

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA DE BEJAI

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT GENIE ELECTRIQUE



Mémoire de fin de cycle

Présenté par :

M^r FERHAD Youva

M^r ABERBOUR Noureddine

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Electrotechnique

Option : Techniques de haute tension

Thème

Contrôle d'écoulement de puissance par TCSC et SVC

Soutenu publiquement le 02/07/2015 devant le jury constitué de :

M ^r . ADLI Mouloud	Univ. Bejaia	Président
M ^r . BOUTEBEL Mohamed	Univ. Bejaia	Examineur
M ^r . HAMOUDI Farid	Univ. Bejaia	Rapporteur

Remerciements

Nous remercions DIEU le tout puissant, de nous avoir donné le courage, la force et la patience afin de mener ce travail à terme.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude et grand respect à notre promoteur Mr HAMOUDI Farid Pour son aide, sa disponibilité, ses conseils avisés, et ses remarques qui nous ont permis de présenter notre travail.

Nos sincères remerciements s'adressent aussi aux membres de jury d'avoir accepté de juger notre travail et de contribuer à son enrichissement par leurs valeureuses remarques.

Mr ADLI Mouloud et Mr BOUTEBEL Mohamed pour avoir accepté d'examiner ce travail, d'avoir bien voulu prendre le temps d'évaluer et de juger notre travail.

Nous remercions également tout l'ensemble des enseignants du département Génie Electrique.

Nous ne manquerons pas de remercier particulièrement Mr BOUZIDI Athmane pour son aide lors de la pratique.

En dernier lieu, nous remercions chaleureusement toutes les personnes ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.

Dédicaces

J'exprime mon profond respect et ma sincère gratitude aux êtres qui me sont les plus chères au monde, à mes parents qui ont su me faire confiance et me soutenir en toute circonstance au cours de toutes mes années d'existence, c'est avec émotion que je leur exprime toute ma gratitude mon admiration et
Mon profond respect.

Au charme et à la bonne humeur de notre famille, ma chère sœur Fatima.

Au bonheur de la famille notre aimable Hani, que Dieu te
Garde ton innocence.

Que Dieu garde ma famille toujours réunis.

A ma chère femme (Nounouche) qui m'accepte tel que je suis, Il y a toujours au fond de tes yeux ce sourire qui me fait tellement de bien, tu as été toujours avec moi dans chaque instant de ma vie, je ne trouve pas les mots qui conviennent au remerciement que je te dois.

A l'adorable HOUDA ma deuxième sœur

A la sagesse de la famille ma grand-mère (Oumelkhire) et mon oncle (Ahmed)

Et toute la famille Fatima Smina Ahcen Houcine Lwiza Lakhdar.

A mes deux chères familles ABERBOUR et BOULAYOUNE

A tous mes chers amis Saïd et Rachida, Amine (l'innocence), Meziane (Beza), Moussa, Sofiane Djoudjou, Nassima, Zohra, Lydia, Rafik, Ali (Ferouze) avec eux j'ai passé les meilleurs moments de ma vie.

Sans oublier Farouk, Hamide (K114 RUTO)

A toute les personnes que J'ai connues et que je n'ai pas citées.

A toute la promo THT 2014/2015 surtout Hakim et Khaled

A mon binôme Youva et à toute sa famille.

Noureddine

Dédicaces

J'exprime mon profond respect et ma sincère gratitude aux êtres qui me sont les plus chères au monde, à mes parents qui ont su me faire confiance et me soutenir en toute circonstance au cours de toutes mes années d'études, c'est avec émotion que je leur exprime toute ma gratitude mon admiration et mon profond respect.

A ma chère sœur pour son soutien et son encouragement : Thinhinane

A la joie et le bonheur de mes deux famille "FERHAD et OUAMAR".

Que Dieu les garde toujours réunis.

A tous mes chers amis Lamine, yacine, farid, mazigh, hafid, ahmed oussama, awris , khellaf, athmane, said , hamza , youcef , Meziane, farouk, nabil, hamid, khodir, toufik, faycal , anissa, firoz, nabila, zahra, fatima avec eux j'ai passé les meilleurs moments de ma vie.

A toute les personnes que J'ai connues et que je n'ai pas citées.

A toute la promo THT 2014/2015 surtout laarbi et massi.

A mon binôme Noureddine et à toute sa famille.

Youva

Sommaire

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I Ecoulement de puissance	
I.1. Introduction	3
I.2. Modélisation d'un réseau électrique	5
I.2.1. Modélisation des générateurs	5
I.2.2. Modélisation d'une charge	6
I.2.3. Modélisation de ligne longue	7
I.2.4. Modélisation du transformateur	7
I.2.4.1 Transformateur à gradins	8
I.2.4.2. Transformateur déphaseur	10
I.3. Le système PU	11
I.3.1. Définition	11
I.3.2. Changement de base dans le système (P.U)	12
I.3.3. Avantage du système (P.U)	12
I.4. Calcul de l'écoulement de puissance dans le réseau électrique	14
I.4.1. Equations d'écoulements de puissance	14
I.4.2. Méthodes de calcul du transit de puissance	14
I.4.3. Application de la méthode de Newton-Raphson pour le calcul des tensions aux accès..	15
I.4.3.1. Forme générale	15
I.4.3.2. Forme cartésienne	15
I.4.3.3. Forme polaire	16
I.4.3.4. Forme hybride	16
I.4.4. Calcul de l'écoulement de puissance par la forme hybride	16
I.4.4.1. Détermination des éléments du Jacobien	18
I.4.4.2. Algorithme de calcul du transit de puissance par la méthode de Newton-Raphson	20
I.5. Conclusion	22

Chapitre II Les systèmes FACTS

II.1 Introduction.....	23
II.2. Généralités sur les FACTS	23
II.3 Les systèmes FACTS	25
II.3.1. Structures de base des systèmes FACTS	26
II.3.1.1. Inductance commandée par thyristor TCR	26
II.3.1.2. Capacité commutée par thyristors TSC	27
II.3.1.3. Inductance commutée par thyristors TSR	27
II.3.1.4. Condensateur commuté mécaniquement MSC	27
II.4. Types des dispositifs FACTS	28
II.4.1. Compensateurs Parallèles	28
II.4.2. Compensateurs série	29
II.4.3 Compensateurs hybrides (série-série et shunt-série)	30
II.5. Modes de fonctionnement du SVC et TCSC	31
II.5.1. Mode de fonctionnement du SVC.....	31
II.5.2. Mode de fonctionnement du TCSC	32
II.5.2.1. Mode de blocage.....	32
II.5.2.2. Mode by-pass	33
II.6. Modélisation du SVC et TCSC.....	33
II.6.1. Modélisation du SVC.....	34
II.6.1.1. La réactance d'un SVC	35
II.6.1.2. Construction de matrice nodale YBUS	35
II.6.1.2.1. SVC placé en début de ligne.....	35
II.6.1.2.2. SVC placé au milieu d'une ligne.....	36
II.6.2. Modélisation du (TCSC)	39
II.6.2.1. Construction de matrice nodale YBUS	40
II.6.2.2 Insertion d'un TCSC au milieu de la ligne	41
II.6.3. Dimensionnement du TCSC.....	42
II.6.3.1. Détermination de la capacité de TCSC	42
II.6.3.2. Détermination de l'inductance de TCSC	42
II.6.2.3. Dimensionnement du TCSC en fonction de (α)	42
II.7 Conclusion	43

Chapitre III Simulation et interprétation des résultats

III.1. Introduction	44
III.2. Topologie du réseau étudié.....	44
III.2.1. Données du réseau étudié	45
III.3. Résultats de simulation.....	45
III.3.1 Sans compensation	45
A. Le module des tensions dans les nœuds :.....	46
B. Les Phases des tensions aux nœuds	46
C. Puissance injectée aux jeux de barres	46
D. Puissance active (P) et réactive (Q) transité dans les lignes	47
E. Perte de puissance active (P) et réactive (Q) transité dans les lignes	48
III.3.2 Avec compensation.....	48
III.3.2.1 Compensation avec TCSC	48
A. Le module des tensions dans les nœuds avec TCSC.....	48
B. Les Phases des tensions aux nœuds avec TCSC	48
Interprétation.....	48
C. Puissance injectée aux jeux de barres avec TCSC	49
D. Puissance active (P) et réactive (Q) transité dans les lignes avec TCSC	49
Interprétation.....	49
E. Pertes de puissance active (P) et réactive (Q) transité dans les lignes avec TCSC...	50
Interprétation.....	50
III.3.2.2 Compensation avec SVC	51
A. Le module des tensions dans les nœuds avec SVC.....	51
B. Les Phases des tensions aux nœuds avec SVC	51
Interprétation.....	51
C. Puissance injectée aux jeux de barres avec SVC	52
D. Puissances active (P) et réactive (Q) transité dans les lignes avec SVC	52
Interprétation.....	52
E. Pertes de puissance active (P) et réactive (Q) transité dans les lignes avec SVC .	53
Interprétation.....	53
III.4 La comparaison entre SVC et TCSC.....	54
III.5 Conclusion.....	55
Conclusion générale.....	57

Liste des abréviations

Liste des Abréviations

FACTS	Flexible alternatif curant transmission systems
SVC	Static Var Compensator
STATCOM	Static Synchronous Compensator
TCSC	Thyristor Controlled Séries Capacitor
SSSC	Static Synchronous Series Compensator
TCSR	Thyristor Controlled Series Reactor
UPFC	Unified Power Flow Controller
TCPAR	Thyristor Controlled Phase Angle Regulator
FC	Condensateur fixe
IPF	Interline Power Flow Controller
MSC	Mechanically-Switched Capacitor
TCR	Thyristor Controlled Reactor
TCSR	Thyristor Controlled Series Reactor
TCVR	Thyristor Controlled Voltage Regulator
TSC	Thyristor Switched Capacitor
TSR	Thyristor Switched Reactor
TCBR	Thyristor Control Breaking Resistor
TCSC	Thyristor Controlled Series Capacitor
TSSC	Thyristor Switched Series Capacitor
TSSR	Thyristor Switched Series Reactor
UPFC	Unified Power Flow Controller
GTO	Gate Turn Off
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistors

Liste des figures

Listes des figures

Figure I.1 Le modèle d'une génératrice	5
Figure I.2 Une source de tension.....	6
Figures I.3 Modélisation d'une charge.....	6
Figure I.4 Modélisation d'une ligne longue.....	7
Figure I.5 Modèle d'un transformateur	8
Figure I.6 Modèle approximatif du transformateur	9
Figure I.7 Modèle d'un transformateur déphaseur.....	10
Figure II.1 Principaux Dispositifs FACTS.....	24
Figure II.2 Modèle d'un TCR	26
Figure II.3 Modèle d'un TSC	27
Figure II.4 Structure de base d'un MSC	28
Figure II.5 Compensateurs Shunt.....	29
Figure II.6 Compensation série	30
Figure II.7 Structure d'un TCR-FC.....	32
Figure II.8 Structure d'un TCR-TSC	32
Figure II.9 Structure d'un TCR-TSC-FC.....	32
Figure II.10 Structure d'un TCR-TSR-TSC	32
Figure II.11 Module et phase de l'impédance du TCSC	33
Figure II.12 Configuration la plus avancée du SVC.....	34
Figure II.13 Courbe caractéristique tension-courant du SVC.....	35
Figure II.14 Introduction d'un SVC dans une ligne	36
Figure II.15 SVC placé au milieu d'une ligne	37
Figure II.16 Transformation Y- Δ	37
Figure II.17 Schéma de principe d'un TCSC	39
Figure II.18 Insertion d'un TCSC à l'extrémité d'une ligne.....	40
Figure II.19 TCSC inséré en milieu d'une ligne.....	41

Figure III.1 Topologie du réseau électrique étudié.....	44
Figure III.2. Allure des puissances actives avec SVC et TCSC	54
Figure III.3. Allure de module de tension avec SVC et TCSC.....	54
Figure III.4. Allure des pertes des puissances actives avec SVC et TCSC	55

Liste des tableaux

Listes des tableaux

Tableau II.1 : Application des FACTS à la résolution des problèmes des réseaux	30
Tableau II.2 Dispositifs FACTS installés dans le monde	31
Tableau III.1 Données des lignes	45
Tableau III.2 Données des nœuds	45
Tableau III.3 Module des tensions aux nœuds (pu)	46
Tableau III.4 Phases des tensions aux nœuds (degré).....	46
Tableau III.5 Puissances injectées aux jeux de barres	46
Tableau III.6 Les puissances sortantes des JDB (i) vers JDB (j)	47
Tableau III.7 Les puissances reçues par JDB (i) ou JDB (j)	47
Tableau III.8 Pertes dans les lignes	48
Tableau III.9 Module des tensions aux nœuds TCSC (pu)	48
Tableau III.10 Phases des tensions aux nœuds TCSC (degré).....	48
Tableau III.11 Puissances aux jeux de barres avec TCSC	49
Tableau III.12 Les puissances sortantes des JDB (i) vers JDB (j) avec TCSC.....	49
Tableau III.13 Les puissances reçus au niveau des JDB (j)	50
Tableau III.14 Les pertes de puissances dans les lignes	50
Tableau III.15 Modules des tensions aux nœuds SVC (degré).....	51
Tableau III.16 Phases des tensions aux nœuds SVC (degré).....	51
Tableau III.17 Puissances aux jeux de barres avec SVC (pu).....	52
Tableau III.18 Les puissances sortantes des JDB (i) vers JDB (j) avec SVC	52
Tableau III.19 Les puissances reçus au niveau des JDB (j)	53
Tableau III.20 Les pertes de puissances dans les lignes	53

Introduction

Générale

Introduction générale

Le mécanisme de gestion des systèmes énergétiques de puissance devient de plus en plus compliqué à cause de la croissance continue de la demande de l'électricité d'une part vu l'augmentation quotidienne de nos villes et l'agglomération urbaines et la mauvaise adaptation d'autre part de quelques grandeurs électriques (à titre d'exemple mauvais profil de tension aux niveaux des jeux de barres de contrôle). Le problème de planification de la puissance occupe une place importante dans la gestion des réseaux électriques et ce pour procurer un approvisionnement efficace en matière d'électricité [1].

Les réseaux maillés, soumis à des boucles de puissances indésirables entre les zones interconnectées, subissent des surcharges de ligne, des problèmes de stabilité et de toute manière un accroissement des pertes. Les moyens classiques de compensation et de contrôle des réseaux tel que le transformateur à prises réglables en charge, les transformateurs déphaseurs, les compensateurs séries ou parallèles commutés par disjoncteurs, modification des consignes de production, changement de topologie du réseau et action sur l'excitation des générateurs pourraient s'avérer trop lents et insuffisants pour répondre efficacement aux perturbations du réseau. Il faudra donc compléter leur action en mettant en œuvre le développement récent des dispositifs d'électronique de puissance, ce développement a fait surgir un nouveau concept intitulé FACTS (Flexible Alternative Current Transmission Systems) [3].

En 1988, Hingorani présente, lors d'une conférence d'IEEE, ce concept: "Flexible AC Transmission Systems (FACTS)", qui met en relief les nouvelles possibilités de l'électronique de puissance dans la commande et le contrôle du transport de l'énergie électrique en courant alternatif(AC). Selon IEEE, le terme FACTS désigne les systèmes de transport et de distribution d'énergie électrique, en courant alternatif, qui font appel à l'électronique de puissance pour améliorer leur flexibilité d'exploitation et leur capacité de transport [4].

Ce concept regroupe une multitude de dispositifs très efficaces ayant des temps de réponse très courts, qui permettent un contrôle plus souple et adéquat des différents

paramètres du réseau (tension, impédance, déphasage). Ainsi, les transits de puissance seront mieux contrôlés, ce qui permettra d'accroître les marges de stabilité ou de tendre vers les limites thermiques des lignes.

Chapitre 1

Ecoulement de

Puissance

I.1. Introduction

L'écoulement de puissance ou l'écoulement de charge, est la solution pour les conditions de fonctionnement normal d'un réseau électrique triphasé équilibré en régime permanent. En d'autres termes, c'est la recherche d'un point de fonctionnement stable d'un réseau électrique à un moment donné à travers une information complète des tensions, courants et puissances mises en jeu dans le système de puissance [1].

