

LA REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE D'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE AMAR TELIDJI DE LAGHOAT

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE



MEMOIRE DE MASTER

DOMAINE : Technologie

FILIERE : Électronique

OPTION : Automatique et Informatique Industrielle

Thème

**Optimisation des paramètres des régulateurs par
l'algorithme génétique pour commander un UPFC**

Présenté Par :

BETAIMI MOHAMMED EL HACHIMI

Devant le Jury de soutenance composé de :

Nom et prénom	Grade	Qualité
<i>Mme. CHETTIH Saliha</i>	<i>Pr</i>	<i>président</i>
<i>Mr. BOUTOUBAT Mohamed</i>	<i>Pr</i>	<i>Examineur</i>
<i>Mr. DABBAGH Mazen</i>	<i>MC.B</i>	<i>Encadreur</i>

Promotion: 2020 -2021

ملخص:

تشكل دراسة استقرار نظام الطاقة موضوعًا مهمًا لتخطيط واستغلال نظام الطاقة. لقد أوضحنا في هذا المستند كيف يمكن استخدام معوض الطاقة التفاعلية لتحسين سلوك نظام الطاقة الخاطئ. تم إجراء دراسة على UPFC (وحدة تحكم تدفق الطاقة الموحدة). الموضوعات الأساسية التي تم تناولها هي الكفاءة من حيث تخميد تذبذبات الطاقة ، وزيادة وقت المقاصة الحرج والاعتماد على موقع المعدات. الكلمات المفتاحية: FACTS ، UPFC ، التحكم في الطاقة والجهد التفاعلي في نظام الطاقة ، نظام الطاقة

Résumé:

L'étude de la stabilité des réseaux électriques constitue un sujet important pour la Planification et l'exploitation des réseaux électrique, comme nous avons pu le constater tout le long de ce mémoire.

L'objectif de ce travail était de concevoir comment la compensation réactive peut être utilisée pour améliorer la stabilité d'un réseau électrique soumis à une perturbation.

Le FACTS utilisé au cours de ce travail est un dispositif de type hybride à savoir L'UPFC (Unified Power Flow Controller).

Les points essentiels mis à exergue sont l'efficacité de ce dispositif en termes d'amortissement des oscillations et d'augmentation du temps critique ainsi que leur influence sur le réseau lorsque ce dernier est placé proche de l'endroit perturbé.

Mots clés: FACTS, UPFC, stabilité d'un réseau électrique, réseau électrique.

Abstract:

The study of power system stability forms an important subject for the planification and exploitation of power system.

We have shown in this document how reactive power compensator can be used to improve the behavior of fault power system.

A study was carried out on the UPFC (Unified Power Flow Controller).

The essential topics dealt with are efficiency in terms of damping power oscillations, Increasing critical clearing time and the dependence of equipment location.

Keywords: FACTS, UPFC, Reactive Power and Voltage control in Power System, power system

Remerciements

Je remercie Dieu Tout-Puissant de m'avoir donné le courage, la volonté et la patience de faire ce travail actuel.

Je tiens à remercier M. Al-Dabbagh Mazen, qui a accepté de me superviser, et en particulier, je lui exprime ma gratitude pour m'avoir donné l'opportunité de bénéficier de ses compétences scientifiques, de ses caractéristiques humaines et de sa présence constante.

Je tiens également à remercier tous les enseignants de la Faculté des Sciences et Techniques, en particulier le Département d'Électronique de l'Université de Laghouat.

Enfin, je tiens à remercier ma famille et mes amis qui m'ont soutenu tout au long de mon parcours collégial, en particulier mon cher père.

DEDICACES

Dieu soit loué pour m'avoir donné la capacité d'écrire et de penser, la force d'y croire, la patience de continuer à rêver et le bonheur de lever les mains au ciel et de dire.

"O Qayyum"

Je dédie ce modeste ouvrage à celle qui m'a donné la vie, symbole de tendresse, qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite, pour ma chère maman...

À mon père, le professeur de mon enfance, qui a été mon ombre pendant toutes mes années d'école, qui m'a encouragé toute ma vie, m'a aidé et protégé. Dieu les bénisse et les garde.

- A mon compagnon et la prunelle de mes yeux, ma future femme, mon amour (Souad)*
- Mes frères et sœurs (Omar, Hamza, Mahmoud, Atika, Asma, Oussama, Ayoub...)*
- Toute ma famille.*
- tous les amis. (Ayoub, Mustapha, Taher, AbdelNour, Adel, Aymen, Fadi, Abdelkader, Amine, Abdellatif...)*
- À tous ceux que j'aime et ceux qui m'aiment.*
- Toutes catégories d'électronique 2021.*

BETAIMI.Mohammed.El Hachimi

Sommaire

Introduction Générale.....	1
I Chapitre I Les Systèmes FACTS	4
I.1 Introduction.....	5
I.2 Généralités sur les FACTS.....	6
I.3 Rôle des dispositifs FACTS.....	6
I.4 Les différents types des systèmes FACTS.....	7
I.4.1 Compensateur Parallèle.....	8
I.4.2 Compensateurs Séries	13
I.4.3 Compensateurs hybrides (série – parallèle)	16
I.5 Avantage technique des dispositifs FACTS.....	19
I.6 Conclusion	20
II Chapitre II Modélisation du Compensateur de Flux de Puissance (UPFC).....	21
II.1 Introduction.....	22
II.2 Structure de l'UPFC.....	22
II.3 Modélisation de l'UPFC	23
II.3.1 Calcul des puissances active et réactive instantanées de L'UPFC.....	27
II.3.2 Technique de la modulation de largeur d'impulsion onduleur simple.....	27
II.4 Description du convertisseur statique DC/AC (l'onduleur).....	28
II.5 Découplage par régulateur PI.....	29
II.6 Conclusion	32
III Chapitre III Commande Classique du Compensateur de Flux de Puissance UPFC ..	33
III.1 Introduction.....	34
III.2 Configuration du mode de réglage de l'UPFC.....	34
III.3 Description du système de commande de l'UPFC SERIE	35
III.4 Schéma de contrôle du système UPFC	36
III.4.1 Schéma de contrôle du système UPFC série.....	36
III.4.2 Schéma de contrôle du système UPFC Shunt	36
III.5 Contrôle avec un PI-Découplé.....	37

III.5.1	Calcul des Paramètres du Régulateur PI	38
III.6	Résultats de la Simulation.....	39
III.7	CONCLUSION	46
IV	Chapitre IV Commande RST	47
IV.1	Introduction.....	48
IV.2	Régulateurs numériques.....	49
IV.3	Présentation de la commande RST	49
IV.4	Les Avantages de régulateur RST.....	51
IV.5	Application.....	52
IV.6	Algorithmes génétiques.....	53
IV.7	Conclusion	57
	Conclusion générale	58
	Références	61

Liste des Figures

Figure I-1: Différentes catégories des dispositifs de contrôle des réseaux électriques.	8
Figure I-2 : Schéma du TCR.	9
Figure I-3 : Schéma du TSC.	10
Figure I-4 : Schéma du SVC.	11
Figure I-5 : Schéma du SVC et TCBR.	11
Figure I-6 : Schéma de base d'un STATCOM.	13
Figure I-7 : Ligne de transmission avec système de compensation série.	14
Figure I-8 : Structure d'un TCSC.	14
Figure I-9 : Structure d'un TCSR.	15
Figure I-10 : Schéma de base du SSSC.	16
Figure I-11 : Schéma de base d'un TCPAR.	17
Figure I-12 : Schéma de base d'un IPFC.	18
Figure I-13 : schéma de base d'un UPFC.	19
Figure II-1: Variateur statique de charge universel à l'aide de deux onduleurs.	22
Figure II-2: Circuit équivalent de L'UPFC.	23
Figure II-3 : Modèle mathématique de système de L'UPFC série.	25
Figure II-4 : modèle mathématique de système de L'UPFC shunt.	26
Figure II-5: principe d'un MLI en sin-triangle d'un phase d'un onduleur simple.	28
Figure II-6 : Circuit électrique des onduleurs.	28
Figure II-7: schéma bloc de la commande de L'UPFC (série).	32
Figure III-1: Schéma de contrôle de l'UPFC.	35
Figure III-2: Schéma de contrôle du système UPFC série.	36
Figure III-3: Schéma de contrôle de la partie shunt et la branche continue de L'UPFC.	37
Figure III-4: Commande PI-D de l'UPFC série.	38
Figure III-5: Commande PI-D de l'UPFC shunt.	38
Figure III-6: Réponses des puissances active.	41
Figure III-7: Réponses des puissances réactive.	42
Figure III-8: Courant de phase.	42

Figure III-9: Comportement du réglage de la tension continue lors d'une variation brusque de la puissance active. 43

Figure III-10: La réponse indicielle des puissances actives et réactives avec découplage. 44

Figure III-11: Comportement des puissances active et réactive..... 45

Figure III-12: Comportement des puissances active vis-à-vis d'une variation de la réactance. 45

Figure IV-1: Schéma fonctionnel général d'un système asservi numérique..... 48

Figure IV-2: Schéma classique d'un système asservi numérique avec élément-correcteur..... 49

Figure IV-3: schéma du principe d'un système asservi par un régulateur RST..... 50

Figure IV-4: puissances active (W) et réactive(VAr) sans perturbation. 52

Figure IV-5: réponse des puissances active et réactive des Commande RST avec perturbations 25%..... 53

Figure IV-6: réponse des puissances active et réactive des Commande RST avec perturbations variable. 53

Figure IV-7: Organigramme d'un algorithme génétique simple..... 55

Figure IV-8: puissance réactive (VAr) pour les gains optimaux obtenus par l'algorithme génétique. 56

Liste des Tableaux

Table III-1: Paramètres du Régulateur PI. 39

Liste des Abréviations

ASVC	<i>Advanced Static Van Compensator.</i>
AVR	<i>Automatic Voltage Regulator</i>
FACTS	<i>Fixable Alternating Current Transmission Systems.</i>
GTO	<i>Gate Turn Off.</i>
IGBT	<i>Insulate Gate Bipolar Transistor.</i>
IPFC	<i>Interline Power Flow Controller</i>
IPFC	<i>Interline Power Flow Controller</i>
MLI	<i>Modulation de Largeur d'Impulsion.</i>
PSAT	<i>Power System Analysis Toolbox</i>
SEE	<i>Systèmes Électro Énergétiques</i>
SSSC	<i>Static Synchronous Series Capacitor.</i>
SSSC	<i>Static Synchronous Series Compensator</i>
STATCOM	<i>Static Synchronous Compensator.</i>
STATCOM	<i>Static Compensator</i>
STATCON	<i>Static Condenser.</i>
SVC	<i>Static Var Compensator.</i>
SVC	<i>Static Var Compensator</i>
SVG	<i>Static Var Generator.</i>
TCBR	<i>Thyristor Control Breaking Resistor</i>
TCPAR	<i>Thyristor Controlled Phase Angle Regulator</i>
TCR	<i>Thyristor Controlled Reactor</i>
TCSC	<i>Thyristor Controlled Series Capacitor</i>

TCSR	<i>Thyristor Controlled Series Reactor</i>
TSC	<i>Thyristor Switched Capacitor</i>
TSR	<i>Thyristor Switched Reactor</i>
TSSC	<i>Thyristor Switched Series Capacitor</i>
TSSR	<i>Thyristor Switched Series Reactor</i>
UPFC	<i>Unified Power Flow Controller.</i>
C	<i>Capacité du condensateur du circuit continu</i>
V_{dc}	<i>Tension continue</i>
P_c	<i>Puissance absorbée par le compensateur série et fournie au circuit commun</i>
P_{cp}	<i>Puissance active fournit par le compensateur parallèle et absorbée par le compensateur série</i>
E(z)	<i>Entrée de consigne (Sortie désirée)</i>
ε(z)	<i>Erreur entre la sortie désirée et la sortie réelle du système</i>
U(z)	<i>Signal de commande du système</i>
S(z)	<i>Sortie réelle du système</i>
C(z)	<i>Fonction de transfert numérique du régulateur</i>

Introduction Générale

Introduction Générale

L'industrialisation et la croissance de la population sont les premiers facteurs pour lesquels la consommation de l'énergie électrique augmente régulièrement. Ainsi, pour avoir un équilibre entre la production et la consommation, il est à première vue nécessaire d'augmenter le nombre de centrales électriques, des lignes, Des transformateurs etc., ce qui implique une augmentation de coût et une dégradation du milieu naturel. En conséquence, il est aujourd'hui important de travailler proche des limites de stabilité afin de satisfaire ces nouvelles exigences [1].

Nouveau paradigme pour la gestion et la conduite des réseaux électriques. Cette profonde mutation intervient alors que les réseaux électriques ont déjà connu ces dernières années un accroissement considérable des interconnexions à travers le Continent.

Nous complétons l'action en mettant en œuvre des dispositifs électroniques de puissance à grande vitesse de réponse, récemment développés et connus sous l'appellation FACTS (Flexible Alternative Current Transmission System) pour le contrôle des réseaux .

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 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.

Les études de stabilité transitoire concernent les grandes perturbations comme le court-circuit la perte d'ouvrage ou de groupe de production etc. La conséquence de ces défauts peut être très grave, pouvant même conduire à l'effondrement complet du réseau.

L'objectif de ce travail est l'utilisation une technique artificielle pour améliorer la régulation de l'UPFC. On va appliquer la logique floue dans ce travail. Ce travail s'articule autour de la stabilité transitoire d'un réseau électrique en utilisant le plus puissant des dispositifs FACTS, l'UPFC (*Unified Power Flow Controller*) qui est constitué de deux parties :

- ✓ Une partie en parallèle qui injecte du courant au réseau;
- ✓ Une partie en série qui injecte une tension en série avec le réseau.

Notre mémoire est constitué de **4** chapitres :

 **Chapitre I** : présente les différentes structures de FACTS (parallèle, série et

Introduction Générale

hybride)

- ✚ **Chapitre II** : présente la modélisation du compensateur de flux de puissance UPFC. Effectivement, nous allons modéliser les deux convertisseurs formant l'UPFC en décrivant en détail leurs équations mathématiques.
- ✚ **Chapitre III** : sera réservé à description détaillée des régulateurs PI qui seront appliquées à UPFC. Ensuite on va présenter et discuter les résultats de simulation obtenus.
- ✚ **Chapitre IV** : Dans ce chapitre, on va s'intéresser au développement et l'application de la commande RST à la commande de l'UPFC. Pour perfectionner le régulateur RST, on s'est intéresser à l'optimisation de ses paramètres en se basant sur l'algorithme génétique. Une conclusion générale sur les travaux réalisés et l'avancement de quelques perspectives clôturerons ce travail.

Chapitre I

Les Systèmes

FACTS

I.1 Introduction

Le secteur de la fourniture d'énergie connaît une mutation rapide sous l'effet de la dérégulation et de la privatisation. Des années de sous-investissement dans des nombreux réseaux de transport obligent les exploitants à augmenter la capacité de transit des lignes existantes, à accroître les échanges d'énergie transfrontaliers et à résoudre les problèmes de qualité de l'alimentation électrique [2].

Pour des raisons économiques et des contraintes écologiques, les recours à la construction de nouveaux ouvrages sont repoussés. L'alternative est de multiplier les interconnexions et d'augmenter les capacités de transport des ouvrages existants obligeant ainsi l'exploitation des lignes de transport dans des conditions critiques.

La perturbation inévitable telle que les court-circuit, les indisponibilités momentanées de lignes, de générateurs ou de transformateurs (de l'ordre de milliers d'incidents par année) ainsi que les pertes dans les lignes et les aléas de consommation pouvant affecter le réseau à tout instant et l'amener en dehors de sa zone de stabilité. Dans une ligne de transport, le flux de puissance est déterminé par trois paramètres électriques, produit par une variation de la puissance à travers la ligne de transport.

Les moyens classiques de contrôle de réseaux à savoir les transformateurs à prises réglables en charge, les transformateurs à décalage d'angle, les condensateurs et inductances additionnelles commutés par disjoncteurs pour une compensation série et parallèle, les modifications de consigne de production de puissances active et réactive s'avèrent trop lentes et insuffisantes pour répondre efficacement aux perturbations des réseaux.

Le développement de l'électronique de puissance a cependant permis, depuis la fin des années 70, de mettre au point et d'exploiter des dispositifs capables de modifier en permanence, et très rapidement, les différents paramètres physiques qui régissent les transits de puissance dans les réseaux électriques. Ils permettent en outre, de mieux utiliser la capacité de transport de réseaux en équilibrant les charges de la meilleure façon possible. Ces dispositifs sont connus sous le nom « FACTS ».

I.2 Généralités sur les FACTS

Un système de transmission de courant alternatif flexible (FACTS) est un système composé d'équipements statiques utilisés pour la transmission de courant alternatif (AC) d'énergie électrique. Il est destiné à améliorer la contrôlabilité et à augmenter la capacité de transfert de puissance du réseau. Il s'agit généralement d'un système basé sur l'électronique de puissance.[3]

FACTS est défini par (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) (IEEE) comme "un système basé sur l'électronique de puissance et d'autres équipements statiques qui permettent de contrôler un ou plusieurs paramètres du système de transmission CA pour améliorer la contrôlabilité et augmenter la capacité de transfert de puissance".

I.3 Rôle des dispositifs FACTS

Le développement des dispositifs FACTS est essentiellement dû 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.

Les FACTS représentent une alternative aux dispositifs de réglage de puissance utilisant des techniques passives : bobine d'induction et condensateur déclenchés par disjoncteur, transformateur déphaseur à régleur en charge mécanique, etc. dans les dispositifs FACTS, les interrupteurs électromécaniques sont remplacés par des interrupteurs électroniques. Ils disposent ainsi de vitesses de commande très élevées et ne rencontrent pas les problèmes d'usure de leurs prédécesseurs. De ce fait, les FACTS possèdent une très grande fiabilité et une flexibilité pratiquement sans limite.

Dans un réseau électrique, les FACTS permettent de remplir des fonctions tant en régime stationnaire qu'en régime transitoire. Ils agissent généralement en absorbant ou en fournissant de la puissance réactive, en contrôlant l'impédance des lignes ou en modifiant les angles des tensions. En régime permanent, les FACTS sont utilisés principalement dans les deux contextes suivants :

- Le maintien de la tension à un niveau acceptable en fournissant de la puissance réactive lorsque la charge est élevée et que la tension est trop basse, alors qu'à l'inverse ils en absorbent si la tension est trop élevée.
- Le contrôle des transites de puissances de manière à réduire, voire supprimer, les

surcharges dans les lignes ou les transformateurs ainsi que pour éviter les flux de bouclage dans le réseau. Ils agissent alors en contrôlant la réactance des lignes et en ajustant les déphasages.

Additionnement à leur vitesse de commande élevée, les FACTS possèdent de nombreuses qualités en régime dynamique. Ils permettent en particulier :

- D'accroître la réserve de stabilité transitoire.
- D'amortir les oscillations de puissance.
- De supporter de manière dynamique la tension. [4]

I.4 Les différents types des systèmes FACTS

Les systèmes de transmission à courant alternatif (FACTS) traduisent un concept qui regroupe tous les dispositifs à base d'électronique de puissance qui permettent d'améliorer l'exploitation du réseau électrique. La technologie de ces systèmes (interrupteur statique) leur assure une vitesse beaucoup plus que celle des systèmes électromécaniques classiques, l'intérêt de ces systèmes et non seulement de pouvoir contrôler l'écoulement de puissance dans les réseaux électriques mais aussi d'augmenter la capacité effective de transport jusqu'à leur limite thermique maximale tout en maintenant voir en améliorant la stabilité des réseaux électriques[5][6].

Les systèmes "FACTS" peuvent être classés en trois catégories:

- Les compensateurs parallèles.
- Les compensateurs séries.
- Les compensateurs hybrides (série – parallèle).

