

**République Algérienne Démocratique et Populaire**

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université Mouloud MAMMERY, Tizi-Ouzou**



**Faculté de Génie Electrique et d'Informatique  
Département d'Automatique**

**MEMOIRE DE FIN D'ETUDES**

En vue de l'obtention du diplôme

*de MASTER ACADEMIQUE EN AUTOMATIQUE  
OPTION : COMMANDE DES SYSTEMES*

*Thème*

**Gestion du Flux de puissance dans une  
ligne HT en utilisant un SSSC**

Proposé par : Mr Amar HAMACHE

Présenté par : KASDI Nassima

Dirigé par : Mr Amar HAMACHE

Soutenu le : / /2013

*Promotion 2013*

## **Résumé**

L'objectif de ce travail est de contrôler le transit de puissance dans un réseau électrique en utilisant un dispositif SSSC qui est un FACTS de type série. Cette solution moderne a fait l'objet d'une étude de l'écoulement de puissance par simulation en régime permanent suivie de la modélisation dynamique du dispositif, et enfin des simulations ont été faites dans le but de tester le système de commande utilisant des correcteurs retour d'état. Les résultats de simulation révèlent de bonnes performances dynamiques et un temps de réponse appréciable.

**Mots clés :** Réseau électrique, Load Flow, FACTS, SSSC, H.T, Réseau triphasé, Ligne électrique, Flux de puissance, Transformation de Park, Commande retour d'état.

## **Abstract**

The objective of this work is to control the power flow in an electric network using a SSSC device, which is a series FACTS device. This modern solution was the subject of the power flow survey by simulation in permanent regime followed by the dynamic modeling of the device and finally some simulations have been made in order to test the control system using some return of state controllers. The results of simulation reveal a good dynamic performances and a substantial response time.

**Key words:** Electric network, Load Flow, FACTS, SSSC, HT, Three- phase network, Electric line, Power Flow, Transformation of Park, Return of State.

## Remerciements

Je remercie en premier lieu notre Dieu le tout puissant pour la patience et l'effort qu'il m'a donné pour élaborer ce travail jusqu'au dernier moment.

Nous tenons d'abord à exprimer nos profondes reconnaissances et nos remerciements à notre promoteur Mr : Amar HAMACHE, enseignant à l'Automatique à l'Université de MOULOUD MAMMERI de TIZI OUZOU, pour sa disponibilité. Son rôle, ses critiques constructives, ses précieux conseils et ses propositions nous ont permis de mener à bien ce mémoire et toujours d'aller de l'avant.

Nous remercions aussi aux membres de jury, qui nous ont fait l'honneur d'être des examinateurs de notre mémoire, pour avoir consacré du temps pour lire, évaluer et examiner ce présent travail. Pour tout cela nous leur exprimons nos vives reconnaissances et nos estimations.

Nous remercions tous les enseignants qui ont participé à nos formations et toutes les personnes qui, de près ou de loin nous ont apportés leur soutien.



## Dédicaces

*A ce qui m'ont toujours bercé de l'amour et sans leurs soutiens, ce mémoire n'aurait jamais vu le jour, je vous dois beaucoup mes très chers parents.*

*Et toute ma famille*

*A tous mes amis*

**K.NASSIMA**



## Liste des symboles et abréviations

FACTS : Flexible Alternatif Curant Transmission Système.

THT: Très haute tension.

EPRI: Electric Power research Institutue.

IEEE: Institutue of Electrical and Electronics Enginners.

SVC: Static Var Compensateur.

TCBR: Thyristor Control Breaking Resistor.

STATCOM: Static Compensateur.

TCSC: Thyristor Controlled Series Capacitor.

TCPAR: Thyristor Controlled Phase Angle Regulator.

IGBT: Insulated Gate Bipolar Transistors.

IGCT: Insulated Gate GommutatedTyristors.

GTO: Gate Turn Off.

SSSC: Static Synchronous Series Compensateur.

DVR: Dynamic Voltage Restorer.

UPFC: Unified Power Flow Controller.

IPFC: Interline Power Flow Controller.

SMES: Superconducting Magnetic and Energy storage.

$V_s$  : Tension du jeu de barre de génération (sending voltage).

$V_r$  : Tension du jeu de barre de charge (receiving voltage).

$V_{ssc}$  : Tension injectée par le SSSC.

$P_r$  : Puissance active demandée par la charge.

$Q_r$  : Puissance réactive demandée par la charge.

$\delta$  : Angle de charge entre  $V_s$  et  $V_r$ .

$R$  : Résistance de la ligne de transport.

$X$  : Réactance de la ligne de transport.

$\theta$ :Déphasage du courant de ligne.

$V_{se}$  : Tension (série) injectée par le SSSC.

$I_{se}$  : Courant (série) injectée par le STATCOM

$U_{dc}$  : Tension-continu aux bornes du condensateur.

$I_{dc}$  : Courant dans le circuit continu.

$d$  (indice) : La composante sur l'axe  $d$  du repère  $d$ - $q$ .

$q$  (indice) : La composante sur l'axe  $q$  du repère  $d$ - $q$ .

$K$  : Matrice gain de pré-compensation statique.

$N$  : Matrice gain de pré-compensation statique.

$S$  : Opérateur de Laplace.

# SOMMAIRE

## Introduction générale

## Chapitre 1: Généralités sur les systèmes FACTS

Introduction .....	1
1.1 Structure générale des réseaux électriques.....	1
a) Production.....	2
b) Le transport.....	2
c) La distribution.....	2
d) la consommation.....	2
1.2 Problématiques de fonctionnement des réseaux électriques .....	3
1.3 Définitions des FACTS .....	3
1.4 Rôle des FACTS.....	4
1.5 Classifications des dispositifs FACTS .....	5
1.5.1 Compensateurs séries.....	5
1.5.2 Compensateurs shunt (parallèles) .....	5
1.5.3 Compensateurs hybrides série-shunt.....	6
1.6 Structures des principaux dispositifs FACTS .....	8
1.6.1 Contrôleurs séries .....	8
1.6.1.1 Condensateur série contrôlé par thyristors TCSR .....	8
1.6.1.2 Réactance Série contrôlée par thyristors .....	9
1.6.1.3 Compensateur statique série synchrone SSSC .....	9
1.6.2 Contrôleurs parallèles.....	10
1.6.2.1 SVC (Static Var compensateur) .....	10

1.6.2.2 STATCOM .....	11
1.6.2.3 SMES .....	12
1.6.3 Contrôleurs hybrides série-shunt .....	13
1.6.3.1 TCPAR .....	13
1.6.3.2 IPFC .....	14
1.6.3.3 UPFC .....	14
Conclusion.....	15

## **Chapitre 2: Modélisation du système : le SSSC**

Introduction .....	16
2.1 Structure de base d'un SSSC.....	16
2.2 Principe de fonctionnement d'un SSSC .....	17
2.3 Caractéristiques du SSSC.....	18
2.4 Modélisation du SSSC .....	18
2.5 Simulation de système en boucle ouverte .....	23
2.5.1 Résultats de simulation.....	24
Conclusion.....	24

## **Chapitre 3 : Commande du système :le SSSC**

Introduction .....	25
3.1 Cahier de charge.....	25
3.2 Synthèse de la commande par retour d'état .....	25
3.3 Simulation .....	27
a) Variation de puissance active .....	28
b) Variation de puissance réactive .....	29
c) Chute de tension de 70% coté récepteur à l'instant $t=1s$ .....	31
d) Variation du flux et chute de tension à $t=1s$ .....	32
e) Variation paramétrique sur la matrice d'état .....	33

3.3.1 Résultats de simulation.....	35
Conclusion.....	35

**Conclusion générale**

**Bibliographie**

**Annexes**

**Annexe A**

Transformation de Park.....	36
-----------------------------	----

**Annexe B**

Calcul les puissances .....	42
-----------------------------	----



# **Introduction générale**

# Introduction générale

---

## Introduction générale :

La consommation de l'énergie électrique est en hausse et progresse et cette tendance augmente avec l'industrialisation et la croissance de la population. Devant des consommateurs qui deviennent de plus en plus exigeants en voulant plus d'énergie et de meilleure qualité, les entreprises de production, transport et distribution de l'énergie électrique doivent donc assurer l'approvisionnement continu et régulier en électricité. Evidemment, cela est accompagné d'un développement continu du réseau qui devient de plus en plus complexe et difficile à contrôler. Ainsi à un réseau qui doit gérer de grandes quantités d'énergie électrique en l'absence de dispositifs de contrôle sophistiqués et adéquats, beaucoup de problèmes peuvent survenir entre autre la surcharge des lignes et l'encombrement des couloirs de servitude.

Le développement rapide de l'électronique de puissance a eu un effet considérable dans l'amélioration des conditions de fonctionnement des réseaux électriques en performant le contrôle de leurs paramètres par l'introduction des dispositifs de contrôle à base de valves de puissance commandables en ouverture et fermeture très avancés (GTO, IGBT). Ces dispositifs sont appelés FACTS (acronyme de Flexible Alternative Current Transmission Systems).

Notre projet porte principalement sur l'étude et la commande de l'un de ces dispositifs les plus performants à savoir le SSSC. Pour accomplir cette tâche, nous avons divisé notre travail en plusieurs chapitres.

Dans le premier chapitre, on exposera les principaux problèmes affectant les réseaux électriques et les solutions utilisées pour pallier à ces problèmes, on présentera les principaux dispositifs FACTS qui permettent une commande des flux de puissance et la compensation des chutes de tension dans les réseaux.

Dans le second chapitre, est décrit le fonctionnement du SSSC et est établi un modèle de celui-ci dans l'espace d'état. Ensuite, nous introduisons la transformation de Park qui permet de manipuler des grandeurs diphasées.

Dans le troisième chapitre, le réseau sera doté d'un dispositif FACTS de type SSSC. Après que son principe de fonctionnement aura été expliqué, Le SSSC sera modélisé en vue de sa commande. Le modèle établi dans l'espace de transfert servira à la synthèse de correcteurs classiques dans l'objectif de réguler le flux de puissance et remédier par conséquent au problème de surcharge des lignes.

## **Introduction générale**

---

Finalement, on terminera ce projet par une conclusion générale où sont résumés les résultats de notre travail et nous proposons les travaux à venir.

L'analyse de faisabilité et efficacité de l'utilisation de ce moyen moderne dans la gestion des flux de puissance dans les réseaux électriques sera faite sur la base des résultats de simulation.



# **Chapitre 1**

Généralités sur les  
systèmes FACTS

## **Introduction :**

De nos jours, avec la complexité et le développement des systèmes utilisant l'énergie électrique, il est nécessaire d'améliorer les réseaux électriques en matière de performances et de sécurité.

Les réseaux électriques subissent parfois des surcharges de lignes, entre les zones interconnectés, des problèmes de stabilité et de toute manière un accroissement des pertes. C'est dans ce nouveau contexte que les spécialistes des réseaux électriques se voient de plus en plus confrontés à de nombreux défis.

Face à ce problème et devant des contraintes environnementales, écologique et économique de reconstitution de nouvelles lignes, et dans le but de substituer aux moyens classiques, la compagnie américaine EPRI (Electric Power Research Institute) a lancé en 1988, un projet d'étude des système FACTS afin de mieux maîtriser le transit de puissance dans les lignes électriques et d'augmenter leurs capacités de transport.

Aujourd'hui la technologie des « FACTS » s'impose pour les systèmes énergétiques en augmentant et en contrôlant leurs capacités de transport, et assurer par conséquent suffisamment de flexibilité et stabilité au réseau dans le transport de l'énergie électrique.

Le développement des dispositifs FACTS (Flexible AC Transmission System) ouvre de nouvelles perspectives pour une meilleure exploitation des réseaux par leur action continue et rapide sur les différents paramètres du réseau.

## **1.1 Structure générale des réseaux électriques :**

Les réseaux de transport et d'interconnexion à très haute tension (THT) assurent la liaison entre les centrales de production et les consommateurs (zones industrielles, clients domestiques,...etc.). Ils permettent d'acheminer, là où elle est consommée, l'énergie aux couts les plus faibles.

De façon très générique, un réseau électrique est toujours dissocié en quatre grandes parties :

### **a) La production :**

Elle consiste en la génération de l'ensemble de la puissance active consommée par le réseau tout entier. En grande majorité, les tensions associées à cette production sont produites

sous la forme de systèmes triphasés par l'intermédiaire d'alternateurs entraînés à partir de divers types de sources d'énergie dites « primaires ». [1]Cas de l'Algérie (gaz naturel méthane).

### **b) Le transport :**

Il consiste à acheminer les puissances produites par les unités de production auprès des lieux de consommation. Les grandes centrales étant en général groupées autour des fleuves, des cours d'eau et des océans, le « grand transport » consiste à parcourir de longues distances en direction des extrémités des territoires nationaux. L'ordre de grandeur de ces distances impose, entre autre, le fait de véhiculer l'énergie électrique sous très haute tension. [1]

### **c) La distribution :**

Elle consiste en un maillage fin du territoire permettant à chaque utilisateur d'être à proximité d'une liaison au réseau. C'est l'ultime ramification des lignes et des installations qui permet également un passage progressif des très hautes tensions du transport aux basses tensions de la consommation. [1]

### **d) La consommation :**

Chaque récepteur électrique connecté au réseau consomme une puissance active et une puissance réactive. La consommation domestique, qui est généralement majoritaire, est très ramifiée et se fait sous basse tension souvent monophasée (100 à 250 V). Certains clients industriels (grosses usines, ferroviaire, etc.) sont directement reliés en moyenne, haute ou très haute tension. [1]

La figure suivante illustre les grandes parties du réseau électrique :

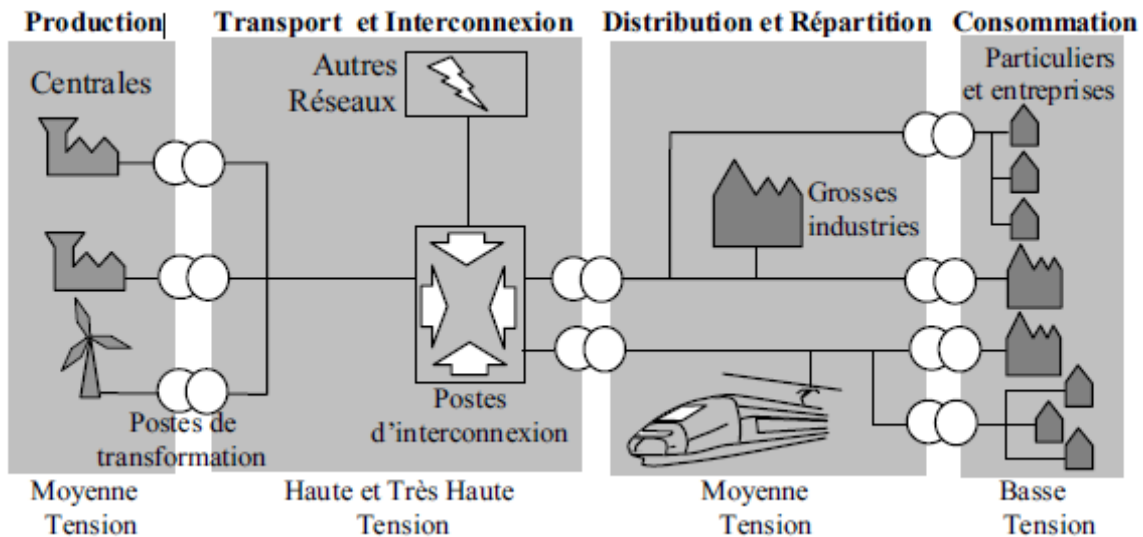


Figure 1.1 : réseau électrique simplifié

### 1.2 Problématique de fonctionnement des réseaux électriques :

L'écoulement de charges (Load Flow, en anglais, en littérature anglo-saxonne) est l'un des principaux problèmes auxquels sont confrontés les gestionnaires d'un système de production-transport d'énergie électrique. Dans tout ensemble de centrales électriques alimentant un ensemble de consommateurs par l'intermédiaire d'un réseau de transport par essence maillé, on doit déterminer la répartition des puissances en régime permanent (>300 sec) tout en respectant un ensemble de contraintes techniques et /ou économiques.[2]

La résolution du problème de Load Flow, nous permettra de déterminer les valeurs, en chaque nœud (jeu de barres THT), des phaseurs de tension (module et phase) du réseau pour un point de fonctionnement donné. Ce qui nous permettra par conséquent de calculer les puissances transitées, générées et dissipées dans les lignes.