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.

Tout réseau électrique consiste principalement en :

- Générateurs d'énergie électrique
- Consommateurs d'énergie électrique
- Lignes et câbles électriques

On associe à chaque jeu de barre quatre quantités, dont deux sont connues :

- La puissance active
- La puissance réactive
- Le module de la tension
- L'angle de phase

Un modèle mathématique de ce système doit être déterminé pour pouvoir résoudre le problème de l'écoulement des puissances.

En particulier, nous pouvons déterminer aussi les puissances à générer par les unités de production si nous connaissons la demande d'énergie par les consommateurs. Il est nécessaire de choisir un jeu de barre de référence, pour fournir des puissances actives et réactives supplémentaires, pour compenser les pertes dans les lignes de transmission qui restent inconnues jusqu'à l'obtention de la solution finale [2].

Afin de définir le problème d'écoulement de puissance à résoudre, il est nécessaire de spécifier la puissance active et l'amplitude de tension à chaque nœud connecté à un générateur, ces quantités étant respectivement contrôlées par le régulateur de vitesse et le système d'excitation. Les nœuds de génération sont généralement appelés nœuds PV, la

puissance réactive Q ne nécessite pas d'être spécifiée. Les nœuds de charge sont généralement appelés nœuds PQ . Ceci est dû au fait que les puissances active et réactive de charge sont spécifiées d'avance. Quant au nœud balancier ou slack bus, l'amplitude de tension est généralement fixée à 1pu (mais on peut avoir une autre spécification), alors que la phase est généralement fixée à 0 degré, pour des raisons de référence pour la valeur de tension des nœuds du réseau électrique. D'ailleurs, le slack bus est parfois considéré comme étant aussi le nœud de référence.

En plus de ces trois types de nœuds, un autre type de nœuds, appelés nœuds contrôlés, peut être additionné, lorsque certains nœuds de charge comportent des transformateurs avec prises de réglage pour varier par degrés l'amplitude de tension / ou avec déphaseur pour varier la phase de tension entre l'entrée et la sortie des transformateurs. Pour ces nœuds, les paramètres connus sont l'amplitude de tension $|V|$ en plus des puissances active et réactive (P, Q), alors que les paramètres inconnus sont la phase de tension (θ) et les rapports de transformation (t) [2].

But de l'étude de la répartition de charge :

- Elle a pour but de déterminer, en régime triphasé permanent (en général équilibré), les tensions en module et en phase en tout point du réseau et les puissances actives et réactives transitant sur toutes les lignes du réseau électrique [3].
- La précision des valeurs limites de la stabilité technique, pour éviter la détérioration de certains éléments du réseau.
- Le maintien des tensions aux J.D.B entre les limites tolérées ($V_{min} < V < V_{max}$) pour éviter l'endommagement de certains récepteurs et l'excès des pertes de puissance dans les lignes et les transformateurs ... etc.
- Le contrôle de la puissance réactive c'est-à-dire, le maintien de cette puissance entre deux limites ($Q_{min} < Q < Q_{max}$), pour éviter l'excès des coûts d'utilisation de la puissance réactive.
- L'interconnexion entre les centrales et les réseaux qui permettent d'améliorer la qualité d'énergie fournie en tension et fréquence.
- La planification des réseaux (étude prévisionnelle répondant à la demande des usagers dans l'avenir) [4].

I.2. Modélisation d'un réseau électrique [4]

Un réseau d'énergie électrique comprend des génératrices, des lignes de transport et distribution, et un ensemble de consommateurs, qui constituent la charge de réseau, en outre le réseau comporte également des transformateurs et des appareils de protection. L'ensemble des systèmes électrique comporte en gros trois sous-systèmes :

- Production (génératrice).
- Transport, répartition et distribution (lignes).
- Utilisation (consommateur).

Vu la complexité d'un réseau d'énergie électrique, il faut simplifier leur représentation pour établir des modèles ou schéma équivalent des principaux composant à savoir, des générateurs, les différents types de transformateurs, des lignes et des charges.

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 induit 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.

Le schéma équivalent est représenté par la **figure I.1**.

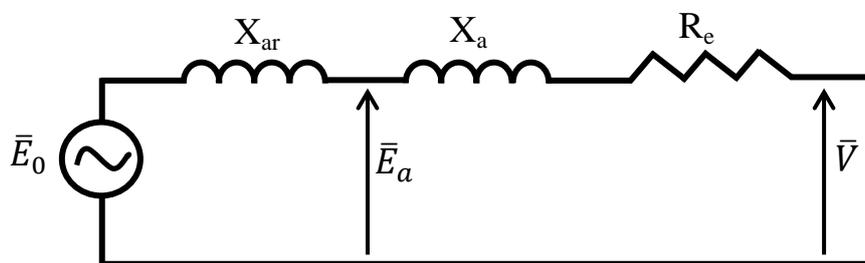


Figure I.1 Le modèle d'une génératrice

E_0 : La f.e.m à vide.

E_a : La f.e.m en charge.

\bar{V} : Tension de sortie.

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

X_a : Réactance de fuite.

R_e : Résistance d'enroulement.

- f.e.m : La force électromotrice

Dans le calcul d'écoulement de puissance, il est représenté par une source de tension (**Figure I.2**).

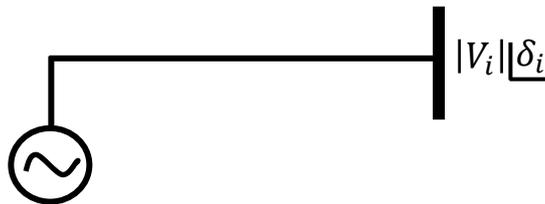


Figure I.2 Une source de tension.

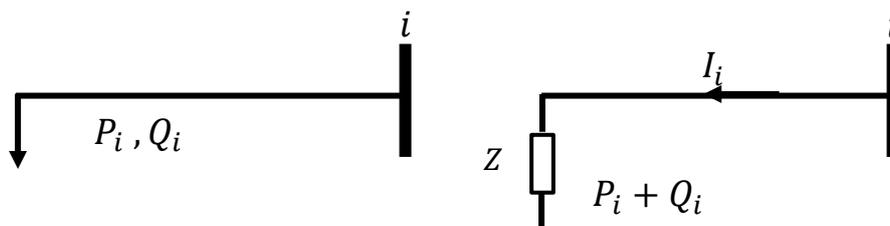
La puissance apparente délivrée par le générateur est :

$$S_i = P_i + jQ_i \quad (\text{I-1})$$

$$\text{La tension simple } V_i = |V_i|e^{j\delta_i} \quad (\text{I-2})$$

I.2.2. Modélisation d'une charge

Une charge peut être modélisée par une impédance qui consomme une quantité constante de puissance active et réactive (**Figures I.3**).



Figures I.3 Modélisation d'une charge.

$$Z = \left(\frac{Vn^2}{Sn} \right)^{|\delta_z|} \quad \text{Impédance de la ligne}$$

I.2.3. Modélisation de ligne longue

Une ligne peut être considérée comme une série de circuit à constantes répartie uniformément sur toute sa longueur. Ces circuits sont composés d'une infinité d'éléments identiques constitués, d'une inductance linéique, et d'une résistance linéique, dans le sens longitudinal, qui donnent naissance à des chutes de tension, une conductance linéique et une capacité linéique dans le sens transversale. Le schéma équivalent en Π est représenté par la **Figure I.4**.

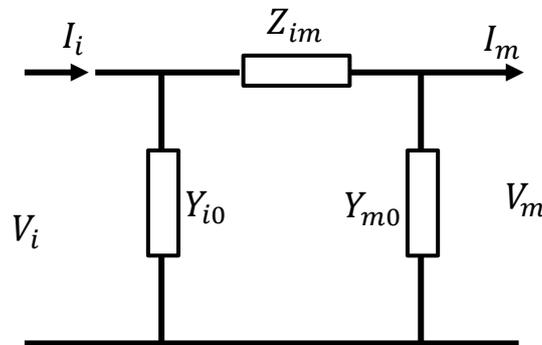


Figure I.4 Modélisation d'une ligne longue

Les équations de la ligne :

$$\begin{cases} Z_{im} = Z_c \cdot \sinh(\gamma \cdot L) \\ Y_{i0} = Y_{im} = \tanh\left(\frac{\gamma \cdot L}{2}\right) / Z_c \end{cases} \quad (\text{I-7})$$

Finalement on a les expressions de l'impédance série Z_{im} et de l'admittance transversale $Y_{i0} = Y_{m0}$ de la ligne de schéma équivalent en Π représenté sur la **Figure I.4**.

I.2.4. Modélisation du transformateur [5]

Les transformateurs de puissance sont des éléments importants du réseau et ont contribué au développement des capacités de transport des réseaux électriques. Les différentes parties du réseau électrique requièrent différents niveaux de tension. Pour tirer profit du meilleur rendement. Il paraît impératif de disposer d'un outil capable de changer le niveau de tension (et l'intensité du courant) et cela à des niveaux de puissances élevés.

Le transformateur de puissance, tel qu'il est connu actuellement, répond à ce besoin avec des rendements approchant l'unité. Il existe plusieurs types de transformateurs. Deux modèles des plus usités sont représentés dans ce qui suit.

I.2.4.1 Transformateur à gradins

Un transformateur à gradins peut être modélisé comme suit **Figure I.5** :

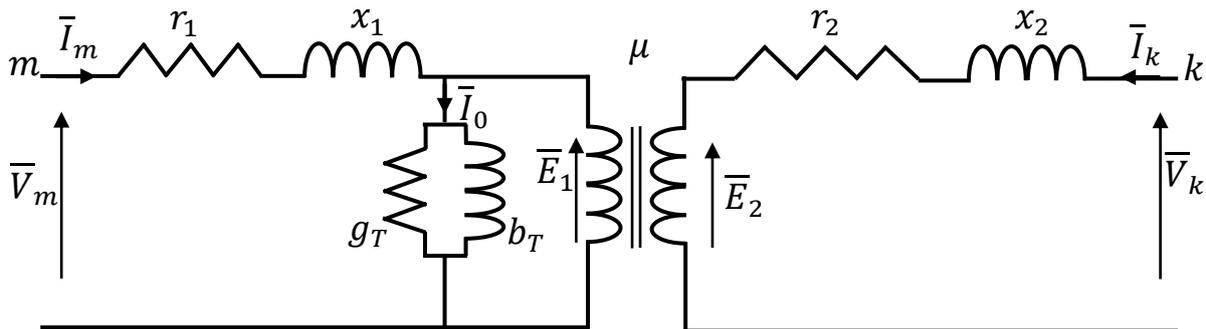


Figure I.5 Modèle d'un transformateur

\bar{V}_m, \bar{I}_m : Tension et courant respectivement au primaire du transformateur

\bar{V}_k, \bar{I}_k : Tension et courant respectivement au secondaire du transformateur

\bar{E}_1, \bar{E}_2 : f.e.m primaire et secondaire respectivement

$\bar{Z}_1 = r_1 + jx_1$: Impédance de l'enroulement primaire

$\bar{Z}_2 = r_2 + jx_2$: Impédance de l'enroulement secondaire

r_1, r_2 : Résistance de l'enroulement primaire et secondaire respectivement

x_1, x_2 : Réactance de l'enroulement primaire et secondaire respectivement

$\bar{Y}_T = g_T + jb_T$: Admittance shunt

g_T, b_T : Conductance et susceptance shunt

\bar{I}_0 : Courant qui traverse la branche magnétisante

μ : Rapport de transformation.

En négligeant l'effet de la branche magnétisante et en ramenant l'impédance de l'enroulement primaire au secondaire on aura le schéma approximatif suivant :

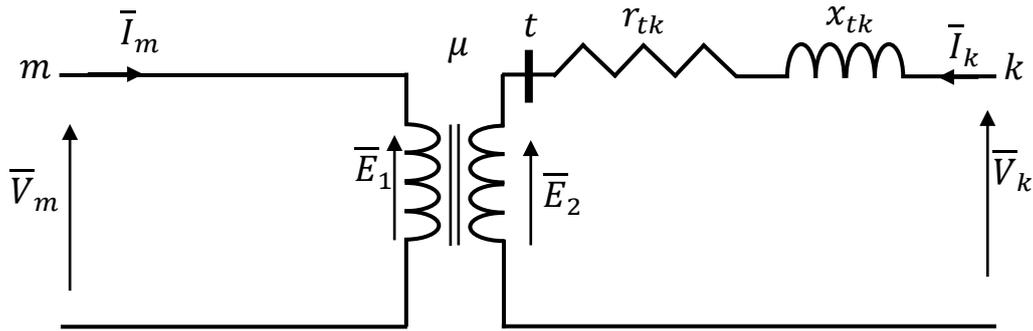


Figure I.6 Modèle approximatif du transformateur

Avec :

$$\bar{Z}_{tk} = r_{tk} + jx_{tk} \quad (\text{I-8})$$

\bar{Z}_{tk} : Impédance du transformateur ramenée au secondaire.

r_{tk}, x_{tk} : Résistance et réactance, respectivement, du transformateur ramenée au secondaire.

De la **figure I.6**, on peut écrire :

$$\mu = \frac{\bar{E}_1}{\bar{E}_2} = -\frac{\bar{I}_k}{\bar{I}_m} \quad (\text{I-9})$$

$$\bar{V}_m = \bar{E}_1 \quad (\text{I-10})$$

$$\bar{V}_k = \bar{E}_2 + (r_{tk} + jx_{tk})\bar{I}_k \quad (\text{I-11})$$

Les équations (I-10), (I-11) et (I-12) donnent les expressions des courants comme suit:

$$\begin{cases} \bar{I}_m = \frac{\bar{y}_{tk}}{\mu^2} \bar{V}_m + \frac{-\bar{y}_{tk}}{\mu} \bar{V}_k \\ \bar{I}_k = \frac{-\bar{y}_{tk}}{\mu} \bar{V}_m + \bar{y}_{tk} \bar{V}_k \end{cases} \quad (\text{I-12})$$

Avec :

$$\bar{y}_{tk} = \frac{1}{\bar{Z}_{tk}} \quad (\text{I-13})$$

Sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_m \\ \bar{I}_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{\bar{y}_{tk}}{\mu^2}\right) & \left(\frac{-\bar{y}_{tk}}{\mu}\right) \\ \left(\frac{-\bar{y}_{tk}}{\mu}\right) & \bar{y}_{tk} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \bar{I}_m \\ \bar{V}_k \end{bmatrix} \quad (\text{I-14})$$

D'où la matrice admittance nodale du transformateur est :

$$\bar{Y}_{TR} = \begin{pmatrix} \frac{\bar{y}_{tk}}{\mu^2} & -\frac{\bar{y}_{tk}}{\mu} \\ -\frac{\bar{y}_{tk}}{\mu} & \bar{y}_{tk} \end{pmatrix} \quad (\text{I-15})$$

I.2.4.2. Transformateur déphaseur

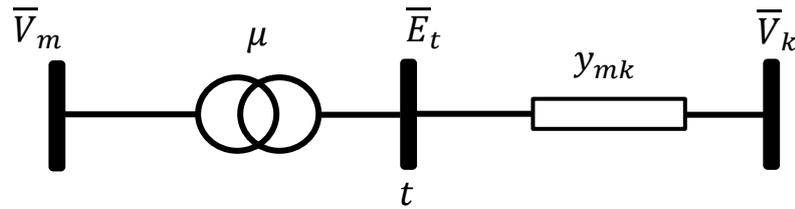


Figure I.7 Modèle d'un transformateur déphaseur

Etant donné que le transformateur est idéal, on aura :

$$\bar{S}_m = \bar{S}_t \quad (\text{I-16})$$

Donc :

$$\bar{E}_m \bar{I}_m^* = \bar{E}_t \bar{I}_t^* \quad (\text{I-17})$$

$$\text{Alors : } \bar{I}_m = \frac{\bar{E}_t^*}{\bar{E}_m^*} \bar{I}_t$$

Avec :

$$\bar{I}_t = -\bar{I}_k \quad \text{On aura } \bar{I}_m = -\frac{\bar{E}_t}{\bar{E}_m} \bar{I}_k$$

$$\text{Sachant que : } \bar{\mu} = \frac{\bar{E}_m}{\bar{E}_t} \quad \text{et } \bar{E}_m = \bar{V}_m$$

Alors :

$$\bar{I}_k (\bar{V}_k - \bar{E}_t) \bar{y}_{mk} = \left(\bar{E}_t - \frac{\bar{V}_m}{\bar{\mu}} \right) \bar{y}_{mk} \quad (\text{I-18})$$

$$\left(\bar{E}_t - \frac{\bar{V}_m}{\bar{\mu}} \right) \bar{y}_{mk} = -\frac{\bar{y}_{mk}}{\bar{\mu}} \bar{V}_m + \bar{y}_{mk} \bar{V}_k \quad (\text{I-19})$$

Finalement on obtient:

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_m \\ \bar{I}_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{\bar{y}_{mk}}{\mu^2}\right) & \left(\frac{-\bar{y}_{mk}}{\bar{\mu}^*}\right) \\ \left(\frac{-\bar{y}_{mk}}{\bar{\mu}}\right) & \bar{y}_{mk} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \bar{V}_m \\ \bar{V}_k \end{bmatrix} \quad (\text{I-20})$$

D'où, la matrice admittance du transformateur déphaseur est:

$$\bar{Y}_{TR} = \begin{pmatrix} \frac{\bar{y}_{mk}}{\mu^2} & \frac{-\bar{y}_{mk}}{\bar{\mu}^*} \\ \frac{-\bar{y}_{mk}}{\bar{\mu}} & \bar{y}_{mk} \end{pmatrix} \quad (\text{I-21})$$

I.3. Le système PU [6]

L'utilisation des grandeurs réduites (p.u) permet encore une simplification dans la représentation des transformateurs, en les réduisant à une simple impédance (de dispersion) série.