Le tableau de la (**Figure I-1**) représente te les grandes catégories des dispositifs de contrôle des réseaux électriques[3]

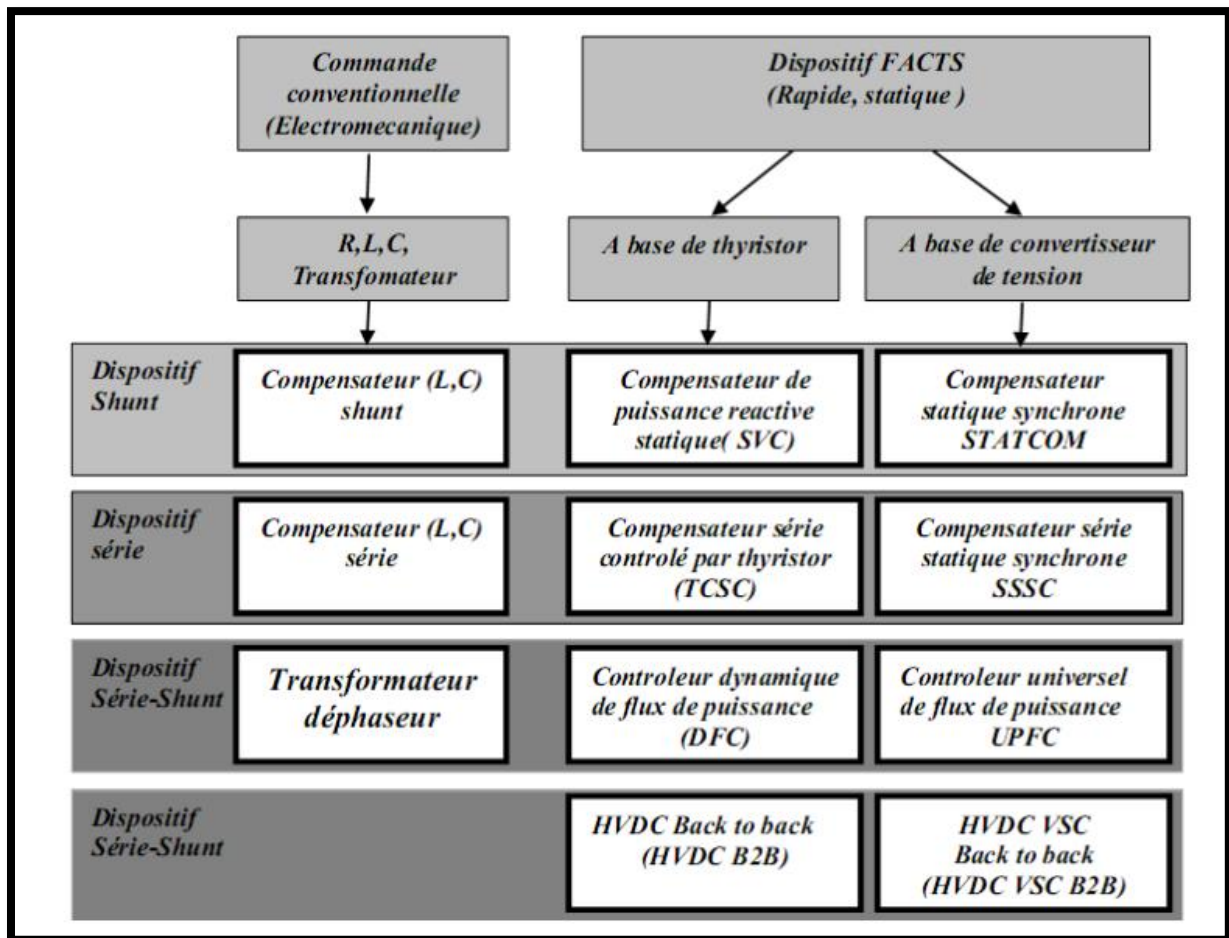


Figure I-1: Différentes catégories des dispositifs de contrôle des réseaux électriques.

I.4.1 Compensateur Parallèle

Selon la demande des consommateurs, les lignes électriques doivent transporter des puissances actives et aussi des puissances réactives.

Afin d'éviter des pertes supplémentaires à cause de la transmission du courant réactif et pour augmenter la stabilité des réseaux interconnectés il est nécessaire de compenser la puissance réactive au niveau des sous stations d'interconnexion.

L'apparition d'équipements utilisant l'électronique de puissance revient vers la fin des années soixante 60 [5]. L'avantage de ces dispositifs permet d'éliminer les parties mécaniques de rendement mauvais et de réaction assez lente, et d'avoir un temps de réponse très court. Ces équipements étaient constitués essentiellement d'une inductance en série avec un gradateur, le retard à l'amorçage des thyristors permettait de régler l'énergie électrique réactive absorbée par l'inductance du dispositif [5].

En effet tous les compensateurs parallèles injectent du courant au réseau à travers les points de raccordement. La connexion d'une impédance variable en parallèle sur le réseau électrique résulte en une consommation ou une injection d'un courant variable, cette injection de courant modifie les puissances actives et réactives qui transitent dans la ligne [7].

Les compensateurs parallèles les plus utilisés sont :

I.4.1.A Compensateurs parallèles à base de thyristors

Il s'agit de :

1. TCR (Thyristor Controlled Reactor) ou TSR (Thyristor Switched Reactor)

Un circuit TCR est composé d'une impédance placée en série avec deux thyristors montés en antiparallèle, comme le montre la (**Figure I-2**), la valeur de l'impédance est continuellement changée par l'amorçage des thyristors[8].

Un thyristor se met à conduire quand un signal de gâchette lui est envoyé, et la tension à ses bornes est positive, il s'arrête de conduire lorsque le courant qui le traverse s'annule.

Un dispositif TCR seul n'est pas suffisant pour pouvoir compenser la puissance réactive dans un réseau, car il ne dispose pas de source de puissance réactive. Généralement on dispose avec un TCR des bancs de condensateurs comme source de puissance réactive, et le TCR contrôle cette source de puissance [9].

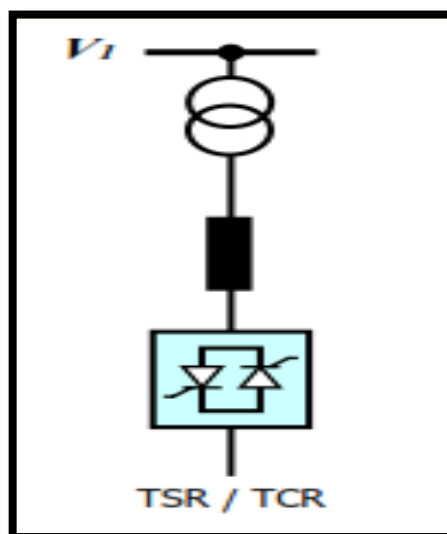


Figure I-2 : Schéma du TCR.

2. TSC (Thyristor Switched Capacitor)

Le circuit TSC est composé d'une réactance placée [15] en série avec deux thyristors montés en antiparallèle, comme le montre la (Figure I-3), pour un TSC les thyristors fonctionnent en pleine conduction [8], [10].

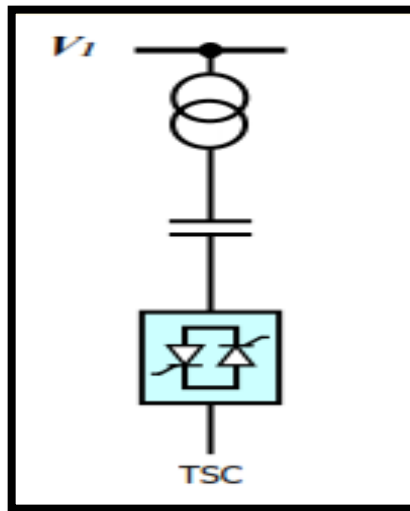


Figure I-3 : Schéma du TSC.

3. SVC (Static Var Compensator)

Le SVC est une association des dispositifs TCR, TSC, banc de capacités fixes et des filtres d'harmoniques. Ces dispositifs constituent le compensateur hybride, plus connu sous le nom de SVC (compensateur statique d'énergie réactive). Un SVC est une impédance continuellement ajustable capacitive (+V) à inductive (-V), qui peut rapidement répondre à des modifications du réseau pour contrebalancer les variations de charge ou les conséquences d'un défaut [11].

Le courant traversant la réactance est contrôlé par les valves à thyristors. Il peut donc varier entre zéro et sa valeur maximale grâce au réglage de l'angle d'amorçage des thyristors. Le système de contrôle qui génère les impulsions de gâchette des thyristors mesure soit la tension au point de connexion soit la puissance réactive dans la charge associée et calcule l'instant auquel il faut amorcer les valves [12].

Le compensateur statique d'énergie réactive (SVC) a été installé pour la première fois en 1979 en Afrique du sud. La caractéristique statique est donnée sur la (Figure I-4), trois zones de fonctionnement sont distinctes [13] :

- Une zone où seules les capacités sont connectées au réseau;
- Une zone de réglage ou l'énergie réactive et une combinaison de TCR et de TSC;
- Une zone où le TCR donne son énergie maximale, les condensateurs sont déconnectés.

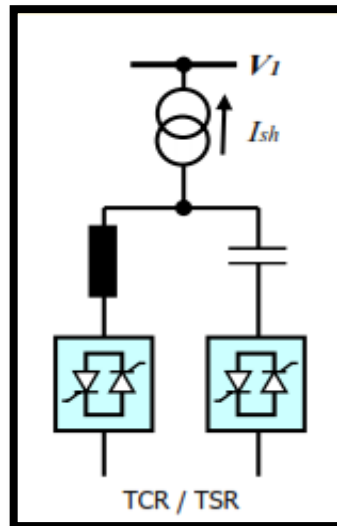


Figure I-4 : Schéma du SVC.

4. TCBR (Thyristor Control Breaking Resistor)

Ce type de compensateur se monte en parallèle, il est utilisé pour améliorer la stabilité du réseau pendant la présence des perturbations [1]. La (Figure I-5) représente un TCBR en parallèle avec un SVC équipé d'un banc de condensateurs et d'un filtre d'harmonique.

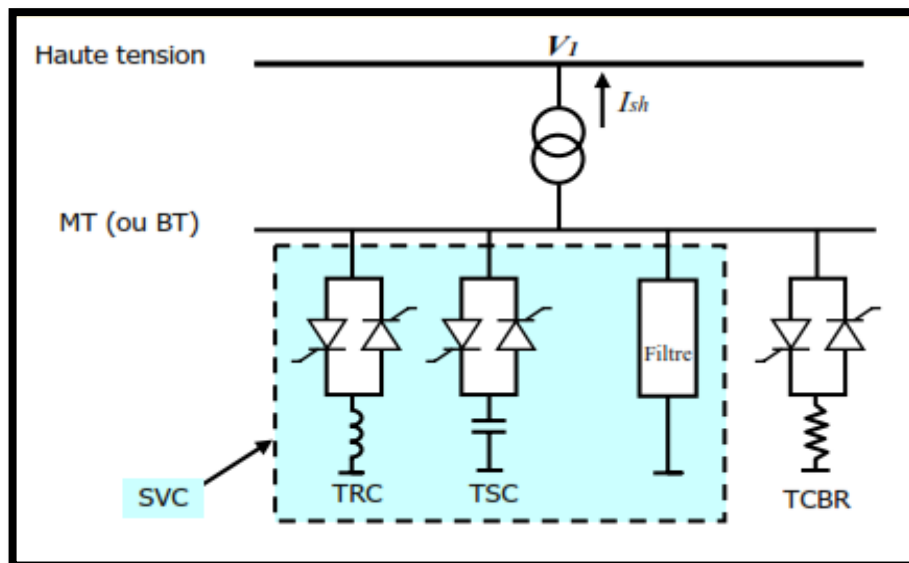


Figure I-5 : Schéma du SVC et TCBR.

I.4.1.B Compensateur parallèle à base de GTO thyristors

1. Le STATCOM (STATIC synchronous compensator)

fut le premier FACTS utilisant le VSC (onduleur à source de tension) à être introduit dans les réseaux électriques [12]. Un STATCOM est un convertisseur statique à source de tension 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 alternative au point de connexion, le flux de courant dans l'impédance de réseau est parfaitement réactif. Le STATCOM, a connu jusqu'à présent

Different appellations [5] :

- ASVC (Advanced Static VAr Compensator);
- STATCOM (STATIC condenser);
- SVG (Static VAr Generator).

Ce type de compensateur est connu depuis la fin des années 70, mais ce n'est que dans les années 90 que ce type de compensateur a connu un essor important grâce aux développements des interrupteurs, GTO de forte puissance [7]. Le STATCOM à une fonction comparable à celle des SVC avec des performances dynamiques plus importantes.

Le STATCOM présente plusieurs avantages [5], [11] à savoir :

- L'étendue de la plage d'opération est plus large qu'un SVC classique;
- Les performances dynamiques sont plus élevées qu'avec un SVC classique;
- Bonne réponse à faible tension : le STATCOM est capable de fournir son courant nominal même lorsque la tension est presque nulle;
- Il ne présente pas d'élément capacitif qui puisse provoquer des résonances avec des éléments inductifs du réseau;
- Un contrôle optimal de la tension, les phases sont contrôlées séparément pendant les perturbations du système;
- Une flexibilité opérationnelle maximale est obtenue par la disponibilité de cabines localisables;

- Un design modulaire du convertisseur permet une adaptation pour une grande plage de puissance.

La (Figure I-6) représente le schéma de base d'un STATCOM, où les cellules de commutation sont bidirectionnelles formées de GTO et de diodes en antiparallèle. Le rôle de STATCOM est d'échanger de l'énergie réactive avec le réseau. Pour se faire, l'onduleur est couplé au réseau par l'intermédiaire d'une inductance, qui est en général l'inductance de fuite du transformateur de couplage [14].

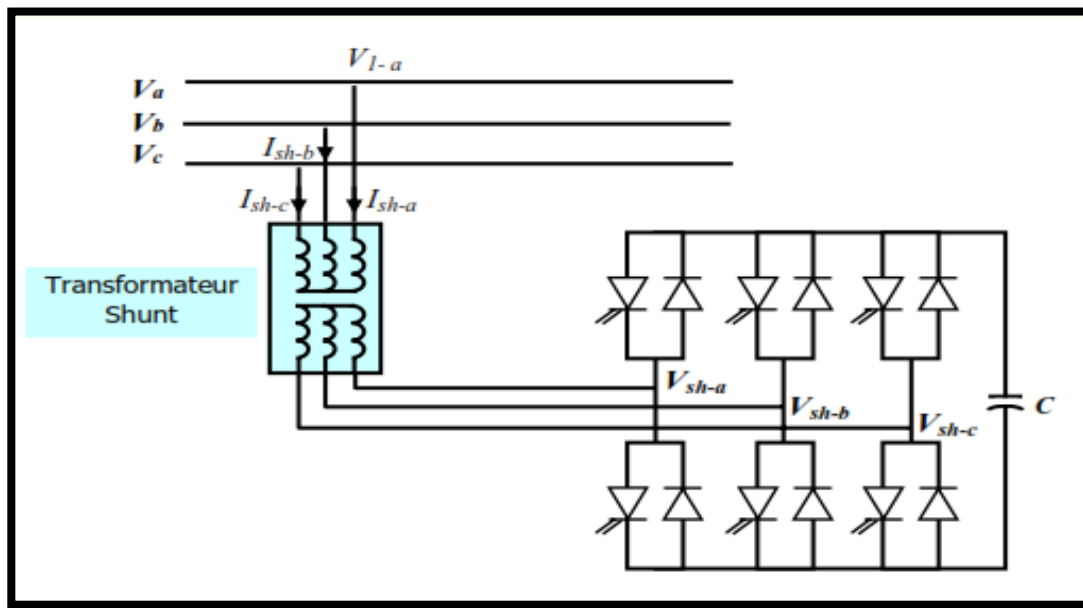


Figure I-6 : Schéma de base d'un STATCOM.

I.4.2 Compensateurs Séries

La puissance active échangée entre deux systèmes peut être augmentée si l'on réduit l'impédance de la liaison dont le comportement est essentiellement inductif. 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 . Artificiellement l'impédance de la ligne est donc réduite de X_l à $(X_c - X_l)$ et le transit de puissance est augmenté. La (Figure I-7) représente la Ligne de transmission avec système de compensation série.

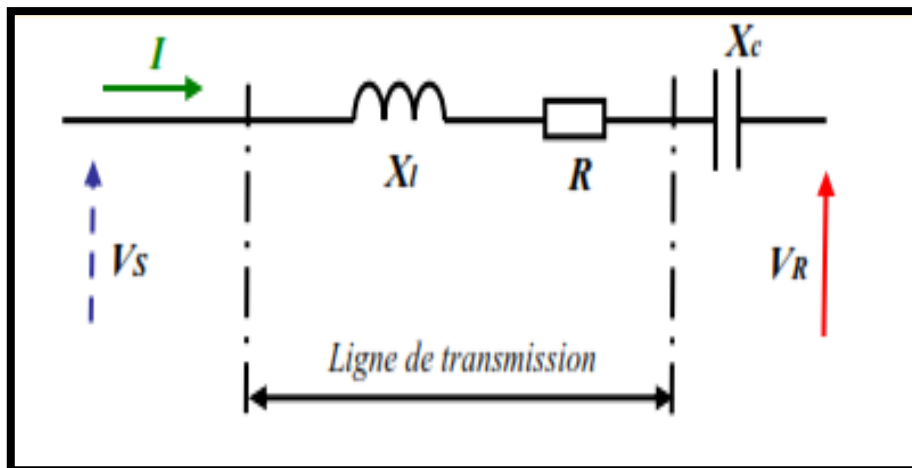


Figure I-7 : Ligne de transmission avec système de compensation série.

I.4.2.A Compensateurs séries à base de thyristors

Les compensateurs série à base de thyristors les plus connus sont :

1. TCSC (Thyristor controlled series capacitor)

Un module de TCSC est composé d'un banc de condensateur en parallèle avec une inductance commandée par thyristors, l'impédance totale vue par la ligne est une combinaison parallèle de capacité et de l'inductance équivalente variable selon l'angle d'allumage des thyristors (**Figure I-8**). On peut aligner plusieurs modules commandés en série dans la ligne à compenser .

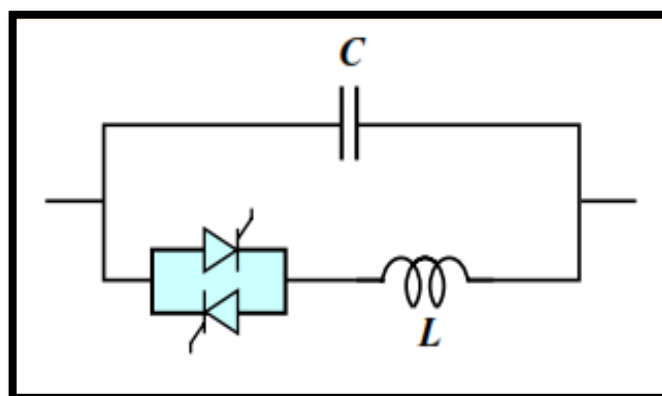


Figure I-8 : Structure d'un TCSC.

2. TSSC (Thyristor Switched Series Capacitor)

La différence entre ce système et le TCSC est que l'angle d'amorçage est soit de 90

degrés soit de 180 degrés[5].

3. TCSR (Thyristor Controlled Series Reactor)

Le TCSR est un compensateur inductif qui se compose d'une inductance en parallèle avec une autre inductance commandée par thyristors afin de fournir une réactance inductive série variable (**Figure I-9**). Lorsque l'angle d'amorçage de réactance contrôlée est égal à 120 degrés, le thyristor cesse de conduire, et la réactance non contrôlée X_1 agit comme un limiteur de courant de défaut. Pendant que l'angle d'amorçage diminue en dessous de 180 degrés, la réactance équivalente jusqu'à l'angle de 90 degrés, où elle est la combinaison des deux réactances en parallèle [5].

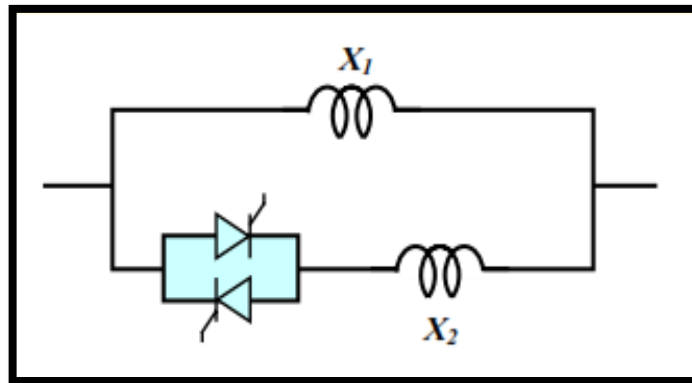


Figure I-9 : Structure d'un TCSR.

4. TSSR (Thyristor Switched Serie Reactor)

La différence entre ce système et le TCSR est que l'angle d'amorçage peut être soit de 90 degrés soit de 180 degrés [5].

I.4.2.B Compensateurs séries à base de GTO thyristors

Le compensateur série à base de GTO thyristors le plus connu est le :

1. SSSC (Static Synchronous Series Compensator)

C'est un convertisseur à source tension placé en série avec la ligne de transport d'énergie électrique à travers un transformateur, ce type de compensateur est le dispositif plus important de cette famille. Il est constitué d'un onduleur triphasé couplé en série avec la ligne [5]. La (**Figure I-10**) montre le branchement d'un SSSC sur la ligne de transport.

