

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Djilali Bounaama Khemis Miliana

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de la Technologie

Mémoire présenté

Pour l'obtention de diplôme

Master

En

« Génie Electrique »

Option :

« Electrotechnique Industrielle »

Titre :

**Contrôle des Flux de Puissance dans Un Réseau Électrique à l'aide
d'Un UPFC**

Réalisé par :

- **HAMRANI MALIKA**
- **SAMET LEMYA**

Encadré par :

- **Dr : YOUSFI ABD ELKADER**

Année Universitaire : 2019/2020

Remerciements

Nous tenons profondément à remercier tout d'abord DIEU l'unique qui a permis à ce travail de voir la lumière.

Nous tenons à remercier vivement

Notre Encadreur Monsieur YOUSFI ABDELKADER pour ses orientations éclairées, ses conseils constructifs, son esprit critique et son aide précieuse.

Nous remercions très chaleureusement les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant d'être rapporteurs de notre mémoire.

Nous remercions aussi tous les enseignants qui ont contribué à nos études pendant notre cycle des études.

Merci à mes collègues et amis avec qui nous avons partagés de merveilleux moments.

Merci à tous ce qui a contribué de près ou de loin, dans nos études ainsi qu'à la réalisation de ce travail reçoit ici le témoignage de notre grande sympathie.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

A *Mon Père* pour sa Sacrificatoire de me orienter dans ma vie ;

A *Ma Mère*, que Dieu la récompense pour sa patience et sa soutenance ;

A *Mes Chers Frères Et Ma Sœur*, tous par leurs noms ;

A *Tous ma famille* ;

A *Tous mes Amis* ;

A *Tous Ceux Qui Ont Contribué* de près ou de loin à la réussite de mon travail ;

A *Tous ceux qui me sont chers*.

A *Vous*.

MALIKA

Je dédie ce modeste travail :

A *Mon Père* pour sa Sacrificatoire de me orienter dans ma vie ;

A *Ma Mère*, que Dieu la récompense pour sa patience et sa soutenance ;

A *Mes Chers Frères*, tous par leurs noms ;

A *Mon Fiancer ABDELAAZIZ* ;

A *Tous ma famille* ;

A *Tous mes Amis* ;

A *Tous Ceux Qui Ont Contribué* de près ou de loin à la réussite de mon travail ;

A *Tous ceux qui me sont chers*.

A *Vous*.

LEMYA

SOMMAIRE

SOMMAIRE

Notation

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction Générale :.....1 ; 2

CHAPITRE I : Généralités sur les réseaux électriques.

I.1 Introduction:.....3

I.2.Définition du Réseau Electrique :.....3

I.3.Les structures d'un réseau:.....4

I.3.1. Réseau maillé :..... 5

I.3.2 : Réseau bouclé :.....5

I.3.3.Réseau radial :.....6

I.4.Les différentes fonctions du réseau :.....7

I.4.1. Réseau d'utilisation :.....7

I.4.2. Réseaux de distribution :.....7

I.4.3. Réseaux de répartition :.....7

I.4.4.Réseaux de transport et d'interconnexions :.....8

I.5.Conclusion :.....9

CHAPITRE II : Les Dispositifs FACTS.

II.1. INTRODUCTION :.....10

II.2. Différents types de perturbation affectant la qualité de tension :.....11

II.2.1. Creux de tension et coupures brèves :.....11

II.2.1.1. Creux de tension :.....11

II.2.1.2. Les coupures:.....12

II.2.1.3. Origine:.....12

SOMMAIRE

II.2.2. Les harmoniques et les Inter-harmoniques:	13
II.2.2.1.Les harmoniques :	13
II.2.2.1.1. Les principales sources d’harmoniques :	13
II.2.2.1.2. Les niveaux d’harmoniques:	14
II.2.2.2.Les inter-harmoniques :	14
II.2.3. Surtensions :	15
II.2.4. Fluctuations lentes de la tension:	15
II.2.5. Variation ou fluctuation de la fréquence:	16
II.2.6. Baisse de tension:	16
II.2.7. Déséquilibre de tension:	16
II.3. Exploitation d’un réseau électrique :	17
II.3.1. Modification de la réactance :	17
II.3.2. Modification de la tension:	18
II.3.3. Modification de l’angle de transmission :	18
II.4. Différents moyens de compensation :	18
II.4.1.Compensation conventionnelle:	18
II.4.1.1.Les Inductances :	18
II.4.1.2.Les Condensateurs:	18
II.4.1.3. Compensateurs statiques :	19
II.4.1.4. Compensateur synchrone:	19
II.4.2. Systèmes FACTS:	19
II.4.2.1. Généralité sur les dispositifs FACTS :	19
II.4.2.2. Rôle des FACTS dans un réseau électrique :	20

SOMMAIRE

II.4.2.3. Classification des dispositifs FACTS :	21
II.4.2.4. Dispositifs shunt:	22
II.4.2.4.1. Compensateur statique de puissance réactive (SVC) :	23
II.4.2.4.2. Compensateur statique (STATCOM) :	25
II.4.2.5. Dispositifs série:	28
II.4.2.5.1. Compensateur série commandée par thyristor (TCSC) :	29
II.4.2.5.2. Le Compensateur Synchrone Statique Série SSSC :	30
II.4.2.6. Dispositifs FACTS combinés série-parallèle :	32
II.4.2.6.1. UPFC (Unified power flow controller):	32
II.4.2.6.2. IPFC (Interline Power Flow Controller):	35
II.4.2.7. Les avantages et les inconvénients des FACTS :	36
II.4.2.7.1. Avantages des dispositifs FACTS :	36
II.4.2.7.2. Inconvénients des dispositifs FACTS :	37
II.4.2.8. Coût des dispositifs FACTS :	37
II.5. Conclusion:	38

CHAPITRE III : Etude de l'UPFC.

III.1. Introduction :	39
III.2. Modélisation de l'UPFC :	40
III.2.1. Modélisation de la partie shunt (STATCOM) :	40
III.2.1.1. Modèle mathématique simplifié :	40
III.2.1.2. Modèle mathématique en considérant le circuit DC :	42
III.2.2. Modélisation de la partie série (SSSC) :	44
III.2.2.1. Modèle mathématique simplifié :	44

SOMMAIRE

III.2.2.2.Modèle mathématique en considérant le circuit DC :	45
III.2.3.Modélisation d'un bus continu :	46
III.2.4. Calcul des puissances instantanées de l'UPFC :	47
III.3.Conclusion :	47

CHAPITRE IV : Résultats de simulation

IV.1 Introduction:	48
IV.2 Contrôle de la partie shunt :	48
IV.2.1. Détermination des références:	48
IV.2.1.1. La Méthode Watt-Var découplée :	49
IV.3 Contrôle de la partie série :	51
IV.3.1 la méthode Watt-Var découplée :	51
IV.3.2. Détermination des références:	52
IV.4 Régulation de la tension continue U_{dc}:	53
IV.5 Commande des convertisseurs statiques:	53
IV.6.Simulation et interprétation des résultats:	54
IV.6.1 Etude de réseau en chute de tension :	54
IV.6.1.1 Description et étude du réseau étudié en chute de tension avant insertion de l'UPFC :	54
IV.6.1.2. Description et étude du réseau étudié en chute de tension après insertion de l'UPFC :	58
IV.7.conclusion :	63
Conclusion générale:	64

SOMMAIRE

Bibliographie:.....66

Annexe:.....69

NOTATION

Liste des abréviations

HT: Haute Tension.

MT: Moyenne Tension.

BT : Basse Tension.

CEI: Commission Electrotechnique International.

FACTS: Flexible Alternative Current Transmission Systems.

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers (Institut des Ingénieurs En Electronique et Electrotechnique).

EPRI: Electric Power Research Institute (Institut de Recherche en Electronique de Puissance).

GTO: Thyristor Commandable à l'Ouverture.

IGBT: Transistor Bipolaire à Grille Isolée.

SVC: Compensateur Statique de Puissance Réactive (Static Var Compensator).

TCR: Thyristor Controlled Reactor (RCT: Réactances Commandées par Thyristors).

TSC: Thyristor Switched Capacitor (CCT: Condensateurs Commandés par Thyristor).

STATCOM: Compensateur Statique Synchronique (STATIC Var COMPensator).

TCSC: Compensateur Série Commandé par Thyristor (Thyristor Controlled Series Capacitors).

SSSC: Compensateur Synchronique Statique Série (Static Synchronous Series Compensator).

UPFC: Unified Power Flow Controller (Contrôleur Universel du Flux de Puissance).

IPFC: Interline Power Flow Controller (Contrôleur du Flux de Puissance d'Interligne).

MLI: Modulation de Largeur d'Impulsion.

AC: Courant Alternative (Alternative Current).

DC: Courant Continu (Direct Current).

QEE: Qualité de l'Energie Electrique.

NOTATION

PI: Proportionnel Intégral (régulateur).

EN 50160: est une norme a été créée afin de caractériser la qualité de la tension fournie. Cette norme présente les différents types de perturbations de la tension observés au point de livraison du client, fonction de la forme d'onde, du niveau de la tension, de la fréquence et du déséquilibre du système triphasé. Elle liste ainsi les paramètres à surveiller et la durée de la surveillance.

NOTATION

Liste des symboles

U_n : Tension composée normalisée

V_1 : Tension simple de la source 1

V_2 : Tension simple de la source 2

X_L : Réactance de la ligne

P : Puissance active transitée dans la ligne

δ : L'angle de transport

V_S : Tension au jeu de bar S

V_M : Tension au jeu de bar M

V_L : Tension injectée au jeu de bar L

V_R : Tension injectée au jeu de bar R

X_L : Réactance de l'inductance shunt

I_L : Courant transitant dans la ligne

I_R : Courant injecté par l'inductance shunt

X_C : Réactance de condensateur

I_{max} : Courant maximal

I_{min} : Courant minimal

V_s : Tension de phase

C : Capacité de condensateur

V_{sh} : Tension injectée par le STATCOM

X_{TSCS} : Réactance équivalente de TSCS

X_{TCR} : Réactance équivalente de TCR

α : L'angle de commande de TSCS

NOTATION

V_b : Tension injectée par SSSC

V_{se} : Tension injectée par UPFC

dq : Axe du plan de transformation de PARK

R : Résistance qui représente les pertes par effet joule dans la ligne (Ω)

L : Inductance dans le sens longitudinal (H)

C : Capacité dans le sens transversal (F)

G : Conductance de la ligne

\bar{z} : Impédance par unité de longueur (Ω / m)

\bar{Z} : Impédance totale (Ω)

\bar{Y} : Admittance linéique de la ligne (S / Km)

K : Rapport de transformation du transformateur idéal

N_1 et N_2 : Nombre de spire primaire et secondaire respectivement du transformateur

R_{sh} et R_{se} : Les résistances shunt et série respectivement de l'UPFC

L_{sh} et L_{se} : L'inductance du transformateur de couplage en shunt et série respectivement de l'UPFC

α et β : Axe du plan de transformation de CONCORDIA

m : Indice de modulation qui dépend que du type de l'onduleur

P_{sh} : Puissance active fournie ou absorbée par la partie shunt de l'UPFC

Q_{sh} : Puissance réactive fournie ou absorbée par la partie shunt de l'UPFC

I_{sh} : Courant injecté ou absorbé par la partie shunt de l'UPFC

P_{se} : Puissance active fournie ou absorbée par la partie série de l'UPFC

Q_{se} : Puissance réactive fournie ou absorbée par la partie série de l'UPFC

I_{se} : Courant injecté ou absorbé par la partie série de l'UPFC

NOTATION

U_{dc} : Tension aux bornes du condensateur (bus continu)

I_{dc} : Courant fourni ou absorbé par le bus continu de l'UPFC

P_{dc} : Puissance active fournie ou absorbée par le bus continu de l'UPFC

I_{sh}^{ref} : Courant de référence à injecter ou à absorber par la partie shunt de l'UPFC

I_{se}^{ref} : Courant de référence à injecter ou à absorber par la partie série de l'UPFC

P_{sh}^{ref} : Puissance active de référence à fournie ou à absorbé par la partie shunt de l'UPFC

Q_{sh}^{ref} : Puissance réactive de référence à fournie ou à absorbé par la partie shunt de l'UPFC

X_1 Et X_2 : Sorties des deux régulateurs PI des courants (I_{shd})et (I_{shq})

I_{shd} Et I_{shq} : Courant direct et quadratural injecté ou absorbé par la partie shunt de L'UPFC

I_{sed} et I_{seq} : Courant direct et quadratural injecté ou absorbé par la partie série de l'UPFC

\widetilde{X}_1 et \widetilde{X}_2 : Laplacien sorties des deux régulateurs PI des courants(I_{shd})et (I_{shq})

K_i et K_p : Coefficients des régulateurs intégral et proportionnel.

V_s et I_s : Tension et courant au niveau de la source.

V_{ch} et I_{ch} : Tension et courant au niveau de la charge.

P_s et Q_s : Puissance active et réactive au niveau de la source.

P_{ch} et Q_{ch} : Puissance active et réactive au niveau de la charge.

P_{inj} et Q_{inj} : Puissance active et réactive injecté par l'UPFC.

P_{abs} et Q_{abs} : Puissance active et réactive absorbé par l'UPFC.

t : Temps de la simulation.

NOTATION

Liste des Figures

Figure I.1 : Schéma du réseau de transport.....	4
Figure I.2: Réseau maillé.....	5
Figure I.3 : Réseau bouclé.....	6
Figure I.4 : Structure en coupure d'artère.....	7
Figure I.5 : Réseau radial.....	7
Figure I.6. Architecture générale des réseaux d'énergie électrique.....	8
Figure II.1:(1a) : creux de tension.....	11
Figure II.1:(1b) : la méthode de calcul un creux de tension.....	12
Figure II.2 : caractéristiques de quelques générateurs d'harmoniques.....	14
Figure II.3: Représentation d'une fluctuation lente de la tension.....	16
Figure II.4: Schéma d'un réseau interconnecté.....	17
Figure II.5: Structure de base d'un SVC.....	24
Figure II.6: Caractéristique d'un SVC.....	24
Figure II.7: Schéma de base du STATCOM.....	26
Figure II.8: le schéma simplifié d'un STATCOM.....	27
Figure II.9 : Diagramme de Fresnel lorsque $V_1 < V_{sh}$	27
Figure II.10 : Diagramme de Fresnel lorsque $V_1 > V_{sh}$	27
Figure II.11: Caractéristique statique du STATCOM.....	28
Figure II.12 : Insertion d'un TCSC dans une ligne.....	30
Figure II.13 : schéma de base d'un SSSC.....	31
Figure II.14 : caractéristique V-I du SSSC.....	31
Figure II.15 : Schéma simplifiée d'un UPFC.....	33
Figure II.16 : Mode de fonctionnement d'un UPFC.....	34

NOTATION

Figure II.17 : Schéma simplifiée d'un IPFC.....	36
Figure III.1 : Circuit équivalent de l'UPFC.....	40
Figure III.2 : Schéma équivalent du STATCOM.....	41
Figure III.3 : Schéma équivalent du STATCOM avec le circuit DC.....	43
Figure III.4 : Schéma équivalent du SSSC.....	44
Figure IV.1 : Schéma bloc d'identification des courants de référence.....	49
Figure IV.2 : Schéma bloc de régulation du STATCOM par la méthode Watt-Var découplée.....	50
Figure IV.3 : Schéma bloc de régulation du SSSC par la méthode Watt-Var découplée.....	51
Figure IV.4 : Schéma bloc de contrôle du SSSC par la méthode Watt-Var découplée.....	53
Figure IV.5 : Schéma bloc de contrôle du courant par MLI.....	54
Figure IV.6 : Schéma du réseau étudié avant insertion de l'UPFC.....	55
Figure IV.7 :(a). La tension au niveau de la source.....	55
Figure IV.7 :(b). Le courant au niveau de la source.....	55
FigureIV.8 :(a). La tension au niveau de la charge.....	56
Figure IV.8 :(b). Le courant au niveau de la charge.....	56
Figure IV.9 : Chute de tension dans le réseau avant compensation.....	57
Figure IV.10 : Puissances active et réactive au niveau de la source avant compensation.....	57
Figure IV.11 : Puissances active et réactive absorbée par la charge avant compensation.....	58
Figure IV.12 : Schéma du réseau étudié après insertion de l'UPFC.....	59
Figure IV.13 :(a). La tension au niveau de la source après compensation.....	59
Figure IV.13:(b). Le courant au niveau de la source après compensation.....	59
Figure IV.14 :(a). La tension au niveau de la charge après compensation.....	60
Figure IV.14 :(b) Le courant au niveau de la charge après compensation.....	60
Figure IV.15 : Chute de tension dans le réseau après compensation.....	61
Figure IV.16 : Puissances active et réactive fournies par la source après compensation.....	62
Figure IV.17 : Puissances active et réactive absorbée par la charge après compensation.....	62

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, de lignes, de transformateurs etc., ce qui implique une augmentation de coût et une dégradation du milieu naturel. En conséquence, il est aujourd'hui important d'avoir des réseaux maillés et de travailler proche des limites de stabilité afin de satisfaire ces nouvelles exigences. [1]

Dans une ligne de transmission le flux de puissance est déterminé par trois paramètres électriques essentiels à savoir la tension de la ligne, l'impédance de la ligne et l'angle de transport. Le changement d'un de ces paramètres électriques, produit une variation de la puissance à travers la ligne de transmission. [1]

Le transit de puissance dans un réseau électrique n'est pas facile à contrôler en raison de la complexité de contrôler les paramètres de ligne qui déterminent le flux de puissance dans cette ligne. Les moyens classiques de compensation et de contrôle du flux de puissance dans les réseaux tel que le transformateur à prises réglables, les transformateurs déphaseurs, les compensateurs séries ou parallèles commutés par disjoncteurs, s'avèrent trop lents et insuffisants pour répondre efficacement aux nouvelles exigences. [2]

En 1988, Hingorani présente, lors d'une conférence d'IEEE, un nouveau concept: "Flexible AC Transmission Systems (FACTS) ", qui met en relief les nouvelles possibilités de l'électronique de puissance dans la commande et le contrôle du transport de l'énergie électrique en courant alternatif(AC). Selon IEEE, le terme FACTS désigne les systèmes de transport et de distribution d'énergie électrique, en courant alternatif, qui font appel à l'électronique de puissance pour améliorer leur flexibilité d'exploitation et leur capacité de transport. [2]

La nouvelle génération des systèmes FACTS est constituée principalement par des convertisseurs de tension (ou courant), à base des interrupteurs statiques modernes (GTO ou IGBT) commandées en ouverture et en fermeture, liés à des condensateurs comme source de tension continue. Ces convertisseurs selon leur connexion au réseau sont distingués en compensateurs shunt, série et hybride tels que: STATCOM, SSSC, UPFC respectivement. [3]

Introduction Générale

L'UPFC (Unified Power Flow Controller), appelé aussi Déphaseur Régulateur Universel (DRU) est l'un des plus performants dispositifs FACTS. Il est capable de contrôler, simultanément et indépendamment, la puissance active et la puissance réactive de la ligne. [4]

Gyugyi a présenté le concept de l'UPFC (ou variateur de charge universel) en 1991. L'originalité de ce compensateur est de pouvoir contrôler les trois paramètres associés au transit de puissance dans une ligne électrique: la tension de la ligne, l'impédance de la ligne et l'angle de transport. Comparativement à d'autres types de FACTS, l'UPFC est capable d'améliorer la stabilité et l'atténuation des oscillations de puissance, la répartition du flux d'énergie et le réglage de tension. [4]

Ce mémoire est destiné à évaluer l'aptitude de l'UPFC à contrôler l'écoulement de puissance à travers une ligne de transmission et compenser la puissance réactive. Cette étude est articulée autour de quatre chapitres dont :

Le premier chapitre comporte des généralités sur les réseaux électriques.

Le deuxième chapitre est une présentation générale du concept FACTS. Il s'adresse tout d'abord une liste des problèmes liés à l'exploitation d'un réseau électrique et dégradent la qualité d'énergie électrique, puis nous présentons les techniques de la compensation de puissance réactive classiques et modernes les solutions qui peuvent être apportées par la technique FACTS. Une classification des différents types de FACTS est proposée et les principaux dispositifs de chaque famille sont décrits d'une façon plus détaillée.

Le troisième chapitre est consacré à la modélisation des différents éléments constituant le dispositif UPFC.

Le quatrième et dernier chapitre présente une complète simulation du dispositif, (UPFC) avec le procédé de détermination des références du système de commande pour le contrôle de ce dispositif. Et en fin nous terminerons par une conclusion générale.

CHAPITRE I

Généralités sur les réseaux électriques

I.1. Introduction:

Aujourd'hui l'exploitation des grands réseaux électriques est de plus en plus complexe du fait de l'augmentation de leurs taille, de la présence des lignes d'interconnexion de grande longueur, de l'adoption de nouvelles techniques, de contraintes économiques, politiques et écologiques... ; Ces facteurs obligent les opérateurs à exploiter ces réseaux près de la limite de stabilité et de sécurité.[3]

La gestion du réseau électrique ne consiste pas seulement à faire en sorte que les transits soient inférieurs aux capacités de transport de chaque ouvrage du réseau. Il faut également surveiller plusieurs paramètres techniques, dont la puissance réactive et le niveau de tension. La tension électrique doit rester dans une plage autorisée en tout point du réseau, dans toutes les situations de production et de consommation prévisibles. En effet, la tension peut localement être dégradée, par exemple les jours de forte consommation, dans ce cas, les transits à travers les lignes du réseau sont importants, ce qui provoque une chute de tension dans ces lignes. [3]

Comme tout générateur d'énergie électrique, un réseau de puissance fournit de l'énergie aux appareils utilisateurs par l'intermédiaire des tensions qu'il maintient à leurs bornes. Il est évident que la qualité et la continuité de la tension est devenue un sujet stratégique pour plusieurs raisons concernent l'exploitation des réseaux électriques. [5]

Un réseau d'énergie électrique est un système d'éléments interconnectés qui est conçu:

- Pour convertir d'une façon continue l'énergie qui n'est pas sous forme électrique en énergie électrique.
- Pour transporter l'énergie électrique sur de longues distances.
- Pour transformer l'énergie électrique sous des formes spécifiques soumises à des contraintes bien déterminées. [6]

I.2. Définition du Réseau Electrique :

Un réseau, c'est d'abord un certain nombre de fonctions et de comportements d'ensemble, qu'il faut définir, mettre en œuvre, maîtriser grâce à une conception et une exploitation convenables. Ce sont ensuite des ouvrages et des matériels (Lignes aériennes et souterraines, postes, câbles, appareillage, transformateurs, parafoudres, etc.) Qui, assemblés, forment le réseau physique ; la

CHAPITRE I : Généralités sur les réseaux électriques

qualité Conditionne très largement celle du réseau, donc celle de la desserte en électricité de ses clients. C'est enfin tout un ensemble d'automatismes et de transmission d'informations et de commandes, ensemble coordonné, donc système nerveux absolument indispensable à la protection des ouvrages et des matériels, à la robustesse du réseau vis-à-vis des défaillances internes et des agressions extérieures telles la foudre et les conditions climatiques extrêmes ; système indispensable aussi à la maîtrise par l'exploitant d'un outil technique qui, pour les réseaux publics, du moins, n'est pas concentré en un site, mais couvre des milliers et des centaines de milliers de kilomètres carrés Les réseaux électriques ont pour fonction d'interconnecter les centres de production tels que les centrales hydrauliques, thermiques..., avec les centres de consommation (villes, usines...). L'énergie Électrique est transportée en haute tension, voire très haute tension pour limiter les pertes joules (les pertes étant proportionnelles au carré de l'intensité puis progressivement abaissée au niveau de la tension de l'utilisateur final **Figure(I.1).** [7]

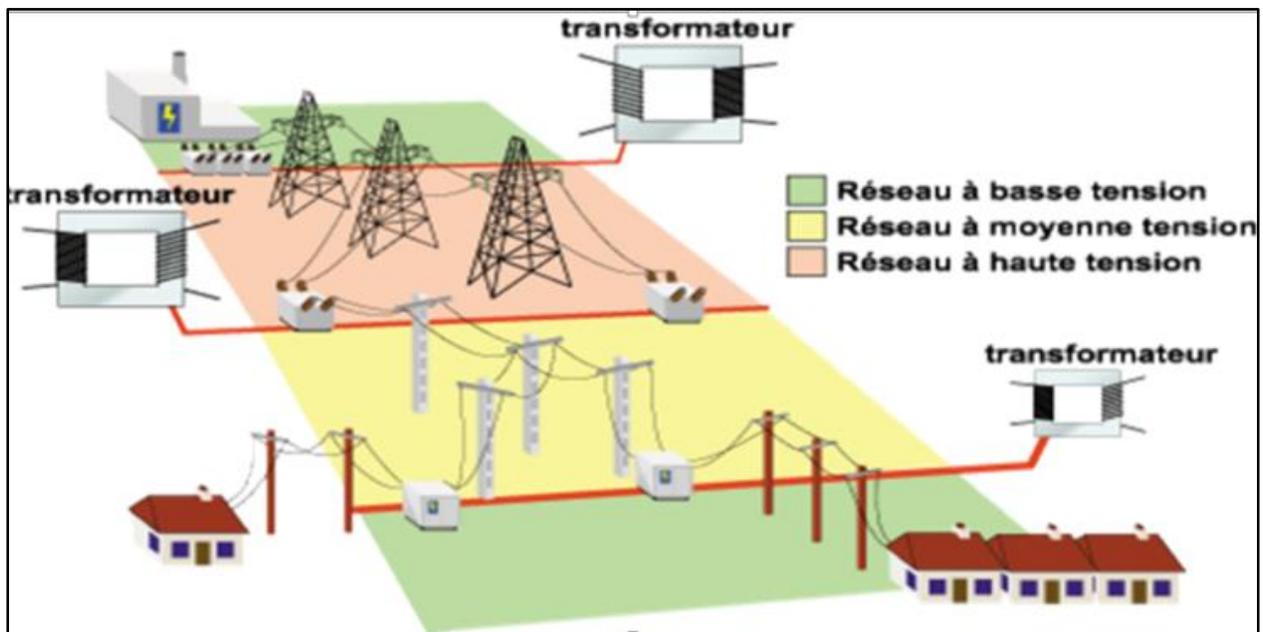


Figure : I.1. Schéma du réseau de transport.