I.3.1. Définition

Dans ce système les grandeurs électriques données en valeurs réelles ou physiques sont transformées en (PU), Quantité en (PU) = quantité physique / valeur de la quantité de base.

Du moment que la quantité physique et celle de base ont la même dimension (V, A,...), la valeur résultante en (PU) n'a pas de dimension.

La puissance de base dans un système triphasé est définie par :

$$S_{(3\phi)base} = 3 \cdot S_{base} \quad (\text{I-22})$$

$$U_{base} = \sqrt{3} \cdot V_{base} \quad (\text{I-23})$$

Avec : S_{base} et V_{base} sont la puissance et la tension de base ramenées à un système monophasé, à partir de la puissance et la tension triphasée.

$$S_{(3\phi)}(P.U) = \frac{S_{3\phi}}{S_{base}} = \frac{3S}{3S_{base}} = S(P.U) \quad (\text{I-24})$$

$$U(P.U) = \frac{\sqrt{3} \cdot V}{\sqrt{3} V_{base}} = V(P.U) \quad (\text{I-25})$$

I.3.2. Changement de base dans le système (P.U) [6]

Une grandeur électrique (puissance S, tension V, ...etc.), dans une base (1) peut être transformée à une autre base (2).

$$A(P.U)_2 = \frac{A_{réelle}}{A_{base1}} \cdot \frac{A_{base1}}{A_{base2}}$$

Actuellement on peut définir un changement de base comme suit :

$$\text{Nouvelle valeur (P.U)} = \text{ancienne valeur (P.U)} \frac{[\text{ancienne base}]}{[\text{nouvelle base}]}$$

$$Z(P.U)_2 = Z(P.U)_1 \cdot \frac{(V)_{base1}^2}{(V)_{base2}^2} \cdot \frac{S_{base2}}{S_{base1}}$$

I.3.3. Avantage du système (P.U) [6]

- L'analyse des réseaux électriques en utilisant système d'unité (P.U) est très simple, du moment que l'addition des impédances de circuit équivalent se fait directement sans tenir compte de la tension du point de connexion.
- Il élimine les multiplications et division par le nombre 3 qui est requis dans la représentation des systèmes triphasés par d'autres monophasés ou (par phase).
- Le facteur 3 ou 3 est directement pris en compte par les quantités de base.
- Les différences dans les caractéristiques d'opération (de marche) pour plusieurs appareils peuvent être estimées en comparant leurs constantes exprimées en (P.U).
- Les constantes moyennes des machines peuvent être obtenues facilement du moment que les paramètres des équipements similaires sont contenus dans une marge relativement petite, et de ce fait, elles sont comparables quand elles sont exprimées en (P.U) basées sur une capacité requise.
- L'impédance d'un transformateurs, qu'elle soit mesurée coté BT ou HT est la même, il suffit seulement de considérer la tension de base celle du transformateur du coté ou on veut mesurer notre impédance.
- L'utilisation de cette méthode donne des valeurs pour les tensions de telle sorte qu'elles soient proches de l'unité, ainsi une surtension ou une chute de tension peuvent être signalées ou détectées en (P.U).

I.4. Calcul de l'écoulement de puissance dans le réseau électrique

L'écoulement de puissance est d'une importance capitale, il nous permet de déterminer l'amplitude et l'angle de phase des tensions sur chaque accès ainsi que les puissances actives et réactives qui transitent d'un accès à un autre.

I.4.1. Equations d'écoulements de puissance

$$\bar{S}_i = (P_{Gi} - P_{Di}) + j(Q_{Gi} - Q_{Di}) \quad (\text{I-26})$$

$$P_i = P_{Gi} - P_{Di} \quad (\text{I-27})$$

$$Q_i = Q_{Gi} - Q_{Di} \quad (\text{I-28})$$

Avec :

P_G, Q_G : Puissances active et réactive respectivement générées.

P_D, Q_D : Puissances active et réactive respectivement demandées.

P_i, Q_i : Puissances active et réactive respectivement nettes.

La puissance apparente (S) à l'accès (i) est donnée par la relation :

Pour $i = 1:n$

$$\bar{S}_i = P_i + jQ_i = \bar{V}_i \bar{I}_i^* \quad (\text{I-29})$$

$$\bar{S}_i^* = P_i - jQ_i = \bar{V}_i^* \bar{I}_i \quad (\text{I-30})$$

Alors :

$$\bar{S}_i^* = \bar{V}_i^* \sum_{j=1}^n \bar{Y}_{ij} \bar{V}_j \quad (\text{I-31})$$

I.4.2. Méthodes de calcul du transit de puissance

Le problème de calcul du transit de puissance consiste à résoudre un système de (n) équations algébriques non linéaires pour lesquelles il n'existe, aucune solution générale, d'où la nécessité d'appliquer des méthodes numériques adoptées pour les résoudre.

Actuellement, on reconnaît deux méthodes très utilisées pour la résolution du problème de l'écoulement de puissance ces deux méthodes sont :

- La méthode de Newton-Raphson (N.R)
- La méthode de Gauss-Seidel (G.S)

Dans notre travail on va résoudre le problème en appliquant la méthode de Newton-Raphson.

I.4.3. Application de la méthode de Newton-Raphson pour le calcul des tensions aux accès

Le calcul des tensions aux différents accès peut s'effectuer à l'aide d'un système d'équations non linéaires exprimant les puissances actives et réactives en fonction des tensions.

La méthode de N.R à plusieurs variantes selon qu'on l'exprime les éléments de la matrice nodale et tensions aux accès en coordonnées cartésiennes, polaires ou hybrides.

I.4.3.1. Forme générale

On a :

$$[I] = [Y][V] \quad (\text{I-32})$$

$$I_i = \sum_{j=1}^n \bar{Y}_{ij} \bar{V}_j \quad (\text{I-33})$$

$$I_i = \frac{S_i^*}{V_i^*} = \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} \quad (\text{I-34})$$

Pour $i = 1:n$

$$\frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} = \sum_{j=1}^n \bar{Y}_{ij} \bar{V}_j \quad (\text{I-35})$$

I.4.3.2. Forme cartésienne

Soient :

$$V_i = e_i + jf_i \quad (\text{I-36})$$

$$Y_{ij} = G_{ij} + B_{ij} \quad (\text{I-37})$$

Donc :

$$P_i = e_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) + f_i \sum_{j=1}^n (B_{ij} f_j + G_{ij} e_j) \quad (\text{I-38})$$

$$Q_i = f_i \sum_{j=1}^n (B_{ij} f_j - G_{ij} e_j) - f_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} e_j + B_{ij} f_j) \quad (\text{I-39})$$

I.4.3.3. Forme polaire

Soit :

$$V_i = |V_i| \cdot e^{j\theta_i} \quad (\text{I-40})$$

$$Y_{ij} = |Y_{ij}| \cdot e^{j\varphi_{ij}} \quad (\text{I-41})$$

D'où :

$$S_i = \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_i| |V_j| e^{j(\theta_i - \theta_j - \varphi_{ij})} \quad (\text{I-42})$$

$$P_i = \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_i| |V_j| \cos(\theta_i - \theta_j - \varphi_{ij}) \quad (\text{I-43})$$

Pour $i = 1:n$

$$Q_i = \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_i| |V_j| \sin(\theta_i - \theta_j - \varphi_{ij}) \quad (\text{I-44})$$

I.4.3.4. Forme hybride

$$\begin{cases} P_i = |V_i| \sum_{j=1}^n |V_j| [G_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) - B_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j)] \\ Q_i = |V_i| \sum_{j=1}^n |V_j| [-G_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) + B_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j)] \end{cases} \quad (\text{I-45})$$

I.4.4. Calcul de l'écoulement de puissance par la forme hybride

D'après la forme hybride donnée par la relation (I-45) on pose :

$$\begin{cases} P_i = |V_i| \sum_{j=1}^n |V_j| [G_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) - B_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j)] = F_{ip} \\ Q_i = |V_i| \sum_{j=1}^n |V_j| [-G_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) + B_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j)] = F_{iq} \end{cases} \quad (\text{I-46})$$

Avec :

F_{ip} et F_{iq} sont des fonctions de tension et de phase.

Après le développement de F_{ip} et F_{iq} en série de TAYLOR autour de la première approximation et l'élimination des éléments d'ordre supérieur on aura les deux fonctions P_i et Q_i sous la forme suivante:

$$\begin{cases} P_i = F_{ip}^{(0)} + \left(\frac{\partial F_{ip}}{\partial \theta_1}\right)^{(0)} \cdot \Delta\theta_1^{(0)} + \dots + \left(\frac{\partial F_{ip}}{\partial \theta_n}\right)^{(0)} \cdot \Delta\theta_n^{(0)} + \left(\frac{\partial F_{ip}}{\partial |V_1|}\right)^{(0)} \cdot \Delta|V_1|^{(0)} + \dots + \left(\frac{\partial F_{ip}}{\partial |V_n|}\right)^{(0)} \cdot \Delta|V_n|^{(0)} \\ P_i = F_{iq}^{(0)} + \left(\frac{\partial F_{iq}}{\partial \theta_1}\right)^{(0)} \cdot \Delta\theta_1^{(0)} + \dots + \left(\frac{\partial F_{iq}}{\partial \theta_n}\right)^{(0)} \cdot \Delta\theta_n^{(0)} + \left(\frac{\partial F_{iq}}{\partial |V_1|}\right)^{(0)} \cdot \Delta|V_1|^{(0)} + \dots + \left(\frac{\partial F_{iq}}{\partial |V_n|}\right)^{(0)} \cdot \Delta|V_n|^{(0)} \end{cases} \quad (I-47)$$

L'amplitude et la phase du jeu de barre de référence sont connues, le développement doit donner $2(n-1)$ équations linéaires [10].

Sous forme matricielle on a :

$$\begin{bmatrix} P_2 - F_{ip}^{(0)} \\ \vdots \\ P_n - F_{ip}^{(0)} \\ Q_2 - F_{iq}^{(0)} \\ \vdots \\ Q_n - F_{nq}^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial F_{2P}}{\partial \theta_2}\right)^{(0)} & \dots & \dots & \left(\frac{\partial F_{2P}}{\partial \theta_n}\right)^{(0)} & \left(\frac{\partial F_{2P}}{\partial |V_2|}\right)^{(0)} & \dots & \dots & \left(\frac{\partial F_{2P}}{\partial |V_n|}\right)^{(0)} \\ \vdots & & & \vdots & \vdots & & & \vdots \\ \left(\frac{\partial F_{nP}}{\partial \theta_2}\right)^{(0)} & \dots & \dots & \left(\frac{\partial F_{nP}}{\partial \theta_n}\right)^{(0)} & \left(\frac{\partial F_{nP}}{\partial |V_2|}\right)^{(0)} & \dots & \dots & \left(\frac{\partial F_{nP}}{\partial |V_n|}\right)^{(0)} \\ \left(\frac{\partial F_{2q}}{\partial \theta_2}\right)^{(0)} & \dots & \dots & \left(\frac{\partial F_{2q}}{\partial \theta_n}\right)^{(0)} & \left(\frac{\partial F_{2q}}{\partial |V_2|}\right)^{(0)} & \dots & \dots & \left(\frac{\partial F_{2q}}{\partial |V_n|}\right)^{(0)} \\ \vdots & & & \vdots & \vdots & & & \vdots \\ \left(\frac{\partial F_{nq}}{\partial \theta_2}\right)^{(0)} & \dots & \dots & \left(\frac{\partial F_{nq}}{\partial \theta_n}\right)^{(0)} & \left(\frac{\partial F_{nq}}{\partial |V_2|}\right)^{(0)} & \dots & \dots & \left(\frac{\partial F_{nq}}{\partial |V_n|}\right)^{(0)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta\theta_2^{(0)} \\ \vdots \\ \Delta\theta_n^{(0)} \\ \Delta|V_2|^{(0)} \\ \vdots \\ \Delta|V_n|^{(0)} \end{bmatrix} \quad (I-48)$$

$$\begin{bmatrix} P_2 - F_{ip}^{(0)} \\ \vdots \\ P_n - F_{ip}^{(0)} \\ Q_2 - F_{iq}^{(0)} \\ \vdots \\ Q_n - F_{nq}^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P^{(0)} \\ \Delta Q^{(0)} \end{bmatrix} \quad (I-49)$$

On peut écrire le système comme suit:

$$\begin{bmatrix} \Delta P^{(0)} \\ \Delta Q^{(0)} \end{bmatrix} = [J^{(0)}] * \begin{bmatrix} \Delta\theta^{(0)} \\ \Delta V^{(0)} \end{bmatrix} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} \Delta\theta^{(0)} \\ \Delta V^{(0)} \end{bmatrix} = [J]^{-1(0)} * \begin{bmatrix} \Delta P^{(0)} \\ \Delta Q^{(0)} \end{bmatrix} \quad (I-50)$$

On rappelle que :

$$\begin{aligned} \Delta\theta^{(k)} &= \theta^{(k+1)} - \theta^{(k)} \\ \theta^{(k+1)} &= \Delta\theta^{(k)} + \theta^{(k)} \end{aligned} \quad (I-51)$$

Et que :

$$\Delta|V|^{(k)} = |V|^{(k+1)} - |V|^{(k)} \quad (\text{I-52})$$

Alors :

$$|V|^{(k+1)} = \Delta|V|^{(k)} + |V|^{(k)} \quad (\text{I-53})$$

Remplaçant (I-51) et (I-52) dans (I-50), on aura:

$$\begin{bmatrix} \theta^{(k+1)} \\ |V|^{(k+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta^{(k)} \\ |V|^{(k)} \end{bmatrix} + [J^{(k)}]^{-1} * \begin{bmatrix} \Delta P^{(k)} \\ \Delta Q^{(k)} \end{bmatrix} \quad (\text{I-54})$$

D'une manière générale

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} = [J]^{-1} * \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (\text{I-55})$$

Avec :

[J]: Matrice Jacobien exprimée comme suit :

$$[J] = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix}$$

Avec J_1, J_2, J_3 et J_4 : Sont les sous matrices de la matrice Jacobien, où :

$$J_1 = \frac{\partial P}{\partial \theta} \quad J_2 = \frac{\partial P}{\partial |V|} \quad J_3 = \frac{\partial Q}{\partial \theta} \quad J_4 = \frac{\partial Q}{\partial |V|} \quad (\text{I-56})$$

