

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أحمد دراية - أدرار -

UNIVERSITE AHMED DRAIA - ADRAR -  
FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE



جامعة أحمد دراية أدرار

جامعة أحمد دراية أدرار

## MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de MASTER ACADEMIQUE

En : Electrotechnique

Spécialité : Réseaux électriques

Intitulé

# Amélioration de la qualité d'énergie dans un réseau électrique par le dispositif STATCOM

Soutenue le 11 Juin 2017

Devant le jury compose de :

- Président : Dr Harrouz Abdelkader Université Adrar
- Examineur : Mr Dehbi Hassan Université Adrar

Dirigé par :

Mr : Talebi Abderrahmane

Co-encadré par

Mr : Khechab Bachir

Réalisé par :

Mr : LANSARI Yahia

Mr : MOUSSAOUI Ammar

Année Universitaire : 2016 - 2017



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ  
الْحَمْدُ لِلَّهِ الَّذِي  
خَلَقَ السَّمَوَاتِ وَالْأَرْضَ  
وَالَّذِي جَعَلَ الْمَوْتَ  
وَالْحَيَاةَ وَالَّذِي  
يُحْيِي الْمَوْتَى  
وَالَّذِي يُخْرِجُ  
الْحَبَّ وَالذُّرَى  
وَالَّذِي يُخْرِجُ  
الْحَبَّ وَالذُّرَى  
وَالَّذِي يُخْرِجُ  
الْحَبَّ وَالذُّرَى

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ  
{ مَا تَوْفِيقِي إِلَّا بِاللَّهِ عَلَيْهِ تَوَكَّلْتُ وَإِلَيْهِ أُنِيبُ }

## دعاء

يارب

لا تدعني أصاب بالغرور إذا نجحت

و لا باليأس إذا فشلت

بل ذكرني دائما بأن الفشل هو التجارب التي تسبق النجاح

يا رب علمني أن التسامح هو أكبر مراتب القوة

و أن حب الانتقام هو أول مظاهر الضعف

يا رب إذا حرمتني من النجاح أترك لي قوة العناد حتى

أتغلب على الفشل

و إذا جردتني من نعمة الصحة أترك لي نعمة الإيمان

يا رب إذا أسئت إلى الناس أعطني شجاعة الاعتذار

وإذا أساء لي الناس أعطني شجاعة العفو يا رب إذا نسينك

لا تنساني

أمين

يحي لنصاري

# Dédicaces

**En signe de respect et de reconnaissances, Je tiens  
dédier ce modeste travail :**

A l'esprit de ma mère Immaculée  
Qui a été reste toujours leurs orientations et consignes  
mon chemin optimal vers le succès.

A mon très cher père, mes chers frères et chères  
sœurs, en témoignage et en gratitude de leurs  
dévouement, de leurs soutien permanent durant ma  
vie, leurs sacrifices illimités, leurs réconforts moral,  
eux qui ont consenti tant d'effort pour mon  
éducation, mon instruction et pour me voir atteindre  
ce but,

Pour ce qui est la source de mon inspiration et mon  
courage, à qui je dois de la reconnaissance,  
Ma chère épouse,

A mon cher petit Yaakoub,

A tous mes chers amis sans exception,

Et à tous ceux qui m'ont encouragé à terminer ce  
travail notamment mes amis de travail au niveau de la  
Direction de Distribution électricité et gaz d'Adrar.

Yahia Lansari



# Dédicaces

**En signe de respect et de reconnaissances, Je tiens dédier ce modeste travail :**

A ma très chère mère, mon très cher père, mes chers frères et chères sœurs, en témoignage et en gratitude de leurs dévouement, de leurs soutien permanent durant ma vie, leurs sacrifices illimités, leurs réconforts moral.

Pour ce qui est la source de mon inspiration et mon courage, à qui je dois de la reconnaissance,  
Ma chère épouse,

A ma chère petite Rima,

A tous mes chers amis sans exception,

Et à tous ceux qui m'ont encouragé à terminer ce travail notamment mes amis de travail au niveau de la Direction de Distribution électricité et gaz d'Adrar.

Ammar Moussaoui



# Remerciements

Le travail présenté dans ce mémoire a été effectué  
au *Faculté de SEANCE ET TECHNOLOGIE* [l'université  
ADRAR].

Mes remerciements vont tout premièrement à Dieu tout  
puissant pour la volonté, la santé et la patience, qu'il  
nous a donnée durant toute cette année.

Ainsi, nous tenons également à exprimer nos vifs  
remerciements à notre encadreur TALEBI  
Abderrahmane et le co-encadreur Mr Khechab Bachir,  
pour avoir d'abord proposé ce thème, pour suivi  
continuel tout ce long de la réalisation de cette thèse et  
qui n'a pas cessée de nous donner ses conseils et  
remarques.

Nos sincères remerciements aux messieurs les membres  
du jury pour l'honneur qu'ils me font en participant  
au jugement de ce travail.

Nous tenons à remercier vivement toutes personnes  
qui nous ont aidé à élaborer et réaliser ce mémoire,  
ainsi à tous ceux qui nous aidés de près ou de Coin  
à accomplir ce travail.



Yahia Lansari  
Ammar Moussaoui

---

## Sommaire

<b>Introduction général</b>	01
<b>Chapitre I: Qualité de l'énergie électrique</b>	
I-1 Introduction	03
I-2 Qualité de tension	03
I-3 Dégradation de la qualité de la tension	04
I-3-1 Variation ou fluctuation de la fréquence	04
I-3-2 fluctuations de la tension (Flicker)	04
I-3-3 Creux de tension	05
I-3-4 Interruption courte ou coupure brève	05
I-3-5 Bosse de tension	06
I-3-6 Chute de tension	06
I-3-7 Tension et/ou courant transitoire	07
I-3-8 Déséquilibre de tension	08
I-3-9 Perturbations Harmonique et inter harmonique	09
I-4 Puissance transmise par une ligne électrique	09
I-5 Compensation d'énergie réactive	11
I-6 Moyens de compensation réactive	12
I-6-1 Les moteurs synchrones	12
I-6-2 Les batteries des condensateurs	12
I-6-2-1 Types de batteries	12
I-6-2-1-1 Compensation par batterie en shunt	12
I-6-2-1-2 La compensation par batterie en série	14
I-6-2-2 Les avantages des batteries	15
I-6-2-3 Les inconvénients des batteries	15
I-6-3 Compensateurs statiques de puissance réactive	16
I-6-4 Compensation réactive dans une ligne électrique	16
I-6-5 Compensateur shunt au point milieu	16
I-7 Conclusion	18
<b>Chapitre II: Concept de base des systèmes FACTS</b>	
II-1 Introduction	19
II-2 Concept générale et définition	19
II-3 Différentes catégories des FACTS	19
II-4 Application des dispositifs FACTS dans les réseaux électriques	21
II-5 Fonctionnement des FACTS	22
II-5-1 Réseau de transport	22
II-5-2 Réseaux Industriels	22
II-5-3 Classification des dispositifs FACTS	23
II-5-3-1 Génération I	23
II-5-3-2 Génération II	23
II-5-3-3 Génération III	23
II-6 Compensateurs shunts	23

II-6-1 Compensateurs parallèles à base de thyristors	24
II-6-1-1 Compensateur Statique de Puissance Réactive (CSPR)	24
II-6-1-2 Principe de fonctionnement	25
II-6-1-3 STATCOM	25
II-6-1-4 Avantages du STATCOM	26
II-6-1-4 Avantages du STATCOM	26
II-6-2 Condensateur série commande par thyristor (TCSC)	27
II-6-3 Static Synchronous Series Compensator (SSSC)	27
II-7 Dispositifs FACTS combinés (série-parallèle)	29
II-7-1 Contrôleur de transit de puissance unifié UPFC	29
II-8 Conclusion	30
<b>Chapitre III: Structure et principe de fonctionnement du STATCOM modélisation et commande:</b>	
III-1 Introduction	32
III-2 Principe de fonctionnement	32
III-3 Effet de la compensation shunt(STATCOM)sur le réseau élec	36
III-4 Modélisation du STATCOM	39
III-4-1 Modèle Mathématique Simplifié	39
III-4-2Modèle Mathématique en considérant le circuit DC	41
III-5 Contrôle du STATCOM	44
III-5-1 Détermination des Références	44
III-5-2 Méthode Watt-Var découplée	45
III-5-3 Régulateur PI avec compensation de pôles	47
III-5-4 Régulation de la tension continue $U_{dc}$	48
III-6 Conclusion	49
<b>Chapitre VI : Simulation d'un dispositif STACOM :</b>	
VI-1 Introduction	50
VI-2 Matériels et méthodes	50
VI-3 Description du Système étudié	50
VI-3-1 Les caractéristiques du réseau	50
VI-3-2 Caractéristiques du STATCOM	51
VI- 4 Résultats de simulation	53
VI-5 Conclusion	56
<b>Conclusion générale</b>	57
<b>Bibliographies</b>	58
<b>Annexe</b>	59



## Liste des figures

Figures	N°de page
<b>CHAPITRE I</b>	
Figure I-1 : variation rapide de la tension	04
Figure I-2 : creux de tension	05
Figure I-3 : Chute de tension :Cas d'une consommation alimentée par une ligne depuis une centrale.	06
Figure I-4 : Chute de tension : Cas d'une forte consommation alimentée par une ligne depuis une centrale	06
Figure. I-5 Chute de tension :Cas d'une consommation répartie avec plusieurs centrales	07
Figure I-6 : Exemple de cas de sursensions transitoires	08
Figure I-7: Déséquilibre de tension	08
Figure I-8 : Distorsion provoquée par un seul harmonique	09
Figure I-9 : Réseau électrique alimentant une charge : (a) schéma unifilaire, (b) diagramme des tensions	09
Figure I-10 : Intérêt de la compensation dans l'échange d'énergie	11
Figure I-11 : Représentation d'un système électrique en $\pi$	13
Figure. I-12 Principe de compensation shunt dans un réseau AC (a) sans compensation (b) avec compensation	14
Figure I-13 : Principe de compensation série. (a) sans compensation (b) avec compensation	15
Figure I-14 : ligne électrique avec compensation shunt.	16
Figure I-15 : valeurs des puissances transportées par une ligne pour différentes valeur de K	17
<b>CHAPITRE II</b>	
Figure II-1 : Principaux dispositifs FACTS.	20
Figure II-2 : Puissance transitée entre deux réseaux.	22
Figure. II-3 : Schéma du SVC.	24
Figure II-4 : présentation d'un Compensateur SVC.	25
Figure II-5 : STATCOM, (a) structure de base, (b) schéma équivalent.	26
Figure II-6 : TCSC (a) structure d'un TCSC, (b) Schéma équivalent.	27
Figure II-7 : SSSC (a) structure de base, (b) schéma équivalent.	28
Figure II-8 : Caractéristiques statique du SSSC.	28
Figure II-9: Schéma de base d'un UPFC.	29
Figure II.10 : Dispositif STATCOM	30

Figure II.11 : Dispositif TCSC	30
Figure II.10 : Dispositif SVC	31
<b>CHAPITRE III</b>	
Figure.III-1:Structure de base d'un STATCOM couplé au réseau	32
Figure.III-2: Commande d'un STATCOM	33
Figure.III-3 : Schéma du STATCOM couplé au réseau électrique.	33
Figure.III-4: Courbes simulées du courant et tension sen mode capacitif	35
Figure.III-5: Courbes simulées du courant et tension sen mode inductif	36
Figure. III-6: $Q_s$ en fonction de $P_s$ pour différentes valeurs de $V_{sh}$	37
Figure.III-7: $P_s$ , $Q_s$ , $P_{sh}$ et $Q_{sh}$ en fonction de $V_{sh}$	38
Figure III-8: Schéma équivalent d'un STATCOM connecté au réseau	39
Figure. III-9: Passage du repère $(\alpha, \beta)$ vers le repère $(d, q)$ .	40
Figure. III-10: Schéma équivalent du STATCOM avec Circuit DC	41
Figure. III-11: Identification des Courants de Référence	42
Figure. III-12: Transfert $I_{shd}$ en fonction de $X_1$	46
Figure. III-13: Transfert $I_{shq}$ en fonction de $X_2$	46
Figure. III-14: Régulation et découplage de $I_{shd}$	46
Figure. III-15: Schéma de Régulation du STATCOM (Watt-Var) découplée)	47
Figure. III-16: Schéma bloc de la Régulation PI des courants du STATCOM	47
Figure III-17 : Régulation de la tension continue $U_{dc}$ .	49
<b>CHAPITRE IV</b>	
Figure IV-1 : Module STATCOM partie puissance.	51
Figure IV-2 : Réseau électrique à 500KV.	52
Figure IV-3 : Courbes des tensions et courants en fonction de temps.	53
Figure IV-4 : Tensions $(V_m, V_{ref})$ en fonction de temps.	54
Figure IV-5 : Puissances active et réactive du STATCOM en fonction de	54
Figure IV-6 : Courant $(I_{qm}, I_{qref})$ d'onduleur VSC en fonction de temps	55
Figure IV-7 : Tension $(V_{dc})$ en fonction de temps (s).	56

### Liste des Tableaux

Tableau	N°de page
Tableau II.1 : Différentes des niveaux ascendant de contribution entre les FACTS	21
Tableau II.2 : Résumé le rôle de chacun de ces dispositifs FACTS	21

---

## Liste des Symboles et Abréviations

FACTS	Flexible alternatif curant transmission Systems
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistors
SPS	Stati c Pha se Shifter
IGCT	Insulated Gate Commutated Thyristors
STATCOM	Static Synchronous Compensator
SSSC	Static Synchronous Series Compensator
TCSR	T hyristor Switched Serie Reactor
TCSC	Thyristor-Controlled Series Capacitor.
DVR	Dynamic Voltage Restorer
UPFC	Unified Power Flow Controller
VSC	Voltage Source Converter
PI	Proportionnel Intégral (régulateur)
$V_s$	Tension du jeu de barre de génération (sending voltage).
$V_r$	Tension du jeu de barre de charge (receiving voltage).
$P_s$	Puissance active fournie par la source
$Q_s$	Puissance réactive fournie par la source
$P_r$	Puissance active demandée par la charge
$Q_r$	Puissance réactive demandée par la charge
$P_l$	Puissance active transportée par la ligne
$Q_l$	Puissance réactive transportée par la ligne
$\delta$	Angle de charge entre $V_s$ et $V_r$
$R$	Résistance de la ligne de transport
$X$	Réactance de la ligne de transport
$\theta$	Déphasage du courant de la ligne
$V_{sh}$	Tension (shunt) injectée par le STATCOM
$I_{sh}$	Courant (shunt) injecté par le STATCOM
$R_{sh}$	Résistance du transformateur de couplage shunt du STATCOM
$X_{sh}$	Réactance du transformateur de couplage shunt du STATCOM
$P_{sh}$	Puissance active délivrée par le STATCOM
$Q_{sh}$	Puissance réactive délivrée par le STATCOM
$V_{se}$	Tension (série) injecté par le SSSC
$I_{se}$	Courant (série) injecté par le STATCOM
$U_{dc}$	Tension continu aux bornes du condensateur
$I_{dc}$	Courant dans le circuit continu
d(indice)	La composante sur l'axe d du repère d-q
q(indice)	La composante sur l'axe q du repère d-q
pu (indice)	La grandeur en unité relative (grandeur réduite)

WINTER  
GENERAL

L'évolution des réseaux électriques fut marquée, durant les dernières années, par des nouvelles stratégies de conception, d'exploitation et de contrôle. En effet la solution adoptée, par les plupart des pays pour faire face au problème de croissance rapide de la demande d'énergie électrique se résume dans les points suivants :

- La mise en service de nouvelles centrales plus puissantes.
- le maillage de plus en plus de réseau de transport et de distribution.
- l'échange d'énergie entre pays par l'interconnexions internationales et même intercontinentales.

Cette complexité de structure ; à la base des problèmes actuels rencontrés dans la conduite en ligne et essentiellement l'affaiblissement de la capacité des réseaux à garder stabilité suite un défaut, a favorise l'appel des moyens de contrôle.

Jusqu'à la fin des années quatre-vingt, les seuls moyens permettant des remplir ces fonctions étaient des dispositifs électromécaniques :

- Les transformateurs-déphaseurs à réglage en charge pour contrôle de la puissance active.
- Les bobines d'inductance et les condensateurs commutés par disjoncteurs pour maintien de la tension et la gestion de réactif.

Toutefois, des problèmes d'usure ainsi que leur relative lenteur ne permet pas d'actionner ces dispositifs plus de quelques fois par jour ; ils sont par conséquent difficilement utilisables pour un contrôle continu des flux de puissance.

Une autre technique de réglage des transits de puissances actives et réactive utilisant l'électronique de puissance a fait ses preuves.

Aujourd'hui, grâce à l'amélioration des performances de l'électronique de puissance, on voit apparaître des nouveaux équipements connus sous l'appellation FACTS (Flexible Alternative Current Transmission System) qui permettent d'améliorer la stabilité des réseaux électriques et accroître la puissance de transport des lignes.

Le développement récent des dispositifs FACTS ouvre des nouvelles perspectives pour une exploitation plus efficace des réseaux électriques par action continue et rapide sur les différents paramètres du réseau (tension, déphasage, impédance). Ainsi les transits de puissance seront mieux contrôler et les tension mieux tenus, ce qui permettra d'augmenter les marges de stabilité ou de tendre vers les limites thermiques des lignes.

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

Généralement, le rôle principal des Dispositif FACTS est la compensation de l'énergie électrique à l'intérieur d'un réseau électrique basée sur les trois domaines de recherche suivants :

- ✓ Les problèmes des pertes de puissance, des chutes de tension.
- ✓ L'optimisation de l'écoulement de puissance (Dispatching).
- ✓ La stabilité des tensions.

Dans ce projet, on va étudier la modélisation et l'intégration efficace des dispositifs de compensation dynamique (FACTS) pour l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique notamment les fonctions de contrôle offertes par le STACOM dans la compensation de la puissance réactive et de maintenir de la tension des lignes de transport électriques.

# CHAPITRE I:

## Qualité de l'énergie électrique

## **I-1 Introduction :**

Le problème de la qualité de l'électricité concerne tous les acteurs en présence, qu'ils soient gestionnaires de réseaux, utilisateurs de ces réseaux (producteurs ou consommateurs d'électricité), ou l'intervenants divers (fournisseurs d'électricité ou de services, organismes de régulation...).

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

## **I-2 Qualité de tension :**

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

Pour rappel, la tension possède quatre caractéristiques principales : fréquence, amplitude, forme d'onde et symétrie.

Le maintien de ce niveau de qualité est la responsabilité commune de tous les gestionnaires de réseaux concernés (zone de réglage), qui doivent participer aux réglages primaire de la fréquence.

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

- ✓ Les creux de tension et coupures brèves.
- ✓ Les variations rapides de tension (flickers).
- ✓ Les surtensions temporaires ou transitoires.

Les deux premières catégories posent les problèmes les plus fréquents (plus grande difficulté s'en protéger) [1].



### I-3 Dégradation de la qualité de la tension :

Les perturbations dégradant la qualité de la tension peuvent résulter de :

- Défauts dans le réseau électrique où dans les installations des clients : court-circuit dans un poste, dans une ligne aérienne, dans un câble souterrain, etc., ces défauts pouvant résulter de causes atmosphériques (foudre, givre, tempête...), matérielles (vieillesse d'isolants ...) ou humaines (fausses manœuvres, travaux de tiers ...).
- Installation perturbatrices : Fours à arc, soudeuses, variateurs de vitesse et toutes applications de l'électronique de puissance, téléviseurs, éclairage fluorescent, démarrage ou commutation d'appareils, etc...

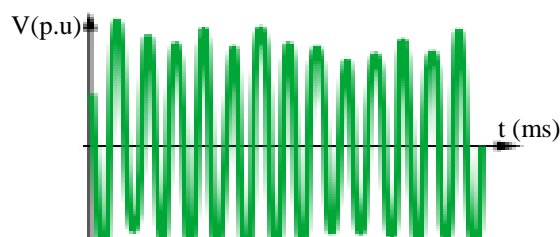
Les principaux phénomènes pouvant affecter la qualité de tension -lorsque celle-ci est présente- sont brièvement décrits ci-après :

#### I-3-1 Variation ou fluctuation de la fréquence :

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

#### I-3-2 fluctuations de la tension (Flicker) :

Des variations rapides de tension, répétitives ou aléatoire (Figure I-1) sont provoquées par des variations rapides des puissances absorbée ou produite par des installations telles que les soudeuses, fours à arc, éoliennes, etc.

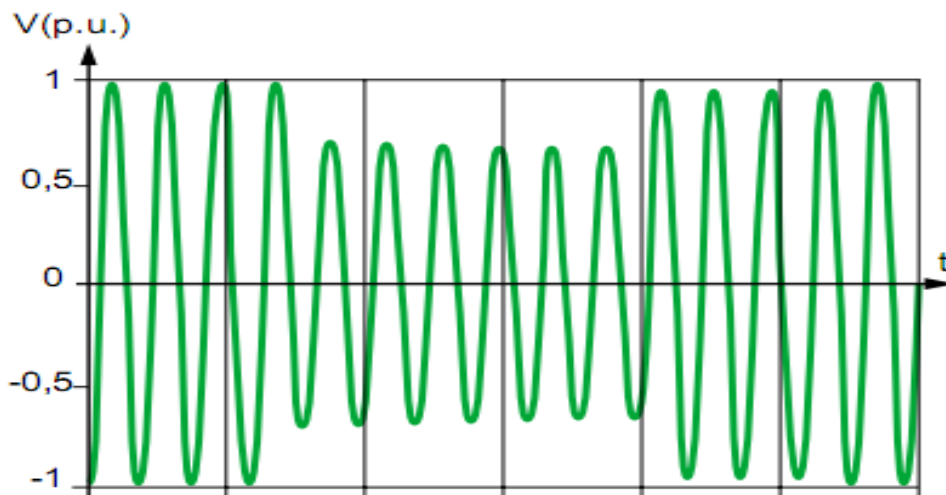


*Figure I-1 variation rapide de la tension*

Ces fluctuations de tension peuvent provoquer un papillotement de l'éclairage (flicker), gênant pour la clientèle, même si les variations individuelles ne dépassent pas quelques dixièmes de pour-cent. Les autres applications de l'électricité ne sont normalement pas affectées par ces phénomènes, tant que l'amplitude des variations reste inférieure à quelque 10% de la tension nominale.

### I-3-3 Creux de tension :

Un creux de tension est une baisse brutale de la tension en un point d'un réseau d'énergie électrique, à une valeur comprise (par convention) ; est produit par de court-circuit survenue dans le réseau général ou dans une installation de la clientèle (Figure I-2). Leur durée peut aller de 10ms à plusieurs secondes, en fonction de la localisation du court-circuit et du fonctionnement des organes de protection (les défauts sont normalement éliminés en 0.1-0.2s en HTA à quelques secondes en HTB).



*Figure I-2 creux de tension*

Ils sont caractérisés par leur : amplitude et durée et peuvent être monophasés ou triphasé selon le nombre de phases concerné.

Les creux de tension peuvent provoquer le déclenchement d'équipements, lorsque leur profondeur et leur durée excèdent certain limites (dépendant de la sensibilité particulière de la charge). Les conséquences peuvent être extrêmement coûteuse (temps de démarrage se chiffrant en heures ; pertes de données informatiques ; dégâts aux produits ; voire aux équipements de production ...).