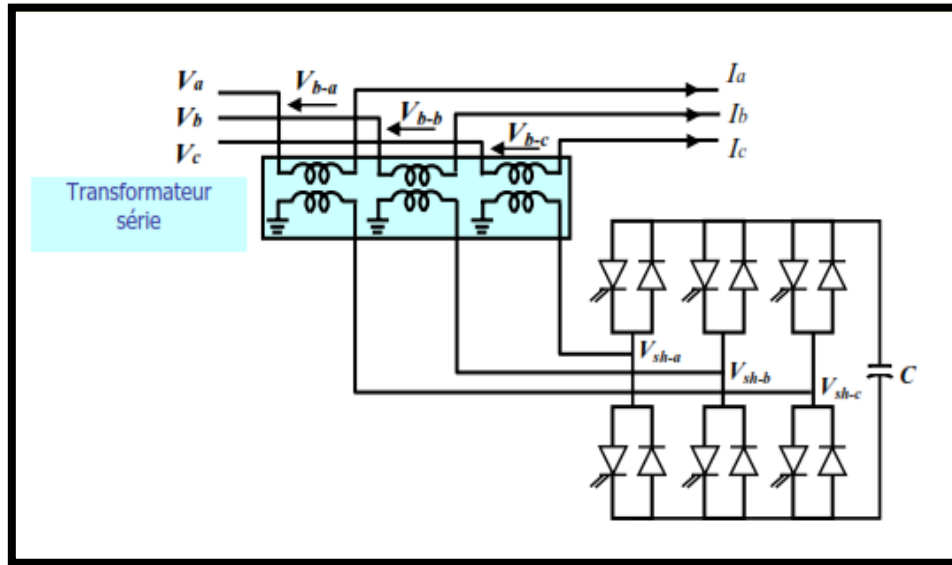


Figure I-10 : Schéma de base du SSSC.

Un SSSC est capable d'échanger de la puissance réactive et de la puissance active (en insérant un système de stockage d'énergie), avec le réseau. Si on ne désire que la compensation réactive, la source d'énergie peut être sous dimensionnée. La tension injectée à la fréquence du réseau peut être commandée en amplitude et en phase, quand il s'agit de la compensation purement réactive, seule l'amplitude de la tension est contrôlable, car le vecteur de tension injectée est perpendiculaire au courant de la ligne, dans ce cas la tension injectée en série peut faire avancer ou retarder le courant de la ligne de 90 degrés.

I.4.3 Compensateurs hybrides (série – parallèle)

I.4.3.A Compensateurs hybrides à base de thyristors

1. TCPAR (Thyristor Controlled Phase Angle Regulator)

Le TCPAR (déphaseur statique) est un transformateur déphaseur à base de thyristors. Ce dispositif a été créé pour remplacer les déphaseurs à transformateurs à réglage en charge (**LTC** : *Load Tap Changer*) qui sont commandés mécaniquement, il est constitué de deux transformateurs, l'un est branché en série avec la ligne et l'autre en parallèle. Ce dernier possède différents rapports de transformation (n_1, n_2, n_3) Ces deux transformateurs sont reliés par l'intermédiaire de thyristors. Son principe de fonctionnement est d'injecter, sur les trois phases de la ligne de transmission, une tension en quadrature avec la tension à déphaser. Ce type de compensateur n'est pas couramment utilisé, seule une étude est actuellement menée

afin d'introduire un déphaseur à thyristors dans l'interconnexion des réseaux du nord ouest du Minnesota et du nord de l'Ontario[5].

Il a l'avantage de ne pas générer d'harmoniques car les thyristors sont commandés en interrupteurs en pleine conduction. Par contre comme le déphasage n'a pas une variation continue, il est nécessaire d'y adjoindre un compensateur shunt, ce qui entraîne des surcoûts d'installation [14].

L'amplitude de la tension injectée est une combinaison des secondaires du transformateur parallèle dont les rapports de transformation sont n_1, n_2, n_3 . Cette combinaison donne une tension à injecter dont l'amplitude peut prendre jusqu'à 27 valeurs différentes [5].

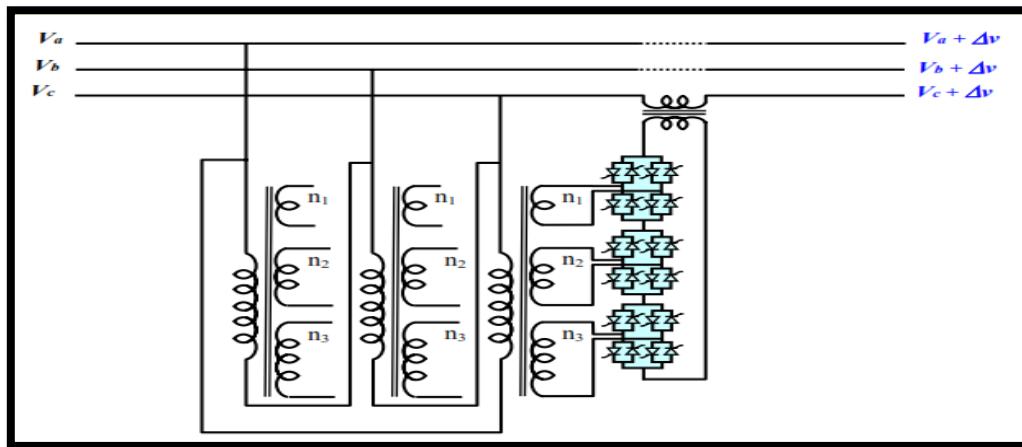


Figure I-11 : Schéma de base d'un TCPAR.

I.4.3.B Compensateurs hybrides à base de GTO thyristors

1. IPFC (Interline Power Flow Controller)

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 [8]. Il est utilisé également afin de conduire des changements de puissances entre les lignes du réseau. La première proposition de L'IPFC est faite en 1998 par Gyugyi, Sen et Schuder [5], [10]. La (Figure I-12) représente le schéma de base d'un IPFC.

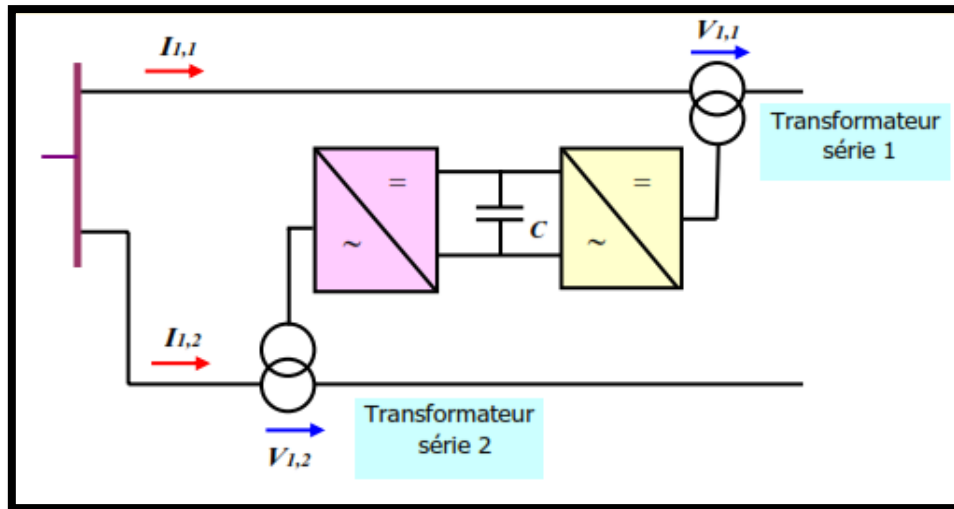


Figure I-12 : Schéma de base d'un IPFC.

2. Compensateur de Flux de Puissance (UPFC)

Le compensateur de flux de puissance (*Unified Power Flow Controller*) est l'union de deux compensateurs l'un est un compensateur série et l'autre est un compensateur parallèle, le concept de ce dispositif a été présenté en 1990 par L. GYUGYI [7]. Il possède à la fois la fonctionnalité de trois compensateurs (série, parallèle et déphaseur). Il est capable de contrôler simultanément et indépendamment la puissance active et la puissance réactive. Il peut contrôler les trois paramètres associés au transit de puissance à savoir la tension de la ligne, l'impédance de la ligne et le déphasage des tensions aux extrémités de la ligne. Son schéma de base est donné par la (Figure I-13).

L'UPFC est constitué de deux onduleurs de tension triphasés, l'un est connecté en parallèle au réseau par l'intermédiaire d'un transformateur et l'autre est connecté en série à travers un deuxième transformateur. Les deux onduleurs sont interconnectés par un bus continu représenté par le condensateur [16].

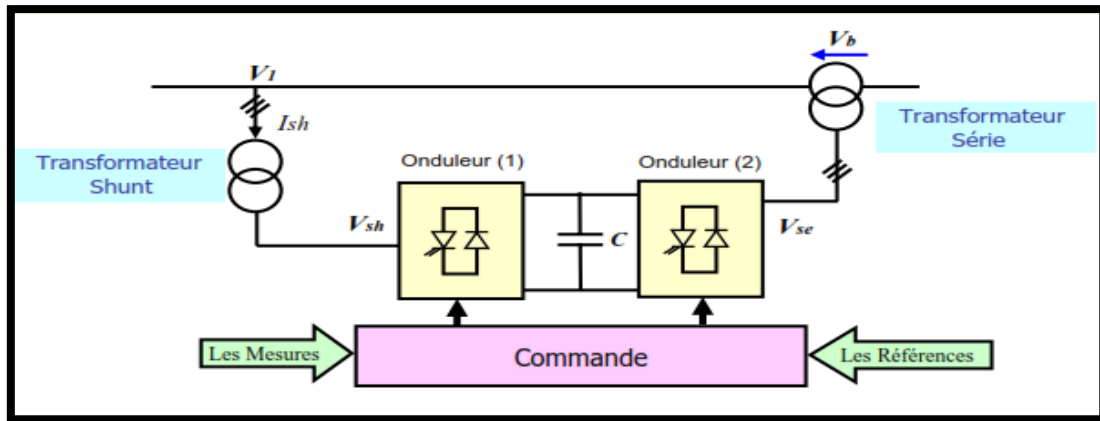


Figure I-13 : schéma de base d'un UPFC.

L'UPFC permet à la fois le contrôle de la puissance active et celui de la tension de la ligne, il est capable d'accomplir les fonctions des autres dispositifs FACTS à savoir le réglage de la tension, la répartition de flux d'énergie, l'amélioration de la stabilité et l'atténuation des oscillations de puissance. Dans la (Figure I-13) l'ondeur (1) est utilisé à travers la liaison continue pour fournir la puissance active nécessaire à l'ondeur (2). Il réalise aussi la fonction de compensation réactive puisqu'il peut fournir ou absorber de la puissance réactive, indépendamment de la puissance active, au réseau. L'ondeur (2) injecte la tension V_b et fournit les puissances actives et réactives nécessaires à la compensation série.

L'UPFC offre une flexibilité énorme qui permet le contrôle de la tension, de l'angle de transport et de l'impédance de la ligne par un seul dispositif comprenant seulement deux onduleurs de tension triphasés. De plus, il peut basculer de l'un à l'autre de ces fonctions instantanément, en changeant la commande de ses onduleurs, ce qui permet de pouvoir faire face à des défauts ou à des modifications du réseau en privilégiant temporairement l'une des fonctions [5].

I.5 Avantage technique des dispositifs FACTS

Actuellement, plus de mille installations de FACTS sont installées à travers le monde dont une part importante est en service depuis des années.

Les dispositifs FACTS ne servent pas uniquement à prolonger la durée de vie et à renforcer les installations existantes mais peuvent assurer les fonctions suivantes :

- Modification du réseau électrique, exemple : changement obligatoire ou souhaitable de

la puissance de court-circuit;

- Accroissement de la disponibilité de l'installation ou le remplacement de la technologie vétuste;
- Ajout de fonctionnalités à l'installation, à titre d'exemple, les nouvelles fonctions de contrôle de commande ou de protection, de télécommunication, de diagnostic, etc...

Les raisons principales qui justifient l'installation des dispositifs FACTS dans les réseaux électriques sont :

- Augmentation des limites de stabilité dynamique;
- Meilleure maîtrise des flux d'énergie.

I.6 Conclusion

L'expansion continue des réseaux de transport d'énergie électrique montre les limites des capacités de transit des systèmes existants. Les gestionnaires de réseau sont entraînés à exploiter le système de transport aux limites thermiques et dynamiques, alors que les consommateurs sont de plus en plus exigeants quant à la qualité de l'énergie et à la continuité de service. Les équipements à base d'électronique de puissance, y compris leurs commandes appropriées, offrent des solutions efficaces à ce problème. Grâce aux avancées récentes dans la technologie GTO / IGBT, le temps de réaction des dispositifs FACTS a diminué à quelques millisecondes.

Les systèmes FACTS ont la capacité d'augmenter la puissance transmissible dans la ligne en utilisant des commandes appropriées. Ses systèmes peuvent également améliorer la stabilité transitoire du réseau de transport.

Dans ce présent chapitre nous avons présenté les systèmes FACTS en général. Nous avons choisi d'étudier l'UPFC pour le contrôle de l'écoulement de puissance active et réactive dans un réseau électrique de transport. L'UPFC est le dispositif le plus complet que les autres systèmes. En effet, il offre des capacités de contrôle incomparables qui ne peuvent pas être obtenues par l'utilisation séparée de n'importe quel autre dispositif des FACTS. Dans le prochain chapitre, ce dispositif de puissance est retenu pour être modélisé et commandé afin de contrôler les puissances qui transitent dans une ligne de transmission.

Chapitre II

Modélisation du

Compensateur de Flux

de Puissance (UPFC)

II.1 Introduction

Actuellement L'UPFC (*Unified Power Flow Controller*) ou variateur de charge universel, représente le dispositif le plus récent qui attire l'attention d'un grand nombre de chercheurs, car il s'avère le seul capable de contrôler simultanément et indépendamment les puissances active et réactive d'un réseau. Union de deux compensateurs. un en série et l'autre en parallèle. il permet de commander les trois paramètres associés au transit des puissances à savoir la tension de la ligne. l'impédance de la ligne et l'angle de transport.

Dans ce chapitre: nous abordons la modélisation, et le synthèse de réglage de l'UPFC

II.2 Structure de l'UPFC

L'UPFC' est constitué de deux onduleurs à source de tension (VSC) qui sont connectés à travers un circuit continu commun (DC Link). L'un est connecté en parallèle(STATCOM) et l'autre en série (SSSC) avec la ligne de transmission comme illustré par la (**Figure II-1**).L'UPFC est non seulement capable de contrôler simultanément et indépendamment, la puissance active et la puissance réactive .mais aussi d'améliorer la qualité d'énergie électrique.

Le convertisseur 2 accomplit la fonction principale de l'UPFC, en injectant en série une tension AC avec une amplitude et angle de phase réglable dans la ligne de transport à l'aide d'un transformateur série T2. La fonction fondamentale du convertisseur 1 est de fournir ou d'absorber de la puissance effective demandée par le convertisseur 2 à la liaison DC commune. Il peut aussi produire ou absorber de la puissance réactive selon la demande et assurer une compensation shunt indépendante à la ligne de transport. Le convertisseur 2 fourni ou absorbe la puissance réactive nécessaire localement et produit de la puissance active comme résultat de l'injection en série d'une tension [17] [6] [19] [20].

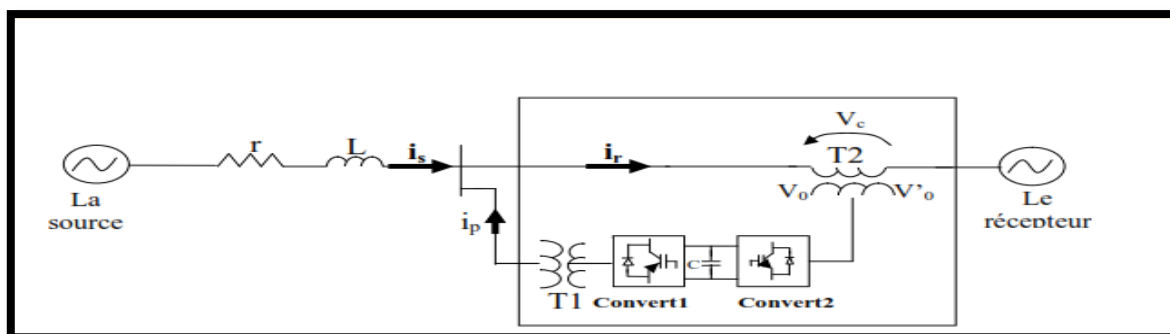


Figure II-1: Variateur statique de charge universel à l'aide de deux onduleurs.

II.3 Modélisation de l'UPFC

Nous commençons la modélisation par la présentation des équations mathématiques de notre système dans le repère triphasé ABC et dans le repère de Park $d-q$.

Le circuit simplifié de l'UPFC est représenté sur la (**Figure II-2**). La modélisation de ce circuit est basée sur les hypothèses suivantes [17] [6] [19] [20] [21]:

- Tous les interrupteurs sont supposés idéaux;
- Les trois tensions de la source alternative sont équilibrées;
- toutes les chutes de tension à travers la ligne sont représentées par la résistance (r);
- l'inductance de la ligne est représentée par l'inductance (L);
- Le transformateur parallèle est représenté par la résistance (r_p) et l'inductance (L_p);
- Les harmoniques causées par l'action d'ouverture et de la fermeture des interrupteurs (sont négligeable).

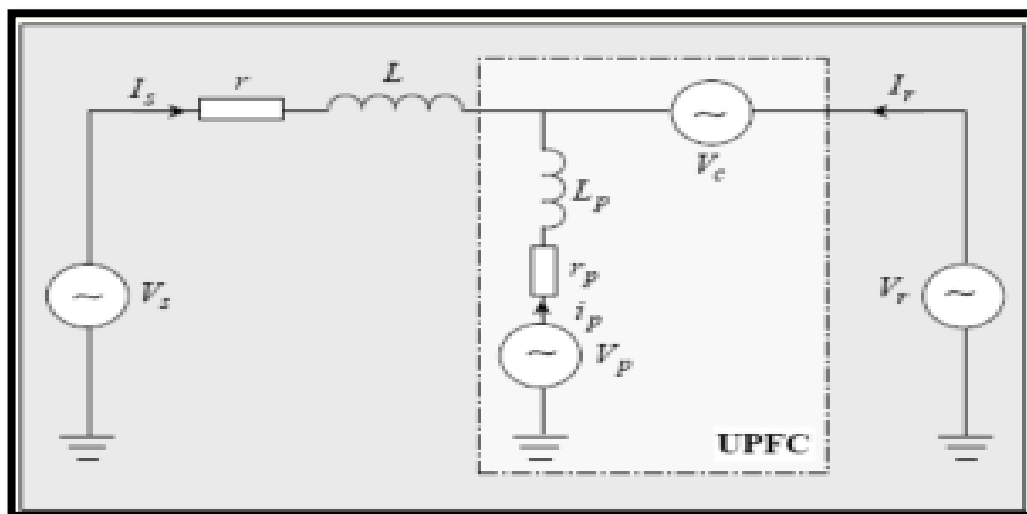


Figure II-2: Circuit équivalent de l'UPFC.

L'UPFC est composé de trois systèmes (Compensateur série, compensateur parallèle et le bus continu). Dans les paragraphes suivants, nous allons détailler respectivement:

- Les équations dynamiques du compensateur série;
- Les équations dynamiques du compensateur parallèle;

- Les équations du circuit continu.

III.3.1. Équations dynamiques du compensateur série

L'application des lois de Kirchhoff aux mailles du circuit de la (**Figure II-2**) nous donne les équations électriques du compensateur série.

$$\begin{cases} V_{sa} - V_{ca} - V_{ra} = r i_{sa} + L \frac{di_{sa}}{dt} \\ V_{sb} - V_{cb} - V_{rb} = r i_{sb} + L \frac{di_{sb}}{dt} \\ V_{sc} - V_{cc} - V_{rc} = r i_{sc} + L \frac{di_{sc}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II. 1})$$

Avec,

- (V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}) : sont les tensions triphasées au départ de la ligne (*Sending End*);
- (V_{ca}, V_{cb}, V_{cc}) sont les tensions de compensation série injectées à l'arrivée de la ligne de transmission;
- $V_{ra,b,c}$: sont les tensions triphasées à l'arrivée t de la ligne (*Receiving End*).

