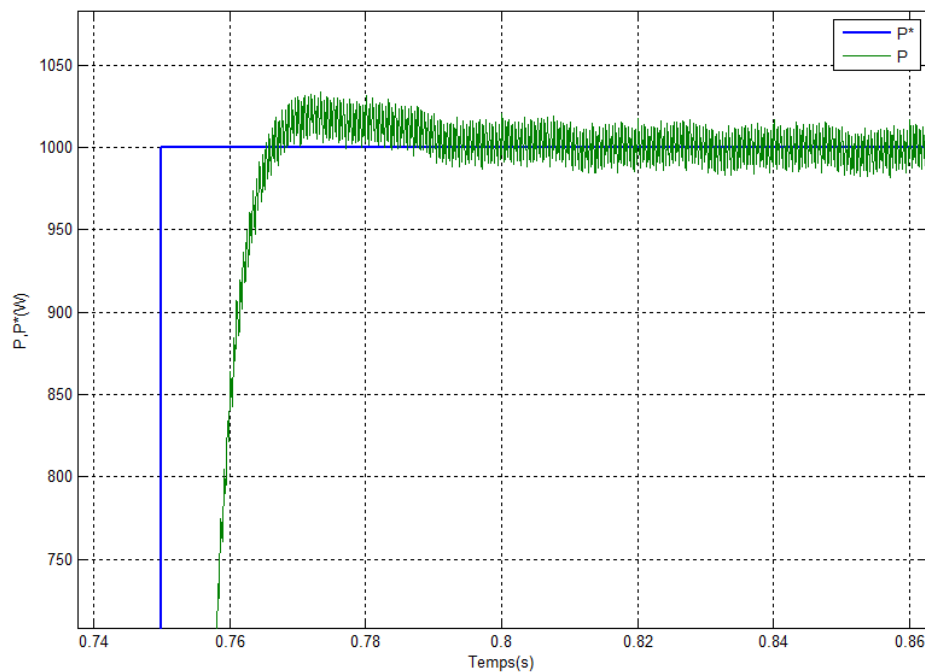


Figure (IV.9) : Zoom de la puissance active à $t=0.75s$

Cette figure montre que le contrôleur PI joue un rôle très important pour la poursuite de la référence avec un temps de réponse égale à 0.015s.

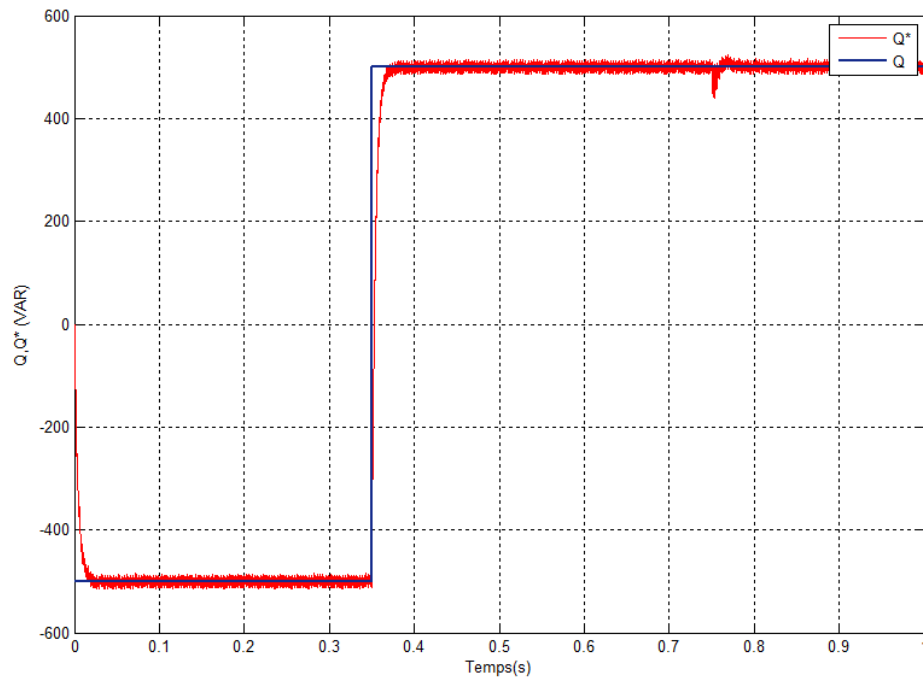


Figure (IV.10): La puissance réactive de référence Q^* et la puissance réactive Q