### I-3-4 Interruption courte ou coupure brève :

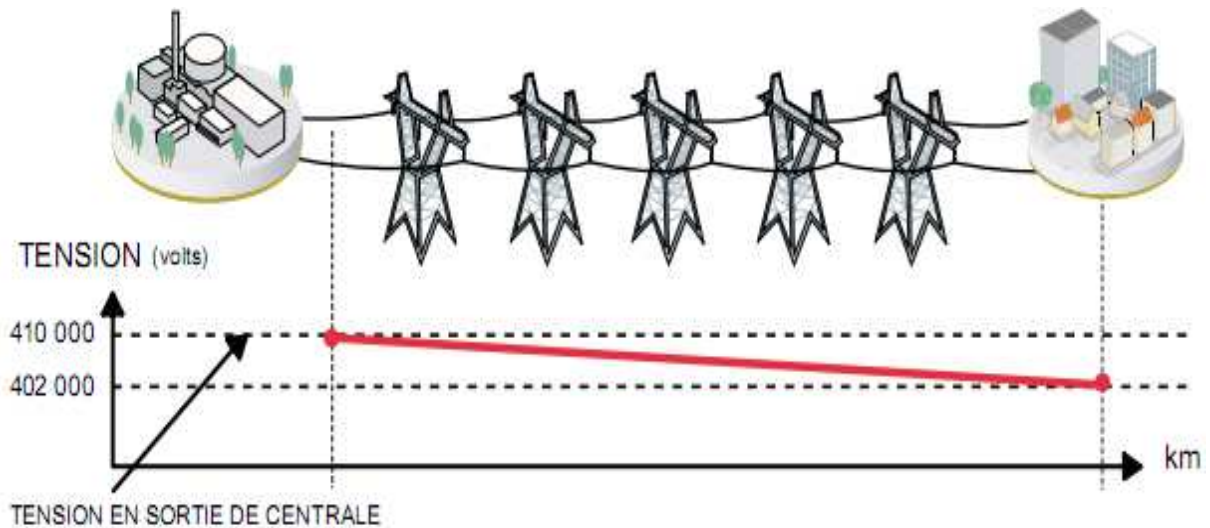
L'interruption courte est la perte complète ou la disparation de la tension d'alimentation pendant une période de temps de 1/2cycle jusqu'à 3s. Elle se produit quand la tension d'alimentation ou le courant de charge diminue moins de 0.1p.u.

### I-3-5 Bosse de tension :

La bosse de tension est une augmentation de la tension au dessus de la tension nominale 1.1p.u pour une durée de 0.5 cycle à 60s. Elle est caractérisée par son amplitude et sa durée. Elle peut causer l'échauffement et la destruction des composants.

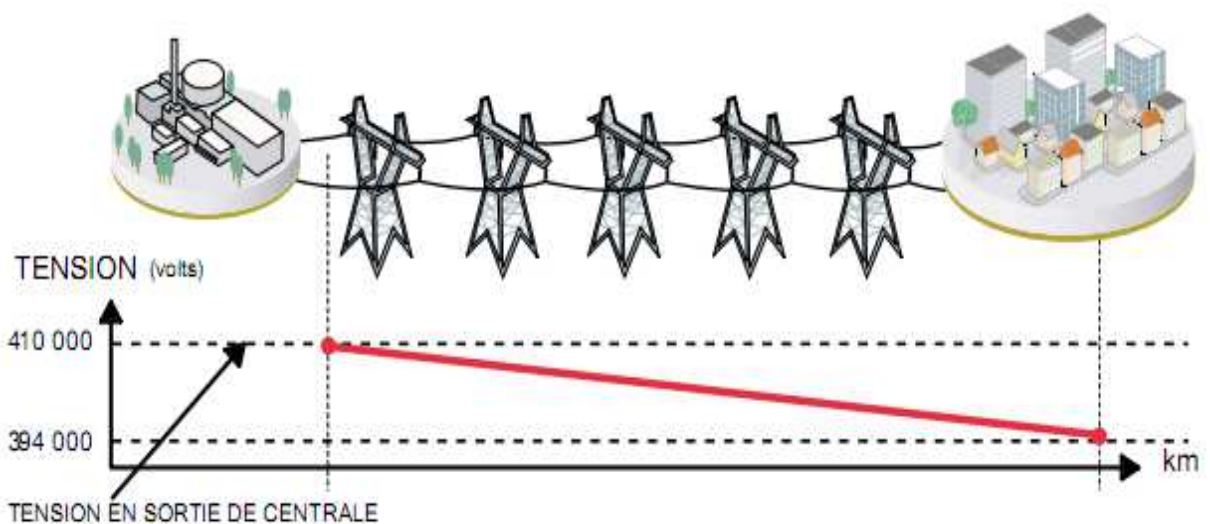
### I-3-6 Chute de tension :

Lorsque le transit dans une ligne électrique est assez important, la circulation du courant dans la ligne provoque une chute de tension (Figure I-3) La tension est alors plus basse en bout de ligne qu'en son origine, et plus la ligne est chargée en transit de puissance, plus la chute de tension sera importante.



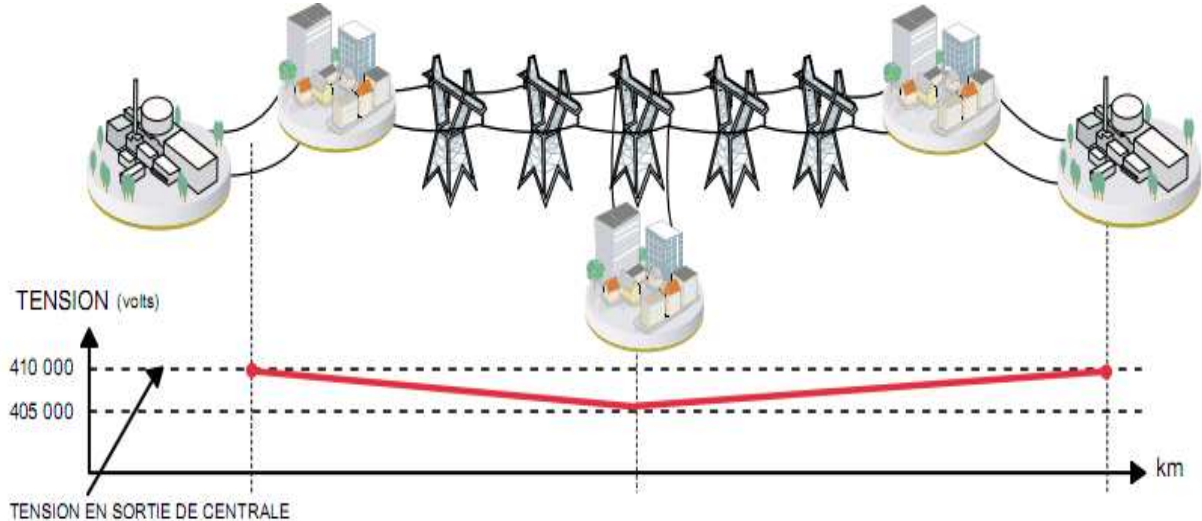
**Figure I-3** Cas d'une consommation alimentée par une ligne depuis une centrale

Si la consommation double, la chute de tension double.



**Figure I-4** Cas d'une forte consommation alimentée par une ligne depuis une centrale

Un réseau dans lequel la consommation est éloignée de la production, présentera un profil de tension différent de celui d'un réseau dans lequel production et consommation sont uniformément réparties (Figure I-5). Chaque centrale impose la tension à sa sortie, et la tension évolue dans le réseau en fonction de la consommation alimentée.



**Figure I-5 Cas d'une consommation répartie avec plusieurs centrales**

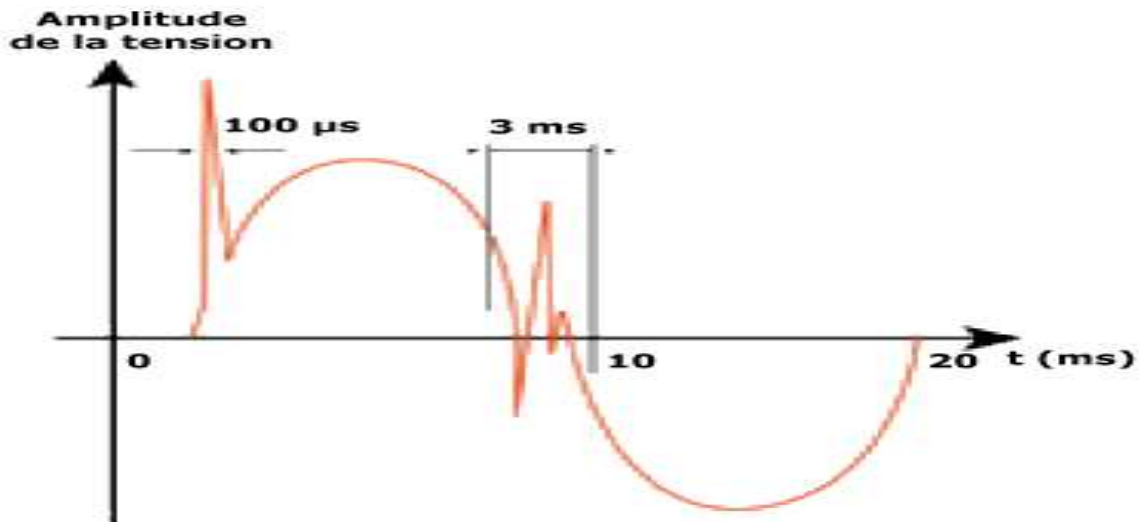
C'est pourquoi dans les réseaux maillés HTB, la tension est différente suivant de l'endroit où l'on se trouve. A la pointe de consommation, la tension est forte aux nœuds du réseau où les centrales débutent, et relativement basse aux points de consommation éloignés des centrales.

Figure (I-3) (I-4) (I-5) sont valables pour un instant donné, à un niveau de consommation donné.

Lorsque la consommation varie au cours du temps, la tension évolue, baissant lorsque la consommation augmente, remontant lorsque la consommation diminue. Le fait que la tension ne soit pas identique en tout point du réseau est normal. Cette différence est compensée par des réglages de tension réalisés dans les postes de transformation. Cela permet de garantir que la tension reste dans la plage admissible en tout point de livraison [1].

### **I-3-7 Tension et/ou courant transitoire :**

Les surtensions transitoires illustrées sur la figure (I-6) sont des phénomènes brefs, dans leur durée et aléatoires dans leur apparition. Elles sont considérées comme étant des dépassements d'amplitude du niveau normal de la tension fondamentale à la fréquence 50Hz ou 60Hz pendant une durée inférieure à une seconde. Quelques équipements tels que les dispositifs électriques sont sensibles aux courants/tensions transitoires.

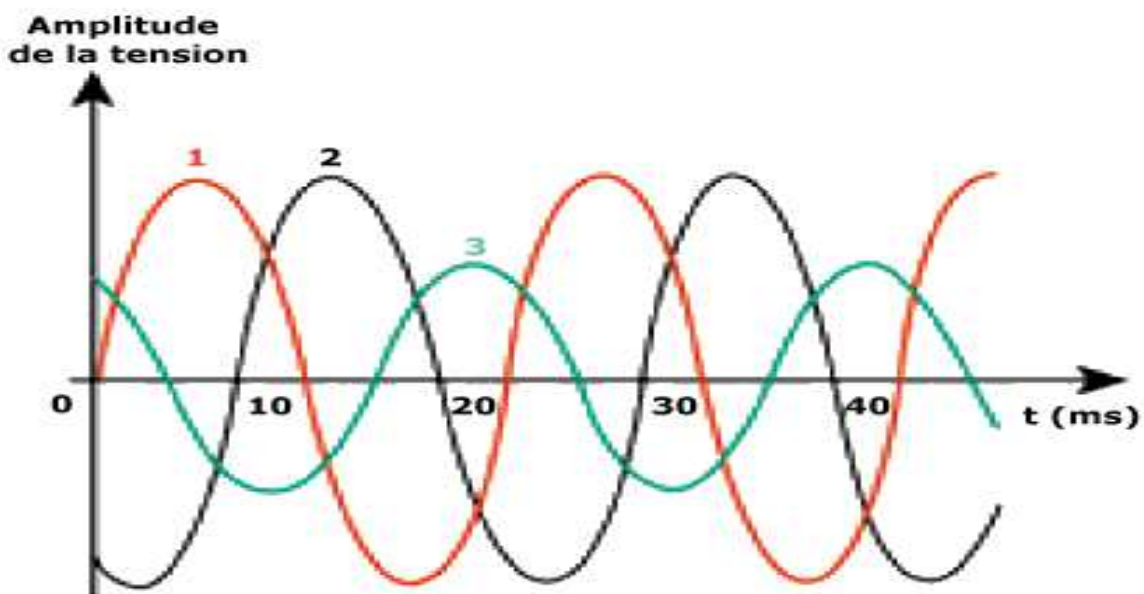


*Figure I-6 Exemple de cas de surtensions transitoires*

### I-3-8 Déséquilibre de tension :

Un récepteur électrique triphasé, qui n'est pas équilibré et que l'on alimente par un réseau triphasé équilibré conduit à des déséquilibres de tension dus à la circulation de courants non équilibrés dans les impédances du réseau (Figure I-7). Ceci est fréquent pour les réceptrices monophasées basses tensions. Mais cela peut également être engendré, à des tensions plus élevées, par des machines à souder, des fours à arc.

Un système triphasé est déséquilibré lorsque les trois tensions ne sont pas égales en amplitude et/ou ne sont pas déphasées les unes des autres de  $120^\circ$

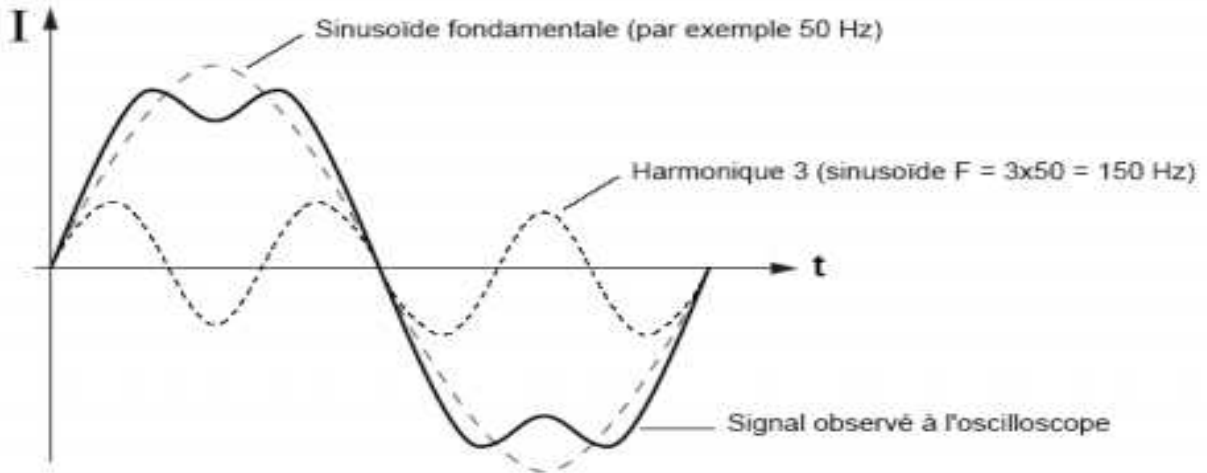


*Figure I-7 Déséquilibre de tension*

### I-3-9 Perturbations Harmonique et inter harmonique :

On entend par harmonique, toute perturbation non transitoire affectant la forme d'onde de tension du réseau électrique.

Les harmoniques sont des composantes dont la fréquence est un multiple de la fréquence fondamentale Figure (I-8), qui provoquent une distorsion de l'onde sinusoïdale. Ils sont principalement dus à des installations non linéaires telles que les convertisseurs ou les grandeurs électroniques, les fours à arc.



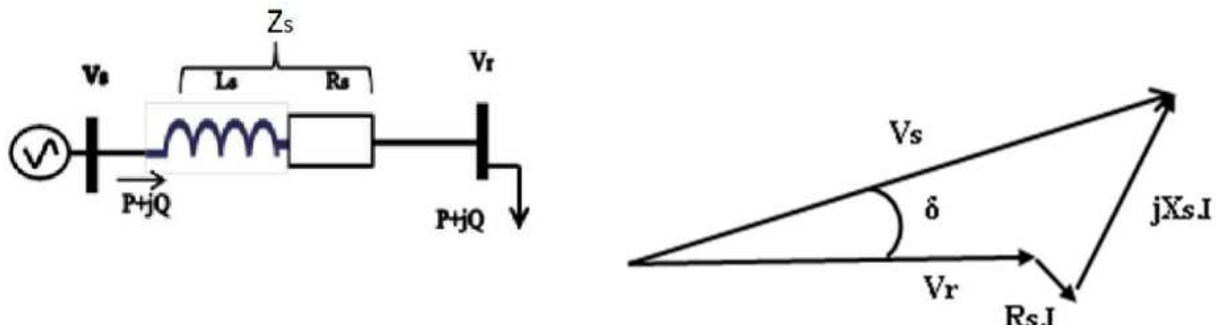
*Figure I-8 Distorsion provoquée par un seul harmonique*

Des niveaux élevés d'harmoniques peuvent causer un échauffement excessif de certains équipements, par exemple de condensateurs ou de machines tournantes, et peuvent perturber le fonctionnement de systèmes électroniques.

### I-4 Puissance transmise par une ligne électrique :

L'énergie électrique est transportée par des lignes électriques de capacités limitées à cause des limites thermiques des câbles, des tensions appliquées aux bornes et de l'angle de charge.

La figure (I-9) représente une ligne électrique alimentant une charge ( $P + jQ$ ) :



*Figure I.9 : Réseau électrique alimentant une charge,*  
 (a) schéma unifilaire, (b) diagramme des tensions

En prenant la tension aux bornes de la charge comme référence des phases (figure(I.9.b)) et en négligeant la résistance  $R_s$ , La puissance apparente demandée par la charge sera donnée par l'équation (I.1):

$$s_r = P + jQ = v_r i \quad (I.1)$$

Avec  $I = \frac{V_s - V_r}{Z_s}$

$$P = \frac{V_s \cdot V_r}{X_s} \sin \delta \quad (I.2)$$

Avec  $\delta = \delta_s - \delta_r$

$$Q = \frac{V_s \cdot V_r}{X_s} \sin \delta - \left( \frac{V_r^2}{X_s} \right) \quad (I.3)$$

La relation entre la tension au jeu de barres de charge et le courant de charge  $I$  est décrite par la droite de la figure (I.4) appelée ligne de charge du système qui est définie par l'équation d'une droite qui passe par  $V_s$  et de pente ( $-Z_s$ ) :

$$V_s - V_r = Z_s \cdot I \iff V_r = -Z_s \cdot I + V_s \quad (I.4)$$

On peut démontrer facilement le besoin du maintien de la tension aux bornes de la charge pour permettre un maximum de puissance à transmettre. Si la charge varie et aucune précaution n'est prise pour maintenir la tension  $V_r$  égale à  $V_s$  alors depuis le diagramme de phase de la figure (I-9 b) :

$$V_r = V_s \cos \delta \quad (I.5)$$

En remplaçant (I.5) dans (I.2) en aura :

$$P = \frac{V_s^2}{X_s} \sin \delta \cdot \cos \delta = \frac{V_s^2}{X_s} \sin 2\delta \quad (I.6)$$

Dans ce cas en ne peut transporter qu'une puissance maximale pour un angle  $\delta = 45^\circ$  égale à :

$$P_{\max} = \frac{V_s^2}{2X_s} \quad (I.7)$$

Dans le cas où on maintient la tension  $V_r$  égale à  $V_s$  on peut avoir, depuis l'équation (I.2), une puissance maximale:

$$P_{\max} = \frac{V_s^2}{X_s} \quad (I.8)$$

### I-5 Compensation d'énergie réactive :

Les réseaux électriques à 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 active  $P$  et la puissance réactive  $Q$  :

$$S = P + jQ = UI (\cos\delta + j \sin\delta) \quad (I.9)$$

En général, l'écart 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.

$$\frac{\Delta V}{V} \approx \frac{RP + XQ}{V^2} \quad (I.10)$$

La présence 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 (figure I.3). 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) figure (I-10)

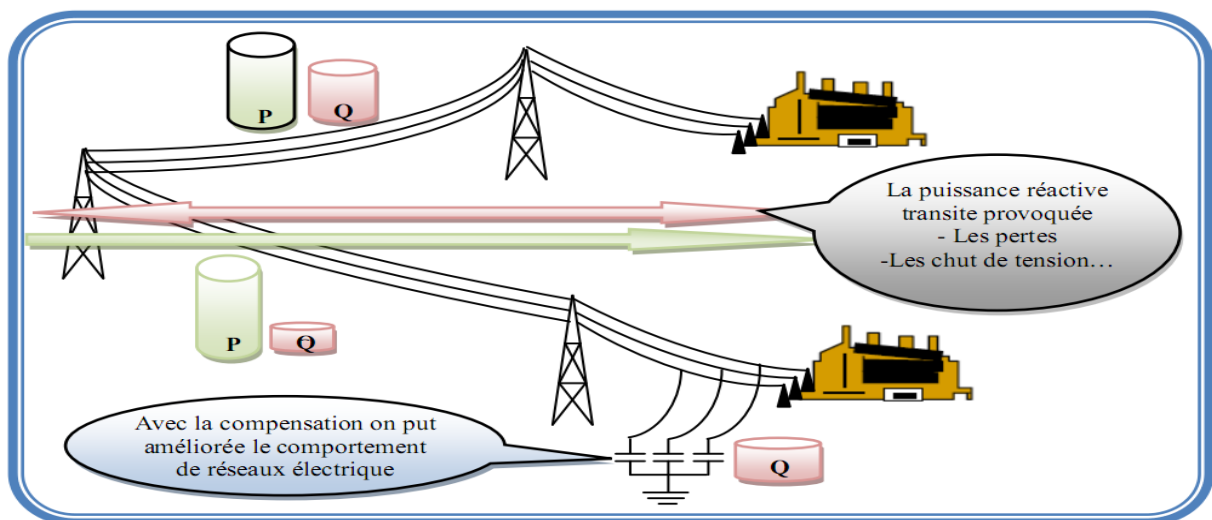


Figure I.10 : Intérêt de la compensation dans l'échange d'énergie électrique.



## **I-6 Moyens de compensation réactive :**

Il y a plusieurs sources qui sont capables de produire de l'énergie réactive, ce qui permet de les utiliser comme des moyens de compensation d'énergie réactive et peut les classer comme suit :

- Les compensateurs rotatifs : qui sont les moteurs synchrones.
- Les compensateurs statiques : qui sont les batteries de condensateurs.

### **I-6-1 Les moteurs synchrones :**

On appelle compensateur synchrone, un moteur synchrone qui tourne à vide et dont la seule fonction est de fournir ou d'absorber de la puissance réactive sur une ligne de transport ou sur un réseau. Pour régulariser la tension d'un réseau, on doit lui fournir une puissance réactive pendant les heures de pointe. Inversement, pendant les périodes creuses, on doit absorber l'excès de puissance réactive générée par les lignes. Le compensateur synchrone permet de compenser ces fluctuations de puissance réactive en ajustant l'excitation selon les besoins.

Le compensateur agit alors comme une énorme capacitance ou inductance variable dont la valeur est réglable en faisant varier le courant d'excitation de son rotor.

### **I-6-2 Les batteries des condensateurs :**

La puissance réactive fournie par la batterie est constante quelles que soient les variations du facteur de puissance de la charge et de la consommation d'énergie réactive de l'installation.