I.3. Les structures d'un réseau:[8]

L'ensemble des constituants d'un réseau électrique peut être agencé selon différentes structures, dont la complexité détermine la disponibilité de l'énergie électrique et le coût de l'investissement. Le choix de l'architecture sera donc fait pour chaque application sur le critère de l'optimum technico-économique.

CHAPITRE I : Généralités sur les réseaux électriques

I.3.1. Réseau maillé :

Utilisé généralement pour le transport, un réseau maillé est un réseau où des liaisons qui forment des boucles, réalisant une structure en mailles d'un filet.

La **figure (I.2)** Montre l'exemple d'un réseau maillé.

- **Avantages :**

Le réseau maillé est caractérisé par ;

- Une grande sécurité d'exploitation ;
- Une chute de tension réduite.

- **Inconvénients :**

- Le coût de réalisation est énorme ;
- Nécessité des protections sophistiquées.

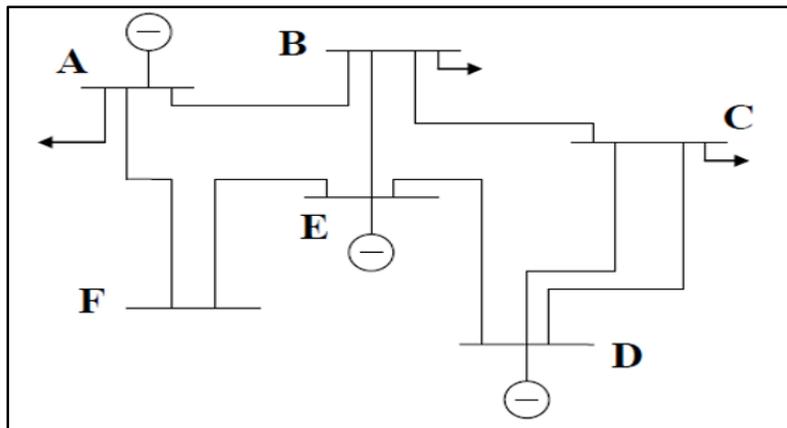


Figure I.2: Réseau maillé.

I.3.2 : Réseau bouclé :

Ce sont des réseaux maillés simplifiés, présentant un certains nombres de boucles fermés, chacune de ces boucles contient un nombre limité de sources. L'énergie peut transiter alors par des chemins différents, et la mise hors tension accidentelle d'un tronçon n'entraîne pas des surcharges inadmissibles pour les autres tronçons. Les réseaux bouclés sont généralement utilisés pour les réseaux de répartition.

La **figure (I. 3)** montre un exemple d'un réseau bouclé.

- **Avantage :**

- Grande continuité de service ;
- Un bon rendement ;
- Faible chute de tension.

CHAPITRE I : Généralités sur les réseaux électriques

- **Inconvénients :**
 - Forts courants de court-circuit ;
 - Plus onéreux et plus difficile à exploiter que le précédent.

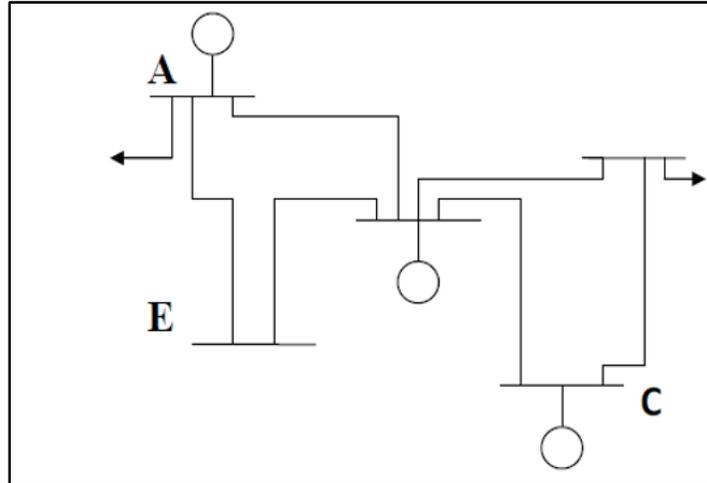


Figure I.3 : Réseau bouclé.

I.3.3. Réseau radial :

Les réseaux radiaux sont exploités débouclés. La sécurité d'alimentation, bien qu'inférieure à celle de la structure maillés, reste élevée. On rencontre deux structures principales :

- **En coupure d'artère :** typique des réseaux souterrains. Ces réseaux sont conçus pour un éventuel fonctionnement en boucle ;
- **Structure arborescente :** typique des réseaux ruraux aériens. Ces réseaux comportent des points de bouclage pour assurer un secours par la moyenne tension ;

La figure (I. 4) et la figure (I.5) montrent un exemple d'un réseau radial.

- **Avantages :**
 - Facile à étudier et à construire ;
 - Pour effectuer des travaux, il suffit d'ouvrir l'appareil (sectionneur, interrupteur ...)

placé au début du réseau.

- **Inconvénients :**
 - Des grandes chutes de tension pour les longueurs dépassant 500m ;
 - La mise hors tension des consommateurs en cas d'une panne en tête de ligne.

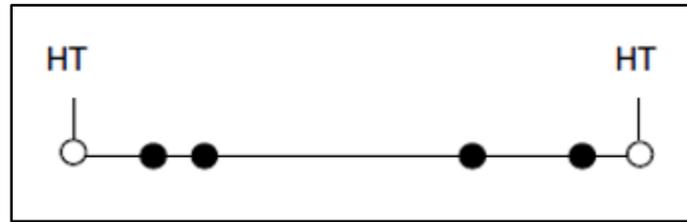


Figure I.4 : Structure en coupure d'artère.

- Poste de distribution
- Poste de répartition

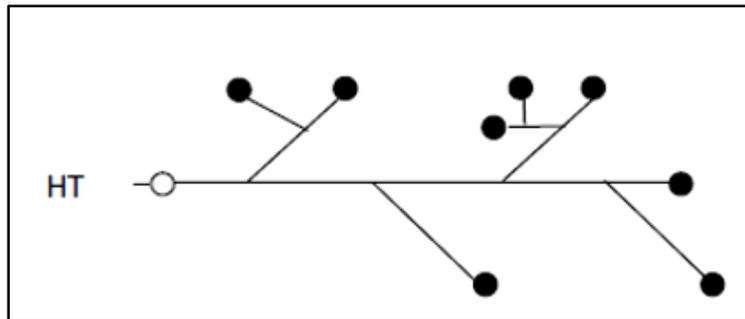


Figure I.5 : Réseau radial.

I.4. Les différentes fonctions du réseau :

I.4.1. Réseau d'utilisation :

Ces sont les réseaux de basse tension (BT) qui alimentent les foyers, l'éclairage, les moteurs, les appareils domestiques et doivent présenter une sécurité totale. Ils sont les plus petites lignes du réseau. Leur tension est comprise entre 230 et 380 volts. Ce sont celles qui nous servent tous les jours pour alimenter nos appareils ménagers. Elles permettent donc la distribution d'énergie électrique vers les ménages et les artisans et représentent plus de la moitié du réseau national. [9]

I.4.2. Réseaux de distribution :

Ce sont les réseaux de moyenne tension (MT) qui fournissent aux réseaux d'utilisation les puissances nécessaires demandées. Ils doivent observer des distances limitées de voisinage, c'est pour cela que ces réseaux se réalisent en souterrain dans les villes. Ils permettent le transport de l'électricité à l'échelle locale vers les petites industries, les PME et les commerces. Elles font également le lien entre les clients et les postes de transformations des compagnies de distribution du courant. Les lignes MT ont une tension comprise entre 15kv et 30kv. [9]

CHAPITRE I : Généralités sur les réseaux électriques

I.4.3. Réseaux de répartition :

Ce sont les réseaux HT/MT, ils fournissent les puissances nécessaires aux réseaux de distribution reliés entre eux, ils facilitent le secours mutuel entre régions. Les lignes haute tension constituent le réseau de répartition ou d'alimentation régionale et permettent le transport à l'échelle régionale ou locale. Elles acheminent l'électricité aux industries lourdes, aux grands consommateurs électriques comme les transports ferroviaires et font le lien avec le second réseau. Leur tension est comprise entre 10kv et 100kv. [9]

I.4.4. Réseaux de transport et d'interconnexions :

Ils assurent l'alimentation de l'ensemble du territoire national grâce à des transits de puissances importantes. Les lignes THT permettent de transporter de grandes quantités d'électricité sur de longues distances avec des pertes minimales. Ces lignes, dont la tension est supérieure à 100 kilovolts (kV) constituent le réseau de grand transport ou d'interconnexion. Elles permettent de relier les régions et les pays entre eux ainsi que d'alimenter directement les grandes zones urbaines. La majorité des lignes THT ont une tension de 400 kV. [9]

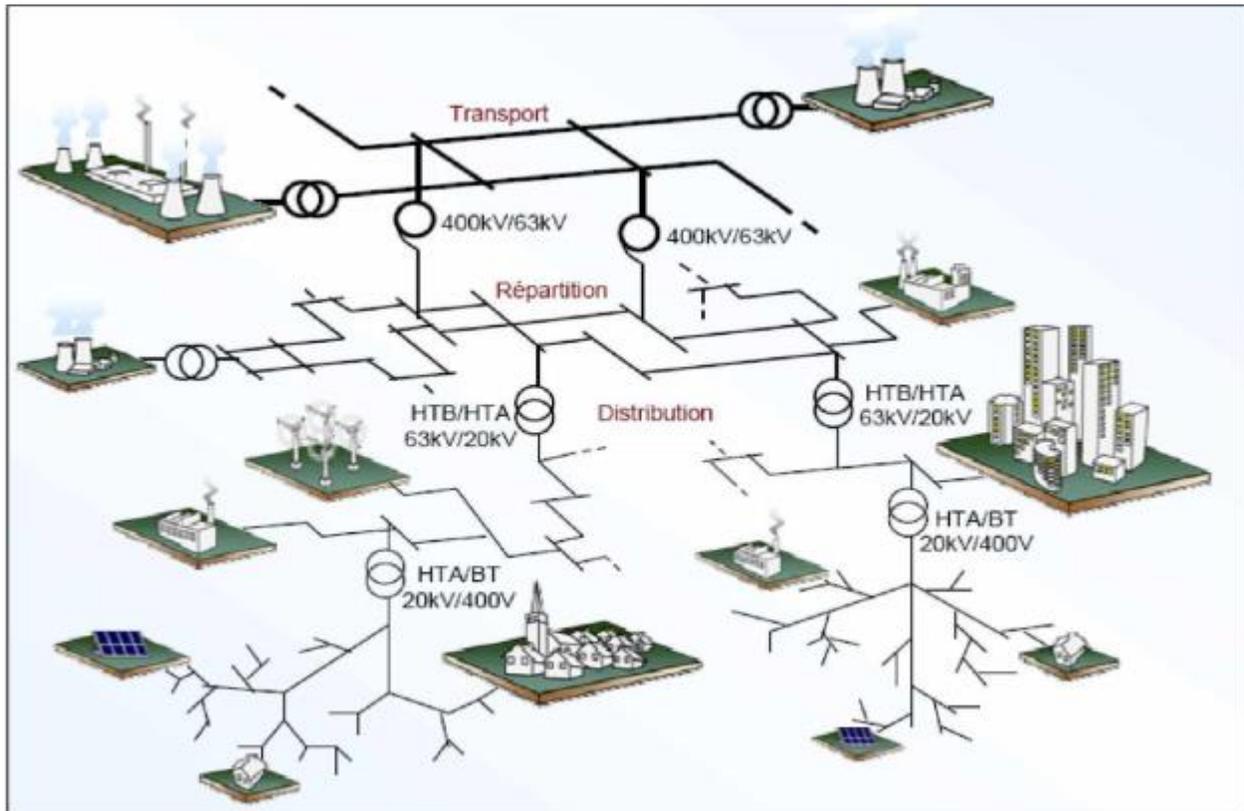


Figure I.6. Architecture générale des réseaux d'énergie électrique.

I.5. Conclusion :

Ce premier chapitre a permis d'avoir une vue générale sur les réseaux électriques. En premier lieu, on a présenté une structure générale du réseau électrique (maille, bouclé, radial) permet de comprendre les mécanismes d'acheminement de l'électricité aux consommateurs, on a présenté aussi les différentes fonctions des réseaux de transport, répartition et distribution d'énergie électrique. Le chapitre suivant sera consacré aux différents types de perturbations qui dégradent la qualité d'énergie électrique, et aux différents moyens de compensation d'énergie réactive.

CHAPITRE II

Les dispositifs FACTS

CHPITRE II : Les dispositifs FACTS

II.1. INTRODUCTION :

La notion de qualité signifie les propriétés de la production, on peut dire qu'on a une production de bonne ou de mauvaise qualité, s'il s'agit de l'énergie électrique, on exige une bonne qualité de celle-ci qu'on se basant sur les indices techniques (normes nominales). Alors, la qualité de l'énergie électrique (QEE) est un sujet stratégique pour assurer la compétitivité des entreprises. L'ouverture du marché de l'électricité et la diffusion en masse des équipements à la fois sensibles et générateurs de perturbations doivent être maîtrisées par les services d'exploitation et de maintenance électrique. La QEE est considérée comme une combinaison de la qualité de la tension et du courant. [10]

La qualité d'énergie ou de la tension est le concept d'efficacité de classer les équipements sensibles d'une manière qui convient à l'opération de l'équipement.

Pour rappel, la tension possède quatre caractéristiques principales : **La fréquence** ; **L'amplitude** ; **La forme d'onde** et **La symétrie**. [3]

Pour le réseau algérien, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale, mesurée, doit se trouver dans l'intervalle de $50 \text{ Hz} \pm 1 \%$. Le maintien de ce niveau de qualité est la responsabilité commune de tous les gestionnaires de réseaux concernés (zones de réglage), qui doivent participer aux réglages primaire et secondaire de la fréquence.

Le gestionnaire du réseau doit maintenir l'amplitude de la tension dans un intervalle de l'ordre de $\pm 10 \%$ autour de sa valeur nominale. Cependant, même avec une régulation parfaite, plusieurs types de perturbations peuvent dégrader la qualité de la tension :

- les creux de tension et les coupures brèves.
- les variations rapides de la tension (Flicker).
- les surtensions temporaires ou transitoires.

Les deux premières catégories posent les problèmes les plus fréquents (plus grande difficulté de s'en protéger). [3]

Les systèmes de transport à courant alternatif flexibles basés sur l'électronique de puissance offrent de nouvelles solutions. Les dispositifs FACTS peuvent être utilisés pour augmenter la capacité de transport, pour améliorer la stabilité et le comportement dynamique ou pour assurer une meilleure

CHPITRE II : Les dispositifs FACTS

qualité de puissance dans les réseaux modernes. Ils sont capables de compenser la puissance réactive, commander la tension et commander de l'écoulement de puissance. En raison de leur électronique de puissance contrôlable. [11]

Les dispositifs FACTS présentent une rapidité de commande par rapport aux dispositifs conventionnels comme la compensation conventionnelle ou aux transformateurs déphaseurs avec des commutateurs mécaniques de prises. [11]

Ce chapitre traite les différents types de perturbations qui dégradent la qualité d'énergie électrique, et aux différents moyens de compensation de l'énergie réactive.

II.2. Différents types de perturbation affectant la qualité de tension :

II.2.1. Creux de tension et coupures brèves :

II.2.1.1. Creux de tension :

Un creux de tension est une chute brutale de l'amplitude de la tension. Il est caractérisé par:

- Sa profondeur (ΔU) ;
- Sa durée (Δt).

La norme EN 50160 fixe la diminution de la tension à une valeur située entre 1% et 90% de la tension nominale pendant une durée de $\left(\frac{1}{2}\right)$ période à 50 Hz soit 10 ms jusqu'à une minute. La mesure d'un creux de tension s'effectue par la détermination de la valeur efficace de la tension toutes les $\left(\frac{1}{2}\right)$ périodes (avec recouvrement d'une $\left(\frac{1}{2}\right)$ période). Les creux de tension sont dus à l'apparition de défauts sur l'installation ou sur le réseau de distribution. (**Figure II.1) (1a)**. [10]

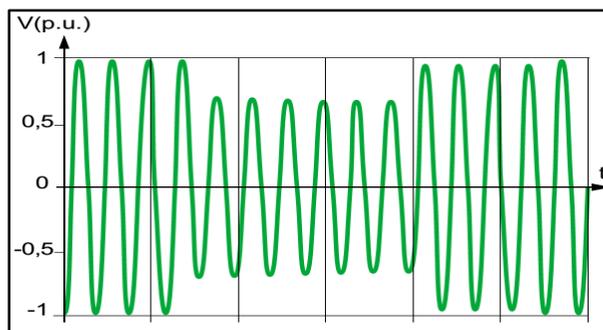


Figure II.1:(1a) : creux de tension.

CHPITRE II : Les dispositifs FACTS

La méthode habituellement utilisée pour détecter et caractériser un creux de tension est le calcul de la valeur efficace du signal sur une période du fondamental toutes les demi-périodes (Figure II.1) (1b).

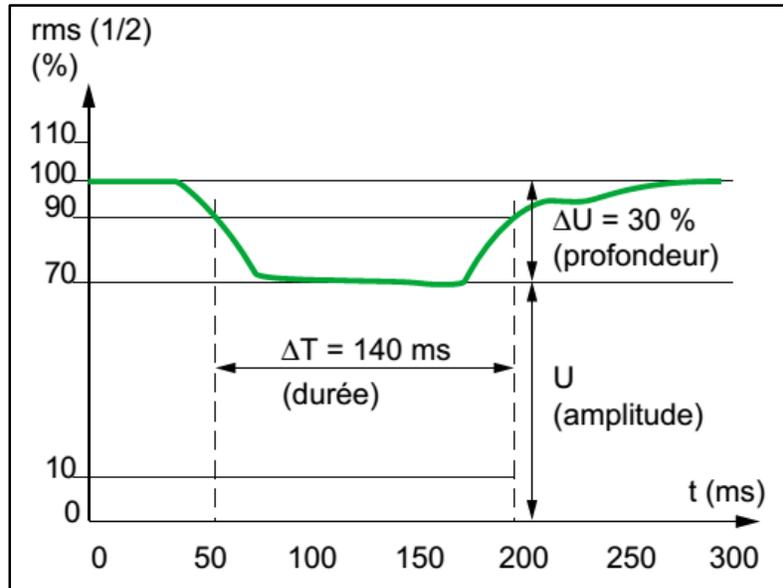


Figure II.1:(1b) : la méthode de calcul un creux de tension.

II.2.1.2. Les coupures:

Une coupure brève est un cas particulier du creux de tension. Sa profondeur est supérieure à 90% et elle est caractérisée uniquement par sa durée inférieure à 3 minutes. Les coupures longues sont supérieures à 3 minutes. Les coupures brèves sont généralement la cause de manœuvres des automatismes des réseaux de distribution (réenclencheurs, isolations de défaut). [10]

II.2.1.3. Origine:

Les creux de tension et les coupures brèves sont principalement causés par des phénomènes conduisant à des courants élevés. Alors, Les creux de tension et les coupures brèves ont différentes causes:

- des défauts sur le réseau de transport (HT) de distribution (BT et MT) ou sur l'installation elle-même.
- la commutation de charges de puissance importante (moteurs asynchrones, fours à arc, machines à souder, chaudières...) par rapport à la puissance de court-circuit.

CHPITRE II : Les dispositifs FACTS

Selon la durée on peut distinguer deux types de cause de coupures:

- Les coupures longues sont le résultat de l'isolement définitif d'un défaut permanent par les dispositifs de protection ou de l'ouverture volontaire ou intempestive d'un appareil.
- Les transitoires ($\Delta T < T/2$) sont causés, par exemple, par la mise sous tension de condensateurs ou l'isolement d'un défaut par un fusible ou par un disjoncteur rapide BT, ou encore par les encoches de commutations de convertisseurs polyphasés.

II.2.2. Les harmoniques et les Inter-harmoniques:

II.2.2.1. Les harmoniques :

Sont des signaux de fréquence multiple de la fréquence industrielle. Ils sont générés par des charges dites non-linéaires. Certains appareils ne présentent pas une impédance constante durant la durée de l'alternance de la sinusoïde de tension à 50 Hz. Ils absorbent alors un courant non sinusoïdal qui se propage dans le réseau et déforme ainsi l'allure de la tension.

Les harmoniques proviennent principalement de charges non linéaires dont la caractéristique est d'absorber un courant qui n'a pas la même forme que la tension qui les alimente. Ce courant est riche en composantes harmoniques dont le spectre sera fonction de la nature de la charge.

II.2.2.1.1. Les principales sources d'harmoniques :

Ce sont des charges, qu'il est possible de distinguer selon leurs domaines, industrielles ou domestiques :

- **Les charges industrielles :**
 - équipements d'électronique de puissance : variateurs de vitesse, redresseurs à diodes ou à thyristors, onduleurs, alimentations à découpage;
 - charges utilisant l'arc électrique : fours à arc, machines à souder, éclairage (lampes à décharge, tubes fluorescents). Les démarrages de moteurs par démarreurs électroniques et les enclenchements de transformateurs de puissance sont aussi générateurs d'harmoniques (temporaires).
 - **Les charges domestiques :** munies de convertisseurs ou d'alimentation à découpage: téléviseurs, fours à micro-ondes, ordinateurs, imprimantes, photocopieuses, gradateurs de lumière, équipements électroménagers, lampes fluorescentes.

CHPITRE II : Les dispositifs FACTS

II.2.2.1.2. Les niveaux d'harmoniques:

Ils varient généralement selon le mode de fonctionnement de l'appareil, l'heure de la journée et la saison (climatisation). Les sources génèrent, pour la plupart, des harmoniques de rangs impairs (**Figure II.2**). La mise sous tension de transformateurs ou les charges polarisées (redresseurs mono-alternance) ainsi que les fours à arc génèrent aussi (en plus des rangs impairs) des harmoniques de rangs pairs.

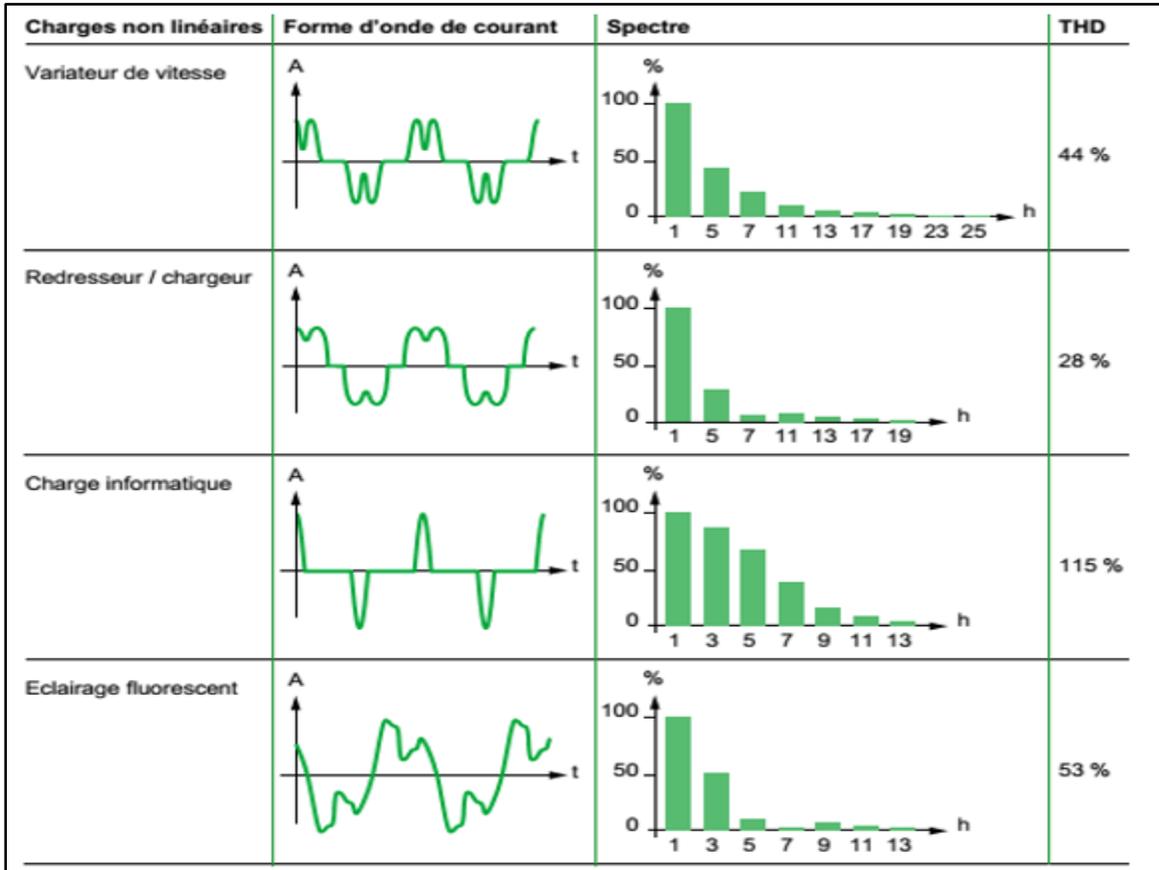


Figure II.2 : caractéristiques de quelques générateurs d'harmoniques.

