

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



FACULTE DE TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

*En vue de l'obtention du diplôme Master En  
Electrotechnique  
Option : Réseaux Electrique*

*Thème*

*Etude et Commande d'un STATCOM*

*Présenté par :*

*M<sup>r</sup> KIROUANI Fayçal  
M<sup>r</sup> LALAOUI Yacine*

*Encadré par :*

*M<sup>r</sup> K. GHEDAMSI  
M<sup>lle</sup> S. CHEKKAL*

*Année Universitaire : 2013 / 2014*

# *Remerciement*

*Avant tout, nous remercions Dieu le tout puissant qui nous a donné la force et la patience de faire ce travail, et finir ce cursus d'études.*

*Nos plus vifs remerciements vont à :*

*Notre promoteurs Mr GHEDAMSI Kaci et Mme CHEKKAL Samira d'avoir bien voulu diriger ce travail et pour leurs disponibilité.*

*Et à tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.*

# DEDICACES

*Je dédie ce modeste travail :*

*A toute ma famille*

*A ma mère et mon père qui m'a beaucoup encouragé.*

*A ma femme et toute sa famille.*

*A mes deux sœurs.*

*A mes grands parents.*

*A mon collègue riad, faycel et sa famille.*

*A toute la promo de l'électrotechnique 201 3/2014.*

*Et à tous mes amis de près ou de loin.*

**Yacine.I**



# DEDICACES

*Je dédie ce travail :*

*A toute ma famille.*

*A ma mère, mon père et mon petit frère.*

*A mes grand parents, Djimouh, et mes tantes pour leurs  
délice gâteaux.*

*A mon binôme tchitchi et sa famille.*

*Et à mes copain de chambres, Yazid et Salas.*

*A mes deux amis qui sont loin de nous, Kamel et Mazigh.*

*A mon copain Sofiane.*

*A tous mes amis, Gouda, Youba, Zilouh, Lydia, Diiya...*

*A tous ceux que J'aime.*

Fayçal.k



## TABLE DES MATIERES

<b>Remerciements</b> .....	I
<b>Dédicaces</b> .....	II
<b>Liste des figures</b> .....	VI
Introduction générale.....	1

**Chapitre I : Etat de l'art des systèmes FACTS**

I 1. Introduction .....	4
I 2. Systèmes FACTS (Flexible alternative Current Transmission Systems) .....	4
I 2.1. Amélioration de la stabilité par les FACTS.....	5
I 2.2. Différents types des systèmes FACTS .....	5
I 2.2.1. Compensateurs Parallèles (SVC, STATCOM) .....	7
I 2.2.2. Compensateurs séries .....	10
I 2.2.3. Compensateurs hybrides (TCPAR, UPFC, IPFC) .....	12
I 2.3. Apports et Avantages des FACTS.....	12
I 2.4. Applications Pratiques des Dispositifs FACTS en Exploitation .....	13
I 2.5. Coût des dispositifs FACTS .....	14
I 3. Etude de STATCOM.....	14
I 3.1 Introduction au compensateur synchrone statique (STATCOM).....	14
I 3.2 Fonctionnement de STATCOM .....	15
I 3.3 Mise en page d'un poste STATCOM.....	18
I 4. Avantages du STATCOM.....	20
I 5. Conclusion.....	20

**Chapitre II : Modélisation et Commande du Statcom**

II.1. Introduction.....	21
II.2. Principe de Fonctionnement du STATCOM .....	21
II.3. Effet de la compensation shunt (STATCOM) sur le réseau Electrique .....	25
II.4. Modélisation du STATCOM .....	28
II.4.1. Modèle Mathématique Simplifié.....	28

II.4.2. Modèle Mathématique en Considérant le Circuit DC .....	30
II.5. Contrôle du STATCOM .....	33
II.5.1. Détermination des Références .....	35
II.6. La Méthode Watt Var découplée. ....	36
II.7. Régulateur PI avec compensation de pôles .....	39
II.8. Régulation de la tension continue $U_{dc}$ .....	40
II.9. Conclusion .....	42

### **Chapitre III : *Simulations et Résultats des résultats***

III.I. Introduction .....	41
III.2. Simulation du STATCOM .....	41
III.2.1. Description du réseau étudié .....	41
III.3. Essais de simulation et résultats .....	42
III.3.1. résultats de simulation .....	42
a) Sans STATCOM .....	42
b) Avec STATCOM .....	44
III.4. Conclusion .....	48

## Liste des figures

<b>Fig I.1</b> : Compensateur shunt .....	7
<b>Fig I.2</b> :Structure d'un SVC, schéma équivalent. ....	8
<b>Fig I.3</b> :Structure de base d'un STATCOM couplé au réseau. ....	10
<b>Fig I.4</b> :Compensation série .....	10
<b>Fig I.5</b> :Condensateur série commander par thyristor (TCSC) : a) Schéma ; b) Caractéristique de fonctionnement .....	11
<b>Fig I.6</b> :Structure de base d'un SSSC couplé au réseau.....	11
<b>Fig I.7</b> :(a) schéma représentatif d'un UPFC, (b) schéma équivalent de l'UPFC. ..	12
<b>Fig I.8</b> : Schéma d'un STATCOM .....	16
<b>Fig I.9</b> :Une valve de convertisseur STATCOM .....	17
<b>Fig I.10</b> : Condensateurs dans un STATCOM.....	18
<b>Fig I.11</b> : Un poste STATCOM avec une capacité de stockage d'énergie (photo avec l'aimable autorisation de ABB). ....	19
<b>Fig II.1</b> :Structure de base d'un STATCOM couplé au réseau. ....	22
<b>Fig II.2</b> :Principe de fonctionnement du STATCOM.....	23
<b>Fig II.3</b> :Schéma équivalent du STATCOM connecté à un réseau électrique. ....	23
<b>Fig II.4</b> :Courant et tensions en mode capacitif.....	25
<b>Fig II .5</b> :Courant et tensions en mode inductif. ....	26
<b>Fig II.6</b> :Schéma équivalent de STATCOM.....	27
<b>Fig II.7</b> :passage du repère $\alpha,\beta$ vers le repère d, q.....	28
<b>Fig II.8</b> :Schéma équivalent du Statcom avec Circuit DC.....	30
<b>Fig II.9</b> :Schéma d'un STATCOM conçu pour la compensation de tension. ....	33
<b>Fig II.10</b> : Identification des Courants de Référence. ....	35
<b>Fig II.11</b> :Le transfert $I_{shd}$ en fonction de $X_1$ .....	36
<b>Fig II.12</b> :le transfert $I_{shq}$ en fonction de $X_2$ .....	37
<b>Fig II.13</b> :Régulation et découplage de $I_{shd}$ . ....	37
<b>Fig II.14</b> :Schéma de Régulation du Statcom (Watt-Var découplée).....	38
<b>Fig II.15</b> :Schéma bloc de la Régulation PI des courants du Statcom.....	39
<b>Fig II.16</b> :Régulation de la tension continue. ....	40

<b>Fig III.1</b> : Schéma unifilaire du réseau test étudié.....	41
<b>Fig III.2</b> : Schéma équivalent du réseau en grandeurs réduites.....	42
<b>Fig III.3</b> : Tension et courant de source ( $V_s, I_s$ ). .....	42
<b>Fig III.4</b> : Tension et courant de charge ( $V_r, I_r$ ).....	43
<b>Fig III.5</b> : allure de la tension au nœud charge en (pu) .....	43
<b>Fig III.6</b> : Evolution des chutes de tension avant l'insertion du statcom .....	43
<b>Fig III.7</b> : Tension et courant de la source avec compensation. ....	44
<b>Fig III.8</b> : Tension et courant de charge avec compensation.....	44
<b>Fig III.9</b> : Allure de la tension au nœud charge en (pu) .....	45
<b>Fig III.10</b> : Evolution des chutes de tension après l'insertion du statcom .....	45
<b>Fig III.11</b> :puissance active et réactive de charge ( $P_r, Q_r$ ). .....	46
<b>Fig III.12</b> :Puissance active et réactive de la source ( $P_s, Q_s$ ).....	46

# *Introduction Générale*

### ***Introduction Générale***

La consommation de l'énergie électrique est en hausse progressive et cette tendance augmente avec l'industrialisation et la croissance de la population. De plus en vie aujourd'hui dans l'ère de l'électronique et de l'informatique et tous les charges sont très sensible aux perturbations qui surviennent sur leurs alimentations : Une perte d'alimentation peut causer l'interruption des différents processus de production; et devant des consommateurs qui deviennent de plus en plus exigeants en voulant plus d'énergie et de meilleur qualité, les entreprises de production de l'énergie électrique doivent donc assurer l'approvisionnement régulier de cette demande, et sans interruption, afin de prouver une fiabilité dans leurs service.

D'autre part plus que le réseau augmente plus qu'il devient complexe et plus difficile à contrôler. Ce système qui doit conduire de grandes quantités de l'énergie en l'absence de dispositifs de contrôle sophistiqués et adéquats beaucoup de problèmes peuvent survenir sur ce réseau tels que: le transit de puissance réactive excessif dans les lignes, les creux de tension entre différentes parties du réseau...etc. Et de ce fait le potentiel de l'interconnexion du réseau ne sera pas exploiter.

Les réseaux électriques jusqu'à ces dernières années sont contrôlés mécaniquement: malgré l'utilisation de la microélectronique, des ordinateurs et des moyens rapides de télécommunication dans le contrôle des réseaux, la dernière action dans ces systèmes de commande est prise avec des dispositifs mécaniques ayant un temps de réponse plus au moins long et avec lesquels l'action d'amorçage et de réamorçage ne peut être répétitivement exécuté à une fréquence élevée par rapport aux dispositifs à base d'interrupteurs statiques (semi-conducteurs).

Le développement rapide de l'électronique de puissance a eu un effet considérable dans l'amélioration des conditions de fonctionnement des réseaux électriques en performant le contrôle de leurs paramètres par l'introduction de dispositifs de contrôle à base des composants d'électronique de puissance très avancés (GTO, IGBT) connus sous l'acronyme FACTS: Flexible Alternatif Curant Transmission Systems.

L'apport de cette technologie FACTS pour les compagnies de l'électricité est d'ouvrir de nouvelles perspectives pour contrôler le flux de puissance dans les réseaux et d'augmenter les capacités des lignes. Ces apports résultent de l'habilité de ces contrôleurs FACTS de contrôler les paramètres interdépendants qui gouvernent l'opération de transport de l'énergie électrique y compris l'impédance, courant, tension, angle de phase... etc.

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.

L'objectif de notre travail est d'étudier les fonctions de contrôle offertes par le STATCOM dans la compensation de la puissance réactive aussi que le maintien de la tension et l'amélioration de la capacité des lignes de transport électriques. Cette étude est organisée en trois chapitres.

Le premier chapitre a donné une brève revue sur les techniques FACTS. Une exploration rapide dans l'historique et de brèves définitions des célèbres dispositifs FACTS sont données. Plus précisément le compensateur synchrone «STATCOM» ou on trouve son fonctionnement, sa mise en page, ainsi son rôle et apport sur le réseau.

Le deuxième chapitre est consacré à la description de la structure de ce dispositif STATCOM, une explication en détail des principes de son fonctionnement et puis la contribution de ce dernier et son effet dans le contrôle des réseaux électriques. Dans la deuxième partie de ce chapitre on a parlé sur la modélisation de ce dispositif et différents modèles mathématiques de chaque circuit sont développés séparément. La stratégie de commande Watt-Var découplé adoptée pour le contrôle des courants actifs et réactifs de ce dispositif est expliquée ainsi que le calcul de tous les régulateurs proportionnels intégraux de chaque circuit est démontré.

Afin de valider la théorie et les modèles exposés dans les chapitres précédents une simulation structurée est exécutée dans l'environnement « Matlab-Simulink » de ce contrôleur intégré séparément dans un réseau simple de transport de l'énergie électrique. Les courbes de la majorité des paramètres du réseau dans plusieurs cas de simulation sont présentées et interprétées dans ce troisième chapitre.

A la fin de ce travail une conclusion générale a été tirée en vue de nos résultats et de l'apport de notre compensateur étudié au réseau.

**Chapitre I:**

***Etat de l'art***  
***Des systèmes FACTS***

**I.1. Introduction**

Le développement de l'électronique de puissance a permis d'améliorer la gestion des réseaux électriques en introduisant un nouveau concept par ce système FACTS (STATCOM), avec lequel le contrôle du flux de puissance réactive dans les lignes est atteint, par l'injection d'une tension (courant) d'un onduleur conçu avec des interrupteurs statiques modernes (IGBT, IGCT), de plus ce dispositif ne change pas d'énergie active avec le réseau et la compensation n'est pas faite pas des condensateurs connecter directement au réseau ce qui élimine totalement le problème de résonance synchrone qui nuit le transport électrique.

**I.2. Systèmes FACTS (Flexible alternative Current Transmission Systems)**

Les systèmes FACTS (ou D-FACTS en réseau de distribution : Distribution FACTS) ont été développés pour maintenir la tension dans les limites admissibles et limiter les transits de puissance réactive. Ces systèmes à base d'électronique de puissance utilisent les performances de contrôle offertes par l'utilisation de cette technologie. Une liste non exhaustive des moyens de réglages par compensation d'énergie réactive va être donnée. [1]

Les FACTS sont capables d'accroître la capacité du réseau dans son ensemble en contrôlant les transits de puissances. Il est donc important de souligner que les dispositifs FACTS ne peuvent pas augmenter la capacité thermique des lignes de transport. En revanche, ils permettent d'utiliser les lignes plus proches de cette limite en repoussant d'autres limitations, en particulier celles liées à la stabilité.

Dans un réseau électrique, les FACTS permettent de remplir des fonctions tant en régimes stationnaires qu'en régimes transitoires. Ils agissent généralement en absorbant ou en fournissant de la puissance réactive, en contrôlant l'impédance des lignes ou en modifiant les angles de tensions. En régimes permanents, les FACTS sont utilisés principalement dans les deux contextes suivants. [2]

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

Les dispositifs FACTS peuvent être utilisés pour la symétrie des lignes de transport afin d'accroître leur capacité. [3]

### ***1.2.1. Amélioration de la stabilité par les FACTS***

Devant les problèmes de transit de puissance, la compagnie américaine EPRI (Electric Power Research Institute) a lancé, en 1988, un projet d'étude des systèmes FACTS afin de mieux maîtriser le transit de puissance dans les lignes électriques.[4]

Les systèmes FACTS sont appliqués à l'amélioration de la stabilité des réseaux électriques. A cet égard, les composants FACTS peuvent être classés en trois catégories : compensateurs parallèle, compensateurs série et compensateurs hybrides « série – parallèle ».

### ***1.2.2. Différents types des systèmes FACTS***

La technologie FACTS n'est pas limitée en un seul dispositif mais elle regroupe une collection de dispositifs à base de l'électronique de puissance implantés dans les réseaux électriques afin de mieux contrôler le flux de puissance et augmenter la capacité de transit de leurs lignes. Par action de contrôle rapide de ces systèmes sur l'ensemble des paramètres du réseau: (tension, impédance, déphasage ...etc.). Ils permettent d'améliorer les marges de stabilité et d'assurer une meilleure flexibilité du transfert d'énergie.

Le tableau 1. Représente les grandes catégories des dispositifs de contrôle des réseaux électriques. La première colonne contient les systèmes conventionnels constitués de composant de base (R L C). [5]

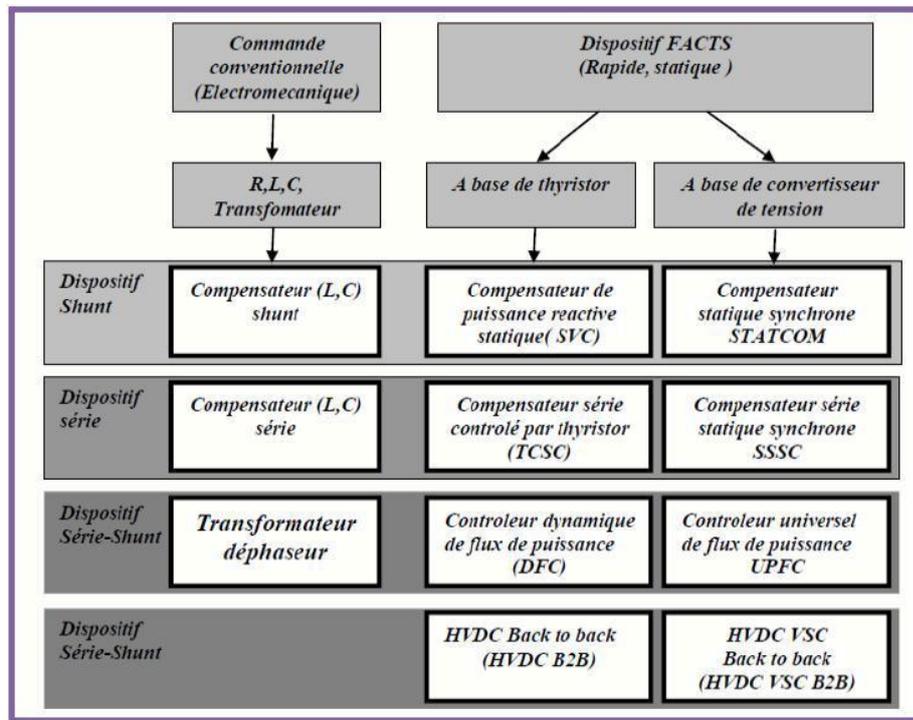


Tableau.1 : Différentes catégories des dispositifs de contrôle des réseaux électriques

La colonne gauche des systèmes FACTS présente les contrôleurs à base des thyristors ou bien à des convertisseurs à thyristor tels que le SVC et le TCSC qui sont connus depuis plusieurs dizaines d'années à titre de compensateurs shunt et série respectivement et qui ont prouvés leur fiabilité dans le contrôle des réseaux. Les dispositifs dans la colonne de droite sont la technologie la plus avancée des FACTS avec des convertisseurs de sources de tension à base des interrupteurs statiques sophistiqués IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistors) ou bien les IGCT (Insulated Gate Commutated Thyristors) tels que le STATCOM, le SSSC et l'UPFC. Ces convertisseurs de source de tension fournissent ou injectent une tension totalement contrôlable en amplitude et en phase en série ou en parallèle dans le réseau selon les exigences de contrôle. Chaque élément de ces colonnes peut être structuré selon sa connexion au réseau.