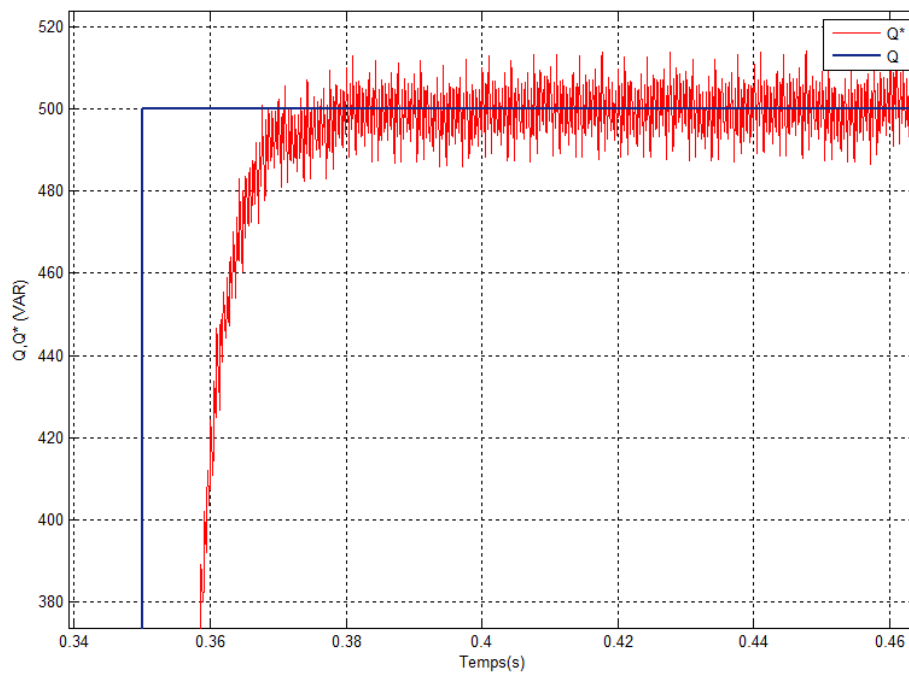


Figure (IV.11) : Zoom de la puissance réactive à $t=0.35$ s

De même comme la puissance active et réactive on a une poursuite de la référence à un temps égale à 0.015s.

Les allures des puissances actives et réactive résultantes se traduisent dans la figure suivant :

