

N° d'ordre :  
N° de série :

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Centre Universitaire d'EL-Oued  
Institut des Sciences et de Technologies  
Département de Génie Electrique

Filière : Génie Electrique et Electronique  
Spécialité: Réseaux Electriques

Mémoire de Fin d'Etudes  
En vue de la préparation du diplôme:

**MASTER ACADEMIQUE**

## *Thème*

**L'IMPACT DES DISPOSITIFS DE  
COMPENSATION DYNAMIQUE ( FACTS)  
SUR LES RESEAUX DE TRANSPORT**

**Proposé et Dirigé Par:**

- Dr. BEN ATTOUS Djillani
- Mr. LABBI Yacine

**Présenté par:**

- SOUID Yousef
- MEHDA Med Said

**Promotion: 2011/2012**

## *Dédicace*

*Je m'incline devant Dieu tout puissant qui m'a ouvert la porte du savoir et m'a aidé la franchir.*

*Je dédie ce modeste travail:*

*A ma mère (Djamila), source d'affection de courage et d'inspiration qui a autant sacrifié pour me voir atteindre ce jour.*

*A mon père (M<sup>ed</sup> El Hamid), source de respect, en témoignage de ma profonde reconnaissance pour tout l'effort et le soutien incessant qui m'a toujours apporté.*

*A mes frères KHALED, ISMAIL, SOUFIAN, SALAH*

*A mes sœurs SOUMAIYA et ses filles, MOUNA, AMEL, MARWA*

*A tout mes oncles ainsi qu'à leurs familles.*

*A toute la famille de MEHDA et KHEMMES et tout L'ahbab*

*A tous mes amis du département d'électrotechnique.*

*Une spéciale dédicace à mes collègues:*

*Amar .D, Salem .D, Saad .H, Abd elkader .Z, Ismail .O, Brahim .D, Ahmed .H,  
Noureddin .T, Adel .F, Ayoub .F, Faoizi .F, Brahim .M,*

*Bader .M, Belkher T, Youcef .S, Mosbah .L, Med Seghir .H, Med .H  
, Ezzedin .L, No3ni .H*

*Said*

## *Dédicace*

*Je m'incline devant Dieu tout puissant qui m'a ouvert la porte du savoir et m'a aidé la franchir.*

*Je dédie ce modeste travail:*

*A ma mère (Khadidja), source d'affection de courage et d'inspiration qui a autant sacrifié pour me voir atteindre ce jour.*

*A mon père (Abdelkader), rahimaho allah source de respect, en témoignage de ma profonde reconnaissance pour tout l'effort et le soutien incessant qui m'a toujours apporté.*

*A mes frères Abdeldjalil, El hadi, Abdelhakem, Larbi*

*A mes sœurs Chahira, Nadja, Fatiha, Aicha*

*Et leurs conjoints ainsi qu'à leurs familles.*

*A tout mes oncles ainsi qu'à leurs familles.*

*A toute la famille de SOUID*

*A tous mes amis du département d'électrotechnique , ainsi de la cité universitaire.*

*Une spéciale dédicace à mes collègues: Said.M, Mosbah .L ,Med Seghir .H ,Med .H Ezzeddin.L ,Bilal.L ,Souhail.M ,Samoui.B ,Dahbi,M ,Mesbah.H ,Miloud.B*

*Takichi.D .Bachir.M, Ibrahim.Gh, Ayoub.Ch ,Ayoub.B, No3ni.H, Issa.M, Yahia.B, Khmaiss.K, Boubaker.S, Sassi.Kh. Taleb .B ,Bachir.B ,Terzi.B, Said.S, Larbi.B, Hamdi .A*

*youcef*

*Merci*

## *Remerciement*

*Avant tout nous remercions dieu de nous avoir donné le courage, la patience et la chance d'étudier et de suivre Le chemine de la science. et, la force et la patience pour élaborer notre travail.*

*Nos vifs remerciements particulièrement à notre encadreur **Mr : Labbi Yacine**, pour son aide précieuse, ses conseils constructifs et ses orientations bénéfiques et objectives et surtout sa confiance durant les moments d'efforts pour la réalisation de notre projet.*

*Nous remercions tous les enseignants de l'électrotechnique en particulier :*

***Dr : Ben Attous Djilani***

*Mes remerciements vont aussi aux membres de jury qui ont accepté de juger ce travail et d'y apporter leur coùtions.*

# SOMMAIRE

---

|  |    |
|--|----|
| Dédicaces                                |    |
| Remerciements                            |    |
| Sommaire .....                           | I  |
| Liste de figure .....                    | IV |
| Listes des Symboles et Abréviations..... | VI |
| Introduction Générale.....               | 1  |

## Chapitre I

|  |           |
|--|-----------|
| <i>I.1 Introduction : .....</i>  | <i>3</i>  |
| <i>I.1.1 Historique : .....</i>  | <i>3</i>  |
| <i>I.1.2 Architecture des réseaux électriques : .....</i>                              | <i>4</i>  |
| <i>I.2 Problématique du fonctionnement des réseaux : .....</i>                         | <i>4</i>  |
| <i>I.3 L'acheminement de la puissance : .....</i>                                      | <i>6</i>  |
| <i>I.4 Puissance transmissible dans une ligne : .....</i>                              | <i>6</i>  |
| <i>I.5 Chute de tension dans une ligne : .....</i>                                     | <i>8</i>  |
| <i>I.6 Moyens classiques de compensation réactive et de réglage de tension : .....</i> | <i>9</i>  |
| <i>I.6.1 Condensateurs et inductances fixes : .....</i>                                | <i>10</i> |
| <i>I.6.2 Groupes de production et compensateurs synchrones : .....</i>                 | <i>11</i> |
| <i>I.6.3 Compensateurs statiques : .....</i>   | <i>11</i> |
| <i>I.6.4 Transformateurs avec prises réglables en charge : .....</i>                   | <i>12</i> |
| <i>I.7 Conclusion : .....</i>  | <i>12</i> |

## Chapitre II

|  |           |
|--|-----------|
| <i>II.1 Introduction : .....</i>                                       | <i>13</i> |
| <i>II.2 Utilisation des FACTS : .....</i>                              | <i>13</i> |
| <i>II.2.1 Types de FACTS : .....</i>                                   | <i>13</i> |
| <i>II.2.2 Compensation shunt : .....</i>                               | <i>14</i> |
| <i>II.2.2.1 Compensateur statique d'énergie réactive (SVC) : .....</i> | <i>14</i> |
| <i>II.2.2.2 Compensateur statique (STATCOM) : .....</i>                | <i>15</i> |
| <i>II.2.3 Les systèmes de compensation série : .....</i>               | <i>17</i> |

## **SOMMAIRE**

---

|  |    |
|--|----|
| <i>II.2.3.1 Capacités série commandées par thyristor (TCSC) :</i>        | 17 |
| <i>II.2.3.2 Compensateur Série Statique Synchronne (SSSC) :</i>          | 18 |
| <i>II.2.3.3 Régulateur de déphasage commandé par thyristor (TCPAR) :</i> | 19 |
| <i>II.2.4. Compensateurs hybrides série – parallèle :</i>                | 20 |
| <i>II.2.4.1 Contrôleur de transit de puissance unifié (UPFC) :</i>       | 20 |
| <i>II.3 Application des FACTS :</i>                                      | 21 |
| <i>II.4 Les avantages de la technologie des dispositifs FACTS :</i>      | 23 |
| <i>II.5 CONCLUSION :</i>   | 23 |

### *Chapitre III*

|   |    |
|---|----|
| <i>III. Introduction :</i>  | 24 |
| <i>III.1. Caractéristique d'un compensateur statique SVC :</i>    | 27 |
| <i>III.1.1. Caractéristique en V d'un compensateur statique :</i> | 27 |
| <i>III.1.2. Caractéristique d'un SVC :</i>                        | 28 |
| <i>III.2. Modélisation des compensateurs statiques (SVC) :</i>    | 29 |
| <i>III.2.1. Introduction :</i>                                    | 29 |
| <i>III.2.2. Modélisation de SVC :</i>                             | 30 |
| <i>III.2.3. Modélisation de TCR :</i>                             | 31 |
| <i>III.2.4. Principe de fonctionnement de TCR :</i>               | 32 |
| <i>III.2.5. Modél TCR en simulink:</i>                            | 33 |
| <i>III.2.6. Modèle du compensateur shunt SVC :</i>                | 34 |
| <i>III.2.6. 1 Les équation de SVC :</i>                           | 35 |
| <i>III.3. Différent types des régulateurs :</i>                   | 39 |
| <i>A) Type 1 :</i>  | 39 |
| <i>B) Type 2 :</i>  | 40 |
| <i>III.4. Modélisation et contrôle d'un UPFC:</i>                 | 41 |
| <i>III.4.1 Caractéristiques D'un Compensateur Statique UPFC:</i>  | 41 |
| <i>III.4.2 Modélisation D'un UPFC :</i>                           | 43 |
| <i>III.4.2 1 Modélisation de la partie shunt :</i>                | 43 |
| <i>III.4.2 1 Modélisation de la partie série :</i>                | 44 |

## *SOMMAIRE*

---

|  |    |
|--|----|
| <i>III.4.3 Contrôle De L'UPFC :</i> .....      | 44 |
| <i>III.4.3.1.partie série :</i> .....          | 45 |
| <i>III.4.3.2.partie shunt :</i> .....          | 45 |
| <i>III.4.3.3.comonde de l'onduleur :</i> ..... | 45 |
| <i>III.5 Conclusion :</i> .....                | 45 |

### *Chapitre IV*

|   |    |
|---|----|
| IV.1.Introduction .....   | 46 |
| IV.2.L'impact du compensateur shunt SVC sur le régime transitoire (stabilité dynamique) ..... | 46 |
| IV.3. Les résultats de simulation.....  | 48 |
| IV.3.1. Compensation Sans SVC.....  | 48 |
| IV.3.1.1.Court circuit monophasé a la terre .....   | 48 |
| IV.3.1.2.Court circuit biphasé a la terre.....  | 49 |
| IV.3.1.3.Court-circuit triphasé à la terre.....   | 50 |
| IV.3.2.Compensation avec SVC .....  | 51 |
| IV.3.2.1.Court circuit monophasé a la terre .....   | 51 |
| IV.3.2.2.Court circuit biphasé a la terre .....   | 52 |
| IV.3.2.3.Court-circuit triphasé à la terre .....  | 53 |
| IV.4. L'impact du l'UPFC sur le régime transitoire (stabilité dynamique).....                 | 54 |
| IV.5. Conclusion.....   | 57 |
| Conclusion générale.....  | 58 |
| Bibliographie.....  | 59 |

Annexe

## Liste de figure

---

### Chapitre I

|  |    |
|--|----|
| Figure (1-1) : Schéma monophasé équivalent .....             | 7  |
| Figure (1-2): Diagramme vectoriel des tensions.....          | 8  |
| Figure (1-3): <i>Principe de la compensation série</i> ..... | 10 |

### Chapitre II

|   |    |
|---|----|
| Figure (2-1):Schéma type du SVC en connexion shunt. ....                              | 15 |
| Figure (2-2):SVC installée dans les réseaux .....                                     | 15 |
| Figure (2-3):Schéma représentatif du SVS (solid-stat switching-converter based) ..... | 16 |
| Figure (2-4):Schéma:(a) STATCOM. (b) caractéristiques tension/courant du STATCOM...16 |    |
| Figure (2-5):STATCOM installée dans les réseaux électriques .....                     | 17 |
| Figure (2-6):Schéma d'un TCSC multi gradins pour une compensation série.....          | 18 |
| Figure (2-7):Compensation série statique synchrone .....                              | 19 |
| Figure (2-8): Schéma du contrôle de l'angle de transport par TCPAR .....              | 19 |
| Figure (2-9):Contrôleur de transit puissance unifié.....                              | 21 |
| Figure (2-10):Diagramme schématique des applications des FACTS dans les réseaux.....  | 21 |

### Chapitre III

|  |    |
|--|----|
| Figure (3-1) : Technologie des dispositifs FACTS categorie 1 .....   | 25 |
| Figure (3-2) : Technologie des dispositifs FACTS categorie 2 .....   | 26 |
| Figure(3.3) : la caractéristique en V d'un SVC .....   | 28 |
| Figure (3.4) : Variation de la puissance réactive en fonction du courant.....  | 29 |
| Figure (3-5) : Présentation d'un compensateur SVC.....   | 30 |
| Figure (3.6) : La forme de la tension et du courant de l'inductance .....  | 31 |
| Figure (3-7): Schéma unifilaire d'un TCR.....  | 32 |
| Figure (3-8): Variation de courant et la tension de thyristor.....   | 33 |
| Figure (3-9) : Variation courant de ligne.....   | 34 |
| Figure (3.10) : Schéma bloc du compensateur SVC.....   | 35 |
| Figure (3.11) : Organigramme représentant la variation de l'angle d'amorçage<br>en fonction de la tension à régler ..... | 36 |
| Figure (3.12) : la variation de la susceptance en fonction de l'angle d'amorçage.....                                    | 36 |
| Figure (3.13) : Variation de la susceptance en fonction de l'angle $\alpha$ .....  | 37 |
| Figure (3-14) : Installation du Compensateur SVC .....   | 38 |
| Figure (3-15) Régulateur mode 1 du SVC.....  | 39 |
| Figure (3-16) : Régulateur mode 2 de SVC.....  | 40 |
| Figure (3-17) : Schéma général du système de contrôle UPFC .....   | 42 |
| Figure (3-18) : Schéma simplifié d'un STATCOM (partie parallèle de l'UPFC) connecté au<br>réseau .....                   | 43 |
| Figure (3-19) : Schéma simplifié d'un UPFC (partie série) connecté au réseau.....  | 44 |
| Figure (3-20) : Modèle mathématique d'un UPFC connecté au réseau .....   | 44 |

### Chapitre IV

|  |    |
|--|----|
| Figure (4-1) : Schémas unifilaire du réseau test de simulation Hydro-Quebec- Canada..... | 47 |
| Figure (4-2) : Variation de la tension et la susceptance .....                           | 48 |
| Figure (4-3) : Variation de l'angle de charge.....                                       | 48 |

## *Liste de figure*

|  |    |
|--|----|
| Figure (4-4) : Variation de la puissance maximale transitée.....                                       | 49 |
| Figure (4-5) : variation de la tension et la susceptance.....  | 49 |
| Figure (4-6): Variation de l'angle de charge.....  | 49 |
| Figure (4-7) : Variation de la puissance maximale transitée.....                                       | 50 |
| Figure (4-8) : Variation de la tension et la susceptance.....  | 50 |
| Figure (4-9) : Variation de l'angle de charge.....   | 50 |
| Figure (4-10) : Variation de la puissance maximale transitée.....                                      | 51 |
| Figure (4-11) : Variation de la tension et la susceptance.....   | 51 |
| Figure (4-12) : Variation de l'angle de charge.....  | 51 |
| Figure (4-13) : Variation de la puissance maximale transitée.....                                      | 52 |
| Figure (4-14) : Variation de la tension et la susceptance.....   | 52 |
| Figure (4-15) : Variation de l'angle de charge.....  | 52 |
| Figure (4-16) : Variation de la puissance maximale transitée.....                                      | 53 |
| Figure (4-17) : Variation de la tension et la susceptance.....   | 53 |
| Figure (4-18) : Variation de l'angle de charge.....  | 53 |
| Figure (4-19) : Variation de la puissance maximale transitée.....                                      | 54 |
| Figure (4-20) : exemple du modèle utilisée au l'implantation de dispositif dans le réseau<br>UPFC..... | 55 |
| Figure (4-21) : Schéma équivalent en grandeurs réduites .....  | 55 |
| Figure (4-22) : Résultats des simulations pour le contrôle de la puissance dans la ligne.....          | 56 |

### ***Abréviations et acronymes***

|                |   |
|----------------|---|
| <i>FACTS</i>   | Flexible Alternating Current Transmission Systems |
| <i>TSR</i>     | Thyristor Switched Reactor                        |
| <i>TSC</i>     | Thyristor Switched Capacitor                      |
| <i>SVC</i>     | Static Var Compensator                            |
| <i>STATCOM</i> | Static Compensator                                |
| <i>TCSC</i>    | Thyristor Controlled Series Capacitor             |
| <i>SSSC</i>    | Static Synchronous Series Compensator             |
| <i>TCPAR</i>   | Thyristor Controlled Phase Angle Regulator        |
| <i>UPFC</i>    | Unified Power Flow Controller                     |
| <i>THT</i>     | Très Haute Tension                                |

#### ***Paramètres***

|           |  |
|-----------|--|
| $V_{ref}$ | est la tension de référence dans le SVC.         |
| $I_{svc}$ | est le courant dans le SVC.                      |
| $B_e$     | est la susceptance.                              |
| $V_k$     | est la tension du réseau où est connecté le SVC. |
| $U_{eff}$ | La tension efficace appliquée à l'inductance.    |
| $I_{eff}$ | Courant efficace de la composante fondamentale   |
| $R$       | Résistance de la ligne                           |
| $X$       | Réactance de la ligne                            |
| $C$       | La capacité du circuit continu commun DC         |

# *Introduction Générale*

L'industrialisation et la croissance de la population sont les premiers facteurs pour lesquels la consommation de l'énergie électrique augmente régulièrement. Ainsi, pour avoir un équilibre entre la production et la consommation, il est à première vue nécessaire d'augmenter le nombre de centrales électriques, de lignes, de transformateurs... etc., ce qui implique une augmentation de coût et une dégradation du milieu naturel. En conséquence, il est aujourd'hui important d'avoir des réseaux maillés et de travailler proche des limites de stabilité afin de satisfaire ces nouvelles exigences.

Les réseaux maillés, soumis à des boucles de puissance indésirables entre zones interconnectées, subissent des surcharges de lignes, des problèmes de stabilité et de toute manière un accroissement des pertes. Les moyens classiques de contrôle des réseaux (transformateur à prises réglables en charge, transformateurs déphaseurs, compensateurs série ou parallèle commutés par disjoncteurs, modification des consignes de production, changement de topologie du réseau et action sur l'excitation des générateurs) pourraient dans l'avenir s'avérer trop lents et insuffisants pour répondre efficacement aux perturbations du réseau, compte tenu notamment des nouvelles contraintes.

Il faudra vraisemblablement, dans l'avenir, compléter leur action en mettant en œuvre des dispositifs électroniques de puissance à grande vitesse de réponse, récemment développés et connus sous l'appellation FACTS (Flexible Alternative Current Transmission System) pour le contrôle des réseaux.

Les systèmes FACTS (Flexible Alternative Current Transmission System) sont des systèmes de contrôle rapide des réseaux utilisant les ressources offertes par l'électronique de puissance et la microélectronique de commande ont été récemment étudiés et réalisés, et sont actuellement pour certains en application normale[2].

Le développement récent des dispositifs FACTS ouvre de nouvelles perspectives pour une exploitation plus efficace des réseaux par action continue et rapide sur les différents paramètres du réseau (déphasage, tension, impédance). Ainsi, les transits de puissance seront mieux contrôlés et les tensions mieux tenues, ce qui permettra

d'augmenter les marges de stabilité ou de tendre vers les limites thermiques des lignes.

Dans ce projet, on va étudier la modélisation et l'intégration efficace des dispositifs de compensation dynamique (FACTS) pour l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique.

\* Le premier chapitre : Nous avons donné dans ce chapitre généralité sur la compensation classique, les moyens de ce compensation et quelques définitions.

\* Le deuxième chapitre : Vise à introduire la nouvelle technologie basée sur l'électronique de puissance.

\* Le troisième chapitre : Modélisation des dispositifs FACTS(SVC).

\* Le quatrième chapitre : On a exposé en détails les résultats de simulation des dispositifs FACTS (SVC - UPFC) sous l'environnement MATLAB.

# Chapitre I

## *Généralité sur la compensation de l'énergie réactive*

---

### **I.1 Introduction :**

La compensation de l'énergie réactive est un élément important pour réduire le facture d'énergie et améliorer la qualité du réseau électrique, dans ce chapitre nous avons présenté une étude générale sur la compensation de l'énergie réactive.

La compensation d'énergie réactive peut se faire :

- par condensateurs fixes (si la puissance des condensateurs est inférieure à 15% de la puissance du transformateur)
- par batteries de condensateurs à régulation automatique (si la puissance des condensateurs est supérieure à 15% de la puissance du transformateur), qui permettent l'adaptation immédiate de la compensation aux variations de la charge

La compensation peut être:

- globale, en tête d'installation
- partielle, par secteur, au niveau du tableau de distribution
- locale, aux bornes de chaque récepteur inductif

La compensation idéale est celle qui permet de produire l'énergie réactive à l'endroit même où elle est consommée et en quantité ajustée à la demande (compensation locale).

#### **I.1.1 Historique :**

En 1882, EDISON a réalisé la première distribution d'électricité en courant continu sous une tension de 110 V pour l'éclairage et si la première transmission à distance a été réalisée en 1882 entre Miesbach et Munich (57 Km, 2000 V), il est vite apparu que la solution pour un transport à distance devrait passer par une tension plus élevée pour diminuer le volume de cuivre (Depez en 1981) et donc utiliser le courant alternatif et le transformateur dont le principe était breveté par Gaulard et Gibbs en 1881. Les générateurs triphasés sont de conception plus simple que les machines à courant continu et la coupure de courant plus facile. En 1891, une liaison en courant alternatif sous 15 KV reliait une centrale sur le Neckar à Lauffan à Francfort (sur une distance de 176 Km). Vers 1920, la fréquence de 50

Hz est normalisée en Europe et la tension passe à 132 KV grâce notamment à l'invention des isolateurs suspendus. Les raisons de ce transport à distance proviennent, au début, de la distance entre les centrales hydrauliques et les villes. Lorsque des centrales thermiques sont développées, il est vite apparu qu'une complémentarité existait entre ces divers modes de production, d'où une meilleure utilisation des ressources par une interconnexion tant au sein d'un pays qu'entre pays voisins. Les liaisons internationales vont alors rapidement se développer : en 1922 une liaison à 150 KV entre la France et la Suisse, en 1929 une liaison entre l'Autriche et l'Allemagne en 225 KV, en 1935 tout l'est de la France est interconnecté avec la Belgique, la Suisse et l'Allemagne, interconnexion sous 380 KV de l'Europe occidentale en 1985, extension vers l'Europe de l'est (Pologne, Hongrie, ...etc) et le grand Maghreb dans les années 1990 [1,2].

### **I.1.2 Architecture des réseaux électriques :**

Le réseau à très haute tension THT (400 KV, 225KV) d'interconnexion internationale forme un ensemble maillé sur lequel sont raccordées les grandes centrales (centrales nucléaires de 1000 MW, par exemple). Il est complété par le réseau de répartition (60 à 150 KV) souvent exploité en poches reliées au niveau supérieur de tension et sur lequel se raccordent des centrales électriques de moindres puissances, ainsi que les grands utilisateurs industriels. On trouve en suite un réseau de distribution (de 20 KV à 400 V) desservant la clientèle (petites et moyennes entreprises, commerces, secteur résidentiel). Ce réseau de distribution est généralement de structure radiale, éventuellement bouclé dans des zones urbaines pour assurer la continuité de service, voire bouclé même en basse tension dans certaines grandes villes. Le coût d'un réseau bouclé est plus élevé par la complexité du contrôle et de la protection, mais ce type de réseau se caractérise par une meilleure continuité de service.

L'alimentation d'une grande agglomération se fait en général par une boucle à 380 ou 225 KV, alimentée par le réseau d'interconnexion et sur laquelle sont raccordés des postes abaisseurs vers le réseau de répartition, souvent en câble pour la pénétration urbaine. Sur ce réseau de répartition sont branchés des postes abaisseurs vers le réseau de distribution (15 à 20 KV), bouclé et enfin le réseau basse tension de structure radiale alimentant les consommateurs (en triphasé ou en monophasé) [3].

### **I.2 Problématique du fonctionnement des réseaux :**

Pour des raisons économiques (effet de taille...) ou techniques (localisation des réserves hydrauliques et des sources froides...), les unités de production sont souvent géographiquement très concentrées. Par contre, la consommation est beaucoup plus

dispersée.

Les réseaux de transport et d'interconnexion à très haute tension (THT) assurent la liaison entre les centres de production et les grandes zones de consommation. Ils permettent d'acheminer, là où elle est consommée, l'énergie la moins chère possible à un instant donné.

Par ailleurs, le maillage du réseau contribue à la sécurité d'alimentation et permet de faire face, dans des conditions économiques satisfaisantes, aux aléas locaux ou conjoncturels qui peuvent affecter l'exploitation (indisponibilité d'ouvrage, aléas de consommation, incidents...). Les réseaux THT contribuent donc de façon déterminante au maintien de l'équilibre entre la demande et l'offre, ainsi qu'à la sécurité d'alimentation et à l'économie de l'exploitation [4].

Par ailleurs, la qualité du service est également un souci majeur de l'exploitant. Sur le plan pratique, cette qualité nécessite :

- de maintenir les caractéristiques du produit (tension, fréquence) dans les limites très précises du cahier des charges.
- de limiter, autant que faire se peut, les interruptions de service.

Les réseaux THT jouent aussi un rôle très important pour respecter ces contraintes car :

- les références de tension qui vont conditionner l'ensemble du plan de tension dans le réseau sont fixées, pour l'essentiel, par les groupes de production raccordés aux réseaux THT.
- la fréquence est, de même, fixée par les groupes de production qui doivent rester synchrones en régime permanent.
- la sécurité d'alimentation des grands centres de consommation dépend très fortement de la structure des réseaux de transport.

