

**RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

## **UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET**

**FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUEES**  
**DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE**



# **MEMOIRE DE FIN D'ETUDES**

**Pour l'obtention du diplôme de Master**

**Domaine : Sciences et Technologie**

**Filière : Électrotechnique**

**Spécialité : Réseaux électriques et haute tension**

## **THÈME**

**L'évolution des FACTS et leurs impacts  
sur les réseaux électriques**

**Préparé par : Mr**  
*Belkacem Mohammed*

### **Devant le Jury :**

<b>Nom et prénoms</b>	<b>Grade</b>	<b>Qualité</b>
<b>Mr : M.CHAALAL</b>	MAA	Président
<b>Mr : B.BEKKI</b>	MAA	Examineur
<b>Mme : M.BEDOUI</b>	MAA	Examinatrice
<b>Mme : K.BELHACEL</b>	MAA	Encadreur

**PROMOTION**  
**2017 /2018**

# DEDICACE

*Je dédie ce modeste travail a mes chères parents qui non cessé de me soutenir  
tout au long de ma vie  
A ma belle vie Djamila*

*A mes très chères enfants : Mouataz billah , Nihad , Inas , Yahia et Abderrahmane  
A toute ma famille*

*A mes collègues de travail et mes élèves a l'école des cadets de la nation  
Echahid Ammar Mohammed Tiaret*

*A tous ceux qui me sont chers*

***" Mohammed belkacem "***

# **Remerciements**

*Je remercie Allah, le tout puissant, le miséricordieux, de m' avoir appris ce que j'ignorais, de m' avoir donné la santé et tout dont je nécessitais pour l'accomplissement de ce mémoire.*

*Je remercie, en deuxième position **Mme BELHACEL** pour leur aide*

*Et leur orientation durant toute la durée de ce travail.*

*Je remercie aussi le président et les membres de jury qui ont bien voulu examiné Ce travail.*

# Sommaire

<b>Introduction générale</b> .....	1
<b>Chapitre I : L'État de l' Art des FACTS</b>	
I.1 Introduction.....	3
I.2 Concept Général et Définition .....	3
I.3 Différentes Catégories des FACTS .....	4
I.4 Apports et Avantages des FACTS .....	5
I.5 Application des FACTS .....	6
I.5.1 Applications Pratiques des Dispositifs FACTS .....	7
I.6 Structure des principaux dispositifs FACTS .....	7
I.6.1 Dispositifs de compensation dynamique shunts .....	7
I.6.1.1 Compensateur statique de puissance réactive SVC.....	8
I.6.1.1.1 Définition .....	8
I.6.1.1.2 Principe de fonctionnement .....	8
I.6.1.2 Le STATCOM .....	9
I.6.1.2.1 Définition .....	9
I.6.1.2.2 Principe de fonctionnement .....	10
I.6.2 Dispositifs de compensation série.....	11
I.6.2.1 La capacité série commandé par thyristor (TCSC) .....	12
I.6.2.1.1 Définition .....	12
I.6.2.1.2 Principe de fonctionnement .....	12
I.6.2.2 Compensateur statique série synchrone SSSC.....	13
I.6.2.2.1 Définition .....	13
I.6.2.2.2 Principe de compensation par SSSC .....	13
I.6.3 Dispositifs de compensation hybrides "série - parallèle " .....	14
I.6.3.1 UPFC.....	14
I.6.3.1.1 Définition .....	14
I.6.3.1.2 Principe de fonctionnement .....	14
I.7 HVDC.....	15
I.8 Conclusion .....	16

## **Chapitre II : Modélisation d'un Réseau Électrique**

II.1 Introduction .....	17
II.2 Présentation générale des réseaux.....	17
II.2.1 Les réseaux de transport et d'interconnexion.....	17
II.2.2 Les réseaux de répartition.....	17
II.2.3 Les réseaux de distribution.....	17
II.3 Modélisation de la machine synchrone .....	18
II.3.1 Hypothèses simplificatrices.....	19
II.3.2 Modèle de la machine synchrone dans le repère de Park.....	20
II.3.3 Équations électriques et magnétiques .....	20
II.3.4 Équation du mouvement des machines synchrones : .....	23
II.3.5 Expression de la tension aux bornes de la machine.....	24
II.3.6 Mise en équation du réseau électrique .....	25
II.3.6.1 Réduction de la matrice admittance .....	25
II.3.7 Expression de la puissance électrique.....	26
II.4 Modélisation d'une ligne de transport .....	27
II.5 Modélisation du transformateur.....	27
II.6 Modélisation d'une charge .....	28
II.7 Modélisation des dispositifs de régulation .....	29
II.7.1 Régulateur de tension.....	29
II.7.2 Régulateur de vitesse .....	30
II.8 Conclusion.....	30

## **Chapitre III : Étude Comparative SVC / STATCOM**

III.1 Introduction .....	31
III.2 Description générale .....	31
III.3 Application du système étudié de 9 J.B .....	31
III.4 Comparaisons entre SVC et STATCOM.....	38
III.5 Simulation d'un système micro-grid.....	39
III.5.1 Fonctionnement normal .....	39
III.5.2 Fonctionnement en présence de défaut.....	41
III.6. Conclusion.....	42
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>44</b>

## Liste d'abréviations

<b>IGBT :</b>	Insulated Gate Bipolar Transistors
<b>FACTS :</b>	Flexible Alternatif Curant Transmission System
<b>SVC :</b>	Static Var Compensator
<b>STATCOM :</b>	Static Synchronous Compensator
<b>SSSC :</b>	Static Synchronous Series Compensator
<b>UPFC :</b>	Unified Power Flow Controller
<b>IEEE :</b>	Institut des Ingénieurs en Electricité et en Electronique
<b>IGCT :</b>	Insulated Gate Commutated Thyristors
<b>TCSC :</b>	Thyristor Controlled Series Capacitor Compensator
<b>VSC :</b>	Voltage Sourced Converter
<b>DRU :</b>	Déphaseur Régulateur Universel
<b>HVDC :</b>	Hight Voltage Direct Curent
<b>CSERA :</b>	Compensateur statique d'énergie réactive de type avancé
<b>SVG :</b>	Static Var Generator
<b>STATCON :</b>	Static Condenser
<b>ASVC :</b>	Advanced Static Var Compensator

# Liste des Figures

## Chapitre I : L'État de l' Art des FACTS

Figure I.1 : Diagramme traduisant l'échange d'énergie et l'intérêt de la compensation. ....	3
Figure I.2 : Diagramme schématique des applications des FACTS dans les réseaux. ....	6
Figure I.3 : Schéma équivalent d'un SVC. ....	8
Figure I.4 : Fonctionnement du compensateur statique. ....	9
Figure I.5 : Schéma de base du STATCOM. ....	10
Figure I.6 : (a) Présentation d'un compensateur. ....	10
Figure I.7 : (b) Diagramme vectoriel de STATCOM. ....	10
Figure I.8 : Caractéristique statique du STATCOM. ....	11
Figure I.9 : (a) Insertion d'un TCSC sur une ligne. ....	12
Figure I.10 : (b) Impédance du TCSC. ....	12
Figure I.11 : (a) Schéma de base du SSSC. ....	14
Figure I.12 : (b) Statique du SSSC. ....	14
Figure I.13 : Schéma simplifié d'un UPFC connecté au réseau électrique. ....	15
Figure I.14 : Schéma d'une ligne de transport à CC reliant deux réseaux. ....	16

## Chapitre II : Modélisation d'un Réseau Électrique

Figure II-1 : Machine synchrone triphasé. ....	19
Figure II-2 : Modèle de la machine synchrone dans le repère de Park. ....	20
Figure II-3 : Schéma équivalent d'une ligne de transport. ....	27
Figure II-4 : Modèle du transformateur. ....	27
Figure II-5 : Schéma équivalent d'une charge. ....	28
Figure II-6 : Schéma bloc du régulateur de tension IEEE Type 1. ....	29
Figure II-7 : Schéma bloc du régulateur de vitesse. ....	30

## Chapitre III : Étude Comparative SVC / STATCOM

Figure III.1 : Schéma d'un réseau test 9J.B. ....	31
Figure III.2 : Angles rotoriques des générateurs. ....	32
Figure III.3 : Amplitude tension. ....	32
Figure III.4 : Angles rotoriques des générateurs. ....	33
Figure III.5 : Angles rotoriques des générateurs. ....	34
Figure III.6 : Angles rotoriques des générateurs. ....	35
Figure III.7 : Angle rotoriques des générateurs. ....	36
Figure III.8 : Angles rotoriques des générateurs. ....	37
Figure III.9 : Angle rotoriques des générateurs. ....	38
Figure III.10 : Angles rotoriques des générateurs. ....	39
Figure III.11 : Représentation d'un système muni d'un STATCOM. ....	40
Figure III.12 : Représentation d'un système muni d'un SVC. ....	40
Figure III.13 : Résultats de simulation. ....	41
Figure III.14: Résultats de simulation. ....	42

# Introduction générale



## **Introduction générale**

La demande en énergie électrique ne cesse de croître et le souci majeur des entreprises de production d'énergie électrique est de répondre à la croissance du marché et aux exigences des consommateurs en assurant une fourniture régulière et sans interruption.

Pour des raisons écologiques et des contraintes économiques la construction de nouveaux ouvrages est éloignée. L'éventualité est de multiplier les interconnexions et d'augmenter les capacités de transmission des ouvrages existants obligeant ainsi l'exploitation des lignes de transmission dans des conditions critiques qui peuvent affecter le réseau à tout instant et l'amener en dehors de sa zone de stabilité.

D'autre part plus que le réseau augmente plus qu'il devient complexe et plus difficile à contrôler. Ce système qui doit conduire de grandes quantités de l'énergie en l'absence de dispositifs de contrôle sophistiqués et adéquats beaucoup de problèmes peuvent survenir sur ce réseau tel que: le transit de puissance réactive excessif dans les lignes, les creux de tension entre différentes parties du réseau...etc. et de ce fait le potentiel de l'interconnexion du réseau ne sera pas exploiter.

Les réseaux électriques jusqu'à ces dernières années sont contrôlés mécaniquement: malgré l'utilisation de la microélectronique, des ordinateurs et des moyens rapides de télécommunication dans le contrôle des réseaux, la dernière action dans ces systèmes de commande est prise avec des dispositifs mécaniques ayant un temps de réponse plus au moins long et avec lesquels l'action d'amorçage et de réamorçage ne peut être répétitivement exécuté à une fréquence élevée par rapport aux dispositifs à base d'interrupteurs statiques (semi-conducteurs).[ 02 ]

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 de dispositifs de contrôle à base des composants d'électronique de puissance très avancés (GTO, IGBT) connus sous l'acronyme FACTS: Flexible Alternatif Current Transmission Systems.

L'apport de cette technologie FACTS pour les compagnies de l'électricité est d'ouvrir de nouvelles perspectives pour contrôler le flux de puissance dans les réseaux et d'augmenter les capacités utilisées des lignes existantes semblables à des extensions dans ces dernières. Ces apports résultent de l'habilité de ces contrôleurs FACTS de contrôler les paramètres interdépendants qui gouvernent l'opération de transport de l'énergie électrique y compris l'impédance série, impédance shunt, courant, tension, angle de phase... etc.

La nouvelle génération des systèmes FACTS est constituée principalement par des convertisseurs de tension (ou courant), à base des interrupteurs statiques modernes (GTO ou IGBT) commandées en ouverture et en fermeture, liés à des condensateurs comme source de tension continue. Ces convertisseurs selon leur connexion au réseau sont distingués en compensateurs shunt, série et hybride tels que: le SVC ( Static Var Compensator), le STATCOM (Static Compensator), le SSSC (Synchronous Static Series Compensator) et l'UPFC (Unified Powers Flow Controller).

Ces dispositifs agissent sur la tension et/ou l'impédance de la ligne en injectant la quantité de la puissance active et/ou réactive nécessaire.

**Ce travail est structuré comme suit :**

Dans le premier chapitre, nous exposons une exploration rapide dans l'historique des systèmes FACTS et de brèves définitions des célèbres dispositifs FACTS sont données. Dans le deuxième chapitre, Nous présenterons la modélisation du réseau électrique. Dans le troisième chapitre quant à lui donne, étude comparative SVC / STATCOM d' après des simulations faites sur un réseau test neuf nœuds et sur un parc éolien.

**Chapitre I :**  
**L'État de l' Art**  
**des FACTS**

## I.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter Les systèmes de dispositifs FACTS qui sont employés pour le contrôle dynamique de tension, impédance et angle de phase de tension afin d'améliorer le comportement dynamique des réseaux ainsi que la répartition et l'écoulement des puissances dans les réseaux. Selon IEEE, les FACTS, sont définis comme suit :

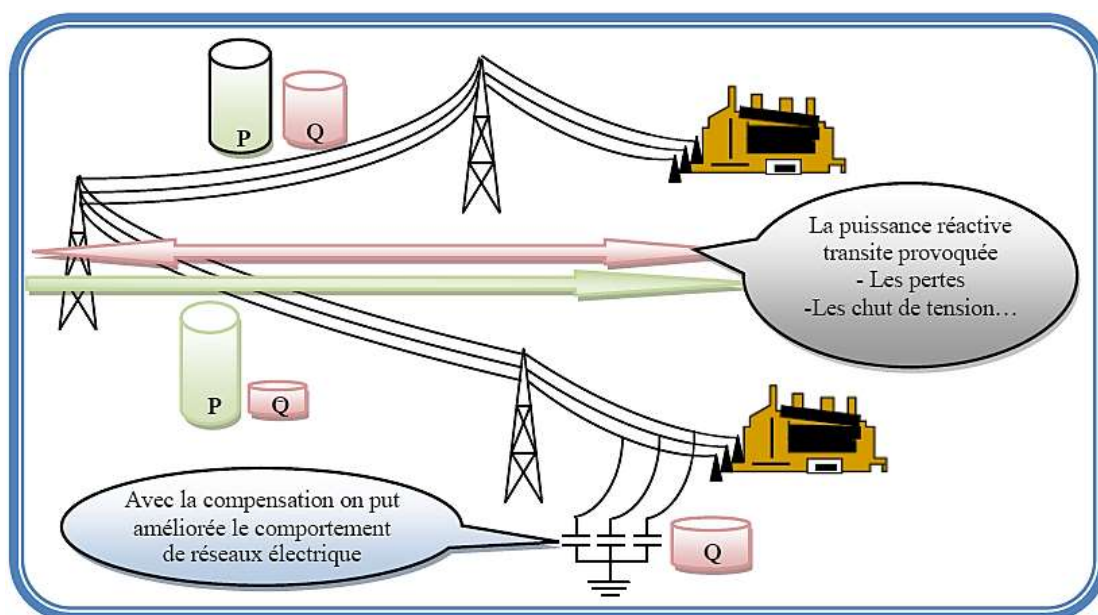
Ce sont des systèmes à courant alternatif incorporant des éléments d'électronique de puissance et d'autres contrôleurs statiques pour l'amélioration de la contrôlabilité et la capacité du transit de la puissance.

## I.2 Concept Général et Définition

D'après IEEE, FACTS qui est l'abréviation de « Flexible AC Transmission Systems » est défini comme suit:

Les systèmes de transmission du courant alternatif incorporant des contrôleurs à base d'électronique de puissance et autres contrôleurs statiques afin d'améliorer la contrôlabilité des réseaux électriques ainsi que la capacité de transfert des lignes. [3,19]

La technologie FACTS n'est pas limitée en un seul dispositif mais elle 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 d'améliorer les marges de stabilité et assurer une meilleur **flexibilité** du transfert d'énergie. [02]

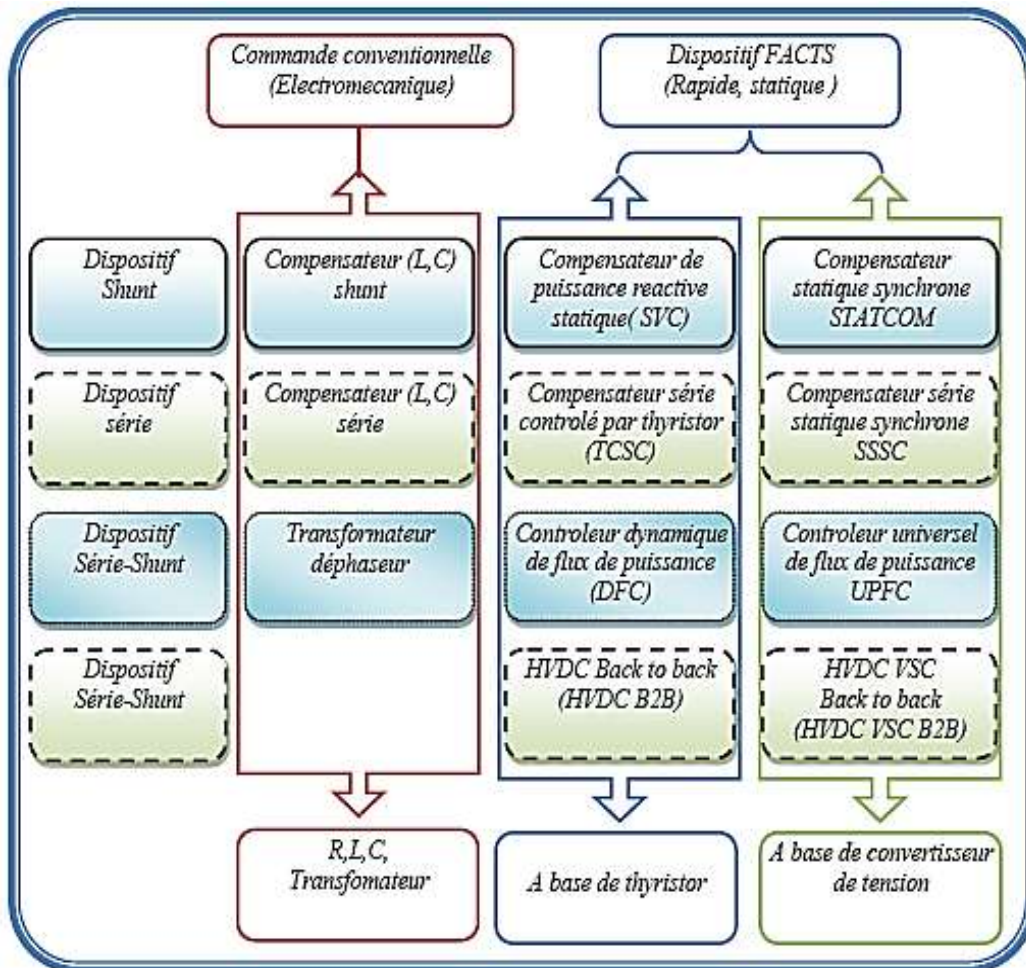


**Figure I.1:** Diagramme traduisant l'échange d'énergie et montrant l'intérêt de la compensation.

**I.3 Différentes Catégories des FACTS**

Le tableau I.1 représente les grandes catégories des dispositifs de contrôle des réseaux électriques; la colonne sur la gauche contient les systèmes conventionnels constitués de composants de base R L C et transformateurs de valeurs fixes (compensation fixe) ou variable commandés par des interrupteur mécanique. Les dispositifs FACTS contiennent également les mêmes composants mais rapidement, commander avec des interrupteurs statiques et convertisseurs de l'électronique de puissance [3].

