

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITEDEMOHAMED BOUDIAF M'SILA
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME
DE MASTER EN GENIE ELECTRIQUES

SPECIALITE : RESEAUX ELECTRIQUES

THEME

*Modélisation et commande d'un compensateur
TCSC*

Proposé et dirigé par:

- Mr. MESSALTI Sabir

Présenté par :

- OUCIF Ahmed

Année Universitaire : 2015 / 2016

N° d'ordre : Rés_222

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier tout premièrement Allah le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience, qu'il nous a donné durant toutes ces longues années.

Ainsi, nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements à mon encadreur pour avoir d'abord proposé ce thème, pour suivi continuel tout le long de la réalisation de ce mémoire et qui n'a pas cessée de nous donner ses conseils.

Nos remerciements vont aussi à tous les enseignants et le chef de département Génie électrique qui a contribué à notre formation Par ailleurs, Nos remerciements à tous les membres du jury qui ont accepté de juger notre travail.

En fin, nous tenons à exprimer notre reconnaissance à tous nos amis et collègues pour le soutien moral.



Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

À mes très chers parents et ma grande famille.

À mes très chers frères et mes sœurs.

À tous mes amis.

À tous ceux qui m'aiment et que j'aime.

À vous.

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I : Généralités sur les Réseaux électriques	
I Introduction	4
I.1 Généralités sur les réseaux d'énergie électrique.....	5
I.2 Modélisation des éléments du réseau électrique.....	6
I.2.1. Modélisation des générateurs	6
I.2.2. Modélisation du transformateur	7
I.2.3. Modélisation d'une charge	8
I.2.4. Modélisation de la ligne	8
I.3 Puissance transmise par une ligne électrique	9
I.3.1 Réglage de puissance active.....	10
I.4 Écoulement de puissance dans un réseau électrique	11
I.4.1 Formulation des équations de l'écoulement de puissance.....	11
I.4.2 la méthode de Gauss appliqué aux équations de l'écoulement de puissance.....	12
I.5 La qualité d'énergie	13
I.6 Compensation de l'énergie réactive	14
I.6.1 Principe général de la compensation.....	15
I.6.2 Les Moyens classiques de compensation de l'énergie réactive	15
I.6.2.1 Les avantages compensateurs classiques.....	15
I.6.2.2 Les inconvénients compensateurs classiques.....	16
I.7 Conclusion	16

Chapitre II. Généralité sur les FACTS

II.1 Introduction	17
II.2 Définition les dispositifs FACTS	17
II.2.1 Classification des dispositifs FACTS	18
II.2.2 les avantage des dispositifs FACTS.....	19
II.2.2 Les inconvénients des dispositifs FACTS.....	19
II.3 Compensateurs parallèles	19
II. 3.1 Compensateur statique de l'énergie réactive (SVC).....	20
II.3.1.1 Principe de fonctionnement	21
II.3.1.2 Les avantages de SVC	22
II. 3.2 Compensateur statique STATCOM	22
II.3.2.1 Les avantages de STATCOM	23
II.4 Compensateur hybrides	23
II.4.1 Régulateur d'angle de phase contrôlé par thyristor (TCPAR).....	23
II.4.2 Unified Power Flow Controller (UPFC).....	25
II.5 Compensateurs série	26
II.5.1 Compensateur TCSC.....	27
II.5.1.1 Définition du TCSC.....	27
II.5.1.2 principe de fonctionnement.....	28
II.5.1.2 Les avantages de TCSC.....	29
II.5.2 Static Synchronous Series Compensator (SSSC).....	29
II.6 CONCLUSION.....	31

Chapitre III. Modélisation des dispositifs FACTS

III.1 introduction.....	32
III.2 Modélisation des dispositifs FACTS	33
III.2.1. Injection de puissance aux extrémistes de la ligne.....	33
III.2.2. Création d'un nœud fictif.....	35
III.2.3. Modification de la matrice d'admittance nodal.....	36
III. 3 Modèle de compensateur statique de puissance réactive SVC	36
III.3.1 SVC placer en un nœud du réseau	38

III.4 Dispositifs de compensation série.....	39
III.4.1 Modèle du compensateur série à thyristors	39
III.4.2 Intégration du TCSC dans le système.....	40
III.4.3 Influence du TCSC	41
III.5 Conclusion.....	42

Chapitre IV. SIMULATION ET RESULTATS

IV.1 Introduction.....	43
IV.2 Simulation et analyse les résultats.....	44
IV.3 Simulation 1 : contrôle de transit d'un réseau avec deux de barres.....	44
IV.3.1 Simulation lors d'une variation brusque de la tension.....	45
IV.3.2 Contrôle de transit lors de variation brusque de la consommation et la tension.....	47
IV.4 Simulation 3 : contrôle de transit d'un réseau avec trois jeux de barres.....	48
IV.4.1 Contrôle de transit d'un réseau trois jeu de barres lors d'une variation brusque de la tension	50
IV.5 Simulation 5 : contrôle de transit d'un réseau avec 5 jeux de barres.....	53
VI.5.1 Simulation 6 lors d'une variation brusque de la tension.....	55
IV.5.2 Simulation 7 contrôle de transit d'un réseau avec 5 jeux de barres avec déclenchement d'une ligne.....	57
IV.6 Conclusion.....	60
Conclusion générale	61
Bibliographie	65

Liste des figures

CHAPITRE I

Figure I:1 : Le réseau électrique.....	6
Figure I:2 : Modélisation de générateur.....	6
Figure I:3 : Modélisation de transformateur.....	7
Figure I:4 : Modélisation d'une charge.....	8
Figure I:5 : Modélisation d'une ligne longue.....	8
Figure I:6 : a) circuit équivalent d'un réseau électrique, b) diagramme vectorielle associé.....	9
Figure I:7 : Système de puissance a deux jeu de barres.....	11
Figure I:8 : Diagramme traduisant l'échange d'énergie et montrant l'intérêt de la compensation...	15

CHAPITRE II

Figure II:1 : Schéma principe des dispositifs FACTS.....	18
Figure II:2 : Principe de compensation shunt.....	19
Figure II:3 : Courbe de puissance avec et sans compensation shunt en fonction de l'angle de transmission.....	20
Figure II:4 : structure du SVC.....	21
Figure II:5 : Fonctionnement du compensateur statique SVC.....	21

Figure II:6 : Structure du STATCOM.....	22
Figure II:7 : Structure du TCPAR.....	24
Figure II:8 : Diagramme des phraseurs du TCPAR.....	24
Figure II:9 : Schéma de base d'un UPFC.....	25
Figure II:10 : Principe de compensation sérié.....	26
Figure II:11 : Courbe de puissance avec et sans compensation.....	26
Figure II:12 : Structure du TCSC.....	27
Figure II:13 : Exemple réelle de TCSC.....	28
Figure II:14 : Insertion d'un TCSC dans la ligne.....	28
Figure II:15 : Impédance du TCSC en fonction de l'angle.....	28
Figure II:16 : Schéma de base du SSSC.....	30
Figure II:17 : Caractéristique statique du SSSC.....	30

CHAPITRE III

Figure III.1 : Modélisation par injection de puissance :a)ligne avec FACTS, b) ligne avec injections équivalents.....	33
Figure III.2 : Modélisation par injection de puissances : a) ligne avec FACTS, b) représentation équivalent.....	35
Figure III.3 :Intégration du dispositif FACTS dans une ligne.....	36
Figure III.4 : Modélisation du SVC, a) symbole, b) modèle.....	37
Figure III.5 : SVC placé dans un nœud.....	38
Figure III.6 : Modélisation du TCSC : a) modèle général, b) modèle détaillé.....	39
Figure III.7 : TCSC inséré dans la ligne.....	40
Figure III.8 : Influence de TCSC sur la caractéristique PV.....	42

CHAPITRE IV

Figure IV.1 : Réseau électrique à 2 jeux de barres.....	44
Figure IV.2 : Réseau électrique à 2 jeux de barres avec TCSC.....	45
Figure IV.3 : Evolution de la puissance transite P 1-2 sans TCSC , b) Evolution de la puissance transite P 1-2 avec TCSC.....	46
Figure IV.4 : Evolution de la degré de compensation K_{TCSC}	46
Figure IV.5 : a) Evolution de la puissance transite P 1-2 sans TCSC , b) Evolution de la puissance transite P 1-2 avec TCSC.....	48
Figure IV.6 Evolution de la degré de compensation K_{TCSC}	48
Figure IV.7 Réseau électrique à 3 jeu de barre.....	49
Figure IV.8 Réseau électrique à 3 jeu de barre avec TCSC.....	50
Figure IV.9 a) Evolution de la puissance transite P 2-3 sans TCSC , b) Zoom de la puissance transite P 2-3 avec TCSC.....	51
Figure (IV.10) : a) Evolution de la puissance transite P 2-3 avec TCSC , b) Evolution de la degré de compensation K_{TCSC}	51
Figure IV.11 Réseau électrique a 3 jeu de barres avec TCSC.	52
Figure IV.12 : a) Evolution de la puissance transite P 1-2 sans TCSC , b) zoom de la puissance transitité de la ligne 1-2.....	52
Figure IV.13 : a) Evolution de la puissance transite P 1-2 avec TCSC , b) Evolution de la degré de compensation K_{TCSC}	53
Figure IV.14 : Réseau électrique a 5 jeu de barre.....	54
Figure IV.15 : Réseau électrique a 5 jeu de barre avec TCSC.....	56
Figure IV.16 : a) Evolution la puissance transite P 4-5 sans TCSC , b)Evolution a puissance transite P 4-5 avec TCSC.....	56
Figure IV.17: Evolution de la degré de compensation K_{TCSC}	57
Figure IV.18: Réseau électrique a 5 jeu de barre avec déclanchement de la ligne parallèle 2-4.....	58
Figure IV.19 a) Evolution de la puissance transite P 1-2 sans TCSC , b) Evolution de la puissance transite P 1-2 avec TCSC.....	58

Figure IV.20 Evolution de la degré de compensation K_{TCSC}59

Liste des tableaux

CHAPITRE III

Tableau III.1 : Types des FACTS modélisables par la création d'un nœud fictif.....47

CHAPITRE VI

Tableau IV.1 Paramètres du réseau a 2 jeux de barres (en pu).....44

Tableau IV.2 Résultat d'écoulement de puissance du réseau a 2 jeux de barres.....45

Tableau IV.3 Variation brusque de la tension V1.....45

Tableau IV.4 Variation brusque de la consommation.....47

Tableau IV.5 Variation brusque de la tension V1.....47

Tableau IV.6 Paramètres du réseau a 3 jeux de barres.....48

Tableau IV.7 Résultat d'écoulement de puissance du réseau a 3 jeux de barres.....49

Tableau IV.8 Variation brusque de la tension V1.....50

Tableau IV.9 Paramètres du réseau à 5 jeux de barres.....54

Tableau IV.10 Résultat d'écoulement de puissance du réseau a4 jeux de barres.....55

Tableau IV.11 Variation brusque de la consommation.....55

Tableau IV.12 Variation brusque de la tension V1.....57

La table de nomenclature

<i>EPRI</i> :	Electric Power Research Institute
<i>FACTS</i> :	Flexible Alternating Current Transmission Systems
<i>GTO</i> :	Gate Turn Off
<i>SVC</i> :	Static Var Compensator
<i>TCPAR</i>	Thyristor Controlled Phase Angle Regulator
<i>UPFC</i> :	Unified Power Flow Controller
<i>STATCOM</i> :	Static Synchronous Compensator
<i>TCSC</i> :	Thyristor Controlled Series Capacitor
<i>MOV</i>	Métal Oxide Varistor
<i>SSSC</i> :	Static Synchronous Series Compensator
K_{TCSC}	Le degré de Compensation
<i>XC</i> :	Condensateur de réactance.
<i>XL</i> :	Réactance inductive
<i>BL</i> :	Susceptance l'inductance.
<i>R</i> :	resistance de la ligne
<i>X</i> :	Reactance de la ligne
b_{svc} :	la susceptance
y_{svc} :	l'admittance
α :	Rapport de transformation
E_0 :	La fem a vide
E_a :	la fem en charge
<i>V</i> :	tension de sortie

Introduction générale

L'industrialisation et la croissance de la population sont les premiers facteurs pour lesquels la consommation de l'énergie électrique augmente régulièrement. De plus on vis aujourd'hui dans l'ère de l'électronique et de l'informatique et toute les charges sont très sensible aux perturbations qui surviennent sur leurs alimentations: une perte d'alimentation peut causer l'interruption des différents processus de la production; et devant des consommateurs qui deviennent de plus en plus exigeants en voulant plus d'énergie et de meilleur qualité, les entreprises de production de l'énergie électrique doivent donc assurer l'approvisionnement régulier de cette demande, et sans interruption, à travers un réseau maillé et interconnecté afin de prouver une fiabilité dans leurs service ; et augmenter le nombre de centrales électriques, de lignes, de transformateurs etc., ce qui implique une augmentation du coût et une dégradation du milieu naturel.[1]

les réseaux augmentes continuellement et ils devient complexe et plus difficile à contrôler. Ce système doit conduire de grandes quantités de l'énergie en l'absence des dispositifs de contrôle sophistiqués et adéquats, beaucoup de problèmes peuvent survenir sur ce réseau tel que: le transit de la 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 convenablement. [1]

Jusqu'à la fin des années quatre-vingt, Les réseaux électriques étaient contrôlés par des dispositifs électromécaniques ayant un temps de réponse plus au moins long, les bobines d'inductance et les condensateurs commutés par disjoncteurs pour le maintien de la tension et la gestion du réactif. Toutefois, des problèmes d'usure ainsi que leur action lente ne permet pas d'actionner ces dispositifs plus de quelques fois par jour, ils sont par conséquent difficilement utilisables pour un contrôle continu des flux de puissance. Une autre technique de réglage et de contrôle des puissances réactives, des tensions et des transits de puissance utilisant l'électronique de puissance a fait ses preuves. [1]

La solution de ces problèmes passe par l'amélioration du contrôle des systèmes électriques déjà en place. Il est nécessaire de doter ces systèmes d'une certaine flexibilité leur permettant de

mieux s'adapter aux nouvelles exigences. 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 des composants d'électronique de puissance très avancés (GTO, IGBT) connus sous l'acronyme FACTS: « Flexible Alternating Current Transmission Systems ».[2]

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.

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: STATCOM, SSSC, UPFC respectivement. [2]

Les dispositifs FACTS peuvent être utilisés dans la compensation de l'énergie réactive le contrôle des puissances transitées dans les lignes de transport d'énergie électrique au moyen de dispositifs TCSC. Pour atteindre cet objectif, le présent mémoire est organisé en quatre chapitres.

Le premier chapitre intitulé « Généralité sur les réseaux électriques », Nous présentons un aperçu sur le fonctionnement des réseaux électriques. On retrouve dans ce chapitre la définition, la Modélisation du réseau électrique, et la puissance transmissible dans une ligne de transport. On va également discuter l'analyse de l'écoulement de puissance, ainsi que l'importance de l'énergie réactive puis les différentes techniques et les moyens de compensation.

Le deuxième chapitre, est une présentation générale du concept « FACTS ». Une classification des différents types est proposée et les principaux dispositifs de chaque famille sont décrits, et présente aussi les différentes structures de FACTS (shunt, hybride et série) basées sur les thyristors ou les (IGBT/GTO).

Le troisième chapitre, nous présentons la modélisation générale des deux dispositifs FACTS tels que le compensateur statique d'énergie réactive SVC (en anglais, Static Var Compensator), les condensateurs Série contrôlés par Thyristor (en anglais, Thyristor Controlled Series Capacitor, TCSC) ce dernier sont utilisés dans la simulation dans le chapitre prochain, afin d'étudier le comportement du réseau avec et sans intégration de TCSC.

Le quatrième chapitre est consacré à l'installation l'étude de TCSC pour le contrôle de transit existant dans la bibliothèque du logiciel Matlab/Simulink afin d'améliorer la qualité d'énergie en terme de contrôle le flux de puissance.

Finalement, nous terminerons notre travail par une conclusion générale et quelque perspectives.

Chapitre I

Généralités sur les Réseaux électrique

I Introduction

L'industrialisation et la croissance de la population sont les premiers facteurs pour lesquels la consommation de l'énergie électrique augmente régulièrement. Il devient de plus en plus difficile d'obtenir des endroits de passage pour construire des nouvelles lignes de transport ou de distribution. Pour ces raisons, les compagnies d'électricité cherchent à augmenter la puissance que peuvent transporter les lignes existantes, sans autant compromettre leur fiabilité et stabilité. Idéalement, on aimerait les charger jusqu'aux limites de la capacité thermique des conducteurs et utiliser toutes les lignes pour supporter la charge électrique. [3]

Les réseaux de transport et de distribution de l'énergie électrique comportent jusqu'à maintenant des appareillages passifs. Par ailleurs, le maillage des lignes exige de plus en plus le contrôle des puissances transitées. La complexité des réseaux exige aussi des marges de sécurité accrues afin que les perturbations locales ne provoquent aucune instabilité qui pourrait s'étendre sur tout le réseau de transport. [3]

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

I.1 Généralités sur les réseaux d'énergie électrique :

Les réseaux électriques sont constitués par l'ensemble des appareils destinés à produire, transporter, à distribuer l'électricité depuis les centrales de génération jusqu'aux clients (centrales, lignes, postes de transformation, conducteurs, isolateurs, pylônes, parafoudres, transformateurs, équipements de protection,...).[4]

Les réseaux électriques ont pour fonction d'interconnecter les centres de production tels que les centrales hydrauliques, thermiques... avec les centres de consommation (villes, usines,...).

L'énergie électrique est transportée en haute tension, afin de limiter les pertes joules puis progressivement abaissée au niveau de la tension de l'utilisateur final. [4]

L'énergie électrique est fournie sous forme de tension constituant un système sinusoïdal triphasé dont les paramètres caractéristiques sont:

- 1- La fréquence (50Hz).
- 2- L'amplitude des trois tensions.
- 3- La forme d'onde qui doit être la plus proche possible d'une sinusoïde
- 4- la symétrie du système triphasé ;

Le réseau électrique doit permettre de livrer aux utilisateurs une énergie adaptée à leurs besoins et doit satisfaire les exigences suivantes:

1. Assurer au client la puissance dont il a besoin.
2. Fournir une tension stable dont les variations n'excèdent pas $\pm 10\%$ de la tension nominale.
3. Fournir une fréquence stable dont les variations n'excèdent pas $\pm 0,1$ Hz.
4. Fournir l'énergie à un prix acceptable.
5. Veiller à la protection de l'environnement.

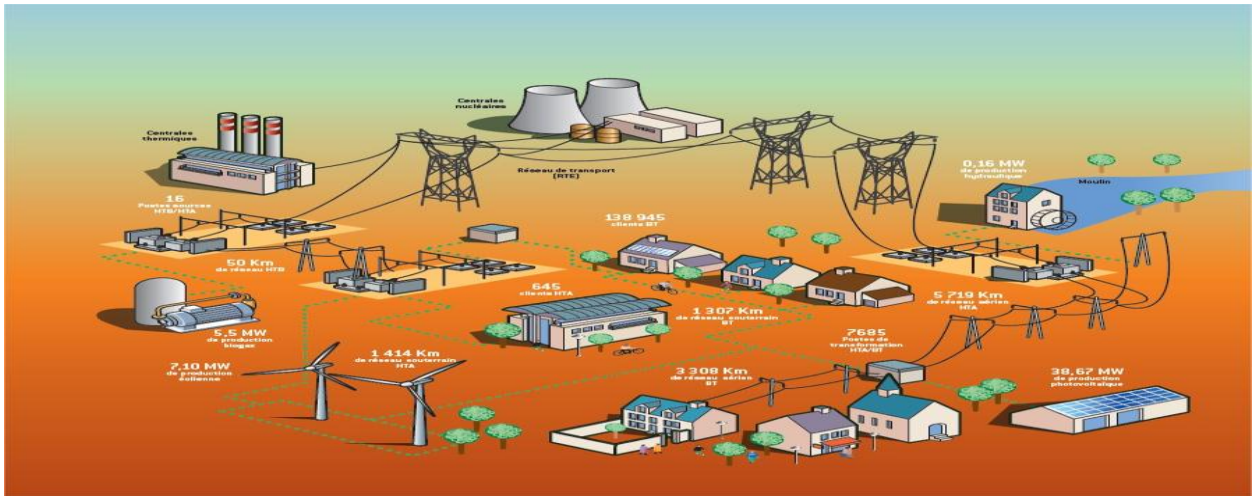


Figure I.1 : Le réseau électrique

I.2 Modélisation des éléments du réseau électrique :

I.2.1 Modélisation des générateurs :

Une machine synchrone est une machine à courant alternatif, dans laquelle la fréquence de la tension induite engendrée et la vitesse sont en rapport constant. Elle est composée : d'un inducteur fixe, un inducteur tournant. On appelle une machine synchrone toutes les machines qui tournent exactement à la vitesse correspondant à la fréquence des courants et des tensions à ses bornes.

Les machines de faible vitesse angulaire sont à pôles saillants. Pour les grandes machines à grande vitesse (3000 tr/min, dans les centrales à fuel ou charbon), (1500 tr/min dans les centrales nucléaires), on utilise des rotors lisses à entrefer constant. [5]

Le schéma équivalent est représenté par la figure (I.2) :

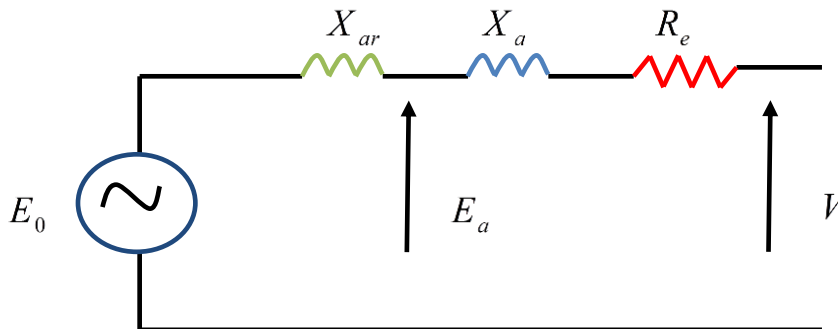


Figure I.2 : Modélisation de générateur

E_0 : La fem a vide

E_a : la fem en charge

V : tension de sortie.