Sachant que, compte tenu de l'inertie mécanique relativement faible de certains composants des systèmes électriques (groupes de production et moteurs) et de la grande vitesse de propagation des phénomènes, les réseaux THT créent un couplage dynamique très fort entre les moyens de production, d'une part, et les charges (consommation), d'autre part.

Au-delà de l'examen du problème de la répartition économique et en sécurité de la puissance, l'étude du fonctionnement de ces vastes systèmes interconnectés et fortement couplés est donc absolument nécessaire. Elle portera sur leur réglage et leur stabilité.

Enfin, il va de soi qu'il est nécessaire de protéger les systèmes électriques qui peuvent être affectés par de nombreux types d'incidents. Il convient de distinguer la protection des ouvrages du réseau proprement dit (lignes...) et celle du système production-transport. La protection du système production-transport est essentielle, car certains incidents (pertes de ligne en cascade, pertes brutales de moyens de production importants...) peuvent induire de conséquences catastrophiques (effondrement du système électrique) [4].

### I.3 L'acheminement de la puissance :

Pour résoudre le problème de l'acheminement de la puissance disponible sur les lieux de consommation, dans le cas d'un réseau maillé, il convient de déterminer le niveau de production de chaque groupe et les transits de puissance dans le réseau.

En général, il existe une multitude de plans de production qui permettent de faire face à la demande. Toutefois, certains de ces plans ne sont pas adaptés pour acheminer la puissance sur les lieux de consommation en respectant les contraintes technico-économiques d'exploitation (minimiser les coûts de production et le coût des pertes, respecter les limites thermiques des ouvrages, maintenir la tension dans certaines plages en chaque noeud du réseau, être capable de faire face le plus rapidement possible à certains types de défaillance...).

Le problème général de la production et de la répartition optimale et en sécurité de la puissance dans un système production-transport-consommation alternatif maillé est donc fort complexe. Le fonctionnement d'un système électrique est gouverné, à chaque instant, par l'équilibre nécessaire entre les puissances actives et réactives produites et consommées. Lorsque cette condition nécessaire de fonctionnement est respectée, l'état du système est caractérisé, en régime stationnaire, par la fréquence  $f$  (grandeurs globales) et les tensions (grandeurs locales). La fréquence  $f$  est fixée par la vitesse de rotation de toutes les machines qui doivent rester synchrones (en régime permanent).

Contrairement à ce qu'un abus de langage pourrait laisser croire, l'objectif du réglage des réseaux n'est pas de maintenir l'équilibre entre la production et la consommation (les lois de Kirchhoff s'en chargent dans la mesure où  $f$  et  $V$  restent dans certaines plages qui correspondent aux conditions nécessaires de fonctionnement, en particulier de stabilité dite statique). Par contre, l'objectif des réglages est de maintenir la fréquence et la tension dans des limites contractuelles qui sont plus contraignantes que les limites imposées par les conditions nécessaires de fonctionnement [4].

### I.4 Puissance transmissible dans une ligne :

Contrairement à une idée très répandue, ce n'est pas l'échauffement maximal des conducteurs qui, en général, limite la puissance transmissible à travers une ligne [4].

En effet, considérons la figure (1-1) qui représente de manière très simplifiée, un dipôle d'impédance  $Z = R + jX$ , une ligne destinée à alimenter la charge  $Z_1$ . Nous supposons, d'abord, que la résistance  $R$  de la ligne est nulle (elle est généralement très faible vis-à-vis de la réactance  $X$ ) et que la puissance réactive,  $Q_2$  de la charge est nulle (ce qui est vrai en cas d'une bonne compensation de puissance réactive).

Nous nous attacherons d'abord à montrer qu'il est important de réguler la tension aux bornes de la charge.

Si nous désignons par  $\theta$  l'angle entre les tensions  $V_1$  et  $V_2$ , nous avons, en considérant la figure (I.2) simplifiée (avec  $R = 0$ ), le courant  $I$  en phase avec la tension  $V_2$ , d'où :

$$XI = V_1 \sin \theta \quad (\text{I.1})$$

Et la puissance active est :

$$P_1 = P_2 = \frac{V_1 V_2}{X} \sin \theta \quad (\text{I.2})$$

Si aucune précaution n'est prise pour maintenir  $V_2$  constante lorsque la charge varie, on a :

$$V_2 = V_1 \cos \theta \quad (\text{I.3})$$

Soit :

$$P_1 = P_2 = \frac{V_1^2}{2X} \sin 2\theta \quad (\text{I.4})$$

Il apparaît donc que, dans ce cas, on ne peut transporter qu'une puissance active maximale par phase égale à :

$$P_{\max} = \frac{V_1^2}{2X} \quad (\text{I.5})$$

Cette valeur maximale est atteinte pour  $\theta = 45^\circ$ .

Si l'on maintient  $V_2$  constante, ce qui implique que  $Q_2$  n'est plus nulle, mais ne remet pas en cause l'expression (I.1), on a, pour  $V_1 = V_2$  :

$$P_{\max} = \frac{V_1^2}{X} \quad (\text{I.6})$$

Soit le double de la valeur précédente.

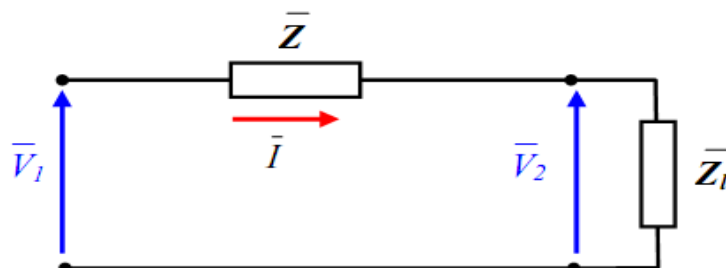


Figure (1-1) : Schéma monophasé équivalent

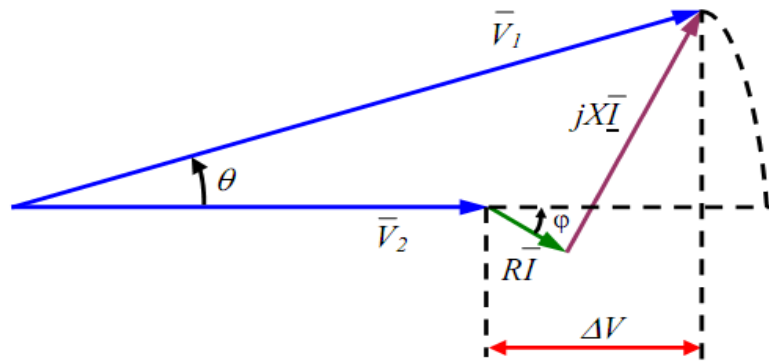


Figure (1-2): Diagramme vectoriel des tensions

Pour améliorer la capacité de transfert des réseaux, on voit donc qu'il est essentiel de disposer du plus grand nombre possible de points à tension fixée.

### I.5 Chute de tension dans une ligne :

Concédons la figure (1-1) qui représente une ligne de transport d'impédance complexe  $Z = R + jX$ , et que la tension n'est tenue qu'à l'extrémité 1 (coté générateur), l'extrémité 2 (coté charge) absorbant une puissance  $S_2 = P_2 + jQ_2$ .

Si le réseau n'est pas trop chargé, le diagramme de tension donné par la figure (1-2) conduit à assimiler la chute de tension  $\Delta V$  à :

$$\Delta V \cong V_1 \cos \theta - V_2 \quad (\text{I.7})$$

L'angle de transport  $\theta$  étant petit (réseau peu chargé), si  $\varphi$  désigne le déphasage du courant par rapport à la tension à l'extrémité réceptrice 2, on peut écrire, pour un réseau monophasé :

$$\Delta V \approx RI \cos \varphi + XI \sin \varphi \quad (\text{I.8})$$

$$\Delta V \approx RI \frac{V_2}{V_2} \cos \varphi + XI \frac{V_2}{V_2} \sin \varphi \quad (\text{I.9})$$

$$\Delta V \approx \frac{RP_2 + XQ_2}{V_2} \quad (\text{I.10})$$

On montre de même que

$$\sin \theta \approx \frac{XP_2 + RQ_2}{V_1 V_2} \quad (\text{I.11})$$

L'hypothèse du réseau peu chargé permet d'écrire :

$$V_1 \approx V_2 = V \quad (\text{I.12})$$

Soit, pour un réseau triphasé et en notant  $U$  la tension composée correspondant à P et Q les puissances de transit triphasé :

$$\frac{\Delta U}{U} \approx \frac{RP + XQ}{U^2} \quad (\text{I.13})$$

$$\sin \theta \approx \frac{XP + RQ}{U^2} \quad (\text{I.14})$$

On peut également noter que si,  $R \ll X$  ( $R \approx 0$ ) :

$$\Delta U \approx \frac{XQ}{U} \quad (\text{I.15})$$

$$\sin \theta \approx \frac{XP}{U^2} \quad (\text{I.16})$$

Dans ces conditions, les relations (I.15) et (I.16) illustrent le fait que :

- La chute de tension dépend principalement de la puissance réactive consommée par l'extrémité réceptrice ;
- L'angle de transport  $\theta$  dépend principalement de la puissance active transmise.

### **I.6 Moyens classiques de compensation réactive et de réglage de tension :**

En général, les moyens de compensation et de réglage à mettre en œuvre doivent faire face aux fluctuations périodiques liées à l'évolution journalière des transits de puissance mais aussi aux variations brusques liées aux incidents sur le réseau.

Les dispositifs de compensation de l'énergie réactive et de réglage de la tension sont:

- des condensateurs et inductances fixes ;
- des compensateurs synchrones ;
- des transformateurs à prises variables (en charge ou à vide) ;
- les groupes générateurs.

L'ajustement rapide et fin de l'énergie réactive en HT et le réglage de tension sont assurés par les groupes générateurs (boucles de réglage de tension) et les condensateurs des postes de transformation vers le réseau de répartition [2] [3].

En distribution, la compensation du réactif se fait au niveau des consommateurs par la tarification qui pénalise un mauvais  $\cos\phi$ , l'ajustement de la tension se réalisant par les prises en charge des transformateurs au niveau des postes [2].

### I.6.1 Condensateurs et inductances fixes :

Les bancs de condensateurs installés en dérivation peuvent atteindre quelques Mvar fractionnables par gradins de 2 à 4 Mvar, voire 10 Mvar. Ils sont utilisés pour améliorer le facteur de puissance au niveau de charges inductives. Parmi leurs inconvénients :

- La puissance réactive produite diminue lorsque la tension diminue ( $Q = \omega CV^2$ ) alors qu'elle devrait augmenter ;
- Surtensions et surintensités à l'enclenchement.

Les batteries de condensateurs sont fractionnées en gradins mis en ou hors tension par disjoncteurs ou actuellement par thyristors (ce qui supprime toute usure du matériel et accroît la vitesse de réponse), commandés par relais varométrique qui mesure l'erreur entre valeur de consigne et puissance fournie.

Des bancs de condensateurs peuvent être insérés en série avec les conducteurs d'une ligne afin de diminuer sa réactance. On diminue aussi la chute de tension entre la source et la charge comme indiquée sur la figure (1-3). On voit que ce type de compensation diminue l'angle de transport  $\theta$  et agit donc aussi sur le transit de puissance active et augmente la limite de puissance transmissible et la stabilité du réseau [2] [3].

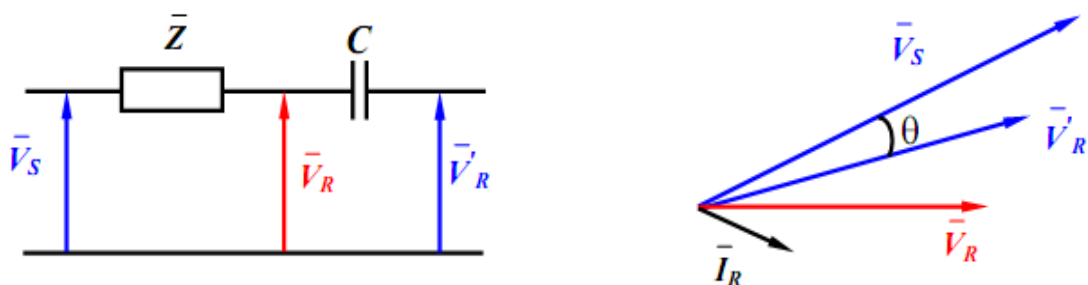


Figure (1-3): Principe de la compensation série

Les inductances sont utilisées pour absorber la puissance réactive produite par des lignes longues à très haute tension à faible charge ou des réseaux de câbles. Elles sont généralement raccordées au tertiaire de transformateurs et leur puissance peut aller de 50 Mvar (via un transformateur à trois enroulements) à 400 Mvar en raccordement direct sur des lignes de très haute tension [2].

### **I.6.2 Groupes de production et compensateurs synchrones :**

Les groupes de production sont les sources de tension du réseau et peuvent produire ou consommer de l'énergie réactive : une machine synchrone surexcitée fournit de l'énergie réactive comme un condensateur. En sous-excitation, elle absorbe du réactif comme une inductance. Vu l'éloignement électrique entre centres de production et de consommation, les groupes ne compensent pas les charges mais peuvent faire face aux besoins en réactif du réseau.

La fourniture de puissance réactive en surexcitation est limitée par le courant rotorique maximum et en absorption par la stabilité de la machine synchrone. Cette limite peut varier avec des régulateurs de tension.

Un compensateur synchrone était une machine synchrone sans charge, spécifiquement conçue pour la production ou l'absorption de puissance réactive en ajustant l'excitation. Les limites sont les mêmes que pour les groupes de centrales. Des valeurs typiques vont de 20 à 60 Mvar en fourniture et de 10 à 30 Mvar en absorption. Ils sont branchés le plus souvent au tertiaire d'un transformateur. Le grand avantage par rapport aux condensateurs ou inductances passives est leur grande flexibilité sous toutes conditions de charge (réglage continu), par contre leur coût est élevé tant en investissement qu'en maintenance [2].

### **I.6.3 Compensateurs statiques :**

L'électronique de puissance a permis, outre des liaisons à courant continu, l'introduction de compensateurs purement statiques, constitués de capacités et d'inductances commandés par des thyristors montés en tête-bêche. On aura ainsi par la mise en parallèle d'une inductance réglable par thyristors (TCR : Thyristor Controlled Reactor) et de batteries de condensateurs commutables également par thyristors, un réglage continu de l'inductance par modification de l'angle d'allumage des thyristors. C'est le principe du compensateur statique (SVC : Static Var Condenser) [2].

**I.6.4 Transformateurs avec prises réglables en charge :**

Un régleur en charge modifie le rapport de transformation à l'intérieur d'une plage déterminée en augmentant ou diminuant le nombre de spires de l'enroulement haute tension. Il faut prendre garde de ne pas interrompre le courant ni mettre des spires en court-circuit lors de la commutation. Cela est réalisé par l'insertion temporaire d'une inductance ou d'une résistance. La plage de réglage est typiquement de  $\pm 15\%$  avec une vingtaine de prises (échelon entre 1 et 2 %). Par rapport au réglage nominal, un changement de prises correspond à une injection d'une tension additionnelle au point d'insertion du transformateur, ce qui implique une modification de la répartition de la puissance réactive dans la zone concernée [2].

**I.7 Conclusion :**

Nous avons présenté dans ce chapitre un aperçu sur le fonctionnement des réseaux d'énergie électrique en commençant par l'historique des réseaux, leurs architectures et l'acheminement de puissance à travers ces réseaux. On a vu brièvement les facteurs qui limitent la puissance transmissible dans les lignes de transport et la chute de tension provoquée par le transit de puissance réactive. Enfin on a présenté les différents moyens classiques de compensation d'énergie réactive.

---

*Chapitre II*

# *FACTS*

---

## **II.1 Introduction :**

L'augmentation de la demande en énergie électrique a eu pour résultat, un rapide développement des réseaux électriques. Il existe différents domaines d'analyse des réseaux électriques, tels que la stabilité, le contrôle de la tension et de l'écoulement de puissance. La compensation de l'énergie réactive des lignes de transmissions modifie les caractéristiques électriques de manière à répondre à d'éventuelles demandes en charge. On trouve deux sortes de compensation : la compensation shunt et série. La compensation shunt est utilisée afin de contrôler la tension et la puissance transmise le long des lignes. La compensation série quand à elle, est utilisée dans le but de contrôler la transmise par la réduction ou l'augmentation de l'impédance de la ligne, cette compensation est employée dans le cas de longues lignes de transmissions.

Les méthodes traditionnelles de compensation réactive en régime permanent utilisent des capacités fixes ou des compensateurs synchrones. Ces méthodes de compensation ne sont pas très efficaces lors de l'apparition de sévère perturbation, ce qui affecte négativement le réseau.

Dans ce chapitre nous avons présenté comme solution les systèmes FACTS (Flexible Alternating Current Transmission Systems) qui met en relief les nouvelles possibilités de l'électronique de puissance dans la commande, et le contrôle du transport d'énergie électrique en courant alternatif a fin de mieux maîtriser le transit de puissance dans les lignes électriques.

## **II.2 Utilisation des FACTS :**

Les FACTS permettent de contrôler dynamiquement l'écoulement de puissance en utilisant des divers composants de l'électronique de puissance [5].

### **II.2.1 Types de FACTS :**

Les FACTS peuvent se diviser en six familles distinctes :

- SVC : Compensateur statique d'énergie réactive.
- TCSC : Capacité en série commandée par thyristor.

- TCPAR : Régulateur de déphasage par thyristor.
- STATCOM : Compensateur statique.
- SSSC : Compensateur série statique synchrone.
- UPFC : Contrôleur de transit de puissance unifié.

### II.2.2 Compensation shunt :

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

Ce principe de réglage, outre les nuisances sonores, nécessite un coup d'investissement initial et d'entretien non négligeables. Par ailleurs, l'inertie de la machine implique des temps de réponse conséquents.

Des inductances et des condensateurs commandés par des interrupteurs mécaniques ont été largement utilisés et le demeurent encore. Ce sont tout simplement des inductances ou des batteries condensateurs qui sont connectées au réseau en fonction de l'énergie réactive que l'on veut absorber ou fournir. Cette technique ne permet pas un réglage fin, et n'a pas un temps de réponse suffisamment rapide pour compenser des fortes variations d'énergie, de plus, les parties mécaniques demandent une importante.

#### II.2.2.1 Compensateur statique d'énergie réactive (SVC) :

La figure (2-1) est le diagramme unifilaire de la connexion shunt du SVC (Static Var Compensator). Le SVC est composé des thyristors commandés par des capacités (TSCs) et d'autres par des réactances (TCRs). La génération de la puissance réactive varie constamment entre des valeurs capacitives et inductives mises en jeu dans le circuit. Le SVC est utilisé afin de réguler la tension des systèmes de transport, à la valeur de référence. L'installation d'un SVC à un ou plusieurs points appropriés dans le réseau peut augmenter la capacité de transfert et réduire les pertes tout en maintenant le profile de la tension pendant le régime perturbé [6].

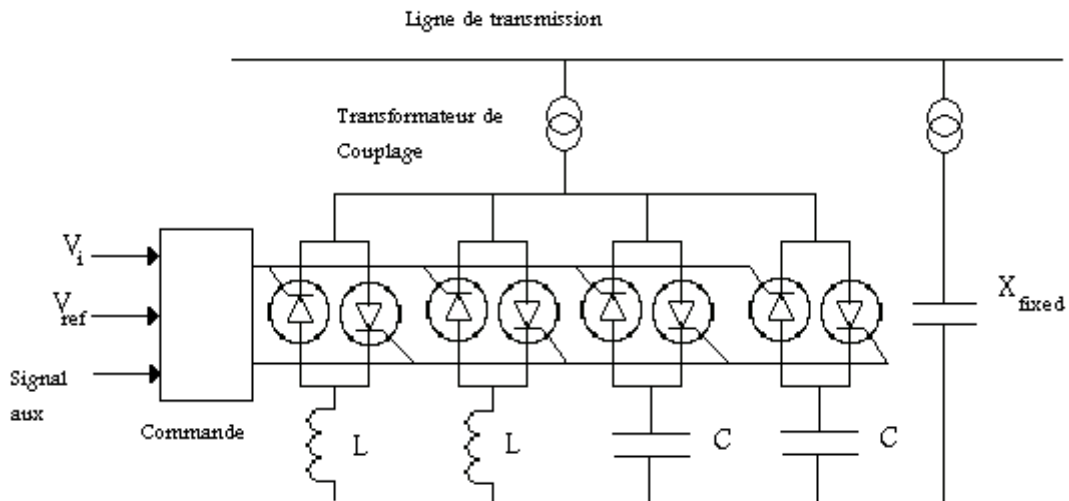


Figure (2-1):Schéma type du SVC en connexion shunt.

**Exemple de SVC :**

- 160 SVC à 1975
- Puissance 32 000 MVA

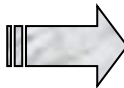


Figure (2-2):SVC installée dans les réseaux

**II.2.2.2 Compensateur statique (STATCOM) :**

Le dispositif STATCOM (Compensateur statique) a une caractéristique semblable au compensateur synchrone, mais comme dispositif électronique, il n'a aucune inertie et est supérieur au compensateur synchrone : une meilleure dynamique, une charge de placement inférieure et des coûts de fonctionnement et d'entretien inférieurs. Le modèle fonctionnel du SVS est décrit par la figure (2-3).

L'amplitude  $V$  et le déphasage  $\varphi$ , sont définis respectivement par la valeur de référence de  $Q_{ref}$  et  $P_{ref}$ . Les valeurs de  $V$  et  $\varphi$  déterminent les puissances réactive et active échangées entre le SVS et le système AC.

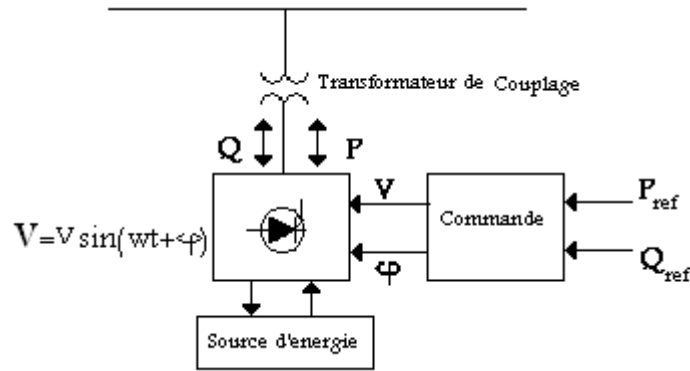


Figure (2-3):Schéma représentatif du SVS (solid-stat switching-converter based)

Le SATABCOM est utilisé aussi comme un compensateur statique d'énergie réactive, SVC, pour la commande de la tension de transmission par la compensation shunt réactive.

Le STATCOM fournit une puissance réactive capacitive maximale, pour n'importe quelle tension même si elle est inférieure à zéro. Cette possibilité donnée par le STATCOM, prouve qu'il est plus efficace que le SVC, dans l'amélioration de la stabilité transitoire.

L'amplitude variable de la tension triphasée  $V$  contrôle l'échange de puissance réactive entre le STATCOM et le système AC. Dans ce cas, l'amplitude de la tension augmente au-dessus de celle de la tension du système AC. Le STATCOM agit comme une capacité et génère une puissance réactive. Lorsque l'amplitude de la tension produite décroît au-dessous de celle du système AC, le STATCOM agit comme une inductance et absorbe la puissance réactive.

Le STATCOM génère ou absorbe la puissance réactive (Figure (2-4)). Ce qui lui permet d'amortir les oscillations du réseau [5,7].

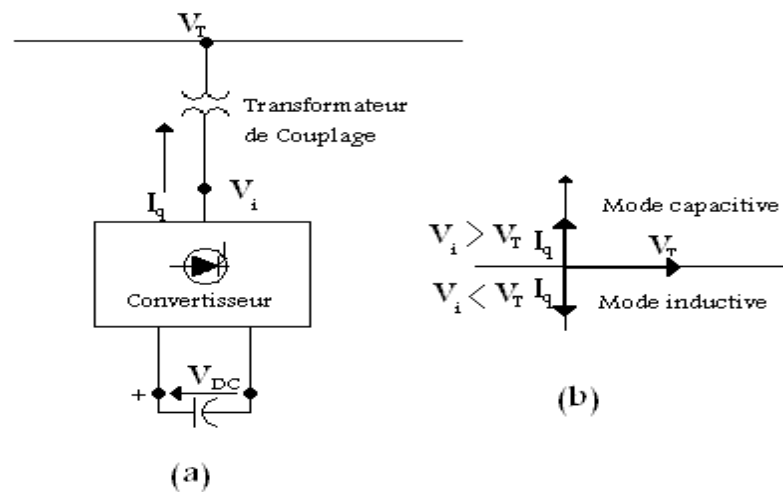


Figure (2-4):Schéma: (a) STATCOM. (b) caractéristiques tension / courant du STATCOM

**Exemple de STATCOM :**

- 19 VSCs à 1997
- Puissance 1500 MVA

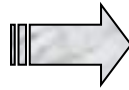


Figure (2-5): STATCOM installée dans les réseaux électriques

**II.2.3 Les systèmes de compensation série :**

Le principe de ces compensateurs est de modifier l'impédance de la ligne de transport en insérant des éléments en série avec la ligne. Pour modifier l'impédance d'une ligne essentiellement inductrice. On insère d'éléments capacitifs. On va bien sur chercher à contrôler l'impédance de la ligne, en utilisant des condensateurs séries réglables.

