

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la**  
**Recherche Scientifique**



**Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued**

**FACULTE DE TECHNOLOGIE**

**DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE**

**Mémoire de fin d'étude**

Présenté pour l'obtention du diplôme de

**MASTER ACADEMIQUE**

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie mécanique

Spécialité : Électromécanique

**Thème**

**Compensation d'énergie réactive dans  
les réseaux électriques**

**Réalisé par :**

- ATIA Salim.
- HAMIDANI Zakaria.
- HEZLA Kheir Eddine.
- LAKHOUES Nacer Eddine

**Encadré par :**

- Dr. LAOUAMER Mosbah

**Co-encadré par :**

- Remha souheib

**Année Universitaire 2022-2023**





# Remerciements

*Nous Tenons à remercier avant tout Dieu le tout puissant, pour notre avoir donné la santé, le courage et la volonté d'étudier et pour notre avoir permis de réaliser ce modeste travail dans les meilleures conditions.*

*Au terme de cette modeste étude, je tiens à exprimer nos profondes gratitude et nos vifs remerciements à notre promoteur **Mr. Laouamer Mosbah** pour le soutien, l'aide et les conseils qu'il nous a dispensé pour l'élaboration de ce présent mémoire et à nos formations durant les années d'étude.*

*Un grand merci pour toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin pour la réalisation de ce mémoire.*





# Dédicaces

*Nous dédions cet humble travail:*

*À nos chers parents qui nous ont soutenu tout au long de  
nos études.*

*À tous nos chers membres de la famille.*

*Tous nos amis qui nous ont soutenus.*

*À tous ceux qui nous aiment et que nous aimons.*

*Pour vous.*



المُلخَص

Résumé

Abstract

## Résumé

Les convertisseurs de tension (ou courant) de la nouvelle génération des systèmes FACTS sont principalement basés sur les interrupteurs modernes (GTO ou IGBT), commandés en ouverture et en fermeture et connectés à des condensateurs comme source de tension continue. Ces systèmes sont classés en compensateurs shunt, série et hybride, tels que STACOM, SSSC et UPFC, en fonction de leur connexion au réseau.

Le rôle major des dispositifs FACTS est généralement la compensation de l'énergie électrique dans un réseau électrique basé sur les trois domaines de recherche suivants :

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

La modélisation et l'intégration efficaces des dispositifs de compensation dynamique (FACTS) pour l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique seront étudiées dans ce projet, en particulier les fonctions de contrôle offertes par le STACOM pour la compensation de la puissance réactive et le maintien de la tension des lignes de transport électriques.

**Mots-clés :** l'énergie électrique, modélisation, la puissance réactive, STACOM, FACTS.

## **Abstract**

The new generation of FACTS systems consists mainly of voltage (or current) converters, based on modern switches (GTO or IGBT) controlled in opening and closing, linked to capacitors as a source of DC voltage. These systems according to their connection to the network are distinguished into the shunt, serial and hybrid compensators such as STACOM, SSSC, and UPFC.

Generally, the main role of the FACTS Device is the compensation of electrical energy within an electrical network based on the following three research areas:

- The problems of power losses, and voltage drops.
- Optimization of power flow (Dispatching).
- Stability of tensions.

In this project, we will study the modeling and efficient integration of dynamic compensation devices (FACTS) for the improvement of the quality of electrical energy including the control functions offered by STACOM in the compensation of reactive power and maintenance of voltage of power lines.

**Keywords:** Electrical energy, modeling, reactive power, STACOM, FACTS.

## الملخص

يتكون الجيل الجديد من أنظمة **FACTS** بشكل أساسي من محولات الجهد (أو التيار)، استنادا إلى مفاتيح حديثة (**GTO** أو **IGTB**) يتم التحكم فيها في الفتح والإغلاق، مرتبطة بالمكثفات كمصدر لجهد التيار المستمر. تتميز هذه الأنظمة وفقا لاتصالها بالشبكة إلى معوضات تحويلية وتسلسلية وهجينة مثل: **UPFC, SSSC, STACOM** بشكل عام، يتمثل الدور الرئيسي لجهاز **FACTS** في تعويض الطاقة الكهربائية داخل شبكة كهربائية بناء على مجالات البحث الثلاثة التالية:

- مشاكل فقدان الطاقة، وانخفاض الجهد.
- تحسين تدفق الطاقة (الإرسال).
- استقرار التوترات.

في هذا المشروع، سوف ندرس النمذجة والتكامل الفعال لأجهزة التعويض الديناميكية (**FACTS**) لتحسين جودة الطاقة الكهربائية بما في ذلك وظائف التحكم التي تقدمها **STACOM** في تعويض الطاقة التفاعلية وصيانة جهد خطوط الطاقة.

**الكلمات الرئيسية:** الكلمات المفتاحية: الطاقة الكهربائية، النمذجة، الطاقة التفاعلية، **STACOM**،

**.FACTS**



# Sommaire

Dédicace

Remerciement

Résumé

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale

a

| <b>CHAPITRE I : Généralités sur les réseaux électriques</b> |    |
|-------------------------------------------------------------|----|
| I.1. Introduction                                           | 4  |
| I.2. La qualité de l'énergie électrique                     | 4  |
| I.2.1. Qualité de la tension                                | 4  |
| I.2.1.1. L'amplitude                                        | 5  |
| I.2.1.2. La fréquence                                       | 5  |
| I.2.1.3. Forme d'onde                                       | 6  |
| I.2.1.4. La symétrie du système triphasé                    | 6  |
| I.2.2. Qualité du courant                                   | 7  |
| I.2.3. Critères Qualité de l'énergie                        | 7  |
| I.2.4. Évaluation de la qualité d'énergie                   | 7  |
| I.2.5. Les normes de la qualité d'énergie électrique.       | 8  |
| I.3. Les perturbations électriques et leurs origines        | 8  |
| I.3.1. Creux ou coupures de tension                         | 8  |
| I.3.2. Déséquilibre du Système Triphasé                     | 9  |
| I.3.3. Fluctuations de Tension (Flicker)                    | 10 |
| I.3.4. Variation de la fréquence                            | 10 |
| I.4. Les perturbations harmoniques                          | 11 |
| I.4.1. Définition                                           | 11 |
| I.4.2. Sources harmoniques identifiables                    | 11 |
| I.4.3. Sources harmoniques non identifiables                | 11 |
| I.5. Caractéristiques des perturbations harmoniques         | 11 |
| I.5.1. Le taux de distorsion harmoniques (TDH)              | 11 |
| I.5.2. Facteur de puissance                                 | 11 |
| I.5.3. Le facteur de distorsion                             | 11 |
| I.5.4. Facteur de crête                                     | 11 |

|                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| I.6. Solutions de dépollution des réseaux électriques                                                 | 12 |
| I.6.1. Solutions traditionnelles                                                                      | 12 |
| I.6.2. Solutions modernes (le filtrage actif)                                                         | 17 |
| I.6.2.1. Principe de fonctionnement du filtre actif                                                   | 18 |
| I.6.2.2 Filtre actif série (FAS)                                                                      | 18 |
| I.6.2.3. Filtre actif parallèle (SFAP)                                                                | 19 |
| I.6.2.4. La combinaison parallèle-série actifs (UPQC)                                                 | 20 |
| I.6.2.5. Filtre actif hybride                                                                         | 20 |
| I.7. Conclusion                                                                                       | 21 |
| <b>CHAPITRE II : Concepts de base de FACT</b>                                                         |    |
| II.1. Introduction                                                                                    | 23 |
| II.2. Définition des FACTS                                                                            | 23 |
| II.3. Classification des dispositifs FACTS                                                            | 24 |
| II.4. Rôle des dispositifs FACTS                                                                      | 25 |
| II.5. Fonctionnement des FACTS                                                                        | 26 |
| II.6. Différents types des dispositifs FACTS                                                          | 26 |
| II.6.1. Compensateurs shunts (parallèles)                                                             | 27 |
| II.6.1.1. Compensateurs parallèles à base de thyristors                                               | 27 |
| II.6.1.2. Compensateurs parallèles à base de GTO thyristors                                           | 29 |
| II.6.2. Compensateurs série                                                                           | 30 |
| II.6.2.1. Compensateur série contrôlée par thyristor (TCSC)                                           | 30 |
| II.6.2.2. Compensateur série contrôlée par thyristor (TCSR)                                           | 31 |
| II.6.2.3. Compensateur série synchrone (SSSC)                                                         | 32 |
| II.6.3. Compensateurs hybrides (série - parallèle)                                                    | 33 |
| II.6.3.1. UPFC (Unified Power Flow Controller)                                                        | 33 |
| II.7. Coût des dispositif FACTS                                                                       | 35 |
| II.8. Les avantages, les inconvénients et les contraintes de la technologie des dispositifs FACTS     | 35 |
| II.9. Conclusion                                                                                      | 35 |
| <b>CHAPITRE III : Structure et principe de fonctionnement du STATCOM<br/>modélisation et commande</b> |    |
| III.1. Introduction                                                                                   | 37 |
| III.2. Principe de fonctionnement                                                                     | 37 |

|                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------|----|
| III.3. Effet de la compensation shunt (STATCOM) sur le réseau électrique | 41 |
| III.4. Modélisation du STATCOM                                           | 42 |
| III.4.1. Modèle Mathématique Simplifié                                   | 43 |
| III.4.2. Modèle mathématique en considérant le circuit DC                | 45 |
| III.5. Contrôle du STATCOM                                               | 48 |
| III.5.1. Détermination des Références                                    | 48 |
| III.5.2. Méthode Watt-Var découplée                                      | 49 |
| III.5.3. Régulateur PI avec compensation de pôles                        | 51 |
| III.5.4. Régulation de la tension continue $U_{dc}$                      | 52 |
| III.6. Conclusion                                                        | 54 |
| <b>Chapitre IV : Simulations et interprétations des résultats</b>        |    |
| IV.1. Introduction                                                       | 56 |
| IV.2. Matériels et méthodes                                              | 56 |
| IV.3. Description du Système étudié                                      | 56 |
| IV.3.1. Les caractéristiques du réseau sont les suivantes                | 56 |
| IV.3.2. Caractéristiques du STATCOM                                      | 57 |
| IV.4. Résultats de simulation                                            | 59 |
| IV.5. Conclusion                                                         | 62 |
| <b>Conclusion générale</b>                                               | 64 |
| <b>Bibliographique</b>                                                   |    |

# Liste des figures

# LISTE DES FIGURES

Page

| <b>Chapitre I : Généralités sur les réseaux électriques</b>                                       |                                                            |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure 1</b>                                                                                   | Amplitude et fréquence de tension                          | 6  |
| <b>Figure 2</b>                                                                                   | Système triphasé symétrie                                  | 6  |
| <b>Figure 3</b>                                                                                   | Creux de tension                                           | 9  |
| <b>Figure 4</b>                                                                                   | Déséquilibre du système triphasé de tension                | 9  |
| <b>Figure 5</b>                                                                                   | Fluctuations de tension                                    | 10 |
| <b>Figure 6</b>                                                                                   | Variation de fréquence                                     | 10 |
| <b>Figure 7</b>                                                                                   | Représentation d'une onde déformée                         | 11 |
| <b>Figure 8</b>                                                                                   | Déférentes solutions utilisées dans le filtrage du courant | 14 |
| <b>Figure 9</b>                                                                                   | Raccordement d'un filtre passif                            | 15 |
| <b>Figure 10</b>                                                                                  | Filtre passif série                                        | 15 |
| <b>Figure 11</b>                                                                                  | Filtre passif parallèle                                    | 15 |
| <b>Figure 12</b>                                                                                  | Filtre amorti                                              | 16 |
| <b>Figure 13</b>                                                                                  | Filtres résonants agissant sur plusieurs rangs harmoniques | 16 |
| <b>Figure 14</b>                                                                                  | Schéma de principe d'un filtre actif série                 | 18 |
| <b>Figure 15</b>                                                                                  | Filtre actif série                                         | 19 |
| <b>Figure 16</b>                                                                                  | Filtre actif parallèle.                                    | 19 |
| <b>Figure 17</b>                                                                                  | Filtre combiné parallèle-série (UPQC).                     | 20 |
| <b>Figure 18</b>                                                                                  | Filtre actif hybride                                       | 21 |
| <b>Chapitre II : Concepts de base de FACT</b>                                                     |                                                            |    |
| <b>Figure 1</b>                                                                                   | Schéma du TCR                                              | 27 |
| <b>Figure 2</b>                                                                                   | Schéma du TSC                                              | 28 |
| <b>Figure 3</b>                                                                                   | Schéma du SVC                                              | 28 |
| <b>Figure 4</b>                                                                                   | Caractéristique d'un SVC                                   | 29 |
| <b>Figure 5</b>                                                                                   | STATCOM, (a) structure de base, (b) schéma équivalent      | 29 |
| <b>Figure 6</b>                                                                                   | Schéma de structure du TCSC                                | 31 |
| <b>Figure 7</b>                                                                                   | Système TCSR : a). Montage, b). Réactance apparente        | 32 |
| <b>Figure 8</b>                                                                                   | Schéma de base du SSSC                                     | 33 |
| <b>Figure 9</b>                                                                                   | Schéma de base d'un UPFC                                   | 34 |
| <b>Chapitre III : Structure et principe de fonctionnement du STATCOM modélisation et commande</b> |                                                            |    |

|                                                                   |                                                                                          |    |
|-------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure 1</b>                                                   | <i>Structure de base d'un STATCOM couplé au réseau</i>                                   | 37 |
| <b>Figure 2</b>                                                   | <i>Schéma de principe d'un STATCOM</i>                                                   | 38 |
| <b>Figure 3</b>                                                   | <i>Schéma du STATCOM couplé au réseau électrique</i>                                     | 38 |
| <b>Figure 4</b>                                                   | <i>Courbes simulées courant et tension en mode capacitif.</i>                            | 40 |
| <b>Figure 5</b>                                                   | <i>Courbes simulées courant et tension en mode inductif</i>                              | 40 |
| <b>Figure 6</b>                                                   | <i>Ps, Qs, Psh, et Qsh en fonction de Vsh</i>                                            | 42 |
| <b>Figure 7</b>                                                   | <i>STATCOM schéma équivalent</i>                                                         | 43 |
| <b>Figure 8</b>                                                   | <i>Passage du repère (<math>\alpha, \beta</math>) vers le repère (<math>d, q</math>)</i> | 45 |
| <b>Figure 9</b>                                                   | <i>Schéma équivalent du STATCOM en considérant le circuit DC</i>                         | 46 |
| <b>Figure 10</b>                                                  | <i>Identification des courants de référence</i>                                          | 48 |
| <b>Figure 11</b>                                                  | <i>Transfert du Ishd en fonction de X1</i>                                               | 49 |
| <b>Figure 12</b>                                                  | <i>Transfert Ishq en fonction de X2.</i>                                                 | 50 |
| <b>Figure 13</b>                                                  | <i>Régulation et découplage de Ishd</i>                                                  | 50 |
| <b>Figure 14</b>                                                  | <i>Schéma de Régulation du STATCOM (Watt-Var découplée</i>                               | 51 |
| <b>Figure 15</b>                                                  | <i>Schéma de bloc de la régulation des courants du STATCOM</i>                           | 51 |
| <b>Figure 16</b>                                                  | <i>Régulation de la tension continue</i>                                                 | 53 |
| <b>Chapitre IV : Simulations et interprétations des résultats</b> |                                                                                          |    |
| <b>Figure 1</b>                                                   | <i>Module STATCOM partie puis</i>                                                        | 57 |
| <b>Figure 2</b>                                                   | <i>Réseaux électriques a 500 KV</i>                                                      | 58 |
| <b>Figure 3</b>                                                   | <i>Courbes des tensions et courant en fonction de temps</i>                              | 59 |
| <b>Figure 4</b>                                                   | <i>Tensions (<math>V_m, V_{ref}</math>) en fonction de temps</i>                         | 60 |
| <b>Figure 5</b>                                                   | <i>Puissances active et réactive du STATCOM en fonction de temps</i>                     | 60 |
| <b>Figure 6</b>                                                   | <i>Courant (<math>I_{qm}, I_{qref}</math>) d'onduleur VSC en fonction de temps</i>       | 61 |
| <b>Figure 7</b>                                                   | <i>Tension (<math>V_{dc}</math>) en fonction de temps (s).</i>                           | 62 |

# Liste des tableaux



# LISTE DES TABLEAUX

Page

| <i>CHAPITRE II : Concepts de base de FACT</i> |                                         |    |
|-----------------------------------------------|-----------------------------------------|----|
| <b>Tableau 1</b>                              | <i>Principaux dispositifs des FACTS</i> | 24 |



# Liste des symboles

## Abréviations

T.H.T : Très Haute Tension

H.T : Haute Tension

HTA : Haute Tension A

HTB : Haute Tension B

BTA : Basse Tension A

BTB : Basse Tension B

RMG : Rayon moyen géométrique

## Symboles

$R'$ : résistance linéique ( $\Omega/\text{km}$ )

$C'$ : capacité linéique ( $\text{F}/\text{km}$ )

$L'$ : inductance linéique ( $\text{H}/\text{km}$ )

$\rho$ : résistivité du matériau ( $\Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{m}$ )

$S$ : Section des conducteurs ( $\text{mm}^2$ )

$l$ : Longueur de la ligne ou câble ( $\text{km}$ )

$t_1, t_2$ : les températures en  $^{\circ}\text{C}$  à l'Etat initiale et à l'état final du conducteur.

$R_1, R_2$ : les résistances du conducteur respectivement aux températures  $t_1$  et  $t_2$ .

$T$ : température paramétrique ( $^{\circ}\text{C}$ ).

$K$ : le coefficient du spiralage du conducteur.

$q$ : facteur de Kelvin

$f$ : fréquence du réseau ( $\text{Hz}$ ).

$B$ : induction magnétique ( $\text{wb}/\text{m}^2$ )  $H$ : champ magnétique ( $\text{At}/\text{m}$ )

$\psi$ : Flux ( $\text{Wb} \cdot \text{t}/\text{m}$ )

$\mu_0$ : La permittivité du vide ou de l'air ( $\mu_0 = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H}/\text{m}$ )

$G_{11}$  : Rayon moyen géométrique du faisceau.  
 $g_{11}$  : Rayon moyen géométrique d'une corde.  
 $n$  : Nombre de corde dans un faisceau.  
 $r_t$  : Rayon du cercle passant par les centres des cordes.  
 $D_{eq}$  : Distance géométrique moyenne (GMD)  
 $Y$  : Admittance de la ligne ( $\Omega$ )  
 $Z$  : Impédance de la ligne ( $\Omega$ )  
 $\overline{Z}_c$  : Impédance caractéristique ( $\Omega$ )  
 $\gamma$  : Coefficient de propagation  
 $\theta$  : Angle propagation  
 $V_R$  : Tension au récepteur (kV)  
 $I_R$  : Courant au récepteur (A)  
 $\cos(\varphi_R)$  : facteur de puissance au récepteur  
 $V_S$  : Tension a la source (kV)  
 $I_S$  : Courant a la source (A)  
 $S_S$  : Puissance apparente a la source  
 $P_S$  : Puissance active a la source (MW)  
 $Q_S$  : Puissance réactive a la source (MVAR)  
 $Q_C$  : Puissance réactive fournie par une capacité (MVAR)  
 $\cos(\varphi_S)$  : Facteur de puissance a la source  
 $\eta$  : Le rendement de la ligne (%)  
 $\Delta \overline{U}$  : La chute de tension dans la ligne

# **Introduction générale**

## Introduction générale

L'évolution des réseaux électriques a été marquée, ces dernières années, par l'émergence de nouvelles stratégies de conception, d'exploitation et de contrôle. En effet, la plupart des pays ont adopté les mesures suivantes pour faire face à la croissance rapide de la demande en énergie électrique :

- La mise en service de centrales plus puissantes.
- L'extension du maillage des réseaux de transport et de distribution.
- Les échanges d'énergie entre les pays grâce aux interconnexions internationales, voire intercontinentales.

Cette complexité de la structure des réseaux électriques a engendré des problèmes actuels, notamment en matière de gestion en ligne et de stabilité suite à un défaut, ce qui a favorisé le recours à des moyens de contrôle. Jusqu'à la fin des années quatre-vingt, les seuls dispositifs disponibles pour remplir ces fonctions étaient principalement des dispositifs électromécaniques :

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

Cependant, ces dispositifs présentaient des problèmes d'usure et leur réactivité relativement lente limitait leur utilisation à quelques fois par jour seulement, ce qui les rendait peu adaptés pour un contrôle continu des flux de puissance.

Une autre technique de réglage des flux de puissance active et réactive, utilisant l'électronique de puissance, a fait ses preuves. Aujourd'hui, grâce aux améliorations des performances de l'électronique de puissance, de nouveaux équipements appelés FACTS (Flexible Alternative Current Transmission System) émergent, ce qui permet d'améliorer la stabilité des réseaux électriques et d'accroître la capacité de transport des lignes.

Le développement récent des dispositifs FACTS ouvre de nouvelles perspectives pour une exploitation plus efficace des réseaux électriques, en permettant une action continue et rapide sur les différents paramètres du réseau tels que la tension, le déphasage et l'impédance. Ainsi, les flux de puissance peuvent être mieux contrôlés et les tensions mieux maintenues, ce qui permet d'augmenter les marges de stabilité ou de s'approcher des limites thermiques des lignes.

La nouvelle génération de systèmes FACTS est principalement constituée de convertisseurs de tension (ou de courant) basés sur des interrupteurs modernes (GTO ou IGBT) commandés pour l'ouverture et la fermeture, associés à des condensateurs comme source de tension continue. Selon leur connexion au réseau, ces systèmes se distinguent en tant que compensateurs shunt, série et hybrides tels que le STACOM, le SSSC et l'UPFC.

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

- La résolution des problèmes de pertes de puissance et de chutes de tension.
- L'optimisation de l'écoulement de puissance (dispatching).
- La stabilisation des tensions.

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

Le présent mémoire est structuré comme suit :

Dans le premier chapitre, nous décrivons d'une façon générale les réseaux électriques (les types, les problèmes dans les réseaux ...).

Le deuxième chapitre définit la ligne de transport et ces paramètres.

La modélisation de dispositif STATCOM a fait l'objectif du troisième chapitre. La stratégie de commande Watt-Var découplé adoptée pour le contrôle des courants actifs et réactifs de ce dispositif est expliqué ainsi que le calcul de tous les régulateurs proportionnels intégraux.

Dans le quatrième chapitre on a réalisé un modèle du système sur le SIMULINK MATLAB et l'interprétation des résultats. Finalement, divers exemples d'un réseau simple comportant un STATCOM ont été présentés afin de montrer la validité des stratégies de commande développées.

Ce travail se termine par une conclusion générale dans laquelle on résume les principaux résultats obtenus et on énumérera les perspectives à ce travail.