I.4.4.1. Détermination des éléments du Jacobien

En dérivant les équations de puissance active et réactive par rapport θ à $|V|$, on aura :

A. Eléments de J_1

- **Eléments de la diagonale**

$$\frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} = \sum_{j=1}^n |V_i| \cdot |V_j| \cdot [B_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) - G_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j)] \quad (\text{I-57})$$

- **Eléments hors de la diagonale**

$$\frac{\partial P_i}{\partial \theta_j} = \sum_{j=1}^n |V_i| \cdot |V_j| \cdot [G_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) - B_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j)] \quad (\text{I-58})$$

B. Eléments de J_2 • **Eléments de la diagonale**

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = \sum_{j=1}^n |V_j| \cdot [G_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) + B_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j)] \quad (\text{I-59})$$

• **Eléments hors de la diagonale**

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_j|} = \sum_{j=1}^n |V_i| \cdot [G_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) + B_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j)] \quad (\text{I-60})$$

C. Eléments de J_3 • **Eléments de la diagonale**

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} = \sum_{j=1}^n |V_i| \cdot |V_j| \cdot [G_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) + B_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j)] \quad (\text{I-61})$$

• **Eléments hors de la diagonale**

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \theta_j} = - \sum_{j=1}^n |V_i| \cdot |V_j| \cdot [G_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) + B_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j)] \quad (\text{I-62})$$

D. Eléments de J_4 • **Eléments de la diagonale**

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = \sum_{j=1}^n |V_j| \cdot [G_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) - B_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j)] \quad (\text{I-63})$$

• **Eléments hors de la diagonale**

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_j|} = \sum_{j=1}^n |V_i| \cdot [G_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) - B_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j)] \quad (\text{I-64})$$

Pour les accès $(P, |V|)$ où le module de la tension est spécifié et la puissance réactive est inconnue. Les équations de ΔQ dans les systèmes d'équations précédents doivent être

remplacées par les équations régissant le module de la tension soit $|\Delta V|^2$ en fonction de $|\Delta V|$ et θ . Par conséquent, les éléments de la ligne correspondants à chaque accès $(P, |V|)$ dans J_3 et J_4 doivent être remplacés par :

$$\frac{\partial |V_i|^2}{\partial \theta_j} = 0 \quad (\text{I-65})$$

Et :

$$\frac{\partial |V_i|^2}{\partial \theta_j} = \begin{cases} 2|V_i| & \text{si } i = j \\ 0 & \text{si } i \neq j \end{cases} \quad (\text{I-66})$$

Avec :

$$\Delta |V_i^k|^2 = (V_{i \text{ spécifique}}) - (|V_i^k|)^2 \quad (\text{I-67})$$

En résumé :

- Pour l'accès (P, Q) , on calcul les résidus

$$\begin{cases} \Delta P_i^k = P_{i \text{ spé}} - P_i^k \\ \Delta Q_i^k = Q_{i \text{ spé}} - Q_i^k \end{cases} \quad (\text{I-68})$$

Avec :

$P_{i \text{ spé}}$ $Q_{i \text{ spé}}$: Puissances spécifiées.

- Pour l'accès $(P, |V|)$, on calcul :

$$\begin{cases} \Delta P_i^k = P_{i \text{ spé}} - P_i^k \\ \Delta |V_i^k|^2 = |V_{i \text{ spé}}|^2 - |V_i^k|^2 \end{cases} \quad (\text{I-69})$$

I.4.4.2. Algorithme de calcul du transit de puissance par la méthode de Newton-Raphson

- 1) lire les données des lignes et accès.
- 2) Définir le critère de convergence.
- 3) Prendre les valeurs initiales des tensions aux accès :

$V_i = (|V_{isp}|, 0)$ avec $i = 1$ pour l'accès bilan.

$V_i = (|V_{isp}|, P_{isp})$ avec $i = 2, \dots, n$ pour les accès générateurs.

- 4) former la matrice admittance nodale de réseau Y_{bus}
- 5) Mettre le compteur d'itération à zéro ($k = 0$).
- 6) Mettre le compteur d'accès à 1 ($i = 1$).
- 7) Si I est un accès bilan, allé à la ligne 13.
- 8) Calculer P_i^k et Q_i^k .
- 9) Calculer : $\Delta P_i^k = P_{isp} - P_i^k$
- 10) Si I est un accès générateur (P,Q), aller à l'étape 12.
- 11) Comparer Q_i^k . Avec ses limites :
 Si Q_i^k viole ses limites, alors fixer Q_i^k à sa limite violée et aller à la ligne 12.
 Sinon, calculer $|\Delta V_i^k|^2 = |V_{isp}|^2 - |V_i|^2$ et aller à la ligne 13.
- 12) calculer $\Delta Q_i^k = Q_{isp} - Q_i^k$
- 13) mettre $I = I + 1$
- 14) Si $I \leq n$, aller à la ligne 7.
- 15) Déterminer le max de $|\Delta P_i^k|$ et $|\Delta Q_i^k|$
- 16) Si $|\Delta P_i^k| \leq \varepsilon$ et $|\Delta Q_i^k| \leq \varepsilon$, aller à la ligne 21.
- 17) Calculer les éléments de Jacobien.
- 18) Résoudre le système d'équation (I-55).
- 19) Calculer la nouvelle valeur de $|\Delta V_i|^{k+1} = |V_i|^k + |\Delta V_i^k|$
- 20) Incrémenter le compteur ($k = k+1$) et aller à la ligne 6.
- 21) Afficher les résultats.

I.5. Conclusion

Dans la première partie de ce chapitre on a étudié le calcul des puissances transitant dans un réseau électrique qui nécessite le calcul des tensions complexes aux différents points de fonctionnement, ces tensions sont données en fonction des puissances d'où la nécessité de résoudre un système d'équations non linéaires. La méthode de Newton-Raphson est l'une des solutions pour résoudre ce système d'équations.

La modélisation des éléments d'un réseau électrique nous permet de connaître les expressions des impédances des éléments constituant un réseau électrique tel, à base de ces données nous accéderons à la formation de la matrice admittance nodale dont ses éléments sont utilisés pour ce fameux calcul du transit de puissance.

Actuellement il existe une méthode moderne pour le contrôle d'écoulement de puissance et des tensions dans les réseaux électriques. Cette méthode utilise les dispositifs FACTS (basées sur l'électronique de puissance) qu'ils seront traités dans le chapitre qui suit.

Chapitre II

Les systèmes FACTS

Descriptions générales des systèmes FACTS

II.1 Introduction

Avec le développement technologique et industriel que vit le monde entier la demande en énergie électrique est en augmentation continue et sans cesse. Pour satisfaire ces besoins et acheminer cette énergie aux points de consommation dispersés sur un large espace géographique; les réseaux électriques, ayant des capacités de transit limité à cause des limites thermique des lignes, doivent s'élargir et de nouvelles lignes d'extension seront ajoutées [7].

Les moyens classiques de contrôle où l'amélioration du comportement d'un réseau électrique pourrait dans l'avenir s'avérer trop lents et insuffisants pour répondre efficacement aux perturbations du réseau, compte tenu notamment des nouvelles contraintes [8].

Face à ce problème et devant les contraintes environnementale, écologique et économique de reconstructions de nouvelles lignes, 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 et d'augmenter leurs capacités de transfert [7].

Le développement des dispositifs FACTS est essentiellement dû aux progrès réalisés dans le domaine des semi-conducteurs de puissance et plus particulièrement des éléments commandés tels le thyristor et le thyristor GTO. Les FACTS représentent une alternative aux dispositifs de réglage de puissance utilisant des techniques passives: bobine d'induction et condensateur déclenchés par disjoncteur, transformateur déphaseur à régleur en charge mécanique,...etc. dans les dispositifs FACTS, les interrupteurs électromécaniques sont remplacés par des interrupteurs électroniques. Ils disposent ainsi de vitesses de commande très élevées et ne rencontrent pas les problèmes d'usure de leurs prédécesseurs. De ce fait, les FACTS possèdent une très grande fiabilité et une flexibilité pratiquement sans limite [9].

II.2. Généralités sur les FACTS

Le tableau de la figure II.1 représente les grandes catégories des dispositifs de contrôle des réseaux électriques, la colonne sur la gauche contient les systèmes conventionnels constitués de composant de base (R.L.C) et transformateurs de valeurs fixes (compensation fixe) ou variable commandés par des interrupteur mécanique. Les dispositifs

FACTS contient également les mêmes composants mais rapidement commander avec des interrupteurs statiques et convertisseurs de l'électronique de puissance [10].

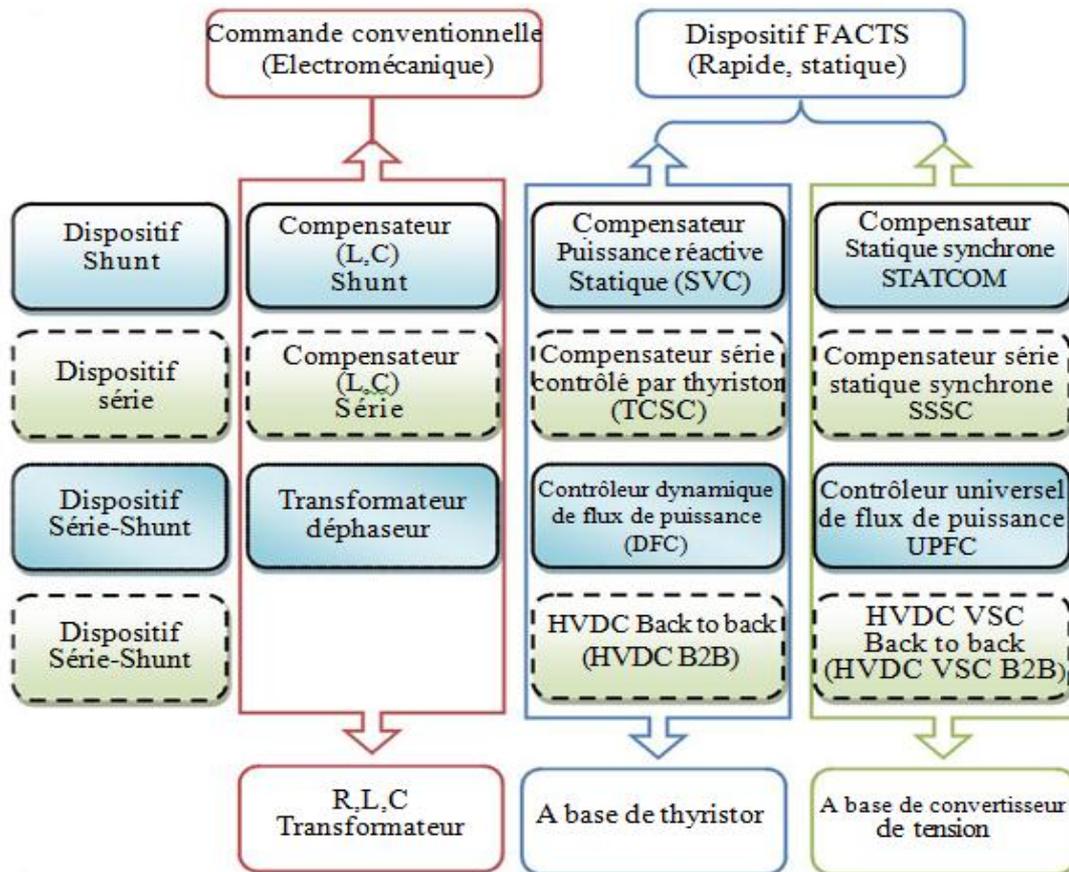


Figure II.1 Principaux Dispositifs FACTS [10]

Les dispositifs FACTS, insérés dans un réseau électrique, peuvent toucher divers domaines tels que le côté technique, économique et environnemental, et satisfaire plusieurs besoins comme [9]:

- Compenser l'énergie réactive Réduire des pertes actives totales.
- La contribution à l'exploitation optimale d'un système électrique par réduction des pertes de puissance et d'amélioration du profil de tension,
- L'augmentations de la capacité des transites de puissances de façon à éliminer les surcharges dans les lignes ou les transformateurs ainsi pour éviter les flux de bouclage dans le réseau et le problème de la résonance sub-synchrone.
- L'extension de la réserve de stabilité transitoire en régime dynamique;

- L'amortissement des oscillations de puissances;
- La permission d'un meilleur contrôle et d'une meilleure rapidité de gestion de l'écoulement de Puissance;

Un autre avantage des équipements FACTS, réside qu'il est possible de déplacer une installation en l'espace de quelques mois, si les conditions d'exploitation venaient à changer en rendant le dispositif inutile dans son emplacement initial.

De manière générale, les dispositifs FACTS agissent en fournissant ou en absorbant de la puissance réactive, en augmentant ou en réduisant la tension aux jeux de barres, en contrôlant l'impédance des lignes ou en modifiant les phases des tensions

II.3 Les systèmes FACTS

D'après IEEE, FACTS qui est l'abréviation de «Flexible AC Transmission Systems» est défini comme suit: « Les systèmes de transmission du courant alternatif incorporant des contrôleurs à base d'électronique de puissance et autres contrôleurs statiques afin d'améliorer la contrôlabilité des réseaux électriques ainsi que la capacité de transfert des lignes »[10].

La technologie FACTS n'est pas limitée en un seul dispositif mais elle regroupe une collection de dispositifs à base de l'électronique de puissance implantés dans les réseaux électriques afin de mieux contrôler le flux de puissance et augmenter la capacité de transit de leurs lignes. Par action de contrôle rapide de ces systèmes sur l'ensemble des paramètres du réseau: tension, impédance, déphasage ...etc. Ils permettent d'améliorer les marges de stabilité et assurer une meilleure flexibilité du transfert d'énergie [11].

- Flexibilité de Transmission de l'énergie: l'aptitude d'accommoder aux changements du système énergétique et aux conditions de fonctionnement en maintenant l'état stable et de suffisantes marges de stabilité transitoire.

La puissance active P transitée entre deux réseaux de tensions V_1 et V_2 présentant un angle de transport δ (déphasage entre V_1 et V_2) et connectés par une liaison d'impédance X est donnée par l'équation suivante:

$$P = \frac{V_1 V_2}{X} \sin \delta \quad (\text{II-1})$$

Cette équation montre qu'il est possible d'augmenter la puissance active transitée entre deux réseaux soit en maintenant la tension des systèmes, soit en augmentant l'angle de transport entre les deux systèmes, soit en réduisant artificiellement l'impédance de la liaison.

En jouant sur un ou plusieurs de ces paramètres, les FACTS permettent un contrôle précis des transits de puissance réactive, une optimisation des transits de puissance active sur les installations existantes et une amélioration de la stabilité dynamique du réseau.

II.3.1. Structures de base des systèmes FACTS

La majorité des systèmes FACTS possèdent des éléments contrôlables analogues dont les plus courants sont les suivants:

II.3.1.1. Inductance commandée par thyristor TCR

Un TCR (Thyristors Controlled Reactor) est composé d'une inductance fixe mise en série avec une valve à thyristors (gradateur) d'après la **figure II.2**, qui fait varier le courant à travers l'inductance et cela en variant l'angle d'amorçage des thyristors compris entre 90° et 180° . Le TCR est caractérisé par sa commande continue et par sa génération d'harmoniques sur le réseau [12].

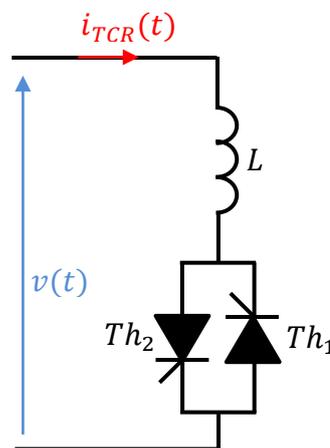


Figure II.2 Modèle d'un TCR

Avec :

$$\begin{cases} \bar{I}_{TCR} = -jB_{TCR}\bar{V} \\ B_{TCR} = \frac{2(\pi-\alpha)+\sin 2\alpha}{\pi L\omega} \end{cases} \quad (II.2)$$

On ajoute souvent un filtre à courant alternatif au montage du SVC. Son rôle est de réduire les harmoniques introduites par l'utilisation du TCR. Pour cela le filtre fournit une puissance réactive au réseau.