**II.2.3.1 Capacités série commandées par thyristor (TCSC) :**

Les condensateurs en série commandés par thyristor (TCSC) fournissent une technologie prouvée qui adresse des problèmes dynamiques spécifiques dans des systèmes de transmission. Le gradin du TCSC est composé de capacités fixes en parallèle avec des thyristors, en série avec une bobine. Chaque gradin est en parallèle avec une varistance (MOV) en métal oxyde, qui protège le gradin contre les surtensions. Séparés et disposés en série, les gradins forment ainsi un système complet de compensation. La capacité principale de valeur fixe est disposée en séries avec les gradins.

La figure II.6 décrit le schéma de compensation série d'une ligne de transmission, dans lequel est inclus un TCSC à plusieurs modules. Il est possible de varier l'impédance totale de compensateur en modifiant l'angle d'amorçage du thyristor. La compensation série de la ligne de transmission, commandé par thyristor permet d'amortir les fluctuations de puissance car le TCSC est essentiellement utilisé afin de contrôler l'écoulement de puissance [8].

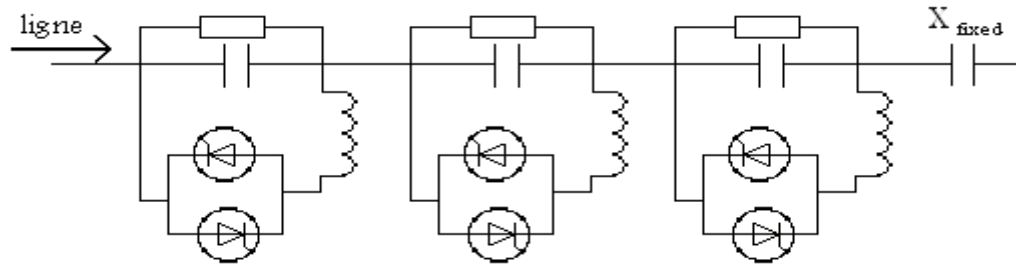


Figure (2-6):Schéma d'un TCSC multi gradins pour une compensation série.

### Exemple de TCSC :

Location Rating Voltage

- Maraba 348 Mvar SC 500 kV
- Miracena 161 Mvar SC 500 kV
- Colinas 2x161 Mvar SC 500 kV
- Imperatriz 161 Mvar SC 500 kV
- 107 Mvar TCSC 500 kV



### II.2.3.2 Compensateur Série Statique Synchronique (SSSC) :

Le SSSC est utilisé pour injecter une tension en série dans la ligne de transport. La figure (2.7) représente un dispositif dans lequel des tensions en série, sont injectée dans la ligne de transport afin d'accroître ou de décroître la tension à travers l'impédance inductive de la ligne et par la suite augmenter le courant fondamental de la ligne et la puissance transmise. Par conséquent, si le déphasage de la tension injecté  $\Delta V$  est choisie à  $90^\circ$  degré en arrière par rapport au déphasage du courant de la ligne, nous obtenons une compensation série équivalente a celle fournie par un condensateur série a la fréquence fondamentale. Par contre, si le déphasage de  $\Delta V$  est de  $90^\circ$  en avance sur le courant de la ligne, la compensation série au même effet que lorsque l'impédance réactive de la ligne augmente.

Contrairement a la compensation série conventionnelle, la tension injectée  $\Delta V$  fournie par le SSSC est indépendante du courant de la ligne. Le SSSC permet de fournir une tension de compensation constante en présence d'un courant de ligne variable.

L'amplitude de la tension injectée  $\Delta V$  peut être commandée indépendamment de l'amplitude du courant de la ligne. Le pouvoir que possède le SSSC pour la compensation

de la ligne de transport, dans les deux modes capacitif et inductif, peut être utilisé dans l'amortissement des oscillations du réseau [5,9].

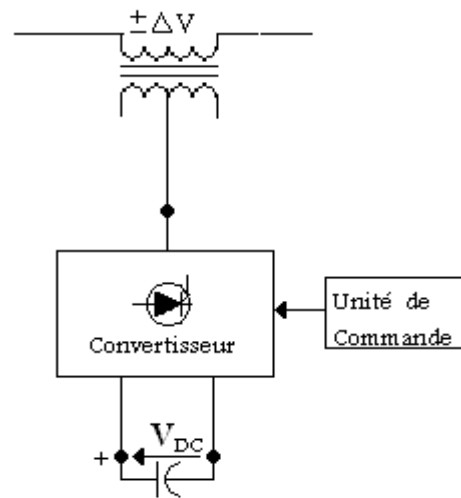


Figure (2-7): Compensation série statique synchrone

### II.2.3.3 Régulateur de déphasage commandé par thyristor (TCPAR) :

Dans les lignes de transmission, les puissances actives  $P$  et réactive  $Q$  est fonctions du déphasage entre les deux tensions de départ et d'arrivée. Placé en série avec la ligne de transmission, le TCPAR met les tensions en quadrature et modifie le déphasage de la tension à travers la ligne et par conséquent, commande l'écoulement de puissance.

Le schéma type TCPAR est montré sur la figure(2-8) qui comporte un transformateur d'excitation relié par shunt, un transformateur d'insertion de série et un arrangement de commutateur de thyristor reliant une combinaison choisie de tension. La capacité du TCPAR à maintenir l'angle interne pendant les premières oscillations peut également être utilisée efficacement pour augmenter la marge de stabilité du système [5].

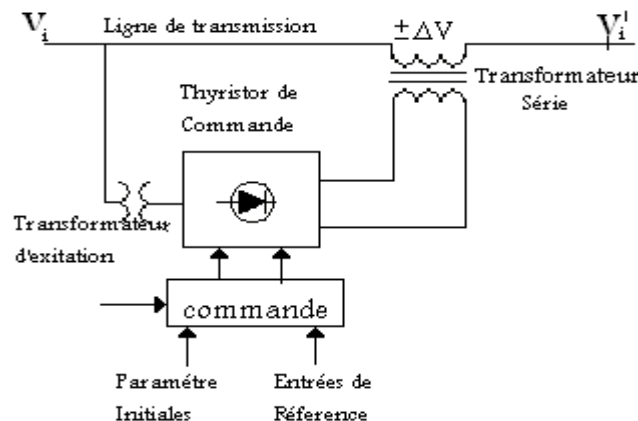


Figure (2-8): Schéma du contrôle de l'angle de transport par TCPAR

## II.2.4. Compensateurs hybrides série – parallèle :

### II.2.4.1 Contrôleur de transit de puissance unifié (UPFC) :

Si on remplace la capacité  $C$  dans la figure I.6 par un accumulateur d'énergie (DC) ayant une capacité infinie, le déphasage de la tension série  $\Delta V$  peut être choisi indépendamment du courant de la ligne entre  $0$  et  $2\pi$ . Ceci est possible lorsque la source de tension synchrone, SVC, génère et absorbe la puissance active et réactive. Dans un cas idéal, la puissance réactive est généralement produite ou absorbée, mais en pratique la puissance active est générée et absorbée par l'accumulateur d'énergie (DC). Si la source DC est disponible, elle peut être considérée comme le système de puissance AC.

L'implantation pratique d'un tel dispositif, dans lequel la source d'énergie DC est alimentée par le système de puissance AC est décrite dans la figure (2-9). Le convertisseur à connexion shunt fournit la puissance active que l'onduleur à connexion série échange avec la ligne. Cette figure montre que les deux convertisseurs AC-DC peuvent fournir la compensation nécessaire tout en assurant un échange de puissance active et réactive à travers la liaison capacitive DC.

L'un du convertisseur est placé en série et l'autre en parallèle avec la ligne transmission.

Le convertisseur (2) est utilisé pour injecter une tension série  $\Delta V$  à la tension terminale du réseau AC, avec une amplitude et un déphasage variable. Cette tension injectée, agit comme une source de tension AC dans laquelle le courant qui circule est celui de la ligne. La génération de l'énergie active demandée par le convertisseur (2) est assurée par la connexion en shunt du convertisseur (1) avec le système de puissance AC.

La génération de la puissance réactive dans le convertisseur shunt est indépendante de la puissance active échangée avec la source terminale DC. Par conséquent, le convertisseur shunt peut aussi accomplir la fonction d'un STATCOM indépendant. Grâce à ce dispositif, il est possible de fournir une tension série  $\Delta V$  avec une amplitude et un déphasage  $\varphi$  appropriés.

L'UPFC peut réaliser une multitude de fonction qui permet le contrôle de l'écoulement de puissance. Les différentes fonctions du contrôle de l'écoulement de puissance de l'UPFC, sont les suivantes:

- Commande de la tension d'arrivée et réglage de la tension de départ.
- Commande de la compensation série de la ligne.
- Contrôle par réglage de déphasage.

- Combinaison de toutes les commandes de la tension terminale, de la compensation série de la ligne ainsi que le réglage du déphasage.

L'UPFC est extrêmement puissant grâce à son pouvoir d'agir sur différents paramètres, ce qui permet d'avoir une commande adéquate de l'écoulement de puissance [5,10].

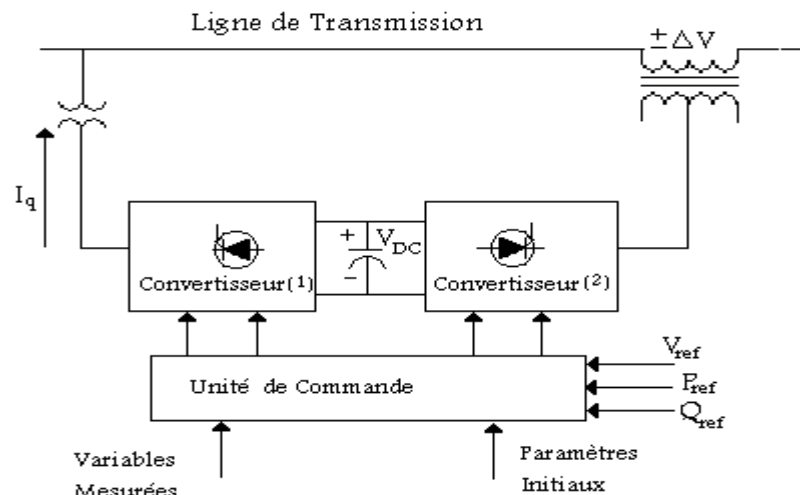


Figure (2-9): Contrôleur de transit puissance unifié

### II.3 Application des FACTS :

L'idée principale des FACTS peut être expliquée par l'équation de base de la puissance transmise à travers une ligne de transport à courant alternatif.

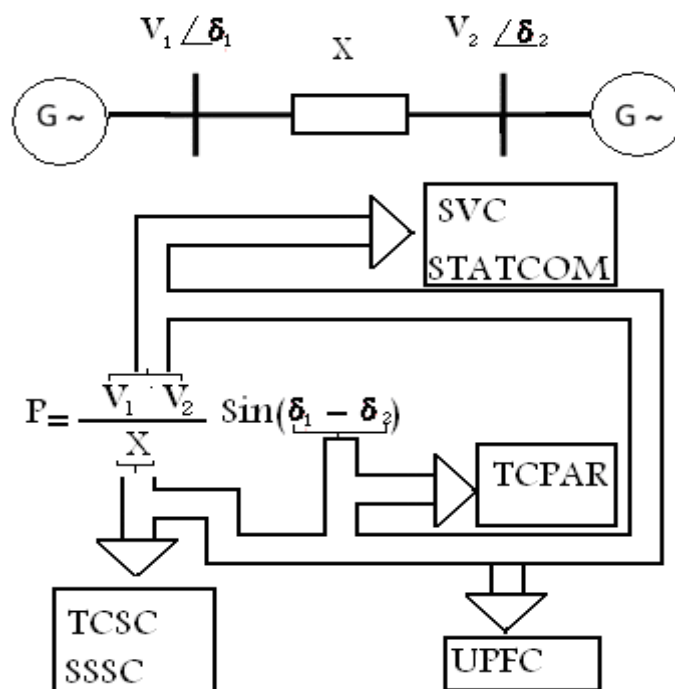


Figure (2-10): Diagramme schématique des applications des FACTS dans les réseaux.

La figure (2-10) représente la puissance transmise entre deux noeuds du système. Elle dépend des tensions aux deux extrémités de l'interconnexion, de l'impédance de la ligne et de la différence d'angle de phase entre les deux systèmes. Les différents dispositifs de FACTS peuvent activement influencer un ou plusieurs de ces paramètres pour la commande du flux de puissance et pour l'amélioration de la stabilité de tension aux noeuds de l'interconnexion.

Selon la configuration du système, les tâches des FACTS peuvent être récapitulées comme suit:

- Systèmes maillés: Commande du transit de puissance.
- Systèmes radiaux et lignes parallèles: commande de l'impédance.
- Systèmes faiblement connectés: commande de la tension.

Le tableau(2-1) résume d'une manière simple l'impact de l'utilisation de chaque FACTS, à la résolution des différents problèmes qui entravent le bon fonctionnement du réseau électrique.

Tableau (2-1): Application des FACTS a la résolution des problèmes dans le réseau [5]

|                | Contrôle de Charge | Contrôle de Tension | Stabilité Transitoire | Amplitude des Oscillations |
|----------------|--------------------|---------------------|-----------------------|----------------------------|
| SVC<br>STATCOM | ★                  | ★★★                 | ★                     | ★★                         |
| TCSC           | ★★                 | ★                   | ★★★                   | ★★                         |
| SSSC           | ★★★                | ★                   | ★★★                   | ★★                         |
| TCPAR          | ★★★                | ★★                  | ★                     | ★★                         |
| UPFC           | ★★★                | ★★★                 | ★★★                   | ★★★                        |

**Influence:**

Petite → ★.

Moyenne → ★★.

Forte → ★★★.

Les lignes de transport constituent une composante importante du réseau. Elles sont constituées d'impédances série et shunt. L'impédance série peut affecter le maximum de puissance transmise à travers la ligne et l'impédance shunt est à prédominance capacitive.

L'impédance série de la ligne, les tensions de départ et d'arrivée ainsi que le déphasage entre les tensions, déterminent la puissance transitée. Les FACTS sont utilisés afin de changer les paramètres série et shunt ainsi que le déphasage des tensions d'arrivées des lignes de transport dans le but de contrôler l'écoulement de puissance [5].

#### **II.4 Les avantages de la technologie des dispositifs FACTS :**

- Contrôle le transit de la puissance active.
- Augmente la sécurité du système énergétique (augmentation de la limite de la stabilité transitoire, amortissement des oscillations ...)
- Réduit le transit de l'énergie réactive.
- Optimise les puissances générées, donc réduit le coût de production de l'énergie.
- Améliorée l'interconnexion et l'échange énergétique

#### **II.5 CONCLUSION :**

Nous avons présenté dans ce chapitre un aperçu sur les dispositifs FACTS, ses types. Parmi ces derniers, les dispositifs FACTS sont introduits d'une manière simple en précisant pour chacun : sa définition, son schéma représentatif ainsi que ses domaines d'application.

## Chapitre III

# Modélisation des dispositifs

# FACTS

---

**III. Introduction :**

Les dispositifs FACTS sont des moyens de contrôle rapide et flexibles insérés dans un réseau pour satisfaire plusieurs besoins, tels que la réparation correct des puissances actives, la compensation de la puissance réactive et le renforcement de la stabilité du réseau électrique.

Les dispositifs FACTS ils sont capable de réaliser plusieurs fonctions, telles que : augmentation de la capacité de transfert, renforcement de la stabilité et amélioration économique du réseau électrique.

L'implantation d'un dispositif nécessite de nouvelles méthodes d'études et d'analyses des réseaux électriques.

Dans ce chapitre, nous donne des exemples du modèle utilisée au l'implantation de dispositif dans le réseau, et quelques modèles des régulations (SVC, UPFC) qui permettant leurs implantation dans les réseaux électriques afin d'améliorer les indices de qualités de l'énergie électriques.

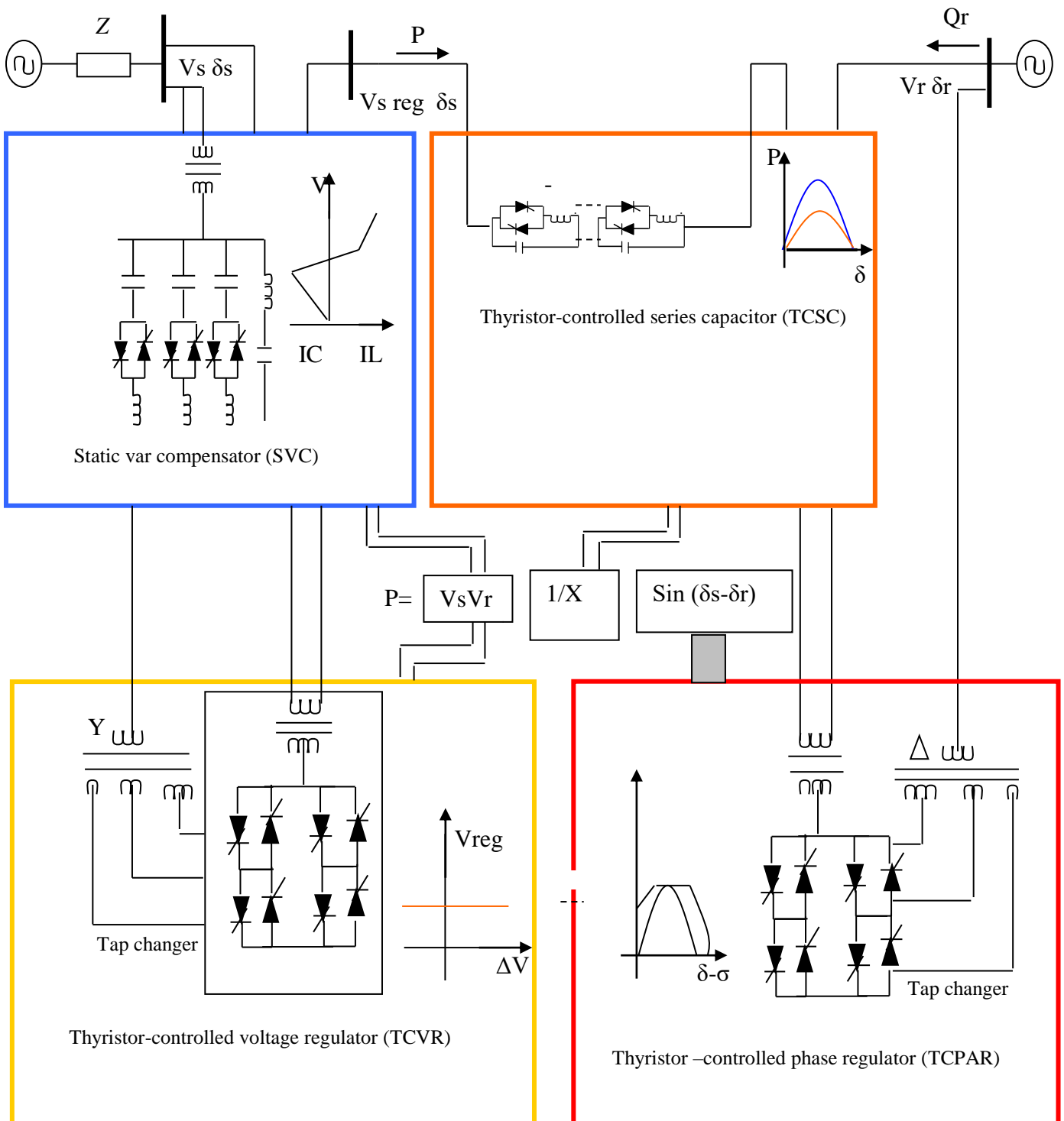


Figure (3-1) : Technologie des dispositifs FACTS categorie 1

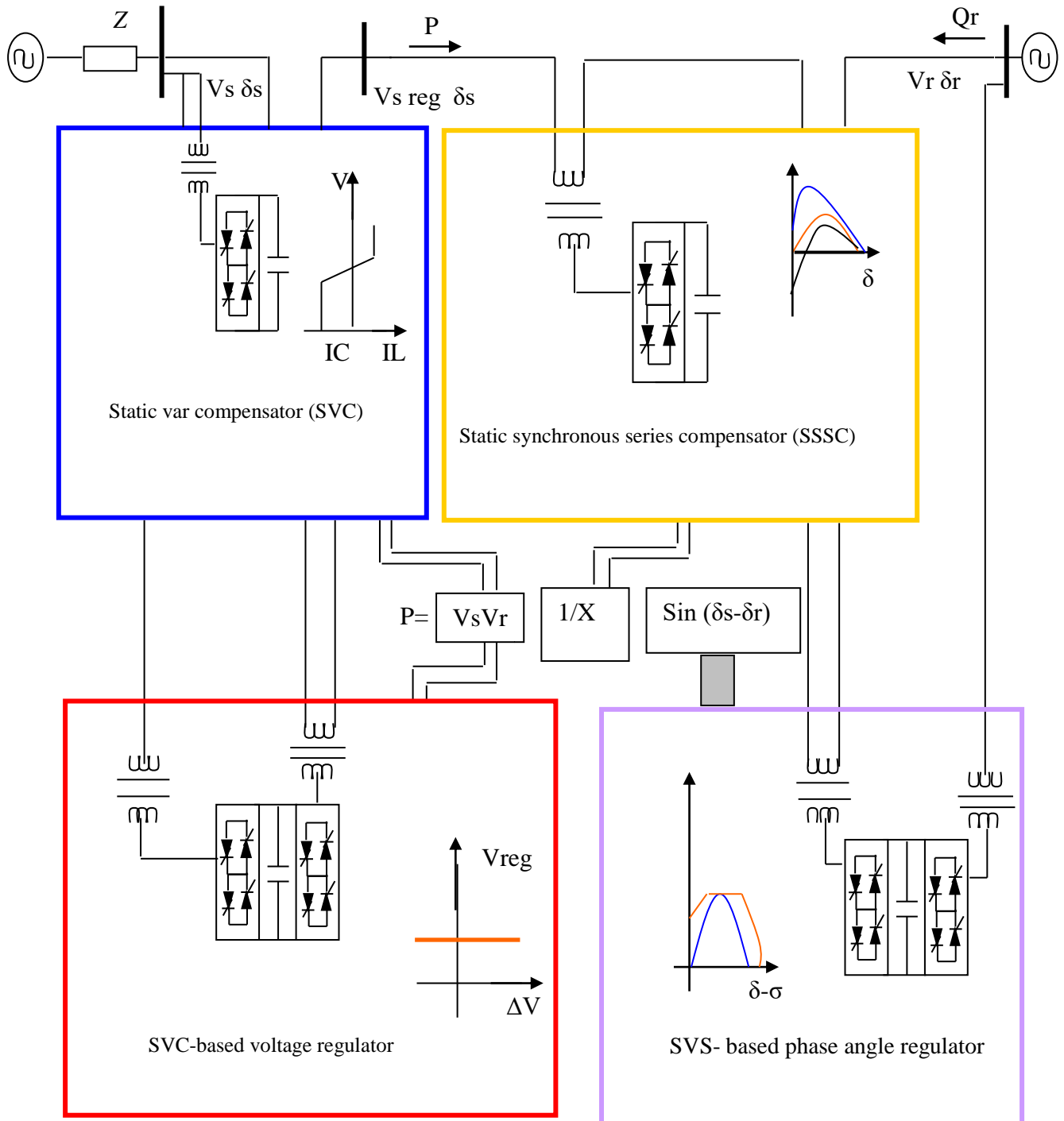


Figure (3-2) : Technologie des dispositifs FACTS categorie 2

### III.1. Caractéristique d'un compensateur statique SVC :

#### III.1.1. Caractéristique en V d'un compensateur statique :

Ajustons l'angle  $\alpha$  des thyristors commandant la branche inductive à  $90^\circ$ , de façon à obtenir la pleine conduction [1]. Le courant est alors à sa valeur maximal, la droite  $L//C$  (figure (3.3)) montre la relation entre la tension  $U$  et le courant  $I_{SVC}$ .

$$I_{SVC} = \frac{U}{X_L // X_C} \text{ (A)} \quad \text{(III.1)}$$

$$Q = \frac{U^2}{X_L} - \frac{U^2}{X_C} \text{ (var)}. \quad \text{(III.2)}$$

Lorsque l'inductance est débranchée alors l'angle des thyristors est  $180^\circ$  et que le condensateur est en service, le courant total par phase sous une tension  $U$  est égale  $\frac{U}{X_C}$ .