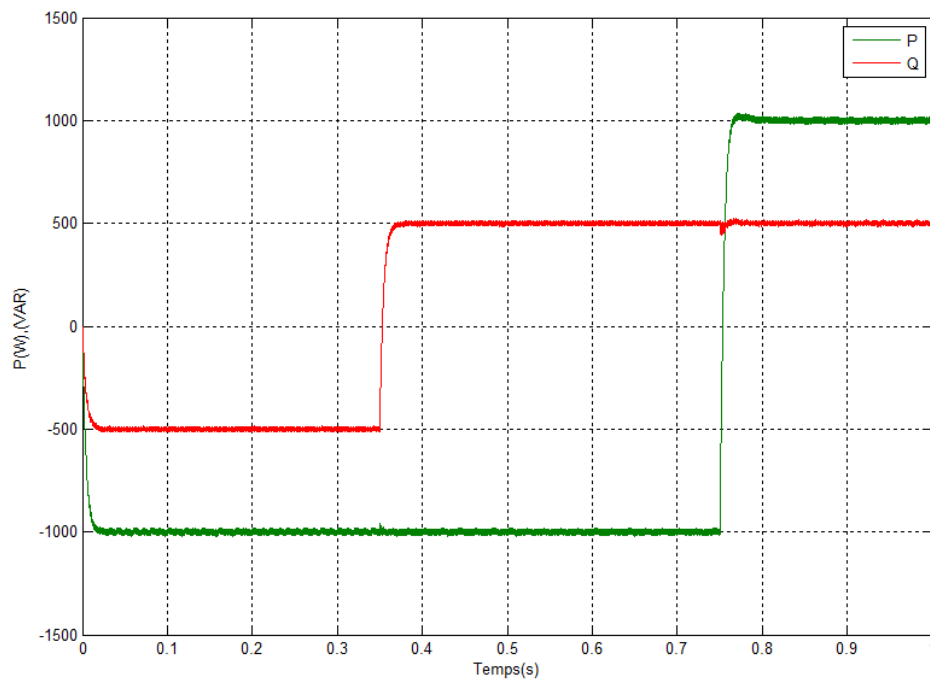


Figure (IV.12):La puissance active P et réactive Q

D'après ces allures on remarque une légère perturbation puissance active et réactive qu'est résultat de l'interaction entre deux les puissances ce qu'est le même pour les courants I_{ds} et I_{qs} .

IV.1.3.Erreur d'estimation :

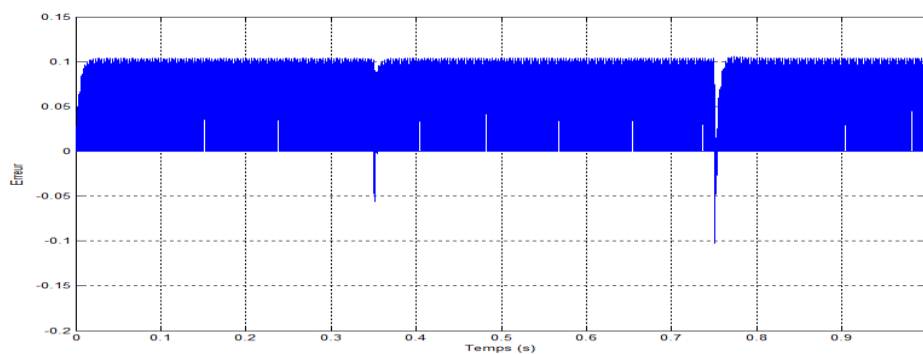


Figure (IV.13) : erreur d'estimation

IV.1.4. Test de stabilité :

Pour tester la stabilité du l'UPFC, cette fois-ci on a été simulé le système en introduisant une perturbation de durée 25ms et d'amplitude 1,5 à l'instant 0.85s.