II.2.2.2. Les inter-harmoniques :

Sont des composantes sinusoïdales, qui ne sont pas à des fréquences multiples entières de celle du fondamental (donc situées entre les harmoniques). Elles sont dues à des variations périodiques ou aléatoires de la puissance absorbée par différents récepteurs tels que fours à arc, machines à souder et convertisseurs de fréquences (variateurs de vitesse, cyclo-convertisseurs). Les fréquences de télécommande utilisées par le distributeur sont aussi des inter-harmoniques.

CHPITRE II : Les dispositifs FACTS

II.2.3. Surtensions :

Toute tension appliquée à un équipement dont la valeur de crête sort des limites d'un gabarit défini par une norme ou une spécification est une surtension. Les surtensions sont moins fréquentes que les creux de tension et sont généralement dues à des courts circuits dans les systèmes à neutre isolé qui engendrent à la fois des creux de tension et des surtensions. La norme **EN 50160** fixe les niveaux de surtensions selon le schéma de liaison à la terre de l'installation:

- Réseaux à neutre à la terre (raccordé directement ou avec une impédance): La surtension ne devra pas dépasser $1.7U_n$ (U_n est la tension nominale);
- Réseaux à neutre isolé ou résonant: La surtension ne devra pas dépasser $2U_n$.

Les surtensions sont de trois natures:

- **Surtensions temporaires:** Les surtensions temporaires prennent naissance suite à un défaut d'isolement entre phase et terre, lors d'une surcompensation de l'énergie réactive ou encore lors d'une Ferro-résonance provoquée par un circuit inductif et un condensateur;
- **Surtensions de manœuvre:** Les surtensions de manœuvre découlent d'une modification de la structure du réseau, mise en service de gradins de condensateur d'une ligne à vide;
- **Surtensions atmosphériques (foudre):** Les surtensions atmosphériques sont provoquées par la foudre soit directement, soit indirectement par augmentation du potentiel de la terre.

Elles apparaissent selon deux modes:

- Mode commun (entre conducteurs actifs et la masse ou la terre);
- Mode différentiel (entre conducteurs actifs, phase-phase ou phase-neutre). [10]

II.2.4. Fluctuations lentes de la tension:

La fluctuation lente de la tension (flicker) est une diminution de la valeur efficace de la tension de moins de 10%. La tension est modulée en amplitude par une enveloppe dont la fréquence est comprise entre 0.5 Hz et 25 Hz. Le phénomène est dû à la propagation sur les lignes du réseau

CHPITRE II : Les dispositifs FACTS

d'appels de courants importants à la mise en service ou hors service d'appareil dont la puissance absorbée varie de manière rapide (les fours à arcs, les machines à souder, les moteurs à démarrages fréquents,...).

Les conséquences de la fluctuation lente de la tension s'observent essentiellement sur des lampes à incandescence où elle provoque un papillotement du flux lumineux. Cette gêne visuelle est perceptible pour une variation de 1% de la tension. [10]

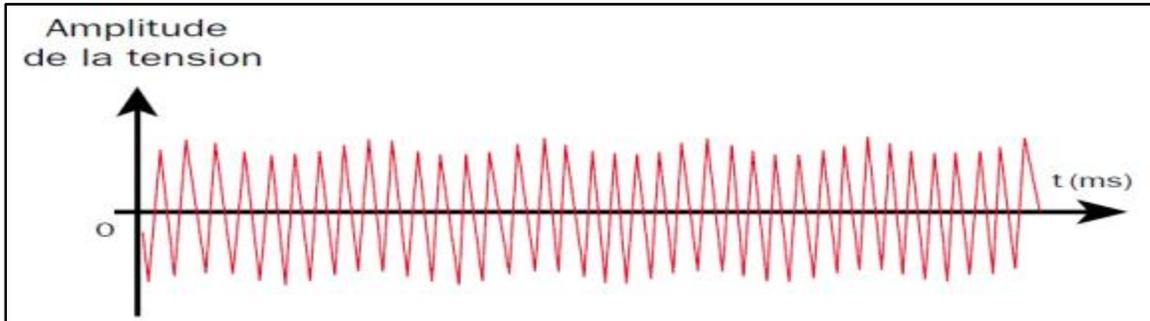


Figure II.3: Représentation d'une fluctuation lente de la tension.

II.2.5. Variation ou fluctuation de la fréquence:

Les fluctuations de fréquence sont observées le plus souvent sur des réseaux non interconnectés ou des réseaux sur groupes électrogènes. Dans des conditions normales d'exploitation, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle $50 \text{ Hz} \pm 1\%$. [12]

II.2.6. Baisse de tension:

Les baisses de tension (sags) sont une réduction de la tension d'une durée plus longue et sont dans la plupart du temps dues à une diminution volontaire de la tension par le fournisseur afin de réduire la puissance aux moments où la demande est maximale. Lorsque la puissance est anormalement faible par rapport à celle requise par la charge on parle également de **sags**. [3]

II.2.7. Déséquilibre de tension:

Un récepteur électrique triphasé, qui n'est pas équilibré et que l'on alimente par un réseau triphasé équilibré conduit à des déséquilibres de tension dus à la circulation de courants non équilibrés dans les impédances du réseau. Ceci est fréquent pour les

CHPITRE II : Les dispositifs FACTS

réceptrices monophasées basses tensions. Mais cela peut également être engendré, à des tensions plus élevées, par des machines à souder, des fours à arc ou par la traction ferroviaire. Un système triphasé est déséquilibré lorsque les trois tensions ne sont pas égales en amplitude et/ou ne sont pas déphasées les unes des autres de 120° . [3]

II.3. Exploitation d'un réseau électrique :

La puissance active P transitée entre deux réseaux de tensions V_1 et V_2 présentant un angle de transport δ et connecté par une liaison d'impédance X_L est représentée dans la **figure (II.4)** est donnée par l'équation (II.1). [13]

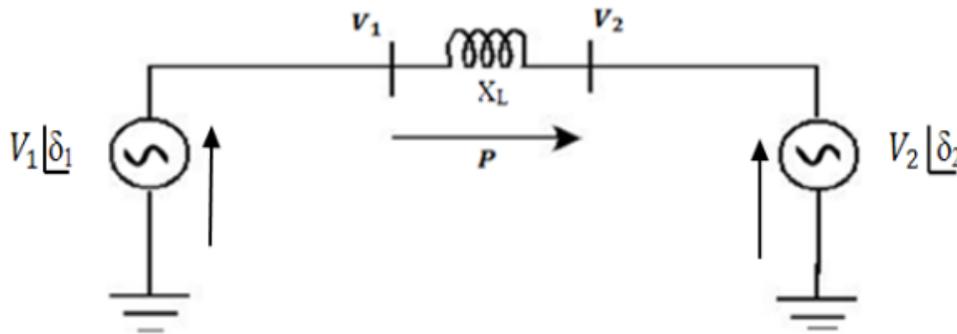


Figure II.4: Schéma d'un réseau interconnecté.

$$P = \frac{V_1 V_2}{X_L} \sin \delta \quad (\text{II.1})$$

L'expression (II.1) indique les paramètres par lesquels il est possible d'améliorer et contrôler le transit de puissance dans les réseaux tout en utilisant des dispositifs FACTS. Ces paramètres sont: **La réactance X_L , l'amplitude de la tension et l'angle de transport δ .**

II.3.1. Modification de la réactance :

L'insertion d'une réactance (inductive ou capacitive) en série ou en parallèle avec la ligne, dans le cas inductif permet la modification de la réactance de la ligne soit d'augmenter ou de diminuer la puissance qui transite dans cette ligne. Donc la variation de la réactance de la ligne agit simultanément sur les puissances actives et réactives. [13]

CHPITRE II : Les dispositifs FACTS

II.3.2. Modification de la tension:

La modification de la tension aux nœuds permet de contrôler principalement les flux de puissance, la puissance active et réactive tend à circuler de la tension la plus élevée à celle qui est la moins élevée. [13]

II.3.3. Modification de l'angle de transmission :

La modification de l'angle de transmission δ permet d'agir sur le transit de puissance active, réalisé par injection d'une tension. On utilise pour cela des transformateurs raccordés en série dans la liaison. [13]

II.4. Différents moyens de compensation :

Il existe deux moyens de compensation : **La compensation conventionnelle** et **la compensation FACTS**.

II.4.1.Compensation conventionnelle:

Le réseau lui-même est une source non négligeable de puissance réactive. Ainsi, en dehors de la production de l'énergie réactive par les générateurs, le réseau doit faire appel à d'autres sources ou d'autres moyens de compensation, qui sont les compensateurs conventionnels.

II.4.1.1.Les Inductances :

Elles sont utilisées pour compenser l'énergie réactive fournie en heures creuses par les lignes à très haute tension ou par les câbles. Elles sont soit directement raccordées au réseau, soit branchées sur les tertiaires des transformateurs. Par conséquent, elles permettent une limitation des surtensions dans le réseau. [14]

II.4.1.2.Les Condensateurs:

Ils ont pour rôle de fournir une partie de l'énergie réactive consommée par les charges dans le réseau. On distingue deux types:

CHPITRE II : Les dispositifs FACTS

- Des batteries de condensateurs HT, raccordées aux jeux de barres HT des postes THT/HT. Elles sont essentiellement destinées à compenser les pertes réactives sur les réseaux HT et THT.
- Des batteries de condensateurs MT, raccordées aux jeux de barres MT des postes HT/MT ou THT/MT. Ces batteries servent à compenser l'appel global de l'énergie réactive des réseaux de distribution aux réseaux de transport. Elles sont localisées et dimensionnées individuellement en fonction du réglage de tension. [12]

II.4.1.3. Compensateurs statiques:

Ils sont constitués par l'ensemble de condensateurs et d'inductances commandées par thyristors, montés en tête-bêche dans chaque phase. La puissance réactive absorbée par l'inductance varie en contrôlant la valeur efficace du courant qui la traverse par action sur l'angle d'amorçage des thyristors. [12]

II.4.1.4. Compensateur synchrone:

Les compensateurs synchrones sont des machines tournantes qui ne fournissent aucune puissance active, mais qui peuvent suivant qu'elles soient sous ou surexcitées, fournir ou absorber de la puissance réactive. [12]

II.4.2. Systèmes FACTS:

II.4.2.1. Généralité sur les dispositifs FACTS :

Selon l'IEEE, la définition du terme FACTS est un système de transmission en courant alternatif comprenant des dispositifs basés sur l'électronique de puissance et d'autres dispositifs statiques utilisés pour accroître la contrôlabilité et augmenter la capacité de transfert de puissance du réseau.

Le concept FACTS, introduit en 1986 par EPRI regroupe l'ensemble des dispositifs basés sur l'électronique de puissance qui permettent d'améliorer l'exploitation d'un réseau électrique. 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 peuvent contribuer à faire face aux problèmes rencontrés dans l'exploitation des réseaux électriques.

CHPITRE II : Les dispositifs FACTS

Ces éléments jouent le rôle d'interrupteurs très rapides, ce qui confère aux dispositifs FACTS une vitesse et une fiabilité bien supérieures à celles des systèmes électromécaniques classiques. [15]

La classification des FACTS en termes « rapide » et « statique » a besoin d'une certaine explication. Le terme « rapide » est employé pour exprimer la contrôlabilité rapide des FACTS fournis par l'électronique de puissance. C'est l'un des facteurs principaux de différenciation des dispositifs conventionnels. Le terme « statique » signifie que les dispositifs n'ont aucune pièce mobile comme les commutateurs mécaniques pour exécuter la contrôlabilité rapide. [11]

II.4.2.2. Rôle des FACTS dans un réseau électrique : [16]

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 permanent 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 de déphasage.

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 transits de puissances de manière à réduire, les surcharges dans les lignes où les transformateurs ainsi que pour éviter les congestions dans le réseau. Ils

CHPITRE II : Les dispositifs FACTS

agissent alors en contrôlant la réactance des lignes et en ajustant les déphasages. Ainsi 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.

Les dispositifs FACTS ont également une action bénéfique sur les niveaux des courants de court-circuit ainsi qu'en cas de résonance hypo synchrone.

II.4.2.3. Classification des dispositifs FACTS : [17]

Depuis les premiers compensateurs, trois générations de dispositifs FACTS ont vu le jour. Elles se distinguent par la technologie des semi-conducteurs et des éléments de puissance utilisés.

1. La première génération est basée sur les thyristors classiques. Ceux-ci sont généralement utilisés pour enclencher ou déclencher les composants afin de fournir ou absorber de la puissance réactive dans les transformateurs de réglage.
2. La deuxième génération, dite avancée, est née avec l'avènement des semi-conducteurs de puissance commandables à la fermeture et à l'ouverture, comme le thyristor GTO. Ces éléments sont assemblés pour former les convertisseurs de tension ou de courant afin d'injecter des tensions contrôlables dans le réseau.
3. Une troisième génération de FACTS utilisant des composants hybrides et qui est adaptée à chaque cas. Contrairement aux deux premières générations, celle-ci n'utilise pas de dispositifs auxiliaires encombrants tels que des transformateurs pour le couplage avec le réseau.

Une autre classification des contrôleurs FATCS basée sur le mode de couplage peut être réalisée. Selon ce critère, trois familles de dispositifs FACTS peuvent être mises en évidence :

- les dispositifs shunt connectés en parallèle dans les postes du réseau.
- Les dispositifs séries insérées en série avec les lignes de transport.
- Les dispositifs combinés série-parallèle qui recourent simultanément aux deux couplages.

[17]

CHPITRE II : Les dispositifs FACTS

II.4.2.4. Dispositifs shunt:

Ces équipements ont fait leur apparition vers la fin des années 60. Ils sont constitués essentiellement d'une inductance en série avec un gradateur. Le retard à l'amorçage des thyristors permet de régler l'énergie réactive absorbée par le dispositif. En effet, tous les compensateurs parallèles injectent du courant au réseau via le point de raccordement. [18]

Ces derniers sont insérés en Shunt sur le réseau, ils permettent ainsi d'injecter un courant sur le réseau au point de raccordement. La variation du courant injecté sur le réseau permet de modifier le flux de puissance active et réactive qui transitent, et aussi sur la tension du point de raccordement. [19]

- Les condensateurs montés en Shunt fournissent de la puissance réactive au réseau augmentant la tension au point de raccordement (utilisés dans le cas d'une forte consommation, où dans des zones éloignées).
- Les sources de tension variable couplées à une impédance permettent de basculer entre les deux modes cités précédemment, ainsi que de stabiliser la tension au point de raccordement selon le cas.

Les compensateurs parallèles les plus utilisés sont : **SVC, STATCOM.**

Les applications principales dans le réseau du transport, distribution et les réseaux industriels sont :

- Réduction de flux de puissance réactifs non désirés et donc de pertes réduites de réseau ;
- Conservation des échanges de puissance contractuelle avec une puissance réactive équilibrée ;
- La compensation des consommateurs et l'amélioration de la qualité de puissance particulièrement avec des fluctuations énormes de demande comme les machines industrielles, les usines de fusion des métaux, le chemin de fer. etc.
- La compensation des convertisseurs de thyristor par exemple dans le CCHT (courant continu haute tension) conventionnel ;
- Amélioration de stabilité statique et dynamique. [11]

CHPITRE II : Les dispositifs FACTS

II.4.2.4.1. Compensateur statique de puissance réactive (SVC) :

Compensateur statique de puissance réactive (SVC) est un dispositif de compensation shunts de la famille flexible de systèmes de transmission à courant alternative (FACTS). Il peut fournir en continu la puissance réactive nécessaire pour contrôler les fluctuations dynamiques de la tension sous différents régimes de fonctionnement et ainsi améliorer les performances de réseaux de transport et de distribution d'énergie électrique. L'installation de SVC en un ou plusieurs points spécifiques du réseau peut accroître la capacité de transit et réduire les pertes tout en maintenant un profil de tension régulier sous différents régimes. De surcroît, un compensateur statique sa puissance réactive peut atténuer les oscillations des amplitudes de tension. [16]

En principe le SVC se compose d'un ensemble de :

- **TCR (Thyristor Controlled Reactor):**

Dans le TCR (ou RCT : Réactances commandées par thyristors), la valeur de l'inductance est continuellement changée par l'amorçage des thyristors, qui fait varier le courant à travers l'inductance et cela en variant l'angle d'amorçage des thyristors compris entre 90° et 180° .

Le TCR est caractérisé par sa commande continue et par sa génération d'harmoniques sur le réseau, permet de générer ou d'absorber de l'énergie réactive.

- **TSC (Thyristor Switched Capacitor):**

Dans le TSC (ou CCT : Condensateurs commandés par thyristor), les thyristors fonctionnent en pleine conduction. Le TSC fournit une solution plus rapide et plus fiable à la commutation de condensateurs que les dispositifs mécaniques conventionnels de commutation.

Le rôle d'un filtre à courant alternatif est de réduire les harmoniques introduites par l'utilisation du TCR. Pour cela le filtre fournit une puissance réactive au réseau.

Le schéma de structure de base de ce dispositif représenté sur **la figure(II.5)** :

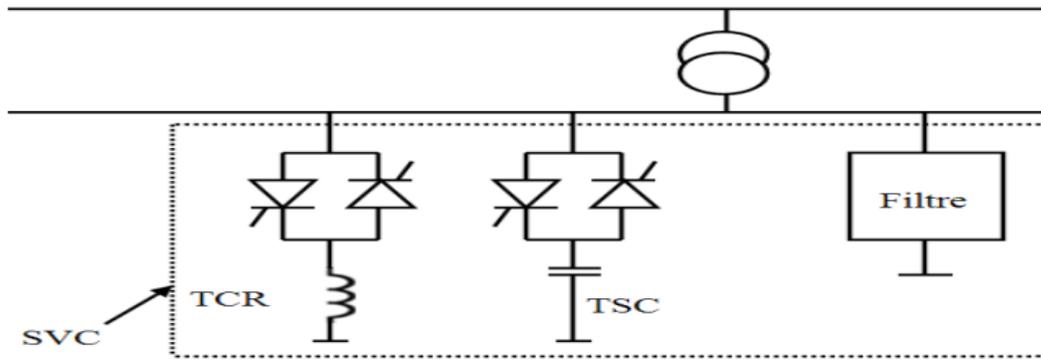


Figure II.5: Structure de base d'un SVC.

- **Principe de fonctionnement du SVC :**

Ce dispositif est basé sur l'électronique de puissance utilisée dans la régulation de la tension avec de grandes performances et d'améliore le transit de puissance, permet le réglage de la tension par variation de commande du gradateur en série dont le fonctionnement est basé sur la modification de la réactance équivalente du réseau par variation de l'angle de commande.

La caractéristique statique de la puissance réactive d'un compensateur statique est donnée par la figure (II. 6).

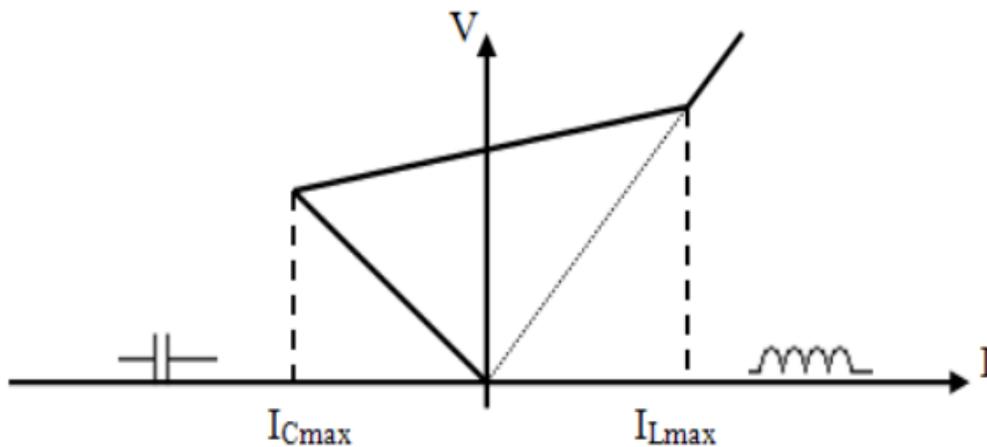


Figure II.6: Caractéristique d'un SVC.

CHPITRE II : Les dispositifs FACTS

- **Avantages du SVC :**

Le SVC présente plusieurs avantages : [16]

- Stabiliser la tension dans les systèmes faibles ;
- Réduire les pertes de transmission ;
- Augmenter la capacité de transmission ;
- augmenter la limite de stabilité ;
- Améliorer la commande et la stabilité de tension ;
- Atténuer les oscillations de puissance.

- **Applications du SVC:**

Les principales applications du compensateur statique de puissance réactive sont : [17]

- Soutien de la tension en régime permanent ;
- Compensation rapide de la puissance réactive ;
- Stabilisation statique et transitoire de la tension ;
- Réduction des risques de résonance hypo synchrone ;
- Equilibrage dynamique des charges;
- Amélioration de la stabilité synchrone.

II.4.2.4.2. Compensateur statique (STATCOM) :

En 1999 le premier SVC avec VSC appelé STATCOM (COMPensateur STATique) est met en pratique. Un STATCOM est construit avec des thyristors commandés à la fermeture et l'ouverture comme les GTO (Gate turn Off thyristor) ou les IGCT (Integrated gate-commutated thyristor) ou avec des IGBT (Insulated-gate bipolar transistor). [15]

Alors Un STACOM est un système d'électronique de puissance connecté en parallèle, qui injecte dans le réseau un courant alternatif contrôlé en phase et en amplitude. Leur topologie est basée sur des convertisseurs de tension. Le schéma de STATCOM est donné par **la figure (II.7)**

Le rôle du STATCOM est d'échanger de l'énergie réactive avec le réseau. Pour ce 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. [20]

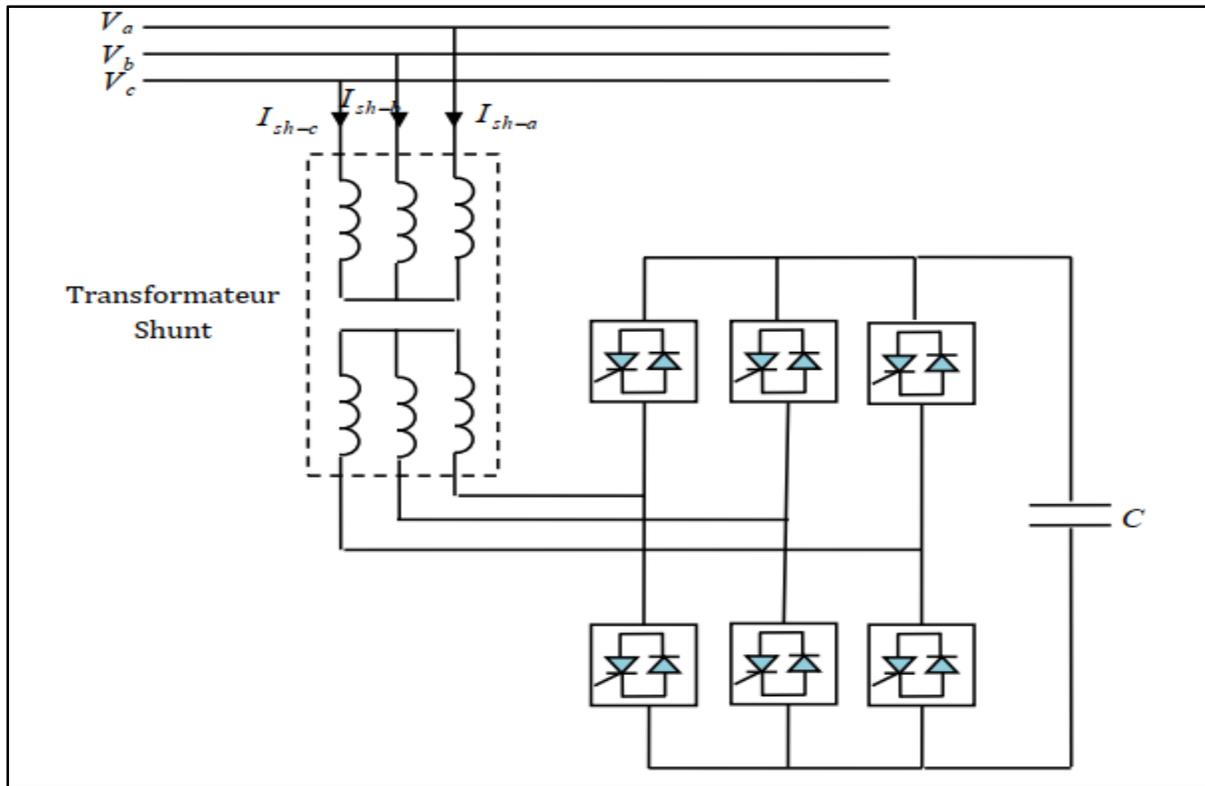


Figure II.7: Schéma de base du STATCOM.