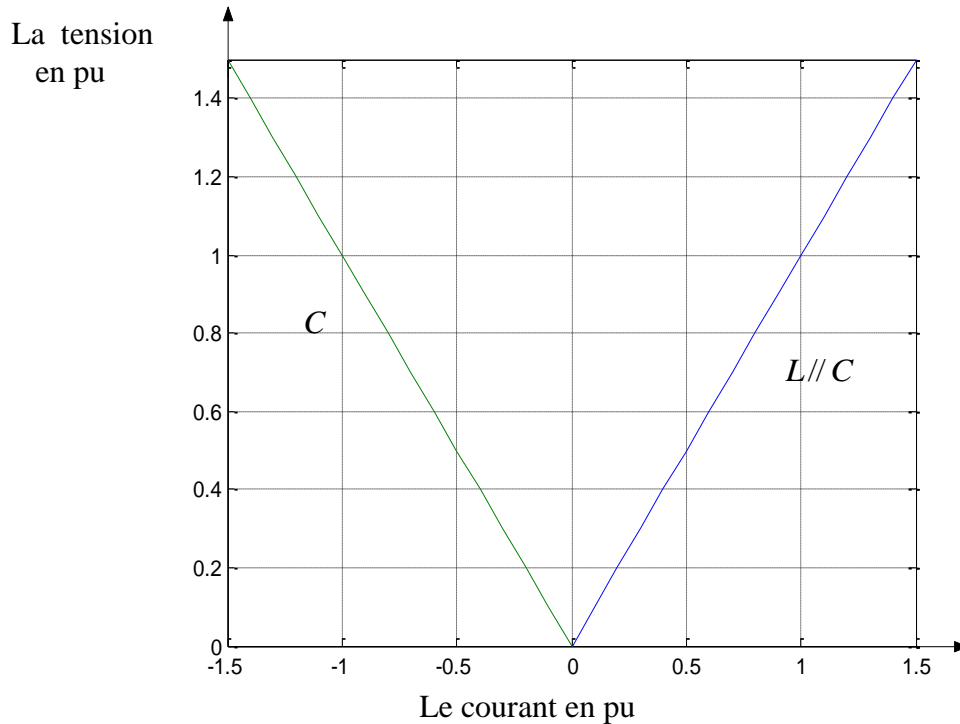
La coutume est d'apposer un signe (-) à ce courant capacitif pour le distinguer du courant inductif. La relation entre le courant et la tension est alors une nouvelle droite, désignée  $C$  (figure (3.3)).

$$I_{SVC} = \frac{U}{X_C} \quad \text{(III.3)}$$

$$Q = -\frac{U^2}{X_C} \quad \text{(III.4)}$$

Les droites  $L//C$  et  $C$  forment ensemble une « courbe en V » qui correspond aux limites inductive et capacitive du compensateur statique.

Cette figure pour  $X_C = 2 * X_L$



Figure(3.3) : la caractéristique en V d'un SVC

D'après cette courbe, on a un courant capacitif lorsque le condensateur est en service et l'inductance est débranchée donc le montage génère une puissance réactive et cette puissance est en fonction du capacité du condensateur et de la tension. Lorsque les deux sont en service le montage génère ou consomme une puissance réactive.

### III.1.2. Caractéristique $Q_{SVC}(I)$ d'un SVC :

Pour fixer le signe de la puissance réactive  $Q$ . Le compensateur est considéré comme un consommateur. La puissance réactive  $Q$  est positive lorsqu'elle est absorbée par le compensateur (comportement inductif). Si par contre le compensateur fournit de la puissance réactive (comportement capacitif), ce dernier est considéré comme étant négative, aussi bien un courant  $I$ . Ces relations sont prises en compte sur la figure (3.4). Par conséquent, suivant les exigences imposées par les consommateurs et les lignes de transmission dans une sous-station, la puissance réactive  $Q$  doit varier entre une certaine valeur inductive  $Q_L$  et une certaine valeur capacitive  $Q_C$ , avec

$$Q_C = \frac{U^2}{X_C} \quad (\text{III.5})$$

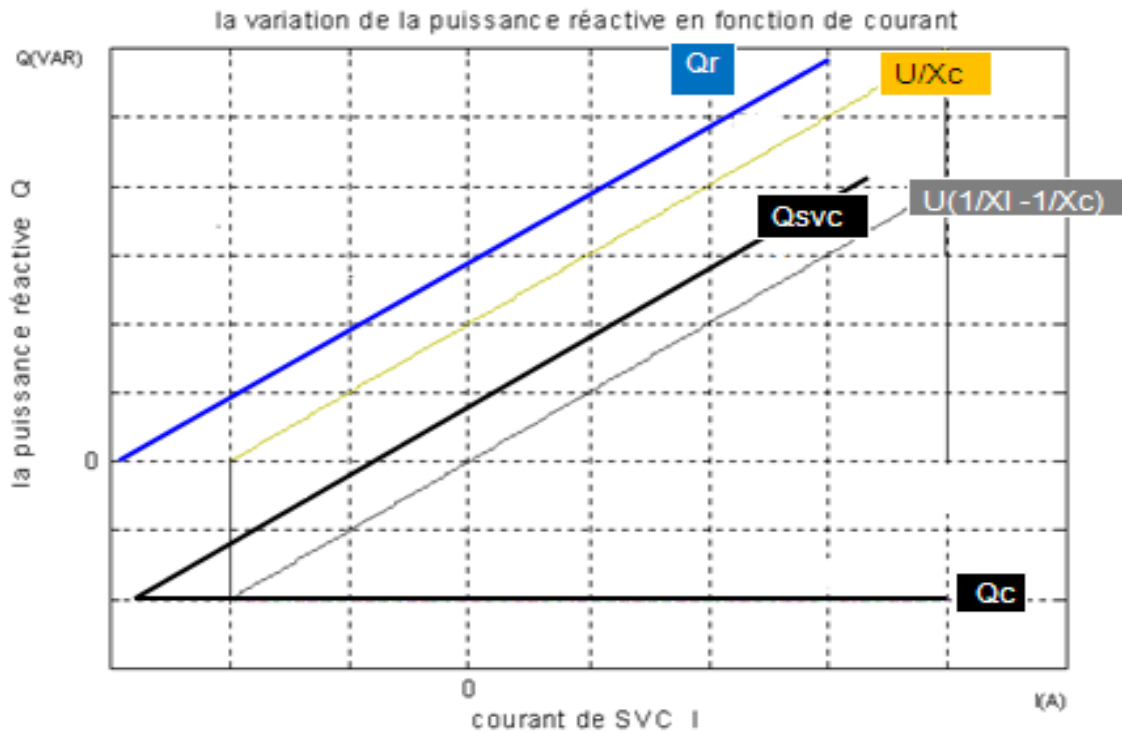


Figure (3.4) : Variation de la puissance réactive en fonction du courant

## III.2. Modélisation des compensateurs statiques (SVC) :

### III.2.1. Introduction :

Les modèles de SVC les plus courants sont des modèles statiques, car conçus pour des logiciels de répartition de charges [2]. Lesquels sont destinés à des études statiques de réseau. Ils sont constitués d'éléments de réseaux : réactances, susceptance, nœuds, etc...

Le modèle statique est constitué d'une susceptance  $B_e$  reliée entre le nœud de charge et le potentiel nul. La susceptance est définie comme la partie imaginaire de l'admittance.

## III.2.2. Modélisation de SVC :

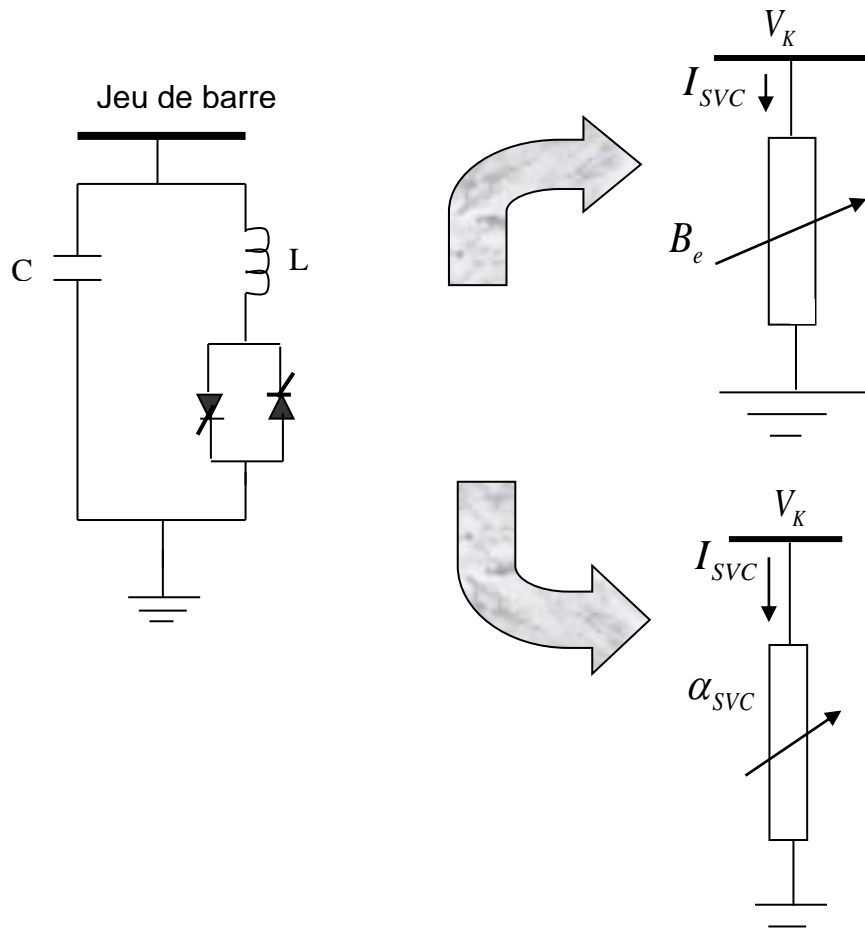


Figure (3-5) : Présentation d'un compensateur SVC

$V_K$  : est la tension du réseau où est connecté le SVC.

$B_e$  : est la susceptance.

$I_{svc}$  : est le courant dans le SVC.

$V_{ref}$  : est la tension de référence dans le SVC.

**III.2.3. Modélisation de TCR :**

On se basant sur le schéma de base de TCR présenté dans le chapitre (II).

On peut faire varier le courant dans l'inductance  $L$  en ajustant l'angle de retard  $\alpha$  entre  $90^\circ$  et  $180^\circ$ , la figure (3.6) montre la forme d'onde du courant pulsé, la valeur du courant instantané est donnée par la forme :

$$i_{tcr} = \frac{1}{L} \int v(t) dt \dots \dots \dots (III.6)$$

Si l'allure de la tension une forme sinusoïdale

$$v(t) = U * \sin(\omega t) \text{ (V)} \dots \dots \dots (III.7)$$

$$i_{tcr} = \frac{U}{\omega L} \left( \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) + \sin\left(\alpha - \frac{\pi}{2}\right) \right) \text{ (A)} \dots \dots \dots (III.8)$$

$i_{tcr}$  : Courant de la réactance qui contrôlé par thyristor

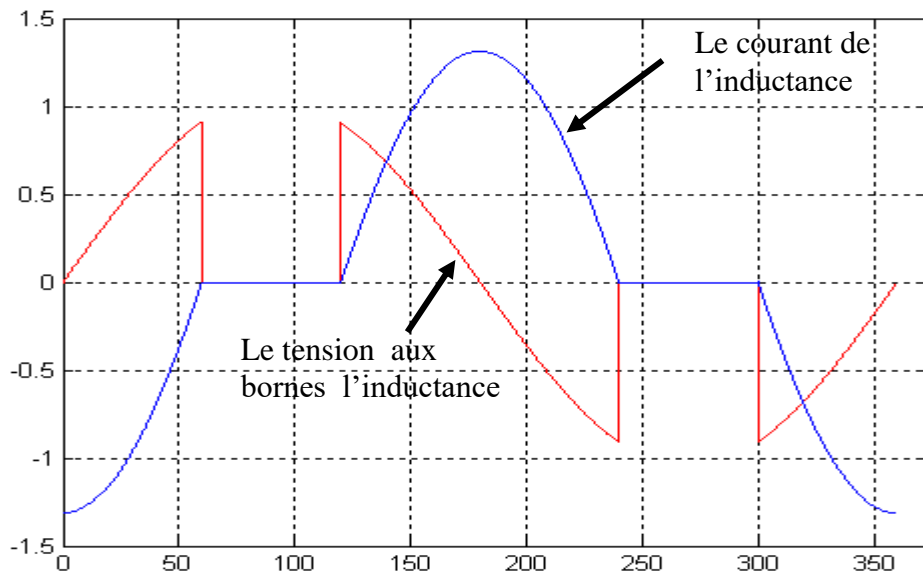


Figure (3.6) : La forme de la tension et du courant de l'inductance

Le courant pulsé comprend une composante fondamentale et des harmoniques. C'est la composante fondamentale du courant pulsé qui est de première importance. Elle est donnée par l'expression

$$I_{eff} = \frac{U_{eff}}{X_L} \left( 2 - \frac{2\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{\pi} \right) \dots \dots \dots (III.9)$$

$I_{eff}$  : Courant efficace de la composante fondamentale.

$U_{eff}$  : La tension efficace appliquée à l'inductance.

On constate que le courant fondamental diminue à mesure que l'angle d'amorçage augmente au-delà de  $90^{\circ}$ . C'est comme si la réactance de l'inductance augmentait avec  $\alpha$ .

La réactance effective  $X_e$  est donnée par l'expression :

$$X_{tr} = \frac{X_L}{2 - \frac{2\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{\pi}} \quad (III.10)$$

Mais on a un montage du SVC composé par une inductance contrôlée par thyristors en parallèle avec une capacité de réactance  $X_C$ , donc la réactance de montage est :

$$X_e = X_C // X_L$$

$$\frac{1}{X_e} = -\frac{1}{X_C} + \frac{2\pi - 2\alpha + \sin(2\alpha)}{\pi X_L} \quad (III.11)$$

### III.2.4.Principe de fonctionnement de TCR :

Considérons le schéma équivalent de réseau électrique présente dans la figure(3-7) [11].

Le compensateur statique (SVC) est alimenté à travers un transformateur abaisseur 735KV/16KV.

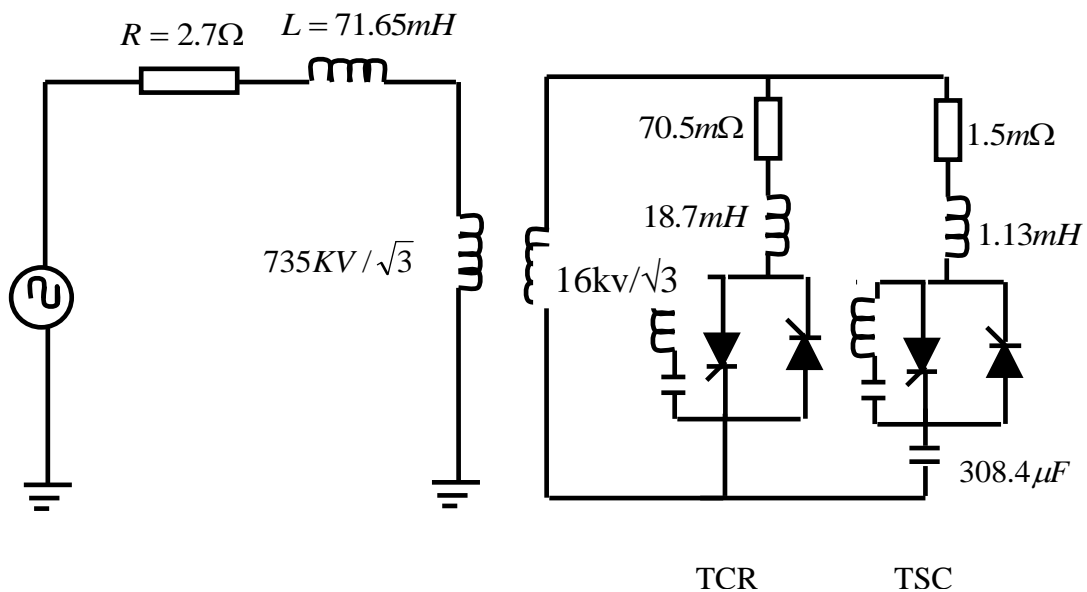


Figure (3-7): Schéma unifilaire d'un TCR

**III.2.5. Modél TCR en simulink:**

L'Objectif de cette partie est la visualisation des caractéristiques de TCR ,on utilisant la simulation sous l'environnement MATLAB (simulink).

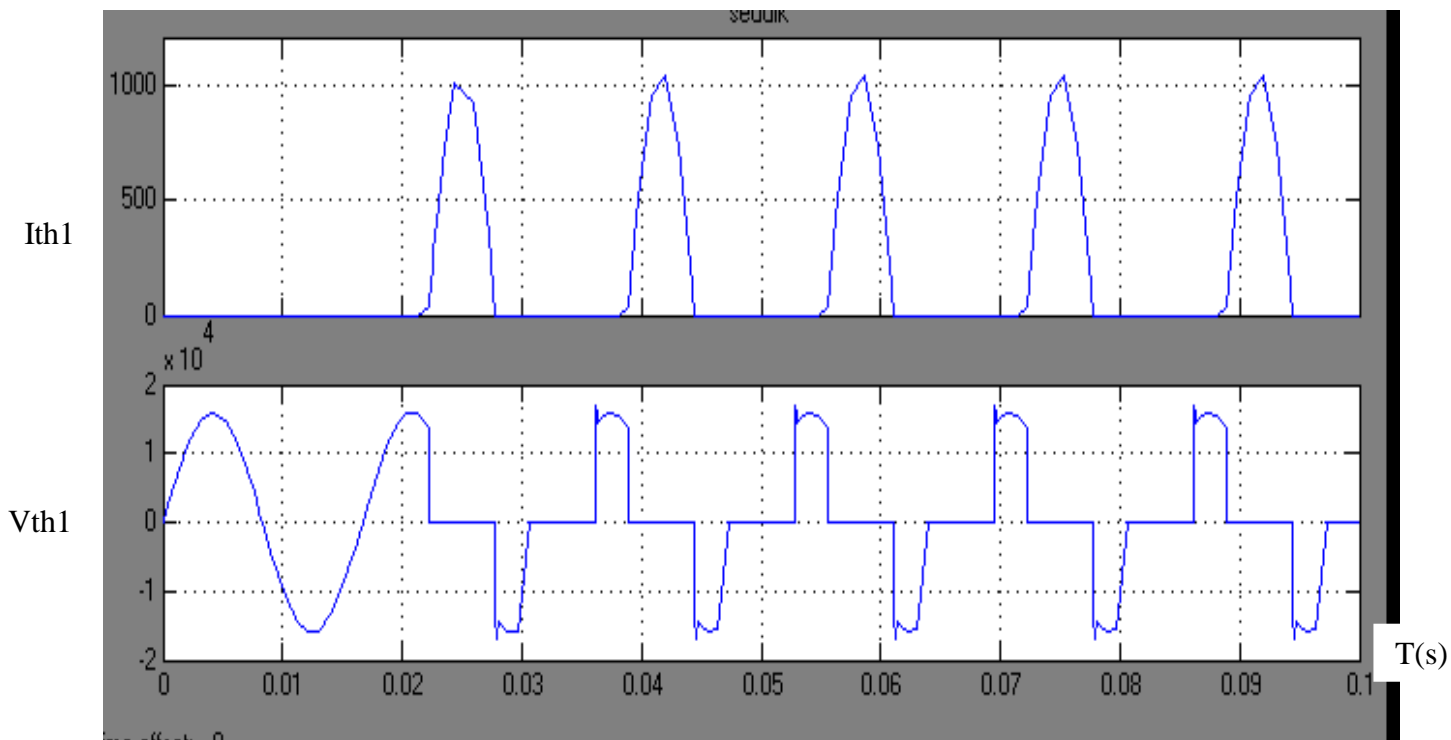
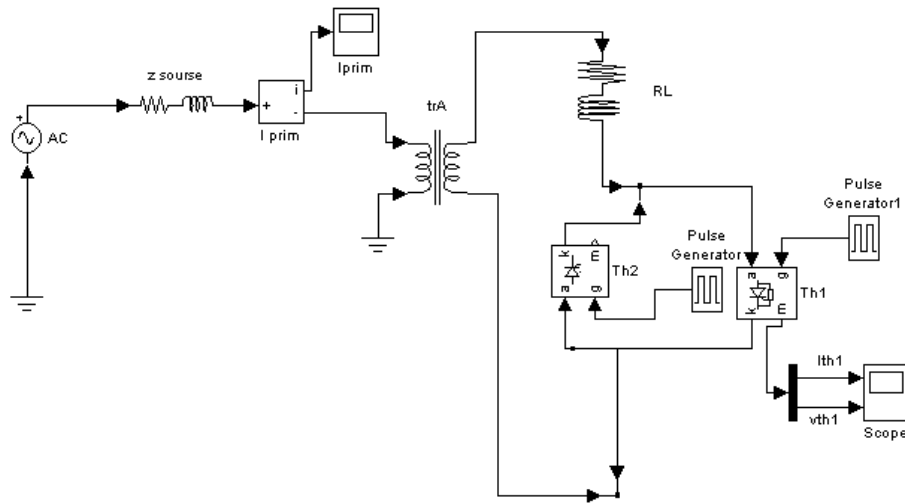


Figure (3-8): Variation de courant et la tension de thyristor

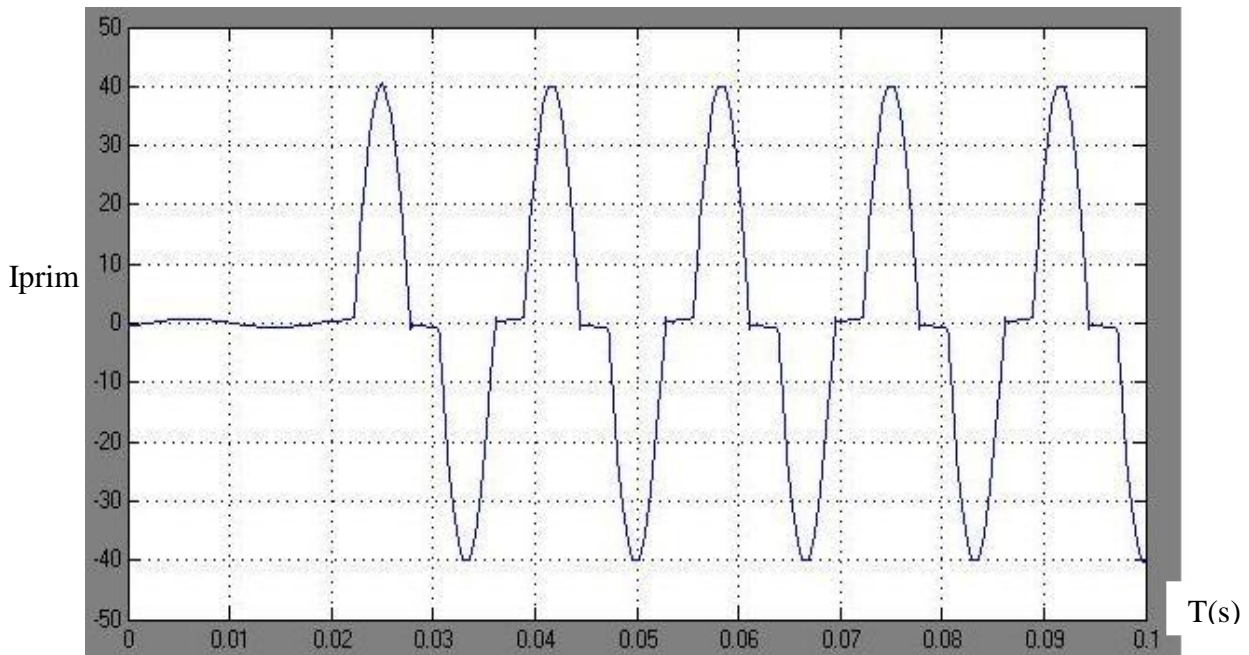


Figure (3-9) : Variation courant de ligne

La figure (3-9) précédentes ont été déterminés en utilisant le schéma de simulation (simulink), qui représente les caractéristiques de TCR (tension, courant de thyristor et courant de ligne en fonction de l'angle d'amorçage).

**III.2.6. Modèle du compensateur shunt SVC :**

On définit  $B_e$  la susceptance de SVC  $B_e = \frac{1}{X_e}$

$$B_e = \frac{\sin(2\alpha) - 2\alpha + \pi(2 - \frac{X_L}{X_C})}{\pi X_L} \implies \dots\dots\dots(III.12)$$

$$X_e = \frac{\pi X_L}{\sin(2\alpha) - 2\alpha + \pi(2 - \frac{X_L}{X_C})}$$

Avec  $V = V_{ref} + X_{SL} I$  (III.13)

Et  $X_{SL} = \{\pm 5\% \text{ où } \pm 2\% \}$  de la valeur de  $V_{ref}$  [12].

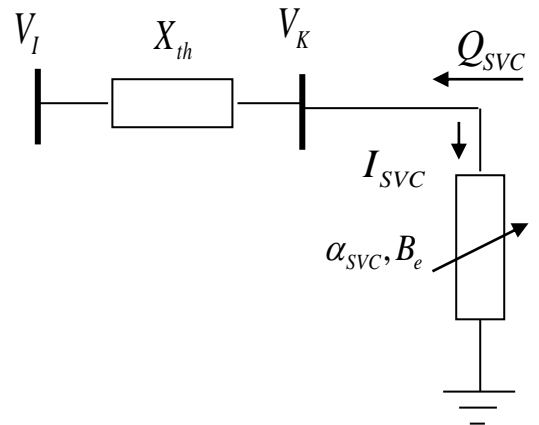
**III.2.6.1. Les équations de SVC :**

Les équations qui décrivent le comportement du SVC dans le réseau sont :

$$V_I - V_{REF} + X_{SL} V_K B_e = 0$$

$$Q_{SVC} - V_K^2 B_e = 0$$

$$\pi X_C X_L B_e + \sin 2\alpha + \pi \left( 2 - \frac{X_L}{X_C} \right) = 0$$



Représentation du circuit de base pour le compensateur SVC

Avec  $\alpha$  représente la variation de l'angle d'amorçage des thyristors :  $\alpha$  compris entre  $[90^\circ \text{ et } 180^\circ]$ .

Le Schéma (3-10) représente le Schéma bloc du compensateur SVC.