**Tableau 1.1:** Principaux Dispositifs FACTS.



La colonne gauche des systèmes FACTS présente les contrôleurs à base des thyristors ou bien à des convertisseurs à thyristor tel que le SVC et le TCSC qui sont connu depuis plusieurs dizaines d'années à titre de compensateurs shunt et série respectivement et qui ont prouvé leur fiabilité dans le contrôle des réseaux. Les dispositifs dans la colonne de droite sont la technologie la plus avancée des FACTS avec des convertisseurs de sources de tension à base des interrupteurs statiques sophistiqués IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistors)[21] ou bien les IGCT (Insulated Gate Commutated Thyristors) tel que le STATCOM, le SSSC et l'UPFC.

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

Chaque élément de ces colonnes peut être structuré selon sa connexion au réseau, en général les FACTS sont divisés en trois grandes catégories principales :

- **Compensateurs séries :**

Ces compensateurs sont connectés en série avec le réseau comme une impédance variable (inductive ou 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. En général ces dispositifs séries injectent une tension en série avec la ligne de transmission. [3][8]

- **Compensateurs shunts :**

Ils consistent en une impédance variable, source variable ou une combinaison des deux. Ils injectent un courant dans le réseau à travers le point de connexion. Ils sont principalement pour la compensation de la puissance réactive et par conséquent contrôler de tension des nœuds [1].

- **Compensateurs hybrides ( série-shunt ) :**

C'est une combinaison des dispositifs séries et shunts commandé d'une manière coordonnée afin d'accomplir un contrôle prédéfini. Ils permettent un contrôle multi variables, ils servent à contrôler le flux de puissance active et réactive, la tension et l'angle de transport de l'énergie.

#### **I.4 Apports et Avantages des FACTS**

L'intérêt majeur de la technologie FACTS pour les opérateurs de l'énergie électrique est d'ouvrir plus d'opportunités pour le contrôle de la puissance et d'augmenter les capacités utilisables des présentes lignes sous les conditions normales. Ces possibilités résultent par l'habileté des contrôleurs FACTS de contrôler les paramètres intervenant dans l'équation (I.1) qui gouverne l'opération de transmission de l'énergie dans une ligne tel que les impédances séries, impédances shunts, courant , tension angle de phase.

$$P = \frac{V_r V_s}{X} \sin(\delta) \quad (I.1)$$

X

Par cette action les contrôleurs FACTS permettent dans un système énergétique d'obtenir plusieurs bénéfices :

- ❖ Contrôle du flux de puissance qui est la principale fonction des dispositifs FACTS.

Ce contrôle doit être réalisé selon un schéma de charge prédéfini pour satisfaire les besoins des consommateurs.

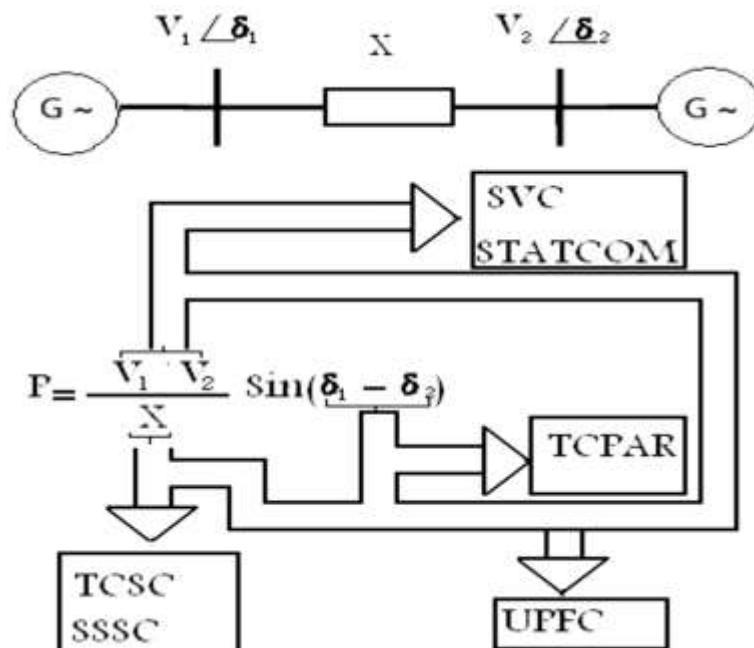
- ❖ Contrôle des tensions dans les nœuds.
- ❖ Augmenter les capacités de charge des lignes vers leurs limites thermiques.
- ❖ Contrôle de la puissance réactive: Réduction de l'écoulement de la puissance réactive,
- ❖ Améliorer la stabilité dynamique du système: entre autre des fonctions des FACTS, l'amélioration de la stabilité transitoire, atténuation des oscillations et le contrôle de la stabilité des tensions. Donc permettre aux lignes de transmettre plus d'énergie active et par conséquence réduire les pertes de transmission.
- ❖ Amélioration de la qualité de l'énergie.

### I.5 Application des FACTS

Les FACTS permettent de contrôler dynamiquement l'écoulement de puissance moyennant l'utilisation des divers composants de l'électronique de puissance [5]. La Figure I.2 représente la puissance transitée entre deux nœuds du système. Elle dépend des tensions aux deux extrémités de l'interconnexion, de l'impédance de la ligne et de déphasage entre les deux systèmes. Les différents dispositifs FACTS peuvent activement influencer un ou plusieurs de ces paramètres pour la commande du flux de puissance et l'amélioration de la stabilité de tension aux nœuds de l'interconnexion.

Selon la configuration du système, les tâches des FACTS peuvent être résumées 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.



**Figure I.2 :** Diagramme schématisant les applications des FACTS dans les réseaux.

Le tableau I.2 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 [5].

**Tableau I.2** Application des FACTS à la résolution des problèmes dans le réseau.

	<b>Contrôle de charge</b>	<b>Contrôle de tension</b>	<b>Stabilité transitoire</b>	<b>Amplitude des oscillations</b>
<b>SVC STATCOM</b>	+	+++	+	++
<b>TCSC</b>	++	+	+++	++
<b>SSSC</b>	+++	+	+++	++
<b>TCPAR</b>	+++	++	+	++
<b>UPFC</b>	+++	+++	+++	+++

**Influence :** Petite +. Moyenne ++. Forte +++.[ 14 ]

### I.5.1 Applications Pratiques des Dispositifs FACTS

Les systèmes FACTS sont habituellement connus comme nouvelle technologie, mais des centaines d'installations dans le monde, plus particulièrement du SVC depuis 1970 avec une puissance totale installée de 90.000 MVAR, prouvent l'acceptation de ce genre de technologie.

Le tableau I.3 montre des chiffres approximatifs des dispositifs FACTS installés dans le monde avec les puissances totales installées [4].

**Tableau I.3 :** Dispositifs FACTS installés dans le monde et leurs puissances totales.

<i>Type</i>	<i>Nombre</i>	<i>Puissance installée en MVA</i>
<b>SVC</b>	<b>600</b>	<b>90.000</b>
<b>STATCOM</b>	<b>15</b>	<b>1.200</b>
<b>Série Compensation</b>	<b>700</b>	<b>350.000</b>
<b>TCSC</b>	<b>10</b>	<b>2.000</b>
<b>HVDCB2B</b>	<b>41</b>	<b>14.000</b>
<b>UPFC</b>	<b>2-3</b>	<b>250</b>

### I.6 Structure des principaux dispositifs FACTS

#### I.6.1 Dispositifs de compensation dynamique shunts

Vers la fin des années 60 plusieurs équipements utilisant l'électronique de puissance ont fait leurs apparitions. Ces derniers avaient l'avantage d'éliminer les parties mécaniques et d'avoir un temps de réponse très court. Ces équipements étaient constitués essentiellement d'une inductance en série avec un gradateur.



Le retard à l'amorçage des thyristors permet de régler l'énergie réactive absorbée par le dispositif. En effet tous les compensateurs parallèles injectent du courant au réseau via le point de raccordement. Quand une impédance variable est connectée en parallèle sur un réseau, elle consomme (ou injecte) un courant variable. Cette injection de courant modifie les puissances actives et réactive qui transitent dans la ligne [7].

### I.6.1.1 Compensateur statique de puissance réactive SVC

#### I.6.1.1.1 Définition

Compensateur statique de puissance réactive (SVC) est un dispositif de compensation shunts de la famille flexible de systèmes de transmission à courant alternatif (FACTS). Il peut fournir en continu la puissance réactive nécessaire pour contrôler les fluctuations dynamiques de la tension sous différents régimes de fonctionnement et ainsi améliorer les performances de réseaux de transport et de distribution d'énergie électrique. L'installation de SVC en un ou plusieurs points spécifiques du réseau peut accroître la capacité de transit et réduire les pertes tout en maintenant un profil de tension régulier sous différents régimes. De surcroît, un compensateur statique sa puissance réactive peut atténuer les oscillations des amplitudes de tension [8].

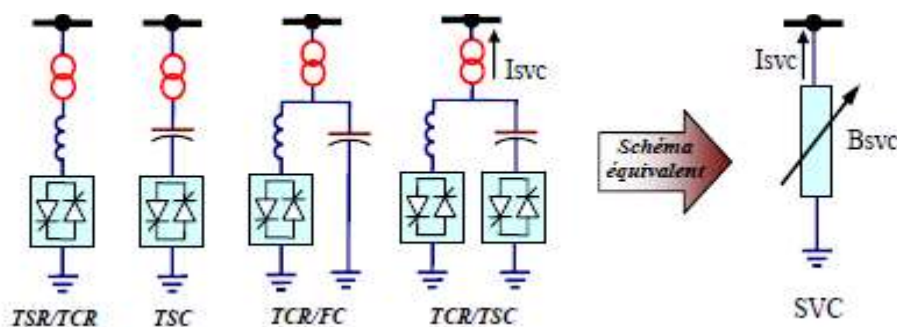


Figure I.3 : Schéma équivalent d'un SVC.

#### I.6.1.1.2 Principe de fonctionnement

La Figure. 1.4 donne une représentation schématique monophasée d'un compensateur statique. Il est composé d'un condensateur avec une réactance capacitive  $C X$  et d'une bobine d'inductance avec la réactance  $L X$ . Ce système utilise l'angle d'amorçage  $\alpha$  des thyristors pour contrôler le courant dans la réactance alors que le contrôle de la puissance réactive par cette méthode est rapide et d'une façon continue. Le RCT ne peut absorber que de l'énergie réactive, puisque il est constitué d'éléments inductifs.

C'est pour cela que l'on associe ses dispositifs avec des bancs de condensateur commandé par thyristor (CCT) qui fournit de l'énergie réactive au réseau. Des thyristors fonctionnent cette fois en pleine conduction (une période complète de la pulsation du réseau). Le réglage de l'énergie absorbée par RCT, le bilan global est la somme de deux énergies.

Ce dispositif est associé à des filtres LC accordés pour éliminer les harmoniques de ces dispositifs RCT, CCT, bancs des capacités fixes et filtres d'harmoniques constitue le compensateur hybride, plus connu sous le nom de SVC dont le premier dispositif à été installé en 1979 en Afrique du Sud. La caractéristique statique de SVC est donnée par la Figure. 1.4, Trois zones sont distinctes :

- Pour  $V_{\min} \leq V \leq V_{\max}$  : est une zone de réglage où l'énergie réactive est une combinaison des CCT et RCT.
- Pour  $V > V_{\max}$  : est une zone où le RCT donne son énergie maximale (bute de réglage). Les condensateurs sont déconnectés.
- Pour  $V \leq V_{\min}$  : est une zone où les seules capacités sont connectées au réseau.

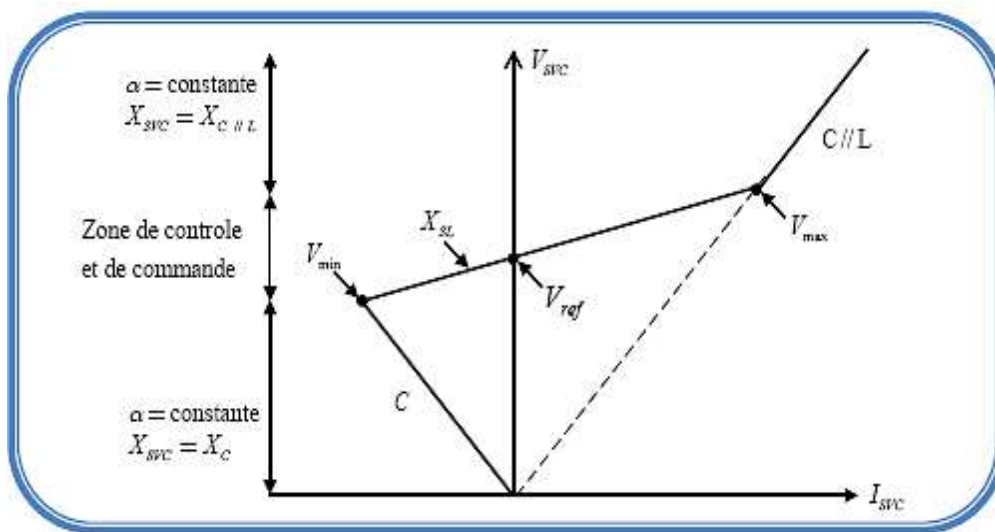


Figure I.4 : Fonctionnement du compensateur statique.

**Le SVC présente plusieurs avantages :**

- Stabiliser la tension dans les systèmes faibles.
- Réduire les pertes de transmission.
- Augmenter la capacité de transmission.
- augmenter la limite de stabilité.

### I.6.1.2 Le STATCOM

#### I.6.1.2.1 Définition

Le STATCOM (Statique Compensateur) a connu jusqu'à maintenant différentes appellations, CSERA (Compensateur statique d'énergie réactive de type avancé). ASVC (Advanced Static Var Compensator). SVG (Static Var Generator) et STATCON (Static Condenser). Un STACOM est un système d'électronique de puissance connecté en parallèle, qui injecte dans le réseau un courant alternatif contrôlé en phase et en amplitude.

Leur topologie est basée sur des convertisseurs de tension. Le schéma de STATCOM est donné par la Figure I.5.

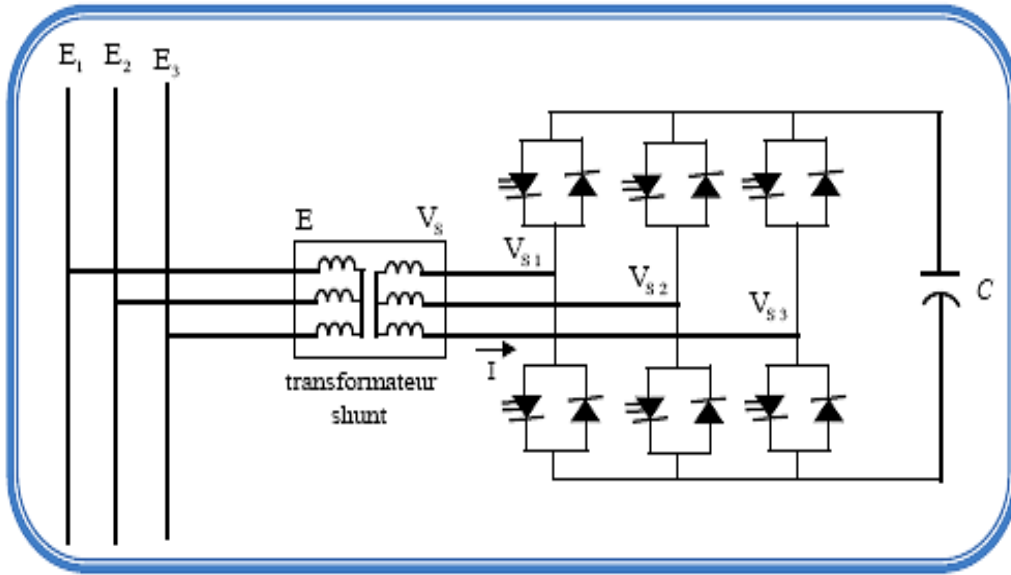


Figure I.5 : Schéma de base du STATCOM.

**I.6.1.2.2 Principe de fonctionnement**

Le principe de fonctionnement de STATCOM est similaire à celui du compensateur synchrone. Les tensions de sortie sont générées par un onduleur au lieu d'avoir été créées par un groupe tournant. Ce principe a pu être mis en œuvre grâce à l'évolution des composants de l'électronique de puissance, et surtout grâce à l'apparition des GTO de forte puissance. Les cellules de commutation sont bidirectionnelles, c'est-à-dire formées de GTO et de diodes en antiparallèle. Le rôle de STATCOM est d'échanger l'énergie réactive avec les réseaux électriques [7, 9 et 10]. L'échange d'énergie réactive se fait par le contrôle de la tension de sortie de l'onduleur  $V_s$ , laquelle est en phase avec la tension du réseau  $E$ .

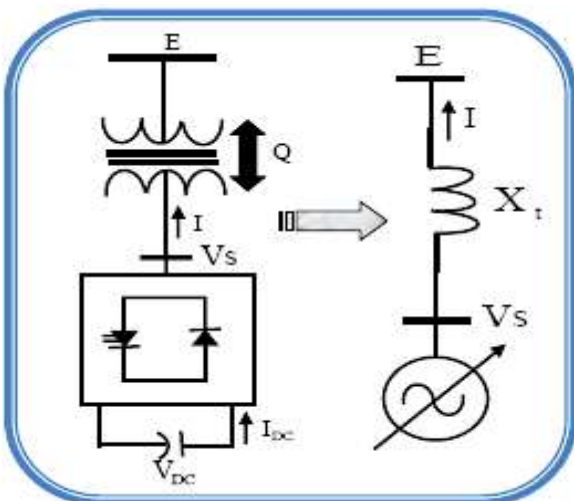


Figure I.6: (a) Présentation d'un compensateur.