- **Principe de fonctionnement du STATCOM :**

Le principe de fonctionnement de STATCOM est similaire à celui du compensateur synchrone. Les tensions de sortie sont générées par un onduleur au lieu d'avoir été créées par un groupe tournant. Ce principe a pu être mis en œuvre grâce à l'évolution des composants de l'électronique de puissance, et surtout grâce à l'apparition des GTO de forte puissance. Les cellules de commutation sont bidirectionnelles, c'est-à-dire formées de GTO et de diodes en antiparallèle. Le rôle de STATCOM est d'échanger l'énergie réactive avec les réseaux électriques. L'échange d'énergie réactive se fait par le contrôle de la tension de sortie de l'onduleur V_s , laquelle est en phase avec la tension du réseau. [15]

CHPITRE II : Les dispositifs FACTS

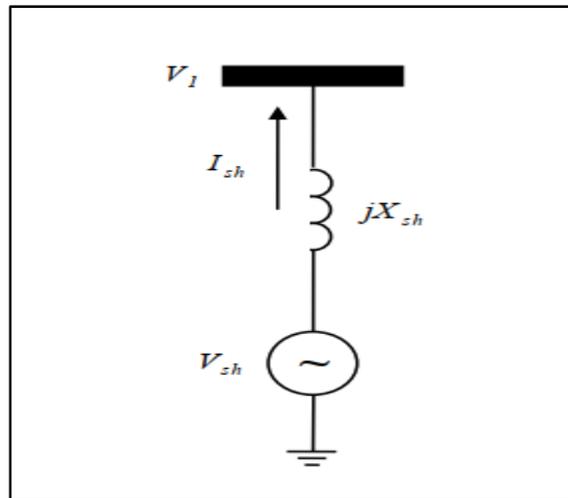


Figure II.8: le schéma simplifié d'un STATCOM.

- Si $V_1 < V_{sh}$ le courant circulant dans l'inductance est déphasé de $(+\pi/2)$ par rapport à la tension V_1 ou le courant est capacitif.

Donc le STATCOM fournit de l'énergie réactive.



Figure II.9 : Diagramme de Fresnel lorsque $V_1 < V_{sh}$.

- Si $V_1 > V_{sh}$ le courant circulant dans l'inductance est déphasé de $(-\pi/2)$ par rapport à la tension V_1 ou le courant est inductif.

Donc le STATCOM absorbe de l'énergie réactive.

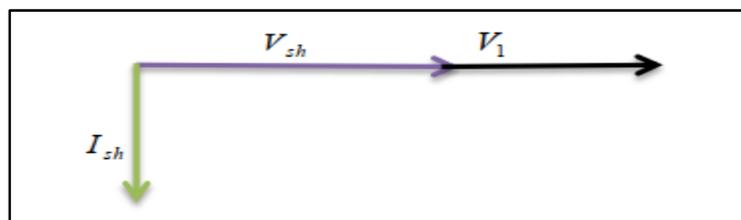


Figure II.10 : Diagramme de Fresnel lorsque $V_1 > V_{sh}$.

CHPITRE II : Les dispositifs FACTS

- Si $V_s = E$, le courant circulant dans l'inductance est nul, il n'y a pas d'échange d'énergie. On considère dans ce fonctionnement que les tensions sont triphasées et équilibrées. Par ailleurs, l'amplitude de la tension de sortie est proportionnelle à la tension continue aux bornes du condensateur.

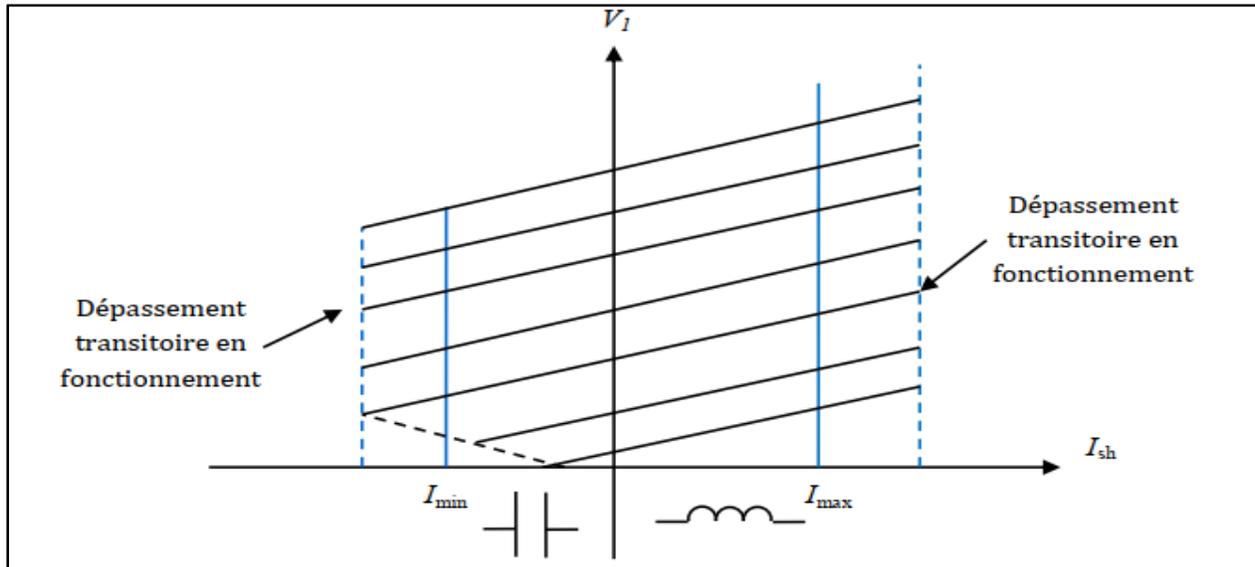


Figure II.11: Caractéristique statique du STATCOM.

- **Avantages du STATCOM :**
 - bonne réponse à faible tension : le STATCOM est capable de fournir son courant nominal, même lorsque la tension est presque nulle.
 - bonne réponse dynamique : Le système répond instantanément.
 - L'étendue de la plage de l'opération est plus large qu'avec un SVC classique.
 - Pour un contrôle optimal de la tension, les phases sont contrôlées séparément pendant les perturbations du système.
 - Un design modulaire du convertisseur permet une adaptation pour une grande plage de puissances nominales. [16]

II.4.2.5. Dispositifs série:

Les dispositifs FACTS de compensation série sont des impédances variables (inductives, capacitives) ou des sources de tensions variables employées afin de réduire la partie réactive de l'impédance de la ligne, Ils agissent généralement en insérant une tension capacitive sur la ligne de

CHPITRE II : Les dispositifs FACTS

transport qui permet de compenser la chute de tension inductive. Leurs applications principales sont:

- réduction de la chute de tension série de la ligne en module et en angle ;
- réduction de fluctuations de tension dans des limites définies pendant les changements des puissances transmis ;
- l'atténuation des oscillations;
- limitation des courants de court-circuit dans les réseaux ou les postes ;
- prévention de flux de boucle et ajustement de flux de puissance. [11]

II.4.2.5.1. Compensateur série commandée par thyristor (TCSC) :

Les TCSC (compensateur série contrôlé par thyristors) abordent des problèmes dynamiques spécifiques dans les réseaux de transports. Premièrement ils augmentent l'amortissement des oscillations lors de l'interconnexion des grands réseaux électriques. Deuxièmement ils peuvent surmonter le problème de la résonance Sous-Synchrone (SSR), un phénomène qui implique une interaction entre les grandes unités de production des et les réseaux de transports compensés en série. La grande vitesse de commutation du TCSC fournit un mécanisme pour le contrôle d'écoulement de puissance de la ligne, qui permet l'augmentation de la puissance transportée par les lignes de transport existantes, et tient compte du réajustement rapide d'écoulement de puissance de la ligne en réponse à des éventualités diverses. Le TCSC peut également régler le flux de puissance à l'état stable dans ses limites d'estimation. [11]

- **Principe de fonctionnement:**

Le TCSC est composé d'une inductance en série avec un gradateur à thyristor, le tout en parallèle avec un condensateur **figure (II.12)**. L'insertion d'un TCSC fonction en mode capacitif en série à une ligne permet de réduire la réactance équivalente de réseau par conséquent la chute de tension et d'élèver les capacités de transport d'une ligne. Ces avantages peuvent être enregistré instantanément grâce à la rapidité de TCR se qui permet le maintien de la stabilité entre régions interconnectées.

CHPITRE II : Les dispositifs FACTS

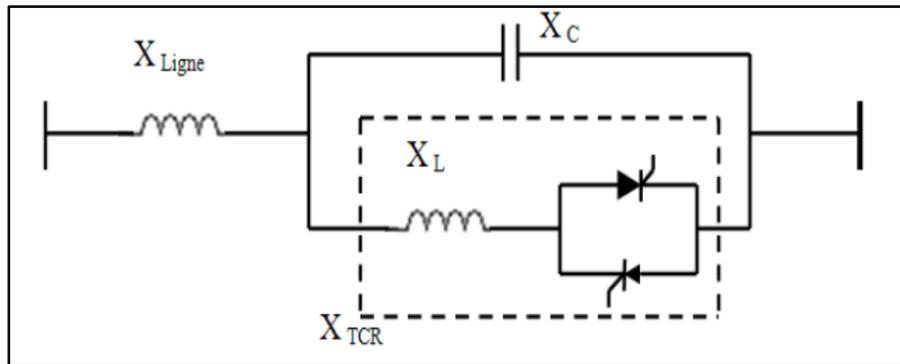


Figure II.12 : Insertion d'un TCSC dans une ligne.

Avec:

X_C : Impédance du condensateur du TCSC ;

X_L : Impédance de l'inductance du TCSC ;

X_{Ligne} : Impédance de la ligne.

- **Applications du TCSC:**

- L'augmentation du transit de puissance sur les lignes ;
- La compensation du déséquilibre des courants de charge ;
- L'amélioration de la stabilité dynamique ;
- L'amortissement des oscillations de puissance ;
- La réduction des risques de résonance hypo synchrone ;
- L'inter-connexion des réseaux;
- La stabilisation de la tension. [17]

II.4.2.5.2. Le Compensateur Synchrone Statique Série SSSC : [20]

Ce type de compensateur série (Compensateur Synchrone Statique Série) est le plus important dispositif de cette famille. Il est constitué d'un onduleur triphasé couplé en série avec la ligne électrique à l'aide d'un transformateur **figure (II.13)**.

Son rôle est d'introduire une tension triphasée, à la fréquence du réseau, en série avec la ligne de transport. Cette tension est en quadrature avec le courant de ligne. Nous pouvons, dans ce cas, régler continuellement la valeur apparente de la capacité ou de l'inductance ainsi introduite dans la ligne. L'avantage de ce compensateur est de ne pas

CHPITRE II : Les dispositifs FACTS

introduire physiquement un condensateur ou une inductance, mais de simuler leurs fonctions. Cela évite l'apparition des oscillations dues à la résonance avec les éléments inductifs du réseau.

Si l'on utilise un système de stockage d'énergie, le SSSC peut à ce moment-là échanger de la puissance active avec la ligne électrique. Ceci peut contribuer à améliorer la stabilité du réseau. Dans ce cas la tension V_s n'est pas obligatoirement en quadrature avec le courant de ligne.

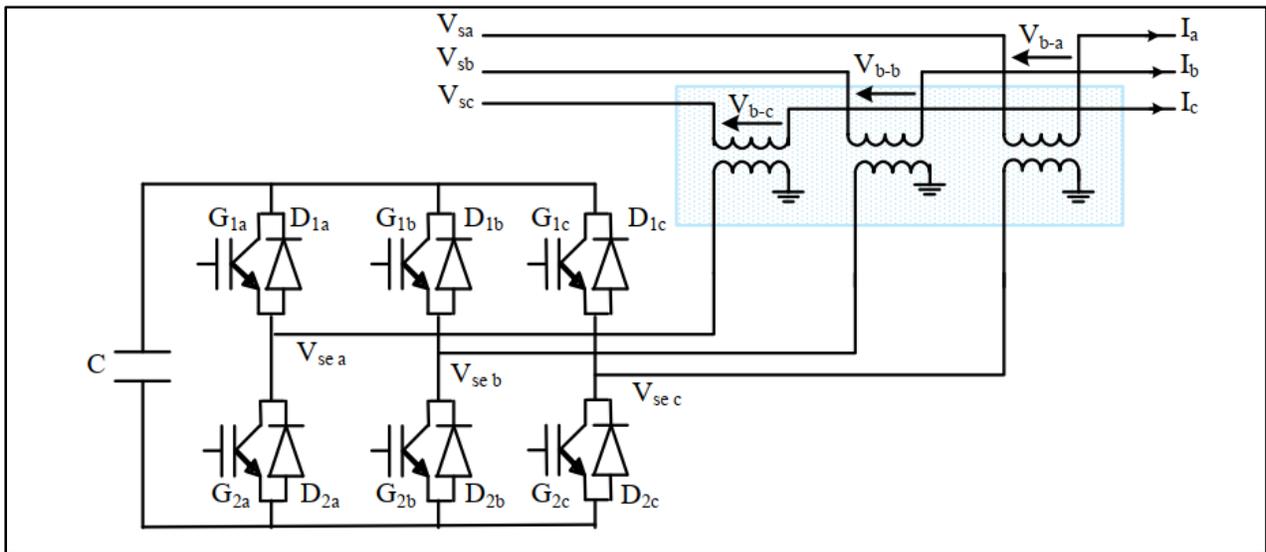


Figure II.13 : schéma de base d'un SSSC.

La caractéristique statique d'un Compensateur Synchrone Statique Série est donnée sur la **figure (II.14)**.

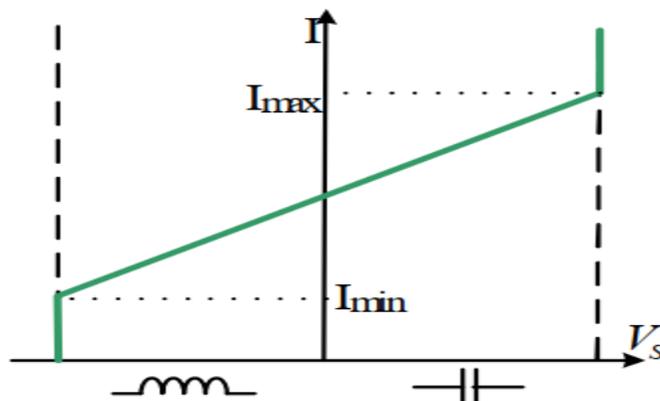


Figure II.14 : caractéristique V-I du SSSC.

CHPITRE II : Les dispositifs FACTS

- Si l'injection de la tension s'effectue avec un angle de 90° en arrière par rapport au courant de la ligne, on obtient une compensation série qu'est équivalente à un condensateur série à la fréquence fondamentale.
- Si par contre, la tension injectée est en avance de 90° par rapport au courant, la compensation a le même effet que celui d'augmenter l'impédance réactive de la ligne.
- **Applications du SSSC :**

Les applications pour lesquelles sont utilisées les SSSC sont identiques à celles où l'on a recours à des condensateurs séries réglables. Ce sont plus particulièrement: [17]

- les commandes statiques et dynamiques des flux de puissances ;
- L'amélioration de la stabilité angulaire ;
- L'atténuation des oscillations électromécaniques.

II.4.2.6. Dispositifs FACTS combinés série-parallèle :

Les dispositifs FACTS présentés précédemment permettent d'agir uniquement sur un des trois paramètres déterminant la puissance transmise dans une ligne (tension, impédance et angle). Alors que les dispositifs FACTS combinés série-parallèle se sont des dispositifs qui combinent des convertisseurs shunt et série et qui permettent un contrôle simultané du transit de puissance. Les plus utilisés des dispositifs de cette famille sont l'IPFC et l'UPFC.

II.4.2.6.1. UPFC (Unified power flow controller):

L'UPFC (Unified Power Flow Controller), appelé aussi Déphaseur Régulateur Universel (DRU) ou variateur de charge universel, est l'un des plus performants des composants FACTS. Il est capable de contrôler, simultanément et indépendamment, la puissance active et la puissance réactive de la ligne. L'originalité de ce compensateur est de pouvoir contrôler les trois paramètres associés au transit de puissance dans une ligne électrique : la tension, l'impédance de la ligne, le déphasage des tensions aux extrémités de la ligne. [15]

CHPITRE II : Les dispositifs FACTS

Selon **IEEE**, définis l'UPFC comme étant une combinaison entre un STATCOM et un SSSC couplés via une liaison à courant continu, pour permettre un écoulement bidirectionnel de la puissance active entre la sortie du SSSC et celle du STATCOM.

En principe, l'UPFC 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. [15]

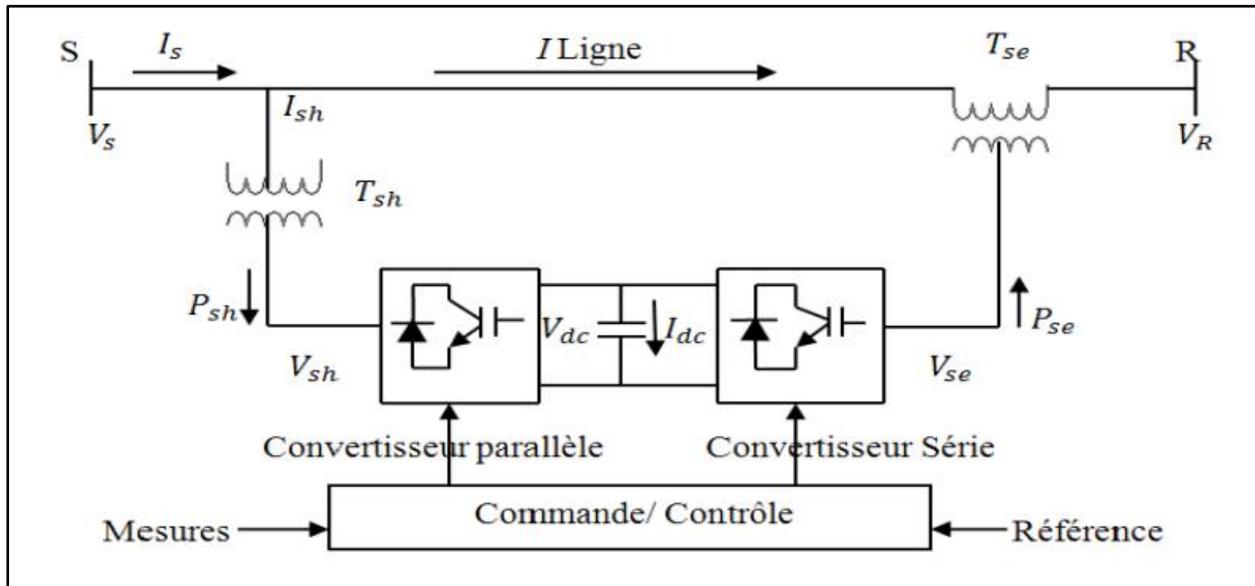


Figure II.15 : Schéma simplifiée d'un UPFC.

- **Principe de fonctionnement:**

Le dispositif UPFC est constitué de deux onduleurs triphasés de tension à thyristors GTO, l'un connecté en parallèle au réseau par l'intermédiaire d'un transformateur triphasé, l'autre connecté en série avec le réseau via trois transformateurs monophasés dont les primaires sont reliés, entre eux, en étoile .

Les deux onduleurs sont interconnectés par un bus continu et par un condensateur de filtrage comme indiqué sur la **figure(II.15)**.

L'onduleur série injecte une tension à la même fréquence que celle du réseau et dont l'amplitude et la phase est ajustable. Ce réglage d'amplitude et de phase permet d'obtenir trois modes de fonctionnement de la partie série :

CHPITRE II : Les dispositifs FACTS

- Contrôle de tension : la tension injectée est en phase avec celle du côté shunt.
- Contrôle de l'impédance de ligne : la tension injectée est en quadrature avec le courant de ligne. Ce mode permet de faire varier l'impédance de la ligne comme un compensateur série.
- Contrôle de phase : l'amplitude et la phase de la tension injectée sont calculées de manière à obtenir le même module de la tension avant et après l'UPFC.

Le but principal de ces trois modes de fonctionnement est le contrôle des puissances actives et réactive qui transitent dans la ligne. De plus, l'UPFC est capable de combiner les différentes compensations et de basculer d'un mode de fonctionnement à un autre.

La partie shunt peut être utilisée afin de compenser la puissance réactive pour le maintien du plan de la tension au nœud S et éventuellement fournir de la puissance active injectée dans le réseau par la partie série. [16]

Comme il a été déjà mentionné l'UPFC peut contrôler indépendamment ou séparément tous les paramètres affectant le flux de puissance sur une ligne de transmission. L'UPFC peut avoir différents modes de fonctionnement quand la tension injectée en série a différentes amplitudes et angle de phase. [20]

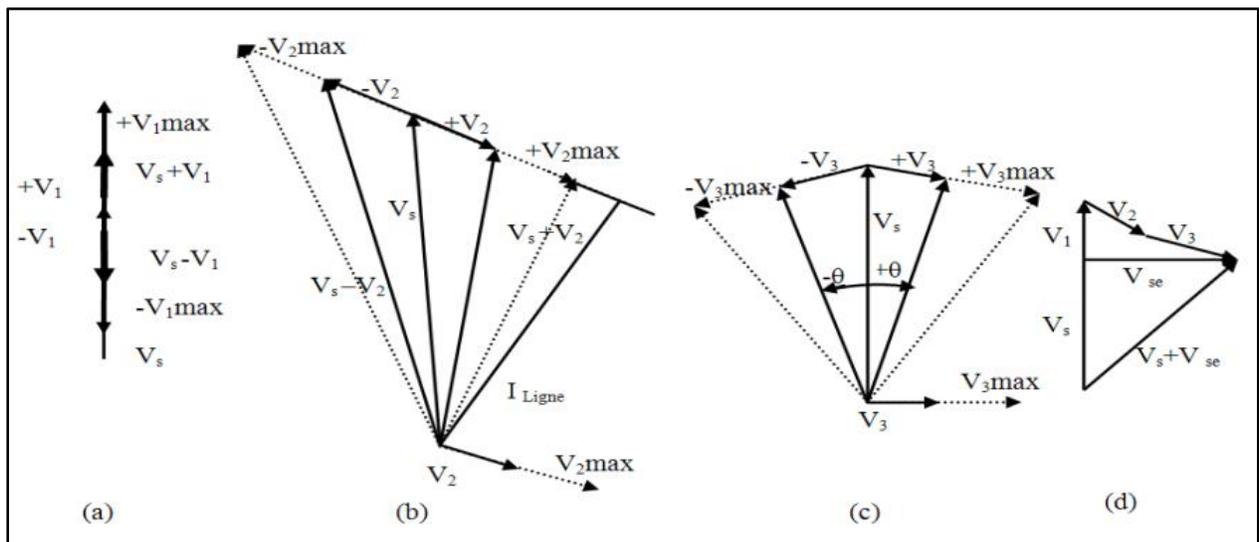


Figure II.16 : Mode de fonctionnement d'un UPFC.