La figure (3-11) représente l'organigramme de la variation de l'angle d'amorçage en fonction de la tension à régler.

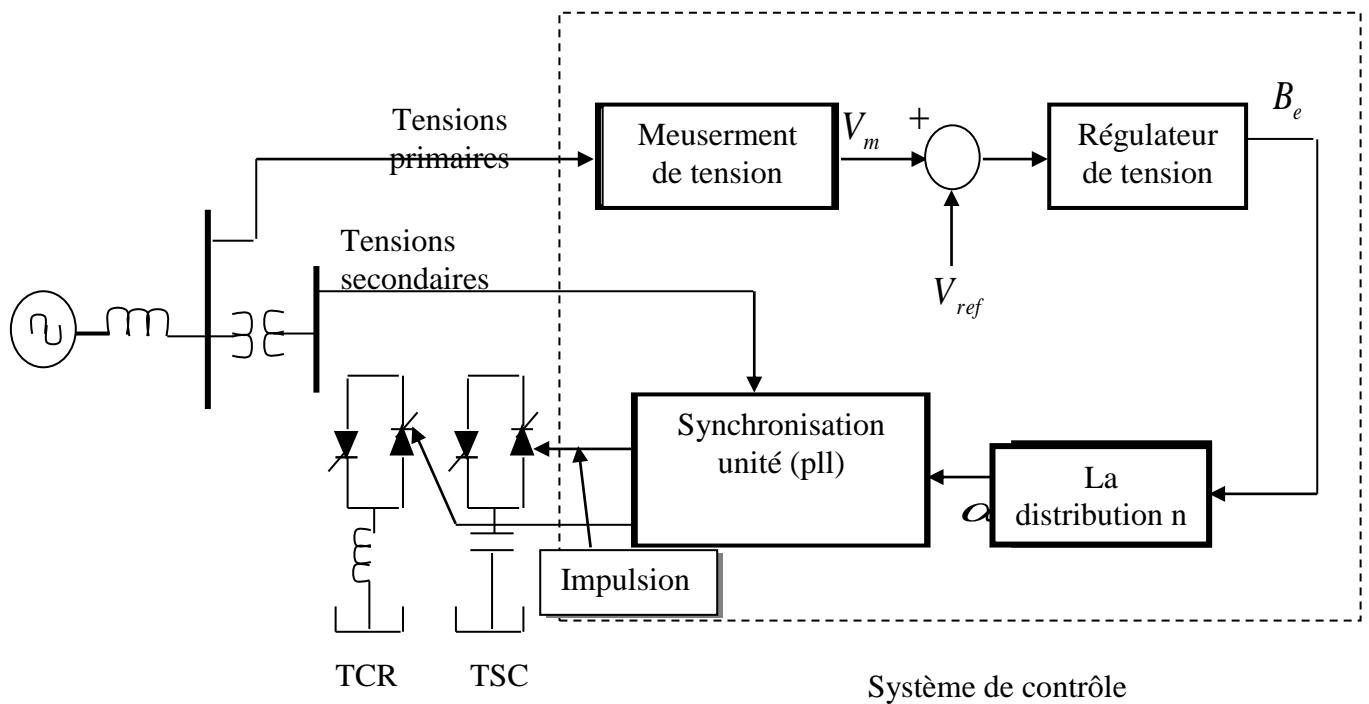


Schéma (3.10) : Schéma bloc du compensateur SVC

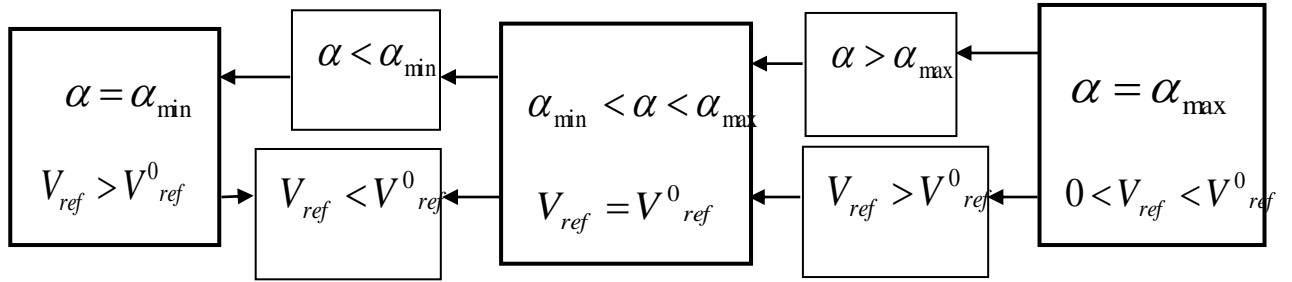


Figure (3.11) : Organigramme représentant la variation de l'angle d'amorçage

La réactance contrôlée par les thyristors est en fonction de  $X_L, X_C, \alpha$ . On peut tracer la courbe de  $B_e = f(\alpha)$ , si  $X_C = 1(pu)$ ,  $X_L = 0.5(pu)$ .

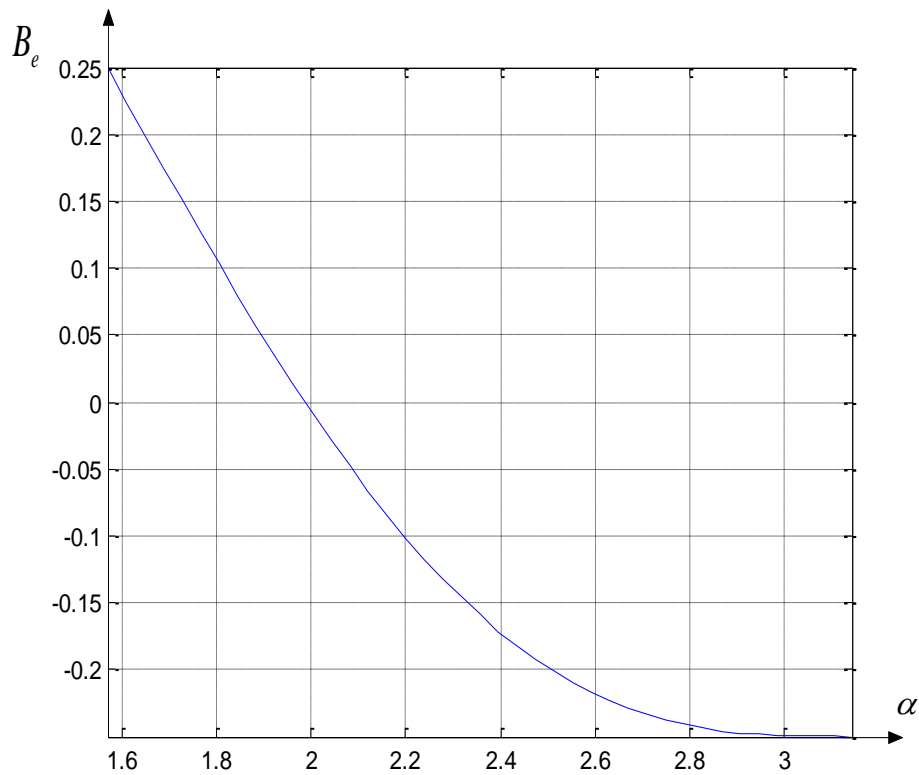


Figure (3.12) : la variation de la susceptance en fonction de l'angle d'amorçage

On remarque que  $B_e$  change de signe lorsque  $\alpha$  varie (Figure (3.12))

- ✓ Pour certains valeurs de  $\alpha$ ,  $B_e$  est positif, donc le montage fonctionné en mode inductif.
- ✓ Pour les autres valeurs,  $B_e$  est négatif, donc le montage fonctionné en mode capacitif.
- ✓ Pour  $\alpha = \alpha_0$ ,  $B_e$  est nulle donc le montage est représenté par une charge infinie.

Pour chaque valeur de  $X_L$  ( $X_C$  fixe), on obtient une caractéristique de  $B_e$  et pour choisir la première valeur il faut tenir compte de la nature de la charge à compenser et le type de ligne.

Par exemple :

Pour  $X_L = 1(pu) = B_e \leq 0$ , donc le SVC est toujours en mode capacitif .

Par contre  $X_L \leq 1(pu)$ , le SVC fonctionne en mode capacitif ou inductif, d'après l'angle  $\alpha$ .

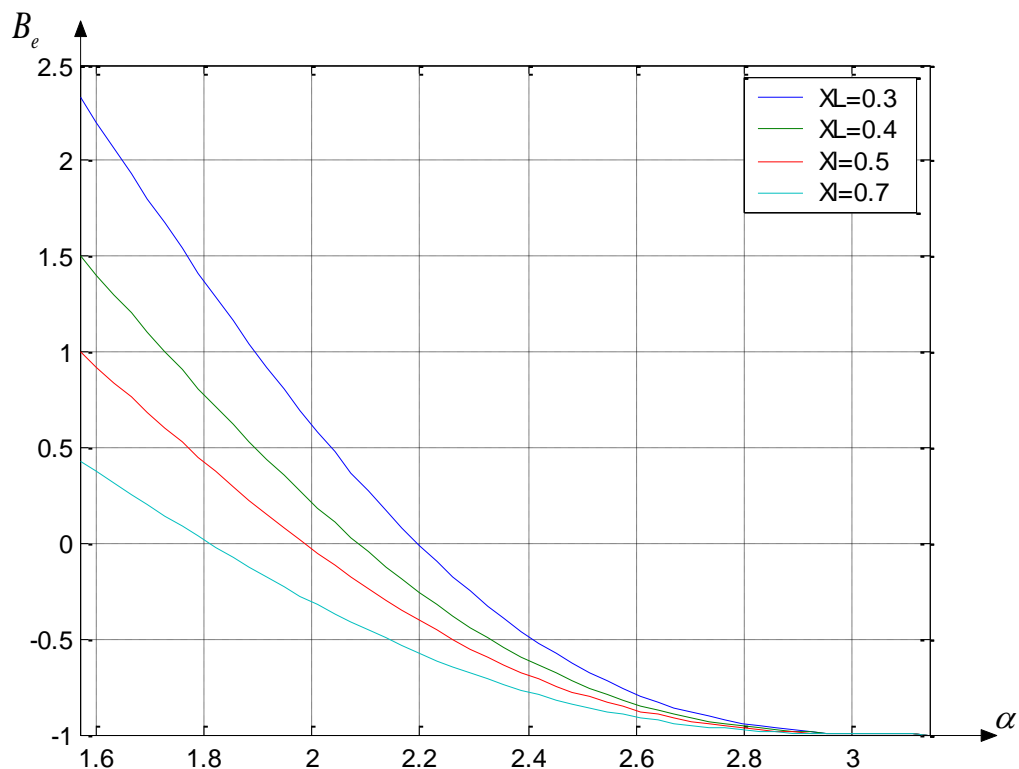


Figure (3.13) : Variation de la susceptance en fonction de l'angle  $\alpha$

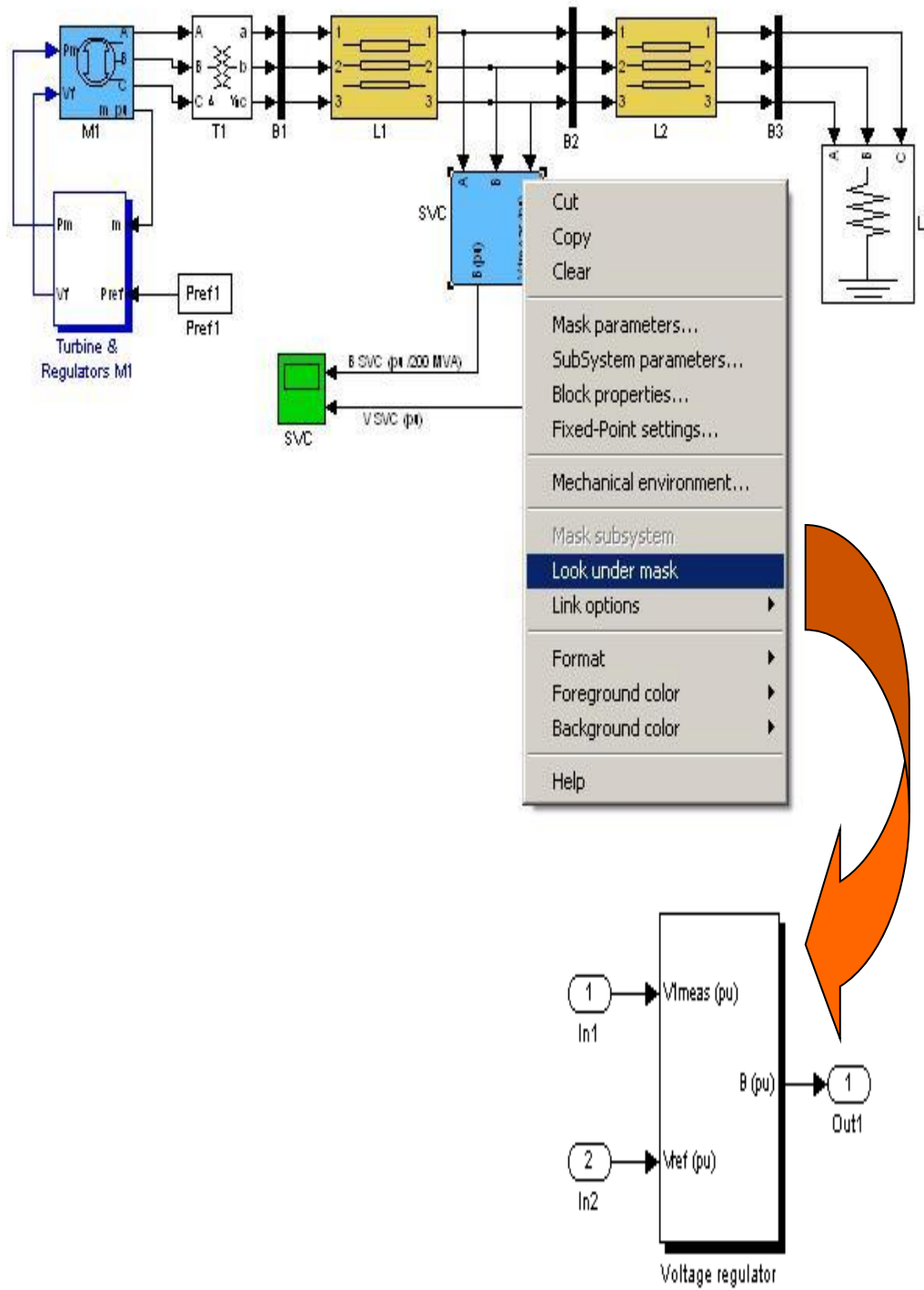


Figure (3-14) : Installation du Compensateur SVC

III.3. Différent types des régulateurs :

A) Type 1 :

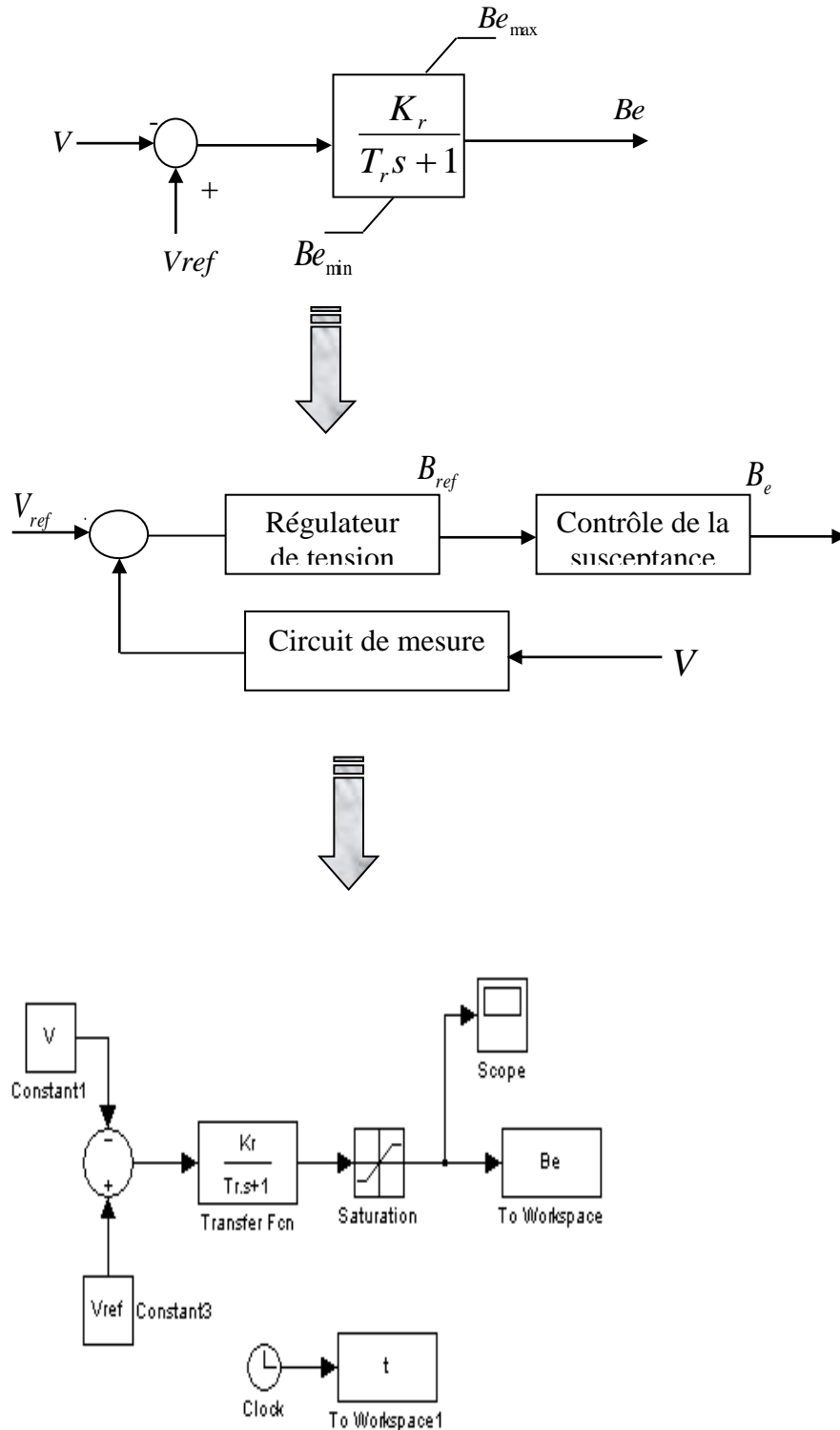


Figure (3-15) Régulateur mode 1 du SVC

|     | Variable   | Description                         | Unité     |
|-----|------------|-------------------------------------|-----------|
| □1□ | $V_{ref}$  | Tension de référence                | P.U.      |
| □2  | Tr         | Temps Constante de régulateur<br>□□ | S         |
| □3  | Kr         | gain de régulateur                  | P.U./P.U. |
| □4  | $Be_{max}$ | susceptance maximum                 | P.U.      |
| □5□ | $Be_{min}$ | susceptance minimum                 | P.U.      |

B) Type 2 :

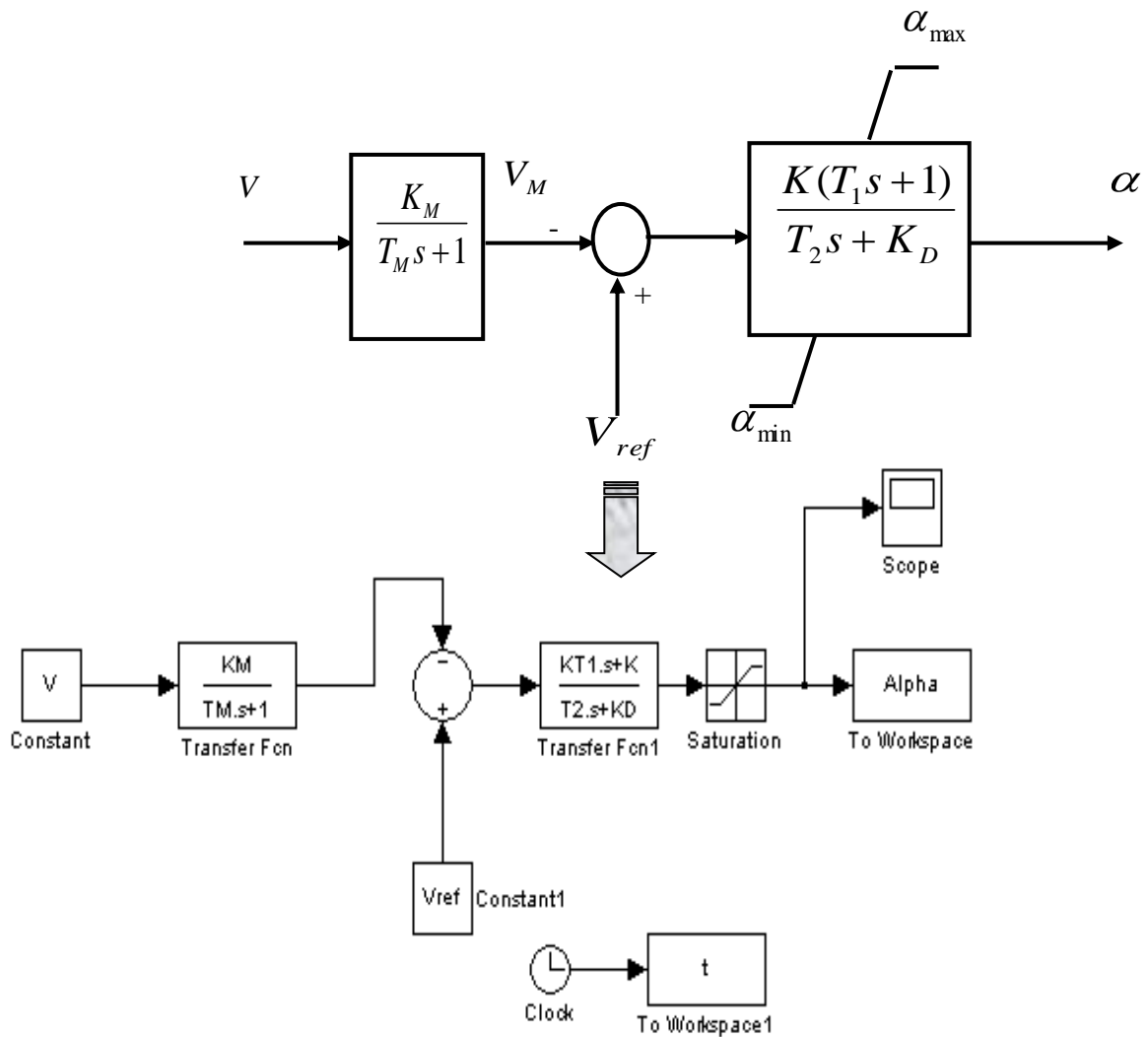


Figure (3-16) : Régulateur mode 2 de SVC

|   | Variable       | Description                   | Unité     |
|---|----------------|-------------------------------|-----------|
| 1 | $V_{ref}$      | Tension de référence          | P.U.      |
| 2 | $T_2$          | Temps Constante du régulateur | S         |
| 3 | K              | gain du régulateur            | P.U./P.U. |
| 4 | $\alpha_{max}$ | L'angle d'amorçage maximal    | P.U.      |
| 5 | $\alpha_{min}$ | L'angle d'amorçage minimal    | P.U.      |
| 6 | KD             | Déviation d'Intégral          | P.U.      |
| 7 | T1             | Constante temps de régulateur | S         |
| 8 | KM             | Gain de mesure                | P.U./P.U. |
| 9 | TM             | Temps de retard               | S         |

#### III.4. Modélisation et contrôle d'un UPFC

Dans ce chapitre, nous donne un exemple du modèle utilisée au l'implantation de dispositif dans le réseau UPFC.

##### III.4.1 Caractéristiques D'un Compensateur Statique UPFC:

Dans ce chapitre nous avons étudié le comportement du système et la synthèse des lois de commande, il est nécessaire d'établir un modèle adéquat du dispositif. Nous avons étudié un réseau réel associé à un UPFC. Le modèle détaillé représente correctement les limites de commande et de fonctionnement du contrôleur et peut être considéré comme un modèle avancé.

La conception, les principes de fonctionnement, le modèle mathématique et les blocs de commande de base de l'UPFC sont expliqués dans le quatrième chapitre ainsi que les résultats des simulations obtenus par Matlab (**SimPowerSystems Demos V 7.0**).

Il est constitué de deux onduleurs de puissance qui sont connectés à travers un circuit continu commun. L'un des onduleurs, connecté en parallèle, assure la compensation de la puissance réactive. L'autre, branché en série avec la ligne de transmission, permet de contrôler le transit de puissances actives et réactive.

Il est capable de contrôler, simultanément et indépendamment, la puissance active et la puissance réactive de la ligne. Il peut contrôler les trois paramètres associés au transit de puissance ; la tension, l'impédance et l'angle de transport de la ligne.

Le dispositif UPFC est constitué de deux onduleurs triphasés de tension à thyristors GTO, l'un connecté en parallèle au réseau par l'intermédiaire d'un transformateur triphasé et l'autre connecté en série avec le réseau via trois transformateurs monophasés dont les primaires sont reliés, entre eux, en étoile. Les deux onduleurs sont interconnectés par un bus continu et par un condensateur de filtrage comme indiqué sur la figure 3-17.