#### **I-6-2-1 Types de batteries :**

On distingue deux types de batteries suivant leur raccordement :

- Le branchement en dérivation pour les batteries shunt.
- Le branchement en série entre la source et la charge pour les batteries en série.

##### **I-6-2-1-1 Compensation par batterie en shunt :**

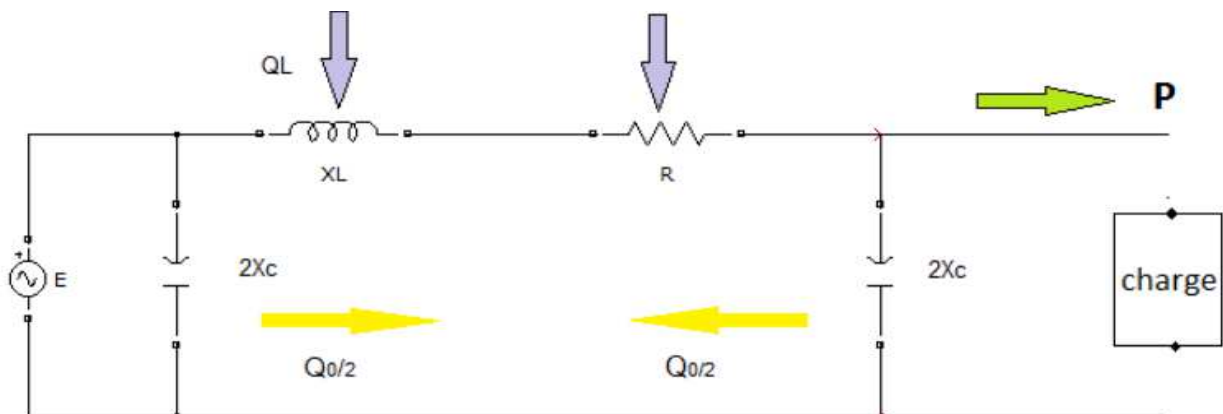
La compensation parallèle (shunt) consiste à enclencher des condensateurs shunt et/ou des inductances shunt connectés entre les phases du réseau et la terre en général par le biais de disjoncteurs à différents endroits sur le réseau pour modifier l'impédance des lignes, dans le but de maintenir des niveaux de tension acceptables suivant l'état de charge du réseau.

Ces éléments permettent de compenser les réseaux en puissance réactive et de maintenir la tension dans les limites admissibles.

Cette technique de compensation est dite passive car elle fonctionne en tout ou rien. C'est-à-dire qu'elle est soit en service, par exemple lorsqu'une inductance shunt est enclenchée, soit complètement hors service lorsque l'inductance est retirée. Lorsqu'elle est en service, aucune modification des inductances ou des condensateurs n'est effectuée pour essayer de contrôler la tension ou l'écoulement de puissance.

D'après la figure (I.3), on voit que ces équipements permettent aussi d'augmenter la puissance active transitée. La puissance transitée peut être augmentée de 50% pour une compensation au niveau de la charge et de 100% pour une compensation au point milieu.

Une ligne HT peut être modélisée par schéma en  $\pi$  représenté par la figure(I.11)



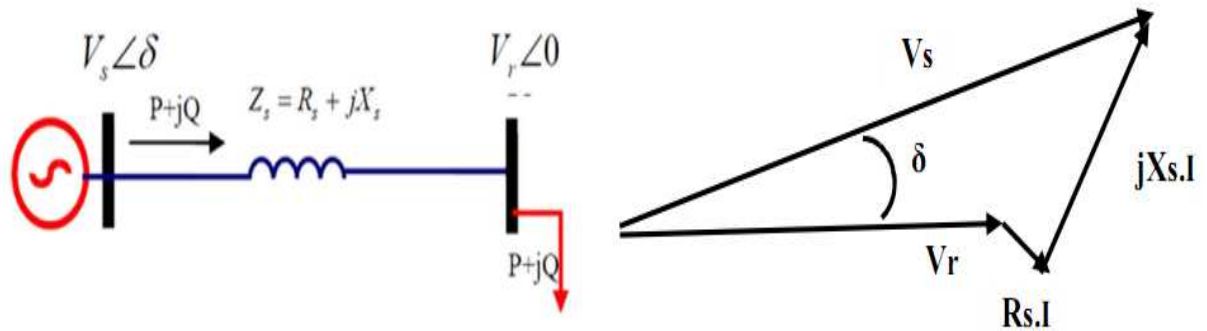
**Figure I.11 : Représentation d'un système électrique en  $\pi$**

Lorsque le réseau n'est pas ou peu chargé, c'est-à-dire que l'impédance de la charge est très élevée, la tension sur la ligne a tendance à monter considérablement (effet Ferranti), cette augmentation de tension est d'autant plus importante que le réseau est exploité à tension élevée et que les lignes sont longues. Pour réduire la tension en bout de ligne, il faut augmenter artificiellement l'impédance caractéristique de la ligne en diminuant sa capacité shunt. Des inductances shunt sont enclenchées à différents postes sur le réseau.

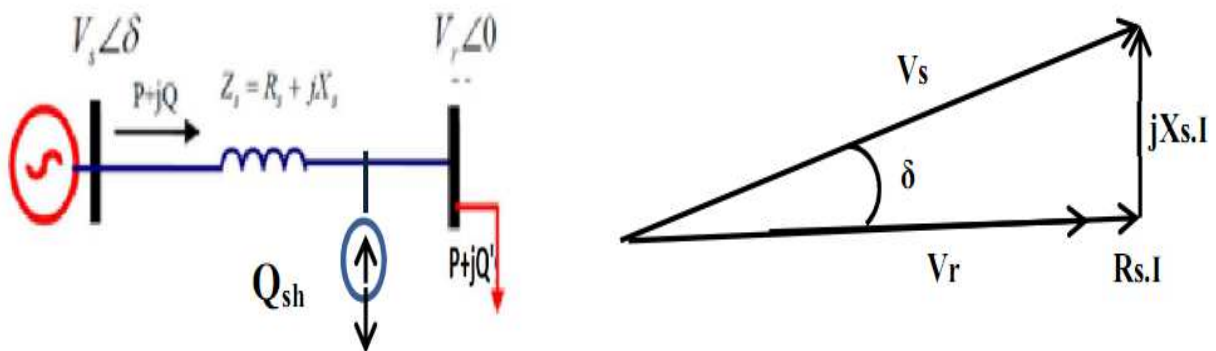
Cependant, lorsque le réseau est fortement chargé, dans ce cas l'impédance de la charge est très faible et la tension a tendance à diminuer sur le réseau. Pour compenser cet effet, il s'agit de diminuer artificiellement l'impédance caractéristique de la ligne pour la rendre égale, ou la plus près possible, de l'impédance de la charge. Les réactances shunt deviennent inutiles.

Pour maintenir la tension dans les limites contractuelles, le gestionnaire du réseau doit donc augmenter la capacité shunt de la Ligne et connecter des condensateurs shunt dans différents postes du réseau selon la charge.

Les bancs de condensateurs vont compenser la puissance réactive absorbée par la charge et ainsi éviter la transmission de puissance réactive sur de longues distances. Ces bancs de condensateurs doivent être connectés ou déconnectés par des disjoncteurs.



(a) sans compensation



$Q' = Q + Q_{sh}$

(b) avec compensation

Figure. I.12 Principe de compensation shunt dans un réseau AC

**I-6-2-1-2 La compensation par batterie en série :**

Cette compensation a pour principe d'insérer une réactance et inductive sur la ligne toujours dans le but d'en augmenter la puissance active transmissible. La ligne étant modélisée par une réactance de type inductive, on comprend aisément que l'on diminue cette réactance en ajoutant une réactance de type capacitive .En conservant le même modèle de ligne. On obtient la compensation série donnée par la Figure (I.13).

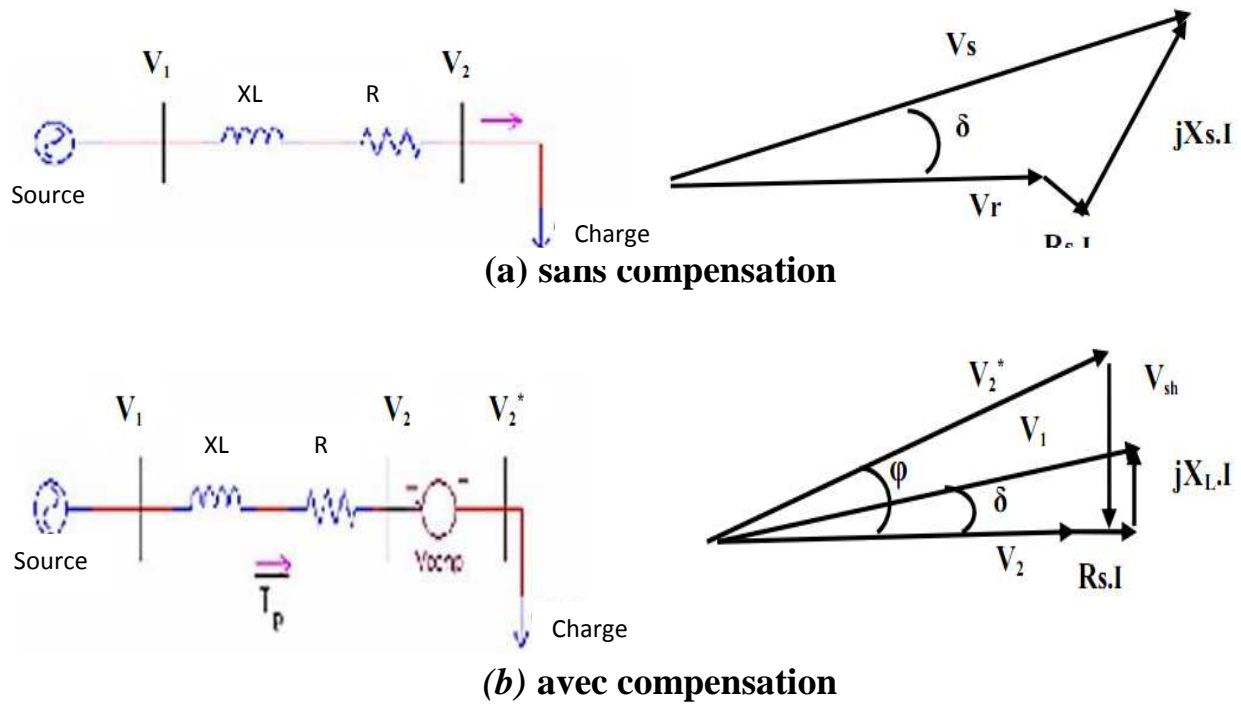


Figure 1.13 : Principe de compensation série.

### I-6-2-2 Les avantages des batteries :

- ✓ L'absence d'usure mécanique et un entretien réduit ;
- ✓ De faibles pertes ;
- ✓ Un faible volume et une installation facile ;
- ✓ Peuvent être fractionnés suivant les besoins ;
- ✓ Soit leur prix est moins élevé que les compensateurs rotatifs, qu'elle que soit la puissance ;

### I-6-2-3 Les inconvénients des batteries :

- ✓ La puissance réactive fournie n'est pas réglable simplement ;
- ✓ La puissance réactive fournie varie avec la tension d'alimentation ;
- ✓ La mise sous tension provoque un violent appel de courant ;
- ✓ Si la fréquence de résonance avec l'inductance de la source est proche de celle d'un harmonique existant, cet harmonique est amplifié et peut devenir gênant ou dangereux ;
- ✓ L'inconvénient le plus important c'est le régime transitoire après l'enclenchement et déclenchement parce que :

L'enclenchement d'une batterie de condensateurs destinée à fonctionner en dérivation sur un réseau est accompagné d'un régime transitoire résultant de la charge de la batterie.

### I-6-3 Compensateurs statiques de puissance réactive :

Les compensateurs statiques de puissance réactive FACTS ( Flexible Alternative Current Transmission System) sont des dispositifs plus récents qui associent des bancs de condensateurs et de bobines à des convertisseurs d'électronique de puissance permettant de régler la puissance réactive délivrée et ainsi la tension du nœud de connexion. Ces appareils ont un temps de réponse très court, de l'ordre de quelques dizaines de millisecondes.

### I-6-4 Compensation réactive dans une ligne électrique :

La compensation réactive représente l'application de tous les dispositifs de puissance réactive dans un réseau électrique pour:

- Maintenir le profil du plan de la tension pour les différents niveaux des puissances transportées.
- Pour améliorer la stabilité du système par augmentation de la puissance maximale transmissible.
- Et/ou pour couvrir le besoin en puissance réactive sur la majorité des plans économiques.

Idéalement la compensation réactive doit modifier l'impédance de charge en agissant sur la capacité et/ou l'inductance de la ligne pour obtenir une impédance de charge virtuelle s'adaptant aux valeurs de la puissance actuelle transportée par la ligne.

### I-6-5 Compensateur shunt au point milieu :

Considérant un réseau électrique simple avec un compensateur shunt idéal connecté au point milieu de la ligne de transport donné sur la figure (I.14).

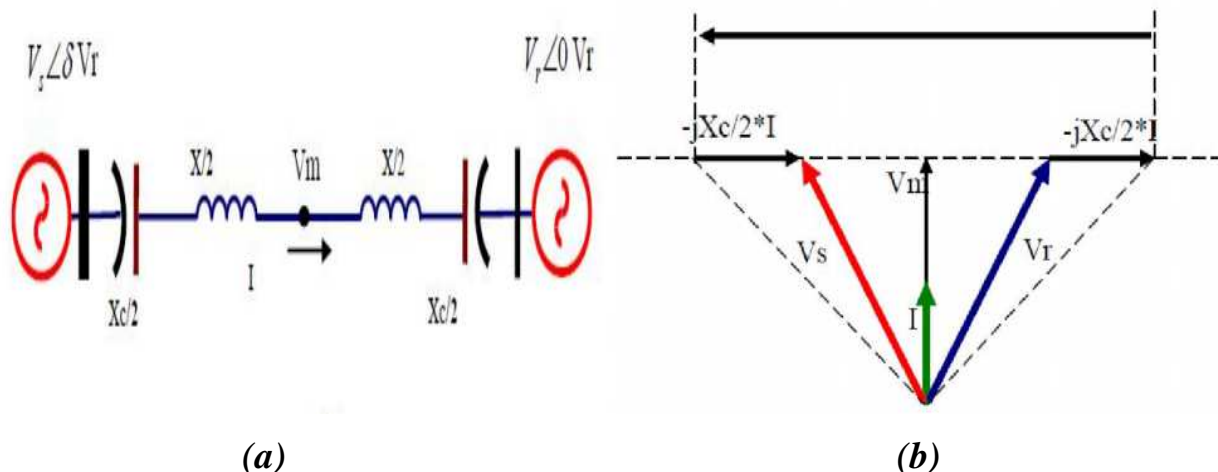


Figure I.14 : ligne électrique avec compensation shunt.

La relation entre les différentes tensions et courants, dans l'ensemble ligne électrique et compensateur série, est expliquée par le diagramme de la figure I.7 (b).

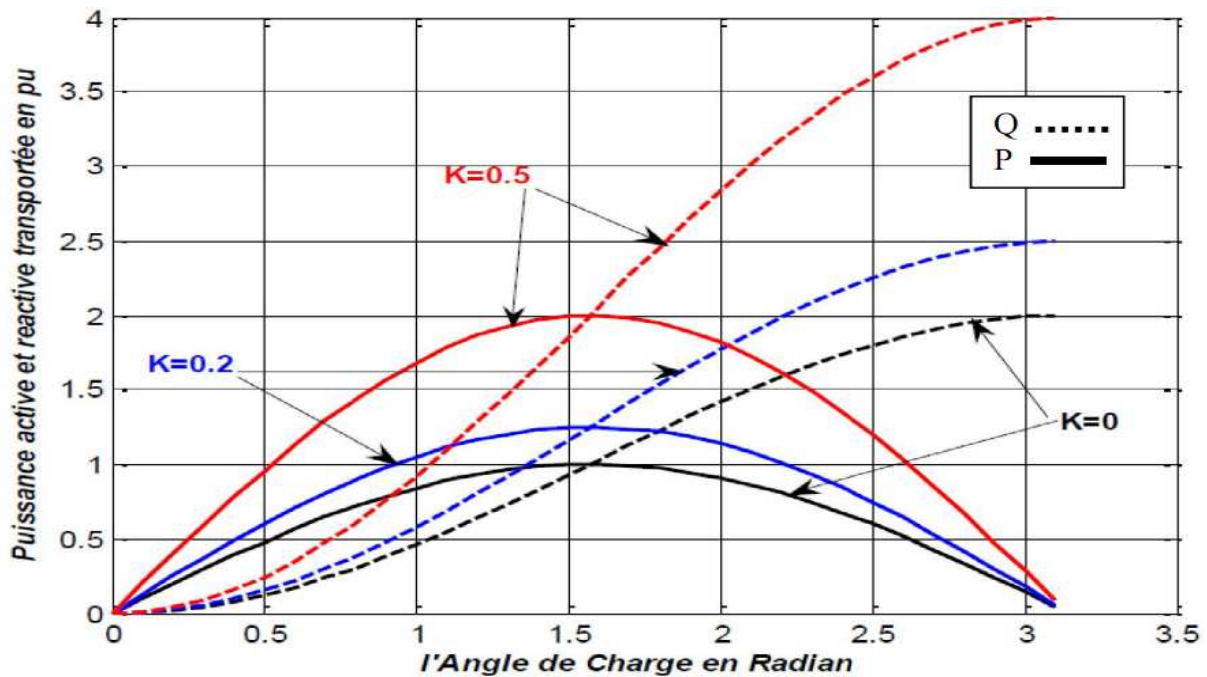
Systématiquement, en insérant ces condensateurs, la réactance effective de la ligne  $X_{\text{eff}}$  doit être diminuée et avoir la nouvelle valeur:

$$X_{\text{eff}} = X - X_c = X(1 - k) \quad (\text{I.11})$$

Avec  $K = X/X_c$  est défini comme le coefficient de Compensation série.

La puissance transportée par une telle ligne est donnée par l'équation (1.12) et varie selon la valeur du degré de compensation  $K$  comme le montre la figure (I. 15).

$$P_c = \frac{V_s \cdot V_r \sin \delta}{X(1-K)} \quad (\text{I.12})$$



**Figure I.15 : valeurs des puissances transportées par une ligne pour différentes valeur de  $K$**

Il est facile d'observer à partir des courbes de la figure (I.15) que la compensation shunt peut augmenter significativement la capacité de transport de la puissance a travers une ligne électrique.

### **I-7 Conclusion :**

La difficulté de bien évaluer les problèmes liés à la circulation d'énergie réactive, en particulier dans les réseaux électriques, pourrait conduire à envisager, à partir de centrale électrique, la solution *définitive* qui serait capable de résoudre, par nature, tous ces problèmes est les compensateurs statiques ; mais tous les types de compensateurs statiques ne présentent pas les mêmes possibilités.

La nouvelle technologie de compensation dynamique (FACTS) utilisées pour résoudre le problème de la compensation seront traitées en détaille dans le suivant chapitre.

CHAPITRE II:  
concept de Base  
des Systèmes

FACTS



## **II.1 Introduction:**

De nos jours ; la technologie "FACTS" s'impose pour les systèmes énergétiques en augmentant leurs capacités de transport, en améliorant le contrôle des paramètres de ces derniers donc leur assurer une flexibilité du transfert de l'énergie et améliorer sa stabilité.

## **II.2 Concept générale et définition :**

Les FACTS «Flexible Alternative Currents Transmission Systems» sont des systèmes flexibles de transmission à courant alternatif incorporant des contrôleurs à base d'électronique de puissance et autres contrôleurs statiques afin d'améliorer la contrôlabilité des réseaux électriques ainsi que la capacité de transfert des lignes.

La technologie FACTS n'est pas limitée en un seul dispositif mais elle regroupe une collection de dispositifs implantés dans les réseaux électriques afin de mieux contrôler le flux de puissance et augmenter la capacité de transit de leurs lignes.

Par action de contrôle rapide de ces systèmes sur l'ensemble des paramètres du réseau: tension, impédance, déphasage ...etc. ils permettent d'améliorer les marges de stabilité et assurer une meilleure flexibilité du transfert d'énergie.

## **II.3 Différentes catégories des FACTS :**

La figure (II.1), représente les grandes catégories des dispositifs FACTS de contrôle des réseaux électriques.

La colonne sur la gauche contient les systèmes conventionnels constitués de composants de base R L C et transformateurs fixes (compensation fixe) ou variable commandés par des interrupteurs mécaniques.

Les dispositifs FACTS contiennent également les mêmes composants mais rapidement commandés avec des interrupteurs statiques et convertisseurs de l'électronique de puissance.

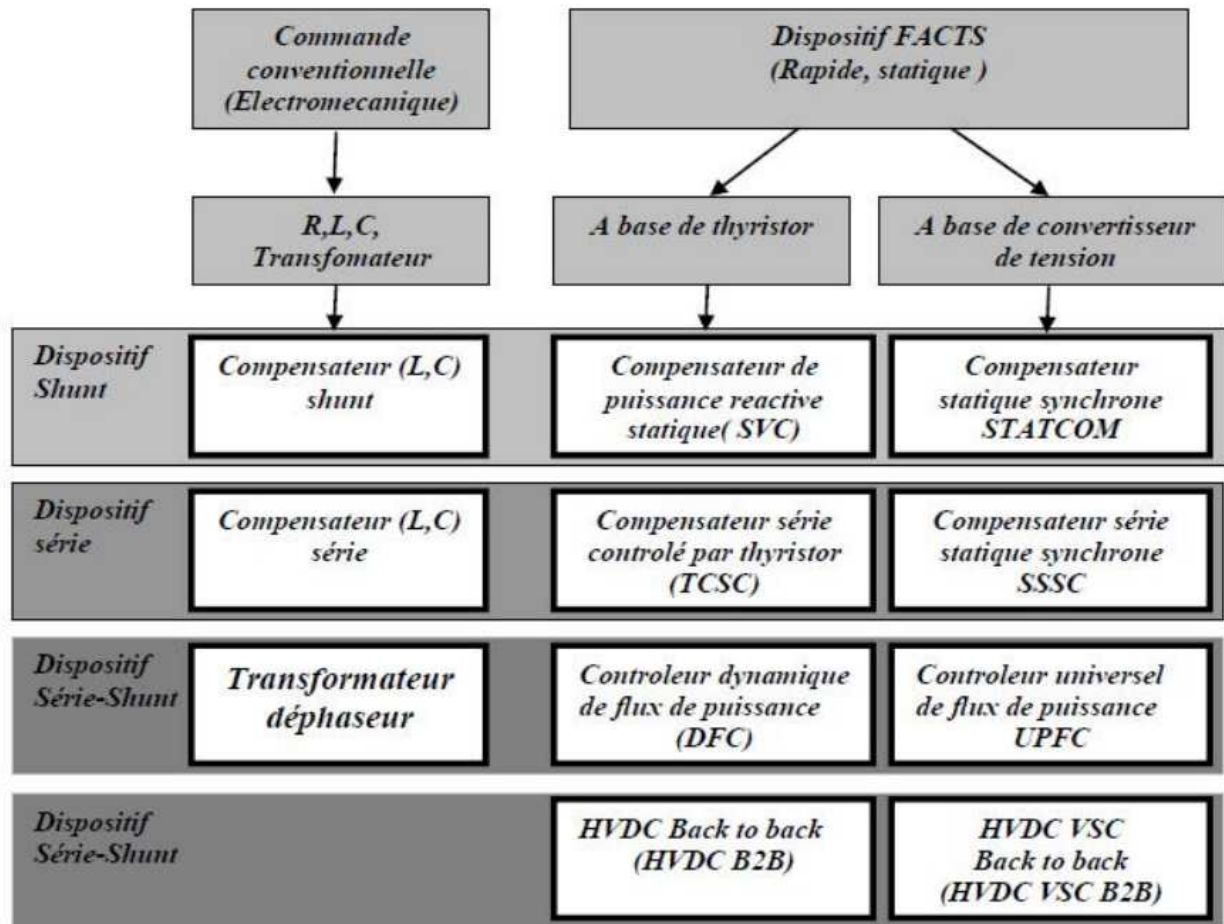


Figure II.1 : Principaux dispositifs des FACTS

La colonne gauche présente les contrôleurs FACTS à base des thyristors ou bien des convertisseurs à thyristor tel 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 prouvé leur fiabilité dans le contrôle des réseaux.