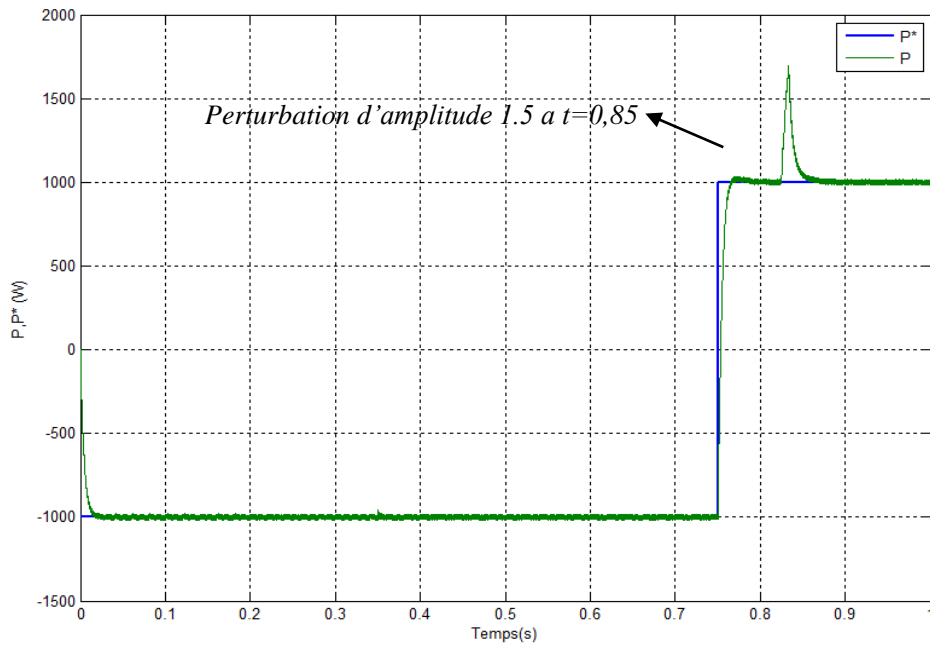


Figure (IV.14) : Les puissances active P^* et P avec une perturbation

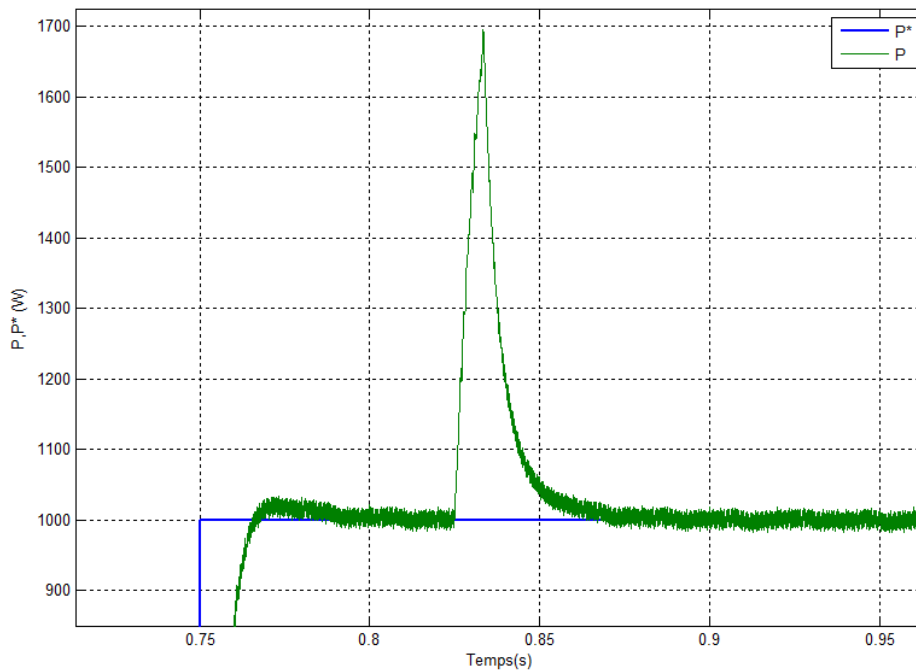