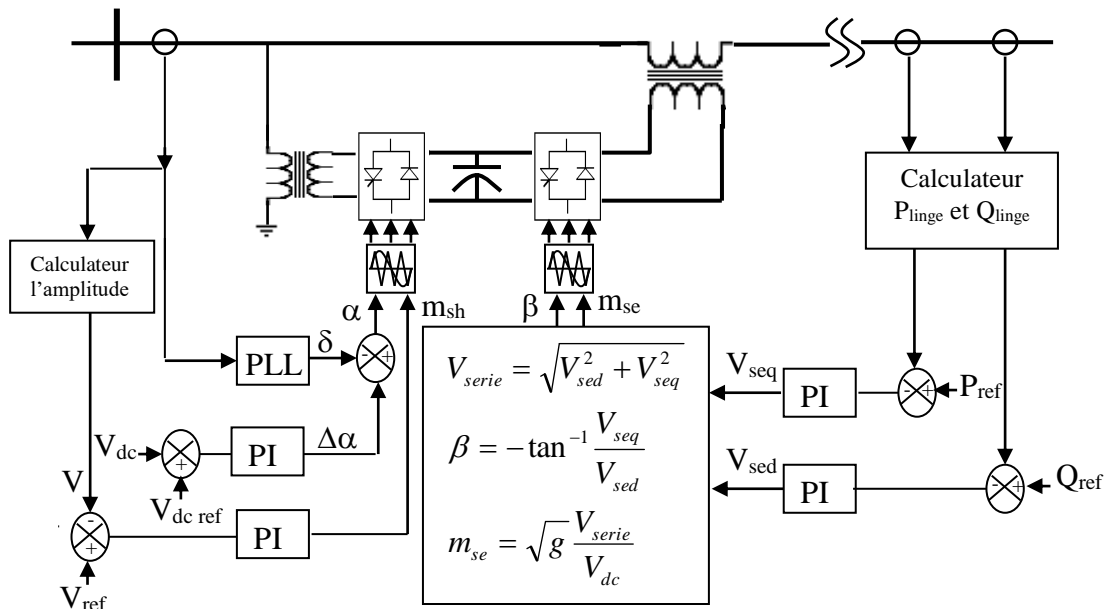


Figure (3-17) : Schéma général du système de contrôle UPFC

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

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

### III.4.2 Modélisation D'un UPFC :

Un système de contrôle efficace est essentiel afin de tirer l'avantage maximum des possibilités inhérentes de l'UPFC. La raison unique des caractéristiques de l'UPFC est commandée indépendamment de la puissance active et réactive. Pour tenir compte de la nécessité la commande d'active et réactive puissance indépendante dans un UPFC, une commande à trois niveaux de convertisseur ou une certaine prolongation de la technique de MLI utilisée dans des convertisseurs à deux niveaux doit être mise en application.

Les équipements d'UPFC utilisés est basé sur deux convertisseurs identiques, chacun composé de structures multiples de valve de la puissance élevée GTO alimentant un transformateur intermédiaire. La tension de sortie de convertisseur est une sinusoïde de 48 impulsions produites par la commutation appropriée des valves entre le positif. Zéro et négative de tensions de condensateur DC.

#### III.4.2.1 Modélisation de la partie shunt :

La structure triphasée de la partie shunt (nommé STATCOM) est donnée sur la figure III.18. Pour simplifier les calculs, nous considérons les valeurs en grandeur réduite et ainsi nous n'avons plus besoin du rapport de transformation du transformateur shunt. L'onduleur est modélisé par des interrupteurs idéaux en série avec la résistance  $R$  représentant les pertes par conduction. Le réseau électrique est représenté par les trois tensions simples ( $v_a$ ,  $v_b$ ,  $v_c$ ), celles au point de raccordement de la partie shunt. Chaque capacité est en parallèle avec une résistance qui représente ses pertes.

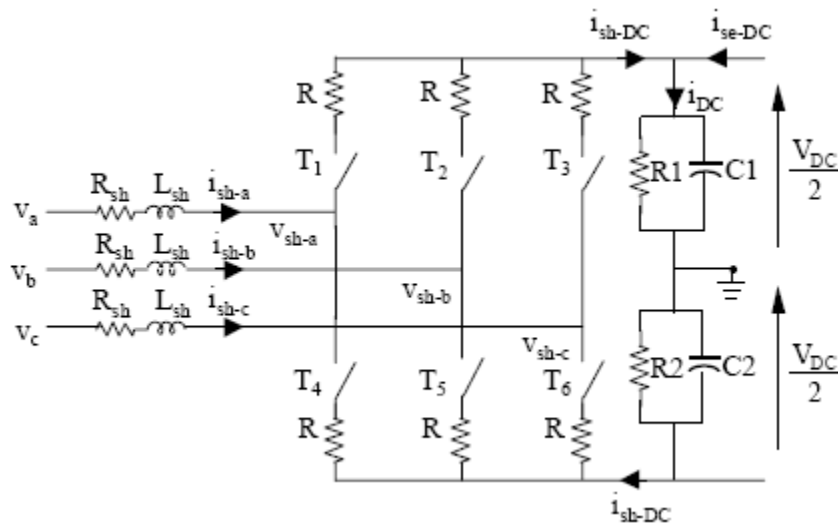


Figure (3-18) : Schéma simplifié d'un STATCOM (partie parallèle de l'UPFC) connecté au réseau

**III.4.2.2 Modélisation de la partie série :**

La structure de cette partie est identique à celle de la partie parallèle. Le bus de tension continu est le même. Côté alternatif, le transformateur de liaison est représenté par trois transformateurs monophasés éleveurs. Les inductances de fuites et les résistances des transformateurs sont notées  $L_{se}$  et  $R_{se}$  (Figure 3-19).

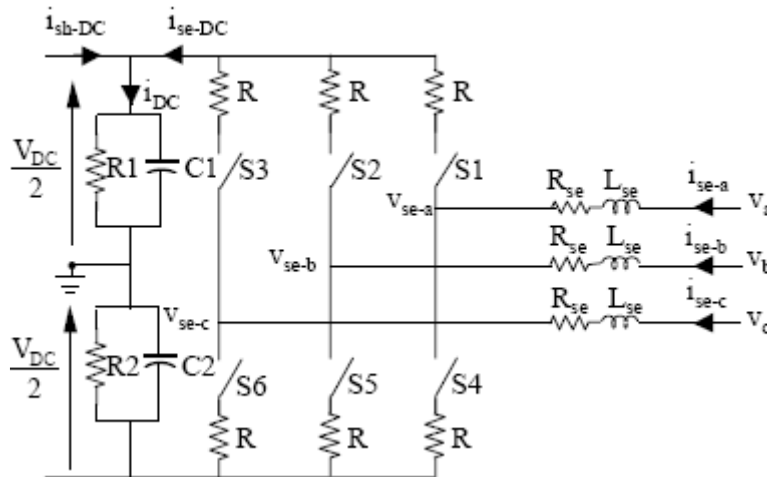


Figure (3-19) : Schéma simplifié d'un UPFC (partie série) connecté au réseau

**III.4.3 Contrôle De L'UPFC :**

Le contrôle d'un UPFC se décompose de deux parties, celle de la partie parallèle et celle de la partie série. Pour chacune, nous allons développer des différentes méthodes de commande de système.

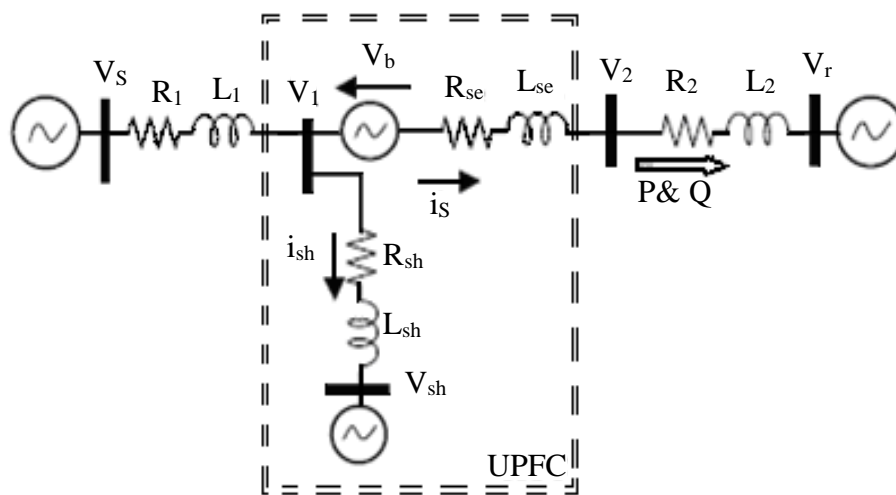


Figure (3-20) : Modèle mathématique d'un UPFC connecté au réseau

**III.4.3.1 Partie série :**

La partie série est utilisée pour le contrôle des puissances active et réactive transitées. Il existe plusieurs de contrôle du convertisseur série, méthodes parmi lesquelles nous pouvons citer un système de contrôle de l'écoulement de puissance active dans la ligne de transmission et tension à la fin de Jb de réception; un autre système de contrôle pour l'écoulement de puissance active et réactive dans la ligne de transmission.

**III.4.3.2 Partie shunt :**

Le courant shunt est commandé en variant l'amplitude et l'angle de la tension de convertisseur shunt.

**III.4.3.3 Commande de l'onduleur :**

L'objectif de la commande est de générer les ordres d'ouverture et de fermeture des interrupteurs de sorte que la tension créé par l'onduleur soit la plus proche de la tension de référence. Deux méthodes de commande peuvent être utilisées :

- commande par hystérésis,
- commande par MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion)

**III.5 Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons d'abord développé le modèle mathématique de le SVC et nous avons vu ses caractéristiques et leur modélisation. Et dans la deuxième partie nous avons également présenté la modélisation de l'UPFC et l'identifié les références du système de commande pour la partie parallèle et la partie série. Ensuite nous avons étudié différents type pour leur commande.



## Chapitre IV

# Testes et Applications

### L'impact des dispositifs FACTS (SVC, UPFC) sur la régulation de la tension, la puissance transité

#### IV.1. Introduction :

Les dispositifs FACTS ils sont capable de réaliser plusieurs fonctions, telles que : augmentation de la capacité de transfert, renforcement de la stabilité et amélioration économique du réseau électrique.

L'implantation d'un dispositif nécessite une nouvelle méthode d'études et d'analyses des réseaux électriques.

Dans ce chapitre, nous donne deux exemples du modèle utilisée au l'implantation des dispositifs dans le réseau SVC et UPFC.

#### IV.2. L'impact du compensateur shunt SVC sur le régime transitoire (stabilité dynamique) :

L'étude et la simulation du comportement dynamique d'un réseau électrique doivent prendre en compte les phénomènes électromécaniques qui déterminé la stabilité transitoire. C'est dans ce cadre que doivent être modélisé les FACTS pour étudier leur influence sur le comportement dynamique des réseaux électriques. Le problème de la stabilité transitoire s'est posé à l'exploitant du réseau électrique depuis l'apparition des grands réseaux maillés. Beaucoup de méthodes d'évaluations et d'amélioration des marges de stabilité ont été élaborées pour assurer la continuité de service. Parmi ces méthodes, on cite les méthodes de simulation numérique, les méthodes heuristiques, et les méthodes d'apprentissage. La partie importante dans l'analyse de stabilité transitoire est la détermination exacte du temps critique d'élimination du défaut (CT). Le CT est la durée maximale du défaut, pour laquelle le réseau électrique préserve sa stabilité.

Cette partie présente une analyse générale de la stabilité transitoire en présence d'un dispositif FACTS (SVC). Cette étude a été testée sur un réseau standard de 'Hydro Quebec Canada', constitué de 3 jeux de barres et de 2 générateurs (turbine hydraulique). Afin de comprendre l'impact de SVC sur la marge de stabilité transitoire un modèle simplifié a été employé. Les résultats de calculs ont été obtenus par une simulation sous l'environnement MATLAB (SIMULINK).

Les courbes qui ont été exposé dans cette partie correspond à :

- La tension de SVC,
- La susceptance B,
- L'angle de charge  $\delta$ .
- La puissance transitée

Dans les deux cas :

- Sans compensation,
- Avec compensation.

Et avec différents types de court-circuit :

- Monophasée,
- Biphasée,
- Triphasée.

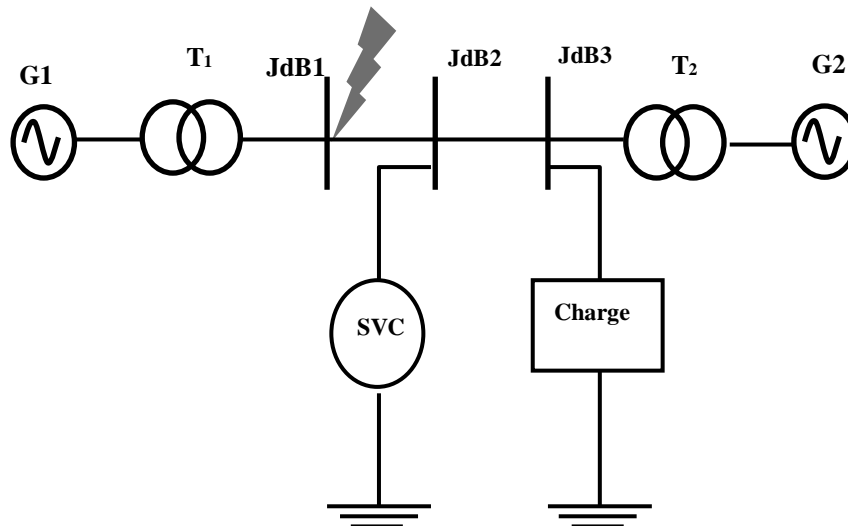


Figure (4-1) : Schémas unifilaire du réseau test de simulation Hydro-Quebec- Canada