Les dispositifs FACTS traduisent un concept qui regroupe tous les dispositifs à base d'électronique de puissance qui permettent d'améliorer l'exploitation du réseau électrique.

Les systèmes FACTS peuvent être classés en trois catégories :

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

### 1.2.2.1. Compensateurs Parallèles (SVC, STATCOM)

Ils consistent en une impédance variable, source variable ou une combinaison des deux. Ils injectent un courant dans le réseau à travers le point de connexion. Ils sont utilisés principalement pour la compensation de la puissance réactive et par conséquent contrôle de tension. [6]

Le courant réactif est injecté dans la ligne pour maintenir la magnitude du voltage, ainsi la puissance réactive sera plus fournie.

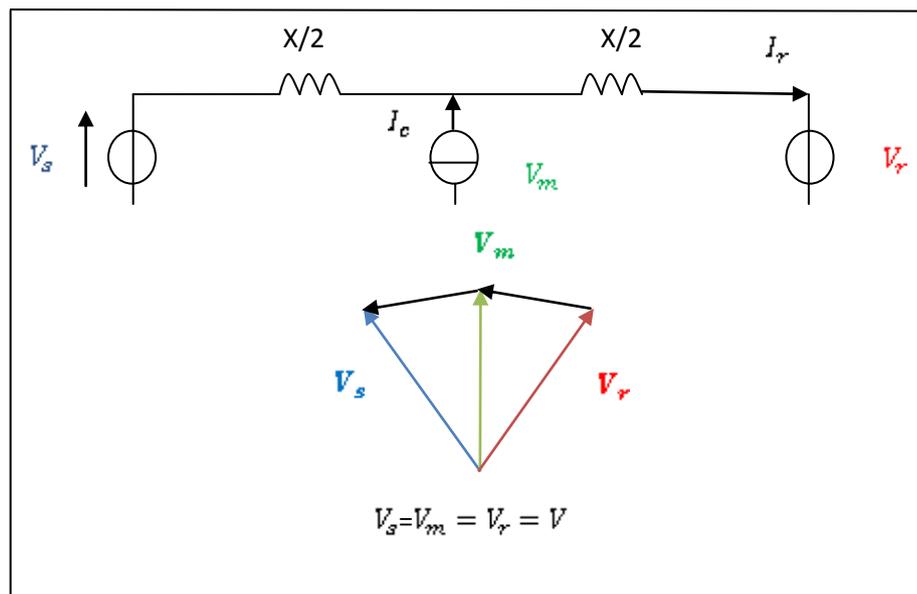


Fig I 1. Compensateur shunt.

### 1.2.2.1.1. Compensateur statique de la puissance réactive ou bien statique var compensateur (SVC)

Ces équipements étaient constitués essentiellement d'une inductance en série avec un gradateur. Le retard à l'amorçage des thyristors permettait de régler l'énergie réactive absorbée par le dispositif. En effet, tous les compensateurs parallèles injectent du courant au réseau via le point de raccordement. Quand une impédance variable est connectée en parallèle sur un réseau, elle consomme (ou injecte) un courant variable. Cette injection de courant modifie les puissances active et réactive, qui transitent dans la ligne. [7]

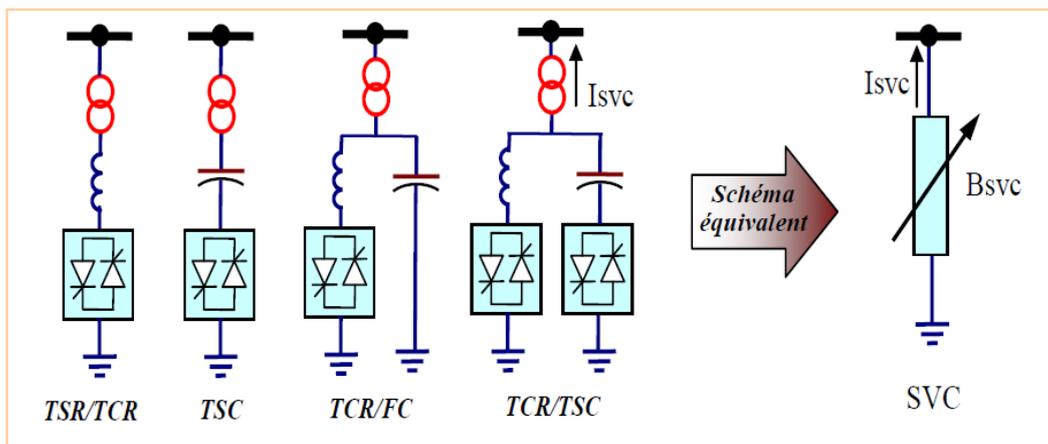


Fig I.2. Structure d'un SVC, schéma équivalent.

### 1.2.2.1.2. Static Synchronous Compensator (STATCOM)

Après le SVC, l'arrivée des thyristors GTO a conduit au développement d'un autre dispositif FACTS shunt, le STATCOM. Similaire au compensateur synchrone classique, le STATCOM présente un temps de réponse plus court. Il est capable de fournir ou d'absorber de l'énergie réactive. Il se présente le plus souvent sous la forme d'un onduleur de tension.

Le concept de base du STATCOM a été proposé par Gyugyi en 1976. Les premiers STATCOM, à base de convertisseurs de deux niveaux, appliqués dans les réseaux de transports sont:

- Le STATCOM de 80 MVar appliqués à un réseau de transport de 154 KV à Inuyama au Japon, a été commercialisé par "Kansai Electric Power Corporation" et "Mitsubishi Electric Power Corporation".
- LE STATCOM de 100 MVar à 161 KV, installé à la station de "Sullivan du Nord-Est de Tennessee" par "Westinghouse Electric Corporation aux Etats-Unis".

L'IEEE ((Institute of Electrical and Electronics Engineers) définit le STATCOM (Static Synchronous Compensator) comme un générateur synchrone fonctionnant comme un compensateur parallèle de l'énergie réactive dont le courant capacitif ou inductif généré peut être contrôlé séparément de la tension du réseau.[8]

Le compensateur statique synchrone STATCOM, autrefois appelé compensateur statique de puissance réactive avancé fait partie de la deuxième génération des FACTS. Il correspond à l'équivalent statique exact de la machine synchrone classique fonctionnant en compensateur, mais sans inertie. Il est principalement utilisé pour la compensation dynamique des réseaux, afin de faciliter la tenue de tension, d'accroître la stabilité en régime transitoire et d'amortir les oscillations de puissance.

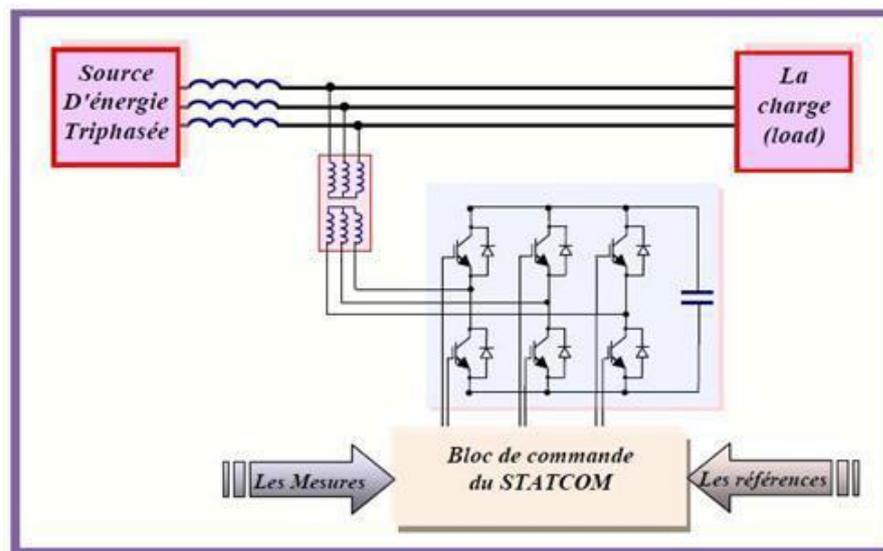


Fig I.3. Structure de base d'un STATCOM couplé au réseau.

### I.2.2.2. Compensateurs séries

Ces compensateurs sont connectés en série avec le réseau comme une impédance variable (inductive ou capacitive) ou une source de tension variable. Utilisés pour la compensation série de la puissance réactive et par leur influence sur l'impédance effective des lignes ils interviennent dans le contrôle du flux de puissance et la stabilité de ce dernier. En général, ces dispositifs séries injectent une tension en série avec la ligne de transmission. [9]

Les FACTS dans la compensation série modifient l'impédance de la ligne : la réactance ( $X$ ) de la ligne est diminuée, donc augmenter la puissance active transmissible. Cependant la puissance réactive doit être plus fournie. [6]

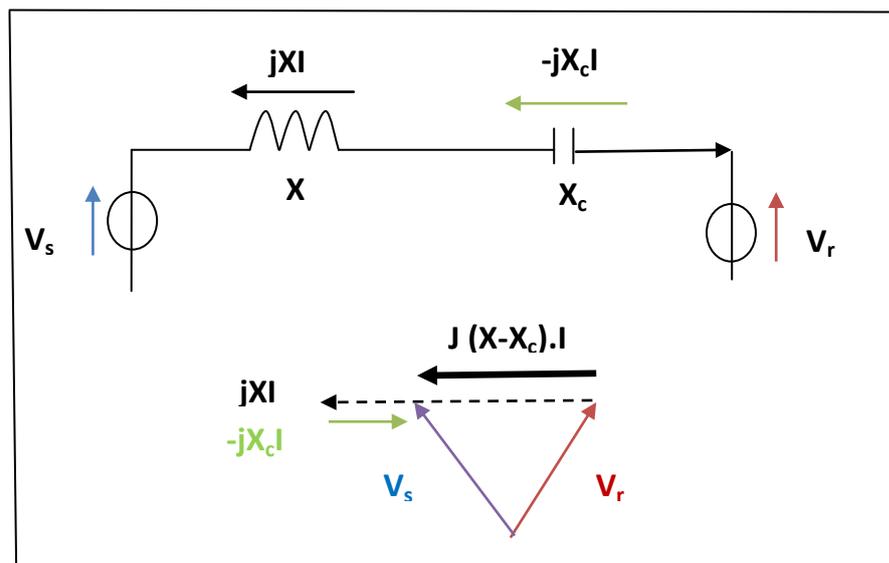


Fig I 4. Compensation série.

#### I.2.2.2.1. Condensateur série commander par thyristor « TCSC » (Thyristor controlled series capacitor)

Ces compensateurs sont connectés en série avec le réseau et peuvent être utilisés comme une impédance variable (inductive, capacitive) ou une source de tension variable. En général, ces compensateurs modifient l'impédance des lignes de transport en insérant des éléments en série avec celles-ci. [1][10]

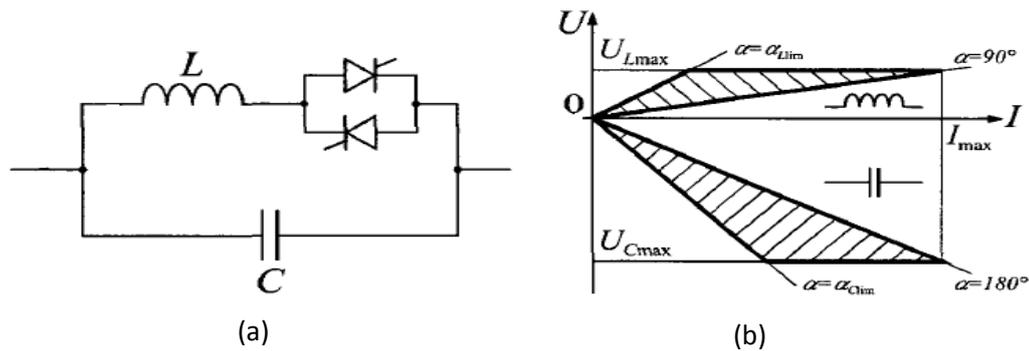


Fig I 5. Condensateur série commandé par thyristor (TCSC) : a) Schéma ; b) Caractéristique de fonctionnement.

**I.2.2.2.2. Compensateurs séries à base de thyristors GTO « SSSC » (Compensateur statique série synchrone)**

Le dispositif FACTS à base d'onduleur de tension connecté en série au réseaux électrique et appelé Static Synchronous Série Compensator (SSSC) a été proposé par Gyugyi en 1989; et jusqu'au récent progrès qu'a connus les semi-conducteurs de puissance, le SSSC n'est pas utilisé dans la majorité des cas de besoins de compensation série à cause de son prix très accru. Il est généralement combiné avec un STATCOM et fonctionné en tant qu'un UPFC. [1]

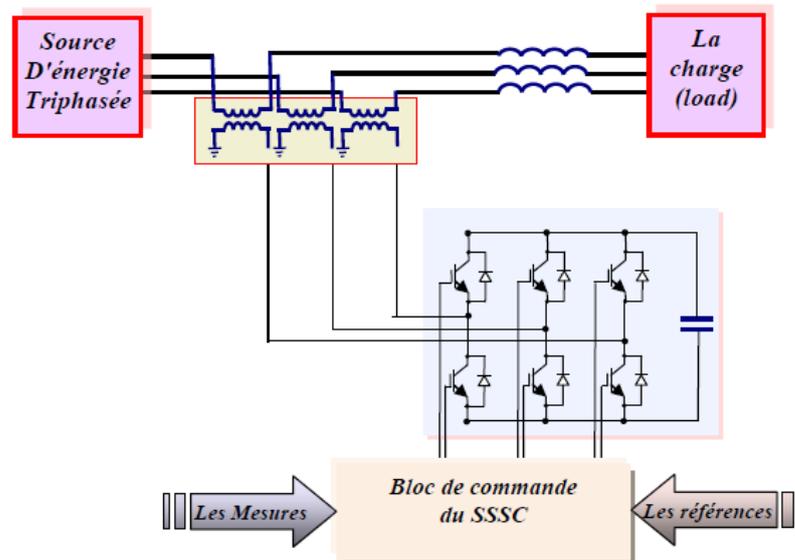


Fig I 6. Structure de base d'un SSSC couplé au réseau.

**I.2.2.3. Compensateurs hybrides (TCPAR, UPFC, IPFC)**

C'est une combinaison des dispositifs séries et shunts commandé d'une manière coordonné afin d'accomplir un contrôle prédéfini. Ils permettent un contrôle multi variables, ils servent à contrôler le flux de puissance active et réactive, la tension et l'angle de transport de l'énergie. [11]

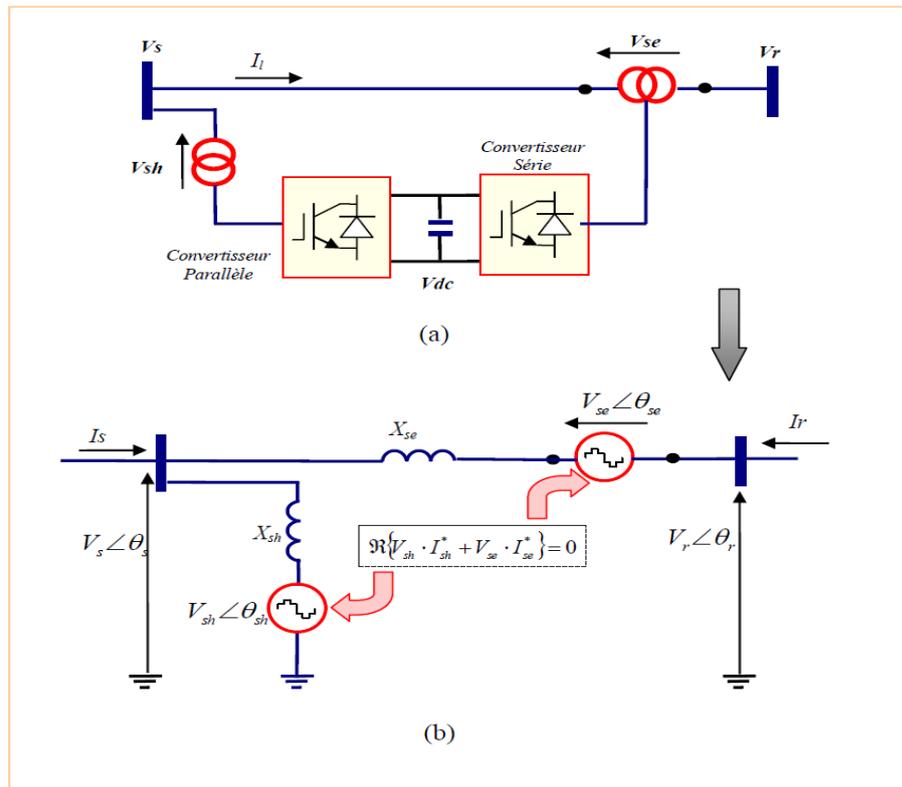


Fig I 7. (a) schéma représentatif d'un UPFC, (b) schéma équivalent de l'UPFC.