X_{ar} : Réactance de réaction d'induit.

Xa : Réactance de fuite

R_e : Résistance d'enroulement

I.2.2 Modélisation du transformateur :

Un transformateur de l'énergie électrique est représenté par un quadripôle en π non symétrique. Les grandeurs associées sont le rapport de transformation α et l'impédance de fuite. Les rapports a_{ij} sont inclus dans les éléments de la matrice admittance, c'est-à-dire que les susceptances de la matrice admittance sont vues comme des fonctions de rapports de transformation α (Figure I.3).[6]

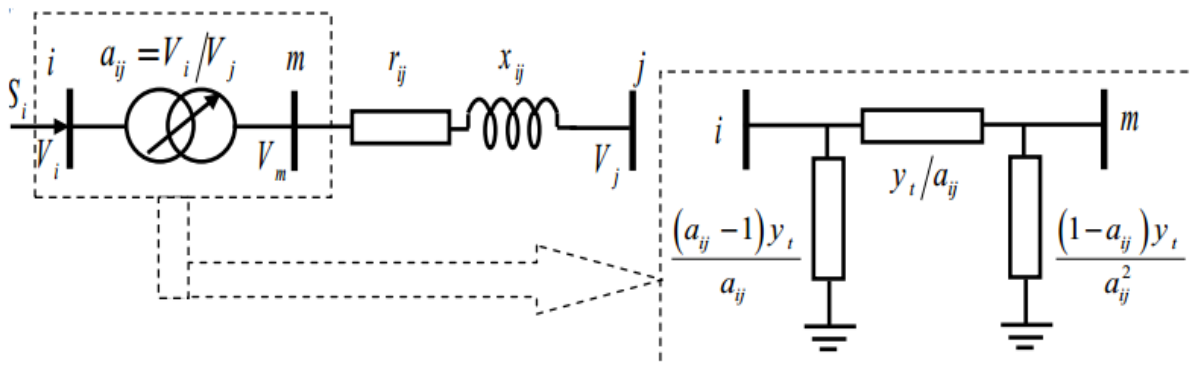


Figure I.3 : Modélisation de transformateur

I.2.3 Modélisation d'une charge :

Une charge peut être modélisée par une impédance qui consomme une quantité constante de puissance active et réactive Figures(I.4). [7]

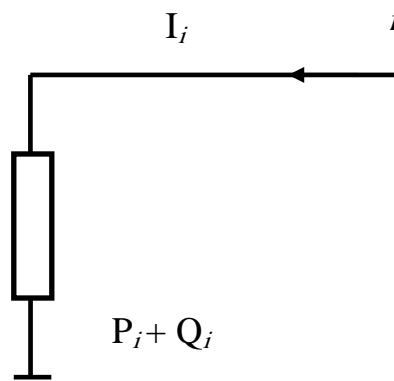


Figure I.4 : Modélisation d'une charge.

I.2.4 Modélisation de la ligne :

Généralement la ligne de transport est modélisée par un schéma équivalent en π qui se compose d'une impédance série (résistance R en série avec une réactance inductive X), et une admittance shunt qui consiste en une susceptance capacitive Y (due à l'effet capacitif de la ligne avec la terre) en parallèle avec une conductance d'isolation (Voir Figure I.5).

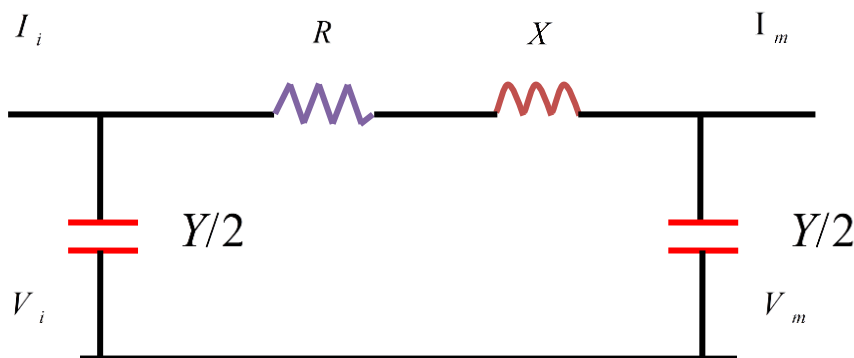


Figure I.5 : Modélisation d'une ligne longue

I.3 Puissance transmise par une ligne électrique :

La plupart des charges sont de nature inductive et ont besoin d'une certaine quantité de puissance réactive. Cette quantité est déterminée par le facteur de puissance de la charge. La Figure I.6 montre le circuit équivalent d'une ligne de transmission avec une source de tension V_S , une réactance jX_L et une charge d'impédance $Z_{ch}(V_R)$. [3]

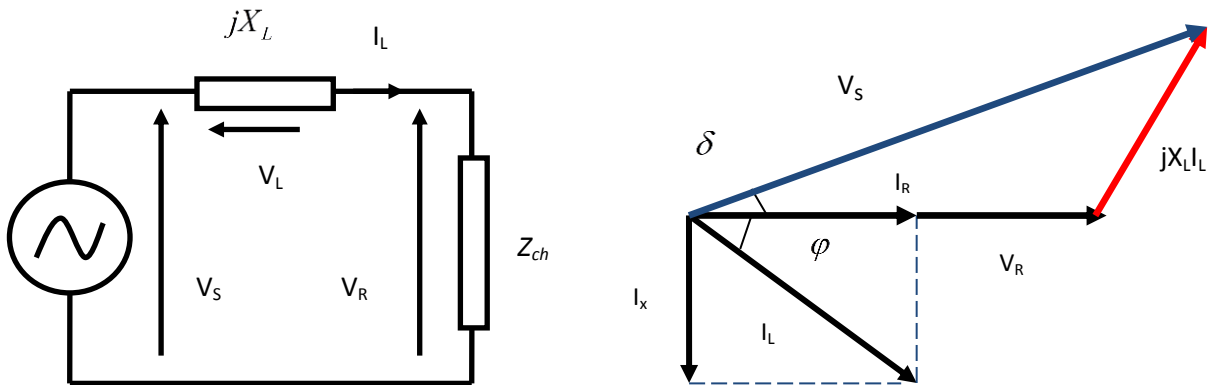


Figure I.6 : a) circuit équivalent d'un réseau électrique, b) diagramme vectorielle associé.

Si la charge est de nature inductive, le courant efficace I_L qui la traverse sera en retard de phase avec un angle φ par rapport à la tension aux bornes de celle-ci Z_{ch} (V_R). Ce courant comprend deux composantes: la composante active I_R qui est en phase avec la tension V_R et la composante réactive I_X qui est en quadrature avec la tension V_R . La racine de la somme au carré de ces deux courants donne le courant de ligne I_L . Le courant I_R est porteur de la puissance active et le courant I_X est responsable au besoin de la puissance réactive de la charge (Figure I.6.b). [3]

Où δ est l'angle de déphasage entre V_R et V_S .

Le diagramme vectoriel de la (Figure I.8.b) nous permet d'extraire les équations suivantes:

$$V_S \cos(\delta) = V_R + X_L I_L \sin(\varphi) \quad (I.1)$$

$$V_S \sin(\delta) = X_L I_L \cos(\varphi) \quad (I.2)$$

A partir des deux équations (I.1) et (I.2), on peut calculer la puissance active et réactive transmise dans la ligne comme suite :

$$P_R = \frac{V_R V_S}{X_L} \sin \delta \quad (\text{I.3})$$

$$Q_R = \frac{-V_R^2}{X_L} - \frac{V_R V_S}{X_L} \cos \delta \quad (\text{I.4})$$

Les puissances au niveau de la source :

$$P_S + jQ_S = V_S I_L \cos(\varphi + \delta) + jV_S I_L \sin(\varphi + \delta) \quad (\text{I.5})$$

$$Q_S = V_S I_L (\cos(\varphi) \sin(\delta) + \sin(\varphi) \cos(\delta)) \quad (\text{I.6})$$

$$Q_S = V_S \frac{V_S \sin(\delta)}{X_L} + V_S \cos(\delta) \frac{V_S \cos(\delta) - V_R}{X_L} \quad (\text{I.7})$$

On obtient :

$$Q_S = \frac{V_S^2}{X_L} - \frac{V_R V_S}{X_L} \cos \delta \quad (\text{I.8})$$

Après l'analyse des équations ci-dessus, nous pouvons remarquer que le flux de puissance active et réactive peut être commandé par le contrôle de l'angle de déphasage δ , par le contrôle de la réactance X_L ou par le contrôle des tensions V_R et V_S . Pour bien comprendre, on suppose dans ce cas que la tension $V_S = V_R = V_{\text{base}}$ et $X_L = X_{\text{base}}$ (I.9)

Tenant compte de ces considérations, nous pourrions convertir les paramètres de la ligne de transmission en valeurs réduites qui sont comme suit : $V_S = V_R = 1\text{pu}$, $X_L = 1\text{pu}$ (I.10)

I.3.1 Réglage de puissance active :

La puissance active P transmise entre deux réseaux de tensions V_1 et V_2 présentant un angle de transport $(\theta_1 - \theta_2)$ et connectés par une liaison d'impédance X est donnée par l'équation

suivante: [8]

$$P_e = \frac{V_1 V_2}{X} \sin(\theta_1 - \theta_2) \quad (\text{I.11})$$

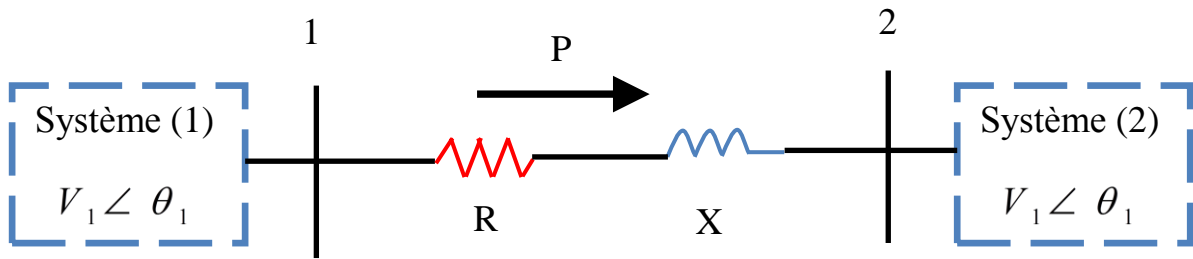


Figure I.7 : Système de puissance a deux jeu de barres

Le sens de transfert de puissance est uniquement déterminé par le déphasage relatif des tensions aux deux extrémités. Cela signifie que ce transfert s'effectue du point où la tension est en avance de phase par rapport au point où la tension est en retard de phase.

La relation (I.11) montre que la puissance maximale transmissible à tension et réactance constantes est atteinte pour un angle de transmission $(\theta_1 - \theta_2) = 90^\circ$, cet angle correspond à la limite de la stabilité statique. [8]

Cette relation montre aussi les paramètres sur lesquels il est possible d'agir pour contrôler le transfert de puissance :

- ✓ Les tensions V_1 et V_2 ont une faible marge de variation en raison de la nécessité de maintenir le profil du plan de la tension pour limiter les pertes en lignes.
- ✓ L'angle $(\theta_1 - \theta_2)$ par un système déphaseur
- ✓ La réactance de la ligne par compensation.

I.4 Écoulement de puissance dans un réseau électrique :

I.4.1 Formulation des équations de l'écoulement de puissance :

L'étude de l'écoulement de puissance (load flow), permet d'avoir la solution des grandeurs d'un réseau électrique en fonctionnement normal équilibré en régime permanent. Ces grandeurs sont les tensions aux nœuds, les puissances injectées aux nœuds et celles qui transitent dans les lignes. Les pertes et les courants s'en déduisent. Les études de mouvement d'énergie permettent de planifier la construction et l'extension des réseaux électriques ainsi que la conduite et le contrôle de ce réseau. [7]

Pour un réseau à n nœuds, les équations reliant les tensions nodales et les courants injectés sont :

$$I = Y.V \quad (\text{I.12})$$

$$I = \sum_{j=1}^n Y_{ij} \cdot V_j \quad (\text{I.13})$$

En pratique, le système est connu par les puissances apparentes injectées. Les n équations complexes se décomposent en 2n équations réelles : [6]

$$S_i^* = P_i - jQ_i = V_i^* \cdot \sum_{k=1}^n Y_{ik} \cdot V_k \quad (\text{I.14})$$

$$P_i = V_i \sum_{k=1}^n V_k (G_{ik} \cos \theta_{ik} + B_{ik} \sin \theta_{ik}) \quad (\text{I.15})$$

$$Q_i = V_i \sum_{k=1}^n V_k (G_{ik} \sin \theta_{ik} - B_{ik} \cos \theta_{ik}) \quad (\text{I.16})$$

I.4.2 la méthode de Gauss appliquée aux équations de l'écoulement de puissance :

On utilise des valeurs estimées des tensions des jeux de barres pour calculer un ensemble de nouvelles valeurs. Les nouvelles valeurs sont fonctions des valeurs estimées des tensions, des puissances actives et réactives spécifiées et des admittances du réseau. Chaque fois qu'un ensemble de valeurs de tensions est obtenu, le nombre d'itérations augmente d'une unité, jusqu'au point où au niveau de tous les jeux de barres, la différence entre deux tensions appartenant à deux itérations successives est inférieure à une certaine valeur qu'on spécifie et qu'on appelle tolérance ou précision. Pour un réseau de N jeux de barres, la tension calculée à n'importe quel jeu de barres k est donnée par :

a. Méthode de Gauss- Seidel :

$$\bar{V}_i^{(l)} = \frac{1}{\bar{Y}_{ij}} \left[\frac{P_i - jQ_i}{\bar{V}_i^{*(l-1)}} - \sum_{i=1}^{k-1} \bar{Y}_{ij} \cdot \bar{V}_i^{(l-1)} \right]$$

b. Méthode de Gauss :

$$\bar{V}_i^{(l)} = \frac{1}{\bar{Y}_{jj}} \left[\frac{P_i - jQ_i}{\bar{V}_i^{*(l-1)}} - \sum_{i=1}^{k-1} \bar{Y}_{ij} \cdot \bar{V}_i^{(l-1)} - \sum_{i=j+1}^n \bar{Y}_{ij} \cdot \bar{V}_i^{(l-1)} \right]$$

l Indique l'itération en cours. Tandis que $l - 1$ indique l'itération précédente.

\bar{V}_i Le module de la tension au jeu de barres i .

\bar{Y}_{ij} Le module de l'admittance de la branche ij .

P_i La puissance active du jeu de barres i .

Q_i La puissance réactive du jeu de barres i .

Dans chaque itération la tension est déterminée pour tous les jeux de barres sauf le jeu de barres de référence (swing bus). Ce processus de résoudre les équations linéaires est connu sous le nom de la méthode itérative de GAUSS-SEIDEL, si le même ensemble de valeurs des tensions est utilisé dans une itération complète (au lieu de substituer les nouvelles valeurs chaque fois qu'elles sont déterminées pour calculer la tension du jeu de barres suivant), le processus serait appelé la méthode itérative de GAUSS.[7]

I.5 La qualité d'énergie :

Le terme de qualité d'énergie est largement utilisé lorsque des phénomènes perturbants sont présents sur le réseau électrique. La détérioration de la qualité de l'énergie sur le réseau peut avoir plusieurs causes et effets comme par exemple :[9]

- les charges ayant un facteur de puissance trop bas. Le transit inutile d'énergie réactive sur les lignes peut alors augmenter fortement les pertes en lignes et faire chuter la tension aux nœuds de raccordement des charges .
- les charges non-linéaires, comme par exemple les redresseurs à diodes. Les harmoniques absorbés ou générés accélèrent le vieillissement de certains matériels, perturbent les systèmes de contrôle.
- les déséquilibres en courant et/ou en tension du fait d'un déséquilibre de charges : provoquent par exemple dans les machines tournantes des champs tournants inverses produisant des couples parasites.
- les transitoires rapides essentiellement provoqués par des enclenchements déclenchements de charges (ou de compensateurs) et de manœuvres.

Les solutions curatives s'insèrent dans des architectures déjà existantes et se basent sur la compensation de l'énergie réactive. [9].

Afin de garantir une bonne qualité d'énergie il est nécessaire de satisfaire l'équilibre offre-demande de l'énergie réactive, de fournir une tension aussi régulière que possible et de respecter un certain nombre de contraintes techniques.

I.6 Compensation de la puissance réactive :

Le transport de la puissance réactive sur de longue distance présente une plusieurs inconvénients tels-que les chutes de tension considérables, les pertes par effet joule et moins de capacité pour transporter la puissance active. Actuellement, avec la complexité des réseaux, la participation des générateurs dans la production de l'énergie réactive est devenue insuffisante. Elle est générée en grande partie par les moyens de compensation existants ou en période creuse, par les lignes de transport. [9]

I.6.1 Principe général de la compensation:

Le principe de compensation avec des condensateurs peut être représenté par les deux figures ci-après. La figure(I.8) illustre l'échange local d'énergie réactive entre le récepteur et le condensateur. Le courant total fourni par le réseau I_{t2} est réduit, le rendement de l'installation se trouve donc amélioré puisque les pertes par effet Joule sont proportionnelles au carré du courant.[10]

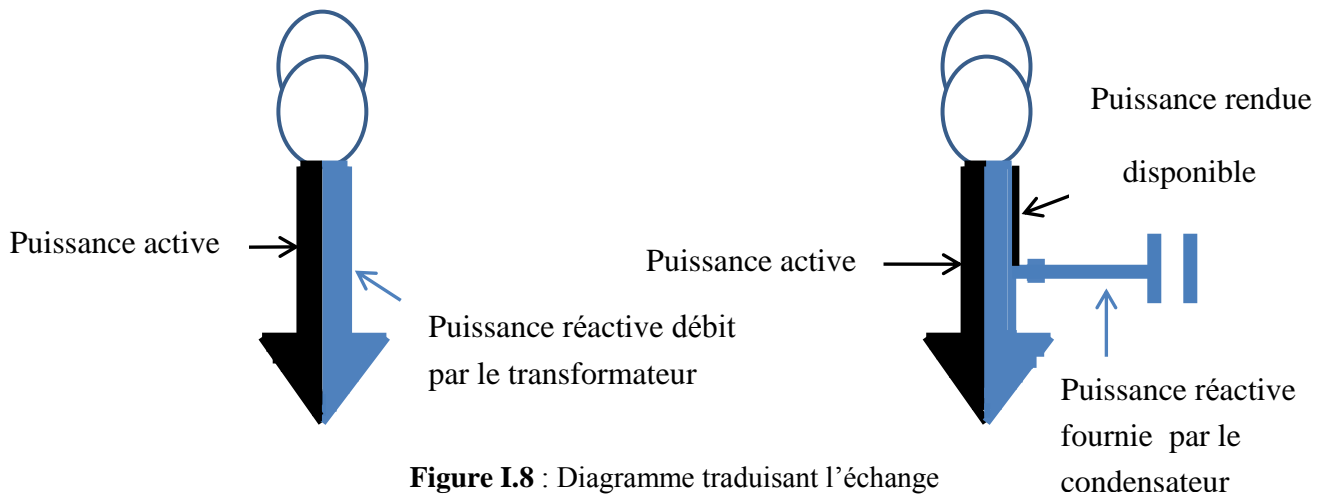


Figure I.8 : Diagramme traduisant l'échange d'énergie et montrant l'intérêt de la compensation.

I.6.2 Les Moyens classiques de compensation de l'énergie réactive :

Le transport de la puissance réactive sur de longue distance présente un plusieurs inconvénients tels-que les chutes de tension considérables, les pertes par effet joule et moins de capacité pour transporter la puissance active. Actuellement, avec la complexité des réseaux, la participation des générateurs dans la production de l'énergie réactive est devenue insuffisante. Elle est générée en grande partie par les moyens de compensation existants ou en période creuse, par les lignes de transport. [11]

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

- ✓ Les condensateurs et inductances fixes.
- ✓ Les compensateurs synchrones.
- ✓ Les compensateurs statiques.
- ✓ Les transformateurs à prises variables (en charge ou à vide).
- ✓ Les groupes générateurs.

I.6.2.1 Les avantages compensateurs classiques :

- ✓ L'absence d'usure mécanique et un entretien réduit.

- ✓ De faibles pertes.
- ✓ Un faible volume et une installation facile.
- ✓ Peuvent être fractionnés suivant les besoins.
- ✓ Soit leur prix est moins élevé que les compensateurs rotatifs, qu'elle que soit la puissance.

I.6.2.2 Les inconvénients compensateurs classiques : [10]

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

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

I.7 Conclusion :

Dans ce chapitre Nous avons présenté les notions de base des réseaux d'énergie électrique qui influent sur la qualité de la tension, on commençant par une étude générale sur les réseaux, l'acheminement de puissance à travers ces réseaux. On a vu brièvement les facteurs qui limitent la puissance transmissible dans les lignes de transport provoquée par le transit de puissance réactive. En fin on a présent les différent moyens classique de compensation d'énergie réactive.[12]

Cependant une nouvelle solution, basée sur les systèmes FACTS de transmission à courant flexible utilisant l'électronique de puissance pour contrôler le flux d'énergie sur le réseau électrique est aujourd'hui utilisée. Ces dispositifs seront traités dans le deuxième chapitre.