La matrice de transformation standard de Park est donnée par [18]:

$$K = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos wt & \cos(wt - \frac{2\pi}{3}) & \cos(wt + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin wt & -\sin(wt - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(wt + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 2})$$

On note que la matrice inverse de la matrice de Park est la transposée de K:

$$K^{-1} = K^T \quad (\text{II. 3})$$

On peut transformer les grandeurs triphasées en biphasé comme suit:

$$X_{dq0} = K X_{abc} \quad (\text{II. 4})$$

De même, on peut transformer les grandeurs triphasées en biphasé comme suit:

$$X_{abc} = K^T X_{dq0} \quad (\text{II. 5})$$

Appliquant la transformée de Park au système d'équations (II.1), on obtient:

$$\begin{cases} V_{sd} - V_{cd} - V_{rd} = r i_{sd} + L \frac{di_{sd}}{dt} - \omega L i_{sq} \\ V_{sq} - V_{cq} - V_{rq} = r i_{sq} + L \frac{di_{sq}}{dt} + \omega L i_{sd} \end{cases} \quad (\text{II. 6})$$

Cette dernière équation peut être écrite sous la forme matricielle suivante:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r/L & \omega \\ -\omega & -r/L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} V_{sd} & -V_{cd} & -V_{rd} \\ V_{sq} & -V_{cq} & -V_{rq} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 7})$$

La (Figure II-3) montre le schéma équivalent de L'UPFC série dans les axes $d-q$ basé sur le système d'équation (II.7).

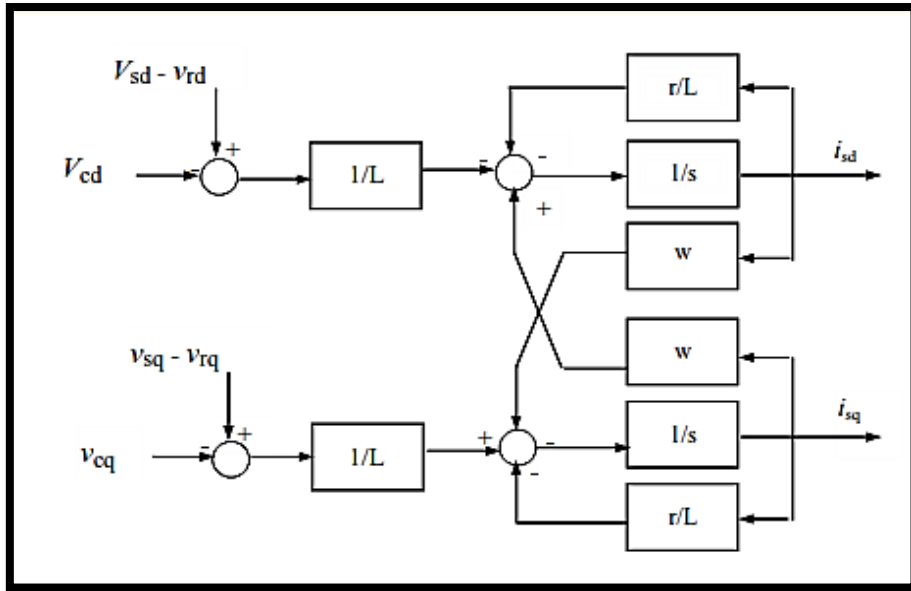


Figure II-3 : Modèle mathématique de système de L'UPFC série.

II.2 Équations dynamiques du compensateur parallèle

L'application des lois de Kirchhoff aux mailles du circuit de la (Figure II-2) nous donne les équations électriques du compensateur parallèle

$$\begin{cases} V_{pa} - V_{ca} - V_{ra} = r_p i_{pa} + L_p \frac{di_{pa}}{dt} \\ V_{pb} - V_{cb} - V_{rb} = r_p i_{pb} + L_p \frac{di_{pb}}{dt} \\ V_{pc} - V_{cc} - V_{rc} = r_p i_{pc} + L_p \frac{di_{pc}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II. 8})$$

- \$(V_{pa}, V_{pb}, V_{pc})\$ sont les tensions de compensation parallèle injectées à l'arrivée

de la ligne de transmission.

Dans le plan de transformation de park ce système devient :

$$\begin{cases} V_{pd} - V_{cd} - V_{rd} = r_p i_{pd} + L_p \frac{di_{pd}}{dt} - \omega L i_{pq} \\ V_{pq} - V_{cq} - V_{rq} = r_p i_{pq} + L_p \frac{di_{pq}}{dt} + \omega L i_{pd} \end{cases} \quad (\text{II. 9})$$

En utilisant la représentation matricielle :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{pd} \\ i_{pq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-r_p}{L_p} & \omega \\ -\omega & \frac{-r_p}{L_p} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{pd} \\ i_{pq} \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} V_{pd} & -V_{cd} & -V_{rd} \\ V_{pq} & -V_{cq} & -V_{rq} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 10})$$

Le bloc diagramme de IUPFC shunt est donné par la (**Figure II-4**)ci-dessous :

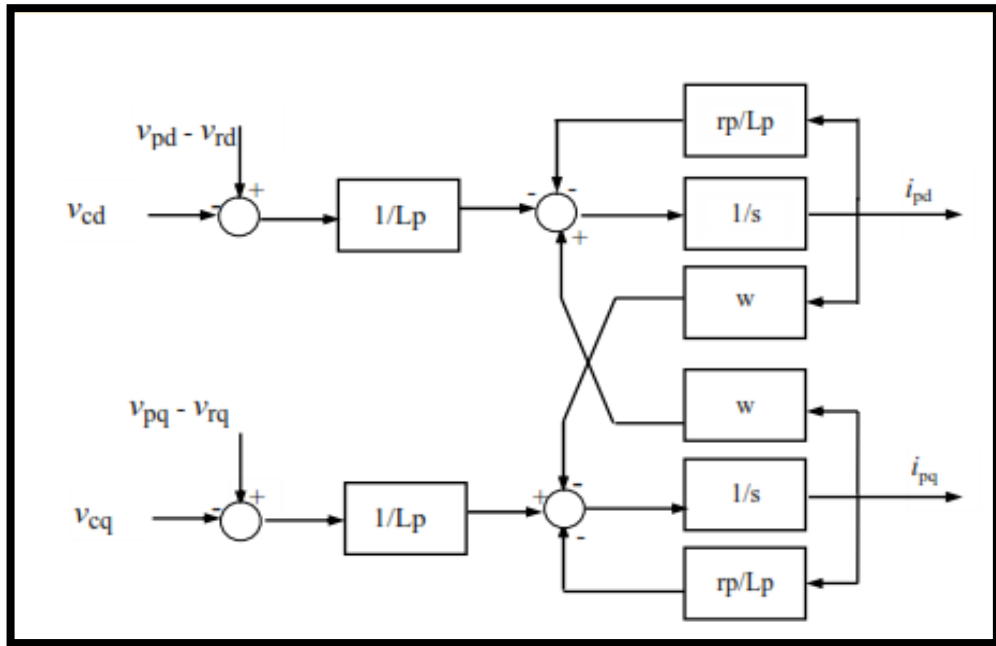


Figure II-4 : modèle mathématique de système de L'UPFC shunt.

II.3. Équation dynamique de circuit continue

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} C \frac{dV_{dc}^2}{dt} &= p_c - p_{cp} \\ p_c &= V_{ca} i_{ra} + V_{cb} i_{rb} + V_{cc} i_{rc} \\ p_{cp} &= V_{pa} i_{pa} + V_{pb} i_{pb} + V_{pc} i_{pc} \end{aligned} \quad (\text{II. 11})$$

Avec:

C : Capacité du condensateur du circuit continu;

V_{dc} : Tension continue;

P_c : Puissance absorbée par le compensateur série et fournie au circuit commun.

P_{cp} : Puissance active fournit par le compensateur parallèle et absorbée par le compensateur série.

Les équations dynamiques de circuit continue s'écrit

$$\frac{dv_{dc}}{dt} = \frac{3}{2 \cdot C v_{dc}} \cdot (V_{cd}i_{rd} + V_{cq}i_{rq} - V_{pd}i_{pd} + V_{pq}i_{pq}) \quad (\text{II. 12})$$

$$i_{rd} = i_{sd} + i_{pd}$$

$$i_{rq} = i_{sq} + i_{pq}$$

II.3.1 Calcul des puissances active et réactive instantanées de L'UPFC

Le calcul des puissances active et réactive instantanées générées et absorbées s'obtient au moyen de la formule classique [22] :

➤ **les puissances active et réactive générées**

$$P_s = \frac{3}{2} (V_{sd}i_{sd} + V_{sq}i_{sq}) \quad (\text{II. 13})$$

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

➤ **les puissances active et réactive absorbée**

$$P_r = \frac{3}{2} (V_{rd}i_{rd} + V_{rq}i_{rq}) \quad (\text{II. 14})$$

$$Q_r = \frac{3}{2} (V_{rq}i_{rd} - V_{rd}i_{rq})$$

II.3.2 Technique de la modulation de largeur d'impulsion onduleur simple

La technique MLI consiste à contrôler la tension et la fréquence du signal fondamentale ainsi que les distorsions dues aux harmoniques et ceci en variant la largeur des différentes impulsions de la tension obtenues après modulation.

La commande MLI compare à chaque instant la porteuse et la tension de commande. Leurs intersections envoient les ordres d'allumage ou d'extinction aux interrupteurs correspondants.

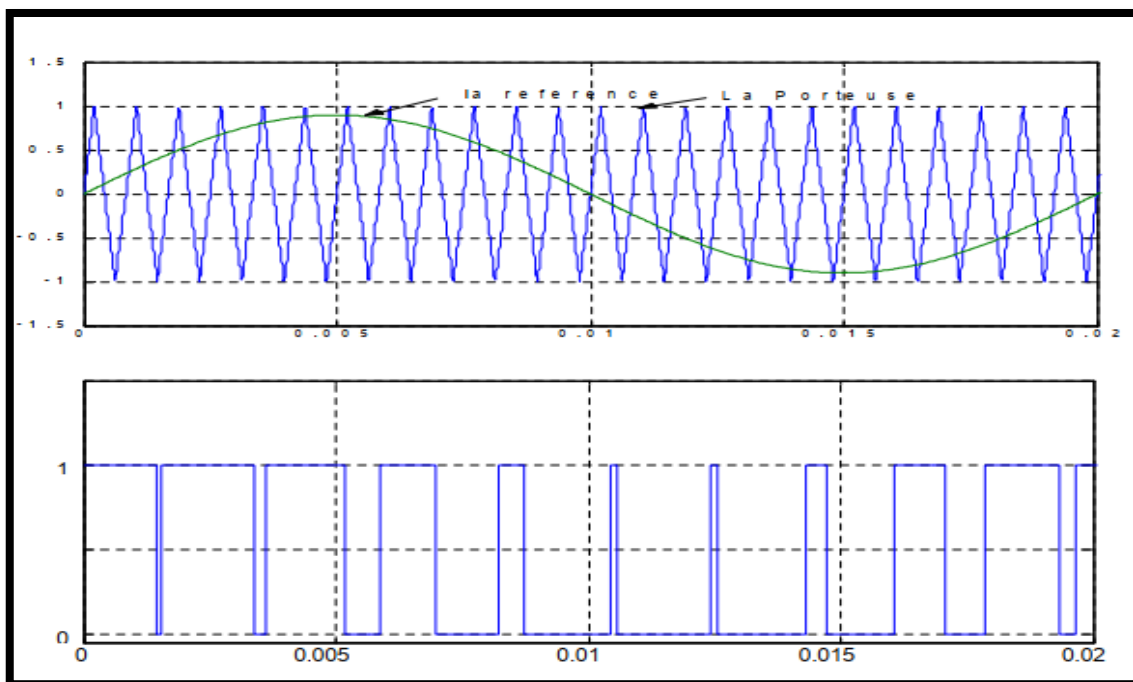


Figure II-5: principe d'un MLI en sin-triangle d'une phase d'un onduleur simple.

II.4 Description du convertisseur statique DC/AC (l'onduleur)

Le circuit électrique des deux onduleurs formant l'UPFC est la suivante:

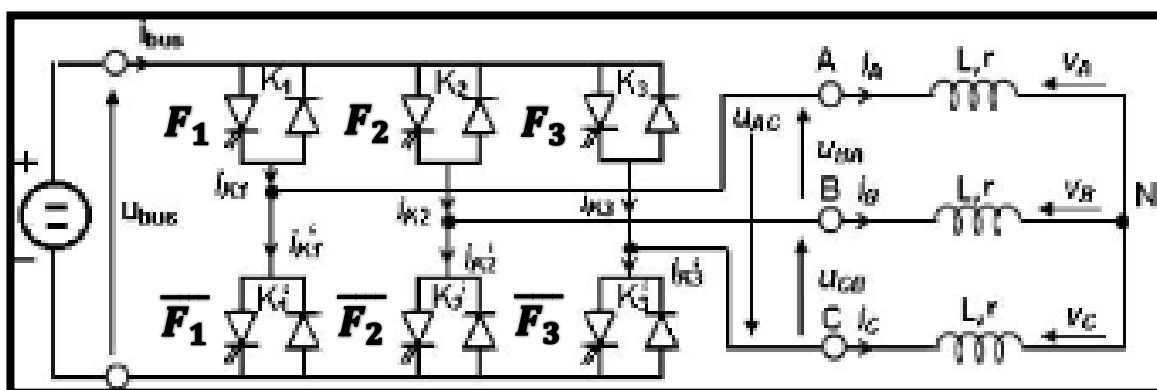


Figure II-6 : Circuit électrique des onduleurs.

Les tensions à MLI de l'onduleur sont exprimées par:

$$V_{AN} = \frac{V_{dc}}{3} (2F_1 - F_2 - F_3) \quad (\text{II. 15})$$

$$V_{BN} = \frac{V_{dc}}{3} (-F_1 + 2F_2 - F_3) \quad (\text{II. 16})$$

$$V_{CN} = \frac{V_{dc}}{3} (-F_1 - F_2 + 2F_3) \quad (\text{II. 17})$$

$$\begin{bmatrix} V_{AN} \\ V_{BN} \\ V_{CN} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II. 18})$$

Les onduleurs sont des convertisseurs statiques assurant la conversion d'énergie électrique de la forme continue à la forme alternative.

Il existe des onduleurs:

- Non autonomes : la fréquence et la forme d'onde sont imposées par la source du alternatif « le réseau »;
- Autonomes : la fréquence et la forme d'onde sont imposées par la commande et la source du coté continu;

On distingue deux grands types d'onduleurs:

- Les onduleurs de tension: alimenté par une source de tension continue;
- Les onduleurs de courant : alimenté par une source de courant continu.

Il existe plusieurs types de commande permettant de commander les convertisseurs statiques. Le choix de l'une ou l'autre de ces commandes dépend principalement de l'application envisagée. Les convertisseurs utilisant la modulation de largeur d'impulsion (MLI) sont très flexibles, ils peuvent générer une tension de n'importe quelle forme, et de n'importe quelle fréquence et de n'importe quelle phase. une autre raison justifiant l'emploi des convertisseurs MLI est qu'ils peuvent générer des tensions sinusoïdales à t0 Hz, par conséquent on peut les installer dans un réseau de distribution, en recourant à des petits filtres harmoniques de quelques kilohertz [22][23].

II.5 Découplage par régulateur PI

La régulation classique type proportionnelle intégrale (PI) est la technique la plus répandue à l'échelle industrielle, cela est dû évidemment à la simplicité de sa mise en œuvre, de ses performances acceptables. tel son coût réduit par rapport à ceux utilisées dans les techniques avancées.

Les performances des régulateurs PI sont obtenues par un choix judicieux de ses paramètres «Kp. Ki», qui représentent respectivement le gain proportionnel et le gain intégrale [24].

D'après les deux systèmes d'équation (II.7), et (II.10), on voit qu'il y a un couplage entre les deux composantes du courant, pour pouvoir aboutir à une commande aisée du système. Il est indispensable de procéder à un découplage des deux composantes. Une inspection de toutes les équations du système (II.7), nous mène directement à la règle qui nous fournira une commande par découplage des courants i_d et i_q . Ainsi le vecteur des tensions de sortie de l'onduleur série peut être commandé de la manière suivante :

On pose :

$$\begin{aligned} X_1 &= \frac{1}{L} (V_{sd} - V_{cd} - V_{rd}) \\ X_2 &= \frac{1}{L} (V_{sq} - V_{cq} - V_{rq}) \end{aligned} \quad (\text{II. 19})$$

$$\begin{aligned} X_1 &= \left(K_p + \frac{K_i}{p} \right) (i_{sd}^* - i_d) - \omega i_{sq} \\ X_2 &= \left(K_p + \frac{K_i}{p} \right) (i_{sq}^* - i_q) - \omega i_{sd} \end{aligned} \quad (\text{II. 20})$$

X_1 et X_2 étant les sorties des deux régulateurs PI données par les courants i_{sd} et i_{sq} respectivement.

En substituant les équations (II.19) et (II.20) dans le système d'équations (II.7), on aboutit à un système de deux équations découplées avec les fonctions de transfert en boucle fermée suivantes :

$$\begin{aligned} F_{11}(P) &= \frac{i_{sd}(P)}{i_{sd}^*(P)} = \frac{K_1 + K_p P}{K_1 + \left(\frac{r}{L} + K_p \right) P + P^2} \\ F_{22}(P) &= \frac{i_{sq}(P)}{i_{sq}^*(P)} = \frac{K_1 + K_p P}{K_1 + \left(\frac{r}{L} + K_p \right) P + P^2} \end{aligned} \quad (\text{II. 21})$$

Le schéma bloc de ce système est représenté sur la **(Figure II-7)**. Le découplage est réalisé par la séparation du système en deux boucles fermées, où le contrôle est optimal par rapport au critère de l'erreur dynamique quadratique si les gains sont maximaux. Le système se transforme en un système du premier ordre.

$$\begin{aligned} K_{popt} &= K_{pmax} \\ K_{iopt} &= K_{imax} \end{aligned} \quad (\text{II. 22})$$

En traduisant la condition simple suivante liant les paramètres du régulateur

$$K_1 = \frac{r}{L} K_p \quad (\text{II. 23})$$

Nous obtenons la fonction de transfert de premier ordre avec une constante de temps

$$T = 1/K_p$$

$$F_{11}(P) = F_{22}(P) = -\frac{K_p}{K_p + P} \quad (\text{II. 24})$$

La détermination de la constante de temps dépend des changements admissibles maximaux des grandeurs de contrôle V_{sd} et V_{sq} pour le compensateur série et V_{pd} et V_{pq} pour le compensateur parallèle. Etant données les équations (II.20) et un choix convenable de la valeur de T (T =5 ms), les gains K_p et K_i peuvent être obtenus comme suit:

$$K_p = \frac{1}{T}$$

$$K_i = \frac{r}{L} \cdot \frac{1}{T} \quad (\text{II. 25})$$

➤ Réglage de la tension (V_{dc})

Le diviseur capacitif n'est pas tout à fait fiable pour maintenir le niveau intermédiaire de la tension à niveau stable. Mais dans l'utilisant des onduleurs dans le domaine des FACTS .Ce problème est contourné par un circuit de réglage qui maintient le niveau de tension à une valeur plus stable.

Le circuit intermédiaire à tension continue comporte les condensateurs tampon c_1 et c_2 qui sert au maintien de la tension. Le niveau de la tension V_{dc} doit être constant aussi que possible parce que lors des échanges de puissance active, les condensateurs tampon jouent un rôle primordiale. Si l'on soutire trop de courant à partir des condensateurs, il peut se produire une chute de tension.

D'autre part, si l'on charge trop les condensateurs. le niveau de la tension peut augmenter.

La (**Figure II-7**), illustrent la représentation schématique du réglage de cette tension continue ainsi le découplage entre les deux composantes du courant utilisant un régulateur PI pour le compensateur série et parallèle.