**I.2.3. Apports et avantages des FACTS [9]**

L'intérêt majeur de la technologie FACTS pour les opérateurs de l'énergie électrique est d'ouvrir plus d'opportunités pour le contrôle de la puissance et d'augmenter les capacités des lignes sous les conditions normales. Les contrôleurs FACTS permettent dans un système énergétique d'obtenir un ou bien plusieurs des bénéfices suivants:

- Contrôle du flux de puissance qui est la principale fonction des dispositifs FACTS. Ce contrôle doit être réalisé pour satisfaire les besoins des consommateurs ;
- Améliorer la stabilité dynamique du système ;
- Contrôle des tensions dans les nœuds ;
- Augmenter les capacités de charge des lignes vers leurs limites thermiques ;
- Contrôle de la puissance réactive: Réduction de l'écoulement de la puissance réactive, donc permettre aux lignes de transmettre plus d'énergies active et par conséquent réduire les pertes de transmission ;
- Amélioration de la qualité de l'énergie ;

Dans notre étude on s'intéressera à l'un des dispositifs de la famille des FACTS, destinées à la compensation et au contrôle des réseaux électriques, à base d'onduleurs de tension connectés au réseau électrique *en parallèle*, est connu sous l'appellation "*STATCOM*" pour lequel on étudiera son principe de fonctionnement et son rôles dans le contrôle des réseaux électriques.

#### ***1.2.4. Applications pratiques des dispositifs FACTS en exploitation***

Les systèmes FACTS sont habituellement connus comme nouvelle technologie, et dans des centaines d'installations dans le monde, plus particulièrement du SVC depuis 1970 avec une puissance totale installée de 90.000 MVAR, prouvent l'acceptation de ce genre de technologie. Le tableau (2) montre des chiffres approximatifs des dispositifs FACTS installés dans le monde avec les puissances totales installées. [9][7]

Tableau.2: Dispositifs FACTS installés dans le monde.

Type	nombre	Puissance installée (MVA)
SVC	600	90.000
STATCOM	15	1.200
TCSC	10	2.000
HVDC B2B	41	14.000
UPFC	2-3	250

### ***I. 2.5. 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. [12]

## **I.3. Etude de STATCOM**

### ***I.3.1. Introduction au compensateur synchrone statique (STATCOM)***

Les compensateurs synchrones statiques (STATCOM), qui font partie de la famille des FACTS, se composent principalement de trois phases, redresseur/onduleur qui peut être connectée à un système afin de compenser dynamiquement l'exigence de la puissance réactive. Semblable à un

redresseur/onduleur, un STATCOM est un convertisseur de source de tension qui convertit le courant continu en courant alternatif d'amplitude variable et un angle de phase. En faisant varier l'angle de courant alternatif, un STATCOM peut fournir une quantité variable et précise de la puissance réactive au réseau au qu'il est relié. Cette caractéristique peut être utilisée pour faire en sorte que la tension aux bornes du système d'alimentation connectée au STATCOM est maintenue à la valeur nominale ou de veiller à ce que le facteur de puissance d'une grande application industrielle est maintenue à l'unité.

Les STATCOMs sont couramment utilisés afin de maintenir une tension constante aux bornes des lignes de transmission à courant alternatif. Semblable à une sous-station shunt-condensateur, un STATCOM augmente la capacité de transfert de puissance d'une ligne de transmission lorsqu'il est ajouté. Cependant un certain nombre d'avantages par rapport stations shunt condensateur, et plus particulièrement:

- ✓ Un contrôle plus strict de la compensation de tension aux bornes de la ligne de transmission.
- ✓ Augmentation de la stabilité en ligne lors des transitoires (par exemple, lors de changements brusques de la charge à la fin de réception de la ligne de transmission), en raison de la rapidité supérieure de la réponse STATCOM.

Les STATCOMs sont également couramment utilisés pour la correction du facteur de puissance dynamique (c'est à dire, la compensation dynamique de puissance réactive) dans les applications industrielles fonctionnant avec des grands pics aléatoires de la demande de puissance réactive (centrales avec fours à arc). Lorsque rien n'est fait, ces pics de la demande de puissance réactive augmentent de façon significative les coûts de l'énergie de la plante. D'autres effets indésirables des grands pics aléatoires de la demande de puissance réactive comprennent des variations de tension à l'entrée de l'installation et dans le réseau d'alimentation en courant alternatif, ainsi que la réduction de la productivité de l'application industrielle. [13]

### I. 3.2 Fonctionnement de STATCOM [13]

La figure (I.8) montre le schéma synoptique d'un STATCOM.

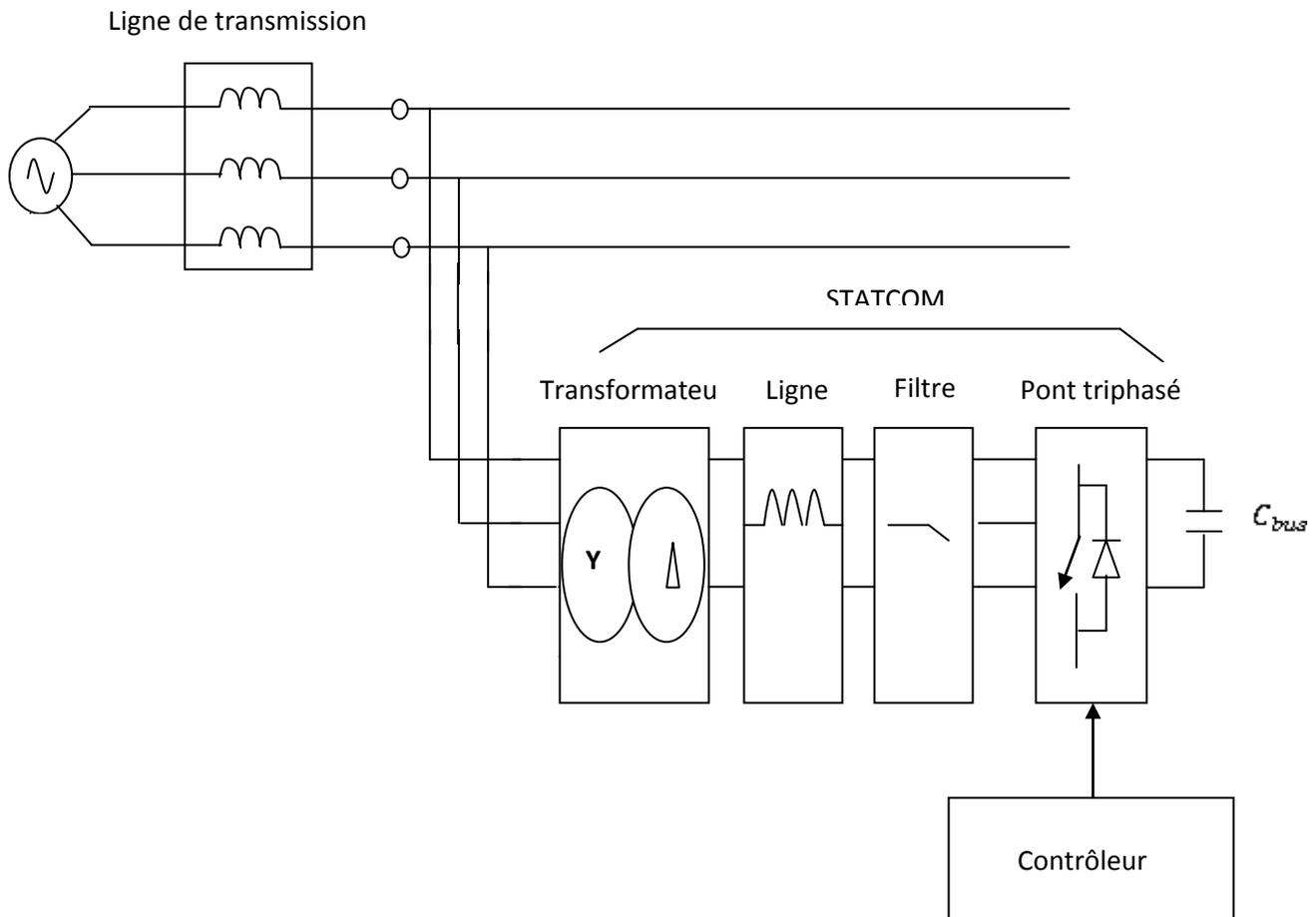


Fig I 8.Schéma d'un STATCOM

La figure (I.8) montre qu'un STATCOM se compose principalement d'un transformateur abaisseur de tension et un redresseur / onduleur triphasé (à savoir un pont triphasé, un filtre triphasé, des inductances de ligne, et un dispositif de commande). Un condensateur ( $C_{bus}$ ) est utilisé comme une source d'alimentation en courant continu pour le redresseur / onduleur.

Le STATCOM est utilisé pour fournir de la puissance réactive au réseau au il est relié, soit pour la compensation de la tension ou pour la correction du facteur de

puissance, Ceci est obtenu en contrôlant l'angle du courant triphasé circulant dans le STATCOM

L'intensité du courant circulant à travers le STATCOM détermine la quantité de puissance réactive échangée avec le réseau. Cela permet au STATCOM de fournir ou absorber la quantité exacte de puissance réactive nécessaire pour compenser l'exigence de la puissance réactive du système d'alimentation.

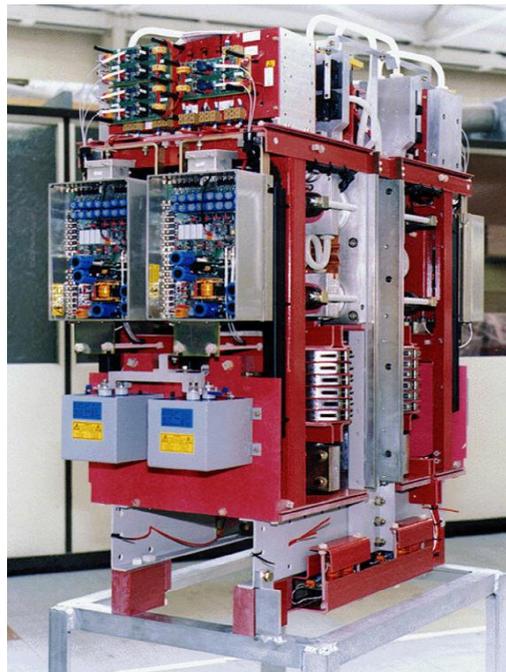


Fig I 9. Une valve de convertisseur STATCOM. [13]

La figure (I.9) montre également que dans un STATCOM, un grand condensateur ( $C_{bus}$ ) est utilisé pour fournir de l'énergie en courant continu au redresseur / onduleur. La tension aux bornes de ce condensateur doit être maintenue à une valeur qui est suffisamment élevée pour que le STATCOM peut échanger de la puissance réactive avec le réseau. La tension aux bornes du condensateur est maintenue à la valeur désirée en ajustant en permanence la grandeur et la polarité de la composante active du courant. Lorsque la tension aux bornes du condensateur doit être augmentée, le STATCOM ajuste l'amplitude et la polarité de la composante active du courant circulant à travers son côté à courant alternatif de telle sorte que la puissance active étant tirée du système d'alimentation en courant

alternatif et convertie en énergie afin de charger le condensateur. Inversement, lorsque la tension aux bornes du condensateur doit être diminuée, le STATCOM ajuste l'amplitude et la polarité de la composante active du courant circulant à travers son côté à courant alternatif de telle sorte que la puissance active est renvoyée au système d'alimentation, déchargeant ainsi le condensateur.

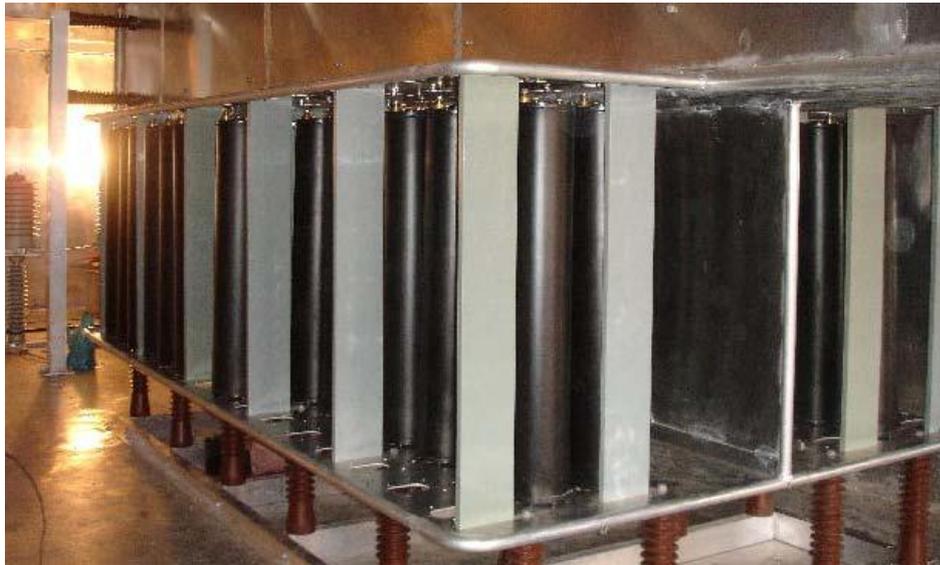


Fig I.10. Condensateurs dans un STATCOM

### ***I. 3.3. Mise en page d'un poste STATCOM***

La figure (I.11) montre la disposition typique d'un poste STATCOM utilisé pour la compensation de la tension de lignes de transmission à courant alternatif. Les cases numérotées dans la figure sont identifiés ci-dessous. [13]

- 1** : STATCOM bâtiment principal: Contient valves de convertisseur, systèmes de contrôle et de protection, et des condensateurs à courant continu ;
- 2** : Bâtiment de stockage de l'énergie (en option) ;
- 3** : Inductances de ligne ;
- 4** : Échangeur de chaleur et le système de refroidissement ;
- 5** : Transformateur abaisseur ;
- 6** : Equipements haute tension .

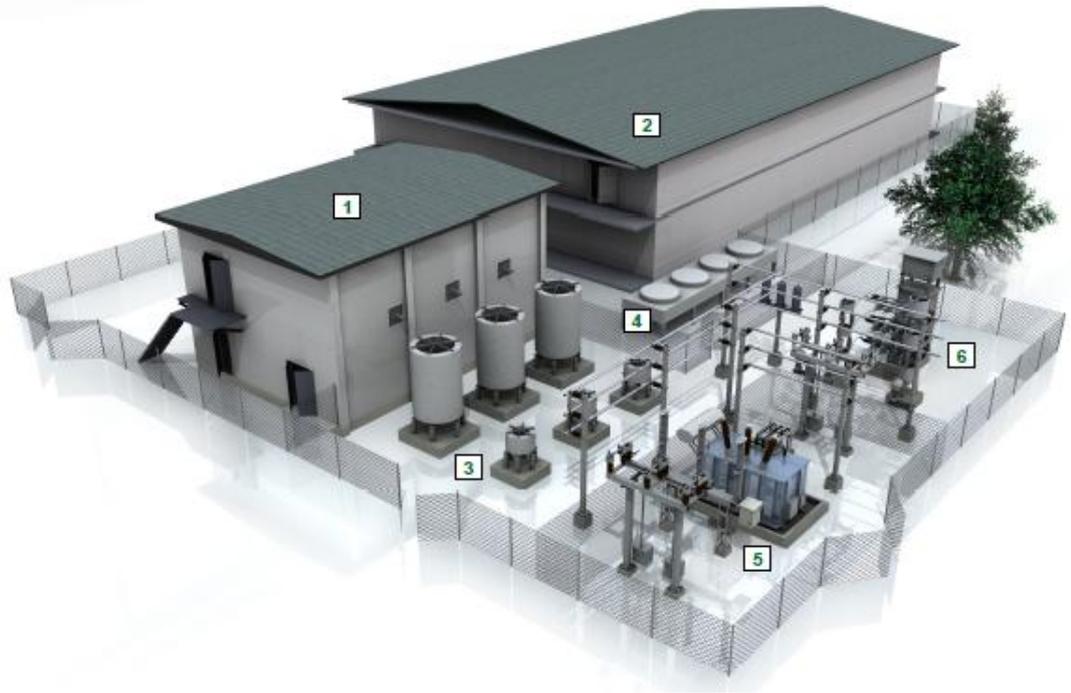


Fig I 11. Un poste STATCOM avec une capacité de stockage d'énergie .

La plupart des composants principaux d'un STATCOM (les systèmes valves de convertisseur, de contrôle et de protection, et des condensateurs) sont situées dans le bâtiment principal STATCOM sur la gauche de la figure 11. L'équipement électrique reste nécessaire pour le fonctionnement STATCOM sont installés à l'air libre à côté le bâtiment principal STATCOM.

Un bâtiment de stockage d'énergie est situé à l'arrière, près du bâtiment principal STATCOM. Ce bâtiment est facultative et n'est pas une composante nécessaire d'un STATCOM. Le but principal d'un bâtiment de stockage de l'énergie est de permettre au STATCOM de stocker l'énergie électrique reçu d'une station de production (par exemple, éolien, panneaux solaires) ou à partir du réseau. Le poste STATCOM peut alors stocker l'énergie électrique pendant les périodes de production d'énergie à haute ou faible consommation d'énergie, et de retour à l'arrière de l'énergie stockée dans le réseau pendant les périodes de production d'énergie à faible consommation d'énergie ou de pointe. Cela démontre l'utilisation et la flexibilité des systèmes de puissance liée à des faits technologies améliorées.

