



République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministre de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique



SAAD DAHLAB BLIDA -1-

**FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE DEPARTEMENT
DES SCIENCES DE LA TECHNOLOGIE**

Thème

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

Pour l'obtention du diplôme de MASTER

Domaine : Sciences techniques

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Machine électrique

COMPENSATION ENERGIE REACTIVE PAR STATCOM

Présenté par :

Encadré par :

- Tair oussama
- Ali Meziane

- Mr.belazzouge

Année universitaire 2021-2022

Remerciement

Je tiens à remercier tout d'abord Dieu le tout puissant qui nous a donnée durant toutes ces années la santé, le courage et la foi en nous même pour arriver à ce jour.

Vous remerciez chaleureusement l'encadreur Mr. BALAZZOUG pour son aide, son orientation, et son encouragement de notre projet de fin d'étude. Je remercie tous les personnes qui ont contribué de près ou loin à la réalisation de ce travail.

Dédicace

Je dédie ce travail

A toute ma famille.

A ma mère, mon père et mes frères.

A mon binôme Oussama et sa famille.

Et à mon copain de chambre, Karim.

A tous mes amis, Hamza, Souhaib, Halim, Abdou, Yanis, cherif.....

A tous ceux que J'aime..

ALI

Dédicace

Je dédie ce travail

A toute ma famille.

A ma mère, mon père Et à mon frère Youcef

A mon binôme Ali et sa famille.

A tous mes amis et tout notre promo

A tous ceux que J'aime..

OUSSAMA

Résumé

La nécessité d'améliorer la qualité de l'énergie fournie par le réseau est désormais un aspect très intéressant. Le développement de l'électronique de puissance a fait émerger les dispositifs FACTS qui peuvent jouer un rôle très important dans l'amélioration de la qualité de l'énergie. Ces appareils peuvent être placés en shunt (STATCOM), en série (SSSC) ou en série-shunt (UPFC). Une étude a été réalisée sur l'effet de ses trois types de FACTS sur le réseau en conditions statiques et dynamiques du point de vue de la régulation de tension. Les points mis en évidence sont l'efficacité des STATCOM, en termes de contrôle de la tension au nœud auquel ils sont connectés, ainsi que l'amélioration de l'énergie.

Abstract

The need to improve the quality of the energy supplied by the network is now a very interesting aspect. The development of power electronics has led to the emergence of FACTS devices, which can play a very important role in improving the quality of energy. These devices can be placed in shunt (STATCOM), in series (SSSC) or in series-shunt (UPFC). A study was carried out on the effect of its three types of FACTS on the network in static and dynamic conditions from the point of view of voltage regulation. Highlighted points are the efficiency of STATCOMs, in terms of controlling the voltage at the node to which they are connected, as well as improving energy.

ملخص

أصبحت الحاجة إلى تحسين جودة الطاقة التي توفرها الشبكة الآن جانباً مثيراً للاهتمام. أدى تطوير إلكترونيات الطاقة إلى ظهور أجهزة FACTS التي يمكن أن تلعب دوراً مهماً للغاية في تحسين جودة الطاقة. يمكن وضع هذه الأجهزة في تحويلية (STATCOM)، في سلسلة (SSSC) أو في تحويل متسلسل (UPFC). تم إجراء دراسة حول تأثير ثلاثة أنواع من FACTS على الشبكة في الظروف الثابتة والديناميكية من وجهة نظر تنظيم الجهد. النقاط البارزة هي كفاءة STATCOM، من حيث التحكم في الجهد في العقدة التي ترتبط بها، وكذلك تحسين الطاقة.

Table des matières

Table des matières

Introduction générale.

Chapitre I: GENERALITE SUR LES RESEAUX ELECTRIQUE ET LA COMPENSATION

I.1.Introduction	1
I.2 GENERALITE SUR LES RESEAUX ELECTRIQUE ET LA COMPENSATION	1
I.2.1 Le réseaux électrique	1
I.3 Structure du réseau électrique en Algérie	2
I.3.1 Réseaux d'utilisation	2
I.3.2 Réseaux de distribution	3
I.3.3 Réseaux de répartition	3
I.3.4 Réseaux de transport	4
I.4 Lignes aériennes	4
I.5 Conducteur	5
I.6 LA COMPENSATION	5
I.7 Les systèmes de compensation	6
I.7.1 compensation de shunt	8
I.7.2 Compensateurs séries :	9
I.7.3 TCSC (Thyristor Controlled Series Compensation)	9
I.7.4 Static Synchronous Series Compensator (SSSC)	10
I.8 CONCLUSSION	10
Chapitre II: Les dispositifs Facts	
II.1 introduction	12

II.2 Problématique d'insertion des FACTS	13
II.3 Classification des dispositifs FACTS :	13
II.4 Types de FACTS	15
II.4.1 FACTS série	15
II.4.2 Fact Série-Parallèle	17
II.4.2.1 hybrides (série-parallèle)	17
II.4.3 FACTS parallèle	18
II.5 Comparaison des FACTS les plus utilisés	22
II.6 Rôle des dispositifs FACTS	23
II.7 conclusion	24

Chapitre III: Modélisation du STATCOM

III.1 Introduction	26
III.2 Structure et constitution d'un STATCOM	27
III.3 Principe de Fonctionnement du STATCOM	28
III.4 Modelisation du SATATCOM	32
III.5 Modèle Mathématique du Circuit DC	35
III.6 Contrôle du STATCOM	36
III.7 Méthode Watt-Var découplée	37
III.8 Boucle de régulation des courants	38
III.9 Régulation de la tension continue U_{dc}	40
III.10 Conclusion	41

Chapitre IV: Résultats et simulation.

IV.1 Introduction	44
IV.2 Description du réseau étudié	44
IV.3 Essais de simulation et résultats	46
IV.4.1 EN MODE CAPACITIVE	48
IV.4 Conclusion	60
IV.5 Conclusion générale	61
Recommandations futures	62

Liste des figures

Chapitre I:

FIGURE I-1 SCHEMA D'UN RESEAU ELECTRIQUE.	1
FIGURE I.2 CENTRALES THERMIQUES.	2
FIGURE I.3 : RESEAUX PUBLIQUES.	3
FIGURE I.4 CONDUCTEUR DE HT.....	5
FIGURE I.5 : CONTROLE DES PUISSANCES DANS UN RESEAU ELECTRIQUE.	7
I.6 PRINCIPE DE LA COMPENSATION SHUNT.....	8
FIGURE I.7 A- STRUCTURE D'UN TCSC B-SCHEMA EQUIVALENT.....	9
FIGURE I.8 : SSSC (A) STRUCTURE DE BASE- (B) SCHEMA EQUIVALENT.....	10

Chapitre II:

FIGURE II.1 CLASSIFICATION DES DISPOSITIFS DE COMPENSATION FACTS	14
FIGURE II.2 CONFIGURATION DE LA COMPENSATION SERIE.....	15
FIGURE II.3 SCHEMA DU TCSC	16
FIGURE II.4 SCHEMA UNIFILAIRE D'UN SSSC ET DE SON SCHEMA FONCTIONNEL DE SYSTEME DE CONTROLE	17
FIGURE II.5 SCHEMA DE BASE D'UN UPFC	18
FIGURE II.6 REPRESENTATION D'UN SVC	19
FIGURE II.7 SCHEMA DE BASE D'UN STATCOM.....	20
FIGURE II.8 SCHEMA D'UNE PHASE STATCOM CONNECTE A UN RESEAU ELECTRIQUE.....	20
FIGURE II.9 VSC STATCOM DE BASE A 6 IMPULSIONS A DEUX NIVEAUX.	21
FIGURE II.10-SCHEMA EQUIVALENT D'UN TCR	21
FIGURE II.11 CONDENSATEUR COMMUTE PAR THYRISTORS: A) MONTAGE, B) COURANT ET TENSION DANS LE CONDENSATEUR	22

Chapitre III:

FIGURE-III.1 STRUCTURE DE BASE D'UN STATCOM COUPLE AU RESEAU.....	27
FIGURE III.2 STRUCTURE ET CONSTITUTION D'UN STATCOM.....	27
FIGURE III.3 SCHEMA EQUIVALENT DU STATCOM.....	28
FIGURE III.4 COURANT INDUCTIF.....	28
FIGURE III.5 COURANT CAPACITIF.....	28
FIGURE III.6 SCHEMA DU STATCOM COUPLE AU RESEAU ELECTRIQUE.....	29
FIGURE III.7 COURBES SIMULEES COURANT ET TENSION EN MODE INDUCTIF.....	31
FIGURE III.8 COURBES SIMULEES COURANT ET TENSION EN MODE CAPACITIF.....	31
FIGURE III.9 SCHEMA EQUIVALENT DU STATCOM CONNECTE AU MILIEU D'UNE LIGNE ELECTRIQUE.....	33
FIGURE III.10 RECONSTITUTION DES COURANTS I_d ET I_q	34
FIGURE III.11 FONCTION DE TRANSFERE DU STATCOM.....	38
FIGURE III.12 REGULATION EN PI DU COURANT.....	39
FIGURE III.13 BOUCLE DE REGULATION DU CIRCUIT CONTINU.....	40
FIGURE III.14 SCHEMA GLOBAL DE COMMANDE PAR LA METHODE WATT-VAR DECOUPLE DU STATCOM.....	41

Chapitre VI:

FIGURE: IV.1 ONDULEUR DE TENSION 400V IGBT.	46
FIGURE: IV.2 STRUCTURE COMPENSATION ENERGIE REACTIVE AVEC STATCOM.....	47
FIGURE: IV.3 LES COURANTS DE CHARGE ET L'ONDULEUR.....	48
FIGURE: IV.4 RESULTATS DE COMPENSATION CAPACITIF.....	49
FIGURE: IV.5 PUISSANCE ACTIVE ET REACTIVE DE L'ONDULEUR.....	49
FIGURE: IV.7 TENSION VDC AU BORNE DE CONDENSATEUR.....	50
FIGURE: IV.8 LES COURANTS DU STATCOM ET LA CHARGE.....	51
FIGURE: IV.9 RESULTAT DE COMPENSATION INDICATIF.....	51
FIGURE: IV.10 PUISSANCE ACTIVE ET REACTIVE DE L'ONDULEUR.....	52
FIGURE: IV.11 PUISSANCE ACTIVE ET REACTIVE DE LA SOURCE.....	52
FIGURE: IV.12 PUISSANCE ACTIVE ET REACTIVE DE LA CHARGE.....	53
FIGURE: IV.13 STRUCTURE DE RESEAU HT AVEC STATCOM.....	54
FIGURE: IV.14 STRUCTURE DU STATCOM.....	55
FIGURE VI.15 MODELE DE CONVERSION DE (AMPLITUDE ET ANGLE) EN TENSION ALTERNATIVE TRIPHASEE.....	56
FIGURE VI.16 REGULATEUR DE COURANT.....	56
FIGURE: IV.17 STATCOM EN TRAVAIL COMPENSATION AU BESOIN DE RESEAU.....	57
FIGURE: IV.18 TENSION AU BORNE DE CONDENSATEUR.....	57
FIGURE: IV.19 COURANT ET TENSION DU STATCOM.....	58
FIGURE VII.20 PUISSANCE ACTIVE ET REACTIVE DU STATCOM.....	59
FIGURE: IV.21 COURANT 'ID' ET 'IQ' REFERENTIELLE.....	60

Liste des abréviations

Liste des symboles et abréviations:

SVC	Static Var Compensator(Compensateur statique d'énergie réactive).
TSC	Thyristor swtched capacitor.
Fc	Fixed Capacitor.
Facts	Flexible alternative Current Transmission systems.
TCR	Thyristor controllrd reactor (réactances commandée par Thyristprs).
STATCOM	STATIC SYNCHRONOUS Compensator.
VSC	Voltage source converter.
HVDC	Hight voltage direct current.
GTO	Gate turn-off thyristor.
IGBT	Insulatud Gate BIpolar thuristor.
Vdc	Tension du circuit continu.
Vs	Tension de la source.
Vr	Tension d'arrivée.
Idc	le courant fournie par le convertisseur .
C	La capacité du condensateur.
Pdc	La puissance de condensateur.
TBo	La constante du temps en boucle ouvert.
TBf	Constante du temps en boucle fermé.
PI	Régulateur proportionnel intégrale.

V_a, V_b, V_c	Tension simple aux bornes de chaque phase.
X_P	Réactance de fuite du transformateur.
I_L	Courant passant dans la branche shunt.
d	Axes direct et en quadrature.
q	Axes en quadrature.
ω	Fréquence synchrone du système en (rd/sec).
Q_{comp}	Puissance réactive du STATCOM.
P_{comp}	puissance active du STATCOM.
V_L	tension de sortie du convertisseur de tension.
L_p	L'inductance de fuite du transformateur parallèle de couplage du STATCOM .

Introduction générale

L'industrie de l'énergie électrique est de plus confrontée à des problèmes liés à de nouvelles contraintes qui touchent différents aspects de la production, du transport et de la distribution de l'énergie. Dans de nombreux systèmes de puissance, c'est une tâche longue et difficile à construire de nouvelles lignes de transmission en raison des coûts et les questions environnementales. Une classe de dispositifs de contrôle basés sur l'électronique de puissance, connu sous le nom FACTS (Flexible AC Transmission System) apportent des solutions nouvelles pour faire face à ces contraintes. Ils permettent un meilleur contrôle et une meilleure gestion de l'écoulement de puissance. Ils ont aussi comme objectif d'augmenter la capacité de transmission de puissance des lignes en s'approchant des limites thermiques de celle-ci. Enfin ils devraient permettre d'améliorer la stabilité du réseau que ce soit pour des défaillances majeures dans le réseau ou pour éliminer l'effet d'oscillations parasites telles que la résonance sous synchrone.

Le dispositif FACTS utilisée ici le STATCOM qui connecté en parallèle présente plusieurs avantages comme la bonne réponse instantanément à faible tension par ce qu'il est capable de fournir son courant nominal même lorsque la tension est presque nulle.

Organisation

Afin de répondre aux objectifs cités ci-dessus, ce mémoire est organisé en quatre chapitres de la manière suivante :

Le 1er chapitre nous-allons aborder état de l'art Généralités sur les réseaux de transport d'énergie électrique, système de compensation.

Le 2eme chapitre généralité sur système FACTS STATCOM.

Le 3eme chapitre consacré à l'étude à la modélisation du STATCOM. Dans ce chapitre. Nous allons étudier le fonctionnement du static Synchronous Compensator STATCOM, et nous présentons les éléments qui constituent ces dispositifs. Différentes configurations de sont présentées.

Le 4eme chapitre, La dernière partie comprend la simulation du STATCOM

En utilisant le logiciel MATLAB(Simulink) approprié pour ces tâches. Puis on termine le chapitre avec des discussions comparatives des résultats trouvés. Enfin, présentera les conclusions et perspectives de cette mémoire

Objectif scientifique

Le développement rapide de l'électronique de puissance a eu un effet considérable dans l'amélioration des conditions de fonctionnement des réseaux électriques en permettant 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 Current Transmission System. 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 utilisées des lignes existantes semblables à des extensions dans ces dernières. Ces apports résultent de l'habileté de ces contrôleurs FACTS de contrôler les paramètres interdépendants qui gouvernent l'opération de transport de l'énergie électrique y compris l'impédance série, impédance shunt, 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.

Chapitre 01

**GENERALITE SUR LES RESEAUX
ELECTRIQUE ET LA COMPENSATION**

I.1.Introduction

La distribution et le transport de l'énergie électrique consiste une grande étude on doit parler centrales de production qui doit opère des tensions de ces bornes à l'utilisateur avec une certaine qualité et continuité de tension pour le fonctionnement sans défaut en oppose dans les heures de forte consommation ce dernier provoque de chute de tension ce qui s'impose des problèmes particuliers.

I.2 GENERALITE SUR LES RESEAUX ELECTRIQUE ET LA COMPENSATION

I.2.1 Le réseaux électrique

En général pour les réseaux électriques (transport et distribution) ont pour rôle d'acheminer l'énergie des sites de production vers les lieux des consommateurs, avec des étapes de diminution de niveau de tension dans les postes de transformation.

Les réseaux électriques ont pour fonction d'interconnecter le centre de production telle que les centrales hydraulique, thermique ...etc. avec les centres consommation (ville usine).

C'est un système d'éléments interconnectés qui est conçu:

- Conversion d'énergie mécanique (TURBIN en mouvement) en énergie électrique;
- Le transport de l'énergie électrique de longue distance;
- Distribution sous des formes spécifiques soumises à descontraintes bien déterminées;
- Consommateur de l'énergie électrique (charge);

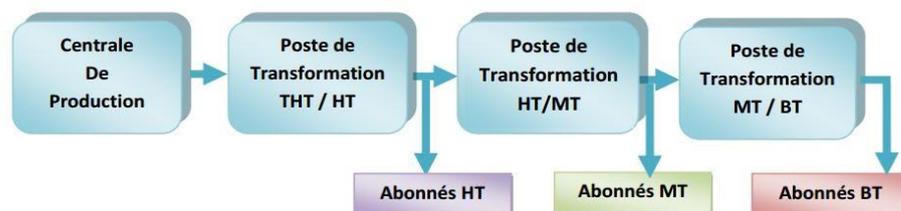


Figure I-1 schéma d'un réseau électrique.

Types de centrales électriques :

Il Ya 5 types de centrales électriques :

- Les centrales à combustibles fossiles (charbon - pétrole et gaz naturel) dites centrales thermiques classiques.
- Les centrales nucléaires qui sont également des centrales que l'on peut qualifier d'une façon thermique.
- Les centrales hydroélectriques.
- Les centrales solaires (photovoltaïques, thermique).
- Les centrales éoliennes.

En Algérie la centrale le plus utilisé pour la production générale de l'énergie électrique comme la figure ce dessus :

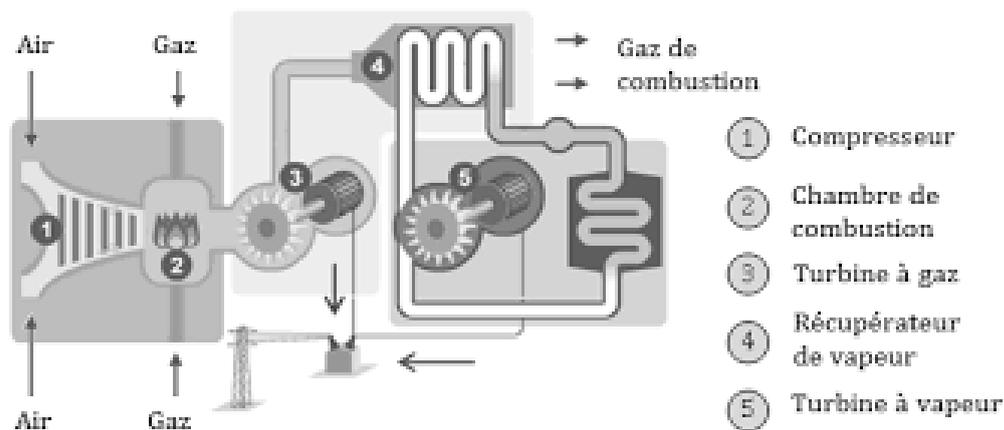


Figure I.2 centrales thermiques.

I.3 Structure du réseau électrique en Algérie

I.3.1 Réseaux d'utilisation

Sont les réseaux de basse tension (BT) qui fournit les maisons, par exemple l'éclairage public, les moteurs et les appareils domestiques. Ce type de réseau électrique doit présenter

une continuité de service permanente. Généralement la gamme de tension est de 220 volts à 380 volts [1].



Figure I.3 : réseaux publics.

I.3.2 Réseaux de distribution

Les réseaux de moyenne tension (MT) qui fournissent la puissance nécessaire à l'utilisation des 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. (En Algérie le niveau de tension de distribution de l'énergie est fixé à 10 kV) [1] d'autre part manière le réseau de distribution c'est aussi un réseau d'alimentation des consommateurs, mise à part les importantes installations industrielles qui sont très souvent alimentés directement par les réseaux THT et HT.

I.3.3 Réseaux de répartition

Ce sont les réseaux HT/MT qui fournissent les puissances nécessaires aux réseaux de distribution qui fait partie reliés entre eux (stable pour l'alimentation des points de livraison à la distribution), ils facilitent le secours mutuel entre régions. [1] Ces réseaux alimentent d'une part les réseaux de distribution à travers des postes de transformation HT/MT et, d'autre part, les

utilisateurs industriels dont la taille (supérieure à 60 MVA) nécessite un raccordement à cette tension [5].