CHPITRE II : Les dispositifs FACTS

- Régulation de tension **figure (II.16) (a)**. La tension de départ V_s est augmentée (ou diminuée) en injectant une tension V_1 , en phase avec V_s . La tension V_1 est réglable en module et possède une amplitude maximale V_{1max} .
- Compensation série (régulateur d'impédance) **figure (II.16) (b)**. La tension injectée V_2 est en quadrature avec le courant de ligne. La tension V_2 possède une amplitude maximale V_{2max} . Ce mode permet de faire varier l'impédance de la ligne comme un compensateur série.
- Contrôle de phase **figure (II.16) (c)**. L'angle de la tension injectée V_3 est variable alors que l'amplitude de la tension V_s reste constante.
- Contrôle simultané **figure (II.16) (d)**. Il est possible à l'UPFC d'accomplir trois fonctions à savoir le réglage de la tension, la compensation série et le réglage de l'angle de phase simultanément c'est le mode de fonctionnement automatique. L'angle de phase et l'amplitude de la tension injectée $V_{se} = V_1 + V_2 + V_3$ sont choisis d'une manière à produire un courant de ligne qui permet d'obtenir les puissances active et réactive désirées.
- **Applications de l'UPFC :**

Les principales applications du contrôleur de puissance universel sont :

- La commande des transits de puissances sur les lignes ;
- L'amélioration de la stabilité des réseaux électriques ;
- L'exploitation à pleine capacité des équipements et des lignes ;
- L'interconnexion des réseaux ; [21]
- Le réglage de la tension ;
- L'amélioration des flux de puissances active et réactive ;
- La limitation des courants de court-circuit ;
- L'amortissement des oscillations de puissance. [12]

II.4.2.6.2. 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

CHPITRE II : Les dispositifs FACTS

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. La première proposition de L'IPFC est faite en 1998 par Gyugyi, Sen et Schuder. La **figure (II.17)** représente le schéma de base d'un IPFC. [1]

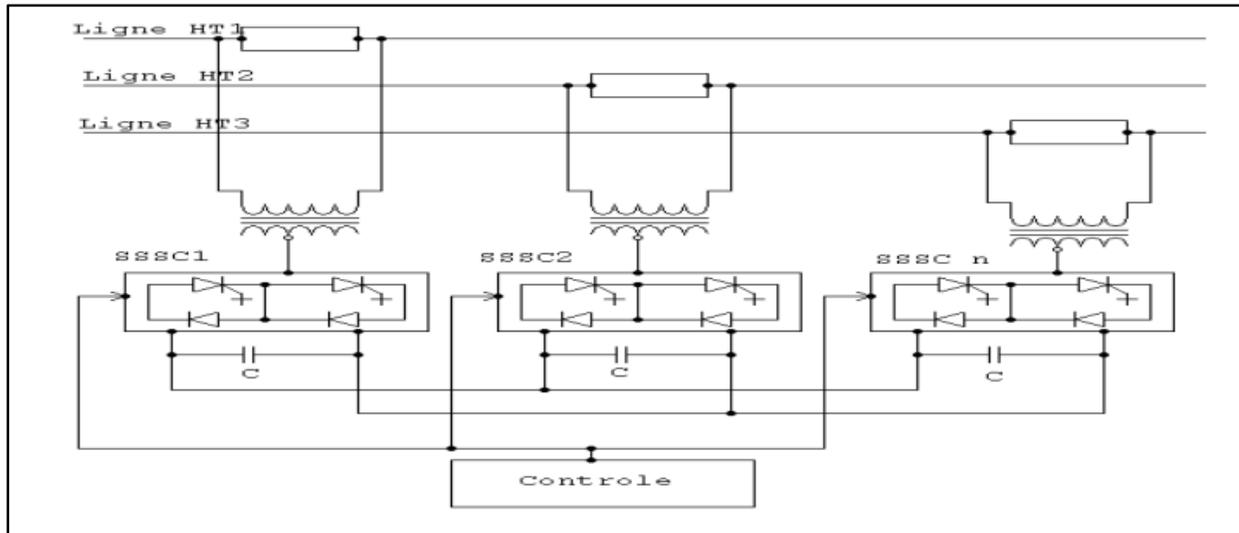


Figure II.17 : Schéma simplifiée d'un IPFC.

L'IPFC permet le transférer de la puissance active entre les lignes compensées pour égaliser les transits de puissances active et réactive sur les lignes ou pour décharger une ligne surchargée vers une autre moins chargée. Les tensions injectées possèdent une composante en quadrature et une composante en phase avec les courants respectifs des lignes. La composante en quadrature permet une compensation série indépendante dans chaque ligne, alors que la composante en phase permet le contrôle de puissance active échangée entre les lignes. [1]

II.4.2.7. Les avantages et les inconvénients des FACTS : [17]

II.4.2.7.1. Avantages des dispositifs FACTS : Les avantages apportés aux réseaux électriques sont:

- Grande fiabilité grâce à l'utilisation de contrôleur d'électronique de puissance caractérisée par une grande rapidité de réaction;
- Une grande flexibilité dans le contrôle de la puissance de telle sorte qu'elle s'écoule le long de l'itinéraire de transmission prescrit;
- Amélioration de la stabilité transitoire.

CHPITRE II : Les dispositifs FACTS

II.4.2.7.2. Inconvénients des dispositifs FACTS :

Les dispositifs FACTS sont considérés comme des solutions pour aider les systèmes électriques, mais ils présentent aussi des inconvénients. En plus, qu'ils ne représentent pas une solution universelle, ils existent plusieurs contraintes pour que ces dispositifs soient efficaces et rentables :

- Le choix du FACTS ;
- Le choix du modèle du FACTS ;
- Le choix de la localisation du FACTS ;
- Protection pour les FACTS et pour le réseau ;
- Interaction entre les dispositifs FACTS et l'autre élément.

II.4.2.8. Coût des dispositifs FACTS :

Mis à part les avantages techniques apportés par les FACTS, d'autres critères liés au coût doivent être pris en considération dans la décision d'installer un dispositif. Sur le plan économique, le critère généralement adopté dans l'évaluation des bénéfices obtenus par un FACTS est que l'accroissement des revenus doit excéder les coûts d'exploitations, de maintenance et d'amortissement de l'installation.

Le coût d'une installation FACTS dépend principalement des facteurs tels que :

- Les performances requises.
- La puissance de l'installation.
- Le niveau de tension du système.
- La technologie du semi-conducteur utilisé. [3]

Le choix du type de FACTS doit être effectué en fonction de la configuration du réseau, aucune conclusion générale ne peut être faite. On peut toutefois lister les forces des différents systèmes. [9]

CHPITRE II : Les dispositifs FACTS

	SVC	STATCOM	TCSC	SSSC	UPFC	IPFC
Contrôle de transit de puissance active	+	+	+++	+++	+++	+++
Contrôle de transit de puissance réactive	+++	+++	/	/	+++	/
Contrôle de tension (U)	+++	+++	+	+	+++	+
Contrôle de l'angle de transport (δ)	/	/	+++	+++	+++	+++
Stabilité de système	+++	+++	+++	+++	+++	++
Déséquilibre de phase	+++	+++	/	/	+++	/

Tableau II.1 : récapitulatif des différences entre FACTS. [9]

II.5. Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons parlé sur la qualité de la tension et les différents types de perturbation électrique dégradant cette dernière et nous avons présenté les différents moyens et dispositifs pour pallier ces perturbations, et parmi ces dispositifs les plus fiables sont les FACTS.

En effet les dispositifs FACTS offrent un contrôle rapide et efficace aux différents paramètres du système de puissance pour augmenter leur limite de stabilité. L'UPFC est le dispositif FACTS le plus flexible, offre un contrôle indépendant de la tension, la puissance active et réactive.

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.

CHAPITRE III

Etude de l'UPFC

III.1.Introduction :

L'UPFC se compose de deux onduleurs à source de tension à éléments entièrement commutables (GTO, IGBT) qui sont connectés à travers un lien continu commun (DC-Link). L'un, monté en shunt, appelé STATCOM (statique compensateur), injecte un courant presque sinusoïdal de grandeur réglable. Le second, monté en série appelé SSSC (statique séries synchrones compensateur), injecte en série une tension presque alternative avec une amplitude et un angle de phase réglables dans la ligne de transport. Chaque onduleur peut permuter la puissance réactive nécessaire localement, et de produire la puissance active comme résultat de l'injection en série d'une tension. La fonction fondamentale de l'onduleur shunt (ond1) est de fournir ou d'absorber la puissance active demandée par l'onduleur série (ond2) à travers la liaison DC commune. Il peut aussi produire ou absorber la puissance réactive selon la demande et assurer un support à la tension au point de connexion du réseau. [4]

Pour pouvoir observer l'impact de ce dispositif FACTS (UPFC) dans un réseau électrique, il est nécessaire de le représenté par des modèles mathématiques appropriés. Les modèles mathématiques des convertisseurs de tension pour les différentes connexions dans un réseau électriques, série ou parallèle et aussi hybride, sont très utiles sinon obligatoire pour analyser leurs fonctionnements et déterminer des lois de commande de ces dispositifs (FACTS) à base de ces convertisseurs. La description mathématique est basée sur la transformation du système triphasé à un système biphasé orthogonal stationnaire ou tournant au synchronisme par la transformation de PARK afin d'aboutir à un système d'équations différentielles d'état dans le plan (d, q).

Après avoir étudié dans le deuxième chapitre les différents systèmes FACTS existants, nous abordons dans ce chapitre, une étude détaillée de la constitution, et la mise en modèle mathématique de l'UPFC (Unified Power Flow Controller). Ce qui nous permette l'établissement et la simplification de ces équations afin d'aborder le contrôle et commande de notre système.

CHAPITRE III : Etude de l'UPFC

III.2. Modélisation de l'UPFC :

La modélisation d'un UPFC se compose de deux parties, la partie shunt nommée STATCOM et la partie série équivalente à un SSSC [13]. La modélisation de ce dispositif est basée sur les hypothèses suivantes :

- Les trois tensions de la source alternative sont équilibrées ;
- Toutes les chutes de tension dans le compensateur shunt et série sont présentées respectivement par les résistances R_{sh} et R_{se} ;
- Les harmoniques causées par l'action d'ouverture et de fermeture des interrupteurs sont négligées ;
- L'inductance de fuite du transformateur shunt et série sont représentés respectivement par les inductances L_{sh} et L_{se} ;
- Tous les interrupteurs sont supposés idéals.

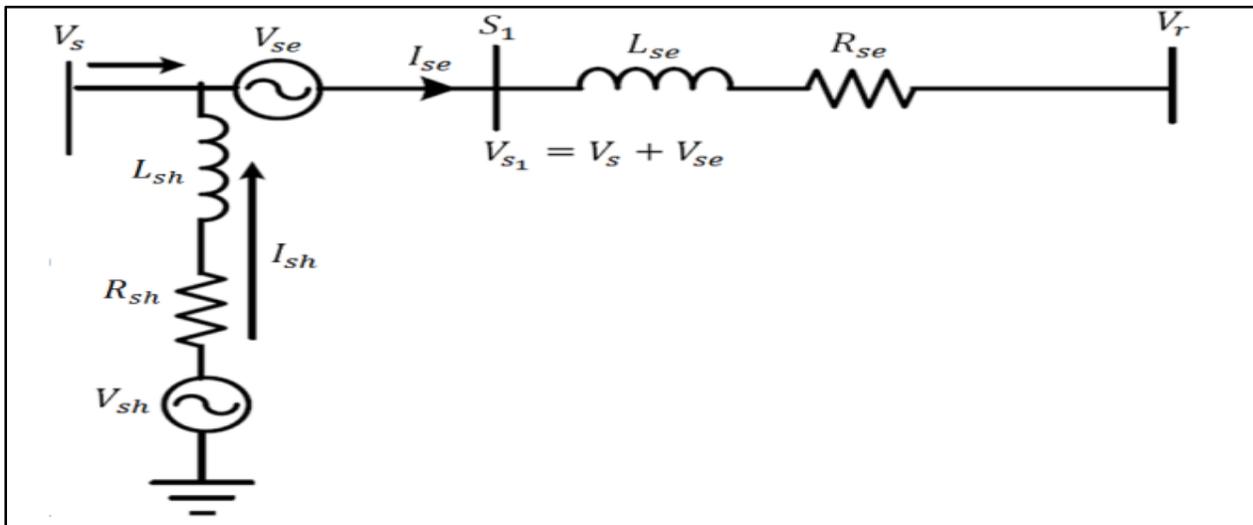


Figure III.1 : Circuit équivalent de l'UPFC.

III.2.1. Modélisation de la partie shunt (STATCOM) :

III.2.1.1. Modèle mathématique simplifié :

Le modèle simplifié du STATCOM est représenté par le schéma équivalent contenant une source de tension sinusoïdale connectée au nœud par l'inductance L_{sh} du transformateur de couplage en série avec une résistance R_{sh} qui représente les pertes ohmiques du transformateur et les pertes dans les interrupteurs de l'onduleur. Pour le modèle simplifié du

CHAPITRE III : Etude de l'UPFC

STATCOM, son circuit continu est négligé [13]. Le schéma équivalent de ce dispositif représenté par la **figure (III.2)**.

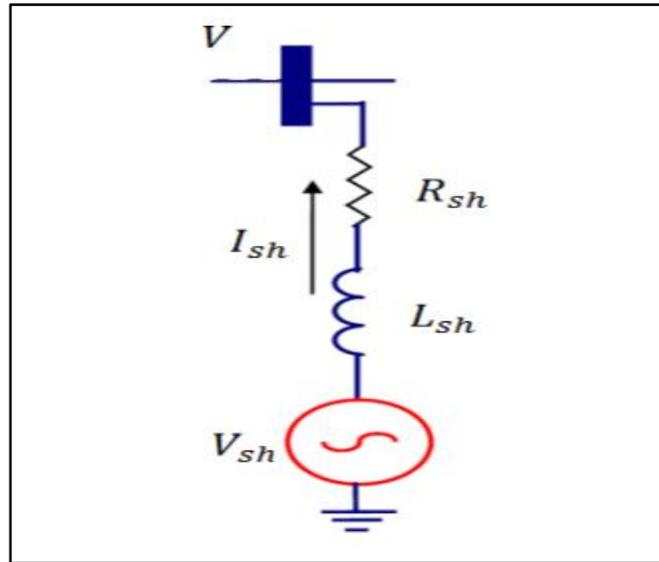


Figure III.2 : Schéma équivalent du STATCOM.

Le courant du STATCOM dépend de la différence entre la tension du système V (tension au nœud) et la tension ajustable du STATCOM V_{sh} , est régi par l'équation **(III.1)**.

$$\bar{V} - \bar{V}_{sh} = R_{sh}\bar{I}_{sh} + L_{sh}\frac{d\bar{I}_{sh}}{dt} \quad (\text{III.1})$$

Où les grandeurs sont en triphasé :

$$\bar{V} = \begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix}; \quad \bar{V}_{sh} = \begin{pmatrix} V_{ash} \\ V_{bsh} \\ V_{csh} \end{pmatrix}; \quad \bar{I}_{sh} = \begin{pmatrix} I_{ash} \\ I_{bsh} \\ I_{csh} \end{pmatrix}$$

Pour simplifier ces équations on passe au repère orthogonal fixe (α, β) on multiplie l'équation **(III.1)** par la matrice de la transformation de CLARK, en suite on passe au référentiel (d, q) en multipliant toutes les grandeurs par $e^{-j\gamma}$ avec $\frac{d\gamma}{dt} = \omega$, où ω est la pulsation de la grandeur \bar{U} .

Nous avons donc:

$$\bar{U}_{(\alpha,\beta)} = \bar{U}_{(d,q)}e^{j\gamma}$$

CHAPITRE III : Etude de l'UPFC

En appliquant cette écriture sur l'équation (III.1), on aura :

$$\bar{V}^{(d,q)} e^{j\gamma} - \bar{V}_{sh}^{(d,q)} e^{j\gamma} = R_{sh} \bar{I}_{sh}^{(d,q)} e^{j\gamma} + L_{sh} \frac{d}{dt} \bar{I}_{sh}^{(d,q)} e^{j\gamma} \quad (\text{III.2})$$

Après simplification on aboutit aux équations dynamiques dans le repère (d, q) suivantes :

$$V_d - V_{shd} = R_{sh} I_{shd} + L_{sh} \frac{dI_{shd}}{dt} - L_{sh} \omega I_{shq} \quad (\text{III.3})$$

$$V_q - V_{shq} = R_{sh} I_{shq} + L_{sh} \frac{dI_{shq}}{dt} + L_{sh} \omega I_{shd} \quad (\text{III.4})$$

Sous forme matricielle on écrit le système d'état du STATCOM comme suit:

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{R_{sh}}{L_{sh}} & \omega \\ -\omega & -\frac{R_{sh}}{L_{sh}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \end{pmatrix} + \frac{1}{L_{sh}} \begin{pmatrix} V_d & - \\ V_q & - \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{shd} \\ V_{shq} \end{pmatrix} \quad (\text{III.5})$$

Où le vecteur $\begin{pmatrix} V_d & - \\ V_q & - \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{shd} \\ V_{shq} \end{pmatrix}$ représente le vecteur de commande du système.

III.2.1.2. Modèle mathématique en considérant le circuit DC :

Le modèle simplifié est dérivé sous l'hypothèse d'aucune variation de la tension continue U_{dc} durant les petits échanges de l'énergie active entre le réseau et la source DC.

Lorsque la capacité de la source DC est relativement petite, le modèle mathématique doit être amélioré par l'équation du circuit continu. Le circuit continu est représenté par une source de courant connecté au condensateur C et une résistance shunt R_c pour exprimer les pertes Joules dans le circuit continu **Figure (III.3)**.

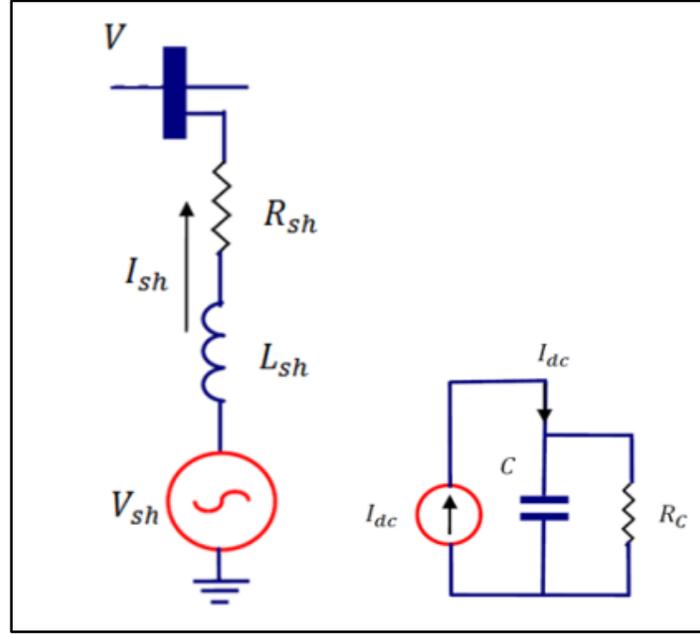


Figure III.3 : Schéma équivalent du STATCOM avec le circuit DC.

On suppose que:

$$\vec{V}_{sh}^{(d,q)} = V_{shd} + jV_{shq} = v \cos \theta + jv \sin \theta \quad (\text{III.6})$$

v : étant le module de la tension injectée qui dépend directement de la tension continue U_{dc} et peut être exprimée par:

$$v = mU_{dc} \quad (\text{III.7})$$

m : est l'indice de modulation, il ne dépend que du type de l'onduleur.

En substituant les équations (III.6) et (III.7) dans les équations (III.3) et (III.4) on aboutit aux deux équations suivantes :

$$V_d - mU_{dc} \cos \theta = R_{sh}I_{shd} + L_{sh} \frac{dI_{shd}}{dt} - L_{sh}\omega I_{shq} \quad (\text{III.8})$$

$$V_q - mU_{dc} \sin \theta = R_{sh}I_{shq} + L_{sh} \frac{dI_{shq}}{dt} + L_{sh}\omega I_{shd} \quad (\text{III.9})$$

La puissance circulant entre le condensateur et l'onduleur de tension peut être décrite par l'équation (III.10) et en même temps vérifie l'égalité qui suit, équation (III.11):

CHAPITRE III : Etude de l'UPFC

$$P_{sh} = \frac{3}{2}(V_{shd}I_{shd} + V_{shq}I_{shq}) \quad (\text{III.10})$$

$$U_{dc}I_{dc} = \frac{3}{2}(V_{shd}I_{shd} + V_{shq}I_{shq}) \quad (\text{III.11})$$

Le courant I_{dc} est défini comme étant la somme du courant capacitif i_c et le courant résistif i_r .

$$I_{dc} = C \frac{dU_{dc}}{dt} + \frac{U_{dc}}{R_c} \quad (\text{III.12})$$

III.2.2. Modélisation de la partie série (SSSC) :

III.2.2.1. Modèle mathématique simplifié :

Le convertisseur série est connecté en série avec la ligne de transmission. Son schéma équivalent représenté par la **figure (III.4)** contenant une source de tension en série avec l'impédance de la ligne ainsi que l'impédance du transformateur de couplage. L'équation du circuit continu est négligée pour ce modèle simplifié de ce dispositif dans l'hypothèse de condensateur de grande capacité ayant l'habilité de tenir la tension continue U_{dc} constante. [13]

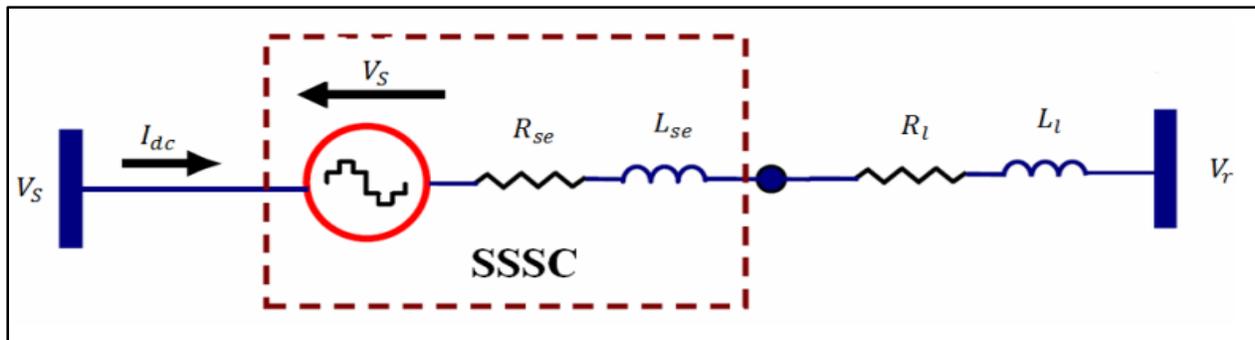


Figure III.4 : Schéma équivalent du SSSC.

$$\bar{V}_s - \bar{V}_r - \bar{V}_{se} = (R_{se} + R_l)\bar{I}_{se} + (L_{se} + L_l)\frac{d\bar{I}_{se}}{dt} \quad (\text{III.13})$$

Avec : R_{se} , L_{se} est la résistance représentant les pertes des interrupteurs de l'onduleur et dans le transformateur de couplage, et l'inductance de fuite du transformateur série, respectivement.

D'après l'équation (III.13), on aura $\bar{V}_s - \bar{V}_r - \bar{V}_{se} = R\bar{I}_{se} + L\frac{d\bar{I}_{se}}{dt}$

CHAPITRE III : Etude de l'UPFC

Avec $\mathbf{R} = \mathbf{R}_{se} + \mathbf{R}_l$; $\mathbf{L} = \mathbf{L}_{se} + \mathbf{L}_l$

En passant au repère référentiel (d, q) par la transformation de PARK, l'équation (III.13)

devient :

$$\bar{V}_s - \bar{V}_r - \bar{V}_{se} = R\bar{I}_{se} + L \frac{d\bar{I}_{se}}{dt} + jL\omega\bar{I}_{se} \quad (\text{III.14})$$

Sous forme matricielle dans le repère (d, q) :

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} I_{sed} \\ I_{seq} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{R}{L} & \omega \\ -\omega & -\frac{R}{L} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{sed} \\ I_{seq} \end{pmatrix} + \frac{1}{L} \begin{pmatrix} V_{sd} & -V_{rd} & -V_{sed} \\ V_{sq} & -V_{rq} & -V_{seq} \end{pmatrix} \quad (\text{III.15})$$

Le système d'équations (III.15) représente le modèle d'état simplifié de l'SSSC dans le référentiel synchrone (d, q) , qui présente un couplage entre les deux composantes I_{sed} et I_{seq} par le terme ω .

III.2.2.2. Modèle mathématique en considérant le circuit DC :

Le modèle simplifié est dérivé sous l'hypothèse qu'aucune variation de la tension continue U_{dc} durant les petits échanges d'énergie active entre le réseau et la source DC. Lorsque la capacité de la source DC est relativement petite, le modèle mathématique doit être amélioré par l'équation du circuit continu. On peut réécrire la tension V_{se} sous la forme suivante:

$$\bar{V}_{se}^{(d,q)} = V_{sed} + jV_{seq} = v \cos \varphi + jv \sin \varphi \quad (\text{III.16})$$

v : Étant le module de la tension injectée qui dépend directement de la tension continue U_{dc} .

$$\begin{cases} V_{sed} = mU_{dc} \cos \varphi \\ V_{seq} = mU_{dc} \sin \varphi \end{cases} \quad (\text{III.17})$$

L'équation du courant du circuit continu est décrite par l'équation qui suit:

$$I_{dc} = C \frac{dU_{dc}}{dt} + \frac{U_{dc}}{R_c} \quad (\text{III.18})$$

La puissance active échangée avec le circuit continu est exprimée par les équations suivantes:

$$P_{se} = \frac{3}{2} (V_{sed} I_{sed} + V_{seq} I_{seq}) \quad (\text{III.19})$$

CHAPITRE III : Etude de l'UPFC

$$U_{dc}I_{dc} = \frac{3}{2}(V_{sed}I_{sed} + V_{seq}I_{seq}) \quad (\text{III.20})$$

L'équation dynamique du côté continu est la suivante:

$$C \frac{dU_{dc}}{dt} = \frac{3}{2}m(I_{sed} \cos \varphi - I_{seq} \sin \varphi) - \frac{U_{dc}}{R_c} \quad (\text{III.21})$$

En injectant l'équation (III.21) dans le modèle précédent (III.15), ainsi que l'équation (III.17), nous arrivons au système d'équations d'état du modèle du SSSC en tenant compte du circuit continu suivant :

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} I_{sed} \\ I_{seq} \\ U_{dc} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{-R}{L} & \omega & \frac{-m}{L} \cos \varphi \\ -\omega & \frac{-R}{L} & \frac{m}{L} \sin \varphi \\ \frac{3m}{2C} \cos \varphi & -\frac{3m}{2C} \sin \varphi & -\frac{1}{R_c C} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{sed} \\ I_{seq} \\ U_{dc} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_d \\ V_q \end{pmatrix} \quad (\text{III.22})$$

III.2.3. Modélisation d'un bus continu :

Les convertisseurs shunt et série sont couplés par un circuit continu. [13] L'équation de la puissance du circuit continu est donnée par :

$$P_{dc} = P_{sh} + P_{se} \quad (\text{III.23})$$

Avec : P_{sh} et P_{se} sont les puissances injectées par les convertisseurs shunt et série exprimée par les équations (III.10) et (III.19).