II.3.1.2. Capacité commutée par thyristors TSC

Il se compose d'un condensateur branché en série avec une valve à thyristors bidirectionnelle qui sert de commutateur (**figure II.3**). Celle-ci permet la mise en marche ou l'arrêt du condensateur mais sans introduire d'harmoniques au réseau. Cela est possible car la commutation intervient lorsque la tension résiduelle du condensateur est égale à la tension du réseau et, donc, le courant s'annule en ce point. Le TSC fournit donc une solution plus rapide et plus fiable à la commutation de condensateurs que les dispositifs mécaniques conventionnels de commutation [13].

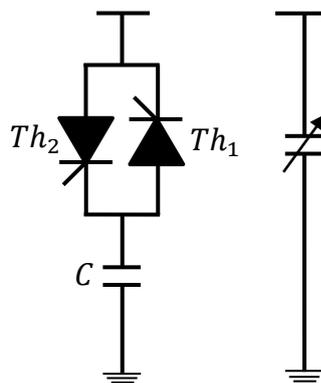


Figure II.3 Modèle d'un TSC

II.3.1.3. Inductance commutée par thyristors TSR

Le TSR est un TCR mais sans commande de la phase du courant, il est enclenché et déclenché comme un TSC. L'avantage du TSR par rapport au TCR réside dans l'absence de formation de courants harmoniques [12].

II.3.1.4. Condensateur commuté mécaniquement MSC

Le MSC comme le montre la **figure II.4** est une branche accordée comprenant un banc de condensateurs et une bobine d'induction. Il est conçu pour n'être commuté qu'un petit nombre de fois par jour, vu que les commutations sont effectuées par des disjoncteurs. Le but du MSC consiste à fournir de la puissance réactive en régime permanent [12].

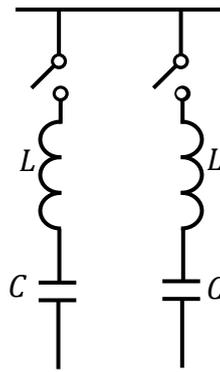


Figure II.4 Structure de base d'un MSC

II.4. Types des dispositifs FACTS

Typiquement les systèmes FACTS sont divisés en trois catégories:

- Les compensateurs parallèles
- Les compensateurs séries
- Les compensateurs hybrides (série - parallèle)

II.4.1. Compensateurs Parallèles [14]

Les compensateurs parallèles sont utilisés depuis longtemps dans les réseaux électriques, leurs objectifs principaux sont le contrôle des tensions aux niveaux désirés lorsqu'il y a un changement sur les conditions du système et l'accroissement de la puissance transmissible dans les lignes. Le principe de compensation consiste à fournir ou à absorber de la puissance réactive de façon à modifier les caractéristiques naturelles des lignes pour les rendre plus compatibles avec la charge, de façon que le temps de réponse soit très court, Actuellement, le compensateur parallèle le plus utilisé dans les réseaux électriques est le:

- ✚ **SVC** Compensateur statique d'énergie réactive (Static Var Compensator);
- ✚ **STATCOM** Compensateur statique synchrone (Static Synchronous Compensator)

Ils consistent en une impédance variable, source variable ou une combinaison des deux. Ils injectent un courant dans le réseau à travers le point de connexion. Ils sont principalement pour contrôler les tensions des nœuds [15].

Le courant réactif est injecté dans la ligne pour maintenir la magnitude du voltage. La puissance active transmissible est augmentée mais la puissance réactive sera plus fournie **figure II.5** [16].

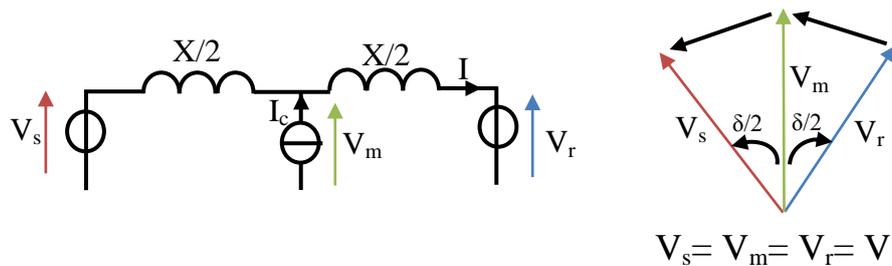


Figure II.5 Compensateurs Shunt

II.4.2. Compensateurs série [14]

Les dispositifs FACTS de compensation série sont des impédances variables (inductives, capacitives) ou des sources de tensions variables employées afin de réduire la partie réactive de l'impédance de la ligne, Ils agissent généralement en insérant une tension capacitive sur la ligne de transport qui permet de compenser la chute de tension inductive (**Figure II.6**).

Leurs applications principales sont:

- La commande statique et dynamique des flux de puissances ;
- Amélioration de la stabilité angulaire;
- L'amortissement des oscillations de puissance;
- L'équilibrage des flux de charge dans les réseaux de transport ;
- Réduction des problèmes dus aux phénomènes de résonance sub synchrone ;
- Prévention des risques de rupture des arbres mécaniques,

Les compensateurs séries les plus connus sont les :

- ✚ TCSC : Condensateur Série Commandé par thyristor, (Thyristor Controlled Series Capacitor)
- ✚ SSSC (Static Synchronous Series Compensator)
- ✚ TCSR (Thyristor Controlled Series Reactor)

Les FACTS dans la compensation série modifient l'impédance de la ligne : la réactance (X) de la ligne est diminué, donc augmenter la puissance active transmissible. Cependant la puissance réactive doit être plus fournie (**Figure II.6**) [16].

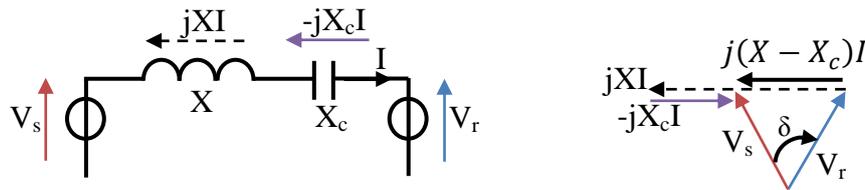


Figure II.6 Compensation série

II.4.3 Compensateurs hybrides (série-série et shunt-série) [16]

C'est une combinaison des dispositifs séries et shunts commandée d'une manière coordonnée afin d'accomplir un contrôle prédéfini. Ils sont donc capables d'agir sur les trois paramètres (tension, impédance et angle de déphasage) qui permettent de contrôler le transit de puissance sur une ligne de transport.

Un des compensateurs hybrides les plus connus sont les :

- UPFC : Contrôleur universel de flux de puissance, (Unified Power Flow Controller)
- TCPAR (Thyristor Controlled Phase Angle Regulator)

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

	Contrôle de charge	Contrôle de tension	Stabilité transitoire	Amplitude des oscillations
SVC	*	***	*	**
STATCOM	*	***	*	**
TCSC	**	*	***	**
SSSC	***	*	***	**
TCPAR	***	**	*	**
UPFC	***	***	***	***

Influence : Petite : * Moyenne : ** Forte : ***

Tableau II.1 Application des FACTS à la résolution des problèmes des réseaux [18]

Le tableau II.2 montre des chiffres approximatifs des dispositifs FACTS installés dans le monde avec les puissances totales installées.

Type	Nombre	Puissances installée (MVA)
SVC	600	90.000
STATCOM	15	1.200
TCSC	10	2.000
HVDC B2B	41	14.000
UPFC	2-3	250

Tableau II.2 Dispositifs FACTS installés dans le monde

Parmi les équipements FACTS, ceux qui ont des applications spécifiques tel le maintien de la tension et le contrôle de l'écoulement de puissance : le SVC étant le plus efficace dans le maintien de la tension et le TCSC est le meilleur choix pour un contrôle approprié du transit de puissance et par suite la réduction des pertes actives dans le réseau [9].

De ce fait, nous avons opté, dans la suite de notre travail, pour l'utilisation combinée du SVC et du TCSC en vue d'assurer de meilleures performances dynamiques du système avec plus de rentabilité et d'efficacité [9].

II.5. Modes de fonctionnement du SVC et TCSC

II.5.1. Mode de fonctionnement du SVC

Les régimes de fonctionnement du SVC [21] :

a- Mode de déviation : Les thyristors sont en pleine conduction. Le circuit est alors la mise en parallèle de l'inductance et de la capacité.

b- Mode inductif poussé : Lorsque l'angle d'amorçage α est inférieur à la valeur de résonance le circuit agit comme une inductance.

c- Mode capacitif poussé : Quand l'angle d'amorçage est au-delà de l'angle de résonance, le circuit se comporte comme une capacité.

d- Mode bloqué : Les thyristors sont bloqués et seule la capacité contribue dans la réactance du circuit.

Il existe plusieurs dispositions de SVC illustrés par les figures (II.7), (II.8), (II.9) et (II.10).

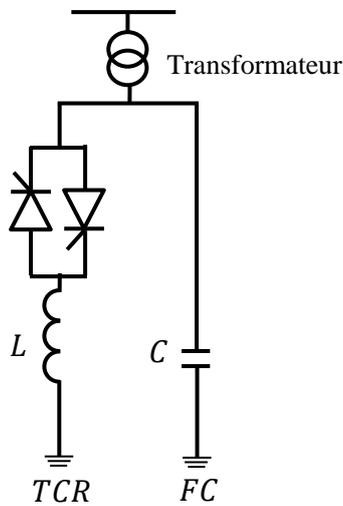


Figure II.7 Structure d'un TCR-FC

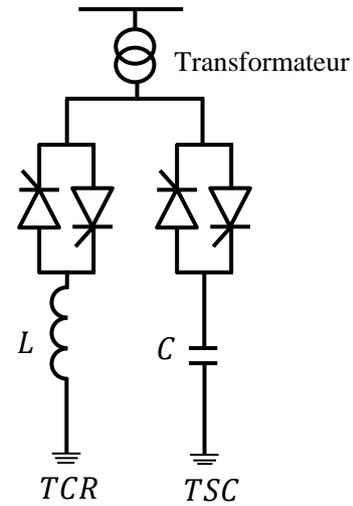


Figure II.8 Structure d'un TCR-TSC

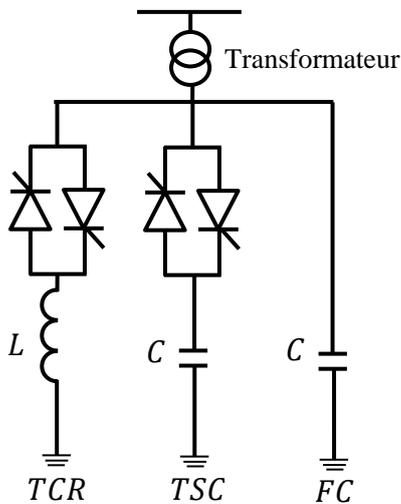


Figure II.9 Structure d'un TCR-TSC-FC

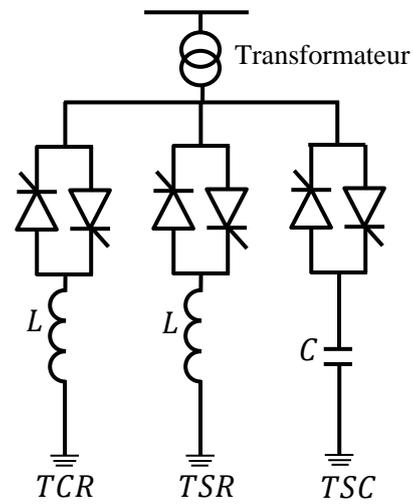


Figure II.10 Structure d'un TCR-TSR-TSC

II.5.2. Mode de fonctionnement du TCSC [19]

II.5.2.1. Mode de blocage

Lorsque la valve à thyristor n'est pas enclenchée et que les thyristors restent à l'état non passant, le TCSC travaille en mode de blocage, le courant I_L de la ligne passe alors uniquement à travers le banc de condensateurs, ainsi :

$$\bar{V}_c = jX_c \bar{I}_L \quad (\text{II-3})$$

Dans ce mode, le TCSC fonctionne comme condensateur série fixe avec un facteur de survoltage égal à 1.

II.5.2.2. Mode by-pass

Si la valve à thyristor est commandée en permanence, elle reste constamment à l'état passant et le TCSC se comporte comme la connexion parallèle d'un banc de condensateurs série et de réactance de la branche de la valve à thyristors.

Dans ce mode, la tension du condensateur pour un courant de ligne donné est beaucoup plus faible qu'en mode de blocage.

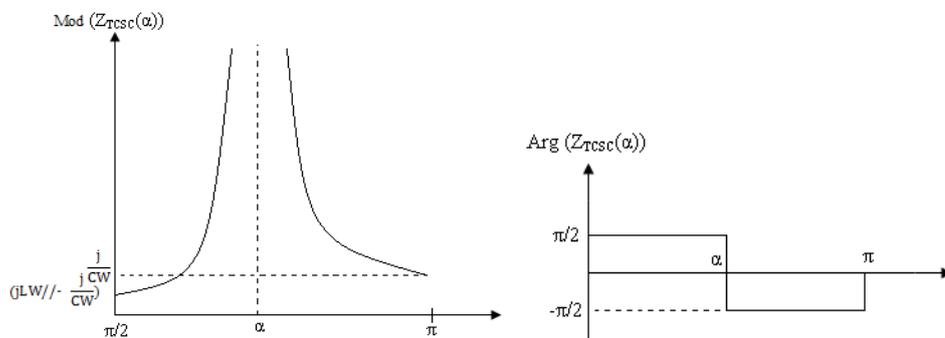


Figure II.11 Module et phase de l'impédance du TCSC.

II.6. Modélisation du SVC et TCSC

L'introduction des FACTS dans les réseaux pour la compensation impose la prise en compte de leurs effets sur le transit de puissances. Cela conduit à recalculer le *load flow* et à introduire des modifications dans les méthodes de calculs pour prendre en considération la présence des dispositifs FACTS. Des modèles représentant les dispositifs FACTS ont été développés depuis le début des années 1990, pour étudier leur comportement en régime permanent, régime transitoire et leur effet sur la protection des réseaux [12].

La modélisation des FACTS consiste à représenter les dispositifs sous certaines hypothèses et dans un domaine de fréquence choisi. Différentes façons ont été développées pour l'étude des dispositifs FACTS dans les régimes permanents chacune utilisant une méthode différente pour intégrer les dispositifs FACTS dans le calcul de transit de puissance [12].

On distingue trois méthodes les plus utilisées dans la modélisation des dispositifs FACTS :

- L'injection de la puissance équivalente
- La création d'un nœud fictif.
- La modification de la matrice d'admittance nodale de la ligne.

II.6.1. Modélisation du SVC

Le SVC est un dispositif FACTS de première génération connecté en shunt à la ligne et qui permet la génération ou l'absorption de l'énergie réactive et cela pour maintenir un niveau de tension désiré, il est le plus souvent constitué de trois inductances connectées en triangle et réglées indépendamment par un variateur de courant à thyristors. Cela permet de rééquilibrer le réseau par une action différenciée sur chacune des phases. On place un banc triphasé de condensateurs commutables en gradins pour compléter ce dispositif [12].

La configuration la plus avancée du SVC est illustrée par la **figure II.12**

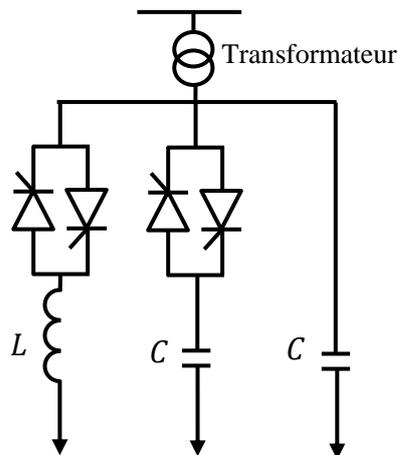


Figure II.12 Configuration la plus avancée du SVC

Le courant traversant la réactance est contrôlé par des valves à thyristors. Le système de contrôle qui génère les impulsions de gâchette des thyristors mesure soit la tension au point de connexion soit la puissance réactive dans la charge associée et calcule l'instant auquel il faut amorcer les valves [20].