# **Chapitre I**

## **Qualité d'énergie électrique**

## **I.1. Introduction**

Le système de tensions triphasées, sinusoïdales et équilibrées, avec une fréquence de 60 Hz, produit de l'énergie électrique. Cependant, diverses perturbations détériorent la qualité de l'onde de ces tensions dans les réseaux électriques. Les perturbations peuvent être causées par une anomalie dans le réseau électrique ou par la nature de fonctionnement des charges non linéaires. Ces perturbations ont un impact négatif sur la durée de vie et le fonctionnement des équipements électriques. En outre, la croissance des apps électroniques a conduit à l'apparition d'appareils contemporains plus réceptifs aux fluctuations de tension. Afin d'éviter le dysfonctionnement des équipements, des moyens de compensation tels que des compensateurs passifs, actifs ou hybrides sont utilisés.

D'une part, il est vrai que la qualité de l'onde a un effet financier direct sur les consommateurs d'électricité. Une panne dans une usine automatisée qui oblige à arrêter la chaîne de production prend des heures et entraîne des pertes financières importantes. D'autre part, le fournisseur d'électricité est également préoccupé par la qualité de l'onde pour des raisons commerciales et pour maintenir la confiance, évitant ainsi les plaintes coûteuses des clients. Un certain nombre de perturbations sont causées par le fonctionnement des charges non linéaires, tandis que d'autres perturbations sont causées par des accidents et des pannes sur le réseau électrique [1].

Ce chapitre définit le terme « qualité de l'énergie électrique », et présente les principales perturbations électriques ainsi que leurs origines, caractéristiques et conséquences.

## **I.2. La qualité de l'énergie électrique**

La qualité de l'énergie désigne plus concrètement la qualité de la fourniture électrique.

Celle-ci dépend de trois facteurs qui sont la continuité d'alimentation, la qualité de l'onde de tension et la qualité de courant. Donc nous allons définir ces dernières notions dans les paragraphes suivantes.

### **I.2.1. Qualité de la tension**

La qualité de la tension alternative est directement liée aux propriétés de ses composants, telles que représentées dans :

- La forme d'onde qui doit être sinusoïdale : sans de distorsions, de pics, de creux...
- L'amplitude.
- La fréquence.

la symétrie du système triphasé, caractérisée par l'égalité des modules des trois tensions et de leurs déphasages relatifs.[2]

Tout phénomène physique affectant une ou plusieurs de ces caractéristiques peut être considéré comme perturbation. En pratique, ces perturbations sont classées selon la durée du phénomène. Ainsi, il est possible de distinguer :

- les altérations de l'onde de tension (harmonique, déséquilibre, flicker). Ces phénomènes sont permanents ou durent au minimum plusieurs minutes.
- les creux de tension, surtension et coupures brèves d'une durée de l'ordre d'une à quelques secondes.
- les surtensions transitoires, de durée inférieure à une période. Dans ce qui suit nous nous restreindrons à la présentation des perturbations provoquées par les harmoniques ainsi que leurs conséquences néfastes sur le réseau électrique.[3]

#### **I.2.1.1. L'amplitude**

L'amplitude de la tension est un facteur crucial pour la qualité de l'électricité. Elle constitue en général le premier engagement contractuel du distributeur d'énergie.

Généralement, les fluctuations de tension sont des variations de basses fréquences de valeur efficace de tension. Dans le cas idéal, les trois tensions ont la même amplitude. Cependant, plusieurs phénomènes perturbateurs peuvent affecter cette amplitude, en fonction de sa variation, on distingue deux grandes familles de perturbations :

- Les creux de tension, coupures et surtensions qui se caractérisent par des variations importantes de l'amplitude. Elles ont pour principale origine des courts circuits, et peuvent avoir des conséquences importantes pour les équipements électriques.
- Les variations de tension qui se caractérisent par des variations de l'amplitude de la tension inférieure à 10% de sa valeur nominale. Elles sont généralement dues à des charges fluctuantes ou des modifications de la configuration du réseau.[2]

#### **I.2.1.2. La fréquence**

Dans le cas idéal, la fréquence nominale de la tension alternative sinusoïdale fournie par le réseau est constante et de 50/60 Hz selon le pays [4].

Le maintien de la fréquence de la tension en réseau dépend de l'équilibre établi entre la charge et la puissance des centrales. Comme cet équilibre évolue dans le temps, il en résulte de petits écarts de fréquence qui dépendent des particularités de la charge et de la réponse de la production. Par ailleurs, le réseau peut être soumis à des variations plus importantes dues à des courts-circuits ou des variations importantes de charge ou de production qui causent des

variations de fréquence temporaires dont l'amplitude et la durée dépendent de la sévérité de l'événement.

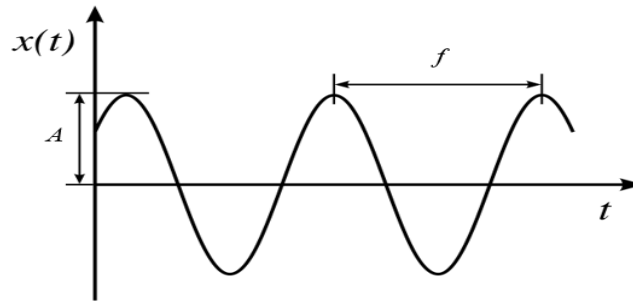


Figure I.1: Amplitude et fréquence de tension

### I.2.1.3. Forme d'onde

La forme d'onde des trois tensions formant un système triphasé doit être la plus proche possible d'une sinusoïde. En cas de perturbations au niveau de la forme d'onde, la tension n'est plus sinusoïdale et peut en général être considérée comme une onde fondamentale à 50Hz associée à des ondes de fréquences supérieures ou inférieures à 50 Hz appelées également harmoniques. Les tensions peuvent également contenir des signaux permanents mais non-périodiques, alors dénommés bruits.

### I.2.1.4. La symétrie du système triphasé

Le système est symétrique si les amplitudes des grandeurs sinusoïdales sont égales et si le déphasage entre deux grandeurs consécutives vaut  $120^\circ$  ( $2\pi/3$ ).

Le déséquilibre de tension sert à caractériser les asymétries d'amplitude et de déphasage des tensions d'alimentation triphasées. Le taux de déséquilibre de tension est défini, suivant la méthode des composantes symétriques de Fortescue.

Le déséquilibre de tension qui s'applique aux tensions triphasées a deux causes principales, soient les asymétries d'impédance de réseau et les déséquilibres de charge (ou de courant) [5].

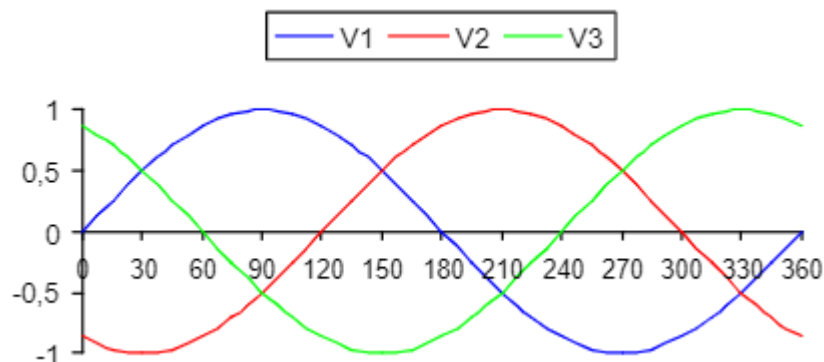


Figure I.2: Système triphasé symétrie.

### I.2.2. Qualité du courant

La qualité du courant est relative à une dérive des courants de leur forme idéale, et se caractérise de la même manière que pour les tensions par quatre paramètres. Le terme « qualité du courant » est rarement utilisé, car la qualité du courant est étroitement liée à la qualité de la tension et la nature des charges. Pour cette raison, « la qualité de l'énergie électrique » est souvent réduite à « la qualité de la tension ».[2]

### I.2.3. Critères Qualité de l'énergie

Les critères de qualité de l'électricité proviennent directement des perturbances électromagnétiques observées dans les réseaux électriques. La capacité d'un appareil ou d'un dispositif à fonctionner normalement dans un environnement électromagnétique sans produire lui-même des perturbations nuisibles aux autres appareils ou dispositifs est connue sous le nom de compatibilité électromagnétique (CEM). La (C.E.M) divise ces perturbations dans deux catégories :

-  Basses fréquences (moins de 9 kHz)
-  Hautes fréquences (plus de 9 kHz).

Les perturbations électrotechniques sont généralement de basse fréquence. Il existe de nombreux phénomènes observés, notamment des creux et des coupures de tension, des surtensions, des fluctuations de tension (flicker), des variations de fréquence, des déséquilibres dans un système triphasé, des harmoniques et des inter harmoniques.

### I.2.4. Évaluation de la qualité d'énergie

La qualité de l'énergie électrique est importante pour les fournisseurs et les consommateurs.

Le fournisseur d'énergie électrique à l'obligation de transport et de distribution, qu'il gère. La valeur de la fréquence avec les limites de variations acceptées dans divers régimes de fonctionnement et la continuité de l'alimentation électrique des consommateurs. Le consommateur d'énergie est intéressé à avoir une qualité adéquate de l'énergie, mais il est également impliqué dans le maintien de la qualité par le type de récepteur utilisé et par l'utilisation judicieuse de ceux-ci. Les principales influences négatives produites par les récepteurs des consommateurs comprennent la fabrication d'harmoniques de courant et de tension, ainsi que le fonctionnement dans des régimes déséquilibrés et non symétriques. La qualité de l'énergie électrique aux bornes des récepteurs est évaluée principalement, conformément aux normatifs d'écarts admissibles de la valeur réelle des paramètres des valeurs nominales[3].

### **I.2.5. Les normes de la qualité d'énergie électrique.**

Afin de limiter les effets des perturbations électromagnétiques sur les réseaux électriques, des normes ont été mises en place. Les deux principaux organismes qui ont établi de telles normes sont la Commission Électrotechnique Internationale (CEI) et l'IEEE. Les normes qu'ils ont établies sont, de façon respective, la série CEI 61000 et l'IEEE Standard 519.

### **I.3. Les perturbations électriques et leurs origines**

La qualité de l'énergie électrique est étroitement liée à différents paramètres, principalement la qualité de l'onde de tension, laquelle est caractérisée par les paramètres suivants :

- La fréquence.
- L'amplitude des trois tensions.
- La forme d'onde qui doit être la plus proche possible d'une sinusoïde.
- Un système triphasé, caractérisée par l'égalité des modules des trois tensions et de leur déphasage. [3]

Les réseaux électriques sont très pollués et soumis à de multiples agressions à cause des perturbations électriques, qu'on peut définir en cinq catégories :

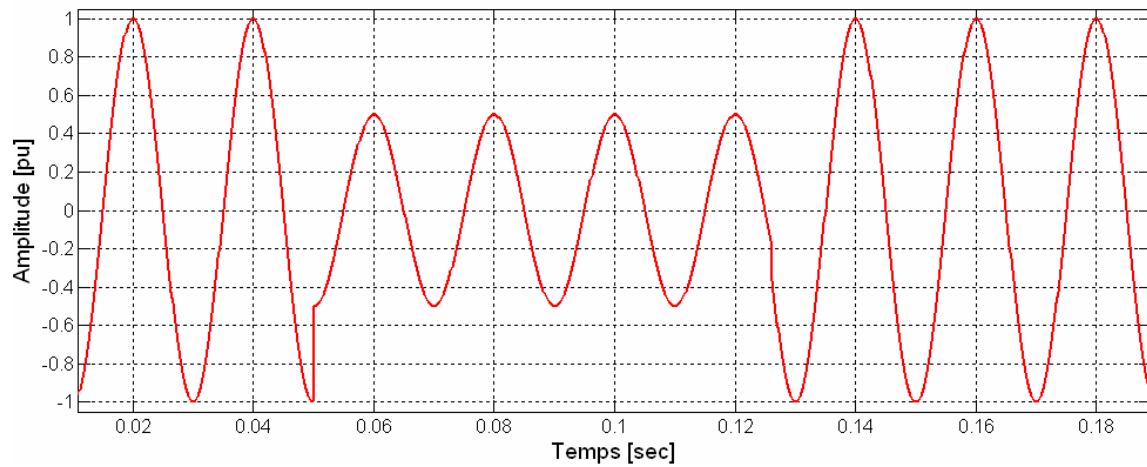
- Creux de tension
- Variation de la tension
- Court-circuit
- Déséquilibre de système triphasé
- Variation de fréquence

#### **I.3.1. Creux ou coupures de tension**

Un creux de tension est une brusque réduction de tension en un point du réseau, à une valeur entre 10% et 90% de la tension nominale, suivi de son rétablissement après une courte durée allant d'une demi-période jusqu'à quelques secondes.

Une coupure de tension quant à elle est une diminution brutale de la tension à une valeur supérieure à 90% de la tension nominale ou disparition totale pendant une durée comprise entre 10 ms et une minute pour les brèves et supérieure à une minute pour les longues.

Ils peuvent être produits par des manœuvres d'enclenchement mettant en jeu des courants de fortes intensités ou par le fonctionnement consécutif des protections suite à l'apparition de défauts dans le réseau.[6]

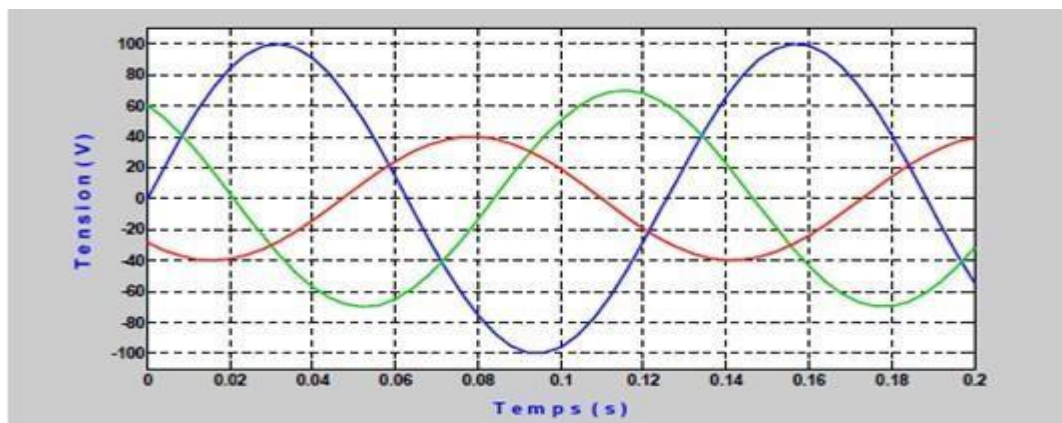


**Figure I.3: Creux de tension.**

**Conséquences:** perturbation ou arrêt du procédé, pertes de données, données erronées, ouverture de contacteurs, verrouillage de variateurs de vitesse, ralentissement ou décrochage des moteurs et extinction de lampes à décharge.

### I.3.2. Déséquilibre du Système Triphasé

Lorsque les trois tensions ne sont pas identiques en amplitude et/ou ne sont pas décalés d'un angle  $120^\circ$  les unes par rapport aux autres, on parlera de déséquilibre du système triphasé comme le montre la figure I.4. Un réseau électrique triphasé équilibré alimentant un récepteur électrique triphasé non équilibré conduit à des déséquilibres de tension dus à la circulation de courants non équilibrés dans les impédances du réseau.[5]



**Figure I.4: Déséquilibre du système triphasé de tension**

**Conséquences:** couples moteurs inverses (vibrations) et sur-échauffement des machines asynchrones.

### I.3.3. Fluctuations de Tension (Flicker)

Les fluctuations de tension sont une suite de variations de tension ou de variations cycliques ou aléatoires de l'enveloppe d'une tension dont les caractéristiques sont la fréquence et l'amplitude. Les variations de tension sont des variations de la valeur efficace ou de la valeur crête inférieure à 10 de la tension nominale. L'effet visible des lampes (papillotement de la lumière) est à l'origine du terme Flicker. Les fours à arc sont parmi les causes les plus courantes de fluctuations de tension dans les réseaux de distribution et de transmission..[7]

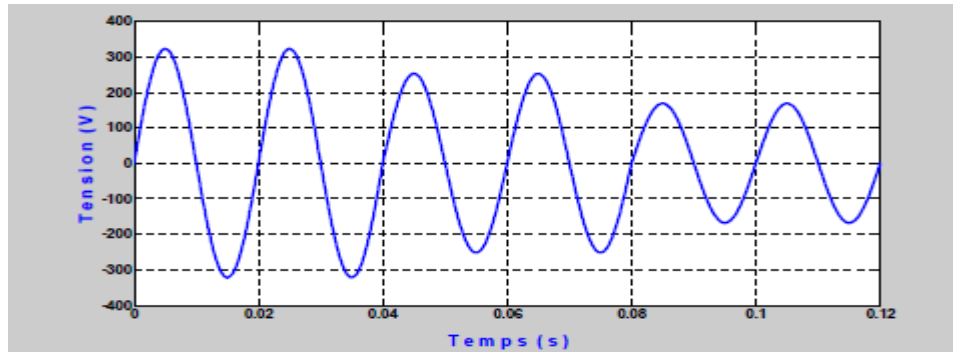


Figure I.5: Fluctuations de tension

**Conséquences :** Fluctuation de la luminosité des lampes (papillotement ou flicker).

### I.3.4. Variation de la fréquence

Les fluctuations de fréquence sont caractérisées par des variations de la valeur nominale de cette dernière (50/60 Hz), résultant des variations de vitesses des alternateurs suite à un déséquilibre entre charges et puissances mises en jeu par les centrales. Elles se manifestent par des variations de vitesses et couples dans les machines synchrones et asynchrones, et parfois par l'arrêt entier du système.

A noter que ce type de perturbation concerne en premier lieu le réseau de transport et de distribution de l'énergie électrique.[6]

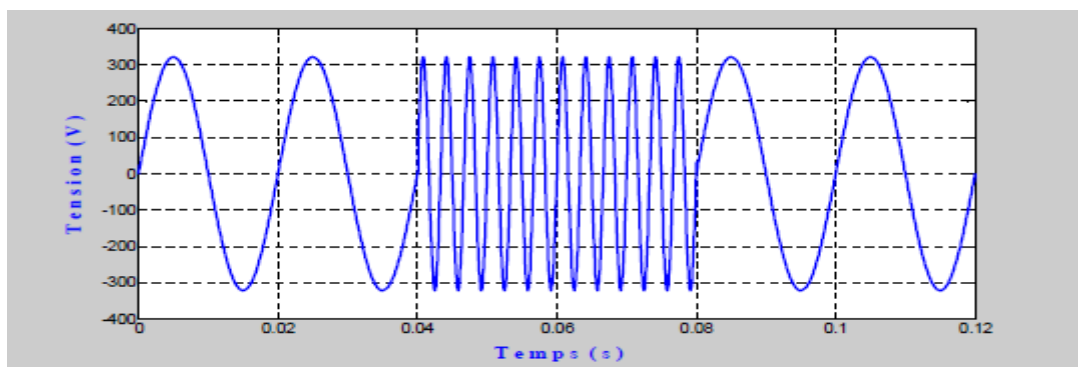


Figure I.6 : Variation de fréquence.



## I.4. Les perturbations harmoniques

### I.4.1. Définition

Les perturbations sont tous les phénomènes internes ou externes au réseau qui peuvent changer transitoirement ou permanentement l'ampleur et/ou la forme du réseau. Ces perturbations sont le résultat de la superposition d'ondes sinusoïdales mais de fréquences multiples sur l'onde fondamentale à 50 Hz. Le domaine de fréquence qui correspond à l'étude des harmoniques est généralement compris entre l'harmonique 2 et l'harmonique 40 [2], mais des sous-harmoniques ou des inter-harmoniques peuvent également être observés à des fréquences non multiples entières de la fréquence fondamentale.

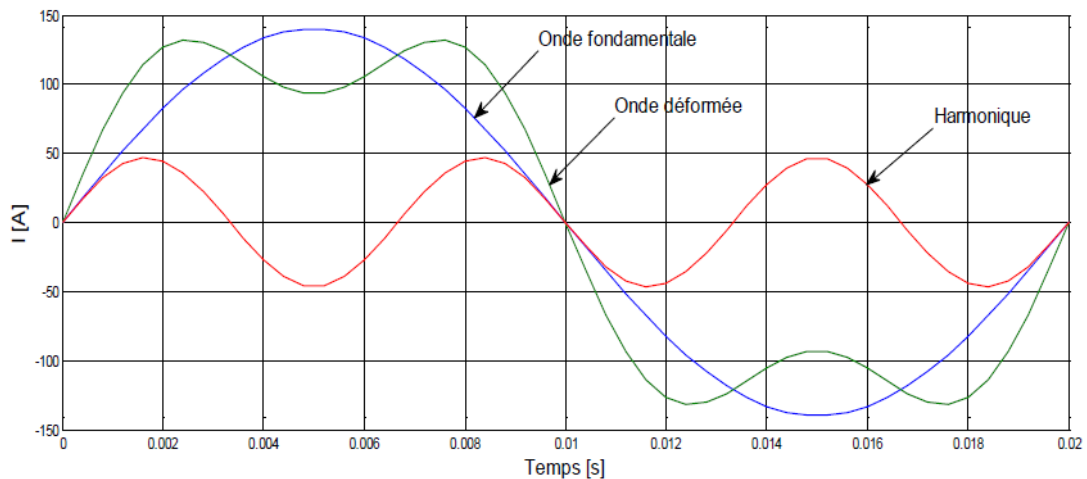


Figure I.7 : Représentation d'une onde déformée.

### I.4.2. Sources harmoniques identifiées

Les sources harmoniques identifiées sont généralement les équipements dotés de dispositifs électroniques de puissance, tels que les redresseurs et les cyclo convertisseurs de puissances importantes, installés sur les réseaux haute et moyenne tension. Le distributeur d'énergie est capable d'identifier le point d'injection des harmoniques avec ce sort de charge non linéaire et de quantifier la perturbation provoquée. Dans ce cas, c'est l'utilisateur qui doit trouver les moyens de réduire cette perturbances au-dessous du seuil exigé par le distributeur d'énergie sous peine d'être puni [2].

Généralement des sources harmoniques facilement identifiées. Le distributeur d'énergie est capable d'identifier le point d'injection des harmoniques avec ce sort de charge non linéaire et de quantifier la perturbation provoquée. Dans ce cas, c'est l'utilisateur qui doit trouver les moyens de réduire cette perturbances au-dessous du seuil exigé par le distributeur d'énergie sous peine d'être puni [2].

### I.4.3. Sources harmoniques non identifiables

Les appareils utilisés dans les domaines électrodomestiques ou tertiaires, comme les téléviseurs et les micro-ordinateurs, représentent principalement ce sort de générateur de courants harmoniques. En raison de leur grande dissémination, ces dispositifs, qui incluent fréquemment un redresseur monophasé à diodes et un condensateur de lissage, captent de nombreux courants harmoniques. Puisque chaque utilisateur génère un faible taux d'harmonique individuellement, il est de la responsabilité du distributeur d'énergie électrique d'empêcher la propagation de la perturbation harmonique sur le réseau. [2].

## I.5. Caractéristiques des perturbations harmoniques

Plusieurs critères sont définis pour caractériser les perturbations. Le taux de distorsion harmonique et le facteur de puissance sont les plus employés pour quantifier respectivement les perturbations harmoniques et la consommation de puissance réactive. [4]

### I.5.1. Le taux de distorsion harmoniques (TDH)

Le taux de distorsion harmonique est connu sous le nom de THD (Total Harmonic Distorsion). Le THD est exprimé par rapport à la fréquence fondamentale et représente l'impact des harmoniques sur l'onde de signal déformée.