### IV.3. Les résultats de simulation

#### IV.3.1. Compensation Sans SVC :

##### IV.3.1.1. Court circuit monophasé a la terre :

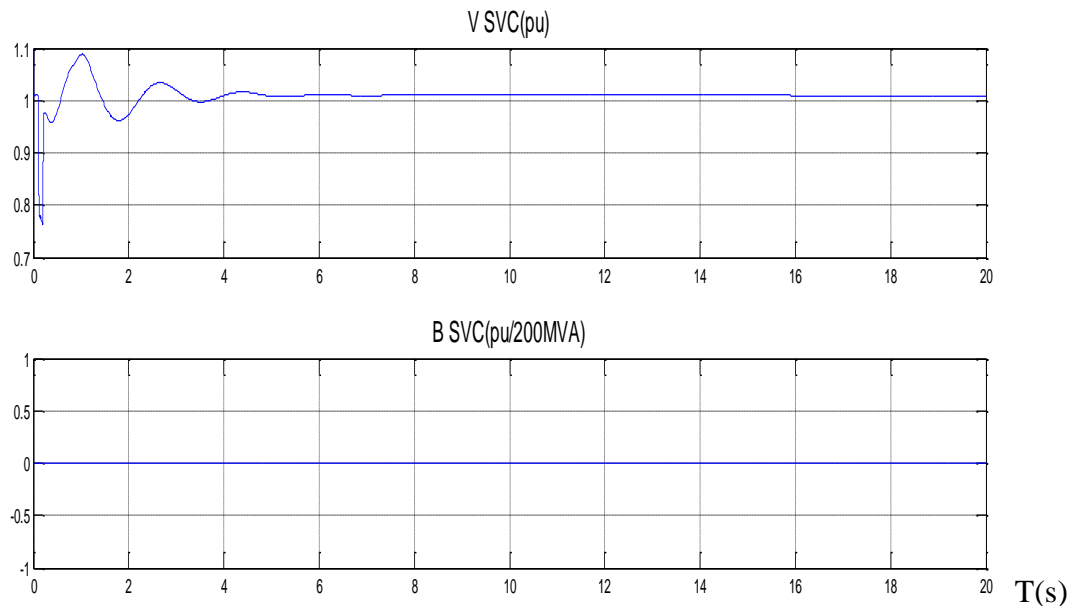


Figure (4-2) : Variation de la tension et la susceptance

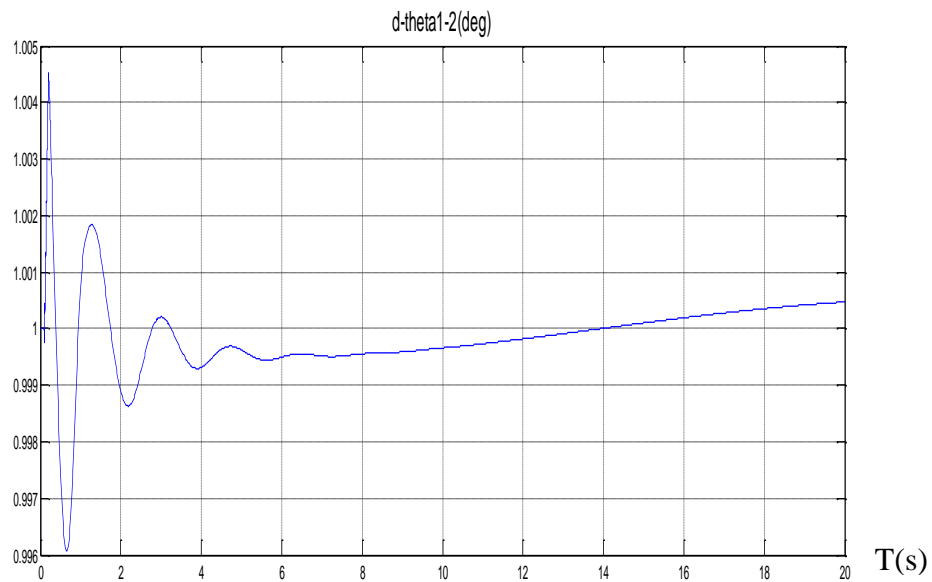


Figure (4-3) : Variation de l'angle de charge

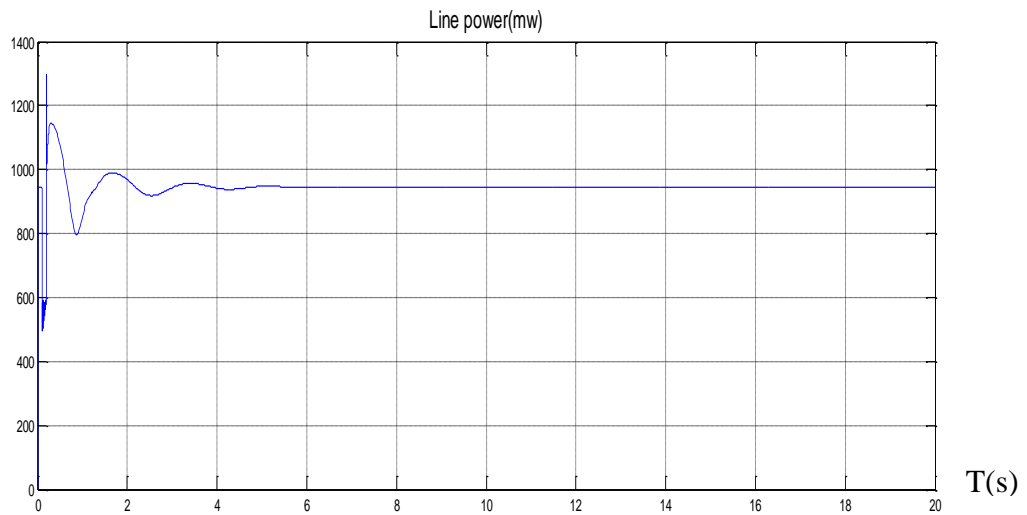


Figure (4-4) : Variation de la puissance maximale transitée

**IV.3.1.2.Court circuit biphasé a la terre :**

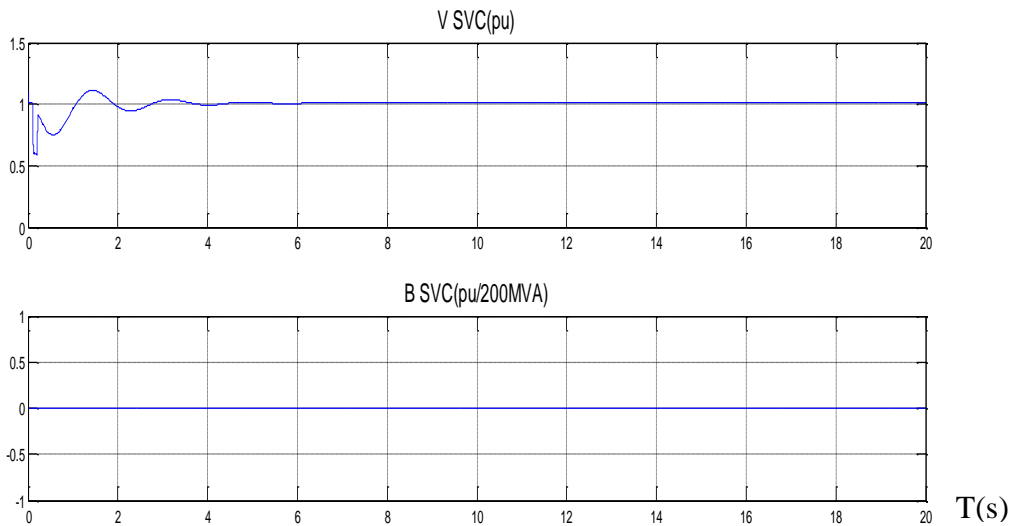


Figure (4-5) : variation de la tension et la susceptance

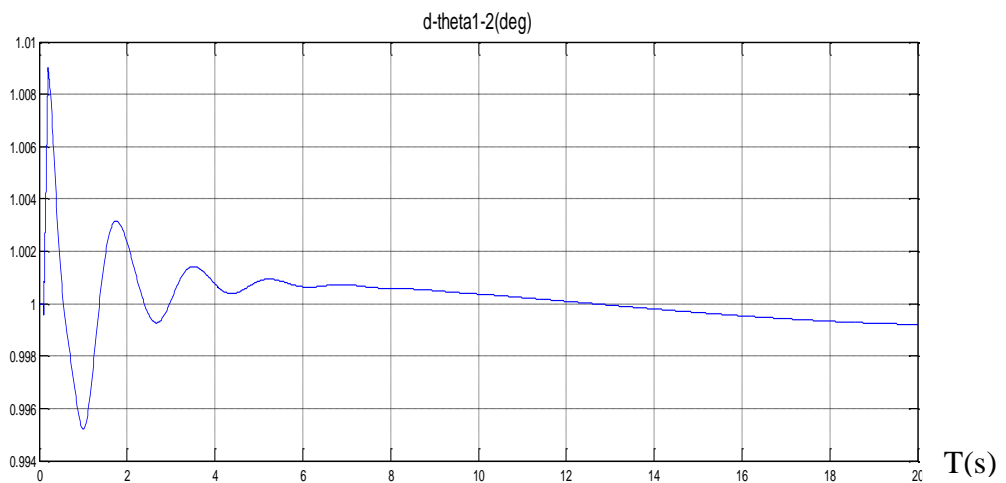


Figure (4-6): Variation de l'angle de charge

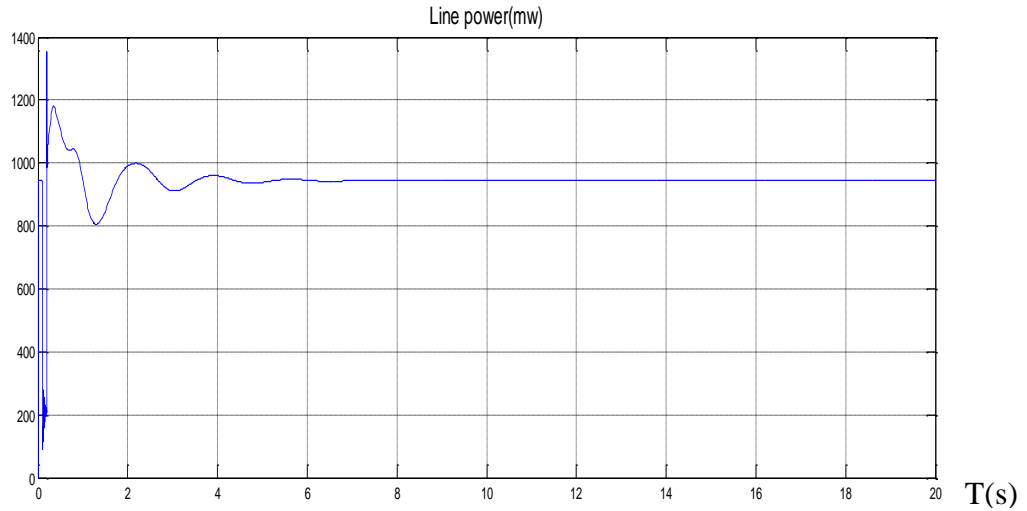


Figure (4-7) : Variation de la puissance maximale transitée

**IV.3.1.3.Court-circuit triphasé à la terre :**

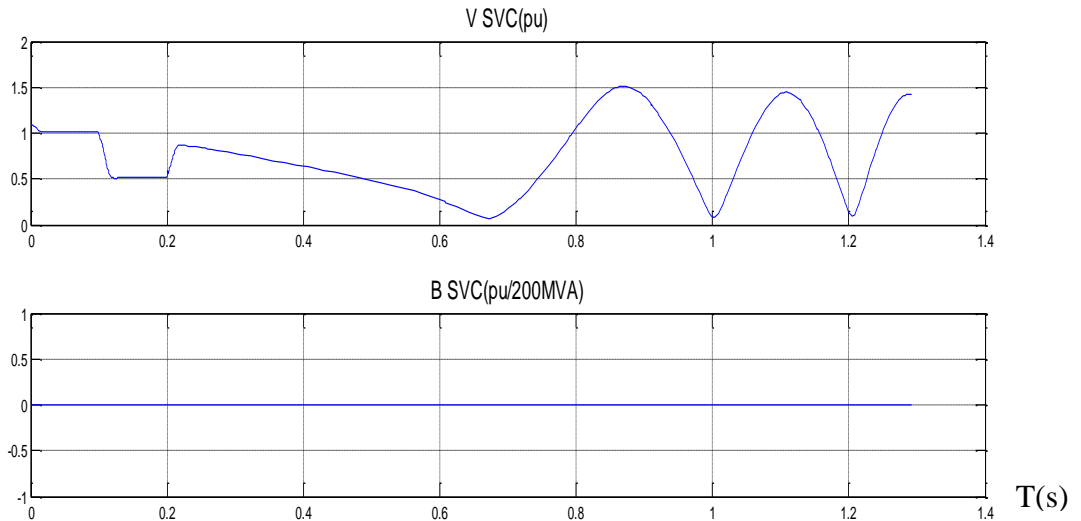


Figure (4-8) : Variation de la tension et la susceptance

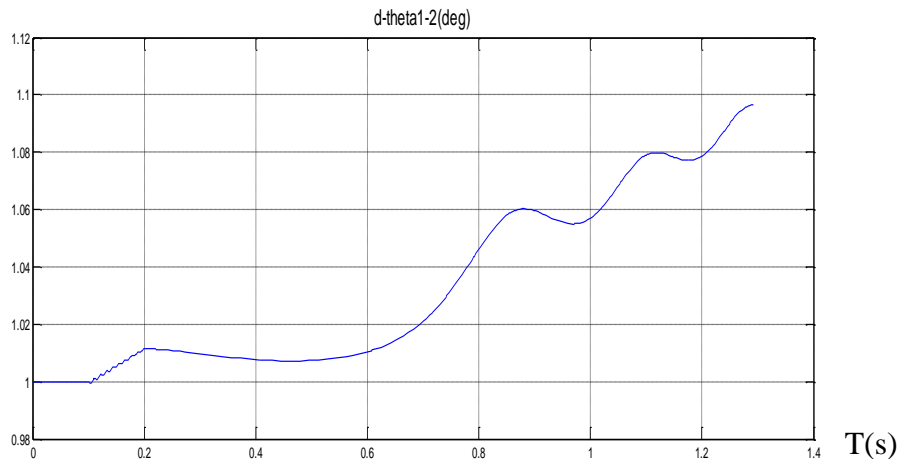


Figure (4-9) : Variation de l'angle de charge

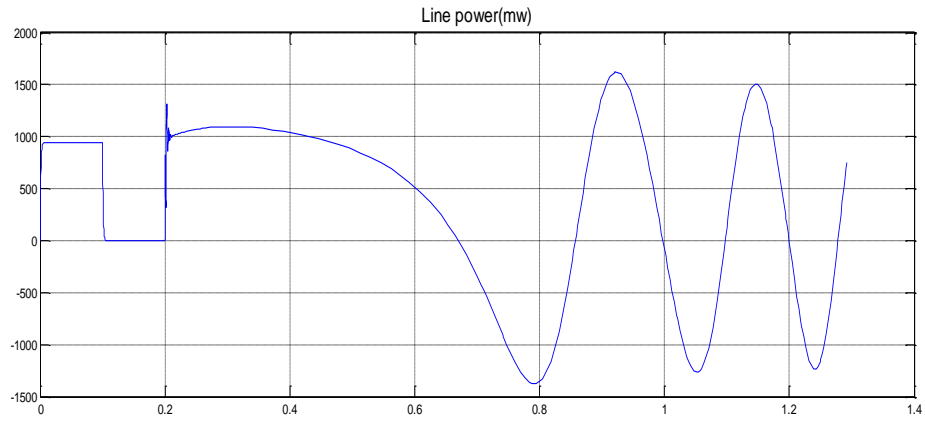


Figure (4-10) : Variation de la puissance maximale transitée

**IV.3.2.Compensation avec SVC :**

**IV.3.2.1.Court circuit monophasé a la terre :**

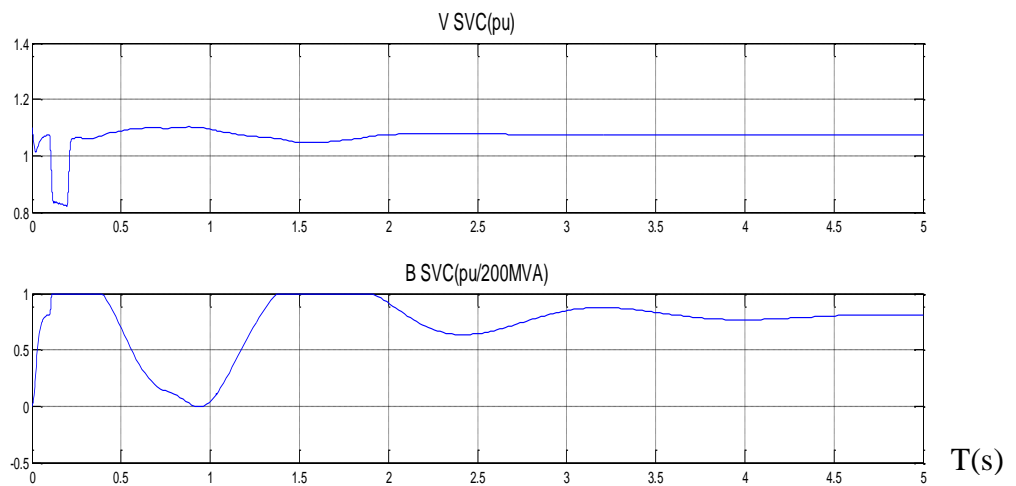


Figure (4-11) : Variation de la tension et la susceptance

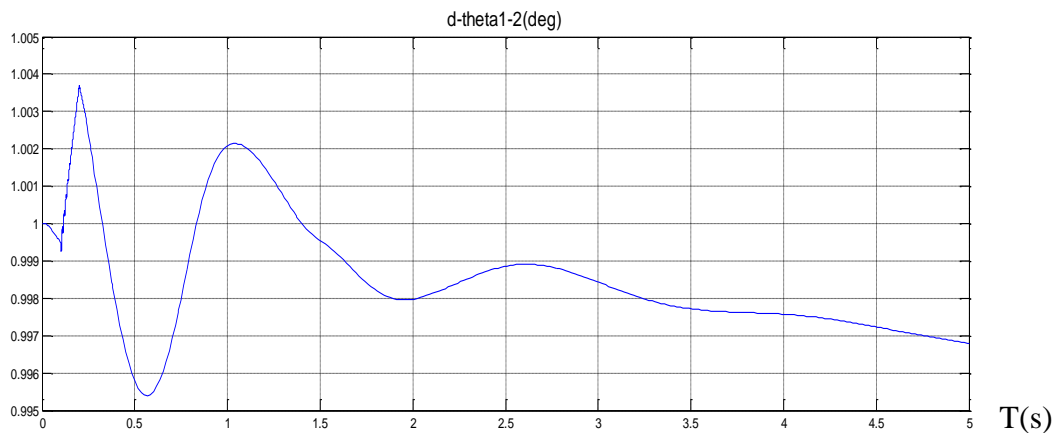


Figure (4-12) : Variation de l'angle de charge

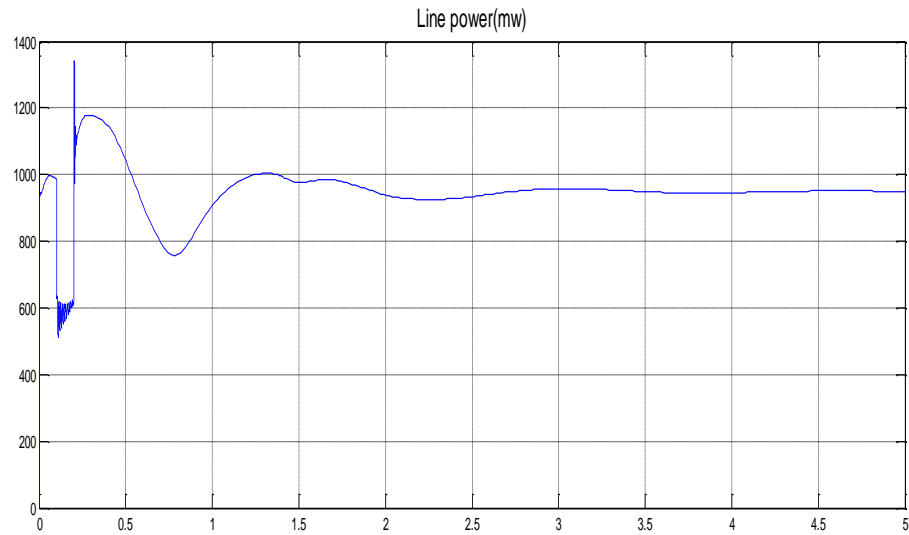


Figure (4-13) : Variation de la puissance maximale transitée

**IV.3.2.2.Court circuit biphasé a la terre :**

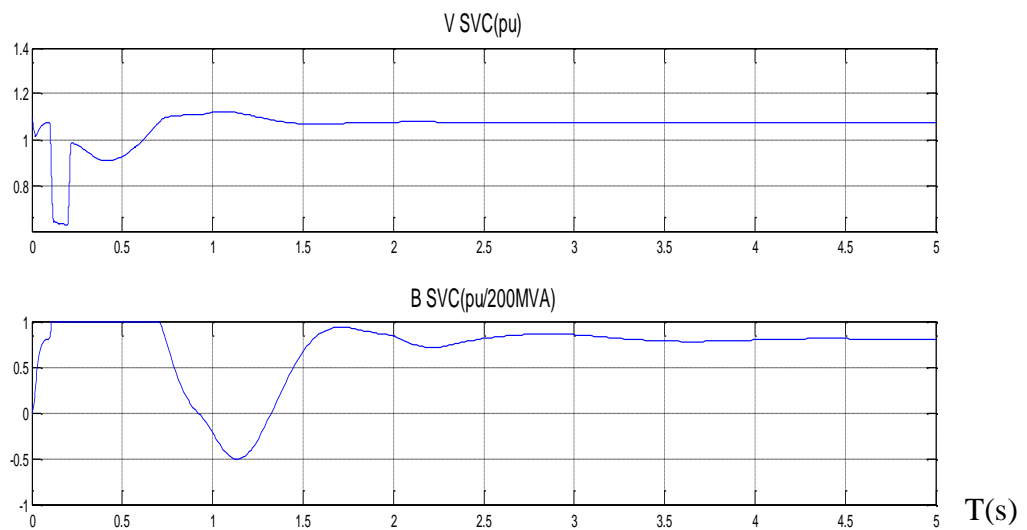


Figure (4-14) : Variation de la tension et la susceptance

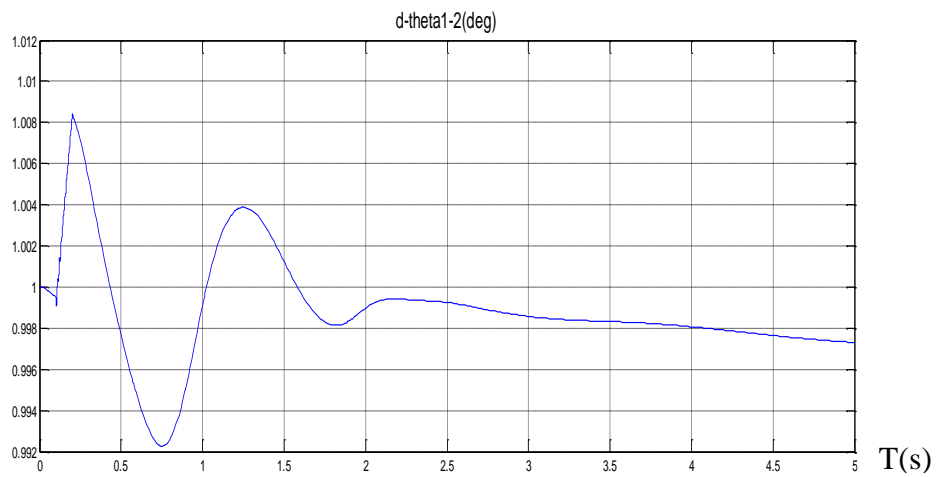


Figure (4-15) : Variation de l'angle de charge

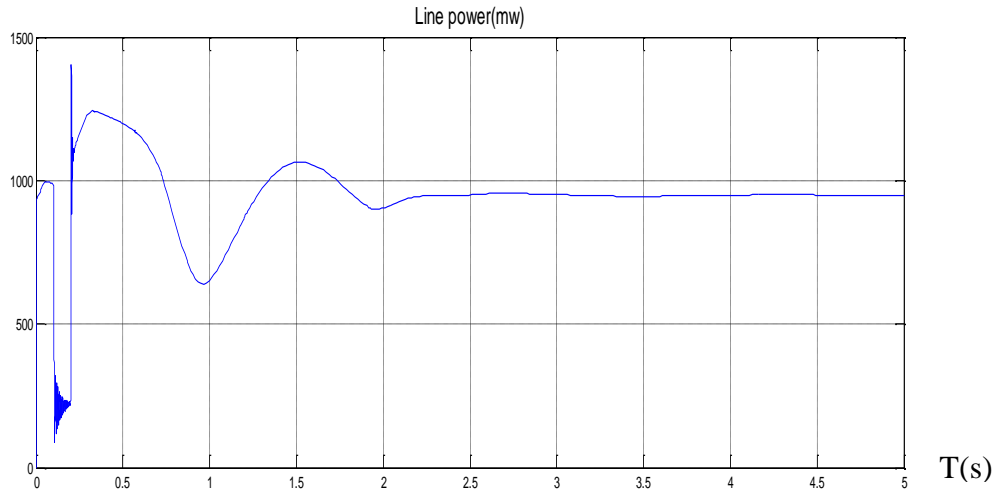


Figure (4-16) : Variation de la puissance maximale transitée

**IV.3.2.3.Court-circuit triphasé à la terre :**

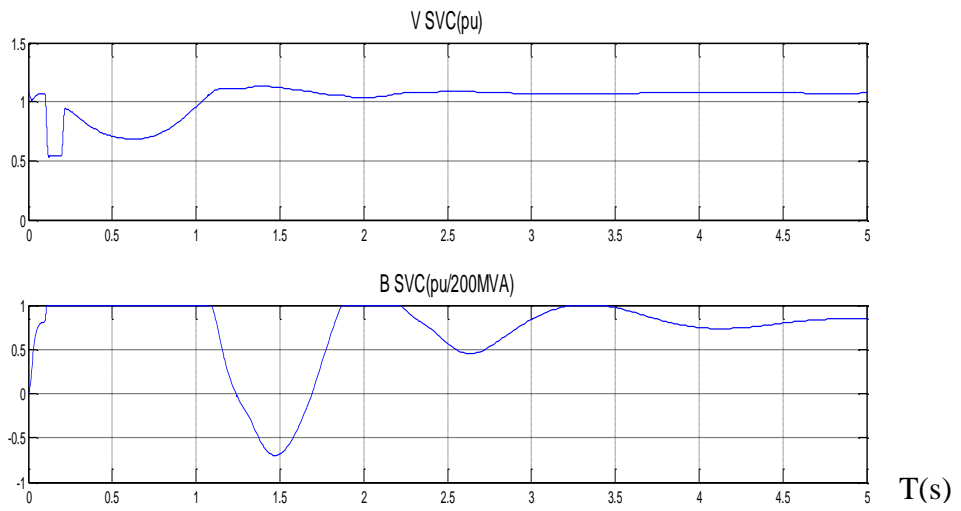


Figure (4-17) : Variation de la tension et la susceptance

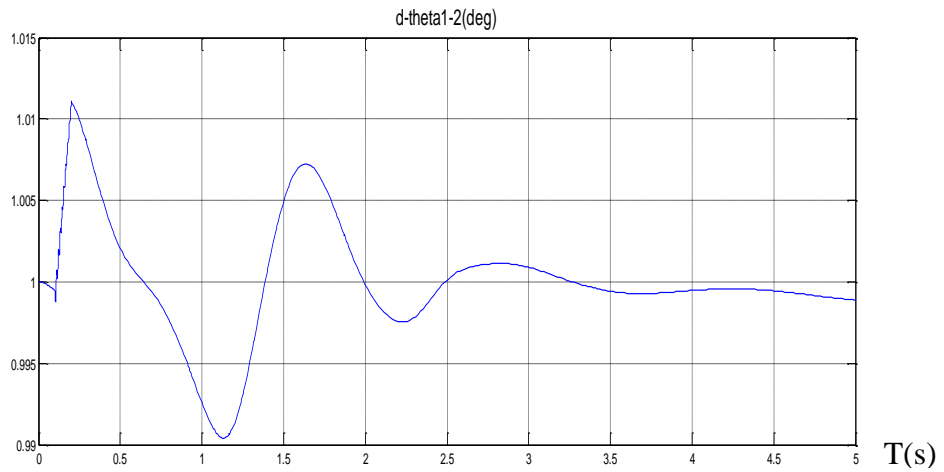


Figure (4-18) : Variation de l'angle de charge

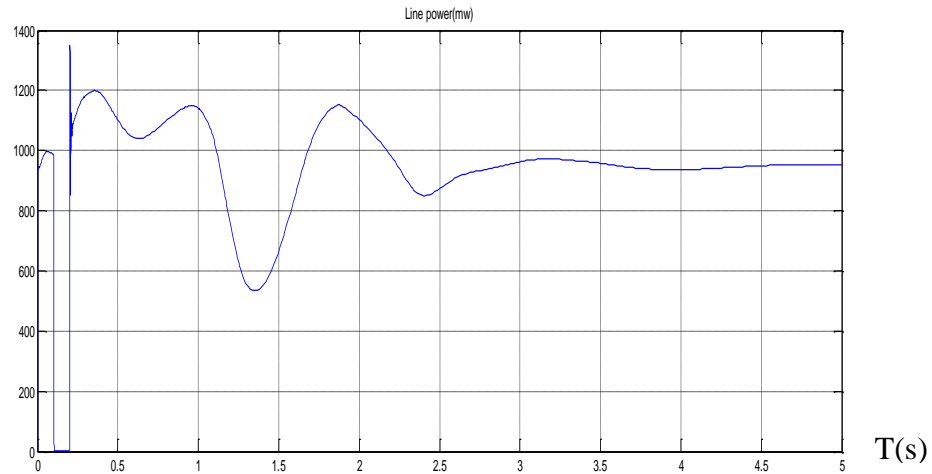


Figure (4-19) : Variation de la puissance maximale transitée

Nous venons de présenter les résultats obtenus par l'implantation des dispositifs de compensation dynamique dans les réseaux électriques.

Les difficultés du point de vue stabilité apparaissent lors de court-circuit triphasé, celui-ci entraîne une brusque chute de tension, et par conséquent la liaison entre les alternateurs, devient si faible que souvent, ce qui entraîne une rupture de la stabilité.

Lors du court-circuit monophasé et biphasé, la chute de tension est moindre et les alternateurs se trouvent dans des meilleures conditions de fonctionnement celle du court-circuit triphasé.

L'utilisation de ce dernier a permis d'améliorer d'une remarquable la marge de stabilité transitoire. Le comportement transitoire d'un réseau test soumis à un défaut (monophasé, biphasé et triphasé), près des jeux de barres de la source de production a été investi par simulation pour les cas suivant: sans SVC, avec SVC. Le changement apporté par les SVC en termes d'amélioration du temps critique d'élimination du défaut ainsi que l'influence de leurs emplacements et leurs paramètres ont été étudiés.

#### IV.4. L'impact du l'UPFC sur le régime transitoire (stabilité dynamique) :

Dans ce partie, nous donne un exemple du modèle utilisée au l'implantation de dispositif dans le réseau UPFC.

La conception, les principes de fonctionnement, le modèle mathématique et les blocs de commande de base de l'UPFC sont expliqués dans le troisième chapitre ainsi que les résultats des simulations obtenus par Matlab (**SimPowerSystems Demos V 7.0**).

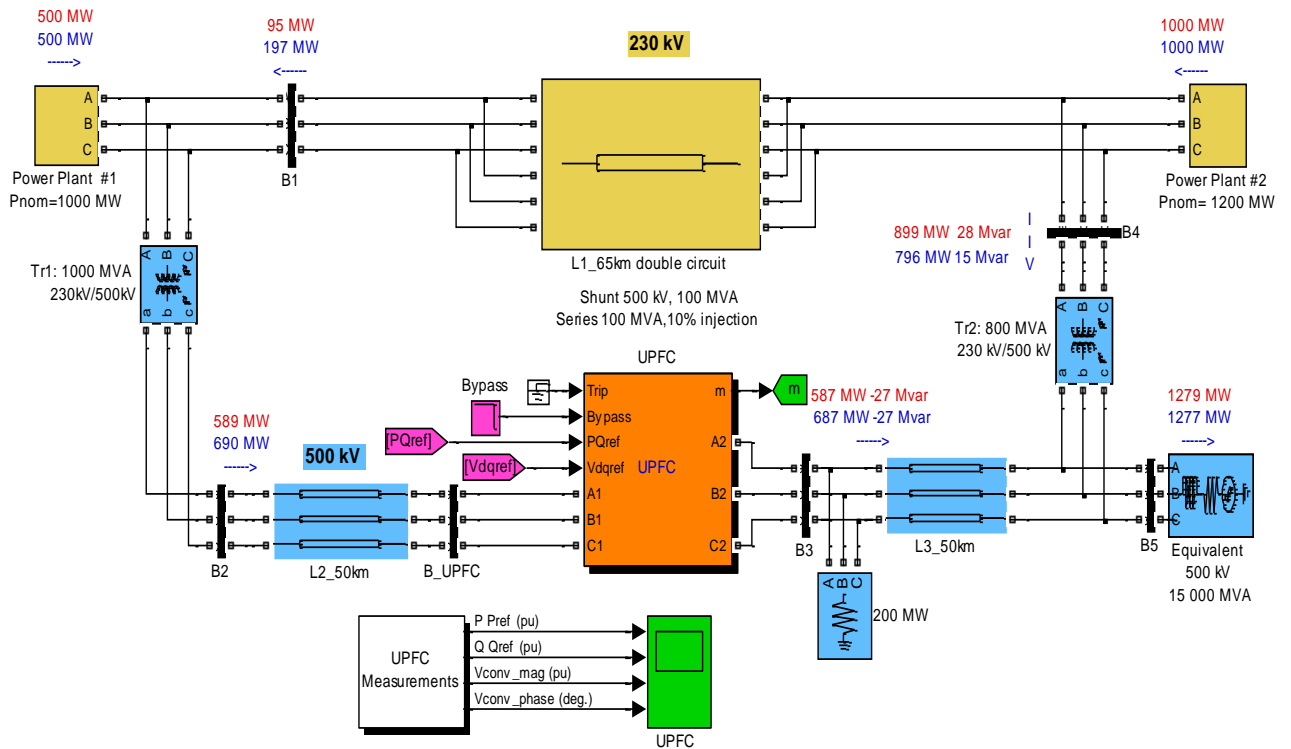


Figure (4-20) : exemple du modèle utilisée au l’implantation de dispositif dans le réseau UPFC.

Considérons le réseau teste de notre étude qui est constitué d’un générateur connecté au réseau infini par le transformateur T et ligne de transmission d’énergie (**SimPowerSystems Demos V 7.0**).

En considérant les grandeurs réduites du système, le schéma équivalent du réseau est présenté par la figure 4.21 [1].