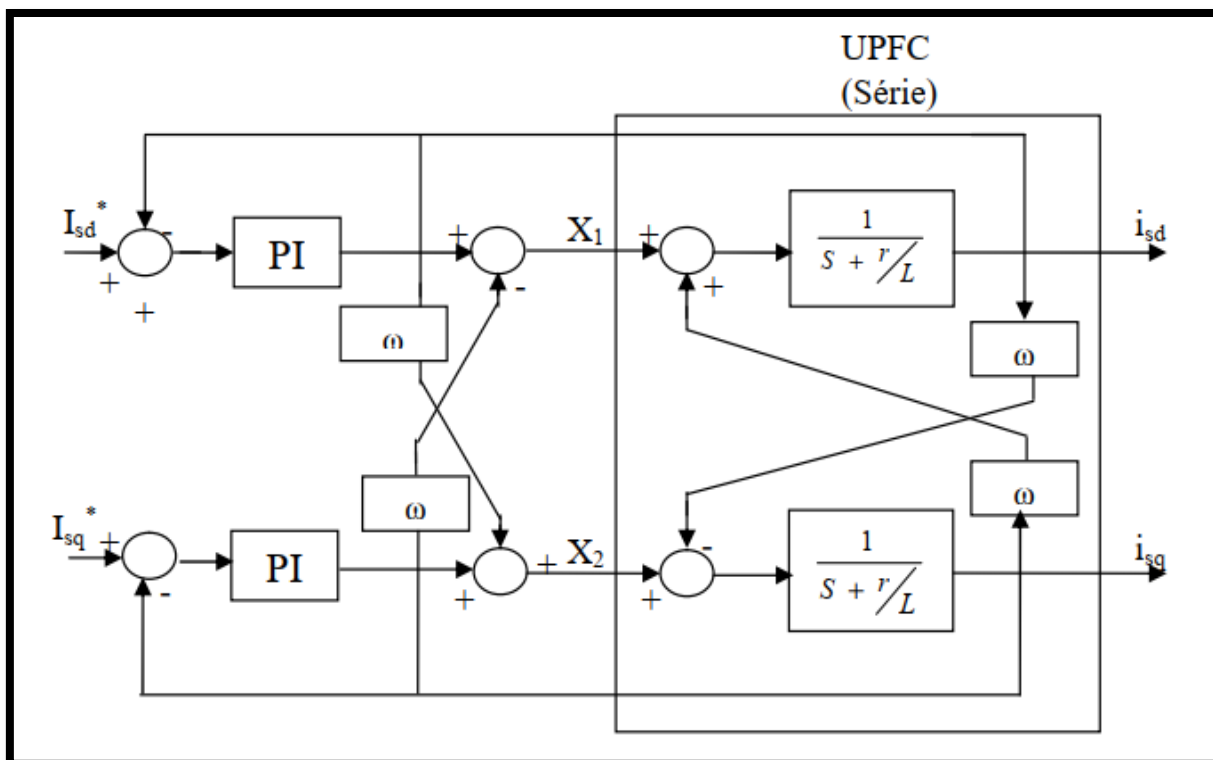


Figure II-7: schéma bloc de la commande de L'UPFC (série).

II.6 Conclusion

La modélisation du processus nous a permis de mettre en équation les différents paramètres du système. Le résultat de cette procédure nous amène à la remarque suivante :

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 modèle est simplifié, les calculs deviennent faciles mais s'éloignent de la réalité. Un choix très difficile consiste à garder les phénomènes les plus importants et en négligeant les paramètres moins contraignants.

Chapitre III
Commande Classique du
Compensateur de Flux de
Puissance UPFC

III.1 Introduction

Dans cette partie, nous allons présenter les principaux modes et les différentes configurations de réglage et de contrôle de l'UPFC, ensuite on développera séparément les circuits de réglage de l'UPFC série et shunt. Après dans la seconde partie de ce chapitre on va présenter le réglage de L'UPFC en utilisant des régulateurs PI découplés, ainsi que la synthèse de ce régulateur. A la fin de ce chapitre on présente les résultats de simulation sous Matlab et Simulink.

III.2 Configuration du mode de réglage de l'UPFC

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

La possibilité de séparation est justifiée par deux facteurs principaux qui sont :

- Premièrement, le couplage entre les deux convertisseurs sur la ligne de transmission est assez faible;
- Deuxièmement, la variation dynamique de la tension du coté du continu DC est dominée par le convertisseur parallèle. La justification est prise par le fait que la variation de la tension du coté DC, est beaucoup moins sensible au contrôle du convertisseur série. C'est-à-dire, le convertisseur série peut être considéré comme une source de tension pure de système de transmission.

Le contrôle du convertisseur parallèle dans l'UPFC est très similaire à celui du compensateur SVC. Donc, pour contrôler le flux des puissances active et réactive 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-1**) illustre le mode choisi pour la branche série ainsi que pour la branche shunt. Les entrées sont les composants d-q, des tensions à la sortie des branches série ou shunt et les sorties sont les composants, d-q des courants de ligne de transport I_d , I_q .

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

contrôle PI pour le:

- Contrôle de la branche série;
- Contrôle de la branche Parallèle.

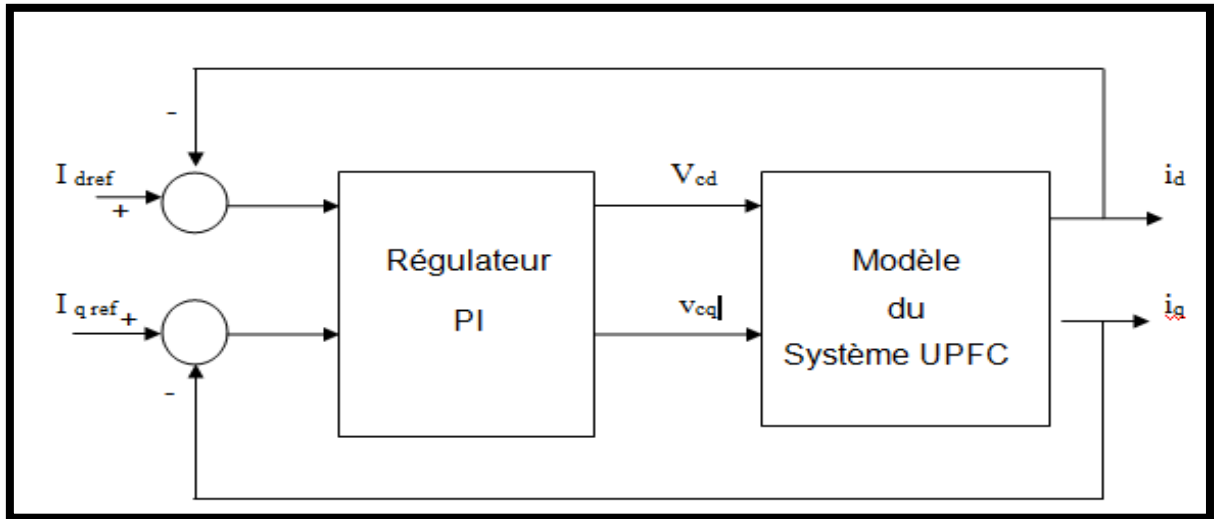


Figure III-1: Schéma de contrôle de l'UPFC.

III.3 Description du système de commande de l'UPFC SERIE

Les puissances active et réactive sont données par les relations suivantes :

$$P = \frac{3}{2} (V_{sd} \cdot i_{sd} + V_{sq} \cdot i_{sq}) \quad (\text{III. 1})$$

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

où:

$$i_{rd} = i_{sd} + i_{pd} \quad (\text{III. 3})$$

$$i_{rq} = i_{sq} + i_{pq} \quad (\text{III. 4})$$

D'après le système d'équations, en utilisant les puissances active et réactive (P^*, Q^*), nous obtenons :

$$i_d^* = \frac{2}{3} \left(\frac{P^* \cdot V_{rd} - Q^* \cdot V_{rq}}{\Delta} \right) \quad (\text{III. 5})$$

$$i_q^* = \frac{2}{3} \left(\frac{P^* \cdot V_{rq} + Q^* \cdot V_{rd}}{\Delta} \right) \quad (\text{III. 6})$$

où :

$$\Delta = V_{rd}^2 + V_{rq}^2 \quad (\text{III. 7})$$

L'objectif de contrôle est d'avoir des puissances active et réactive à l'arrivée de la ligne (*Receiving END*) identiques à celle des consignes (P^*, Q^*) en forçant les courants de ligne (i_{sd}, i_{sq}) de suivre correctement leurs références[25].

III.4 Schéma de contrôle du système UPFC

III.4.1 Schéma de contrôle du système UPFC série

Les courants de référence sont calculés à partir les équations (III.5) et (III.6). Ces valeurs sont ensuite comparées aux courants de lignes réels, les sorties des correcteurs PI en courant

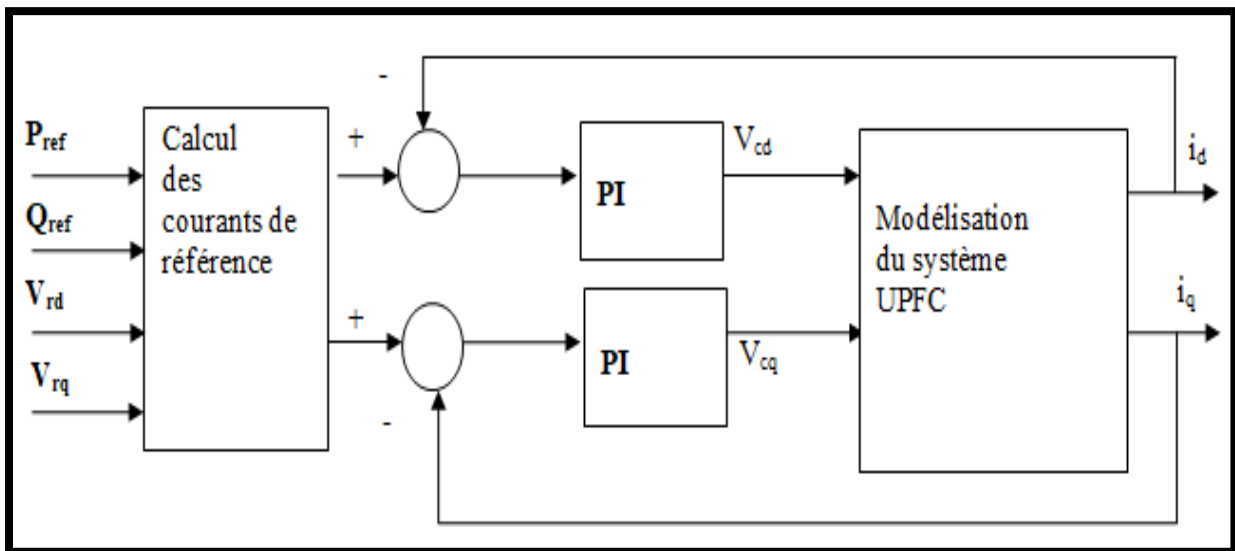


Figure III-2: Schéma de contrôle du système UPFC série.

III.4.2 Schéma de contrôle du système UPFC Shunt

Le schéma de contrôle de l'UPFC shunt détermine le courant shunt I_{pd} et I_{pq} . Dans le contrôleur shunt, la tension continue DC est utilisée pour déterminer les composants des pertes des puissances P_{loss} .

Remarque :

Pour faciliter la synthèse des réglages et des commande dans ce travail, on se limite au traitement de l'UPFC Série, la tension de point de départ V_s est égale a la tension du point d'arrivée V_r et les réponses des active et réactive dans chacun de deux points sont identiques.

III.5 Contrôle avec un PI-Découplé

Les deux régulateurs fournissent les tensions de commande (V_{cd} , V_{cq}) et par transformation inverse du Park, on obtient les tensions triphasées (V_{ca} , V_{cb} , V_{cc}) qui sont utilisées comme tension de référence de l'onduleur série à commande MLI.

En examinant les équations précédentes, on remarque qu'il existe une interaction entre les deux boucles des courants causée par le terme de couplage (ω).

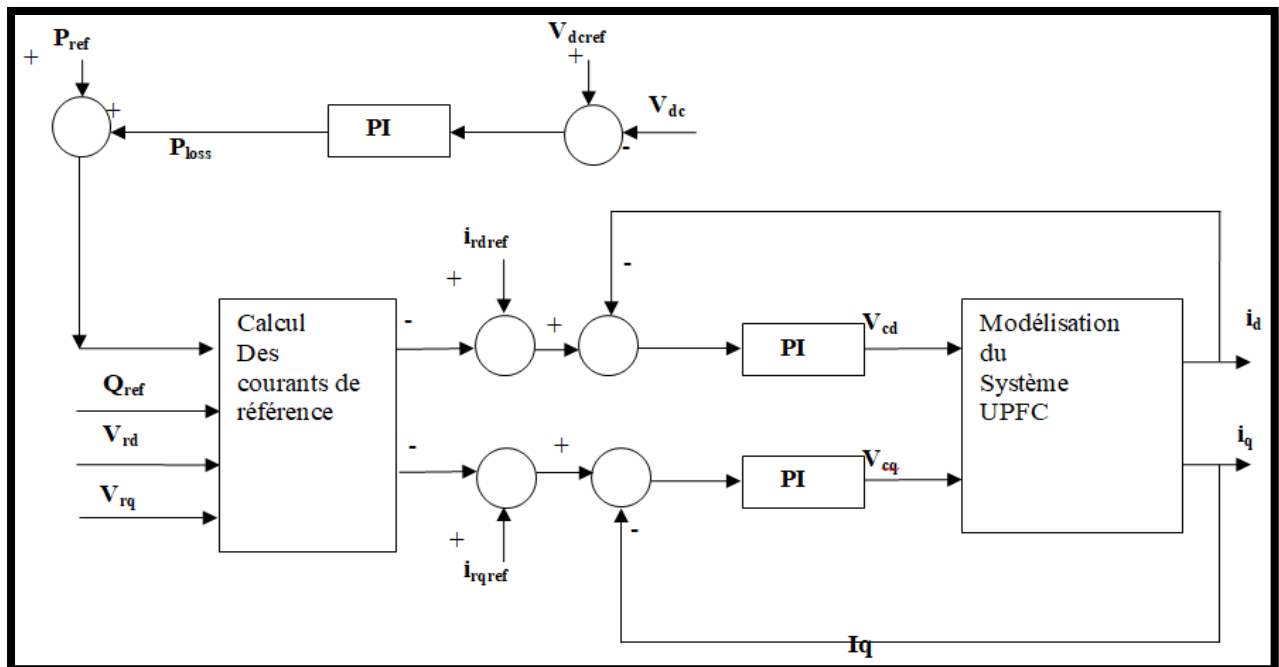


Figure III-3: Schéma de contrôle de la partie shunt et la branche continue de L'UPFC.

Pour aboutir à une commande fiable du système, il est préférable de prévenir à un découplage de deux composants. Bien sûr, pour diminuer l'interaction entre la puissance active et réactive, un découplage de deux boucles est indispensable. Il s'obtient en enlevant le terme(ω) à travers une contre réaction

La fonction de découplage est de soustraire le produit (ωL) et I_q du régulateur et d'ajouter (ωL) et I_d au régulateur selon l'axe q.

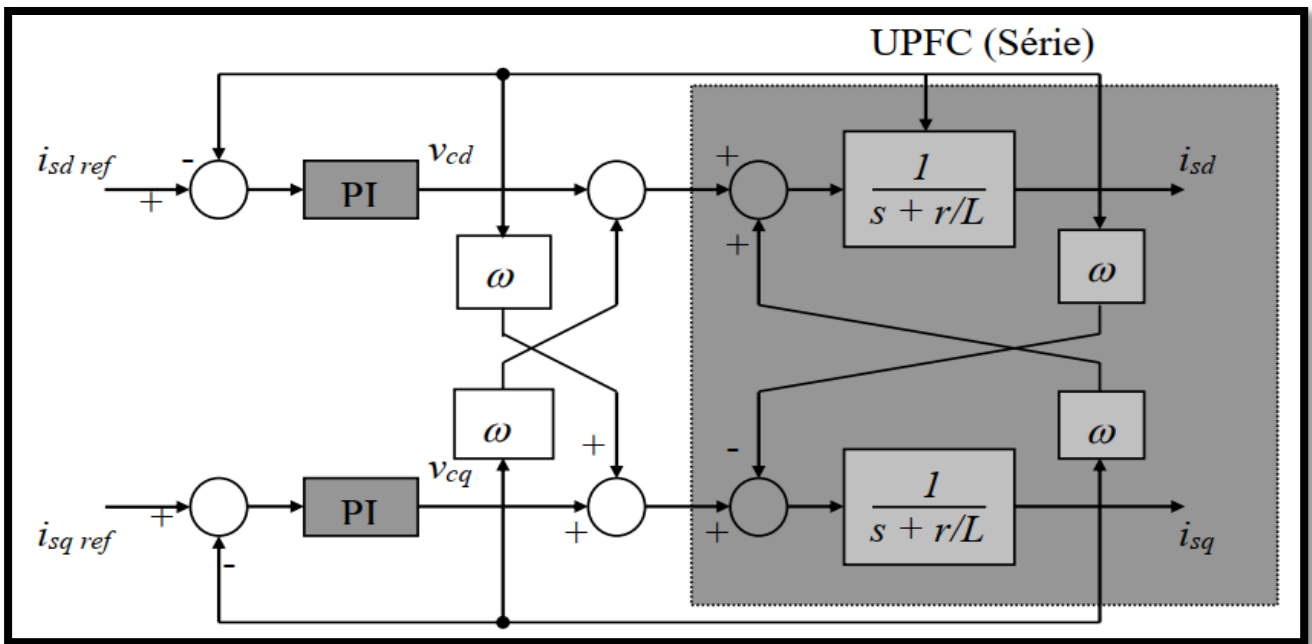


Figure III-4: Commande PI-D de l'UPFC série.

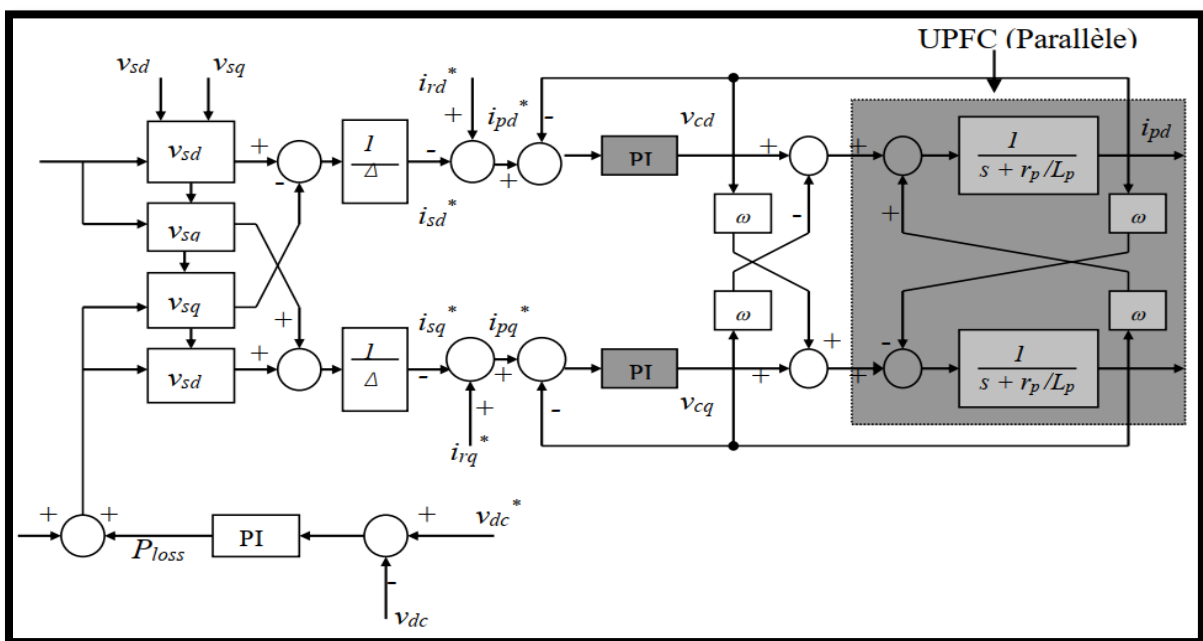


Figure III-5: Commande PI-D de l'UPFC shunt.

III.5.1 Calcul des Paramètres du Régulateur PI

Le système de l'UPFC avec la ligne de Transmission sont représenté par la fonction du transfert suivante :

$$K(S) = \frac{1}{s + \frac{r}{L}} \quad (III. 8)$$

Pour l'UPFC shunt, on utilise (r_p , L_p). Afin de fournir des tensions de commande bien réglées, nous allons calculer les paramètres PI. Plusieurs techniques existent pour calculer les Paramètres d'ajustement PI

$$K(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad \text{(III. 9)}$$

Parmi les différentes techniques qui existent, nous proposons celle de Ziegler et Nicols. Elle obéit à plusieurs étapes :

En premier lieu, nous déterminons le gain proportionnel (K_p) et la constante de temps T_i [27][28].

Dans notre cas, on prend $T_i = \infty$. Nous utilisons seulement l'action proportionnelle K_p en la variant de 0 jusqu'à une valeur critique (k_{cr}). Le gain critique (K_{cr}) correspond à une période critique (P_{cr}) qui est déterminée expérimentalement.

Ziegler et Nicols [28] ont suggéré qu'on peut tirer les valeurs de K_p , T_i à partir des valeurs suivantes correspondant au type de régulateur :

Table III-1: Paramètres du Régulateur PI.