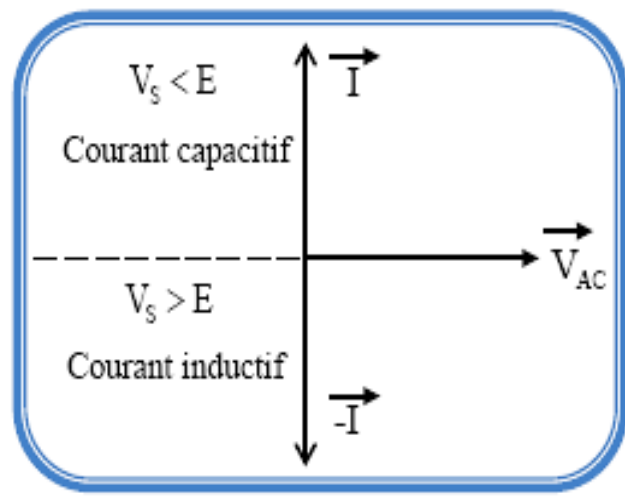
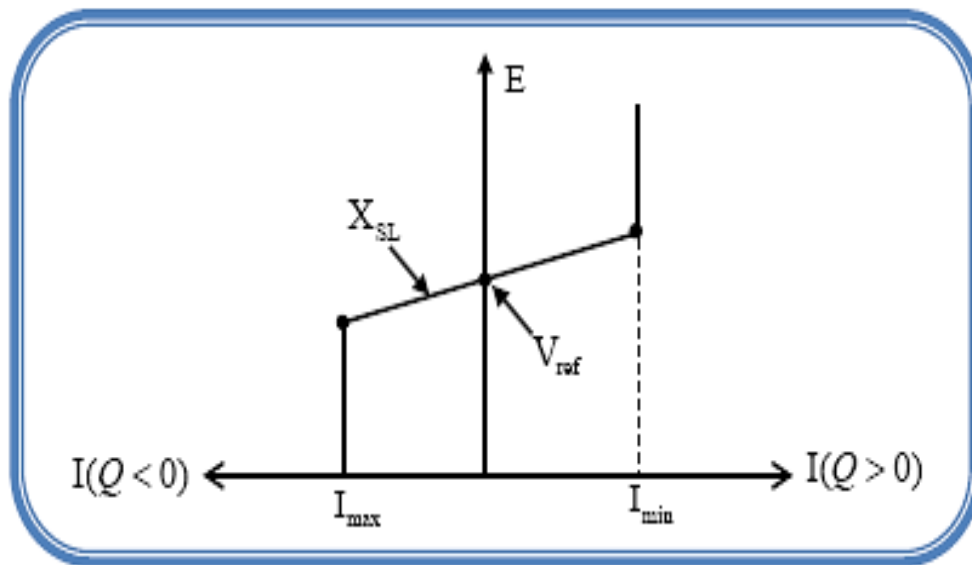


Figure I.7 : (b) Diagramme vectoriel de STATCOM.

**Le fonctionnement peut être décrit de façon suivante :**

- Si  $V_S < V_E$ , le courant circulant dans l'inductance est déphasé de  $+2\pi$  par rapport à la tension E ou le courant est capacitif.
- Si  $V_S > V_E$ , le courant circulant dans l'inductance est déphasé de  $-2\pi$  par rapport à la tension E ou le courant est inductif.
- Si  $V_S = V_E$ , le courant circulant dans l'inductance est nul, il n'y a pas d'échange d'énergie.

On considère dans ce fonctionnement que les tensions sont triphasées et équilibrée. Par ailleurs, l'amplitude de la tension de sortie  $V_S$  est proportionnelle à la tension continue aux bornes du condensateur.



**Figure I.8 :** Caractéristique statique du STATCOM.

**Le STATCOM présente plusieurs avantages :**

- Bonne réponse à faible tension : le STATCOM est capable de fournir son courant nominal, même lorsque la tension est presque nulle.
- Bonne réponse dynamique : Le système répond instantanément.
- L'étendue de la plage de l'opération est plus large qu'avec un SVC classique.
- Pour un contrôle optimal de la tension, les phases sont contrôlées séparément pendant les perturbations du système.[20]

### **I.6.2 Dispositifs de compensation série**

Ces compensateurs sont connectés en série avec le réseau et peuvent être utilisés comme une impédance variable (inductive, capacitive) ou une source de tension variable. En général, ces compensateurs modifient l'impédance des lignes de transport en insérant des éléments en série avec celles-ci.

### I.6.2.1 La capacité série commandé par thyristor (TCSC)

#### I.6.2.1.1 Définition

La capacité série commande par thyristor (TCSC: Thyristors Controlled Séries Compensator) est un dispositif de compensation série, elle utilise l'électronique de puissance comme élément de base. Elle connecte en série avec le réseau pour contrôler le transit de puissance, l'amortissement de résonance subsynchrone et des oscillations de puissance. Ce type de compensateur est apparu au milieu des années 80 [11].

#### I.6.2.1.2 Principe de fonctionnement

Le TCSC est composé d'une inductance en série avec un gradateur à thyristor, le tout en parallèle avec un condensateur. Le TCSC est inséré sur la ligne de transmission (Figure I.9). Où :

$X_C$  : est l'impédance du condensateur du TCSC.

$X_L$  : est l'impédance du l'inductance du TCSC.

$X_{line}$  : est l'impédance de la ligne.

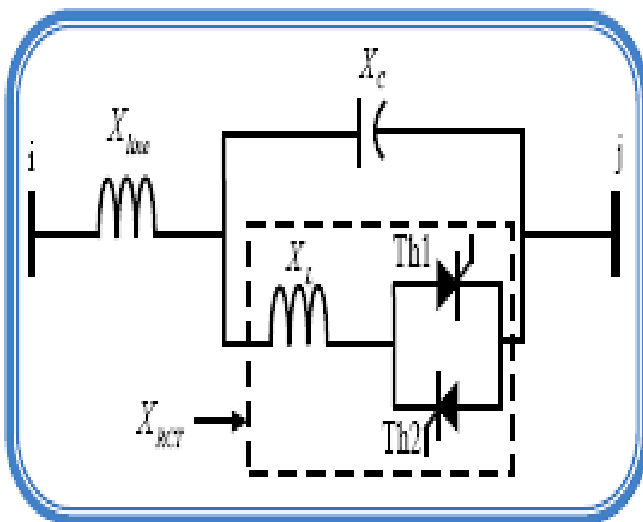


Figure I.9 : (a) Insertion d'un TCSC sur une ligne.

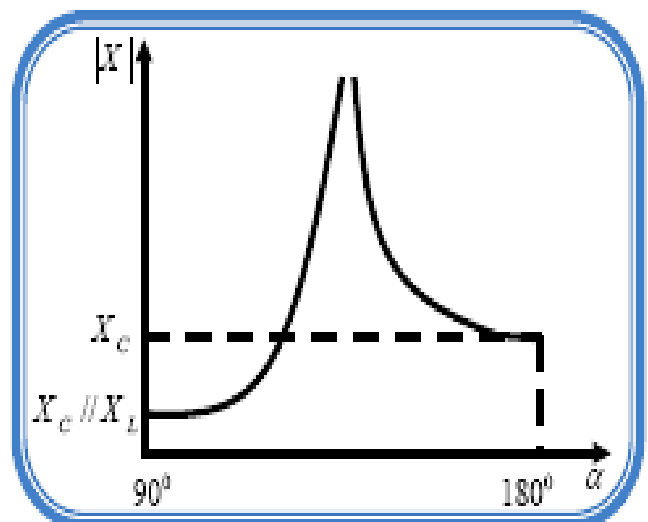


Figure I.10 : (b) Impédance du TCSC.

À la réactance variable tel qu'un RCT (Réactances Commandées par Thyristor) et relier à travers un condensateur en série. Quand l'angle d'amorçage de RCT est de 180 degrés, le réacteur devient non conduire et le condensateur en série à sa impédance normale. Pendant que l'angle est avancé de 180 degrés, l'impédance capacitive augmentée. A l'autre extrémité, quand l'angle d'amorçage de RCT est de 90 degrés, le réacteur devient entièrement conduisant, et toute impédance devienne inductive, par ce que l'impédance du réacteur est conçue pour être beaucoup inférieure au condensateur en série impédance. Avec 90 degré, le TCSC aide en limitant le courant de défaut. Quand l'angle d'amorçage du RCT est de 180 degrés, lui des arrêts conduisant, et les actes non contrôlés du réacteur comme limiteur de courant de défaut.

**Le dispositif peut opérer en trois modes différents :**

- a) Mode hors circuit : les thyristors sont en pleine conduction.
- b) Mode bloqué : les thyristors sont bloqués.
- c) Mode variable : la conduction des thyristors est contrôlée par un signal d'amorçage et donc le TCSC a une réactance contrôlables dans les régions inductives et capacitives.

Ce dernier cas a un grand intérêt. Les angles d'amorçage des thyristors peuvent changer de  $90^\circ$  jusqu'à une valeur maximale dans une plage de fonctionnement inductif et de fonctionnement capacitif.

**Les principaux avantages de l'insertion de TCSC dans un réseau électrique sont :**

- Compensation du déséquilibre des courants de charge.
- Réduction des risques de résonance hypo-synchrone.
- Amélioration de la stabilité dynamique, par l'amortissement des oscillations de puissance et de la stabilité de tension.

**I.6.2.2 Compensateur statique série synchrone SSSC****I.6.2.2.1 Définition**

Le SSSC est un système d'électronique de puissance connecté en série qui injecte une tension en série avec la ligne de transmission à travers un transformateur série. Le SSSC, a une fonction comparable au TCSC [9, 11,18]. Mais contrairement à ce dernier qui présente une zone morte à la résonance parallèle, le réglage est continu. De plus, l'introduction d'un stockage d'énergie est possible du fait de la structure des convertisseurs de tension (VSC).

**I.6.2.2.2 Principe de compensation par SSSC**

Ce type de compensateur série (Compensateur Synchrone Statique Série) est le plus important dispositif de cette famille. Il est constitué d'un onduleur triphasé couplé en série avec la ligne électrique à l'aide d'un transformateur (Figure I.11).[16]

Son rôle est d'introduire une tension triphasée, à la fréquence 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.

L'avantage de ce compensateur est de ne pas introduire physiquement un condensateur ou une inductance, mais de simuler leurs fonctions. Cela évite l'apparition des oscillations dues à la résonance avec les éléments inductifs du réseau. La caractéristique statique d'un Compensateur Synchrone Statique Série est donnée sur la Figure (I.12).

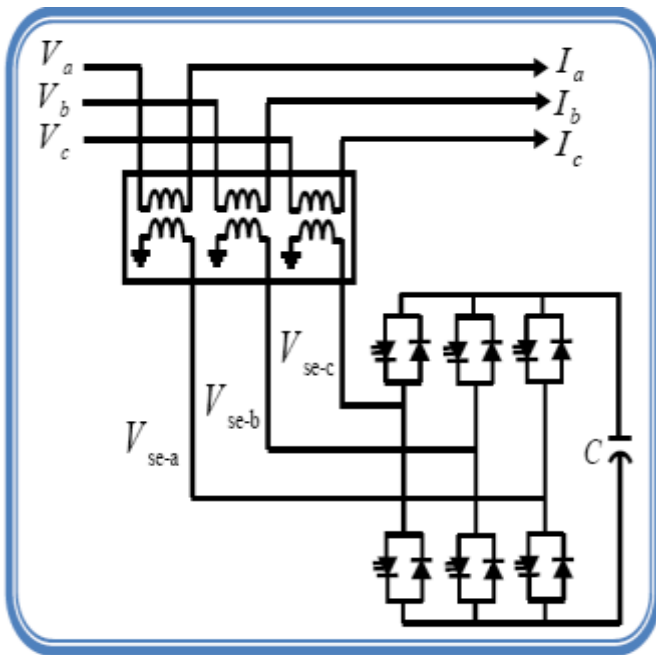


Figure I.11: (a) Schéma de base du SSSC.

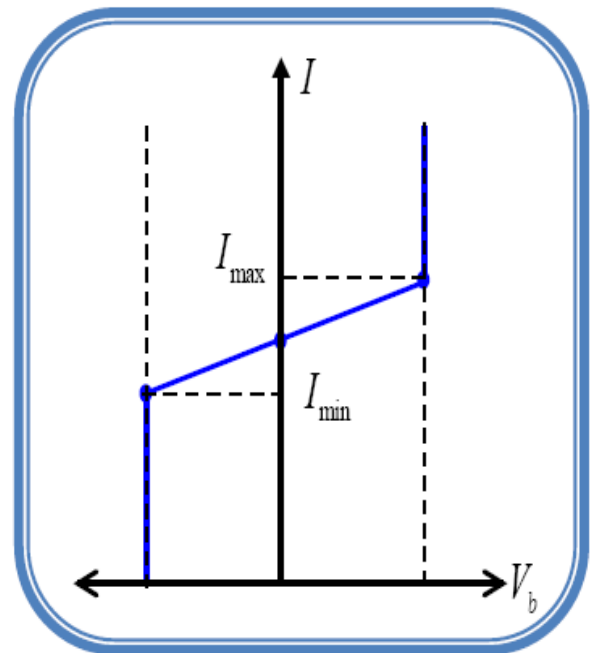


Figure I.12: (b) Statique du SSSC.

### I.6.3 Dispositifs de compensation hybrides "série - parallèle "

#### I.6.3.1 UPFC

##### I.6.3.1.1 Définition

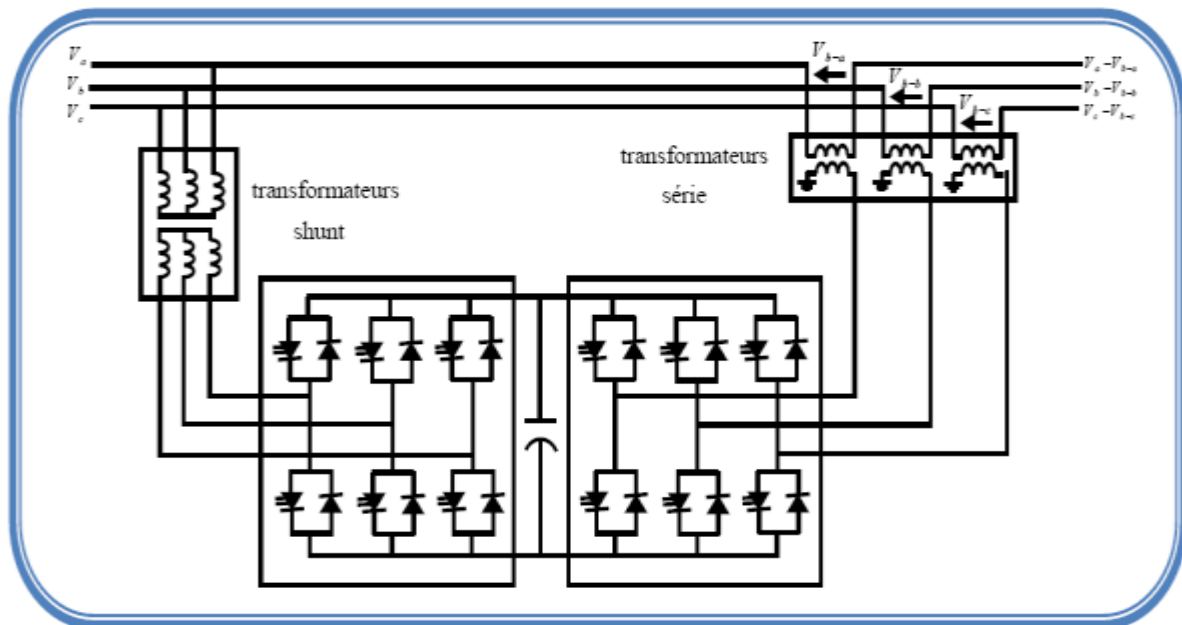
L'UPFC (Unified Power Flow Controller), appelé aussi Déphaseur Régulateur Universel (DRU) ou variateur de charge universel, est l'un des plus performants des composants FACTS. Il est capable de contrôler, simultanément et indépendamment, la puissance active et la puissance réactive de la ligne. L'originalité de ce compensateur est de pouvoir contrôler les trois paramètres associés au transit de puissance dans une ligne électrique : la tension, l'impédance de la ligne, le déphasage des tensions aux extrémités de la ligne.

En principe, l'UPFC est capable d'accomplir les fonctions des autres dispositifs FACTS à savoir le réglage de la tension, la répartition de flux d'énergie, l'amélioration de la stabilité et l'atténuation des oscillations de puissance.

##### I.6.3.1.2 Principe de fonctionnement

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, l'autre connecté en série avec le réseau via trois transformateurs monophasés dont les primaires sont reliés, entre eux, en étoile [6].

Les deux onduleurs sont interconnectés par un bus continu et par un condensateur de filtrage comme indiqué sur la Figure (I.13). L'onduleur série injecte une tension à la même fréquence que celle du réseau et dont l'amplitude et la phase est ajustable.



**Figure I.13:** Schéma simplifié d'un UPFC connecté au réseau électrique.

Ce réglage d'amplitude et de phase permet d'obtenir trois modes de fonctionnement de la partie série :

- Contrôle de tension : la tension injectée est en phase avec celle du côté shunt.
- 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.

Le but principal de ces trois modes de fonctionnement est le contrôle des puissances actives et réactive qui transitent dans la ligne. De plus, l'UPFC est capable de combiner les différentes compensations et de basculer d'un mode de fonctionnement à un autre.

La partie shunt peut être utilisée afin de compenser la puissance réactive pour le maintien du plan de la tension au nœud S et éventuellement fournir de la puissance active injectée dans le réseau par la partie série.

## I.7 HVDC

Dans les années 1950, avec le développement des interrupteurs au mercure, les systèmes de transport haute tension à courant continu sont devenus attractifs pour les transmissions de puissance longue distance. Leur principe de fonctionnement peut être résumé de la manière suivante : la puissance alternative fournie par une (ou plusieurs) source(s) est dans un premier temps transformée en une puissance continue. Un redresseur assure l'opération. La puissance continue transite ensuite par l'intermédiaire d'une ligne de transmission et, finalement, un autre onduleur transforme cette puissance continue en une puissance alternative délivrée à une ou plusieurs charge(s).