Figure (IV.15) : Zoom sur la perturbation

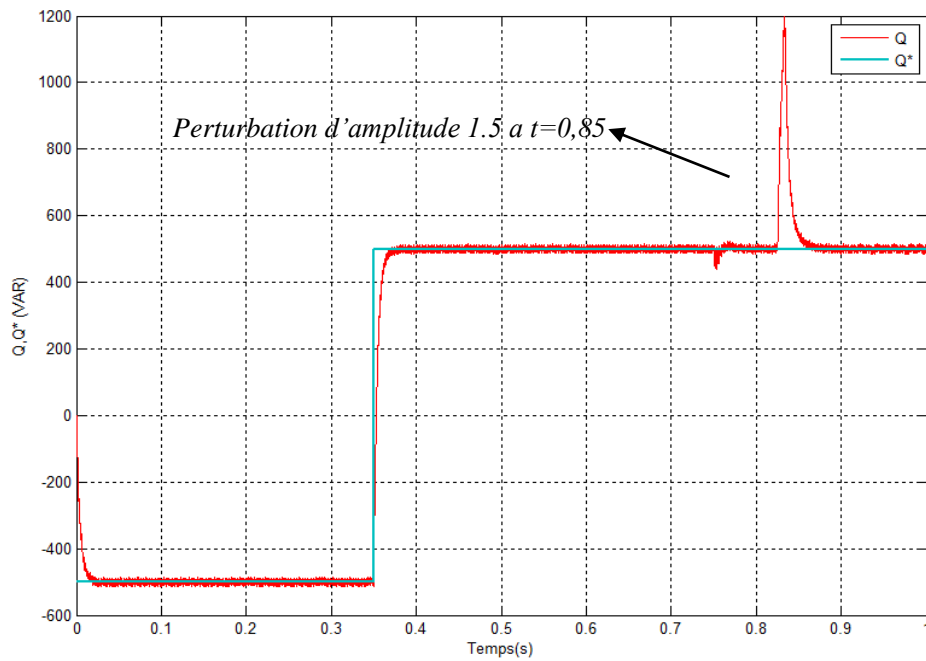
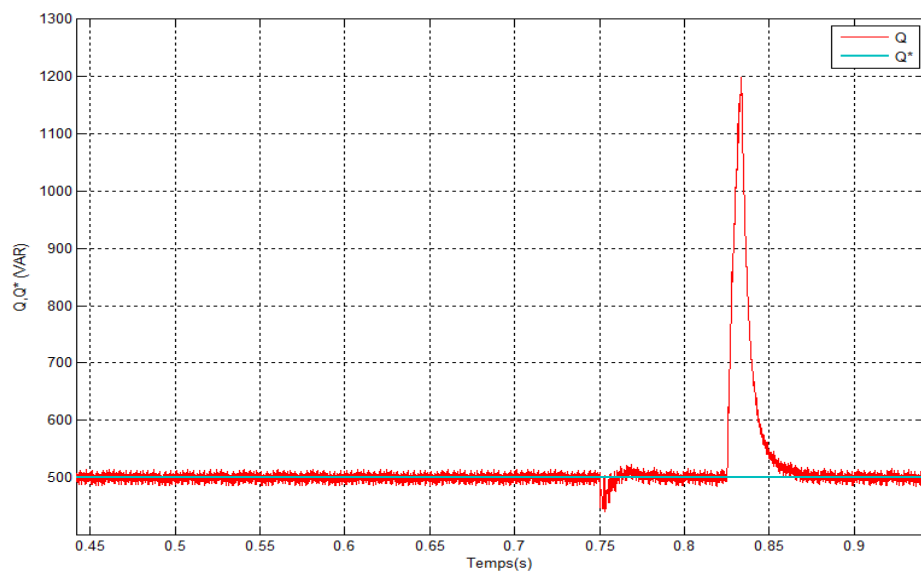