Il existe deux niveaux de distorsion harmonique distincts [8] :

- THDi, le taux de distorsion harmonique du courant
- THDv, le taux de distorsion harmonique en tension

Le premier s'exprime sous la forme :

$$THD_i = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \frac{I_h^2}{I_1^2}} \quad (I.1)$$

Avec:  $I_1$  la valeur efficace du courant fondamental et  $I_h$  les valeurs efficaces des différentes harmoniques du courant.

Le  $THDi$  ne dépend que des valeurs efficaces du courant de charge. En revanche, le  $THDv$  est fonction des courants harmoniques, caractérisant la charge, et de l'impédance de court-circuit imposée par le réseau :

$$THD_v = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{V_h}{V_1}\right)^2} = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{|Z_{cc}| I_n}{V_1}\right)^2} \quad (I.2)$$

$V_1$  : désigne la valeur efficace de  $v_1$  .

Ainsi, plus les impédances  $Z_\infty^h$  ( $h > 1$ ) sont faibles, plus la distorsion en tension est faible

### I.5.2. Facteur de puissance

Le facteur de puissance est défini dans le cas général par le rapport de la puissance active sur la puissance apparente:

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} V_h I_h \cos(\phi_h)}{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} V_h^2} \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_h^2}} \quad (I.3)$$

En présence des harmoniques, on définit la notion de puissance déformante  $D$  permettant de rendre compte des harmoniques. Son expression est donnée par l'équation suivante :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (I.4)$$

L'expression du facteur de puissance peut alors se mettre sous la forme suivante :

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad (I.5)$$

On voit bien que la puissance déformante dégrade le facteur de puissance.

### I.5.3. Le facteur de distorsion

Le facteur de distorsion  $F_d$  est défini comme étant le rapport entre la fondamentale et le signal en valeurs efficaces. Il est donné par l'expression suivante :

$$F_d = \frac{I_1}{I_{eff}} \quad (I.6)$$

Il est alors égal à l'unité lorsque le courant est purement sinusoïdal et diminue lorsque la distorsion apparaît.[9]

### I.5.4. Facteur de crête

Le facteur de crête  $F_c$  d'un signal est défini par ainsi :

$$F_c = \frac{\text{valeur crete}}{\text{valeur efficace}} \quad (I.7)$$

## I.6. Solutions de dépollution des réseaux électriques

Les systèmes électroniques de puissance utilisés pour améliorer la qualité de l'énergie sont principalement des systèmes de compensation. Ils coopèrent avec le réseau en superposant leur énergie. Il existe deux sorts de solutions possibles. Le first employs des convertisseurs statiques peu ou moins polluants, tandis que le second filtre les composantes harmoniques. Il existe deux types de solutions de dépollution : les solutions traditionnelles et les solutions modernes. Ils sont conçus pour compenser toutes les perturbations. [2]

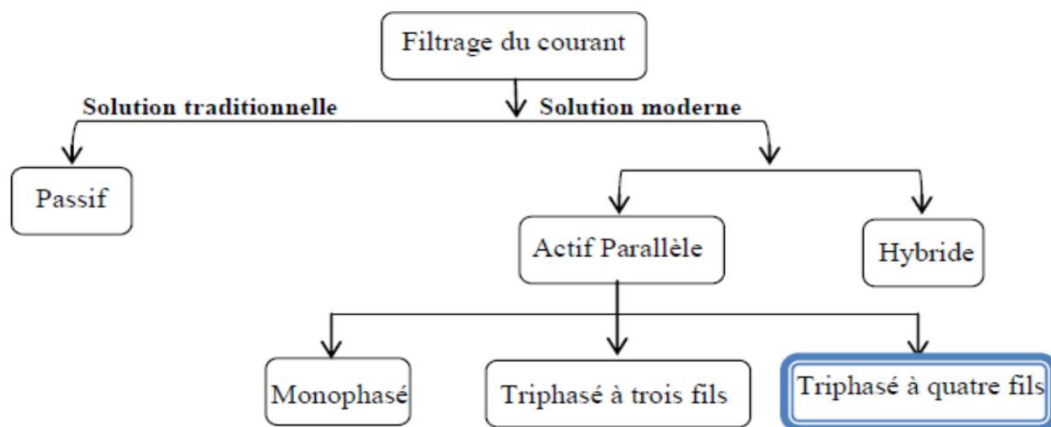


Figure I.8 : Différentes solutions utilisées dans le filtrage du courant

### I.6.1. Solutions traditionnelles

Il s'agit notamment de mettre en œuvre les moyens suivants :

**a/ Compensateur statique :** Il s'agit d'une méthode de compensation utilisée pour relever le facteur de puissance.

**b/Filtrage passif :** Le filtrage passif est basé sur l'utilisation de circuits électriques RLC (résistance, inductance, capacité) dit filtre passif, dont le principe est de modifier localement l'impédance du réseau, de façon à dériver les courants et à éliminer les tensions harmoniques.

On associe des éléments capacitifs et inductifs de manière à obtenir une résonance série accordée à une fréquence choisie. Donc avant le choix des éléments constituant le filtre passif et leur dimensionnement, une connaissance précise des rangs harmoniques qui devront être filtrés et des atténuations requises est nécessaire, car plusieurs types de filtres passifs sont utilisés pour différentes dépollutions à réaliser.[ 3]

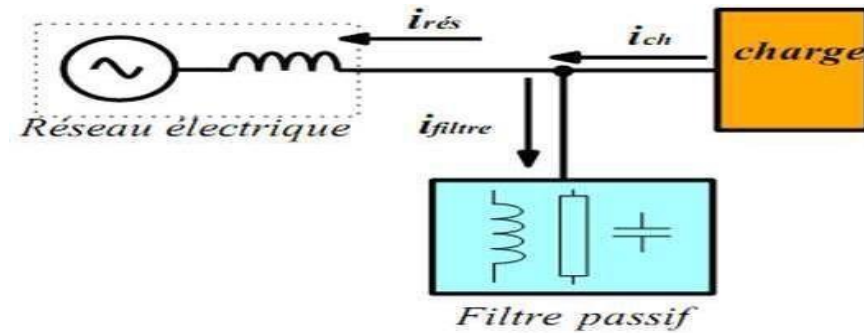


Figure I.9 : Raccordement d'un filtre passif.

**b.1. Filtrage passif série :** Une façon d'atténuer les harmoniques générées par les charges non linéaires est d'introduire un filtre passif série, dans l'alimentation d'entrée ligne de sorte que le filtre offre une impédance élevée à la circulation des harmoniques à partir de la source à la charge non-linéaire. Depuis le filtre passif série est accordé sur une fréquence particulière, il offre une impédance élevée à sa seule fréquence d'accord. Selon la propriété physique de L et C choisie, il existe généralement une bande étroite autour de la fréquence d'accord lorsque l'impédance reste élevée.[10]

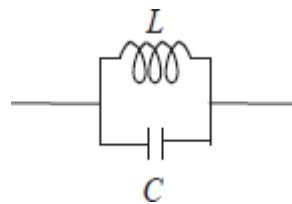


Figure I.10: Filtre passif série

**b.2. Filtrage parallèle :** Le filtre passif parallèle est montré sur la Figure I.11. Il est constitué d'une inductance en parallèle avec un condensateur. Il présente une impédance faible pour tous les harmoniques et une impédance suffisamment importante par rapport au fondamental, ce qui empêche les courants harmoniques de se propager vers le réseau. Le filtre passif parallèle à un comportement inductif pour les fréquences inférieures à la fréquence fondamentale et un comportement capacitif pour les fréquences supérieures à la fréquence fondamentale, ce qui est un avantage majeur pour le contrôle du courant dans l'inductance.

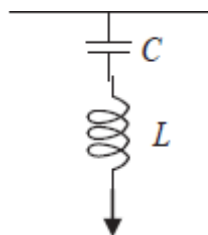


Figure I.11: Filtre passif parallèle

En général dans l'usage, on rencontre deux types de filtres passifs parallèles : le filtre passif amorti et le filtre passif résonant.

**b.2.1. Filtre passif amorti :** Le filtre amorti peut réduire le risque de résonance non souhaitée, et permet de réduire considérablement la taille du filtre passif, en fonctionnant sur une large gamme de fréquence.

On distingue trois types de filtre amorti : le filtre de premier ordre est très peu utilisé car il exige une grande capacité et provoque des pertes de puissance élevées. Les filtres de deuxième et troisième ordres sont plus performants.

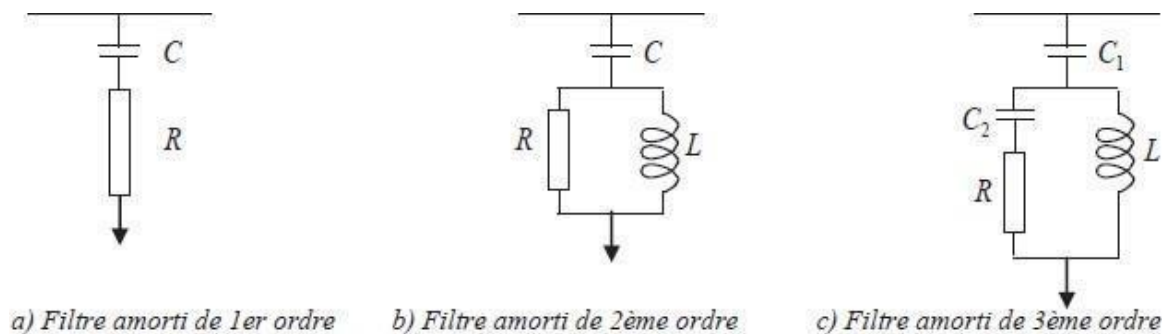
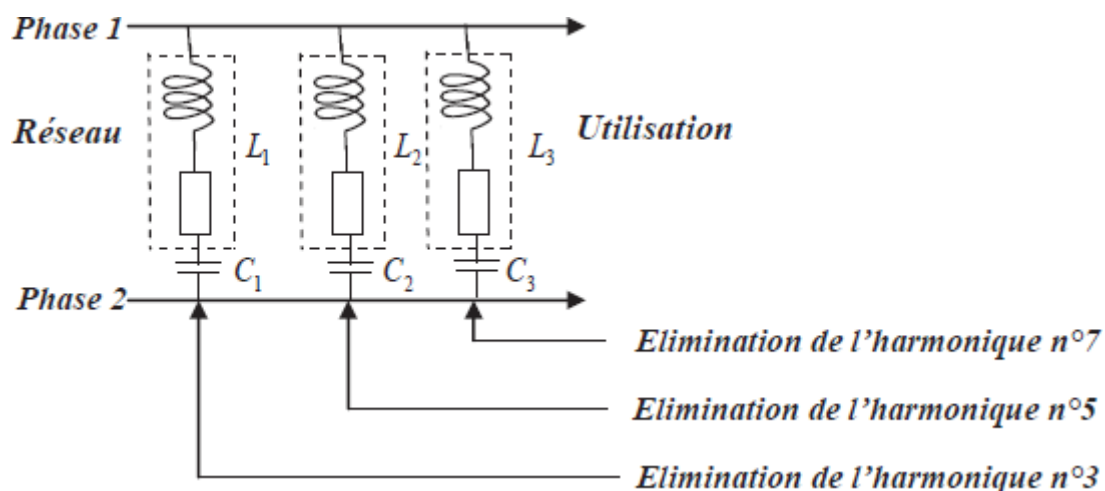


Figure I.12: Filtre amorti

**b.2.2. Filtre résonant :** Le filtre passif résonnant est constitué d'un circuit résonnant composé d'un condensateur et d'une inductance en série accordés sur la fréquence de l'harmonique que l'on veut éliminer.

Ce filtre possède une impédance faible pour l'harmonique concerné et suffisamment importante à la fréquence fondamentale du réseau. Lorsque l'on souhaite réaliser le filtrage d'un signal déformé entaché par plusieurs courants harmoniques, il est nécessaire de prévoir un ensemble de filtres ou chacun d'entre eux agit sur le rang harmonique à éliminer voir la figure I.13. [11]



**Figure I.13: Filtres résonants agissant sur plusieurs rangs harmoniques.**

Le dimensionnement de ces filtres dépend des harmoniques à éliminer, des performances exigées, de la structure du réseau et de la nature des récepteurs. Par cette technique, il est en général plus aisé de rejeter les harmoniques de rang élevé que celles de rang faible. Malgré sa large utilisation dans l'industrie, ce dispositif simple à tout de même porte certains inconvénients ;

- Une connaissance approfondie de la configuration du réseau électrique est nécessaire.
- Les variations de l'impédance du réseau peuvent détériorer les performances du filtre.
- Le réseau peut former un système résonnant avec le filtre et les fréquences voisines de la fréquence de résonance sont amplifiées.
- Equipement volumineux.
- Inadaptabilité et perte d'efficacité lorsque les caractéristiques du réseau électrique évoluent.

Les filtres passifs ne constituent pas un moyen fiable et efficace pour la compensation d'harmoniques de charges industrielles, surtout dans le cas des systèmes de distribution. En revanche, ils sont parfaitement adaptés pour les systèmes de transmission de hautes tensions pour lesquelles les études de systèmes détaillés sont faites une fois pour toutes et dont l'effort d'ingénierie est seulement une petite fraction du coût total du système.[2]

### **I.6.2. Solutions modernes (le filtrage actif)**

Deux raisons principales ont conduit à concevoir une nouvelle structure de filtrage moderne et efficace appelée filtre actif. La première raison est due aux inconvénients inhérents des solutions traditionnelles de dépollution qui ne répondent plus à l'évolution des charges et des réseaux électriques. La seconde raison fait suite à l'apparition de nouveaux composants semi-conducteurs, comme les thyristors GTO et les transistors IGBT. Le but de ces filtres est de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à compenser les perturbations responsables de la dégradation des performances des équipements et installations électriques.

Nous citerons trois topologies possibles de filtres actifs :

- Le filtre actif parallèle (SFAP) : conçu pour compenser toutes les perturbations de courant comme les harmoniques, les déséquilibres et la puissance réactive.

- Le filtre actif série (FAS) : conçu pour compenser toutes les perturbations de tension comme les harmoniques, les déséquilibres et les creux de tension.
- La combinaison parallèle-série actifs : solution universelle pour compenser toutes les perturbations en courant et en tension[6]

### I.6.2.1. Principe de fonctionnement du filtre actif

Le principe de base des filtres actifs a été proposé dans les années 70s. Les filtres actifs sont souvent conçus pour la compensation des courants harmoniques et de la puissance réactive.

Ces filtres sont des onduleurs mono/triphasés agissant comme source de courant ou de tension en injectant en série ou en parallèle sur le réseau électrique des composantes harmoniques en opposition de phase à ceux du réseau, par conséquent, les composantes harmoniques de la charge polluante s'éliminent et le courant de la source va acquérir une forme quasi sinusoïdale, Le schéma relatif à ce principe est montré dans la figure Figure I.14 [6]

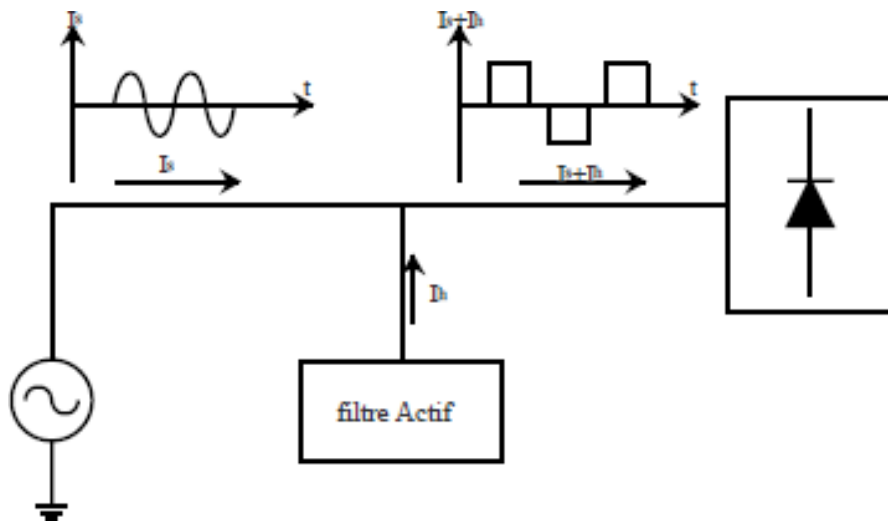


Figure I.14 : Schéma de principe d'un filtre actif série.

### I.6.2.2. Filtre actif série (FAS)

Le filtre actif série engendre des tension harmoniques  $V_h$  dont la somme avec la tension réseau  $V_s$  est une onde sinusoïdale (figure I.15). Il est destiné à protéger les installations sensibles aux perturbations provenant du réseau telles que les harmoniques en tension, les surtensions. En revanche, le filtrage série ne permet pas de compenser les courants harmoniques consommés par la charge[7].



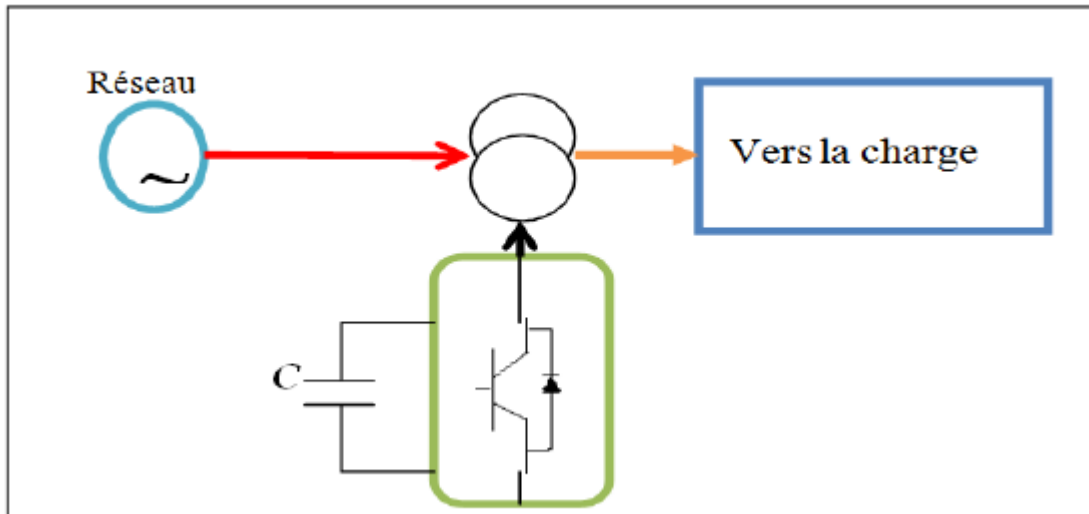


Figure I.15 : Filtre actif série.

#### I.6.2.3. Filtre actif parallèle (SFAP)

Il est connecté en parallèle à réseau de distribution, également connu sous le nom de compensateur shunt (figure I.16). Il est généralement commandé en tant que générateur de courant. Il restitue les courants harmoniques in dans un réseau électrique égaux à ceux absorbés par une charge non linéaire mais en opposition de phase, de sorte que le courant fourni par le réseau est sinusoïdal et en phase avec la tension simple correspondante. Son indépendance vis-à-vis de la source et de la charge lui permet d'être adaptable, fiable et efficace. [10].

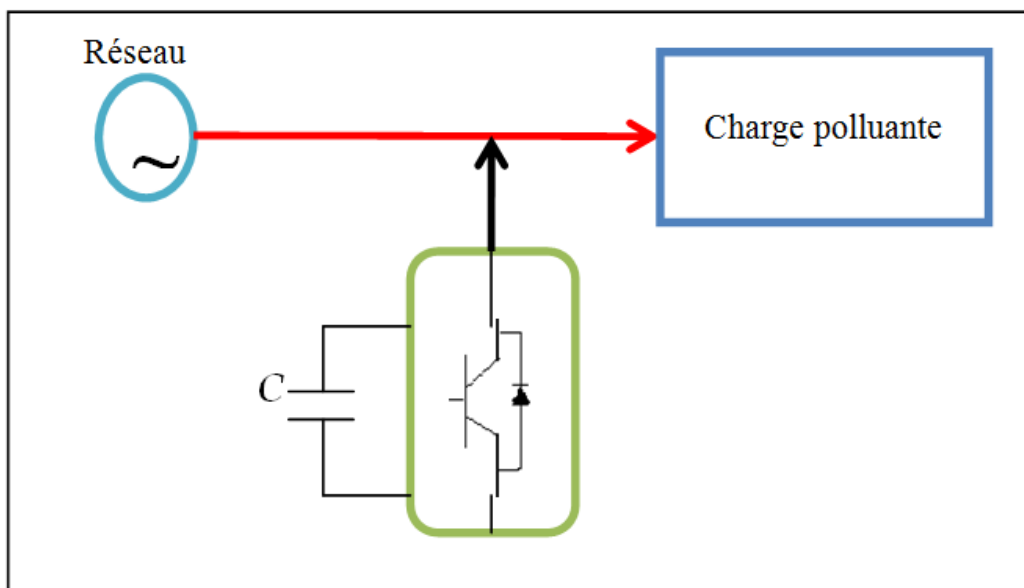
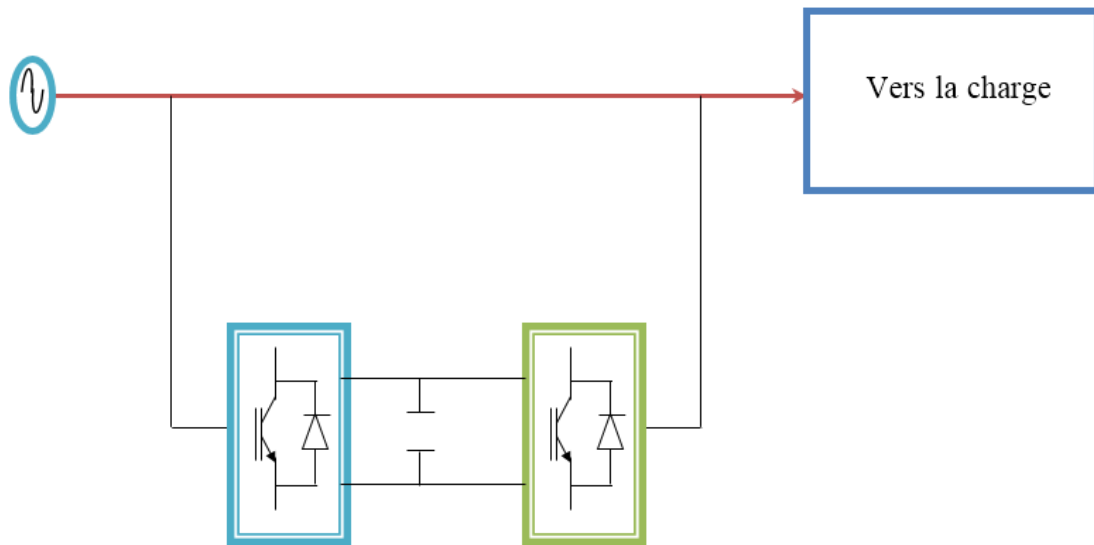


Figure I.16: Filtre actif parallèle.