#### **I.4. Avantages du STATCOM**

Le STATCOM présente plusieurs avantages:

- Un contrôle optimal de la tension, les phases sont contrôlées séparément pendant les perturbations du système.
- Bonne réponse à faible tension : le STATCOM est capable de fournir son courant nominal, même lorsque la tension est presque nulle.
- Bonne réponse dynamique c.à.d. le système répond instantanément. [14]

#### **I.5. Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons donné un aperçu sur les différents topologies et structures des dispositifs FACTS. Nous avons aussi présenté quelques caractéristiques pour chaque compensateur étudié avec des schémas présentatifs. Ainsi on a étudié le STATCOM plus en détails, son fonctionnement, sa mise en page, ces avantages et apports sur le réseau.

**Chapitre II:**

***Modélisation et Commande  
Du STATCOM***

## II.1. Introduction

Dans ce présent chapitre nous étudions un nouveau concept de la compensation de la puissance réactive dans les réseaux électriques soutenue par l'application du compensateur statique synchrone STATCOM, pour lequel un modèle mathématique développé dans le repère tournant (d,q) ainsi qu'une analyse des effets de compensation sur les différentes puissances dans le réseau .la méthode Watt-Var découplé sera présentée et adoptée comme stratégie de commande de ce dispositif et elle sera validée par plusieurs essais de simulation.

Le STATCOM est composé d'un convertisseur de tension à base de semi conducteur de haute technologie (IGBT, IGCT) associé à un condensateur comme source de tension continue et l'ensemble connecté en parallèle au réseau par le biais d'un transformateur de couplage comme représenté dans la figure (II.1).

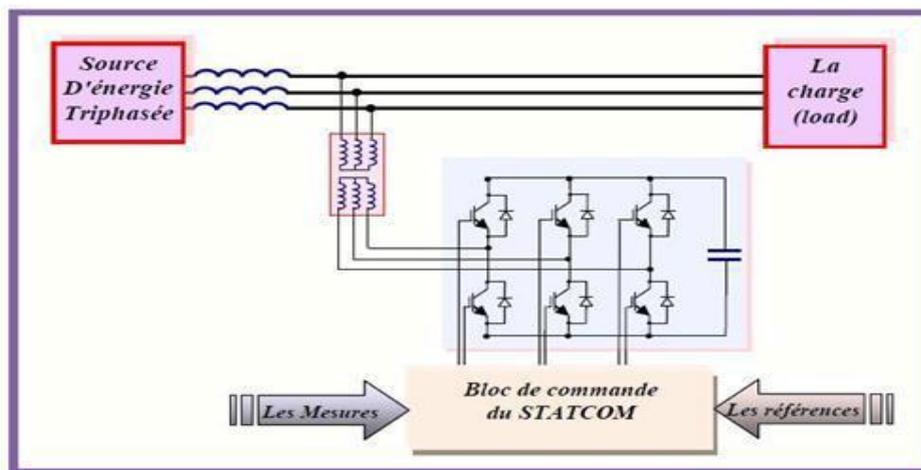


Fig II 1. Structure de base d'un STATCOM couplé au réseau.

## II.2. Principe de Fonctionnement du STATCOM

Les compensateurs shunts sont bien reconnus dans la compensation de l'énergie réactive et par conséquent la régulation de la tension au jeu de barre où ils sont connectés. Le STATCOM est un générateur synchrone statique qui génère une tension alternative triphasée synchrone avec la tension du réseau à partir d'une source de tension continue. L'amplitude de la tension du STATCOM peut être contrôlée afin d'ajuster la quantité de l'énergie réactive à échanger avec le réseau.

En général la tension du STATCOM est injectée en phase avec la tension de la ligne et dans ce cas il n'y a pas d'échange de l'énergie active avec le réseau mais seulement la puissance réactive qui sera injectée (ou absorbée) par le STATCOM comme le résume la figure(II.2) [8]

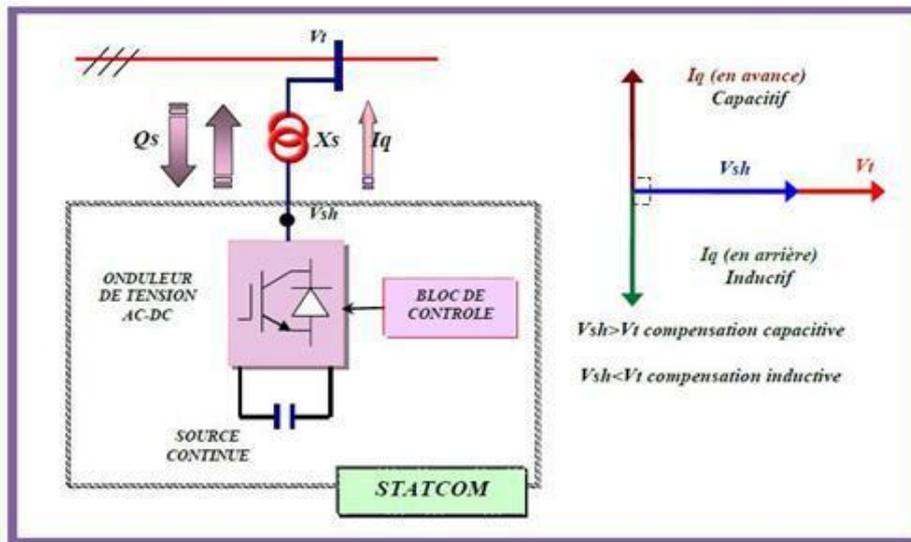


Fig II.2. Principe de fonctionnement du STATCOM.

Considérant le STATCOM de la figure (II.2) connecté à un jeu de barre dans le système énergétique (source de tension, ligne et charge), le schéma équivalent de ce dispositif est donné par la figure (II.3).

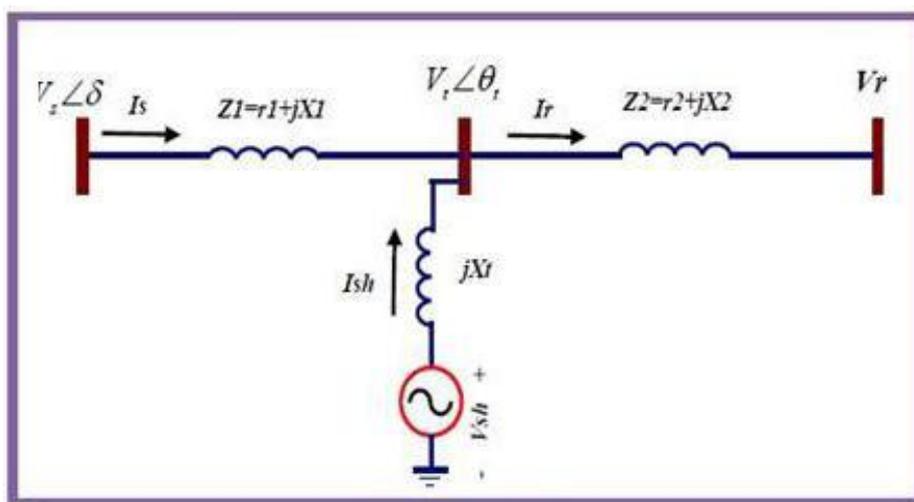


Fig II.3. Schéma équivalent du STATCOM connecté à un réseau électrique.

- Mise en équations du système:

Le courant injecté par le STATCOM est donné par:

$$\bar{I}_{sh} = \frac{\bar{V}_{sh} - \bar{V}_t}{jX_t} \quad (2.1)$$

La puissance injectée au jeu de barre "t" est donnée par l'équation suivante :

$$\bar{S} = \bar{V}_t \cdot \bar{I}_{sh} = \frac{\bar{V}_t(\bar{V}_{sh}^* - \bar{V}_t^*)}{-jX_t} = \frac{\bar{V}_t \cdot \bar{V}_{sh}^* - \bar{V}_t^2}{-jX_t} \quad (2.2)$$

D'où on abouti aux puissances active et réactive injectées par le STATCOM au jeu de barre "t" exprimées par les formules qui suivent:

$$P_{sh} = -V_t \cdot V_{sh} \cdot \sin(\Theta_t - \Theta_{sh})/X_t \quad (2.2a)$$

$$Q_{sh} = V_t(V_{sh} \cdot \cos(\Theta_t - \Theta_{sh}) - V_t)/X_t \quad (2.2b)$$

Avec l'hypothèse d'un STATCOM idéal (convertisseur sans pertes), la contrainte de fonctionnement que doit satisfaire le STATCOM est de ne pas échanger la puissance active avec le réseau :

$$P_{sh} = -V_t \cdot V_{sh} \cdot \sin(\Theta_t - \Theta_{sh})/X_t = 0$$

$$D'où \text{ la condition } \Theta_t - \Theta_{sh} = 0 \Rightarrow \Theta_{sh} = \Theta_t$$

D'après cette condition la tension injectée par le STATCOM doit être en phase avec la tension du jeu de barre de raccordement. [8][15]

Cependant il y a toujours, dans la pratique, une petite quantité de la puissance active absorbée à partir du réseau pour couvrir les pertes des interrupteurs du convertisseur du STATCOM et les pertes au niveau du transformateur de couplage et pour maintenir la tension DC aux bornes du condensateur constante.

Comme les tensions  $V_{sh}$  et  $V_t$  Figure(II.4) sont en phase le courant  $I_{sh}$  du STATCOM en quadrature avec la tension  $V_t$ , est donc un courant réactif son

amplitude et sa puissance réactive correspondante échangée avec le réseau sont données par les équations suivantes: En admettant que la tension  $V_{sh}$  est sur l'axe d (comme référence des phases) :

$$V_{shd} = V_{sh} ; V_{shq} = 0$$

$$|I_{sh}| = I_{shq} = \frac{(V_{sh}-V_t)}{X_t} \tag{2.3}$$

$$Q_{sh} = V_{sh} \cdot I_{sh} = \frac{V_{sh}^2}{X_t} \left(1 - \frac{V_t}{V_{sh}}\right) \tag{2.4}$$

A partir de l'équation (2.4) il parait claire que :

- Si le module de la tension du STATCOM  $V_{sh}$  égale le module de la tension  $V_t$  du réseau aucun transfert de l'énergie n'est effectué.
- Si  $V_{sh} > V_t$ , donc  $Q_{sh} > 0$ , le STATCOM fonctionne en mode capacitif et fournit une puissance réactive au réseau (Fig II.4).
- Si  $V_{sh} < V_t$  alors  $Q_{sh} < 0$ , le STATCOM dans ce cas absorbe la puissance réactive à partir du réseau et fonctionne en mode inductif Fig (II.5).

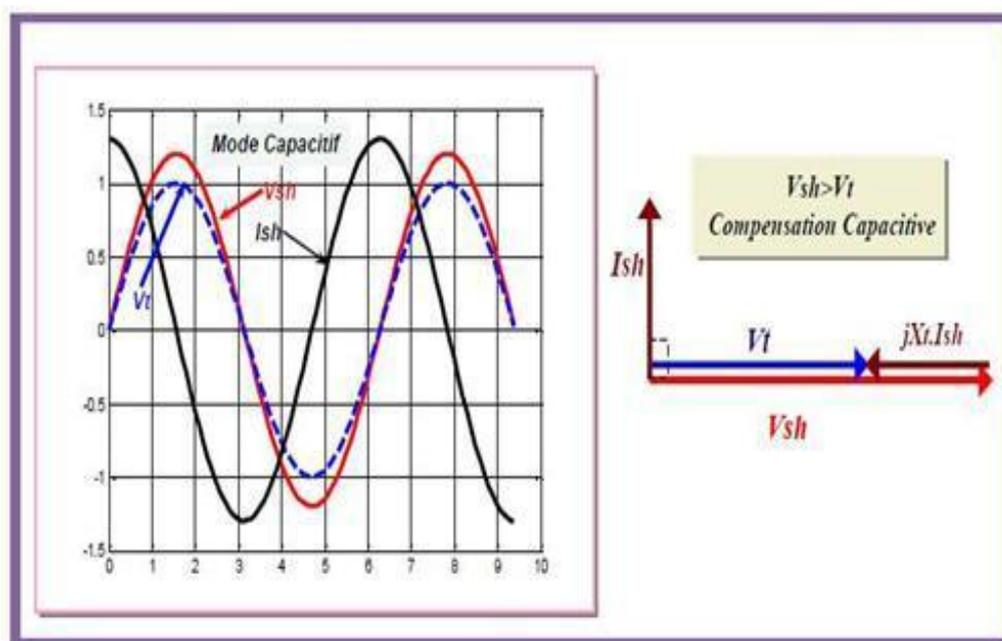


Figure II 4. Courant et tensions en mode capacitif. [7]

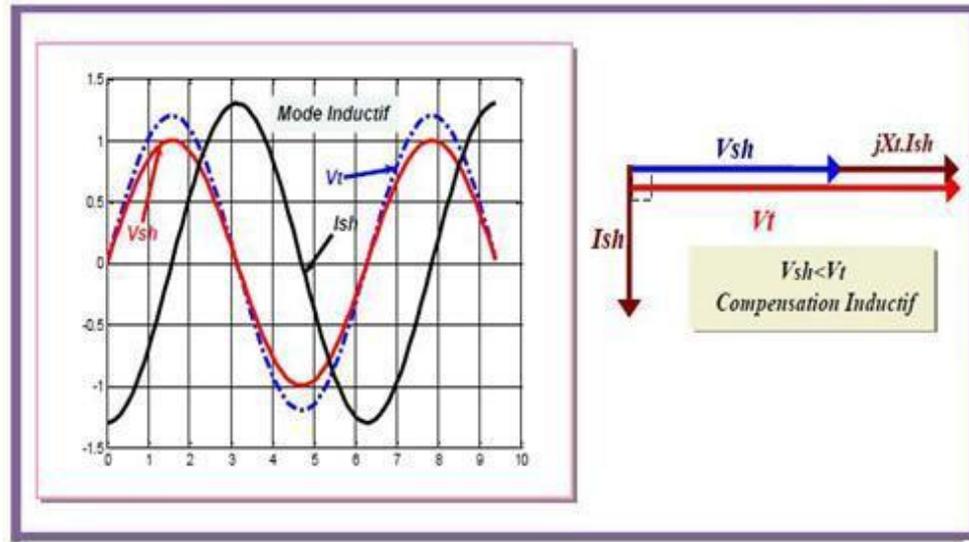


Fig II.5. Courant et tensions en mode inductif. [7]

### II.3. Effet de la compensation shunt (STATCOM) sur le réseau Electrique

Pour étudier les relations entre le réseau électrique et le STATCOM on va adopter pour cela le modèle mathématique de la figure (II 4). qui représente le schéma unifilaire d'un réseau électrique et d'un STATCOM installé dans une ligne de transport. Les équations des courants  $I_s$ ,  $I_{sh}$  et  $I_r$  sont les suivants:

$$\begin{aligned} \bar{I}_s &= \frac{(\bar{Z}_2 + jX_t)\bar{V}_s - \bar{Z}_2 \cdot \bar{V}_{sh} - jX_t \cdot \bar{V}_r}{\bar{Z}_1 \cdot \bar{Z}_2 + jX_t(\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2)} \\ \bar{I}_{sh} &= \frac{-\bar{Z}_2 \bar{V}_s + (\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2)\bar{V}_{sh} - \bar{Z}_1 \bar{V}_r}{\bar{Z}_1 \cdot \bar{Z}_2 + jX_t(\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2)} \\ \bar{I}_r &= \frac{jX_t + \bar{Z}_1 \cdot \bar{V}_{sh} - (\bar{Z}_1 + jX_t)\bar{V}_r}{\bar{Z}_1 \cdot \bar{Z}_2 + jX_t(\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2)} \end{aligned} \quad (2.5)$$

Les puissances injectées par la source  $V_s$  peuvent être calculée à partir des équations:

$$P_s = R_e(\bar{V}_s \cdot \bar{I}_s^*) = R_e \left[ \bar{V}_s \cdot \left( \frac{(\bar{Z}_2 + jX_t)\bar{V}_s - \bar{Z}_2 \cdot \bar{V}_{sh} - jX_t \cdot \bar{V}_r}{\bar{Z}_1 \cdot \bar{Z}_2 + jX_t(\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2)} \right)^* \right] \quad (2.6a)$$

$$Q_s = \text{Im}(\bar{V}_s \cdot \bar{I}_s^*) = \text{Im} \left[ \bar{V}_s \cdot \left( \frac{(\bar{Z}_2 + jX_t)\bar{V}_s - \bar{Z}_2 \cdot \bar{V}_{sh} - jX_t \cdot \bar{V}_r}{\bar{Z}_1 \cdot \bar{Z}_2 + jX_t(\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2)} \right)^* \right] \quad (2.6b)$$

Les puissances délivrées par le STATCOM données par les équations 2.7 (a) et (b) sont :

$$P_{sh} = \text{Re}(\bar{V}_{sh} \cdot \bar{I}_{sh}^*) = \text{Re} \left[ \bar{V}_{sh} \cdot \left( \frac{-\bar{Z}_2 \bar{V}_s + (\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2) \bar{V}_{sh} - \bar{Z}_1 \cdot \bar{V}_r}{\bar{Z}_1 \cdot \bar{Z}_2 + jX_t(\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2)} \right)^* \right] \quad (2.7a)$$

$$Q_{sh} = \text{Im}(\bar{V}_{sh} \cdot \bar{I}_{sh}^*) = \text{Im} \left[ \bar{V}_{sh} \cdot \left( \frac{-\bar{Z}_2 \bar{V}_s + (\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2) \bar{V}_{sh} - \bar{Z}_1 \cdot \bar{V}_r}{\bar{Z}_1 \cdot \bar{Z}_2 + jX_t(\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2)} \right)^* \right] \quad (2.7b)$$

## II.4. Modélisation du STATCOM

### II.4.1. Modèle Mathématique Simplifié

Le STATCOM, comme on la décrit déjà avant, peut être représenté par le schéma équivalent qu'on reproduit sur la figure (II.8) en tenant compte uniquement du jeu de barre où est connecté ce dispositif:

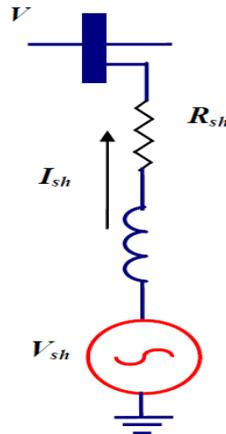


Fig II.6. Schéma équivalent de STATCOM.