Figure (IV.16) : Les puissances réactive Q^* et Q avec une perturbation



(IV.17) : Zoom sur la perturbation

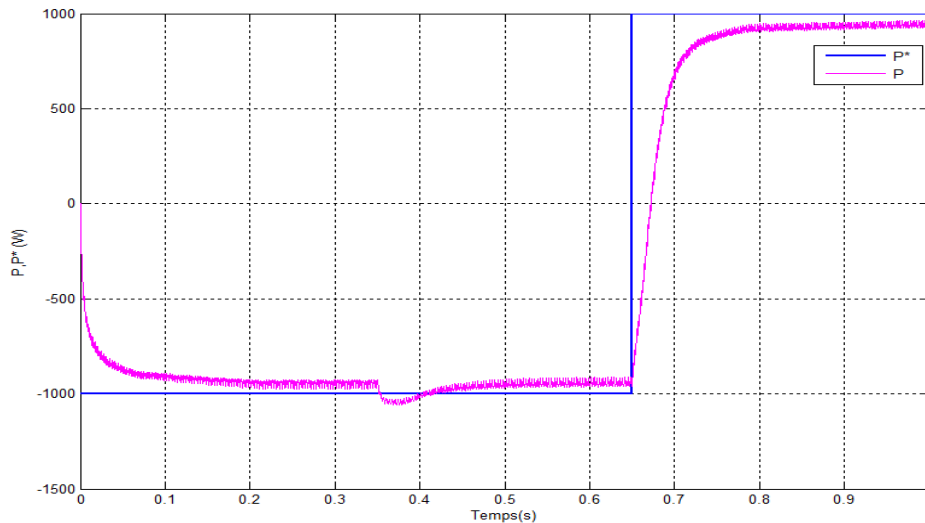
Figure

On constate dans les figures (IV.14) et (IV.16) et leurs zooms que notre système perde leur poursuite de référence à l'instant $t=0,85s$ à cause de la perturbation brusque. Donc le régulateur PI-D fait un effort pour rendre le signal à la référence dans un temps très court.

IV.1.5. Test de robustesse

Pour tester la robustesse de notre système on varie la réactance de la ligne X_l à $\pm 35\%$ de sa valeur nominale.

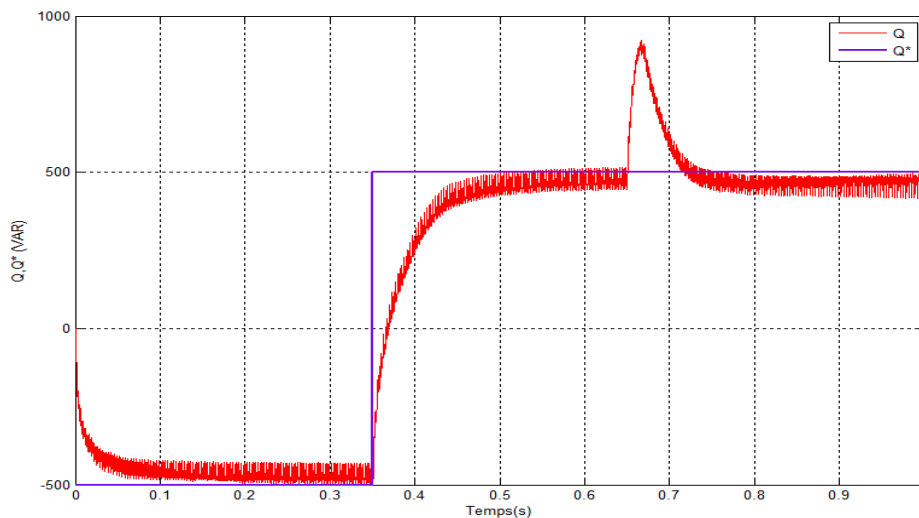
Les variations sur la puissance active P_{X_l} à $\pm 35\%$ de (PI-D) on donne d'allure suivant :



Figure

(IV.18) : Les puissances active P^* et P avec test de robustesse

Les variations sur la puissance réactive P_{X_l} à $\pm 35\%$ de (PI-D) on donne d'allure suivant :



Figure

(IV.19) : Les puissances réactive Q^* et Q avec test de robustesse

On trouve une dégradation des deux puissances active et réactive dans les courbes qui sont apparues sous les figures (IV.18) et (IV.19), Cette détérioration conduit à la perte de stabilité donc notre régulateur classique il est besoin d'un aide comme une commande pour garder la stabilité de système.

IV.2. Conclusion :

L'analyse de ces résultats, nous permet aussi de conclure sur l'utilisation de la modélisation dans le repère des axes d-q qui améliore la réponse transitoire de l'UPFC et réduit l'interaction entre la puissance active et réactive. On peut dire que le contrôleur PI peut causer une large interaction entre les boucles de courant et un dépassement important au niveau des puissances. Pour réaliser un découplage parfait, il faut que les paramètres de la ligne soient connus donc d'après les résultats de simulation, on conclut que le contrôleur PI-D à une large interaction et un temps de réponse courte et rapide. Mais d'après les tests (stabilité et robustesse) notre contrôleur pourrait être la commande idéale pour le système UPFC si les variations de l'inductance X_L n'ont pas affectés ses performances.