### 1.3 Définitions des FACTS :

FACTS est l'abréviation de « Flexible AC Transmission Systems ».

Selon l'IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), la définition du terme FACTS est la suivante: Systèmes de Transmission en Courant Alternatif comprenant des dispositifs basés sur l'électronique de puissance et d'autres dispositifs statique utilisés pour accroître la contrôlabilité et augmenter la capacité de transfert de puissance du réseau. Avec leurs aptitudes à modifier les caractéristiques apparentes des lignes, les dispositifs FACTS ne

remplacent pas la construction de nouvelles lignes sont un moyen de différer les investissements en permettant une utilisation plus efficace du Réseau existant. [2]

La technologie des FACTS regroupe une collection de dispositifs à base de l'électronique de puissance implantés dans les réseaux électriques afin de mieux contrôler le flux de puissance et augmenter la capacité de transit de leurs lignes par action de contrôle rapide de ces systèmes sur l'ensemble des paramètres du réseau: tension, impédance, déphasage...etc. Ils permettent ainsi d'améliorer les marges de stabilité et assurer une meilleure flexibilité au transport d'énergie.

### 1.4 Rôle des FACTS :

Le développement des dispositifs FACTS est essentiellement du aux progrès réalisées dans le domaine des semi-conducteurs de puissances et plus particulièrement des éléments commandables en ouverture /fermeture telle thyristor GTO et le transistor IGBT. Les FACTS représentent une alternative aux dispositifs de réglages de puissance utilisant des techniques passives : bobine d'induction et condensateur déclenchés par disjoncteur, transformateur déphaseur à régleur en charge mécanique, etc. Dans les dispositifs FACTS, les interrupteurs électromécaniques sont remplacés par des interrupteurs électroniques. Ils disposent ainsi d'une vitesse de commande et ne rencontrent pas de problèmes d'usure de leurs prédécesseurs. De ce fait, les FACTS possèdent une très grande fiabilité et une flexibilité pratiquement sans limite. En régime permanent, les FACTS sont utilisés principalement dans le cas de contrôle des transits de puissances de manière à réduire, voir supprimer, les surcharges dans les lignes et dans le cas d'amélioration du plan de tension global du réseau.[7]

Dans un réseau électrique, les FACTS permettent de remplir des fonctions tant en régime stationnaire qu'en régime transitoire. Ils agissent généralement en absorbant ou en fournissant de la puissance réactive, en contrôlant l'impédance des lignes ou en modifiant les angles des phaseurs de tension. Les dispositifs FACTS sont insérés dans un réseau pour satisfaire plusieurs besoins tels que : [7]

- Améliorer le contrôle de la tension et la stabilité du réseau.
- Réduire des pertes actives totales.
- Compenser l'énergie réactive.
- Amortir les oscillations de puissance.
- Augmenter la capacité de transport de la puissance active.
- Maîtriser la répartition et les transits des puissances.

- Améliorer des oscillations de puissance et de tension susceptibles d'apparaître dans Les réseaux à la suite d'un défaut.
- Améliorer la stabilité électromécanique des groupes de production.
- permettre un meilleur contrôle et une meilleure gestion de l'écoulement de Puissance.
- augmenter la capacité de transmission de puissance des lignes en s'approchant des Limites thermiques de celle-ci.

### 1.5 Classification des dispositifs FACTS :

Depuis les premiers compensateurs, trois générations de dispositifs FACTS ont vu le jour. Elles se distinguent par la technologie des semi-conducteurs et des éléments de puissance Utilisés. [2]

- La première génération est basée sur les thyristors classiques. Ceux-ci sont généralement utilisés pour enclencher ou déclencher les composants afin de fournir ou absorber de la puissance réactive dans les transformateurs de réglage. [2]
- La deuxième génération, dite avancée, est née avec l'avènement des semi-conducteurs de puissance commandables à la fermeture et à l'ouverture, comme le thyristor GTO. Ces éléments sont assemblés pour former les convertisseurs de tension ou de courant afin d'injecter des tensions contrôlables dans le réseau. [2]
- Une troisième génération de FACTS utilisant des composants hybrides et qui est adaptée à chaque cas. Contrairement aux deux premières générations, celle-ci n'utilise pas de dispositifs auxiliaires encombrants tels que des transformateurs pour le couplage avec le réseau. [2]
- Dans notre proposition, une autre classification des contrôleurs FACTS basée sur les cinq caractéristiques indépendantes. [2]

1. Selon le type de Raccordement sur le réseau (Connexion).

2. Selon le mode de Commutation.

3. Selon la Fréquences de Commutation.

4. Selon le mode de Stockage d'énergie.

5. Selon le mode de Connexion au Port DC.

Selon ces critères, trois familles de dispositifs FACTS peuvent être mises en évidence :

- Les dispositifs shunt connectés en parallèle dans les postes du réseau.
- Les dispositifs séries insérés en série avec les lignes de transport.

- Les dispositifs combinés série-parallèle qui recourent simultanément aux deux couplages

Les systèmes de transport à courant alternatif (FACTS) traduisent un concept qui regroupe tous les dispositifs à base d'électronique de puissance permettant d'améliorer l'exploitation des réseaux électriques. La technologie de ces systèmes (interrupteurs statiques) leurs assure une vitesse très élevée relativement aux systèmes électromécaniques classiques.

L'intérêt de ces systèmes n'est pas réduit au contrôle de l'écoulement de puissance dans les réseaux électriques mais aussi de l'augmentation de la capacité effective de transport jusqu'aux limites thermiques des liaisons tout en maintenant voire améliorant la stabilité des réseaux électriques. [2]

En général, les FACTS sont divisés en trois grandes catégories :

- a) parallèles
- b) séries
- c) hybrides

### 1.5.1 Compensateurs séries :

Ces FACTS sont connectés en série avec le réseau peuvent être utilisés comme une impédance variable (inductive, capacitive) ou une source de tension variable. Utilisés pour la compensation série de la puissance réactive et par leur influence sur l'impédance effective des lignes ils interviennent dans le contrôle du flux de puissance et la stabilité de ce dernier. La puissance active échangée entre deux systèmes peut être augmentée si l'on réduit l'impédance de la liaison. C'est ce que réalise la compensation série. En général, ces compensateurs modifient l'impédance des lignes de transport en insérant des éléments en série avec celles-ci. [9]

### 1.5.2 Compensateurs shunts (parallèles):

Ils consistent en une impédance variable, source variable ou une combinaison des deux. Ils injectent un courant dans le réseau via le point de connexion pour principalement la compensation de la puissance réactive et par voie de conséquence le contrôle de la tension.

L'avantage de ce dispositif est de pouvoir échanger de l'énergie de nature inductive ou capacitive uniquement à l'aide d'une inductance. Il n'y a pas d'élément capacitif qui puisse provoquer des résonances avec des éléments inductifs du réseau. [9]

### 1.5.3 Compensateurs hybrides série-shunt :

Les dispositifs FACTS présentés précédemment permettent d'agir uniquement sur un des trois paramètres déterminant la puissance transmise dans une ligne (tension, impédance et angle). Par une combinaison des deux types de dispositifs (shunts et séries) commandé d'une manière coordonnée afin d'accomplir prédéfini, il est possible d'obtenir des dispositifs hybrides capables de contrôler simultanément les différentes variables précitées. Ils servent à contrôler le flux de puissance active et réactive, la tension et l'angle de transport de l'énergie. Ils permettent un contrôle multi variables. [9]

Les différents types de FACTS sont exposés à la figure suivante :

Le tableau de la figure 1.2 représente les grandes catégories des dispositifs de contrôle des réseaux électriques ; la colonne sur la gauche contient les systèmes conventionnels constitués de composant de bas RLC et transformateurs fixes (compensation fixe) ou variable commandés par des interrupteurs statiques et convertisseurs de l'électronique de puissance.

La colonne gauche des systèmes FACTS présente les contrôleurs à base des thyristors ou bien à des convertisseurs à thyristor tel que SVC et le TCSC qui sont connus depuis plusieurs dizaines d'années à titre de compensateurs shunt et série respectivement et qui ont prouvé leur fiabilité dans le contrôle des réseaux. [9]

Les dispositifs dans la colonne de droite sont la technologie la plus avancée des FACTS avec des convertisseurs de sources de tension à base des interrupteurs statiques sophistiqués IGBT (Insulated Gate Comutated tyristors) tel que STATCOM , le SSSC et L'UPFC .Ces convertisseurs de source de tension fournissent ou injectent une tension totalement contrôlable en amplitude et en phase en série ou en parallèle dans le réseau selon les exigences de contrôle en exerçant une MLI sur les gâchettes des interrupteurs de ces convertisseurs. Chaque élément de ces colonnes peut être structure selon la connexion de réseau. [9]

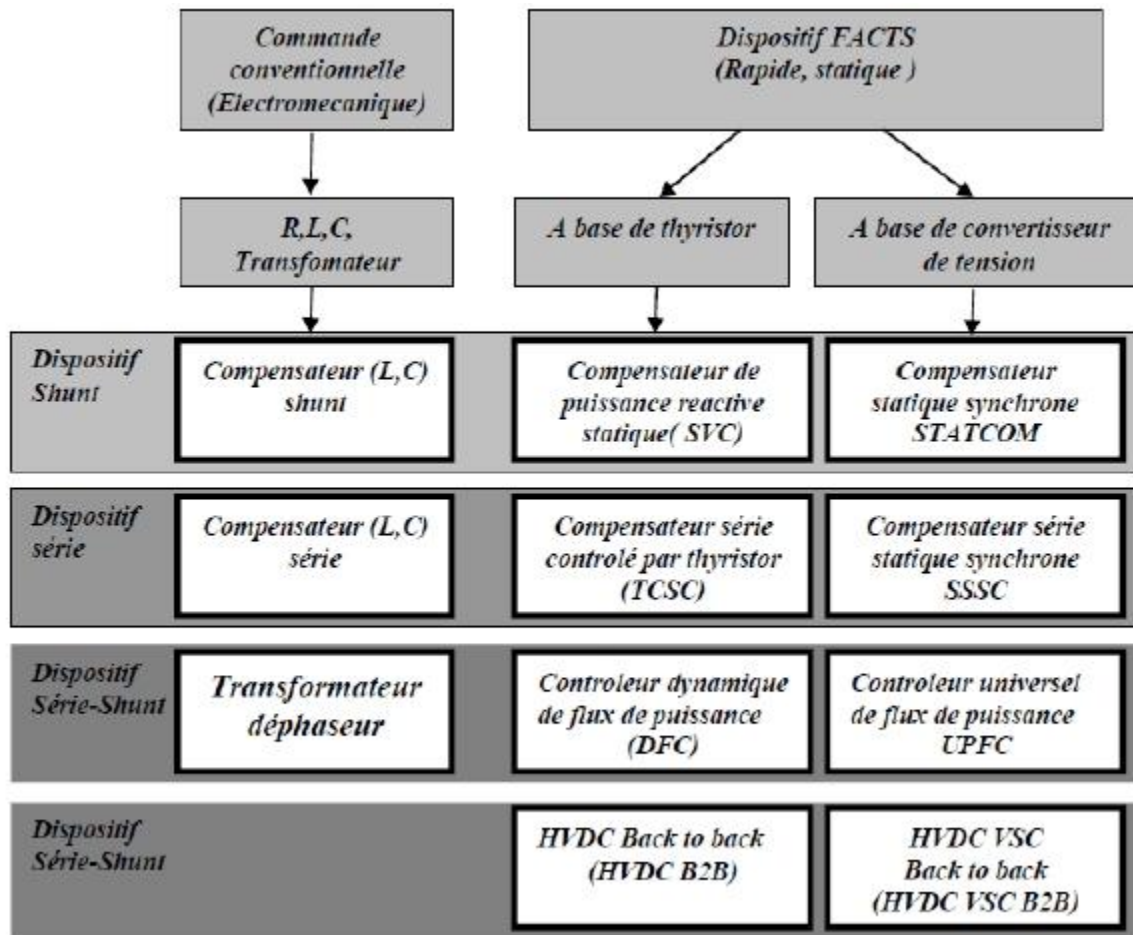


Figure1.2 : Types des FACTS

1.6 Structure des principaux dispositifs FACTS :

1.6.1 Contrôleurs Séries :

1.6.1.1 Condensateur série contrôlé par thyristors TCSC :

Le TCSC fait partie des condensateurs séries à qui ont été utilisés avec succès pendant de nombreuses années pour améliorer la stabilité et les capacités de charge des réseaux de transport haute tension. La figure 1.3 donne la configuration d'un TCSC. Il travaille par l'insertion de la tension capacitive pour compenser la chute de tension inductive sur les lignes de transport. [10]

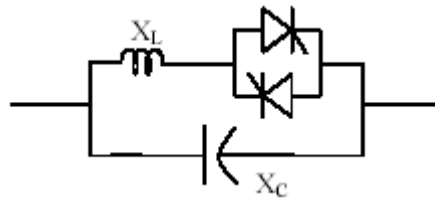


Figure1.3 : Schéma du TCSC

**1.6.1.2 Réactance série contrôlée par thyristors TCSR :**

Le TCSR est un compensateur inductif qui se compose d'une inductance en parallèle avec une autre inductance commandée par thyristors afin de fournir une réactance inductive série variable. Lorsque l'angle d'amorçage du réacteur commandé par thyristors est de 180 degrés, il cesse de conduire, et la réactance non contrôlable  $X_1$  agit comme un limiteur de courant de défaut. Pendant que l'angle d'amorçage diminue en dessous de 180 degrés, la réactance équivalente diminue jusqu'à l'angle de 90 degrés, où elle est la combinaison parallèle de deux réactances. [10]