Pour le modèle simplifié du STATCOM on suppose que le circuit continu consiste en une source de tension constante, et le circuit DC ne sera pas inclus dans ce modèle. Le schéma équivalent de ce dispositif donc est une source de tension sinusoïdale connectée à un nœud du réseau par l'inductance  $L_{sh}$  du transformateur de couplage, le circuit contient aussi une résistance en série pour représenter les pertes ohmiques du transformateur et les pertes dans les interrupteurs de l'onduleur. [17][18]

Le courant du STATCOM dépend de la différence entre la tension du système  $V$  (tension au nœud) et la tension ajustable du STATCOM. On appliquant la loi d'ohm on a:

$$\bar{V} - \bar{V}_{sh} = R_{sh} \cdot \bar{I}_{sh} + L_{sh} \cdot \frac{dI_{sh}}{dt} \tag{2.8}$$

Où les grandeurs sont en triphasé:

$$\bar{V} = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}; \bar{V}_{sh} = \begin{bmatrix} V_{ash} \\ V_{bsh} \\ V_{csh} \end{bmatrix} \text{ et } \bar{I}_{sh} = \begin{bmatrix} I_{sha} \\ I_{shb} \\ I_{shc} \end{bmatrix}.$$

Pour simplifier ces équations on passe au repère orthogonal fixe  $(\alpha, \beta)$  on multipliant l'équation (2.8) par la matrice de la transformation de CLARK suivante:

$$T_{\alpha\beta} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix}$$

On passe au repère tournant  $(d, q)$ , le référentiel du synchronisme, en multipliant tout les grandeurs par le phaseur  $e^{-j\gamma}$ , avec  $\gamma = \frac{d\gamma}{dt}$  la pulsation des grandeurs en question voir la figure (II.7).

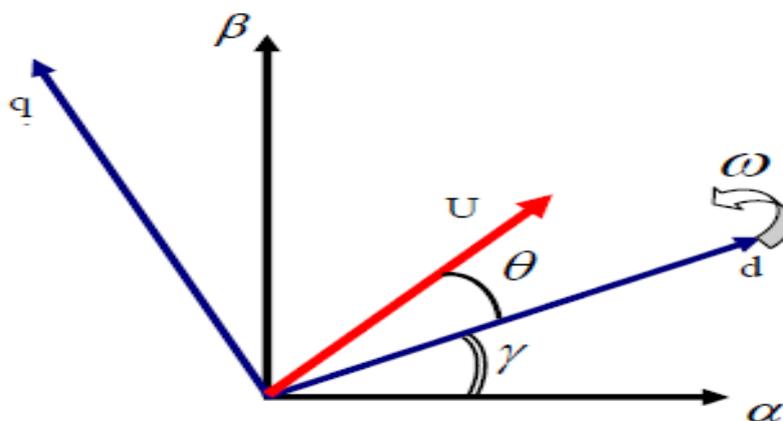


Fig II.7. Passage du repère  $\alpha, \beta$  vers le repère  $d, q$

Donc :

$$\bar{U}_{(d,q)} = \bar{U}_{(\alpha,\beta)} \cdot e^{-j\gamma} \quad \text{et inversement}$$

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

En appliquant cette écriture sur l'équation (2.8) on aura:

$$\bar{V}^{(d,q)} \cdot e^{j\gamma} - \bar{V}_{sh}^{(d,q)} \cdot e^{(j\gamma)} = R_{sh} \cdot \bar{I}_{sh}^{(d,q)} \cdot e^{(j\gamma)} + L_{sh} \cdot \frac{d}{dt} (\bar{I}_{sh}^{(d,q)} \cdot e^{(j\gamma)}) \quad (2.9)$$

Après simplification de calcul en aboutit aux équations dynamiques du STATCOM dans le repère (d, q) suivante:

$$V_d - V_{shd} = R_{sh} \cdot I_{shd} + L_{sh} \cdot \frac{dI_{shd}}{dt} - L_{sh} \cdot I_{shq} \quad (2.10a)$$

$$V_q - V_{shq} = R_{sh} \cdot I_{shq} + L_{sh} \cdot \frac{dI_{shq}}{dt} - L_{sh} \cdot I_{shd} \quad (2.10b)$$

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

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R_{sh}}{L_{sh}} & \omega \\ -\omega & \frac{-R_{sh}}{L_{sh}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_{sh}} \begin{bmatrix} V_d - V_{shd} \\ V_q - V_{shq} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Ou le vecteur  $\begin{bmatrix} V_d - V_{shd} \\ V_q - V_{shq} \end{bmatrix}$  représente le vecteur de commande de système.

#### II.4.2. 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 petites 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. [17][19]

Le circuit continu est représenté par une source de courant connecté au condensateur C et une résistance shunt pour exprimer les pertes joules dans le circuit continue Figure (II.10). [18][20]

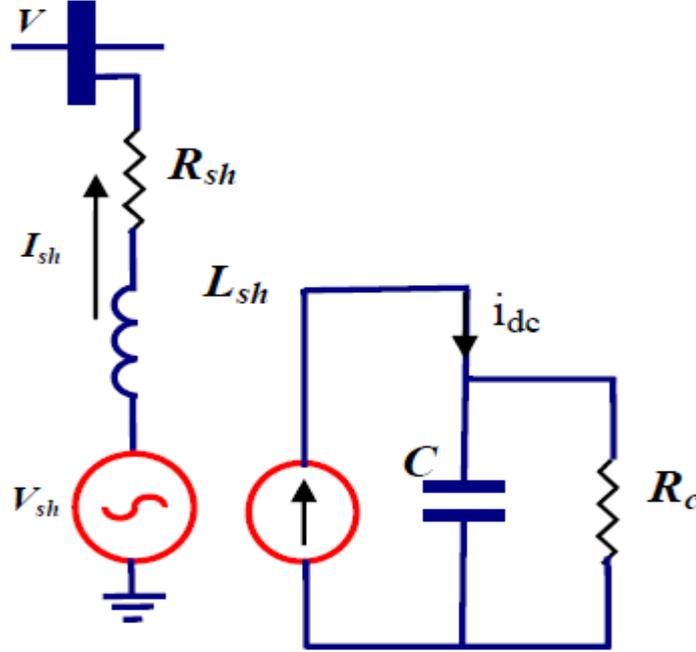


Fig II.8. Schéma équivalent du Statcom avec Circuit DC

On suppose que :

$$\bar{V}_{sh}^{(d,q)} = V_{shd} + jV_{shq} = v \cos \Theta + jv \sin \Theta \quad (2.12)$$

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

$$v = m * U_{dc} \quad (2.13)$$

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

En substituant les équations (2.12) et (2.13) dans les équations (2.10a) et (2.10b) on aboutit aux équations:

$$V_d - mU_{dc} \cos \Theta = R_{sh} \cdot I_{shd} + L_{sh} \cdot \frac{dI_{shd}}{dt} - L_{sh} \cdot I_{shq} \quad (2.14a)$$

$$V_q - mV_{dc} \sin \Theta = R_{sh} \cdot I_{shq} + L_{sh} \cdot \frac{dI_{shq}}{dt} - L_{sh} \cdot I_{shd} \quad (2.14b)$$

La puissance circulant entre le condensateur et l'onduleur de tension peut être décrite par l'équation (2.15) et en même temps vérifier l'égalité qui suit (2.16):

$$P_{sh} = \frac{3}{2} (V_{shd} \cdot I_{shd} + V_{shq} I_{shq}) \quad (2.15)$$

$$U_{dc} I_{dc} = \frac{3}{2} (V_{shd} \cdot I_{shd} + V_{shq} I_{shq}) \quad (2.16)$$

Le courant  $I_{dc}$  est défini comme étant la somme du courant capacitif " $i_c$ " et le courant résistif " $i_{rc}$ " dans la branche de la résistance  $R_{dc}$ .

$$I_{dc} = c \frac{dU_{dc}}{dt} + \frac{U_{dc}}{R_c} \quad (2.17)$$

De ces équations (2.12-13-16-17) on peut tirer l'équation dynamique du coté continu du STATCOM suivante:

$$c \frac{dU_{dc}}{dt} = \frac{3}{2} m (I_{shd} \cos \theta - I_{shq} \sin \theta) - \frac{U_{dc}}{R_c} \quad (2.18)$$

Les équations (2.14a-2.14b et 2.18) forme le système d'équation d'état du STATCOM en tenant compte des variations de la tension du circuit continu qu'on écrit sous forme matricielle suivante:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \\ U_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R}{L_{sh}} & & \frac{-m}{L_{sh}} \cos \Theta \\ -\omega & \frac{-R}{L_{sh}} & \frac{m}{L_{sh}} \sin \Theta \\ \frac{3m}{2c} \cos \Theta & -\frac{3m}{2c} \sin \Theta & -\frac{1}{R_c c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \\ U_{dc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{sh}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_{sh}} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

On peut observer qu'il y a deux paramètres de commande dans ce système avec trois paramètres d'état à contrôler et uniquement deux grandeurs peuvent être commandées indépendamment. Ce système qu'on doit linéariser autour d'un point de fonctionnement sera de la forme suivante : [17] [18]

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \\ U_{dc} \end{bmatrix} = & \begin{bmatrix} \frac{-R}{L_{sh}} & & \frac{-m}{L_{sh}} \cos \Theta_0 \\ -\omega & \frac{-R}{L_{sh}} & \frac{m}{L_{sh}} \sin \Theta_0 \\ \frac{3m}{2c} \cos \Theta_0 & -\frac{3m}{2c} \sin \Theta_0 & -\frac{1}{R_e c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \\ U_{dc} \end{bmatrix} \\
& + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{sh}} & 0 & \frac{m}{L_{sh}} U_{dc0} \sin \Theta_0 \\ 0 & \frac{1}{L_{sh}} & \frac{m}{L_{sh}} U_{dc0} \cos \Theta_0 \\ 0 & 0 & -\frac{3m}{2c} (I_{shd} \sin \Theta_0 + I_{shq} \cos \Theta_0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ \Theta \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{2.20}$$

Le courant réactif est commandé indépendamment pour contrôler le flux de puissance réactive et les autres paramètres sont utilisés pour maintenir la tension continue  $U_{dc}$  constante. [17][21]

## II.5. Contrôle du STATCOM

Quand un STATCOM est utilisé pour compenser la tension à travers un système d'alimentation en courant alternatif, la tension aux bornes du STATCOM est régulée à l'aide d'une boucle de commande de tension mise en œuvre dans le contrôleur STATCOM (voir la figure II.9). Ce contrôleur contrôle la tension aux bornes du côté transformateur abaisseur de tension, le courant circulant à travers le STATCOM, et la tension aux bornes du côté en courant continu du STATCOM. L'utilisation de ces valeurs de mesures, le contrôleur STATCOM détermine les signaux de commutation à appliquer au pont triphasé afin d'assurer que la tension de ligne mesurée est égale à la commande de tension de ligne à courant alternatif de bus (la valeur de cette commande étant réglée de telle sorte que la tension résultante à travers le STATCOM est à la valeur désirée), et que la tension mesurée aux bornes du côté courant continu du STATCOM est égale à la commande de tension du bus à courant continu. Le schéma de principe d'un STATCOM conçu pour la compensation de la tension (à savoir, contrôle automatique de la tension) est représenté sur la Figure (II.9).

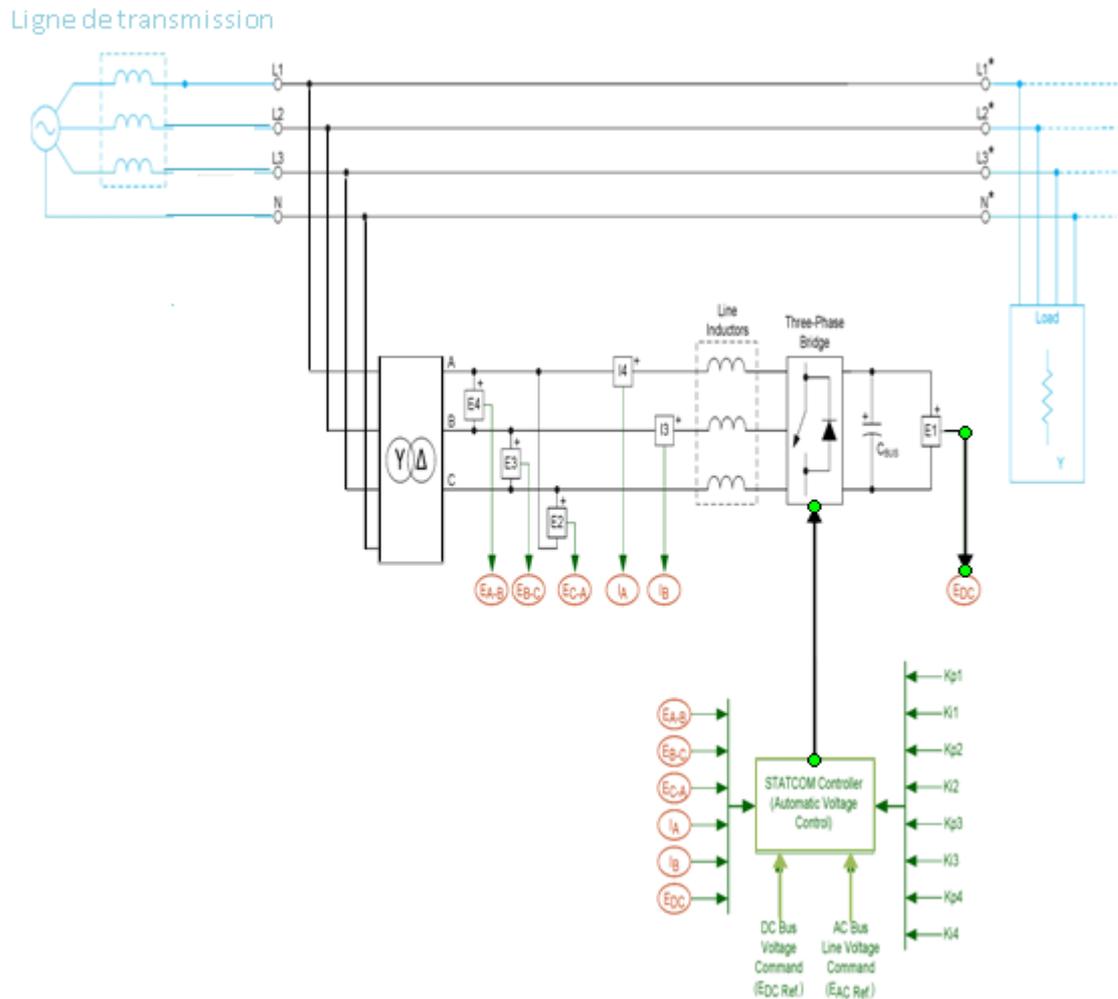


Fig II.9. Schéma d'un STATCOM conçu pour la compensation de tension.

Comme la figure 9 montre, trois capteurs de tension des lignes  $E_{A-B}$ ,  $E_{B-C}$ , et  $E_{C-A}$ , à travers le côté de transformateur, deux capteurs de courant pour mesurer les courants  $I_A$  et  $I_B$  traversant le STATCOM, et un capteur mesure la tension continue  $E_{DC}$  à travers le côté à courant continu du STATCOM. Ces valeurs de tension et de courant sont envoyés au contrôleur STATCOM.

Le contrôleur STATCOM compare la tension de ligne mesurée à l'AC bus à la tension de commande  $E_{ACref}$ , et détermine l'erreur dans la ligne. Le contrôleur STATCOM compare également la tension mesurée en courant continu  $E_{DC}$  à la tension de commande  $E_{DCref}$ , Et détermine l'erreur dans la tension mesurée à travers le côté DC du STATCOM. L'utilisation de ces valeurs d'erreur calculés et la tension mesurée et les valeurs de courant, le contrôleur STATCOM détermine les signaux

de commutation à appliquer au pont à trois phases de façon que la quantité de puissance réactive échangée avec le système d'alimentation à laquelle il est relié assure le respect que la tensions mesurée à travers le côté de STATCOM est égal à la tension de commande, et que la quantité de puissance active passant à travers le STATCOM rend la tension mesurée aux bornes du côté courant continu du STATCOM égale à la tension  $U_{dcbus}$  de commande. Notez que la tension de ligne  $E_{A-B}$  est également utilisée pour fournir l'angle de phase ( $\theta$ ), l'information nécessaire pour effectuer des calculs mathématiques dans le contrôleur.

Dans la totalité des applications pratiques le STATCOM est utilisé principalement pour compenser la puissance réactive au jeu de barre de connexion et par conséquence maintenir la tension de ce dernier. Pour cet objectif ce dispositif injecte ou absorbe un courant  $I_{sh}^*$ , qui est l'image de la puissance à compensée. Ces courants ( $I_{shd}$ ,  $I_{shq}$ ) sont donc les grandeurs de références du STATOM qu'on déterminera à partir des puissances à injectées.