Les dispositifs dans la colonne droite, sont des FACTS les plus avancés avec des convertisseurs de source de tension VSC (voltage source converter) à base des interrupteurs statiques sophistiqués IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistors) ou bien les IGCT (Insulated Gate Commutated Thyristors) tel que le STATCOM, SSSC et l'UPFC.

Ces VSC fournissent ou injectent une tension totalement contrôlable en amplitude et en phase en série ou en parallèle dans le réseau.

Chaque élément de ces colonnes peut être structuré selon sa connexion au réseau.

## II.4 Application des dispositifs FACTS dans les réseaux électriques :

Ces FACTS ont été intégrés depuis des années dans des réseaux où ils ont prouvé leur efficacité.

Les tableaux (II.1) (II.2) résument le rôle de chacun de ces dispositifs, ainsi que leur capacité de contribution pour différentes applications dans les réseaux électriques.

*Tableau II.1: Différentes des niveaux ascendants de contribution entre les FACTS*

	Contrôle d'écoulement de puissance	Contrôle De la tension	Stabilité transitoire	Stabilité dynamique
SVC	*	***	*	**
STATCOM	*	***	**	**
TCSC	**	*	***	**
UPFC	***	***	**	**

*Tableau II.2 : Le rôle des différents dispositifs FACTS*

	Problème	Action à mener	Solutions conventionnel	Dispositifs FACTS
Limite de la Tension	Chut ou sur - tension	Fourniture ou absorption de l'énergie réactive	Condensateurs séries et shunts	SCV STATCOM
Limites thermiques	Surcharge des lignes	Réduction des charges	Ajouter de nouvelles lignes	TCSC UPFC SVC
Courants de boucles	Répartition de La Puissance transférée	Réajustement de la réactance de ligne	Ajouter des Condensateurs en série	TCSC UPFC SVC
Niveaux des Courts-circuits	Courant de court-circuit très élevé	Limitation du courant de court-circuit	Ajouter des Condensateurs en série	TCSC UPFC
Résonances subsynchrones	Emballement des générateurs	Atténuation des oscillations	Compensation série	TCSC

## II.5 Fonctionnement des FACTS :

Un FACTS agit généralement en fournissant ou en consommant dynamiquement de la puissance réactive (courant réactif) sur le réseau. Ceci a pour effet de modifier l'amplitude de la tension à son point de connexion, et par conséquent la puissance active maximal transmissible.

Les FACTS sont utilisés aussi pour le filtrage des courants harmoniques (c'est faux, car ils ont des sources d'harmoniques à cause des composants EP) et la stabilisation de la tension. L'ordre de grandeur de la puissance d'un FACTS va de quelque MVA à quelques centaines de MVA.

Ils s'appliquent dans deux secteurs principaux :

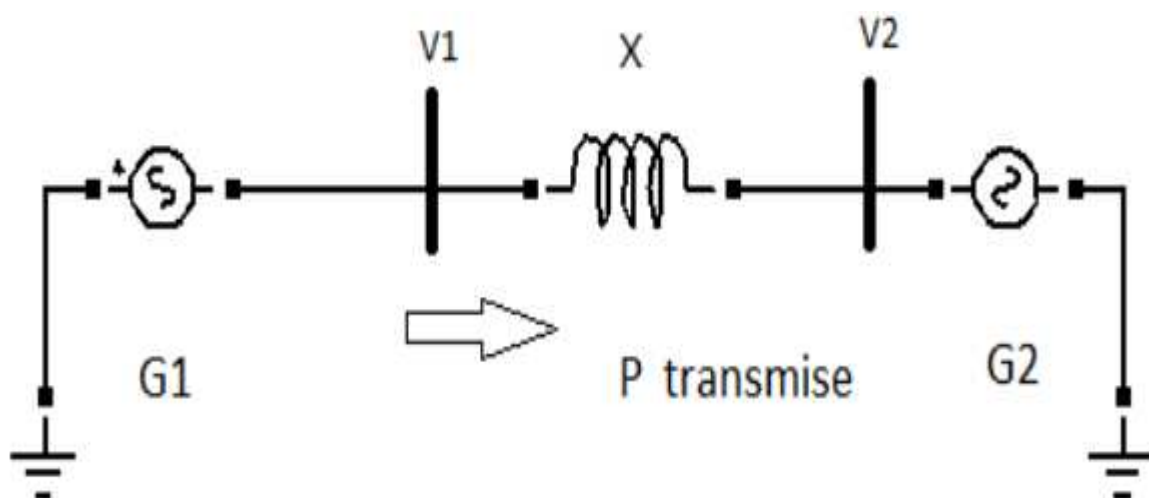
- Réseau de transport
- Réseaux Industriels

### II.5.1 Réseau de transport

Pour améliorer le contrôle, augmenter la capacité des puissances transmissent et assister à la récupération du réseau suite à un défaut.

### II.5.2 Réseaux Industriels

Pour améliorer la qualité de la puissance fournie en un point précis du réseau AC en présence de fluctuations de charge, compensation du flicker pour les fours à arc. Gamme de puissance inférieure à celle d'un réseau de transmission.



*Figure II.2 : Puissance transitée entre deux réseaux.*

## **II. 5.3. Historique des dispositifs FACTS :**

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

### **II. 5.3.1 Premier Génération :**

Basée sur les thyristors classiques. Ceux-ci sont généralement utilisés pour enclencher ou déclencher les composants afin de fournir ou absorber de la puissance réactive dans les transformateurs de réglage.

### **II. 5.3.2 Deuxième Génération :**

Dite avancée, est née avec l'avènement des semi-conducteurs de puissance commander à la fermeture et à l'ouverture, comme le thyristor GTO. Ces éléments sont assemblés pour former les convertisseurs de tension ou de courant afin d'absorber ou d'injecter des courants (tensions) contrôlables dans le réseau.

### **II. 5.3.3 Troisième Génération :**

FACTS utilisant des composants hybrides et qui sont adaptée à chaque cas. Contrairement aux deux premières générations, celle-ci n'utilisent pas des dispositifs auxiliaires encombrants tels que des transformateurs pour le couplage avec le réseau.

## **II.6 Compensateurs shunts :**

Les compensateurs shunts injectent du courant au réseau via le point de leur raccordement. Leur principe est basé sur une impédance variable est connectée en parallèle sur un réseau, qui consomme (ou injecte) un courant variable.

Cette injection de courant modifie les puissances actives et réactives qui transitent dans la ligne. Les compensateurs shunts les plus utilisés sont les SVC et les STATCOM.

## II.6.1 Compensateurs parallèles à base de thyristors :

### II .6.1.1 Compensateur Statique de Puissance Réactive (CSPR) :

SVC (static var compensator) est un équipement de compensation parallèle à base d'électronique de puissance (Thyristor) capable de réagir en quelques cycles aux modifications du réseau.

Il permet entre autres la connexion de charges éloignées des centres de production et la diminution des effets des défauts ou des fluctuations de charges.

Un SVC est généralement constitué d'un ou plusieurs batteries de condensateurs fixes (CF) commutables soit par disjoncteur, ou bien par thyristors (Thyristor Switched Capacitor TSC) et d'un banc de réactances contrôlable (Thyristor controlled Reactor TCR) et ou bien par des réactances commutables (Thyristor Switched Reactor TSR), et d'autre part on trouve des filtres d'harmoniques.

Pour avoir un temps de réponse plus rapide et pour éliminer les parties mécaniques, les TCR (Réactances commandés par thyristor) ont fait leur apparition vers la fin des années soixante.

Elles sont constituées d'une inductance en série avec un gradateur (deux thyristor tête-bêche). Chaque thyristor conduit pendant moins demi-période de la pulsation du réseau.

Le retard à l'amorçage permet de régler l'énergie réactive absorbée par le dispositif. (Figure II.3)

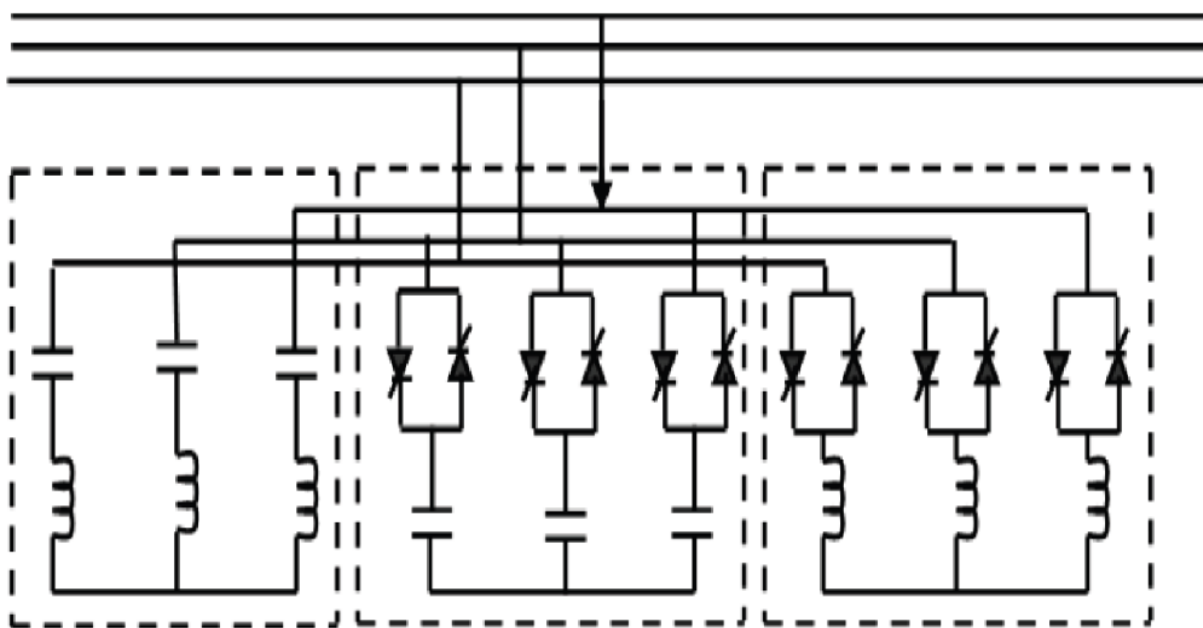
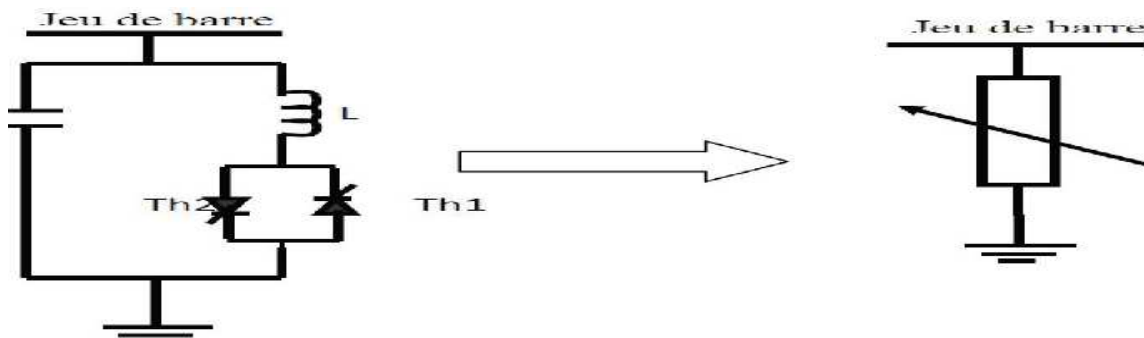


Figure. II.3 : Schéma du SVC.

### II .6.1.2 Principe de fonctionnement :

La figure (II.4) donne une représentation schématique monophasée d'un compensateur statique. Il est composé d'un condensateur avec une réactance capacitive  $X_c$  et d'une bobine d'inductance avec la réactance  $X_L$ . Ce système utilise l'angle d'amorçage  $\alpha$  des thyristors pour contrôler le courant dans la réactance alors que le contrôle de la puissance réactive par cette méthode est rapide et d'une façon continu.



*Figure II.4 : présentation d'un Compensateur SVC.*

Le SVC présente plusieurs avantages :

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

### II.6.1.3 STATCOM :

C'est en 1990 que le premier STATCOM a été conçu, c'est un convertisseur de tension à base de GTO ou de IGBT alimenté par des batteries de condensateur, l'ensemble est connecté parallèlement au réseau à travers un transformateur de couplage (Figure (II.5a)).

Ce dispositif est l'analogue d'un compensateur synchrone; car il n'a pas d'inertie mécanique présente alors des meilleures caractéristiques telles que sa dynamique rapide, son faible coût d'installation et de sa maintenance devant les compensateurs synchrones.

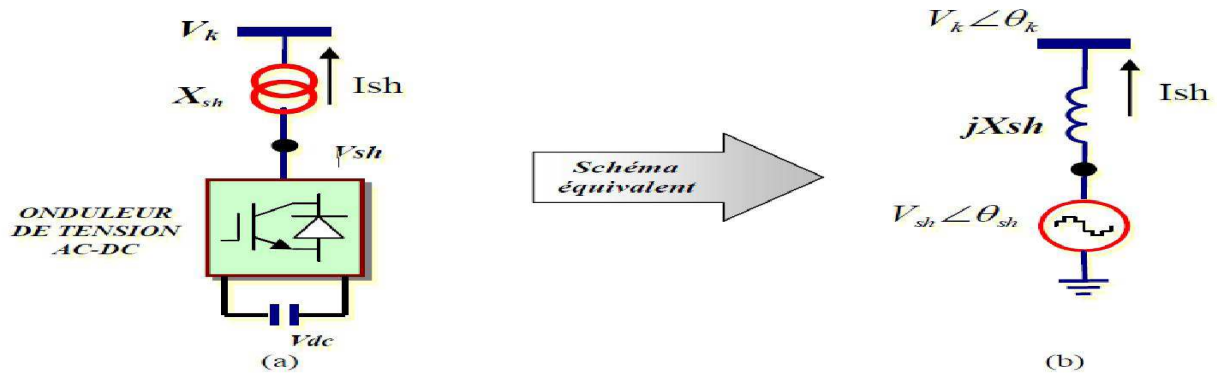


Figure II.5 : STATCOM, (a) structure de base, (b) schéma équivalent.

Le STATCOM permet le même contrôle qu'un SVC mais avec plus de robustesse, ce dispositif est capable de délivrer la puissance réactive même si la tension au jeu de barres (nœud de connexion) est très faible, d'après sa caractéristique en constate que le courant maximal du STATCOM est indépendant de la tension du nœud.

Pour un STATCOM idéal, n'ayant pas des pertes actives, l'équation (II.1) décrit le transfert de puissance réactive dans le réseau électrique.

Si  $|V_k| > |V_{sh}|$ ,  $Q_{sh}$  devienne positive et le STATCOM absorbe la puissance réactive.

Si  $|V_k| < |V_{sh}|$ ,  $Q_{sh}$  devienne négative et le STATCOM fournit la puissance réactive.

$$Q_{sh} = \frac{|V_k|^2}{X_{sh}} - \frac{|V_k||V_{sh}|}{X_{sh}} \cos(\theta_k - \theta_{sh}) = \frac{|V_k|^2 - |V_k||V_{sh}|}{X_{sh}} \quad (II.1)$$

#### II.6.1.4 Avantages du STATCOM :

##### ► Bonne réponse à faible tension :

Il est capable de fournir son courant nominal, même lorsque la tension est presque nulle.

##### ► Bonne réponse dynamique :

Le système répond instantanément, l'étendue de la plage de l'opération est plus large qu'avec un SVC classique.

Pour un contrôle optimal de la tension, les phases sont contrôlées séparément pendant les perturbations du système. Un design modulaire du convertisseur permet une adaptation pour une grande plage de puissances nominales.



## II.6.2 Condensateur série commande par thyristor (TCSC)

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 (II.6).

Connecte en série avec le réseau pour contrôler le flux de puissance et d'élever la capacité de transfert des lignes en agissant sur la réactance  $X_{TCSC}$  qui varie selon l'angle de retard à l'amorçage des thyristors  $\alpha$  donné par l'équation (II.2).

Ce type de compensateur est apparu au milieu des années 80.

$$X_{TCSC}(\alpha) = \frac{jL\omega}{\frac{2}{\pi}(\pi - \alpha + \frac{\sin(2\alpha)}{2}) - LC\omega^2} \quad (II.2)$$

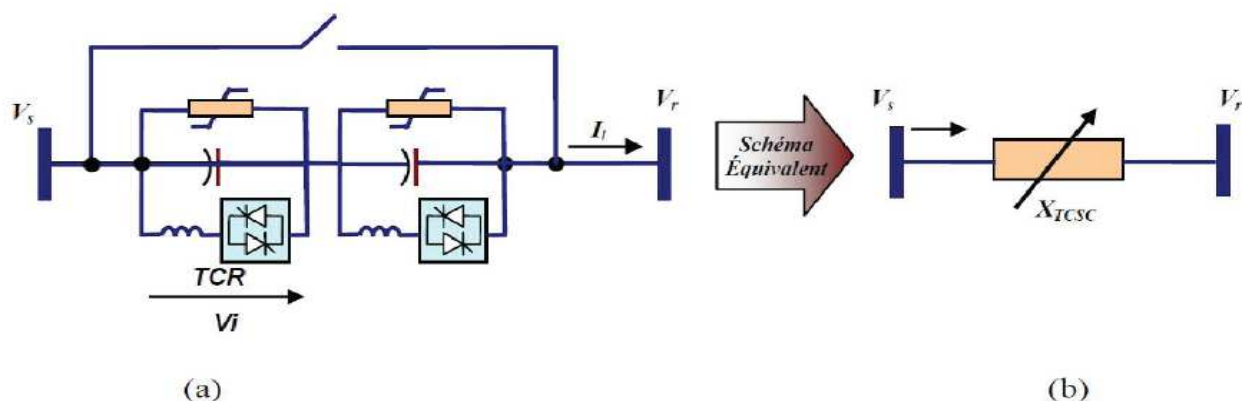


Figure II.6 : (a) structure d'un TCSC, (b) Schéma équivalent.

La puissance transmise entre deux jeux de barres du réseau est donné par l'équation (II.3)

$$P_{sr} = \frac{|V_s||V_r|}{X_{TCSC}} \cdot \sin(\theta_s - \theta_r) \quad (II.3)$$

## II .6.3 Static Synchronous Series Compensator (SSSC)

C'est l'un des plus important dispositifs FACTS; similaire à un STATCOM mais avec un tension de sortie injectée en série dans la ligne, son schéma de principe est donné par la figure (II.7).

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 detensions et maintenir ces dernières à des niveaux constants.

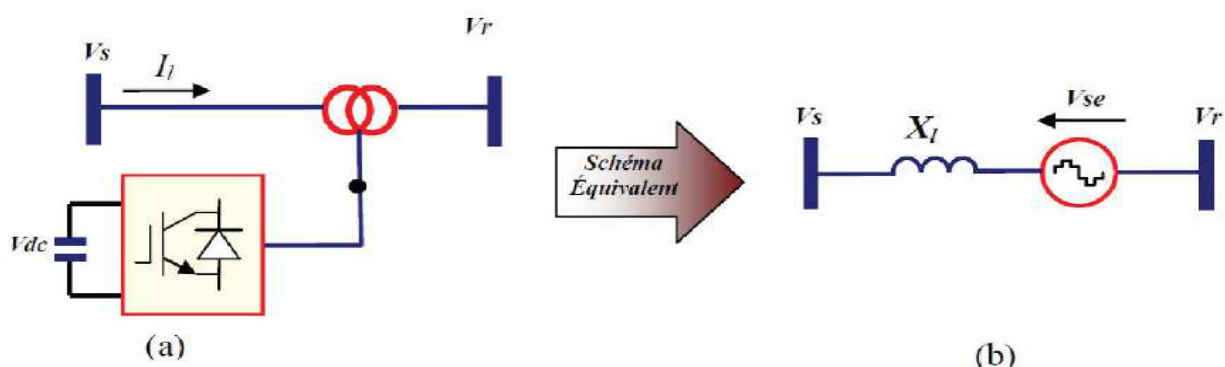


Figure II.7 : SSSC (a) structure de base, (b) schéma équivalent.

Dans le but d'un fonctionnement stable, ce dispositif performe les mêmes fonctions d'un SPS (static phase shifter) ou d'une impédance série variable de compensation : il injecte une tension en quadrature avec une tension des extrémités de la ligne pour contrôler le flux de puissance active.

Et comme ce système ne consomme pas de la puissance réactive à partir du réseau et possède son propre énergie réactive stockée dans les batteries de condensateur, il a l'aptitude de contrôler à la fois la puissance active et réactive. Ces caractéristiques statique tension/courant est donnée par la figure (II.8).

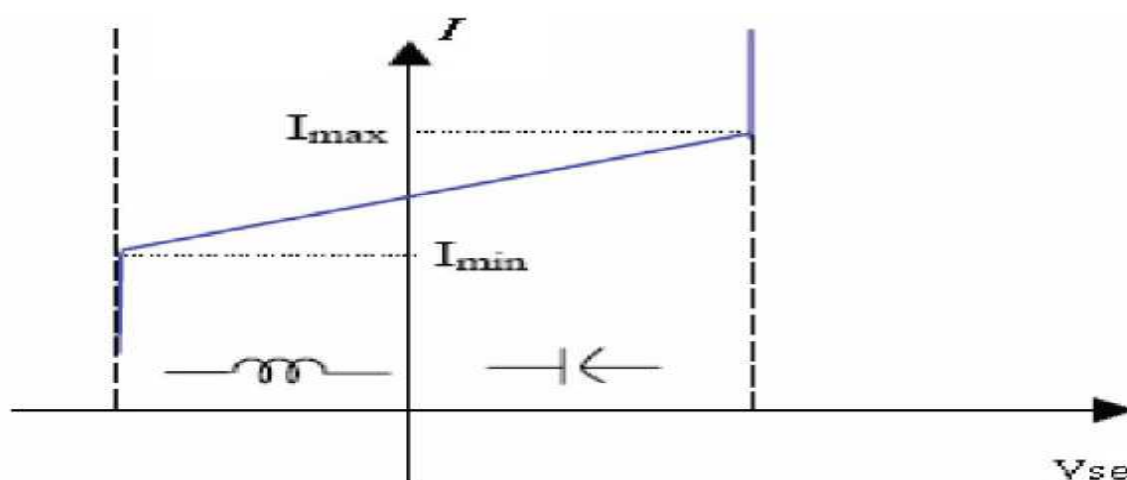


Figure II.8 : Caractéristiques statique du SSSC.