Si on néglige les pertes dans le circuit continu, la puissance absorbée par la capacité est exprimée par :

$$P_{dc} = v_{dc}I_{dc} = -v_{dc} \frac{d}{dt} v_{dc} \quad (\text{III.24})$$

En utilisant l'équation (III.23), on obtient :

$$\frac{d}{dt} v_{dc} = \frac{1}{Cv_{dc}} (P_{se} + P_{sh}) \quad (\text{III.25})$$

À partir de l'équation (III.23) nous démontre que v_{dc} augmente quant $(P_{se} + P_{sh}) > 0$ et diminue lorsque $(P_{se} + P_{sh}) < 0$. Et on remarque que l'équation (III.25) est une équation différentielle non linéaire.

CHAPITRE III : Etude de l'UPFC

$$\frac{d}{dt} v_{dc}^2 = 2v_{dc} \frac{dy}{dx} v_{dc} \quad (\text{III.26})$$

À partir des équations (III.25) et (III.26) la dérivé de v_{dc}^2 s'écrit par :

$$\frac{d}{dt} v_{dc}^2 = \frac{2}{C} (P_{sh} + P_{se}) \quad (\text{III.27})$$

III.2.4. Calcul des puissances instantanées de l'UPFC :

Le calcul des puissances active et réactive instantanées générées par l'UPFC ce fait par la formule classique.

$$\begin{cases} P_{inj} = \frac{3}{2} (V_{sd}I_{sd} + V_{sq}I_{sq}) \\ Q_{inj} = \frac{3}{2} (V_{sq}I_{sd} - V_{sd}I_{sq}) \end{cases} \quad (\text{III.28})$$

Les puissances active et réactive absorbées sont également données par :

$$\begin{cases} P_{abs} = \frac{3}{2} (V_{rd}I_{rd} + V_{rq}I_{rq}) \\ Q_{abs} = \frac{3}{2} (V_{rq}I_{rd} - V_{rd}I_{rq}) \end{cases} \quad (\text{III.29})$$

III.3.Conclusion :

Ce chapitre a été consacré à la modélisation mathématique de dispositif FACTS (UPFC), Nous avons présenté son modèle mathématique pour lequel nous avons identifié les références de leur système de commande de ce dispositif dans le chapitre suivant.

De manière générale, les dispositifs FACTS agissent en fournissant ou en absorbant de la puissance réactive, en augmentant ou en réduisant la tension aux nœuds, en contrôlant l'impédance des lignes ou en modifiant les phases des tensions.

L'énorme avantage de l'UPFC est bien sûr la flexibilité qu'il offre en permettant le contrôle des trois paramètres associés au transit de puissance; la tension, l'angle de transport et l'impédance de la ligne en un seul dispositif comprenant seulement deux onduleurs de tension.

CHAPITRE IV

Résultats de simulation

CHAPITRE IV : Résultats de simulation

IV.1 Introduction:

Après avoir dans le chapitre précédent la modélisation des différents éléments constituant l'UPFC et les différents lois de fonctionnement de ce dernier, dans ce chapitre on va présenter le procédé de détermination des références du système de commande pour le contrôle de l'UPFC, et une complète simulation du dispositif (UPFC) introduit dans un réseau test simple. Cette simulation a été performée dans l'environnement **Matlab-Simulink**. Les résultats de simulations obtenus sont bien présentés et interprétés dans ce chapitre.

IV.2 Contrôle de la partie shunt :

La partie shunt est utilisée principalement pour compenser la puissance réactive au point de raccordement et par conséquent maintenir la tension de ce dernier. Pour cet objectif ce dispositif injecte ou absorbe un courant I_{sh}^{ref} , qui est l'image de la puissance à compenser. Ces courants ($I_{shd}^{ref}, I_{shq}^{ref}$) sont donc les grandeurs de références du STATOM qu'on déterminera à partir des puissances à injecter.

IV.2.1. Détermination des références:

Les puissances injectées par la partie shunt sont la puissance réactive Q_{sh}^{ref} calculée en fonction de la chute de tension et la puissance active $P_{sh}^{ref} \cong 0$ représentant les pertes Joules dans le circuit continu et des interrupteurs dans l'onduleur. [13] Ces puissances qui sont les images des courants ($I_{shd}^{ref}, I_{shq}^{ref}$) active et réactive qu'on déterminera à partir du système d'équation suivante :

$$\begin{pmatrix} I_{shd}^{ref} \\ I_{shq}^{ref} \end{pmatrix} = \frac{2}{3} \frac{1}{V_d^2 + V_q^2} \begin{pmatrix} V_d & -V_q \\ V_q & V_d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_{sh}^{ref} \\ Q_{sh}^{ref} \end{pmatrix} \quad (\text{IV.1})$$

Où les tensions V_d et V_q sont les tensions au point de raccordement.

Nous pouvons résumer la méthode d'identification des courants de référence par le schéma de la **figure (IV.1)** suivante :

CHAPITRE IV : Résultats de simulation

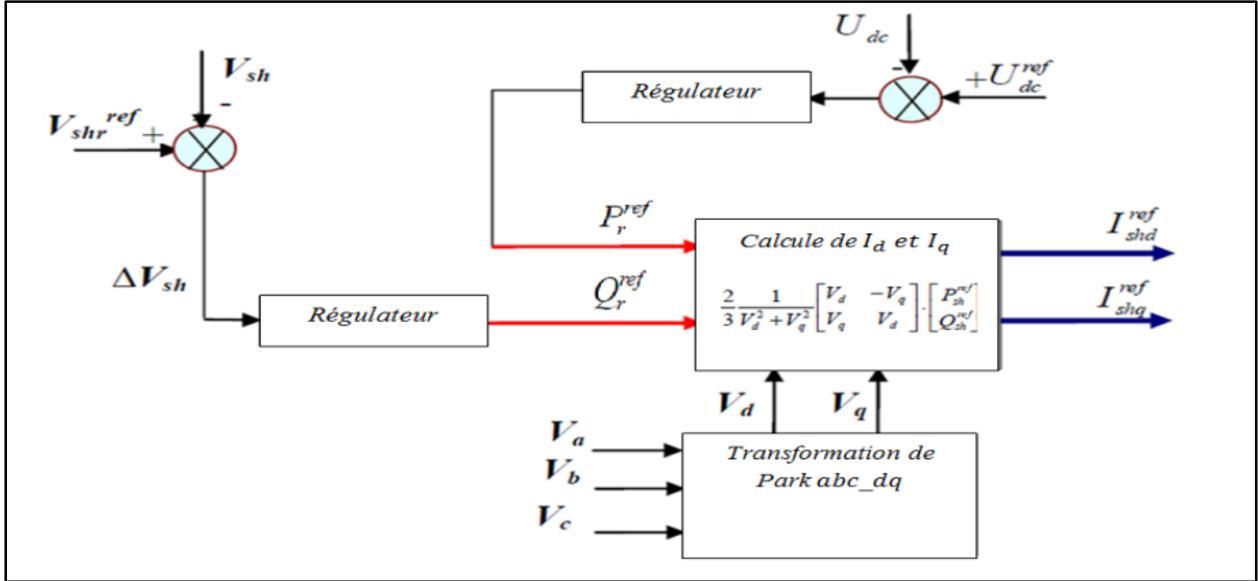


Figure IV.1 : Schéma bloc d'identification des courants de référence.

La régulation de la tension continue compense la puissance active demandée par la partie série et bien évidemment les pertes des onduleurs et des transformateurs. Il faut déterminer les références pour commander le dispositif. Il existe plusieurs méthodes d'identification des références, parmi ces méthodes, on utilise la méthode Watt-Var découplée.

IV.2.1.1. La Méthode Watt-Var découplée :

Considérant le modèle simplifié représenté par le système d'équations (III.5): [13]

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{R_{sh}}{L_{sh}} & \omega \\ -\omega & -\frac{R_{sh}}{L_{sh}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \end{pmatrix} + \frac{1}{L_{sh}} \begin{pmatrix} V_d & - \\ & V_q \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{shd} \\ V_{shq} \end{pmatrix}$$

On effectue le changement de variable suivant sur le vecteur de commande suivant :

$$\frac{1}{L_{sh}} \begin{pmatrix} V_d & - \\ & V_q \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{shd} \\ V_{shq} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \end{pmatrix} \quad (IV.2)$$

Avec:

$$X_1 = \frac{1}{L_{sh}} (V_d - V_{shd}) \text{ Et } X_2 = \frac{1}{L_{sh}} (V_q - V_{shq}),$$

X_1 et X_2 étant les sorties des deux régulateurs PI des courants (I_{shd}) et (I_{shq}).

CHAPITRE IV : Résultats de simulation

Les nouvelles grandeurs de commande à partir du système d'équations (III.5) on aura :

$$\begin{cases} \frac{dI_{shd}}{dt} = -\frac{R_{sh}}{L_{sh}} I_{shd} + \omega I_{shq} + X_1 \\ \frac{dI_{shq}}{dt} = -\frac{R_{sh}}{L_{sh}} I_{shq} + \omega I_{shd} + X_2 \end{cases} \quad (IV.3)$$

On appliquant la transformation de Laplace sur l'équation (IV.3) on obtient :

$$\begin{cases} \left(S + \frac{R_{sh}}{L_{sh}} \right) I_{shd} = +\omega I_{shq} + X_1 = \widetilde{X}_1 \\ \left(S + \frac{R_{sh}}{L_{sh}} \right) I_{shq} = -\omega I_{shd} + X_2 = \widetilde{X}_2 \end{cases} \quad (IV.4)$$

D'où on arrive au transfert I_{shd} et I_{shq} en fonction de X_1 et X_2 suivant :

$$\frac{I_{shd}}{\widetilde{X}_1} = \frac{I_{shq}}{\widetilde{X}_2} = \frac{1}{S + \frac{R_{sh}}{L_{sh}}} \quad (IV.5)$$

La commande est en X_1 , X_2 et comme $\widetilde{X}_1 = \omega I_{shq} + X_1$ et $\widetilde{X}_2 = -\omega I_{shd} + X_2$, on doit ajouter donc les termes (ωI_{shq}) et $(-\omega I_{shd})$ pour retrouver \widetilde{X}_1 et \widetilde{X}_2 à l'entrée de ce transfert. On remarque qu'il y a un couplage entre les deux composantes du courant (I_{sh}). Pour pouvoir aboutir à une commande du système, il est indispensable de procéder à un découplage des deux composantes, pour éliminer ce couplage on utilise la compensation avec des régulateurs **PI**, on peut contrôler les courants de sortie de la partie shunt et les faire suivre leurs consignes I_{shd}^{ref} et I_{shq}^{ref} comme le représente le schéma bloc de la méthode Watt-Var découplée sur la figure (IV.2).

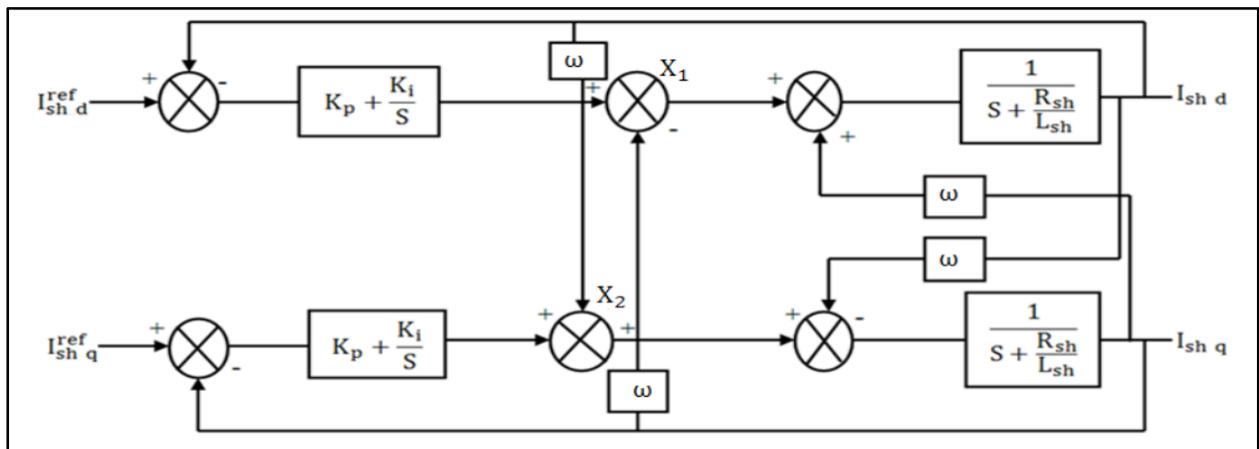


Figure IV.2 : Schéma bloc de régulation du STATCOM par la méthode Watt-Var découplée.

CHAPITRE IV : Résultats de simulation

IV.3 Contrôle de la partie série :

IV.3.1 la méthode Watt-Var découplée :

Cette méthode consiste à contrôler la puissance active et réactive séparément l'une de l'autre. [13] On considérant les équations du système (III.15) nous pouvons appliquer une commande par découplage des courants I_{sed} et I_{seq} de la manière suivante :

$$\text{On pose : } \begin{cases} X_1 = \frac{1}{L} (V_{sd} - V_{rd} - V_{sed}) \\ X_2 = \frac{1}{L} (V_{sq} - V_{rq} - V_{seq}) \end{cases} \quad (\text{IV.6})$$

$$\begin{cases} X_1 = \left(K_p + \frac{K_i}{S} \right) (I_{sed}^{ref} - I_{sed}) - \omega I_{seq} \\ X_2 = \left(K_p + \frac{K_i}{S} \right) (I_{seq}^{ref} - I_{seq}) + \omega I_{sed} \end{cases} \quad (\text{IV.7})$$

X_1 et X_2 sont les sorties des deux régulateurs **PI** des courants I_{sed} et I_{seq} complétés par les termes de compensation $(-\omega I_{seq})$ et (ωI_{sed}) respectivement. On substituant les systèmes d'équations (IV.6) et (IV.7) dans le système d'équations (III.15) on aboutit à un système de deux équations découplées avec les fonctions de transfert en boucle fermée suivantes :

$$F(S) = \frac{I_{sed}}{I_{sed}^{ref}} = \frac{I_{seq}}{I_{seq}^{ref}} = \frac{K_i + S K_p}{K_i + S \left(\frac{R_{se}}{L_{se}} + K_p \right) + S^2} \quad (\text{IV.8})$$

Le schéma bloc de ce système Watt-Var découplé est représenté sur la figure IV.3 :

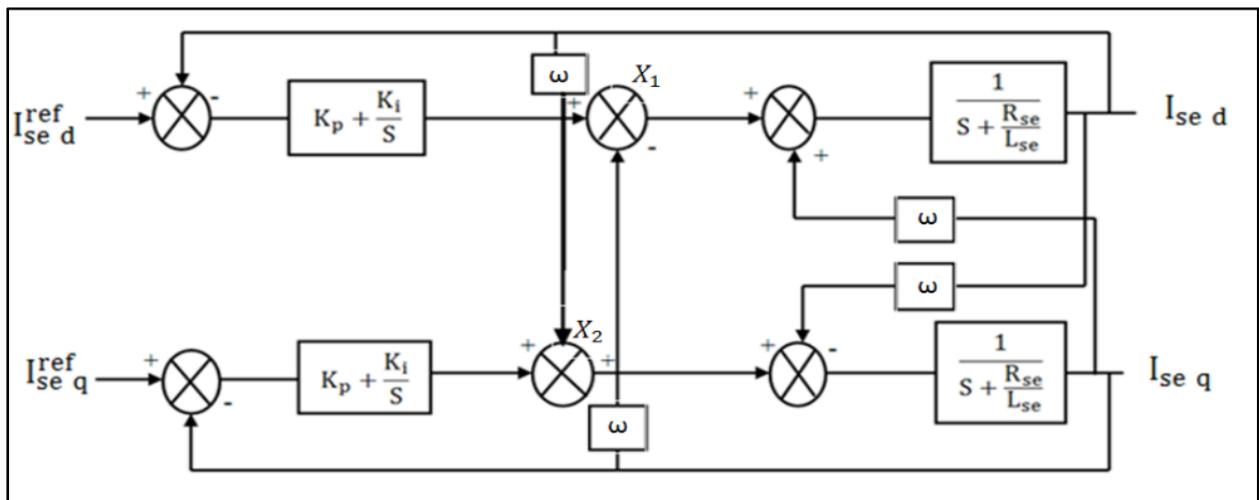


Figure IV.3 : Schéma bloc de régulation du SSSC par la méthode Watt-Var découplée.

CHAPITRE IV : Résultats de simulation

IV.3.2. Détermination des références:

Le SSSC est installé en série pour le contrôle du flux de puissance dans la ligne de transport, en d'autres termes afin d'obtenir la puissance active et réactive désirée au jeu de barre de réception. [13]

Ces puissances dans l'hypothèse de la superposition de la composante V_{rq} sur l'axe q du référentiel synchrone (d, q) ($V_{rq} = 0$ et $V_{rd} = V_r$) sont exprimées par les équations suivantes :

$$P_r = \frac{3}{2} V_{rd} I_{sed}, Q_r = \frac{3}{2} V_{rd} I_{seq} \quad (IV.9)$$

Les grandeurs d'entrée de cette méthode de régulation, expliquée ci-dessus étant les courants de l'SSSC qui sont également les courants de la ligne. Il est possible de calculer leurs valeurs de référence dans le repère (d, q) à partir des équations suivantes :

$$I_{sed}^{ref} = \frac{2 P_r^{ref}}{3 V_{rd}} \text{ Et } I_{seq}^{ref} = \frac{2 Q_r^{ref}}{3 V_{rd}} \quad (IV.10)$$

Avec P_r^{ref} et Q_r^{ref} les puissances désirées à transporter par la ligne.

Les variables X_1 et X_2 sont utilisées pour déterminer les composantes de la tension série du convertisseur V_{sed} et V_{seq} en s'appuyant sur les équations (IV.6), on aura :

$$V_{sed} = (V_{sd} - V_{rd}) - L X_1$$

$$V_{seq} = (V_{sq} - V_{rq}) - L X_2$$

Le schéma bloc de cette méthode de régulation est donné par la **figure (IV.4)** suivante :

CHAPITRE IV : Résultats de simulation

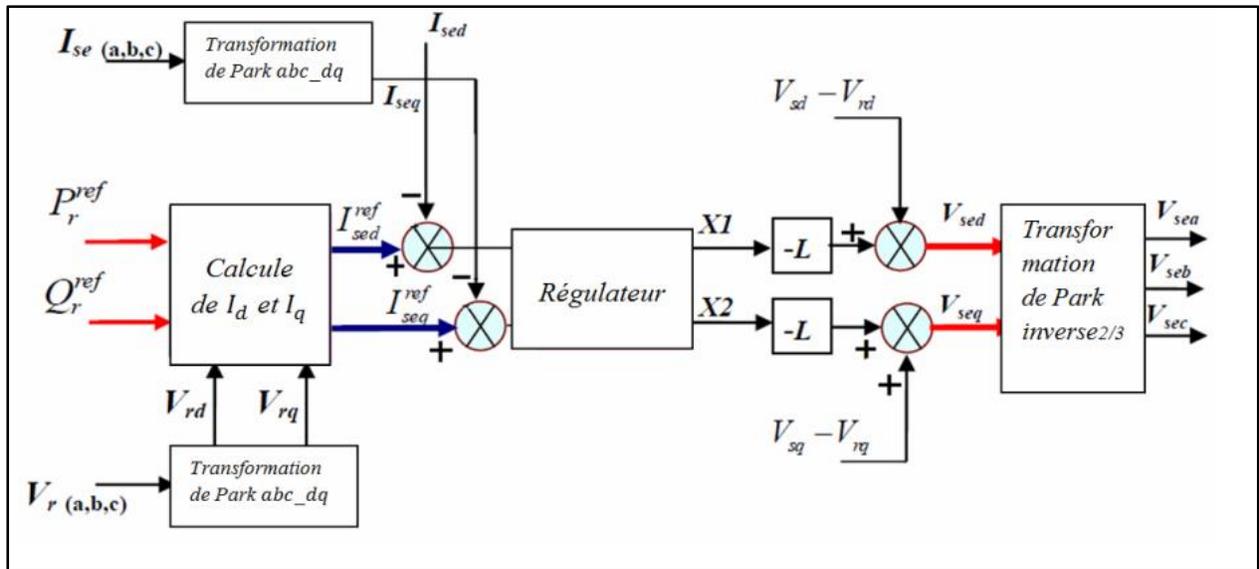


Figure IV.4 : Schéma bloc de contrôle du SSSC par la méthode Watt-Var découplée.

IV.4 Régulation de la tension continue U_{dc} :

La tension continue aux bornes du condensateur doit être maintenue à une valeur constante. La correction de cette tension doit se faire par l'adjonction d'un courant actif au courant de référence de la partie parallèle qui traduira l'absorption ou la fourniture d'une puissance active sur le réseau. La puissance échangée avec le condensateur peut être exprimée par l'équation suivante : [13]

$$P_{dc} = P_{sh} = \frac{1}{2} C \frac{dU_{dc}^2}{dt} \Rightarrow \frac{dU_{dc}^2}{dt} = \frac{2P_{sh}}{C} \quad (IV.11)$$

En passant au domaine fréquentiel (Laplace), on aura :

$$\frac{U_{dc}^2}{P_{sh}} = \frac{2}{C S} \quad (IV.12)$$

Pour obtenir le signal P_{sh} nous utilisons un régulateur proportionnel intégral.

IV.5 Commande des convertisseurs statiques:

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. [13]

CHAPITRE IV : Résultats de simulation

Dans notre cas, nous utiliserons la commande par MLI, car le dispositif UPFC commande de fortes puissances et a besoin d'une fréquence fixe pour les commutations.

Cette technique basée sur la MLI met en œuvre d'abord un régulateur qu'à partir de l'écart entre le courant et sa référence, détermine la tension de référence du convertisseur statique (modulatrice). Ensuite comparée avec un signal en dent de scie à fréquence élevée (porteuse). La sortie du comparateur fournit l'ordre de commande des interrupteurs. Le schéma de principe de cette méthode est donné sur la **figure(IV.5)**.

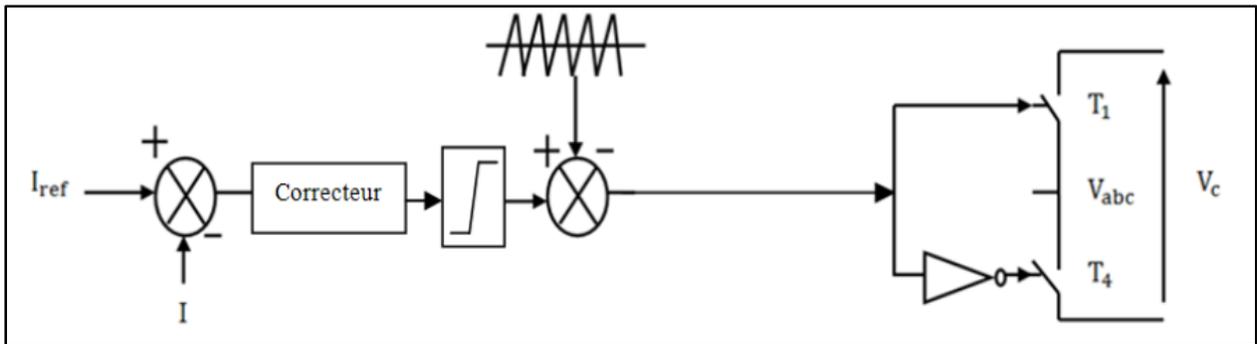


Figure IV.5 : Schéma bloc de contrôle du courant par MLI.

IV.6.Simulation et interprétation des résultats :

IV.6.1 Etude de réseau en chute de tension :

Dans cette étude on subdivise le travail en deux parties :

- ✓ Simulation du réseau sans insertion du dispositif UPFC ;
- ✓ Simulation du réseau avec l'insertion du dispositif UPFC.

IV.6.1.1 Description et étude du réseau étudié en chute de tension avant insertion de l'UPFC :

Les éléments constituant le réseau étudié sont :

- Une source de **10 kV**. Avec une puissance apparente nominale de **5.25 MVA**.
- Une ligne de longueur de **5 km**. Avec une charge de puissance active de **3 (MW)** et de puissance réactive de **1.5804 (MVA_r)**.