### II.5.1. Détermination des courants de Références

Les puissances injectées par le STATCOM sont la puissance réactive  $Q_{sh}^*$  calculée en fonction de la chute de tension et la puissance active  $P_{sh}^* \approx 0$  représentant les pertes joules dans le circuit continu et des interrupteurs dans l'onduleur. [16][22]

Ces puissances qui sont les images des courants ( $I_{shd}$ ,  $I_{shq}$ ) active et réactive qu'on déterminer depuis le système d'équation suivant écrit dans le référentiel tournant au synchronisme (d, q) :

$$\begin{bmatrix} I_{shd}^* \\ I_{shq}^* \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \frac{1}{V_d^2 + V_q^2} \begin{bmatrix} V_d & -V_q \\ V_q & V_d \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_{sh}^* \\ Q_{sh}^* \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

Où les tensions  $V_d$  et  $V_q$  sont les tensions du jeu de barre.

$$Q_{sh}^{ref} = \frac{V_s * \Delta V}{X}$$

Avec  $Q_{sh}^{ref}$  : puissance réactive de référence demandée à injectée par le STATCOM. Nous pouvons résumer la méthode d'identification des courants de référence par l'algorithme de la figure (II.10) suivante:

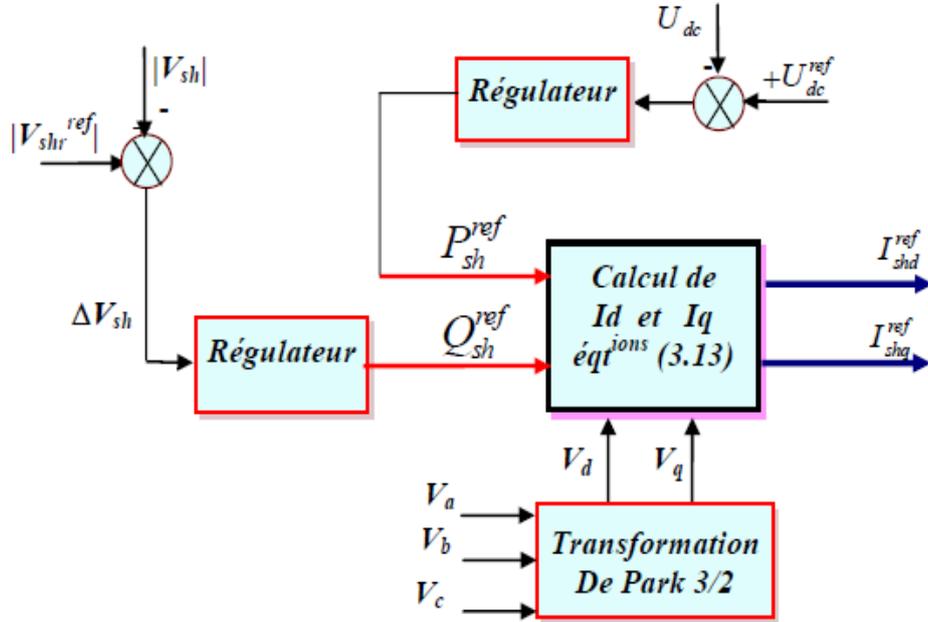


Fig II.10. Identification des courants de référence.

**II.6. Méthode Watt Var découplée. [16] [18] [22]**

Considérant le modelé simplifié représenté par le système d'équation (2.11) précédent:

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

Sur le vecteur de commande on effectue le changement de variable suivant :

$$\frac{1}{L_{sh}} \begin{bmatrix} V_d - V_{shd} \\ V_q - V_{shq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} \tag{2.22}$$

Avec  $X_1 = \frac{1}{L_{sh}} (V_d - V_{shd})$  et  $X_2 = \frac{1}{L_{sh}} (V_q - V_{shq})$  les nouvelles grandeurs de commande.

A partir de la première équation du système (2.12), on aura :

$$\frac{dI_{shd}}{dt} = -\frac{R_{sh}}{L_{sh}} I_{shd} + \omega \cdot I_{shq} + X_1$$

On appliquant la transformation de Laplace sur cette équation, on obtient :

$$\left(s + \frac{R_{sh}}{L_{sh}}\right) I_{shd} = \omega \cdot I_{shq} + X_1 = \tilde{X}_1$$

D'où on arrive au transfert de  $I_{shd}$  en fonction de  $\tilde{X}_1$  :

$$\frac{I_{shd}}{\tilde{X}_1} = \frac{1}{s + \frac{R_{sh}}{L_{sh}}} \tag{2.23}$$

Notre commande en réalité est  $X_1$  et comme  $\tilde{X}_1 = \omega \cdot I_{shq} + X_1$ . On doit donc ajouter le terme  $\omega \cdot I_{shq}$  pour retrouver  $\tilde{X}_1$  à l'entrée de ce transfert comme l'indique le schéma de la figure II.11.

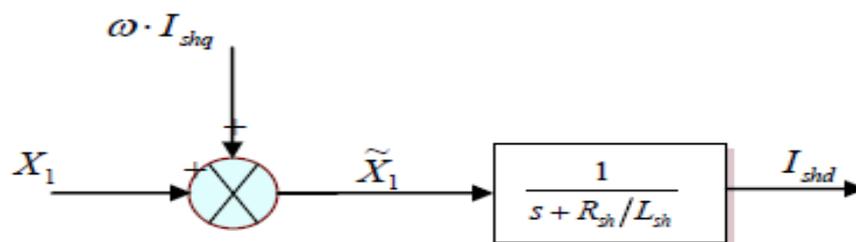


Fig II.11. Le transfert  $I_{shd}$  en fonction de  $X_1$

De la même manière en prenant la deuxième équation du modèle précédent on trouve le transfert  $I_{shq}$  en fonction de  $\tilde{X}_2$  qui suit :

$$\frac{I_{shq}}{\tilde{X}_2} = \frac{1}{s + \frac{R_{sh}}{L_{sh}}} \tag{2.24}$$

Avec  $\tilde{X}_2 = \omega \cdot I_{shq} + X_2$

Le schéma suivant résume ce transfert:

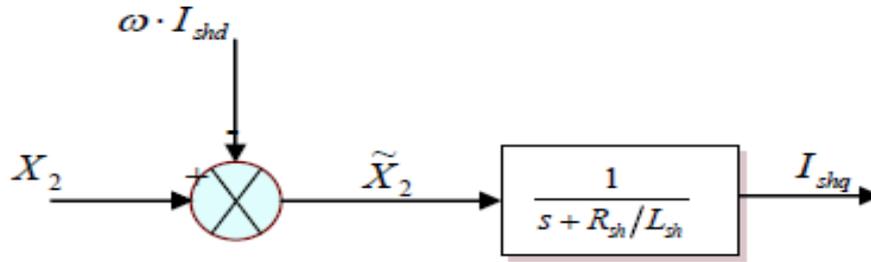


Fig II.12. Le transfert  $I_{shq}$  en fonction de  $X_2$

De ce qu'on vient de voir on constate qu'il y a un couplage naturelle dans les transferts des courants  $I_{shd}$  et  $I_{shq}$ , pour éliminer ce couplage on utilise la méthode de compensation et avec des régulateurs PI on peut contrôler les courants de sortie du STATCOM et suivent leurs consignes  $I_{shd}$  et  $I_{shq}$  comme le représente le schéma bloc de la figure (II 13).

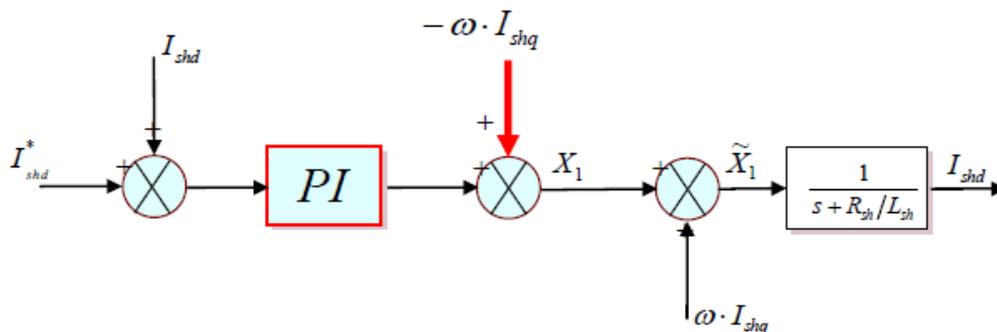


Fig II.13. Régulation et découplage de  $I_{shd}$ .

De la même pour le courant réactif on doit ajouter la composante  $\omega \cdot I_{shd}$  et finalement arriver au schéma de régulation du STATCOM par la méthode Watt-Var découplée de la figure (II.14) suivante:

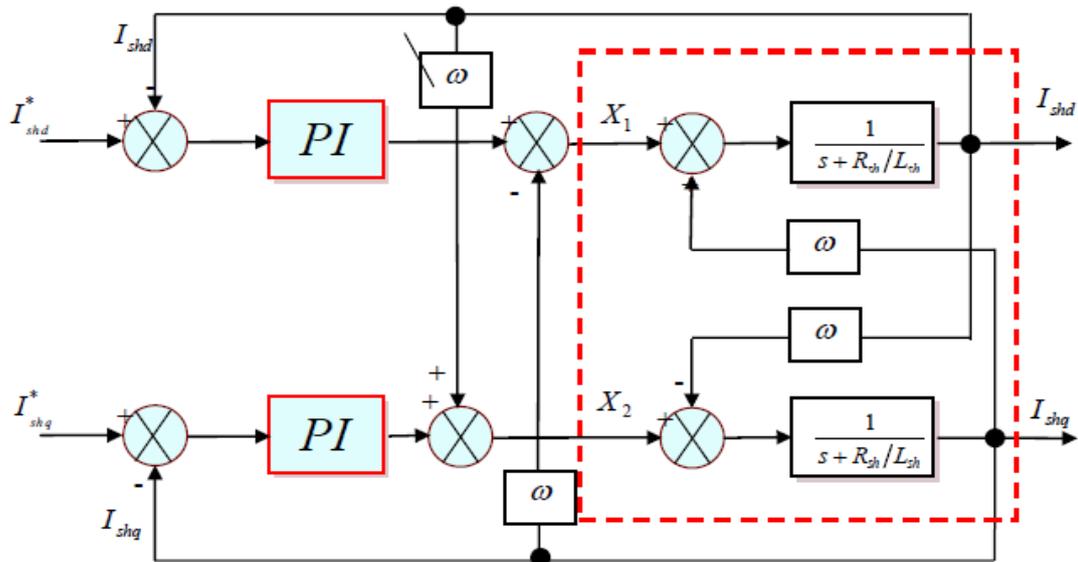


Fig II.14. Schéma de Régulation du Statcom (Watt-Var découplée)

## II.7. Régulateur PI avec compensation de pôles

L'objectif de la régulation est de contrôler le courant à la sortie du STATCOM. La mise au point d'un régulateur doit prendre en compte les critères suivants :

- la bande passante du régulateur doit être assez large afin de ne pas introduire un retard important.
- le fonctionnement de la régulation ne doit pas être perturbé par les harmoniques dus aux découpages de l'onduleur. Ces harmoniques doivent être atténués à la sortie du régulateur.

Il existe certains nombre de régulateur de STATCOM, on peut citer :

- régulateur proportionnel.
- régulateur PI avec compensation de pôle.
- régulateur PI sans compensation de pôle.
- régulateur IP.
- régulateur RST.

En général pour la méthode "Watt-Var découplé" Nous choisissons le régulateur PI avec compensation de pôle parce qu'il assure une bonne régulation.

Nous avons utilisé pour la régulation des courants du STATCOM des régulateurs proportionnels intégraux (PI) comme le montre le schéma de la figure suivante Figure(II.15) :

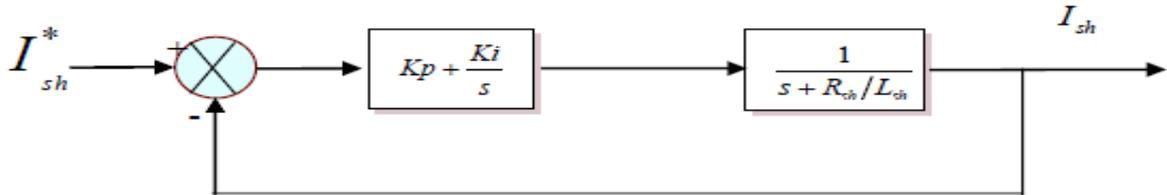


Fig II.15. Schéma bloc de la Régulation PI des courants du Statcom.

La fonction de transfert de cette régulation en boucle ouverte FTBO est:

$$G(s) = \left( Kp + \frac{Ki}{s} \right) \left( \frac{1}{s + R_{sh}/L_{sh}} \right) = Kp \left( \frac{s + Ki/Kp}{s} \right) \left( \frac{1}{s + R_{sh}/L_{sh}} \right)$$

Et par compensation du pôle on doit avoir :

$$\frac{K_i}{K_p} = \frac{R_{sh}}{L_{sh}} = \frac{1}{T_{BO}} \tag{2.25}$$

Et G(s) devient :  $G(s) = Kp \left( \frac{1}{s} \right)$

$T_{BO}$  Constante de temps en boucle ouverte. La fonction de transfert de la régulation précédente après compensation du pôle sera de la forme qui suit:

$$F(s) = \frac{G(s)}{1+G(s)} = \frac{K_p}{s+K_p} = \frac{1}{T_{BO}s+1}$$

$$T_{BF} = \frac{1}{K_p} \tag{2.26}$$

Avec  $T_{BO}$  est la constante de temps de la régulation en boucle fermée. En faisant un choix convenable du temps de réponse en boucle fermée (de l'ordre de 1/3 du temps de réponse en boucle ouverte) on déterminera à l'aide des équations (2.25 et 26) les gains du contrôleur PI.

$$K_p = \frac{1}{3} T_{BO} = \frac{1}{3} \frac{L_{sh}}{R_{sh}} \quad \text{et} \quad K_i = K_p * \frac{R_{sh}}{L_{sh}}$$

**II.8. 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 du STATCOM 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: [16] [18] [22]

$$P_{dc} = P_{sh} = \frac{1}{2} C \frac{dU_{dc}^2}{dt} \implies \frac{dU_{dc}^2}{dt} = \frac{2 * P_{sh}}{c} \tag{2.27}$$

En passant au domaine fréquentiel (Laplacien) on aura

$$\frac{U_{dc}^2}{P_{sh}} = \frac{2}{c * s} \tag{2.28}$$

Pour obtenir le signal  $P_{sh}$  nous avons le choix entre un régulateur proportionnel et un régulateur proportionnel intégral. Ce dernier est souvent préférable du fait qu'il permet d'annuler l'erreur statique. [16]

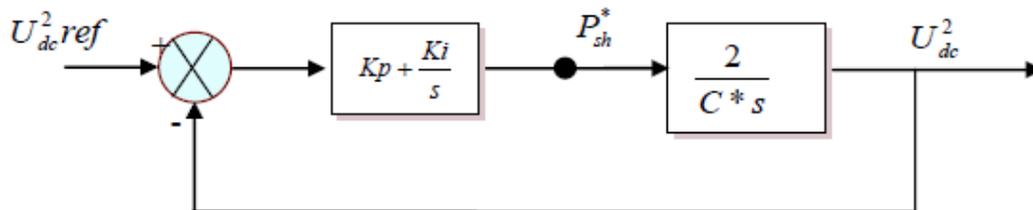


Fig II.16. Régulation de la tension continue.

La fonction de transfert en boucle fermée de ce système sous forme de Bode est :

$$F(s) = \frac{U_{dc}^2}{U_{dc-ref}^2} = \frac{\frac{2K_p s + 2K_i}{c}}{s^2 + \frac{2K_p}{c}s + \frac{2K_i}{c}} \quad (2.29)$$

$$\text{Avec : } \frac{2}{n} = \frac{2K_i}{c} \quad \text{et} \quad \zeta = K_p \cdot \sqrt{\frac{1}{2 \cdot c \cdot K_i}}$$

Alors on peut réécrire (2.29) de la façon suivante :

$$F(s) = \frac{U_{dc}^2}{U_{dc-ref}^2} = \frac{2\zeta_n \cdot s + \frac{2}{n}}{s^2 + 2\zeta_n s + \frac{2}{n}}$$

Et finalement on détermine à partir des équations (2.29) les valeurs des gains  $K_p$  et  $K_i$ .

## II.9. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la modélisation de contrôleurs « STATCOM » dans certaines fonctions de contrôle, la régulation de la tension par compensation de l'énergie réactive.

Nous avons présenté des modèles simples pour lesquels nous avons identifié les références de son système de commande.

La loi de commande utilisée pour ce contrôleur est 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 régulateur PI par compensation des pôles.

**Chapitre III:**  
***Simulations et Résultats***

### III.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à la simulation du STATCOM introduit dans un réseau simple. Cette simulation a été performée dans l'environnement «MATLAB/SIMULINK» et basée sur les lois de fonctionnement et de commande développées dans le chapitre précédent. Les résultats de simulations obtenus sont bien présentés et interprétés dans ce chapitre.

### III.2. Simulation du STATCOM

#### III.2.1. Description du réseau étudié

Le schéma unifilaire du réseau simple de transport d'énergie électrique utilisé pour valider le fonctionnement du Statcom est représenté par la figure (III.1).