I.3.4 Réseaux de transport

Ils assurent l'alimentation de l'ensemble du territoire national grâce à des transits de puissances importantes et de tensions qui sont de 60, 220, et 400 kV à très haute tension (THT) transportant l'énergie électrique produite dans les centrales de production couvrant ainsi de grands territoires et se rapprochant des gros consommateurs. Ces réseaux sont interconnectés, donc maillés, réalisant la mise en commun de l'ensemble des moyens de production à disposition de tous les consommateurs.

Le poste de transformation HTA/BTA constitue le dernier maillon de la chaîne de distribution et concerne tous les usages du courant électrique [5].

I.4 Lignes aériennes

Ils sont constitués de conducteurs nus en aluminium (souvent un alliage pour renforcer les propriétés mécaniques), parfois avec une âme en acier. Ces lignes constituent des circuits de transmissions des réseaux triphasés reliant le générateur aux charges.

La ligne de transmission électrique a quatre paramètres, à savoir la résistance, inductance, capacité et la conductance shunt. Ces derniers sont répartis uniformément sur toute la ligne. Chaque élément de ligne a sa propre valeur, et il est impossible de les concentrer en des points discrets sur la ligne. Pour cette raison, les paramètres des lignes sont connus en tant que paramètres distribués, mais peuvent être regroupées en vue de l'analyse sur base approximatives.

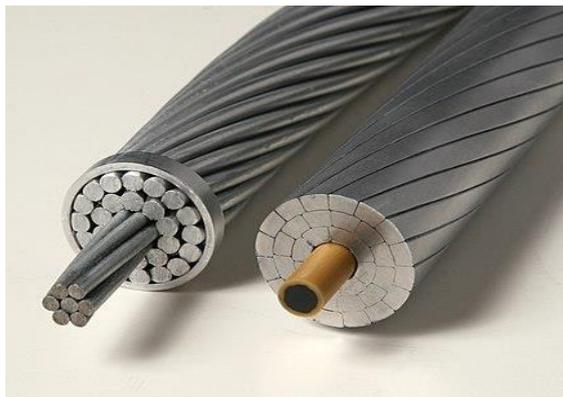
Pour ces paramètres conjointement avec le courant de charge et le facteur de puissance déterminent les performances électriques de la ligne. La performance à long terme comprend le calcul de l'envoi de la tension de la fin, l'envoi courant de la fin, l'envoi de facteur de puissance de la fin, la perte de puissance dans la ligne, l'efficacité de la transmission, la réglementation et les limites de débit de puissance pendant l'état d'équilibre et de l'état transitoire.

I.5 Conducteur

Ils existent trois types de conducteurs :

- Câblés sections (toronné)
- Massif
- Conducteurs creux

Conducteurs câblés (toronné) : Afin de donner aux conducteurs une souplesse suffisante, les câbles constitués habituellement de brins d'égale section circulaire disposé en couches spirales dont le sens est alterné d'une couche à la suivante autour d'un brin central rectiligne



FigureI.4 conducteur de HT

I.6 LA COMPENSATION

La compensation pour le réseau électrique a pour but de véhiculer de la puissance depuis la source jusqu'aux centres de consommation dans un réseau à courant alternatif. La puissance apparente S à deux composantes : la puissance P et la puissance Q liées par le déphasage.

$$S=P+jQ \qquad (I.1)$$

Généralement l'intervalle de tension entre deux extrémités d'une ligne est lié au transit de la puissance réactive consommée par la charge. Pour obtenir une tension identique (ou proche) aux deux bouts de la ligne, il faut donc pouvoir produire localement de la puissance réactive.

La répartition des moyens de production d'énergie réactive (alternateurs, bancs de condensateurs ou compensateurs statiques) à proximité des zones de consommation contribue donc à maintenir la tension constante sur le réseau. Il est à noter que les solutions peuvent reposer sur des moyens de compensation de puissance réactive statiques (bancs de condensateurs, bancs de bobines) ou dynamiques (alternateurs, FACTS) [2].

I.7 Les systèmes de compensation

Compensateurs de puissance réactive ont été appliquée dans les systèmes électrique pour augmenter la transmission de puissance en régime permanent en régulant la tension le long des lignes de transport.

Les systèmes de compensation sont utilisés aussi bien pour éviter l'injection au réseau des perturbations que pour protéger les sources sensibles face aux perturbations présentes sur le réseau.

La nouvelle génération de compensateurs s'appuie sur des dispositifs électroniques de puissance. Ils sont adaptés pour la compensation du puissance réactive rapide et plus robuste dans les systèmes électriques. Par conséquent, ils sont efficaces et dynamique contrôlable au temps réel du flux de la puissance dans les systèmes électriques. Ces compensateurs sont utilisés en série shunt ou mixte en les deux (hybride).

Les compensateurs shunt servent essentiellement à absorber les perturbations qui vient de diverses charges, évitant ainsi de perturber la tension de réseau. Si le compensateur est basé sur des éléments passifs commutés il peut servir à régler la tension au nœud de raccordement par l'absorption ou génération des courants réactifs. S'il est basé sur un onduleur de tension en plus de ces fonctionnalités, il peut également être utilisé filtre active car il peut faire office de source de courant contrôlée.

L'action principale d'un compensateur série basé sur des éléments passifs commutés est la modification de l'impédance de ligne, donc si le compensateur est basé sur un onduleur de tension il sert à compenser des perturbations agissant sur la tension d'alimentation de la charge par l'injection d'une tension en série avec la tension du réseau.

Afin de démontrer les principes de ce concept derrière le contrôle de débit de puissance considérons l'écoulement de la puissance réelle de la ligne de transport sans perte, le flux de puissance est fonction de la réactance de la ligne X , l'ampleur des productions et la qualité de la réception de fin (les tension V_1 , V_2 et l'angle de phase entre ces tensions φ).

Pour illustrer la façon dont l'impédance de la tension ou différence d'angle de phase peut être utilisé pour contrôler le flux de puissance, considérons le réseau de la figure ci-dessous. Le bloc à la fin de la ligne 1 représente un dispositif de contrôle de flux :

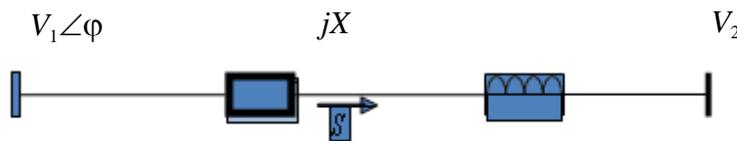


Figure I.5 : contrôle des puissances dans un réseau électrique.

La puissance a pour contrôlé le réseau comme suite :

$$P = \frac{V^2}{X} * \sin \varphi \quad (I.2)$$

$$Q = V^2/X * (1 - \cos \varphi) \quad (I.3)$$

D'ou :

$$P/P_{\max} = \sin \varphi \quad (I.4)$$

$$Q/P_{\max} = 1 - \cos \varphi \quad (I.5)$$

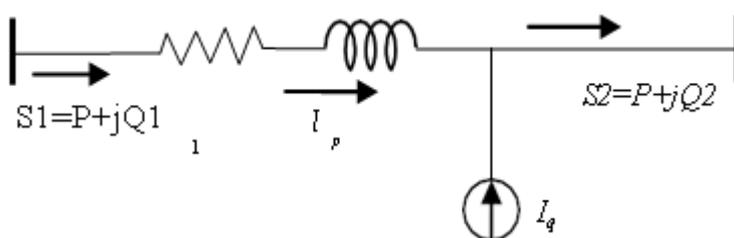
Ainsi, le débit naturel de la puissance réelle est déterminé par les rapports des réactances de ligne. En introduisant un dispositif de contrôle comme le montre la figure (I.5), les flux de puissance naturelle ci-dessus seront modifiés. Exemples d'utilisation de chacun des trois paramètres (X , V , φ) pour contrôler le flux de puissance [3].

I.7.1 compensation de shunt

Dans la compensation shunt 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. Leurs rôles principaux sont la compensation de la puissance réactive, et par conséquent contrôler la tension des nœuds.

Dans la compensation shunt les FACTS sont connectés parallèle avec la ligne de transmission du système électrique. Il fonctionne comme une source de courant contrôlable. Un courant réactif est injecté dans la ligne pour maintenir une amplitude de tension constante en faisant une variation à l'impédance du shunt. Par conséquent, la puissance active transmissible est augmentée mais au détriment de l'augmentation de la demande de puissance réactive il existe deux méthodes de compensation de shunt.

Le compensateur a déjà fait des preuves sous la forme d'une machine synchrone couplée au réseau et fonctionnant à vide. La puissance active alors consommée est uniquement liée aux pertes de la machine. Le réglage du transfert d'énergie réactive se fait par le biais de l'excitation de la machine.



I.6 principe de la compensation shunt.

La figure montre les principes théoriques et les effets de la compensation de puissance réactive dans un système de base à courant alternatif qui comporte une source V_1 , une ligne de

transport, et une charge inductive typique. Si la puissance réactive est fournie à proximité de la charge, le courant de la ligne est réduit au minimum, ce qui réduit les pertes d'énergie et l'alimentation de la régulation de tension aux borne de la charge.

En conséquence, la régulation de tension de système est améliorée et le composant courant réactif de la source est presque éliminé. Une source courant ou une source de tension peut être employé pour la compensation réactive de shunt.

I.7.2 Compensateurs séries :

La réactance des lignes est une des limitations principales de la transmission de courant alternatif dans les longues lignes. Pour remédier à ce problème, la compensation série capacitive a été introduite afin de réduire la partie réactive de l'impédance de la ligne. Les dispositifs FACTS de compensation série sont des évolutions des condensateurs série fixes.

Ils agissent généralement en insérant une tension capacitive sur la ligne de transport qui permet de compenser la chute de tension inductive.

Les compensateurs séries les plus utilisés sont :

I.7.3 TCSC (Thyristor Controlled Series Compensation)

TCSC (Thyristors Controlled Séries Condensateur) est un dispositif de compensation série à base d'électronique de puissance. Il est constitué d'une inductance en série avec un gradateur, l'ensemble monté en parallèle avec une capacité comme montre la figure (I.7). Connecte en série avec le réseau pour contrôler le flux de puissance et d'élever la capacité de transfert des

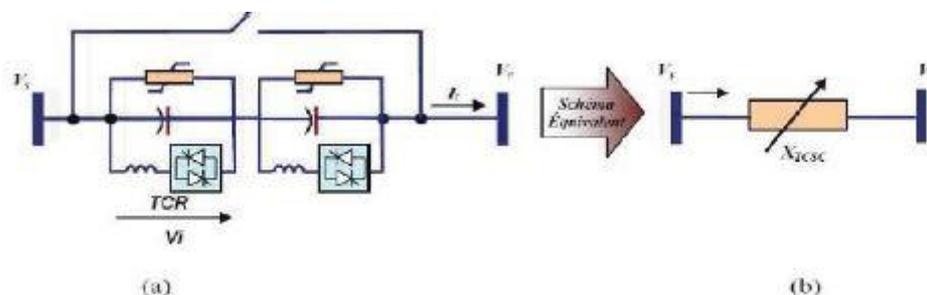


Figure I.7 a- structure d'un TCSC b-schéma équivalent.

lignes en agissant sur la réactance X_{TCSC} qui varie selon l'angle de retard à l'amorçage des thyristors α donné. Ce type de compensateur est apparu au milieu des années 80.

I.7.4 Static Synchronous Series Compensator (SSSC)

C'est l'un des plus importants dispositifs FACTS; similaire à un STATCOM mais avec une tension de sortie injectée en série dans la ligne, son schéma de principe est donné par la figure (1.8). Ce dispositif appelé aussi DVR (Dynamic Voltage Restorer) est utilisé généralement dans les réseaux de distribution afin de résoudre les problèmes de qualité d'énergie tel que les creux de tensions et maintenir ces dernières à des niveaux constants [4].

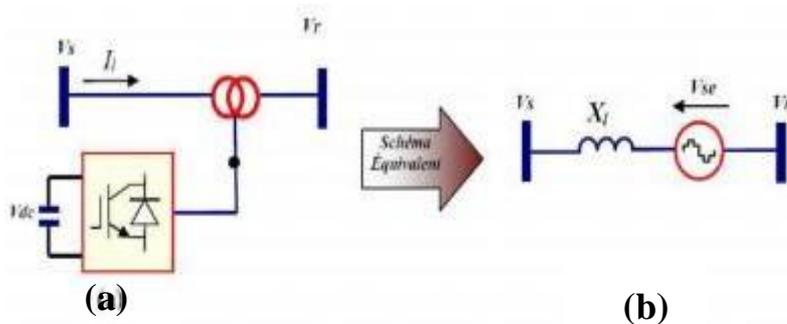


Figure I.8 : SSSC (a) structure de base- (b) schéma équivalent

I.8 CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons présenté une étude sur les différents types de la compensation (série, shunt et parallèle) appliqué au contrôle des réseaux électriques. Aussi dans cette étude nous avons donné des définitions pour les nouveaux dispositifs de contrôle et de commande des réseaux électriques s'appelent FACTS comme :

TCSC, TCSR, TCR, TSR, STATCOM, UPFCetc., d'après cette étude nous avons compris que cette famille moderne de FACTS est nécessaire à pour but de la stabilité dans le réseau.

Chapitre 02

**Les dispositifs
des systèmes**

FACTS

II.1 introduction

Depuis ce développement énorme de la technologie le monde besoin plus et plus d'énergie électrique au résultats des réseaux de transport d'énergie électrique sont actuellement de plus en plus sollicités. L'augmentation de la consommation due à l'industrialisation en est une des causes importantes. L'implantation de nouvelles lignes et centrales nécessite de résoudre le problème. Seulement, les contraintes politiques, économiques et écologiques produisent difficiles l'obtention de permis de construire. De plus, la construction et la mise en service de nouvelles installations peuvent prendre plusieurs années. Avec ces contraintes, la localisation géographique des nouvelles centrales ne correspondra pas aux besoins d'énergie. Par ailleurs, la consommation d'énergie est en augmentation constante, tout en étant géographiquement et temporairement irrégulière. Pour satisfaire cette consommation, les échanges internationaux de puissances sont intéressants, ce qui demande une interconnexion de systèmes différents. Ainsi, l'augmentation du maillage d'un réseau favorise des boucles de puissance et des lignes en parallèle, par contre la surcharge de certaines lignes engendrent la dégradation du profil de tension et diminution de la stabilité du réseau. la résolution moderne a le besoin aujourd'hui les système FACTS peuvent être :

- Les compensateurs d'énergie réactive qui soutiennent la tension du réseau au point de connexion en contrôlant le flux de la puissance réactive.
- Les condensateurs séries réglables qui modifient l'impédance de la ligne et permettent alors de contrôler la puissance qui transite sur celle-ci.
- Les déphaseurs qui modifient la puissance transmise sur une ligne en changeant la phase de la tension à un nœud donné.
- Les limiteurs de courant de défaut qui insèrent des éléments résistifs en cas de court-circuit.
- Les freins dynamiques: les machines génératrices du réseau peuvent perdre leur synchronisme à la suite de divers problèmes, les freins dynamiques réduisent alors la perte de synchronisme.
- Les amortisseurs de résonance subsynchrone : ces dispositifs amortissent les oscillations de puissances dans le réseau. Ces fréquences sont très inférieures à la fréquence nominale du réseau.

II.2 Problématique d'insertion des FACTS

Le développement a contribué à une augmentation de la consommation de l'énergie électrique, qui a pour conséquence, un accroissement de la production et transport de l'énergie électrique aux consommateurs. Par conséquent, les réseaux électriques deviennent plus en plus larges et complexes. L'intérêt de la recherche est de trouver des moyens d'exploitation efficaces et économique pour assurer la sécurité et le fonctionnement de réseaux électriques, la solution de ces problèmes est d'améliorer le contrôle des systèmes électriques. Les équipements proposés dans cette thèse, qui permettent ce contrôle et améliore les réseaux sont les dispositifs FACTS « Flexible Alternating Current Transmission System ». Le dispositif FACTS est un équipement d'électronique de puissance d'appoint utilisé pour contrôler la répartition des charges dans le réseau en améliorant ainsi la capacité de transit et en réduisant les pertes, pour contrôler la tension en un point ou assurer la stabilité dynamique des réseaux de transmission d'électricité et des groupes de productions qui y sont connectés. Il peut également filtrer certaines harmoniques et donc améliorer la qualité de l'électricité. L'emplacement optimal de dispositif FACTS est très important d'un point de vue économique et technique, il y a plusieurs méthodes et critères qui sont utilisés dans l'endroit optimal des concepts FACTS. Ces méthodes peuvent être classiques basés sur des analyses de sensibilité ou intelligents basés sur les méthodes heuristiques comme l'algorithme génétiques. Dans notre travail nous avons utilisé le facteur de base sur l'analyse de sensibilité pour l'emplacement optimal de dispositif FACTS.

II.3 Classification des dispositifs FACTS :

Les dispositifs FACTS peuvent être classés en trois types, série, parallèle, hybride (série - parallèle ; série- série), figure II.1

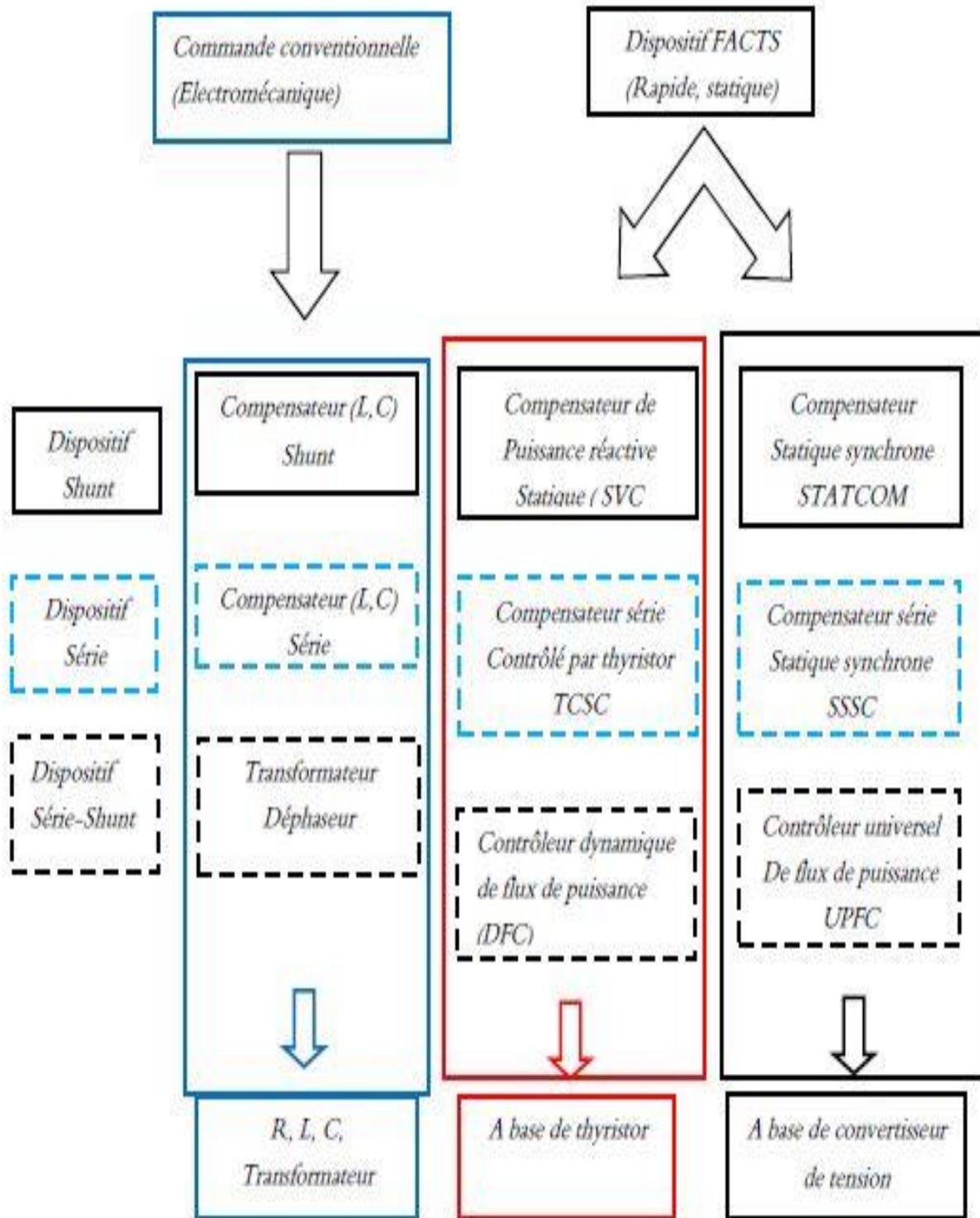


Figure II.1 classification des dispositifs de compensation FACTS

II.4 Types de FACTS

Les FACTS sont comme suit :

- FACTS parallèles
- FACTS série
- FACTS hybrides (série-parallèle).