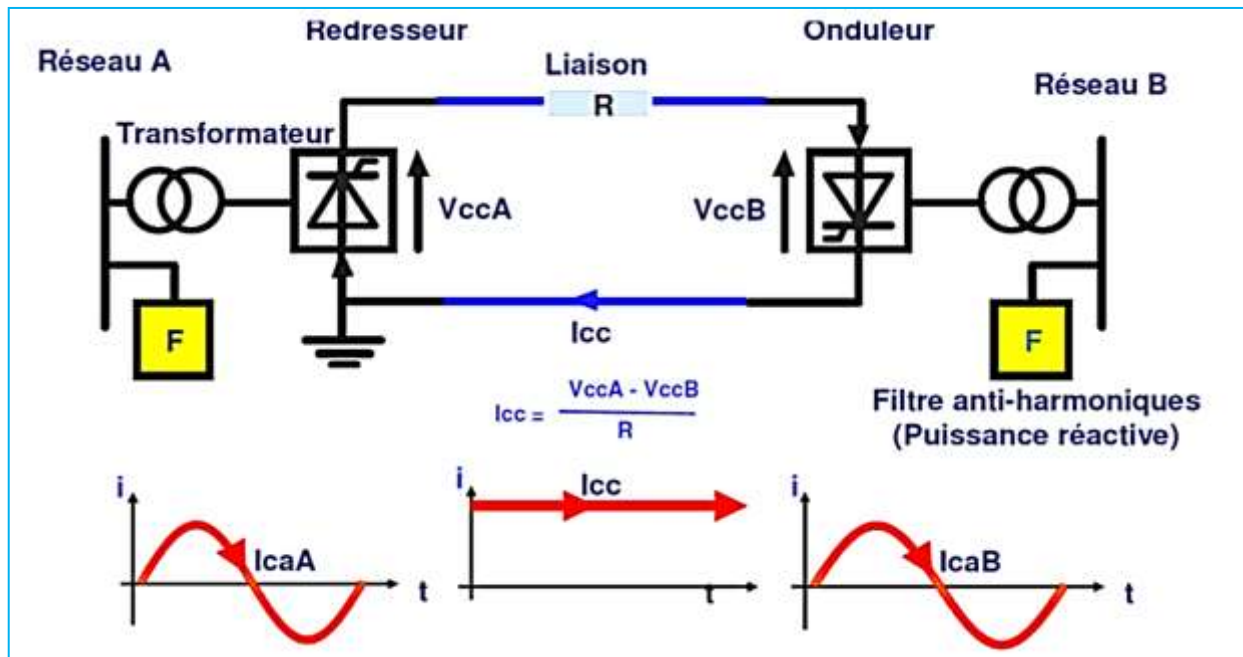


Figure I.14 : Schéma d'une ligne de transport à CC reliant deux réseaux.

### I.8 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre, les dispositifs FACTS de types séries, parallèles et hybrides. Et examiner les FACTS les plus utilisés à l'être dans la perspective des évolutions de l'électronique de puissance. Les solutions FACTS seront de plus en plus compétitives face aux développements des réseaux appelés à fonctionner près de leur limite de stabilité.

# **Chapitre II :**

# **Modélisation d'un**

# **Réseau Électrique**

## **II.1 Introduction**

L'objet de ce chapitre est de présenter les modèles des différents éléments qui contribuent au transfert de la puissance active. Ainsi, nous allons dans un premier temps étudier la modélisation de la source de puissance. Nous pourrions voir que celle-ci sera décrite par une génératrice synchrone. Le modèle de ligne de transmission sera aussi un élément essentiel dans notre système.

## **II.2 Présentation générale des réseaux**

La fonction principale des réseaux de distribution et de transport est d'assurer la mise en commun de tous les moyens de production pour fournir l'énergie électrique aux différents utilisateurs. Les points de production sont des centrales qui produisent l'énergie électrique provenant de diverses sources d'énergie primaire : nucléaire, hydro-électrique, charbon . . . et naturellement les énergies renouvelables : éolienne, PV. . .

Traditionnellement, les réseaux électriques sont décomposés en trois sous systèmes : la génération, le transport et la distribution. Chaque sous-système est relié par des postes chargés de l'adaptation des niveaux de tension. Traditionnellement, ces réseaux utilisent des courants alternatifs à basse fréquence (50 \ 60 Hz). Nous distinguons trois types de réseaux électriques

### **II.2.1 Les réseaux de transport et d'interconnexion**

Qui ont pour mission de collecter l'énergie produite par les centrales et de l'acheminer avec les flux les plus importants possibles vers les zones de consommation afin de permettre une exploitation sûre et économique des moyens de production. Le niveau de tension dépend du pays, mais normalement, le niveau de tension est établi entre 220 kV et 800 kV (exemple 765 kV en Afrique du sud).

### **II.2.2 Les réseaux de répartition**

Qui reçoivent l'énergie des réseaux de transport et leur rôle est de mener l'électricité aux villes et aux importants clients industriels, Le niveau de tension de ces réseaux est entre 45 kV et 160 kV, ils assurent la desserte des points de livraison à la distribution.

### **II.2.3 Les réseaux de distribution**

Les réseaux de distribution qui desservent les postes de distribution publique, alimentant les réseaux en basse tension, et les postes clients. Le niveau de tension est entre 4 Kv à 45 kV pour la moyenne tension et quelques centaines de volts pour la basse tension (220/400 V) Toute défaillance sur ces réseaux peut entraîner des défauts d'alimentation sur des zones étendues, des chutes de tension importantes ou même des pertes de synchronisme des alternateurs de centrales.

Des dispositions sont prises afin qu'un incident ou une avarie sur une unité de production ou une ligne de transport n'ait que peu ou pas de répercussion sur les utilisateurs. Ils sont aujourd'hui équipés de systèmes de protection très élaborés, sélectifs, permettant l'élimination des défauts pouvant les affecter et ainsi nuire à la fois et à la qualité de fourniture, à la sécurité des biens et des personnes. Dans un pays, les réseaux de transport et de distribution publics assurent le transfert d'énergie électrique de points de production aux points de consommation.

### II.3 Modélisation de la machine synchrone

Les différentes machines ne sont pas indépendantes entre elles, mais reliées par un réseau d'énergie électrique. Celui-ci correspond à un ensemble de lignes, transformateurs, machines, charges, jeux de barres, dispositifs de régulation etc. La machine synchrone représente l'élément essentiel dans l'étude de la stabilité des systèmes d'énergie électriques. Les machines synchrones participent de façon extrêmement importante aux phénomènes dynamiques et à la qualité globale de l'alimentation en énergie. Il est donc nécessaire de développer des modèles pratiques et réalistes.

L'alternateur est une machine synchrone composée des ensembles suivants : le stator comprend un circuit magnétique constitué par des tôles isolées les une des autres. Dans sa partie intérieure, le circuit magnétique comporte des encoches uniformément réparties dans lesquelles vient se loger l'enroulement triphasé du stator. La sortie de chacune des phases du stator est connectée au réseau triphasé d'utilisation. Le rotor tourne à l'intérieur du stator immobile. Il porte des encoches disposées dans sa périphérie, un enroulement parcouru par un courant continu (courant d'excitation). Le rotor excité en courant continu, produit un champ tournant; ce champ tournant engendre des forces électromotrices dans chacune des phases de l'enroulement du stator. La machine est munie d'un autre type d'enroulements (dit amortisseurs). Pour les machines à pôles saillants, nous les trouvons sous formes de barres reliées à deux couronnes en court-circuit.

Pour les machines à pôles lisses, c'est la partie massive du fer rotorique qui joue le rôle d'amortisseur. Les deux caractéristiques essentielles d'une machine synchrone sont :

- Le rotor est excité par un courant continu ;
- La vitesse de rotation qui est constante en régime permanent. Elle est donnée par :

$$N = 60 \frac{f}{p}$$

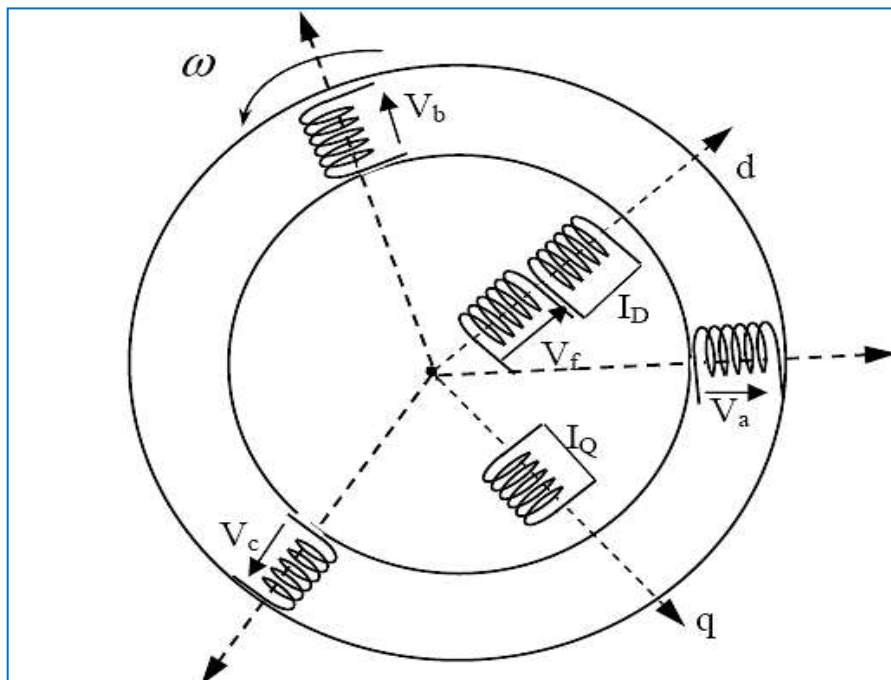
Avec :

N : vitesse de rotation synchrone en [tr/min]

f : fréquence des courants statoriques en [Hz]

P : nombre de paires de pôles.

La Figure (II.1) montre une représentation d'une machine synchrone à trois phases avec circuits amortisseurs :



**Figure II-1** : Machine synchrone triphasée.

Où :

- a, b, c : enroulements statoriques ;
- D: enroulement amortisseur longitudinal ;
- Q: enroulement amortisseur transversal ;

### II.3.1 Hypothèses simplificatrices

Afin de développer le modèle de la machine synchrone, plusieurs hypothèses sont considérées, telles que :

- Le circuit magnétique n'est pas saturé.
- La résistance des enroulements ne varie pas avec la température
- Entrefer constant.
- L'effet de la variation de la vitesse est négligé.
- L'influence des harmoniques est négligeable.
- L'effet d'hystérésis et des courants de Foucault dans les parties magnétiques sont négligés.
- On admettra que l'ensemble des amortisseurs peut être représenté par deux enroulements fermés D et Q en court circuit sur eux même.
- Les forces électromotrices sont réparties sinusoïdalement dans l'entrefer de la machine, il y a symétrie par rapport à l'axe magnétique du rotor.

### II.3.2 Modèle de la machine synchrone dans le repère de Park

La méthode de décomposition selon deux axes liés au rotor appliquée à la machine synchrone permet de résoudre un grand nombre de problèmes des régimes transitoires (problème de perturbations, oscillations, fonctionnement asynchrone). Cette méthode supprime la non-linéarité entre les grandeurs du stator et celles du rotor, les enroulements de la machine doivent être ordonnés selon deux axes perpendiculaires, chaque machine est modélisée dans sa référence locale (d-q) tournant avec son rotor. La transformation de Park permet de représenter la machine synchrone par une machine équivalente bipolaire où les enroulements statoriques a, b, c seront transférés vers le référentiel rotorique constitué par des enroulements orthogonaux selon les deux axes. En désignant par  $\theta$ , l'angle entre l'axe d et l'axe magnétique de la phase a, la transformée de Park est définie par :

$$A = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{II.1})$$

La représentation schématique de la Figure (II.2) devient celle de la Figure suivante :

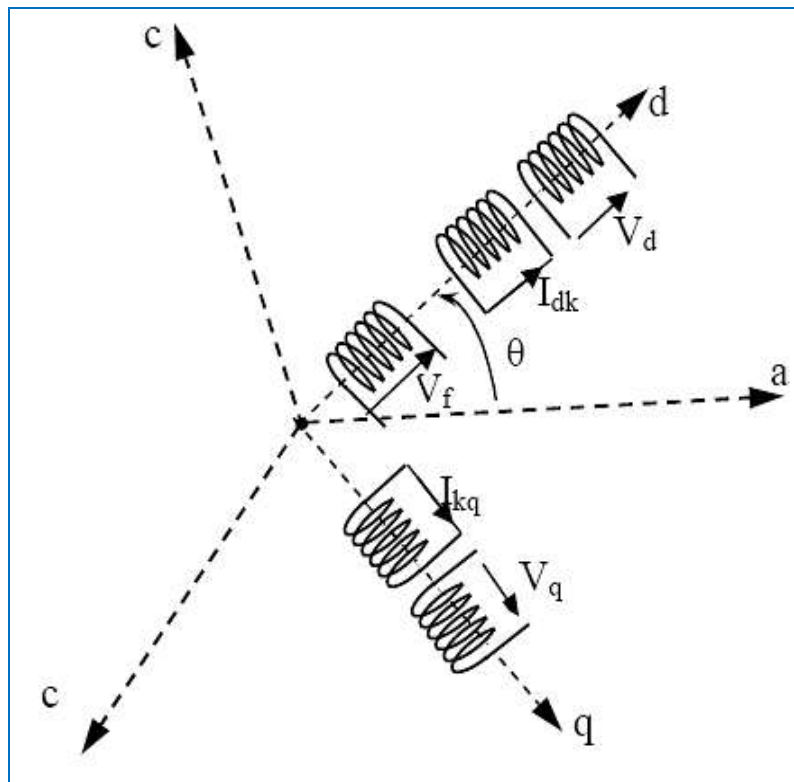


Figure II-2 : Modèle de la machine synchrone dans le repère de Park.

### II.3.3 Équations électriques et magnétiques

Les équations décrivant la machine synchrone sont données comme suit :

- Équations électriques ( Les enroulements amortisseurs sont court-circuités  $V_D = V_Q = 0$  )

$$U_d = r_s \cdot i_d + \frac{d\phi_d}{dt} - \omega_r \cdot \phi_q \quad (\text{II-2})$$

$$U_q = r_q \cdot i_q + \frac{d\phi_q}{dt} + \omega_r \cdot \phi_d \quad (\text{II-3})$$

$$U_F = r_F \cdot i_F + \frac{d\phi_F}{dt} \quad (\text{II-4})$$

$$0 = r_{kd} \cdot i_{kd} + \frac{d\phi_{kd}}{dt} \quad (\text{II-5})$$

$$0 = r_{kq} \cdot i_{kq} + \frac{d\phi_{kq}}{dt} \quad (\text{II-6})$$

**Équations de flux :**

$$\begin{bmatrix} \phi_d \\ \phi_q \\ \phi_F \\ \phi_{kd} \\ \phi_{kq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 & M_F & M_{kd} & 0 \\ 0 & L_q & 0 & 0 & M_{kq} \\ M_F & 0 & L_F & M_{Fd} & 0 \\ M_{kd} & 0 & M_{Fd} & L_{kd} & 0 \\ 0 & M_{kq} & 0 & 0 & L_{kq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_F \\ i_{kd} \\ i_{kq} \end{bmatrix} \quad (\text{II.7})$$

A partir des équations (III.2),..., (III.7), nous avons alors :

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_F \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s + pL_d & -L_q \omega_r & pM_F & pM_{kd} & -\omega_r \cdot M_{kq} \\ L_d \cdot \omega_r & r_s + pL_q & \omega_r \cdot M_F & \omega_r \cdot M_{kd} & pM_{kq} \\ pM_F & 0 & rF + pL_F & pM_{Fd} & 0 \\ pM_{kd} & 0 & pM_{Fd} & r_{kd} + pL_{kd} & 0 \\ 0 & pM_{kq} & 0 & 0 & r_{kq} + pL_{kq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_F \\ i_{kd} \\ i_{kq} \end{bmatrix} \quad (\text{II.8})$$

Afin de présenter le système sous la forme d'équations d'état, les tensions s'écrivent également sous la forme suivante :

$$[V] = [L][I^*] - [R] \cdot [I] \quad (\text{II.9})$$

$$[I^*] = [L]^{-1} [V] - [L]^{-1} \cdot [R] \cdot [I] \quad (\text{II.10})$$

$$[V] = \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.11})$$

$$[I] = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_f \\ i_{kd} \\ i_{kq} \end{bmatrix} \quad (\text{II.12})$$

$$[L] = \begin{bmatrix} L_d & 0 & M_F & M_{kd} & 0 \\ 0 & L_q & 0 & 0 & M_{kq} \\ M_F & 0 & L_F & M_{Fd} & 0 \\ M_{kd} & 0 & M_{Fd} & L_{kd} & 0 \\ 0 & M_{kq} & 0 & 0 & L_{kq} \end{bmatrix} \quad (\text{II.13})$$

$$[R] = \begin{bmatrix} -r_s & L_q \omega_r & 0 & 0 & \omega_r M_{kq} \\ -L_d \omega_r & -r_s & -\omega_r M_F & -\omega_r M_{kd} & 0 \\ 0 & 0 & -r_F & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -r_{kd} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -r_{kq} \end{bmatrix} \quad (\text{II.14})$$

$$[R] = \begin{bmatrix} -r_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -r_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -r_F & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -r_{kd} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -r_{kq} \end{bmatrix} - \omega_r \begin{bmatrix} 0 & -L_q & 0 & 0 & M_{kq} \\ L_d & 0 & M_F & M_{kd} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.15})$$

Le couple électromagnétique de la machine synchrone triphasé s'exprime en fonction des différents courants de la machine comme suit :

$$C_e = 3/2.p(l_d i_q i_d - l_q i_q i_d + M_f i_f i_q + M_{kd} i_{kd} i_q - M_{kq} i_{kq} i_d) \quad (\text{II.16})$$

Où :

**Id , Iq** : Composantes directe et en quadrature des courants statoriques .

**Vd , Vq** : Composantes directe et en quadrature de la tension terminale .

**If** : Courant rotorique du circuit d'alimentation.

**Vf** : Tension d'excitation.



**ikd , ikq**: composantes directe et en quadrature des courants des circuits d'amortissement .

**w<sub>r</sub>**: vitesse de synchronisme du rotor

**C<sub>m</sub>**: couple mécanique ;

**r<sub>s</sub>**: résistances de l'enroulement a, b, c.

**r<sub>f</sub>, r<sub>kd</sub>, r<sub>kq</sub>**: résistance de l'inducteur, de l'amortissement d'axe d, de l'amortissement d'axe q respectivement.

**Φ<sub>i</sub> (i = a,b,c,f,kd,kq)** : flux d'enroulement traversant l'enroulement i .

**VD = VQ = 0**, Les enroulements amortisseurs sont court-circuités.

**M<sub>f</sub>, M<sub>kd</sub>, M<sub>kq</sub>**: inductance mutuelle.

**L<sub>i</sub> (i = d,q,f,kd,kq)**: inductance propre de l'enroulements i.

### II.3.4 Équation du mouvement des machines synchrones :

L'équation du mouvement est donnée par :

$$j \frac{d^2 \Omega}{dt^2} = C_m - C_e - C_a = C_{acc} \quad (\text{II.17})$$

Avec :

**C<sub>acc</sub>** : couple d'accélération.

**C<sub>m</sub>**: couple mécanique fourni par la turbine.

**C<sub>e</sub>**: couple électromagnétique fourni par la machine.

**C<sub>a</sub>**: couple d'amortissement dû aux frottements.

**δ**: déplacement angulaire du rotor.

**J** : moment d'inertie des masses tournantes.

L'expression précédente peut s'écrire sous la forme.

$$\frac{dw}{dt} = \frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{w}{2H} \left( P_m - P_e - D \frac{d\delta}{dt} \right) \quad (\text{II.18})$$

Où :

**P<sub>m</sub>** : puissance mécanique fournie à la machine.

**P<sub>e</sub>** : puissance électrique fournie par la machine.

**P<sub>a</sub>** : puissance d'amortissement  $\left( P_a = D \frac{d\delta_i}{dt} \right)$ .

**H** : constante d'inertie de la machine.

Avec :

$$W_c = \frac{1}{2} J w_0^2 \quad (\text{II.19})$$

$$H = \frac{W_c}{S_{mach}} \quad (\text{II.20})$$

$W_c$  : l'énergie cinétique à la vitesse de synchronisme ;

$S_{mach}$  : puissance apparente nominale de la machine [7].