Si le SVC fonctionne en réglage de tension, le système de contrôle ajuste le courant dans le SVC de façon à ce que le courant et la tension suivent la courbe caractéristique représentée **Figure II.13**. La courbe caractéristique est une droite dont la pente et la tension de référence peuvent être ajustées par le système de contrôle. Lorsque la tension du réseau diminue, le

courant du SVC devient plus capacitif (en avance par rapport à la tension) ce qui tend à réduire la chute de tension. De même lorsque la tension augmente, le courant du SVC devient plus inductif (en retard par rapport à la tension) ce qui contribue à maintenir la tension [20].

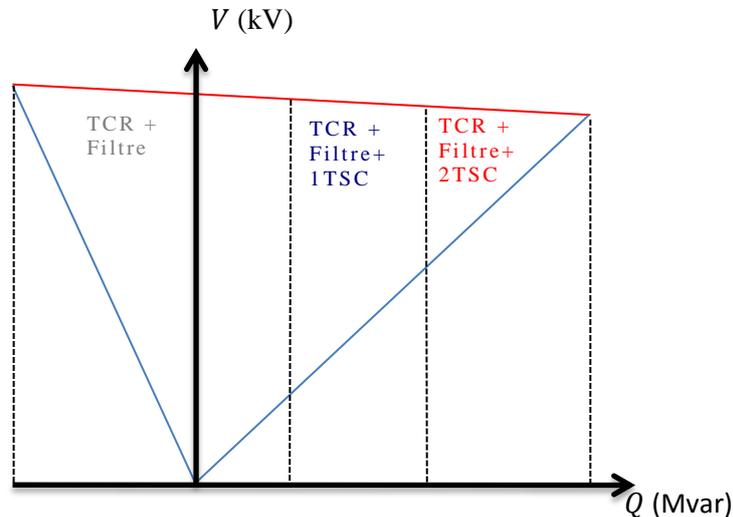


Figure II.13 Courbe caractéristique tension-courant du SVC

II.6.1.1. La réactance d'un SVC [12]

L'expression de réactance du SVC X_{SVC} est donnée par :

$$X_{SVC} = \frac{\pi \cdot X_L}{2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha - \pi \frac{X_L}{X_C}} \quad (\text{II- 4})$$

Avec : X_L : Réactance inductive du SVC

X_C : Réactance capacitive du SVC

α : L'angle d'amorçage

II.6.1.2. Construction de matrice nodale Y_{BUS}

II.6.1.2.1. SVC placé en début de ligne [12]

Pour un SVC branché au jeu de barre m **figure II.14**, la contribution du SVC à la nouvelle matrice admittance concerne l'élément shunt Y_{mm}^{Ligne} .

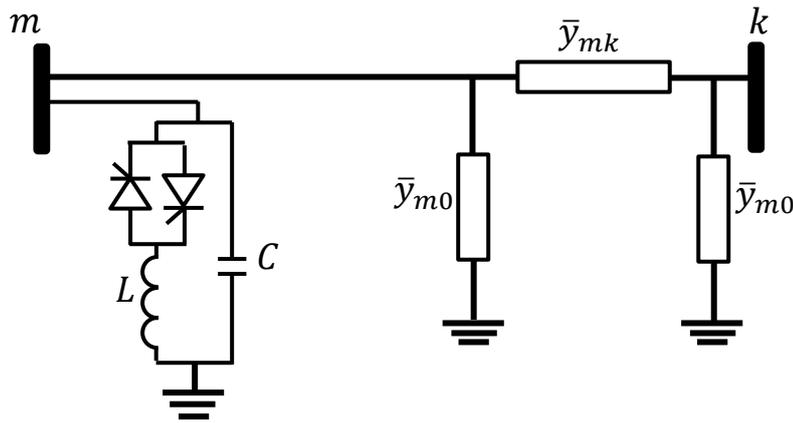


Figure II.14 Introduction d'un SVC dans une ligne

$$Y^{Ligne} = \begin{pmatrix} y_{mk} + y_{m0} & -y_{mk} \\ -y_{mk} & y_{mk} + y_{k0} \end{pmatrix} \quad (II-5.a)$$

Il en résulte la matrice admittance de la ligne modifiée par le SVC (II.5.b).

$$Y^{Ligne\ nouvelle} = \begin{pmatrix} y_{mk} + y_{m0} + y_{SVC} & -y_{mk} \\ -y_{mk} & y_{mk} + y_{k0} \end{pmatrix} \quad (II-5.b)$$

Tel que :

$$y_{SVC} = \frac{1}{x_{SVC}}$$

$$y_{SVC} = j \frac{1}{x_L x_C} \left[X_L - \frac{x_C}{\pi} (2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha) \right] \quad (II-6)$$

II.6.1.2.2. SVC placé au milieu d'une ligne [5]

Un SVC inséré au milieu d'une ligne du réseau conduit à des modifications de la matrice admittance nodale et du Jacobien qui sont détaillées dans ce qui suit. Lorsque le compensateur statique est inséré au milieu d'une ligne située entre deux nœuds k et m, et il la divise en deux tronçons identiques. Le SVC est relié au nœud additionnel "t" **Figure II.15**.

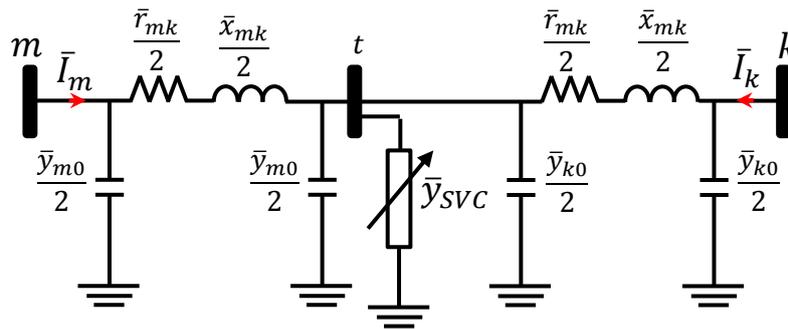


Figure II.15 SVC placé au milieu d'une ligne

Afin de prendre en compte ce nouveau nœud, une ligne et une colonne supplémentaires devraient être ajoutées à la matrice admittance nodale. Pour éviter d'avoir à changer le nombre de nœuds du réseau et donc la taille de la matrice d'admittance, une transformation étoile-triangle permet de réduire le système en supprimant le nœud t et en calculant les paramètres d'une ligne équivalente.

La figure II.16 illustre les étapes pour obtenir cette ligne équivalente.

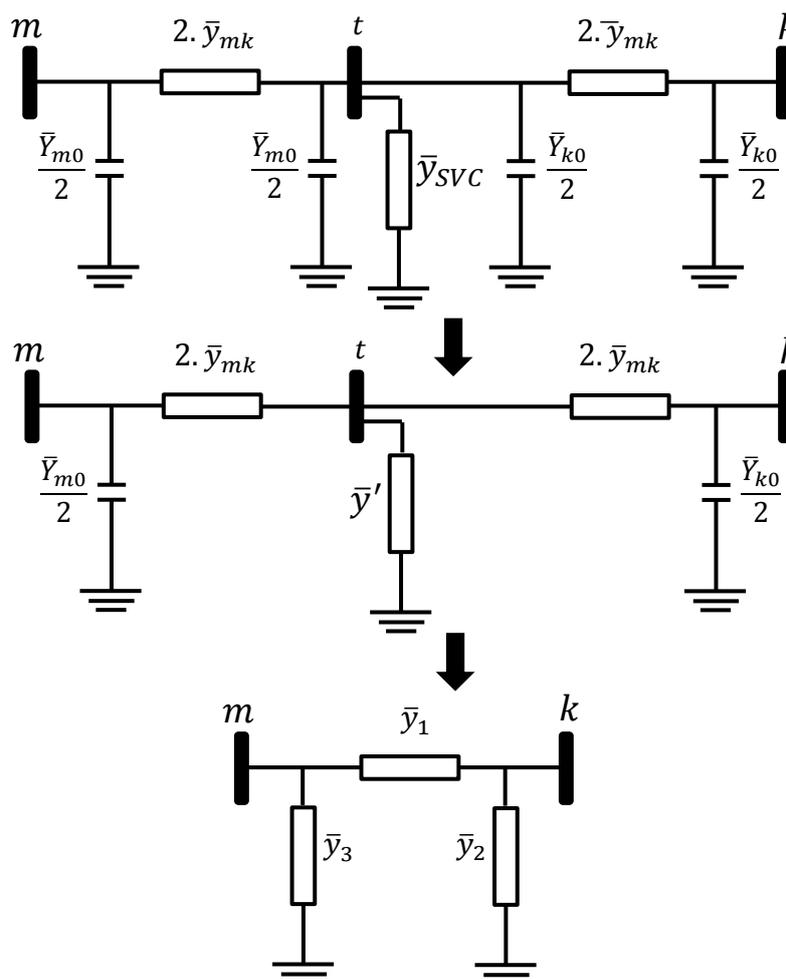


Figure II.16 Transformation Y-Δ

Tel que :

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{y}_1 = \frac{4\bar{y}_{mk}^2}{4\bar{y}_{mk} + \bar{y}_{SVC} + \frac{1}{2}\bar{y}_{m0} + \frac{1}{2}\bar{y}_{k0}} \\ \bar{y}_2 = \frac{\bar{y}_{mk}(2\bar{y}_{SVC} + \bar{y}_{m0} + \bar{y}_{k0})}{4\bar{y}_{mk} + \bar{y}_{SVC} + \frac{1}{2}\bar{y}_{m0} + \frac{1}{2}\bar{y}_{k0}} + \frac{1}{2}\bar{y}_{m0} \\ \bar{y}_3 = \frac{\bar{y}_{mk}(2\bar{y}_{SVC} + \bar{y}_{m0} + \bar{y}_{k0})}{4\bar{y}_{mk} + \bar{y}_{SVC} + \frac{1}{2}\bar{y}_{m0} + \frac{1}{2}\bar{y}_{k0}} + \frac{1}{2}\bar{y}_{k0} \end{array} \right. \quad (\text{II-7})$$

Tous les éléments de la matrice d'admittance d'une ligne avec un SVC en son milieu sont modifiés, tels que :

$$\bar{Y}_{\text{nouveau}}^{\text{ligne}} = \begin{pmatrix} \bar{Y}_{mm} & \bar{Y}_{mk} \\ \bar{Y}_{km} & \bar{Y}_{kk} \end{pmatrix} \quad (\text{II-8})$$

Avec : $\bar{Y}_{km} = \bar{Y}_{mk}$ et :

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{Y}_{mm} = \frac{4\bar{y}_{mk}^2 + \bar{y}_{mk}(2\bar{y}_{SVC} + \bar{y}_{m0} + \bar{y}_{k0})}{4\bar{y}_{mk} + \bar{y}_{SVC} + \frac{1}{2}\bar{y}_{m0} + \frac{1}{2}\bar{y}_{k0}} + \frac{1}{2}\bar{y}_{m0} \\ \bar{Y}_{kk} = \frac{4\bar{y}_{mk}^2 + \bar{y}_{mk}(2\bar{y}_{SVC} + \bar{y}_{m0} + \bar{y}_{k0})}{4\bar{y}_{mk} + \bar{y}_{SVC} + \frac{1}{2}\bar{y}_{m0} + \frac{1}{2}\bar{y}_{k0}} + \frac{1}{2}\bar{y}_{k0} \\ \bar{Y}_{km} = \frac{4\bar{y}_{mk}^2 + \bar{y}_{mk}(2\bar{y}_{SVC} + \bar{y}_{m0} + \bar{y}_{k0})}{4\bar{y}_{mk} + \bar{y}_{SVC} + \frac{1}{2}\bar{y}_{m0} + \frac{1}{2}\bar{y}_{k0}} + \frac{1}{2}\bar{y}_{k0} \end{array} \right. \quad (\text{II-9})$$

Modification de la matrice admittance : D'après (II-9), les éléments $Y_{mm}, Y_{kk}, Y_{mk}, Y_{km}$ vont être modifiés de manière à donner la nouvelle matrice admittance :

$$\bar{Y}_{\text{nouveau}} = \begin{bmatrix} \bar{Y}_{11} & \dots & \bar{Y}_{1m} & \dots & \bar{Y}_{1k} & \dots & \bar{Y}_{1n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \bar{Y}_{m1} & \dots & \bar{Y}_{mm}^{anc} + \bar{Y}_{mm}^{add} & \dots & \bar{Y}_{mk}^{anc} + \bar{Y}_{mk}^{add} & \dots & \bar{Y}_{mn} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \bar{Y}_{k1} & \dots & \bar{Y}_{km}^{anc} + \bar{Y}_{km}^{add} & \dots & \bar{Y}_{kk}^{anc} + \bar{Y}_{kk}^{add} & \dots & \bar{Y}_{kn} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \bar{Y}_{n1} & \dots & \bar{Y}_{nm} & \dots & \bar{Y}_{nk} & \dots & \bar{Y}_{nn} \end{bmatrix} \quad (\text{II-10})$$

Avec : \bar{Y}_{mm}^{anc} , \bar{Y}_{kk}^{anc} , \bar{Y}_{mk}^{anc} , \bar{Y}_{km}^{anc} sont les éléments de la matrice avant l'introduction du SVC :

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{Y}_{mk}^{add} = \frac{-4\bar{y}_{mk}^2}{4\bar{y}_{mk} + \bar{y}_{SVC} + \frac{1}{2}\bar{y}_{m0} + \frac{1}{2}\bar{y}_{k0}} + \bar{y}_{mk} \\ \bar{Y}_{kk}^{add} = \frac{4\bar{y}_{mk}^2 + \bar{y}_{mk}(2\bar{y}_{SVC} + \bar{y}_{m0} + \bar{y}_{k0})}{4\bar{y}_{mk} + \bar{y}_{SVC} + \frac{1}{2}\bar{y}_{m0} + \frac{1}{2}\bar{y}_{k0}} - \bar{y}_{km} - \frac{1}{2}\bar{y}_{k0} \\ \bar{Y}_{mk}^{add} = \frac{-4\bar{y}_{mk}^2}{4\bar{y}_{mk} + \bar{y}_{SVC} + \frac{1}{2}\bar{y}_{m0} + \frac{1}{2}\bar{y}_{k0}} + \bar{y}_{mk} \\ \bar{Y}_{km}^{add} = \frac{-4\bar{y}_{mk}^2}{4\bar{y}_{mk} + \bar{y}_{SVC} + \frac{1}{2}\bar{y}_{m0} + \frac{1}{2}\bar{y}_{k0}} + \bar{y}_{km} \end{array} \right. \quad (II-11)$$

II.6.2. Modélisation du (TCSC)

Le TCSC est un dispositif série qui permet le contrôle de l'énergie active transitant dans une ligne de transport et cela par l'introduction d'une réactance variable en série avec l'impédance de la ligne [12].

Le schéma de principe d'un TCSC est décrit par la **figure II.17** :

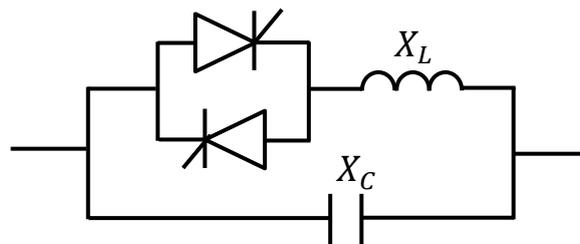


Figure II.17 Schéma de principe d'un TCSC

Le TCSC est composé d'une réactance couplée à un variateur de courant à thyristors composant un TCR qui est mis en parallèle avec un condensateur à capacité fixe. Ce dispositif permet un contrôle continu de la réactance offerte par le TCSC. Avec l'introduction de cette réactance X_{TCSC} la réactance globale de la ligne est modifiée est donc la puissance transitée dans la ligne sera modifiée [12].