Ces catégories peuvent aussi être décomposées en deux types selon la technologie d'électronique de puissance utilisée.

- Le premier type est à base de thyristors (SVC, TCSC)
- Le deuxième type est à base de thyristors GTO (STATCOM, SSSC, UPFC).

II.4.1 FACTS série

Ce type de FACTS peut être utilisé comme source de tension variable ou impédance inductive ou capacitive variable. Celle-ci insérée dans la ligne de transport peut modifier l'impédance de la liaison du réseau. La figure (II.2) montre la configuration d'une compensation série. X_L est la réactance de la ligne et V_s la tension injectée par le compensateur V_s Chapitre I Technologie des éoliennes et Systèmes flexibles de transmission à courant alternatif La tension V_s générée par le compensateur maintient la tension V' constante et sinusoïdale aux bornes de la charge.

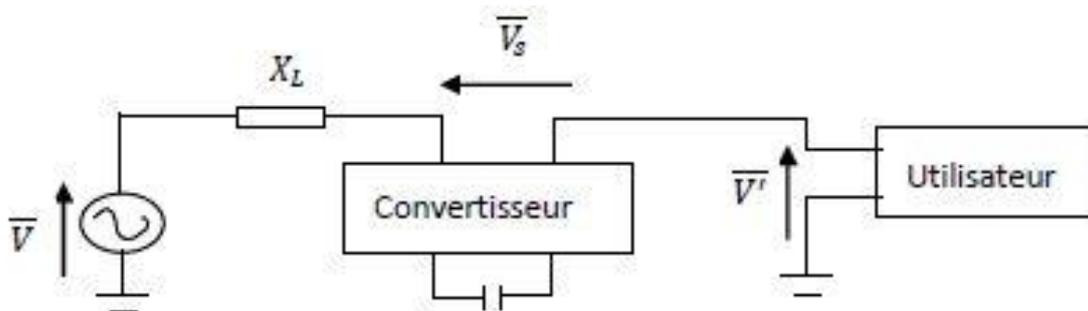


Figure II.2 configuration de la compensation série

II.4.1.1 TCSC (Thyristor controlled Serie Capacitor)

C'est un (Thyristor Controlled Series Capacitor) fait partie des condensateurs séries qui ont été utilisés avec succès pendant de nombreuses années pour améliorer la stabilité et les capacités de charge des réseaux de transport haute tension. La figure (II.3) donne sa configuration. Il fonctionne par l'insertion de la tension capacitive pour compenser la chute de tension inductive sur les lignes de transport [6].

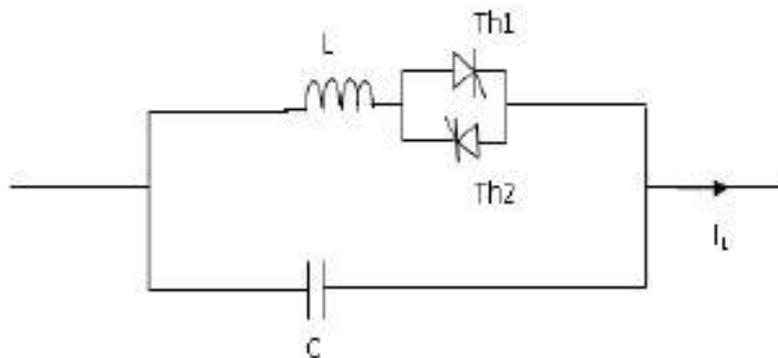


Figure II.3 schéma du TCSC

II.4.1.2 Le SSSC (Static Synchronous Series Compensator)

Le compensateur statique synchrone série (SSSC) est un dispositif série de la famille Flexible AC Transmission Systems (FACTS) utilisant l'électronique de puissance pour contrôler le flux de puissance et améliorer l'amortissement des oscillations de puissance sur les réseaux électriques [1]. Il est constitué d'un onduleur triphasé, autrement dit une source de tension, couplé en série avec la ligne électrique à l'aide d'un transformateur. Le SSSC injecte une tension V_s en série avec la ligne de transmission où il est connecté. Ainsi un SSSC peut faire varier à la fois la puissance active et réactive indépendamment du courant traversant la ligne électrique contrairement aux TCSC.

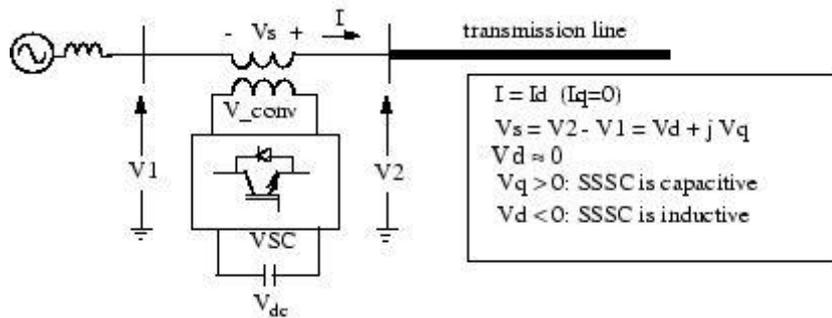


Figure II.4 schéma unifilaire d'un SSSC et de son schéma fonctionnel de système de contrôle

II.4.2 Fact Série-Parallèle

II.4.2.1 hybrides (série-parallèle)

II.4.2.1.1 UPFC (Unified Power Flow Controller)

L'UPFC utilise des dispositifs à semi-conducteurs, qui offrent une flexibilité fonctionnelle, généralement impossible à atteindre par les systèmes conventionnels contrôlés par thyristor. L'UPFC est une combinaison d'un compensateur synchrone statique (STATCOM) et d'un compensateur série synchrone statique (SSSC) couplés via une liaison de tension continue commune. [7]

La figure dessus s'illustre L'UPFC (Contrôleur de transit de puissance unifié) est constitué de deux onduleurs de tension triphasés, l'un est connecté en parallèle au réseau par l'intermédiaire d'un transformateur et l'autre est connecté en série à travers un deuxième transformateur. Les deux convertisseurs sont interconnectés par un bus continu représenté par le condensateur.

Le principe de l'UPFC consiste à dériver une partie du courant circulant dans l'aligne pour le réinjecter avec une. Le convertisseur (1), connecté en parallèle, a pour fonction de prélever la phase appropriée puissance active et de la délivrer au convertisseur série (2).

Ce dernier génère une tension UPQ, contrôlée en amplitude et en phase, qui est insérée dans la ligne.

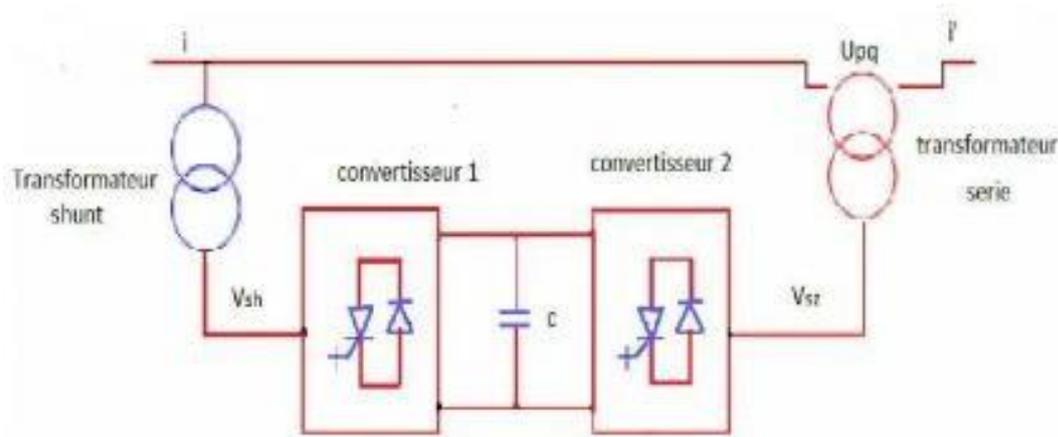


Figure II.5 schéma de base d'un UPFC

II.4.3 FACTS parallèle

Les systèmes de compensation conventionnels, tels que les bancs de condensateurs et les inductances actionnées mécaniquement, ont longtemps été utilisés pour augmenter le transit de puissance en régime permanent en contrôlant le profil de la tension le long des lignes de transport. Il a été prouvé que la stabilité transitoire ainsi que la stabilité en régime permanent d'un réseau électrique peuvent être améliorées si le dispositif de compensation peut réagir rapidement. Ceci est possible en utilisant les composants commandables tant à l'ouverture qu'à la fermeture tels que les thyristors GTO et les transistors IGBT [6].

II.4.3.1 SVC (STATIC VAR COMPENSATION)

Ces systèmes sont des dispositifs de compensation parallèle connectés en des points précis du système de transmission. Leur topologie est basée sur des convertisseurs de courant. Le SVC permet entre autres la connexion de charges éloignées des centres de production d'énergie électrique et la diminution des défauts ou des inconstances de charges.

Un SVC est généralement composé d'un ou plusieurs batteries de condensateurs fixes (CF) commutables soit par disjoncteur, ou bien par thyristors (TSC) et d'un banc de réactances contrôlable (TCR) et ou bien par des réactances commutables (TSR), mais toujours on trouve des filtres d'harmoniques.

Ce dispositif marque certains avantages comme suite :

- Augmente la capacité de puissance transmise dans les réseaux De transmission.
- Améliore la stabilité en régime permanent et transitoire.
- Amortie les oscillations de puissance.
- Compensation de puissance réactive.
- Minimise les pertes de puissance transmise.
- Régulation de la tension.
- SVC est basé sur des éléments capacitifs et inductifs;
- Pas d'élément rotatif;
- Le control fonctionnel à travers l'électronique de puissance.

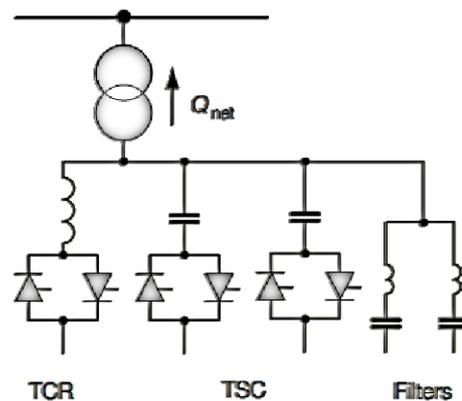


Figure II.6 représentation d'un SVC

II.4.3.2 STATCOM (Static Synchronous Compensator)

Le STATCOM est générateur de tension alternative triphasé synchrone avec la tension du réseau à partir d'une source de tension continue V_{dc} (base de travail comme un onduleur). L'amplitude de la tension du STATCOM peut être contrôlée afin d'ajuster la quantité de l'énergie réactive à échanger avec le réseau. Donc 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.9.

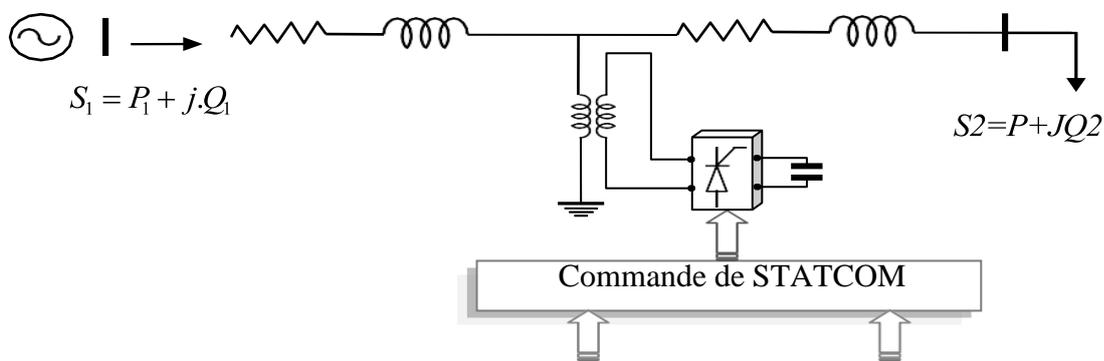


Figure II.7 schéma de base d'un STATCOM

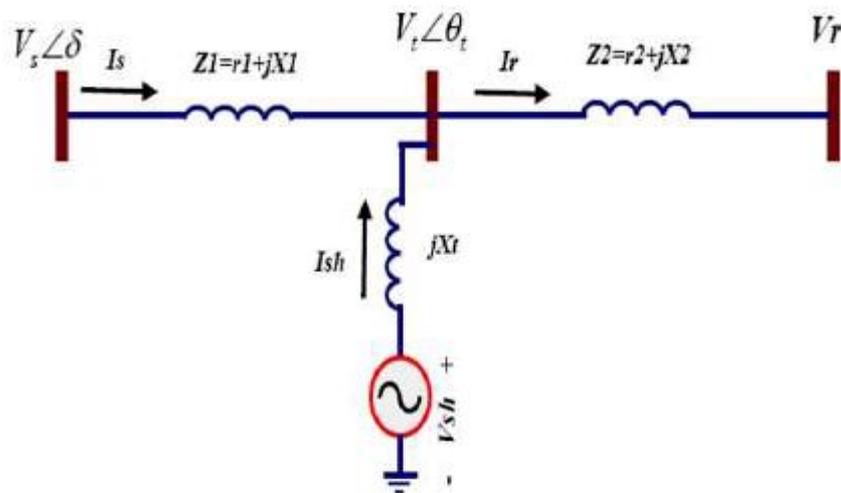


Figure II.8 schéma d'une phase STATCOM connecte à un réseau électrique

Le STATCOM est un compensateur statique synchrone. Il réalise une compensation de type parallèle. Il est constitué d'un convertisseur continu-alternatif à commutation forcée raccordé côté continu à un élément de stockage d'énergie : un condensateur C. La figure ci-dessus montre la structure du dispositif. Les cellules de commutation sont bidirectionnelles, formées de thyristors GTO ou IGBT et de diodes antiparallèles.

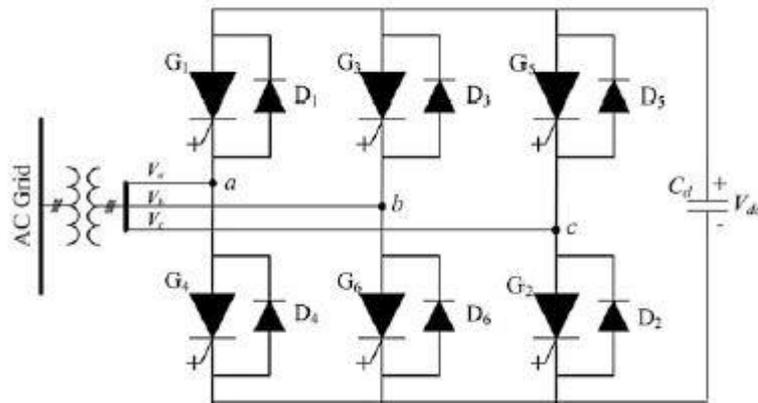


Figure II.9 VSC STATCOM de base a 6 impulsions à deux niveaux.

II.4.3.3 TCR (Thyristor Controlled Réactor)

C'est une inductance branchée en série avec une valve à thyristors bidirectionnelles. La valeur de l'inductance est continuellement changée par l'amorçage des thyristors. TCR est composé d'une impédance placée en série avec deux thyristors montés en antiparallèle. Un dispositif TCR seul n'est pas suffisant pour pouvoir compenser la puissance réactive dans un réseau, car il ne dispose pas de source de puissance réactive.

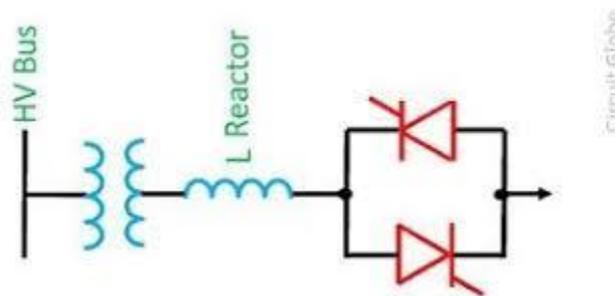


Figure II.10-schéma équivalent d'un TCR

II.4.3.4 TSC (Thyristor switched capacitor)

Ou CCT (Condensateurs Commandés par Thyristor) c'est une composition qui comprend un condensateur branché en série avec une gâchette thyristors bidirectionnelle et une inductance d'atténuation. Le fonctionnement du commutateur thyristors consiste à enclenchement et à permettre le condensateur pour un nombre entier de demi-cycle de la tension appliquée.

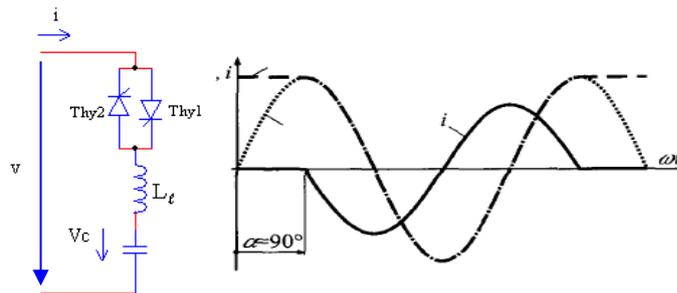


Figure II.11 condensateur commuté par thyristors: a) montage, b) courant et tension dans le condensateur

II.5 Comparaison des FACTS les plus utilisés

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

FACTS PERFORMANCE	SV	SVC	STATCOM	TCSC	SSSC	UPFC
TRANSIT DE PUISSANCE ACTIVE	+	+	+	+++	+++	+++
CONTROLE DE LA PUISSANCE REACTIVE	+++	+++	+++	/	/ \lt	+++
CONTRÔLE DE LA TENSION	+++	+++	+++	+	+	+++
CONTROLE DE L'ANGLE DE TRANSPORT	/	/	/	+++	+++	+++
CONTROLE DYNAMIQUE DE LA TENSION	/	++	+++	/	/	+++
STABILITÉ	/	++	+++	++	+++	+++
OSCILLATION DE PUISSANCE	/	++	+++	+++	+++	+++

Tableau II. 12 tableau récapitulatif des différences entre FACTS

II.6 Rôle des dispositifs FACTS

Le rôle des dispositifs FACTS dans un réseau électrique, permettent de remplir des fonctions tant en régime permanent qu'en régime transitoire, ils agissent généralement en absorbant ou en fournissant de puissance réactive, en contrôlant l'impédance des lignes ou modifiant les angles de tensions.

En régime permanent, les FACTS sont utilisés principalement dans les deux contextes suivants :

- Contrôle de la tension à un niveau acceptable en fournissant de la puissance réactive.
- Contrôle de transits de puissances de manière à réduire les surcharges dans les lignes et transformateurs, dans ce cas le contrôle se fait, par l'ajustement de la réactance de lignes ou le déphasage de tensions.

En régime dynamique, les dispositifs FACTS permettent de :

- Accroître la réserve de stabilité transitoire.
- Amortir les oscillations de puissance.
- Supporte de manière dynamique la tension.

II.7 conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié le besoin de compensation de puissance réactive et les différents dispositifs FACTS utilisés pour la compensation. Le principe de fonctionnement de STATCOM, TCR, SVC et TCSC a été décrit. Enfin la comparaison de ces dispositifs de fait est faite. D'après la comparaison, il ressort que l'UPFC est meilleur pour le contrôle de la tension et le flux de charge, mais pour les applications de bas niveau, STATCOM affiche également de meilleurs résultats. À partir de là, on peut dire que le contrôleur FACT jouera un rôle très vital pour la compensation de la puissance réactive dans le système d'alimentation électrique.

Chapitre 03
MODELISATION
du STATCOM

III.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter un schéma équivalent de STATCOM qui contenant une source de tension sinusoïdale connectée au nœud par l'inductance du transformateur de couplage ; en série avec une résistance qui représente les pertes ohmiques du transformateur et les pertes dans les interrupteurs de l'onduleur. STATCOM c'est un dispositif de compensation de la puissance réactive (Q) qui est connecté en shunt avec les systèmes de transmission et de distribution courant alternatif. La base de ce système est basé sur un Convertisseurs de source de tension où les topologies émergentes consistent en des convertisseurs automatiquement commutables dispositifs de commutation tandis que les STATCOM récents incluent la ligne commutée interrupteurs tels que les thyristors. Un STATCOM capable de générer ou d'absorber la puissance réactive pour compenser la ligne de transmission est située entre les générateurs et charger. Ce principe de fonctionnement de STATCOM lui permet d'agir soit comme un source ou une charge pour la ligne de transmission. Les STATCOM sont considérées comme membres des dispositifs Flexible AC Transmission System (FACTS). les STATCOM peut remplacer les compensateurs Var statiques (SVC) dans les systèmes de distribution mais en plus robuste ,peut augmenter la qualité de l'énergie en effectuant plusieurs compensations tels que le contrôle dynamique de la tension, l'amortissement des oscillations de la ligne électrique, la poursuite de la stabilité pendant les transitoires, contrôles de scintillement de tension et de creux-gonflement, et actifs et contrôle de la puissance réactive (PQ) dans les systèmes de transmission et de distribution. Ceux-ci sont atteint puisque le STATCOM utilise un VSC avec des interrupteurs d'alimentation, une boucle fermée système de contrôle qui contrôle les états marche-arrêt des interrupteurs et des filtres de sortie.