Chapitre II

Généralité sur les FACTS

II.1 Introduction :

Devant les problèmes de transit de puissance, la compagnie américaine EPRI (Electric Power Research Institute) a lancé, en 1988, un projet d'étude des systèmes FACTS afin de mieux maîtriser le transit de puissance dans les lignes électriques. Le concept FACTS regroupe tous les dispositifs à base d'électronique de puissance qui permettent d'améliorer l'exploitation du réseau électrique. La technologie de ces systèmes (interrupteur statique) leur assure une vitesse supérieure à celle des systèmes électromécaniques classiques. De plus, elles peuvent contrôler le transit de puissance dans les réseaux et augmenter la capacité efficace de transport tout en maintenant voir en améliorant, la stabilité des réseaux.[13]

Cette partie est consacrée pour l'étude théorique générale des dispositifs FACTS, nous présenterons les différentes classifications ainsi que les propriétés de ces dispositifs.

Nous avons présente dans le chapitre II les différents type de compensateur du système FACTS série, parallèle, hybride.

Le TCSC c'est un compensateur série commandée par thyristors (Thyristor Controlled Series Capacitor) , c'est la première génération des dispositifs FACTS base à l'électronique de puissance (Thyristor) . Il est capable pour compenser la puissance réactive de la ligne de transmission.

II.2 Définition les dispositifs FACTS :

Un FACTS (Flexible Alternating current Transmission system) est un équipement d'électronique de puissance d'appoint utilisé pour contrôler la tension, augmenter les capacités de transit, ou assurer la stabilité dynamique des réseaux de transmission d'électricité. Il agit généralement en fournissant ou en consommant dynamiquement de la puissance réactive sur le réseau. Ceci a pour effet d'augmenter ou de diminuer l'amplitude de la tension à son point de connexion, et par conséquent la puissance active maximale transmissible.

Les condensateurs shunts fournissent la puissance réactive, et augmentent localement la tension du réseau (utilisé en période de forte consommation ou dans les zones éloignées des centres de production). Les réactances shunts consomment la puissance réactive, et diminuent la tension du réseau (utilisé en période de faible consommation). Les condensateurs séries permettent de diminuer l'impédance des liaisons électriques et d'augmenter la puissance transmissible par ces liaisons (une liaison électrique haute-tension est en effet essentiellement inductive). Les réactances série augmentent l'impédance d'une liaison électrique, afin de mieux répartir les courants sur les différentes liaisons.[14]

II.2.1 Classification des dispositifs FACTS : Les systèmes FACTS peuvent être classés en trois catégories :[15]

- les compensateurs parallèles.
- les compensateurs séries.
- les compensateurs hybrides (série - parallèle).

Ces catégories décomposées en deux générations selon la technologie utilisée:

- La première génération est à base de thyristors :
 - TCSC (Thyristor Controlled Serie Capacitor).
 - SVC (Static Var Compensator).
- La deuxième génération est à base de GTO thyristors :
 - STATCOM (Static Compensator).
 - TCPAR (Thyristor Controlled Phase Angle Regulator).

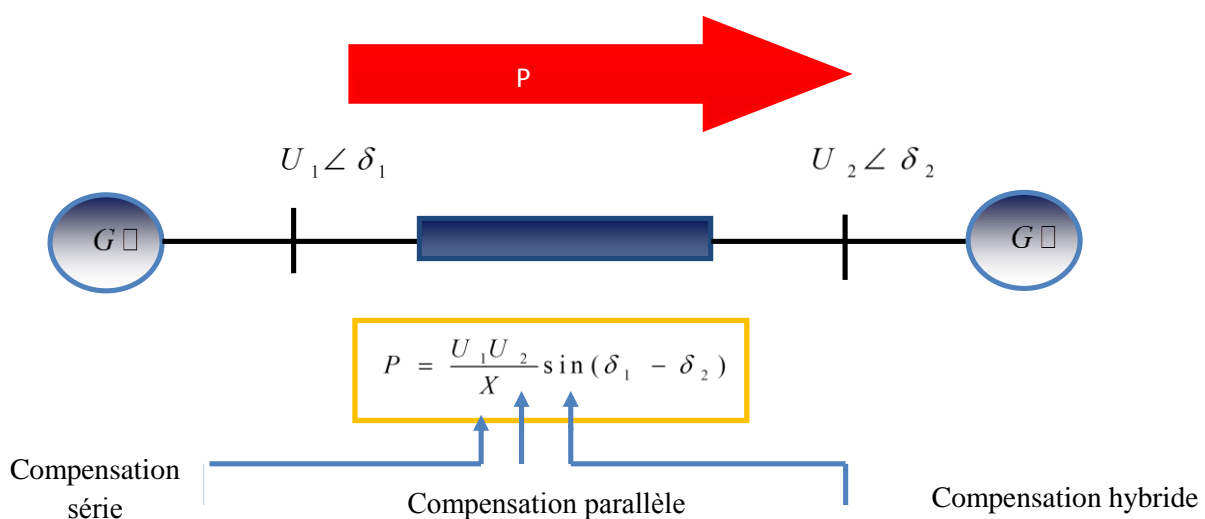


Figure II.1 : Schéma principe des dispositifs FACTS.

II.2.2 Les avantages des dispositifs FACTS : [6]

- Contrôle de l'écoulement de puissance : c'est la fonction principale des FACTS. L'utilisation du contrôle de l'écoulement de puissance peut satisfaire les demandes de charge, atteindre un fonctionnement optimal, et surmonter les conditions d'urgence.
- Amélioration de la stabilité dynamique. Cette fonction supplémentaire des FACTS comprend l'amélioration de la stabilité transitoire, l'amortissement des oscillations de puissance et le contrôle de stabilité de la tension.
- Augmenter la capacité de transport de lignes à leurs capacités thermiques, y compris les demandes à court terme et saisonnière
- Réduction de l'écoulement de la puissance réactive, ce qui permettra ainsi à la ligne de transporter plus de puissance active.

II.2.3 Les inconvénients des dispositifs FACTS :

- Le choix du modèle du FACTS .
- Choix de la localisation des FACTS .
- Protection pour les FACTS et pour le réseau .
- Interactions entre les dispositifs FACTS et les autres éléments.
- Génération des harmoniques .

II.3 compensateurs parallèles :

On insère maintenant au milieu de la ligne un compensateur d'énergie réactive idéal. Ce dispositif permet de maintenir la tension V_M à la tensions V_S , en contrôlant le flux de puissance réactive (Figure. II.2). En effet, la chute de la tension à travers une ligne est donnée par la relation en négligeant le terme résistif de la ligne Les compensateurs parallèles les plus utilisés c'est le SVC.[6]

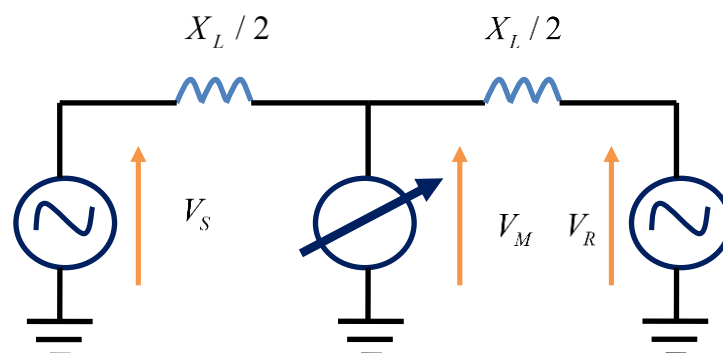


Figure II.2 : Principe de compensation shunt.

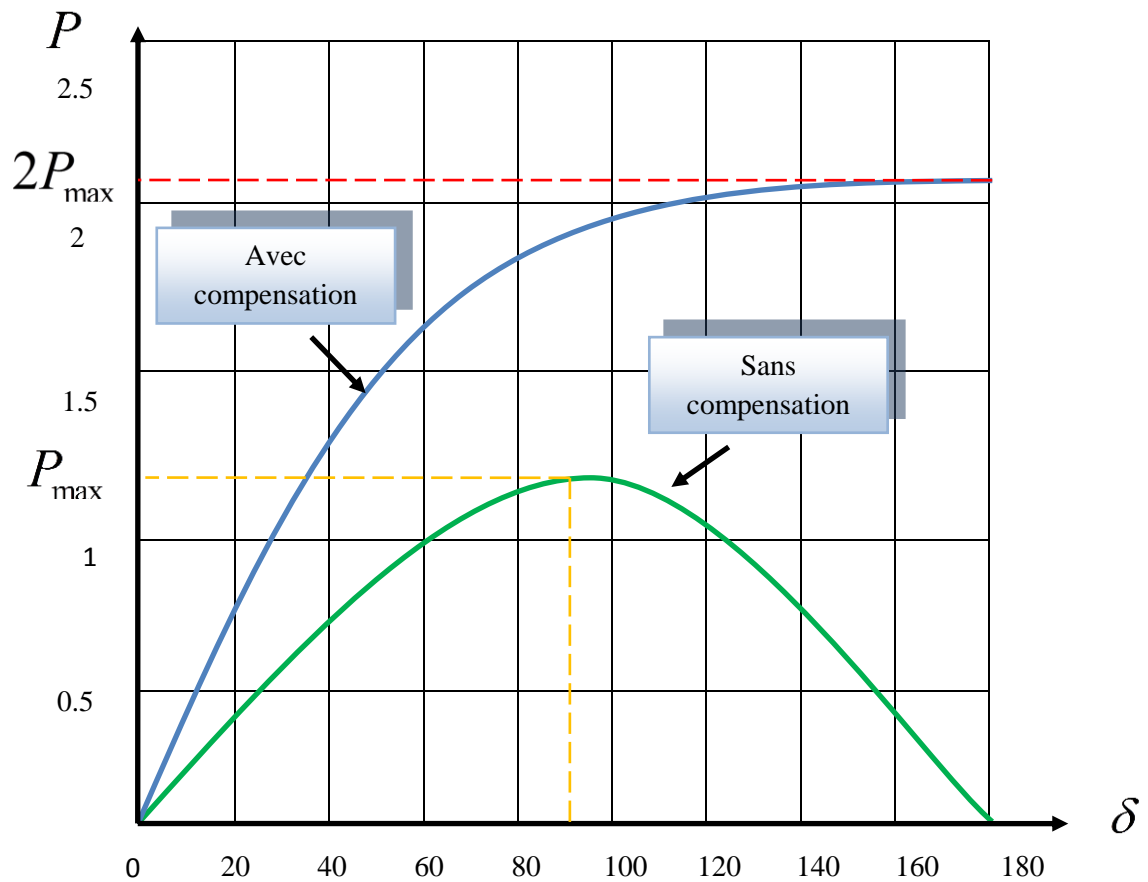


Figure II.3 : Courbe de puissance avec et sans compensation shunt en fonction de l'angle de transmission

II.3.1 Compensateur statique de l'énergie réactive (SVC) :

Le SVC (statice var compensateur) est la première génération FACTS qui a été introduite sur le marché il y a presque plus de vingt ans . Il est constitué d'un banc de condensateurs commutés par thyristors (TSC thyristors switched capacitors) et d'un banc de bobines contrôlées par thyristors (TCR thyristor Controlled reactors) comme indiqué par la figure (II.4). Le premier SVC installé sur une ligne de transport d'énergie était en 1979 en Afrique du sud .Avec une coordination appropriée de l'interrupteur des condensateurs et le contrôle des bobines, la puissance réactive de sortie peut être variée continuellement entre les taux capacitifs et inductifs de l'équipement.[2]

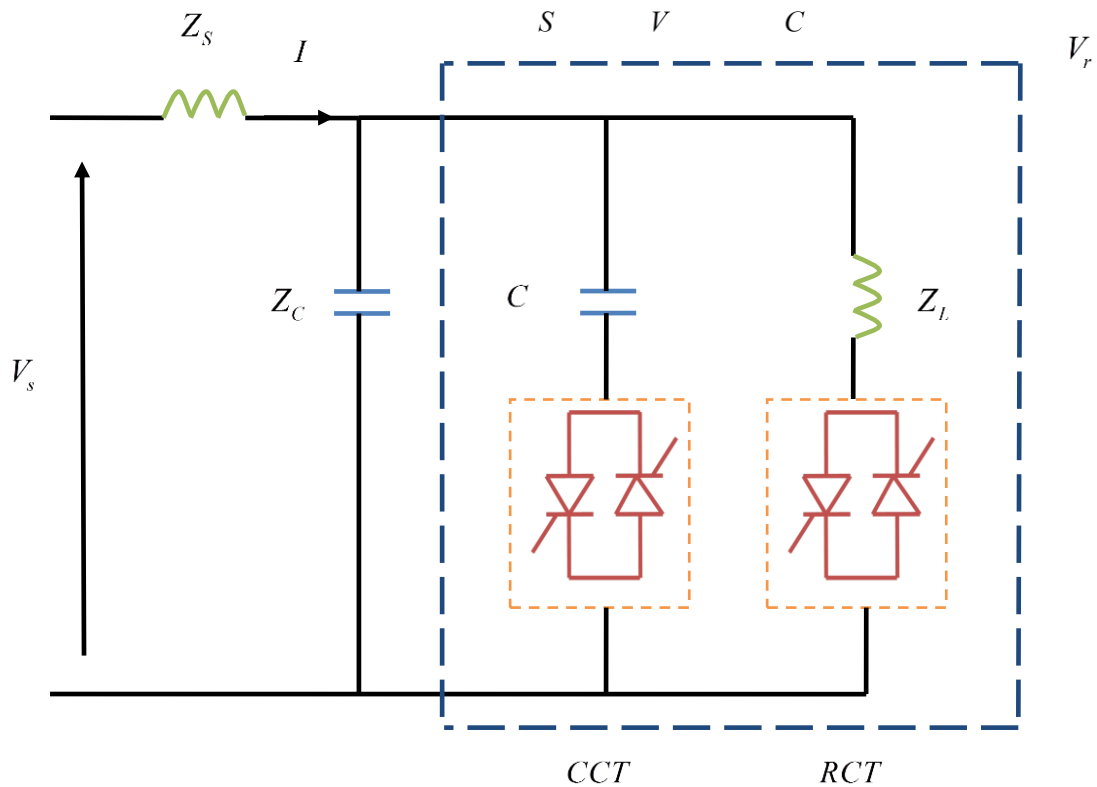


Figure II.4 : structure du

II.3.1.1 Principe de fonctionnement : [5]

La caractéristique statique de SVC est donnée par la (figure II.5) Trois zone 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 $V < V_{min}$: est une zone où les seule capacités sont connectées au réseau.

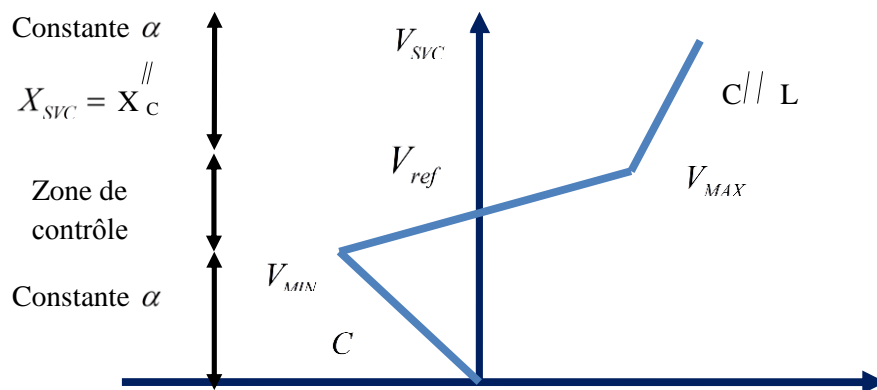


Figure II.5 : Fonctionnement du compensateur statique SVC

II.3.1.2 Les avantages de SVC : [5]

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

II.3.2 Compensateur statique STATCOM :

Le STATCOM est un compensateur fonctionnant en parallèle avec la ligne de transmission. Son courant inductif ou capacitif de sortie peut être contrôlé indépendamment du réseau. Le STATCOM est représenté par la (Figure II.6). [16]

Le STATCOM est constitué d'un transformateur de couplage, un convertisseur de tension, et une source de stockage pour le côté DC. Le transformateur de couplage a deux rôles:

- ✓ Lier le STATCOM avec le système AC ;

L'inductance de liaison a l'avantage que la source DC ne soit pas court-circuité

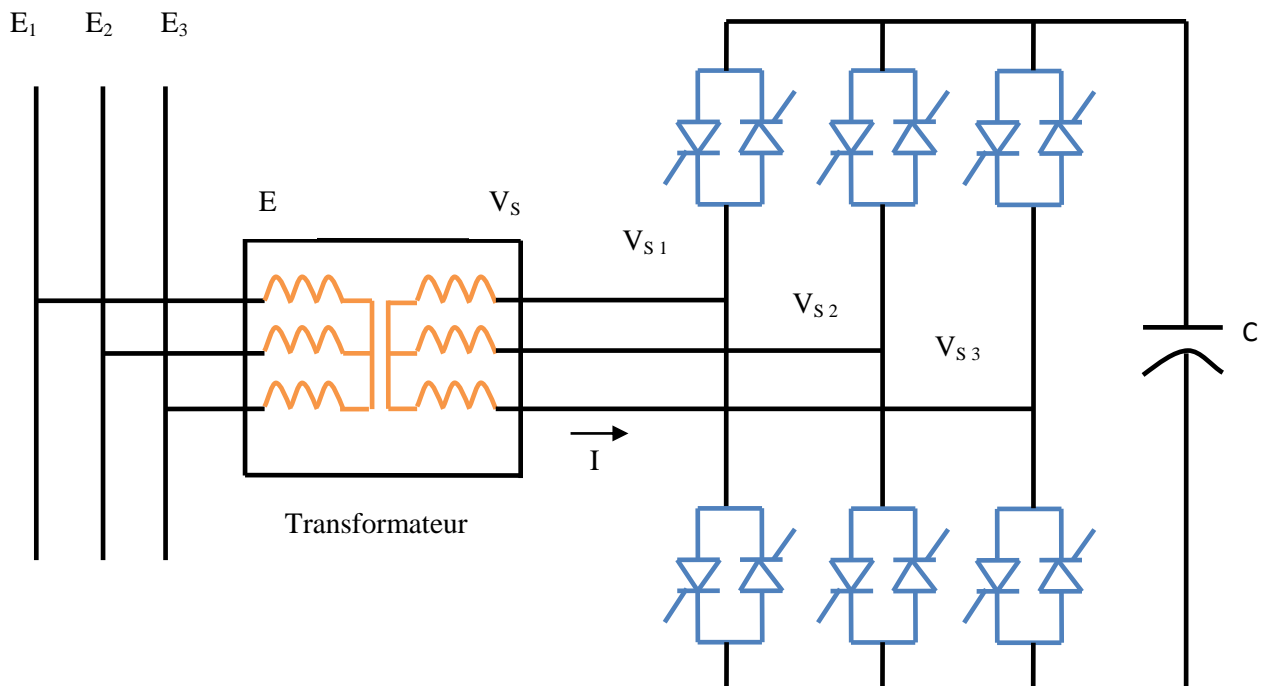


Figure II.6: structure du STATCOM

II.3.2.1 Les avantages de STATCOM : [5]

- 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.
- Un design modulaire du convertisseur permet une adaptation pour une grande plage de puissances nominales.

II.4 Compensateurs hybrides:

Cette famille de compensateurs est la combinaison des autres groupes. 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. On se limite dans ce paragraphe à étudier une seule compensateurs :[17]

II.4.1 Régulateur d'angle de phase contrôlé par thyristor (TCPAR) :

Le TCPAR (Thyristor Controlled Phase Angle Regulator) est un transformateur déphaseur à base de thyristors. Ce dispositif a été créé pour remplacer les déphaseurs à transformateurs à régleur en charge (LTC ;Load Tap Changer) qui sont commandés mécaniquement [3], il est constitué de deux transformateurs, varier la puissance active, Le TCPAR est composé d'un transformateur branché en série avec le réseau, est un deuxième transformateur connecté en parallèle appelé transformateur d'excitation.

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). Cette combinaison donne une tension à injecter dont l'amplitude peut prendre 27 valeurs différentes. [17]

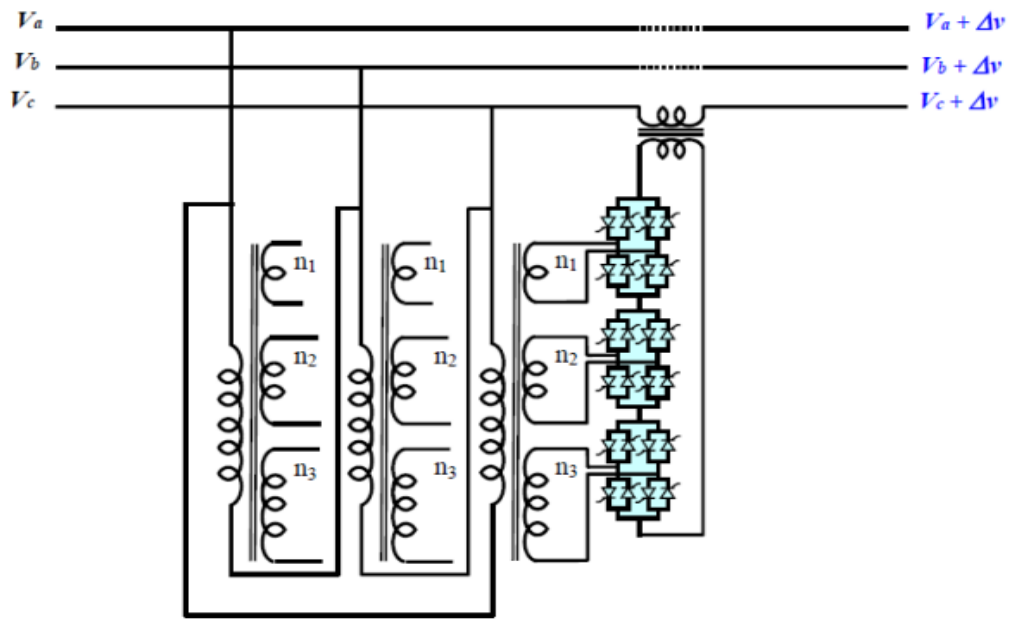


Figure II.7: structure du TCPAR.