CHAPITRE IV : Résultats de simulation

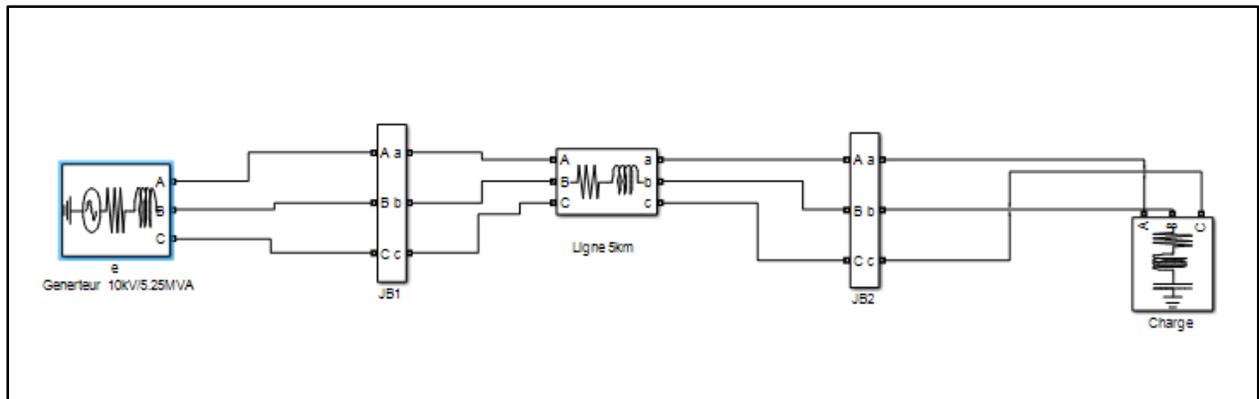


Figure IV.6 : Schéma du réseau étudié avant insertion de l'UPFC.

Après simulation on aboutit aux résultats suivants :

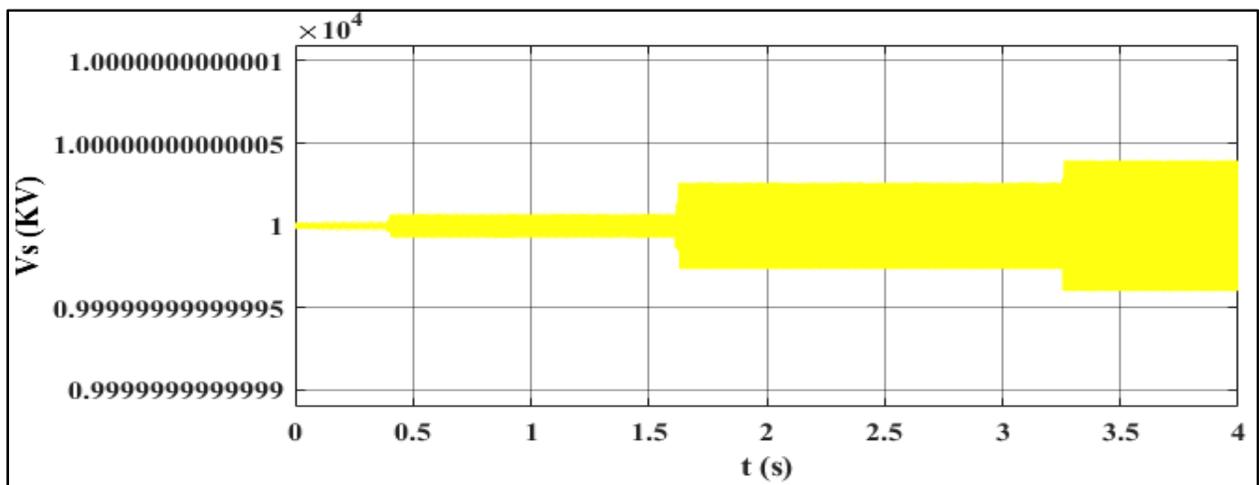


Figure IV.7 :(a). La tension au niveau de la source.

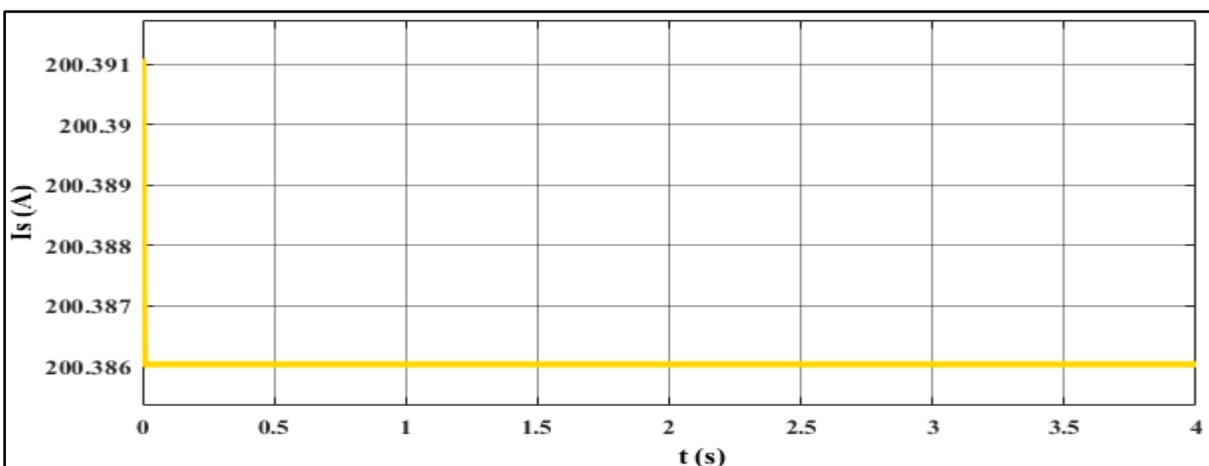


Figure IV.7 :(b). Le courant au niveau de la source.

CHAPITRE IV : Résultats de simulation

- Avant l'insertion de l'UPFC c'est-à-dire (avant la compensation), on constate que le niveau de la tension de la source est de 10 KV. Comme illustre la **figure (IV.7(a))**.
- Concernant la **figure (IV.7(b))**, qu'elle représente le courant au niveau de la source. et on remarque que la valeur de ce dernier est de (200.386 A).

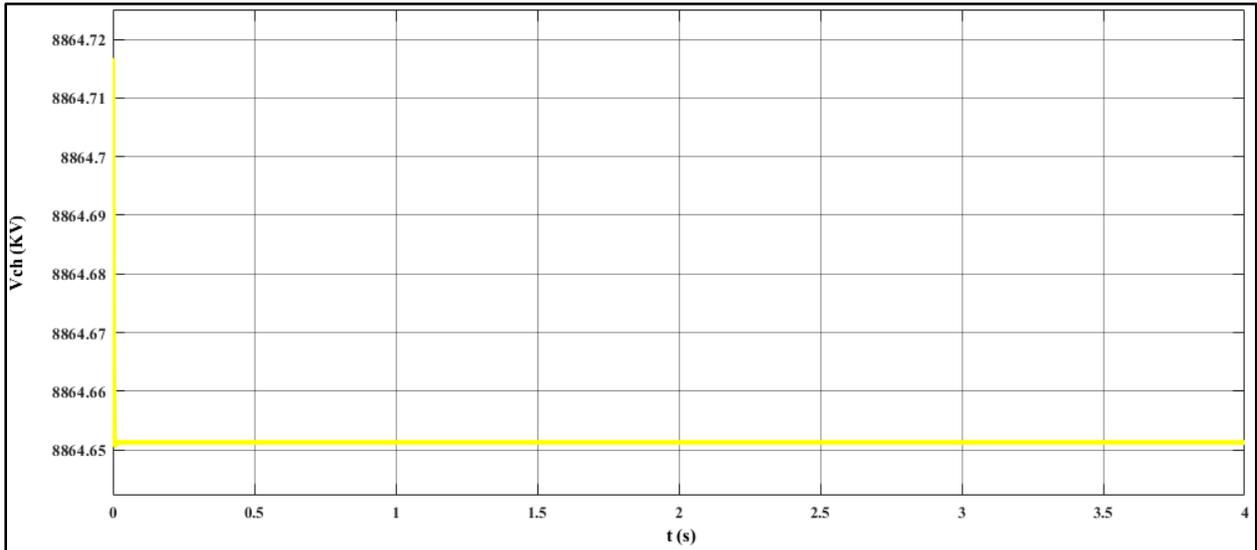


Figure IV.8 :(a). La tension au niveau de la charge.

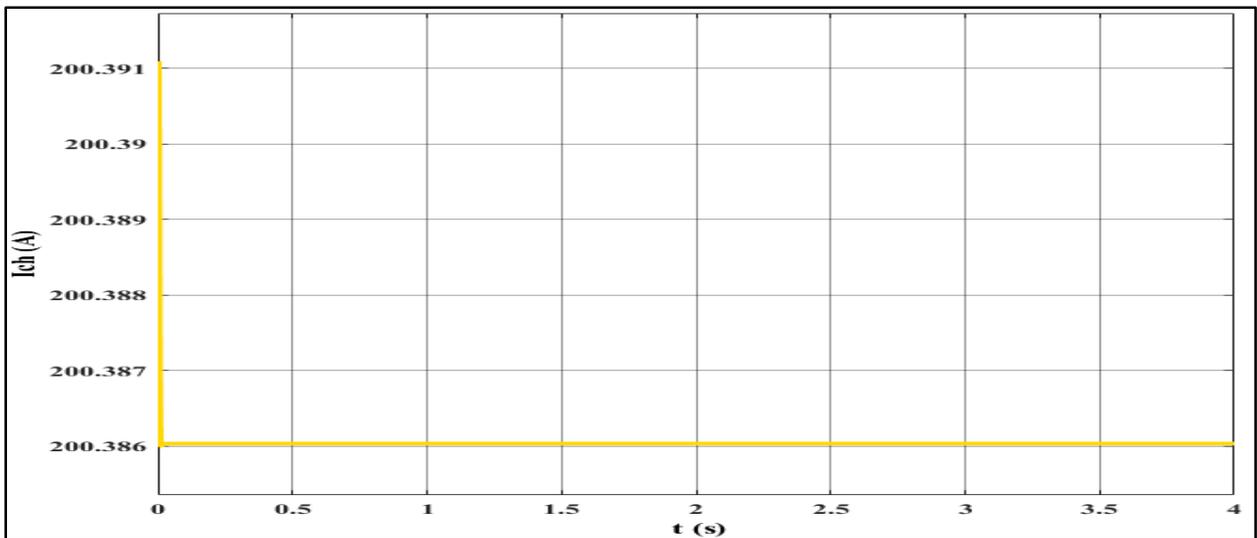


Figure IV.8 :(b).Le courant au niveau de la charge.

- Dans la figure (IV.8(a)), on constate une baisse de la tension au niveau de la charge avant la compensation ($\approx 8864.65KV$).

CHAPITRE IV : Résultats de simulation

- le courant au niveau de la charge avant compensation est resté constant à (200.386 A) comme montre la figure (IV.8(b)).

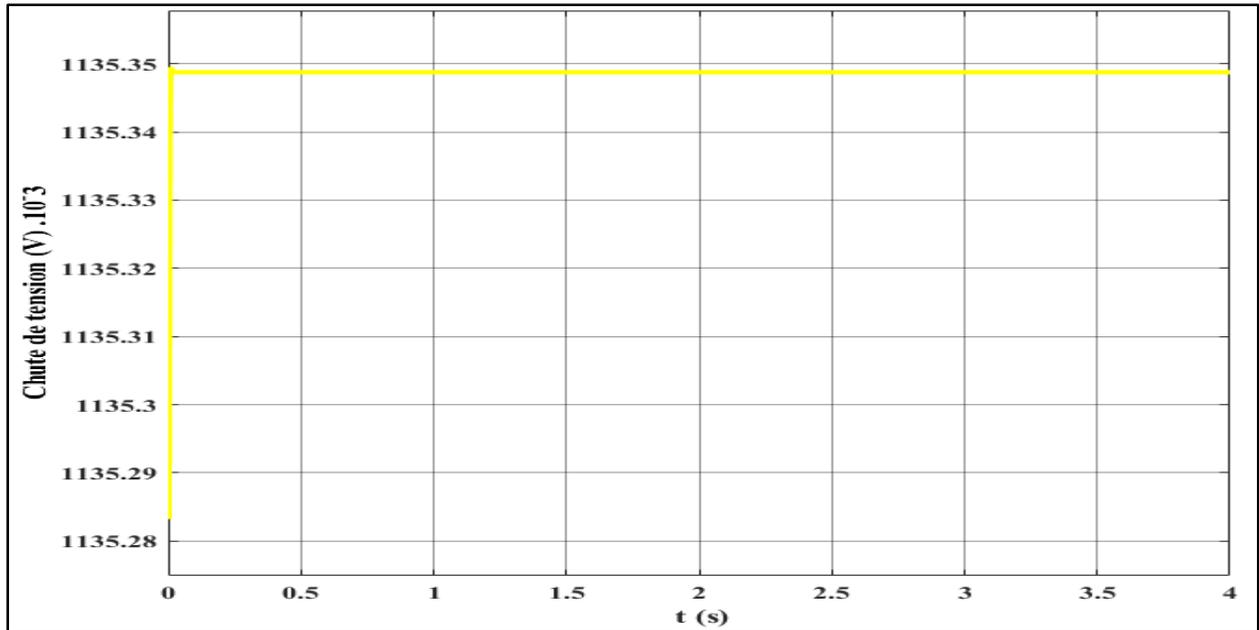


Figure IV.9 : Chute de tension dans le réseau avant compensation.

La Figure (IV.9) montre un déficit de tension de 1.135 kV provoqué par la charge au niveau du point JB2.

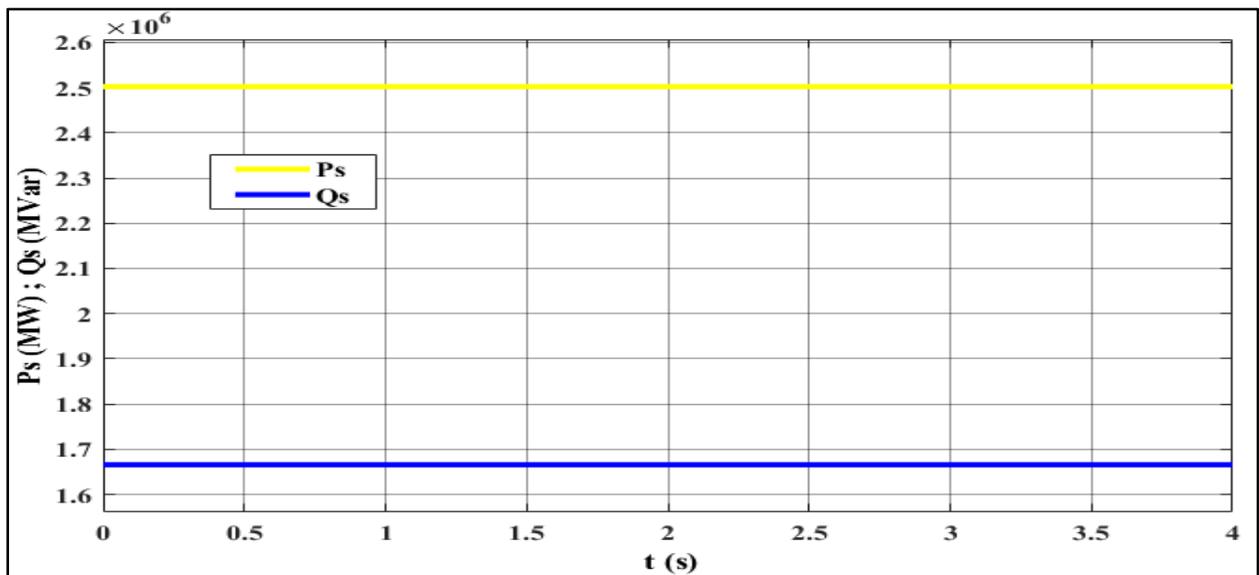


Figure IV.10 : Puissances active et réactive au niveau de la source avant compensation.

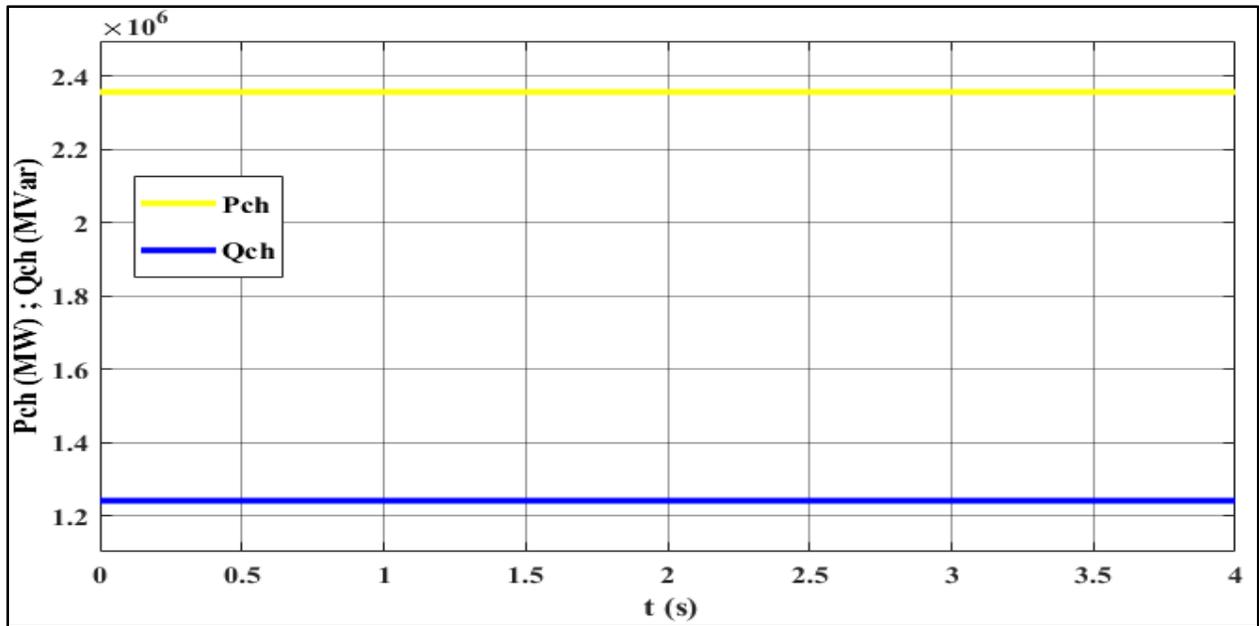


Figure IV.11 : Puissances active et réactive absorbée par la charge avant compensation.

- La **figure (IV.10)** montre que la source débite plus de puissance réactive et moins de puissance active que celles demandées par la charge, cela est dû à un appel important de puissance réactive par la charge et aux pertes de puissance dans la ligne. Ceci a provoqué une diminution de la puissance active et a laissé plus de place au transit de puissance réactive, alors que la charge consomme une puissance active en dessous de sa puissance nominale (**figure IV.11**). Ce manque de puissance est dû aux chutes de tension provoquées par le caractère inductif de la charge.

IV.6.1.2. Description et étude du réseau étudié en chute de tension après insertion de l'UPFC :

Dans la deuxième partie de notre travail, En reprenant l'essai sur le même réseau et en intégrant le dispositif UPFC, tel que l'UPFC est placé en aval de la charge et il est constitué d'un :

- transformateur shunt 10/19 kV de deux onduleurs connecté entre eux par un bus continu.
- transformateur série 19/10 kV dont le secondaire est inséré dans la ligne.

CHAPITRE IV : Résultats de simulation

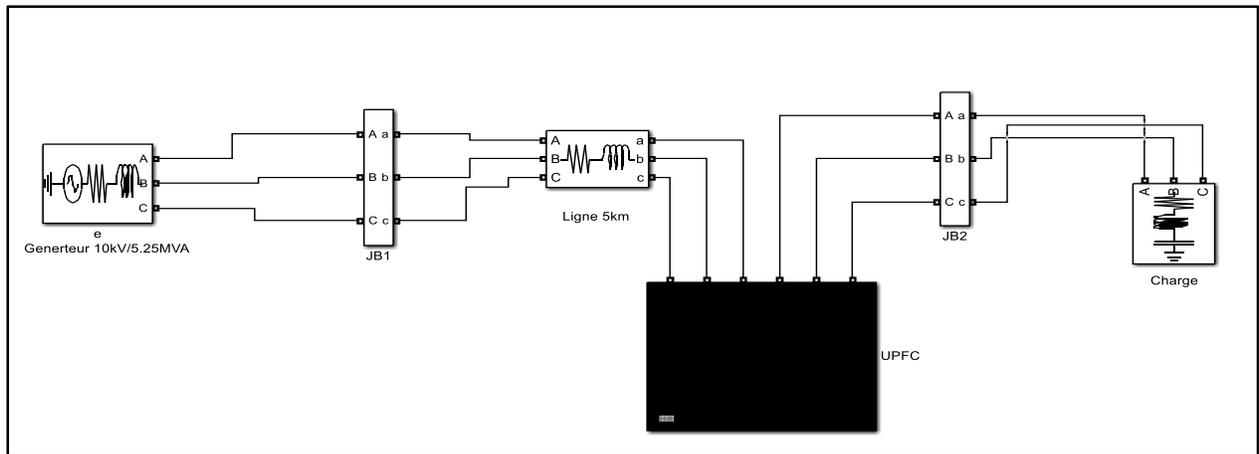


Figure IV.12 : Schéma du réseau étudié après insertion de l'UPFC.

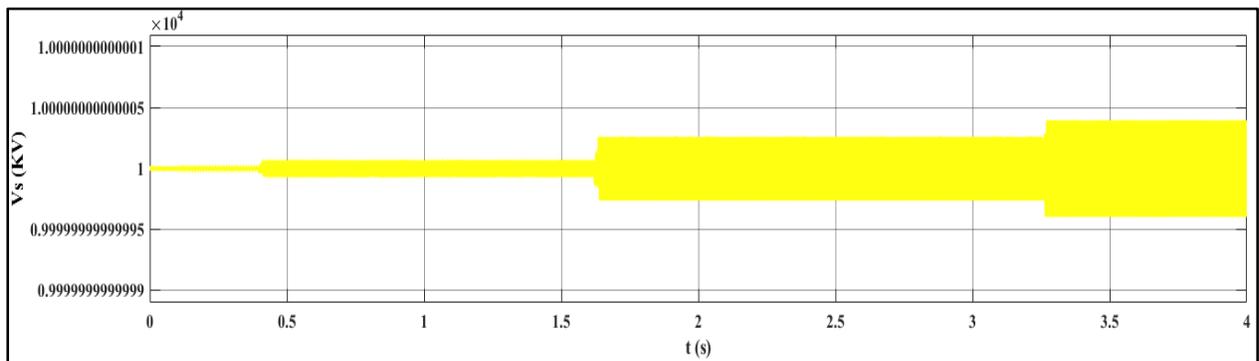


Figure IV.13 :(a). La tension au niveau de la source après compensation.

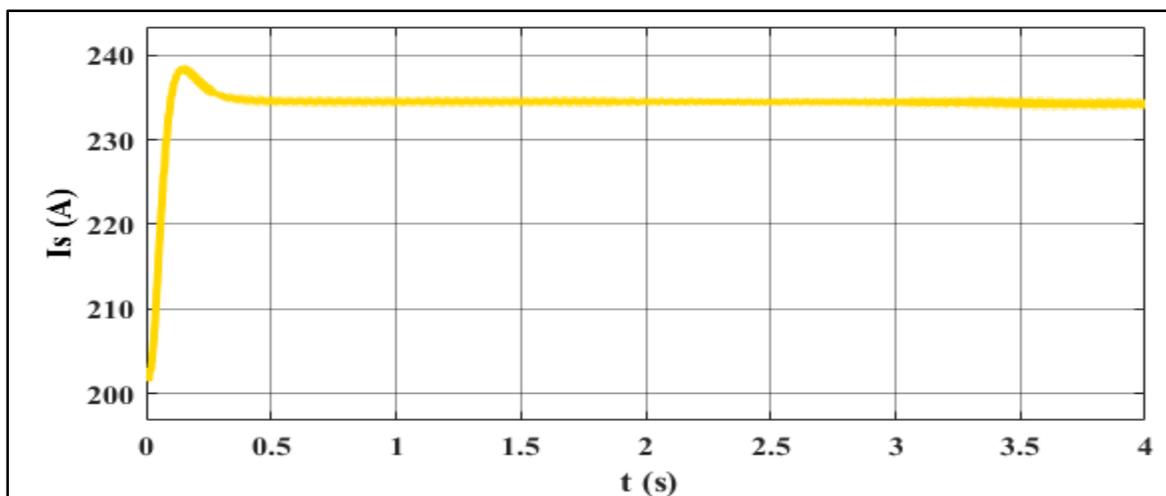


Figure IV.13:(b). Le courant au niveau de la source après compensation.

CHAPITRE IV : Résultats de simulation

Après insertion de l'UPFC, on aboutit aux résultats suivants :

- la **figure (IV.13(a))**, représente l'évolution de la tension au niveau de la source après compensation.
- Dans la **figure (IV.13(b))**, on remarque que le courant de la source atteint sa valeur nominale.