Nous adapterons la convention suivante : l'injection de la puissance réactive au nœud correspond à l'injection de la puissance réactive capacitive alors que l'absorption concerne l'injection de la puissance réactive inductive. Aussi nous parlerons de courant capacitive positive ou inductif négatif.

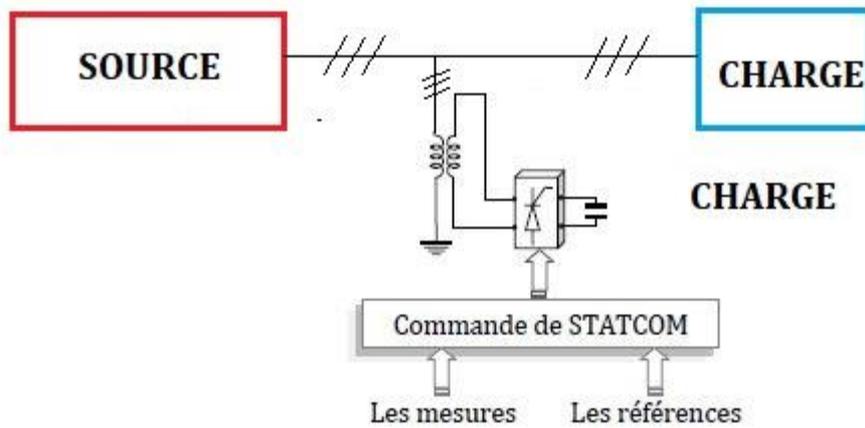


Figure-III.1 structure de base d'un STATCOM couple au réseau.

III.2 Structure et constitution d'un STATCOM

La figure (III.2) donne une représentation schématique d'un compensateur Statique Synchronique qui est composé d'un onduleur qui constitue ce dernier a des IGBT ou GTO. Et un condensateur.

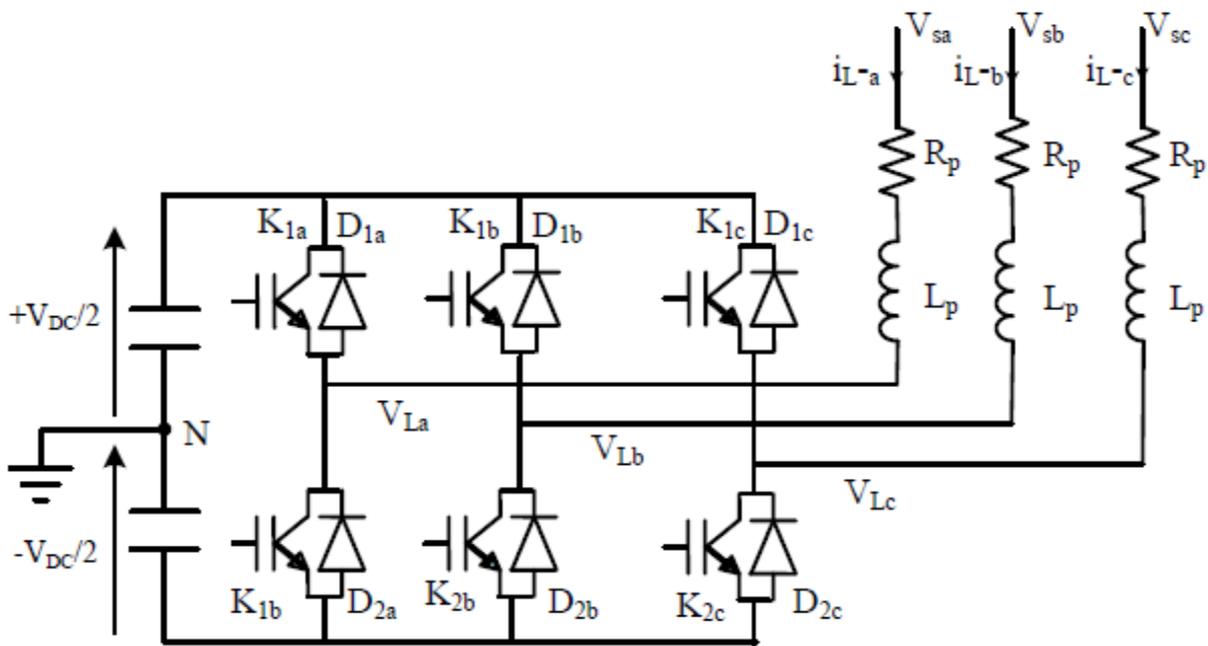


Figure III.2 structure et constitution d'un STATCOM.

III.3 Principe de Fonctionnement du STATCOM

La compensation de la puissance réactive par le STATCOM est réalisée par le contrôle de sa Tension de sortie (la tension fournie par le convertisseur de tension). la figure III.3 montre le schéma simplifié d'un convertisseur de tension relié à un point du réseau par l'intermédiaire d'un transfo du couplage.

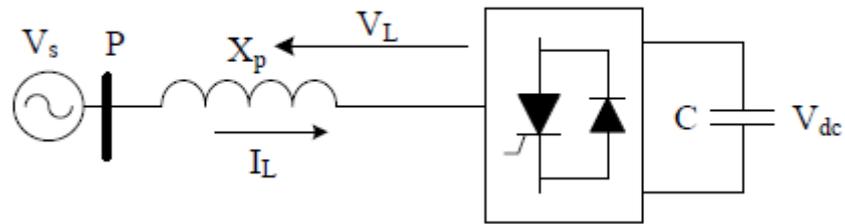


Figure III.3 schéma équivalent du STATCOM.

En général la tension du STATCOM V_L est injectée en phase avec la tension V_s de la ligne, 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 comme suit :

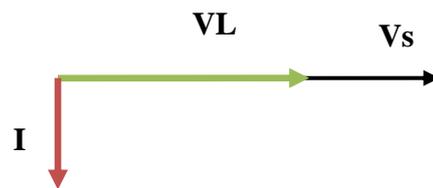


Figure III.4 courant inductif.

Si la tension, $V(L) > V(s)$ le courant circulant dans l'inductance est déphasé de $+\pi/2$ en arrière par à la tension ce qui donne un courant capacitif (figure III.4).

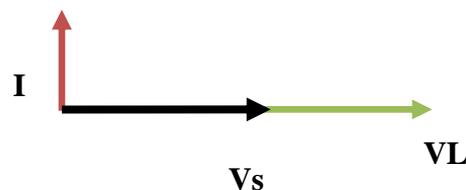


Figure III.5 courant capacitif.

Si la tension, $V(L) < V(s)$ le courant circulant dans l'inductance est déphasé de $-\pi/2$ en avance par à la tension ce qui donne un courant capacitif (figure 3.5).

Puissance réactive échangée par le réseau et le convertisseur:

Si $V_s < V_{conv}$: l'énergie réactive du convertisseur $Q_{conv} > 0$ implique une inductance

Si $V_s > V_{conv}$: l'énergie réactive du convertisseur $Q_{conv} < 0$ implique un condensateur.

$V_L > V_s$ compensation capacitive.

$V_L < V_s$ compensation inductive.

Considérant le STATCOM de la figure (III.1), le schéma équivalent de ce dispositif avec le système énergétique (source, ligne et charge) est donné par la figure (III.6).

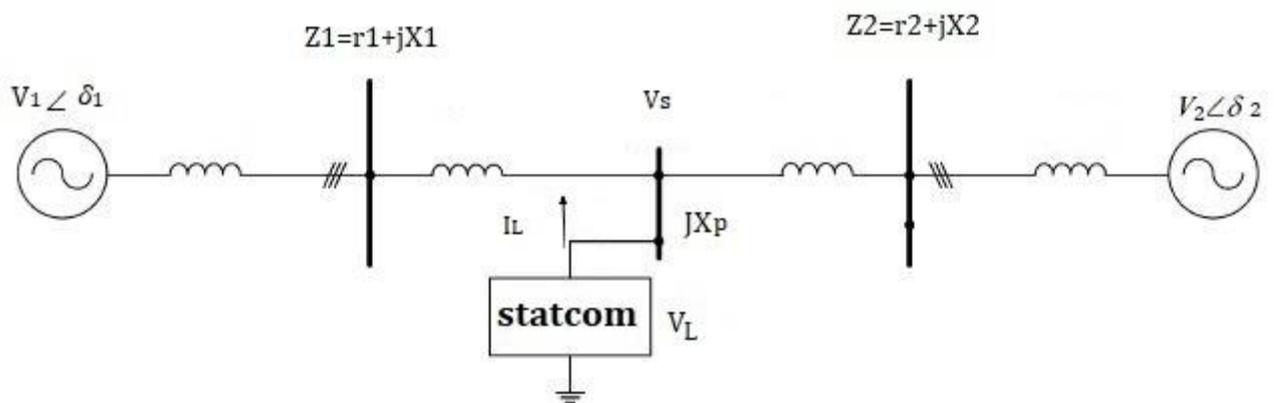


Figure III.6 schéma du STATCOM couplé au réseau électrique.

Le courant injecté par le STATCOM est donné par:

$$\bar{I}_L = \frac{\bar{V}_L - \bar{V}_s}{jX_p} \quad (\text{III.1})$$

Avec

V_s : la tension du point où le STATCOM est connecté dans le réseau.

V_L : la tension fournie par le STATCOM.

X_p : la réactance de fuite du transformateur de couplage.

La puissance injectée au jeu de barre " t " est donnée par l'équation (III.2).

$$\bar{S} = \bar{V}_s \bar{I}_L = \frac{\bar{V}_s (\bar{V}_L^* - \bar{V}_s^*)}{-jX_p} = \frac{\bar{V}_s \bar{V}_L^* - V_s^2}{-jX_p} \quad (\text{III.2})$$

D'où on aboutit aux puissances active et réactive injectées par le STATCOM au jeu de barre " t " exprimées par les formules (III.3) (III.3').

$$P_{\text{comp}} = \frac{V_s V_L \sin(\theta_s - \theta_L)}{X_p} \quad (\text{III.3})$$

$$Q_{\text{comp}} = \frac{V_s (V_L \cos(\theta_s - \theta_L) - V_s)}{X_p} \quad (\text{III.3}')$$

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. Donc

$$P_{\text{comp}} = 0 \quad (\text{III.4})$$

Alors :

$$\theta_s - \theta_L = 0$$

$$\theta_s = \theta_L$$

D'après cette condition la tension injectée par le STATCOM doit être en phase avec la tension au point de couplement [1, 13].

D'où la puissance réactive générée par le STATCOM est :

$$Q_{\text{comp}} = V_L I_L = \frac{V_L^2}{X_p} \left(1 - \frac{V_s}{V_L}\right) \quad (\text{III.5})$$

Avec :

V_s : la tension de la ligne.

V_L : la tension de sortie du convertisseur de tension.

I_L : le courant passant dans la branche shunt.

X_p : Réactance de fuite du transformateur.

P_{comp} : puissance active du STACOM.

Q_{comp} : puissance réactive du STACOM.

A partir de l'équation (III.1), il parait clair que si le module de la tension du STATCOM V_L égale le module de la tension V_t du réseau aucun transfert de l'énergie n'est effectué.

Si $V_L > V_s$, donc $Q_L > 0$, le STATCOM fonctionne en mode capacitif et fournit une puissance réactive au réseau comme montre la figure (3.8), et si $V_L < V_s$ alors $Q_L < 0$, le STATCOM dans ce cas absorbe la puissance réactive à partir du réseau et fonctionne en mode inductif comme montre la figure (III.7). [8]

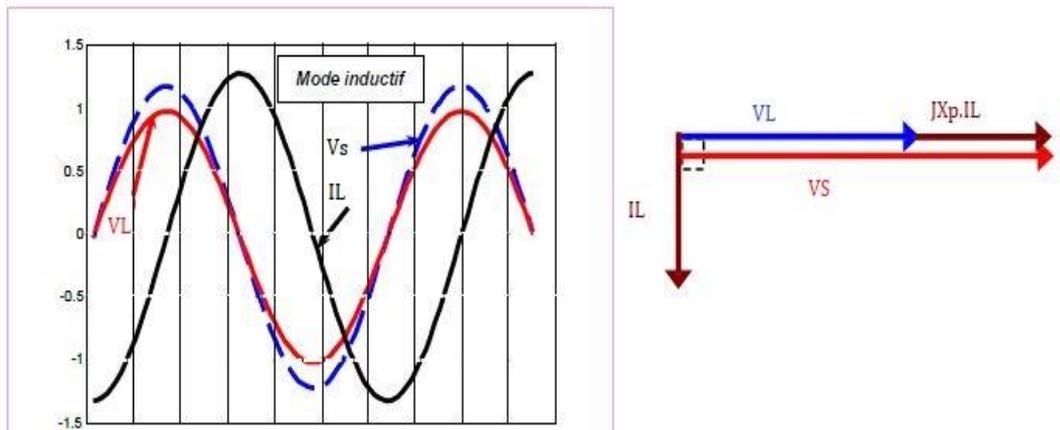


Figure III.7 courbes simulées courant et tension en mode inductif.

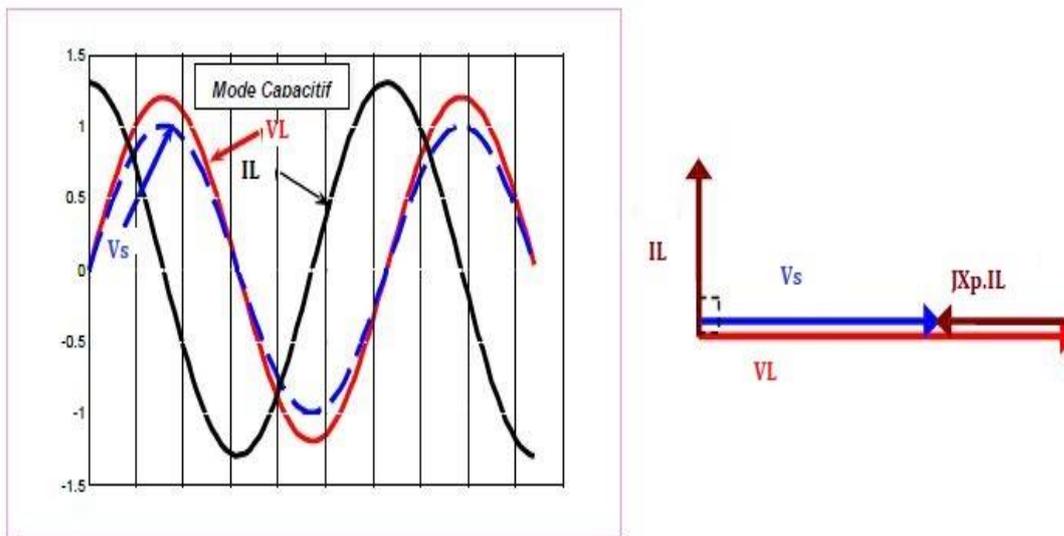


Figure III.8 courbes simulées courant et tension en mode capacitif.

NB: La puissance nominale du STATCOM dépend de la puissance réactive demandée pour la compensation au point de connexion. Le calcul de la répartition de charge (écoulement de puissance) détermine la tension du jeu de barre à réguler et la quantité de la puissance réactive nécessaire pour atteindre cet objectif.

III.4 Modélisation du STATCOM

Comme nous l'avons vu au premier chapitre, le STATCOM est composé principalement d'un convertisseur statique de tension couplé au réseau par un transformateur de puissance. Les modèles mathématiques des convertisseurs de tension pour les différentes connexions dans un réseau électrique, sont très utiles pour analyser leurs fonctionnements et déterminer des lois de commande des 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) (Annexe A). Pour cette modélisation nous avons admis les hypothèses suivantes:

- Les trois tensions de la source alternative sont équilibrées.
- Tous les interrupteurs sont supposés idéals.
- Les harmoniques causées par l'action d'ouverture et de fermeture des interrupteurs sont négligées et on ne considère que le fondamentale.
- L'inductance de fuite du transformateur parallèle de couplage du STATCOM est représentée par l'inductance L_p .
- Le schéma équivalent de ce dispositif donc est une source de tension sinusoïdale connectée à un nœud du réseau par l'inductance de fuite L_p 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 Fig.III.9

Le courant circulant dans le STATCOM dépend de la différence d'amplitude entre la tension du système V_s (tension point de raccordement) et la tension réglable du convertisseur de tension du STATCOM V_L . [12, 13].

Les équations triphasées du système sont données par :

$$V_{sa} - V_{La} = R_p I_{La}(t) + L_p \frac{d}{dt} I_{La}(t) \quad (\text{III.6})$$

$$V_{sb} - V_{Lb} = R_p I_{Lb}(t) + L_p \frac{d}{dt} I_{Lb}(t) \quad (\text{III.7})$$

$$V_{sc} - V_{Lc} = R_p I_{Lc}(t) + L_p \frac{d}{dt} I_{Lc}(t) \quad (\text{III.8})$$

Ou sous forme matricielle :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{La} \\ I_{Lb} \\ I_{Lc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_p}{L_p} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R_p}{L_p} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R_p}{L_p} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{La} \\ I_{Lb} \\ I_{Lc} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_p} \begin{bmatrix} V_{sa} - V_{La} \\ V_{sb} - V_{Lb} \\ V_{sc} - V_{Lc} \end{bmatrix} \quad (\text{III.9})$$

Avec:

V_s : la tension de la ligne.

V_r : la tension d'arrivée.

V_L : la tension de sortie du convertisseur de tension.

I_L : le courant passant dans la branche shunt.

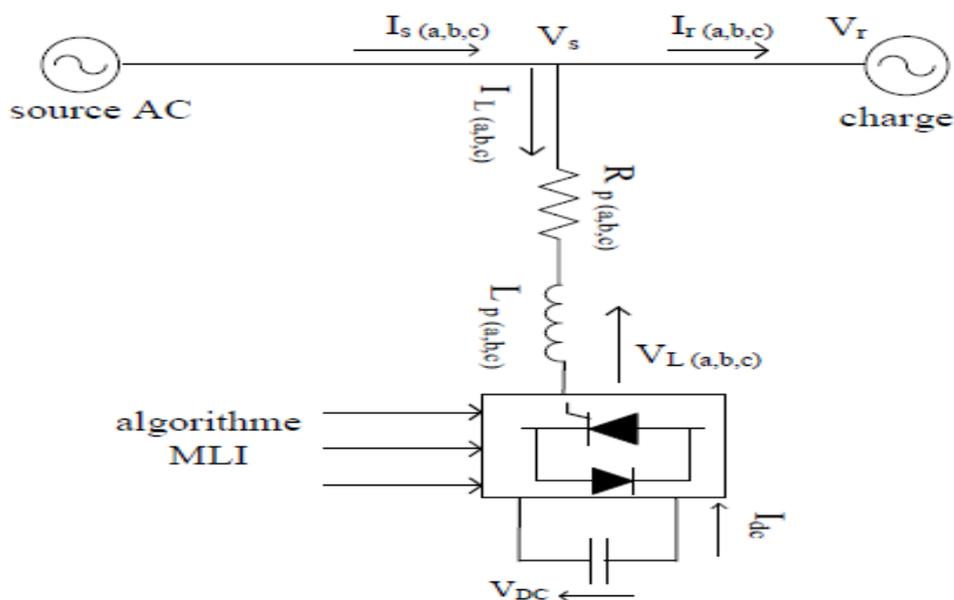


Figure III.9 schéma équivalent du STATCOM connecté au milieu d'une ligne électrique.

Dans un référentiel d-q, l'axe d du repère confonde avec l'origine du phasor de la tension du réseau. Dans ce référentiel chacun des composants a une signification physique claire: la composante d du courant représente la puissance active instantanée, tandis que la composante q du courant décrit la puissance réactive

$$\frac{d}{dt} I_{Ld} = -\frac{R_p}{L_p} I_{Ld} + \omega I_{Lq} + \frac{1}{L_p} (V_{sd} - V_{Ld}) \tag{III.10}$$

$$\frac{d}{dt} I_{Lq} = -\frac{R_p}{L_p} I_{Lq} + \omega I_{Ld} + \frac{1}{L_p} (V_{sq} - V_{Lq}) \tag{III.11}$$

avec: le vecteur $\begin{bmatrix} V_{sd} - V_{Ld} \\ V_{sq} - V_{Lq} \end{bmatrix}$ représente le vecteur de commande.