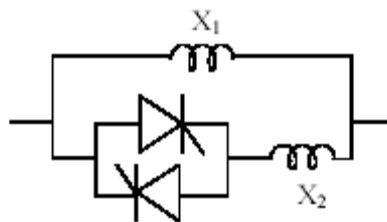


Figure1.4 : Schéma du TCSR

**1.6.1.3 Compensateur statique série synchrone SSSC :**

Le SSSC est constitué d'un convertisseur statique avec une source d'énergie qui est connecté en série avec la ligne de transport à travers un transformateur de tension comme montré à la figure 1.5. Le SSSC injecte en série une tension alternative avec une amplitude et un angle de phase réglable dans la ligne de transport à l'aide d'un transformateur série. Le SSSC peut produire ou absorber de la puissance réactive suivant la commande de convertisseur statique. [10]

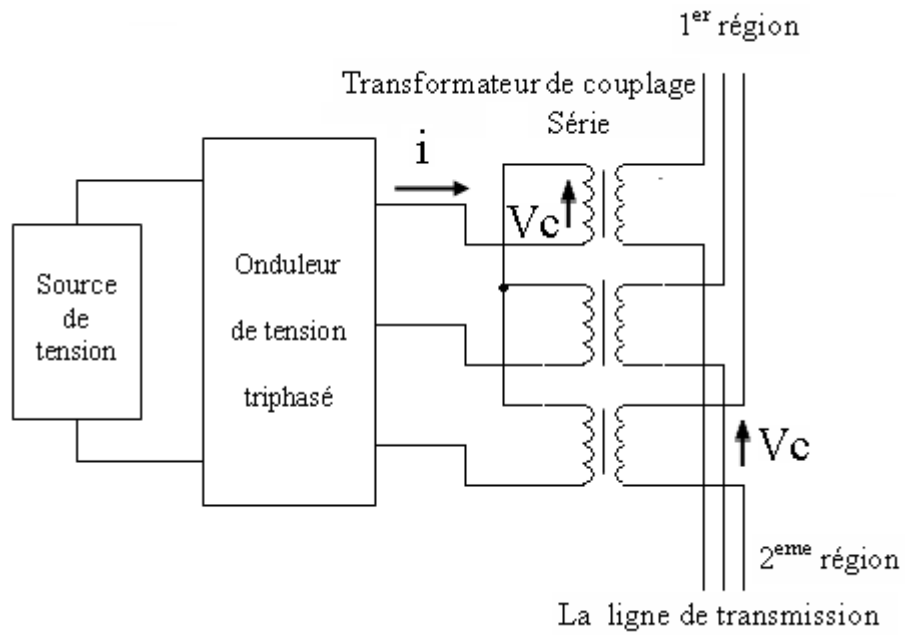


Figure I.5 : Schéma de SSSC

1.6.2 Contrôleurs parallèles :

1.6.2.1 SVC : (Static Var Compensator)

Le compensateur statique de puissance réactive SVC rend possible le contrôle rapide de La tension. Figure 1.6 ci- dessous indique le schéma d'un tel dispositif. [10]

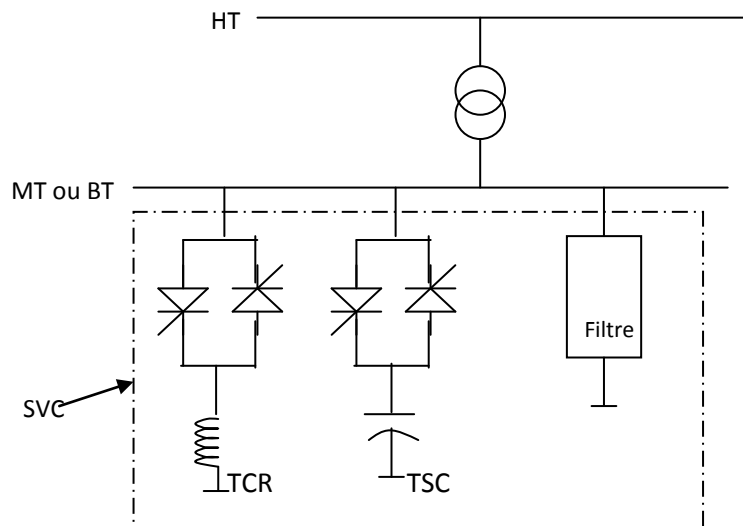
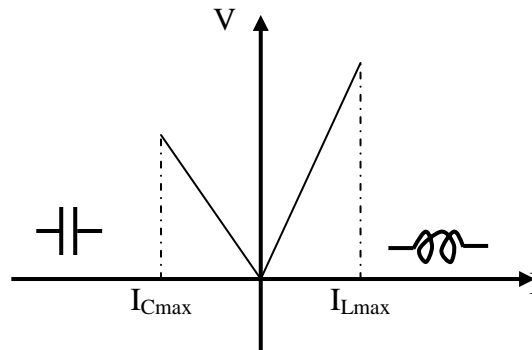


Figure 1.6 : Schéma du SVC

Le SVC est l'association d'une inductance commandée par thyristor (Thyristor-Controlled Reactor : TCR), d'un condensateur commuté par thyristor (Thyristor-Switched Capacitor : TSC) et d'un filtre d'harmoniques. La caractéristique statique de ce type de FACTS est donnée par la figure 1.7. [10]



**Figure 1.7 :** Caractéristique du SVC

$I_{Cmax}$  et  $I_{Lmax}$  sont les courants limites que peuvent supporter respectivement le TCR et le TSC.

**1.6.2.2 STATCOM :(Static Compensator)**

Le compensateur statique synchrone STATCOM est constitué d'un convertisseur à source de tension, d'un transformateur de couplage et de circuit de commande. Dans cette application, la source d'énergie DC peut être remplacée par un condensateur C, de sorte que l'échange d'énergie en régime permanent entre le compensateur statique et le réseau soit uniquement réactif, comme illustré par la figure 1.8 où  $I_q$  est le courant de sortie du convertisseur, perpendiculaire à la tension du convertisseur  $V_i$ . L'amplitude de la tension de convertisseur et la sortie réactive du convertisseur sont réglables. Si  $V_i$  est supérieure à la tension  $V_t$  du réseau le compensateur statique fournit de la puissance réactive au système, si  $V_i$  est inférieure à  $V_t$  le compensateur statique absorbe de la puissance réactive. [10]

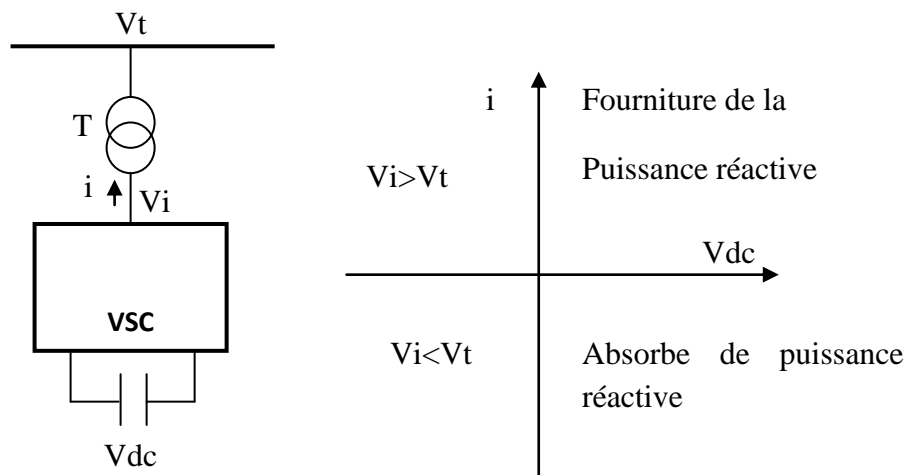


Figure 1.8 : Schéma du STATCOM

1.6.2.3 SMES :(Superconducting Magnetic Energy Storage)

La figure 1.9 ci-dessous donne le schéma de principe d'un tel dispositif. Dont la bobine supraconductrice ne présente aucune résistance : tout courant qui y est induit, en appliquant par exemple une tension à ses bornes puis en la court-circuitant, va se maintenir jusqu'à ce qu'une tension de polarité inverse soit appliquée ou qu'une résistance soit introduite dans le circuit pour la décharger. Si l'inductance de la bobine est  $L_{sm}$ , elle accumulera une énergie  $W_{sm}$  et se charge conformément aux équations (1) et (2) :

$$W_{sm} = \frac{1}{2} L_{sm} I_{sm}^2 \tag{1}$$

$$V_{sm} = L_{sm} \frac{dI_{sm}}{dt} \tag{2}$$

$I_{sm}$  et  $V_{sm}$  sont respectivement le courant de charge et la tension aux bornes de la bobine. L'association d'une bobine supraconductrice utilisée comme accumulateur magnétique supraconducteur d'énergie et d'un convertisseur à commutation forcée de grande puissance constitue le SMES. Les échanges de puissances active et réactive entre la bobine supraconductrice et le réseau électrique à travers le convertisseur convenablement commandé font que le SMES réalise les deux fonctions de régulation, à savoir la régulation de vitesse et celle de tension. [10]

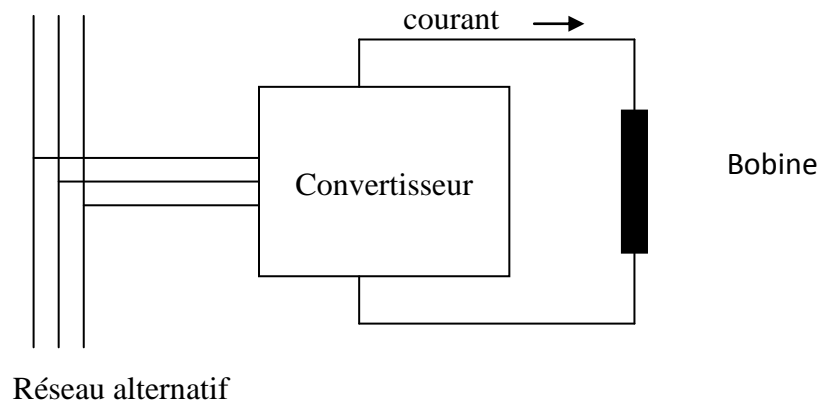


Figure 1.9 : Schéma du SMES

1.6.3 Contrôleurs hybride série-shunt :

1.6.3.1 TCPAR :(Thyristor Controlled Phase Angle Regulateur)

La figure 1.10 montre le schéma du TCPAR (Thyristor Controlled Phase Angle Regulator).

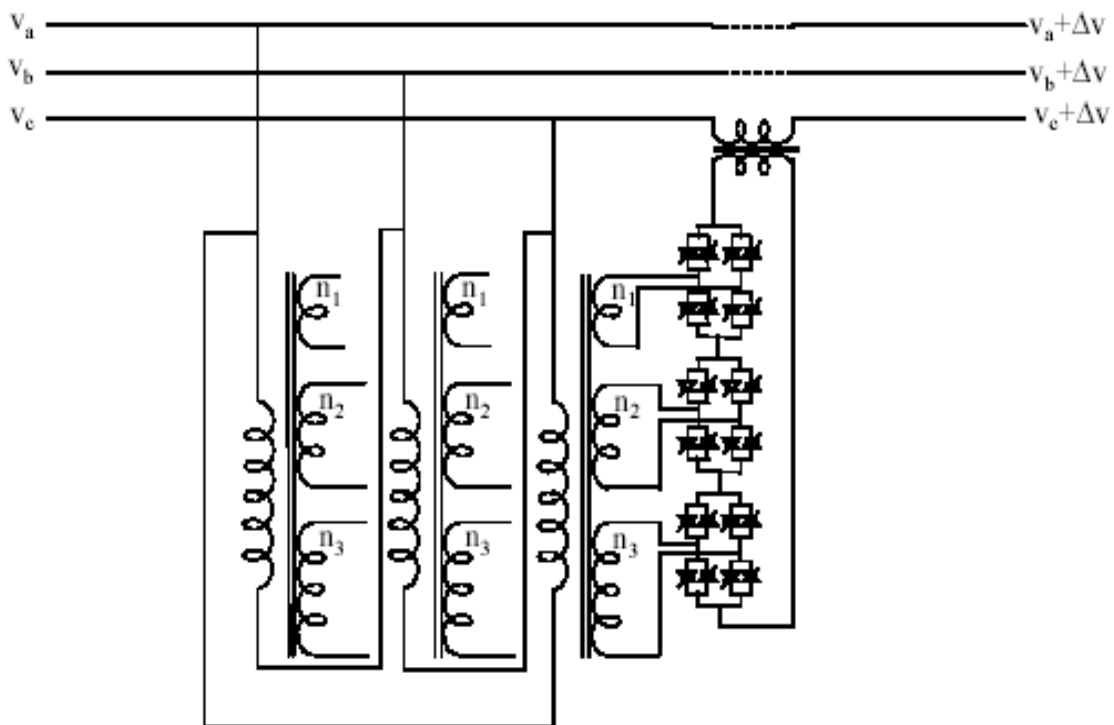


Figure 1.10 : Schéma du TCPAR

C'est un transformateur déphaseur à base de thyristors. Ce dispositif a été créé pour remplacer les déphaseurs à transformateurs à réglage en charge (LTC ; Load Tap Changer) qui sont commandés mécaniquement. Il est constitué de deux transformateurs, l'un est branché en série avec la ligne et l'autre en parallèle. Ce dernier possède différents rapports de transformation ( $n_1$ ,  $n_2$ ,  $n_3$ ). Ces deux transformateurs sont reliés par l'intermédiaire des thyristors. Son principe de fonctionnement est d'injecter, sur les trois phases de la ligne de transmission, une tension en quadrature avec la tension à déphaser. Il a l'avantage de ne pas générer d'harmoniques car les thyristors sont commandés en interrupteurs en pleine conduction. Par contre comme le déphasage n'a pas une variation continue, il est nécessaire d'y adjoindre un compensateur shunt, ce qui entraîne des surcoûts d'installation. L'amplitude de la tension injectée est une combinaison des secondaires du transformateur parallèle dont les rapports de transformation sont  $n_1$ ,  $n_2$ ,  $n_3$ . [10]

### 1.6.3.2 IPFC :( Interligne Power Flow Contrôleur)

C'est un contrôleur de charge interligne (Interligne Power Flow Contrôleur). La figure 1.11 représente le schéma d'un tel dispositif. [10], IPFC est une association de contrôleurs séries dans les lignes différentes. Il utilise des convertisseurs DC-AC placés en série avec la ligne à compenser. En d'autres termes, L'IPFC comporte un certain nombre de SSSC. On peut l'utiliser afin de former des changements de puissance entre les lignes du réseau.