Type de régulateurs	K_p	T_i
PI	$0.45 K_{pc}$	$0.83 T_c$

III.6 Résultats de la Simulation

Nous avons choisi les paramètres du modèle mathématique comme suit [29][30]:

- Tension du réseau (départ) : $V_s = 220V$;
- Tension du récepteur (arrivée) : $V_r = 220V$;
- Tension continu : $V_{dc} = 280V$;
- Fréquence : $F = 50Hz$;
- Résistance (Ligne=Partie shunt): $r_p = 0.4\Omega$;
- L'inductance (Partie Shunt): $L_p = 10 mH$;
- Résistance (Ligne=Partie série): $r_p = 0.8\Omega$;
- L'inductance (Partie Série): $L = 10 mH$;

- Capacité de circuit DC : $C = 200\mu F.$

La simulation a été réalisée sous l'environnement MATLAB 7/ SIMILINK 6. Les **(Figures III-6) et (Figures III-7)**, montrent les réponses des puissances active et réactive, des courants et des tensions d'un UPFC série avec l'implémentation d'un régulateur PI-Découplé.

La **(Figures III-6)** montrent les réponses aux échelons des puissances active et réactive respectivement. Initialement, le système est dans un 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 **(Figure III-6)**.

A l'instant $t = 0.3$ s, la puissance réactive de référence Q^* bascule à 500 Var, quand la puissance active de référence est tenue constante jusqu'à 0.5 s où elle passe à son tour à 1000 W.

On remarque dans la **(Figure III-9)**, une perturbation de la puissance active au moment où la puissance réactive passe de -500 Var à 500 Var ($t = 0.3$ s) et une perturbation de la puissance réactive au moment où la puissance active passe de -1000 W à 1000 W ($t = 0.5$ s).

Ces perturbations sont dues au couplage existant entre le courant direct i_d et le courant en quadrature i_q . Pour l'expliquer, on peut réécrire les équations (III.5) et (III.6) de la façon suivante :

$$\frac{di_{sd}}{dt} = \omega \cdot (1 - \varepsilon) \cdot i_{sq} - \frac{r}{L} \cdot i_{sd} + \frac{1}{L} (v_{sd} - v_{cd} - v_{rd}) \quad \text{(III. 10)}$$

$$\frac{di_{sq}}{dt} = -\omega \cdot (1 - \varepsilon) \cdot i_{sd} - \frac{r}{L} \cdot i_{sq} + \frac{1}{L} (v_{sq} - v_{cq} - v_{rq}) \quad \text{(III. 11)}$$

Où le terme ε représente le paramètre de découplage. Par exemple quand ($\varepsilon = 1$), on obtient un découplage parfait et quand ($\varepsilon = 0$), alors les équations (III.8) et (III.9) seront identiques aux équations (III.5) et (III.6).

En pratique, ε est supérieur à 1. Ce qui revient à dire que le paramètre de découplage est supérieur au paramètre de couplage et le système est surcompensé.

Dans ce cas, les performances du système diminuent car le couplage réapparaît. Ce qui

engendre un temps de réponse assez lent du système. Ceci est dû à ses facteurs non-linéaires.

Les onduleurs à MLI sont la cause de ces déviations. Car, ils sont incapables de produire les signaux continus dont a besoin le découplage. Ce qui fait croître l'erreur au niveau des régulateurs PI-D. Ces régulateurs prennent approximativement une moyenne de 22 ms pour réduire ces déviations jusqu'à ce que les puissances active et réactive atteignent leur niveau de référence.

Le réglage de la tension continue est primordial si l'on veut garantir le bon fonctionnement de notre système.

En plus de pouvoir absorber ou fournir de la puissance réactive au réseau, il doit aussi pouvoir fournir ou absorber de la puissance active venant de l'onduleur série. Ce fonctionnement peut poser des problèmes de stabilité.

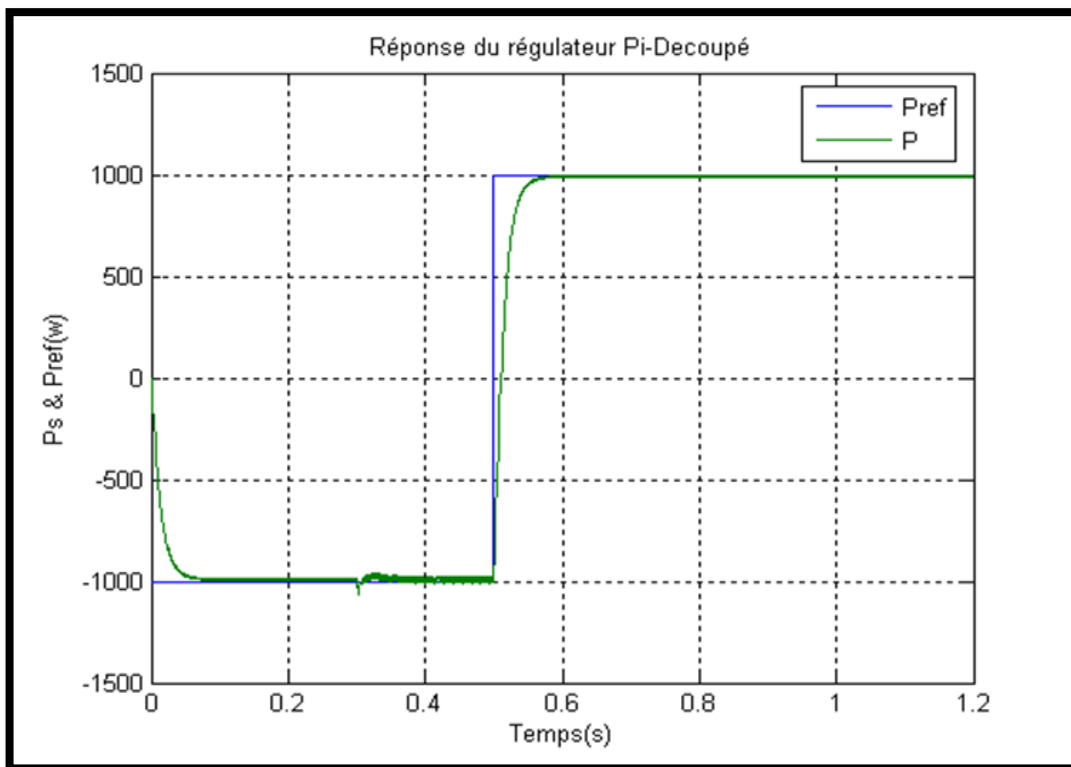


Figure III-6: Réponses des puissances active.

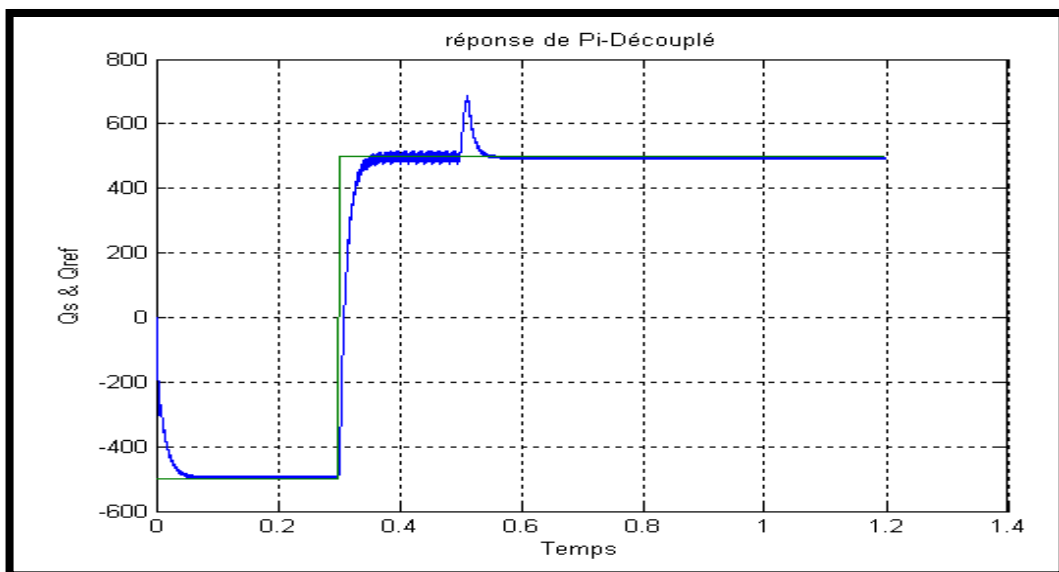


Figure III-7: Réponses des puissances réactive.

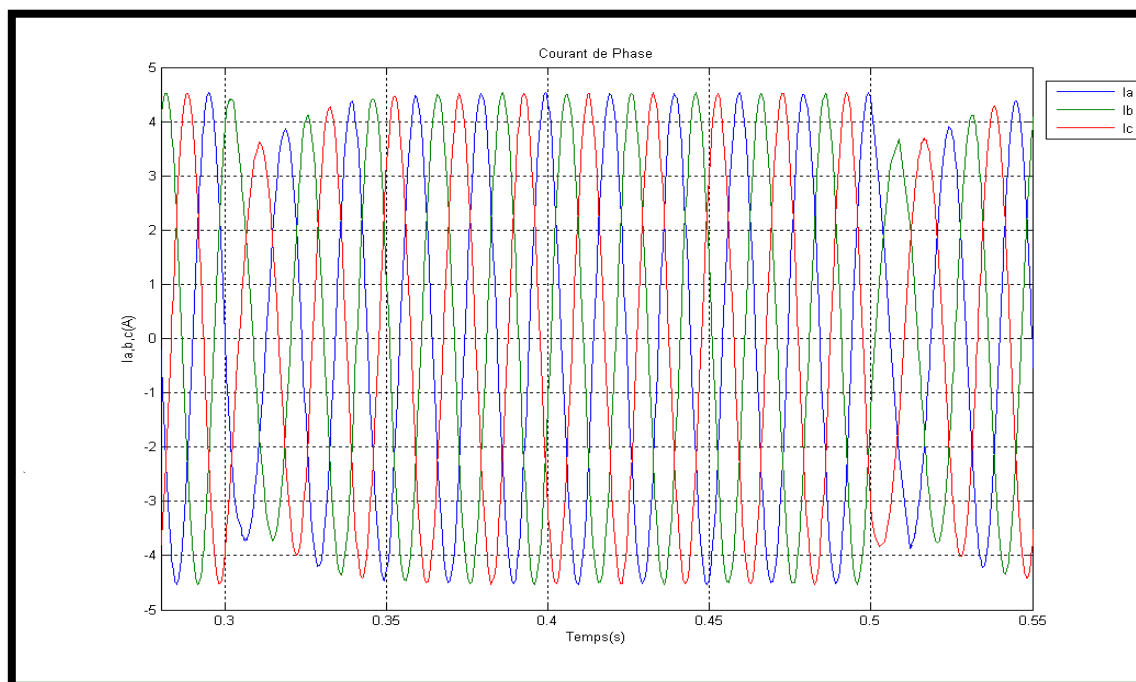


Figure III-8: Courant de phase.

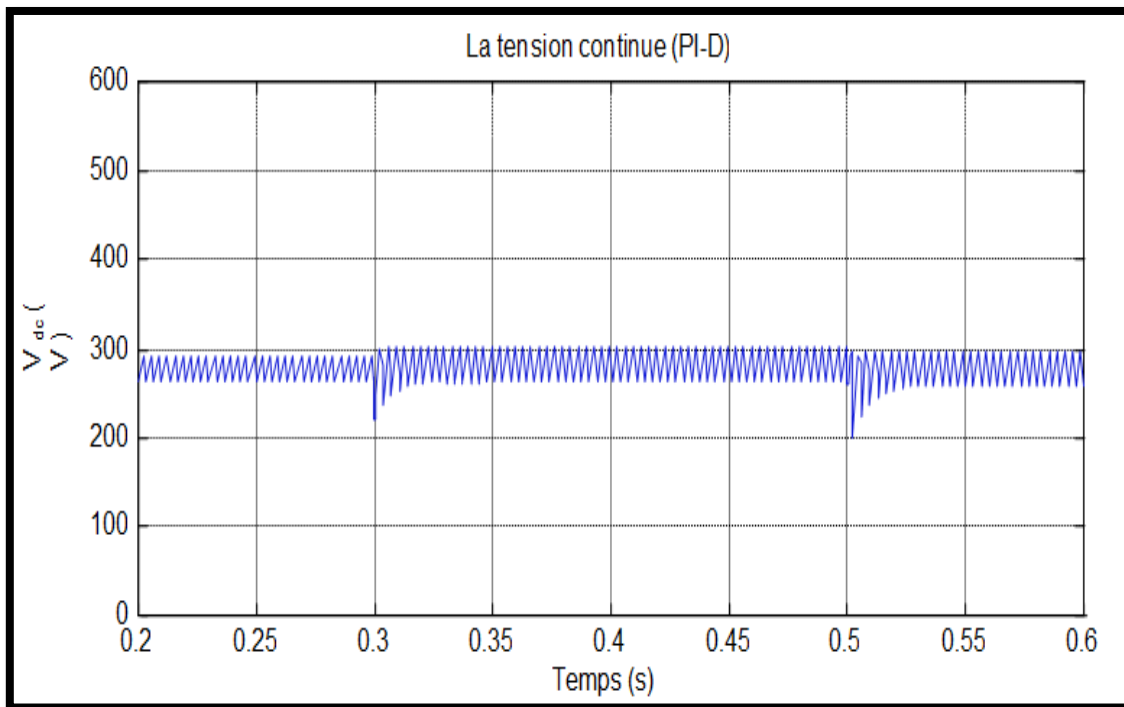


Figure III-9: Comportement du réglage de la tension continue lors d'une variation brusque de la puissance active.

On peut vérifier la réponse de l'asservissement pas uniquement en poursuite, mais également en régulation en ajoutant une perturbation. pour tester la stabilité du système, on a donc introduit une perturbation d'une durée de 0.02s et d'amplitude 2 A. Nous remarquons que le système n'est pas influent par la perturbation et est resté stable. La (Figure III-9) traduit respectivement les réponses des puissances actives et réactive en présence de cette dernière.

La perturbation n'influence pas les réponses des puissances active et réactive, comme on peut le constater. Le comportement par rapport à la grandeur de consigne est tout à fait satisfaisant.

L'action de la perturbation se fait légèrement ressentir sur la (Figure III-10), où le rejet se fait graduellement ainsi que sur la même Figure, où il s'accompagne d'un dépassement plus ou moins important.

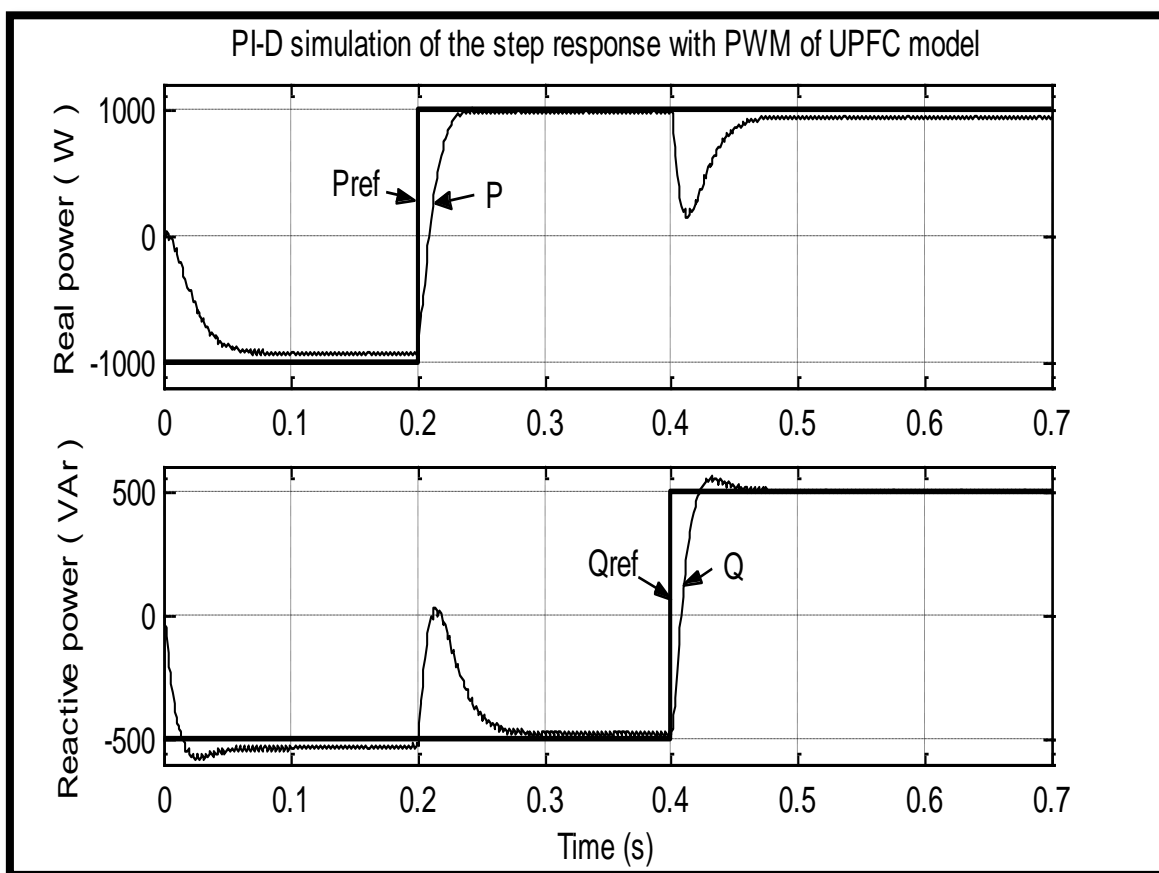


Figure III-10: La réponse indicielle des puissances actives et réactives avec découplage.

Pour tester la robustesse du régulateur proportionnel intégral, on a varié la réactance X_L de la ligne de transmission à $\pm 35\%$ de sa valeur nominale.

La (**Figure III-12**) montre une dégradation plus ou moins importante des performances du régulateur PI. Cette dégradation peut conduire à une perte de la stabilité garantie en analogique.

La réponse des puissances active et réactive à $+35\%$ de X_L n'a pu être relevée. Le message d'erreur donné par " Matlab command" indiquait la saturation de la commande lors des variations brusques des signaux de consigne.

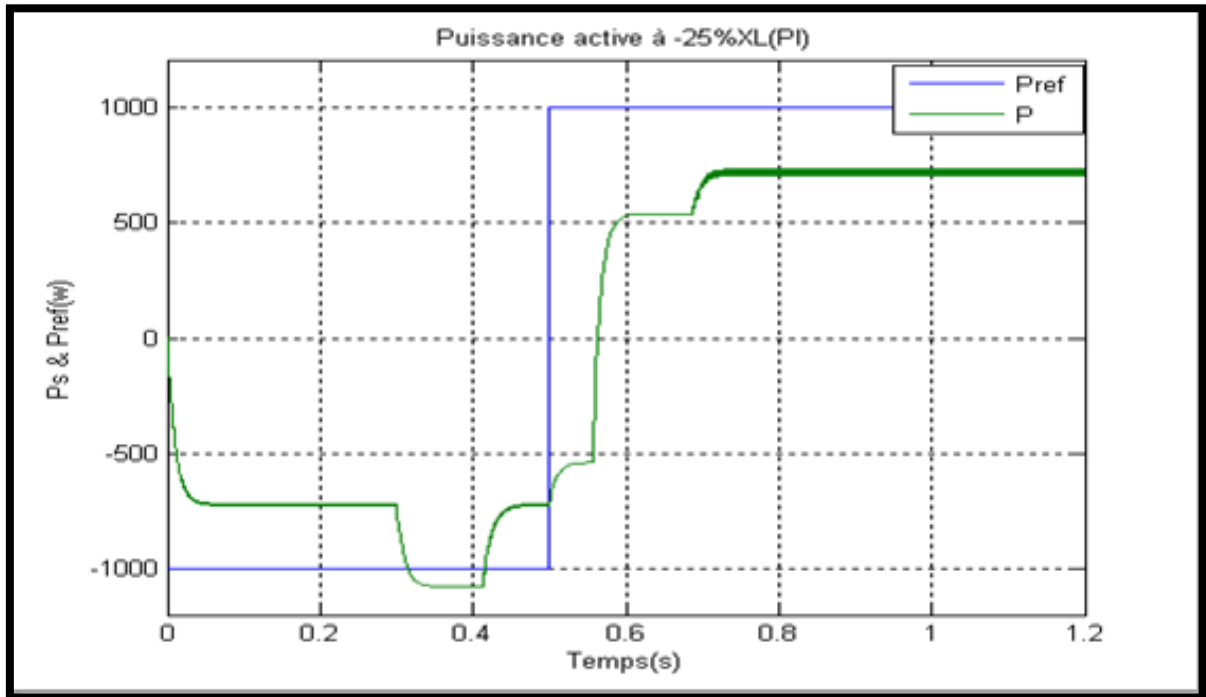


Figure III-11: Comportement des puissances active et réactive.