Les puissances active et réactive délivrées par l'onduleur sont donnée dans le référentiel d-q sont données par les équations suivantes :

$$P_p = \frac{3}{2} (V_{Ld} I_{Ld} + V_{Lq} I_{Lq}) \tag{III.12}$$

$$Q_p = \frac{3}{2} (V_{Ld} I_{Ld} - V_{Lq} I_{Lq}) \tag{III.13}$$

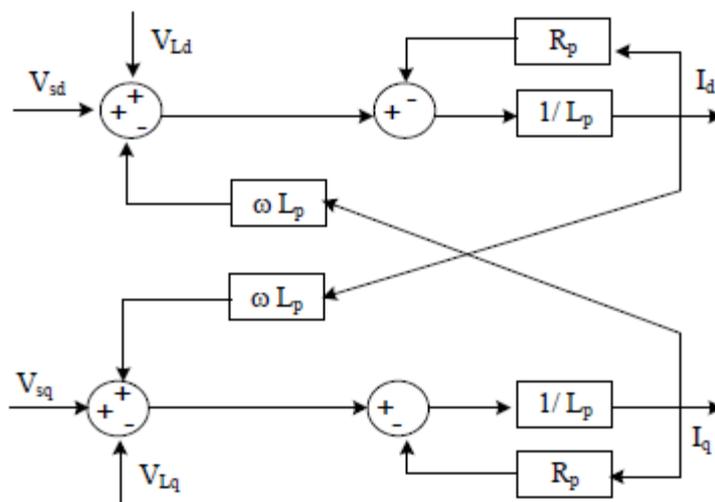


Figure III.10 Reconstitution des courants Id et Iq.

Pour le STATCOM, on cherche à compenser la puissance réactive du réseau; il est intéressant de pouvoir découpler les grandeurs actives et réactives du dispositif. En choisissant la phase θ de la transformation de PARK égale à zéro, on peut séparer les grandeurs actives et réactives du dispositif [12.,13,14].

Toutes les grandeurs sont référencées par rapport à la première phase de la tension du point de couplément du STATCOM à la ligne.

Avec ce choix la matrice de PARK est :

$$k = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \cos(\omega t - 2\pi/3) & \cos(\omega t + 2\pi/3) \\ \sin(\omega t) & \sin(\omega t - 2\pi/3) & \sin(\omega t + 2\pi/3) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{III. 14})$$

La puissance active du STATCOM est:

$$P_p = \frac{3}{2} (V_{Ld} I_{Ld} + V_{Lq} I_{Lq}) = \frac{3}{2} V_{Ld} I_{Ld} \quad (\text{III. 15})$$

La puissance réactive produite par le STATCOM est:

$$Q_p = \frac{3}{2} (V_{Ld} I_{Ld} - V_{Lq} I_{Lq}) = -\frac{3}{2} V_{Lq} I_{Lq} \quad (\text{III. 16})$$

Le courant I_q est l'image du courant réactive circulant dans le STATCOM.

III.5 Modèle Mathématique du Circuit DC

Le circuit continu sert à emmagasiner temporairement la puissance électrique, sa puissance active est exprimée par :

$$P = V_{dc} I_{dc} = \frac{3}{2} (V_{Ld} I_{Ld} + V_{Lq} I_{Lq}) \quad (\text{III. 17})$$

Pendant les périodes transitoire le condensateur partage de l'énergie avec le réseau, et par conséquent sa tension dépend du courant qui le traverse est exprimé par :

$$I_{dc} = C \frac{d}{dt} V_{dc} \quad (\text{III. 18})$$

Avec:

I_{dc} : le courant fournie par le convertisseur statique au condensateur

C : est la capacité du condensateur.

Alors la puissance active du circuit continu est :

$$P = V_{dc} C \frac{d}{dt} V_{dc} \quad (\text{III. 19})$$

La puissance du coté alternative du circuit continu est égale à la puissance délivrée par le convertisseur :

$$P_{ac} = \frac{3}{2} (V_{Ld} I_{Ld} + V_{Lq} I_{Lq}) \quad (\text{III. 20})$$

L'équation du circuit continu est formée sous le principe de l'équivalence des puissances sur les deux cotés AC et DC du circuit continu :

À partir de (III-19) et (III-20) nous trouvons:

$$P = V_{dc} C \frac{d}{dt} V_{dc} = \frac{3}{2} (V_{Ld} I_{Ld} + V_{Lq} I_{Lq}) \quad (\text{III. 21})$$

A partir des équations (III-19) et (III-21) l'équation exprime la dynamique du circuit continu est définie par :

$$\frac{d}{dt} V_{dc} = \frac{3}{2CV_{dc}} (V_{Ld} I_{Ld} + V_{Lq} I_{Lq}) \quad (\text{III. 22})$$

III.6 Contrôle du STATCOM

Le STATCOM est un contrôleur utilisé pour la compensation de la puissance réactive dans le but de maintenir la tension dans des niveaux nominaux au point de son raccordement au réseau.

Cet objectif est atteint en générant des courants de référence et, ces courants calculés à partir des puissances actives et réactives à imposer.

Ces puissances qui sont l'images des courants I_{Ld}^* et I_{Lq}^* active et réactive qu'on déterminer depuis le système d'équation suivant écrit dans le référentiel tournant au synchronisme (d, q) [12,14,16]:

$$\begin{bmatrix} I_{Ld}^* \\ I_{Lq}^* \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \frac{1}{V_{sd}^2 + V_{sq}^2} \begin{bmatrix} V_{sd} - V_{Lq} \\ V_{sq} & V_{Ld} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_p^* \\ Q_p^* \end{bmatrix} \quad (\text{III. 23})$$

Avec :

V_{sd} et V_{sq} : sont les tensions du point de raccordement du STATCOM.

I_{Ld}^* et I_{Lq}^* : sont les courant de référence désirés.

III.7 Méthode Watt-Var découplée

Considérant le modelé simplifié représenté par le système d'équation (III.8 et III.9) précédent on peut le mettre sous la forme d'état:

$$d/dx = Ax + BX \quad (\text{III. 24})$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{Ld} \\ I_{Lq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R_p}{L_p} & \omega \\ -\omega & \frac{-R_p}{L_p} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{Ld} \\ I_{Lq} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_p} \begin{bmatrix} V_d & -V_{Ld} \\ V_q & -V_{Lq} \end{bmatrix} \quad (\text{III. 25})$$

Avec: $\frac{1}{L_p} \begin{bmatrix} V_{sd} & -V_{Ld} \\ V_{sq} & -V_{Lq} \end{bmatrix}$ est le vecteur de commande.

Les variables du courant sont couplés par les termes ωI_{Lq} et $-\omega I_{Ld}$, un découplage entre les deux variables est nécessaire pour une commande performante.

La commande à appliquer à la tension de sortie de l'onduleur pour découpler les grandeurs des courants des axes d et q est définie par :

$$V_{Ld} = V_{sd} + \omega I_{Lq} - U_d \quad (\text{III. 26})$$

$$V_{Lq} = V_{sd} + \omega I_{Lq} - U_d \quad (\text{III. 27})$$

En substituant dans le système (III-25) nous arrivons à :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{Ld} \\ I_{Lq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R_p}{L_p} & 0 \\ 0 & \frac{-R_p}{L_p} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{Ld} \\ I_{Lq} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_p} \begin{bmatrix} U_d \\ U_q \end{bmatrix} \quad (\text{III. 28})$$

Deux régulateurs PI sont utilisés pour réaliser un contrôle découplé des puissances active et réactive.

U_d et U_q sont les sorties des régulateurs PI des courants I_{Ld} et I_{Lq} respectivement.

$$U_d = \left(K_{pd} + \frac{K_i}{s} \right) (I_{Ld}^* - I_{Ld}) \quad (\text{III. 29})$$

$$U_q = \left(K_{pq} + \frac{K_i}{s} \right) (I_{Lq}^* - I_{Lq}) \quad (\text{III. 30})$$

I_{Ld}^* et I_{Lq}^* présentent les courants de référence actif et réactif respectivement.

A partir des équations (III-28) on tire les fonctions de transfert :

$$\frac{I_{Ld}}{U_d} = \frac{I_{Ld}}{U_d} = \frac{\frac{1}{L_p}}{s + \frac{R_p}{L_p}} = \frac{1}{sL_p + R_p} \quad (\text{III. 31})$$

C'est la fonction de transfert du système découplé.

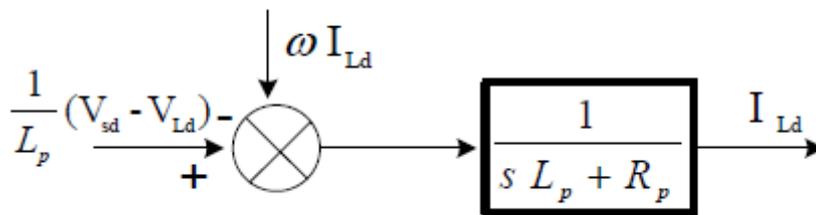


Figure III.11 fonction de transfère du STATCOM.

III.8 Boucle de régulation des courants

D'une manière générale, la partie commande du compensateur est constitué de deux boucles internes et une boucle externe.

L'objectif des boucles internes est de réguler les courants du réseau afin de minimiser leur contenu harmonique et d'échanger avec le réseau une certaine puissance réactive, tandis que la boucle externe a pour objectif de régler la tension de sortie du compensateur. Les Fig. III.12 et III.13, présentent les boucles de régulation du compensateur STATCOM [16, 17].

La fonction de transfert en boucle ouverte est :

$$F(s)_{Bo} = \left(K_{pd} + \frac{K_{id}}{s} \right) \frac{1}{sL_p + R_p} = K_{pd} \left(\frac{s + \frac{K_i}{K_p}}{s} \right) \left(\frac{\frac{1}{R_p}}{s + \frac{R_p}{L_p}} \right) \quad (\text{III. 31})$$

$$F(s)_{Bo} = K_{pd} \left(1 + \frac{1}{sT_{Bo}} \right) \left(\frac{\frac{1}{R_p}}{s\frac{R_p}{L_p} + 1} \right) \quad (\text{III. 32})$$

T_{Bo} : est la constante du temps en boucle ouverte.

Prenons:

$$\left\{ \frac{1}{T_{Bo}} = \frac{R_p}{L_p} = \frac{K_i}{K_p}, K_p = K \right.$$

On aura :

$$F(s)_{Bo} = \frac{K_{pd}}{sL_p} = \frac{K}{sL_p} \quad (\text{III. 33})$$

La fonction de transfert en boucle fermée après compensation des pôles est :

$$F(s)_{BF} = \frac{F(s)_{Bo}}{1 + F(s)_{Bo}} = \frac{\frac{K}{sL_p}}{1 + \frac{K}{sL_p}} = \frac{1}{1 + sT_{BF}} \quad (\text{III. 34})$$

$T_{BF} = L_p / K_p$ Constante du temps en boucle fermée.

D'où les paramètres du régulateur PI sont :

$$\left\{ \begin{array}{l} K_p = K \\ K_i = \frac{KR_p}{L_p} \end{array} \right. \quad (\text{III. 34})$$

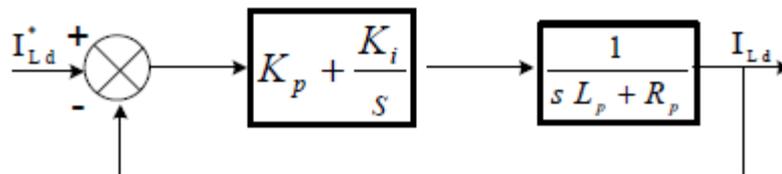


Figure III.12 régulation en pi du courant.

III.9 Régulation de la tension continue Udc

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 instantanée échangée avec le condensateur peut être exprimée par l'équation suivante [13,14,15] :

$$P_{dc} = \frac{1}{2} C \frac{d}{dt} V_{dc}^2 \Rightarrow \frac{d}{dt} V_{dc}^2 = \frac{2}{C} P_{dc} \quad (\text{III. 35})$$

Introduisant la transformation de LPLACE à cette formule nous aurons :

$$\frac{V_{dc}^2}{P_{dc}} = \frac{2}{C s} \quad (\text{III. 36})$$

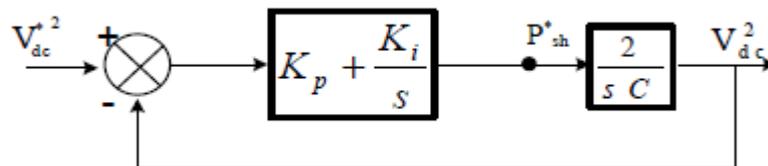


Figure III.13 boucle de régulation du circuit continu.

La fonction de transfert en boucle ouverte de ce système est :

$$F(s)_{Bo} = \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) \frac{2}{C s} = \frac{2K_p}{C s} + \frac{2K_i}{C s^2} \quad (\text{III. 37})$$

La constante du temps en boucle ouverte est :

$$\tau_0 = C$$

La fonction de transfert en boucle fermée de ce système est :

$$F(s) = \frac{V_{dc}^2}{V_{dc ref}^2} = \frac{\frac{2K_p}{C} s + \frac{2K_i}{C}}{s^2 + \frac{2K_p}{C} s + \frac{2K_i}{C}} \quad (\text{III. 38})$$

D'où on tire :

$$\omega n^2 = 2 \frac{K_i}{c} \text{ et } \delta = K_p \sqrt{\frac{1}{2C K_i}} \quad (\text{III. 39})$$

La Figure IV.14 présente le système de contrôle global par la méthode des puissances découplées.

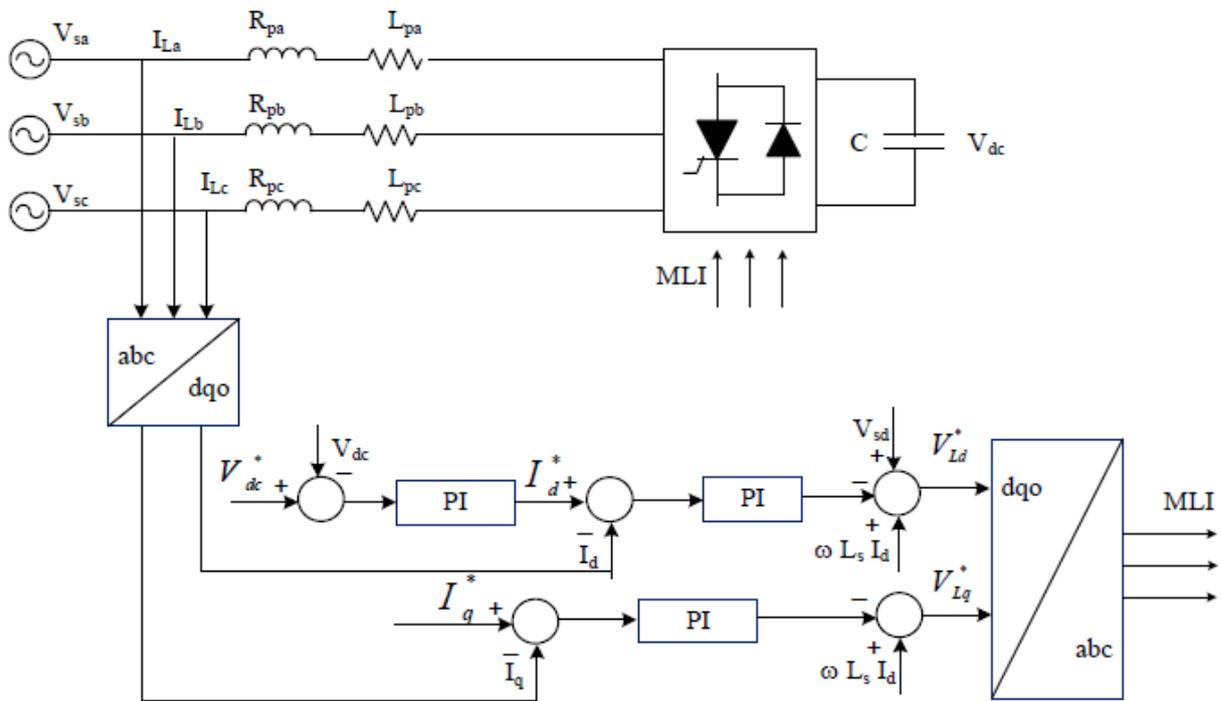


Figure III.14 Schéma global de commande par la méthode Watt-Var Découplé du STATCOM.

III.10 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la modélisation de STATCOM dans certaines fonctions pour contrôler et réguler la tension par la compensation de l'énergie réactive comparaison a le besoin Globalement cette modélisation approche certaines fonctions de contrôle :

La régulation de la tension par compensation de l'énergie réactive et le contrôle du flux de puissance active et réactive.

La loi de commande utilisé pour ce contrôleur été la méthode dite watt-var découplé 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 Les résultats de la simulation de fonctionnement de STATCOM coupler dans un réseau électrique seront traitées en détail dans le chapitre suivant (quatre).

Chapitre 04
SIMILATION ET
RESULTATS

IV.1 Introduction

Un STATCOM est un système électronique de puissance avec un système de contrôle complexe. La modélisation du STATCOM, y compris le réseau électrique et son contrôleur dans l'environnement Simulink nécessite des "blocs électriques" de l'ensemble de blocs du système d'alimentation et des blocs de contrôle de la bibliothèque Simulink.

Le comportement du « STATCOM » sera vérifié par des simulations en utilisant MATLAB-Simulink donc la simulation va dérouler comme suit :

Un petit réseau de BT qui s'illustre un STATCOM comme onduleur de tension et un réseau HT avec le bloc de FACTS-STATCOM dans Simulink.

- Fonctionnement en mode résistif.
- Fonctionnement en mode capacitif.
- Fonctionnement en mode inductif.

IV.2 Description du réseau étudié

Réseau BT

Une seule source de 400 V un filtre LCL d'harmonique et un onduleur(STATCOM).

Tout le système est simulé sous logiciel MATLAB version 9.0.0 (R.2016a).

Réseau HT

Trois sources 13.8KV(128MVA) -16.5 KV(247.5MVA) -18KV(192MVA) STATCOM 3 niveaux PWM, et trois transformateur a 230KV au réseau.

Tout le système est simulé sous logiciel MATLAB version 9.0.0 (R.2016a).

Les caractéristiques du réseau sont les suivantes

Réseau BT

- TENSION DE SOURCE : 400 V
- FREQUENCE DE SOURCE : 50 HZ
- CHARGE 1 : 2 MVA
- CHARGE 2 : 4KVA

Réseau HT :

- Tension de source 1 : 13.8 KV
- Tension de source 2 : 16.5 Kv
- Tension de source 3 : 18 KV
- Fréquence de source : 60 HZ
- Charge 1 : 44 MW
- Charge 2 : 125 MW
- Charge 3 : 12MW
- Charge 4 : 2MW

Les modèles des lignes : lignes à paramètres distribués

- 4 ligne : 100 km
- 1 ligne : 30 KM

Caractéristiques du STATCOM**Réseau BT**

- Onduleur de tension 2 niveaux
- Commander par composants IGBT
- Condansateur: 5.6 uf

Réseau HT

- Onduleur de tension 3 niveaux
- Commander par composants IGBT bridge
- Condansateur : 375 uf

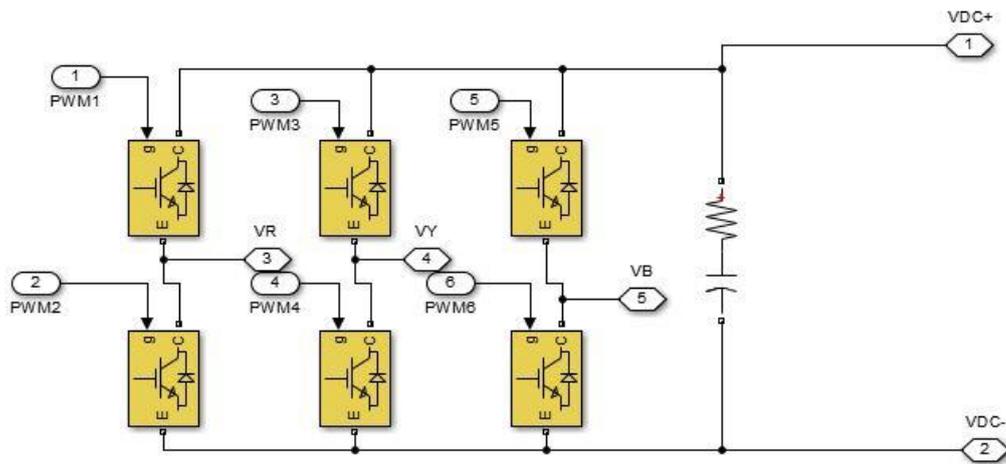


Figure: IV.1 onduleur de tension 400V IGBT.