Dans le model adopté pour ce dispositif la valeur de la source de tension connectée en série et donnée par la formule (II.4):

$$V_{se} = |V_{se}|(\cos \delta_{se} + j \sin \delta_{se}) \tag{II.4}$$

L'amplitude et la phase de ce modèle  $V_{se}$  et  $\delta_{se}$  sont ajustés en utilisant l'algorithme de Newton pour satisfaire les puissances active et réactive spécifique qui transitent ce dispositif.

## II.7 Dispositifs FACTS combinés (série-parallèle)

Les dispositifs FACTS présentés précédemment permettent d'agir uniquement sur un des trois paramètres déterminant la puissance transmise dans une ligne (tension, impédance et angle).

Par une combinaison des deux types de dispositifs (shunt et série), il est possible d'obtenir des dispositifs hybrides capables de contrôler simultanément les différentes variables précitées.

### II.7.1 Contrôleur de transit de puissance unifié UPFC

Le contrôleur de transit de puissance unifié UPFC (Unified Power Flow Controller) est formé de deux convertisseurs de tension reliés par une liaison à courant continu formée par un condensateur.

Il s'agit en fait de la combinaison d'un STATCOM et d'un SSSC. Son schéma est représenté à la figure (II.9).

Le principe de l'UPFC consiste à dériver une partie du courant circulant dans la ligne pour le réinjecter avec une phase appropriée.

Le convertisseur (1), connecté en parallèle, a pour fonction de prélever la puissance active et de la délivrer au convertisseur série (2). Ce dernier génère une tension  $U_{pq}$ , contrôlée en amplitude et en phase, qui est insérée dans la ligne.

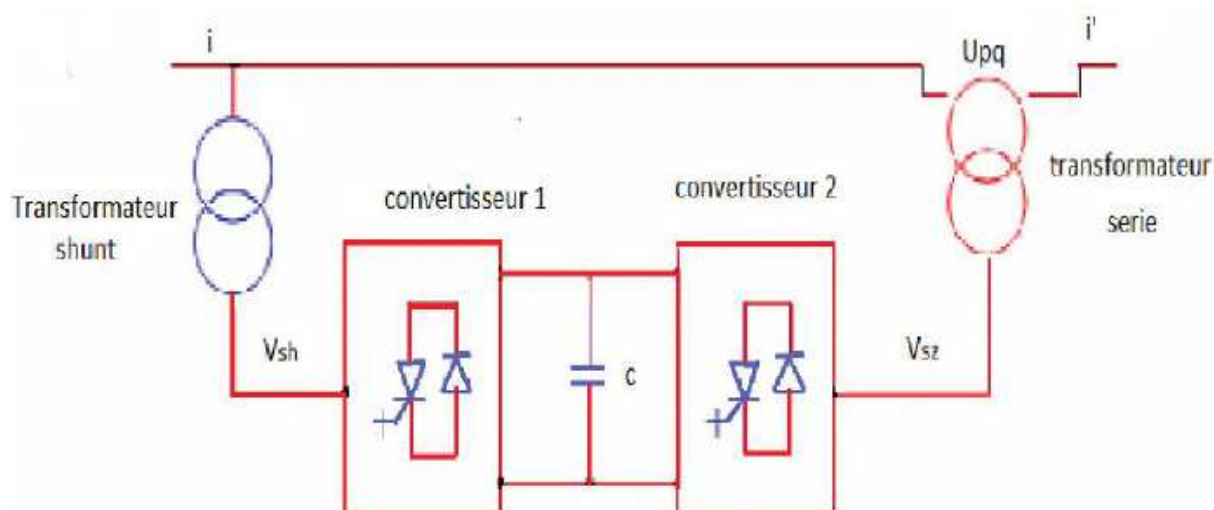


Figure II.9 : Schéma de base d'un UPFC.

Le convertisseur shunt peut également générer de la puissance réactive indépendamment du transfert de puissance active et ainsi contrôler la tension  $U_i$  (figure II.9).

L'UPFC permet de contrôler simultanément les trois paramètres régissant les transits de puissances dans les lignes.

Il peut de ce fait agir à la fois sur les puissances active et réactive. En général, il possède trois variables de commande et peut s'exploiter dans différents modes.

Le convertisseur shunt règle la tension au nœud  $i$ , alors que l'autre branché en série règle les puissances active et réactive ou la puissance active et la tension au nœud.



*Figure II.10 : Dispositif STATCOM*



*Figure II.11 : Dispositif TCSC*



*Figure II.12 : Dispositif SVC*

## **II.8 Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons présenté deux types de compensation shunt et série appliquées au contrôle des réseaux électriques; contrôle de la chute de tension par la compensation de la puissance réactive et le contrôle du flux de puissance active en utilisant les compensateurs séries.

Le compensateur shunt (STATCOM) sera traité en détail dans le prochain chapitre.

CHAPITRE III:  
Structure et Principe  
de Fonctionnement  
du STATCOM  
Modélisation et Commande

### III-1 Introduction:

Un STATCOM, plus récent et plus élaboré, est une source de tension variable contrôlée en amplitude et en phase. Ce dispositif est très différent du point de vue construction, commande, et fonctionnement, mais sa fonction, et son apport au réseau électrique est sensiblement le même que le dispositif SVC.

Dans ce travail, nous adopterons 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 puissance réactive inductive. Aussi, nous parlerons de courant capacitif positif et de courant inductif négatif.

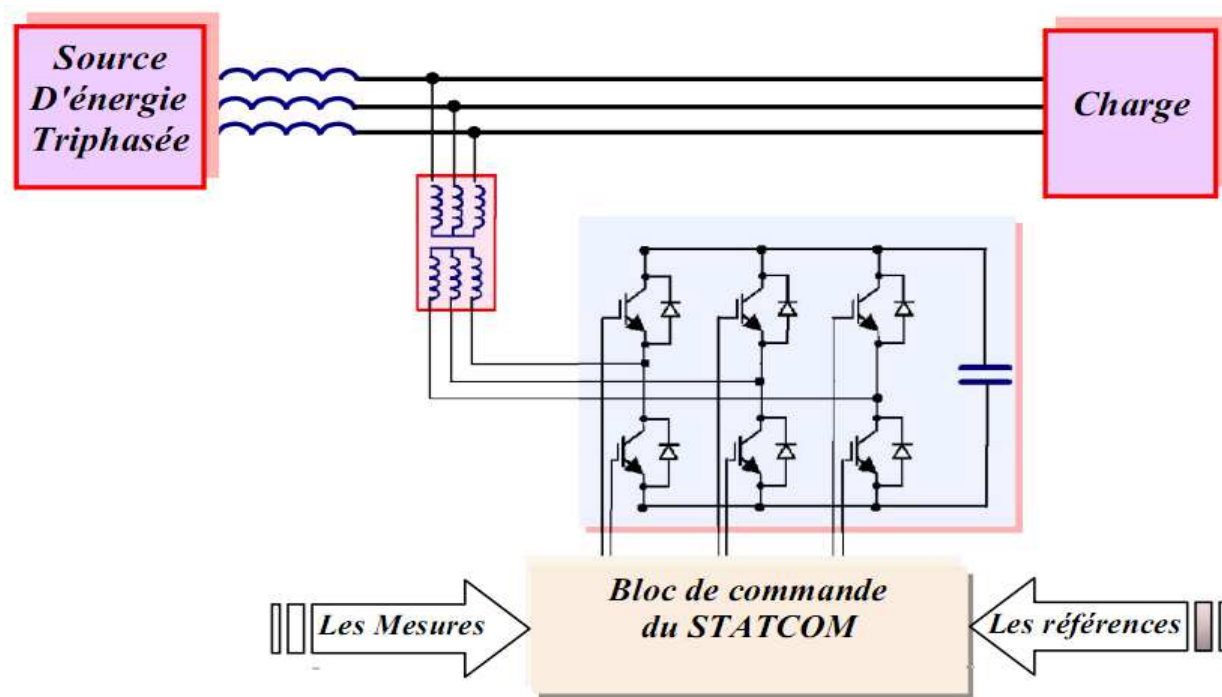


Figure III.1: Structure de base d'un STATCOM couplé au réseau.

### III-02 Principe de fonctionnement :

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 triphasé 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  $V_{sh}$  est injectée en phase avec la tension  $V_t$  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 figure (III.2).

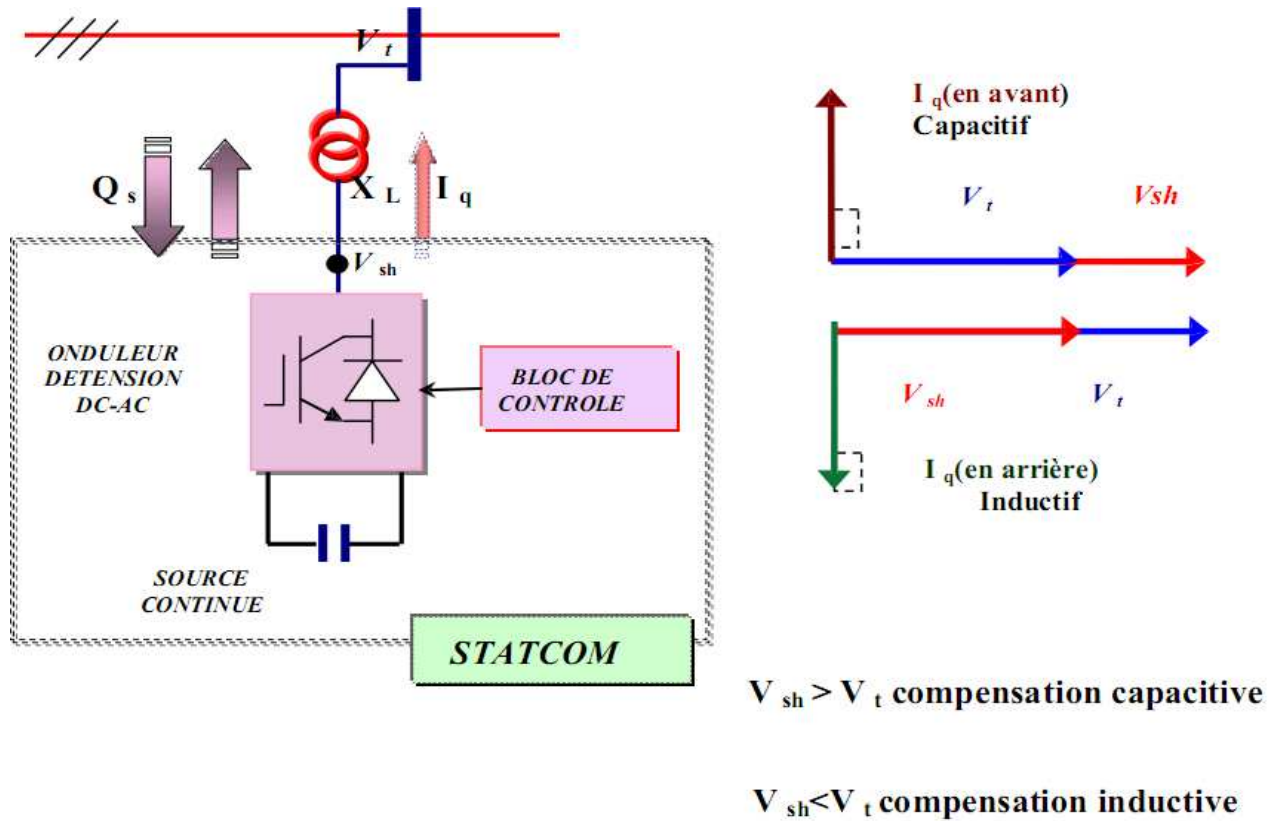


Figure III.2: Commande d'un STATCOM.

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.3).

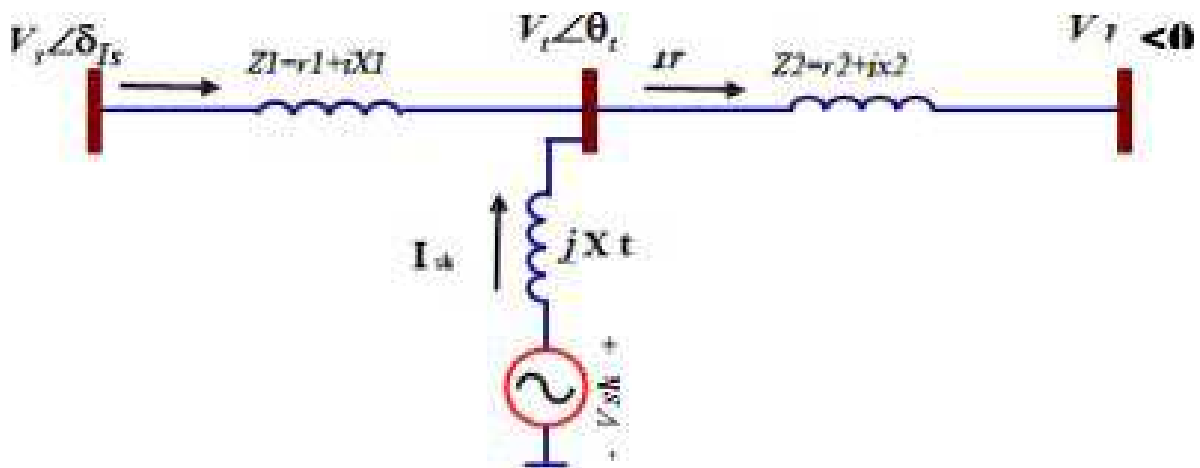


Figure III.3 : Schéma du STATCOM couplé au réseau électrique



Le courant injecté par le STATCOM est donné par:

$$\bar{I}_{sh} = \frac{\bar{V}_{sh} - \bar{V}_t}{jX_t} \quad (III.1)$$

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

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

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

$$P_{sh} = -V_t V_{sh} \cdot \sin(\theta_t - \theta_{sh}) / X_t \quad (III.3.a)$$

$$Q_{sh} = V_t (V_{sh} \cdot \cos(\theta_t - \theta_{sh}) - V_t) / X_t \quad (III.3.b)$$

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 :

$$P_{sh} = -V_t V_{sh} \cdot \sin(\theta_t - \theta_{sh}) / X_t = 0 \quad (III.4)$$

D'où la condition:

$$\theta_t - \theta_{sh} = 0. \Rightarrow \theta_t = \theta_{sh} \quad (III.5)$$

D'après cette condition la tension injectée par le STATCOM  $V_{sh}$  doit être en phase avec la tension du jeu de barre de raccordement.

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. [8][7]

Comme les tensions  $V_{sh}$  et  $V_t$  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 (III.6) (III.7).

En admettant que la tension  $V_{sh}$  est sur l'axe d (comme référence des phases) :

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

$$|I_{sh}| = I_{sh} = \frac{V_{sh} - V_t}{X_t} \quad (III.6)$$

$$Q_{sh} = V_{sh} I_{sh} = \frac{V_{sh}^2}{X_t} \left( 1 - \frac{V_t}{V_{sh}} \right) \quad (III.7)$$

A partir de l'équation (III. 1), il paraît clair 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 comme montre la figure (III.4), et 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, voir figure (III.5).[1]

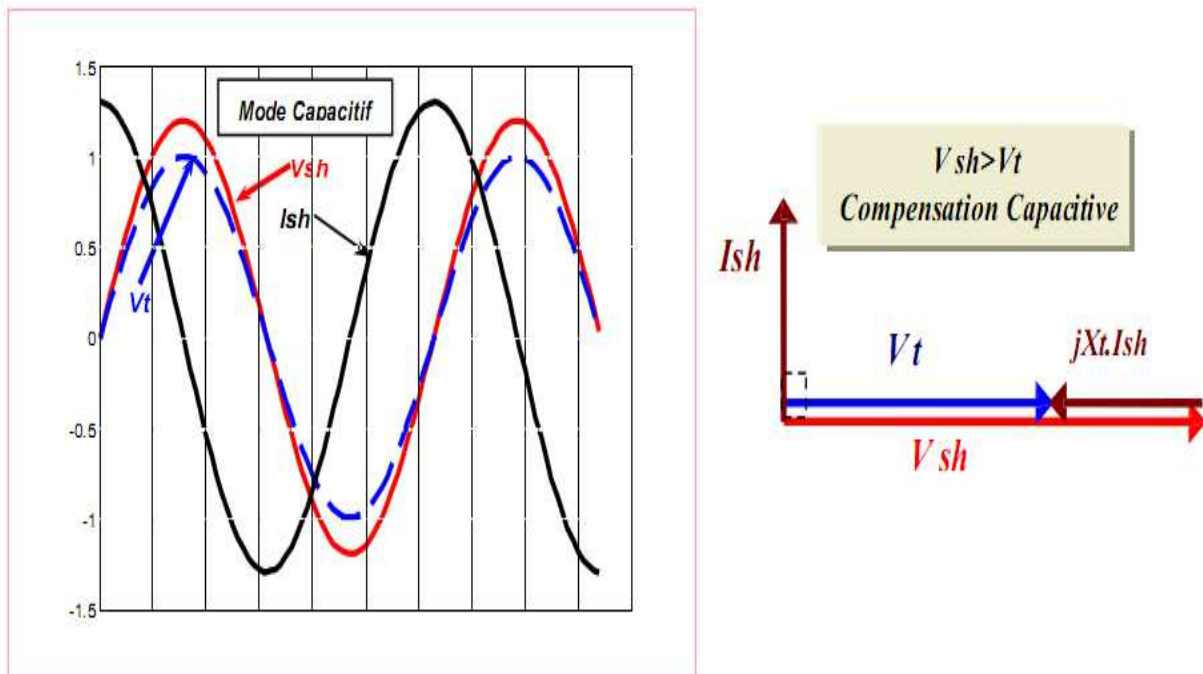
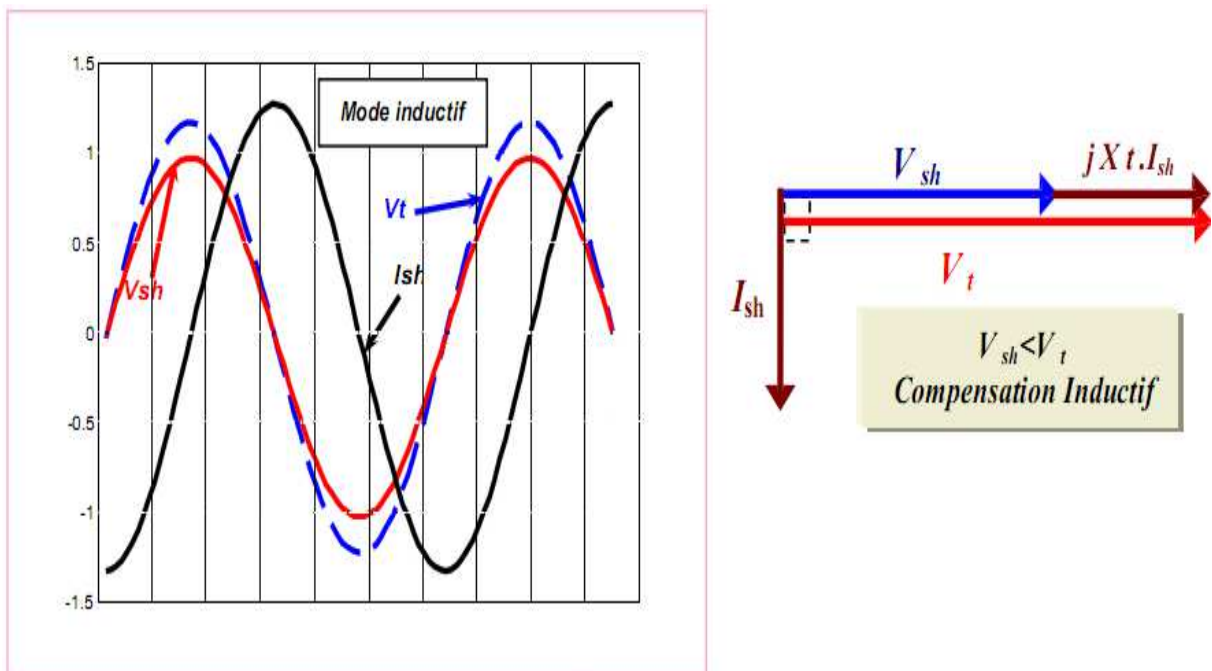


Figure III.4 : Courbes simulées courant et tension en mode capacitif.



**Figure III.5 : Courbes simulées courant et tension en mode inductif.**

**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-3 Effet de la compensation shunt (STATCOM) sur le réseau élec:

Pour étudier les relations entre le réseau électrique et le STATCOM on va adopter pour cela le modèle mathématique de la figure (III.3) qui représente le schéma unifilaire d'un STATCOM couplé au nœud d'un réseau électrique. Les équations des courants  $I_s$ ,  $I_{sh}$  et  $I_r$  sont données par les équations (III. 8), (III.9) et (III. 10) respectivement.

$$\bar{I}_s = \frac{(\bar{Z}_2 + jX_t) \bar{V}_s - \bar{Z}_2 \cdot \bar{V}_{sh} - jX_t \cdot \bar{V}_r}{\bar{Z}_1 \cdot \bar{Z}_2 + jX_t (\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2)} \quad (III.8)$$

$$\bar{I}_{sh} = \frac{-\bar{Z}_2 \cdot \bar{V}_s \cdot (\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2) \cdot \bar{V}_{sh} - \bar{Z}_1 \cdot \bar{V}_r}{\bar{Z}_1 \cdot \bar{Z}_2 + jX_t (\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2)} \quad (III.9)$$

$$\bar{I}_r = \frac{jX_t + \bar{Z}_1 \cdot \bar{V}_{sh} - (\bar{Z}_1 + jX_t) \cdot \bar{V}_r}{\bar{Z}_1 \cdot \bar{Z}_2 + jX_t (\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2)} \quad (III.10)$$

Les puissances injectées par la source  $V_s$  peuvent être calculée à partir des équations (III. 11) et (III. 12):

$$P_s = R_e (\bar{V}_s \cdot \bar{I}_s^*) = R_e \left[ \bar{V}_s \times \left( \frac{(\bar{Z}_2 + jX_t) \bar{V}_s - \bar{Z}_2 \cdot \bar{V}_{sh} - jX_t \cdot \bar{V}_r}{\bar{Z}_1 \cdot \bar{Z}_2 + jX_t (\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2)} \right)^* \right] \quad (III.11)$$

$$Q_s = \text{Im} (\bar{V}_s \cdot \bar{I}_s^*) = \text{Im} \left[ \bar{V}_s \times \left( \frac{(\bar{Z}_2 + jX_t) \bar{V}_s - \bar{Z}_2 \cdot \bar{V}_{sh} - jX_t \cdot \bar{V}_r}{\bar{Z}_1 \cdot \bar{Z}_2 + jX_t (\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2)} \right)^* \right] \quad (III.12)$$

En visualisant la courbe de la figure (III.6) la variation des puissances actives ( $P_s$ ) et réactives ( $Q_s$ ) délivrées par la source pour différentes valeurs de la tension  $V_{sh}$  injectée par le STATCOM, on voit que la puissance réactive  $Q_s$  diminue (*compensée*) ce qui explique l'augmentation du réactive injectée par le compensateur shunt dans le réseau.

Par exemple, sur la même courbe de la figure (III.6), afin de transmettre une puissance active  $P_s$  égale à 1.0 p.u, la puissance réactive  $Q_s$  transmise dans la même ligne doit être égale à 0.8 p.u si la tension à la sortie de l'onduleur  $V_{sh}$  est égale à 0.2 p.u.