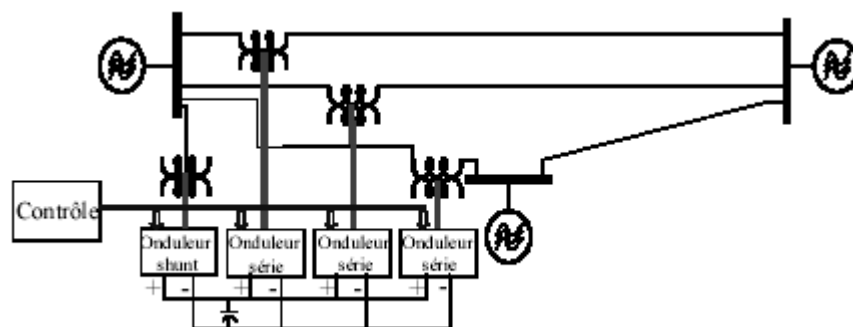
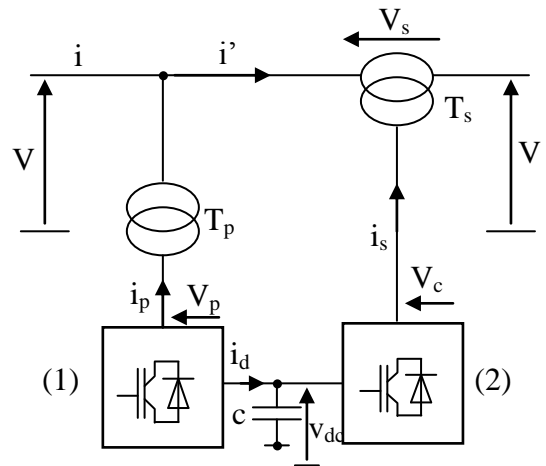


Figure 1.11: Schéma de l'IPFC

### 1.6.3.3 UPFC :( Unified Power Flow Controller)

La configuration de l'UPFC, donnée par la figure 1.12 ci-dessous, peut faire varier la puissance active et réactive circulant sur une ligne à haute tension. L'onduleur (1), onduleur parallèle, connecté à la ligne par le transformateur ( $T_p$ ) fonctionnant comme un redresseur

quatre quadrants maintient la tension  $V_{dc}$  fixe sur le condensateur tampon (C). Un deuxième onduleur (2), onduleur série, connecté au réseau par le transformateur ( $T_s$ ) et alimenté par la tension  $V_{dc}$  permet d'injecter une tension en série  $V_s$  sur le réseau. Cette tension additionnelle  $V_s$  étant variable en module et en phase, il est possible de varier la tension  $V'$ . Ainsi on peut modifier statiquement le flux des puissances active et réactive transmise sur la ligne. [10]



**Figure 1.12 :** Schéma d'un variateur de charge universel

## Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons donné une vue global sur les nouveaux dispositifs de contrôle et de commande des réseaux électriques appelés FACTS d'une structure principalement à base d'onduleurs conçus avec les interrupteurs très avancés caractérisés par un temps de réaction très court qui permet une flexibilité du courant transité.

Nous avons présenté une définition et une classification des divers types de contrôleurs FACTS comme le SVC, STATCOM, TCSC, SSSC, UPFC, IPFC. Cette classification universelle des systèmes FACTS. La plupart sont déjà en service dans la pratique.

Nous avons choisi d'étudier le SSSC comme dispositifs FACTS pour contrôler et améliorer le flux des puissances active et réactive dans un réseau de transport d'énergie électrique.



# **Chapitre 2**

Modélisation du système :  
le SSSC

**Introduction :**

Le SSSC est l'un des dispositifs FACTS les plus flexibles et les plus performants pour le contrôle et l'optimisation des réseaux électriques. L'objectif de l'installation d'un SSSC sur une ligne de Transmission, pour cette étude, est le traitement de la qualité d'énergie électrique dans le cas de la stabilité de la tension. 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. Il donne la possibilité de contrôler la puissance active qui transite dans la ligne, en contrôlant leurs capacités de transport, et assurer par conséquent suffisamment de flexibilité et stabilité au réseau dans le transport de l'énergie électrique.

Dans le présent chapitre, il sera exposé la structure de base d'un SSSC, son principe de fonctionnement avec le réseau électrique associé, sa conception, le modèle mathématique, l'identification des références et les schémas de commande.

Il sera donné dans ce chapitre, un aperçu sur les applications des FACTS, en particulier le SSSC. Bien que théoriquement possible, un modèle qui décrit tous les phénomènes apparaissant dans un système électrique n'offre pas plus d'avantages qu'un modèle simplifié.

**2.1 Structure de base d'un SSSC: (*Static synchronous series compensator*)**

Ce type de compensateur série est le plus important des dispositifs FACTS, il est constitué d'un onduleur triphasé couplé en série avec la ligne électrique à l'aide d'un transformateur. Son rôle est d'introduire une tension triphasée, à la fréquence fondamentale du réseau, en série avec la ligne de transport. Cette tension est en quadrature avec le courant de ligne. Nous pouvons, dans ce cas, régler continuellement la valeur apparente de la capacité ou de l'inductance ainsi introduite dans la ligne. Mais avec une tension de sortie injectée en série dans la ligne, ce dispositif appelé aussi DVR (*Dynamic Voltage Restorer*) est utilisé généralement dans les réseaux de distribution afin de résoudre les problèmes de qualité d'énergie telle que les creux de tension et maintenir ces dernières à des niveaux constants. [11]

2.2 Principe de fonctionnement d'un SSSC:

Le SSSC délivre une tension triphasée  $V_{se}$ , à la fréquence du réseau, commandable en amplitude et en phase afin d'augmenter ou de diminuer la tension à travers la ligne représentée par son impédance inductive selon le mode de compensation capacitif ou inductif respectivement, **mais comme l'impédance de la ligne ne varie pas réellement, c'est le courant dans la ligne qui sera affecté par cette variation et par conséquent les puissances correspondantes.**[5]

Idéalement, la tension est en quadrature avec le courant de la ligne, ce qui fait qu'aucun échange de la puissance active ne peut avoir lieu entre le réseau et le SSSC. Pratiquement il y a toujours une petite composante de cette tension  $V_{sed}$  en phase avec le courant  $I_l$  qui génère une petite quantité de la puissance active pour couvrir les pertes dans le convertisseur. [9]

Le principe de fonctionnement du SSSC est représenté à la figure suivante :

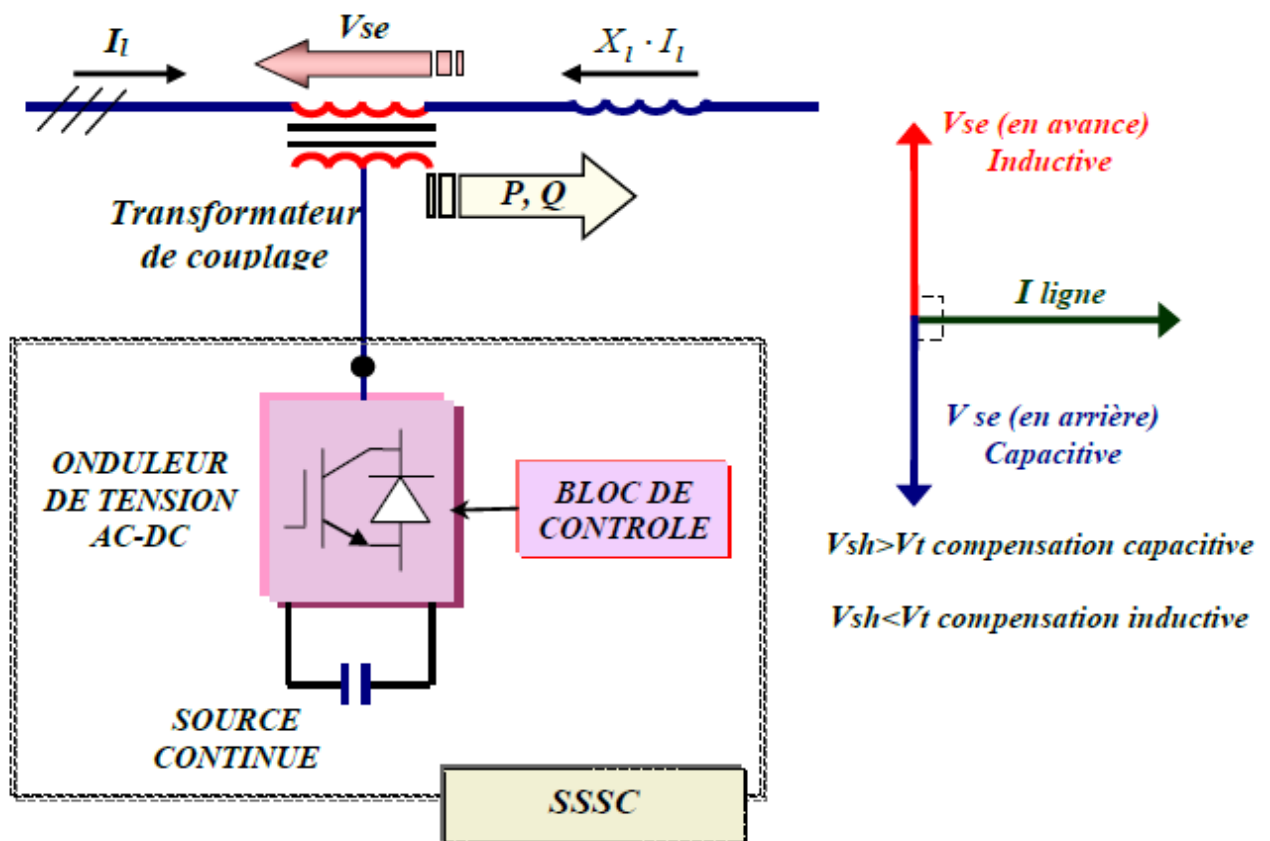
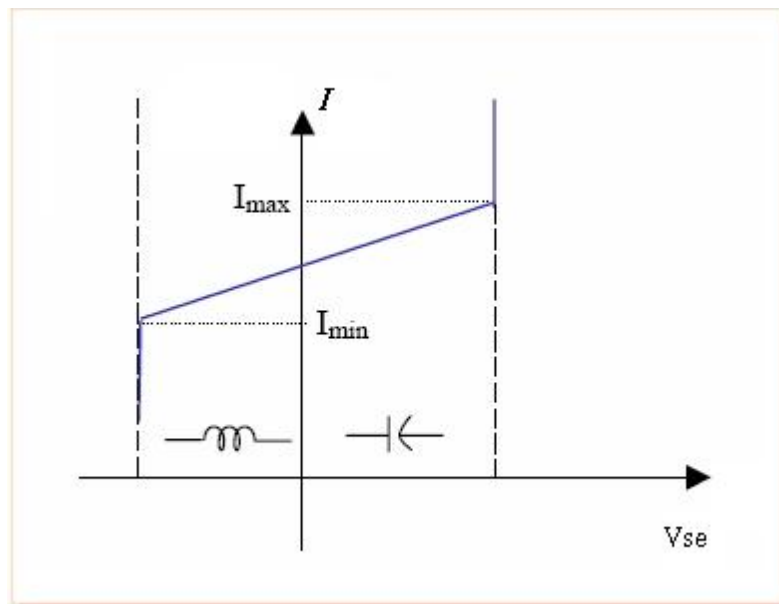


Figure 2.1 : Principe de fonctionnement du SSSC.

**2.3 Caractéristiques du SSSC :**

Dans le but de garantir un fonctionnement stable, ce dispositif performe les mêmes fonctions d'une **impédance série variable** de compensation : il injecte une tension en quadrature avec une tension des extrémités de la ligne pour contrôler le flux de puissance active. Et comme se système ne consomme pas du réactive à partir du réseau et possède son propre énergie réactive stockées dans les batteries de condensateur, il a l'aptitude de contrôler à la fois la puissance active et réactive. [11] Sa caractéristique statique est donnée à la figure suivante:



**Figure 2.2 :** Caractéristique statique du SSSC.

**2.4 Modélisation de SSSC :**

Dans le réseau électrique de la figure 2.1, le SSSC est connecté en série avec la ligne de transport. Son schéma équivalent consiste donc en une source de tension en série avec l'impédance du transformateur de couplage, comme le montre la figure suivante :

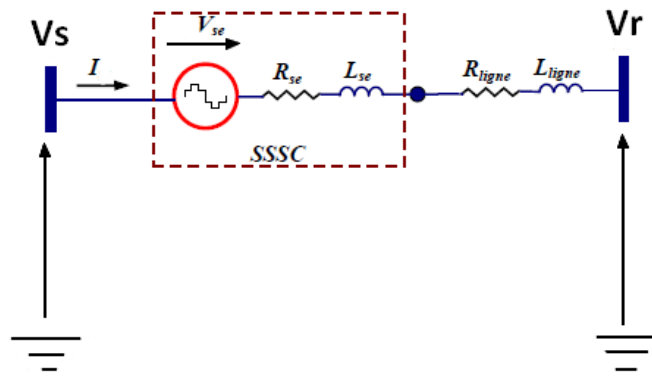


Figure 2.3 : Schéma unifilaire équivalent.

Le courant de la ligne dépend en premier lieu de la différence de potentiel des deux extrémités de la ligne, et en second lieu, de la tension série injectée.

Le tableau ci-dessous donne la signification des grandeurs représentées sur le schéma de la figure 2.3 :

$V_s$	Tension de la ligne en amont
$V_r$	Tension de la ligne en aval
$V_{se}$	Tension injectée par le SSSC
$R_{se} L_{se}$	Impédance de fuite du transformateur série ramenée au secondaire
$R_{ligne} L_{ligne}$	Impédance du réseau en aval augmentée des pertes du transformateur série ramenées au secondaire

En appliquant la loi de Kirchhoff au système de la figure 2.3, on trouve les équations suivantes:

$$\begin{cases} V_{sa} + V_{sea} - V_{ra} - L \frac{dI_a}{dt} - RI_a = 0 \\ V_{sb} + V_{seb} - V_{rb} - L \frac{dI_b}{dt} - RI_b = 0 \\ V_{sc} + V_{sec} - V_{rc} - L \frac{dI_c}{dt} - RI_c = 0 \end{cases} \quad (1)$$

A noter que  $I, V_r, V_s, V_{se}$  sont des grandeurs triphasées telles que :

$$I = \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} ; \quad V_r = \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} ; \quad V_s = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} ; \quad V_{se} = \begin{bmatrix} V_{sea} \\ V_{seb} \\ V_{sec} \end{bmatrix}$$

Le rôle principal de dispositif SSSC étant la gestion du flux de puissance, donc la puissance active et réactive sont considérées comme sorties du système.