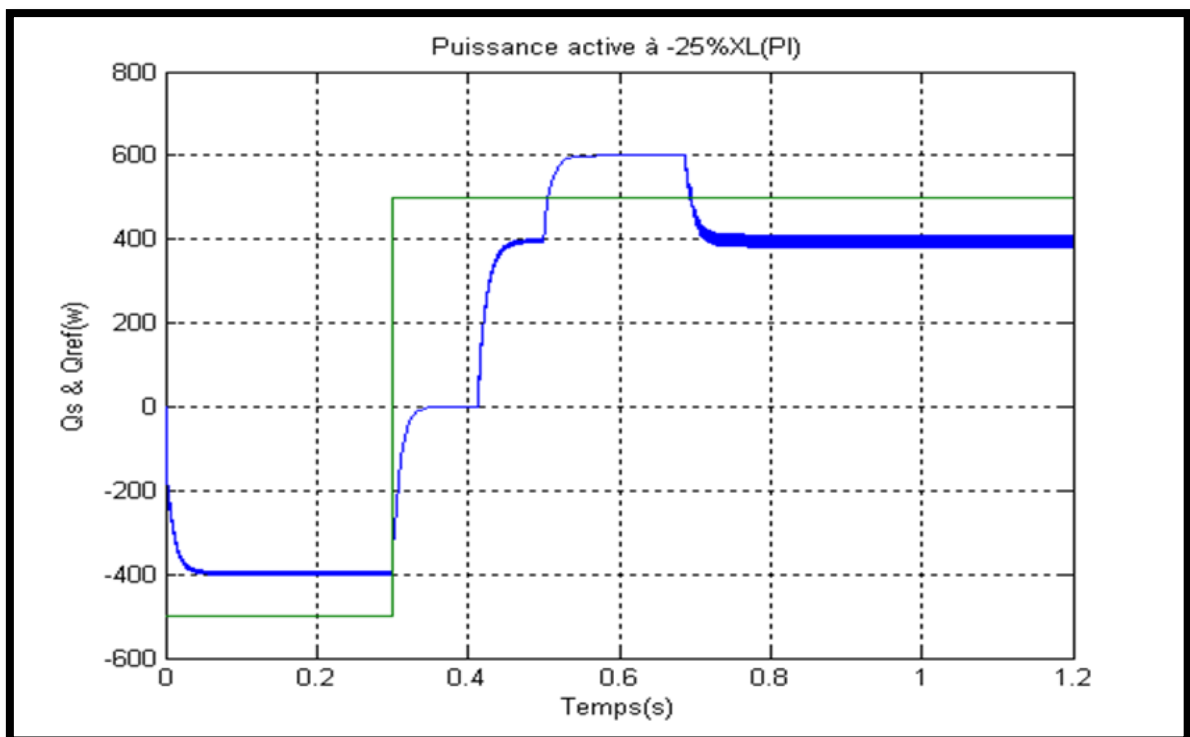


Figure III-12: Comportement des puissances active vis-à-vis d'une variation de la réactance.

III.7 CONCLUSION

On a consacré ce chapitre au contrôle de la puissance active et réactive par un réglage de courants directs selon une stratégie qui permet d'analyser les poursuites des systèmes (UPFC).

A partir des résultats de simulation, nous constatons que le régulateur PI découplé est presque parfait.

La poursuite des puissances est obtenue avec un temps de réponse rapide.

L'analyse de ces résultats, nous permet aussi de conclure sur l'utilisation de la modélisation dans le repère d-q qui améliore la réponse transitoire de l'UPFC en réduisant l'interaction entre les puissances active et réactive.

Le contrôleur PI peut causer une large interaction entre les boucles des courants et un dépassement important au niveau des puissances. Pour réaliser un découplage parfait, il faut que les paramètres des lignes soit connus.

Le régulateur Pi-Découplé pourrait être la commande idéale pour le système UPFC, si, la variation de l'inductance X_l n'a pas affecté ses performances.

Une méthode est développée dans les chapitres suivants.

Chapitre IV

Commande RST

IV.1 Introduction

Contrairement aux régulateurs analogiques qui sont réalisés à base de composants électroniques, Les régulateur numérique sont illustrés par des programmes en utilisant des calculateurs dotés des microprocesseurs (Carte DSP, FPGA, Microcontrôleurs, Automates Programmables...). En plus, pour changer les paramètres d'un régulateur analogique, on doit changer les composants électroniques, mais pour un régulateur numérique, cette opération facile à réaliser en changeant les valeurs numériques du régulateur. Dans ce chapitre, on va s'intéresser au dimensionnement et à la conception des régulateurs numériques de type (P, PI, PID et retour d'état numérique). Noter que les avantages principaux du régulateur numérique par rapport au régulateur continu sont :

- **Souplesse;**
- **Précision.**

Le schéma fonctionnel général d'un système asservi numérique est présenté sur la (Figure IV-1) suivante :

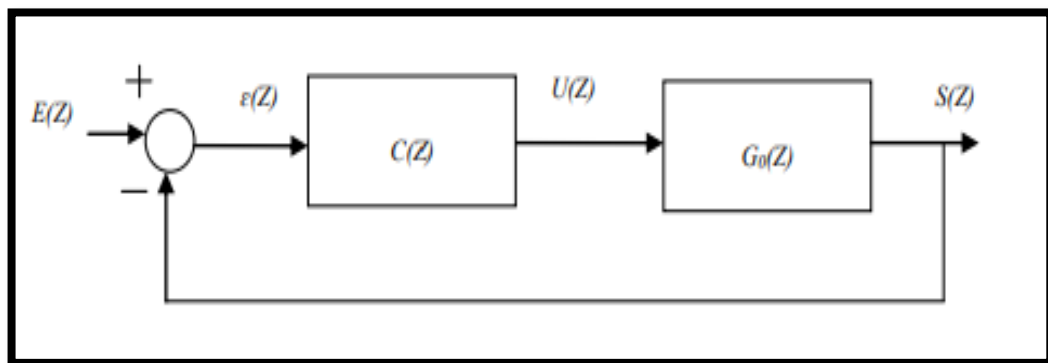


Figure IV-1: Schéma fonctionnel général d'un système asservi numérique.

$E(Z)$: Entrée de consigne (Sortie désirée) ;

$\varepsilon(Z)$: Erreur entre la sortie désirée et la sortie réelle du système ;

$U(Z)$: Signal de commande du système ;

$S(Z)$: Sortie réelle du système ;

$C(Z)$: Fonction de transfert numérique du régulateur ;

$G_0(Z)$: Fonction de transfert numérique du système muni de son bloqueur[31][36][37].

IV.2 Régulateurs numériques

Le développement extraordinaire des microprocesseurs a provoqué des changements importants dans la conception des systèmes de commande/régulation. Leur puissance de calcul et leur faible coût les rendent aptes à prendre également en charge les aspects commande/régulation avec des performances nettement supérieures à celle de régulateur analogique. Pratiquement tous les systèmes de commande / régulation construits actuellement utilisent des microprocesseurs. Pour tirer réellement profit des capacités des microprocesseurs, il ne suffit pas de reproduire le comportement des régulateurs PID analogiques, il faut mettre en œuvre des techniques d'automatique spécifiques et plus performantes, développées pour la commande par ordinateur, techniques testées industriellement ces vingt dernières années. Par ailleurs, le développement des logiciels d'automatique et de leur utilisation a permis d'améliorer d'une façon significative l'efficacité de la conception et de la mise en œuvre des systèmes de commande/régulation. La dissémination des PC-machines ouvertes pouvait être facilement complétée avec des coûts d'acquisition à permis d'une part la généralisation de l'usage des logiciels, et a conduit à d'autre part à la création des stations de travail pour l'analyse, la conception, le développement et la mise en œuvre sur des procédés réels de différents types d'algorithmes de commande/régulation.

IV.3 Présentation de la commande RST

Reprenons le schéma classique d'un système asservi numérique avec élément-correcteur :

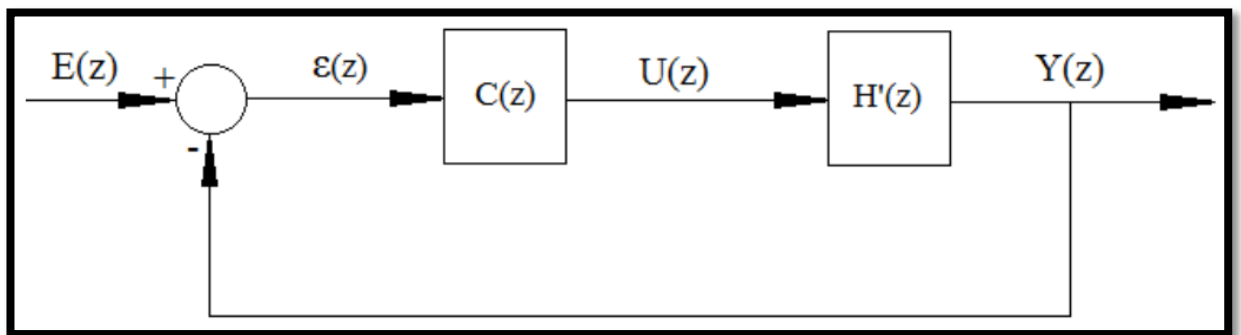


Figure IV-2: Schéma classique d'un système asservi numérique avec élément-correcteur.

Où $H'(z)$ représente le processus $F(s)$ associé à un bloqueur d'ordre zéro [32] :

$$H'(z) = (1 - Z^{-1})Z \left[\frac{F(s)}{s} \right] \quad (\text{IV. 1})$$

Chapitre IV : Commande RST

Les fonctions de transfert du correcteur et du processus peuvent se mettre sous la forme de fonctions rationnelles propres :

$$C(z) = \frac{R(z)}{S(z)} \quad \text{et} \quad H'(z) = \frac{B(z)}{A(z)} \quad (\text{IV. 2})$$

Ce qui nous amène à en déduire une structure plus détaillée du correcteur et du système appelé la structure RST.

La structure RST est la structure de régulateur linéaire la plus générale qui a pour but d'effectuer une régulation en boucle fermée d'un système automatique.

Le régulateur RST est fondé sur une décomposition suivant trois polynômes conduisant à une structure de commande dont le schéma bloc est représenté sur la (**Figure IV-3**) ces trois polynômes qui sont calculés à partir d'une stratégie de placement de pôles pour des systèmes stables ou instables [33].

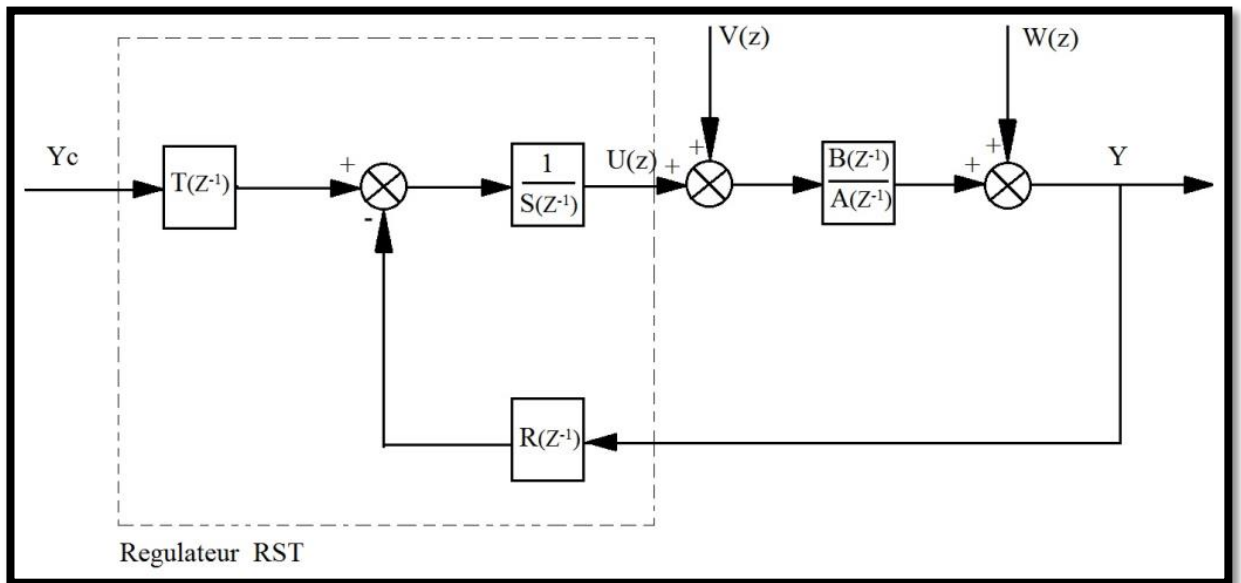


Figure IV-3: schéma du principe d'un système asservi par un régulateur RST.

On note que le procédé est défini par $B(z^{-1})A(z^{-1})$ et Yc représente la consigne, Y est la sortie, $V(z)$ est une perturbation de charge et $W(z)$ traduit des perturbations de mesure avec :

$$A(Z^{-1}) = 1 + a_1(Z^{-1}) + \dots + a_{n_A}(Z^{-n_A}) \quad (\text{IV. 3})$$

$$B(Z^{-1}) = b_1(Z^{-1}) + b_2(Z^{-2}) + \dots + b_{n_B}(Z^{-n_B}) = Z^{-1}B^*(Z^{-1}) \quad (\text{IV. 4})$$

On tenant compte de cette structure on peut déduire la forme générale de la loi de

commande :

$$S(Z^{-1}) U(Z) = S(Z^{-1}) Y_c - R(Z^{-1}) Y \quad (\text{IV. 5})$$

IV.4 Les Avantages de régulateur RST

Le régulateur possède deux degrés de liberté : le premier classiquement défini sur le signal d'erreur consigne/mesure, le second autorisant la poursuite via une trajectoire de référence. La structure du contrôleur permet aussi d'imposer des pôles et certains zéros en boucle fermée [34]. La plupart des boucles d'asservissement mettent en œuvre le classique correcteur PID. Bien que relativement facile à régler, le PID ne permet pas toujours d'obtenir les performances requises, en particulier sur les systèmes :

- À retard pur / temps mort important
- Dont les caractéristiques dynamiques varient au cours du fonctionnement
- D'ordre supérieur à 2 (donc possédant plus d'un mode vibratoire)
- Possédant des zones de non-linéarités (frottements, jeu)

Le correcteur numérique RST (dont le PID est un cas particulier) est bien adapté à ces types de systèmes. Il permet :

- De gérer, sans module complémentaire, le retard pur;
- De commander des systèmes possédant jusqu'à 5 modes vibratoires. (Order 10);
- De gérer de manières distinctes les dynamiques de suivi de consigne et de rejet de perturbation;
- La consigne peut être atteinte selon une trajectoire du 2nd ordre entièrement paramétrable (dépassement, temps de montée);
- D'obtenir une excellente robustesse du réglage, pour s'affranchir des variations dans la dynamique du système (gain, retard, inertie);

Il s'intègre sur toute cible programmable (carte contrôleur, automate programmable, PC)

Sa mise en œuvre s'effectue à partir d'un modèle paramétrique de la boucle et des spécifications des performances à atteindre : dépassement et temps de montée en suivi de consigne et réjection de perturbation.[35][38][39].

IV.5 Application

$$y(z^{-1}) = \frac{b * z^{-1}}{1 + a * z^{-1}} * u(t) \tag{IV.6}$$

$$w_{b0} = \frac{b * z^{-1}}{1 + a * z^{-1}} = \frac{b}{z + a} = \frac{y(z)}{u(z)} \tag{IV.7}$$

Soit la fonction de transfert (BF)

$$w_{bf} = \frac{c * z^{-1}}{1 - d * z^{-1}} = \frac{c}{z - d} = \frac{y(z)}{y_{ref}(z)} \tag{IV.8}$$

On pose:

$$w_{bf}(1) = 1$$

$$u(t) = u(t - 1) - a_1 * y(t - 1) + c_2 * y_{ref} + b_1 * y(t) \tag{IV.9}$$

$$\begin{cases} a_1 = \frac{a}{b} \\ b_1 = \frac{-a + k_1}{b} \rightarrow (k_1 = 1 - c) \\ c_2 = \frac{k_1}{b} \end{cases} \tag{IV.10}$$

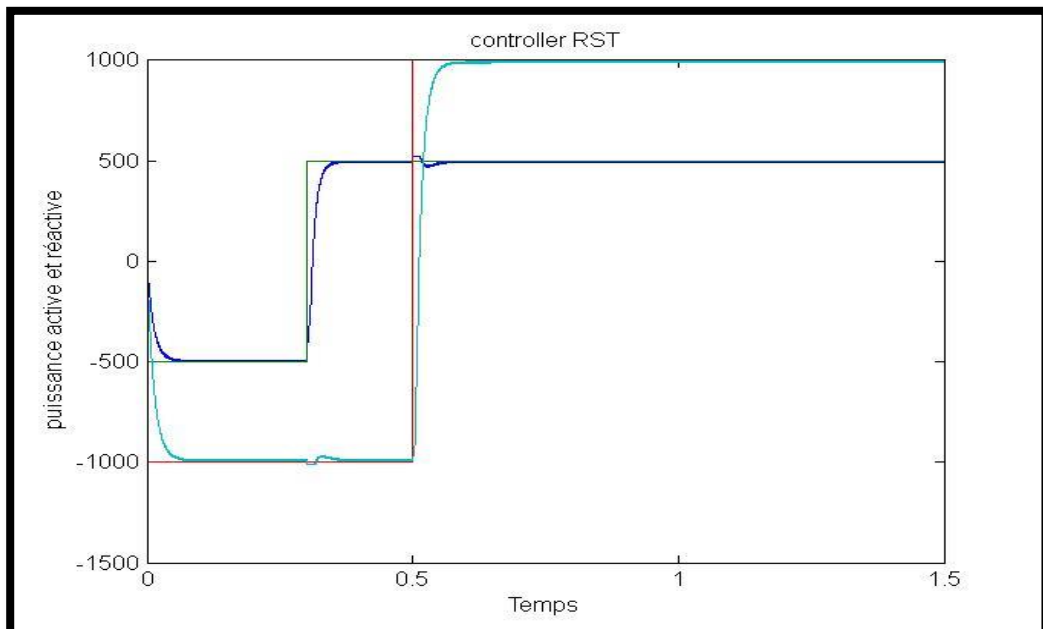


Figure IV-4: puissances active (W) et réactive(VAr) sans perturbation.

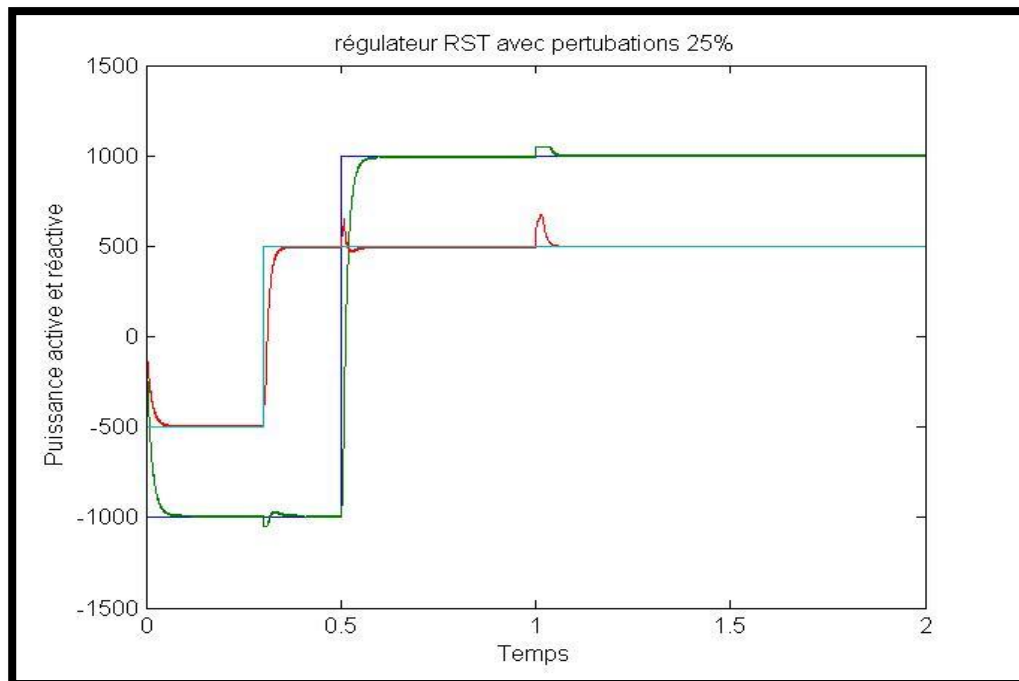


Figure IV-5: réponse des puissances active et réactive des Commande RST avec perturbations 25%.