### II.3.5 Expression de la tension aux bornes de la machine

Les composantes directe et en quadrature de la tension aux bornes des machine sont données par :

$$V_{di} = E'_{di} - X'_{qi} \cdot I_{qi} \quad (II.21)$$

$$V_{qi} = E'_{qi} - X'_{di} \cdot I_{di} \quad (II.22)$$

Avec:

$X'd = L'd \omega$  et  $X'q = L'q \omega$  sont respectivement les réactances statoriques transitoires directes et en quadrature de l'alternateur.

Donc, la tension aux bornes de la machine est:

$$V_i = \sqrt{(V_{di})^2 + (V_{qi})^2} \quad (II.23)$$

L'expression de la F.é.m. transitoire  $E'q$  s'écrit par l'équation :

$$\frac{d E'_q}{dt} = \frac{1}{T'_{do}} \left[ E_{ex} - E'_q (X_d - X'_d) \cdot I_d \right] \quad (II.24)$$

L'expression de la F.é.m. transitoire  $E'd$  s'écrit par l'équation :

$$\frac{d E'_d}{dt} = \frac{1}{T'_{qo}} \left[ E_{ex} - E'_d (X_q - X'_q) \cdot I_q \right] \quad (II.25)$$

Avec :

$E'd, E'q$  : forces électromotrices transitoires suivant les axes q et d ;

$E_{ex}$  : tension d'excitation.

$X_d, X_q$  sont respectivement les réactances statoriques directe et en quadrature de l'alternateur.

$T'_{qo}, T'_{do}$  : Constantes du temps de l'amortisseur selon l'axe q et d.

Selon les hypothèses adoptées on distingue plusieurs modèles:

- Modèle classique (système sans dispositifs de régulation ou modèle du deuxième ordre) :

$$\frac{d \delta}{dt} = \omega - 2 \cdot \pi \cdot f_0 \quad (II.26)$$

$$\frac{d \omega}{dt} = \frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{\pi \cdot f}{H} (P_m - P_e) \quad (II.27)$$

Avec:

$f_0$  : fréquence de base ;

$\omega$  : pulsation de la tension aux bornes de la machine synchrone ;

$t$  : temps en seconde.

- Modèle du troisième ordre (avec la composante quadrature  $E'_q$ ) :

$$\begin{aligned}\frac{d\delta}{dt} &= \omega - 2\pi f_0 \\ \frac{d\omega}{dt} &= \frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{\pi f}{H} (P_m - P_e) \\ \frac{dE'_q}{dt} &= \frac{1}{T'_{do}} [E_{ex} - E'_q + (X'_d - X_d)I_d]\end{aligned}\quad (\text{II.28})$$

- Modèle du quatrième ordre (avec les composantes  $E'_d$  et  $E'_q$ ) :

$$\begin{aligned}\frac{d\delta}{dt} &= \omega - 2\pi f_0 \\ \frac{d\omega}{dt} &= \frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{\pi f}{H} (P_m - P_e) \\ \frac{dE'_q}{dt} &= \frac{1}{T'_{do}} [E_{ex} - E'_q + (X'_d - X_d)I_d] \\ \frac{dE'_d}{dt} &= \frac{1}{T'_{do}} [-E'_d + (X'_q - X_q)I_q]\end{aligned}\quad (\text{II.29})$$

### II.3.6 Mise en équation du réseau électrique

L'ensemble du réseau électrique est modélisé par un système d'équations linéaires reliant les tensions et les courants injectés aux nœuds. Les courants nodaux sont reliés aux tensions nodales par la relation matricielle :

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = [Y_{bus}] \cdot \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix}\quad (\text{II.30})$$

[V], [I] : sont des matrices colonnes désignant le courant et la tension au nœud  $i$  ;

[Ybus] : Matrice d'admittance nodale du réseau.

#### II.3.6.1 Réduction de la matrice admittance

La réduction de la matrice admittance a pour but de trouver la relation entre les courants injectés par les générateurs et les tensions aux nœuds actifs (nœuds des générateurs). Le principe d'élimination des nœuds connu par la méthode de KRON est donné par l'expression suivante :

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K & L \\ L^T & M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_n \end{bmatrix} \quad (\text{II.31})$$

Avec :

$I_n = 0$  ( il n'y a aucun courant entrant ou sortant ).

La matrice  $Y$  doit être partagée d'une façon où les éléments à éliminer soient séparés aux autres éléments par deux traits vertical et horizontal ; développons le système d'équations :

$$\begin{aligned} I_a &= KV_a + LV_n \\ I_n &= L^T V_a + M V_n = 0 \\ V_n &= -M^{-1} L^T V_a \\ I_a &= Y V_a \\ Y &= (K - LM^{-1} L^T) \end{aligned} \quad (\text{II.32})$$

Où :

**K** : matrice carrée à maintenir ;

**M** : matrice carrée dont ses éléments sont liés seulement aux jeux de barres à éliminer

**In**: courant nul au nœud éliminé.

**L** et **LT**: matrices liées aux jeux de barres à garder et à éliminer.

### II.3.7 Expression de la puissance électrique

La puissance électrique est donnée par :

$$Pe_i = \text{Réél} (E_i \cdot I_i)^* \quad (\text{II.33})$$

Avec :

$$I_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} E_j \quad (\text{II.34})$$

**I** : matrice colonne désignant le courant au nœud  $i$  ;

**Y<sub>ij</sub>** : admittance entre les nœuds  $i$  et  $j$ .

Développons l'équation (II.32), la puissance électrique s'écrit alors :

$$Pe_i = \sum_{j=1}^n E_i E_j Y_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \quad (\text{II.35})$$

Avec :

$$Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij} \quad (\text{II.36})$$

**θ<sub>ij</sub>**: l'argument de l'élément  $Y_{ij}$ .

**Y<sub>ij</sub>** : admittance de charge au nœud  $i$ .

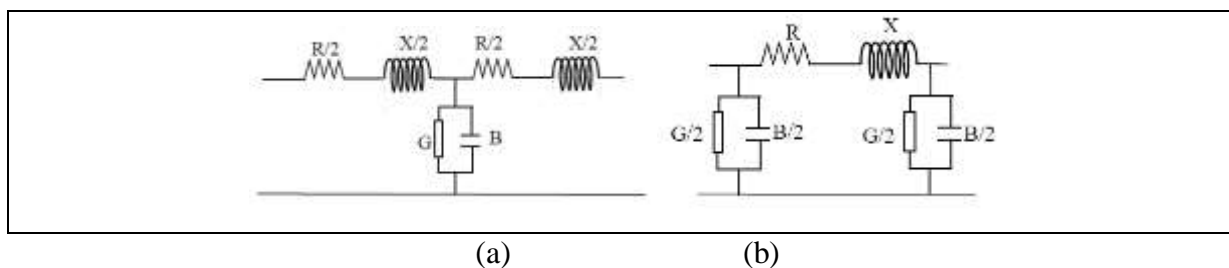
Donc :

L'équation dynamique est donnée par :

$$p_{m_i} - \left[ E_i^2 G_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n E_i E_j Y_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j - \delta_{ij}) \right] = \frac{2H}{\omega} \frac{d^2 \delta_i}{dt^2} + D_i \frac{d \delta_i}{dt} \quad (\text{II.37})$$

### II.4 Modélisation d'une ligne de transport

Une ligne de transmission, reliant deux nœuds i et k, est habituellement modélisée par un circuit équivalent, comme le montre la Figure (II.3) dont les quatre paramètres de la ligne de transmission sont réparties uniformément le long de la ligne.



**Figure II-3 :** Schéma équivalent d'une ligne de transport.

a- modèle en T. b- modèle en  $\pi$ ,

Où :

**R** : résistance de la ligne.

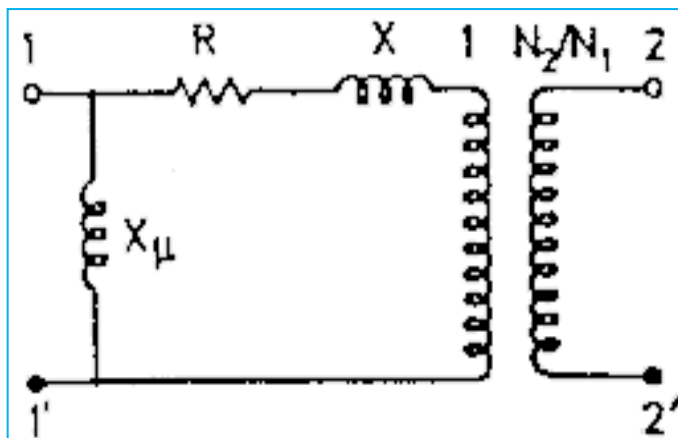
**X** : réactance de la ligne.

**G** : conductance de la ligne.

**B** : réactance capacitive de la ligne.

### II.5 Modélisation du transformateur

Soit un transformateur monophasé possédant  $N_1$  et  $N_2$  spires respectivement au primaire et au secondaire ( $n = N_1/ N_2$ ). En transposant la branche magnétisante en tête du circuit, son schéma équivalent peut se représenter comme ci-dessous :



**Figure II-4 :** Modèle du transformateur.

Où :

- $R$  étant la résistance des enroulements primaires et secondaires :

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_1 + \mathbf{N}[\Omega] \quad (\text{II.38})$$

- $X$  étant la réactance de fuite du transformateur :

$$\mathbf{X} = \mathbf{X}_{f1} + \mathbf{N}_2 \cdot \mathbf{X}_f [\Omega] \quad (\text{II.39})$$

- $X_m$  étant la réactance magnétisante :

$$\mathbf{X}_\mu = \mathbf{n} \cdot \mathbf{X}_M [\Omega] \quad (\text{II.40})$$

Généralement le modèle d'un transformateur est donné par une réactance inductive.

### II.6 Modélisation d'une charge

Le modèle équivalent d'une charge est représenté par une admittance  $Y$  définie par :

$$Y_i = \left( \frac{P_i - jQ_i}{V_i^2} \right) \quad (\text{II.41})$$

$V_i$  : Tension aux bornes de la charge.

$P_i, Q_i$  : Puissances actives et réactives consommées par la charge  $i$ .

$Y_i$  : Admittance de la charge

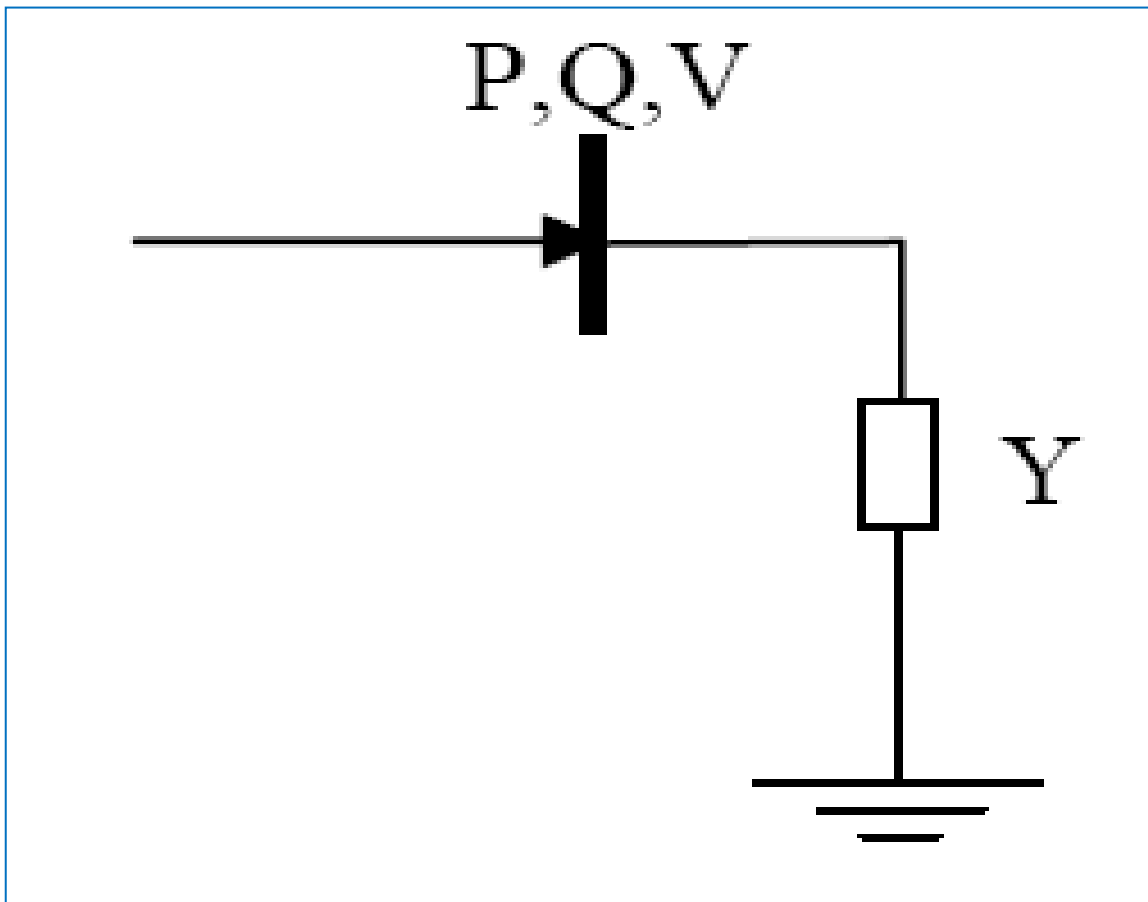
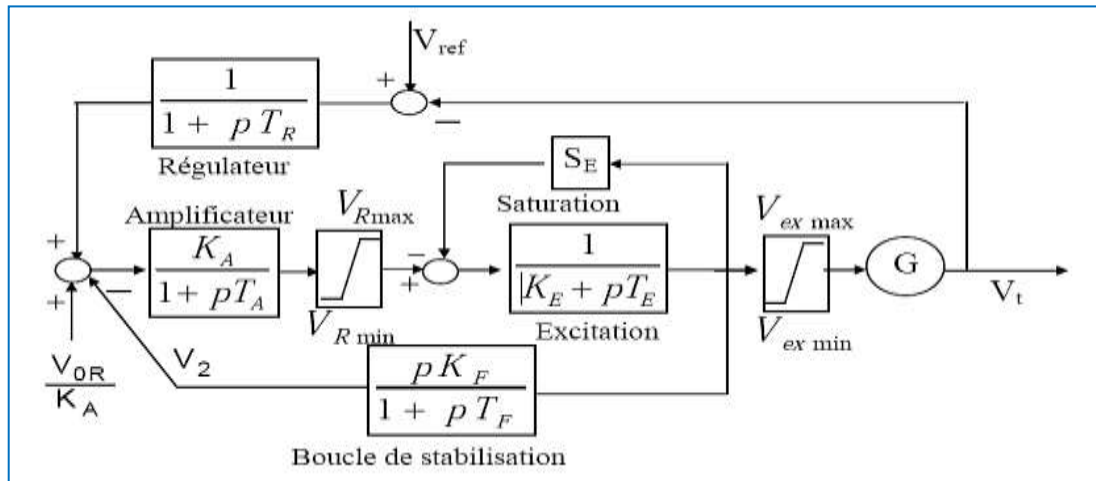


Figure II-5 : Schéma équivalent d'une charge.

## II.7 Modélisation des dispositifs de régulation

### II.7.1 Régulateur de tension



**Figure II-6:** Schéma bloc du régulateur de tension IEEE Type 1.

Avec :

$K_R$ ,  $K_e$ ,  $K_F$  : sont respectivement les gains du régulateur, de l'amplificateur, de l'excitation et du stabilisateur

$T_R$ ,  $T_A$ ,  $T_E$ ,  $T_F$  : sont respectivement les constantes de temps du régulateur, de l'amplificateur, et du stabilisateur ;

$S_E$ : fonction de saturation, elle est définie par :

$$S_e = A_{ex} \exp(B_{ex} \cdot E_{ex}) \quad (\text{II.42})$$

Le schéma bloc présenté par la Figure (II.6) est décrit par l'ensemble des équations différentielles suivantes :

$$\begin{aligned} \frac{dV_1}{dt} &= \frac{1}{T_R} (V_{ref} - V_t - V_1) \\ \frac{dV_R}{dt} &= \frac{1}{T_A} \left[ K_A \left( V_1 + \frac{V_{oR}}{K_A} - V_2 \right) - V_R \right] \\ \frac{dE_{ex}}{dt} &= \frac{1}{T_E} [V_R - (S_E + K_E) E_{ex}] \\ \frac{dV_2}{dt} &= \frac{1}{T_F} \left[ K_F \frac{dE_{ex}}{dt} - V_2 \right] \end{aligned} \quad (\text{II.43})$$

Où :

$V_1$ : Tension de sortie du régulateur.

$V_{or}$  : Tension de sortie de l'amplificateur avant la perturbation (tension initiale) .

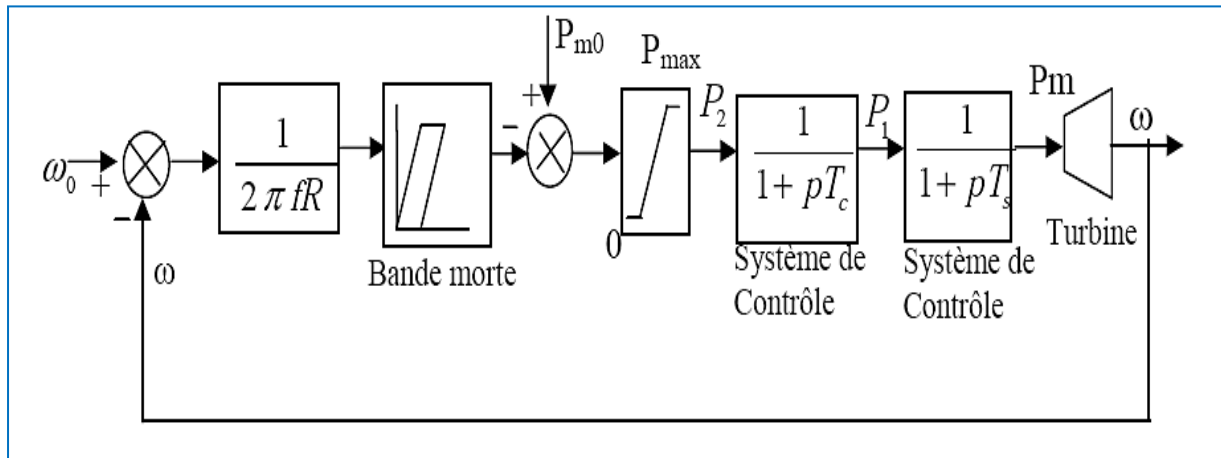
$V_R$ : Tension de sortie de l'amplificateur.