IV.3 Essais de simulation et résultats

Il est noté que la tension du jeu de barre de générateur ($V_s=400V$), et le Condensateur est chargé initialement $C=5600\mu F$. Notre système fonctionne aussi à ($t=0s$) à une Charge capacitive ($P=200KV$, $Q=100KV$) dans un état d'équilibre.

L'étude du réseau BT avec notre système comme suivant :

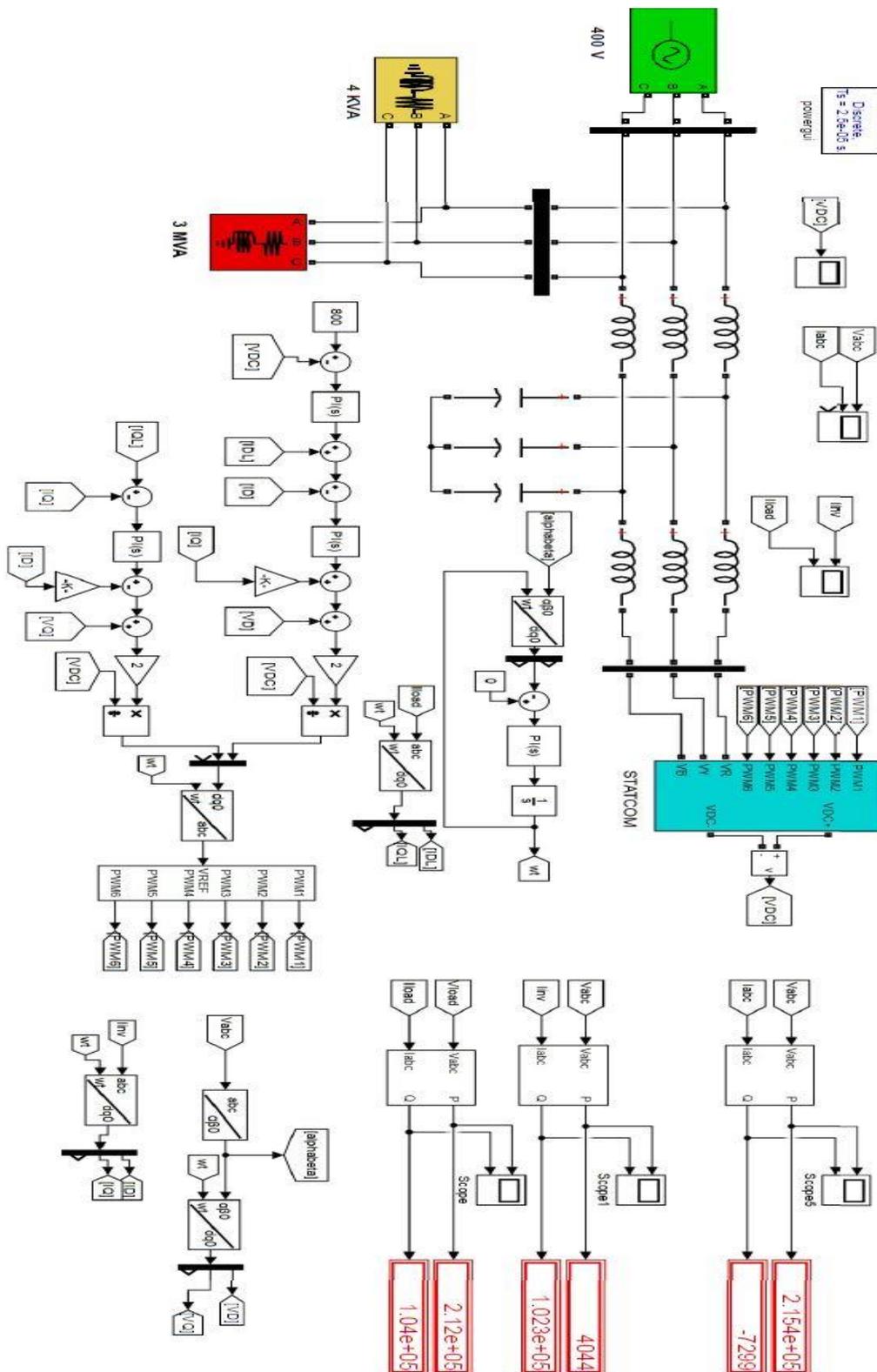


Figure: IV.2 structure compensation énergie réactive avec STATCOM

IV.4 Résultats de simulation (BT)

IV.4.1 EN MODE CAPACITIVE

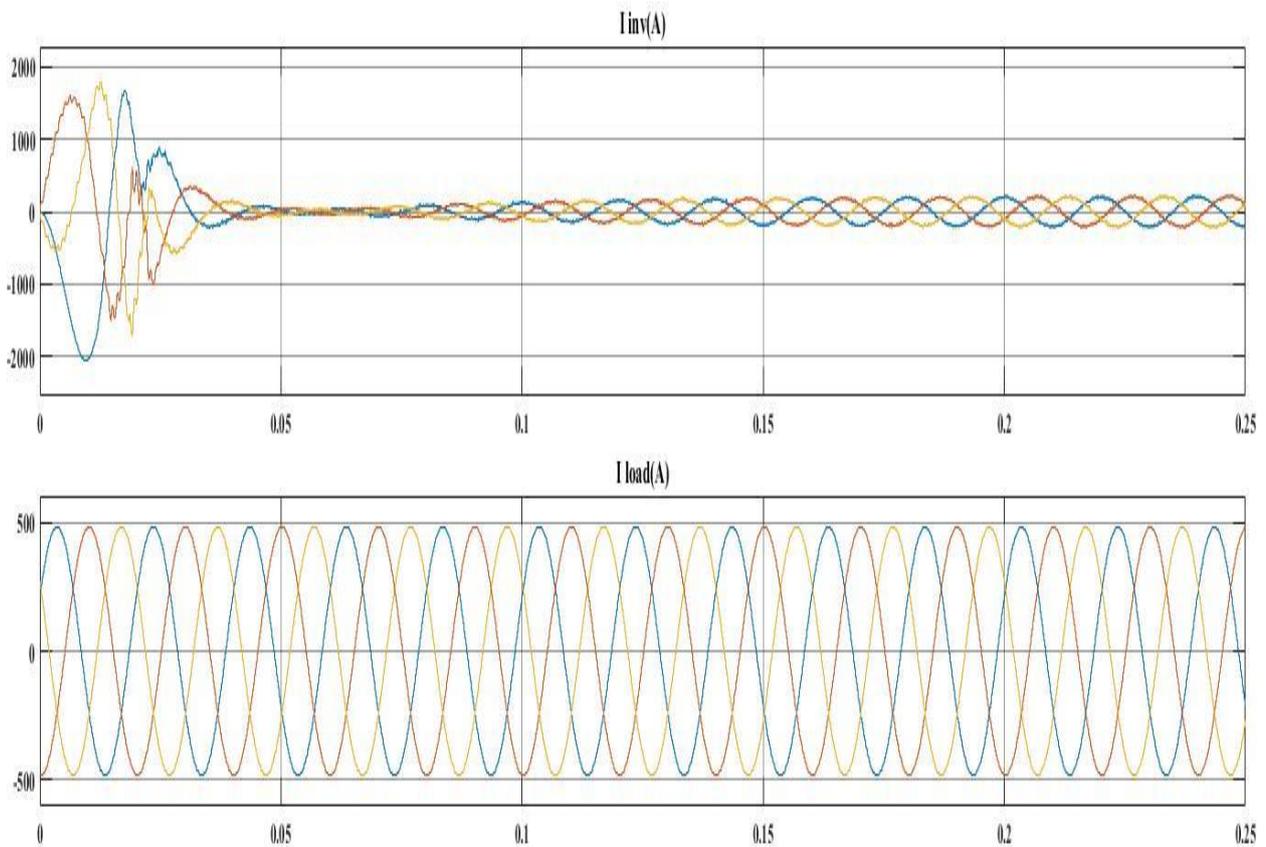


Figure: IV.3 les courants de charge et l'onduleur

D'après la figure IV.3 qui représente le courant injecté au réseau par l'onduleur avec une charge capacitive, le STATCOM fonctionne en mode inductif. C'est-à-dire qu'il absorbe une puissance réactive qui amélioré la tension.

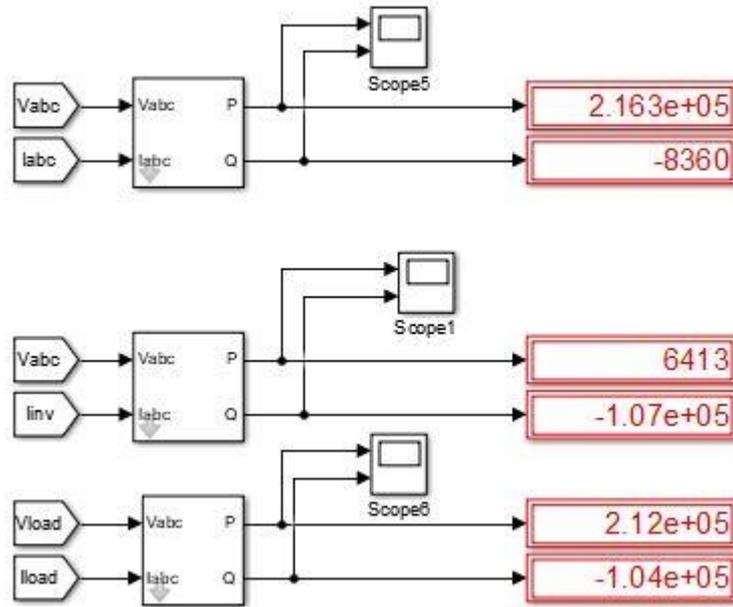


Figure: IV.4 résultats de compensation capacitif

La figure IV.4 montre les résultats de la puissance active et réactive de source et l'onduleur et la charge.

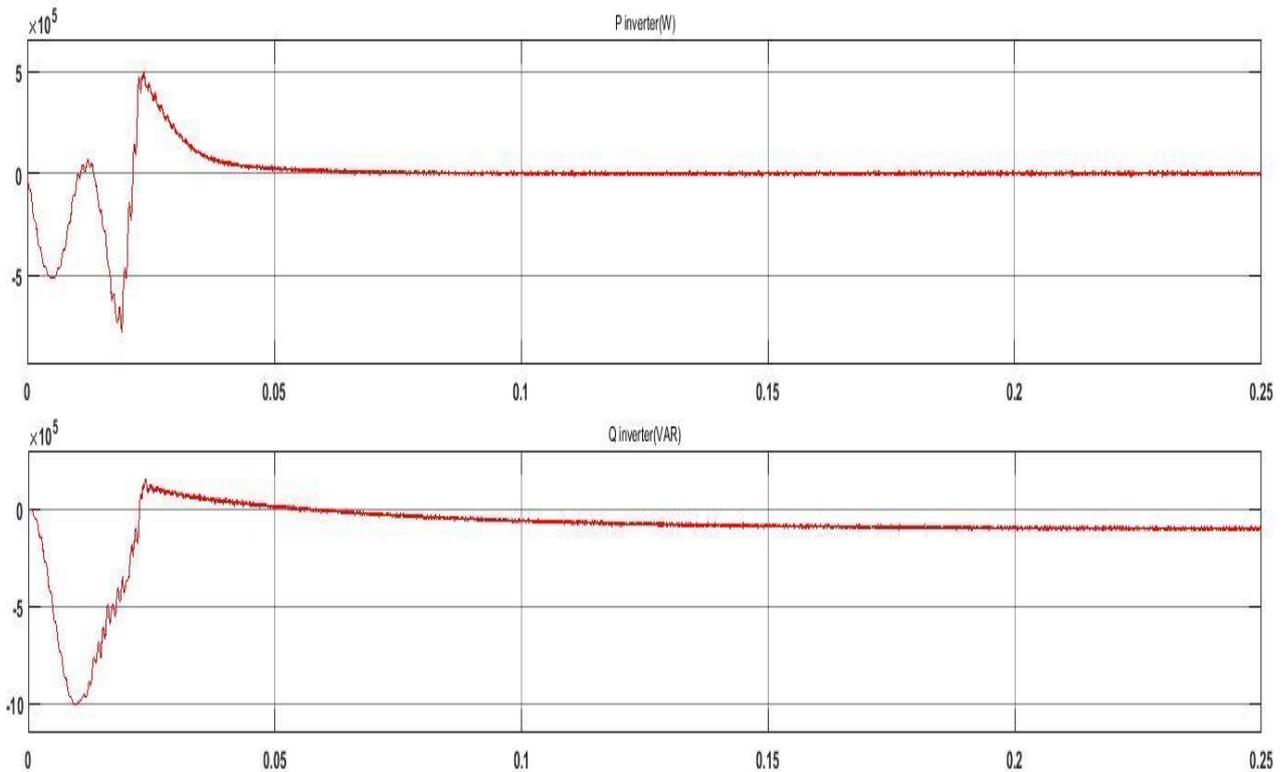


Figure: IV.5 puissance active et réactive de l'onduleur

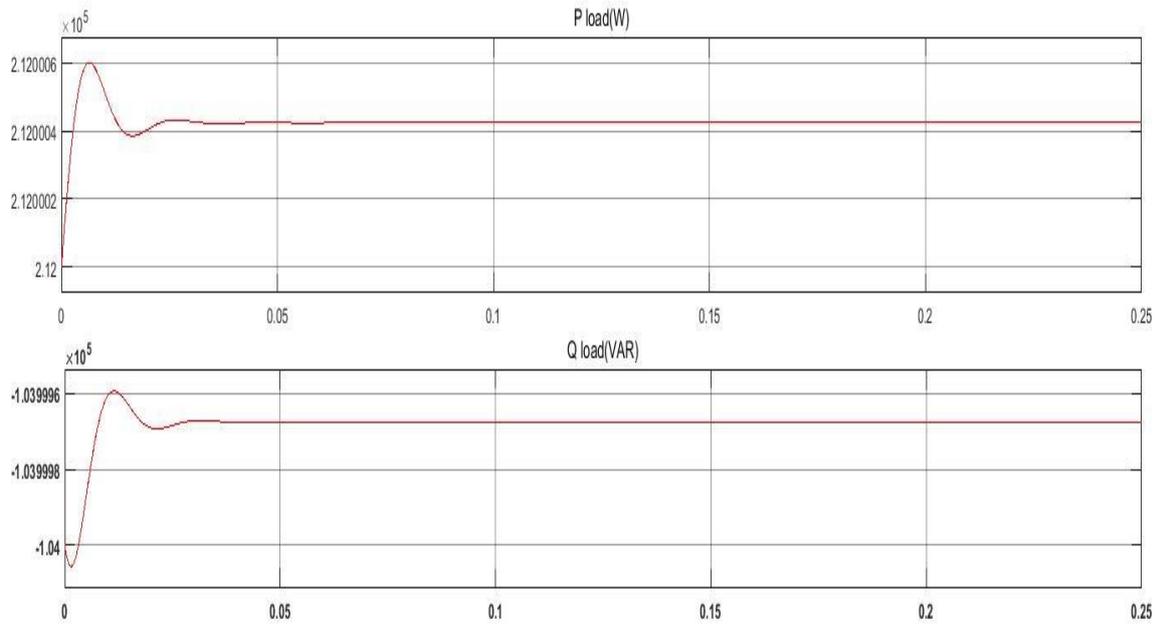


Figure: IV.6 puissance active et réactive de charge

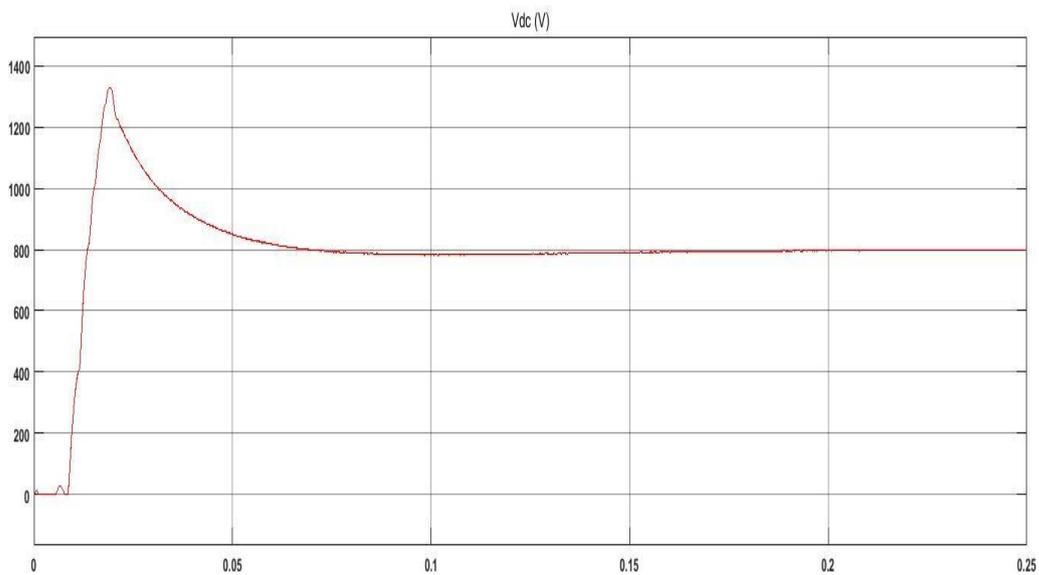


Figure: IV.7 tension Vdc au borne de condensateur.

A partir Les figure (IV.5 et IV.6) on peut dit que l'onduleur est fonctionné en mode capacitif qui absorbé beaucoup plus de la puissance réactive ($Q = -100 \text{KvAr}$) est nécessaire pour l'amélioration de tension. La puissance réactive absorbé par la source presque nul.

Il y a une petite quantité de la puissance active par ce que l'onduleur de STATCOM il a une capacité.

IV.4.2 EN MODE INDUCTIVE :

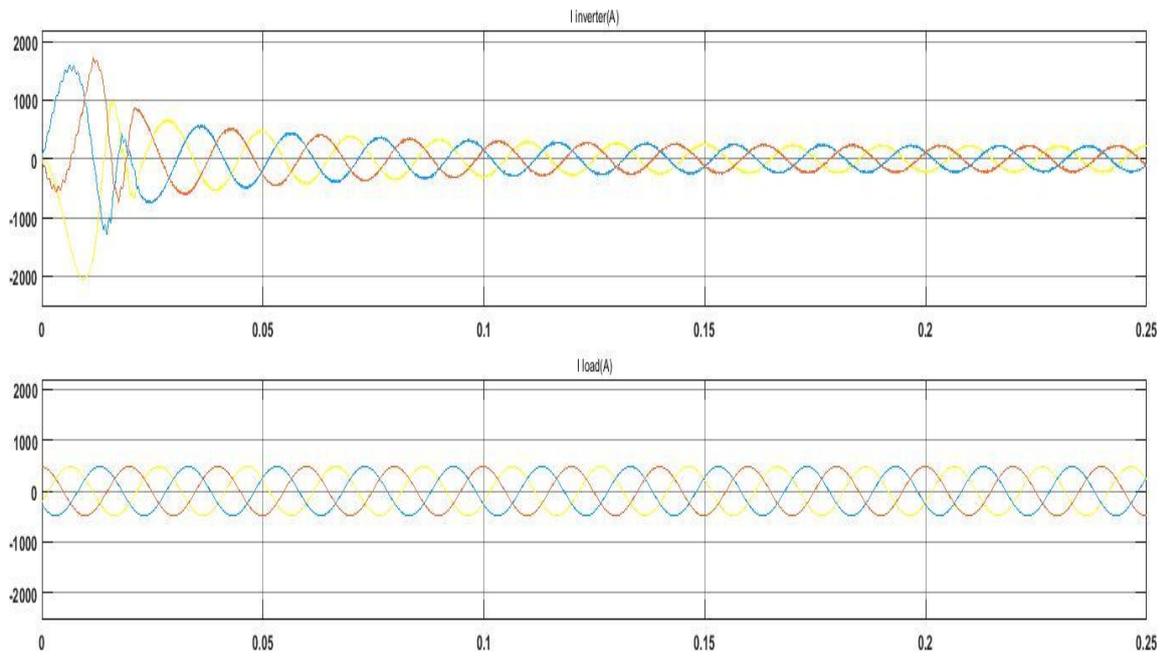


Figure: IV.8 les courants du STATCOM et la charge

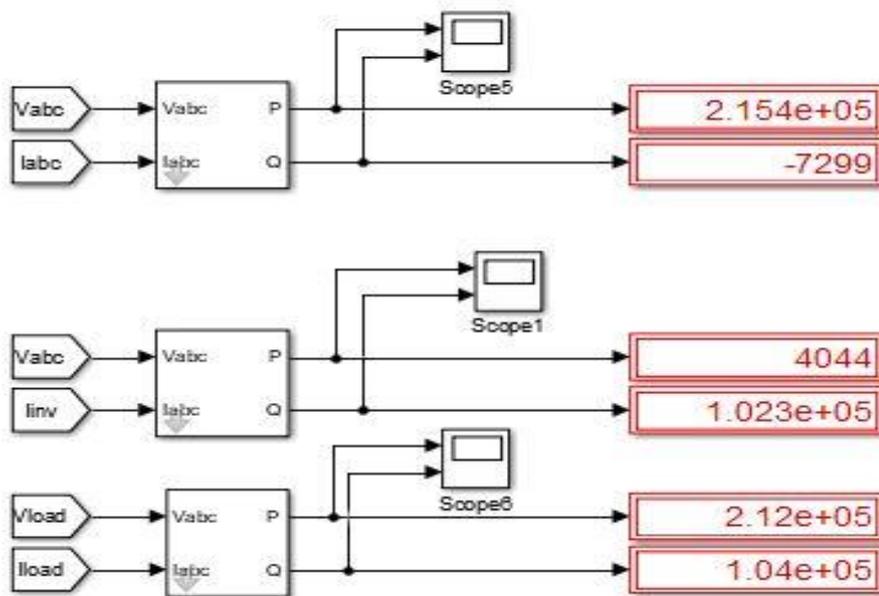


Figure: IV.9 résultat de compensation indicatif

D'après la figure IV.8 qui représente le courant injecté au réseau par l'onduleur avec une charge inductive. Le STATCOM effectue l'action de contrôle appropriée pour fournir la quantité d'énergie requise à la charge.