La tension  $V_{se}$  étant la seule grandeur que l'on peut générer par l'intermédiaire du convertisseur alors, elle est utilisée comme entrée de commande du système.

L'impédance équivalente de la partie avale de la ligne après installation du SSSC a pour inductance et résistance respectivement :

$$\begin{cases} L = L_{se} + L_{ligne} \\ R = R_{se} + R_{ligne} \end{cases}$$

L'équation (1), après résolution par rapport à la dérivée du courant, se réécrit comme suit :

$$\begin{cases} L \frac{dI_a}{dt} + RI_a = V_{sa} - V_{ra} + V_{sea} \\ L \frac{dI_b}{dt} + RI_b = V_{sb} - V_{rb} + V_{seb} \\ L \frac{dI_c}{dt} + RI_c = V_{sc} - V_{rc} + V_{sec} \end{cases} \quad (2)$$

Ou encore :

$$\begin{cases} \frac{dI_a}{dt} = -\frac{R}{L}I_a + \frac{V_{sa} - V_{ra}}{L} + \frac{V_{sea}}{L} \\ \frac{dI_b}{dt} = -\frac{R}{L}I_b + \frac{V_{sb} - V_{rb}}{L} + \frac{V_{seb}}{L} \\ \frac{dI_c}{dt} = -\frac{R}{L}I_c + \frac{V_{sc} - V_{rc}}{L} + \frac{V_{sec}}{L} \end{cases} \quad (3)$$

Cette dernière équation peut être écrite sous forme matricielle comme suit :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} V_{sea} \\ V_{seb} \\ V_{sec} \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} V_{sa} - V_{ra} \\ V_{sb} - V_{rb} \\ V_{sc} - V_{rc} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Par passage dans le repère de Park, l'équation (4) se transforme en :

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} I_d \\ I_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{R}{L} & \omega \\ -\omega & -\frac{R}{L} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_d \\ I_q \end{pmatrix} + \frac{1}{L} \begin{pmatrix} V_{sed} \\ V_{seq} \end{pmatrix} + \frac{1}{L} \begin{pmatrix} V_{sd} - V_{rd} \\ V_{sq} - V_{rq} \end{pmatrix} \quad (5)$$

Avec :

$I_d, I_q$  : sont les composantes directe et en quadrature du courant de la ligne.

$V_{sed}, V_{seq}$  : sont les composantes directe et en quadrature de la tension injectée par le SSSC.

$V_{sd}, V_{sq}$  : sont les composantes directe et en quadrature de la tension en amont.

$V_{rd}, V_{rq}$  : sont les composantes directe et en quadrature de la tension en aval.

$\omega$  : est la pulsation fondamentale de la tension du réseau.

Comme les puissances active  $P$  et réactive  $Q$  sont les images des courants  $I_d$  et  $I_q$ , on choisit

$X = [I_d \quad I_q]^T$  Comme vecteur d'état,  $U = [V_{sd} \quad V_{sq}]^T$  comme vecteur de commande et

$d = \left[ \frac{1}{L}(V_{sd} - V_{rd}) \quad \frac{1}{L}(V_{sq} - V_{rq}) \right]^T$  sera considéré comme étant une perturbation.

Finalement, la réalisation d'état du système est donnée sous forme compacte par :

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + BU + d \\ y = CX \end{cases} \quad (6)$$

Où :

$$A = \begin{pmatrix} \frac{-R}{L} & \omega \\ -\omega & \frac{-R}{L} \end{pmatrix}; \quad B = \begin{pmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} \end{pmatrix}; \quad C = \begin{pmatrix} V_{rd} & V_{rq} \\ V_{rq} & -V_{rd} \end{pmatrix}; \quad d = \frac{1}{L} \begin{pmatrix} V_{sd} - V_{rd} \\ V_{sq} - V_{rq} \end{pmatrix}$$

Il est à noter que, dans le repère de Park, les expressions des puissances sont données par :

$$\begin{cases} P = V_{rd}I_d + V_{rq}I_q \\ Q = V_{rq}I_d - V_{rd}I_q \end{cases} \quad (7)$$

Autrement dit :

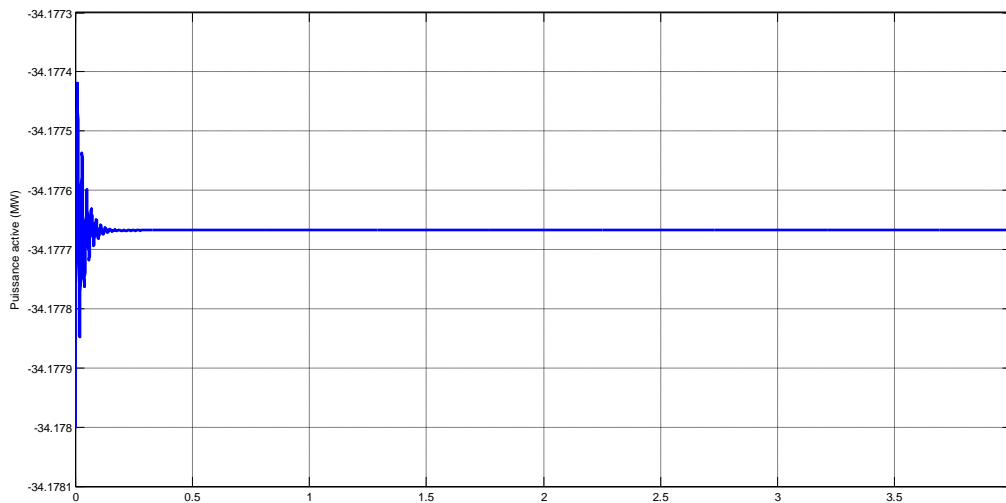
$$\begin{cases} I_d = \frac{PV_{rd} + QV_{rq}}{V_{rd}^2 + V_{rq}^2} \\ I_q = \frac{PV_{rq} - QV_{rd}}{V_{rd}^2 + V_{rq}^2} \end{cases} \quad (8)$$

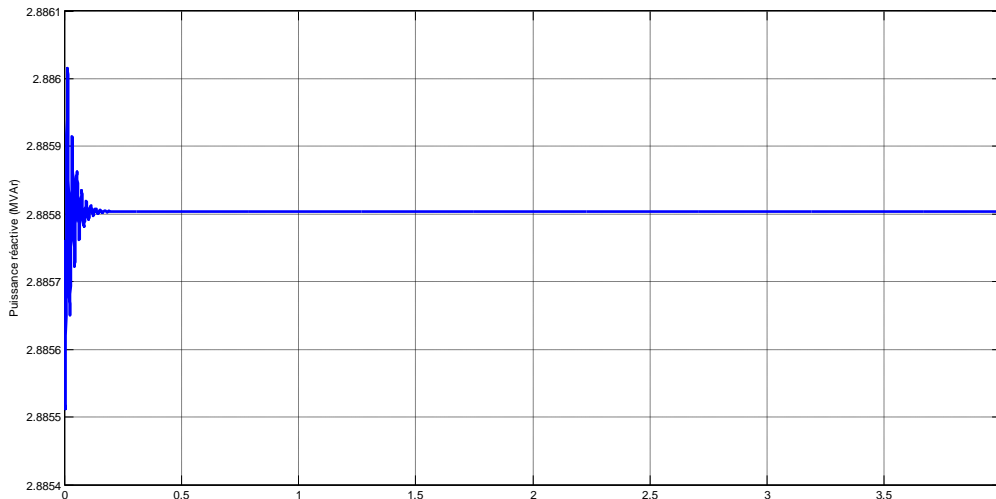
L'équation (6) représente le modèle mathématique du système constitué de la ligne de puissance à laquelle est raccordé le dispositif SSSC. Cela montre que le système est linéaire carré à deux entrées de commande (les composantes d-q de la tension injectée par le SSSC) et deux sorties représentées par les puissances active et réactive transitant dans la ligne.

### 2.5 Simulation de système en boucle ouverte :

Afin de simuler le fonctionnement du SSSC en gestion des flux de puissance en boucle ouverte, un programme Matlab script a été élaboré. La fréquence de simulation étant choisie égale à  $f_s = 2.5 \text{ kHz}$  et le programme implémente la méthode de Range-Kutta pour la résolution numérique des équations différentielles ordinaires.

Ainsi, lorsque le SSSC est débranché, les puissances active et réactive sont imposées par les modules et phases des tensions amont et aval ainsi que l'impédance de la ligne. Leur évolution en fonction du temps sont données à la figure 2.4.





**Figure 2.4 :** Simulation en boucle ouverte.

### 2.5.1 Résultats de la simulation :

Les résultats de simulation montrent que le système est stable au sens entrée-sortie, et que les valeurs des puissances active et réactive convergent vers celles de l'écoulement naturel de puissance en régime permanent (Load Flow), dont les valeurs sont :

$$P = -34.17 MW, Q = 2.8 MVAr$$

### Conclusion :

Dans ce chapitre, on a décrit le circuit de base du SSSC équipant une liaison électrique ainsi que son principe de fonctionnement ce qui a permis de donner un circuit équivalent sur la base duquel on a établi un modèle mathématique sous forme d'équation d'état, en exploitant le formalisme de Kirchhoff en courant alternatif triphasés.

La projection du modèle dans le repère de Park permet de manipuler des grandeurs continues au lieu des grandeurs triphasées ce qui facilite la synthèse de lois de commande pour piloter le système.



# **Chapitre3**

Commande du système : le  
SSSC

**Introduction :**

Au chapitre précédent, il été établi le modèle mathématique du système englobant le SSSC est la ligne de transport. Ce modèle servira à la synthèse de lois de commande permettant au système de réaliser le cahier des charges qui sera décrit dans la section suivante. Le chapitre se terminera par des simulations en boucle fermée afin de montrer l'efficacité de loi de commande et du système tout entier.

**3.1 Cahier des charges :**

L'objectif principal du SSSC est d'être raccordé à une ligne de puissance pour lui améliorer la capacité de transport d'une part, et de l'autre part, le SSSC doit faire en sorte que les puissances transitant dans la ligne prennent des valeurs bien déterminées (valeurs de référence) après un certain temps de transition qui ne dépasse pas les 300 ms (valeur standard).

**3.2 Synthèse de la commande par retour d'état:**

La commande par retour d'état ou placement de pôles est une technique très adaptée aux systèmes linéaires certains (qui ne comprennent d'incertitude paramétriques). La loi de commande sert à modifier la dynamique de la boucle ouverte en modifiant les positions des pôles.

Le système est modélisé dans le repère de Park par l'équation d'état suivante (voir chapitre 2):

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + BU + d \\ y = CX \end{cases} \quad (1)$$

Où :

$$A = \begin{pmatrix} \frac{-R}{L} & \omega \\ -\omega & \frac{-R}{L} \end{pmatrix}; \quad B = \begin{pmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} \end{pmatrix}; \quad C = \begin{pmatrix} V_{rd} & V_{rq} \\ V_{rq} & -V_{rd} \end{pmatrix}; \quad d = \frac{1}{L} \begin{pmatrix} V_{sd} - V_{rd} \\ V_{sq} - V_{rq} \end{pmatrix}$$

Sachant que la perturbation  $d$  est mesurable (en utilisant des capteurs de tension de part et d'autre de la ligne ou en faisant un Load Flow) et que la matrice de commande  $B$  est inversible, l'équation (1) peut donc se réécrire comme suit :

$$\dot{X} = AX + B\mu \quad (2)$$

Où :  $\mu = U + B^{-1}d$  est la commande virtuelle.

La commande par retour d'état s'écrit :

$$\mu = KX + Ny_{ref} \quad (3)$$

Où :  $K$  est la matrice gain de retour d'état,

$N$  est la matrice gain de pré-compensation statique,

$y_{ref}$  est une entrée secondaire représentant la référence.

En remplaçant dans l'équation (2) la commande virtuelle par son expression de l'équation (3), le système en boucle fermé aura la forme suivante :

$$\dot{X} = (A + BK)X + BNy_{ref} \quad (4)$$

La dynamique du système en boucle fermée est imposée par les pôles de la nouvelle matrice d'état  $(A + BK)$ .

En faisant coïncider le polynôme caractéristique de la matrice  $(A + BK)$  avec le polynôme désiré en boucle fermée, tous les coefficients de la matrice de retour d'état  $K$  seront déterminés.

Pour l'outil de simulation Matlab, il y a la fonction «  $K=place(A, B, P)$  » qui permet de faire cette tâche. Ici,  $P$  représente le vecteur des pôles désirés en boucle fermée.

Pour assurer une erreur de régulation nulle en régime statique, il y a lieu de donner une valeur adéquate à la matrice de pré-compensation statique  $N$ .

La transformée de Laplace de l'équation (4) est donnée par ( $s$  étant la variable complexe de Laplace) :

$$sX(s) = (A + BK)X(s) + BNy_{ref}(s) \quad (5)$$

Ou encore :

$$X(s) = (sI_2 - (A + BK))^{-1} BNy_{ref}(s) \quad (6)$$

La multiplication par la matrice de sortie  $C$  membre à membre donne :

$$y(s) = C(sI_2 - (A + BK))^{-1} BNy_{ref}(s) \quad (7)$$

Pour avoir une erreur statique nulle, la condition suivante doit être vérifiée ( $s = 0$ ):

$$C(-(A + BK))^{-1} BN = I_2 \quad (8)$$

D'où est tirée l'expression de la matrice de pré-compensation statique :

$$N = (C(-(A + BK))^{-1} B)^{-1} \quad (9)$$

A ce stade, il faut déterminer la loi de commande réelle  $U$  qui représente les composantes de Park de la tension injectée par le SSSC dans la ligne de puissance :

$$U = \mu - B^{-1}d \quad (10)$$

### 3.3 Simulation :

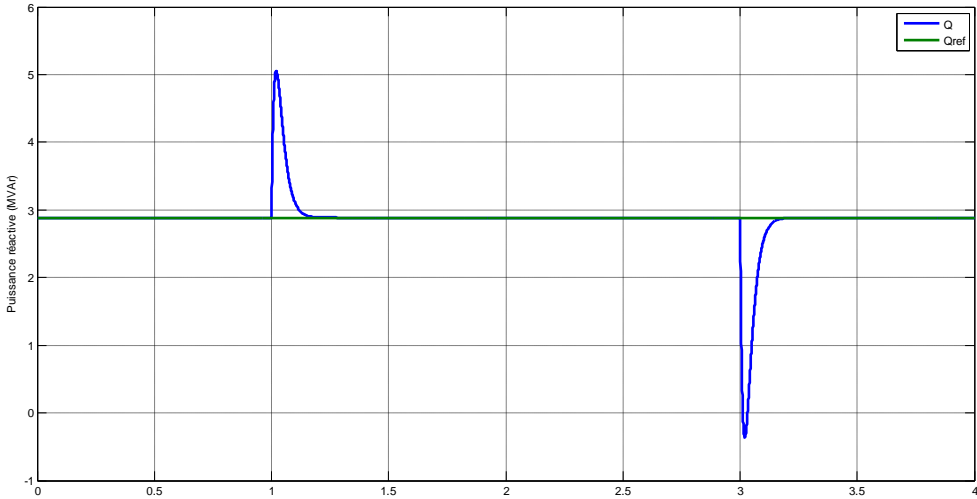
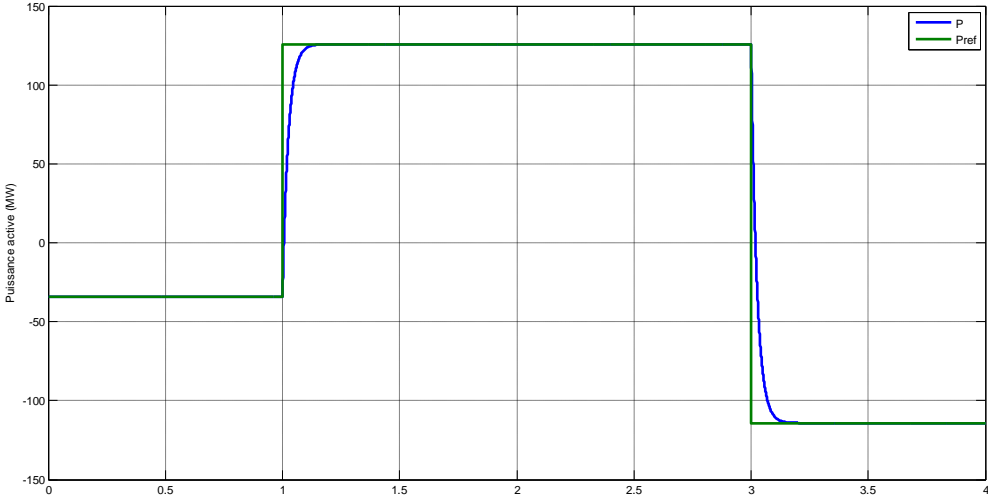
Les pôles en boucle fermée qui ont donné satisfaction sont tels que :

$$P = (-20 \quad -30)^T$$

Pour chaque scénario, sont visualisées les courbes d'évolution en fonction du temps de:

- La puissance active (réelle et désirée),
- La puissance réactive (réelle et désirée),
- La valeur efficace de la tension injectée par le SSSC,
- La tension injectée par le SSSC pour la phase 'a',

a) Variation de puissance active :



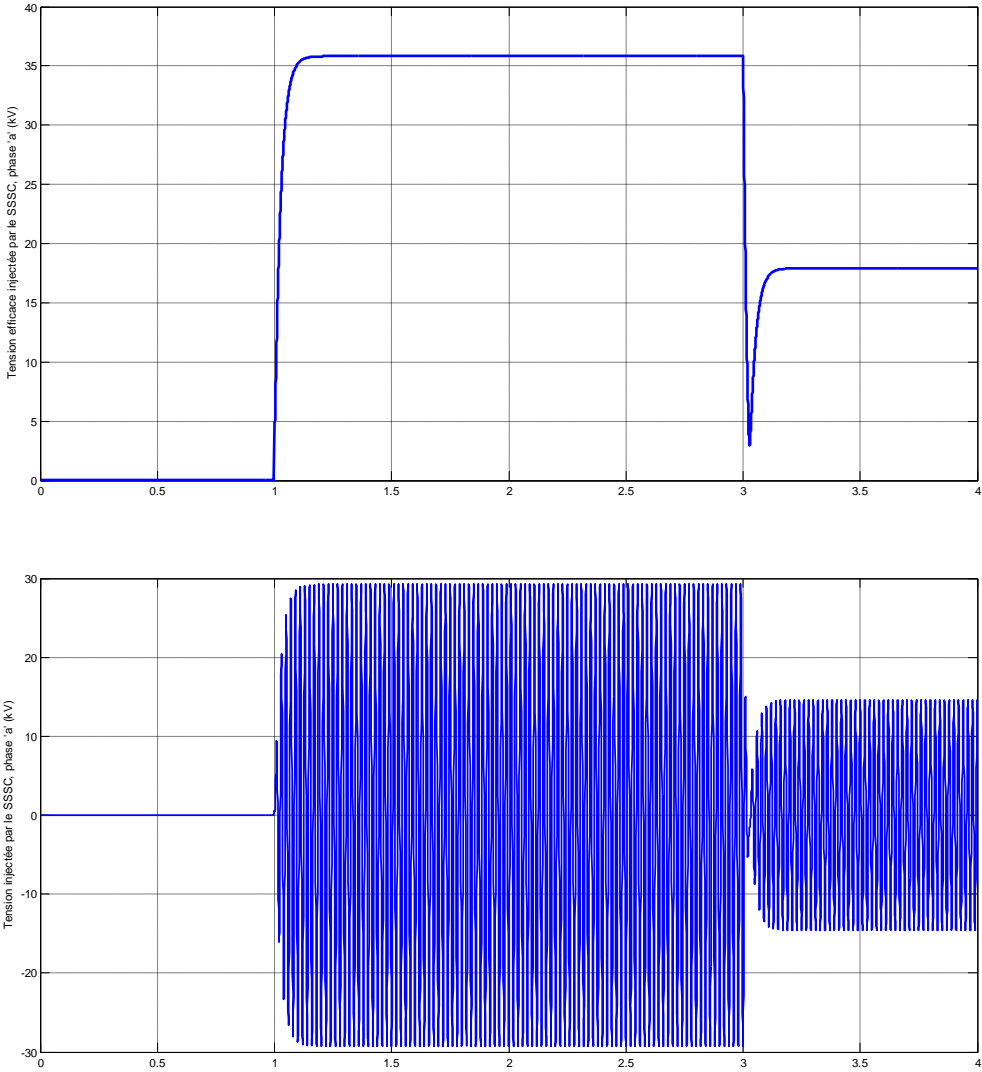
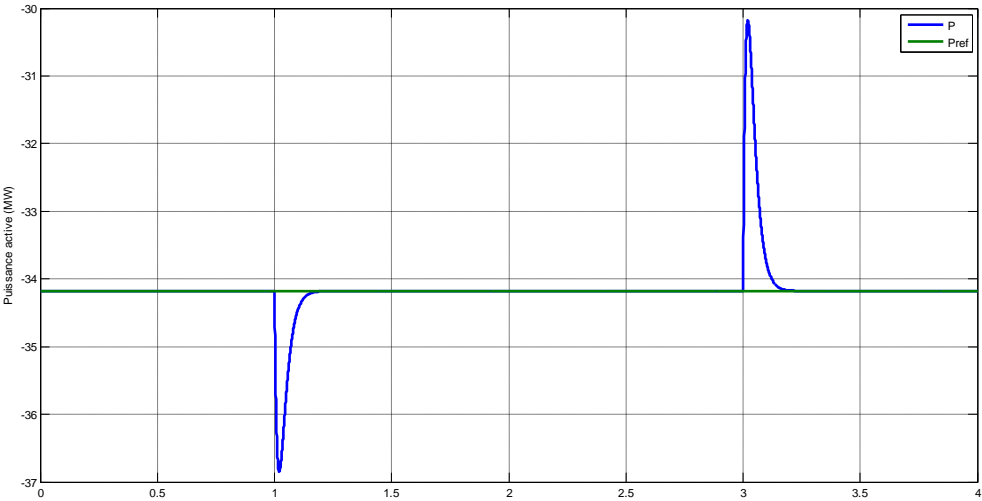


Figure 3.1 : Variation de la puissance active.

b) Variation de puissance réactive :



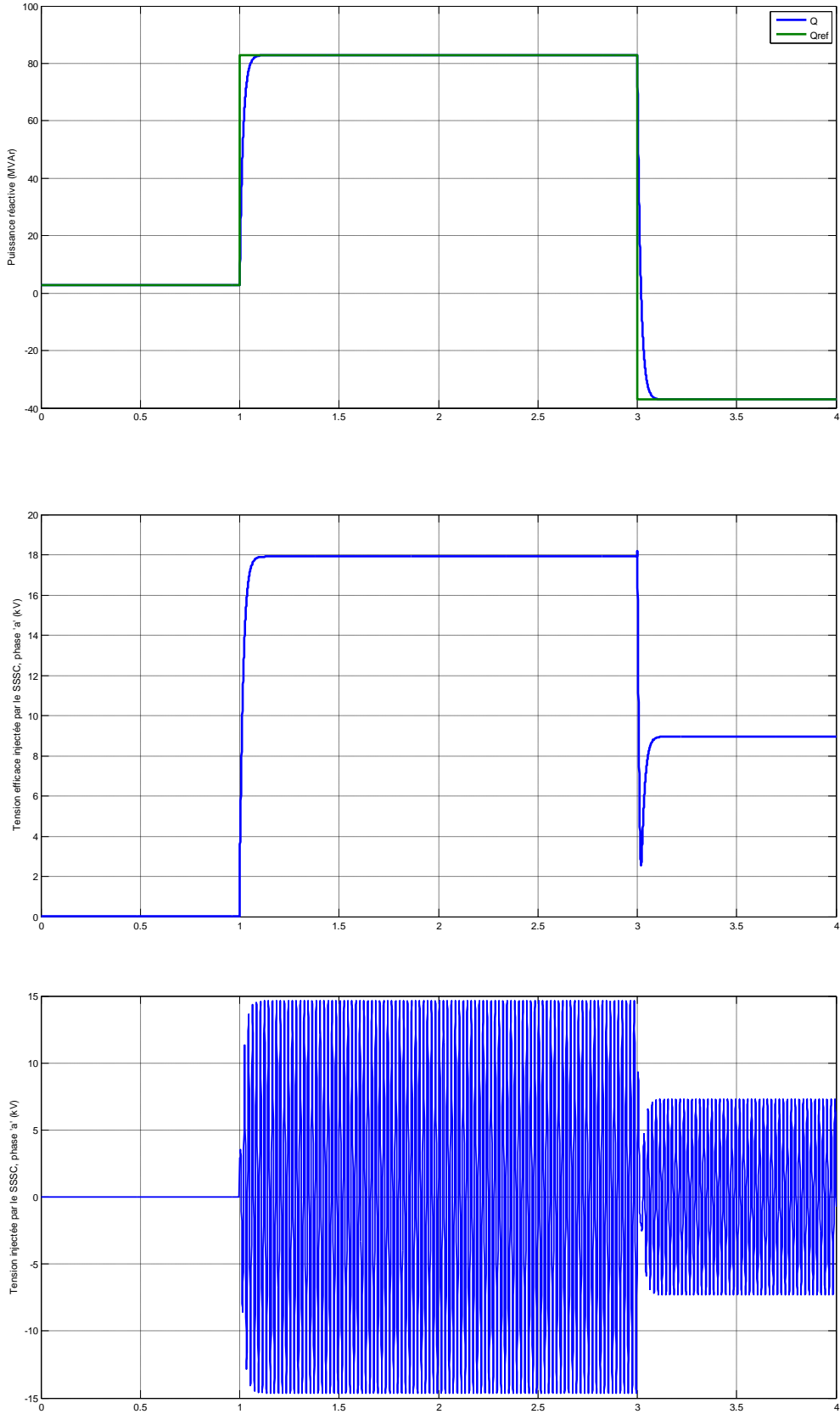
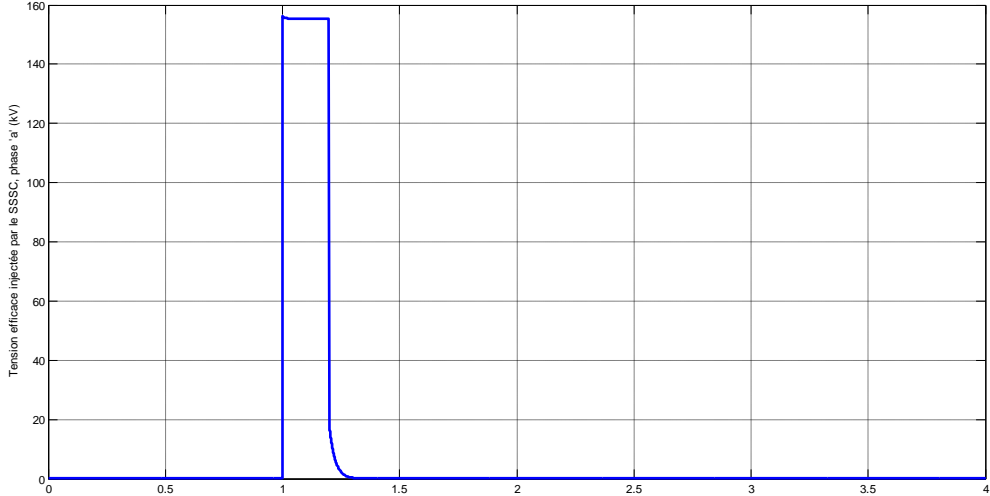
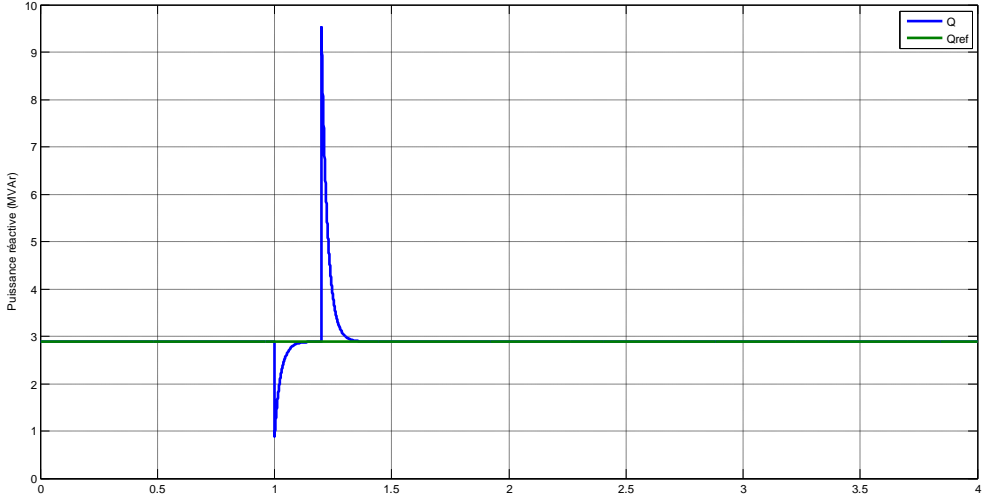
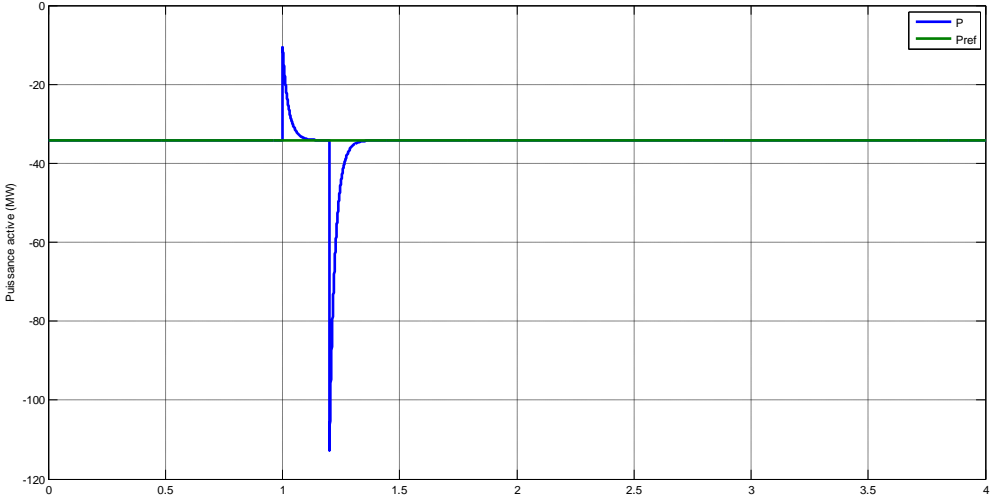