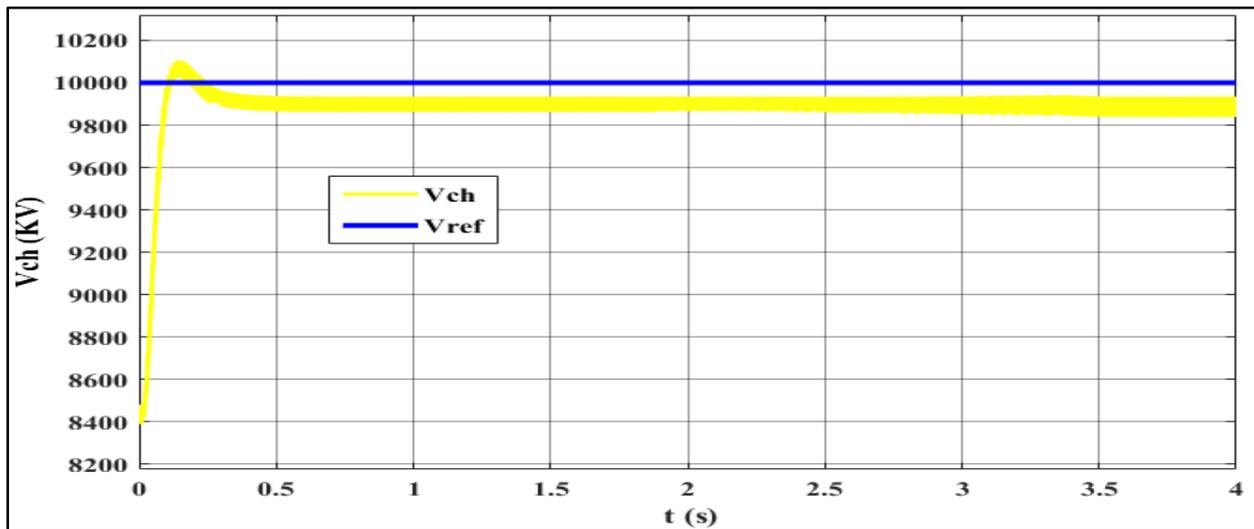


Figure IV.14 :(a). La tension au niveau de la charge après compensation.

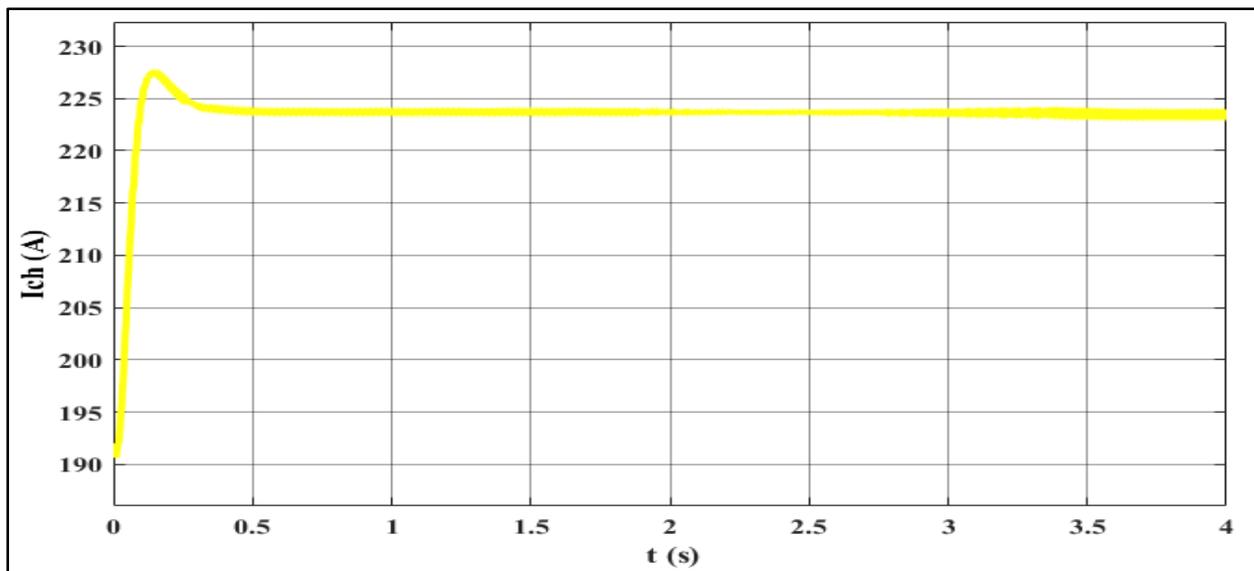


Figure IV.14 :(b). Le courant au niveau de la charge après compensation.

CHAPITRE IV : Résultats de simulation

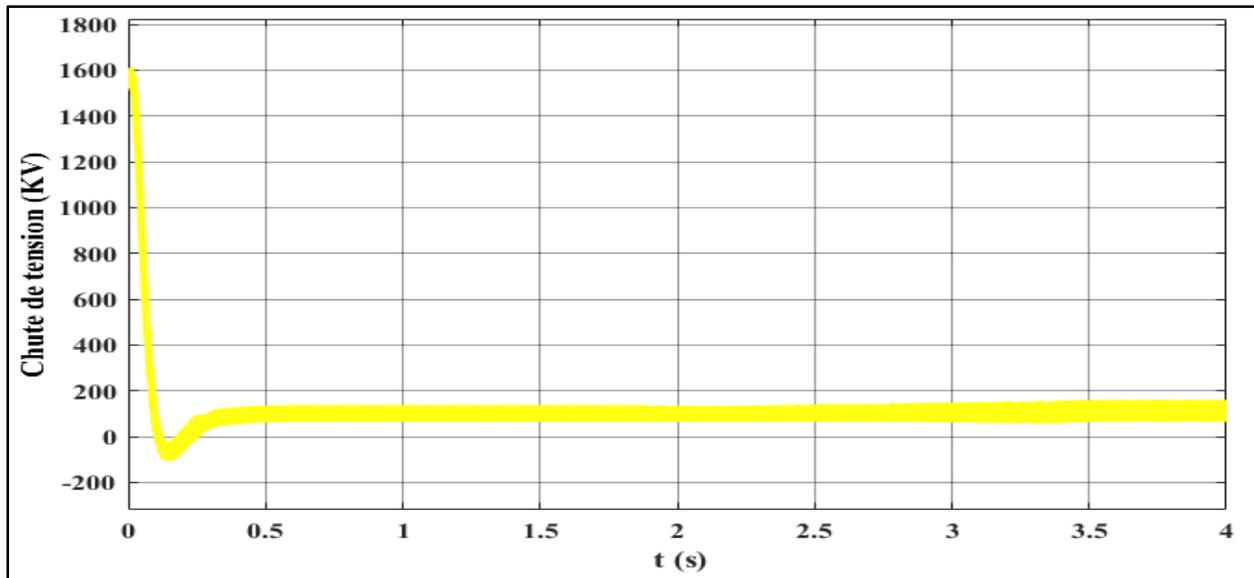


Figure IV.15 : Chute de tension dans le réseau après compensation.

- Après compensation on remarque que l'évolution de la tension de la charge à suivre sa référence, comme illustre la figure (IV.14(a)). donc on peut dire que les résultats montrent un profil de tension meilleur au point de connexion avec une chute de tension tel que de sa tension de référence est de 10 kV (figure IV.15). Cela est dû à l'amélioration du niveau de tension de la source.
- La figure (IV.14(b)) illustre l'allure du courant au niveau de la charge.
- Après insertion de l'UPFC, la figure (IV.14(a)) montre que la tension au niveau de la charge est maintenue égale à la tension de référence (10 kV). cela est dû à la contribution de la partie shunt de l'UPFC par injection d'une tension en phase avec la tension du réseau, cette tension V_{sh} qui est en mode capacitif supérieure à la tension V_{ch} détermine le sens du courant réactif I_{sh} en quadrature avec V_{sh} injecté par le STATCOM, donc de la puissance réactive. Cette puissance réactive qui dans le réseau sans UPFC a causé une forte chute de tension, désormais débitée par le STATCOM.
- La fourniture de l'énergie réactive au point de consommation permet un transit plus important de la puissance active en minimisant le flux de puissance réactive dans la ligne de transport Par conséquent les puissances de la charge peuvent être satisfaisantes. Donc L'effet de la compensation de l'énergie réactive se répercute directement sur le transit de la puissance active dans la ligne.

CHAPITRE IV : Résultats de simulation

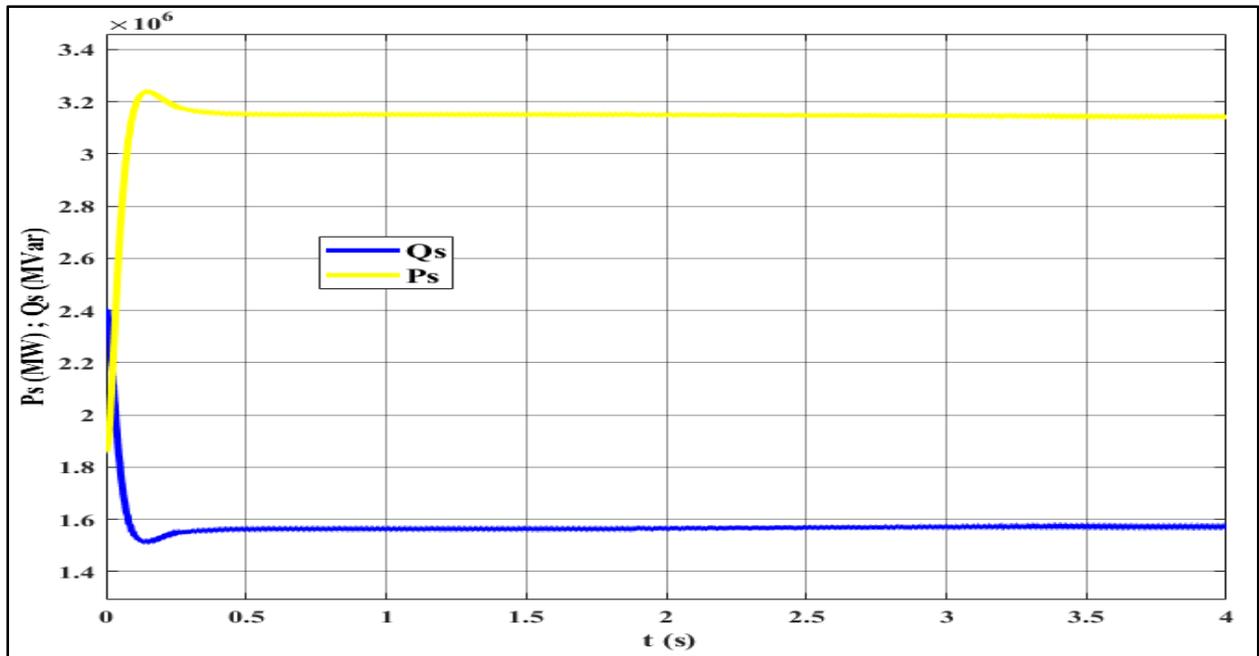


Figure IV.16 : Puissances active et réactive fournies par la source après compensation.

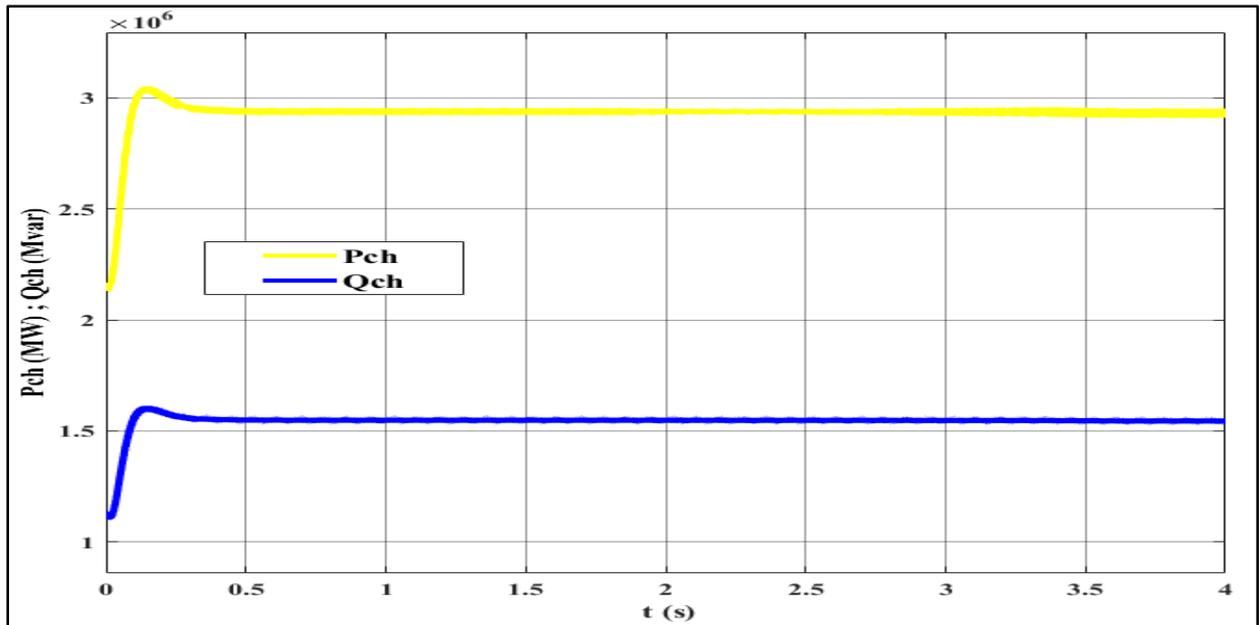


Figure IV.17 : Puissances active et réactive absorbée par la charge après compensation.

- La **figure (IV.16)** représente l'allure des puissances active et réactive au niveau de la source.
- La **figure (IV.17)** représente l'allure des puissances active et réactive au niveau de la charge. et à partir de ces courbes on peut constater clairement l'effet de la

CHAPITRE IV : Résultats de simulation

compensation série sur le transit des puissances active et réactive dans une ligne de transport. Donc les quantités des puissances active et réactive maximales transportées par la ligne augmentent à cause de l'opération de l'SSSC en mode capacitif.

IV.7.conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté l'identification des références du système de commande du contrôleur UPFC. Tel que La loi de commande utilisée pour les deux contrôleurs (STATCOM, SSSC) été la méthode dite Watt-Var découplée basée sur le principe de découplage dans le contrôle des courants actif et réactif du système, accompli avec des régulateurs PI par compensation des pôles, et la commande MLI pour le contrôle des deux onduleurs.

Nous avons présenté aussi une complète simulation sur un réseau test simple, cette simulation a été performée dans l'environnement **Matlab-Simulink**.

Les résultats de simulation montrent que l'UPFC influe sur le transit des puissances et le profil de la tension. On vu que la partie shunt (STATCOM) joue un rôle très important dans la régulation de la tension par compensation de l'énergie réactive et le rôle de la partie série(SSSC) dans et le contrôle du flux de puissance active et réactive.

L'UPFC peut ajuster la répartition du flux de puissance entre les lignes de transmission et réduire les pertes et améliorer le profil de tension.

En plus de ces aptitudes à contrôler le flux de puissance actif et réactif du réseau et la régulation du module et d'angle de tension, l'UPFC devient une meilleure alternative pour la planification et le contrôle du réseau électrique.

Conclusion
Générale

Conclusion Générale

Devant l'évolution récente des réseaux électriques, l'accroissement considérable des interconnexions ainsi que les contraintes économiques, la stabilité des réseaux électriques devient plus critique. L'utilisation de la nouvelle technologie FACTS améliore les performances dynamiques du système électriques tel que;

- Une meilleure utilisation de moyens de transmissions existants;
- Augmenter la capacité du transfert du système de transmission;
- Améliorer la stabilité des réseaux électriques et la qualité de service.

Malgré le coût élevé de cette solution, mais vu l'évolution récente des réseaux électriques et leurs contraintes, cette solution est très efficace.

L'étude de flux de puissance est importante pour la planification de l'expansion future des systèmes électriques ainsi que dans la détermination du meilleur fonctionnement des systèmes existants.

Notre travail de recherche a été consacré à l'évaluation de l'aptitude de l'UPFC qu'il est un dispositif de la famille FACTS, à contrôler l'écoulement de puissance à travers une ligne de transmission et compenser la puissance réactive.

Le concept UPFC fournit un outil puissant pour l'utilisation rentable de lignes de transport en facilitant le contrôle indépendant de flux de puissance active et réactive, et donc la maximisation du transfert de puissance avec un minimum des pertes.

Dans le but de contrôler l'écoulement de puissance sur une ligne électrique nous avons consacré à la modélisation, l'identification des références et l'élaboration de la commande de l'UPFC. Dans la partie modélisation, nous avons présenté le modèle mathématique de l'UPFC avec ses éléments constitutifs.

Nous avons vu que l'UPFC est capable de contrôler indépendamment le flux de puissance active et réactive dans la ligne. Cette aptitude de l'UPFC est facilitée par son circuit de puissance qui est essentiellement un convertisseur AC-AC, généralement mis en œuvre par deux convertisseurs dos à dos avec un lien commun en tension continue. La sortie d'un convertisseur est couplée en série, tandis que la sortie de l'autre en parallèle avec la ligne de transport. Avec cet arrangement, l'UPFC peut injecter une tension entièrement contrôlable (amplitude et angle) en série avec la ligne et de

Conclusion Générale

soutenir la compensation active et réactive en fournissant la puissance active requise par le convertisseur série à travers le convertisseur shunt.

Bibliographie

Bibliographie

[1]: **Mr. BOT Youcef** ; « Influence des FACTS sur le calcul de l'écoulement des puissances en utilisant un IPFC » ; Thèse en vue de l'obtention du diplôme de magister Au sein de l'école doctorale ; Option : Réseaux Electriques ; Université d'Oran ; 2010.

[2] : **Mr. SEBAA Morsli**; « Commande Robuste d'un UPFC dans un Réseau d'Énergie Électrique Multi Machines » ; Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de docteur en science ; option : Réseaux Electriques ; Université d'Oran ; 2011.

[3] :**Mr. SEKHANE Hocine**; « L'optimisation de la puissance réactive et le contrôle de tension à travers l'incorporation des dispositifs FACTS »; Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de magister en électrotechnique ; Option : modélisation et contrôle des procédés de conversion de l'énergie ; Université de Constantine 1 ; 2013.

[4] :**Mm. FALIL Fatima**; « Contrôle Robuste d'un UPFC » ; Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de magister ; Option : Réseaux Electriques ; Université d'Oran.

[5] : **BOUNAB Houria**; « AMELIORATION DU TRANSIT DE PUISSANCE D'UN RESEAU ELECTRIQUE PAR L'UTILISATION DES SYSTEMES FACTS (STATCOM) » ; Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de Master ; Option : Energie et Réseaux Electriques ; Université Larbi Ben M'hidi de Oum El Bouaghi ; 2016.

[6] :**Mr. BELGUIDOUM Hocine** ; « Les systèmes FACTS utilisant les convertisseurs entièrement commandés » ; Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de magister en Electrotechnique ; Option : Réseaux Electriques ; Université Ferhat Abbas — Sétif ; 2011.

[7] : **Ens : L. Boufenneche** ; Note de cours ; Réseaux Electriques ; 3ème Licence ; Electrotechnique.

[8] : **NABECHE .T; TEZKRATT.F**; « Restructuration du réseau électrique MT de la région de Fréha pour alimentation du pôle d'excellence de Tamda » ; Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de Master Professionnel ; Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou ; 2014.

[9] : **SOTA Mohamed Lamine**; « Contribution à la modélisation et à la commande d'un UPFC dans le cadre de développement des réseaux intelligent (SMART GRID) » ; Mémoire en vue de

Bibliographie

l'obtention du diplôme de Master ; Option : Instrumentation et Control Industriel ; Université Badji Mokhtar de Annaba ; 2016.

[10]:Mr.MEZAACHE Mohamed ; « Contribution à l'Etude du Choix Optimal de l'Emplacement du Dispositif UPFC dans les Réseaux Electriques en Utilisant une des Méthodes Artificielles » ; Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de docteur en science en électrotechnique ; Option : Réseaux Electriques ; Université de Batna 2 ; 2015.

[11] :Mr.DJILANI KOBIBI Youcef Islam ; « Incorporation de l'UPFC dans le calcul de la répartition des puissances dans un réseau électrique » ; Thèse en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat 3ème Cycle : Electrotechnique ; Option : Réseaux Electriques ; Université de Djilali Liabes de Sidi-Bel-Abbès ; 2015.

[12]:HAIMOUR Rachida ; «Contrôle des Puissances Réactives et des Tensions par les Dispositifs FACTS dans un Réseau Electrique » ; Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de magister en électrotechnique ; Ecole Normale Supérieure de l'Enseignement Technologique d'Oran ; 2009.

[13]: Mr. HAMADI Amine; Mr. BENBOUYA Nabil ; « Contrôle des flux de puissance dans un réseau électrique à l'aide d'un UPFC » ; Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de Master en Électrotechnique ; Option : Réseaux Electriques ; Université Abderrahmane Mira-Bejaïa ; 2014.

[14] : LAID Hichem ; « Contribution à l'étude du contrôle du flux de puissance par l'UPFC » ; Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de magister ; Université de Batna ; 2009.

[15] : Site d'internet sur le lien :http://www.univsaida.dz/butec/doc_num.php?explnum_id=293.

[16]: CHABROU Mohammed Faouzi et DEBBAR Ali. « L'optimisation de la puissance réactive en présence de dispositif de compensation dynamique (FACTS) » ; Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de Master Académique ; Option : Réseaux Electriques ; Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued ; 2017.

[17] : H.LAMARA et F.OUAIL : « AMELIORATION DES RESEAUX ELECTRIQUES PAR LES DISPOSITIF FACTS LORE D'UN DEFAULT » ; Mémoire en vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en Électrotechnique ; Option : Commande Electrique ; Université Mohamed Boudiaf-M'SILA ; 2008.

Bibliographie

[18] : **BENCHEIKH Abdelhak et DEROUICHE Abdelghani**: « Etude de l'écoulement de puissance sur un réseau électrique en présence des systèmes FACTS » ; Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de Master Académique ; Option : Réseaux Electriques ; Université Kasdi Merbah Ouargla ; 2015.

[19] : **M. AIT MALEK Nassim. Et M. ABDEMEZIEME Amazigh** : « Commande Watt/Var découplée d'une liaison électrique THT équipée d'un UPFC » ; Mémoire En vue de l'obtention du diplôme de Master Académique en Automatique ; Option : Commande des systèmes ; Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou ; 2013.

[20] : **BERRAHAL Khoukha**: « Modélisation et simulation d'un système FACTS : UPFC » ; Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de magister en électrotechnique ; Option : Mechatronique ; Université de Batna ; 2008.

[21] : **BEKKI Brahim** ; « contribution du SMES, dispositifs FACTS, à la stabilisation d'un réseau électrique haute tension », mémoire en vue de l'obtention du diplôme de magister en électrotechnique ; option réseaux électriques et haute tension ; école nationale polytechnique Alger ; 2006.

ANNEXE**Annexe A:****Transformation de PARK:**

Cette transformation permet le passage d'un système triphasé équilibré à un système biphasé. La transformation de PARK définie par la matrice de rotation $P(\theta)$ permet de ramener les variables du repère triphasé naturel (**a, b, c**) sur les axes d'un repère fictif diphasé tournant (**d, q, o**). Le produit matriciel définissant la transformation de Park est exprimé sous forme matricielle :

$$[X]_{dqo} = P(\theta) \cdot [X]_{abc} \quad (\text{A.1})$$

Avec, la transformation de conservation de l'amplitude est considéré :

$$P(\theta) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{A.2})$$

Transformation de PARK inverse :

Cette transformation permet le passage d'un système biphasé à un système triphasé équilibré. Le produit matriciel définissant la transformation de Park inverse est exprimé sous forme matricielle :

$$[X]_{dqo} = P(\theta)^{-1} \cdot [X]_{abc} \quad (\text{A.3})$$

Annexe B:**Paramètre des éléments du réseau d'étude :****1. Paramètres du Générateurs : (B.1)**

- Nom : Générateur (G)
- $P_n = 5$ (MW)
- $Q_n = 1.5804$ (MVar)

- $V = 10$ (KV)

2. Paramètres de la ligne: (B.2)

- $r = 0.48$ (Ω /km)
- $L = 0.00448$ (H /km)
- $l = 5$ (km)

Avec :

$$R = r.l ;$$

$$X = (L.\omega)l ;$$

$$Z = R + jX ;$$

l : Longueur de la ligne.

3. Paramètres de la charge inductive : (B.3)

- Nom : Charge (Ch)
- $P_n = 3$ (MW)
- $Q_n = 1.5804$ (MVar)

4. Paramètres de la partie shunt (STATCOM) et la partie série(SSSC) : (B.4)

- La tension de référence du STATCOM est : $V_{sh}^{ref} = 10$ (KV)
- La tension de référence du SSSC est : $V_{se}^{ref} = 10$ (KV)

5. Paramètres de transformateur shunt et série : (B.5)

- **Transformateur shunt :**

- La tension = 10/19 (KV)
- La puissance apparente = 10 (MVA)

- **Transformateur série :**

- La tension = 10/19 (KV)
- La puissance apparente = 10 (MVA)

Résumé

Résumé :

L'UPFC comme élément FACTS présente l'avantage d'être l'unique dispositif capable de contrôler simultanément la répartition des puissances actives et réactives dans les lignes de transport d'énergie en plus de sa capacité de réguler la tension dans les différents nœuds interconnectés. L'UPFC joue un rôle primordial dans l'amélioration de la qualité de l'énergie et la stabilité des réseaux électriques puisqu'il permet aux lignes de transport de véhiculer l'énergie jusqu'à leurs limites thermiques. Ainsi l'opérateur des réseaux électriques disposera d'une grande flexibilité quant à la satisfaction des demandes en énergie. L'objectif de ce mémoire est d'évaluer l'aptitude de l'UPFC à contrôler le flux de puissance à travers une ligne de transmission, et compenser la puissance réactive dans un réseau électrique.

Mots clés : FACTS, UPFC, flux de puissance, Compensation d'énergie réactive.