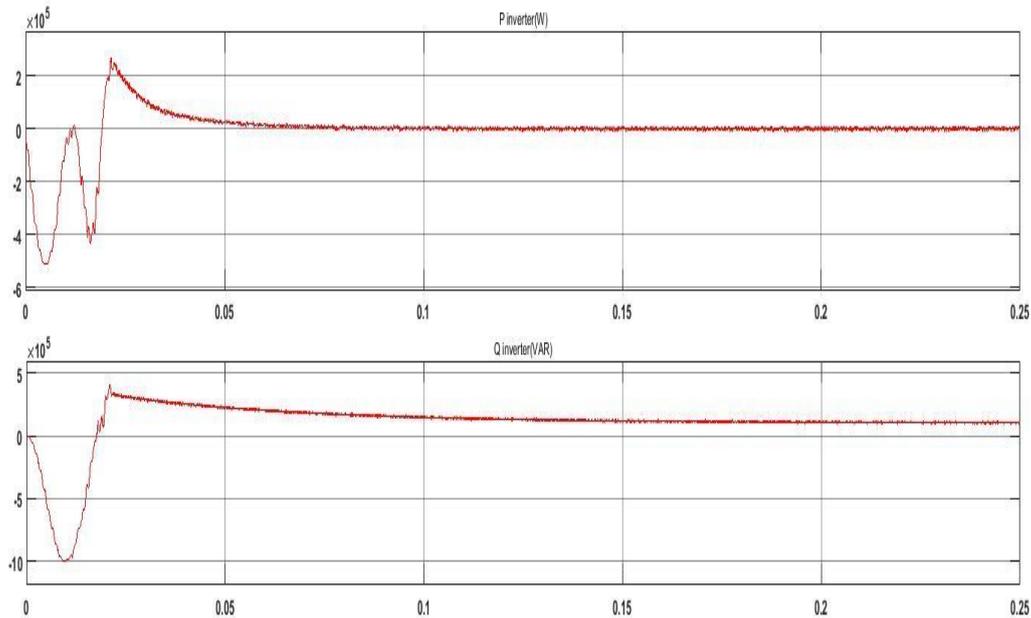


Figure: IV.10 puissance active et réactive de l'onduleur.

A partir la figure (IV.10) on peut dit que l'onduleur est fonctionné en mode capacitif qui injecte beaucoup plus de puissance réactive est nécessaire pour la compensation de l'énergie réactive. Aucune puissance réactive délivré par la source. Comme on a dit déjà que la puissance active est n'est pas important dans ce dispositif.

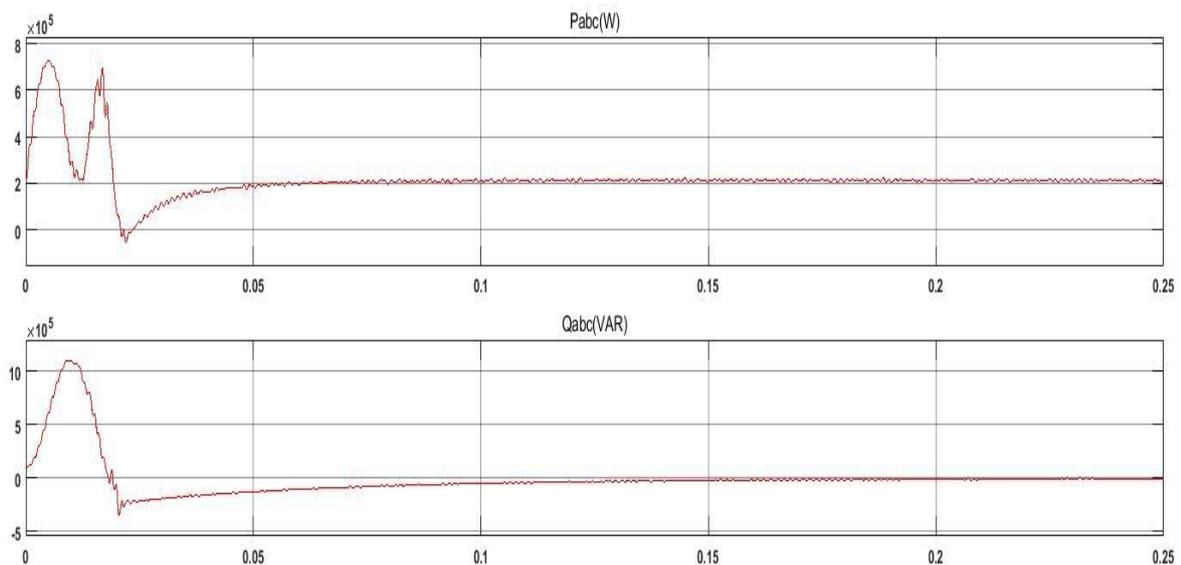


Figure: IV .11 puissance active et réactive de la source

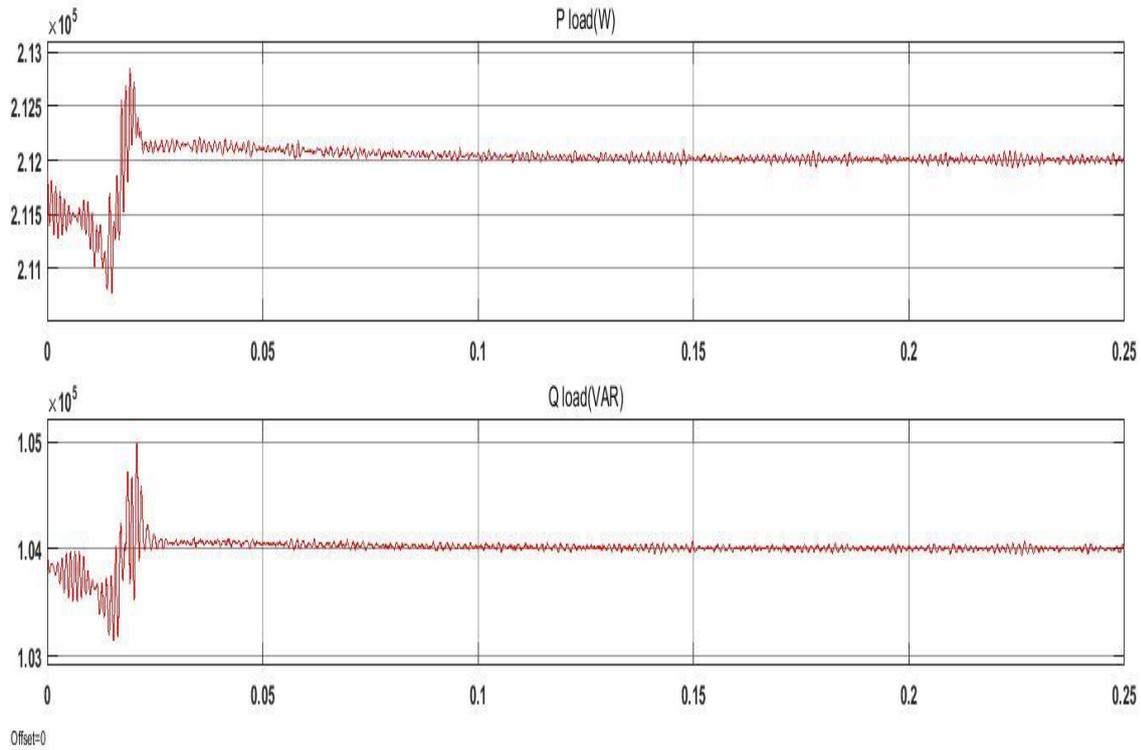


Figure: IV.12 puissance active et réactive de la charge.

L'effet de la compensation de la puissance réactive qu'on voit clairement dans ces figures (IV.11 et IV.12) ou notre réseau est soulagé avec la fourniture de moins de puissance réactive. la fourniture de la puissance réactive au point de connexion permet un transit plus important de l'énergie réactive dans la ligne de transport.

L'étude du réseau HT avec notre système comme suivant :

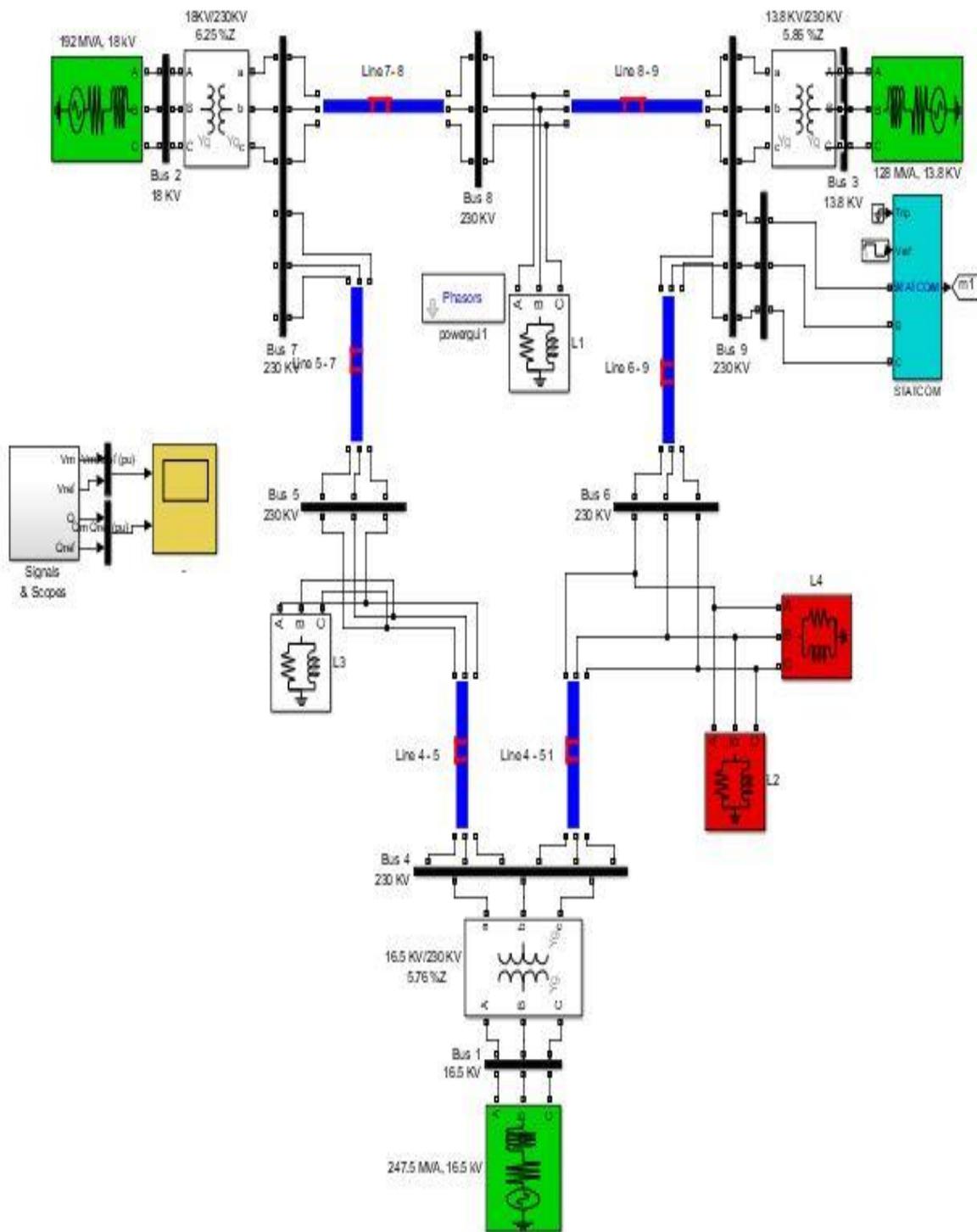


Figure: IV.13 structure de réseau HT avec STATCOM.

STATCOM RESEAU HT :

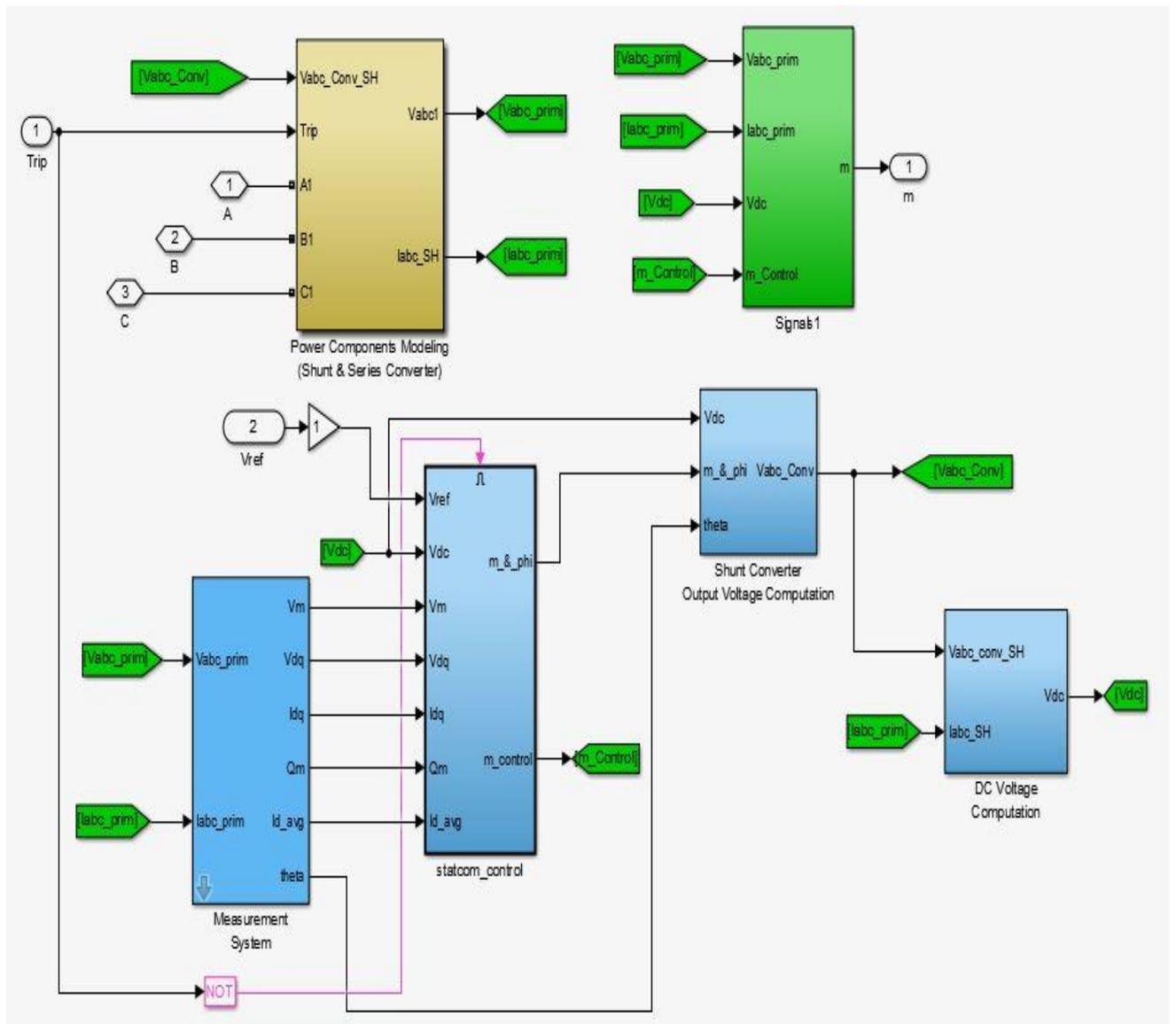


Figure: IV.14 structure du STATCOM.

La figure (IV-15) montre un modèle pour convertir la tension de l'amplitude et de l'angle en tension alternative triphasée, où ces tensions sont utilisées comme signal sinusoïdal de référence dans le taux SPWM.

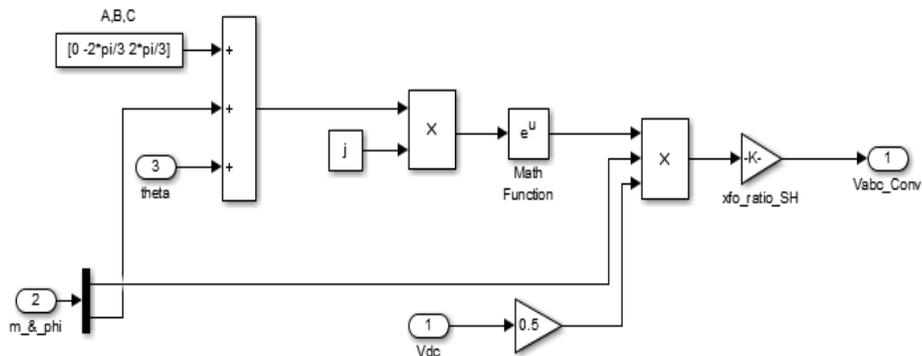


Figure V.15 Modèle de conversion de (amplitude et angle) en tension alternative triphasée.

La figure IV-16 (montre le modèle du régulateur de courant, qui se compose de deux boucles de régulation, chaque boucle contenant un contrôleur (PI). Dans la première boucle de régulation, le courant (I_d) est comparé au courant de référence.

La ref, I_d (du régulateur de tension constante pour obtenir le signal de ligne qui entre dans le contrôleur PI), et à travers cette boucle, le flux de puissance efficace entre le compensateur synchrone et le système de transmission d'énergie électrique est contrôlé.