Figure 3.2 : Variation de la puissance réactive.

c) Chute de tension de 70% Côté récepteur à l'instant  $t = 1s$  :



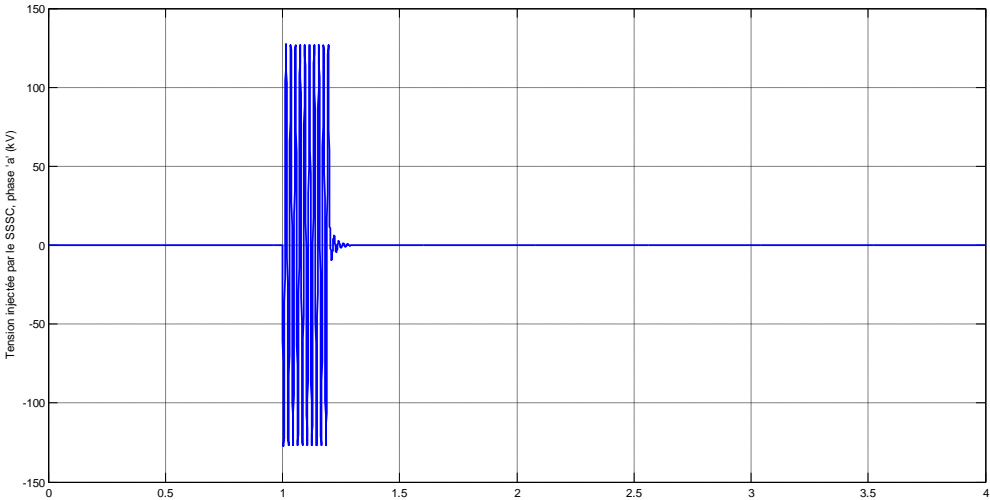
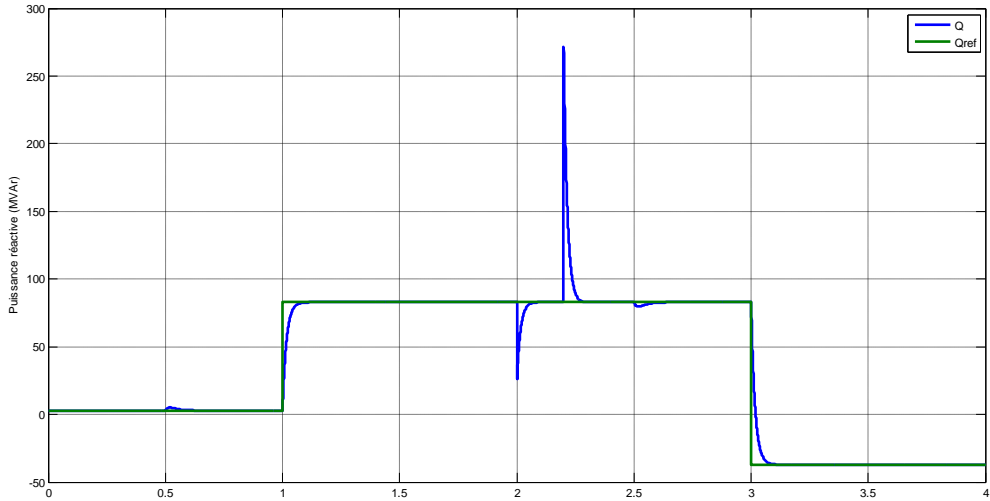
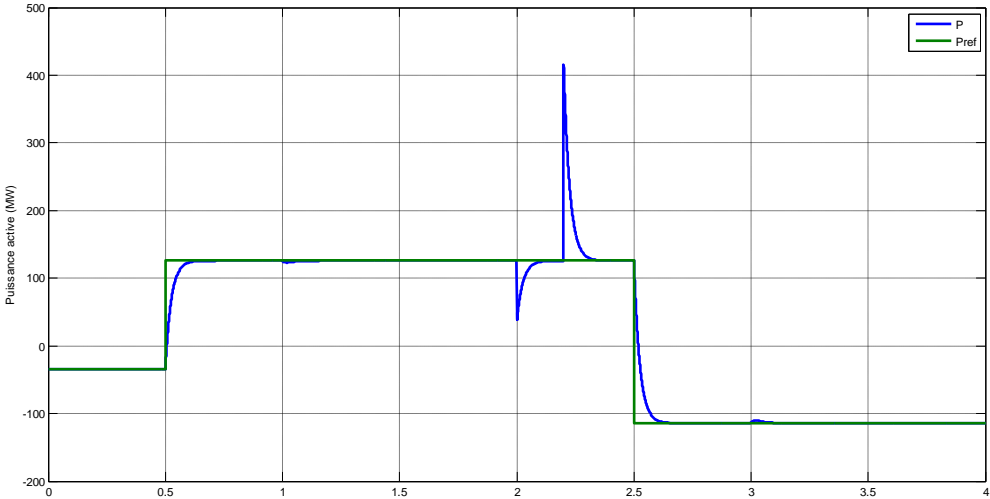


Figure 3.3: Chute de tension.

d) Variation du flux et chute de tension à  $t = 1$  s :



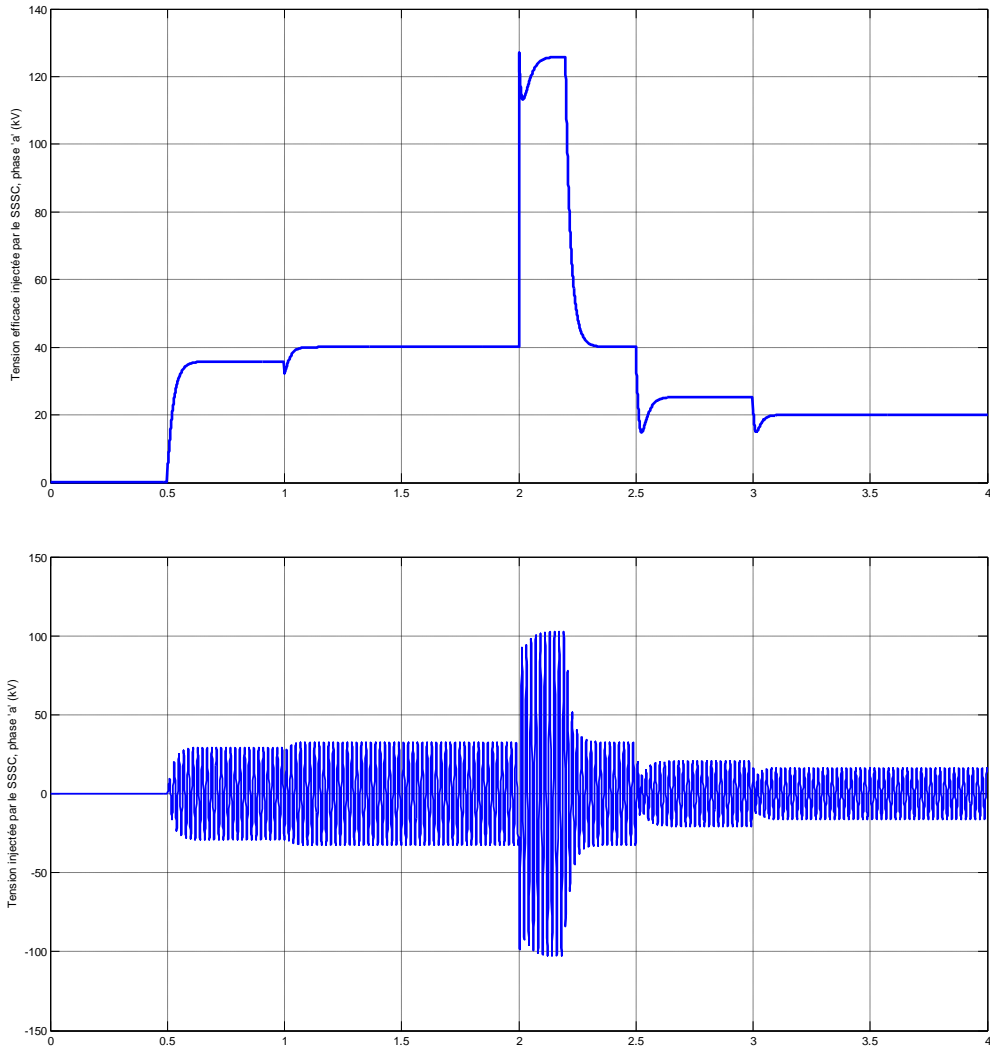
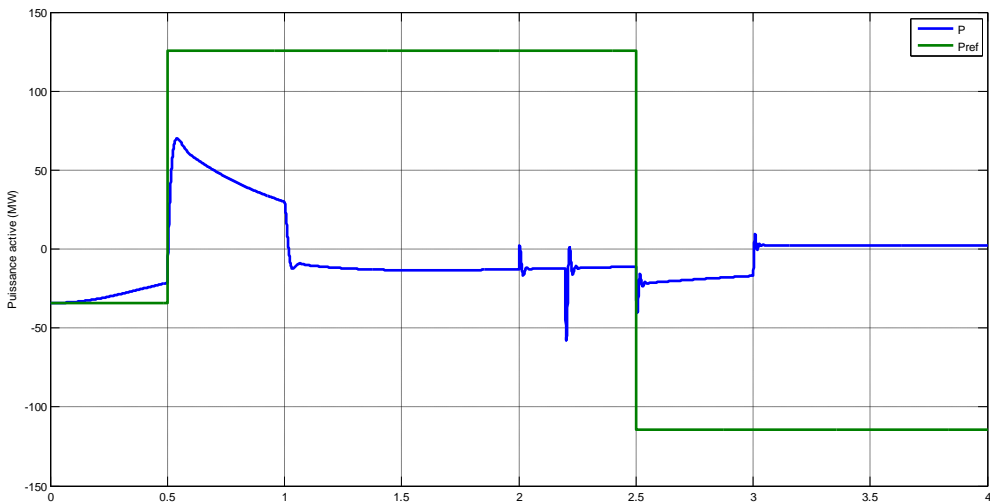


Figure 3.4 : Variation du flux avec chute de tension.

e) Variation paramétrique sur la matrice d'état ( $\frac{\|\Delta A\|}{\|A\|} = 0.01\%$ ):



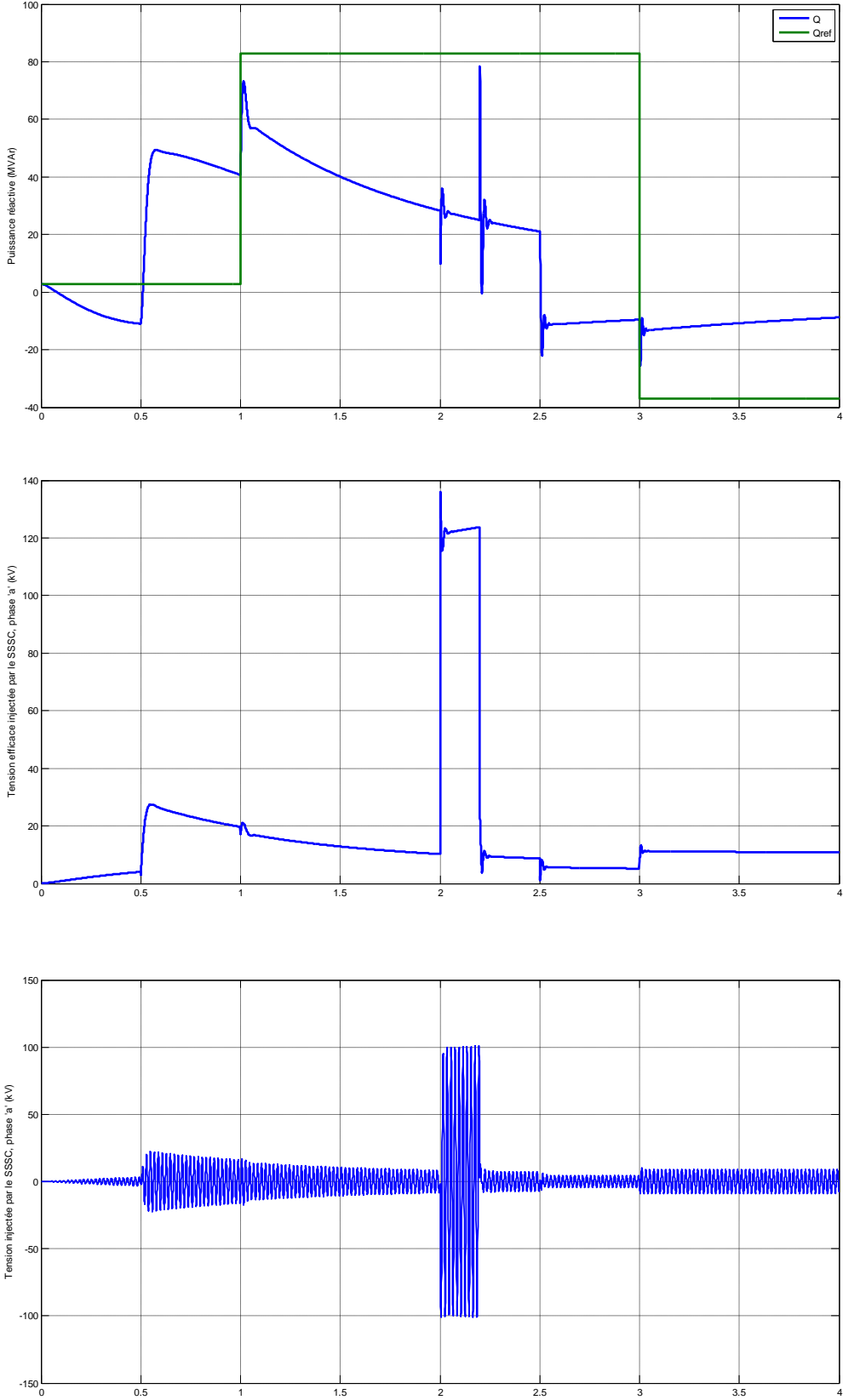


Figure 3.5 : variation paramétrique.