Conclusion

Générale

Conclusion générale

L'industrie de l'énergie électrique a subi des changements profonds, suite aux différents bouleversements politiques et économiques de plusieurs pays dans le monde. Ce nouvel environnement du marché de l'électricité, a mis en évidence une clientèle plus importante et plus exigeante vis-à-vis du fonctionnement des réseaux à travers la flexibilité de leur contrôle et la qualité de l'énergie offerte sur le marché

Alors que l'appel de puissance continue à croître, il devient de plus en plus difficile d'obtenir des droits de passage pour construire de nouvelles lignes de transport et de distribution. Pour ces raisons, les compagnies d'électricité cherchent à augmenter la puissance que peuvent transporter les lignes existantes, sans pour autant compromettre leur stabilité. Idéalement, on aimerait les charger à la limite de la capacité thermique des conducteurs, et utiliser toutes les lignes pour porter la charge électrique. Un des problèmes majeurs est qu'une contingence (court-circuit, ouverture intempestive d'une artère, etc.) Peut déstabiliser un grand réseau en moins d'une seconde. Par conséquent, des disjoncteurs doivent s'ouvrir rapidement afin de limiter les dégâts.

L'étude de la stabilité des réseaux de transport d'énergie électrique constitue un sujet important pour la planification et l'exploitation des réseaux. La nécessité de la bonne gestion des transits de puissance et le besoin d'une conduite optimale des réseaux ont amené les chercheurs à développer de nouveaux moyens de réglage tels que les FACTS. La compensation série à base de thyristor propose des solutions fiables, flexibles, à coût d'investissement limité, avec un faible impact sur l'environnement et des délais d'installation courts à ces nouvelles problématiques des réseaux. Si aujourd'hui les FACTS sont encore peu utilisés par rapport à leur potentiel, les évolutions techniques de l'électronique de puissance vont rendre les solutions FACTS de plus en plus compétitives face aux renforcements traditionnels des réseaux.

Dans ce mémoire nous avons étudié l'UPFC pour améliorer la stabilité d'un réseau électrique (banc d'essai de base tension BT). L'UPFC est un compensateur qui est plus complet que les autres, grâce à sa caractéristique spéciale. En pratique, l'UPFC pourra être utilisé pour la gestion de l'énergie dans les réseaux électriques. Il est évident que l'utilisation de celui-ci en tant que régulateur de stabilité transitoire est une application secondaire, indépendante du rôle principal de l'UPFC

Conclusion générale

Différents réglages sont à prévoir pour ce type de compensateur. Après le développement d'un modèle mathématique de l'UPFC et son principe de fonctionnement, des réglages ont été mis en évidence à savoir un pour le courant triphasé (onduleurs parallèle et série) et l'autre pour la tension continue. Notre intérêt s'est porté sur le réglage des courants de chacun des deux onduleurs pour pouvoir gérer le flux de puissance entre deux nœuds distincts de la ligne de transmission d'un réseau d'énergie.

Pour la commande des onduleurs de tension, nous avons utilisé la commande MLI (Modulation à Largeur d'Impulsion). Nous avons étudié premièrement des régulateurs de type PI-D pour les deux parties de l'UPFC. Ces régulateurs donnent de bons résultats.