Le TCPAR possède la capacité de maintenir l'angle effectif maximale de la ligne de transmission durant la première oscillation. En plus, le TCPAR, peut être utilisé aussi pour augmenter la limite de la stabilité transitoire. [13]

La caractéristique statique d'un tel compensateur est représentée par la figure (II.8).

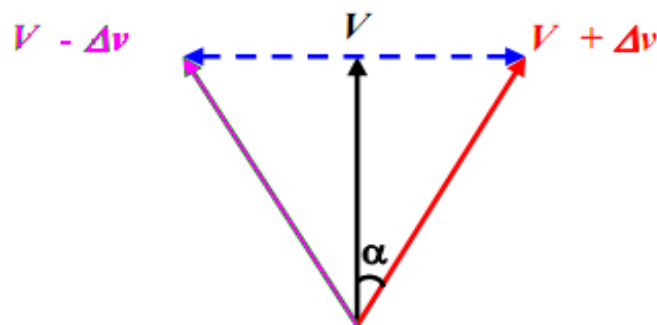


Figure II.8: Diagramme des phasors du TCPAR

II.5 Compensateurs série :

Cette compensation a pour principe d'insérer une réactance capacitive sur la ligne toujours dans le but d'en augmenter la puissance transmissible. La ligne étant modélisée par une réactance de type inductive, on comprend aisément que l'on diminue cette réactance en ajoutant une réactance de type capacitive. En conservant le même modèle de ligne. On obtient la compensation série donnée par la Figure II.10.[5]

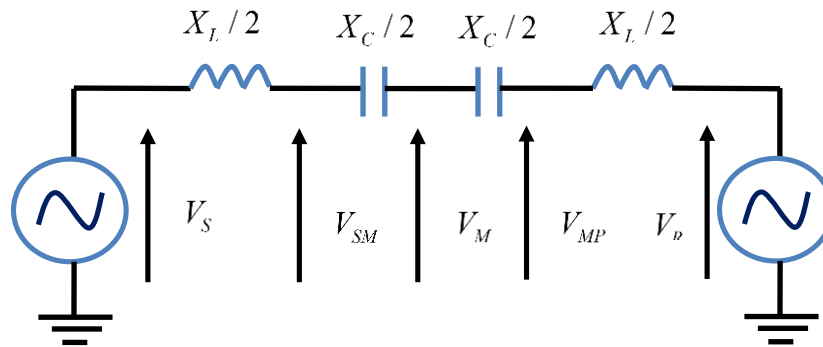


Figure II.10 : Principe de compensation sérié

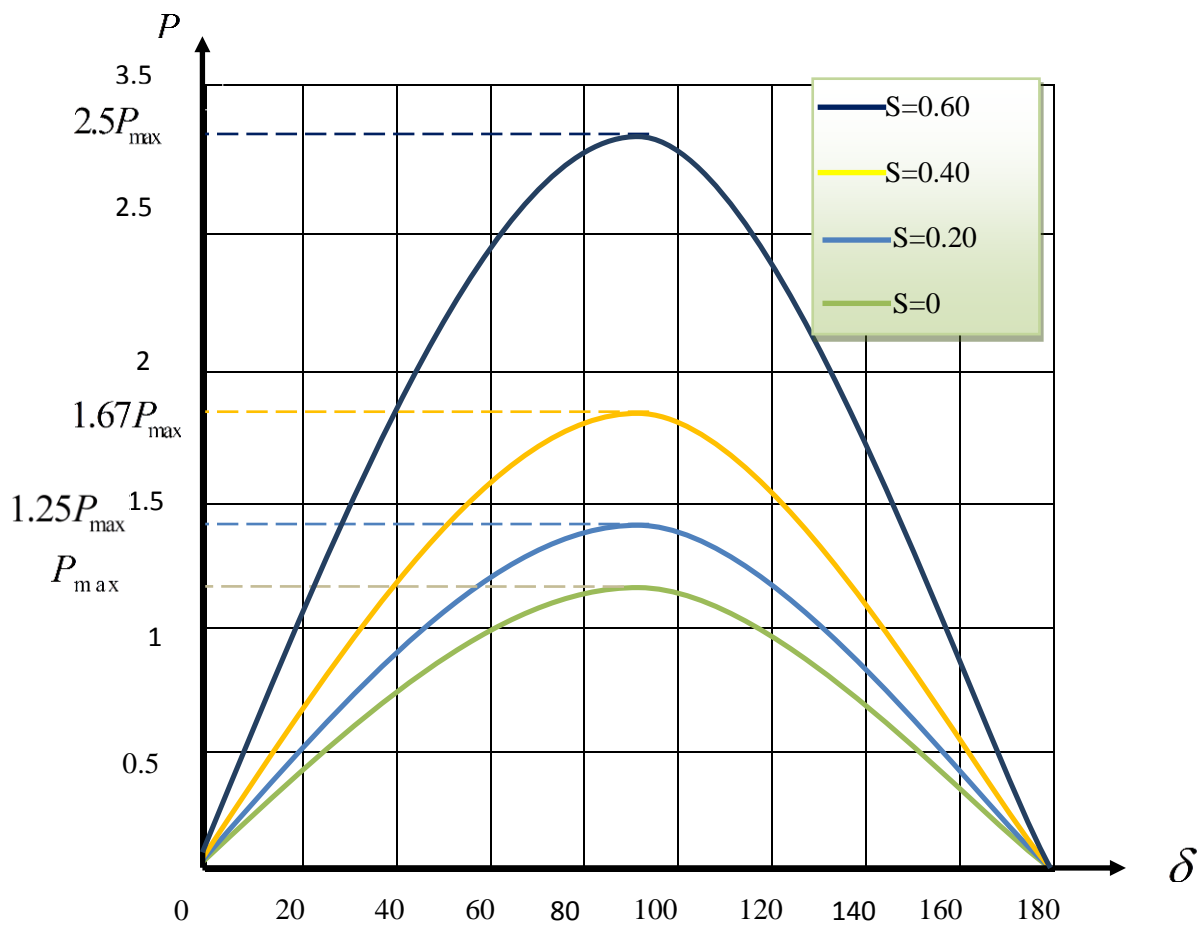


Figure II.11 : Courbe de puissance avec et sans compensation

Une modification de X_L augmenter ou diminuer le flux de puissance active pour un angle de phase fixe. De même, la puissance réactive sera modifiée suite à une modification de X_L . La réactance introduite aura la valeur X_C , donnée par l'équation : [5]

$$X_C = SX_L \quad (\text{II.1})$$

S est le degré de compensation y compris entre :

$$0 \leq S \leq 1 \quad (\text{II.2})$$

Avec ce type de compensation, les condensateurs doivent échanger de l'énergie réactive en quantité importante. Les propriétés sont similaires à celles des compensateurs d'énergie réactive.

II.5.1 Compensateur TCSC :

II.5.1.1 Définition du TCSC:

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

Le TCSC (compensateur série contrôle par thyristor) est composé d'une inductance en série avec un gradateur à thyristors, le tout en parallèle avec un condensateur . Généralement ce dispositif possède un élément de protection contre les surtensions placés en parallèle avec ce dernier, appelé MOV (Métal Oxide Varistor), comme l'indique la (figure II.12) . Du point de vue fonctionnement, le TCSC se comporte comme une réactance variable connectée en série avec la ligne de transmission. [19]

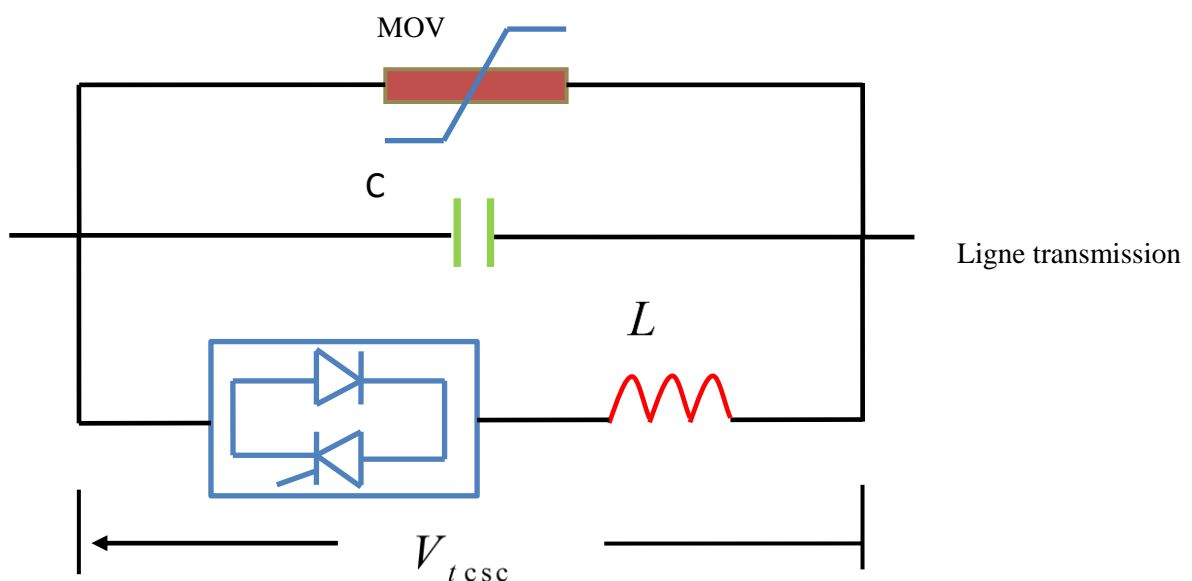


Figure II.12 : Structure du TCSC



Figure II.13 : Exemple réelle de TCSC

II.5.1.2 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. [6]

Où

X_c : est l’impédance du condensateur du TCSC.

X_L : est l’impédance de l’inductance du TCSC.

X_{ligne} : est l’impédance de la ligne

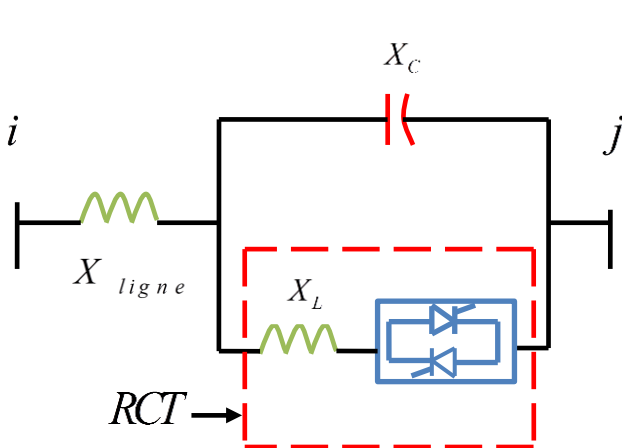


Figure II.14 : Insertion d’un TCSC dans la ligne

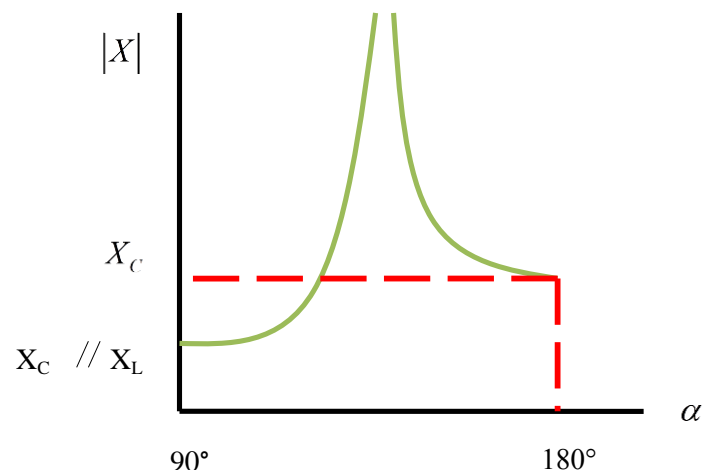


Figure II.15: Impédance du TCSC en fonction de l’angle

A la réactance variable tel qu'un RCT (Réactances Commandées par Thyristor) et relié à travers un condensateur en série. Quand l'angle d'amorçage de RCT est de 180 degrés, le réacteur devient non conducteur et le condensateur en série a 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.

Le TCSC a une réactance contrôlable dans les régions inductives et capacitives. Ce dernier cas a un grand intérêt. Les angles d'amorçage des thyristors peuvent changer de 90 degrés jusqu'à une valeur maximale dans une plage de fonctionnement inductif et de fonctionnement capacitif.

II.5.1.3 Les avantages de TCSC : [7]

- ✓ L'amortissement des oscillations de puissance.
- ✓ La stabilité de la tension.
- ✓ L'équilibrage des flux de charge dans les réseaux de transmission.
- ✓ Une grande plage de variation de l'impédance équivalente capacitive et inductive.
- ✓ La réduction des problèmes dus aux phénomènes de résonance hypo-synchrone.

II.5.2 Static Synchronous Series Compensator (SSSC):

C'est un convertisseur à source de tension placée en série avec la ligne de transport d'énergie électrique à travers un transformateur. Ce type de compensateur est le dispositif le plus important de cette famille. Il est constitué d'un onduleur triphasé couplé en série avec la ligne [18]. La Figure II.16 montre le branchement d'un SSSC sur la ligne de transport.

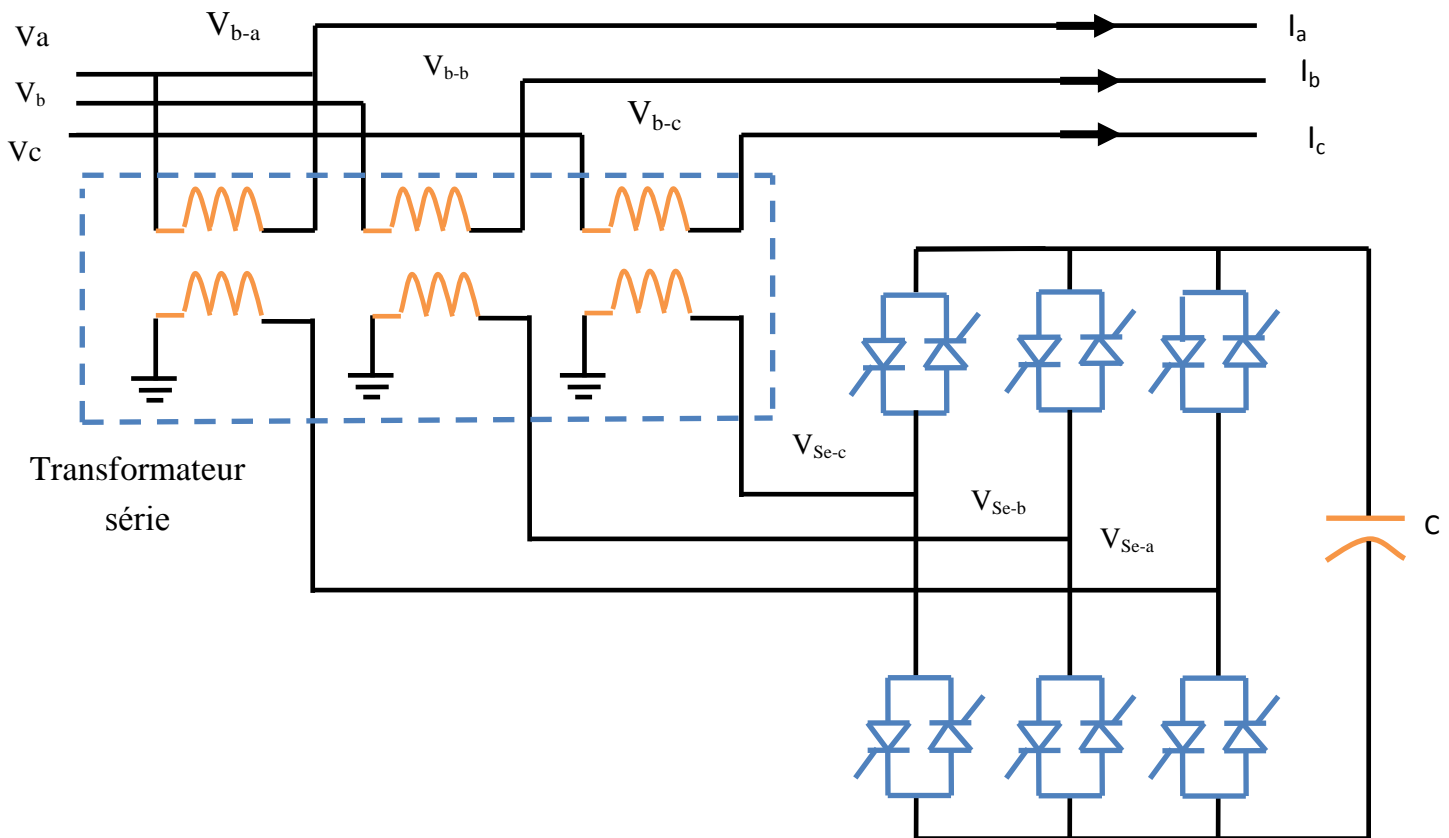


Figure II.16: Schéma de base du SSSC

La caractéristique statique d'un SSSC est donnée sur la Figure II.17.

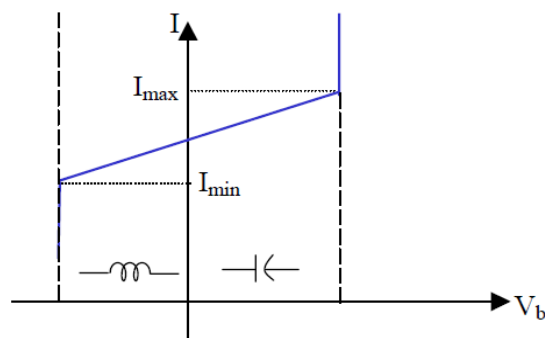


Figure II.17: Caractéristique statique du SSSC

Si l'on utilise un système de stockage d'énergie, le SSSC peut à ce moment-là échanger de la puissance active avec la ligne électrique. Ceci peut contribuer à améliorer la stabilité du réseau. Dans ce cas la tension V_{bn} n'est pas obligatoirement en quadrature avec le courant de ligne.

II.6 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté une introduction d'une manière générale sur les techniques de compensation conventionnelles (série et shunt), appliqués aux contrôles de l'écoulement de puissance des systèmes électriques : contrôle de la chute de tension par la compensation de l'énergie réactive et le contrôle du flux de puissance active et réactive en utilisant les compensateurs séries.

Ce chapitre présente aussi une vue globale sur les nouveaux dispositifs de contrôle et de commande des systèmes énergétiques FACTS. Ainsi que La modélisation du TCSC et SSSC , SVC et TCPAR et STATCOM, UPFC. Aussi le principe de fonctionnement et le rôle de ces derniers.[8]

Aujourd'hui cette technologie "FACTS" occupe une place privilégiée pour la gestion de systèmes énergétiques vis-à-vis ces atouts qu'elle offre tout en augmentant la capacité de transport, renforcement de stabilité de tension et le maintien d'une qualité meilleure de l'énergie.[20]

Nous avons choisi d'étudier le TCSC (Thyristor controlled Serie Capacitor) comme dispositifs FACTS pour contrôler et améliorer le transit dans un réseau électrique. Une étude profonde concernant le fonctionnement, et les principaux éléments constituant le dispositif TCSC est fait dans ce chapitre.

Chapitre III

Modélisation des dispositifs FACTS

III.1 Introduction :

Après avoir nous avons une présentation générale du concept « FACTS ». Une classification des différents types est proposée et les principaux dispositifs de chaque famille sont décrits, et présente aussi les différentes structures de FACTS (shunt, hybride et série).[21]

Pour pouvoir observer l'impact de de dispositif FACTS (TCSC) dans un réseau électrique, il est nécessaire de le représenté par de modèle mathématique approprié. Le modèle mathématique des convertisseurs de tension pour les différentes connexions dans un réseau électriques, série ou parallèle..[1]

Nous présentons la modélisation générale des deux dispositifs FACTS tels que le compensateur SVC et le compensateur TCSC.

III.2 Modélisation des dispositifs FACTS :

La modélisation des FACTS consiste à représenter les dispositifs sous certaines hypothèses et dans un domaine de fréquence choisi. Les modèles développés sont ensuite intégrés dans des programmes de calcul afin de pouvoir simuler leurs effets dans l'ensemble du système. Différentes façons de modéliser les dispositifs FACTS ont été développées pour l'étude des régimes stationnaires. Elles se différencient principalement par la méthode utilisée pour intégrer les FACTS dans le calcul du Load Flow. Les trois modélisations rencontrées le plus souvent dans la littérature sont basées respectivement sur l'injection de puissance équivalente, la création d'un nœud fictif ou encore la modification de la matrice d'admittance. Ces trois techniques sont présentées aux paragraphes suivants.[21]

III.2.1 Injection de puissance aux extrémités de la ligne.