$V_t$  : Tension statoriques.

$V_2$ : Tension de sortie de la boucle de stabilisation.

**II.7.2 Régulateur de vitesse**

Le modèle du régulateur de vitesse est montré par la Figure suivante:



**Figure II-7 :** Schéma bloc du régulateur de vitesse.

Où :

**R** : désigne le statisme.

**T<sub>s</sub>** : temps de réponse du circuit vapeur.

**T<sub>c</sub>** : temps de réponse du circuit commande.

**P<sub>m0</sub>**: désigne la puissance mécanique d'entraînement à l'équilibre.

**P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>**: puissances mécaniques à la sortie du système de contrôle et du circuit de limitation.

**DBt** : valeur de la bande morte (variation de la fréquence tolérée, au delà de cette limite, le régulateur entre en action). Les équations régissant la puissance mécanique liée à la régulation de vitesse de la Figure (II.7) sont données ci -dessous :

$$\begin{aligned} \frac{dP_m}{dt} &= \frac{1}{T_s} (P_1 - P_m) \\ \frac{dP_1}{dt} &= \frac{1}{T_c} (P_2 - P_1) \end{aligned} \tag{II.44}$$

$$P_2 = P_m(0) - \frac{1}{R} \left[ \frac{\omega_b - \omega}{2\pi f} \pm DBt \right]$$

La puissance mécanique P2 est donnée par :

- Si  $P_3 \geq P_{max}$  alors  $P_2 = P_{max}$  (II.45)

- Si  $P_3 \leq 0$  alors  $P_2 = 0$  (II.46)

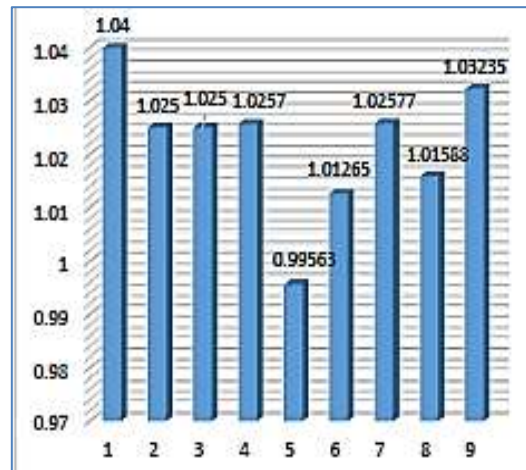
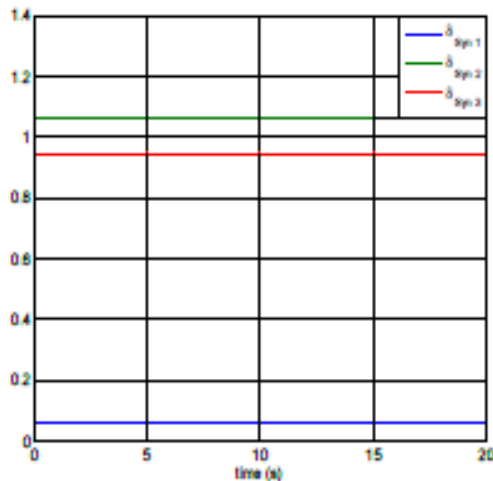
**II.8 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons traité les notions générales concernant la modélisation des différents éléments constituant un système de transport d'énergie telle que la machine, la ligne, le transformateur, la charge et la modélisation des dispositifs de régulation.



**Chapitre III :**  
**Étude Comparative**  
**SVC / STATCOM**





**Figure III.2 :** Angles rotoriques des générateurs.

**Figure III.3 :** Amplitude tension.

Le tableau III.1 montre l'amplitude de tension aux différents jeux de barres de réseau étudié qui montre l'amplitude des tensions dans les limites requises.

**Tableau III.1 :** Amplitude de tension pour 9 J.B.

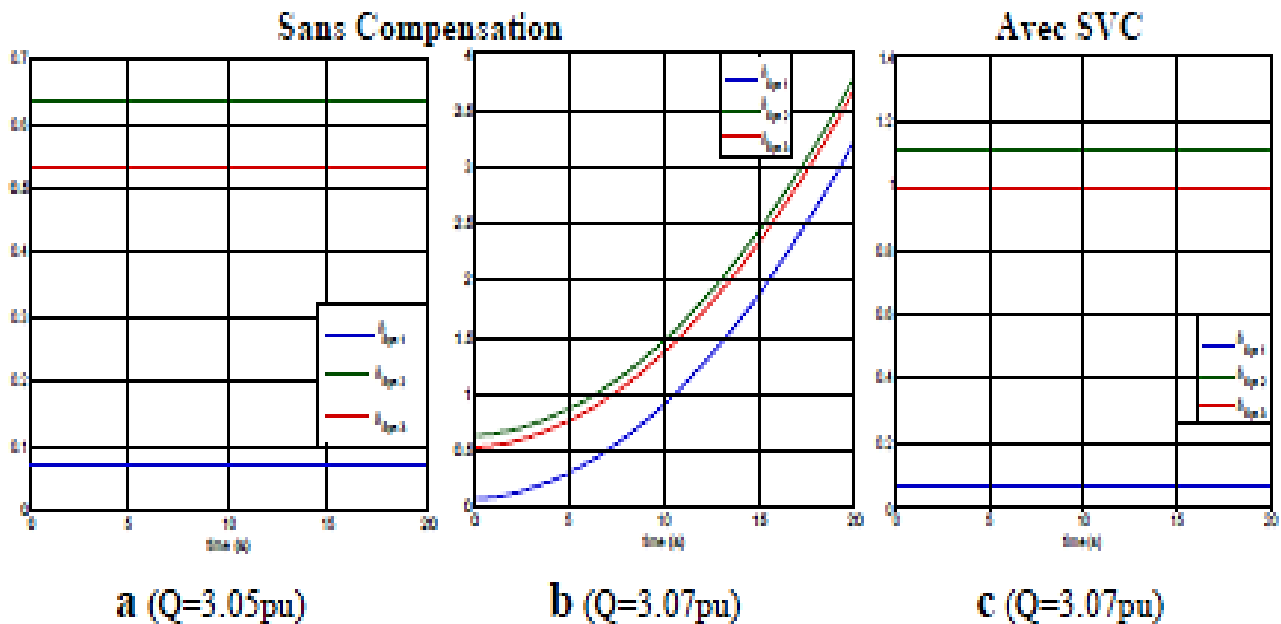
	V (pu)
<b>J.B1</b>	1.04000
<b>J.B2</b>	1.02500
<b>J.B3</b>	1.02500
<b>J.B4</b>	1.02579
<b>J.B5</b>	0.99563
<b>J.B6</b>	1.01265
<b>J.B7</b>	1.02577
<b>J.B8</b>	1.01588
<b>J.B9</b>	1.03235

### Deuxième étape : (compensation avec SVC )

#### - Variation de la charge réactive au J.B5

On a raccordé un dispositif FACTS (SVC) au jeu de barre 5, les résultats de simulation montrent que les générateurs du système se perturbent comme montrés dans les Figures.III.4 (a et b), une fois que le réseau est raccordé à un système de compensation, tel que (SVC) de même charge de la réactive cité auparavant, on voit d'après la Figure III.4 (C) que le système revient à son état de stabilité.

La Figure III.4 (c), montre l'angle rotoriques des générateurs en présence de compensateur SVC. Cette dernière va corriger le manque de l'énergie réactive demander pare les charges



**Figure III.4 :** Angles rotoriques des générateurs.

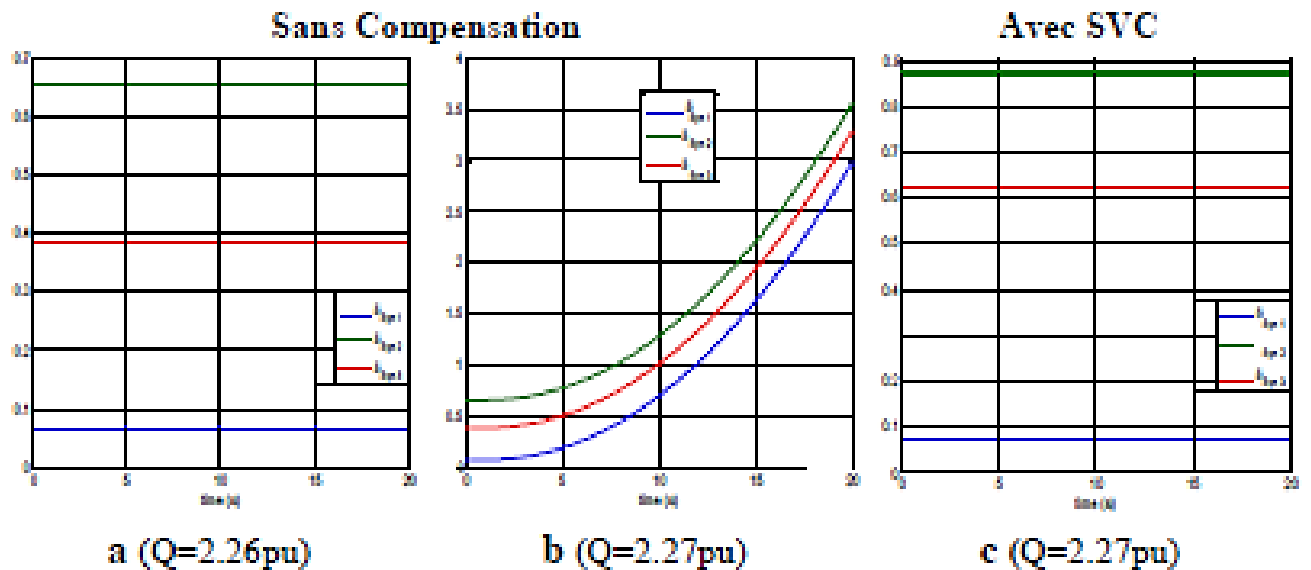
De même que les tensions des jeux de barres adjacentes et la tension de jeux de barres sur lequel la charge réactive est changée de 3.05 à 3.07 (pu) se baissent comme montrés au tableau III.2 en absence de compensation, mais dans le cas où le SVC est installé ; on remarque que les tensions de système améliorent.

**Le tableau III.2 :** Montre l'amplitude de tension aux différents jeux de barres de réseau.

	Sans compensation		SVC
	Q = 3.05	Q = 3.07	Q = 3.07
<b>Vbus4</b>	0.86609	0.86149	1.03682
<b>Vbus5</b>	0.57016	0.55789	1.02500
<b>Vbus7</b>	0.91972	0.91666	1.03307

- **Variation de la charge réactive aux JB 05 et JB 06 :**

On a raccordé un dispositif FACTS (SVC) au jeu de barre 4, les puissances réactives des charges sont présentées dans la Figure 3.11. En présence et en absence de compensation via le SVC. Les résultats de simulation montrent l'effet de l'augmentation de la puissance réactive des charges comme montré dans les Figures (III.5 (a et b)) en absence du SVC, les vitesses rotoriques des générateurs s'accroissent. La Figure (III.5 (c)), montre l'angle rotoriques des générateurs en présence de compensateur SVC. Ce dernière va corriger le manque de l'énergie réactive demandé par les charges.



**Figure III.5 :** Angles rotoriques des générateurs.

De même que les tensions des jeux de barres adjacents et la tension de jeux de barres sur lequel la charge réactive est changée de 2.26 à 2.27 (pu) se baissent comme montrés au tableau III.3 en absence de compensation. Mais dans le cas où le SVC est installé ; on remarque que les tensions de système s'améliore.

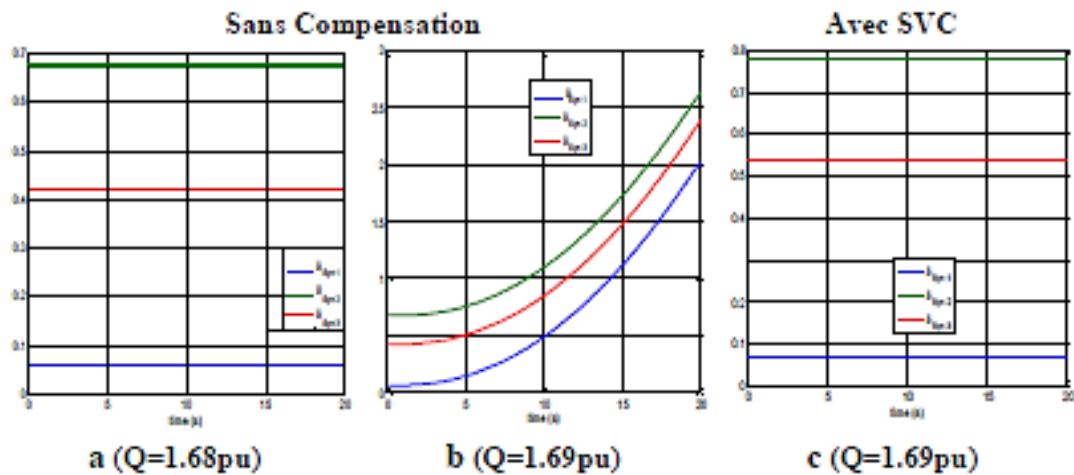
**Le tableau III.3 :** Montre l'amplitude de tension aux différents jeux de barres de réseau.

	Sans compensation		SVC
	Q = 2.26pu	Q = 2.27pu	Q = 2.27pu
<b>Vbus4</b>	0.83021	0.82761	1.02500
<b>Vbus5</b>	0.66197	0.65750	0.85858
<b>Vbus6</b>	0.65320	0.64846	0.85243
<b>Vbus7</b>	0.93044	0.92916	0.98610
<b>Vbus8</b>	0.93860	0.93736	0.99118

**- Variation de la charge réactive aux JBs (05,06 et 08) :**

On a raccordé un dispositif FACTS (SVC) au jeu de barre 4, les puissances réactives des charges sont présentées dans la Figure III.6. En présence et en absence de compensation via le SVC. Les résultats de simulation montrent l'effet de l'augmentation de la puissance réactive des charges comme montré dans les Figure s. (III.6 (a et b)) en absence du SVC, les vitesses rotoriques des générateurs s'accélèrent.

La Figure (III.6 (c)), montre l'angle rotoriques des générateurs en présence de compensateur SVC. Ce dernier va corriger le manque de l'énergie réactive demandé par les charges.



**Figure III.6 :** Angles rotoriques des générateurs.

De même que les tensions des jeux de barres adjacents et la tension de jeux de barres sur lequel la charge réactive est changée de 1.68 à 1.69 (pu) se baissent comme montrés au tableau III.4 en absence de compensation. Mais dans le cas où le SVC est installé ; on remarque que les tensions de système s'améliore.

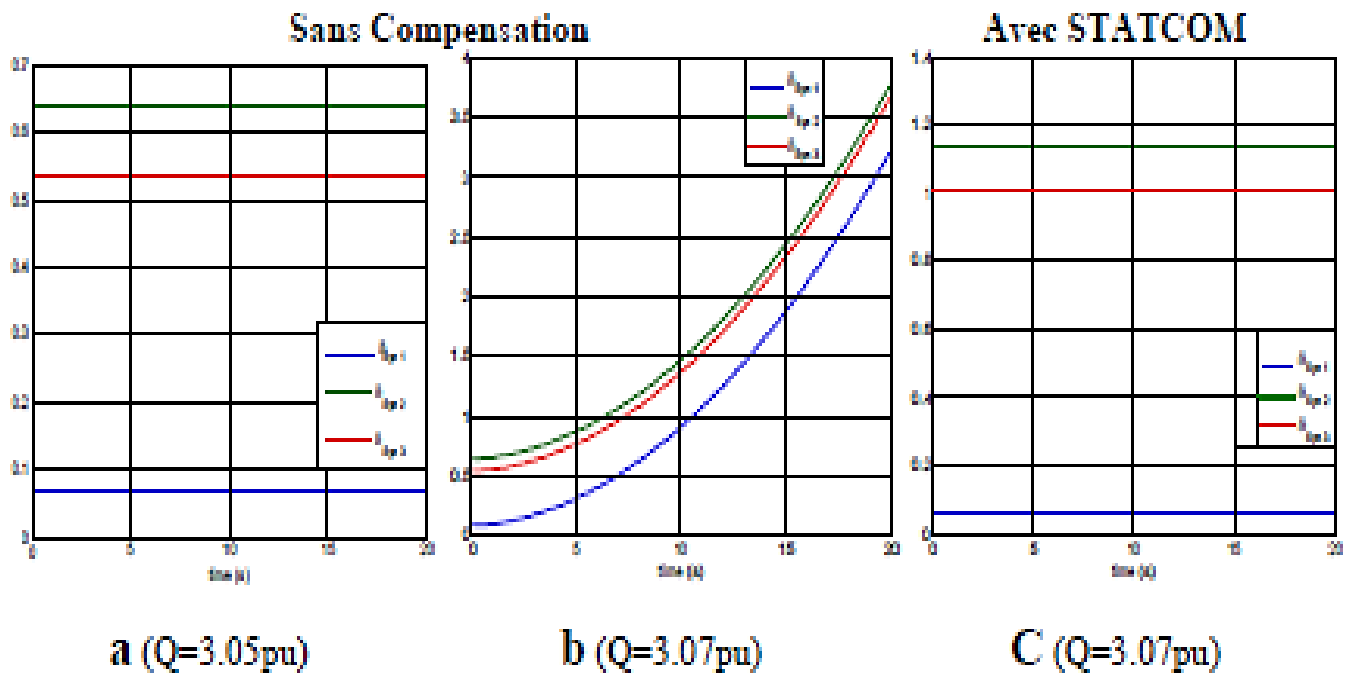
**Tableau III. 4 :** Montre l'amplitude de tension aux différents jeux de barres de réseau.

	Sans compensation		SVC
	Q = 1.68pu	Q = 1.69pu	Q = 1.69pu
<b>Vbus4</b>	0.89774	0.89630	1.02500
<b>Vbus5</b>	0.77611	0.77356	0.88947
<b>Vbus6</b>	0.77884	0.77627	0.89140
<b>Vbus7</b>	0.92131	0.92017	0.95483
<b>Vbus8</b>	0.84425	0.84247	0.88033
<b>Vbus9</b>	0.93846	0.93746	0.96947

### Troisième étape ( Compensation avec STATCOM )

#### Variation de la charge réactive au JB (05) :

On a raccordé un dispositif FACTS (STATCOM) au jeu de barre 5, les résultats de simulation montrent que les générateurs du système se perturbent comme montrés dans les Figures (III.7 (a et b)), une fois que le réseau est raccordé à un système de compensation, tel que (STATCOM) de même charge de la réactive cité auparavant, on voit d'après la Figure (III.7 (C)) que le système revient à son état de stabilité. La Figure (III.7 (c)), montre l'angle rotoriques des générateurs en présence de compensateur STATCOM. Cette dernière va corriger le manque de l'énergie réactive demandé par les charges.