Par contre  $Q_s$  diminue jusqu'à 0.13 p.u si la tension injectée  $V_{sh}=1.1$  p.u pour transmettre la même quantité de la puissance active  $P_s$ .

Les puissances délivrées par le STATCOM données par les équations (III. 13) et (III. 14) sont présentées sur la figure (III.6).

( $P_s$ ,  $Q_s$ ) : Puissances active et réactive en p.u produite par la source;

( $P_{sh}$ ,  $Q_{sh}$ ) : Puissances active et réactive en p.u générées par ledispositif STATCOM.

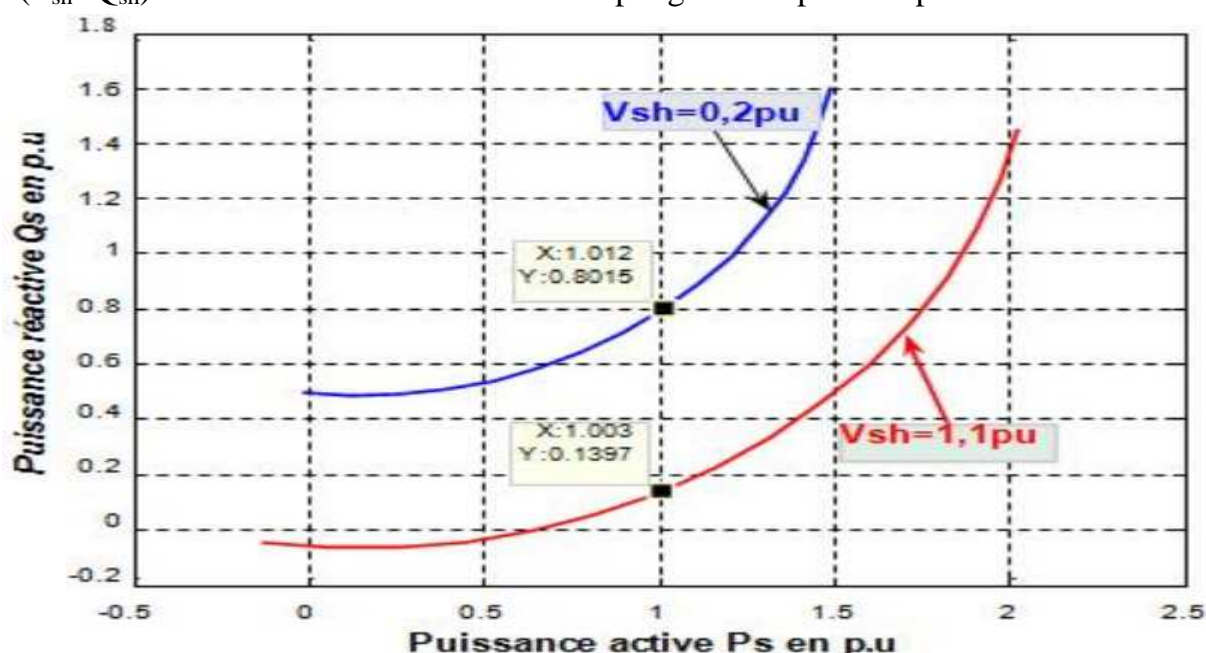


Figure III.6 :  $Q_s$  en fonction de  $P_s$  pour différentes valeurs de  $V_{sh}$

$$P_{sh} = \operatorname{Re} \left( \bar{V}_{sh} \cdot \bar{I}_{sh}^* \right) = \operatorname{Re} \left[ \bar{V}_{sh} \times \left( \frac{-\bar{Z}_2 \cdot \bar{V}_s \cdot (\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2) \cdot \bar{V}_{sh} - \bar{Z}_1 \cdot \bar{V}_r}{\bar{Z}_1 \cdot \bar{Z}_s + j X_t (\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2)} \right)^* \right] \quad (\text{III.13})$$

$$Q_{sh} = \operatorname{Im} \left( \bar{V}_{sh} \cdot \bar{I}_{sh}^* \right) = \operatorname{Im} \left[ \bar{V}_{sh} \times \left( \frac{-\bar{Z}_2 \cdot \bar{V}_s \cdot (\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2) \cdot \bar{V}_{sh} - \bar{Z}_1 \cdot \bar{V}_r}{\bar{Z}_1 \cdot \bar{Z}_s + j X_t (\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2)} \right)^* \right] \quad (\text{III.14})$$

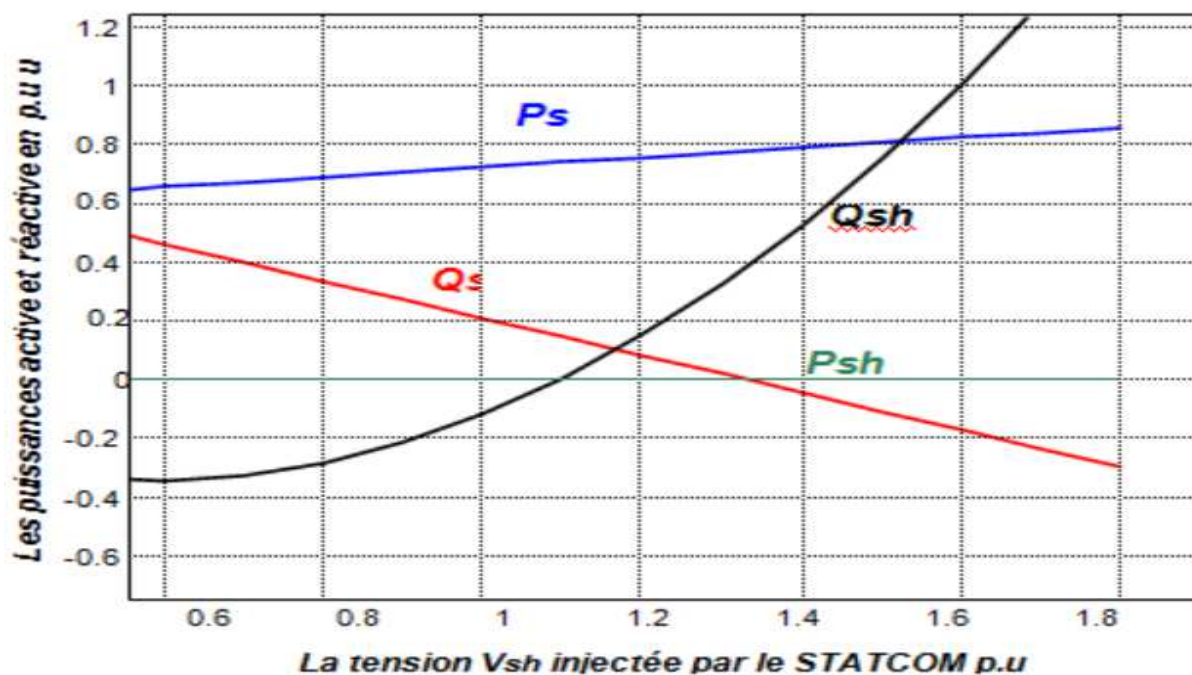


Figure III.7 :  $P_s$ ,  $Q_s$ ,  $P_{sh}$  et  $Q_{sh}$  en fonction de  $V_{sh}$

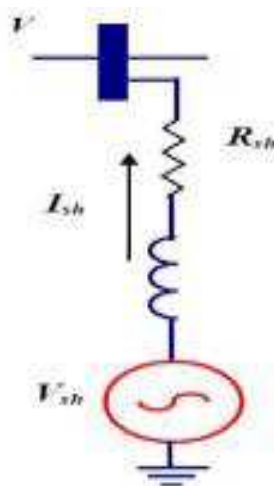
Sur les caractéristiques de la figure (III.7) qui représentent la variation des puissances active et réactive  $P_s$  et  $Q_s$  transportées par la ligne ainsi que les puissances active et réactive injectées par le STATCOM  $P_{sh}$  et  $Q_{sh}$ , en fonction des variations de l'amplitude de la tension  $V_{sh}$  il paraît clair que l'influence de cette tension sur la puissance réactive  $Q_s$  est plus grand que sur la puissance active  $P_s$ . Et on voit qu'en augmentant la tension  $V_{sh}$  la puissance réactive injectée par le STATCOM augmente, et par conséquent la puissance réactive injectée au réseau par le générateur diminue.

Nous pouvons constater aussi que la capacité de transit de la puissance active est améliorée. Celle-ci était occupée par la puissance réactive. Donc, pour améliorer le transfert de puissance à travers des lignes importantes, il faut disposer de compensateur shunt installé de façon appropriée. Cependant, généralement les compensateurs shunts ne sont pas utilisés pour cette fonction qui est plutôt une fonction mieux satisfaite par les compensateurs série qui produisent le même résultat pour un coût meilleur.

### III-4 Modélisation du STATCOM :

#### III-4-1 Modèle Mathématique Simplifié:

Le STATCOM comme il était déjà décrit précédemment, peut être représenté par le schéma équivalent qu'on reproduit sur la figure (III. 1) en tenant compte uniquement du jeu.



*Figure III.8: Schéma équivalent d'un STATCOM connecté au réseau.*

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 est donc une source de tension sinusoïdale connectée à un nœud du réseau par l'inductance  $L_{sh}$  figure (III.8) à travers un 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.

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 :

$$\bar{V} - \bar{V}_{sh} = R_{sh} \bar{I}_{sh} + L_{sh} \frac{d\bar{I}_{sh}}{dt} \quad (III.15)$$

Où les grandeurs en triphasé sont :

$$\bar{V} = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}; \quad \bar{V}_{sh} = \begin{bmatrix} V_{ash} \\ V_{bsh} \\ V_{csh} \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad \bar{I}_{sh} = \begin{bmatrix} I_{ash} \\ I_{bsh} \\ I_{csh} \end{bmatrix} \quad (III.16)$$

Pour simplifier ces équations on passe au repère orthogonal fixe  $(\alpha, \beta)$  on multipliant l'équation (III. 15) par la matrice de la transformation de CLARK suivante:

$$T_{\alpha, \beta} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{III.17})$$

On passe au repère tournant  $(d, q)$ , le référentiel du synchronisme, en multipliant tout les grandeurs par le phasor  $e^{-j\gamma}$  avec  $\frac{d\gamma}{dt} = \omega$ , la pulsation des grandeurs en question voir la figure (III-9). Donc :

$$\bar{U}_{(d,q)} = \bar{U}_{(\alpha,\beta)} \cdot e^{-j\gamma} \quad (\text{III.18})$$

Et inversement

$$\bar{U}_{(\alpha,\beta)} = \bar{U}_{(d,q)} \cdot e^{j\gamma} \quad (\text{III.19})$$

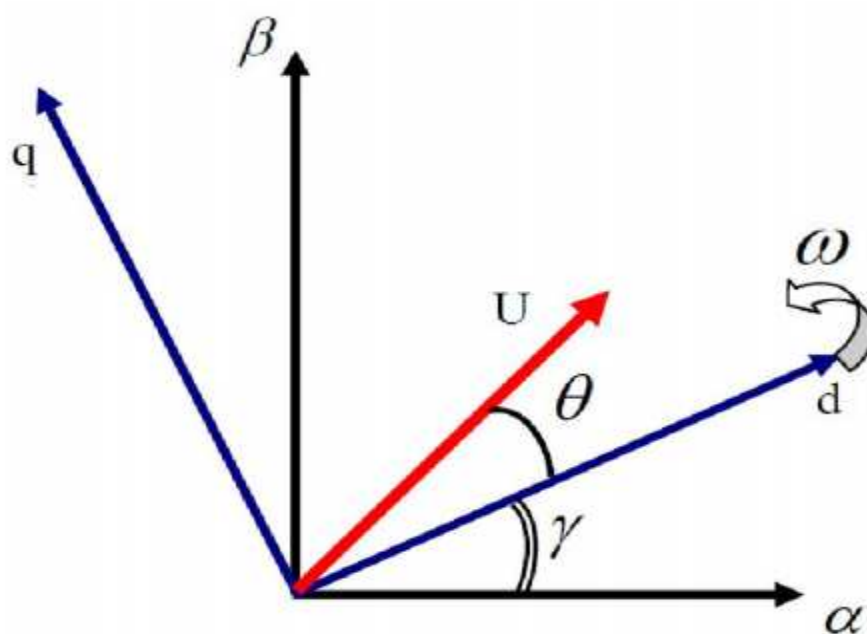


Figure 111.9: Passage du repère  $(\alpha, \beta)$  vers le repère  $(d, q)$ .

En appliquant cette écriture sur l'équation (III. 15) on aura:

$$\overline{V}^{(d,q)} \cdot e^{jy} - \overline{V}_{sh}^{(d,q)} e^{jy} = R_{sh} \overline{I}^{(d,q)} \cdot e^{jy} + L_{sh} \frac{d}{dt} \left( \overline{I}_{sh}^{(d,q)} \cdot e^{jy} \right) \quad (III.20)$$

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

$$V_d - V_{shd} = R_{sh} I_{shd} + L_{sh} \frac{dI_{shd}}{dt} - L_{sh} \cdot \omega I_{shq} \quad (III.21)$$

$$V_q - V_{shq} = R_{sh} I_{shq} + L_{sh} \frac{dI_{shq}}{dt} + L_{sh} \cdot \omega I_{shd} \quad (III.22)$$

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

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R_{sh}}{L_{sh}} & \omega \\ -\omega & \frac{-R_{sh}}{L_{sh}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_{sh}} \cdot \begin{bmatrix} V_d & -V_{shd} \\ V_q & -V_{shq} \end{bmatrix} \quad (III.23)$$

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

### III-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.

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 donner par la figure (III. 10). On suppose que :

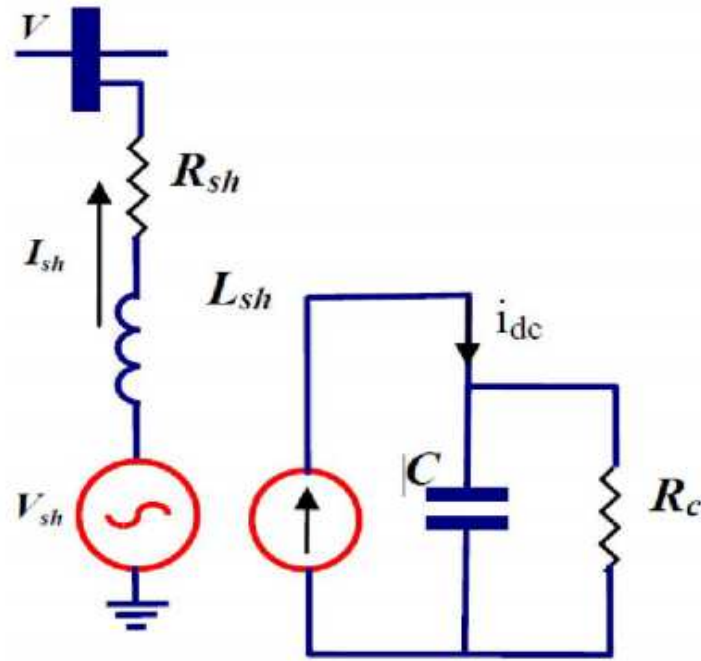
$$\overline{V}_{sh}^{(d,q)} = V_{shd} + j V_{shq} = v \cos\theta + j v \sin\theta \quad (III.24)$$

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

$$v = m \times U_{dc} \quad (III.25) \quad m :$$

l'indice de modulation, il ne dépend que du type d'onduleur.





**Figure III.10 ; Schéma équivalent du STATCOM avec Circuit DC.**

En substituant les équations (III.24) et (III.25) dans les équations (III.21) et (III.22) on aboutit aux équations:

$$V_d - mU_{dc} \cos \theta = R_{sh} I_{shd} + L_{sh} \frac{dI_{shd}}{dt} - L_{sh} \omega I_{shq} \quad (III.26)$$

$$V_q - mU_{dc} \sin \theta = R_{sh} I_{shq} + L_{sh} \frac{dI_{shq}}{dt} - L_{sh} \omega I_{shd} \quad (III.27)$$

La puissance circulant entre le condensateur et l'onduleur de tension peut être décrite par l'équation (III.28) et en même temps vérifie l'égalité qui suit (III.29):

$$P_{sh} = \frac{3}{2} (V_{shd} I_{shd} + V_{shq} I_{shq}) \quad (III.28)$$

$$U_{dc} I_{dc} = \frac{3}{2} (V_{shd} I_{shd} + V_{shq} I_{shq}) \quad (III.29)$$

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  $R_{dc}$ .

$$I_{dc} = C \frac{dU_{dc}}{dt} + \frac{U_{dc}}{R_{dc}} \quad (III.30)$$

De ces équations (III.24), (III.25), (III.29) et (III.30) on peut tirer l'équation dynamique du coté continue du STATCOM suivante:

$$C \frac{dU_{dc}}{dt} = \frac{3}{2} m (I_{shd} \cos \theta - I_{shq} \sin \theta) - \frac{U_{dc}}{R_{dc}} \quad (III.31)$$

Les équations (III.26) (III.27) (III.31 ) 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:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shd} \\ U_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R}{L_{sh}} & \omega & \frac{-m}{L_{sh}} \cos \theta \\ -\omega & \frac{-R}{L_{sh}} & \frac{m}{L_{sh}} \sin \theta \\ \frac{3m}{2c} \cos \theta & -\frac{3m}{2c} \cos \theta & -\frac{1}{R_{dc}c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shd} \\ U_{dc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{sh}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_{sh}} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} \quad (III.32)$$

On peut remarquer 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 le rendre linéaire autour d'un point de fonctionnement sera de la forme suivante :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shd} \\ U_{dc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{-R}{L_{sh}} & \omega & \frac{-m}{L_{sh}} \cos \theta_0 \\ -\omega & \frac{-R}{L_{sh}} & \frac{m}{L_{sh}} \sin \theta_0 \\ \frac{3m}{2c} \cos \theta & -\frac{3m}{2c} \sin \theta_0 & -\frac{1}{R_{dc}c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shd} \\ U_{dc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{sh}} & 0 & \frac{m}{L_{sh}} U_{dc0} \sin \theta_0 \\ 0 & \frac{1}{L_{sh}} & \frac{m}{L_{sh}} U_{dc0} \cos \theta_0 \\ 0 & 0 & -\frac{2m}{3c} (I_{shd} \sin \theta + I_{shq} \cos \theta_0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ \theta \end{bmatrix} \quad (III.33)$$

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.

### III-5 Contrôle du STATCOM:

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

#### III-5-1 Détermination des Références:

Les puissances injectées par le STATCOM sont la puissance réactive  $Q_{shd}$  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.

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

$$\begin{bmatrix} I_{shd}^* \\ I_{shq}^* \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{V_d^2 + V_q^2} \begin{bmatrix} V_d & -V_q \\ V_q & V_d \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_{shd}^* \\ Q_{shd}^* \end{bmatrix} \quad (III.34)$$

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

Nous pouvons résumer la méthode d'identification des courants de référence par l'algorithme de la figure (III. 11).

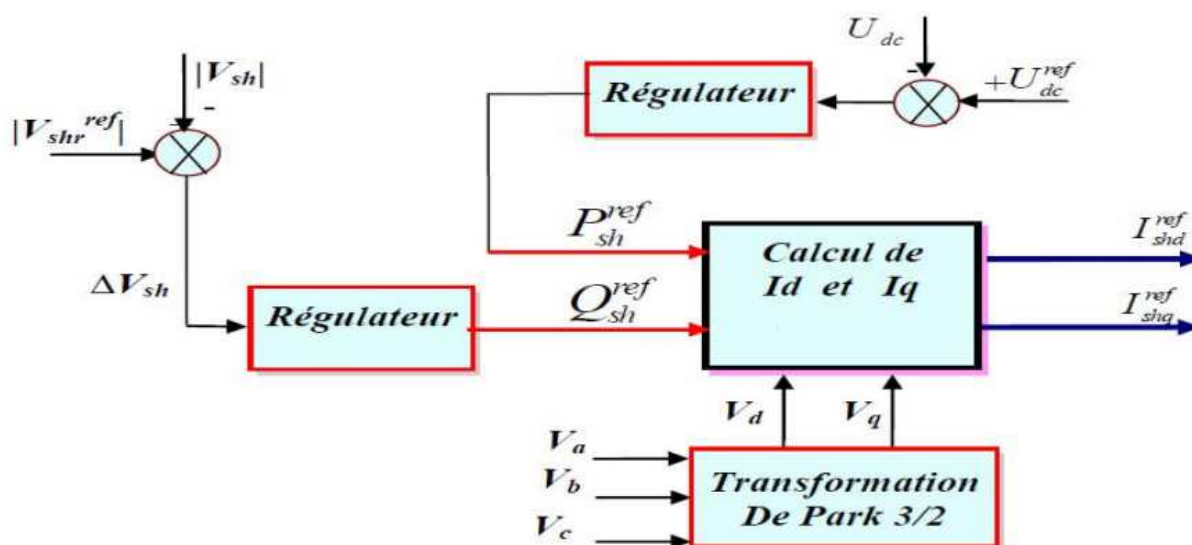


Figure III.11 : Identification des Courants de Référence.

### III-5-2 Méthode Watt-Var découplée :

Considérant le modèle simplifié représenté par le système d'équation (III.23) précédent:

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

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

$$\frac{1}{L_{sh}} \cdot \begin{bmatrix} V_d & -V_{shd} \\ V_q & -V_{shq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} \quad (III.35)$$

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

A partir de la première équation du système (III.23) on aura :

$$\frac{dI_{shd}}{dt} = -\frac{R_{sh}}{L_{sh}} I_{shd} + \omega \cdot I_{shq} + X_1 \quad (III.36)$$

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

$$\left( s + \frac{R_{sh}}{L_{sh}} \right) I_{shd} = \omega \cdot I_{shq} + X_1 = \tilde{X}_1 \quad (III.37)$$

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

$$\frac{I_{shd}}{\tilde{X}_1} = \frac{1}{s + \frac{R_{sh}}{L_{sh}}} \quad (III.38)$$

Notre commande en réalité est en  $X_1$  et comme  $X_1 = \omega \cdot I_{shq}$ , on doit ajouter donc 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 (III-12) suivante:

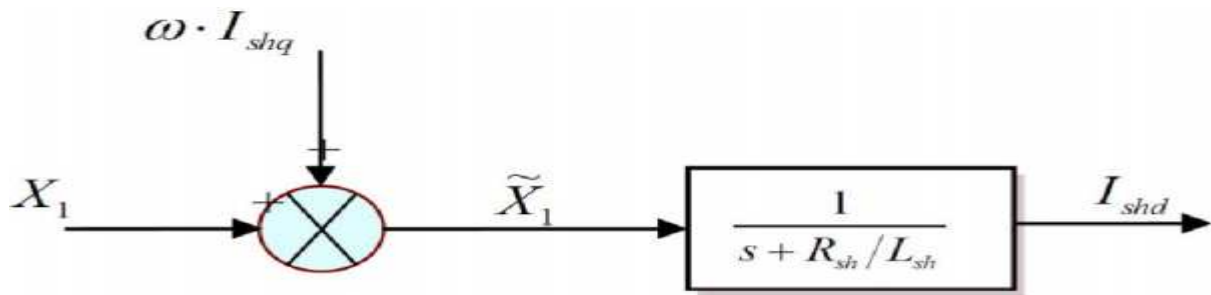


Figure III.12 : Transfert du  $I_{shd}$  en fonction de  $X_1$ .