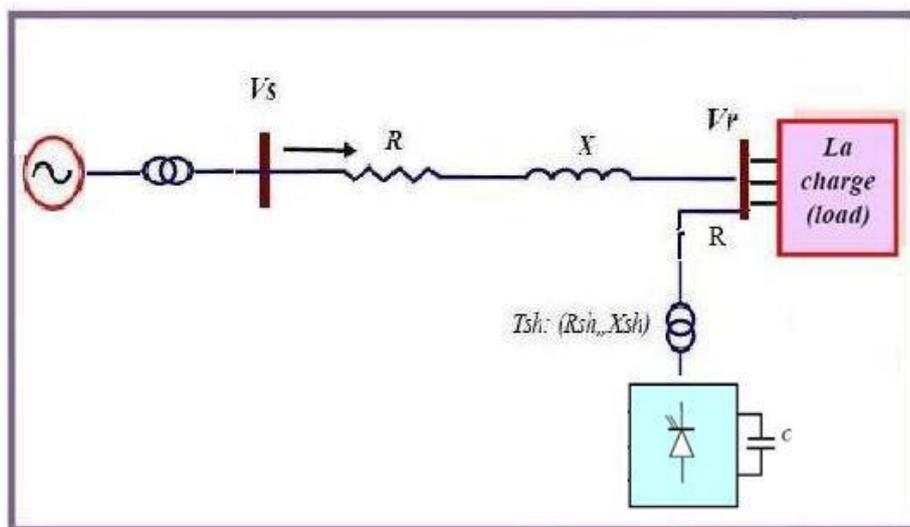


Fig III.1 Schéma unifilaire du réseau test étudié.

Le réseau est composé d'un générateur de 13KV, qui alimente une charge inductif ( $P=6*0.85MW$ ,  $Q=6*0.52MVAr$ ).

Le schéma équivalent du réseau étudié en grandeurs réduites réel est présenté par la figure (III.2) :

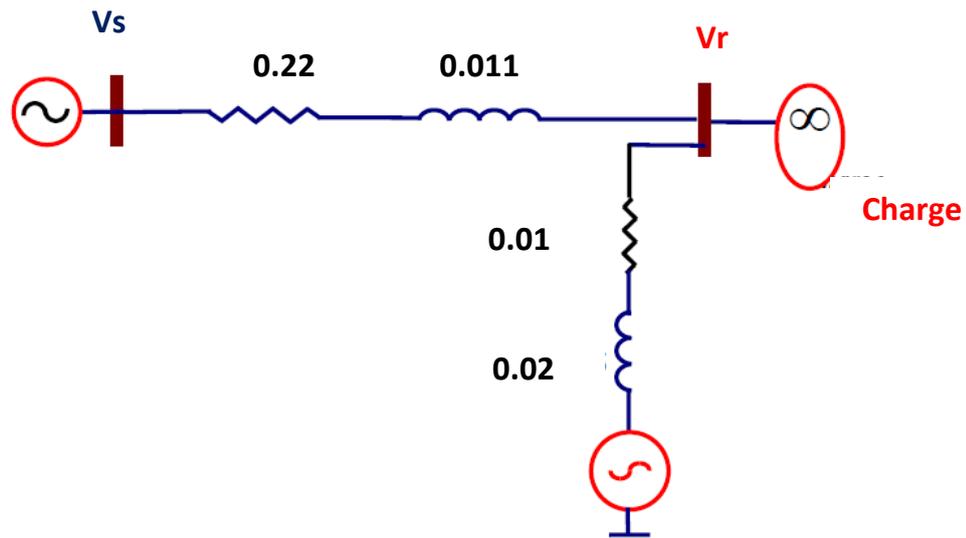


Fig III.2 Schéma équivalent du réseau en grandeurs réduites.

**III.3. Essais de simulation et résultats**

Il est noté que la tension du jeu de barre de générateur ( $V_s=13$  kV), et le condensateur est chargé initialement. Notre système fonctionne aussi à ( $t=0s$ ) à une charge inductive ( $S = 6MVA$ ) dans un état d'équilibre.

**III.3.1. résultats de simulation**

**a) Sans STATCOM**

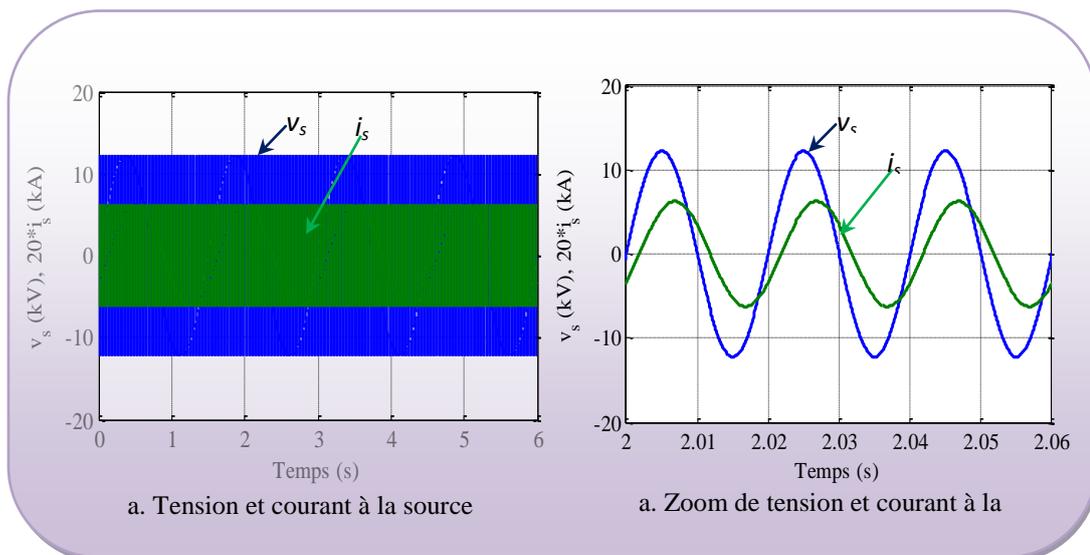


Fig III.3. Tension et courant de source ( $V_s, I_s$ ).

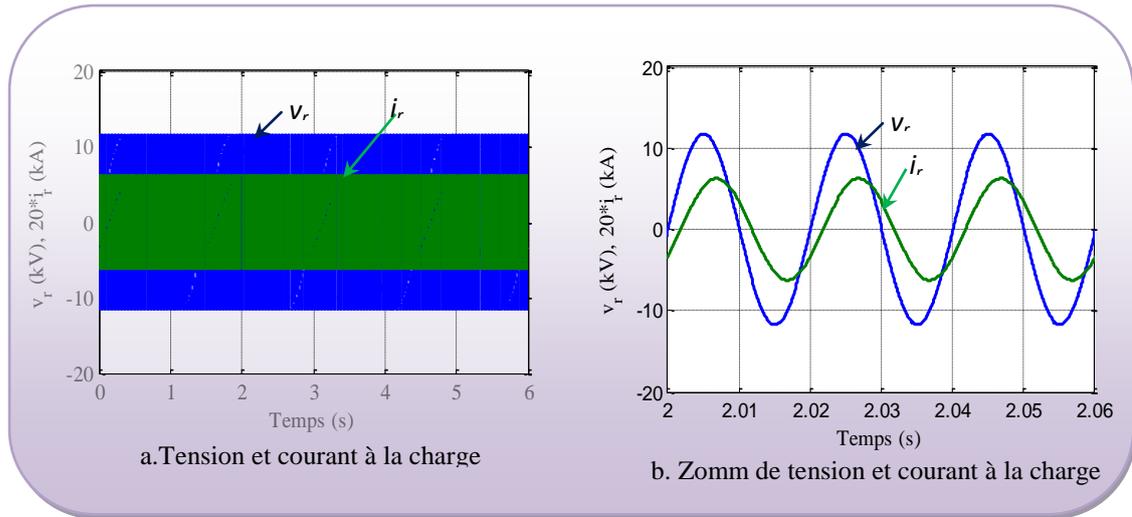


Fig III.4. Tension et courant de charge ( $V_r$ ,  $I_r$ ).

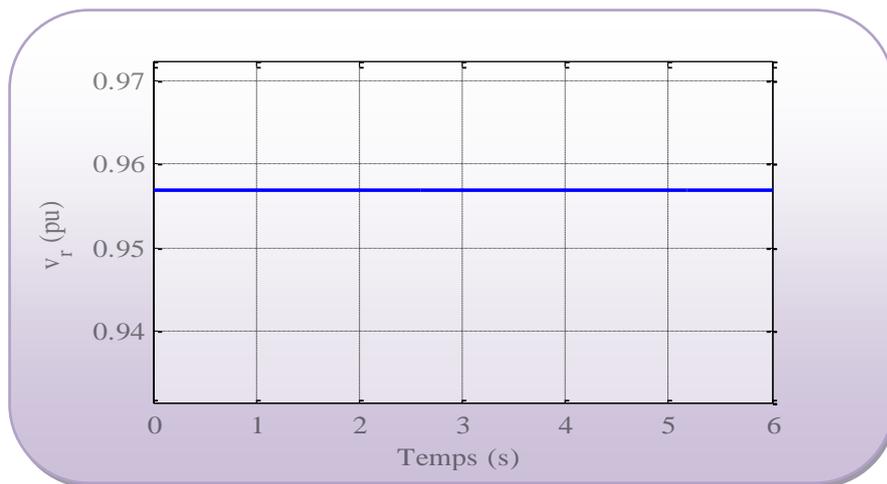


Fig.III.5. allure de la tension au nœud charge en (pu)

Les figures (III.3 et III.4) montrent les tensions et les courants dans la source et la charge respectivement, et d'après ces figures on voit une petite chute de tension au jeu de barre de la charge.

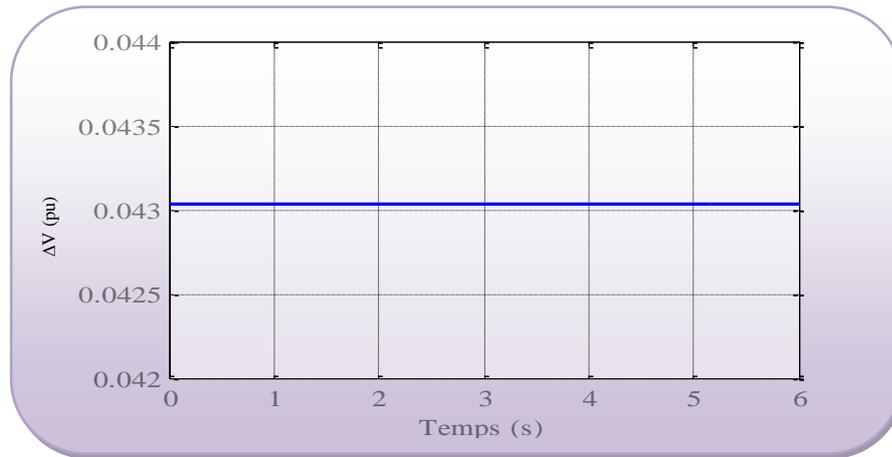


Fig III.6. Evolution des chutes de tension avant l'insertion du statcom

La différence entre la tension de source et celle de charge est représentée sur cette figure de chute de tension, une tension qui est dissipé dans la ligne de transport ( $\Delta V=4\%$  (pu)).

**b) Avec STATCOM**

Les résultats de simulation avec l'insertion de STATCOM sont discutés ci-dessous :

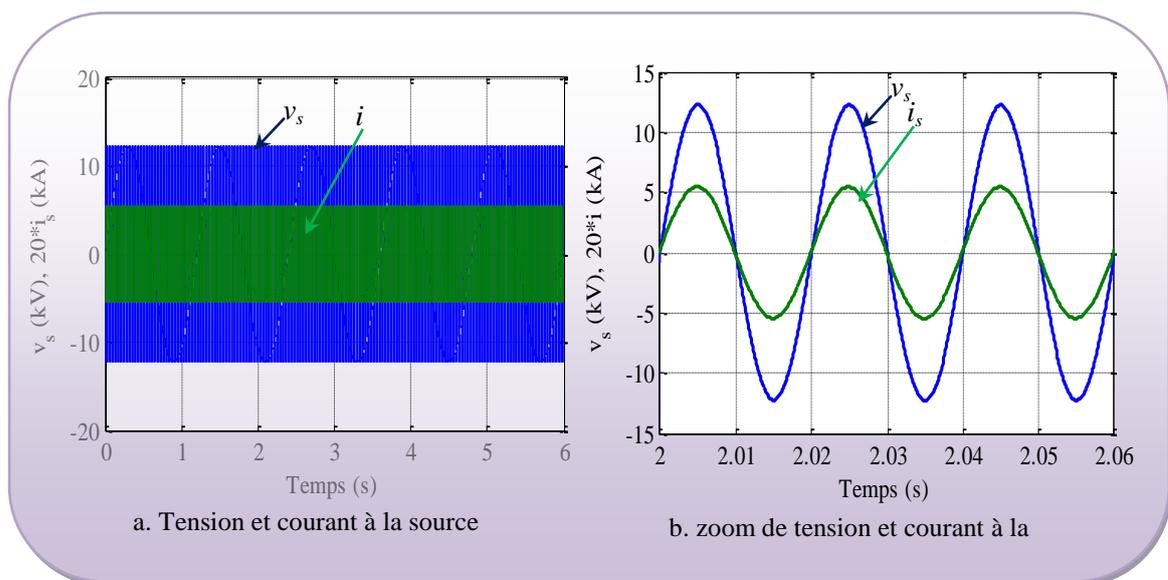


Fig III.7. Tension et courant de la source avec compensation.

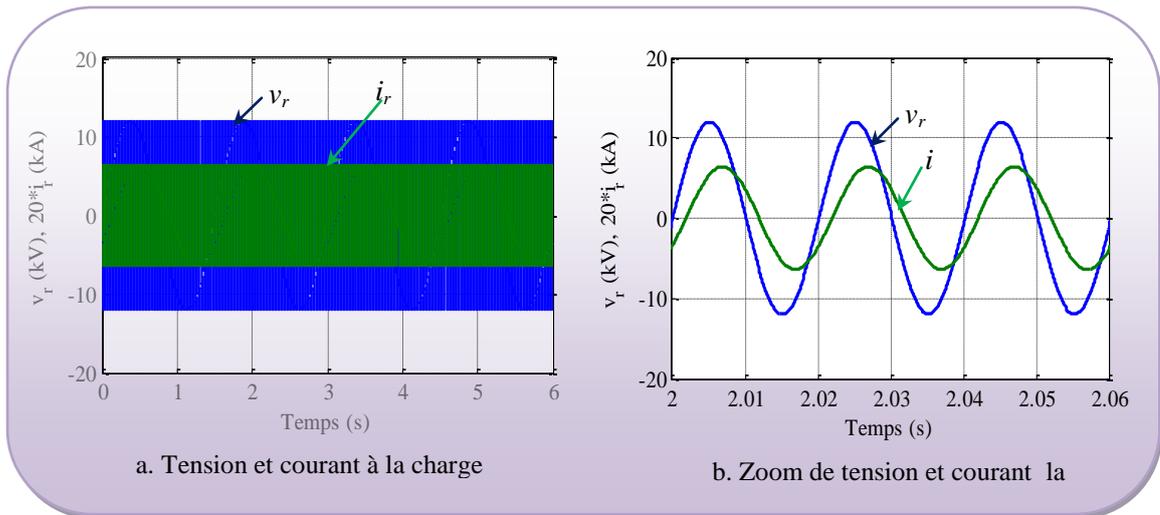


Fig III.8. Tension et courant de charge avec compensation

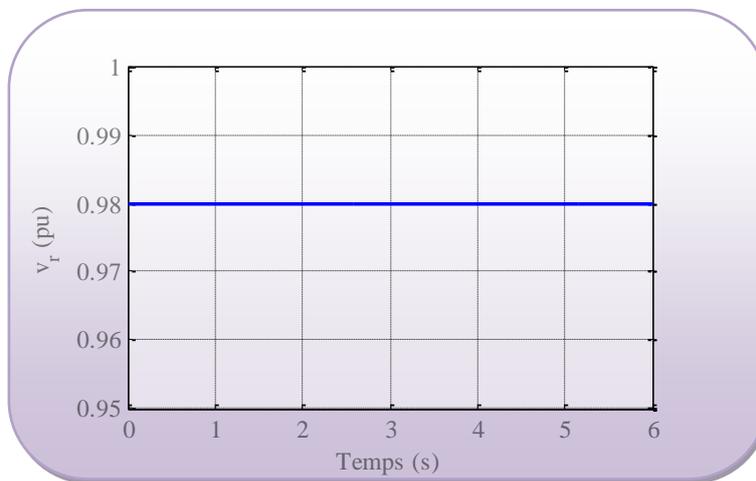


Fig III.9. Allure de la tension au nœud charge en (pu)

Ces deux figures (III.7 et 8) montrent l'effet de la compensation sur notre réseau, qui est l'amélioration au profile de tension, on voit que la tension de charge presque égale a tension de source. Ce qui explique la diminution de la chute de tension dans la ligne.

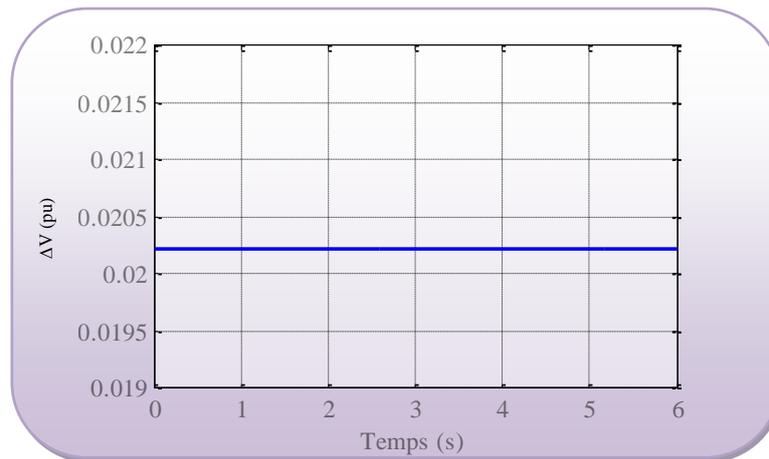


Fig.III.10. Evolution des chutes de tension après l'insertion du statcom

D'après cette figure (III.10) et celle sans compensation (fig.III.6), on voit la diminution de la chute de tension dans la ligne, de 4% au 2%, ce qui traduit l'effet de compensateur étudié.