Une des méthodes les plus répandues consiste à représenter les dispositifs FACTS sous forme d'injections de puissances aux nœuds telles que représentées à la figure III.1 .[22]

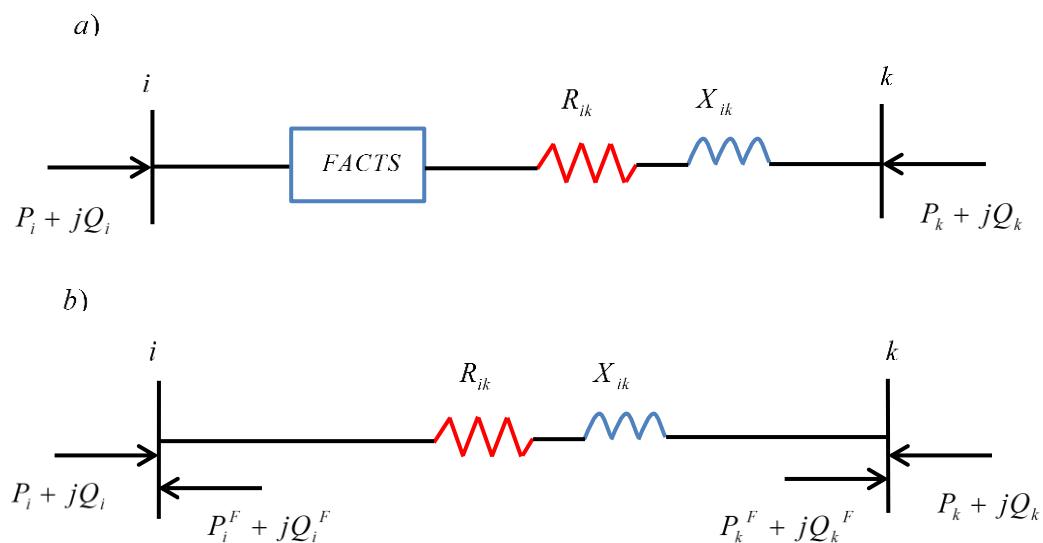


Figure III.1 : Modélisation par injection de puissances : a) ligne avec FACTS, b) ligne avec injections équivalentes.

Le principe consiste à remplacer l'effet dû au dispositif FACTS sur les transits de puissances dans la ligne (Figure III.1.a), par des injections de puissances aux deux extrémités (fig. III.1.b). [22] Celles-ci sont calculées de manière à ce que l'effet produit soit équivalent à

celui du dispositif en question. Les injections de puissances active et réactive au nœud i sont données par :

$$P_i^F = P_{ik} - P_{ik}^F \quad (III.1)$$

$$Q_i^F = Q_{ik} - Q_{ik}^F \quad (III.2)$$

Avec :

- P_i^F , Q_i^F : injections équivalentes de puissance active et réactive au nœud i .
- P_{ik} , Q_{ik} : transit de puissance active et réactive sans dispositif FACTS.
- P_{ik}^F , Q_{ik}^F : transit de puissance active et réactive avec le FACTS dans la ligne.

Deux relations similaires sont obtenues pour le nœud k . Ces quatre injections équivalentes, ainsi que le modèle standard de la ligne, sont utilisées dans les équations du load flow. Elles sont traitées comme des charges ou des générations aux nœuds i et k . Les injections de puissances actives aux nœuds PV et PQ s'écrivent :

$$P_i + P_i^F = V_i \sum_{k=1}^n V_k [G_{ik} \cos(\theta_i - \theta_k) + B_{ik} \sin(\theta_i - \theta_k)] \quad (III.3)$$

Et les puissances réactives injectées aux nœuds PQ valent :

$$Q_i + Q_i^F = -QV_i \sum_{k=1}^n V_k [G_{ik} \cos(\theta_i - \theta_k) + B_{ik} \sin(\theta_i - \theta_k)] \quad (III.4)$$

Avec:

- n : nombres de nœuds de système.

Les valeurs des injections P_i^F et Q_i^F sont calculées après chaque itération, mais ne sont pas utilisées dans le calcul de la matrice jacobienne.

Des variantes de cette modélisation ont été proposées. Dans [22], un modèle des injections de puissance décomposées est proposé, Les effets des FACTS sur les transits de puissances dans les lignes et ceux sur le contrôle des tension aux nœuds sont traités séparément.

III.2.2 Création d'un nœud fictif :

Une modélisation de FACTS basée sur la création d'un nœud fictif est présentée dans [20]. Le modèle d'un dispositif de type UPFC, permettant de contrôler les transits de puissances active et réactive, est illustré à la Figure III.2.[22]

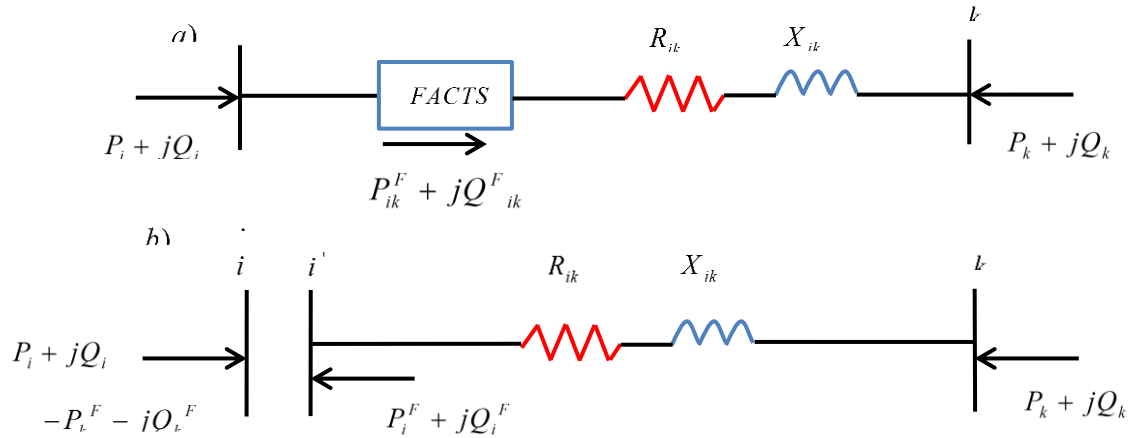


Figure III.2 : Modélisation par injection de puissances : a) ligne avec FACTS, b) représentation équivalente.

Les valeurs de consigne des dispositifs sont directement exprimées en terme de puissances circulant dans les lignes ou injectées aux nœud (Figure III.2.a). un nœud fictif i' dans lequel la ou les puissances contrôlées sont injectées, est temporairement créé. Pour conserver le bilan de puissance, la puissance injectée au nœud i' est soustraite au nœud i (Figure III.2.b). Le nouveau nœud est pris en compte dans le calcul de répartition des puissances en modifiant la structure de la matrice jacobienne. Les types des FACTS pouvant être modélisés selon technique, ainsi que la grandeurs contrôlées correspondantes, sont résumés dans le tableau suivant :[22]

Types de FACTS	Grandeurs controlees
SVC	Puissance réactive Q_i^F injectée au nœud
TCPAR	Puissance active P_{ik}^F transmise dans la ligne
TCVR	Puissance réactive Q_{ik}^F transmise dans la ligne
UPFC	Puissance active P_{ik}^F et réactive Q_{ik}^F transmise dans la ligne

Tableau III.1 : Types des FACTS modélisables par la création d'un nœud fictif.

Dans le contrôle des dispositifs FACTS est réalisé au moyen d'un calcul de répartition des puissances optimale. Les valeurs de consigne des FACTS sont calculées de façons à optimiser une fonction objectif.

III.2.3 Modification de la matrice d'admittance nodale :

Les FACTS sont envisagés comme des éléments venant modifier directement la matrice d'admittance nodale du réseau [21], [22]. Ils sont insérés dans la ligne selon la représentation de (la Figure III.3) Selon le type de FACTS modélisé, le dispositif peut être placé au milieu ou à une extrémité de la ligne.[18]

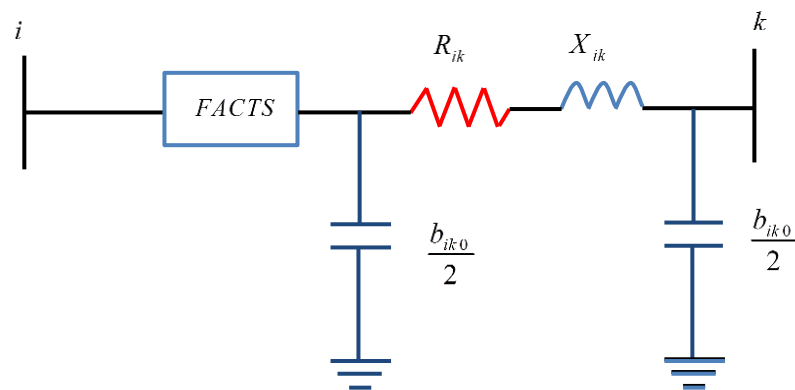


Figure III.3 : Intégration du dispositif FACTS dans une ligne.

Les paramètres d'une ligne équivalente sont déterminés et substitués à ceux de la ligne sans FACTS dans la matrice d'admittance nodale. Cette dernière est modifiée de la manière suivante :

$$Y_{\text{mod}} = \begin{bmatrix} Y'_{ii} & Y'_{ij} \\ Y'_{ji} & Y'_{jj} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} Y_{ii} & Y_{ij} \\ Y_{ji} & Y_{jj} \end{bmatrix}}_{\text{Ligne}} + \underbrace{\begin{bmatrix} y_{ii}^F & y_{ij}^F \\ y_{ji}^F & y_{jj}^F \end{bmatrix}}_{\text{FACTS}} \quad (III.5)$$

III.3 Modèle de compensateur statique de puissance réactive SVC :

Le dispositif SVC est modélisé par une admittance shunt y_{SVC} variable (Figure III.4.a). Le SVC étant supposé sans pertes, l'admittance est donc purement imaginaire:

$$\underline{y}_{\text{SVC}} = j \cdot b_{\text{SVC}} \quad (III.6)$$

La susceptance b_{SVC} peut être de nature capacitive ou inductive afin de fournir, respectivement d'absorber, de la puissance réactive Q_{SVC} (Figure III.4.b), Les valeurs des SVC exprimées sous forme de puissance réactive B_{SVC} absorbée à la tension nominale U_{in} . La correspondance avec la susceptance b_{SVC} est donnée par la relation (III.7).

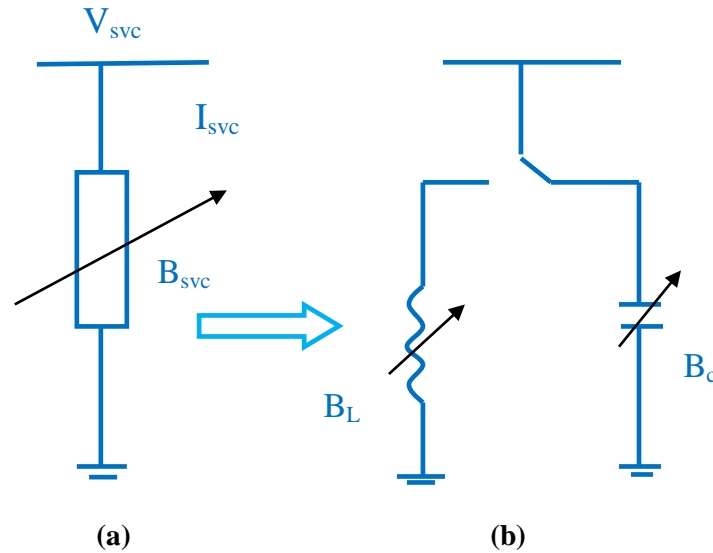


Figure III.4 : Modélisation du SVC, a) symbole, b) modèle

Les valeurs des SVC sont exprimées sous forme de puissance réactive Q_{SVC} absorbée à la tension nominale U_n . La correspondance avec la susceptance b_{SVC} est donnée par la relation [22]:

$$B_{SVC} = -U_n^2 b_{SVC} = -U_n^2 \cdot \frac{X_C [2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha] - \pi X_L}{\pi X_C X_L} \quad (III.7)$$

La puissance réactive réellement absorbée par le SVC est donnée par:

$$Q_{SVC} = -\frac{U^2}{U_n} B_{SVC} \quad (III.8)$$

Le signe « moins » indique que le SVC fournit de la puissance réactive au système lorsqu'il est capacitif alors qu'il en consomme lorsqu'il est inductif. La variation de la puissance réactive injectée en fonction de la tension.

III.3.1 SVC placé en un nœud du réseau :

Lorsqu'ils sont connectés aux nœuds du réseau, les SVC sont généralement placés aux endroits où se trouvent des charges importantes ou variant fortement. Ils peuvent également être positionnés à des nœuds où le générateur n'arrive pas à fournir ou absorber suffisamment de puissance réactive pour maintenir le niveau de tension désiré.[18]

Lorsqu'un SVC est présent au nœud i , seul l'élément Y_{ii} de la matrice d'admittance nodale est modifié, l'admittance du SVC lui étant additionnée :

$$\underline{Y}'_{ii} = \underline{Y}_{ii} + \underline{y}_{svc} \quad (III.9)$$

La Figure III.5 illustre le cas d'un SVC placé en un nœud i constituant une des extrémités d'une ligne.

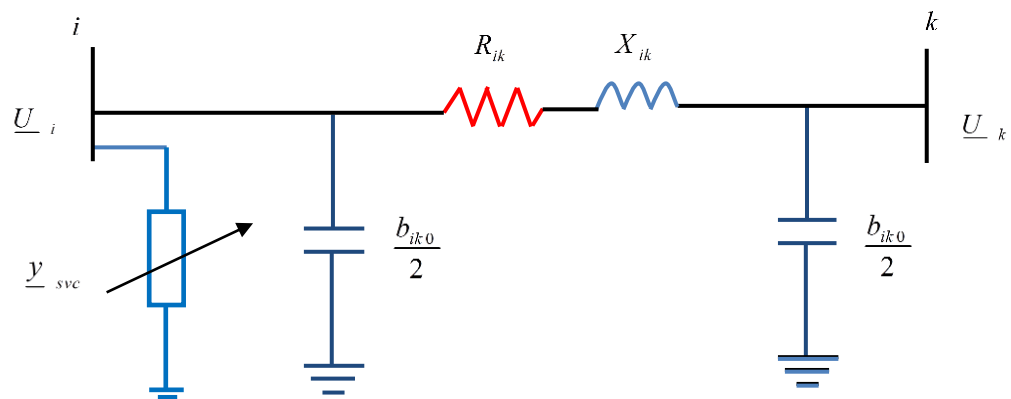


Figure III.5 : SVC placé dans un nœud.

Dans ce cas, la matrice d'admittance est modifiée de la manière suivant :

$$\underline{Y} = \begin{pmatrix} \underline{y}_{ik} + \frac{\underline{y}_{ik0}}{2} + \underline{y}_{svc} & -\underline{y}_{ik} \\ \underline{y}_{ik} & \underline{y}_{ik} + \frac{\underline{y}_{ik0}}{2} \end{pmatrix} \quad (III.10)$$

III.4 Dispositifs de compensation série :

Les dispositifs de compensation série modélisés sont des compensateurs série à thyristors (TCSC, SSSC). Ils modifient l'impédance apparente de la ligne en insérant des éléments réactifs en série avec cette dernier.[21]

Le TCSC possède des performances supérieures à celles des dispositifs mentionnés ci-dessus. Toutefois, sa représentation ne semble pas possible avec la méthodologie adopté pour modéliser les dispositif FACTS. En effet, la compensation réalisée par cet élément se fait insérant une tension en série dans la ligne qui quadrature avec le courant y circulant. Il est donc nécessaire de connaître la valeur du courant pour pouvoir ajuster la phase de la tension à insérer. Ceci nécessite un processus itératif.

III.4.1 modèle du compensateur série à thyristors :

Les compensateurs série à thyristors utilisés peuvent être de nature capacitive ou inductive. Ils s'apparentent donc à des dispositifs de type TCSC. Ils sont modélisés par des impédances variables insérées en série dans la ligne Figure III.6.a. Les dispositifs étant considérés comme idéaux, seule la partie réactive de l'impédance est prise en compte. Le modèle est formé de deux branches en parallèles formées respectivement d'une inductance et d'une capacité variable. Pour éviter les phénomènes de résonance, les branches sont enclenchées de manière exclusive à l'aide d'un interrupteur figure III.6.b.[22]

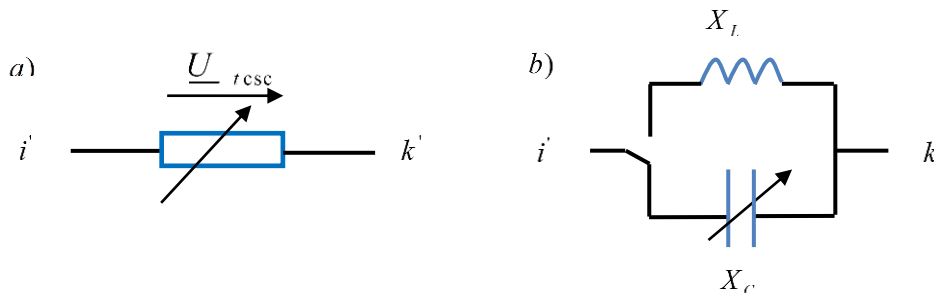


Figure III.6 : Modélisation du TCSC : a) modèle général, b) modèle détaillé.

Les valeurs des TCSC sont exprimées sous la forme du degré de compensation de la ligne k_{TCSC} dans laquelle le dispositif est placé. La valeur de la réactance du TCSC est donnée par :

$$x_{TCSC} = k_{TCSC} x_{ligne} \quad (III.11)$$

La tension insérée par le compensateur est donnée par:

$$\overline{U}_{TCSC} = j x_{TCSC} \overline{I} \quad (III.12)$$

Et la puissance réactive :

$$Q_{TCSC} = \frac{U_{TCSC}^2}{x_{TCSC}} \quad (III.13)$$

III.4.2 Intégration du TCSC dans le système :

Lorsqu'un TCSC est placé dans une ligne reliant les nœuds « i » et « k », il est directement intégré dans le schéma en π de la ligne selon le modèle de la figure III.7.[21]

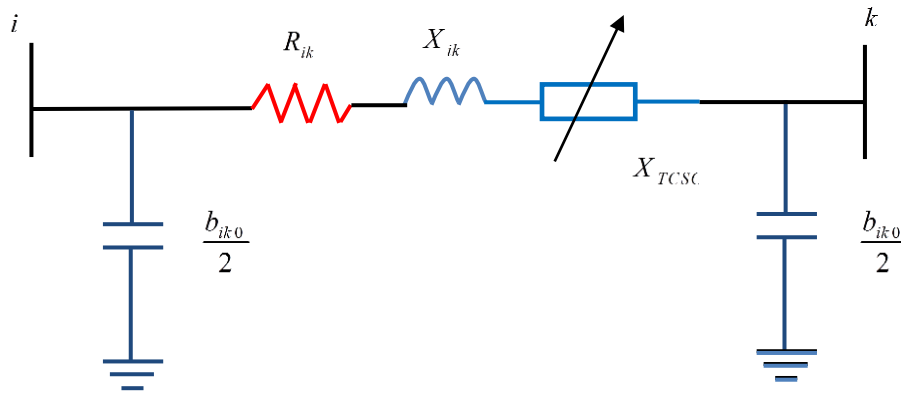


Figure III.7 : TCSC inséré dans la ligne.

La matrice d'admittance de la ligne est modifiée de la manière suivante :

$$\mathbf{Y} = \begin{pmatrix} \overline{\mathbf{Y}}'_{ik} + \frac{\overline{\mathbf{Y}}_{ik0}}{2} & -\overline{\mathbf{Y}}'_{ik} \\ -\overline{\mathbf{Y}}'_{ki} & \overline{\mathbf{Y}}'_{ik} + \frac{\overline{\mathbf{Y}}_{ik0}}{2} \end{pmatrix} \quad (III.14)$$

Pour :

$$\overline{\mathbf{Y}}'_{ik} = \frac{1}{r_{ik} + j(x_{ik} + x_{TCSC})} \quad (III.15)$$

III.4.3 Influence du TCSC :

La Figure (III.8) montre l'influence du TCSC sur la caractéristique PV (la courbe d'effondrement). Comme déjà mentionné précédemment ; le TCSC est un équipement FACTS série qui contrôle la puissance transmise dans une ligne par la variation de la réactance de cette dernière. Dans notre application, la variation de la réactance est effectuée avec un pourcentage de $\pm 50\%$. Les caractéristiques PV obtenues, pour différentes valeurs de X , montrent que la marge de stabilité de la tension augmente quand la réactance de la ligne diminue. Ce résultat apparaît très logique, car l'augmentation de la réactance de la ligne (cas des lignes longues) augmente les pertes réactives, ce qui provoque un déséquilibre entre la demande et la production de l'énergie réactive. Ainsi, le réseau ne peut pas satisfaire la demande de charge. Cette situation favorise un effondrement de tension pour des niveaux de charge relativement faibles. D'autre part, la compensation de la ligne par le TCSC diminue la réactance apparente de la ligne, ce qui fait réduire les pertes réactives et augmenter ainsi la marge de stabilité de tension.[9]

Remarquons que dans la courbe en pointillée, la tension critique reste constante pour les trois cas de test, malgré l'intervention du TCSC. Ce résultat confirme l'utilisation spécifique du TCSC comme un contrôleur efficace d'écoulement de puissance et non de contrôle de la tension.