La figure 4.22 montre les variations de :

- la puissance active et réactive
- la tension injectée en série
- la puissance réactive injectée par partie parallèle
- la valeur efficace de la tension au point de raccordement
- la tension aux bornes du condensateur

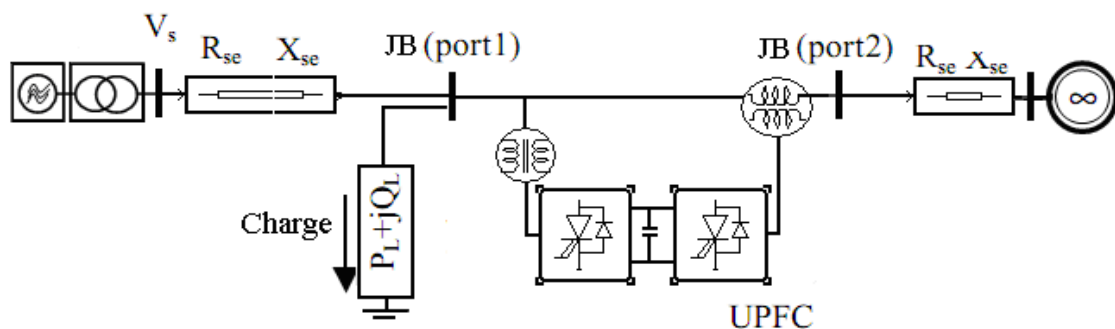


Figure (4-21) : Schéma équivalent en grandeurs réduites :

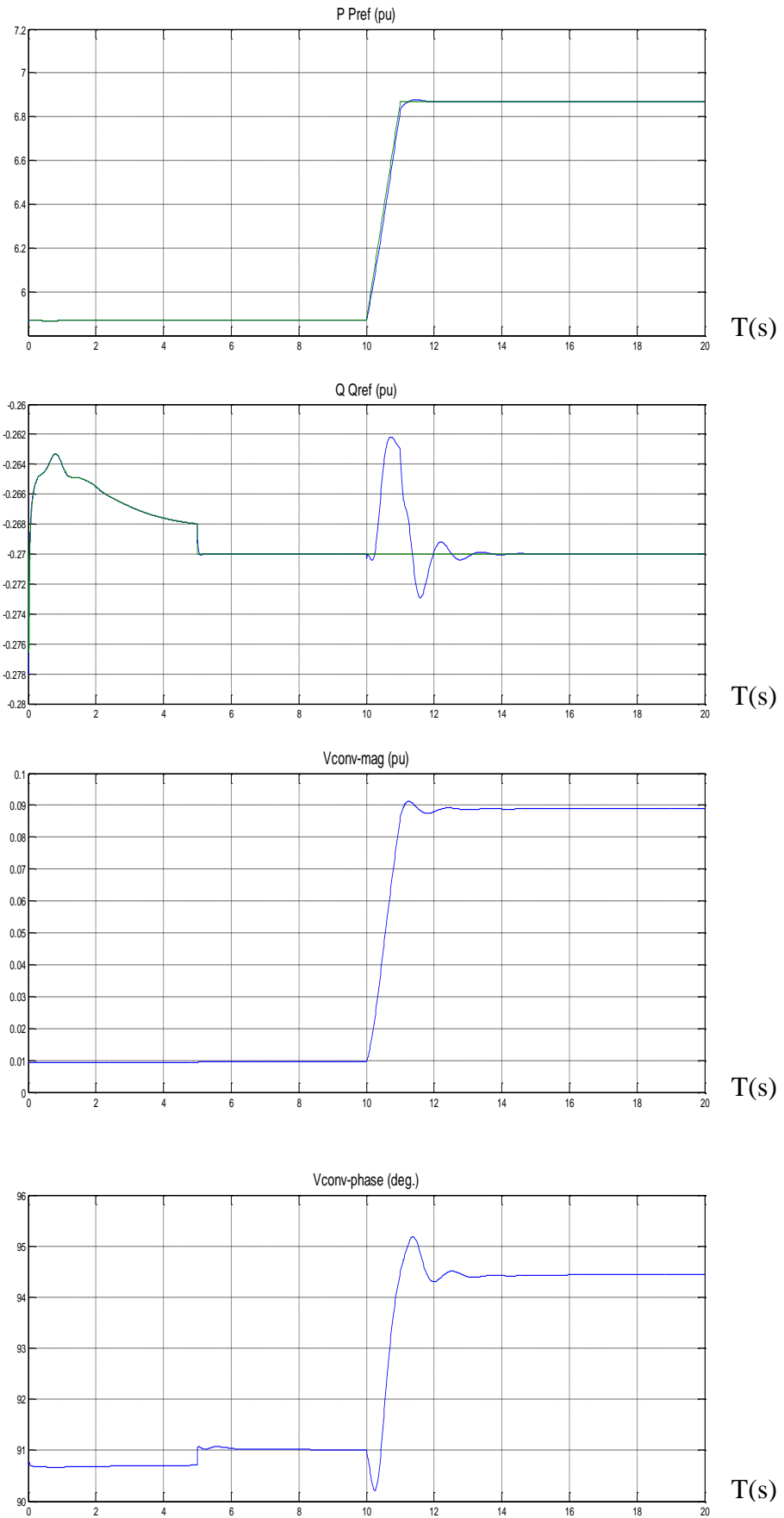


Figure (4-22) : Résultats des simulations pour le contrôle de la puissance dans la ligne

Nous remarquons que les puissances actives suivent leurs consignes, cela valide le bon fonctionnement des régulateurs de la partie série. Grâce aux régulateurs de la partie parallèle, la tension au point de raccordement ainsi que celle aux bornes du condensateur restent constantes. En effet, la partie parallèle injecte (ou consomme) de la puissance réactive de manière à ce que la tension du réseau reste constante

On peut conclure d'après les résultats obtenus que les systèmes de transmission flexibles en courant alternatif (FACTS) puissent contribuer à l'amélioration des indices de qualités d'énergie, par le choix efficace de l'emplacement et le contrôle flexible de leurs paramètres.

#### **IV.5. Conclusion**

La fonction objective a été analysée dans les simulations avec différentes combinaisons des dispositifs de FACTS. On a démontré que chaque dispositif peut influencer certaines parties de la fonction objective. SVC sont responsable des pièces traitant la tension.

L'UPFC est un dispositif puissant parmi les systèmes FACTS, dans ce chapitre nous avons vu ses caractéristiques. Nous avons également identifié les références du système de commande pour la partie parallèle et la partie série.

En conclusion, des simulations montrant les améliorations de la commande dérivée ont été présentées : des congestions ont été résolues, les profils de tension sont devenus plus équilibrés.

# *Conclusion Générale*

Après l'étude accomplie dans ce mémoire concernant la compensation dynamique dans les réseaux électriques on utilise des dispositifs FACTS, on peut conclure que l'intégration de cette nouvelle technologie (FACTS) dans la structure des réseaux électriques, permet le réglage des tensions, le contrôle du transit de la puissance active et réactive, ce qui permet une meilleure gestion de l'énergie et une amélioration des indices de qualité de l'énergie électrique.

On a démontré que chaque dispositif peut influencer certaines parties de la fonction objective. SVC sont responsables des pièces traitant la tension.

L'UPFC est un dispositif puissant parmi les systèmes FACTS, dans ce mémoire nous avons vu ses caractéristiques. Nous avons également identifié les références du système de commande pour la partie parallèle et la partie série.

Les résultats obtenus dans ce travail sous l'environnement (MATLAB), montrent clairement l'avantage d'intégrer des dispositifs, un contrôle flexible de l'énergie réactive est réalisé par un emplacement efficace du dispositif shunt SVC, et l'UPFC permet dans les deux cas d'améliorer les indices de qualité de l'énergie.

Comme perspective nous proposons à la nouvelle promotion d'élargir l'étude du problème de l'énergie réactive en utilisant l'autre dispositif FACTS.

## **BIBLIOGRAPHIE**

- [1] E. GH. Sahraki, "Apport de l'UPFC à l'Amélioration de La Stabilité Transitoire des Réseaux Electriques", Thèse de Doctorat Université de Henri Poincaré, Nancy-I, 13 Octobre 2003.
- [2] M. Crappe, "Commande et regulation des réseaux électriques", Lavoisier 2003.
- [3] J.M. Escane, " Réseaux d'énergie électrique – Modélisation : Lignes, Cables, Eyrolles", Paris 1997.
- [4] P. Bornard, M. Pavard, "Réseaux d'interconnexion et de transport : réglage et fonctionnement", Technique de l'ingénieur D 4 090, pp 1-23.
- [5] A. E. Hammad, Analysis of power system stability enhancement by Static Var Compensator, IEE transactions in power systems, VOL. PWRS-1, No. 4, pp. 222-227, November 1986.
- [6] Yvon Bésanger, Vers l'Amélioration de la Sécurité des Réseaux Electriques de Puissance, l'Institut National Polytechnique de Grenoble, Décembre 2006.
- [7] T. Allaoui, " Réglage Robuste de l'UPFC Pour Optimiser l'Écoulement des Puissances Dans Un Réseau Electrique", Thèse de magister, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, Avril 2002.
- [8] Delendi LOUARDI, Contrôle de l'Écoulement de Puissance Active par Systeme FACTS, Thèse de Magister, Université de Batna, 2009
- [9] A. A. Ladjici, A. Barar, "Introduction aux systèmes flexibles de transmission en courant alternatif FACTS ", Mémoire d'ingénieur, Ecole National Polytechnique, Alger, Juin 2002.
- [10] J. L. Thomas, " Les systèmes flexibles de transport et de distribution électrique FACTS", 10eme entretien Physique – industrie, Paris, 19 Octobre 2006.
- [11] L. Yacine, " Contribution à l'étude des systèmes de compensation FACTS pour l'amélioration de la stabilité des réseaux interconnectés", Thèse de magister, Université de Biskra, 2009.
- [12] L. Belkacem et Salem (Compensation dynamique de l'énergie reactive dans les réseaux électrique), Université de Biskra promotion juin 2005.
- [13] The Power System Tolbox, Environment MATLAB 6.5.

L'Annexe

**Annexe A:**

**-paramètre de ligne :**

Résistance  $R_0 = 0.01755 \Omega/\text{Km}$

Inductance  $L_0 = 0.8737e-3 \text{H} / \text{Km}$

Capacitance  $C_0 = 13.33e-9 \text{F}/\text{Km}$

Longueur de ligne  $L = 350 \text{Km}$

**Annexe B:**

**-Méthode de Newton Raphson**

Incorporation du SVC dans l'étude de la répartition des charges Le compensateur statique SVC, (modélisation mentionné auparavant), peut être représenté comme suit :

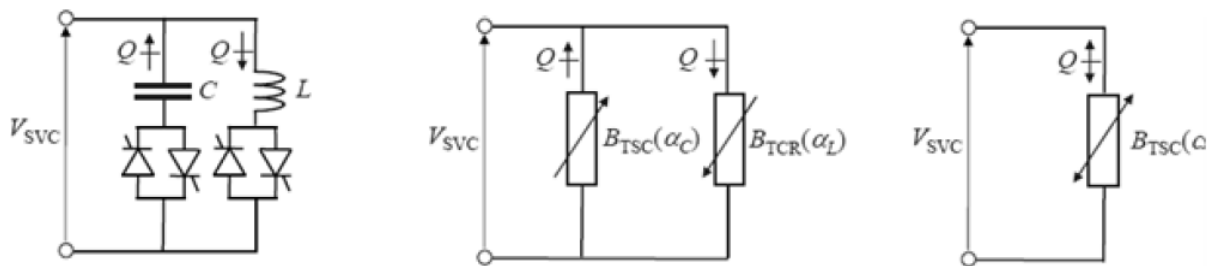


Figure: Le compensateur statique SVC

$$B_{\text{SVC}} = B_{\text{TSC}} - B_{\text{TCR}} = \frac{X_L - \frac{X_C}{\pi} [2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha]}{X_C X_L}$$

$$X_L = \omega L$$

$$X_C = \frac{1}{\omega C}$$

Le modèle du SVC peut être étendu en incluant la représentation explicite d'un transformateur abaisseur.

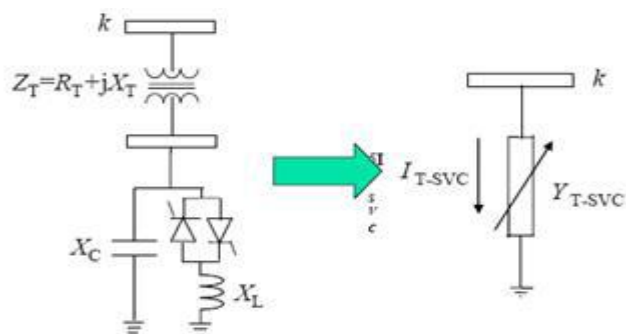


Figure: la représentation explicite d'un transformateur abaisseur

$$G_{T-SVC} = \frac{R_T}{R_T^2 + X_{Eq}^2}$$

$$B_{T-SVC} = -\frac{X_{Eq}}{R_T^2 + X_{Eq}^2}$$

$$X_{Eq} = X_T + X_{SVC}$$

$$X_{SVC} = \frac{X_C X_{TCR}}{X_C - X_{TCR}}$$

$$X_{TCR} = \frac{\pi X_L}{2(\pi - \alpha_{SVC}) + \sin(2\alpha_{SVC})}$$

$$Y_{T-SVC}(\alpha_{SVC}) = \frac{Y_T Y_{SVC}}{Y_T + Y_{SVC}} = G_{T-SVC} + jB_{T-SVC}$$

Dans les premiers modèles SVC pour analyser la répartition des charges, on a considéré les SVC comme « générateurs » derrière une réactance, la réactance faisant office de régulateur de tension. Mais ce modèle donne des résultats peut précis. Cette représentation SVC est très directe mais, peut ne pas être valide pour une utilisation en dehors des limites prévues.

Dans de tels cas, il devient nécessaire de changer la représentation du SVC par une réactance fixe donnée par :

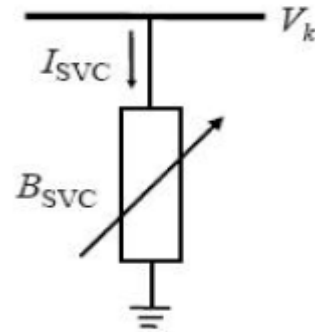
$$B_{SVC} = -\frac{Q_{lim}}{V_{SVC}^2}$$

Où :

$V_{SVC}$  est la nouvelle tension due à la limite Q<sub>lim</sub> de puissance qui est dépassée. La représentation de la combinaison « générateur-susceptance » donne des résultats précis.

En pratique un SVC peut être considéré comme une réactance ajustable (variable) avec, soit

des angles d'amorçage ou simplement des limites de réactance. Le circuit équivalent montré ci-dessous est utilisé pour dériver l'équation non linéaire de puissance et les équations linéarisées requises par la méthode de Newton Raphson :



En se référant à ce schéma la valeur du courant tirée par le SVC est :

$$I_{SVC} = jB_{SVC} V_k$$

Et la puissance réactive tirée par le SVC qui est également la puissance réactive injectée au noeud k est :

$$Q_{SVC} = Q_k = -V_k^2 B_{SVC}$$

L'équation linéarisée, où la susceptance équivalente  $B_{SVC}$  est considérée comme variable

d'état :

$$\begin{bmatrix} \Delta P_k \\ \Delta Q_k \end{bmatrix}^{(i)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & Q_k \end{bmatrix}^{(i)} \begin{bmatrix} \Delta \theta_k \\ \Delta B_{SVC} / B_{SVC} \end{bmatrix}^{(i)}$$

À la fin de l'itération (i), le nouveau shunt variable de la susceptance  $B_{SVC}$  est obtenu selon la formule suivante :

$$B_{SVC}^{(i)} = B_{SVC}^{(i-1)} + \left( \frac{\Delta B_{SVC}}{B_{SVC}} \right)^{(i)} B_{SVC}^{(i-1)}$$

Un autre modèle alternatif de SVC qui inclut le processus itératif additionnel consiste à prendre l'angle d'amorçage  $\alpha$  du TCR, comme une variable d'état dans la formulation du problème de la répartition des puissances. la variable  $\alpha$  sera désignée comme  $\alpha_{SVC}$  pour la différentiel de l'angle d'amorçage  $\alpha$  utilise dans le modèle TCSC. La séquence positive de susceptance du SVC est :

$$Q_k = -V_k^2 \left( \frac{X_L - \frac{X_C}{\pi} [2(\pi - \alpha_{SVC}) + \sin(2\alpha_{SVC})]}{X_C X_L} \right)$$

L'équation linéarisée du SVC est donnée comme suit :

$$\begin{bmatrix} \Delta P_k \\ \Delta Q_k \end{bmatrix}^{(i)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{2V_k^2}{\pi X_L} [\cos(2\alpha_{SVC}) - 1] \end{bmatrix}^{(i)} \begin{bmatrix} \Delta \theta_k \\ \Delta \alpha_{SVC} \end{bmatrix}^{(i)}$$

À la fin de l'itération (i) la nouvelle variable de l'angle d'amorçage  $\alpha_{SVC}$  est comme suit :

$$\alpha_{SVC}^{(i)} = \alpha_{SVC}^{(i-1)} + \Delta \alpha_{SVC}^{(i)}$$

Le noeud de connexion SVC est un noeud à tension contrôlée (*PV bus*) où l'amplitude de tension et les puissances active et réactive sont spécifiées alors que, soit l'angle d'amorçage  $\alpha$ SVC soit la susceptance équivalente *BSVC* sont présent comme variables d'état. Ce noeud est défini comme étant de type PVB. Si  $\alpha$ SVC ou *BSVC* sont dans leurs limites, l'amplitude de tension spécifiée est atteinte et le noeud contrôlé demeure PV. Cependant si  $\alpha$ SVC et *BSVC* vont en dehors de leurs limites, alors les variables seront fixées à la limite dépassée et leur noeud devient alors PQ.

### Annexe C:

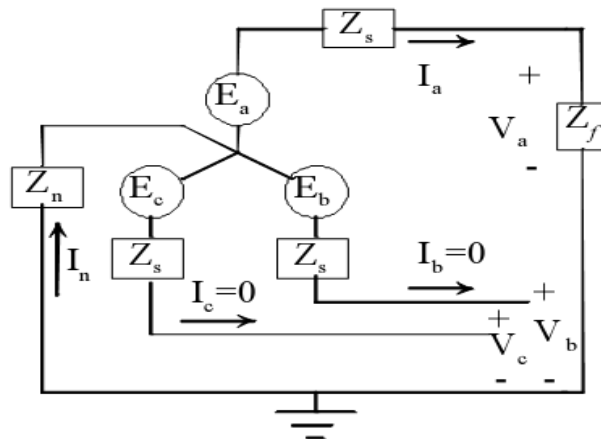
#### - Étude des courts-circuits

✓ Défaut linge-terre:

ce défaut est entre la phase « a » et la terre à travers l'impédance de défaut  $Z_f$ . On se pose que le générateur est initialement non chargé. Les conditions de frontières sont:

$$V_a = I_a Z_f$$

$$I_b = I_c = 0$$



Utilisant l'équation de courant dans les composants symétriques

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_0 \\ \bar{I}_d \\ \bar{I}_i \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Donc

$$I_0 = I_d = I_i = \frac{1}{3} I_a$$

La tension de phase « a » en terme de composants symétriques est

$$\begin{aligned} \bar{V}_a &= (\bar{V}_0 + \bar{V}_d + \bar{V}_i) = (-\bar{Z}_0 \bar{I}_0) + (\bar{E}_a - \bar{Z}_d \bar{I}_d) + (-\bar{I}_i) \\ &= \bar{E}_a - (\bar{Z}_0 + \bar{Z}_d + \bar{Z}_i) \bar{I}_0 \end{aligned}$$

Donc

$$\bar{V}_a = \bar{I}_a \bar{Z}_f = 3\bar{I}_0 \bar{Z}_f = \bar{E}_a - (\bar{Z}_0 + \bar{Z}_d + \bar{Z}_i) \bar{I}_0 \Rightarrow$$

$$\bar{I}_0 = \frac{\bar{E}_a}{3\bar{Z}_f + \bar{Z}_0 + \bar{Z}_d + \bar{Z}_i}$$

Et le courant de défaut est

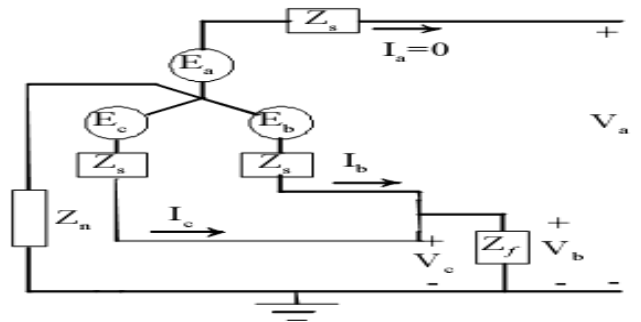
$$\bar{I}_a = 3\bar{I}_0 = \frac{3\bar{E}_a}{3\bar{Z}_f + \bar{Z}_0 + \bar{Z}_d + \bar{Z}_i}$$

✓ Défaut 2 lignes – terre

Le défaut est entre la phase « b », « c » et la terre. On se pose que le générateur est initialement non chargé .les conditions de frontières sont:

$$\bar{V}_b = \bar{V}_c = (\bar{I}_c + \bar{I}_b) \bar{Z}_f$$

$$\bar{I}_a = \bar{I}_0 + \bar{I}_d + \bar{I}_i = 0$$



$$\begin{aligned} \Rightarrow \bar{I}_d &= \bar{E}_a \frac{(\bar{Z}_i + 3\bar{Z}_f + \bar{Z}_0)}{\left( (3\bar{Z}_f + \bar{Z}_0)\bar{Z}_i + \bar{Z}_d(3\bar{Z}_f + \bar{Z}_0 + \bar{Z}_i) \right)} \\ &= \bar{E}_a \frac{1}{\frac{(3\bar{Z}_f + \bar{Z}_0)\bar{Z}_i}{(\bar{Z}_i + 3\bar{Z}_f + \bar{Z}_0)} + \bar{Z}_d} \end{aligned}$$

Si on observe les équations précédentes que l'impédance  $((3Z_f + Z_0) // Z_i)$  en série avec  $Z_d$

## Résumé

L'expansion continue des réseaux de transport d'énergie montre les limites des capacités de transit des systèmes existants. Les gestionnaires de réseaux sont contraints d'exploiter le système au plus près de ses limites thermiques et dynamiques, alors que les consommateurs sont de plus en plus exigeants quant à la qualité de l'énergie et la continuité de service. L'amélioration de la qualité de l'énergie, l'augmentation de la capacité de l'énergie, transitée et le contrôle des réseaux existants peuvent être obtenus grâce à la mise en place de nouvelles technologies. Les FACTS à base d'électronique de puissance apportent des solutions dynamiques, efficaces et prouvées à la conduite des réseaux. Certaines lignes situées sur des chemins privilégiés peuvent être surchargées. Dès lors, il est intéressant pour le gestionnaire du réseau de contrôler ces transits de puissance afin d'exploiter le réseau de manière plus efficace et plus sûre. La technologie FACTS est un moyen permettant de remplir cette fonction. Avec leur aptitude à modifier l'impédance apparente des lignes, les dispositifs FACTS peuvent être utilisés aussi bien pour le contrôle de la puissance active que pour celui de la puissance réactive ou de la tension. Plusieurs types de FACTS existent et le choix du dispositif approprié dépend des objectifs à atteindre. Dans ce projet, on va étudier la modélisation et l'intégration efficace des dispositifs de compensation dynamique (FACTS) pour l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique. Le premier chapitre : Nous avons donné dans ce chapitre généralité sur la compensation classique, les moyens de ce compensation et quelques définitions. Le deuxième chapitre : vise à introduire la nouvelle technologie basée sur l'électronique de puissance. Le troisième chapitre : Modélisation des dispositifs FACTS (SVC). Le quatrième chapitre : On a exposé en détails les résultats de simulation des dispositifs FACTS (SVC - UPFC) sous l'environnement MATLAB.

## Summary

The continued expansion of energy transmission networks shows the limits of transit capacities of existing systems. Network managers are forced to operate the system as close to its thermal limits and dynamic, while consumers are increasingly demanding in terms of power quality and continuity of service. Improving the quality of energy, increasing energy capacity, transited and control of existing networks can be achieved through the introduction of new technologies. FACTS-based power electronics provide dynamic solutions, and proven effective in the conduct of networks. Some lines on preferred paths can be overridden. Henceforth, it is interesting for the network manager to control the power flow to operate the network more efficient and safer. FACTS technology is a way to fulfill this function. With their ability to change the impedance of lines, FACTS devices can be used both to control active power than that of the reactive power or voltage. Several types of FACTS exist and the choice of appropriate device depends on the objectives. In this project we will study the modeling and the effective integration of dynamic compensation devices (FACTS) for improving power quality électrique. Le first chapter: We have given in this chapter on general compensation classic, the means of compensation and some définitions. Le second chapter: Aims to introduce new technology based on power electronics. Chapter Three: Modeling of FACTS devices (SVC).

The fourth chapter was explained in detail the results of simulation of FACTS devices (SVC - UPFC) under the MATLAB environment.

Le quatrième chapitre : On a exposé en détails les résultats de simulation des dispositifs FACTS (SVC - UPFC) sous l'environnement MATLAB.

## ملخص

إن استمرار التوسع في شبكات نقل الطاقة يبين حدود قدرات العبور من النظم القائمة. يتوجب لمديري الشبكة لتشغيل النظام وعلى مقربة من حدودها الحرارية والديناميكية، في حين أن المستهلكين يطالبون بصورة متزايدة من حيث الجودة وقوة استمرارية الخدمة. وتحسين نوعية الطاقة، وزيادة قدرتها، في حين لا يمكن تحقيق عبور ومراقبة الشبكات القائمة من خلال إدخال تكنولوجيات جديدة. والمعرفة بـ (FACTS) القائمة على توفير حلول ديناميكية، وأثبتت فعاليتها في إدارة الشبكات. بحيث يمكن لبعض الخطوط على المسارات المفضلة تجاوزها من الآن فصاعداً، من المثير للاهتمام لمدير الشبكة للتحكم في تدفق الطاقة لتشغيل الشبكة أكثر كفاءة وأكثر أماناً تكنولوجيا (FACTS) فهي وسيلة لتحقيق هذه المهمة، مع قدرتها على تغيير مقاومة الخطوط، ويمكن استخدام هذه الأجهزة على حد سواء للسيطرة على الطاقة الفعالة من ذلك بقوة رد الفعل أو الجهد. وهناك عدة أنواع من (FACTS)، واختيار الجهاز المناسب يعتمد على الأهداف. وسوف نقوم في هذا المشروع بدراسة النماذج والاندماج الفعلي لأجهزة التعويض الحيوي (FACTS) في الفصل الأول قمنا بدراسة التعويض بالطريقة الكلاسيكية، وبعض التعريفات وفي الفصل الثاني: يهدف إلى إدخال تكنولوجيا جديدة تقوم على الإلكترونيات والكهرباء. الفصل الثالث: نماذج من تكنولوجيا (FACTS) (SVC). وأوضح الفصل الرابع بالتفصيل نتائج محاكاة الأجهزة الحقائق (FACTS) (SVC - UPFC) باستخدام MATLAB.