#### I.6.2.4. La combinaison parallèle-série actifs (UPQC)

Comme le montre la figure (I.17), l'association des deux filtres actifs parallèle et série produit cette combinaison parallèle-série actifs, également connue sous le nom (d'Unified Power Quality Conditioner) (UPQC). L'UPQC, en utilisant les avantages des deux filtres actifs, crée un courant et une tension sinusoïdaux dans le réseau électrique à partir d'un courant et d'une tension perturbés [10].



*Figure I.17: Filtre combiné parallèle-série (UPQC).*

Il y a plusieurs autres groupes de filtres actifs combinés avec des filtres passifs cette fois-ci :

- Le filtre actif série connecter en série avec des filtres passifs parallèles.
- Le filtre actif série avec des filtres passifs parallèles.
- Le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle.

#### I.6.2.5. Filtre actif hybride

L'association de filtres actifs de faible puissance avec des filtres passifs peut être une solution pour réduire le dimensionnement et le prix des filtres actifs. Il est possible de combiner des éléments passifs et un filtre actif série ou parallèle dans différentes configurations. Le filtre actif série avec des filtres passifs parallèles :

- Le filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles ;
- Le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle ;

La figure I.18[4] montre l'une des configurations les plus récentes.

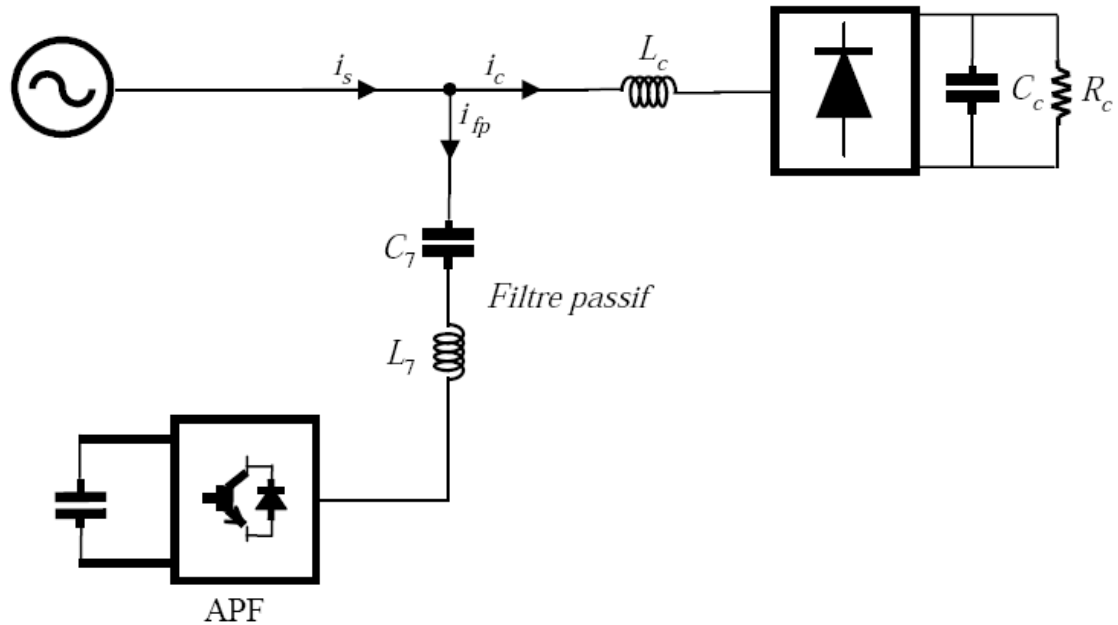


Figure I.18: Filtre actif hybride.

## I.7. Conclusion

Ce chapitre, a été consacré à l'étude des problèmes de la qualité d'énergie électrique, On a exposé les effets, les causes et les conséquences des harmoniques sur le réseau électrique, nous avons présenté les différentes origines des perturbations harmoniques affectant la qualité d'onde des tensions et/ou courants du réseau électrique, Ensuite, pour réduire ces effets, différentes solutions traditionnelles et modernes ont été exposées. L'utilisation des filtres actifs se présente comme une meilleure solution pour tous types de perturbations qui apparaissent dans le réseau électrique.

# **Chapitre II**

**Concepts de base de  
FACT**

## II.1. Introduction

Les boucles de puissance indésirables entre zones interconnectées causent des surcharges de lignes, des problèmes de stabilité et des pertes dans les réseaux maillés. Il est possible que les méthodes traditionnelles de contrôle des réseaux, telles que les transformateurs à prises réglables en charge, les transformateurs déphaseurs, les compensateurs série ou parallèle commutés par disjoncteurs, les modifications des consignes de production, les changements de topologie du réseau et l'action sur l'excitation des générateurs, ne soient plus suffisantes pour faire face aux perturbations du réseau, en raison des nouvelles contraintes.

Il est probable que dans l'avenir, ils devront poursuivre leur action en utilisant des dispositifs électroniques de puissance à grand vitesse de réponse, récemment créés et appelés FACTS (Flexible Alternative Current Transmission System) pour superviser les réseaux. Le récent développement des dispositifs FACTS offre de nouvelles perspectives pour une exploitation plus efficace des réseaux par action continue et rapide sur les différents paramètres du réseau (déphasage, tension, impédance). Par conséquent, les transits de puissance et les tensions seront mieux contrôlés, ce qui permettra d'augmenter les marges de stabilité ou d'approcher les limites thermiques des lignes [12].

## II.2. Définition des FACTS

L'expression "FACTS" est utilisée pour décrire tous les équipements utilisant l'électronique de puissance, tels que les diodes, les thyristors, les GTO et les IGBT, qui remplissent les fonctions d'interrupteurs très rapides. Qui rend les dispositifs FACTS plus rapides et plus fiables que les systèmes électromécaniques traditionnels.

Les paramètres du réseau tels que la tension, l'impédance et la phase sont contrôlés dynamiquement par ces équipements, qu'ils soient contrôlés ensemble ou séparément.

Ils sont utilisés pour améliorer, d'une façon générale les performances d'un réseau (stabilité, capacité de transport...) Les FACTS (abréviation anglaise de Flexible AC Transmission System), sont définis comme suit :

Ceux sont des systèmes à courant alternatif incorporant des éléments d'électronique de puissance et d'autres contrôleurs statiques pour l'amélioration de la contrôlabilité et la capacité du transit de la puissance. Ils peuvent contribuer à faire face aux problèmes rencontrés dans l'exploitation des réseaux électriques.

En maintenant la tension des systèmes, en augmentant l'angle de transport entre les systèmes ou en réduisant artificiellement l'impédance de la liaison, il est possible d'augmenter

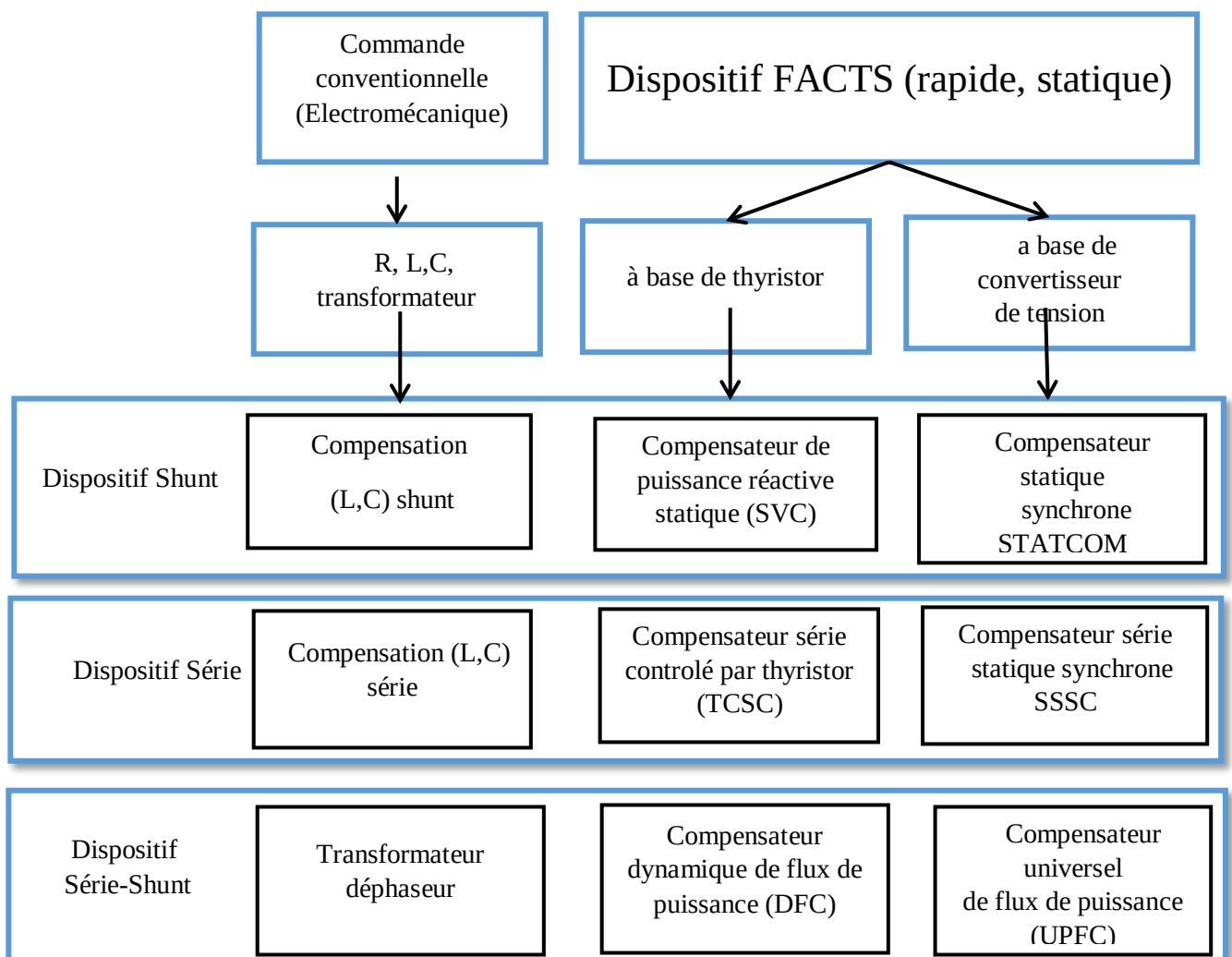
la puissance active transitée entre deux réseaux. Les FACTS permettent un contrôle précis des transits de puissance réactive, une optimisation des transits de puissance active pour les installations existantes et une amélioration de la stabilité dynamique du réseau en fonction d'un ou plusieurs de ces paramètres. Ils permettent également aux utilisateurs industriels de réduire les déséquilibres de charges et de contrôler les fluctuations de tension causées par les variations rapides de la demande de puissance réactive, ce qui augmente la production. [12]

### II.3. Classification des dispositifs FACTS

Les principales catégories de dispositifs de contrôle des réseaux électriques sont représentées dans le tableau II.1.

Les systèmes conventionnels, qui sont constitués de composants de base RLC et de transformateurs de valeurs fixes (compensation fixe) or variable commandés par des interrupteurs mécaniques, sont présentés dans la colonne sur la gauche.

**Tableau II.1: Principaux dispositifs des FACTS**



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

La colonne gauche des systèmes FACTS présente les contrôleurs à base des thyristors ou bien à des convertisseurs à thyristor tel que le SVC et le TCSC qui sont connu 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 de droite sont la technologie la plus avancée des FACTS avec des convertisseurs de sources de tension à base des interrupteurs statiques sophistiqués IGBT (Insulated GateBipolar Transistors) ou bien les IGCT (Insulated Gate Commutated Thyristors) tel que le STATCOM, le SSSC et l'UPFC.

Ces convertisseurs de source de tension fournissent ou injectent une tension totalement contrôlable en amplitude et en phase en série ou en parallèle dans le réseau selon les exigences de contrôle en exerçant une MLI sur les gâchettes des interrupteurs de ces convertisseurs.

## II.4. Rôle des dispositifs FACTS

Les FACTS dans un réseau électrique permettent de remplir des fonctions en régime stationnaire et transitoire. Ils agissent généralement en absorbant or en fournissant de la puissance réactive, en réglant l'impédance des lignes ou en modifiant les angles de tension. Les FACTS sont principalement utilisés en régime permanent dans les deux situations suivantes. [13] :

- La tension est maintenue at un niveau acceptable en fournissant de la puissance réactive lorsque la charge si élevée et que la tension est trop basse et en l'absorbant lorsque la charge est trop élevée.
- Le contrôle des transits de puissances vise à réduire les surcharges dans les lignes ou les transformateurs et à prévenir les flows de bouclage dans le réseau. Ensuite, ils agissent en réglant la réactance des lignes et en ajustant les déphasages.

De par leur vitesse de commande élevée, les FACTS possèdent de nombreuses qualités en régime dynamique [II-4].

Ils permettent en particulier :[13]

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

## II.5. Fonctionnement des FACTS

Un FACTS agit généralement en fournissant ou en consommant dynamiquement de la puissance réactive 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 maximale transmissible.

Les FACTS sont utilisés aussi pour le filtrage des courants harmoniques et la stabilisation de la tension. L'ordre de grandeur de la puissance d'un FACTS va de quelques MVA (Méga Volts Ampères) à quelques centaines de MVA. Ils s'appliquent dans deux secteurs principaux :[13]

### ❖ Grand réseau de transmission

Pour améliorer le contrôle, augmenter les capacités de transfert de puissance et assister la récupération du réseau consécutive à un défaut dans les systèmes de transmission AC (Alternative Current)

### ❖ Réseaux Industriels

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

## II.6. Différents types 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. [14]

- a) **Première génération** : est inspiré des thyristors traditionnels. Ceux-ci sont généralement utilisés pour enclencher ou déclencher les composants pour fournir ou absorber de la puissance réactive dans les transformateurs de réglage.
- b) **Deuxième génération** : L'avènement des semi-conducteurs de puissance a permis leur commande à la fermeture et à l'ouverture, tel que le thyristor GTO, ce qui a conduit à leur évolution. Ces composants sont combinés pour former des convertisseurs de tension ou de courant, qui peuvent injecter des tensions contrôlables dans le réseau.
- c) **Troisième génération** : (FACTS) utilisant des composants hybrides et qui est adaptée à chaque cas. Contrairement aux deux premières générations, celle-ci n'utilise pas de dispositifs auxiliaires encombrants tels que des transformateurs pour le couplage avec le réseau.



### II.6.1. Compensateurs shunts (parallèles)

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

Afin d'éviter des pertes supplémentaires à cause de la transmission du courant réactif et pour augmenter la stabilité des réseaux interconnectés il est nécessaire de compenser la puissance réactive au niveau des sous stations d'interconnexion. L'apparition d'équipements utilisant l'électronique de puissance revient vers la fin des années soixante 60. L'avantage de ces dispositifs permet d'éliminer les parties mécaniques de rendement mauvais et de réaction assez lente, et d'avoir un temps de réponse très court. Ces équipements étaient constitués essentiellement d'une inductance en série avec un gradateur, le retard à l'amorçage des thyristors permettait de régler l'énergie électrique réactive absorbée par l'inductance du dispositif.

En effet tous les compensateurs parallèles injectent du courant au réseau à travers les points de raccordement. La connexion d'une impédance variable en parallèle sur le réseau électrique résulte en une consommation ou une injection d'un courant variable, cette injection de courant modifie les puissances actives et réactives qui transitent dans la ligne. [15]

#### II.6.1.1. Compensateurs parallèles à base de thyristors :

Il s'agit de :

##### a. TCR (thyristor controlled reactor).

Un circuit TCR est composé d'une inductance placée en série avec deux thyristors montés en antiparallèle, comme la montre la Figure II.1. La valeur de l'inductance est continuellement changée par l'amorçage des thyristors. [16]

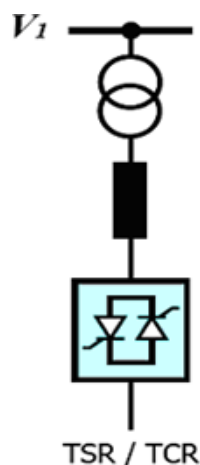


Figure II.1: Schéma du TCR

**b. TSC (thyristor switched capacitor).**

Le circuit TSC est composé d'une réactance placée en série avec deux thyristors montés en antiparallèle, comme la montre la Figure II.2. Pour un TSC les thyristors fonctionnent en pleine conduction.[16]

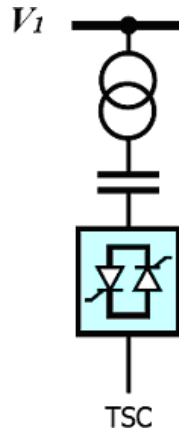


Figure II.2 : Schéma du TSC

**c. SVC (statique Var comepensator).**

L'association des dispositifs TCR, TSC, bancs de capacités fixes et filtres d'harmoniques constitue le compensateur hybride, plus connu sous le nom de SVC (compensateur statique d'énergie réactive) comme montre la Figure II.3 .[16]

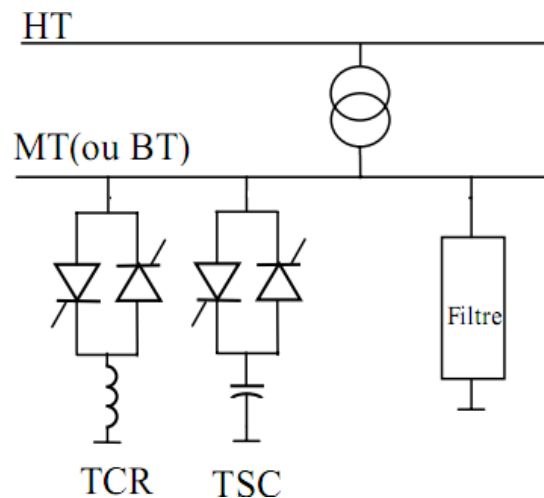


Figure II.3 : Schéma du SVC

La caractéristique statique du SVC est donnée sur la Figure II.4. Trois zones sont distinctes [13] :

- Une zone où seules les capacités sont connectées au réseau.

- Une zone de réglage où l'énergie réactive est une combinaison des TCR et des TSC.
- Une zone où le TCR donne son énergie maximale (butée de réglage), les condensateurs sont déconnectés.

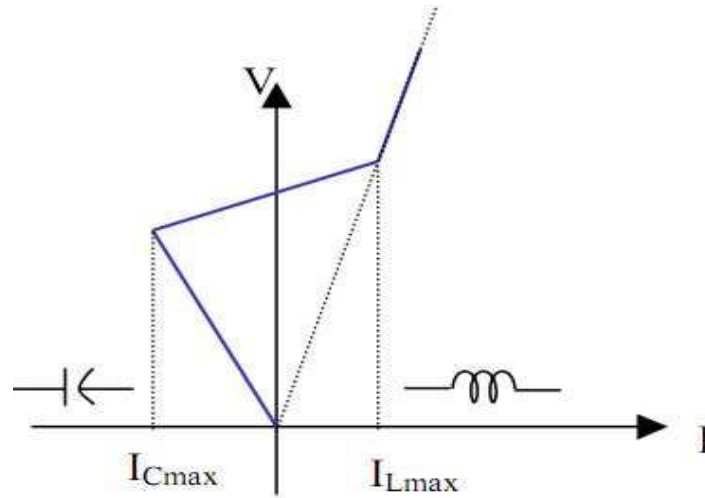


Figure II.4 : Caractéristique d'un SVC

### II.6.1.2. Compensateurs parallèles à base de GTO thyristors

#### a. STATCOM (static compensator)

Le premier STATCOM a été conçu en 1990 et un convertisseur de tension alimenté par des batteries de condensateur. L'ensemble est connecté parallèlement au réseau à l'aide d'un transformateur de couplage. Ce système est similaire à un compensateur synchrone cause il n'a pas d'inertie mécanique et présente des avantages supplémentaires comme sa dynamique rapide, son faible coût d'installation et de maintenance par rapport aux compensateurs synchrones.[17]

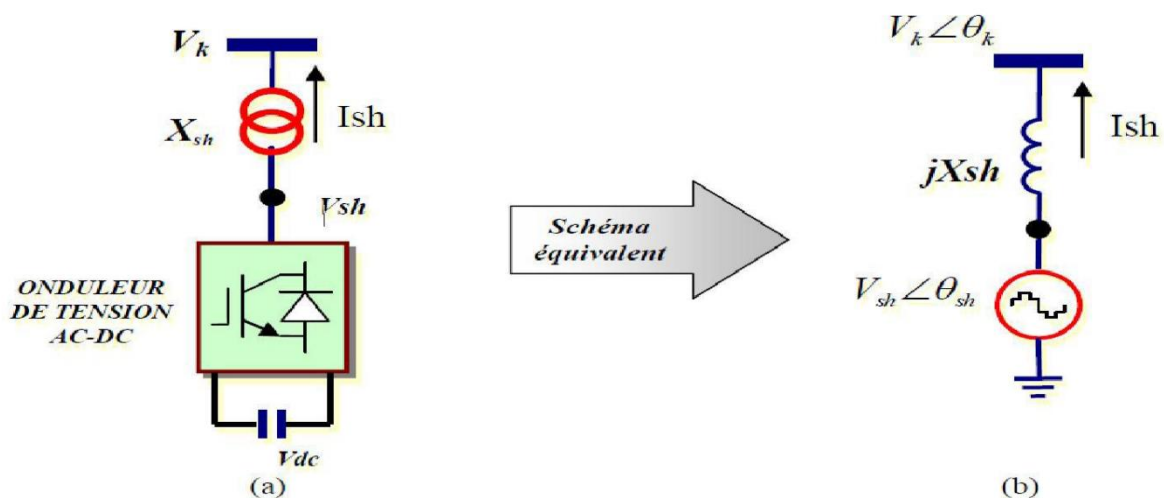


Figure II.5 : STATCOM, (a) structure de base, (b) schéma équivalent.

Le STATCOM a la même capacité de contrôle qu'un SVC, mais il est plus robuste et peut produire de la puissance réactive même si la tension du jeu de barres (nœud de connexion) est très faible. Selon ses caractéristiques, le courant maximal du STATCOM est indépendant de la tension du nœud. [17]

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 fournisse la puissance réactive.

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

#### b. Le STATCOM présente plusieurs avantages :

- ✓ Un contrôle optimal de la tension, les phases sont contrôlées séparément pendant les perturbations du système.
- ✓ Bonne réponse à faible tension : le STATCOM est capable de fournir son courant nominal, même lorsque la tension est presque nulle.
- ✓ Bonne réponse dynamique c.à.d. le système reprend instantanément. [13]

### II.6.2. Compensateurs série

La réactance des lignes est une des limitations principales de la transmission de courant alternatif dans les longues lignes. Pour remédier à ce problème, la compensation série capacitive a été introduite afin de réduire la partie réactive de l'impédance de la ligne. Les dispositifs FACTS de compensation série sont des évolutions des condensateurs série fixes. Ils agissent généralement en insérant une tension capacitive sur la ligne de transport qui permet de compenser la chute de tension inductive.

#### II.6.2.1. Compensateur série contrôlé par thyristor (TCSC)

Un condensateur série commandée par thyristors TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor), c'est la première génération FACTS qui possède la possibilité de contrôler l'impédance de la ligne.