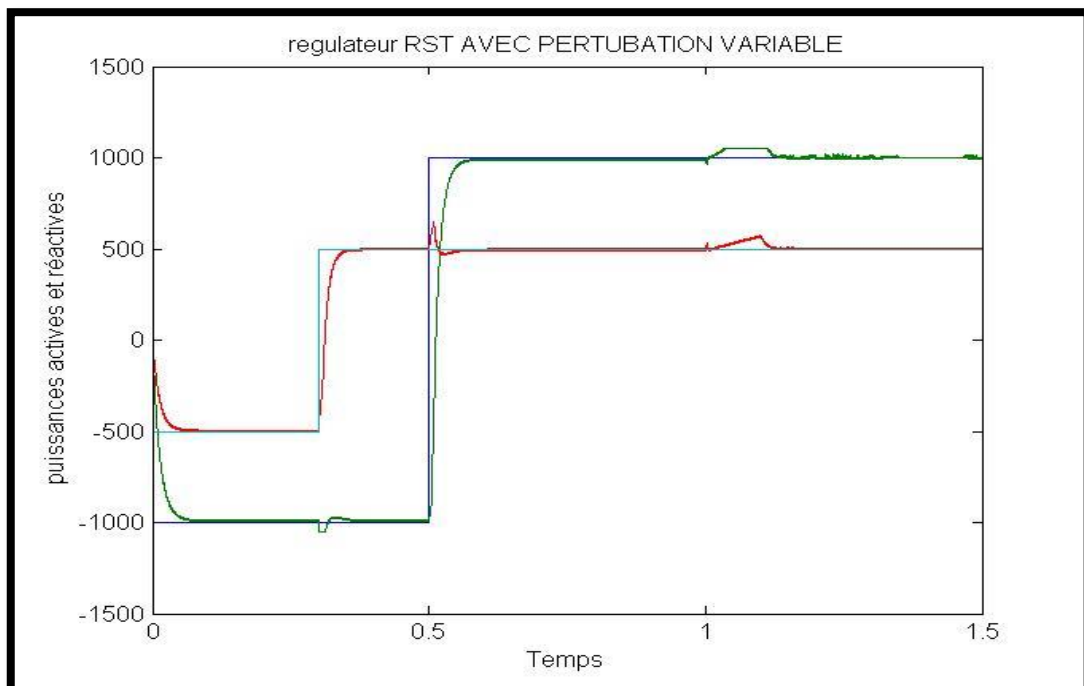


Figure IV-6: réponse des puissances active et réactive des Commande RST avec perturbations variable.

IV.6 Algorithmes génétiques

L'algorithme génétique est organisé en plusieurs étapes et fonctionne de manière

Chapitre IV : Commande RST

itérative. La (**Figure IV-7**) représente l'algorithme génétique le plus simple introduit par Holland [40]. Celui-ci met en œuvre différents opérateurs qui seront décrits dans la section suivante. Mais avant, il est nécessaire de définir quelques termes de base rencontrés dans la littérature :

Individu : solution potentielle du problème.

- Chromosome : solution potentielle du problème sous une forme codée (forme de chaîne de caractères);
- Population : ensemble fini d'individus (de solution);
- Gène : partie élémentaire (caractère) non divisible d'un chromosome;
- Fitness : terme anglo-saxon qui désigne la fonction d'évaluation d'un individu. Cette fonction est liée à la fonction à optimiser et permet de définir le degré de performance d'un individu (donc d'une solution).

D'une manière générale, un algorithme génétique manipule les solutions potentielles d'un problème donné afin d'atteindre la solution optimale ou une solution jugée satisfaisante.

Un algorithme génétique fait évoluer une population de gènes en utilisant les mécanismes de sélection naturelle et de la génétique de l'évolution. Il utilise une fonction coût basée sur un critère de performance pour calculer une « qualité d'adéquation » (fitness).

Les individus les plus « forts » seront à même de se reproduire et auront plus de descendants que les autres.

Chaque chromosome est constitué d'un ensemble d'éléments appelés caractéristiques ou gènes. Le but est de trouver la combinaison optimale de ces éléments qui donne une « fitness » maximale. A chaque itération (génération de population), une nouvelle population est créée à partir de la population précédente.

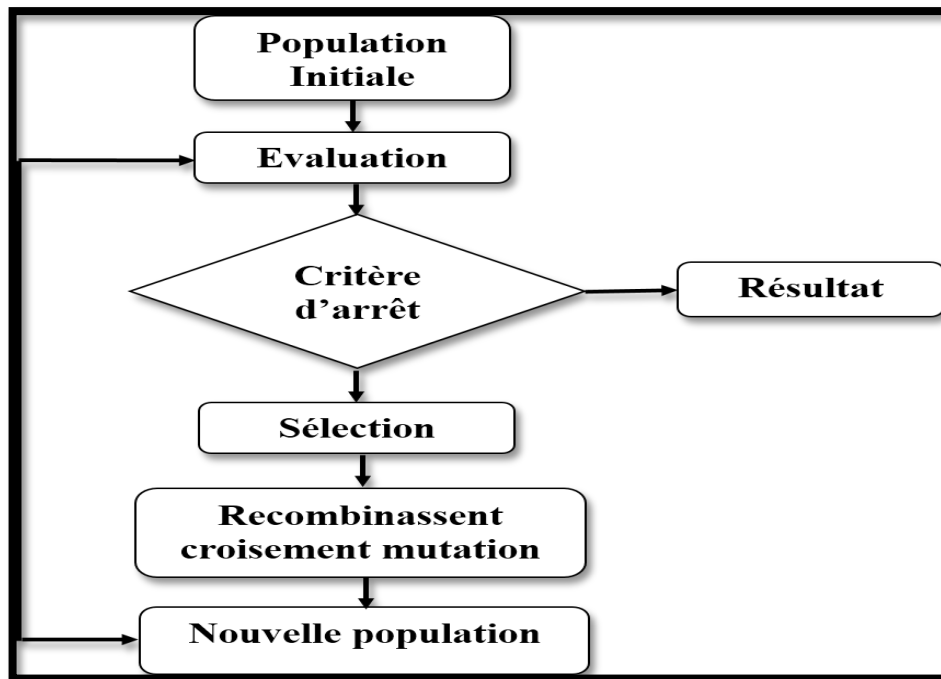


Figure IV-7: Organigramme d'un algorithme génétique simple.

Il existe de nombreuses façons de procéder. Chaque utilisateur conçoit, en fait, sa variante qu'il juge s'adapter le mieux à son problème .

Les pôles imposés optimales sont proches du cercle unités

Paramètre AG

Population 10

$0 < K < 1$

Itération : 30

Sélection : Roulette

Croisement : 2 point

Optimisation terminé

>>

K est optimal après 30 itérations

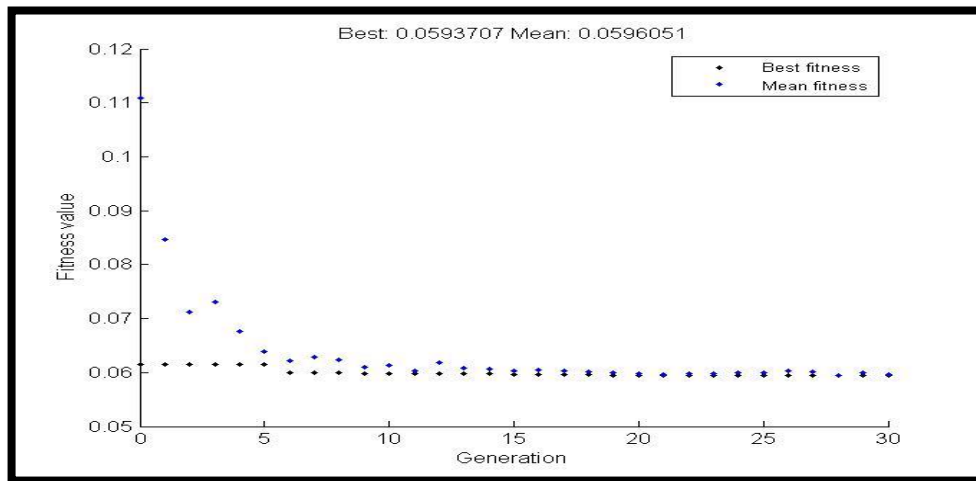
Résultats

- Tension du réseau (départ) : $V_s = 220V$;
- Tension du récepteur (arrivée) : $V_r = 220V$;
- Tension continue : $V_{dc} = 280V$;
- Fréquence : $F = 50Hz$;
- Résistance (Ligne=Partie série) : $r_p = 0.8\Omega$;
- L'inductance (Partie Série) : $L = 10\text{ mH}$.

K le gain proportionnel de régulateur = 884

Le gain intégrateur $T_i=2800$

A)



B)

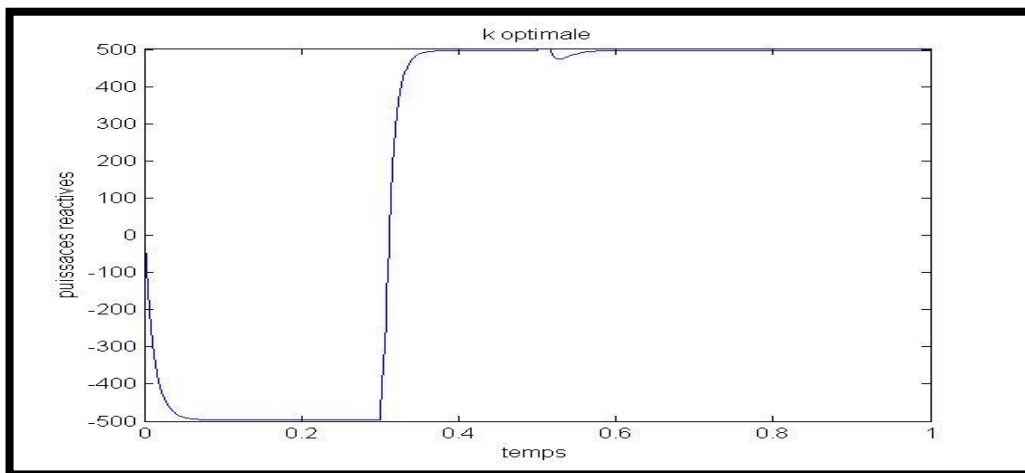


Figure IV-8: puissance réactive (VAr) pour les gains optimaux obtenus par l'algorithme génétique.

IV.7 Conclusion

Tous les régulateurs numériques ont des structures (R-S-T), ils ont deux degrés de liberté (régulation R-S et poursuite T).

La Complexité du régulateur dépend de la complexité du système Contrôle optimal RST donne une meilleure réponse même en cas de perturbation persistante ou de perturbation variable, les perturbations sont additionnées jusqu'à 25% de la réponse (résultat après optimisation des paramètres des régulateur RST

par algorithme génétique GA).

Conclusion générale

Conclusion Générale

Conclusion Générale

L'UPFC est le seul dispositif le plus flexible du système FACT capable de contrôler simultanément et indépendamment, la puissance active et réactive où il permet de régler plusieurs grandeurs du réseau de la ligne de Transmission On a donc appliqué différentes méthodes de réglage en ligne pour l'UPFC, mais l'approche classique souffre malheureusement d'handicaps freinant sérieusement ses capacités quand elle se trouve devant des problèmes où il est impossible d'obtenir avec précision les modèles des processus et des bruits comme dans le cas des réseaux électriques.

Les systèmes FACTS ont la capacité d'augmenter la puissance transmissible dans la ligne en utilisant des commandes appropriées. Ses systèmes peuvent également améliorer la stabilité transitoire du réseau de transport

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 modèle est simplifiés, les calculs deviennent faciles mais s'éloignent de la réalité

La poursuite des puissances est obtenue avec un temps de réponse rapide.

L'analyse de ces résultats, nous permet aussi de conclure sur l'utilisation de la modélisation dans le repère d-q qui améliore la réponse transitoire de l'UPFC en réduisant l'interaction entre les puissances active et réactive.

Le contrôleur PI peut causer une large interaction entre les boucles des courants et un dépassement important au niveau des puissances. Pour réaliser un découplage parfait, il faut que les paramètres des lignes soit connus.

Le régulateur Pi-Découplé pourrait être la commande idéale pour le système UPFC, si, la variation de l'inductance X_l n'a pas affecté ses performances

La commande RST optimale donne une meilleure réponse même dans le cas de perturbations constante ou une perturbation variable, les perturbations sont ajouté jusqu'à 25% de la réponse (résultat après optimisation des paramètres des régulateur d'état UPFC par algorithme génétique GA). Pour donner Une suite favorable à ce travail, on peut avancer les perspectives suivantes:

- Optimisation des paramètres des régulateurs peut être faite par d'autres

Conclusion Générale

algorithmes d'optimisation;

- On peut utiliser d'autres types de régulateur;
- Implémentation pratique de l'UPFC avec sa commande en se basant sur une carte Dspace.

Références

Références

Références

- [1] : Mezhoud Nabil, "Contribution A L'étude De L'écoulement De Puissance Optimal D'un Réseau Electrique Mixte Ac/Dc/Ac Par Les Facts Intelligents", Thèse De Doctorat, Département de Génie Électrique, Université 20 Août 1955- Skikda, Mai2017.
- [2] : R. Grünbaum, M. Noroozian, B. Thorvaldsson: "Facts – Les Systèmes Performants Pour Le Transport Flexible De L'énergie Électrique". Revue Abb 5/1999, 4-17.
- [3] : Stéphane GERBEX, “ Metaheuristique Appliquées Au Placement Optimal De Dispositifs FACTS dans un Réseau Electrique, “ thèse PHD, Ecolepolytechnique de Lausanne,Lausanne 2003.
- [4] : Rabah Benabid,“Optimisation Multiobjectif de La Synthèse des Facts Par Les Particules En Essaim Pour Le Contrôle De La Stabilité De Tension Des Réseaux Électriques”, Mémoire De Magister Soutenu Au Département D'électrotechnique Université De Jijel 2007
- [5] : E. Gh. Sahraki, "Apport De L'UPFC À L'amélioration De La Stabilité Transitoire Des Réseaux Électriques", Thèse De Doctorat Université De Henri Poincaré, Nancy-I, 13 Octobre 2003.
- [6] : T. Allaoui, " Réglage Robuste De L'upfc Pour Optimiser L'écoulement Des Puissances Dans Un Réseau Électrique", Thèse De Magister, Université Des Sciences Et De La Technologie D'oran Mohamed Boudiaf, Avril 2002.
- [7] : 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 Poincare Nancy I, 21 Juin 2001.
- [8] : Higorani, N.G, Gyugyi, L., " Understanding Facts Devices", Ieee Press 2000.
- [9] : A. A. Ladjici, A. Barar, "Introduction Aux Systèmes Flexibles De Transmission En Courant Alternatif Facts ", Mémoire D'ingénieur, Ecole National Polytechnique, Alger, Juin 2002.
- [10] : Zhang. Rehtanz. Pal, "Flexible Ac Transmission Systems: Modelling And Control" Livres, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2006.
- [11] : J. L. Thomas, " Les Systèmes Flexibles De Transport Et De Distribution Électrique

Références

Facts", 10^{eme} Entretien Physique – Industrie, Paris, 19 Octobre 2006.

[12] : E. Catz, "Evolutions Techniques Du Système De Transport Et De Distribution D'électricité", Areva T & D, Saint Priest Cedex, France, 2006.

[13] : J.C. Passelergue, "Interaction Des Dispositifs Facts Dans Les Grands Réseaux Électriques", Thèse De Doctorat De L'ingp 26 Novembre 1998.

[14] : P. Petitclair, "Modélisation Et Commande De Structures Facts : Application Au Statcom", Thèse De Doctorat De L'ingp, 16 Juillet 1997.

[15] : M. Crappe, "Commande Et Regulation Des Réseaux Électriques", Lavoisier 2003.

[16] : E. Acha, V.G. Agelidis, O. Anaya- Lara And T. J. Miller, " Power Electronic Control In Electrical Systems" Liver, Newnes: Oxford, Auckland, Boston, Johannesburg, Melbourne, New Delhi. First Published 2002.

[17] : K. Bouleriel " Etude Et Simulation D'une Commande Du Contrôleur Électronique D'écoulement De Puissance Unifié (Upfc) " Mémoire De Magister. Usto Oran ,2003.

[18] : Parizeau.M, "Réseau de neurones", G1F-21140 et GIF-64326, Université LAVAL,2004.

[19] : S. Zebirete " Réglage Multivariable D'une Upfc Pour La Compensation Des Puissances Active Et Réactive " Mémoire De Magister. Enset D'oran ,2002.

[20] : N. Rahmouni " Amélioration De La Stabilité D'un Réseau Électrique À L'aide D'un Upfc À Base D'un Onduleur À Trois Niveaux" Mémoire De Magister, Université De Batna, 2011-2012.

[21] : H. Azara" Modelling And Control Of Unified Power Controller (Upfc) " Mémoire De Master, Morgan Town, West Virginia, 2000.

[22] : Rahmouni Naima, „Amélioration Des La Stabilité D'Un Réseau Électrique À L'Aide D'Un Upfc À Basse D'Un Onduleur Trois Niveaux „, Thèse Magister, Université Hassiba Ben Bouali Chlef, Faculté Génie Électrique, Département Électrotechnique, Juin 2009.

[23] : M.Boutoubat, "Commande Des Systèmes Linéaires Continus Et Discrets".La Stabilité

Références

Transitoire Des Systèmes Électro-Énergétique”, Thèse Magister, Université Mohamed Boudiaf, Faculté De Génie Electrique Département D'électrotechnique, Juin 2005.

[24] : S.M. Sadeghzadeh, M.Ehsen, N.Hajd Said Et Al, « Improvement Of Transient Stability Limit In Power System Transmission Lines Using Fuzy Control Of Facts Devices », Ieee Trans. On Power Systems, Vol. 13, No.3, Pp.917-922, August 1998.

[25] : L. Gyugyi, Unified Power Flow Control Concept For Flexible Ac, Transmission Systems. Iee Proc. C 139 (1992),

[26] : Dizdravic.N Tesnjak.S Andersson,G, Power Flow Regulation By Use Of Upfc's Injection Model Ieee Power Tech 99 Tech Conference Paper Bpt99-367-12 Budapest, Hungary, Aug 29-Sept 2,1999.

[27] : Mokhtari.M, Matlab 5.2, 5.3 & Simulink 2 Et 3, Edition Springer 2000.

[28] : Derrick H. Nguyen And Bernard Widrow. Neural Networks For Self-Learning Control Systems

[29] : R L Hauth, T Human , R J Newell , “Application Of A Static Var Compensator In Western Nebraska”, Ieee Transactions.

[30] : Hendti Masdi; Nornian Mariun; Senan Malimud;Azah Mohamed And Sailehhudin Yusuf,”Design Of A Prototype D-Statcom For Voltage Sag Mitigation”, National Power And Energy Conference (Peon) 2004 Proceedings, Kuala Lumpur Malaysia.

[31] : https://homepages.laas.fr/fgouaisb/Donnees/Slides_Rstv2.Pdf. Document "Rst Numérique".

[32] : C.M.Yam, M.H. Haque,” A Svd Based Controoler Of Upfc For Power Flow Controller”,Electric Power Tsao-Tsung Ma, Novel Control Schemes Based On Recurrent Fuzzy Neural Networks For The Variable Structure Upfc”, Iaeng International Journal Of Applied Mathematics.

[33] : Mokhtari.M, Matlab 5.2, 5.3 & Simulink 2 Et 3, Edition Springer 2000.

[34] : Par Roland Longchamp, Commande Numérique De Systèmes Dynamiques :Cours D'automatique, Volume 2, Ppur Presses Polytechniques, 2010.

[35] : Samir Ait Abdellah, “Implémentation De La Commande Rst Sous Un Api S7-300 Pour

Références

Le Contrôle De La Station De Température Put-1 D'electronica Veneta” , Mémoire De Fin D'étude De Master Academique.

[36] : C. Sermondade / A. Toussaint. Correcteurs Spécifique, Régulations En Temps Discret. Nathan, Paris, 1998.

[37] : Jean-Marieretif.Synthèsed'unecommanderobuste:Correcteurséchantillonnées, Commande Par Pid, Par Modèle Interne Et Polynômiale Rst. Ellipses, Paris, 2011.

[38] : Par Roland Longchamp, Commande Numérique De Systèmes Dynamiques : Cours D'automatique, Volume 2, Ppur Presses Polytechniques, 2010.

[39] : Henri Bourlès, Linear Systems Iste Ltd 2010.

[40] : J. Dréo, A. Pérowski, P. Siarry, And E. Taillard. Métaheuristiques Pour L'optimisation Difficile. Eyrolles, 2003. Isbn : 2-212-11368-4.