Comme perspectives, nous espérons fonder notre travail sur l'application de cette étude sur un système plus complexe, et évaluer les performances du dispositif (UPFC) dans le contrôle des puissances, des tensions et des courants par une commande et même pour un système multi machines réel. Et plus nous proposerons l'application d'autres méthodes de réglage pour le choix des emplacements des contrôleurs qui peuvent aborder la stabilité des réseaux électriques de grande dimension, ce qui est le cas de la majorité des problèmes de recherche.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] S. M. SADEGHZADEH, "Amélioration de la stabilité transitoire et de l'amortissement des oscillations d'un réseau électrique à l'aide de SMES et de SSSC". Thèse de doctorat de l'INPG Mars 1998.
- [2] E. GH. Sahraki "Apport de l'UPFC à l'Amélioration de La Stabilité Transitoire des Réseaux Electriques", Thèse de Doctorat Université de Henri Poincaré, Nancy-I, 13 Octobre 2003.
- [3] P. Kundur, et al. "Definition and Classification of Power System Stability," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 19, No. 2, pp.1387-1401, May 2004.
- [4] ALIBI Abdelali, "contrôle des réseaux électriques par les système FACTS (Flixible AC Transmission Système)" Thèse de Magister en électronique, Batna ,13-06-2009.
- [5] Martin Geidl, "Implementation of FACTS in an Interactive power flow simulator platform" Thesis PSL 0201 ZURICH, march 2003.
- [6] M.HAMADOU Zakaria, "Optimisation des paramètres d'un FACTS shunt pour l'amélioration de la stabilité transitoire d'un système électriques" Mémoire de Magister en Electronique-Sétif 1, 20 juin 2012.
- [7] P.Petit Claire, "modélisation et commande de structure FACTS, Application Statcom". Thèse de doctorat de L'NPG 1997.
- [8] J. C. PASSELERGUE, "Interaction des dispositifs FACTS dans les grands réseaux électriques".Thèse de doctorat de L'INPG, 1998.
- [9] Xiao-Ping Zhang, Christian Rehtanz, Bikash Pal, "Flexible AC Transmission systems: Modelling and Control", Springer 2005.
- [10] Manish Thakur, "Unified power flow controller (UPFC) development of mathematical framework and design of a transient model", Thèse de magistère de l'université de Manitoba – Canada, février 2003.
- [11] Azara Hasanovic, 'Modelling and control of the unified power controller (UPFC).' Morgan town , west Virginia 2000.
- [12] K. BELACHEHEB, "Contribution à l'étude des systèmes de compensation FACTS en général, UPFC en particulier, pour le contrôle du transit de puissance dans un réseau de transport".Thèse de doctorat de l'université de Henri Poincaré Nancy – I, 2001.
- [13] L. Gyugyi , C .D.schauder , S .L Wiliams , T . R . Rieteman , D.R . Torgerson and A .Idris. "The unified power flow controller: A new approach to power transmission control."IEEE Trans. On Power Delivery,10(2),pp.1085-1097. 1995

Bibliographie

- [14] S. zebirete, “Réglage multi variable d’une UPFC pour la compensation des puissances active et réactive.” thèse de magister .ENSET 2002.
- [15] L. K .Bouleriel ‘Etude et simulation d’une commande du contrôleur électronique d’écoulement de puissance unifié (UPFC).’ thèse de magister .USTO 2003.
- [16] D. Menniti, A. Pinarchi, U . De .Martinis. ‘Modelling of unified power flow controller into power systems using P-Space. ‘the international conference (IPST): 205-210 .2001 Italy.
- [17] Sorin G.’ Modélisation des systèmes électroniques de puissance à commande MLI application aux actionnements électriques ’thèse de doctorat Université Louvain 2005.
- [18] H. Rasmussen. ‘Automatic tuning of PID – regulators.’ Dk 9290 Aalborg, Danemark Septembre 6, 2000.
- [19] A.Bouanane’Techniques de Commande Dynamiques par Réseaux Neurones d’un UPFC Appliqué au Contrôle des Puissances dans les Réseaux Electriques’ Thèse de doctorat de l’ENPOran 2013.
- [20] M. mokhtari, ‘Matlab 5,2 & 5,3 et Simulink 2&3 pour étudiants et ingénieurs.’ édition SPRINGER, 2000.