Le TCSC (compensateur série contrôlé par thyristor) est composé d'une inductance en série avec un gradateur à thyristors, le tout en parallèle avec un condensateur. Généralement ce dispositif possède un élément de protection contre les surtensions placées en parallèle avec

ce dernier, appelé MOV (Métal Oxide Visitor) comme l'indique la figure (II-6). Du point de vue fonctionnement, le TCSC se comporte comme une réactance variable connectée en série avec la ligne de transmission. [18]

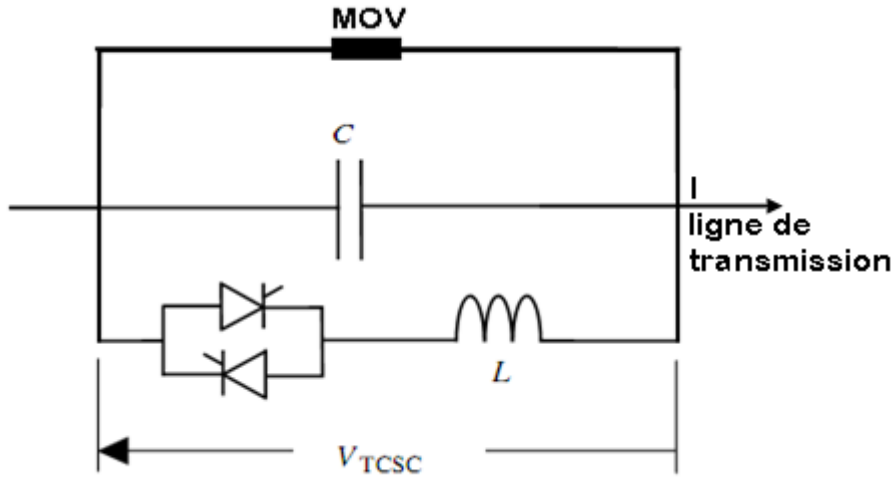


Figure II.6: Schéma de structure du TCSC

Donc il est possible de changer la valeur de l'impédance du compensateur entre la zone capacitive et la zone inductive, par changement de l'angle d'amorçage des thyristors, pour augmenter la puissance transmise par la ligne, afin de renforcer la stabilité transitoire. L'expression de l'impédance est donnée par l'équation suivante :[18]

$$X_{TCSC}(\delta) = \frac{jLw}{\frac{2}{\pi} \left( \pi - \delta + \frac{\sin(2\delta)}{2} \right) - Lcw^2} \sin(\delta) \quad (II.2)$$

Dans ce cas la puissance active transmise entre deux points ou deux jeux de barres et donnée par la relation suivante :

$$P_{sr} = \frac{V_r V_s}{X_{TCSC}} \sin(\delta_s - \delta_r) \quad (II.3)$$

#### II.6.2.2. Compensateur série contrôlée par thyristor (TCSR)

Afin de fournir une réaction inductive série variable, le TCSR (Figure II.7) is un compensateur inductif placé en série avec la ligne de transmission et se compose d'une inductance  $X_{ind1}$  en parallèle avec une autre inductance  $X_{ind2}$  commandée par le thyristor.

Lorsque l'angle d'amorçage de la réaction commandée par le thyristor est de  $180^\circ$ , le thyristor cesse de fonctionner et la réaction non contrôlable  $X_{ind1}$  sert de limiteur de courant de défaut. La réaction équivalente diminue jusqu'à l'angle de  $90^\circ$ , qui est la combinaison parallèle de deux réactions, lorsque l'angle d'amorçage diminue au-dessous de  $180^\circ$ . [19]

Le TCSR (Thyristor Controlled Series Reactor) représenté sur la figure ci-dessus, est un compensateur inductif qui se compose d'une inductance en parallèle ( $L_1$ ) avec une autre inductance ( $L_2$ ) commandée par thyristors antiparallèles afin de fournir une réactance inductive série variable. [19]

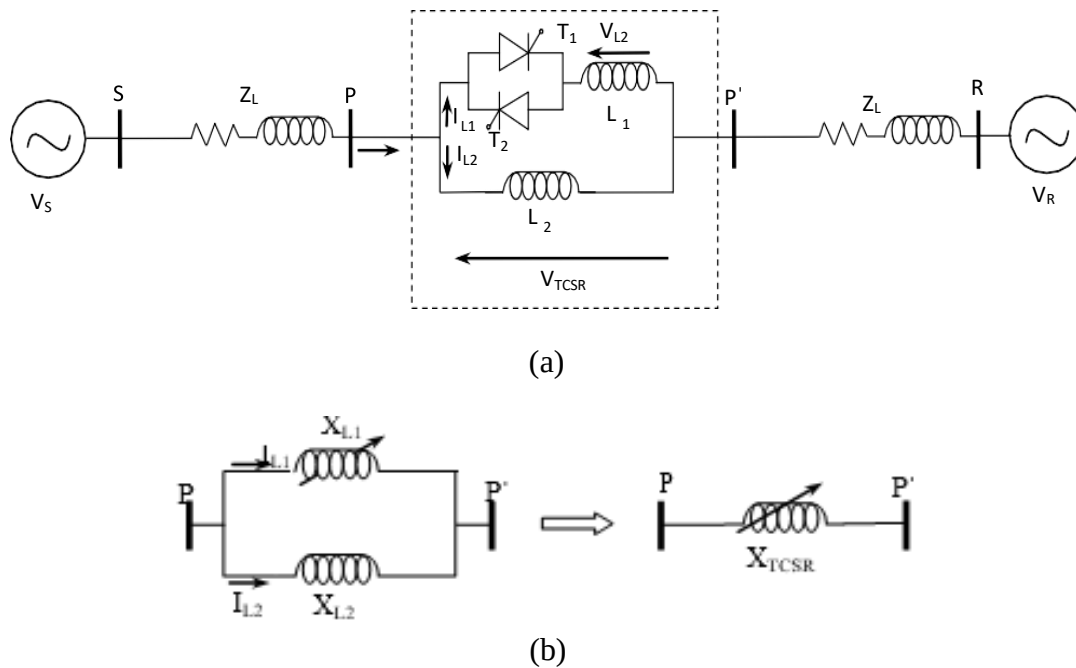


Figure II.7 : Système TCSR : a). Montage, b). Réactance apparente

### II.6.2.3. Compensateur série synchrone (SSSC)

IEEE définit le SSSC (Static Synchrone Séries Compensator) comme étant un générateur synchrone statique fonctionnant sans source d'énergie électrique extérieure comme les compensateurs série, dont la tension de sortie est contrôlable indépendamment du courant de ligne afin d'augmenter ou de diminuer la chute de tension globale, et ainsi de contrôler la puissance électrique transmise.

Le compensateur série synchrone SSSC est un dispositif FACTS de deuxième génération. Il est formé d'un convertisseur de tension inséré en série dans la ligne par l'intermédiaire d'un transformateur. Le SSSC agit sur le courant de la ligne en insérant une tension en quadrature avec ce dernier, la tension pouvant être capacitive ou inductive. Un

SSSC est capable d'augmenter ou de diminuer le flux de puissance dans une ligne. Le comportement d'un SSSC peut être assimilé à celui d'un condensateur ou d'une inductance série réglable. La différence principale réside dans le fait que la tension injectée n'est pas en relation avec le courant de ligne.

De ce fait, le SSSC présente l'avantage de pouvoir maintenir la valeur de tension insérée constante, indépendamment du courant. Il est donc efficace tant pour des petites charges (faibles courants) que pour des grandes charges. Un autre avantage du SSSC réside dans le fait que ce type de compensateur n'insère pas de condensateur en série avec la ligne de transport. De ce fait, il ne peut pas provoquer de résonance hypo synchrone. De plus sa taille est réduite en comparaison au celle du TCSC. [20]

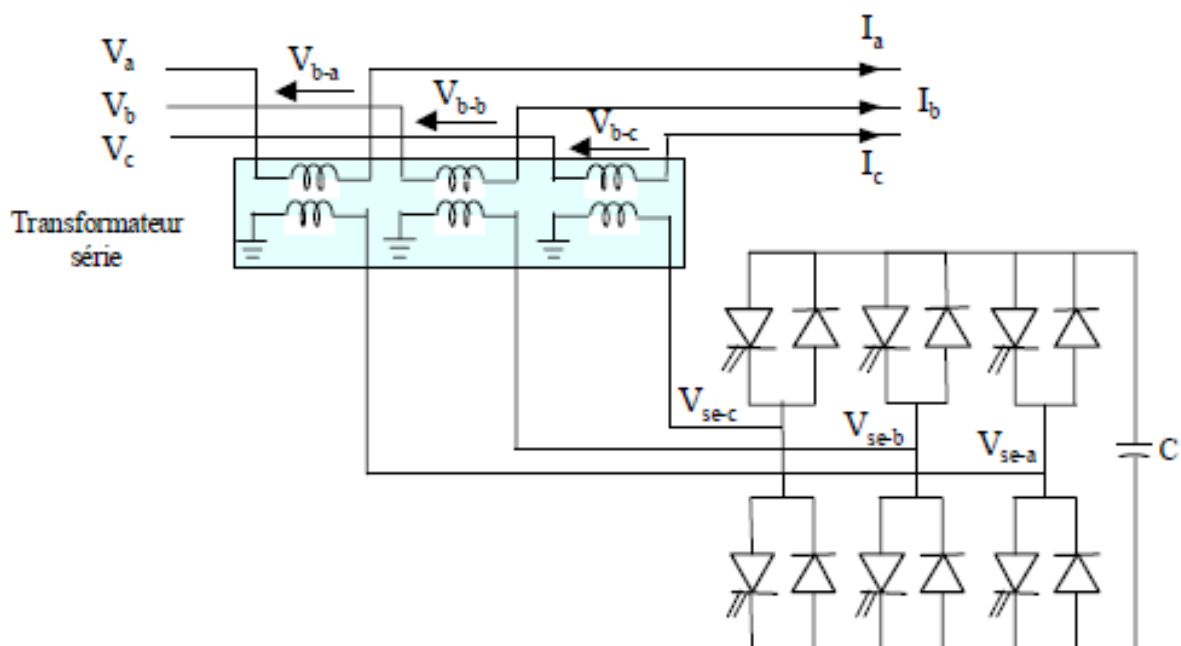


Figure II.8 : Schéma de base du SSSC

### II.6.3. Compensateurs hybrides (série - parallèle)

#### II.6.3.1. UPFC (Unified Power Flow Controller)

Ce dispositif est l'union de deux compensateurs l'un est un compensateur série et l'autre est un compensateur parallèle, le concept de ce dispositif a été présenté en 1990 par L.Gyugyi . Il possède à la fois la fonctionnalité de trois compensateurs (série, parallèle et déphaseur).

Il est capable de contrôler simultanément et indépendamment la puissance active et la puissance réactive. Il peut contrôler les trois paramètres associés au transit de puissance à savoir la tension de la ligne, l'impédance de la ligne et le déphasage des tensions aux extrémités de la ligne. Son schéma de base est donné par la figure (II.9).

L'UPFC est constitué de deux onduleurs de tension triphasés, l'un est connecté en parallèle au réseau par l'intermédiaire d'un transformateur et l'autre est connecté en série à travers un deuxième transformateur. Les deux onduleurs sont interconnectés par un bus continu représenté par le condensateur. [21]

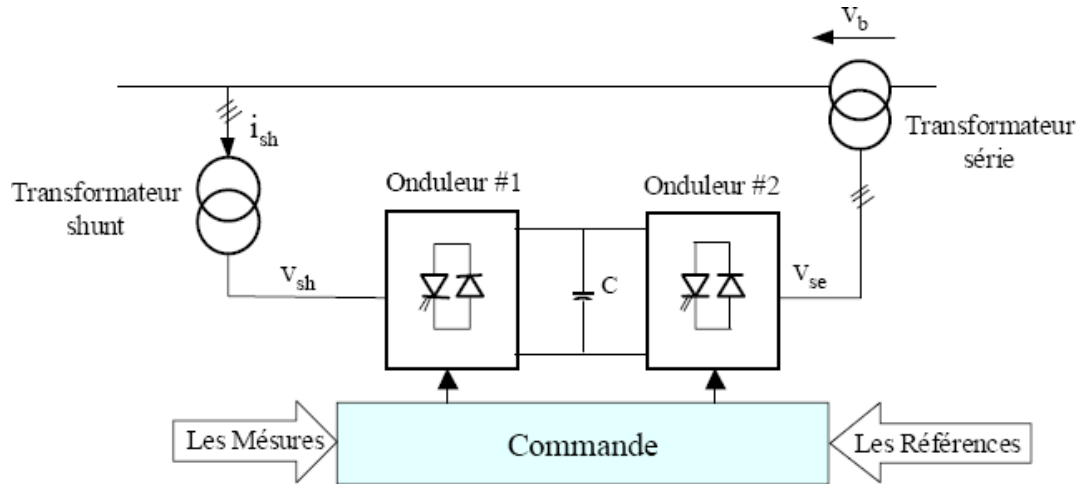


Figure II.9 : Schéma de base d'un UPFC

L'UPFC permet à la fois le contrôle de la puissance active et celui de la tension de la ligne, il est capable d'accomplir les fonctions des autres dispositifs FACTS à savoir le réglage de la tension, la répartition de flux d'énergie, l'amélioration de la stabilité et l'atténuation des oscillations de puissance.

Dans la Figure (II.9) l'ondeur (1) est utilisé à travers la liaison continue pour fournir la puissance active nécessaire à l'ondeur (2). Il réalise aussi la fonction de compensation réactive puisqu'il peut fournir ou absorber de la puissance réactive, indépendamment de la puissance active, au réseau. L'ondeur (2) injecte la tension  $V_b$  et fournit les puissances actives et réactifs nécessaires à la compensation série.

L'UPFC offre une flexibilité énorme qui permet le contrôle de la tension, de l'angle de transport et de l'impédance de la ligne par un seul dispositif comprenant seulement deux onduleurs de tension triphasés. De plus, il peut basculer de l'un à l'autre de ces fonctions instantanément, en changeant la commande de ses onduleurs, ce qui permet de pouvoir faire face à des défauts ou à des modifications du réseau en privilégiant temporairement l'une des fonctions. [21]



## II.7. Coût des dispositif FACTS

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

Le coût d'une installation FACTS dépend principalement des facteurs tels que les performances requises, la puissance de l'installation, le niveau de tension du système ou encore la technologie du semi-conducteur utilisé. [20]

## II.8. Les avantages, les inconvénients et les contraintes de la technologie des dispositifs FACTS

### a) Les avantages des dispositifs FACTS

- ✓ Gère le déplacement de la puissance active.
- ✓ Augmentation de la sécurité des systèmes énergétiques (augmentation de la limite de stabilité transitoire, réduction des oscillations...) et réduction du transit de l'énergie réactive.
- ✓ Optimise les puissances générées, réduisant ainsi le coût de production d'énergie.
- ✓ Être un filtre actif.
- ✓ L'échange et l'interconnexion énergétique ont été améliorés.

### B) Les inconvénients

L'introduction des harmoniques du réseau électrique ce qui le rend pollué, c'est-à-dire le signal sera tendu et non sinusoïdale. Il rend le réseau vulnérable à la surtension due aux commutations répétitives.

## II.9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné un aperçu des FACTS, qui sont les nouveaux dispositifs de contrôle et de commande des réseaux électriques, tels que SVC, STATCOM, TCSC, SSSC et UPFC. Les systèmes FACTS sont classés en utilisant une classification. La plupart d'entre eux sont déjà utilisés dans la pratique d'une structure principalement à base d'onduleurs conçus avec des interrupteurs IGBT/GTO de technologie très avancée avec un temps de réaction très court qui permet une flexibilité du courant transité, augmentant ainsi l'habilité de ces dispositifs à fonctionner le fonctionnement du système énergétique et à améliorer sa stabilité.

# **Chapitre III**

**Structure et principe de  
fonctionnement du  
STATCOM modélisation  
et commande**

### III.1. Introduction

Une source de tension variable contrôlée en amplitude et en phase est un STATCOM, more récent et plus complexe. Bien bien la construction, la commande et le fonctionnement de ce dispositif soient très différents, sa fonction et son apport au réseau électrique sont presque identiques à ceux du dispositif SVC.

Dans ce travail, nous utiliserons la convention suivante : l'injection de puissance réactive au nœud est synonyme d'injection de puissance réactive capacitive, tandis que l'absorption est synonyme d'injection de puissance réactive inductive. Nous discuterons également des courants inductifs négatifs et positifs.

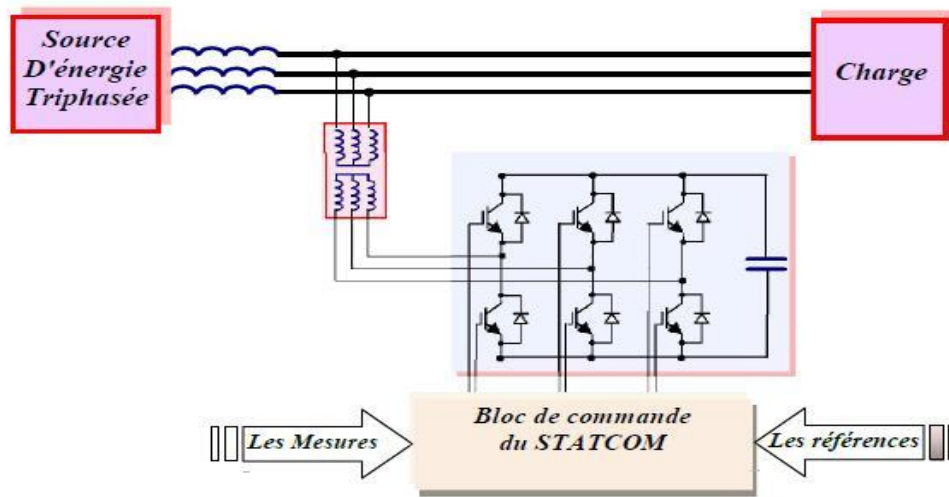


Figure III.1 : Structure de base d'un STATCOM couplé au réseau

### III.2. Principe de fonctionnement

Les compensateurs shunts sont bien connus pour leur capacité à contrôler l'énergie réactive et, par conséquent, la tension au jeu de barre où ils sont connectés.

Le STATCOM est un générateur synchrone statique qui utilise une source de tension continue pour générer une tension alternative triphasée qui est synchrone avec la tension du réseau. La tension du STATCOM peut être ajustée pour déterminer la quantité d'énergie réactive à échanger avec le réseau.

La tension  $V_{sh}$  du STATCOM est généralement injectée en phase avec la tension  $V_t$  de la ligne, ce qui signifie qu'il n'y a pas d'échange d'énergie active avec le réseau, mais seulement la puissance réactive qui sera injectée (or absorbée) par le STATCOM, comme le résume la figure (III.2).

[22]

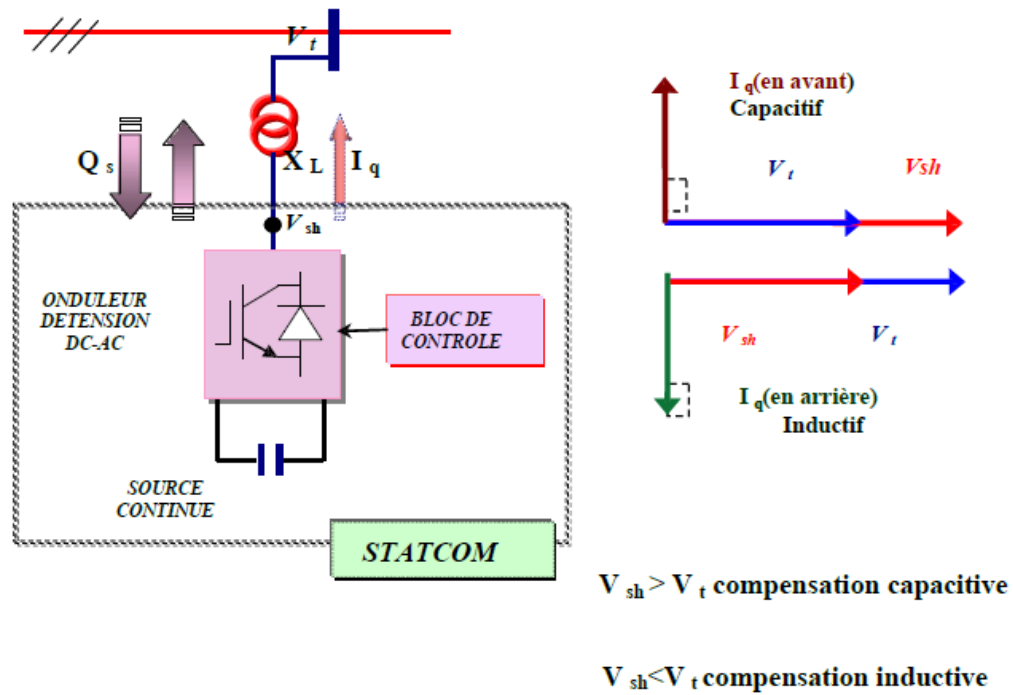


Figure III.2 : Schéma de principe d'un STATCOM

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

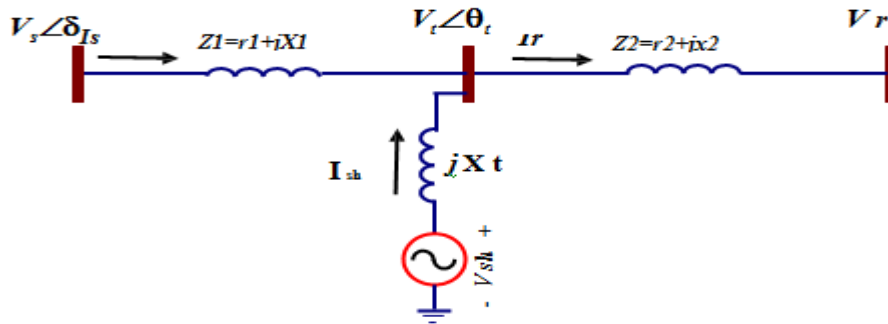


Figure III.3 : Schéma du STATCOM couplé au réseau électrique[20]

Le courant injecté par le STATCOM est donné par :

$$I_{sh} = \frac{V_{sh} - V_t}{jX_t} \quad (III.1)$$

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

$$S = V_t + I_{sh} = \frac{V_t(V_{sh} - V_t)}{-jX_t} = \frac{V_t V_{sh} - V_t^2}{-jX_t} \quad (\text{III.2})$$

D'où on aboutit aux puissances active et réactive injectées par le STATCOM au jeu de barre "t" exprimées par les formules (III-3) (III -4 ).

$$P_{sh} = -V_t V_{sh} \frac{\sin(\theta_t + \theta_{sh})}{X_t} \quad (\text{III.3})$$

$$Q_{sh} = V_t \left( \frac{V_{sh} \cos(\theta_t - \theta_{sh}) - V_t}{X_t} \right) \quad (\text{III.4})$$

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[10].

Donc :

$$P_{sh} = -\frac{V_t V_{sh} \sin(\theta_t - \theta_{sh})}{X_t} = 0 \quad (\text{III.5})$$

D'où la condition:

$$\theta_t - \theta_{sh} = 0 \quad \text{tel que} \quad \theta_t = \theta_{sh} \quad (\text{III.6})$$

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 [23] [24].