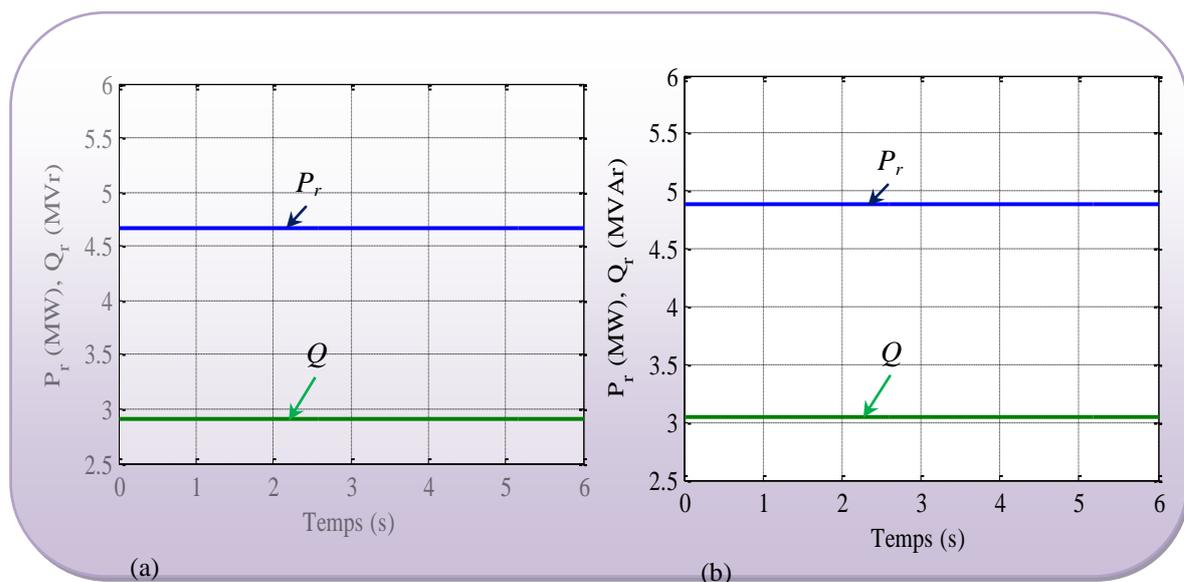


Fig III.11.puissance active et réactive de charge ( $P_r, Q_r$ ).

(a) sans compensation, (b) avec compensation

Il est visible que les puissances active et réactive transmises à la charge sont augmentées avec la compensation et améliorées au profil de tension.

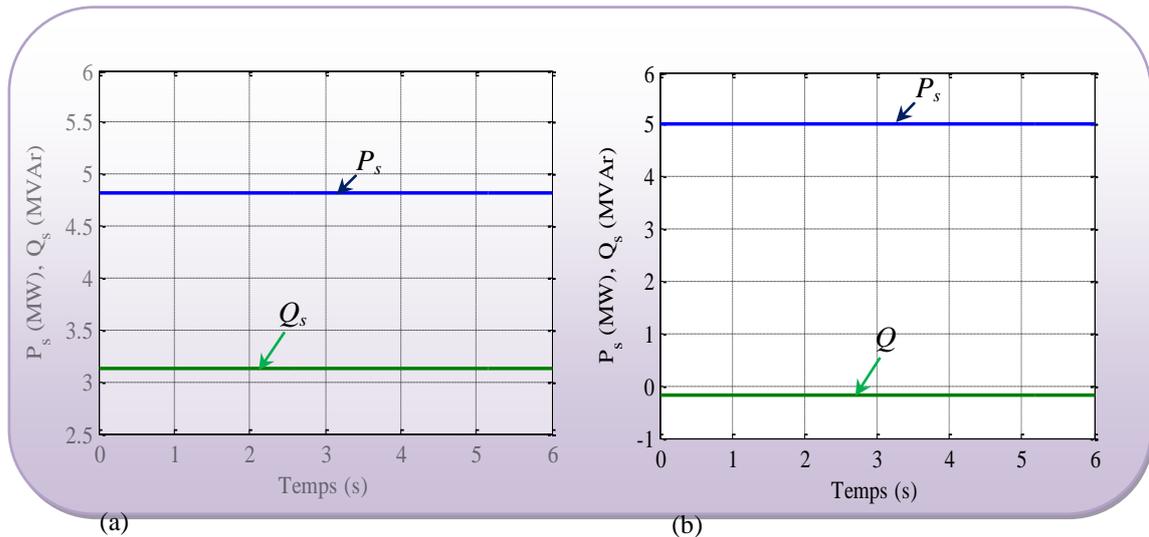


Fig III.12. Puissance active et réactive de la source ( $P_s$ ,  $Q_s$ )

(a) Sans compensation, (b) Avec compensation

L'effet de la compensation de l'énergie réactive qu'on voit clairement dans ces figures (III.12.a et b) ou notre source est soulagé avec la fourniture de moins de puissance réactive. La fourniture de l'énergie réactive au point de connexion permet un transit plus important de la puissance active dans la ligne de transport.

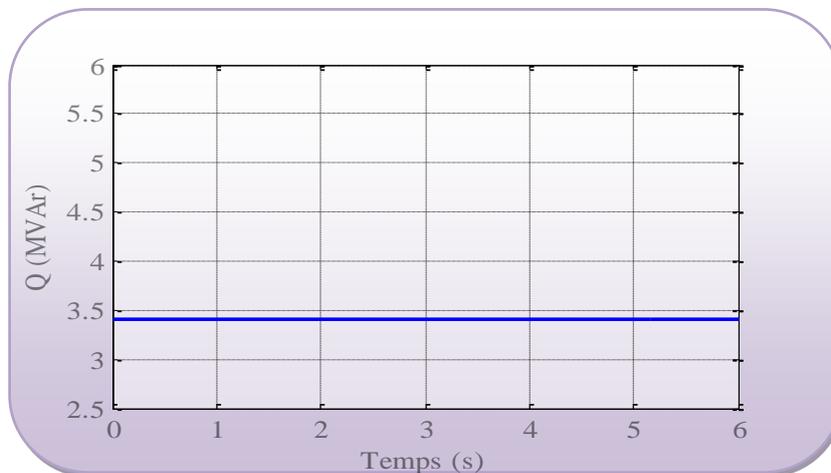


Fig.III.13. Puissance réactive injectée par le statcom

La diminution de la puissance réactive qu'on a vu dans la source après l'insertion de STATCOM est clairement visualisée sur cette figure (III.13), ou cette puissance est fournit par le STATCOM.

**III.4. Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons décrit notre réseau à étudier, ensuite nous avons fait des essais de simulation pour le STATCOM dans l'environnement MATLAB/SIMULINK. Les résultats obtenus sont bien illustrés et interprétés, et ils ont prouvé que la puissance réactive du réseau est optimisée et la tension au jeu de barre de réception est bien régulière, il a prouvé aussi la flexibilité, la sensibilité et la rapidité de ce dispositif FACTS utilisés.

D'après les résultats de simulation nous avons vu le potentiel de la méthode Watt-Var découplée dans la régulation de la puissance active et réactive à travers le contrôle des courants active et réactive correspondants. Le contrôle de ces derniers par des régulateurs proportionnel intégral a prouvé des résultats satisfaisants.

# *Conclusion Générale*

## *Conclusion générale*

Le développement de l'électronique de puissance a permis d'améliorer la gestion des réseaux électriques en introduisant un nouveau concept par les systèmes de transmission de l'énergie appelé FACTS, avec lesquels le contrôle du flux de puissance active et réactive, ainsi que l'augmentation des capacités de charge des lignes sont atteints et performés par l'injection des tensions (ou courant) des convertisseurs conçus avec des interrupteurs statiques modernes.

L'étude présentée dans ce mémoire s'inscrit dans ce concept et porte sur le contrôle de la tension par compensation shunt de l'énergie réactive avec un dispositif FACTS à base d'onduleur de tension.

Afin d'atteindre cet objectif, nous sommes passés par plusieurs étapes:

D'abord nous avons commencé dans le premier chapitre par une aperçue sur quelques principaux dispositifs, puis on a vu plus notre compensateur STATCOM, son fonctionnement, ses composantes, son rôle et avantages dans le réseau de transport d'énergie.

Le deuxième chapitre a fait l'objet d'une étude plus en détail sur le compensateur shunt STATCOM, son principe de fonctionnement, sa mise en équations et son action compensative sur le réseau, afin de mieux analyser et observer le comportement de ce dernier. La méthode de Watt-Var découplée a été adoptée comme stratégie de commande également pour le STATCOM.

Pour valider cette étude théorique, dans le dernier chapitre nous avons effectué plusieurs essais de simulations sur un STATCOM inséré dans une ligne de transmissions dans l'environnement Matlab-Simulink.

Les résultats de simulations obtenus vérifient l'efficacité de la stratégie de commande adoptée qui a permis un contrôle indépendant et découplé des puissances active et réactive de ce dispositif.

Les régulateurs Proportionnel Intégral utilisés pour la régulation des grandeurs de ce dispositif nous ont apportés des résultats satisfaisants en matière de temps de réponse et l'amortissement des dépassements.

Cette étude nous a permis de juger ce dispositif très avantageux pour les réseaux électriques en démontrant une flexibilité, dans le contrôle de la majorité des paramètres du réseau, basée sur la commande MLI des convertisseurs qui représente l'élément constitutif de base de ce dispositif.

L'augmentation des capacités de transport de l'énergie électrique aux limites thermiques des lignes représente une solution précieuse au problème de reconstitution de nouvelles lignes électriques confrontées par des contraintes environnementale, écologique et économique.

De plus que ces dispositifs n'échangent pas d'énergie active avec le réseau, leur compensation n'est pas faite par des condensateurs connectés directement au réseau ce qui élimine totalement le problème de résonance synchrone qui nuit le transport électrique.

Dans certaines applications, la tension ou le courant dans la ligne de transport sont déformés et contenant des harmoniques de hautes fréquences, par conséquent un filtrage approprié de la tension et du courant sera nécessaire pour mener à bien le fonctionnement de ces dispositifs, une telle étude peut être un autre champ de recherche qui complètera ce travail.

# ***BIBLIOGRAPHIE***

- 
- [1] E.S. Gholipour, « Apport de l'UPFC à L'amélioration De La Stabilité Transitoire Des Réseaux Electriques », Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, France, 2004.
- [2] S. Gerbex, « Métaheuristiques Appliquées du Placement Optimal de Dispositifs FACTS dans un Réseau Electrique », Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2003.
- [3] H. Glavitsch, and M. Rahmani, « Increased Transmission Capacity by Forced Symetrization ». IEEE PES Summer Meeting, Berlin, 1997.
- [4] Belacheheb K., *Contribution à l'étude des systèmes de compensation FACTS en général, UPFC en particulier, pour le contrôle du transit de puissance dans un réseau de transport*, Thèse de Doctorat de l'université de Henri Poincaré Nancy i, 21 Juin 2001.
- [5] Chow J. H., Sanchez-Gasca J. J., Ren H. and Wang S., “ Power System Damping Controller Design Using Multiple Input Signals”, *IEEE Control Systems Magazine*, August 2000, pp 82-90.
- [6] Mezaache Mohamed, « analyse et traitement de la qualité d'énergie électrique en utilisant des dispositifs de contrôle des réseaux électriques à UPFC dans le cas de stabilité de la tension », mémoire de magister, option réseaux électriques, université de Batna, soutenu le 24/11/2011.
- [7] Xiao-Ping Zhang, Christian Rehtanz, Bikash Pal, « Flexible AC Transmission systems : Modelling and Control », Springer 2005.
- [8] Amir H. Norouzi, « Flexible AC Transmission Systems : Theory, Control and Simulation of the STATCOM and SSSC », Thèse de magister de l'université de New Brunwick, 2003.

- [9] Abdelaàli ALIBI, « Contrôle des Réseaux Electriques par les Systèmes FACTS: (Flexible AC Transmission Systèmes) »Thèse de magister de l'université de Batna, 2009.
- [10] S. GERBEX, « Métaheuristiques appliquées au placement optimal de dispositifsFACTS dans un réseau électrique », Thèse de doctorat de l'Ecole Polytechnique Fédérale deLausanne, 2003.
- [11] N.G. Hingorani, and L. Gyugyi, «Understanding FACTS», IEEE Press.,New York, 2000.
- [12] Rabah Benabid, «Optimisation Multiobjectif de la Synthèse des FACTS par les Particules en Essaim pour le Contrôle de la Stabilité de Tension des Réseaux Electriques», mémoire de magister, option : Analyse, Conduite et Commande des réseaux électriques, université Amar Telidji, Laghouat, soutenu le 04/09/2007.
- [13] Electric Power / Controls, Static SynchronousCompensator (STATCOM) By the staff of Lab-Volt Ltd. Copyright © 2012 Lab-Volt Ltd.
- [14] Kartobi Lamia, «Optimisation de la Synthèse des FACTS par les Algorithmes Génétiques et les Essaims Particulaires pour le contrôle des Réseaux Electriques », mémoirede magistère, option réseaux électriques et haute tension, école nationale polytechnique Alger,Soutenue le 29 Novembre 2006.
- [15] Xia Jiang, "Operating Modes and Their Regulations of Voltage-sourced Converters Based FACTS Controllers", thèse de Doctorat de L'institut Polytechnique Troy New York, mars 2007.
- [16] Eskandar Gholipour Shahraki, "Apport de l'UPFC à l'amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques", thèse de doctorat, université de Henri Poincaré, Nancy 2003.

- [17] I. Papi , "Mathematical analysis of FACTS devices based on a voltage source converter, Part1: mathematical models", electric power systems research, Elsevier science 56 (2000) 139-148.
- [18] Nitus Voraphonpiput et Somchai Chatratana, "STATCOM analysis and controller design for power system voltage regulation", transmission and distribution conference & exhibition 2005 IEEE/PER.
- [19] Pranesh Rao, M.L.Crow, "STATCOM control for power system voltage control application", IEEE Transaction on power system, vol 15,no 4, October 2000.
- [20]Kalyan K. Sen, "SSSC - Static Synchronous Series Compensator: Theory,Modeling, and Application", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, No.1, January 1998.
- [21] Allaoui Tayeb, "r glage robuste de L'UPFC pour optimiser l'écoulement des puissance dans un réseau électrique", mémoire de magister, université Mohamed Boudiaf Oran – 04/2002.
- [22] Liming Liu, Pengcheng Zhu, Yong Kang, Jian Chen, "Design and dynamic performance analysis of unified power flow controller", publication IEEE 2005.

## *Liste des Symboles et Abréviations*

<b><i>FACTS</i></b>	Flexible alternatif curant transmission systems.
<b><i>IGBT</i></b>	Insulated Gate Bipolar Transistors.
<b><i>IGCT</i></b>	Insulated Gate Commutated Thyristors.
<b><i>SPS</i></b>	Static Phase Shifter.
<b><i>STATCOM</i></b>	Static Synchronous Compensator.
<b><i>SSSC</i></b>	Static Synchronous Series Compensator.
<b><i>DVR</i></b>	Dynamic Voltage Restorer.
<b><i>UPFC</i></b>	Unified Power Flow Controller.
<b><i>VSC</i></b>	Voltage Source Converter.
<b><i>MLI</i></b>	Modulation par largeur d'impulsion.
<b><i>PI</i></b>	Proportionnel Intégral (régulateur).
<b><i>V<sub>s</sub></i></b>	Tension du jeu de barre de génération (sending voltage).
<b><i>V<sub>r</sub></i></b>	Tension du jeu de barre de charge (receiving voltage).
<b><i>P<sub>s</sub></i></b>	Puissance active fournie par la source.
<b><i>Q<sub>s</sub></i></b>	Puissance réactive fournie par la source.
<b><i>P<sub>r</sub></i></b>	Puissance active demandée par la charge.
<b><i>Q<sub>r</sub></i></b>	Puissance réactive demandée par la charge.
<b><i>P<sub>l</sub></i></b>	Puissance active transportée par la ligne.
<b><i>Q<sub>l</sub></i></b>	Puissance réactive transportée par la ligne.
<b><i>Δ</i></b>	Angle de charge entre V <sub>s</sub> et V <sub>r</sub> .
<b><i>R</i></b>	Résistance de la ligne de transport.
<b><i>X</i></b>	réactance de la ligne de transport.
<b><i>Θ</i></b>	Déphasage du courant de al ligne.
<b><i>V<sub>sh</sub></i></b>	Tension (shunt) injectée par le STATCOM.
<b><i>I<sub>sh</sub></i></b>	Courant (shunt) injecté par le STATCOM.
<b><i>R<sub>sh</sub></i></b>	Résistance du transformateur de couplage shunt du STATCOM.

<b><i>Xsh</i></b>	Réactance du transformateur de couplage shunt du STATCOM.
<b><i>Psh</i></b>	Puissance active délivrée par le STATCOM.
<b><i>Qsh</i></b>	Puissance réactive délivrée par le STATCOM.
<b><i>Ise</i></b>	Courant (série) injecté par le STATCOM.
<b><i>Udc</i></b>	Tension continu aux bornes du condensateur.
<b><i>Idc</i></b>	Courant dans le circuit continu.
<b><i>d (indice)</i></b>	la composante sur l'axe d du repère d-q.
<b><i>q (indice)</i></b>	la composante sur l'axe q du repère d-q.
<b><i>pu (indice)</i></b>	la grandeur en unité relative (grandeur réduite).