**Figure III.7 :** Angle rotoriques des générateurs.

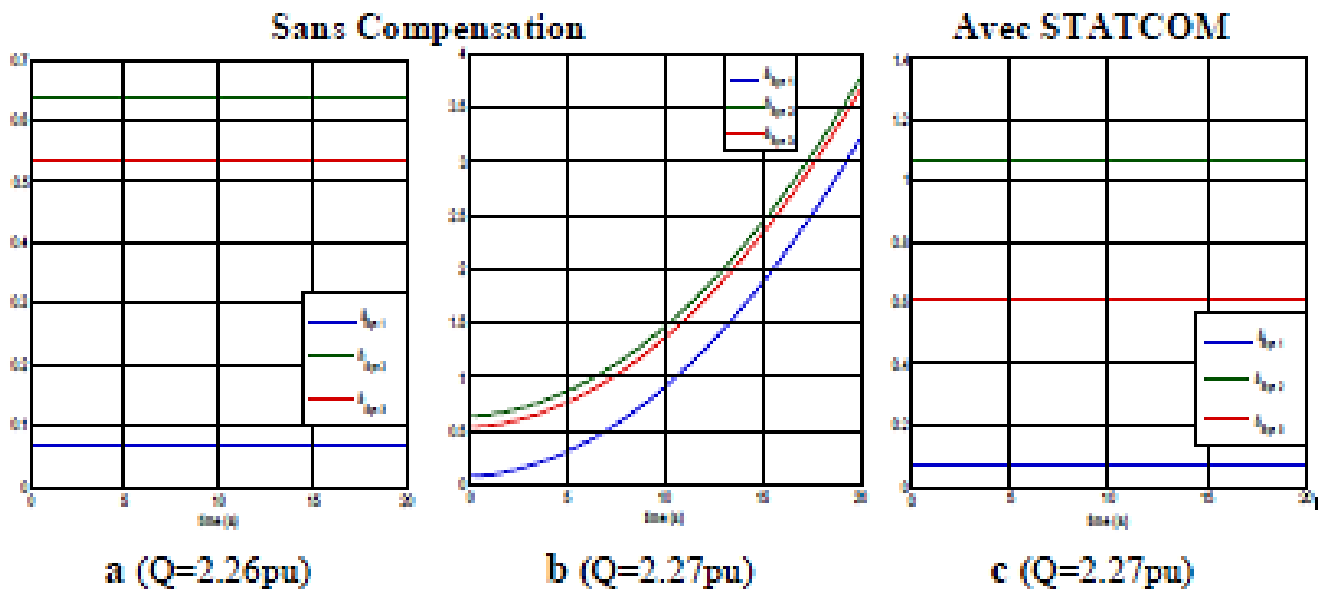
De même que les tensions des jeux de barres adjacents et la tension de jeux de barres sur lequel la charge réactive est changée de 3.05 à 3.07 (pu) se baissent comme montrés au tableau III.5 en absence de compensation. Mais dans le cas où le STATCOM est installé ; on remarque que les tensions de système s'améliore.

**Tableau III.5 :** Montre l'amplitude de tension aux différents jeux de barres de réseau.

	Sans Compensation		Avec STATCOM
	Q = 3.05pu	Q = 3.07pu	Q = 3.07pu
<b>Vbus4</b>	0.86609	0.86149	1.04246
<b>Vbus5</b>	0.57016	0.55789	1.04000
<b>Vbus7</b>	0.91972	0.91666	1.03680

#### Variation de la charge réactive aux JB 05 et JB 06 :

On a raccordé un dispositif FACTS (STATCOM) au jeu de barre 4, les puissances réactives des charges sont présentées dans la Figure III.8. En présence et en absence de compensation via le STATCOM. Les résultats de simulation montrent l'effet de l'augmentation de la puissance réactive des charges comme montré dans les Figures III.8 (a et b) en absence du STATCOM, les vitesses rotoriques des générateurs s'accélèrent. La Figure III.8 (c), montre l'angle rotoriques des générateurs en présence de compensateur STATCOM. Cette dernière va corriger le manque de l'énergie réactive demandé par les charges.



**Figure III.8 :** Angles rotoriques des générateurs.

De même que les tensions des jeux de barres adjacents et la tension de jeux de barres sur lequel la charge réactive est changée de 2.26 à 2.27 (pu) se baissent comme montrés au tableau III.6 en absence de compensation. Mais dans le cas où le STATCOM est installé ; on remarque que les tensions de système s'améliore.

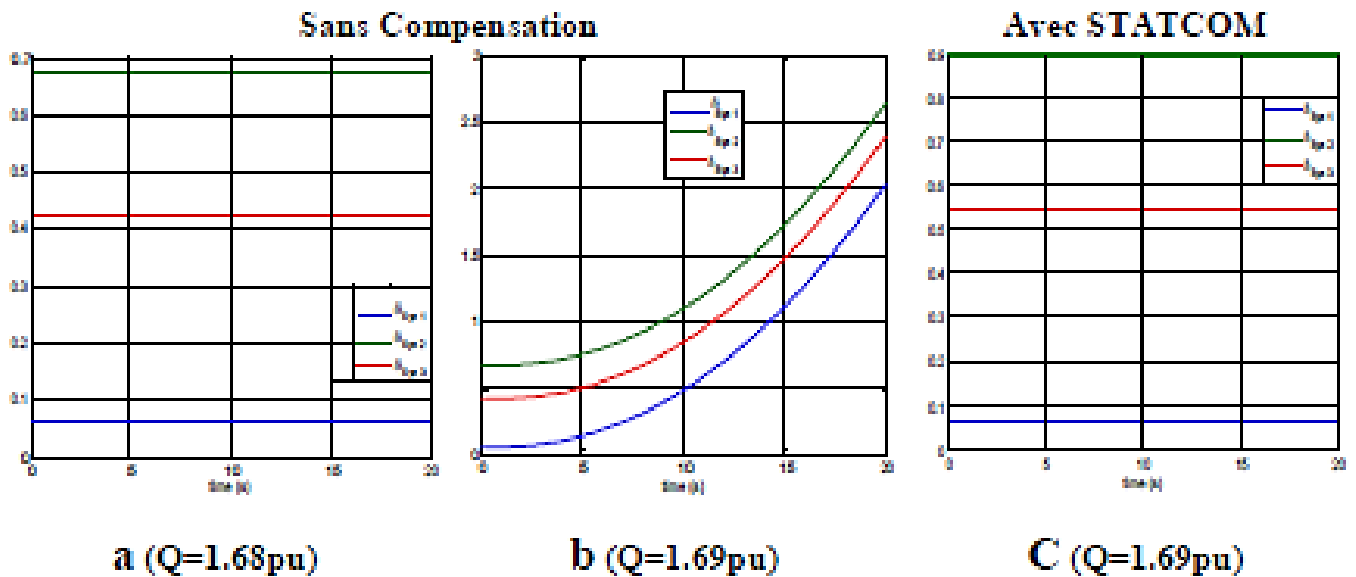
**Tableau III.6 :** Montre l'amplitude de tension aux différents jeux de barres de réseau.

	Sans compensation		Avec STATCOM
	Q = 2.26pu	Q = 2.27pu	Q = 2.27pu
<b>Vbus4</b>	0.83021	0.82761	0.98733
<b>Vbus5</b>	0.66197	0.65750	1.04000
<b>Vbus6</b>	0.65320	0.64846	0.82235
<b>Vbus7</b>	0.93044	0.92916	1.02732
<b>Vbus9</b>	0.93860	0.93736	0.99371

#### Variation de la charge réactive aux JBs (05, 06 et 08) :

On a raccordé un dispositif FACTS (STATCOM) au jeu de barre 4, les puissances réactives des charges sont présentées dans la Figure III.9. En présence et en absence de compensation via le STATCOM. Les résultats de simulation montrent l'effet de l'augmentation de la puissance réactive des charges comme montré dans les Figures. III.9 (a et b)) en absence du STATCOM, les vitesses rotoriques des générateurs s'accroissent. La Figure (III.9 (c)), montre l'angle rotoriques des générateurs en présence de compensateur STATCOM. Cette dernière va corriger le manque de l'énergie réactive demandé par les charges.





**Figure III.9 :** Angle rotoriques des générateurs.

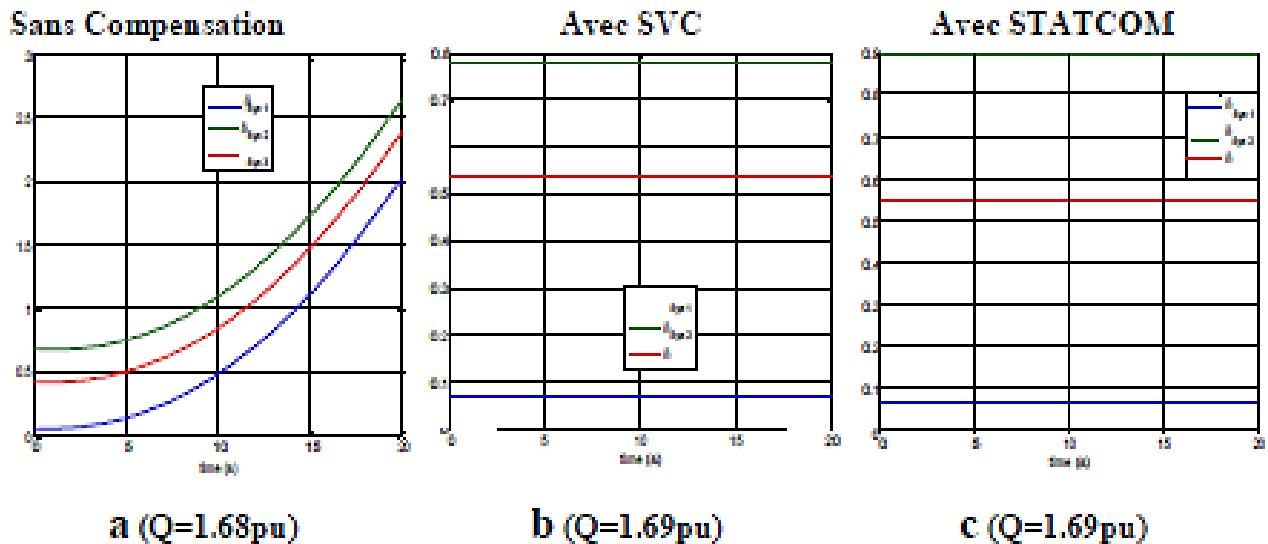
De même que les tensions des jeux de barres adjacents et la tension de jeux de barres sur lequel la charge réactive est changée de 1.68 à 1.69 (pu) se baissent comme montrés au tableau III.7 en absence de compensation. Mais dans le cas où le STATCOM est installé ; on remarque que les tensions de système s'améliore.

**Tableau III.7 :** Montre l'amplitude de tension aux différents jeux de barres de réseau.

	Sans compensation		Avec STATCOM
	Q = 1.68pu	Q = 1.69pu	Q = 1.69pu
<b>Vbus4</b>	0.89774	0.89630	1.00182
<b>Vbus5</b>	0.77611	0.77356	1.04000
<b>Vbus6</b>	0.77884	0.77627	0.87589
<b>Vbus7</b>	0.92131	0.92017	0.99073
<b>Vbus8</b>	0.84425	0.84247	0.90618
<b>Vbus9</b>	0.93846	0.93746	0.97458

#### III.4 Comparaisons entre SVC et STATCOM

Les puissances réactives des charges sont présentées dans la Figure III.10. En présence et en absence de compensation via le SVC et STATCOM. Les résultats de simulation montrent l'effet de l'augmentation de la puissance réactive des charges comme montré dans les Figures. (III.10 (a)) en absence du SVC et STATCOM, les vitesses rotoriques des générateurs s'accroissent. La Figure (III.10 (b et c)), montre l'angle rotoriques des générateurs en présence de SVC ou STATCOM. Ces compensateurs reviennent la vitesse des générateurs stable.



**Figure III.10 :** Angles rotoriques des générateurs.

De même que les tensions des jeux de barres adjacents et la tension de jeux de barres sur lequel la charge réactive est changée de 1.69 (pu) se baissent comme montrés au tableau III.8 en absence de compensation. Mais dans le cas où le SVC et STATCOM est installé ; on remarque que les tensions de système s'améliore.

**Tableau III.8 :** Montre l'amplitude de tension aux différents jeux de barres de réseau.

	Sans compensation	Avec SVC	Avec STATCOM
	Q = 1.68pu	Q = 1.69pu	Q = 1.69pu
<b>Vbus4</b>	0.89774	1.02500	1.00182
<b>Vbus5</b>	0.77611	0.88947	1.04000
<b>Vbus6</b>	0.77884	0.89140	0.87589
<b>Vbus7</b>	0.92131	0.95483	0.99073
<b>Vbus8</b>	0.84425	0.88033	0.90618
<b>Vbus9</b>	0.93846	0.96947	0.97458

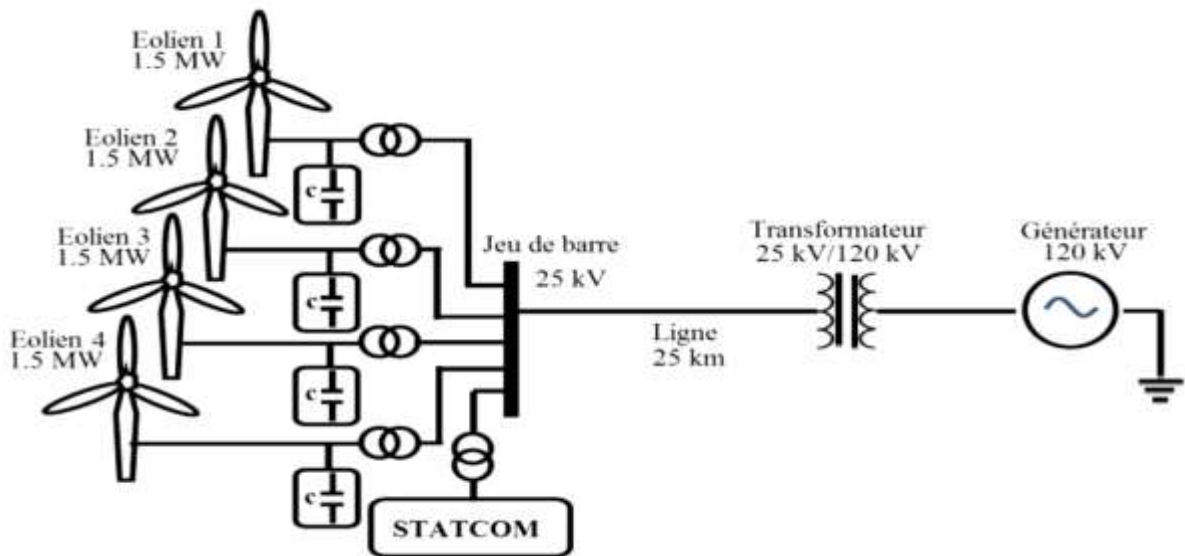
### III.5 Simulation d' un système micro-grid

#### III.5.1 Fonctionnement normal

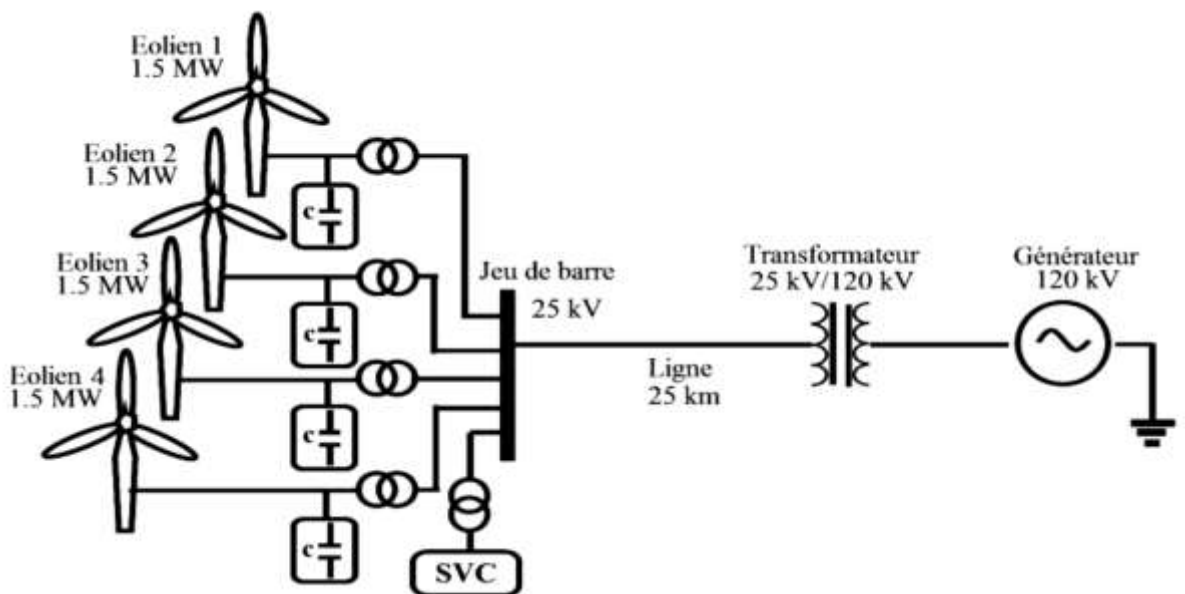
Dans un premier temps, nous allons présenter le fonctionnement normal du parc éolien illustré par les Figures III.11 et III.12, et voir l'effet des deux types de FACTS sur le maintien de la tension. Les courbes de la Figure III.13 décrivent le comportement des différents éléments du parc éolien en fonctionnement normal. Pour notre système muni de STATCOM, on remarque que la puissance active générée commence à augmenter en douceur (avec la vitesse du vent) pour atteindre sa valeur nominale qui est de 6 MW au bout de 12 s.

La puissance réactive absorbée par le jeu de barre est de l'ordre de 1 Mvar pour une vitesse du vent de 11 m/s. La tension au nœud de connexion atteint sa valeur nominale de 1 pu, donc le STATCOM a une meilleure réponse dans les régimes transitoires (il est plus rapide).