Cependant, dans la pratique, le réseau absorbe toujours une petite quantité de puissance active pour couvrir les pertes des interrupteurs du convertisseur STATCOM, les pertes au niveau du transformateur de couplage et pour maintenir la tension continue aux bornes du condensateur constant.

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-7) (III-8).

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

$$V_{shd} = V_{sh} \quad \text{et} \quad V_{shq} = 0$$

$$|I_{sh}| = I_{sh} = \frac{V_{sh} - V_t}{jX_t} \quad (III.7)$$

$$Q_{sh} = V_{sh} I_{sh} = \frac{V_{sh}^2}{X_t} \left(1 - \frac{V_t}{V_{sh}}\right) \quad (III.8)$$

A partir de l'équation (III -1), il apparait clair que si le module de la tension  $V_{sh}$  du STATCOM 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) [25].

Si  $V_{sh} < V_t$ , donc  $Q_{sh} < 0$ , le STATCOM dans ce cas absorbe la puissance réactive à partir du réseau et fonctionne en mode inductif, voir figure (III -5).

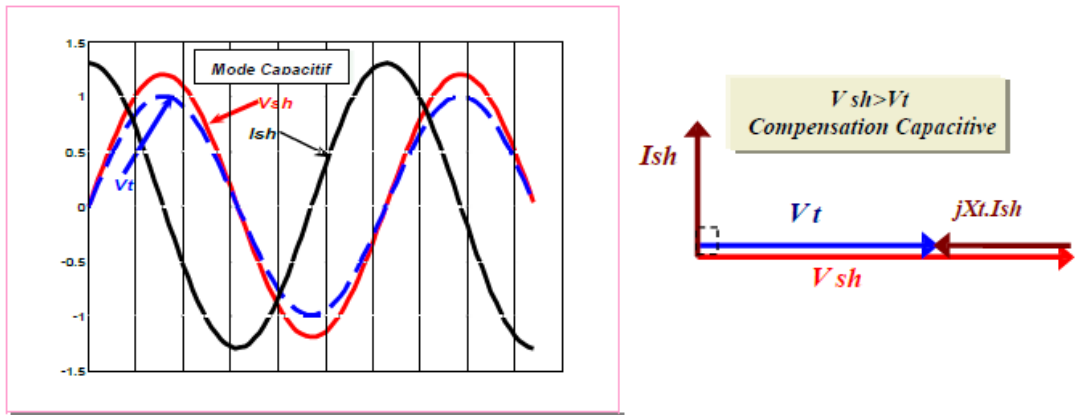


Figure III.4 : Courbes simulées courant et tension en mode capacitif.

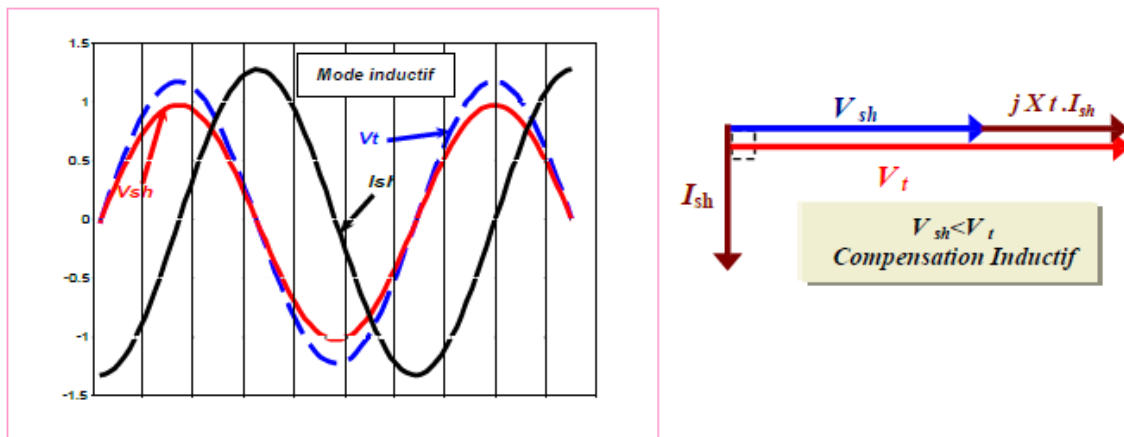


Figure III.5 : Courbes simulées courant et tension en mode inductif.

**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. [20]

### III.3. Effet de la compensation shunt (STATCOM) sur le réseau électrique

Pour étudier les relations entre le réseau électrique et le STATCOM, nous allons adopter pour le modèle mathématique de la (figure III.3) qui représente le schéma unifilaire d'un réseau électrique et d'un STATCOM installé dans une ligne de transport. Les équations des courants  $I_s$ ,  $I_{sh}$  et  $I_r$  sont les suivantes :

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

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

$$\bar{I}_r = \frac{jX_t \bar{V}_s - \bar{Z}_1 \cdot \bar{V}_{sh} - (\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2) \cdot \bar{V}_r}{\bar{Z}_1 \cdot \bar{Z}_2 + jX_t(\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2)} \quad (III.11)$$

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

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

$$Q_s = Im(\bar{V}_s \cdot \bar{I}_s^*) = Im \left[ \bar{V}_s \cdot \left( \frac{(\bar{Z}_2 + jX_t)\bar{V}_s - \bar{Z}_2 \cdot \bar{V}_{sh} - jX_t \bar{V}_r}{\bar{Z}_1 \cdot \bar{Z}_2 + jX_t(\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2)} \right) \right] \quad (III.13)$$

Les puissances délivrées par le STATCOM données par les équations (III.14) et (III.15) sont représentées sur la (figure III.6) [26].

$$P_{sh} = Re(\bar{V}_{sh} \cdot \bar{I}_{sh}^*) = Re \left[ \bar{V}_{sh} \cdot \left( \frac{(\bar{Z}_2 + jX_t)\bar{V}_s - \bar{Z}_2 \cdot \bar{V}_{sh} - jX_t \bar{V}_r}{\bar{Z}_1 \cdot \bar{Z}_2 + jX_t(\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2)} \right) \right] \quad (III.14)$$

$$Q_{sh} = Im(\bar{V}_{sh} \cdot \bar{I}_{sh}^*) = Im \left[ \bar{V}_{sh} \cdot \left( \frac{(\bar{Z}_2 + jX_t)\bar{V}_s - \bar{Z}_2 \cdot \bar{V}_{sh} - jX_t \bar{V}_r}{\bar{Z}_1 \cdot \bar{Z}_2 + jX_t(\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2)} \right) \right] \quad (III.15)$$



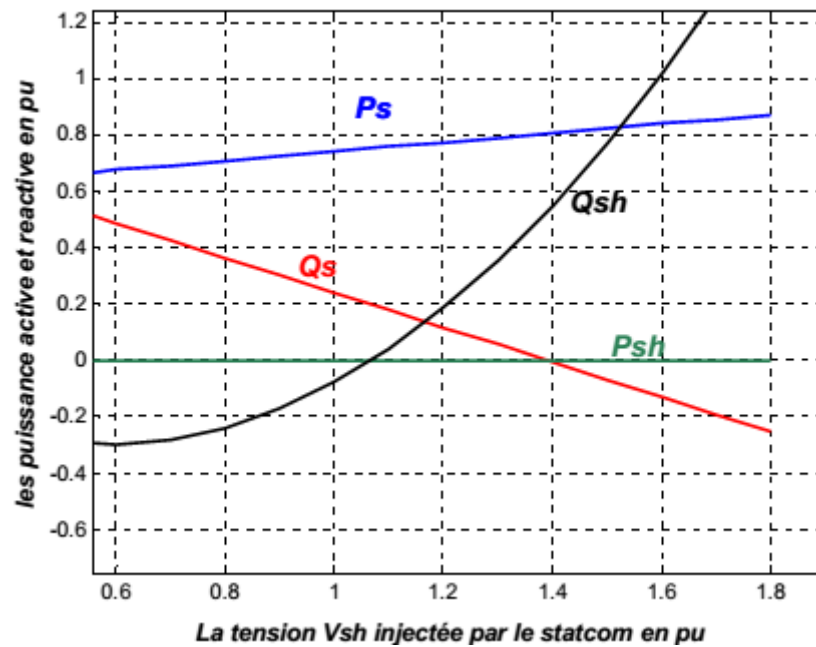


Figure III.6 :  $P_s$ ,  $Q_s$ ,  $P_{sh}$ , et  $Q_{sh}$  en fonction de  $V_{sh}$  [27]

Il est évident que l'influence de la tension  $V_{sh}$  sur la puissance réactive  $Q_s$  est plus grande que sur la puissance  $P_s$ , comme la montre la figure III.6, qui représente la variation des puissances active et réactive  $P_s$  et  $Q_s$  transportées par la ligne ainsi que les puissances active et réactive  $P_{sh}$  et  $Q_{sh}$  injectées par le STATCOM. On constate que lorsque la tension  $V_{sh}$  est augmentée, la puissance réactive injectée par le STATCOM augmente, ce qui diminue la puissance réactive injectée by le générateur au réseau. On peut également constater une amélioration de la capacité de transit de la puissance active. La puissance réactive l'occupait. [27] [28]

### III.4. Modélisation du STATCOM

La modélisation mathématique est basée sur la transformation du système triphasé à un système biphasé orthogonal stationnaire ou tournant au synchronisme par la transformation de PARK respectivement afin d'aboutir à un système d'équations différentielles d'état dans le plan (d, q).

Pour cette modélisation nous avons adopté les hypothèses suivantes :

- Tous les interrupteurs sont supposés idéals.

- Les trois tensions de la source alternative sont équilibrées.
- Les harmoniques causées par l'action d'ouverture et de fermeture des interrupteurs sont négligés et on ne considère que le fondamental.
- L'inductance de fuite du transformateur de couplage Parallèle du STATCOM est représentée par l'inductance  $L_p$ .
- Pour simplification du modèle mathématique le système d'unités relatives est adopté où les grandeurs  $I_B$  et  $U_B$  sont des grandeurs de base :

Donc :

$$U_{pu} = \frac{U}{U_B} ; \quad Z_{pu} = \frac{U_B}{I_B} \quad (\text{III.16})$$

$$L_{pu} = \frac{X_{pu}}{\omega} ; \quad R_{pu} = \frac{R}{Z_B} ; \quad C_{pu} = \frac{1}{\omega C Z_B} \quad (\text{III.17})$$

$\omega$  : Vitesse angulaire de la composante fondamentale de la tension du réseau.

#### III.4.1. Modèle Mathématique Simplifié

Le STATCOM, comme il était déjà décrit dans le chapitre précédent, peut être représenté par le schéma équivalent qu'on reproduit sur la Figure III.7, en tenant compte uniquement du jeu de barre où est connecte ce dispositif [29] :

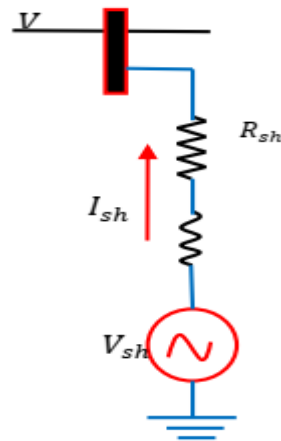


Figure III. 7: STATCOM schéma équivalent [15]

Le modèle STATCOM simplifié assume que le circuit continu est une source de tension constante, et le circuit DC n'est pas inclus. Le design identique de cette machine consiste dans une source de tension sinusoïdale reliée à un nœud du réseau grâce à l'inductance  $L_{sh}$  du transformateur de couplage. Le circuit contient également une résistance

en série pour représenter les pertes ohmiques du transformateur et les pertes des interrupteurs de l'onduleur. [21].

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.

$$\bar{V} - \bar{V}_{sh} = R_{sh} \cdot \bar{I}_{sh} + L_{sh} \frac{d\bar{I}_{sh}}{dt} \quad (\text{III.18})$$

Où les grandeurs sont en triphasé :

$$\bar{V} = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}, \quad \bar{V}_{sh} = \begin{bmatrix} V_{sha} \\ V_{shb} \\ V_{shc} \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad \bar{I}_{sh} = \begin{bmatrix} I_{sha} \\ I_{shb} \\ I_{shc} \end{bmatrix} \quad (\text{III.19})$$

Pour simplifier ces équations on passe au repère orthogonal fixe  $(\alpha, \beta)$  en multipliant l'équation (III.18) par la matrice de la transformation de CLARK suivante:

$$T_{\alpha,\beta} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{III.20})$$

On passe au repère tournant  $(d, q)$ , le référentiel du synchronisme, en multipliant tous les grandeurs par le phaseur  $e^{-j\gamma}$  avec  $d\gamma/dt = \omega$ , la pulsation des grandeurs en question voire la figure (III.7) [30].

Donc :

$$\bar{U}_{(d,q)} = \bar{U}_{(\alpha,\beta)} \cdot e^{-j\gamma} \quad (\text{III.21})$$

Et inversement

$$\bar{U}_{(\alpha,\beta)} = \bar{U}_{(d,q)} \cdot e^{j\gamma} \quad (\text{III.22})$$

En appliquant cette écriture sur l'équation (III.18) on aura :

$$\bar{V}^{(d,q)} \cdot e^{j\gamma} - \bar{V}_{sh}^{(d,q)} \cdot e^{j\gamma} = R_{sh} \bar{I}^{(d,q)} \cdot e^{j\gamma} + L_{sh} \frac{d}{dt} \left( \bar{I}_{sh}^{(d,q)} \cdot e^{j\gamma} \right) \quad (\text{III.23})$$

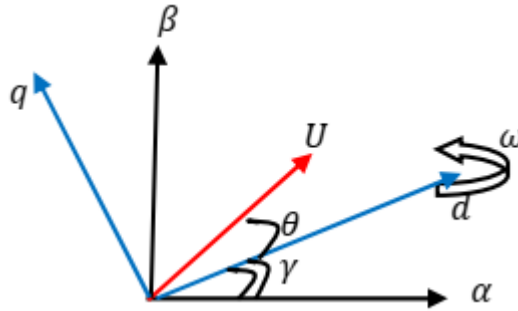


Figure III.8 : Passage du repère  $(\alpha, \beta)$  vers le repère  $(d, q)$

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

$$V_d - V_{shd} = R_{sh} I_{shd} + L_{sh} \frac{dI_{shd}}{dt} - L_{sh} \cdot \omega I_{shq} \quad (III.24)$$

$$V_q - V_{shq} = R_{sh} I_{shq} + L_{sh} \frac{dI_{shq}}{dt} - L_{sh} \cdot \omega I_{shd} \quad (III.25)$$

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

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R_{sh}}{L_{sh}} & \omega \\ -\omega & \frac{-R_{sh}}{L_{sh}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_{sh}} \cdot \begin{bmatrix} V_d & -V_{shd} \\ V_q & -V_{shq} \end{bmatrix} \quad (III.26)$$

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

#### III.4.2. Modèle mathématique en considérant le circuit DC

Le modèle simplifié is basé sur l'idée que la tension continuos  $U_{dc}$  ne change pas pendant les petits échanges d'énergie active entre le réseau et la source de courant continu.

Le modèle mathématique doit être amélioré par l'équation du circuit continu lorsque la capacité de la source DC était relativement petite.

Une source de courant est connectée au condensateur C et une résistance shunt est utilisée pour représenter les pertes joules dans le circuit continu [22].

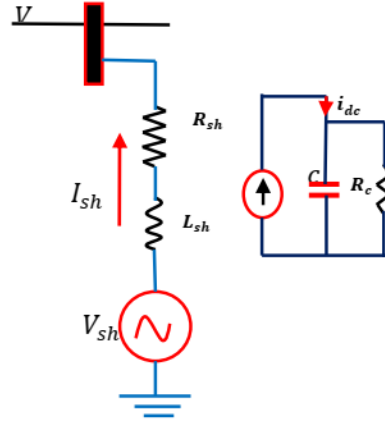


Figure III.9: Schéma équivalent du STATCOM en considérant le circuit DC

On suppose que :

$$\bar{V}_{sh}^{(d,q)} = V_{shd} + jV_{shq} = v \cos \theta + jv \sin \theta \quad (\text{III.27})$$

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

$$v = mU_{dc} \quad (\text{III.28})$$

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

En substituant les équations (III.27) et (III.28) dans les équations (III.24) et (III.25), on aboutit aux équations [23] :

$$V_d - mU_{dc} \cos \theta = R_{sh}I_{shd} + L_{sh} \frac{dI_{shd}}{dt} - L_{sh} \cdot \omega I_{shq} \quad (\text{III.29})$$

$$V_q - mU_{dc} \sin \theta = R_{sh}I_{shq} + L_{sh} \frac{dI_{shq}}{dt} - L_{sh} \cdot \omega I_{shd} \quad (\text{III.30})$$

La puissance circulante entre le condensateur et l'onduleur de tension peut être décrite par l'équation (III.31) et en même temps vérifie l'égalité qui suit (III.32) :

$$P_{sh} = \frac{3}{2} (V_{shd}I_{shd} + V_{shq}I_{shq}) \quad (\text{III.31})$$

$$U_{dc}I_{dc} = \frac{3}{2}(V_{shd}I_{shd} + V_{shq}I_{shq}) \quad (III.32)$$

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

$$I_{dc} = C \frac{dU_{dc}}{dt} + \frac{U_{dc}}{R_c} \quad (III.33)$$

De ces équations (III.27, III.28, III.32 et III.33) on peut tirer l'équation dynamique du coté continue du STATCOM suivante :

$$C \frac{dU_{dc}}{dt} = \frac{3}{2}m(I_{shd}\cos\theta - I_{shq}\sin\theta) - \frac{U_{dc}}{R_c} \quad (III.34)$$

Les équations (III.29, III.30 et III.34) 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 [23]:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \\ U_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R}{L_{sh}} & \omega & \frac{-m}{L_{sh}}\cos\theta \\ -\omega & \frac{-R}{L_{sh}} & \frac{m}{L_{sh}}\sin\theta \\ \frac{3m}{2C}\cos\theta & -\frac{3m}{2C}\sin\theta & \frac{1}{L_{sh}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \\ U_{dc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{sh}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_{sh}} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} \quad (III.35)$$

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

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \\ U_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R}{L_{sh}} & \omega & \frac{-m}{L_{sh}} \cos \theta_0 \\ -\omega & \frac{-R}{L_{sh}} & \frac{m}{L_{sh}} \sin \theta_0 \\ \frac{3m}{2C} \cos \theta_0 & -\frac{3m}{2C} \sin \theta_0 & \frac{1}{L_{sh}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \\ U_{dc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{sh}} & 0 & \frac{m}{L_{sh}} U_{dc0} \cos \theta_0 \\ 0 & \frac{1}{L_{sh}} & \frac{m}{L_{sh}} U_{dc0} \sin \theta_0 \\ 0 & 0 & -\frac{3m}{2C} (I_{shd} \sin \theta_0 + I_{shq} \cos \theta_0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ \theta \end{bmatrix} \quad (\text{III.36})$$

Le courant réactif est commandé indépendamment pour contrôler le flux de puissance réactive et les autres paramètres sont utilisés pour maintenir la tension continue constante. [21] [24]

### III.5. Contrôle du STATCOM

Dans toutes les applications utiles, le STATCOM est principalement utilisé pour compenser la puissance réactive au jeu de la barre de connexion et maintenir sa tension. Ce système injecte ou absorbe un courant  $I^*_{sh}$ , qui représente la puissance à compensée. Ainsi, les courants ( $I^*_{shd}$  et  $I^*_{shq}$ ) sont les grandeurs de référence du STATCOM, qui sera déterminé à partir des puissances à injectées [10].

#### III.5.1. Détermination des Références

La puissance réactive calculée en fonction de la chute de tension and la puissance active  $P^*_{sh} \approx 0$  représentent les pertes joules dans le circuit continu et les interrupteurs dans l'onduleur sont les puissances injectées par le STATCOM.

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 ( $d, q$ ) :

$$|V_s|^2 = \left[ V_r + \frac{R_s P + X_s Q}{V_r} \right]^2 + \left[ \frac{X_s P - R_s Q}{V_r} \right]^2 \quad (\text{III.37})$$

$$\begin{bmatrix} I^*_{shd} \\ I^*_{shq} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \frac{1}{V_d^2 + V_q^2} \begin{bmatrix} V_d & -V_q \\ V_q & V_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P^*_{sh} \\ Q^*_{sh} \end{bmatrix} \quad (\text{III.38})$$

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 la (figure III.10) suivante [25]:

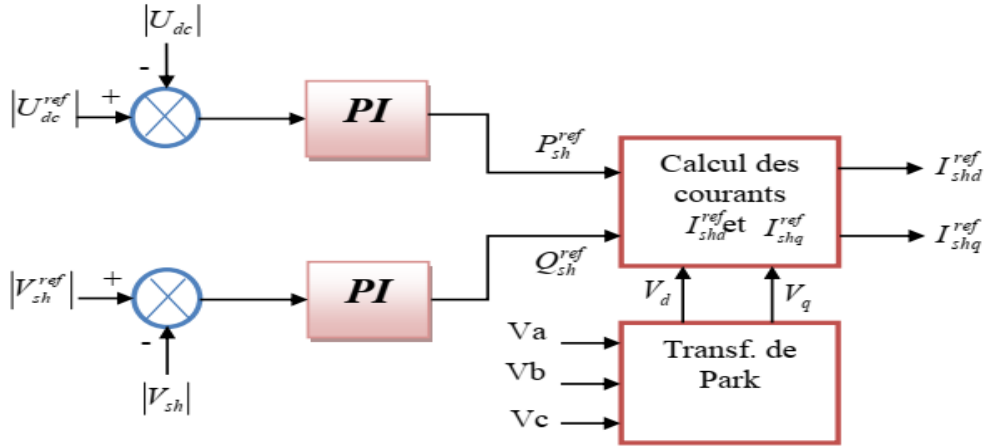


Figure III.10 : Identification des courants de référence.

### III.5.2. Méthode Watt-Var découplée

Considérons le modèle simplifié représenté par le système d'équation (III.26) précédent:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{sh}}{L_{sh}} & \omega \\ \omega & -\frac{R_{sh}}{L_{sh}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_{sh}} \cdot \begin{bmatrix} V_d & -V_{shd} \\ V_q & -V_{shq} \end{bmatrix} \quad (III.39)$$

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

$$\frac{1}{L_{sh}} \cdot \begin{bmatrix} V_d & -V_{shd} \\ V_q & -V_{shq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} \quad (III.40)$$

Avec ;

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

Sont les nouvelles grandeurs de commande.