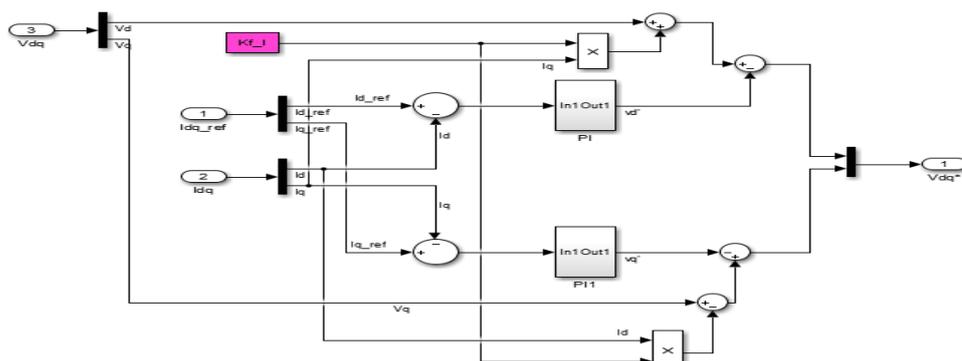


Figure VI.16 Régulateur de courant

Résultats de la simulation(HT)

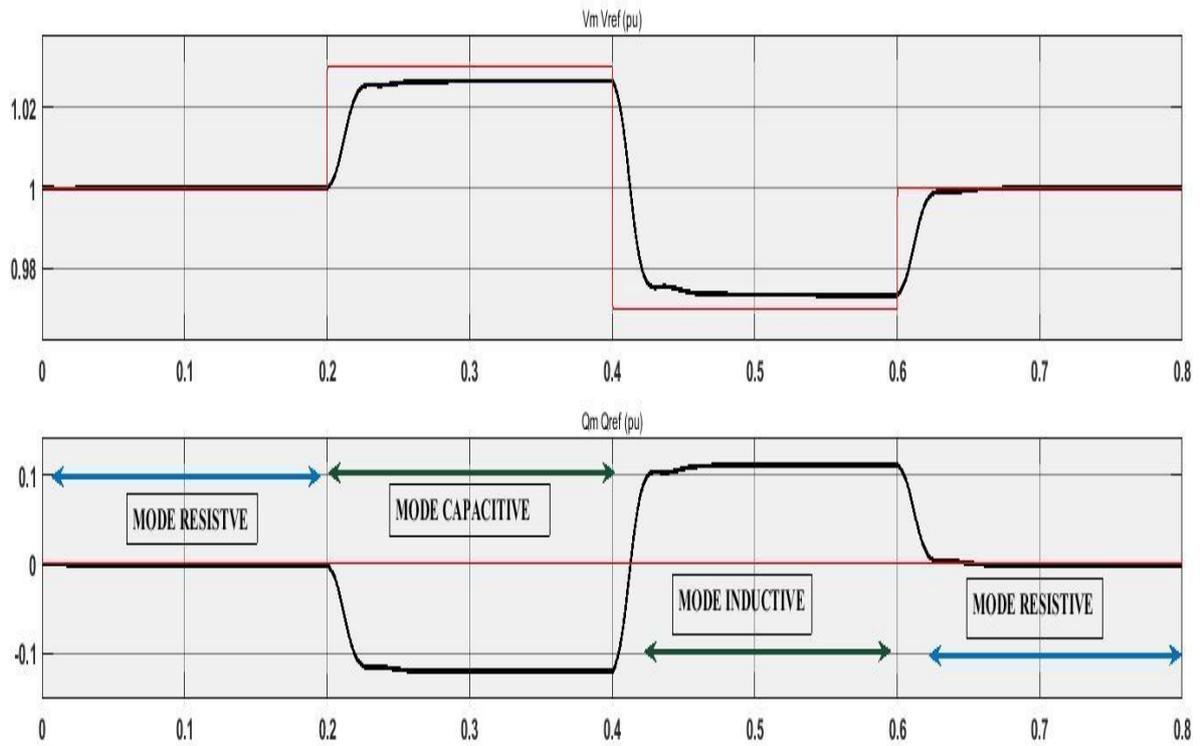


Figure: IV.17 STATCOM en travail compensation au besoin de réseau

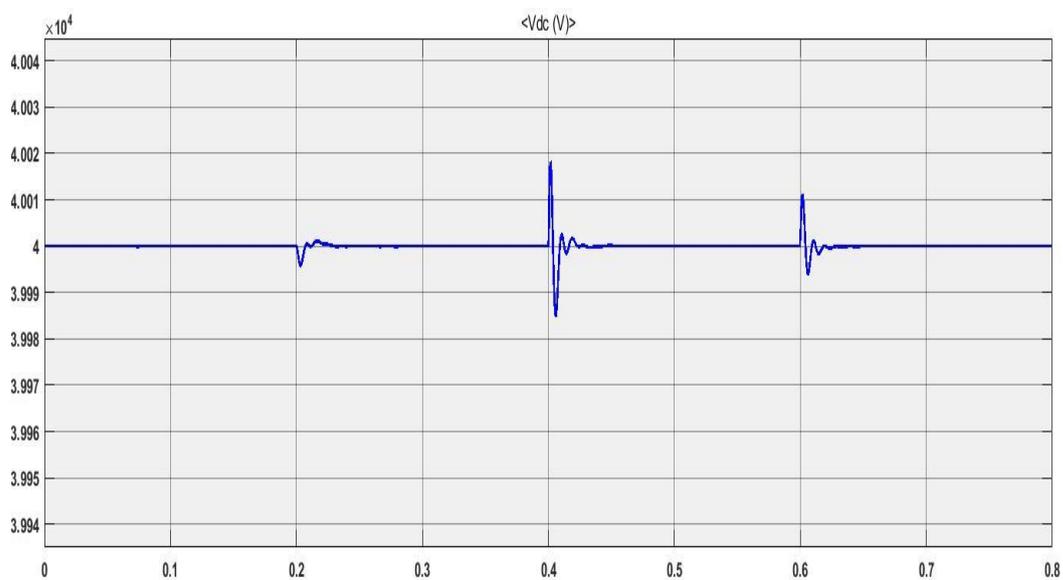


Figure: IV.18 tension au borne de condensateur

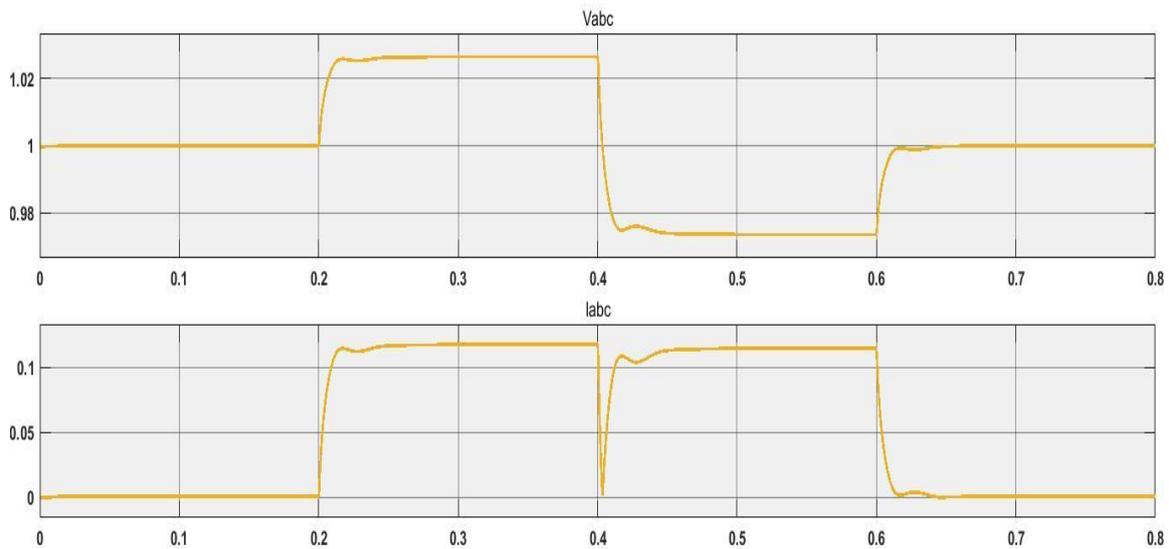


Figure: IV.19 courant et tension du STATCOM.

Initialement, la source de tension programmable est réglée sur 1 pu, lorsque le STATCOM est hors service.

La tension V_{ref} est fixée à 1,0 pu, le STATCOM est initialement flottant (courant nul). La tension continue est de 40 kV. Comme le montre la figure 4.15, le courant STATCOM (I_{abc}) est égal à zéro et la tension du système et la tension STATCOM sont en Phase.

À $t=0,2s$, la tension est brusquement augmentée de 4% (1.03 pu de tension nominale). Le STATCOM réagit en absorbant de la puissance réactive ($Q=-0.13$ pu) pour maintenir la tension à 1,03 pu. Le temps de stabilisation à 95 % est d'environ 20 ms.

Notez que lorsque le STATCOM fonctionne en mode inductif, le STATCOM réagit en générant de la puissance réactive ($Q=0.13$ pu) pour maintenir la tension à 0.97 pu. Le temps de stabilisation à 95 % est d'environ 20 ms. À ce point la tension continue est passée à 40.02 kV.

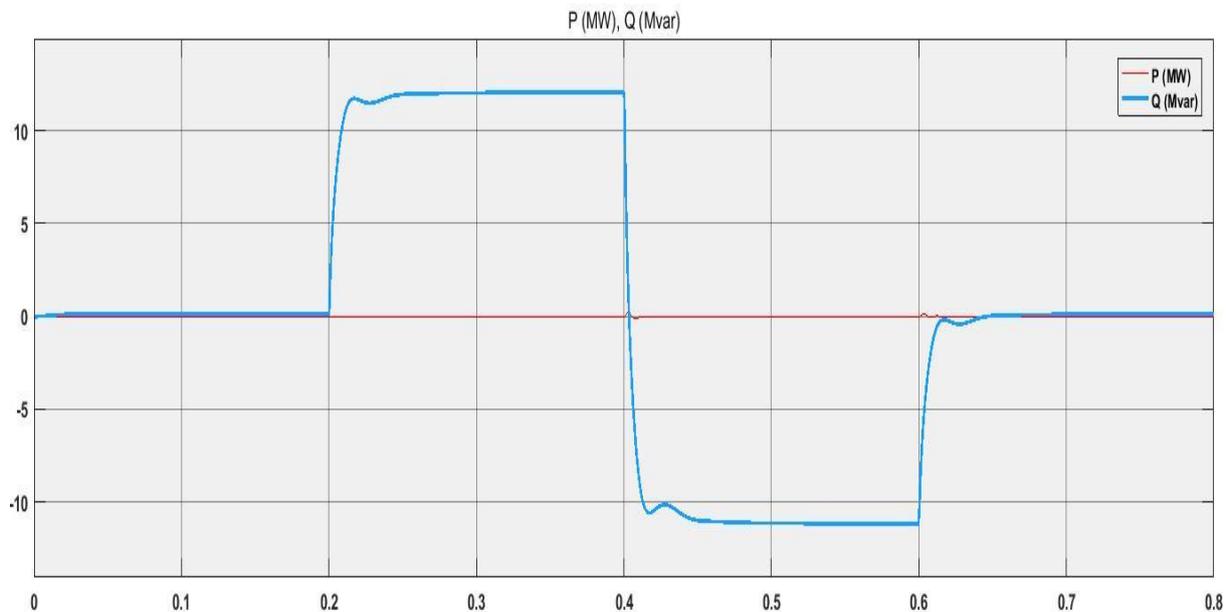


Figure VI.20 puissance active et réactive du STATCOM.

La figure IV.20 indique la sortie de puissance active et réactive produit à partir du STATCOM situé à la source de la perturbation. On observe que la tension de la source d'alimentation augmente d'environ 0.03 pu, le STATCOM absorbera environ 20 MVAR du système d'alimentation pour récupérer la tension à bus 09 à 1 pu. Lorsque la tension de la source d'alimentation a diminué d'environ 0,05 pu, le STATCOM injecte environ 20 MVAR pour récupérer la tension à bus_09 à 1 pu.

On observe pendant la période (0s-0.2s) et (0.6s-0.8) que le réseau fonctionne en régime permanent, aucune perturbation sur la tension. Aucune puissance active et réactive n'a été produit par le STATCOM.

DANS l'intervalle de temps (0.2s-0.4s), le STATCOM est amené à se connecter à la charge pour absorber la quantité requise de puissance réactive non requise par la charge pour maintenir sa valeur normale à 1 p.u.

Dans l'intervalle de temps (0.4s-0.6s), le STATCOM est amené à se connecter à la charge pour produire la quantité requise de puissance réactive demandée par la charge pour maintenir sa valeur normale à 1 p.u. Le STATCOM fournit la quantité d'énergie requise en augmentant la tension aux bornes du condensateur cc.

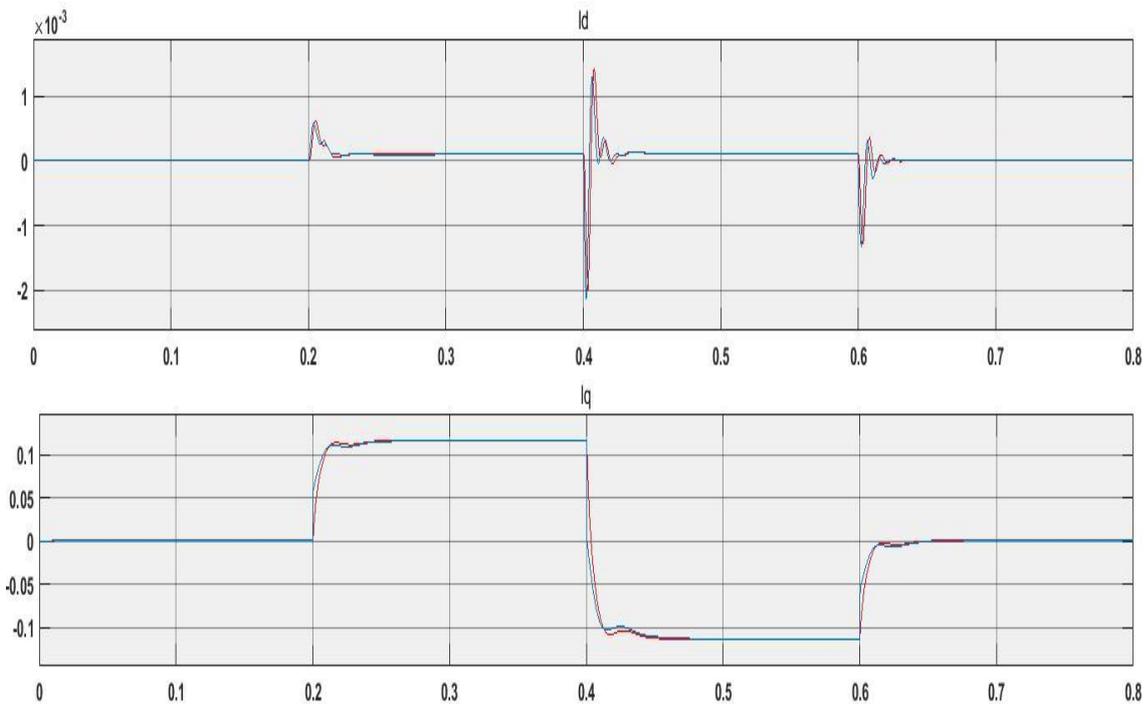


Figure: IV.21 courant 'Id' et 'Iq' référentielle.

Les courants de STATCOM, "Id" et "Iq" suivant leurs grandeurs de références, qui sont calculer à partir des puissances active et réactive de références ce qui valide le bon fonctionnement des régulateurs proportionnels intégraux "PI".

IV.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié et discuté du dispositif d'alimentation personnalisé, c'est-à-dire STATCOM, qui fonctionne à basse tension et en haute tension et de son utilité dans la compensation de la puissance réactive car il injecte la puissance réactive dans la ligne. Le dispositif agit en fait comme un VSC qui a été mis en œuvre du côté charge du système afin d'améliorer le profil de tension du système et de réduire les pertes de puissance. Par conséquent, STATCOM améliore la stabilité de la tension du système.

IV.5 Conclusion générale

Dans cette thèse, une étude approfondie de la compensation de puissance réactive a été réalisée en utilisant un dispositif FACTS connecté en shunt, c'est-à-dire STATCOM. Nous avons étudié le besoin de puissance réactive et sa compensation par STATCOM. Les conclusions générales sont :

La compensation de puissance réactive est utilisée de nos jours pour augmenter la puissance transmissible dans les systèmes d'alimentation en courant alternatif. Des condensateurs et des réacteurs fixes ou à commutation mécanique sont utilisés pour augmenter la transmission de puissance en régime permanent en contrôlant la tension le long des lignes. Cependant, ces dispositifs ne fournissent pas de contrôle à grande vitesse. De plus, le contrôle ne peut pas être déclenché fréquemment car les dispositifs mécaniques s'usent rapidement par rapport aux dispositifs statiques.

STATCOM est une source de puissance réactive contrôlée. Il fournit la génération et l'absorption de puissance réactive souhaitées entièrement au moyen d'un traitement électronique des formes d'onde de tension et de courant dans un convertisseur de source de tension (VSC).

STATCOM présente un certain nombre d'avantages par rapport aux méthodes conventionnelles de compensation, à savoir ; temps de réponse rapide, encombrement réduit, plate-forme de tension optimale, flexibilité opérationnelle accrue et excellentes caractéristiques dynamiques dans diverses conditions de fonctionnement

STATCOM est un meilleur appareil que SVC. Pour un pays comme le Algérie ayant un grand système interconnecté, le SVC est une meilleure option d'un point de vue économique, mais en raison d'autres aspects tels que la marge de stabilité, l'amélioration de la tension et les performances du système électrique, STATCOM est préféré.

Recommandations futures

STATCOM devrait être mis en œuvre dans les usines industrielles, en utilisant des fours à arc qui fonctionnent avec de grands pics aléatoires de demande de puissance réactive et qui provoquent des effets indésirables dans l'usine elle-même et dans le réseau d'alimentation en courant alternatif.

Le fournisseur d'énergie électrique facture également le consommateur pour la demande de puissance réactive. Les STATCOM doivent donc être mis en œuvre dans les applications du système de distribution afin de réduire la demande de puissance réactive.

Les travaux futurs devraient inclure l'introduction du développement de modèles en régime transitoire et en régime permanent pour améliorer respectivement la marge de stabilité transitoire et la capacité de transfert de puissance en régime permanent.

Le convertisseur de source de courant basé sur STATCOM doit être étudié plus avant pour améliorer les performances de STATCOM pour diverses applications.

Des travaux sur HVDC mettant en œuvre le STATCOM devraient être menés.

Références bibliographiques:

[1] KAIDI NOUR EDDINE et MESADI MOHAMMED OUSSAMA< Compensateur statique d'énergie réactive(SVC). Projet fine d'étude Pour l'obtention du diplôme de licence LMD. UNIVERSITE d'ADRAR

[2] NOURANI FAIZA & HADJ MOHAMED NASSIMA < Compensation optimale de l'énergie réactive dans les réseaux de distribution> projet fine d'étude Pour l'obtention du diplôme de licence LMD. Université de SAAD DAHLEB

[3] DJAOUANE HAFSA & KIGMOU DJEMAA<<COMMANDE D'UN STATCOM POUR LA COMPENSATION DE L'ENERGIE REACTIVE DANS UN RESEAUX ELECTRIQUE> projet fine d'étude Pour l'obtention du diplôme de licence LMD. Université Africaine d'Adrar

[4] Mimi Belate l<Compensation dans les Réseaux Electriques par un Système FACTS de Type STATCOM>5ème Conférence Internationale des Energies Renouvelables (CIER– 2017). Université des frères Mentouri, Constantine, Algérie

[5] Zobeidi Messaoud<Amélioration de la sécurité des systèmes électriques à travers l'approche de sensibilité pour l'emplacement optimal des dispositifs FACTS>projet fine d'étude Pour l'obtention du diplôme de licence LMD. UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBES

[6] CHAIB HABIB < Contribution à l'intégration d'une interface FACTS pour une ferme éolienne basée sur des machines synchrones à aimant permanent >projet fine d'étude Pour l'obtention du diplôme de licence LMD. UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBES

[7]Wikipedia « [Unified power flow controller - Wikipedia](#) »

[8] GUERNOUNA NESRINE. & KHETTABI NOUR EL HOUDA< Utilisation d'un D-STATCOM pour la compensation des énergies réactives et des tensions dans le réseau

de distribution d'énergie. > projet fine d'étude Pour l'obtention du diplôme de licence LMD. Centre Universitaire AbdelhafidBoussouf –Mila

[9] Benras Med Amine & Laroui souleymane< Utilisation d'un dispositif STATCOM pour l'amélioration du transit de puissance d'un réseau de transport d'énergie alternatif > UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA. 2014/2015

[10] LIVRE farhad shahnia sumedha rajakaruna arindam ghosh editors< static compensators (STATCOM) in power system>

[11] Hinda Abdelatif ; Bourouina Ahmed< Control D'un Reseaux D'énergie Électrique Par Un Dispositif Facts (Statcom)>. University of ecole polytechnique oran

[12] Barrahal khoukha < Application d'un onduleur multi-niveaux à la compensation de la puissance réactive> Présentée pour l'obtention du diplôme de DOCTORAT en SCIENCES Université de Batna -2- Faculté de Technologie Département d'Électronique

[13] 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.

[14] Nitus Voraphonpiput et Somchai Chatratana, "STATCOM analysis and controller design for power system voltage regulation", transmission and distribution conference & exhibition 2005 IEEE/PER.

[15] Liming Liu, Pengcheng Zhu, Yong Kang, Jian Chen, "Design and dynamic performance analysis of unified power flow controller", publication IEEE 2005.

[16] **Ay Abdelouahab** "Modélisation et Analyse d'Un Compensateur Statique : SVC" mémoire magister, université de Batna 02 /05/2013.

[17] **Djermane Ali** "Contrôle optimal de la tension dans un réseau électrique en utilisant les systèmes de transmission flexibles en courant alternatif (FACTS)" mémoire de Magister, Université D'oum El Bouaghi2009-2010