Dans la pratique, l'augmentation de la réactance de la ligne peut se traduire par un incident d'ouverture d'une ligne ou lorsque la production est très éloignée de la consommation. Dans ces deux cas, on a vu qu'une compensation série est pratiquement bénéfique.[9]

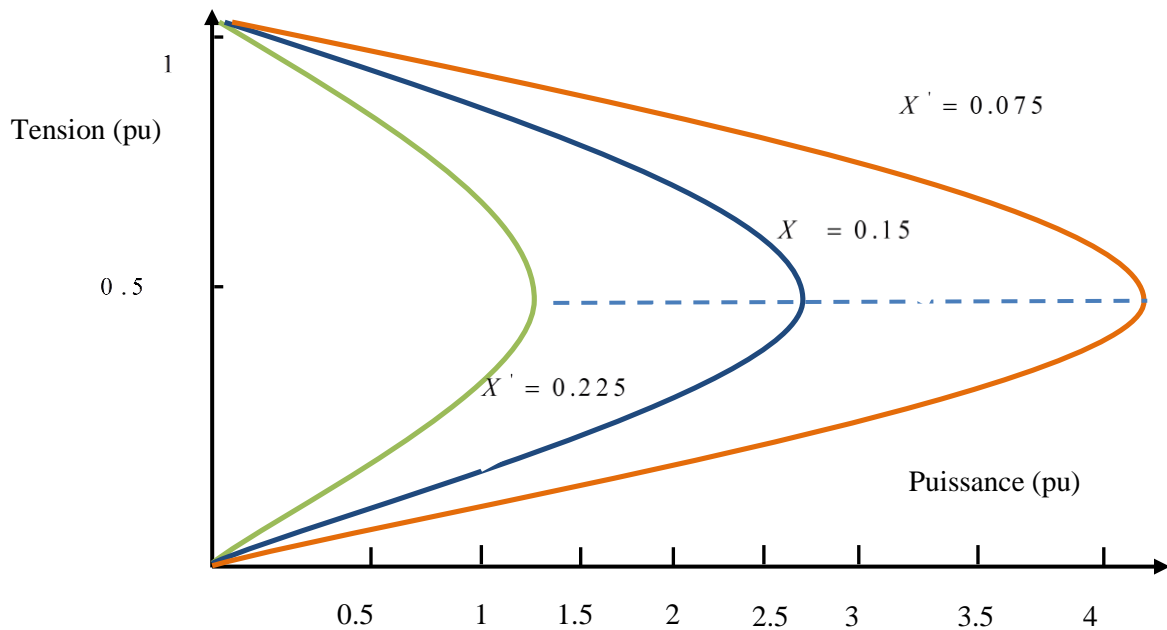


Figure III.8 : Influence de TCSC sur la caractéristique PV.

III.5 Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre, une modélisation deux types de dispositif FACTS, (SVC et TCSC) avec l'installation, d'un seul dispositif FACTS par nœud ou par ligne. Face à ce problème d'optimisation de nature combinatoire, et de grande complexité.[21]

Parmi tous ces nombreux types de compensateurs, on a choisi le compensateur série le TCSC qui peut réduire la réactance de la ligne et contrôler la puissance transitée. Ceci fera l'objet du prochain chapitre.

Chapitre IV

Simulations et Résultats

IV.1 Introduction :

Après avoir présenté dans le deuxième chapitre le principe de fonctionnement et la structure de base du TCSC, ainsi que le modèle mathématique qui traduit son comportement. Dans ce dernier chapitre, nous présentons l'impact du TCSC pour le contrôle de puissance active.

Pour cela, Plusieurs réseaux tests sont considérés pour valider l'efficacité du TCSC pour le contrôle de la puissance active, le modèle basé sur la modification de l'admittance série de la ligne. Dont le degré de compensation est obtenu par un contrôleur PI, l'outil de calcul utilisé pour l'écoulement de puissance est basé sur la méthode de Gauss.

IV.2 Simulation et analyse les résultats :

Dans Cette partie nous avons présenté les résultats de simulation lors l'intégration du compensateur TCSC dans les réseaux tests, le modèle , le modèle basé sur la modification de l'admittance série.

$$\checkmark \quad X'_l = X_l * (1 - K_{TCSC}) \text{ avec } K_{TCSC} \text{ le degré de compensation.}$$

Dans cette application, nous avons modélisé le compensateur TCSC par le degré de compensation, Ce dernier est fournie par le contrôleur PI et intégrée dans le programme d'écoulement de puissance selon la variation de la tension et la charge par rapport à sa référence.

IV.3 Simulation 1 :

contrôle de transit d'un réseau avec deux jeux de barres :

Au départ, un simple réseau électrique de 2 jeux de barres est utilisé juste pour illustrer l'effet du dispositif de compensateur TCSC. Le schéma unifilaire du réseau test « 2-Jdb» est montré par la figure IV.1. Les données des jeux de barres ainsi que les paramètres du réseau sont indiqués dans le tableau (IV.1).

Z12	0.02+j*0.04
Y12	10 -j*30
S2	2.80 + j*0.60
V1	1∠0

Tableau IV.1 : Paramètres du réseau a 2 jeux de barres (en pu)

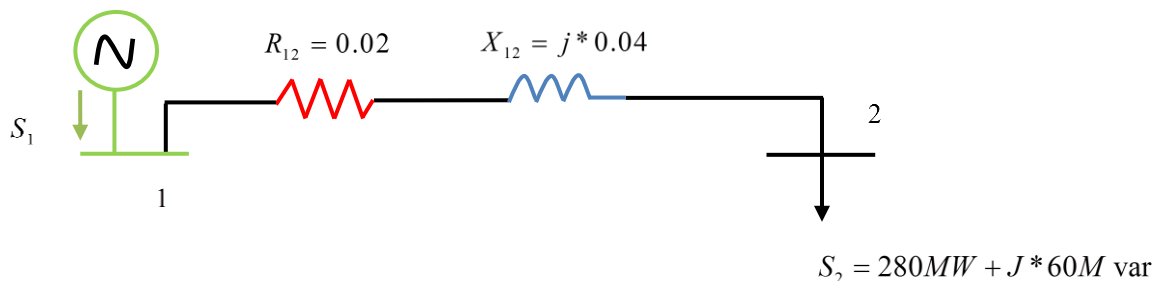


Figure IV.1 : Réseau électrique à 2 jeux de barres.

Les résultats de l'écoulement de puissance obtenues par la méthode de GAUSS sont récapitulés dans le tableau suivant :

V_2	0.9 pu
I_{12}	(3- 1i) pu
I_{21}	(-3+ 1i) pu
S_{12}	(3+ 1i) pu
S_{21}	(-2.80 - 0.60i) pu
DS_{12}	(0.2+ 0.4) pu

Tableau IV.2 : Résultat d'écoulement de puissance du réseau a 2 jeux de barres.

Avec :

- ✓ S_{ij} : puissance transitée dans la ligne i-j.
- ✓ DS_{ij} : perte de puissance dans la ligne i-j.
- ✓ I_{ij} : courant transité dans la ligne i-j.

IV.3.1 Simulation lors d'une variation brusque de la tension:

Afin de montrer l'efficacité du TCSC pour le contrôle de transit, le TCSC est placé dans la ligne 1-2 afin d'assurer un transit désiré même en présence des perturbation et fluctuation de la tension .

Time(sec)	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.3	1.7
Amplitude	1.1	1.1	1.06	1.166	1.1	1.1	1.056	1.056	1.1

Tableau IV3 : Variation brusque de la tension V1.

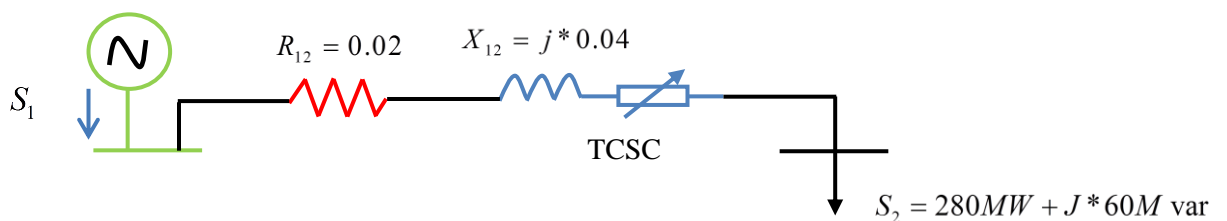


Figure IV.2 : Réseau électrique à 2 jeux de barres avec TCSC.

Les résultats de simulation sont donnés par les courbes suivantes :

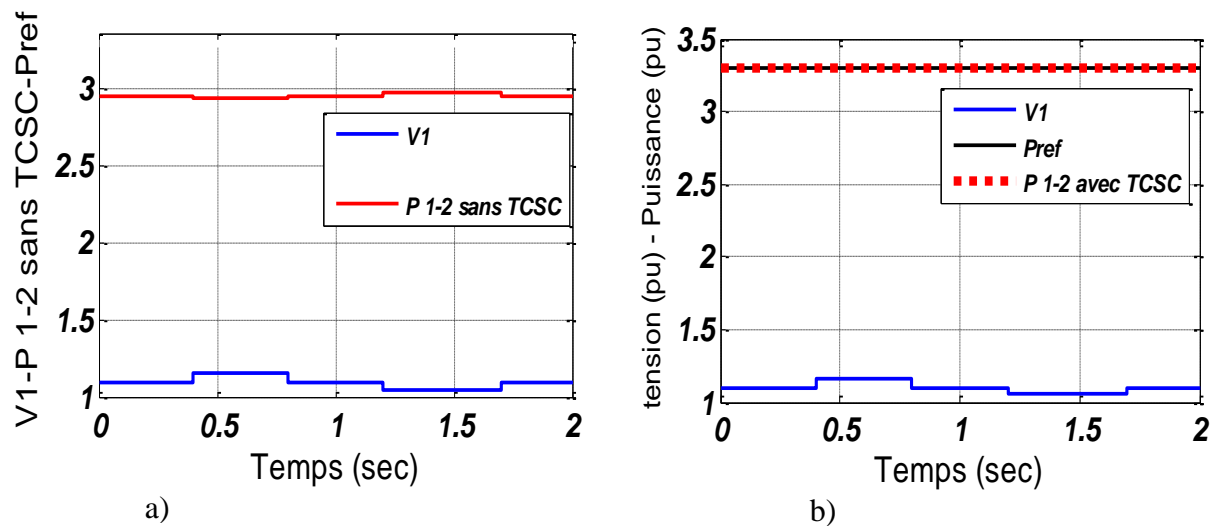


Figure IV.3 : a) Evolution de la puissance transmise P_{1-2} sans TCSC , b) Evolution de la puissance transmise P_{1-2} avec TCSC.

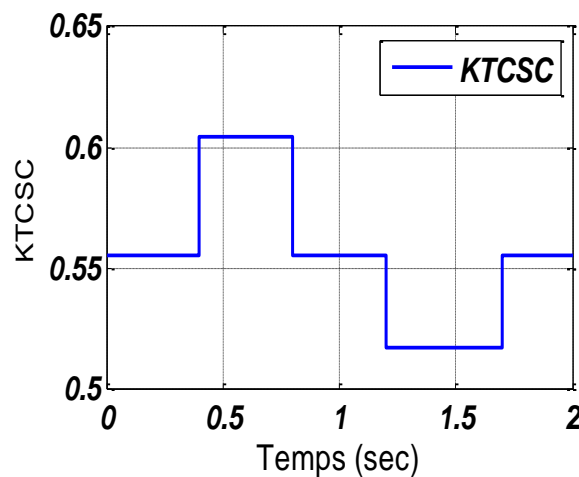


Figure IV.4 : Evolution du degré de compensation K_{TCSC} .

Les résultats obtenus ont montré un contrôle parfait de transit de la puissance active lors l'installation de TCSC la Figure IV.3.b.

On montre que lorsque la puissance est inférieure à celle de référence, Le compensateur TCSC diminué la réactance de la ligne donc le transit augmente. Et lorsque la puissance est supérieure de celle référence , Le TCSC augmente la réactance de la ligne donc le transit est diminué.

➤ Donc le contrôleur TCSC est très efficace pour le contrôle de la puissance.

IV.3.2 : Contrôle de transit lors de variation brusque de la consommation et la tension :

De la même manière précédente, mais nous avons considéré une variation de la tension et de la consommation présenté dans le tableau suivant :

Time(sec)	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2
P (pu)	2.8	2.8	2.85	2.8	2.8	2.75	2.8

Tableau IV.4 : Variation brusque de la consommation.

Time(sec)	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.3	1.7
Amplitude	1.1	1.1	1.06	1.166	1.1	1.1	1.056	1.056	1.1

Tableau IV.5 : Variation brusque de la tension V_1 .

Les résultats de simulation sont donnés par les figures suivantes :

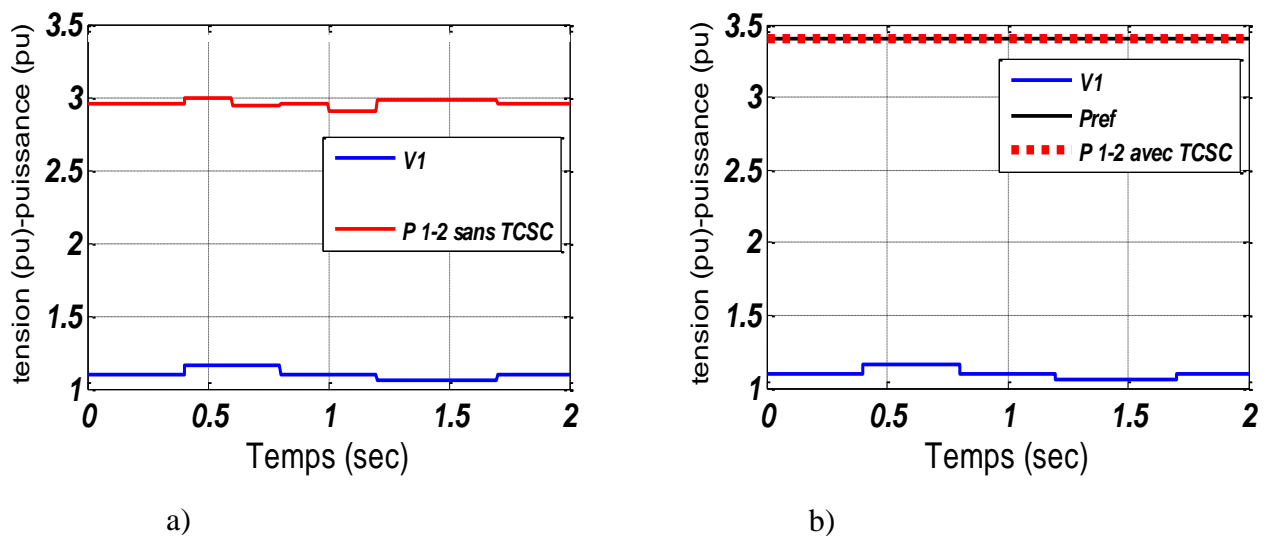


Figure IV.5 : a) Evolution de la puissance transmise P_{1-2} sans TCSC , b) Evolution de la puissance transmise P_{1-2} avec TCSC

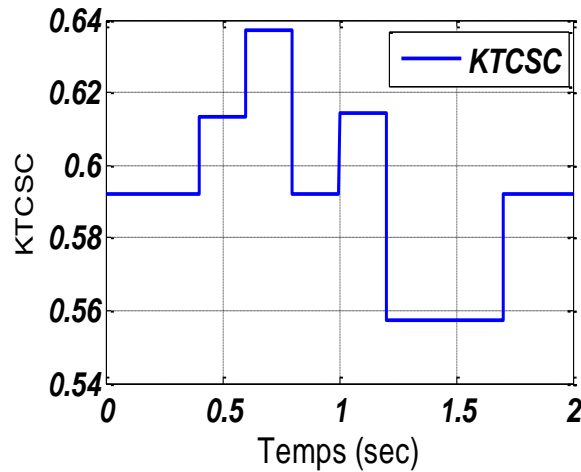


Figure IV.6 : Evolution du degré de compensation K_{TCS} .

La figure (IV.5.b) montre que le transit de la puissance active bien contrôlé par le TCSC, nous pouvons dire que le TCSC a présenté un grand effet pour le contrôle de transit.

IV.4 Simulation 3 : contrôle de transit d'un réseau avec trois jeux de barres :

Le schéma unifilaire du réseau test « 3-Jdb » est montré dans la figure IV.7. Les paramètres de ce réseau sont indiqués dans le tableau IV.6.

V_1	$1\angle 0$
Z_{12}	$1/30*j$
Z_{13}	$j*0.0125$
Z_{23}	$j*0.05$
Y_{12}	$-j*30$
Y_{13}	$-j*80$
Y_{23}	$-j*20$
S_2	$(4.00 + j*3.20) pu$
S_3	$(3 + j*2.7) pu$

Tableau IV.6 : Paramètres du réseau a 3 jeux de barres.

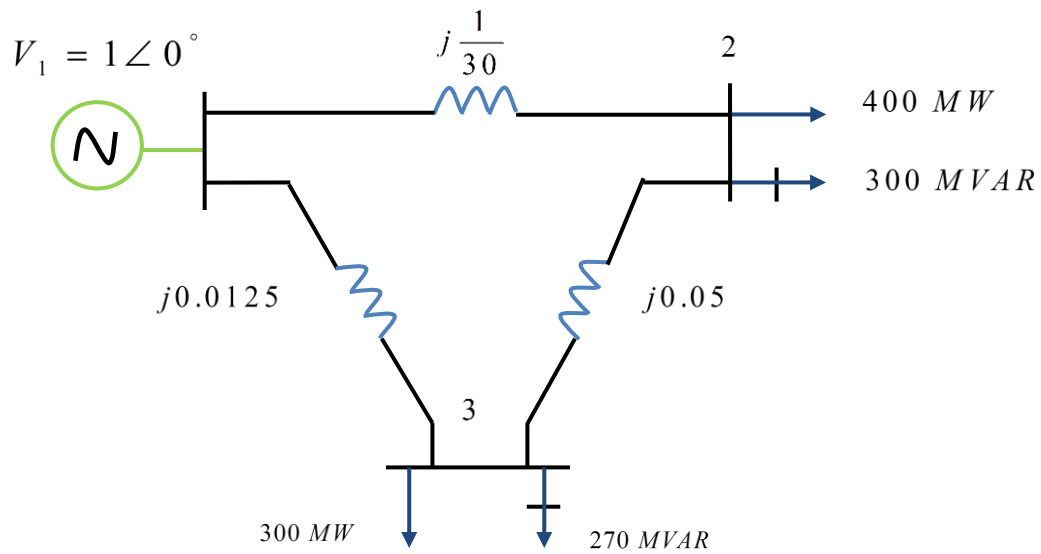


Figure IV.7 : Réseau électrique à 3 jeu de barres.

Deux simulation sont considérées : sans TCSC et avec TCSC.

Les résultats de l'écoulement de puissance obtenus par la méthode de GAUSS sont récapitulés dans le tableau suivant :

V_2	0.9 pu
V_3	0.95 pu
I_{12}	$3 - 3i$ pu
I_{13}	$4 - 3i$ pu
I_{23}	$-1 + 1i$ pu
S_{12}	$(3 + 3i)$ pu
S_{21}	$(3 + 2.4)$ pu
S_{13}	$(4 + 4i)$ pu
S_{31}	$(4 - 3.6i)$ pu
S_{23}	$(-1 - 0.8i)$ pu
S_{32}	$(1 + 0.90i)$ pu
DS_{12}	$0.60i$ pu
DS_{13}	$0.40i$ pu
DS_{12}	$0.10i$ pu

Tableau IV.7: Résultat d'écoulement de puissance du réseau a 3 jeux de barres.

VI.4.1: Contrôle de transit d'un réseau trois jeu de barres lors d'une variation brusque de la tension:

Dans cette simulation le TCSC est installé dans la ligne 2-3. La Figure IV.8 montre le réseau test a 3-Jdb. Le tableau IV.8 montre la variation brusque de la tension :

Time(sec)	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2
Amplitude	1.133	1.133	1.045	1.133	1.133	1.265	1.133

Tableau IV.8: Variation brusque de la tension V_1 .

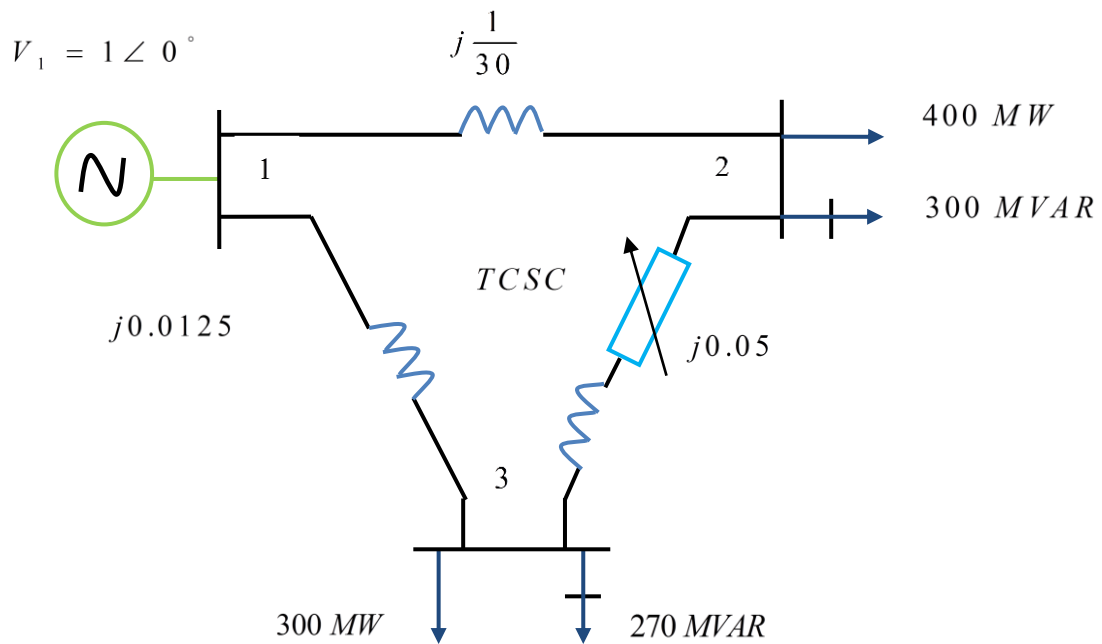


Figure IV.8 : Réseau électrique à 3 jeux de barres avec TCSC.