A partir de la première équation du système (III.26) on aura :

$$\frac{dI_{shd}}{dt} = -\frac{R_{sh}}{L_{sh}} I_{shd} + \omega \cdot I_{shq} + X_1 \quad (III.41)$$

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

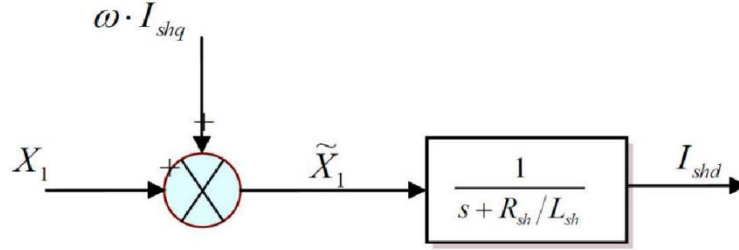
$$\left( S + \frac{R_{sh}}{L_{sh}} \right) I_{shd} = \omega \cdot I_{shq} + X_1 = \tilde{X}_1 \quad (III.42)$$

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

$$\frac{I_{shd}}{\tilde{X}_1} = \frac{1}{S + \frac{R_{sh}}{L_{sh}}} \quad (III.43)$$



Notre commande en réalité est en  $X_1$  et comme  $\tilde{X}_1 = \omega \cdot I_{shq} + X_1$ , on doit ajouter donc le  $\omega \cdot I_{shq}$  terme pour retrouver  $\tilde{X}_1$  à l'entrée de ce transfert comme l'indique le schéma de la figure (III.11) suivante [25]:



**Figure III.11 : Transfert du  $I_{shd}$  en fonction de  $X_1$ .**

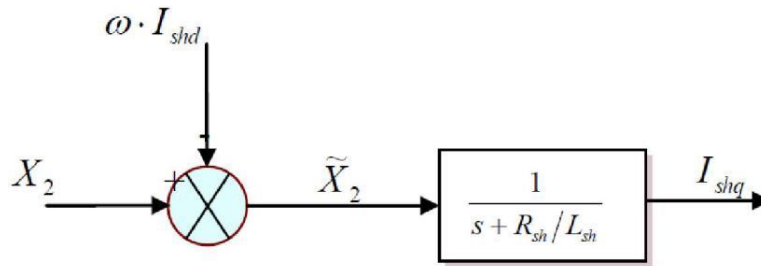
De la même manière en prenant la deuxième équation du modèle précédant on trouve le transfert  $I_{shq}$  en fonction de  $\tilde{X}_2$  qui suit:

$$\frac{I_{shq}}{\tilde{X}_2} = \frac{1}{s + \frac{R_{sh}}{L_{sh}}} \quad (\text{III.44})$$

Avec ;

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

Le schéma suivant résume ce transfert :



**Figure III.12 : Transfert  $I_{shq}$  en fonction de  $X_2$ .**

De ce qu'on vient de voir on constate qu'il y a un couplage naturel dans les transferts des Courants  $I_{shd}$  et  $I_{shq}$ . Pour éliminer ce couplage on utilise la méthode de compensation et avec des régulateurs PI on peut contrôler les courants de sortie du STATCOM et les faire suivre leurs consignes  $I_{shd}^*$  et  $I_{shq}^*$  comme le représente le schéma bloc de la figure (III.13) [25].

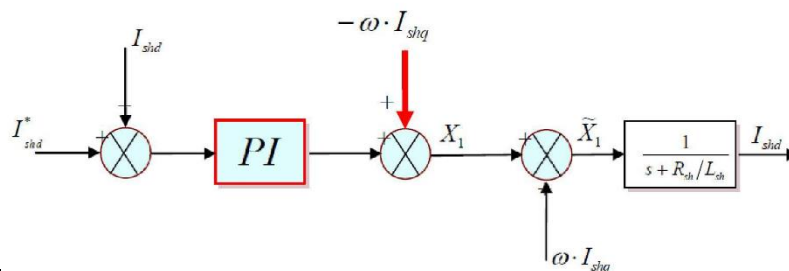


Figure III.13 : Régulation et découplage de  $I_{shd}$ 

De la même pour le courant réactif on doit ajouter la composante et finalement arrivé au schéma de régulation du STATCOM par la méthode Watt-Var découplée de la figure (III.14).

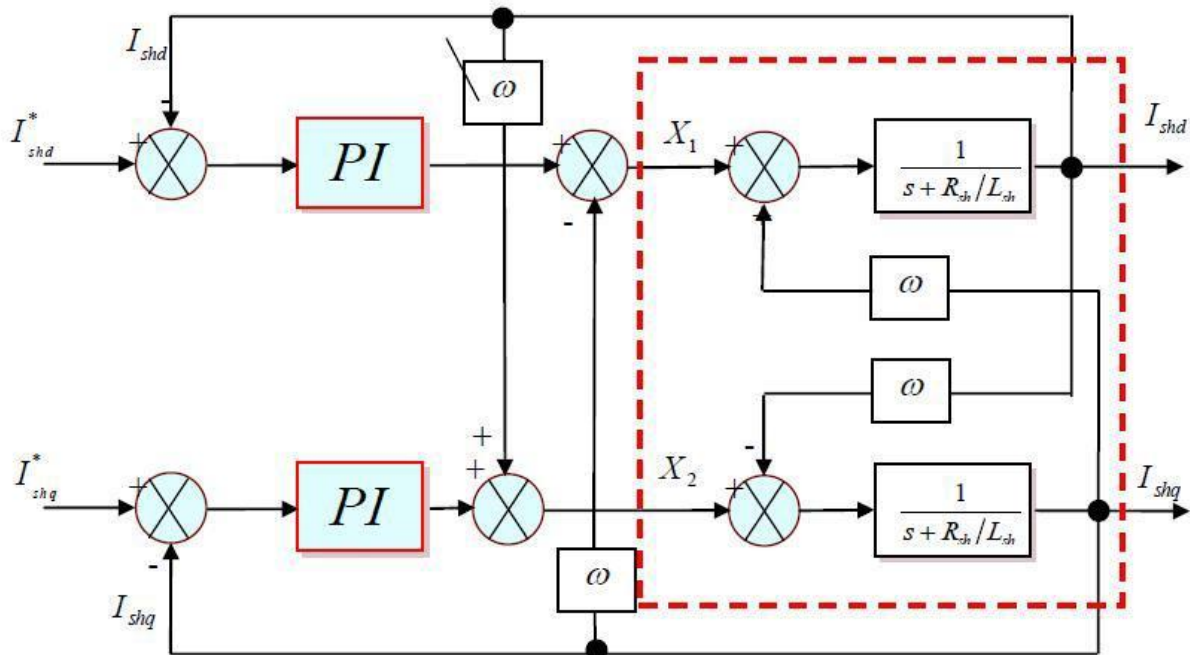


Figure III.14 : Schéma de Régulation du STATCOM (Watt-Var découplée).

### III.5.3. Régulateur PI avec compensation de pôles

Nous avons utilisé pour la régulation des courants du STATCOM des régulateurs (PI) comme le montre le schéma de la figure (III.14). Ce schéma de réglage peut être simplifié comme indiqué dans la figure (III.15) suivante [30] :

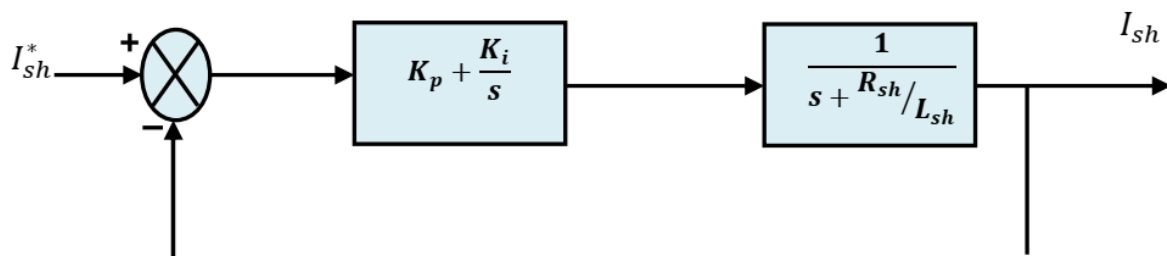


Figure III.15 : Schéma de bloc de la régulation des courants du STATCOM

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

$$G(S) = \left(K_p + \frac{K_i}{S}\right) \left(\frac{1}{S + \frac{R_{sh}}{L_{sh}}}\right) = K_p \left(\frac{S + \frac{R_{sh}}{L_{sh}}}{S}\right) \left(\frac{1}{S + \frac{R_{sh}}{L_{sh}}}\right) \quad (\text{III.45})$$

Et par compensation du pôle on doit avoir :

$$\frac{K_i}{K_p} = \frac{R_{sh}}{L_{sh}} = \frac{1}{T_{BO}} \quad (\text{III.46})$$

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

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

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

$$F(S) = \frac{G(S)}{1 + G(S)} = \frac{K_p}{S + K_p} = \frac{1}{T_{BF}S + 1} \quad (\text{III.47})$$

$$T_{BF} = \frac{1}{K_p} \quad (\text{III.48})$$

Avec  $T_{BF}$ , 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.45 et III.47) les gains du contrôleur PI (proportionnel intégral).

$$K_p = \frac{1}{3} T_{BO} = \frac{1}{3} \frac{L_{sh}}{R_{sh}} \quad (\text{III.49})$$

$$K_i = K_p \frac{R_{sh}}{L_{sh}} \quad (\text{III.50})$$

#### III.5.4. Régulation de la tension continue $U_{dc}$

La tension continue aux bornes du condensateur doit rester constante.

Il est nécessaire d'ajouter un courant actif au courant de référence du STATCOM pour corriger cette tension, ce que traduira l'absorption ou la fourniture d'une puissance active sur le réseau. L'équation suivante peut-être utilisée pour représenter la puissance échangée avec le condensateur [19] [13] :

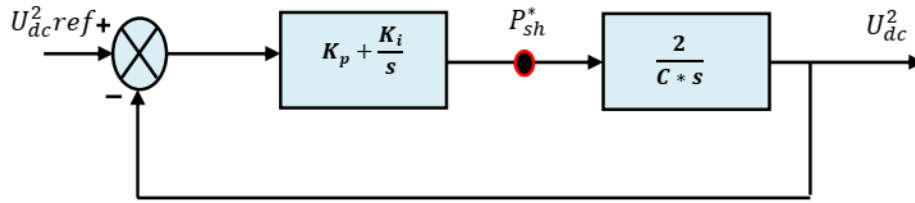
$$P_{dc} = P_{sh} = \frac{1}{2} C \frac{dU_{dc}^2}{dt} \quad (\text{III.51})$$

$$\frac{dU_{dc}^2}{dt} = \frac{2P_{sh}}{C} \quad (\text{III.52})$$

En passant au domaine fréquentiel (Lapalucien) on aura :

$$\frac{U_{dc}^2}{P_{sh}} = \frac{2}{C * S} \quad (\text{III.53})$$

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 [11].



**Figure III.16: Régulation de la tension continue**

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

$$F(S) = \frac{U_{dc}^2}{U_{dc\_ref}^2} = \frac{\frac{2K_p}{C}S + \frac{2K_i}{C}}{S^2 + \frac{2K_p}{C}S + \frac{2K_i}{C}} \quad (\text{III.54})$$

Avec :

$$\omega_n^2 = \frac{2K_i}{C} \quad (\text{III.55})$$

$$\xi = K_p \sqrt{\frac{1}{2.C.K_i}} \quad (\text{III.56})$$

Pour avoir un bon coefficient d'amortissement du système en boucle fermée on choisit généralement :  $\xi = 0.7$ .

Et afin d'atténuer les fluctuations à 300 Hz, et pour avoir un bon filtrage on va choisir  $\omega_n = \frac{2\pi \cdot 300}{100}$  rad/sec, et finalement on détermine à partir des équations (III.56) les coefficients  $k_p$  et  $k_i$ .

### III.6. Conclusion

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

# **Chapitre IV**

**Simulations et  
interprétations des  
résultats**

## IV.1. Introduction

L'augmentation de la charge, l'augmentation ou la diminution de la tension sont quelques-unes des perturbations auxquelles le réseau électrique est soumis.

Le « STATCOM » est utilisé pour équilibrer la tension du réseau, où compenser la puissance réactive.

Le comportement dynamique du « STATCOM » IVa à IVs des perturbations de tension et de puissance réactive sera examiné dans ce chapitre. Des simulations utilisant MATLAB/Simulink vérifieront le comportement du « STATCOM ». Les simulations se dérouleront de la manière suivante :

- Le STATCOM peut fonctionner en mode flottant.
- Mode capacitif
- Mode inductif.

## IV.2. Matériels et méthodes

Un exemple de réseau électrique canadien (hydrau-Québec) de 500 KV réalisé à l'aide de Matlab/Simulink. Il est composé de trois générateurs (G1, G2 et G3) qui ont respectivement des puissances de court-circuit de 8500 MVA, 6500 MVA et 900 MVA. La ligne 1, la ligne 2 and la ligne 3 sont les trois lignes de transport d'énergie. Le système complet est simulé à l'aide du logiciel Matlab version (R.2017a), et le réseau comprend deux charges résistives.

## IV.3. Description du Système étudié

Le dispositif STATCOM 100 MVA (+100 Mvar/-100 Mvar 48-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.

### IV.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

### IV.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  $C1=C= 23000 \mu\text{F}$

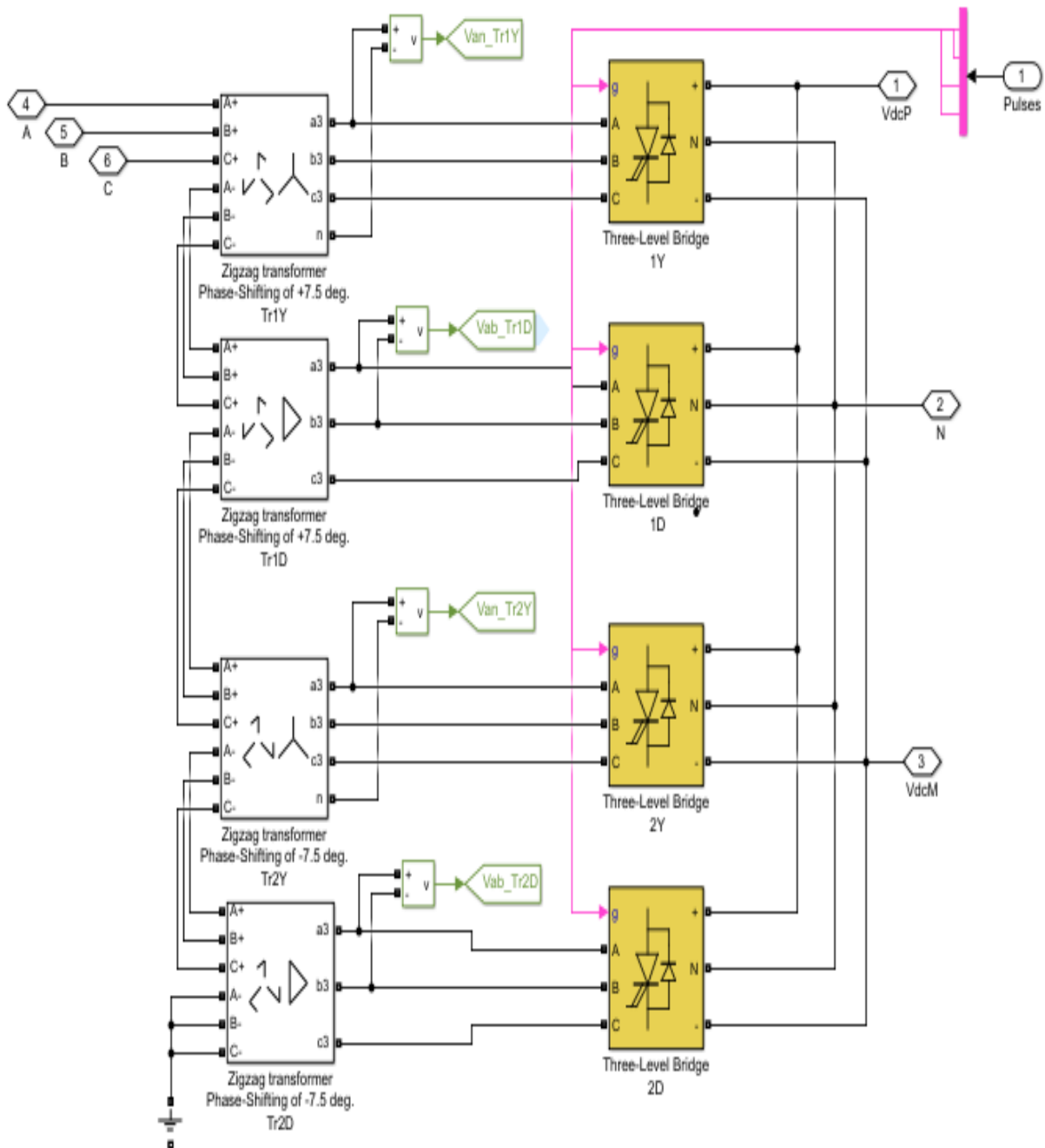


Figure IV.1 : Module STATCOM partie puis



On étudie le système suivant :

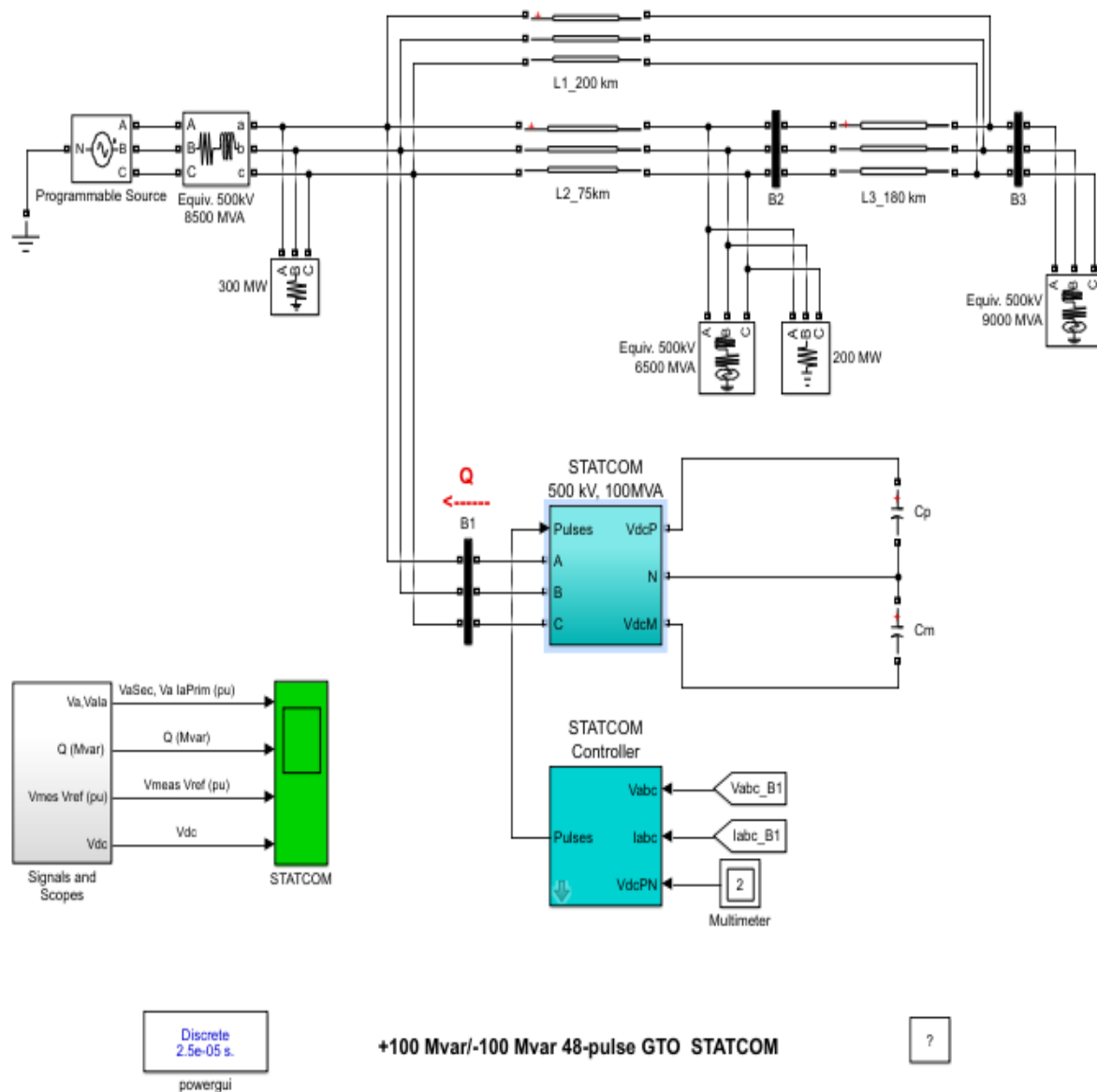
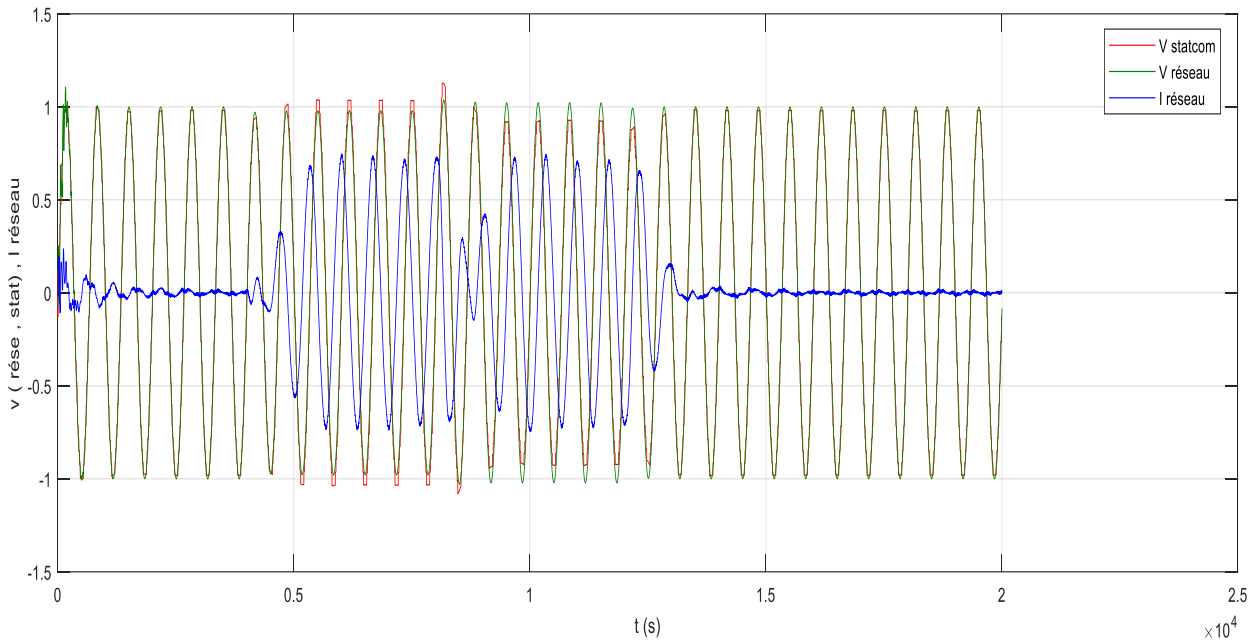