II.6.2.1. Construction de matrice nodale Y_{bus} [12]

Le TCSC présente une réactance variable en fonction de l'angle α , on peut calculer la réactance du TCSC en fonction de l'angle d'amorçage α . En développant l'expression du courant en série de Fourier et en ne retenant que la composante fondamentale, on aura le résultat donné par l'expression suivante :

$$X_{TCSC}(\alpha) = \frac{\pi X_L}{2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha} \quad (\text{II-12})$$

Et en introduisant la capacité en parallèle avec le TCSC on aura l'expression suivante :

$$X_{TCSC}(\alpha) = j \frac{\pi X_L}{2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha - \pi \frac{X_L}{X_C}} \quad (\text{II-13})$$

- Insertion du TCSC à l'une des extrémités de la ligne :

Pour un TCSC introduit à l'une des extrémités d'une ligne comme montré dans la **figure II.18**, Par des transformations de type étoile – triangle, on construit la nouvelle matrice admittance de la ligne modifiée par le dispositif FACTS.

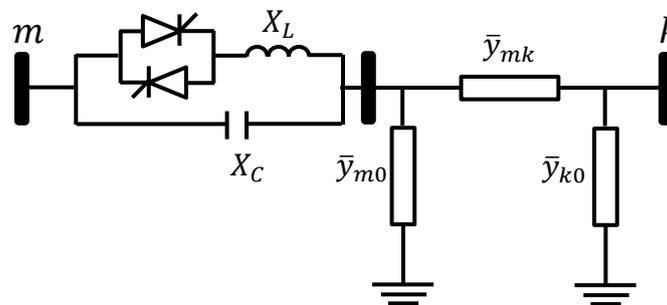


Figure II.18 Insertion d'un TCSC à l'extrémité d'une ligne

$$Y_{\text{nouveau}}^{\text{ligne}} = \begin{bmatrix} \frac{\bar{y}_{TCSC}}{\bar{y}_{TCSC} + \bar{y}_{mk} + \bar{y}_{m0}} (\bar{y}_{mk} + \bar{y}_{m0}) & -\frac{\bar{y}_{TCSC} \bar{y}_{mk}}{\bar{y}_{TCSC} + \bar{y}_{mk} + \bar{y}_{m0}} \\ \frac{\bar{y}_{TCSC} \bar{y}_{mk}}{\bar{y}_{TCSC} + \bar{y}_{mk} + \bar{y}_{m0}} & \frac{\bar{y}_{TCSC} \bar{y}_{mk}}{\bar{y}_{TCSC} + \bar{y}_{mk} + \bar{y}_{m0}} (\bar{y}_{mk} + \bar{y}_{m0}) + \bar{y}_{k0} \end{bmatrix} \quad (\text{II-14})$$

II.6.2.2 Insertion d'un TCSC au milieu de la ligne [5]

Lorsqu'un TCSC est placé dans une ligne reliant les nœuds m et k, il est directement intégré dans le schéma en Π de la ligne selon le modèle de la **figure II.19**

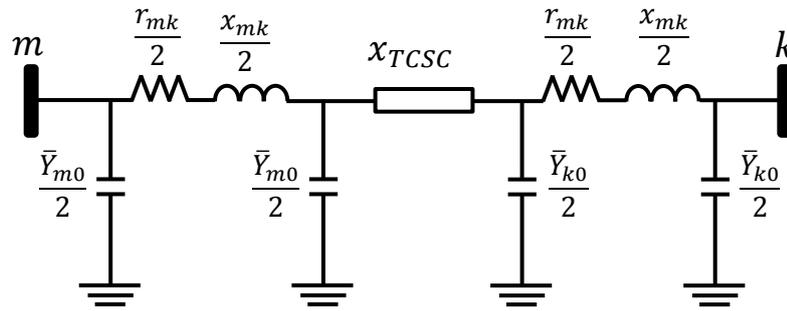


Figure II.19 TCSC inséré en milieu d'une ligne

La réactance effective de la ligne vaut :

$$x'_{mk} = x_{mk} + x_{TCSC} \tag{II-15}$$

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

$$\bar{Y} = \begin{pmatrix} \bar{y}'_{mk} + \bar{y}_{m0} & -\bar{y}'_{mk} \\ -\bar{y}'_{mk} & \bar{y}'_{mk} + \bar{y}_{k0} \end{pmatrix} \tag{II-16}$$

Tel que :

$$\bar{y}'_{mk} = \frac{1}{r_{mk} + j(x_{mk} + x_{TCSC})} \tag{II-17}$$

II.6.3. Dimensionnement du TCSC [19]

Afin d'éviter la surcompensation dans la ligne, la valeur de la réactance X_{TCSC} dépend de la valeur de la réactance de la ligne X_{ligne} .

Telle que :

$$-0,2. X_{ligne} \leq X_{TCSC} \leq 0,8. X_{ligne} \tag{II-18}$$

II.6.3.1. Détermination de la capacité de TCSC

Elle peut être déterminée à partir de :

$$-j0,2. X_{ligne} = -\frac{j}{C\omega} \tag{II-19}$$

Donc,

$$C = \frac{1}{0,8. X_{ligne} \cdot \omega} \tag{II-20}$$

II.6.3.2. Détermination de l'inductance de TCSC

On peut retrouver l'expression de l'inductance comme suit :

$$0,8 \cdot X_{\text{line}} = (X_L // -X_c) \quad (\text{II-21})$$

// : En parallèle.

Alors,

$$X_L = \frac{0,8 \cdot X_{\text{line}} \cdot X_c}{0,8 \cdot X_{\text{line}} + X_c} \quad (\text{II-23})$$

Enfin,

$$L = \frac{0,8 \cdot X_{\text{line}} \cdot X_c}{(0,8 \cdot X_{\text{line}} + X_c) \cdot \omega} \quad (\text{II-24})$$

II.6.2.3. Dimensionnement du TCSC en fonction de (α) [19]

Généralement le TCSC est dimensionné de façon à assurer une compensation fixe de la ligne de 60%. Cette compensation est obtenue pour une impédance minimum du TCSC :

$$X_c(\alpha) = \frac{1}{C\omega} \quad (\text{II-25})$$

Les thyristors sont alors bloqués ($\alpha = 180^\circ$), et le TCSC a pour impédance celle du condensateur C, ce qui donnera :

$$X_c(180) = \frac{1}{C\omega} = Z_l \cdot 0,6 \quad (\text{II-26})$$

Il reste donc à dimensionner l'impédance du TCSC. Pour cela, on a considéré qu'habituellement, le point de résonance est obtenu pour $\alpha_r = 130^\circ$ environ, et la plage de réglage de α correspond au fonctionnement nominal du compensateur est $150^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$. Cela permet d'assurer un fonctionnement du dispositif très loin de la résonance, et d'éviter les variations trop importantes de l'impédance lorsque α varie.

Donc on aura :

$$L \cdot \omega = \frac{2/\pi}{C\omega} \cdot \left(\pi - \alpha + \frac{\sin 2\alpha}{2} \right) \quad (\text{II-27})$$

II.7 Conclusion

Le concept des dispositifs FACTS pour les réseaux électriques couvre un certain nombre de technologies destinées à renforcer la sécurité, la capacité de transit et la flexibilité des réseaux de transport d'énergie.

Dans ce chapitre nous avons présenté les avantages de tels compensateurs dans le contrôle des réseaux électriques par rapport aux autres types de compensateurs traditionnels.

Une classification des dispositifs FACTS, en tenant compte de la variable de contrôle et du mode de branchement au réseau, a été aussi abordée. Une partie importante a été consacrée pour montrer l'influence de l'insertion du dispositif SVC et TCSC dans un réseau électrique sur la matrice admittance nodale du réseau et la matrice Jacobien et par conséquent, sur le transit de puissance dans ce réseau. L'objectif principal est la modification artificielle des caractéristiques des lignes de transport afin de contrôler les puissances transitant et minimiser ainsi les pertes totales.

Chapitre III

Résultats et Discussions

Simulation et interprétation des résultats

III.1. Introduction

Dans le présent chapitre, nous allons étudier l'influence de l'insertion des compensateur FACTS sur l'état du réseau électrique, une simulation numérique sur leur insertion dans un réseau à cinq nœuds et sept lignes, dans un environnement MATLAB, a été effectuée.

La simulation permet d'établir l'état du réseau (tensions, phases et puissances) et, donc, de mesurer à quel niveau est l'influence des dispositifs FACTS sur les performances du réseau électrique. Les résultats sont obtenus pour deux types de dispositifs FACTS. Le premier dispositif de type shunt, le SVC et le second de type série, le TCSC, ce qui permet d'observer à partir des résultats l'influence de chacun sur les paramètres du réseau, à savoir les tensions aux nœuds et les puissances transitées dans les lignes en appliquant l'algorithme de Newton-Raphson.

III.2. Topologie du réseau étudié

Le réseau de la **figure III.1** est constitué de :

- Cinq (5) nœuds numérotés de 1 à 5 dont le nœud 1 représente l'accès référence, le nœud 2 représente l'accès générateur et les trois autres nœuds sont des accès charges.
- Sept (7) lignes numérotées de (1) à (7)

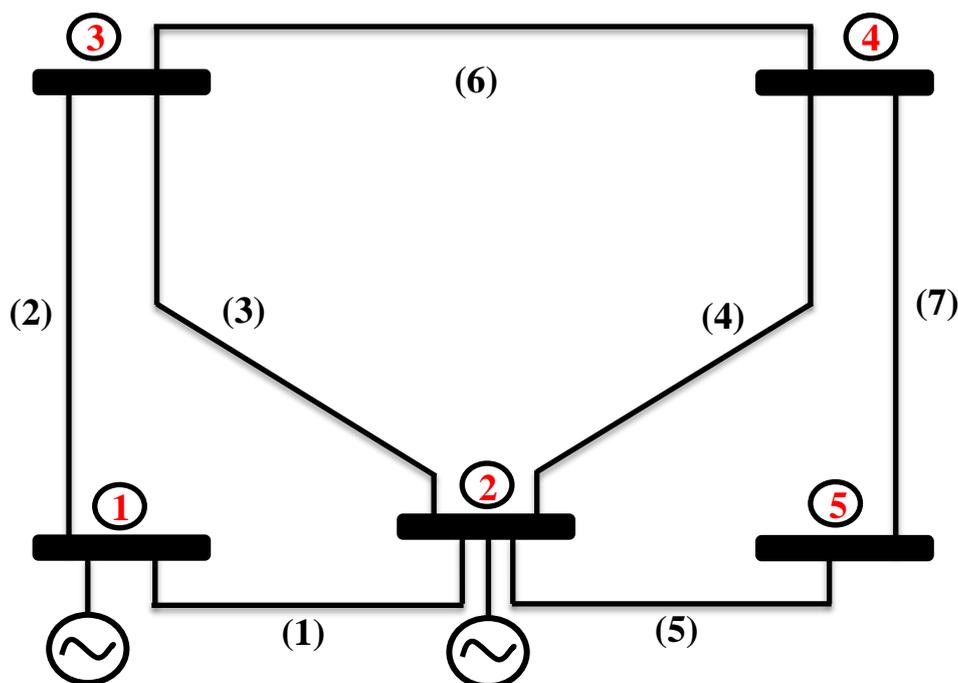


Figure III.1 Topologie du réseau électrique étudié

III.2.1. Données du réseau étudié

Les données des lignes et des nœuds du réseau sont regroupées dans les tableaux (III.1) et (III.2) pour une puissance de base $S_{base} = 100 \text{ MVA}$:

N° de la ligne	Ligne	$R(p.u)$	$X(p.u)$	$B(p.u)$
(1)	1-2	0.02	0.06	0.06
(2)	1-3	0.08	0.24	0.05
(3)	2-3	0.06	0.18	0.04
(4)	2-4	0.06	0.18	0.04
(5)	2-5	0.04	0.12	0.03
(6)	3-4	0.01	0.03	0.02
(7)	4-5	0.08	0.24	0.05

Tableau III.1 Données des lignes

Nœud	$V(pu)$	$\theta(deg)$	Générateur		Charge		$Q \text{ limites (pu)}$
			$P(pu)$	$Q(pu)$	$P(pu)$	$Q(pu)$	
1	1.06	0	1.3112	0.9081	0.000	0.000	0.000
2	1	0	0.4000	-0.6159	0.200	0.100	± 3.00
3	1	0	0.0000	0.0000	0.450	0.150	0.000
4	1	0	0.0000	0.0000	0.400	0.050	0.000
5	1	0	0.0000	0.0000	0.600	0.100	0.000

Tableau III.2 Données des nœuds

III.3. Résultats de simulation

III.3.1 Sans compensation

L'analyse de notre réseau est réalisée à l'aide de logiciel MATLAB. Ce dernier, nous permet le calcul d'écoulement de puissance. Il est effectué en premier lieu pour la détermination des conditions initiales du système avant la compensation. En effet il permet de

trouver les tensions aux différents nœuds et par la suite les puissances transmises, injectées et les pertes.

Les résultats obtenus sont représentés dans les tableaux suivant : (III.3), (III.4) et (III.5) :

A. Le module des tensions dans les nœuds :

Nœud	1	2	3	4	5
Modules des tensions	1.0600	1.0000	0.9872	0.9841	0.9717

Tableau III.3 Module des tensions aux nœuds (pu).

B. Les Phases des tensions aux nœuds :

Nœud	1	2	3	4	5
Phase des tensions	0	-2.0612	-4.6367	-4.9570	-5.7649

Tableau III.4 Phases des tensions aux nœuds (degré)

C. Puissance injectée aux jeux de barres :

JDB	$P(p.u)$	$Q(p.u)$
1	1.3112	- 0.9082
2	0.2000	+ 0.7159
3	-0.4500	+ 0.1500
4	-0.4000	+ 0.0500
5	-0.6000	+0.1000

Tableau III.5 Puissances injectées aux nœuds des jeux de barres

D. Puissance active (P) et réactive (Q) transité dans les lignes :

JDB (i)	JDB (j)	$P(p.u)$	$Q(p.u)$
1	2	0.8933	-0.7400
1	3	0.4179	-0.1682
2	3	0.2447	+0.0252
2	4	0.2771	+0.0172
2	5	0.5466	-0.0556
3	4	0.1939	-0.0286
4	5	0.0660	-0.0052

Tableau III.6 Les puissances sortantes des JDB (i) vers JDB (j)

JDB (i)	JDB (j)	$P(p.u)$	$Q(p.u)$
1	2	-0.8685	+ 0.7291
1	3	-0.4027	+ 0.1751
2	3	-0.2411	+ 0.0035
2	4	-0.2725	+ 0.0083
2	5	-0.5344	0.0483
3	4	-0.1935	0.0469
4	5	-0.0656	0.0517

Tableau III.7 Les puissances recevez par JDB (i) ou JDB (j)

E. Perte de puissance active (P) et réactive (Q) transité dans les lignes :

Ligne	JDB (i)	JDB (j)	P(p.u)	Q(p.u)
(1)	1	2	0.0249	-0.0109
(2)	1	3	0.0152	+0.0069
(3)	2	3	0.0036	+0.0287
(4)	2	4	0.0046	+0.0255
(5)	2	5	0.0122	-0.0073
(6)	3	4	0.0004	+0.0182
(7)	4	5	0.0004	+0.0465

Tableau III.8 Pertes dans les lignes

III.3.2 Avec compensation

III.3.2.1 Compensation avec TCSC

Les données du TCSC sont :

$$X_L = 0.08560;$$

$$X_C = 0.155;$$

$$\alpha = 130;$$

$$X_{tcsc} = (X_L \cdot \pi) / (2 \cdot (\pi - \alpha) + \sin(2 \cdot \pi) - ((X_L / X_C) \cdot \pi));$$

$$Y_{tcsc} = 1 / X_{tcsc}$$

Le calcul du transit de puissance du système avec insertion du dispositif TCSC dans la ligne (1-3), nous a permis d'obtenir les résultats dans les tableaux suivants :

A. Le module des tensions dans les nœuds avec TCSC:

Nœud	1	2	3	4	5
Modules des tensions	1.0600	1.0000	0.9856	0.9828	0.9712

Tableau III.9 Module des tensions aux nœuds TCSC (pu).