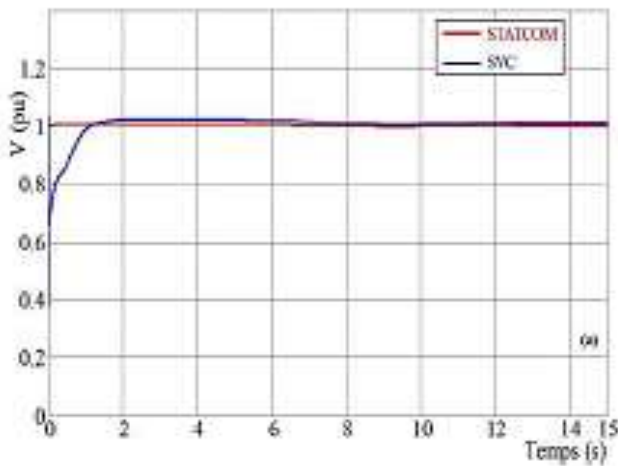
Concernant notre système muni de SVC, on remarque que la puissance active générée atteindra sa valeur nominale qui est de 6 MW au bout de 12 s, mais pendant la phase de démarrage elle atteint un pic 7.8 MW. La puissance réactive absorbée par le nœud de connexion est de l'ordre de 0.5 M avec un pic au démarrage de l'ordre de 11 Mvar, La tension au nœud de connexion atteint sa valeur nominale de 1 pu au bout de 1 seconde.



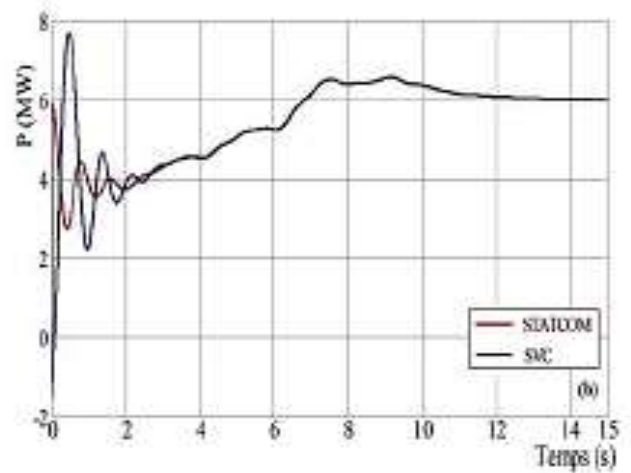
**Figure III.11** : Représentation d'un système muni d'un STATCOM.



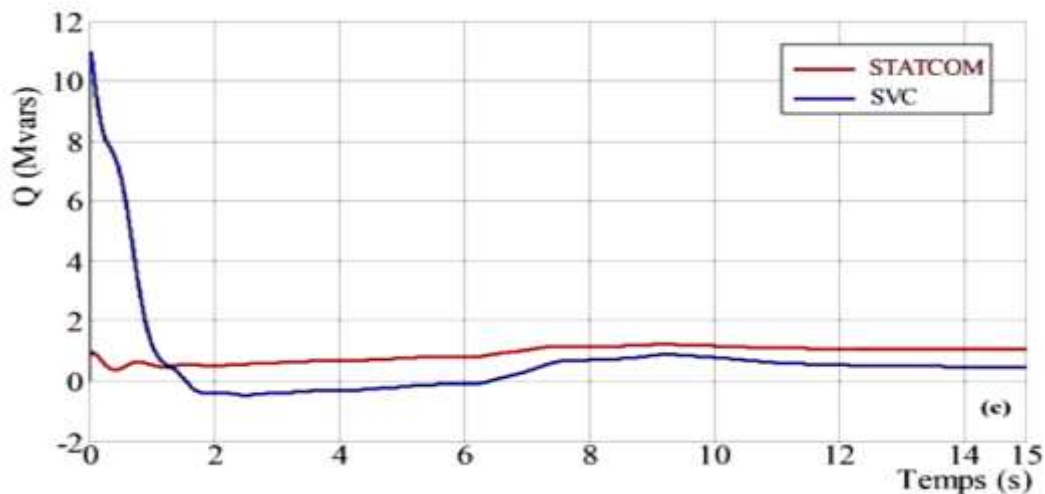
**Figure III.12** : Représentation d'un système muni d'un SVC.



III.13.a-Tension au nœud de connexion.



III.13.b-Puissance active.



III.13.c- Puissance réactive

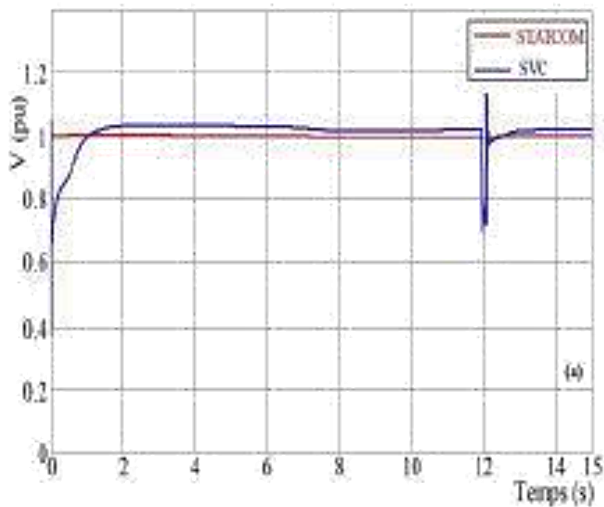
**Figure III.13** : Résultats de simulation.

### III.5.2 Fonctionnement en présence de défaut

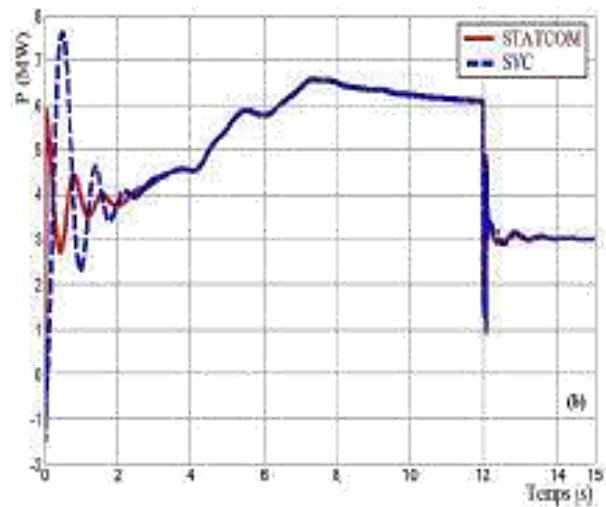
Dans une seconde temps, nous allons simuler un défaut (court-circuit biphasé) au niveau des éoliennes 3 et 4. Les courbes obtenues dans la Figure III.14 donnent les résultats de simulation respectivement du SVC et du STATCOM. A  $t = 12$  s, un défaut entre phases est appliqué à la sortie des éoliennes 3 et 4. A  $t = 12.11$  s, le système de protection des éoliennes 3 et 4 est activé et se déconnecte du système. Les éoliennes 1 et 2 continuent à produire de l'énergie 1.5 MW chacune. On remarque que la tension au nœud de connexion reste aux alentours de 1 pu avec une meilleure réponse en régime dynamique pour le STATCOM et que la puissance active chute de 6 MW à 3 MW, la puissance réactive est aux alentours de 0.73 Mvar pour le STATCOM et de l'ordre de 0.1 Mvar pour le SVC.

La simulation nous montre clairement que le STATCOM a une performance meilleure que le SVC dans les réseaux de distribution d'énergie.

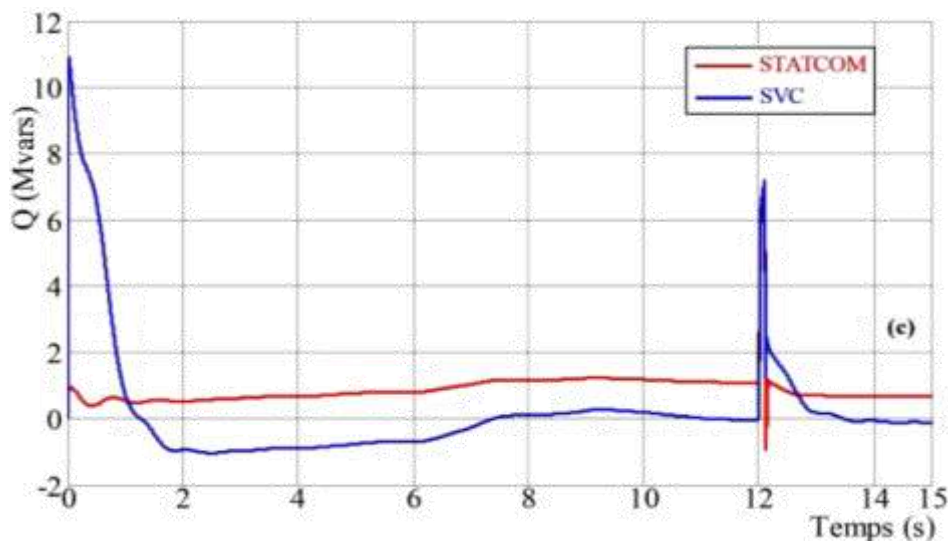
Le STATCOM avec son apport en énergie réactive permet de stabiliser la tension à une valeur relativement constante, malgré l'existence du défaut dans le parc éolien.



III.14.a- Tension au nœud de connexion



III.14.b- Puissance active



III.14.c- Puissance réactive

**Figure III.14:** Résultats de simulation.

### III.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons montré l'influence de la variation de la charge réactive qui engendre des chutes de tensions au niveau de chaque jeu de barre et nous avons montrées aussi l'efficacité des dispositifs FACTS, tel que, SVC et STATCOM pour l'amélioration de la stabilité de ce réseau électrique. Les modèles de SVC et STATCOM les plus courants sont des modèles statiques, car conçus pour des logiciels de répartition de charges. Lesquels sont destinés à des études statiques de réseau. Ils sont constitués d'éléments de réseaux : réactances, susceptance, nœuds, etc... Le rôle des dispositifs FACTS comme le SVC et le STATCOM dans l'amélioration de la performance du système est bien spécifié.

L'amélioration de la stabilité, l'amortissement des oscillations de puissance, la régulation de la tension, l'augmentation de la puissance de transmission en fournissant une énergie réactive afin de stabiliser la tension après l'apparition d'un défaut, sont considérés comme des facteurs d'amélioration d'importance capitale.

Les résultats de simulations montrent clairement que le parc éolien est beaucoup plus performant en qualité de stabilité de tension, lorsqu'il est muni d'un STATCOM avant, pendant et après le défaut. Avant le défaut, le comportement des deux systèmes de transmission, 'FACTS' présente une différence au niveau du régime transitoire (une meilleure réponse du STATCOM par rapport au SVC).

Pendant le défaut (cas d'un court-circuit), le STATCOM réagit en faveur du maintien de la stabilité du réseau électrique entier contrairement au SVC qui fait apparaître plus qu'un inconvénient et surtout pendant la durée du défaut.

Enfin, nous pouvons dire que la présence du STATCOM dans un parc éolien, lorsque ce dernier est connecté au réseau électrique, est plus qu'indispensable pour assurer et garantir d'une part la stabilité du système entier et d'autre part une continuité de service même en présence de fortes perturbations.

Pour conclure, un **Tableau** comparatif des performances des deux dispositifs de systèmes de transmission flexible en courant alternatif, 'FACTS', le SVC et le STATCOM est établi comme suit : [ 20 ]

SVC	STATCOM
Génère plus d'harmoniques	Génère moins d'harmoniques
Réponse lente au cours des régimes transitoires	Meilleure réponse, lors des régimes transitoires
Capacité de compensation du SVC diminue à raison que la tension du service diminue	Le STATCOM est capable de fournir son courant nominal, même lorsque la tension est presque nulle.
Le SVC est une admittance 'inductive ou capacitive' shunte contrôlée.	Le STATCOM est une source de tension synchronisée en shunt avec le réseau électrique.

# Conclusion générale

## **Conclusion générale**

Nous nous sommes attachés Dans ce travail à montrer l'intérêt que peut susciter un système FACTS tel qu'un SVC ou STATCOM; et l'impact positif qu'il peut avoir sur le transit de puissance dans un système électro énergétique.

Nous avons traité les notions générales concernant la modélisation des différents éléments constituant un système de transport d'énergie telle que la machine, la ligne, le transformateur, la charge et la modélisation des dispositifs de régulation.

Pour valider notre étude en dernier temps nous avons donné des résultats de simulation sur un réseau 03 machines 09 nœuds ,et sur un parc éolien et nous avons porté une comparaison entre l'impact de dispositif SVC d'une part et l'impact de STATCOM d'une autre part sur un réseau test. Après l'interprétation des résultats, nous a permis de déterminer la variation de tension dans le cas de perturbation de réseau et le cas de stabilisé de réseau par un système FACT tel que SVC ou STATCOM. Et nous avons constaté que le STATCOM peut être plus efficace et performant que le SVC dans le transit de puissance.

### **Perspectives :**

Les travaux présentés dans cette étude permettent de répondre à un certains nombres de questions, mais laissent d'autres points en suspens, il serait intéressant de compléter ce travail en tenant compte des points suivants :

- Étude de la stabilité lors d'un défaut avec les différents FACTS.
- Introduire des dispositifs de protection.
- Nous souhaitons que ce travail soit complété par la simulation d'un autre system FACT.



# **Bibliographies**

## Références Bibliographiques :

- [01] M. Hannebelle, "Valorisation des services système sur un réseau de transport d'électricité en environnement concurrentiel" .thèse doctorat de l'université paris 11 – 2009.
- [02] A. Alibi mémoire magister, université de Batna (12-6-2009) "Contrôle des réseaux électriques par les systèmes FACTS"
- [03] X. Ping Zhang Christian Rehantez Bikash Pol " Fléxible AC transmission Systems modelling and control " 2005.
- [04] H. Zakaria, " Optimisation des paramètres d' un FACT shunt pour l'amélioration de la stabilité transitoire d' un système électrique. Mémoire de magistère en électrotechnique . Université de Setif 1 le 20 juin 2012
- [05] L. karto, "Optimisation de la syntèse des FACTS par les algorithmes génétiques et les essais particuliers pour le contrôle des réseaux électriques " École nationale polytechnique 29 novembre 2006.
- [06] B . med abdelilah ; lagougui ali ; mémoire master académique université kasdi Merbah Ouragla 31-5-2016.
- [07] N. mancer. Aggoumy " Modélisation et intégration des dispositifs FACTS " mémoire d'ingénieur d' état juin 2007.
- [08] B. mohdad, " Contribution to the improvement of power quality using multi- hybrid model based wind – shunt FACTS " 10 IEEE Conference on environment and electrical engineering . Italy 2011.
- [09] A. seifi, ph ;d SASAN chola mi M.S and Amin Shabanour M.S “ Power flow study and comparison of FACT “ the pacific journal of science and technology vol. 11,N1, mai 2010.
- [10] X.P zhang .E. handschin ; m .yao . Multi- control functional static synchronous compensator (STATCOM ) in power system steady – state opération ; électrique power systems research 72 (2004) .
- [11] P.L.SO.Y.C chu .T yu " coordinated control of tsc and svc for system damping enhancement international journal of control automatic and systems june 2005 vol 3No 2 .pp 322-33.
- [12] G.eskandar, G. SH Apport de l' UPFC a l'amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques l'université henri poincare . nancy 2003.
- [13] A .Mekkaoui –M.Laouar et M. Younes Université Dr Moulay Tahar.
- [14] H.Rachida, «Contrôle des Puissances Réactives et des Tensions par les Dispositifs FACTS dans un Réseau Électrique», Mémoire de Magister ENSET – ORAN -2009.

- [15] H.boudjella, «Contrôle des puissances et des tensions dans un réseau de transport au moyen de dispositif FACTS (SVC) », Mémoire de Magister, Université Djillali Liabes Sidi Bel Abbes, 23 janvier 2008.
- [16] Y.von besanger, «Étude des FACTS (Flexible AC Transmission System) et de leur comportement dans les réseaux de transport et d'interconnexion», Thèse de Doctorat, Institut national polytechnique de Grenoble, 05 Juillet 1996.
- [17] L. Boumediene, «Placement Des Dispositifs «D-FACTS» et contrôle des tensions dans un réseau de distribution », Thèse de doctorat es-science, l'USTO, 04 Janvier 2010.
- [18] K.Amina, M.Meriem, « Impact d'un dispositif FACTS (Flexible AC Transmission Systems) sur l'écoulement de puissance» Mémoire de Master, Université de Saida, 28 octobre 2013.
- [19] A. Innocent Leka, « Amélioration du transit de puissance par les FACTS et simulation sur Matlab/Simulink d'un réseau électrique ». Diplôme de professeur d'enseignement technique deuxième grade 2008.
- [20] K.Amel, « Étude de l'influence des systèmes FACTS sur la qualité de l'énergie électrique», Mémoire de Master, 02 Juin 2013.
- [21] O. Mohamed Bachir, D. El Hadi " Amélioration de la stabilité de tension par l'emplacement optimal des dispositifs FACTS Université Dr Moulay Tahar Saida.

## ملخص

دفعت الزيادة في الطلب على الكهرباء و تبادل أسواق الكهرباء , وكالات التوزيع إلى إيلاء اهتمام وثيق لجودة و موثوقية النظام الكهربائي وتكلفة التوزيع , خاصة في الشبكات الكهربائية. من اجل تقليل خسائر الطاقة من الضروري تحسين عبور النقاط القوية و تحسين صورة الجهد الكهربائي للخطوط الكهربائية نحن ملتزمون بالعمل لإظهار الاهتمام بنظام نقل التيار المتردد المرن مثل SVC أو STATCOM و التأثير الايجابي الذي يمكن أن تحدثه على عبور الطاقة في النظام الكهربائي .

الكلمات المفتاحية : نقل التيار المتردد المرن ، شبكة ، تمثيل ، آلة ، استقرار ، خط ، نقل ، استطاعة .

## Résumé

L'accroissement de la demande en énergie électrique et l'échange de marchés d'électricité, ont poussé les organismes distributeurs à prêter une grande attention à la qualité, à la fiabilité de système électrique et au coût de ce dernier, particulièrement dans les réseaux électriques. Afin de réduire les pertes de puissance dues au transit de forts courants réactifs et améliorer le profil de la tension des lignes électriques. Les éléments proposés qui permettent un contrôle amélioré des systèmes électriques sont les systèmes classiques et FACTS «Flexible Alternating Current Transmission System ». Nous nous sommes attachés dans ce travail à montrer l'intérêt que peut susciter un système FACTS tel qu'un SVC ou STATCOM; et l'impact positif qu'il peut avoir sur le transit de puissance dans un système électro énergétique.

**Mots clés :** FACTS, Réseau, Modélisation, Machine, Stabilité, Ligne, Transmission, Puissance.

## Abstract

The increase in the demand for electricity and the exchange of electricity markets have prompted the distribution agencies to pay close attention to the quality, the reliability of the electricity system and the cost of the latter, particularly in the networks. electric. In order to reduce the power losses due to the transit of strong reactive currents and to improve the profile of the voltage of the electric lines. The proposed elements that allow this enhanced control of electrical systems are conventional systems and FACTS "Flexible Alternating Current Transmission System". In this work we have shown interest in a FACTS system such as SVC or STATCOM; and the positive impact it can have on the transit of power in an electro-energetic system.

Keywords: FACTS, Network, Modilization, Machine, Stability, Line, Transmission, Power.