Les résultats de simulation sont donnés par les figures suivantes :

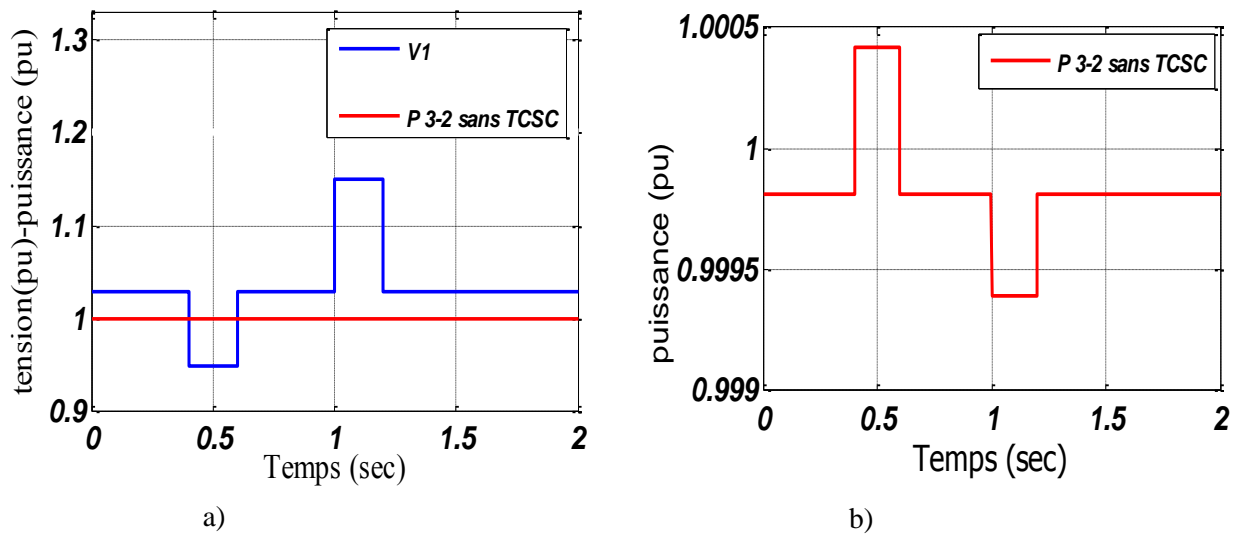


Figure IV.9 : a) Evolution de la puissance transmise P 2-3 sans TCSC , b) Zoom de la puissance transmise P 2-3 avec TCSC.

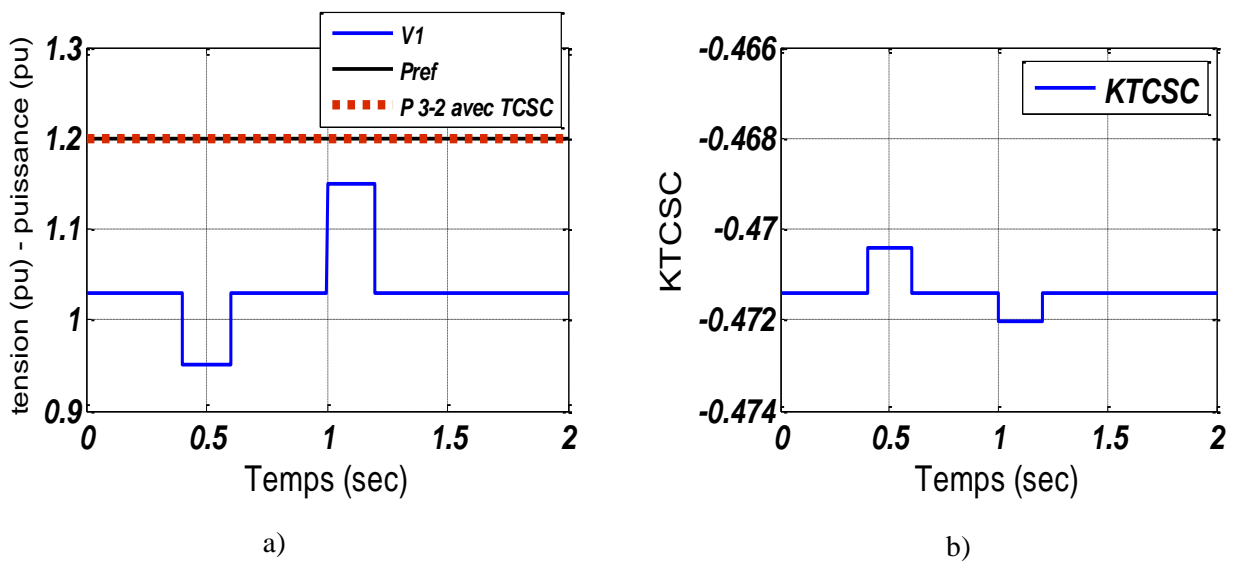


Figure IV.10 : a) Evolution de la puissance transmise P 2-3 avec TCSC , b) Evolution du degré de compensation K_{TCSC} .

La figure IV.9a représente les résultats de simulation sans compensation, La figure IV.9b présente un zoom de la puissance transmise de la ligne 3-2, on remarque une variation brusque de cette dernière due à la variation de la tension V_1 .

La figure IV.10.a montré que le transit de la puissance active bien contrôlé en présence du TCSC , nous pouvons dire que le TCSC a présenté une grand effet pour le contrôle du transit.

De la même manière précédente, mais nous avons placé le TCSC dans la ligne 1-2 pour contrôler le transit P 1-2 (figure IV.11).

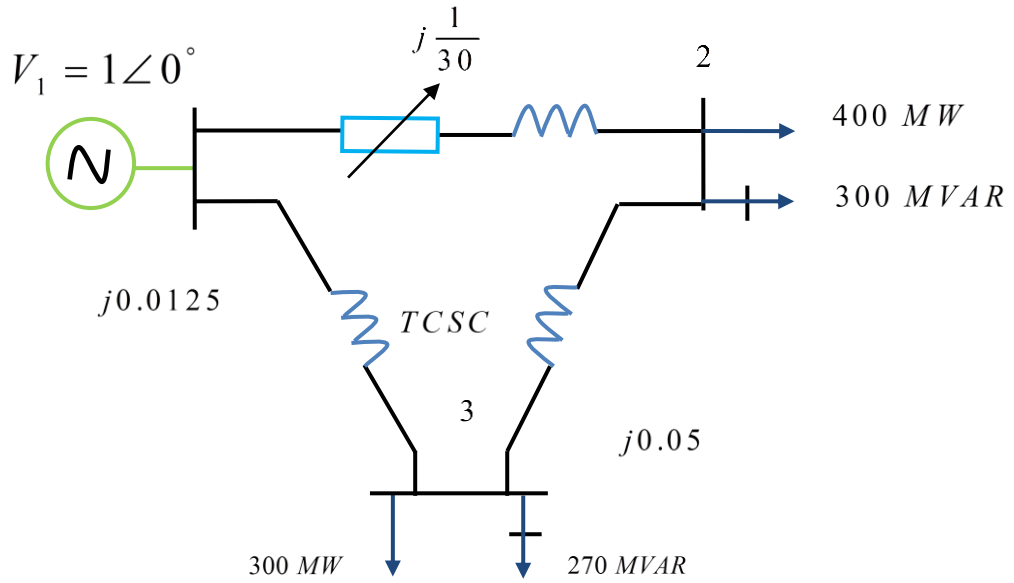


Figure IV.11 : Réseau électrique a 3 jeux de barres avec TCSC.

Les résultats de simulation est donner par les courbes suivants :

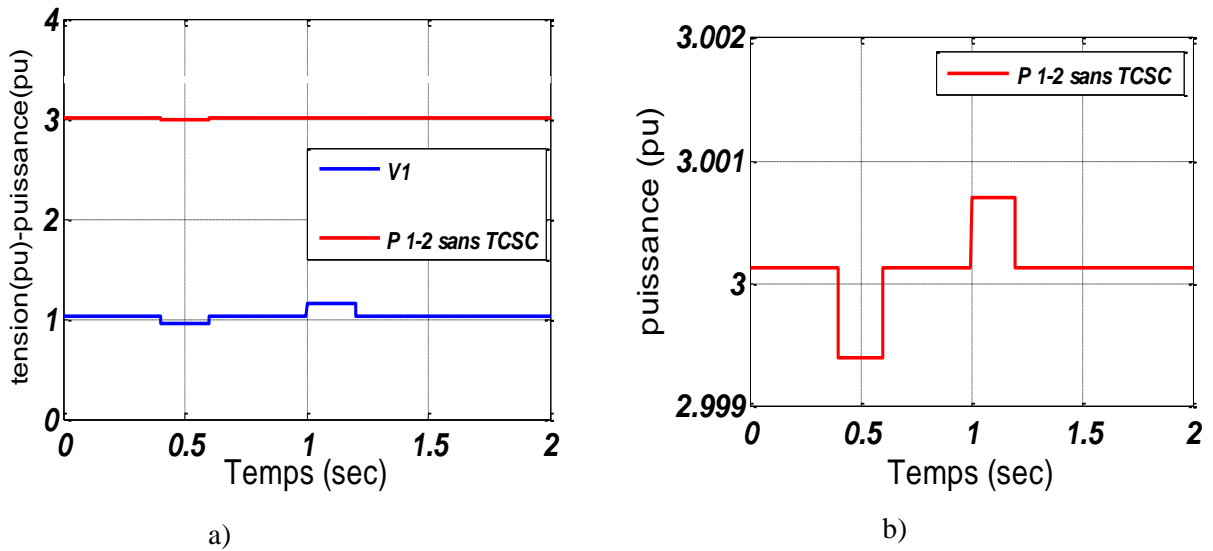


Figure IV.12 : a) Evolution de la puissance transitée P 1-2 sans TCSC , b) zoom de la puissance transitée de la ligne 1-2.

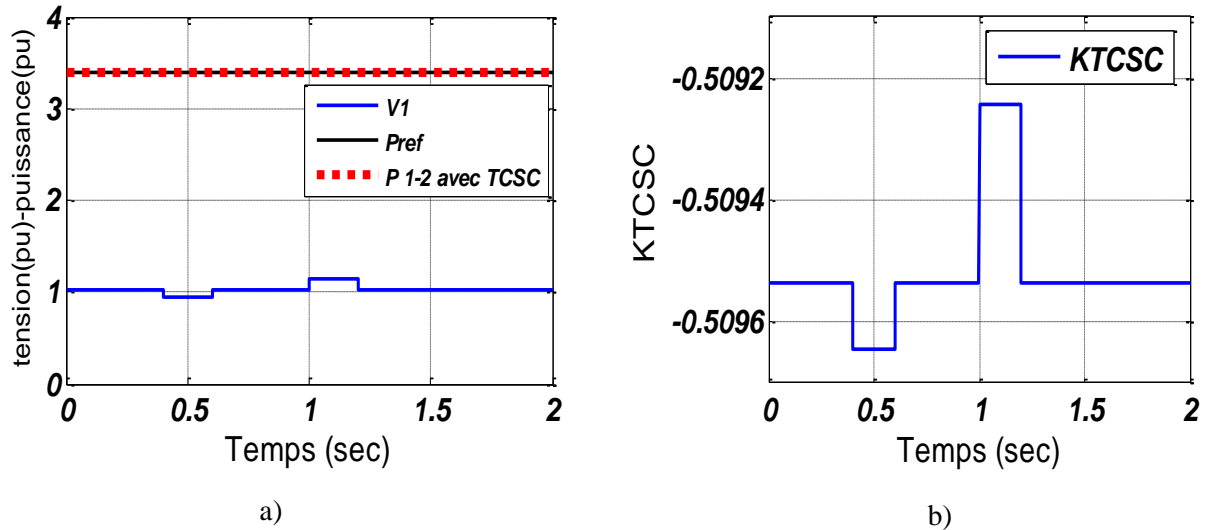


Figure IV.13 : a) Evolution de la puissance transmise P_{1-2} avec TCSC , b) Evolution du degré de compensation K_{TCSC} .

La figure (IV.12.a) représente les résultats de simulation sans compensation, La figure (IV.12.b) présente un zoom de la puissance transmise de la ligne 1-2, on remarque une variation brusque de cette dernière due à la variation de la tension V_1 .

On montre que lorsque la puissance est inférieure à celle de référence, Le compensateur TCSC diminue la réactance de la ligne donc le transit augmente. Et lorsque la puissance est supérieure de celle référence , Le TCSC augmente la réactance de la ligne donc le transit est diminué.

➤ Donc le contrôleur TCSC est très efficace pour le contrôle de la puissance.

IV.5 Simulation 5 : contrôle de transit d'un réseau avec 5 jeux de barres :

Le schéma unifilaire du réseau test « 5-Jdb » illustré par la figure IV.14. Les données des jeux de barres ainsi que les paramètres du réseau sont mentionnés dans le tableau suivant :

Y_{12}	$-j*40$	S_2	$400MW + j*200M \text{ var}$
Y_{13}	$-j*20$	S_3	$300MW + j*270M \text{ var}$
Y_{24}	$-j*40$	S_{G4}	$300 MW + j*250 M \text{ var}$
Y_{34}	$-j*20$	S_{L4}	$300 MW + j*250 M \text{ var}$
Y_{35}	$-j*30$	V_1	$1\angle 0$
Y_{45}	$-j*30$	S_5	$350MW + j*300M \text{ var}$

Tableau IV.9 : Paramètres du réseau à 5 jeux de barres.

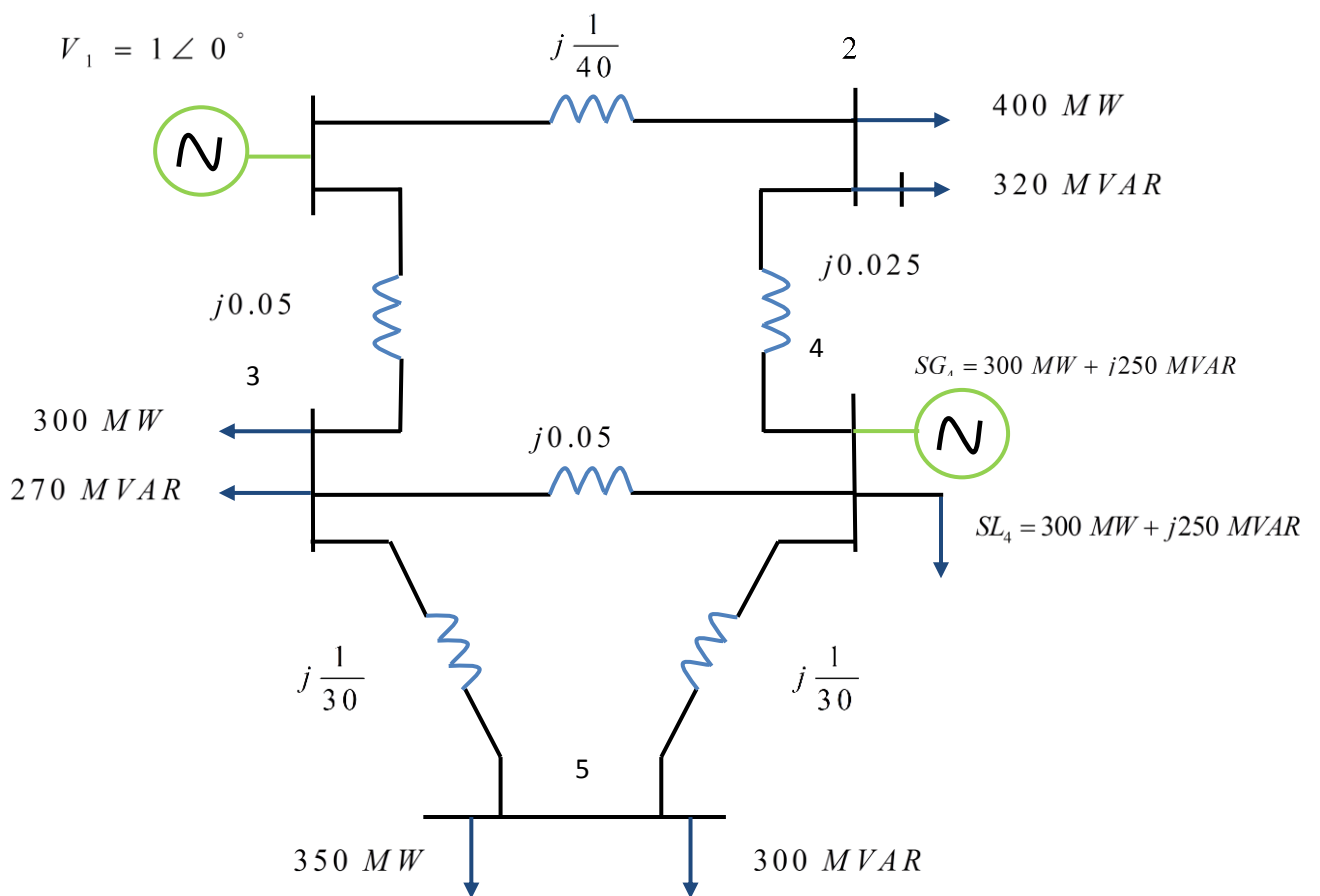


Figure IV.14 : Réseau électrique a 5 jeux de barres.

Deux simulation sont considérées : sans TCSC et avec TCSC.

Les résultats de l'écoulement de puissance obtenue par la méthode de GAUSS sont récapitulés dans le tableau suivant :

V ₂	0.9750	S ₂₁	-2 - 0.875
V ₃	0.9614	S ₁₃	0.8571 + 0.7714i
V ₄	1.000	S ₃₁	-0.8571 - 0.7049i
V ₅	0.95	S ₂₄	-2- 0.875
I ₁₂	2-1i	S ₄₂	2 + 1i
I ₂₁	-2+1i	S ₃₄	-0.8571 - 0.7049i
I ₁₃	0.8571 - 0.7714i	S ₄₃	0.8571 + 0.7714i
I ₃₁	-0.8571 + 0.7714i	S ₃₅	0.4611 + 0.3097i
I ₂₄	-2 + 1i	S ₅₃	-0.4611 - 0.2986i
I ₄₂	2 - 1i	S ₄₅	1.75 + 1.50i
I ₃₄	-0.8571 + 0.7714i	S ₅₄	-1.75 - 1.3229i
I ₄₃	0.8571 - 0.7714i	DS ₁₂	0.1250i
I ₃₅	0.4643 - 0.3429i	DS ₁₃	0.0665i
I ₅₃	-0.4643 + 0.3429i	DS ₂₄	0.1250i
I ₄₅	1.75 - 1.5i	DS ₃₄	0.0665i
I ₅₄	-1.75 + 1.5i	DS ₃₅	0.0111i
S ₁₂	2 + 1i	DS ₄₅	0.1771i

Tableau IV.10: Résultat d'écoulement de puissance du réseau a 5 jeux de barres en pu.

IV.5.1 Simulation 6 contrôle de transit de la puissance lors d'une variation brusque de la tension :

La figure IV.14 représenté un réseau de 5 jeux de barres en régime dynamique avec TCSC pour contrôle P₄₋₅ considère une variation brusque de la charge P₅ (tableau IV.10):

Time (sec)	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.3	1.7
Amplitude	3.5	3.5	4	4	4.2	4.2	3	3	3.1

Tableau IV.11 : Variation brusque de la consommation.

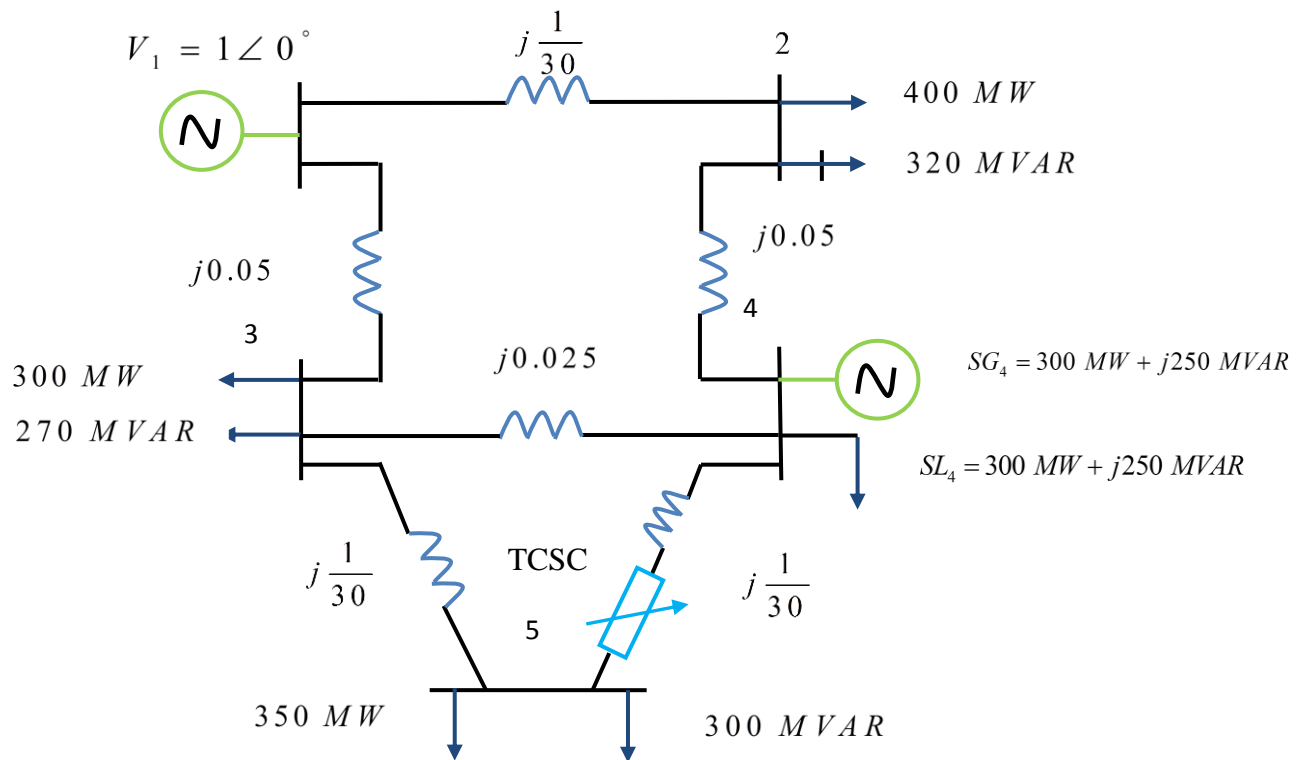


Figure IV.15 : Réseau électrique a 5 jeux de barres avec TCSC.