**3.3.1 Résultats de simulation :**

Les résultats de simulation montrent qu'à l'exception des variations paramétriques affectant le système, le système de commande par retour d'état est fiable. En effet, les sorties rejoignent leurs consignes après un temps de réponse acceptable (inférieur à 250 ms) et avec une commande admissible. Les sorties sont régulées d'une manière quasi découplée sauf aux instants de changement de consignes.

Il faudrait dire que la commande par retour d'état n'est pas facile à appliquer dans la pratique, vu l'impossibilité d'avoir un modèle précis (sans erreurs de modélisation) et l'indisponibilité d'informations exactes sur l'état du réseau des deux bouts de la ligne. De plus la qualité de découplage est moyenne.

Comme solution aux contraintes sus citées, il serait indispensable pour une implémentation pratique d'utiliser une commande robuste telle que la technique  $H_{\infty}$  ou les modes glissants.

**Conclusion :**

Dans ce chapitre, on a synthétisé une commande par retour d'état avec pré-compensation statique afin de réguler les sorties et gérer le flux de puissance transitant dans la ligne. Dans le cas d'un modèle parfait, la loi de commande s'avère très satisfaisante en termes de régulation, temps de réponse et rejet de perturbation. Néanmoins, dans le cas où des erreurs paramétriques affectent le modèle, la loi de commande ne parvient pas à réaliser les objectifs du cahier des charges et le système ne sera pas utilisable.



**Conclusion  
générale**

## Conclusion générale

---

### Conclusion générale :

L'industrie de l'énergie électrique actuelle a subi des changements profonds, suite aux bouleversements économique et technique connus dans plusieurs pays du monde. Ce nouvel environnement du marché de l'électricité a mis en évidence une clientèle plus importante et plus exigeante en termes de performances des réseaux entre autres : la flexibilité, la continuité de service, la fiabilité et la qualité de l'énergie offerte sur le marché.

Le développement de l'électronique de puissance a permis d'améliorer la gestion des réseaux électriques en introduisant un nouveau concept pour les systèmes de transmission de l'énergie à courant alternatif ; ces dispositifs flexible sont appelés FACTS. Ils assurent le contrôle du flux de puissance, par conséquent, ils augmentent les capacités de transport des lignes qui sont souvent limitées par l'échauffement et/ou l'usure. Leur principe de fonctionnement se base essentiellement sur l'injection d'une tension ou courant alternatifs dans le réseau et ce en utilisant des convertisseurs de puissance constitués d'interrupteurs de puissance modernes tels que l'IGBT, le GTO...Etc.

Dans ce mémoire, notre travail à été consacré à l'étude et à la synthèse d'une commande appliquée à une liaison électrique équipée d'un SSSC. Cette commande est capable de contrôler l'écoulement de puissance et éliminer ainsi les éventuelles surcharges de lignes. Cela permet de soulager le réseau en contrôlant indépendamment le flux de puissance active et réactive par l'intermédiaire d'un dispositif de commande utilisant un retour d'état.



# **Bibliographie**

## Bibliographie

- (1) **LUC LASNE**, « ELECTROTECHNIQUE », DUNOD 2008.
- (2) **Rachida HAIMOUR**, «*Contrôle des puissances Réactives et des tensions par les Dispositifs FACTS dans un réseau Electrique* », MEMOIRE DE MAGISTER EN ELECTROTHNIQUE, ENSET-ORAN, 2008-2009.
- (3) **M. Crappe**, « *Commande et régulation des réseaux électriques* », Lavoisier 2003.
- (4) **Djamel AMMOUR, Mohand Arezki SADOUR**,« *Mise en œuvre d'un outil decalcul de l'écoulement de puissance dans les réseaux électriques* », MEMOIRE D'INGENIEURE EN ELECTROTHNIQUE, Université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou 2008.
- (5) **Enrique ACHA**,« *FACTS, Modeling and simulation in power network* », John Wiley& Sons Ltd 2004.
- (6) **Xiao-Ping Zhang, Christian Rehtanz, Bikash Pal**, «*Flexible AC Transmission systems modeling and Control* », Springer 2005.
- (7) **Rabah BENABID**, « *Optimisation Multiobjectif de la Synthèse des FACTS par les Particules en Essaim pour le Contrôle de la stabilité de Tension des réseaux Electriques* », MEMOIRE DE MAGISTER EN ELECTROTECHNIQUE, UAT Laghouat 2007.
- (8) **Louardi DELENDI**,« *Contrôle de l'écoulement de puissance active par systèmes FACTS* », MEMOIRE DE MAGISTER EN ELECTROTECHNIQUE, Université de Batna 2009.
- (9) **Abdelaàli ALIBI**, « *Contrôle des réseaux Electriques par les systèmes FACTS* », MEMOIRE DE MAGISTER EN ELECTROTECHNIQUE, Université de Batna 2009.

- (10) **Inj Mezaache MOHAMMED**, « *Analyse de la qualité d'énergie Electrique en utilisant des dispositifs de contrôle des réseaux électriques dans le cas de la stabilité de latension* » MEMOIRE DE MAGISTER EN ELECTROTECHNIQUE, Université de Batna 2011.
- (11) **Eskandar Gholipour SHAHRAKI**, « *Apport de l'UPFC à l'amélioration de lastabilité transitoire des réseaux électriques* », Thèse de Doctorat, Université de Henri Poincaré, Nancy 2009

A graphic of a scroll with a black outline and a light gray shadow. The scroll is unrolled, showing a white interior. The word "Annexes" is written in a bold, black, serif font in the center of the scroll. The top and bottom edges of the scroll are rounded, and the left edge has a small, dark gray shadow indicating the scroll's depth.

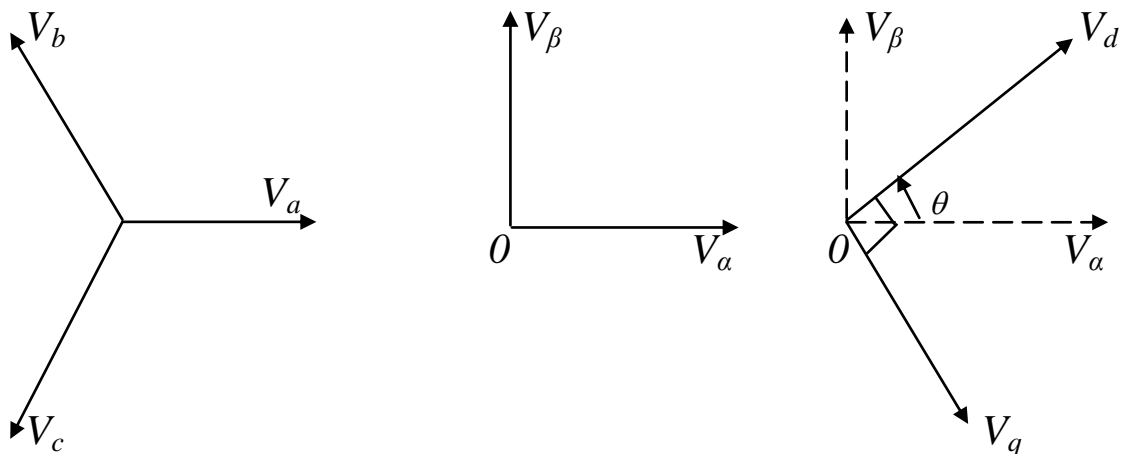
# **Annexes**

## Annexe A

## Transformation de Park

La transformation de Park dite transformation d-q est la transformation des grandeurs électriques (espace vectoriel tridimensionnel) en grandeurs synchrones (espace vectoriel bidimensionnel). L'avantage marquant de cette transformation est que les grandeurs après transformation ne sont plus alternatives mais continuent par conséquent, elles sont facilement manipulables.

Cette transformation se fait en deux étapes. La première étape consiste à projeter les grandeurs alternatives triphasées dans le repère diphasé fixe ( $\alpha$ ,  $\beta$ ) (transformation de Concordia) ; dans ce repère les grandeurs biphasées restent sinusoïdales (figure 1). vient par la suite la seconde étape (transformation d-q) qui à partir des projections dans le repère fixe renvoie les composantes du vecteur tournant dans le repère synchrone (tournant à la vitesse de synchronisme).



**Figure 1 :** Transformation de PARK d'un système de tension triphasé.

L'expression analytique de la transformation intermédiaire (concordia) est donnée par :

$$\begin{pmatrix} V_{\alpha} \\ V_{\beta} \\ V_0 \end{pmatrix} = T_{\alpha\beta} \begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix}$$

Où la matrice  $T_{\alpha\beta}$  est telle que :

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

Avec :  $V_\alpha$  : Première composante diphasée.

$V_\beta$  : Seconde composante diphasée.

$V_0$  : Composante homopolaire.

$(V_a \ V_b \ V_c)^T$  : Système de tension triphasée.

La matrice de transformation inverse de Concordia est donnée par :

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

La transformation d-q est donnée par l'expression (rotation d'un angle  $\theta$  par rapport à l'axe normale au plan  $(\alpha, \beta)$  dans le sens direct).

$$\begin{pmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{pmatrix} = T_{\alpha\beta} \begin{pmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \\ V_0 \end{pmatrix}$$

Où : La matrice  $T_{dq}$  est telle que

$$T_{dq} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 0 \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Et où  $\theta$  est l'angle de synchronisme formé par les vecteurs  $\vec{V}_a$  et  $\vec{V}_d$  ; il est donné par l'expression :

(la position angulaire du système  $(d,q)$  par rapport au système d'axes réel  $(a,b,c)$ )

$$\theta = \arctan 2(V_\alpha \quad V_\beta)$$

La matrice de transformation d-q inverse est donnée par l'expression :

$$T_{dq}^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Il est à noter que toutes les transformations précédentes sont orthogonales ; elles conservent donc la puissance instantanée dans les circuits équivalents.

La matrice de transformation de Park est le produit des matrices de transformation

$T_{dq}$  et  $T_{\alpha\beta}$  ; elle est donnée par :

$$P = T_{dq} \cdot T_{\alpha\beta} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

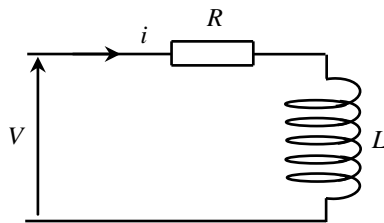
La matrice inverse est :

$$P^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

### Transformation de Park d' une équation électrique d' un circuit triphasé inductif :

Le circuit de la figure 1 représente une phase d' un circuit triphasé inductif équilibré ; il est régi par l' équation électrique donnée par :

$$\begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} R + L \frac{dI}{dt} & 0 & 0 \\ 0 & R + L \frac{dI}{dt} & 0 \\ 0 & 0 & R + L \frac{dI}{dt} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} \quad (1)$$



**Figure 2 :** Une phase d' un circuit électrique triphasé inductif.

Sous forme compacte , l' équation 1 peut être réécrite comme suit :

$$V_{abc} = RI_{abc} + L \frac{d}{dt} I_{abc} \quad (2)$$

Avec :

$$R = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix}$$

$$I_{abc} = (i_a \quad i_b \quad i_c)^T$$

$$V_{abc} = (V_a \quad V_b \quad V_c)^T$$

Par application de la transformation inverse de Park à l'équation 2 ; il est possible d'écrire :

$$P^{-1}V_{dq} = R(P^{-1}I_{dq}) + L \frac{d}{dt}(P^{-1}I_{dq}) \quad (3)$$

Soit en multipliant à gauche par P :

$$V_{dq} = PRP^{-1}I_{dq} + LP(dP^{-1}I_{dq} + P^{-1} \frac{d}{dt} I_{dq}) \quad (4)$$

Ce qui donne :

$$V_{dq} = PRP^{-1}I_{dq} + L(P \frac{dP^{-1}}{dt} I_{dq} + \frac{d}{dt} I_{dq}) \quad (5)$$

On démontre que :

$$P \frac{dP^{-1}}{dt} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\sin(\theta) & -\cos(\theta) & 0 \\ -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 0 \\ -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & 0 \end{bmatrix} \frac{d\theta}{dt} \quad (6)$$

$$= \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \omega$$

En remplaçant dans l'équation 5 le terme  $P \frac{dP^{-1}}{dt}$  par son expression, l'équation 5 devient :

$$V_{dq} = RI_{dq} + \begin{bmatrix} 0 & -L\omega & 0 \\ L\omega & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} I_{dq} + L \frac{d}{dt} I_{dq} \quad (7)$$

On obtient finalement le système des équations de Park qui constitue ainsi un modèle électrique dynamique pour le circuit diphasé équivalent :

$$\begin{cases} V_d = R i_d - L\omega i_q + L \frac{di_d}{dt} \\ V_q = R i_q + L\omega i_d + L \frac{di_q}{dt} \end{cases} \quad (8)$$

**Annexe B :****Calcul des puissances dans le repère de Park :**

Soit  $V_{abc}$  une tension triphasée d'un point de la ligne, et  $I_{abc}$  le courant qui le traverse. On se propose de calculer les puissances actives et réactive dans le repère de Park.

**Puissance active :**

La puissance active instantanée s'écrit :

$$P = V^T I_{abc} = V_a I_a + V_b I_b + V_c I_c \quad (9)$$

En remplaçant  $V_{abc}$  par  $T^{-1}V_{dq}$  et  $I_{abc}$  par  $T^{-1}I_{dq}$ , on trouve :

$$\begin{aligned} P &= (T^{-1}V_{dq})^T (T^{-1}I_{dq}) \\ &= V_{dq}^T (T^{-1})^T T^{-1} I_{dq} \\ &= V_{dq}^T I_{dq} \\ &= V_d I_d + V_q I_q \end{aligned} \quad (10)$$

**Puissance réactive :** La puissance réactive instantanée est donnée par :

$$\begin{aligned} Q &= \frac{-1}{\sqrt{3}} ((V_a - V_b) I_c + (V_b - V_c) I_a + (V_c - V_a) I_b) \\ &= \frac{-1}{\sqrt{3}} \left( \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} V_{abc} \right)^T I_{abc} \\ &= \frac{-1}{\sqrt{3}} (A T^{-1} V_{dq})^T T^{-1} I_{dq} \\ &= \frac{-1}{\sqrt{3}} (T^{-1} V_{dq})^T A^T T^{-1} I_{dq} \\ &= \frac{-1}{\sqrt{3}} V_{dq}^T T^{-T} A^T T^{-1} I_{dq} = V_{dq}^T \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} I_{dq} \\ Q &= V_q I_d - V_d I_q \end{aligned} \quad (11)$$