De la même manière en prenant la deuxième équation du modèle précédant on trouve le transfert  $I_{shq}$  en fonction de  $X_2$  qui suit:

$$\frac{I_{shq}}{\tilde{X}_2} = \frac{1}{s + \frac{R_{sh}}{L_{sh}}} \quad (III.39)$$

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

Le schéma suivant résume ce transfert:

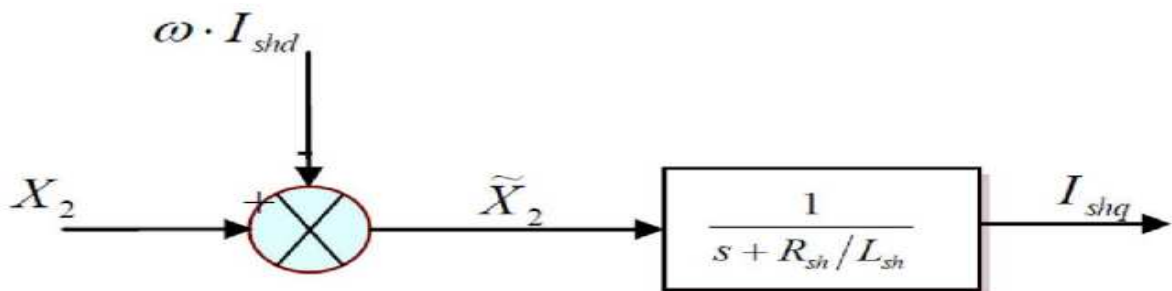


Figure III.13 : Transfert du  $I_{shq}$  en fonction de  $X_2$ .

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 utilisela méthode de compensation et avec desrégulateurs PI on peut contrôler les courants de sortie du STATCOM et faire suivre leurs consignes  $I_{shd}^*$  et  $I_{shq}^*$  comme le représente le schéma bloc de la figure (III. 14).

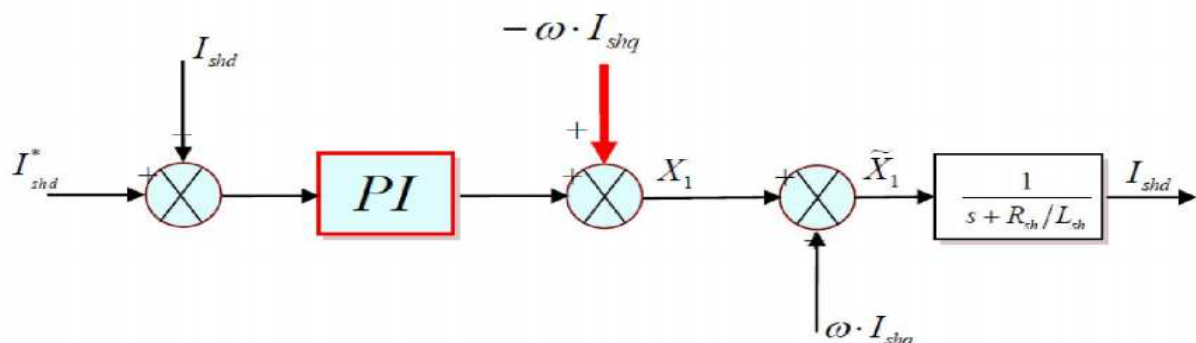


Figure III.14 : Régulation et découplage de  $I_{shd}$

De la même manière , 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 (III.15).

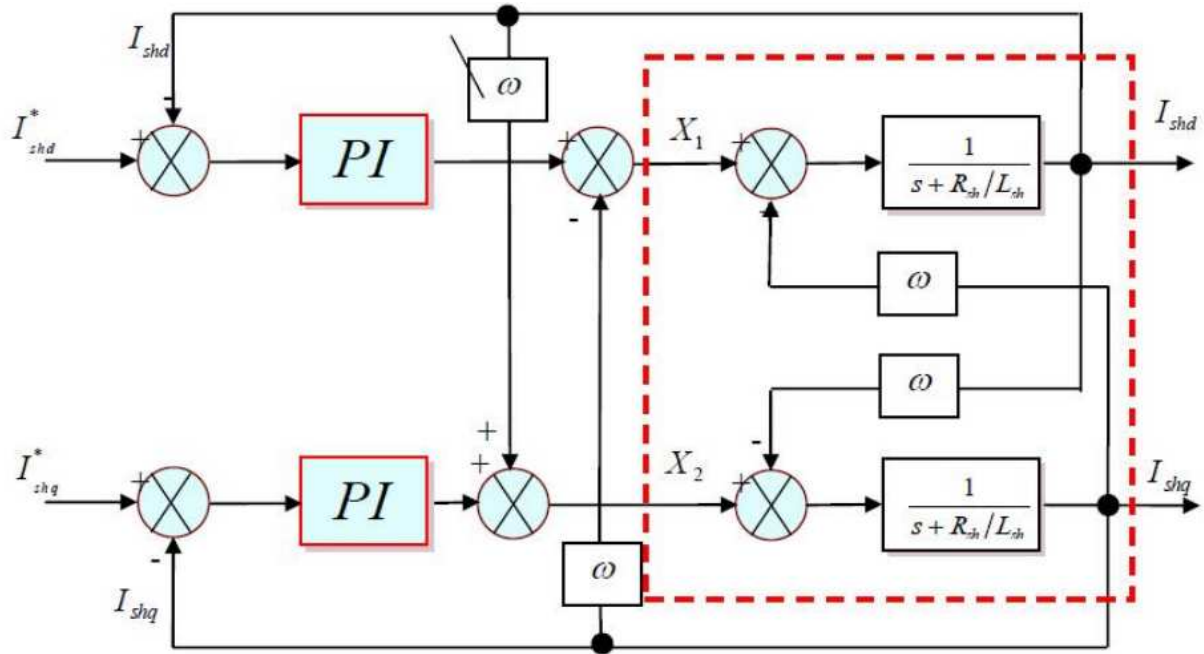


Figure III.14 : Schéma Régulation de STATCOM (Watt-Var découplée)

### III-5-3 Régulateur PI avec compensation de pôles:

Nous avons utilisé pour la régulation des courants du STATCOM des régulateurs proportionnels intégraux (PI) comme le montre le schéma de la figure (III. 16) :

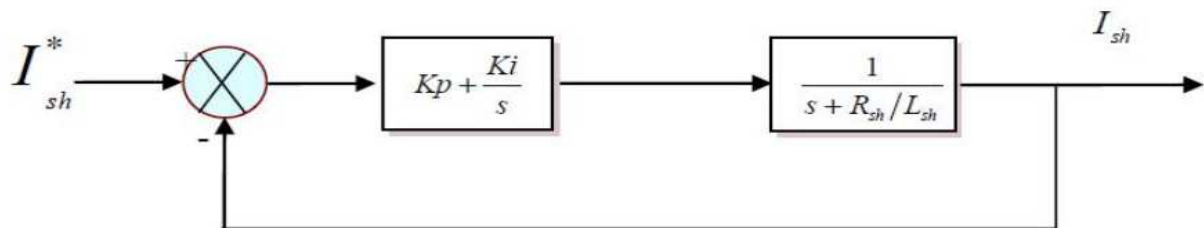


Figure III.16 : Schéma bloc de la Régulation PI des courants du STATCOM.

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

$$G(s) = \left( K_p + \frac{K_i}{s} \right) \left( \frac{1}{s + \frac{R_{sh}}{L_{sh}}} \right) = K_p \left( \frac{s + \frac{K_i}{K_p}}{s} \right) \left( \frac{1}{s + \frac{R_{sh}}{L_{sh}}} \right) \quad (III.40)$$

Et par compensation du pôle on doit avoir :

$$\frac{K_i}{K_p} = \frac{R_{sh}}{L_{sh}} = \frac{1}{T_{BO}} \quad (III.41)$$

Et  $G(s)$  devient:  $G(s) = K_p(I/S)$

$T_{BO}$  : Constante de temps en boucle ouverte.

La fonction de transfert de la régulation précédente après compensation du pôle sera de la forme qui suit:

$$F(s) = \frac{G(s)}{1 + G(s)} = \frac{K_p}{s + K_p} = \frac{1}{T_{BF}(s) + 1} \quad (III.42)$$

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

Avec  $T_{BF}$  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 (III.41) (III.42) les gains du contrôleur PI.

$$K_p = \frac{1}{3} T_{BO} = \frac{1}{3} \frac{L_{sh}}{R_{sh}} \quad \text{et} \quad K_i = K_p \times \frac{R_{sh}}{L_{sh}} \quad (III.43)$$

### III-5-4 Régulation de la tension continue $U_{dc}$ :

La tension continue aux bornes du condensateur doit être maintenue à une valeur constante. La correction de cette tension doit se faire par la jonction 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 (III.44).

$$P_{dc} = P_{sh} = \frac{1}{2} C \frac{dU_{dc}^2}{dt} \Rightarrow \frac{dU_{dc}^2}{dt} = \frac{2 \cdot P_{sh}}{C} \quad (III.44)$$

En passant au domaine fréquentiel (Laplacien) on aura :

$$\frac{U_{dc}^2}{P_{sh}} = \frac{2}{C \cdot s} \quad (III.45)$$

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

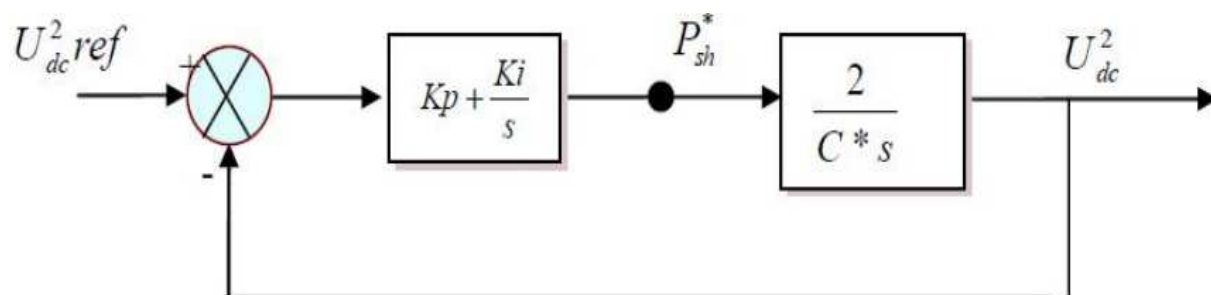


Figure III.17 : Régulation de la tension continue  $U_{dc}$ .

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

$$F(s) = \frac{U_{dc}^2}{U_{dc}^2_{ref}} = \frac{\frac{2 \cdot K_p}{C} s + \frac{2 \cdot K_i}{C}}{s^2 + \frac{2 \cdot K_p}{C} s + \frac{2 \cdot K_i}{C}} \quad (III.46)$$

Avec :

$$\omega_n^2 = \frac{2 \cdot K_i}{C}, \quad \xi = K_p \cdot \sqrt{\frac{1}{2 \cdot C \cdot K_i}} \quad (III.47)$$

Pour avoir un bon coefficient d'amortissement du système en boucle fermée nous avons choisi  $\xi = 0.7$ . Et à fin d'atténuer les fluctuations à 300 Hz, et pour avoir un bon filtrage on va choisir  $\omega_n = \frac{2\pi \cdot 300}{10}$  rad/sec et finalement on détermine à partir des équations (III.47) les valeurs des gains  $K_p$  et  $K_i$ .

### III-6 Conclusion :

Ce chapitre a été consacré à la modélisation de STATCOM dans certaines fonctions pour contrôler et régulé la tension par la compensation de l'énergie réactive.

Les résultats de la simulation de fonctionnement de STATCOM coupler dans un réseau électrique seront traitées en détaille dans le chapitre suivant.



# CHAPITRE IV:

Simulation d'un dispositif

STATCOM

## **VI-1 Introduction :**

Le réseau électrique est exposé aux différentes perturbations telle que : l'augmentation de la charge, l'augmentation ou diminution de la tension,...

Le « STATCOM » est utilisé pour rendre l'équilibre de tension au réseau, où compenser la puissance réactive.

Dans ce chapitre, on va étudier le comportement dynamique du « STATCOM » via à vis des perturbations de tension et de puissance réactive. Le comportement du « STATCOM » sera vérifié par des simulations en utilisant MATLAB/Simulink. Les simulations seront déroulées comme suit :

- Fonctionnement du STATCOM en mode flottant ;
- Fonctionnement du STATCOM en mode capacitif ;
- Fonctionnement du STATCOM en mode inductif.

## **VI-2 Matériels et méthodes :**

Un réseau électrique canadien (hydrau-Québec) de 500 Kv présenté sous l'environnement Matlab/Smulink. il est constitué de trois générateurs (G1, G2, G3) dont leurs puissances de court-circuit sont 8500 MVA, 6500 MVA et 900 MVA respectivement. De trois lignes de transport d'énergie Lignel, Ligne2 et Ligne3. Le réseau comporte également deux charges résistives, tout le système est simulé sous logiciel Matlab version 7.10.0 (R.2010a).

## **VI-3 Description du Système étudié :**

Le dispositif STATCOM 100 MVA (+100 Mvar/-100 Mvar48-impulsions GTO) utilisé pour régler les tensions des réseaux 500 kV ; constitué d'un onduleur de tension 48 impulsions (VSC) à base des thyristors GTO.

### **VI-3-1 Les caractéristiques du réseau sont les suivantes :**

- La tension de la ligne : 500 kV ;
- La fréquence : 60 Hz ;
- La charge 1 : 300 MW ;
- La charge 2 : 200 MW ;
- Les modèles des lignes : lignes à paramètres distribués ;
- Ligne 1 =200 Km ;
- Ligne 2 =75 Km ;
- Ligne 3 =180 Km.

### VI-3-2 Caractéristiques du STATCOM :

- Onduleur de tension à trois niveaux 48 impulsions ;
- Composants d'électronique de puissance : thyristors GTO ;
- La puissance réactive (Générée/Absorbée) : +100 Mvar/-100 Mvar ;
- Coté DC : des capacités de  $C1=C= 23000 \mu\text{F}$ .

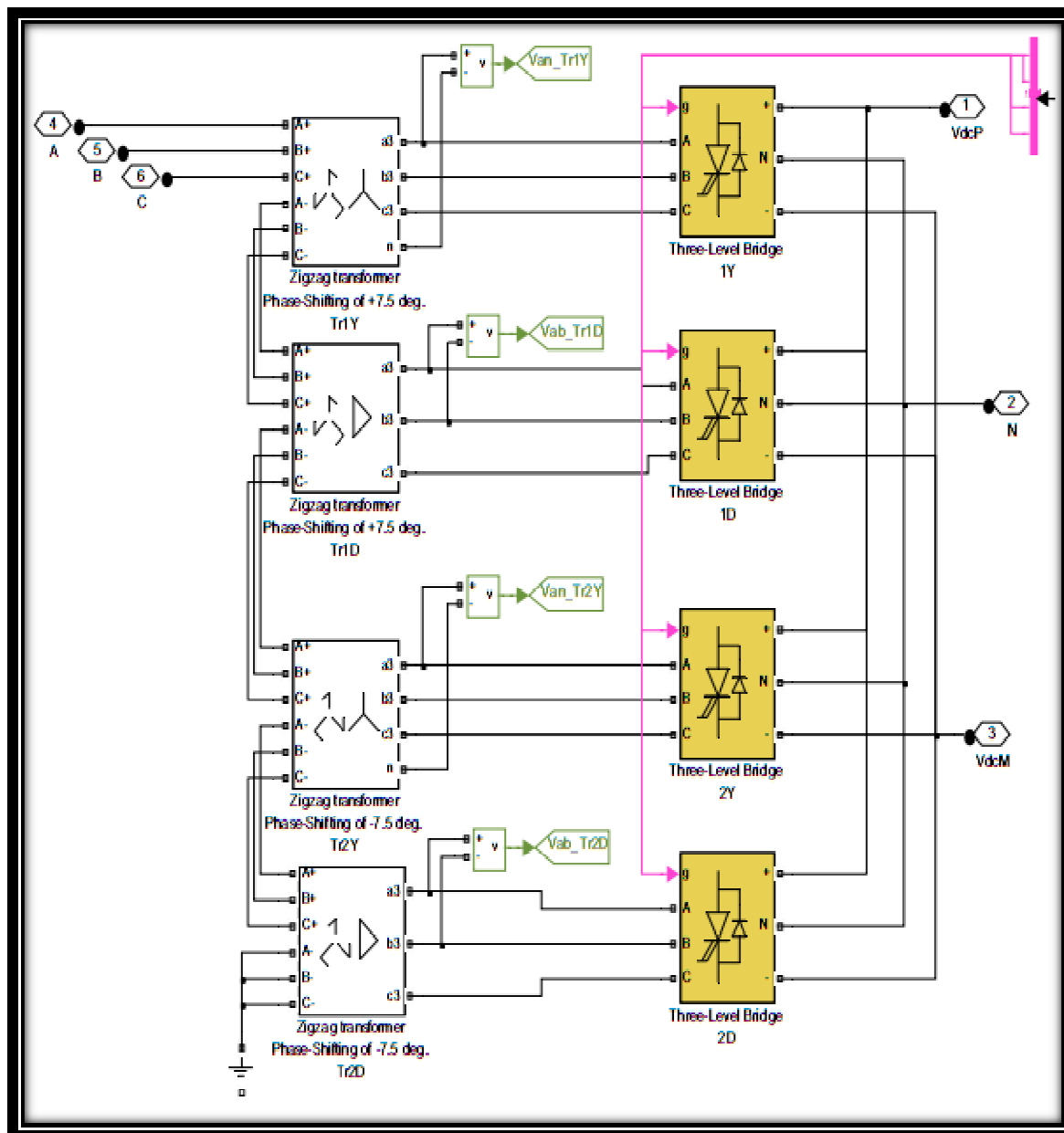
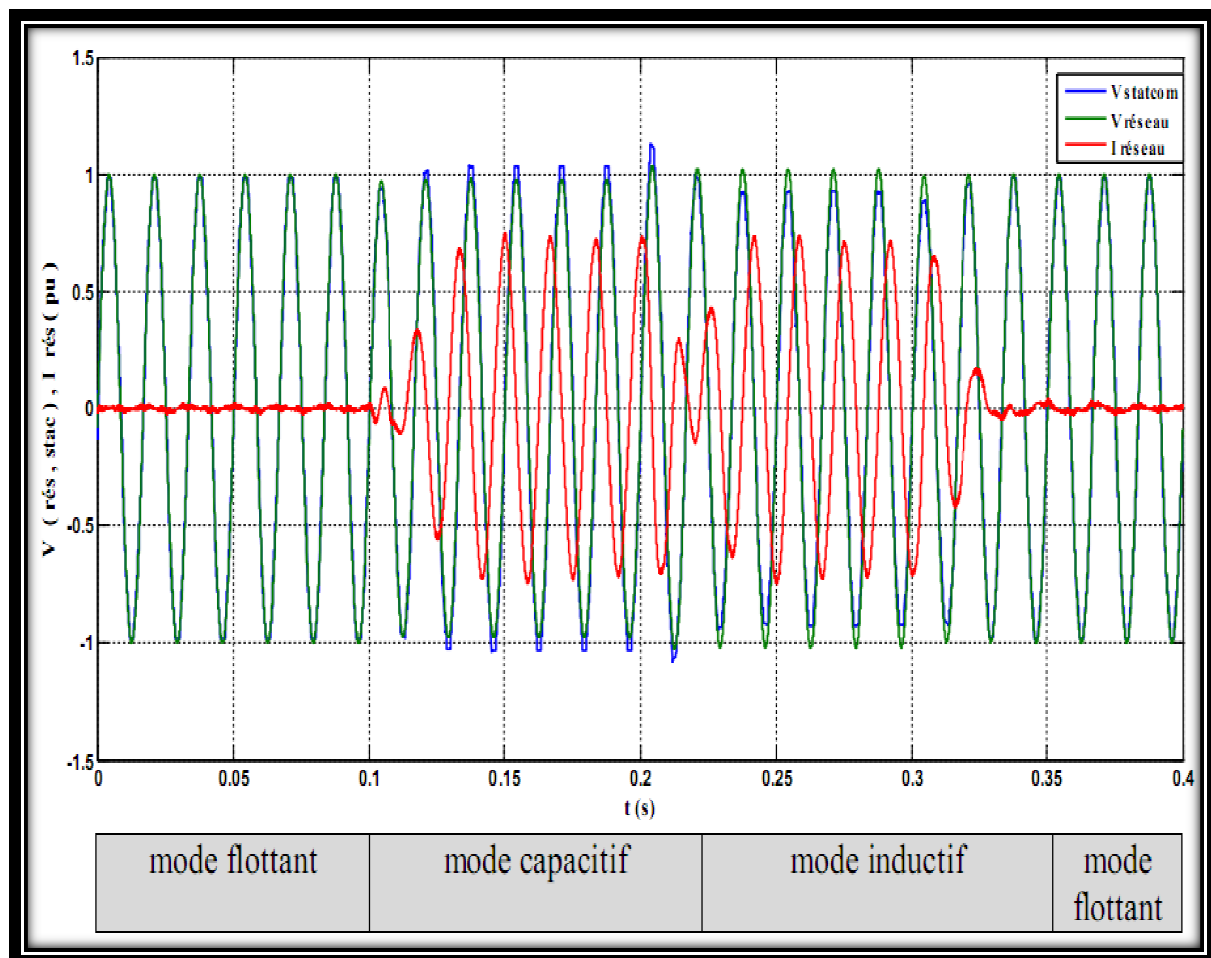


Figure IV.1 : Module STATCOM partie puissance.



## VI- 4 Résultats de simulation :



*Figure IV.3 : Courbes des tensions et courants en fonction de temps*

Nous notons que pendant la période (0s-0.1s) et (0.35s-0.4s) le dispositif STATCOM est en équilibre (mode flottant c-à-t hors service) la tension du réseau est égale à la tension du STATCOM, aucun courant ne circule.

Dans l'intervalle (0.1s-0.23s) la tension du STATCOM augmente par rapport à la tension du réseau, le courant triphasé généré par le STATCOM est en avance par rapport à la tension; dans ce cas le dispositif fonctionne en mode « capacitif ».

On observe pendant la période (0.23s-0.35s) que la tension du STATCOM démine par rapport à la tension du réseau. Le STATCOM réagit par injection d'un courant en retard par rapport à la tension c'est le fonctionnement en mode « inductif ».