Figure IV.2 : Réseaux électrique a 500 KV

#### IV.4. Résultats de simulation

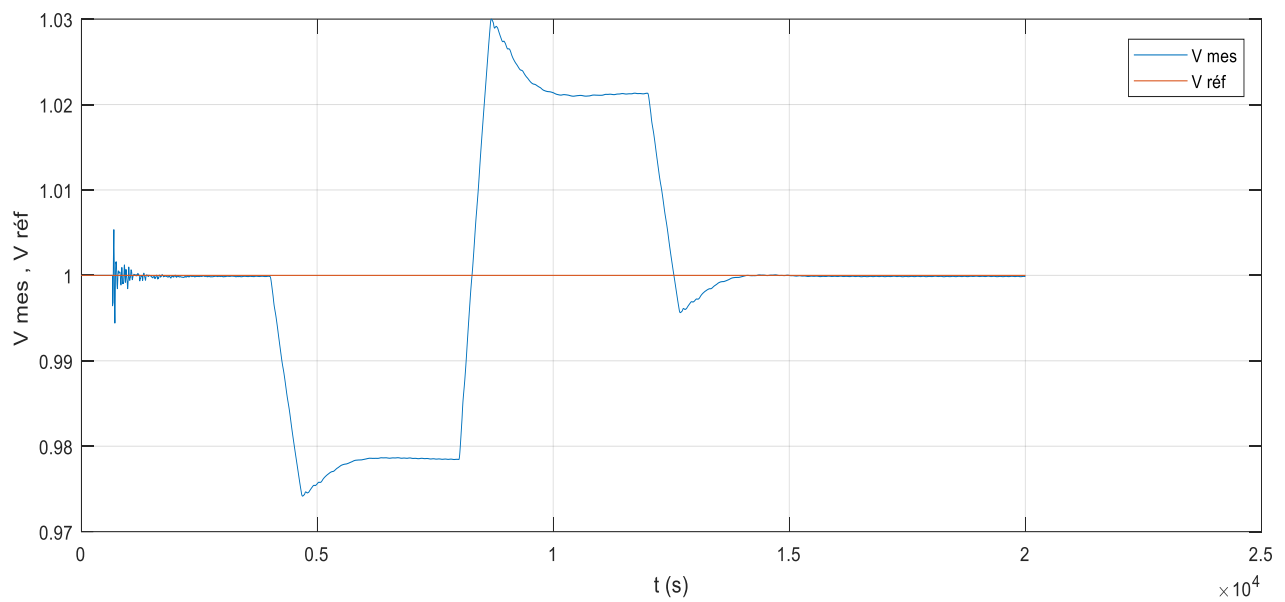


**Figure IV.3 : Courbes des tensions et courant en fonction de temps**

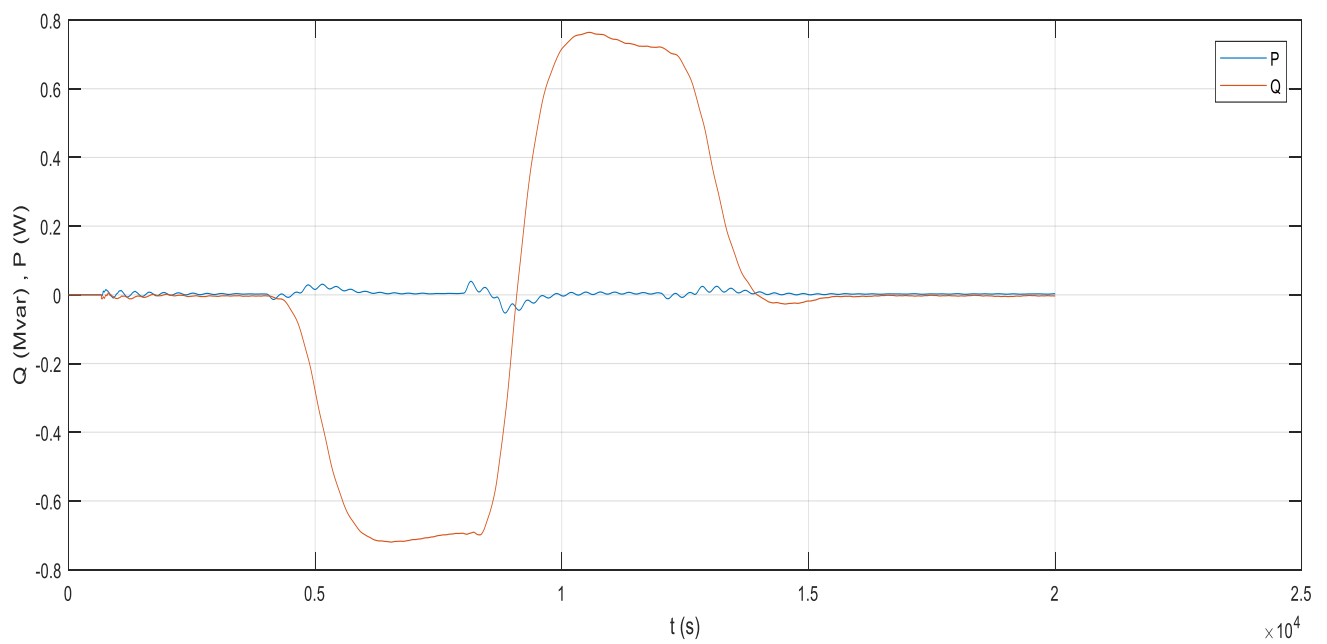
Nous constatons que le dispositif STATCOM est en équilibre (mode flottant c-à-t hors service) dans les intervalles de 0s-0.1s et 0.35s-0.4s. La tension du réseau est égale à la tension du STATCOM et aucun courant ne circule.

Dans l'intervalle de 0.1 secondes à 0.23 secondes, la tension du STATCOM augmente par rapport à la tension du réseau et le courant triphasé produit par le STATCOM est plus rapide que la tension ; Dans cet exemple, l'appareil est en mode « capacitif ».

La tension du STATCOM diminue par rapport à celle du réseau pendant la période de 0.23 secondes à 0.35 secondes. En mode « inductif », le STATCOM réagit en injectant un courant en retard par rapport à la tension.



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

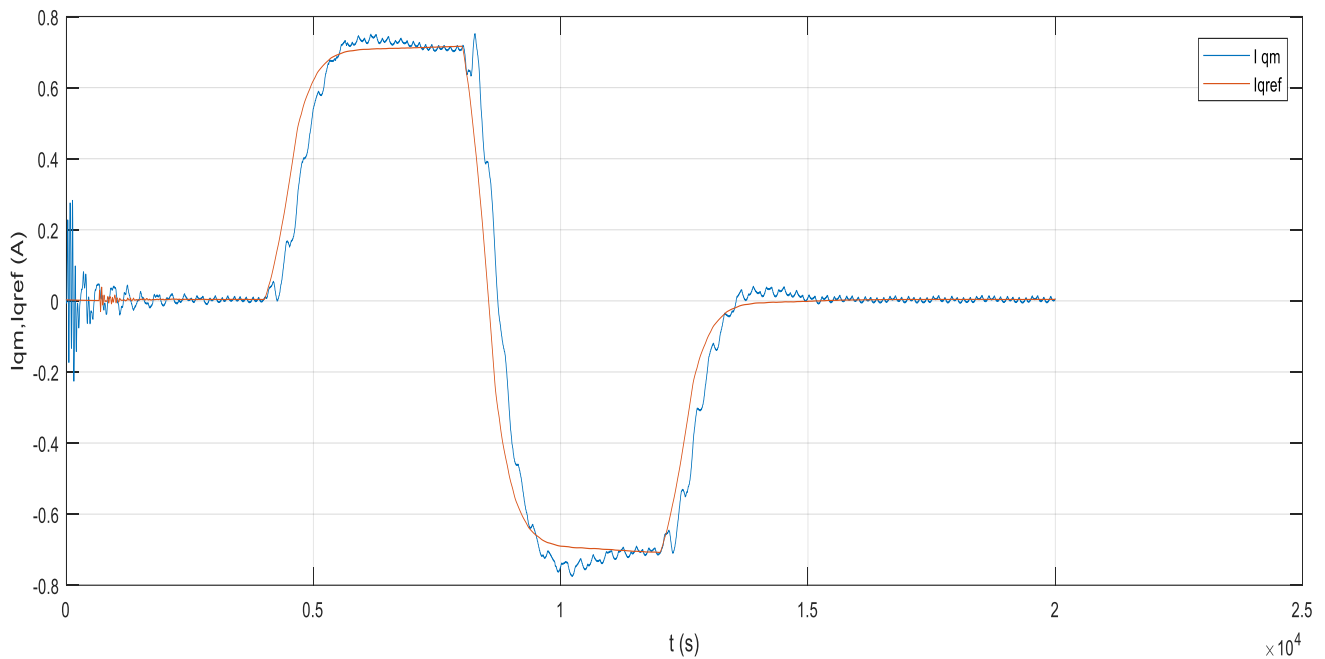


**Figure IV.5 : Puissances active et réactive du STATCOM en fonction de temps**

Le réseau fonctionne en régime permanent pendant la période de (0s-0.1s) et (0.35s-0.4). Aucune perturbances de la tension - il n'y a aucune différence entre la tension mesurée et la tension de référence. Le STATCOM n'a produit aucune puissance réactive ou active (aucun changement dans le réseau).

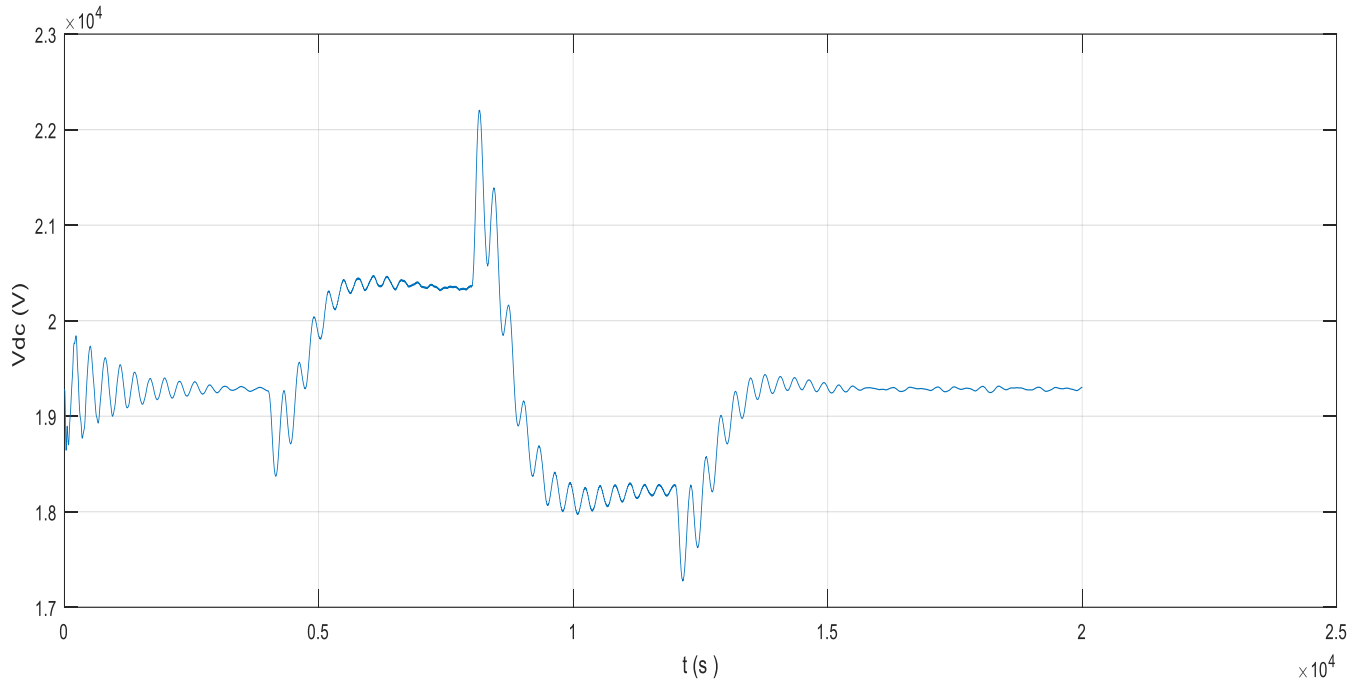
Dans l'intervalle de temps (0.1s-0.23s), le réseau est menu par une chute de tension (puissance réactive transmise plus que les normes). Dans ce cas le STATCOM est intervenu par l'absorption de courant réactive, la puissance absorbée est de l'ordre  $Q = -0.76$  Mvar (le STATCOM fonctionne en mode capacitif)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

Il y a une surtension du réseau dans l'intervalle de temps (0.23s à 0.35s). Dans cette situation, le STATCOM use l'injection de courant réactive et la puissance injectée est de l'ordre  $Q = +0.76$  Mvar (le STATCOM fonctionne en mode inductif). La puissance active du réseau n'a pas changé.



**Figure IV.6 : Courant ( $I_{qm}$ ,  $I_{qref}$ ) 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).**

## IV.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. Quel que soit la perturbation ; chute de tension ou bien une surtension, il réagit d'une manière instantanée 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.

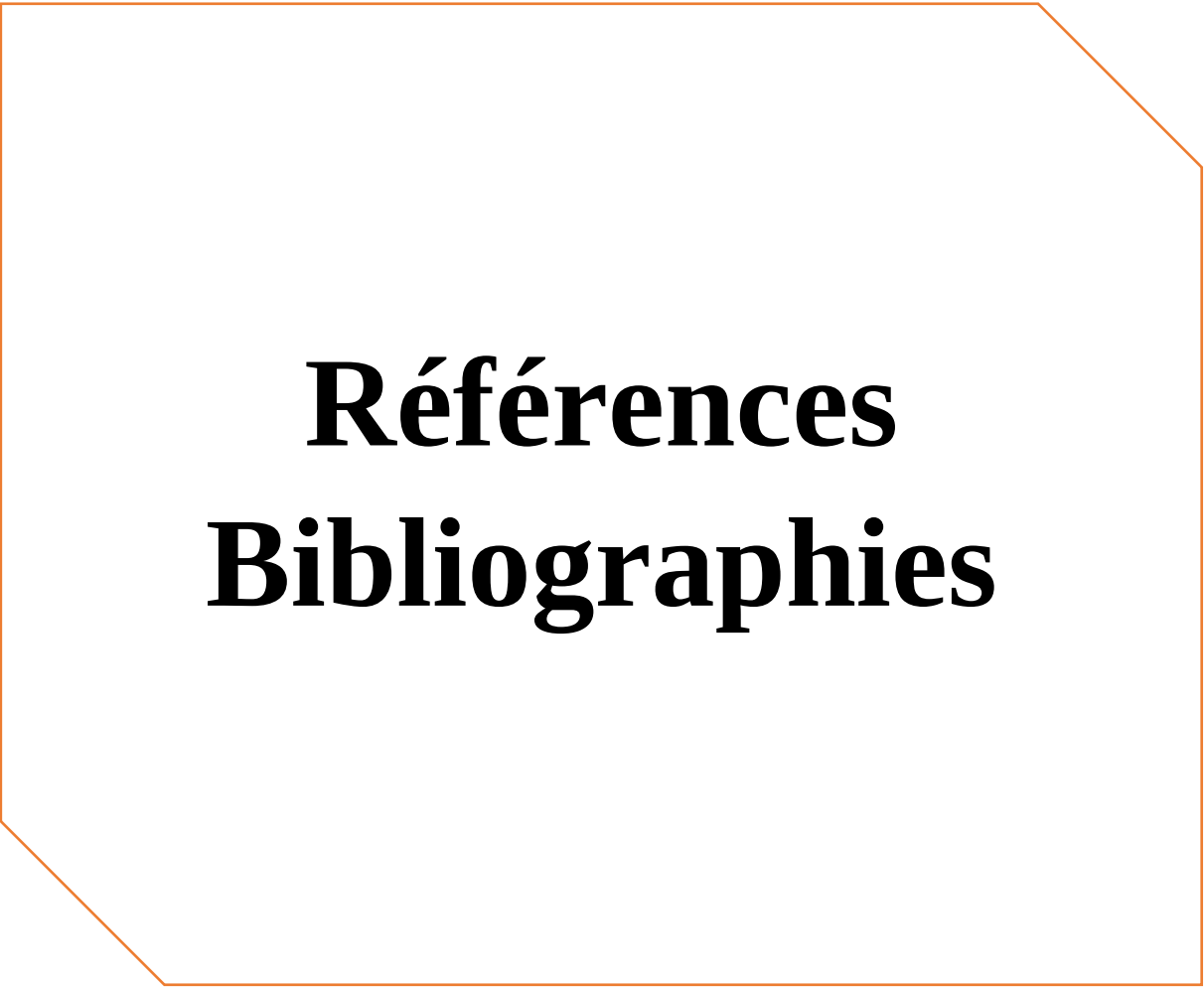
# **Conclusion générale**

## **Conclusion générale**

Grâce au nouveau concept appelé Systèmes Flexibles de Transmission à Courant Alternatif (FACTS), il nous est désormais possible de contrôler le flux de puissance active et réactive, ainsi que d'augmenter les capacités de charge des lignes, pouvant atteindre et même surpasser grâce à l'injection de tensions ou de courant. Cette étude se concentre sur le contrôle de la tension par la compensation shunt de l'énergie réactive à l'aide d'un dispositif appelé STATCOM.

L'essai de simulations d'un STATCOM couplé à un réseau de transmission à l'aide du logiciel MATLAB/Simulink. Les résultats obtenus par la simulation ont confirmé l'efficacité de la stratégie de commande adoptée, qui permet un contrôle indépendant et découplé des puissances active et réactive de ce dispositif, tout en minimisant l'effet d'interaction entre ces puissances.

Ce travail modeste nous pousse à envisager un projet à court terme, consistant à installer des dispositifs STATCOM dans notre réseau électrique, qui a enregistré d'importantes perturbations ayant un impact sur la qualité de service.



# **Références**

# **Bibliographies**



## Références Bibliographies

- [1] Zikem hossem,tazia Mohammed elmabrouk (2016.2017). Amélioration de la qualité d'énergie électrique issue d'un système photo voltaïque utilisant la méthode du courant de source maximum(Ismax).
- [2] Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, IEEE Std. 519,1992.
- [3] A. Med Elhadi : " Étude comparative de différentes méthodes de compensation active d'énergie électrique ", mémoire de Master. Université de M'sila, 2013.
- [4] R. Chebabhi & M. Boudraf : " Modélisation et commande des différentes topologies des filtres actifs parallèles "mémoire d'ingénieur d'état. Université de M'sila, 2011.
- [5] H. Bakhi : "Commande d'un filtre actif triphasé shunt par logique floue" mémoire de Master. Université de M'sila, 2015.
- [6] S. Bouguerra & I. BOURENNANE : "Filtrage actif parallèle des réseaux électriques avec compensation de l'énergie réactive", mémoire d'ingénieur. Université de M'sila, 2007.
- [7] S.OUCHEN, « Contribution à la Commande Directe de Puissance Dédiée au Filtrage Actif, Associé à une Source Photovoltaïque » thèse Doctorat de l'université de Mohamed Khider – Biskra.
- [8] Mme ABAIDIA FATMA ZOHRA " Contribution du STATCOM dans l'amélioration du comportement du réseau électrique "mémoire de master de l'UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA-juin 2018
- [9] Mr MEFTOUHI ABDELMALEK "Influence des FACTS sur L'écoulement De puissance Dans Les Réseaux D'énergie Electriques" magister de UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE «Mohamed Boudiaf » ORAN -2013
- [10] Harrat Ahlem " Amélioration de la stabilité de tension d'un réseau électrique par système FACTS" diplôme de Master 2020/2021
- [11] Mer. Mammeri Ossama" Compensation dynamique de la puissance réactive (Etude comparative SVC et TCSC) " MASTER ACADEMIQUE 2018/2019
- [12] DELENDI LOUARDI" CONTROLE DE L'ECOULEMENT DE PUISSANCE ACTIVE PAR SYSTEME FACTS" Magister en Electrotechnique 2009
- [13] M. ZITOUNI Fares" Amélioration de la Stabilité Transitoire des Réseaux Electriques par l'utilisation des Systèmes FACTS " Mémoire de Magister Electrotechnique 2010
- [14] <https://www.memoireonline.com/08/21/12161/Analyse-du-comportement-dynamique-du-FACTS-STACOM-face--la-variation-de-la-tension-et-de-la-puissa.html>

- [15] Ay Abdelouahab "Modélisation et Analyse d'Un Compensateur Statique : SVC" Mémoire de Magistère en Electrotechnique 2013
- [16] Mr. BOUGOUFFA Lazhar Mr. BOUGOUFFA Lazhar " Effets des Systèmes de Compensation FACTS sur la Protection à Maximum de Courant dans les Réseaux Électriques" DOCTORAT 3ème cycle LMD en Électrotechnique 2016
- [17] ZENDAGUI Fatima Zohra "Analyse de la stabilité transitoire dans les réseaux électrique" mémoire master 2013
- [18] Mr. BOT Youcef " Influence des FACTS sur le calcul de l'écoulement des puissances en utilisant un IPFC" THESE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MAGISTER 2011
- [19] A. BOUSSAID, « Filtrage actif des harmoniques dans les réseaux électriques contribution à l'amélioration de l'énergie électrique » thèse Pour l'obtention du diplôme de Doctorat troisième cycle LMD En Électrotechnique, 2017.
- [20] Abdelaali. Alibi « Contrôle des réseaux électrique par les systèmes FACTS : Flexible AC Transmission Systèmes » mémoire de magister, université de Batna 2009.
- [21] K.R.Padiyar : « Investigation on strong resonance in multimachine power systems with STATCOM supplementary modulation controller », IEEE, transaction on power systems, vol.21, N°2, May 2006.
- [22] Nicolas Buyant : « Etude et commande généralisées des filtres actifs parallèles », thèse de doctorat, Ecole des Sciences pour l'ingénieur de LANPES 1999.
- [23] Laib Hichem « Contribution à l'étude du contrôle du flux de puissance par l'UPFC » mémoire de magister, université de Batna 2009.
- [24] Djermane Ali « Contrôle optimal de la tension dans un réseau électrique en utilisant les systèmes de transmission flexibles en courant alternatif (FACTS) » mémoire de Magister, Université D'oum El Bouaghi 2010
- [25] Pranesh Rao, M.L.Crow, "STATCOM control for power system voltage control application", IEEE Transaction on power system, vol 15, no 4, October 2000.
- [26] Rabah Benabid, "Optimisation Multiobjectif de la Synthèse des FACTS par les Particules en Essaim pour le Contrôle de la Stabilité de Tension des Réseaux Electriques", Mémoire de Magister Soutenu au département d'électrotechnique Université de Jijel 2007.
- [27] Eskandar Gholipour Shahraki, "Apport de l'UPFC à l'amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques ", thèse de doctorat Université Henri Poincaré, Nancy-I octobre 2003.

- [28] Brahim Bekki, “Contribution du SMES, Dispositif FACTS, à la Stabilisation d’un Réseau Electrique Haute Tension”, Mémoire de Magister, Ecole Nationale Supérieure Polytechnique, Alger, Septembre 2006.
- [29] E. G. Shahraki, “Apport de l’UPFC à l’Amélioration de la Stabilité Transitoire des Réseaux Electriques”, Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy, France, 2003.
- [30] Cai Rong, “Analysis of STATCOM for Voltage Dip Mitigation”, Mémoire de Master de Science, Université Chalmers de technologie, Göteborg, Suède, Décembre 2004.