Les résultats de simulation sont donnés par les figures suivantes :

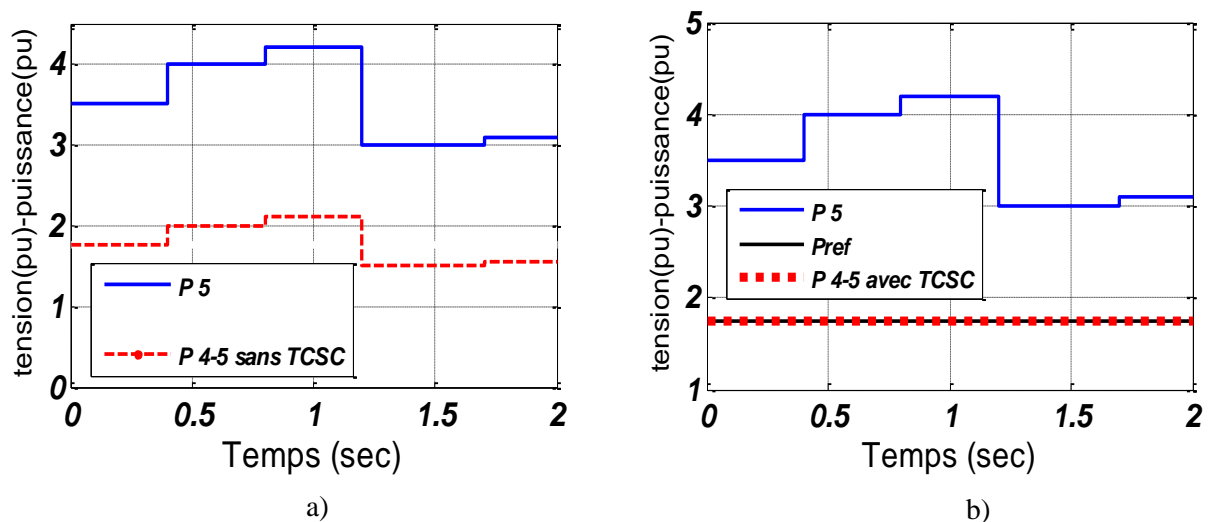


Figure IV.16 : a) Evolution la puissance transitée P_{4-5} sans TCSC , b) Evolution a puissance transitée P_{4-5} avec TCSC.

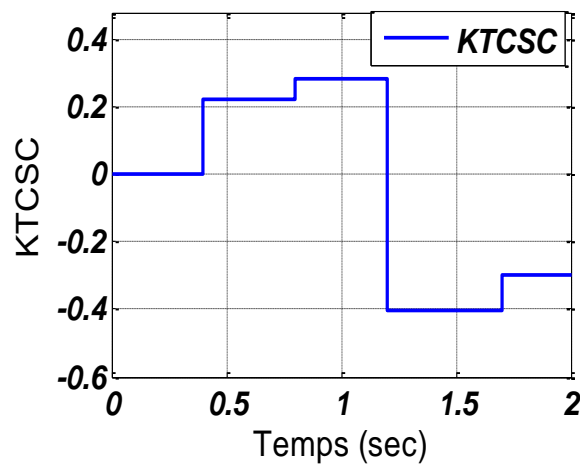


Figure IV.17: Evolution du degré de compensation K_{TCSC} .

La figure IV.16.a représente les résultats de simulation sans compensation, on remarque une variation brusque de cette dernière due à la variation de la consommation P_5 .

La figure IV.16.b montre que le transit de la puissance active bien contrôlé en présence du TCSC, nous pouvons dire que le TCSC a présenté un grand effet pour le contrôle du transit.

IV.5.2 Simulation 7 contrôle de transit d'un réseau 5 jdb lors du déclenchement d'une ligne :

Dans cette simulation on considère une variation brusque de la tension V_1 comme le tableau VI.11 et considère un déclenchement des deux lignes parallèles 2-4 à l'instant $t=1$ sec, On remarque une augmentation du transit P 1-2 voir la Figure IV.19.a.

Time (sec)	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.3	1.7
Amplitude	1.1	1.1	1.155	1.155	1.1	1.1	1.045	1.045	1.1

Tableau IV.12: Variation brusque de la tension V_1 .

Afin de montrer l'efficacité de la TCSC ainsi que le bon choix de l'emplacement de ce dernier, un TCSC est installé dans la ligne 1-2. La figure IV.18 montre l'installation du compensateur série TCSC dans le réseau test 5 jeu de barres.

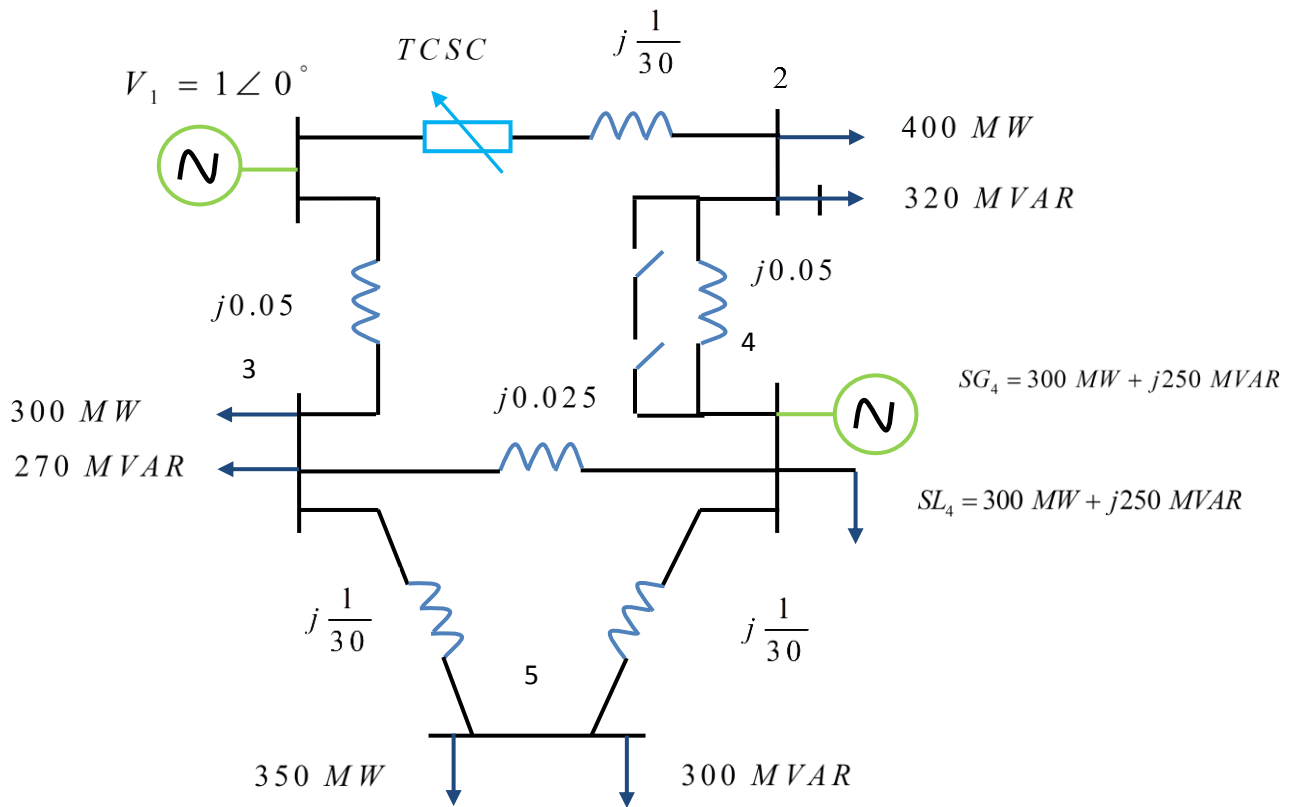


Figure IV.18 : Réseau électrique a 5 jeux de barres avec déclenchement de la ligne parallèle 2-4 .

Les résultats de simulation sont donnés dans les courbes suivantes :

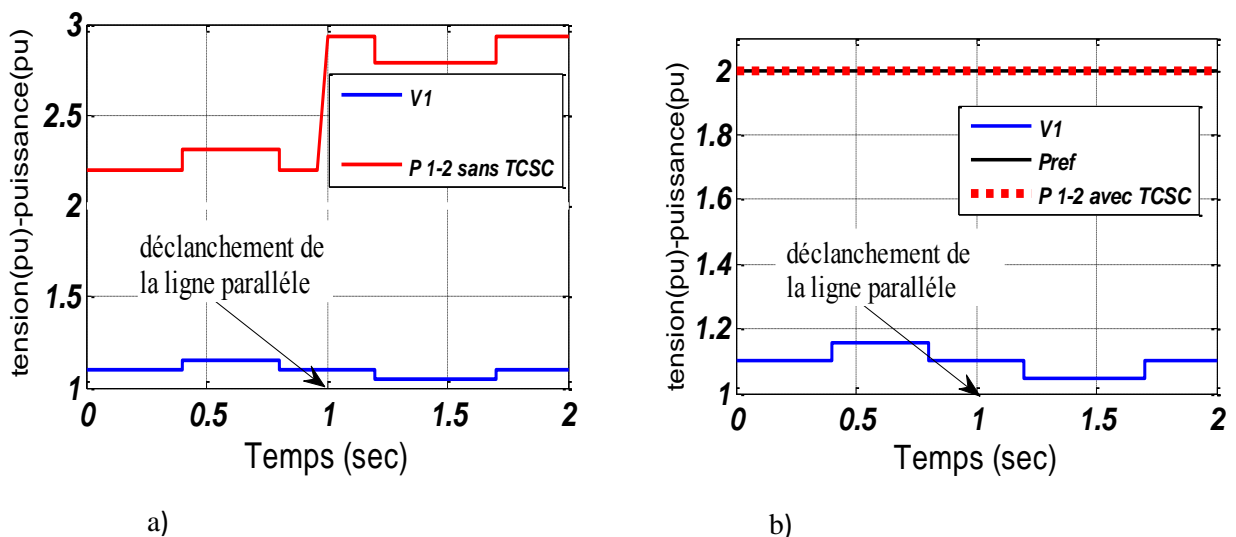


Figure IV.19 : a) Evolution de la puissance transitée P 1-2 sans TCSC , b) Evolution de la puissance transitée P 1-2 avec TCSC.

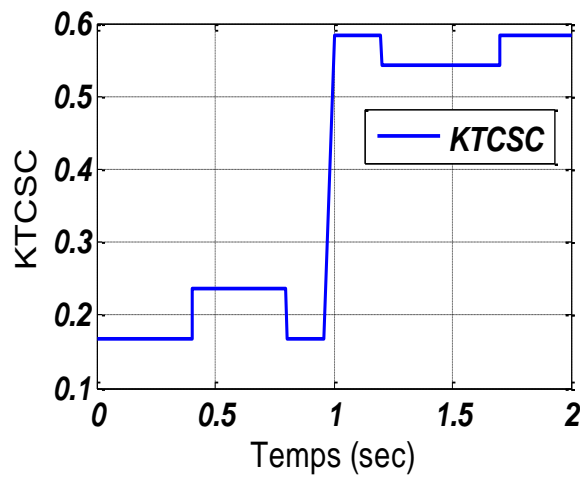


Figure IV.20: Evolution du degré de compensation K_{TCSC} .

Pour cette situation, nous avons montré la possibilité de contrôler de transit de la puissance P_{1-2} en utilisant le dispositif TCSC.

Lors du déclenchement l'impédance de la branche 2-4 devienne égale $Z_{24}' = 2 * Z_{24}$.

La figure IV.19.b montre que le transit de la puissance active est bien contrôlé en présence du TCSC, nous pouvons dire que le TCSC a présenté une grand effet pour le contrôle du transit de la puissance malgré plusieurs perturbations.

IV.6 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté l'effet du TCSC pour le contrôle de transit de la puissance active, pour cela cinq tests d'applications ont été traités d'une manière détaillée.

Les résultats de simulation obtenus ont montré l'efficacité du TCSC pour le contrôle du transit dans la branche choisie, Plusieurs réseaux test ont été utilisé à savoir réseau 2,3, et 5 jeu de barres. De plus l'efficacité du TCSC a été prouvé même en présence des différentes perturbations tel que :Variation de la tension, Variation de la puissance, déclenchement des lignes.

Conculsion générale

Les réseaux électriques modernes sont en évolution continue et leurs interconnexions ne cessent de se développer. Ils sont exploités près de leurs limites de sécurité pour satisfaire la demande toujours croissante de l'énergie électrique. Cette situation engendre des problèmes de fonctionnement tels que, la restriction de transit de puissance, la détérioration du profil de tension, la diminution de la stabilité et l'apparition des oscillations de puissance basse fréquence. Des travaux de recherche sont alors menés mondialement pour trouver des nouveaux moyens et des nouvelles technologies pour améliorer la fonctionnement des réseaux et rendre leur exploitation plus flexible

Le développement rapide de l'électronique de puissance a permis d'améliorer la gestion, les conditions de fonctionnement et le contrôle des réseaux électriques en introduisant les systèmes de transmission de l'énergie à courant alternatif flexible FACTS qui utilisent des interrupteurs statiques modernes commandés en ouverture et en fermeture tels que les (GTO, IGBT,..), avec ce système FACTS le contrôle du flux de puissance active et réactive ainsi que la compensation de tension, est atteint et performé.

L'étude présentée dans ce mémoire montre l'effet du TCSC pour le contrôle de transit dans un réseau électrique.

Afin d'atteindre cet objectif, nous sommes passés par les étapes suivantes :

Dans la première étape nous avons présenté en bref un rappel sur le réseau électrique et l'importance de la puissance réactive, ainsi que le principe générale de la compensation et ces moyens classique de compensation.

La deuxième étape de notre travail a été consacrée à la description des différents systèmes d'assurer le transport d'énergie électrique dans les meilleures conditions et qui sont rangés sous l'appellation « systèmes FACTS ». Les dispositifs FACTS peuvent être classés en trois catégories : les compensateurs parallèles, les compensateurs séries et les compensateurs hybrides (parallèle-série), et nous avons présenté en détail la structure de base et le principe de

fonctionnement des dispositifs FACTS étudiés, ainsi que leurs caractéristiques qui sont bien expliqués et illustrés.

Dans la troisième étape nous présentons la modélisation générale des deux dispositifs FACTS tels que le compensateur statique d'énergie réactive SVC (en anglais, Static Var Compensator), les condensateurs Série contrôlés par Thyristor (en anglais, Thyristor Controlled Series Capacitor, TCSC) qui est utilisé dans la simulation dans le chapitre prochain, afin d'étudier le comportement du réseau avec et sans intégration de ce dernier.

Dans la dernière étape, nous avons présenté les schémas électriques équivalents des réseaux tests étudiés en grandeurs réduites. Afin de voir le comportement de dispositif connecté au réseau pour l'optimisation de la puissance réactive et le contrôle de transit, nous avons fait des simulations par le logiciel MATLAB/SIMULINK. Les résultats obtenus par les différentes simulations effectuées pour le TCSC ont validé d'une manière générale le modèle de dispositif utilisé, et il est bien montré que ce compensateur a prouvé une grande efficacité notre objectif qui est le contrôle de transit dans les réseaux tests étudiés.

Malgré la grande efficacité de la technique de contrôle du TCSC présentée dans ce mémoire, mais il serait très utile de prendre en considération les points suivants pour améliorer, notre étude :

- Valider la méthode proposée sur un réseau test de grande taille(50,114) jdb.

Bibliographie

- [1] Sekhan Hocine « L'optimisation de la puissance réactive et le contrôle de tension à travers l'incorporation des dispositifs FACTS » mémoire de magister, université de Constantine1 Hadj Lakhdar – Constantine 2013.
- [2] Abdelaàli Alibi, « contrôle des réseaux électriques par les systèmes FACTS », mémoire de magistère, option : électricité industrielle, université de Batna 2009.
- [3] Belguidoum Hocine « Les Systemes FACT utilisé les convertisseurs entièrement commandés » mémoire de magister, université Ferhat Abbas – Sétif 2012.
- [4] Michel.Crappe « commande et régulation des réseaux électrique », Chap2.Trait EGEM série génie électrique.la voiser 2003.
- [5] Oussama Mammeri «Puissance réactive dans une nœud a charge non linéaire en présence d'un système de compensation de l'énergie», mémoire de magister université de Batna 2011/2012.
- [6] Nabil Mancer « Contribution à l'optimisation de la puissance réactive en présence de dispositifs de compensation dynamique », mémoire de magister, université Mohamed khider – Biskra 2012
- [7] Nicolas Retière « Modéliser et Concevoir Les réseaux d'énergie électrique » mémoire de magister, université Joseph Fourier – Grenoble 2003
- [8] Ay Abdelouahab « Modélisation et Analyse d'un Compensateur Statique SVC » mémoire de magister, université El Hadj Lakhdar – Batna 2013.
- [9] Rabah Benabid «Optimisation Multi objectif de la Synthèse des FACTS par les Particules en Essaim pour le Contrôle de la Stabilité de Tension des Réseaux Electriques» mémoire de magister, l'Université de Jijel 2007.
- [10] Noui Issam «Réduction des pertes dans les réseaux électriques par la compensation série TCSC» mémoire master, Université Mohamed Khider Biskra 2012.
- [11] Christophe Gombert « Simulation temps-réel des dispositifs d'Electronique de Puissance dédiés aux Réseaux d'Energie Electrique » thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2005.
- [12] Delendi. Louardi « contrôle de l'écoulement de puissance active par un système FACTS » mémoire de magister, université El Hadj Lakhdar – Batna 2009.
- [13] Lamia Kartobi « Optimisation de la Synthèse des FACTS par les Algorithmes Génétiques et les Essaims Particulaires pour le contrôle des Réseaux Electriques » Technique de l'ingénieur Ecole Nationale Polytechnique – Alger.

- [14] K. Belacheheb « Contribution à l'étude des systèmes de compensation FACTS en général, UPFC en particulier, pour le contrôle du transit de puissance dans un réseau de transport » , Thèse de doctorat de l'université de HENRI POINCARÉ NANCY I, 21 Juin 2001.
- [15] Tarik ZABAIYOU « Coordination Des Régulateurs Conventionnels Des Machines Synchrones Et Des Compensateurs Statiques (SVCS) » , Thèse de Doctorat, UNIVERSITÉ DU QUÉBEC, Canada, 2010.
- [16] Laid Hichem « Contribution à l'étude du contrôle du flux de puissance par l'UPFC » mémoire de magister, université de Batna 2009.
- [17] E.G. Shahraki «Apport de l'UPFC à l'amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques» Mémoire de doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy-I, 13 Octobre 2003.
- [18] Zitouni Fares «Amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électrique par l'utilisation des systèmes FACTS » mémoire de magister, université Ferhat Abbas – Sétif 2013.
- [19] B. Houari « Contrôle des puissance réactive et des tension dans un réseau de transport au moyen de dispositifs FACTS (SVC) » Mémoire de Magister de l'Université de Sidi Bel Abbes, 2008
- [20] Daniel J. Sullivan « Improvements in voltage control and dynamic performance of power transmission systems using Static Var Compensators (SVC) » mémoire de Master, université de Pittsburgh, Pennsylvania, USA 5 Avril 2006
- [21] Stéphan Gerbex « Méta heuristiques Appliquées au placement optimal de dispositifs FACTS dans un réseau électrique» mémoire d'ingénieur , Ecole Polytechnique fédérale-Lausanne 2003.
- [22] Magnoun Youness «placement optimal de dispositifs FACTS dans un réseau de puissance» mémoire d'ingénieur , conservatoire national des arts et métiers center du Maroc 2014.

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME
MASTER EN GENIE ELECTRIQUES

SPECIALITE : RESAUX ELECTRIQUES

Proposé et dirigé par : Dr. MESSALTI sabir

Présenté par : OUCIF Ahmed

Thème :

Modélisation et Commande d'un compensateur TCSC

Résumé :

Dans ce mémoire, nous avons présenté le contrôle du transit d'une ligne de transport par les dispositifs FACTS (Flexible Alternating current Transmission system), dont le compensateur (Thyristor controlled Serie Capacitor) est utilisé en raison de ses nombreux avantages. Le présent document est organisé en quatre parties :

dans la première partie expose une brève description du réseau électrique, la modélisation ainsi que la méthode de calcul d'écoulement de puissance utilisant la technique de Gauss.

La deuxième partie, est une présentation générale du concept « FACTS ». Une classification des différents types est proposée et les principaux dispositifs de chaque famille sont décrits.

Dans la troisième partie, nous avons présenté la modélisation générale des deux dispositifs FACTS tels que le compensateur statique d'énergie réactive SVC, Les condensateurs Série contrôlés par Thyristor TCSC.

Dans la quatrième partie nous avons étudié l'impact du TCSC pour le contrôle du transit de la puissance active dont plusieurs réseaux tests ont été utilisés pour valider la technique de contrôle proposée dans ce mémoire.

Mots clés : FACTS, TCSC, SVC, UPFC, TCPAR, Contrôle de transit, méthode de Gauss

N° d'ordre : Rés _222