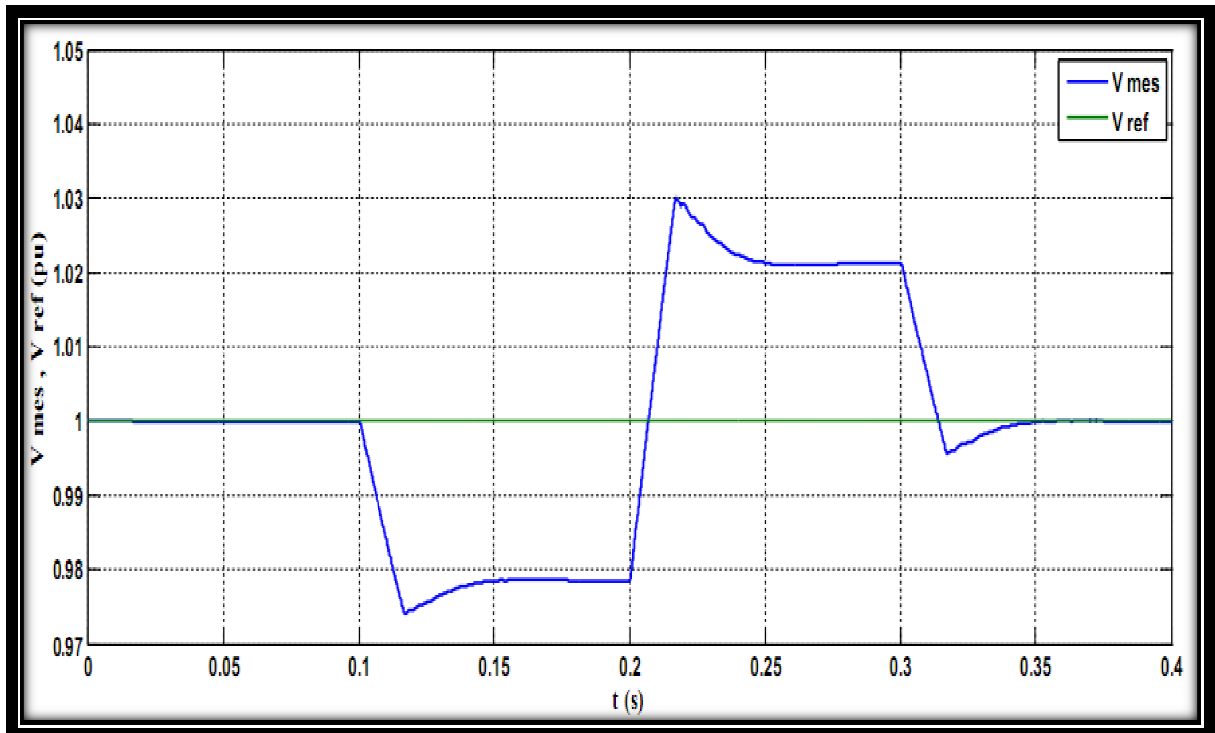


Figure IV.4 : Tensions ( $V_m$ ,  $V_{ref}$ ) en fonction de temps.

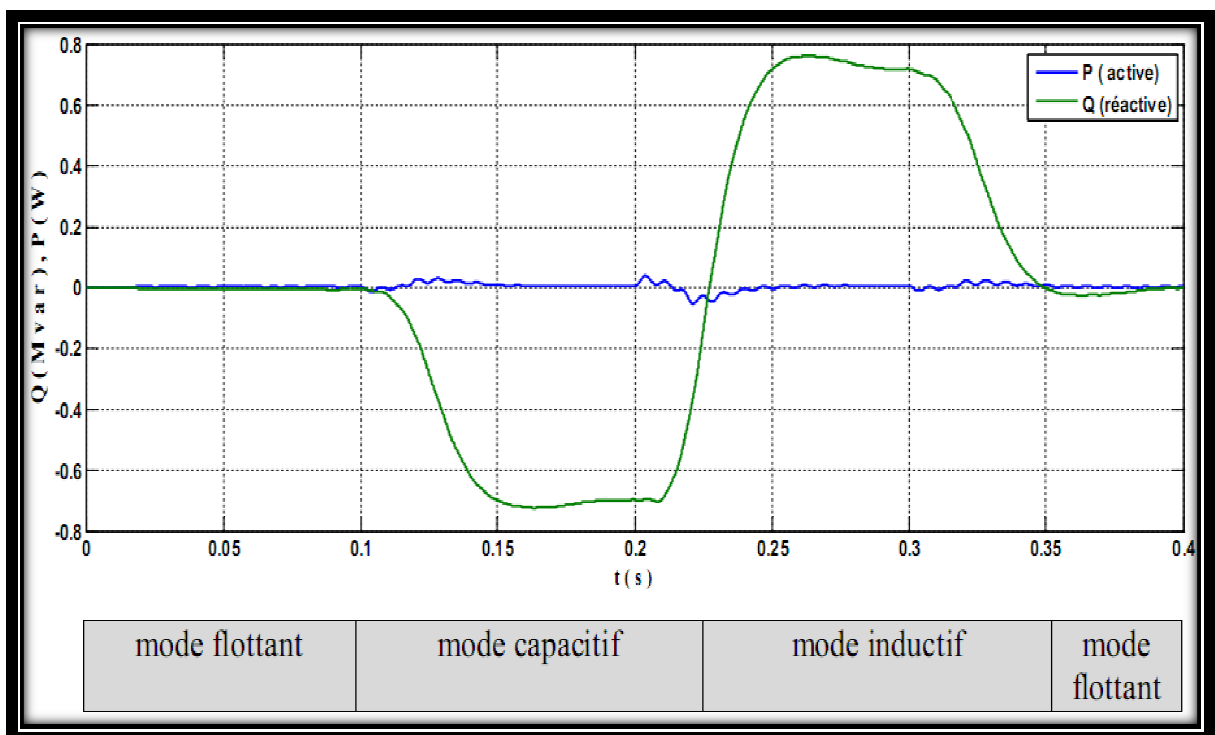


Figure IV.5: Puissances active et réactive du STATCOM en fonction de temps

On observe pendant la période (0s-0.1s) et (0.35s-0.4) que le réseau fonctionne en régime permanent ; aucune perturbation sur la tension (la différence entre la tension de référence et la tension mesurée est nul). Aucune puissance réactive et active n'a été produite par le STATCOM (aucun changement dans le réseau).

Dans l'intervalle de temps (0.1s-0.23s), le réseau est mené par une chute de tension (puissance réactive transmise plus que les normes). Dans ce cas le STATCOM est intervenu par l'absorption de courant réactive, la puissance absorbé est de l'ordre  $Q = -0.76$  Mvar (le STATCOM fonctionne en mode capacitif) ; aucun changement à propos la puissance active du réseau.

Dans l'intervalle de temps (0.23s-0.35s), il y a une surtension dans le réseau (puissance réactive transmise moins que les normes). Dans ce cas le STATCOM est intervenu par l'injection de courant réactive, la puissance injecté est de l'ordre  $Q = + 0.76$  Mvar (le STATCOM fonctionne en mode inductif) ; aucun changement à propos la puissance active du réseau.

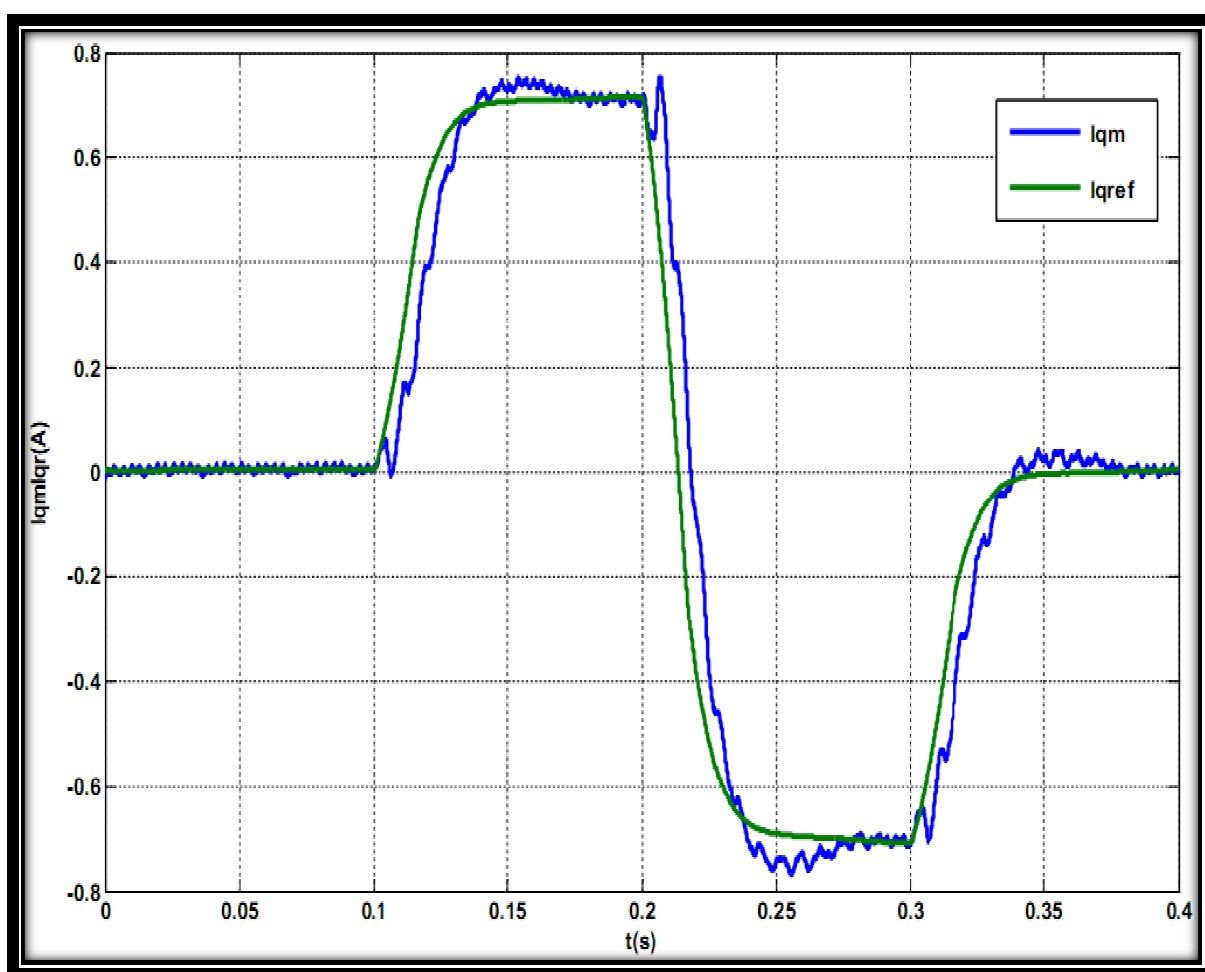
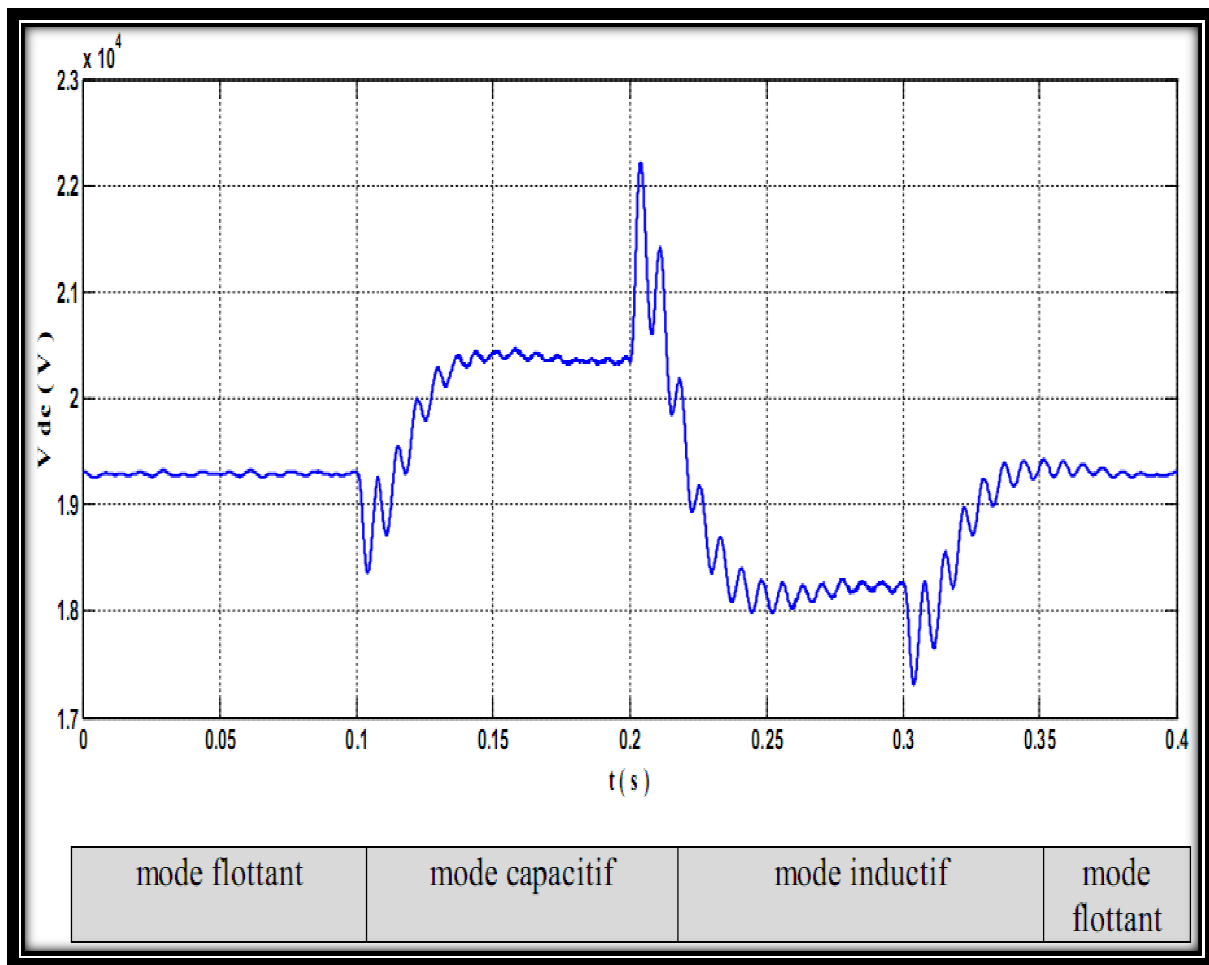


Figure IV.6 : Courant ( $I_{q\ m}$ ,  $I_{qref}$ ) d'onduleur VSC en fonction de temps.

En remarque que le courant de référence c'est l'image de courant mesure.



*Figure IV.7 : Tension ( $V_{dc}$ ) en fonction de temps (s).*

## VI-5 Conclusion

Les résultats de simulations sous l'environnement MATLAB/Simulink du dispositif STATCOM nous ont permis de mieux comprendre le fonctionnement de ce dispositif FACTS dans les différents modes de fonctionnement.

Le STATCOM est un moyen très efficace pour maintenir la tension stable aux jeux de barre auquel il est connecté. Quelque soit la perturbation ; chute de tension ou bien une surtension, il réagit d'une manière instantané soit par la génération de la puissance réactive, c'est son mode capacitif. Soit par l'absorption de la puissance réactive, c'est son mode inductif.



conclusion

Générale

Grace au nouveau concept appelé Systèmes Flexible de transmission à courant alternatif (FACTS), nous a permet de contrôler le flux de puissance active et réactive ainsi que l'augmentation des capacités de charge de lignes cela peut atteindre et même performé par l'injection des tensions (ou courant).

L'étude de ce mémoire se porte sur le contrôle de la tension par compensation shunt de l'énergie réactive avec un dispositif nommé STATCOM.

Il est indispensable de passé par les étapes suivantes pour atteindre cet objectif.

- Le premier chapitre, donner une bref étude des lois de transport de l'énergie électrique en exposant la problématique de la limite de puissance transportable en fonction des paramètres des réseaux ainsi que la chute de tension produite par le déséquilibre des charges.
- Le deuxième chapitre se base sur les principes de fonctionnements des différents types des dispositifs FACTS.
- Le troisième chapitre à fait l'objet d'une étude approfondie sur le compensateur STATCOM, structure de base, principe de fonctionnement et son réglage compensative sur un réseau de transport électrique.
- Le dernier chapitre fait apparaitre plusieurs essais de simulations sur un STATCOM couplé avec un réseau de transmission à l'aide de logiciel MATLAB/Simulink.

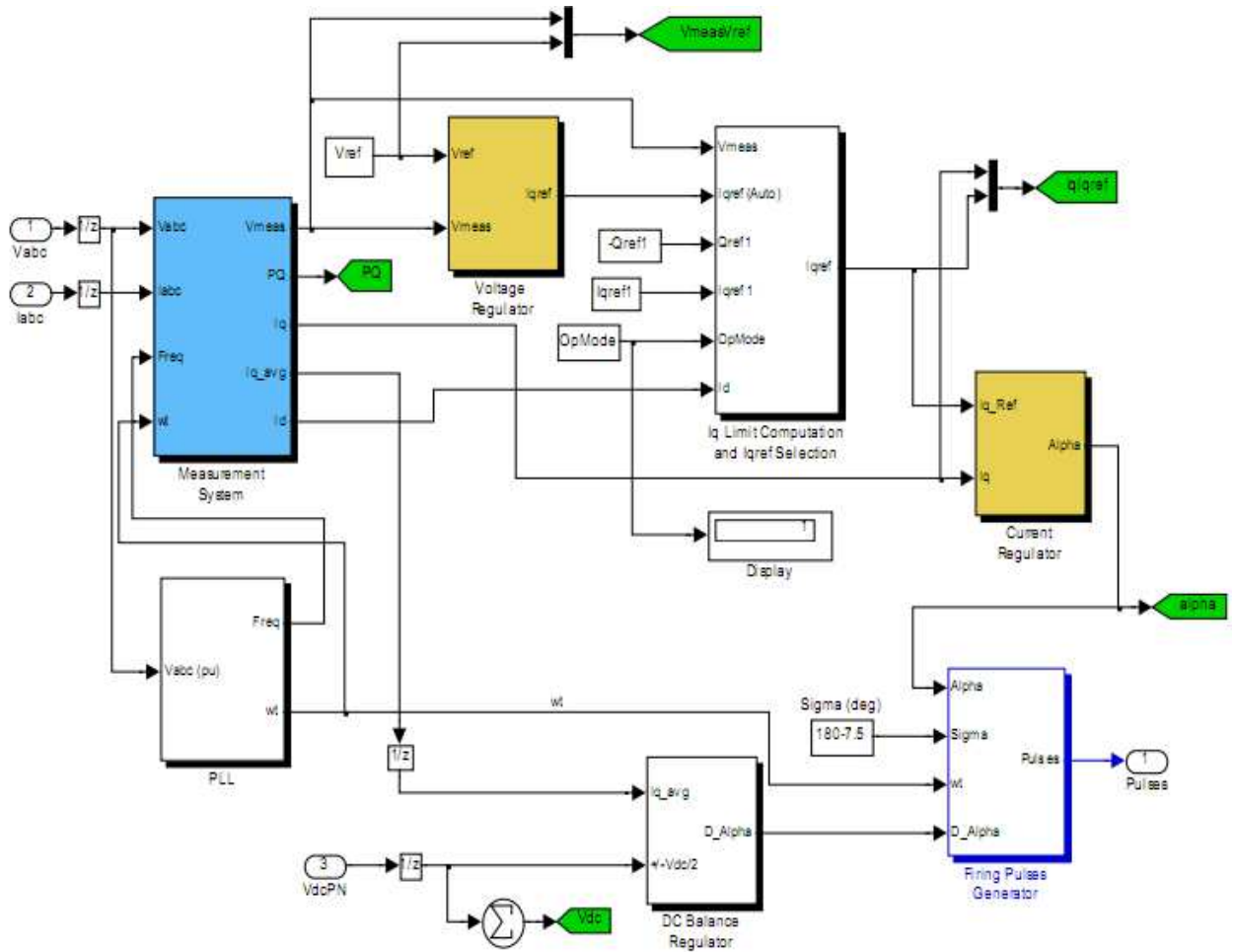
Les résultats atteints par la simulation ont confirmé l'efficacité de la stratégie de la commande adoptée qui a permet un contrôle indépendant et découplé des puissances active et réactive de ce dispositif en minimisant l'effet d'interaction entre ces puissances.

Ce modeste travail, nous pousse à adopter un projet au moins terme d'installation de dispositifs STATCOM dans notre réseau électrique qui a enregistré d'importantes perturbations influant sur la qualité de service.

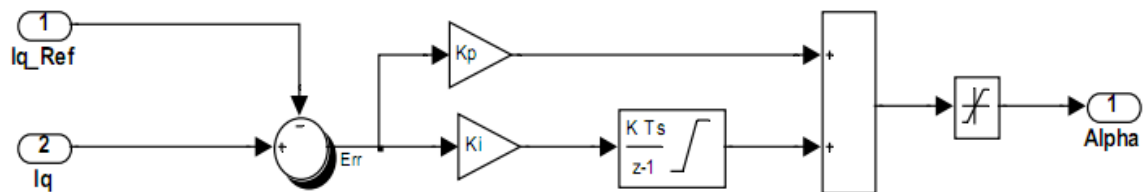
### *Bibliographie*

- [1] BOUTABA Samia "Amélioration de la stabilité d'un réseau électrique par l'utilisation d'un ASVC ", Mémoire de Magistère, université Hassiba Bent Bouali CHELEF, 2009.
- [2] BENRAS Med Amine et Laroui souleymane "Utilisation d'un dispositif STATCOM pour l'amélioration du transit de puissance d'un réseau de transport d'énergie alternatif ", mémoire de master université de Kasdi Merbah OUERGLA, 2015.
- [3] ALIBI Abdelaali , "Contrôle des Réseaux Electriques par les Systèmes FACTS: (Flexible AC Transmission Systems)" mémoire de magistère université de BATNA ,2009.
- [4] BELGUIDOUM Hocine, "Les systèmes FACTS utilisant les convertisseurs entièrement commandes" mémoire de magistère université SETIF ,2012
- [5] NABIL Mancer, (Contribution à l'optimisation de la puissance réactive en présence de dispositifs de compensation dynamique (FACTS)) mémoire de magistère ; université de Biskra 2013.
- [6] BOUDJELLA Houari, "contrôle des puissances et des tensions dans un réseau de transport au moyen de dispositifs FACTS (SVC) ",mémoire de magister université de Sidi Bel Abbès 2008.
- [7] BARAR ; Ladjici "Introduction aux Systèmes Flexibles de Transmission en Courant Alternatif « FACTS »" projet de fin d'études école nationale polytechnique 2002.
- [8] MAMMERI Oussama, "différentes méthodes de calcul de la puissance réactive dans un nœud à charge non linéaire en présence d'un système de compensation de l'énergie" mémoire de magister université de Batna 2012
- [9] NOROUZI Amir. , (" Flexible AC Transmission Systems: Theory, Control and Simulation of the STATCOM and SSSC", mémoire de magister université de New Brunswick, 2003.)
- [10] ALLAOUI Tayeb, "réglage robuste de L'UPFC pour optimiser l'écoulement des puissances dans un réseau électrique", mémoire de magister, université Mohamed Boudiaf ORAN - 04/2002.

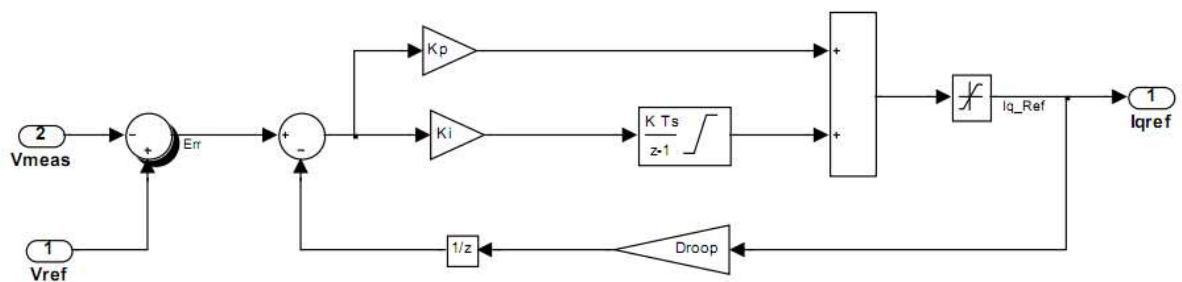
Amber



*Partie commande de STATCOM*



*Partie de régularisation de l'angle Alpha*



*Partie de régularisation de courant*