B. Les Phases des tensions aux nœuds avec TCSC:

Nœud	1	2	3	4	5
Phases des tensions	0	-2.2026	-4.9505	-5.2375	-5.9540

Tableau III.10 Phases des tensions aux nœuds TCSC (degré)

Interprétation

On remarque une légère baisse de module de tension (**Tableau III.9**) après l'insertion de compensateur TCSC est cela et du à sa nature son influence sur l'amélioration de la tension est négligeable, il est destiné à contrôler le transit de puissances actives à travers le réseau. Donc dans un réseau où il y'a des chutes de tensions, la présence d'un TCSC ne compense pas cette chute.

C. Puissance injectée aux jeux de barres avec TCSC:

JDB	$P(p.u)$	$Q(p.u)$
1	1.3109	-0.8890
2	0.2000	+0.6912
3	-0.4500	+0.1500
4	-0.4000	+0.0500
5	-0.6000	+0.1000

Tableau III.11 Puissances aux jeux de barres avec TCSC

D. Puissance active (P) et réactive (Q) transité dans les lignes avec TCSC :

JDB (i)	JDB (j)	$P(p.u)$	$Q(p.u)$
1	2	0.9330	- 0.7283
1	3	0.3779	- 0.1607
2	3	0.2622	+ 0.0209
2	4	0.2912	+ 0.0136
2	5	0.5538	- 0.0578
3	4	0.1733	- 0.0250
4	5	0.0591	- 0.0038

Tableau III.12 Les puissances sortantes des JDB (i) vers JDB (j) avec TCSC

JDB (i)	JDB (j)	$P(p.u)$	$Q(p.u)$
1	2	-0.9072	+0.7146
1	3	-0.3652	+0.1688
2	3	-0.2581	+0.0062
2	4	-0.2861	+0.0104
2	5	-0.5413	+0.0495
3	4	-0.1730	+0.0434
4	5	-0.0587	+0.0505

Tableau III.13 Les puissances reçus au niveau des JDB (j)

Interprétation

D'après les résultats obtenues (Tableaux (III.11), (III.12)), nous remarquons que 4/7 des lignes de transmissions à l'insertion du contrôleur TCSC, transite un peu plus de puissance active, comme exemples : la ligne (1-2) et les lignes (2-3) et (2-4), aussi y a des lignes comme (1-3) qui subissent une légère baisse du transit de puissance, par contre on remarque que la puissance réactive est moins transitée dans les lignes et cela dû à l'influence du compensateur TCSC qui est constitués essentiellement d'une inductance en série avec un gradateur. Le retard à l'amorçage des thyristors permettait de régler l'énergie réactive absorbée par le dispositif.

E. Pertes de puissance active (P) et réactive (Q) transité dans les lignes avec TCSC:

Ligne	JDB (i)	JDB (j)	$P(p.u)$	$Q(p.u)$
(1)	1	2	0.0258	- 0.0138
(2)	1	3	0.0127	+0.0081
(3)	2	3	0.0041	+0.0271
(4)	2	4	0.0051	+0.0240
(5)	2	5	0.0125	-0.0083
(6)	3	4	0.0003	+0.0184
(7)	4	5	0.0004	+0.0467

Tableau III.14 Les pertes de puissances dans les lignes

Interprétation

Concernant les pertes totales actives et réactives au niveau des lignes (tableau. III.3), sont nettement améliorées après l'insertion du TCSC. C'est à dire, qu'ils ont diminués. Pour la puissance active de 6.09 MW par rapport à l'état initial qui est 6,13 MW, et pour la puissance réactive de 10.22 MVAR par rapport à son état initial qui est 10.76 MVAR, Cette diminution est obtenue grâce à l'emplacement du dispositif TCSC entre le nœud (1-3) qui est un emplacement optimal. Cet emplacement n'est pas arbitraire car, nous l'avons opté parmi d'autres lignes.

III.3.2.2 Compensation avec SVC

Les données du SVC sont :

$$\begin{aligned}
 X_L &= 0.08560 \\
 X_C &= 0.155 \\
 \alpha &= 128 \\
 X_{SVC} &= (X_L * \pi) / (2 * (\pi - \alpha) + \sin(2 * \pi) - ((X_L / X_C) * \pi)) \\
 Y_{SVC} &= 1 / X_{SVC} \\
 YI(3, 3) &= YI(3, 3) + Y_{SVC}
 \end{aligned}$$

Le calcul du transit de puissance du système avec insertion du dispositif au niveau du JDB (3) nous a permis d'obtenir les résultats dans les tableaux suivants :

A. Le module des tensions dans les nœuds avec SVC:

Nœud	1	2	3	4	5
Modules des tensions	1.0600	1.0000	1.0059	0.9992	0.9768

Tableau III.15 Modules des tensions aux nœuds SVC (degré)

B. Les Phases des tensions aux nœuds avec SVC:

Nœud	1	2	3	4	5
Phases des tensions	0	-2.0511	-4.9328	-5.1788	-5.8144

Tableau III.16 Phases des tensions aux nœuds SVC (degré)

Interprétation

On remarque à travers le tableau (III.15) que les tensions sont compensées, donc le SVC remplit son rôle de régulateur de tension, lorsque la tension du réseau diminue, le courant du SVC devient plus capacitif (en avance par rapport à la tension) ce qui tend à réduire la chute de tension. De même lorsque la tension augmente, le courant du SVC devient plus inductif (en retard par rapport à la tension) ce qui contribue à maintenir la tension.

C. Puissance injectée aux jeux de barres avec SVC:

JDB	$P(p.u)$	$Q(p.u)$
1	1.3109	-0.8279
2	0.2000	+0.9424
3	-0.4500	-0.1517
4	-0.4000	+0.0500
5	-0.6000	+0.1000

Tableau III.17 Puissances aux jeux de barres avec SVC (pu)

D. Puissances active (P) et réactive (Q) transitée dans les lignes avec SVC:

JDB (i)	JDB (j)	$P(p.u)$	$Q(p.u)$
1	2	0.8905	- 0.7408
1	3	0.4204	- 0.0871
2	3	0.2451	+ 0.1275
2	4	0.2765	+ 0.0992
2	5	0.5441	- 0.0144
3	4	0.1977	- 0.1513
4	5	0.0686	- 0.0454

Tableau III.18 Les puissances sortantes des JDB (i) vers JDB (j) avec SVC

JDB (i)	JDB (j)	$P(p.u)$	$Q(p.u)$
1	2	-0.8657	+0.7301
1	3	-0.4069	+0.0999
2	3	-0.2408	-0.1002
2	4	-0.2715	-0.0741
2	5	-0.5322	+0.00081
3	4	-0.1971	+0.1695
4	5	-0.0678	+0.0919

Tableau III.19 Les puissances reçus au niveau des JDB (j)

Interprétation

D'après les résultats des tableaux (III.17, III.18, III.19) après avoir inséré le compensateur SVC nous remarquons que aussi 4/7 des lignes de transmissions reçoive une amélioration de puissance active transitée dans ces lignes par rapport à l'état du réseau sans compensation, comme exemples : la ligne (1-3) et les lignes (2-3) et (3-4) avec une légère baisse de transitée puissance dans les ligne (1-2) et (2-4), Pour la puissance réactive le SVC consomme la puissance injectée par la surcharge capacitive et donc réduit le transit de celle-ci à travers les lignes du réseau.

E. Pertes de puissance active (P) et réactive (Q) transitée dans les lignes avec SVC

Ligne	JDB (i)	JDB (j)	$P(p.u)$	$Q(p.u)$
(1)	1	2	0.0248	- 0.0107
(2)	1	3	0.0135	+ 0.0128
(3)	2	3	0.0043	+ 0.0273
(4)	2	4	0.0050	+ 0.0251
(5)	2	5	0.0119	- 0.0063
(6)	3	4	0.0006	+ 0.0182
(7)	4	5	0.0008	+ 0.0465

Tableau III.20 Les pertes de puissances dans les lignes

Interprétation

On voit que les pertes diminuent avec l'augmentation du niveau de compensation, cela s'explique par le fait que l'énergie réactive injectée par le SVC permet de combler le besoin de consommation au niveau des nœuds ciblées et donc diminue les puissances transitées vers ces nœuds à partir du nœud bilan et générateur. Avec la diminution des puissances réactives transitées dans les lignes résulte une diminution des pertes.

III.4 La comparaison entre SVC et TCSC

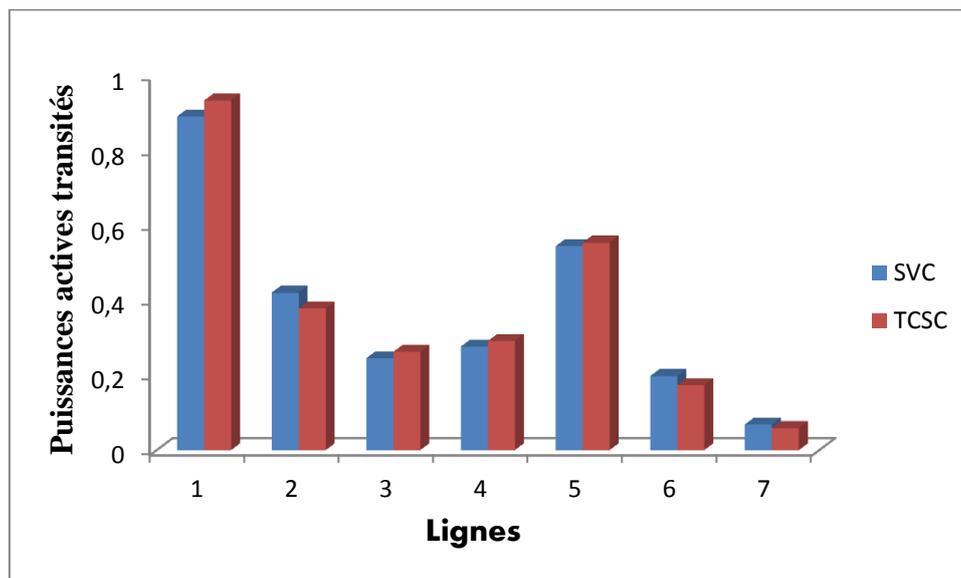


Figure III.2. Allure des puissances actives avec SVC et TCSC

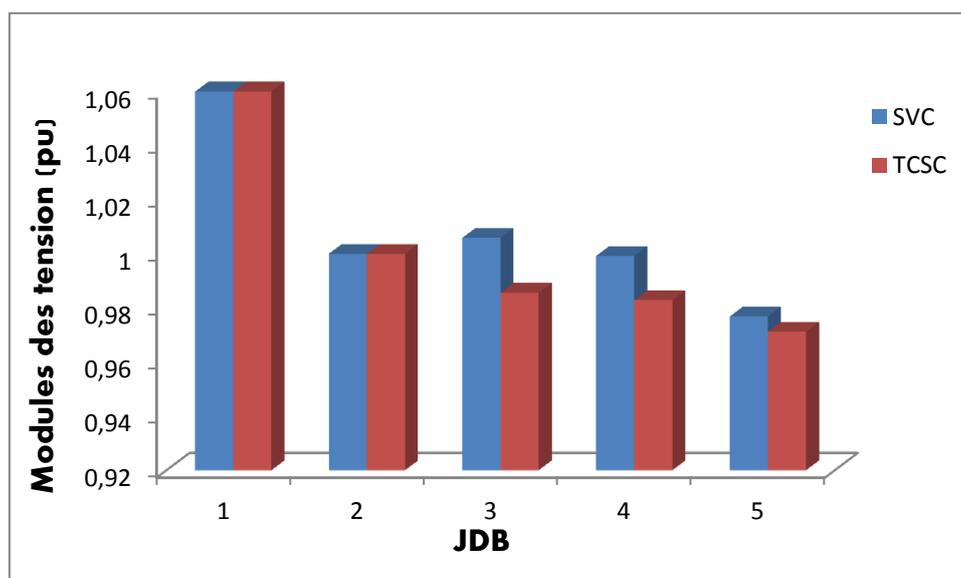


Figure III.3. Allure du module de tension avec SVC et TCSC

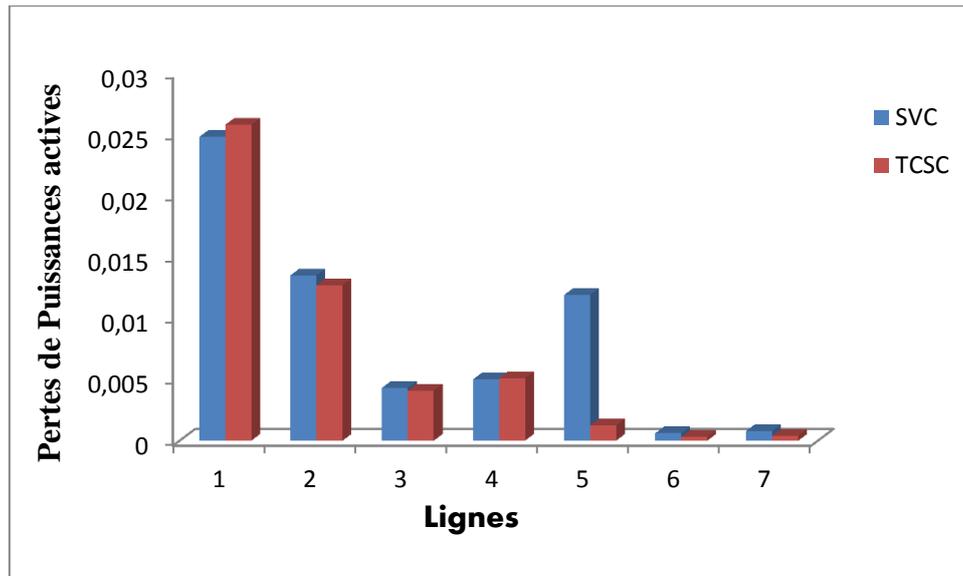


Figure III.4. Allure des pertes des puissances actives avec SVC et TCSC

En Comparant l'influence de ces deux dispositifs SVC et TCSC sur les paramètres de notre réseau, on constate que le SVC améliore et régularise le profil de la tension au niveau de tous les jeux de barres, par contre on remarque que le TCSC compense mieux la puissance active qui transité dans la ligne. Sachant que le TCSC est destiné à contrôler le transit de puissances actives à travers le réseau, on remarque que son influence sur l'amélioration de la tension est négligeable, par contre les deux dispositifs peuvent jouer un rôle très important dans la réduction des pertes de puissance.

III.5 Conclusion

Les résultats obtenus dans ce chapitre, nous ont montré l'efficacité des dispositifs SVC et TCSC dans l'amélioration de profil de tension au niveau des jeux de barres du réseau, il contribuant au contrôle suivi des puissances actives et réactive transitent dans la ligne et cela offre une bon réduction des pertes de puissance , Le choix des contrôleurs particuliers dépend des conditions d'application et de l'exécution désirées, le SVC est plus utilisé dans la régulation des tensions par contre le TCSC fait augmenter la capacité du transfert du système de transmission, c'est un bon compensateur de la puissance active. Néanmoins leur emplacement dans le réseau doit être bien optimisé en tenant compte des contraintes et des critères liés à chaque dispositif.

On peut conclure aussi que le choix adéquat de logiciel de simulation dans le domaine de recherches et d'études est une première démarche essentielle pour l'analyse de n'importe quel problème rencontré dans un système énergétique, dans notre travail on a appliqué la méthode de Newton-Raphson pour le calcul du transit de puissances et la détermination des tensions aux nœuds d'un réseau électrique muni de dispositifs FACTS. Nous avons conçu un programme en langage MATLAB et nous l'avons appliqué à un réseau à cinq nœuds et sept lignes. Nous avons étudié l'insertion de dispositifs FACTS indépendamment en changeant leurs emplacements dans le réseau (jeux de barres, lignes) afin de déterminer leur comportement.

CONCLUSIÓN

Générale

Conclusion générale

Dans de nombreux réseaux électriques, l'augmentation des nombre des échanges non planifiés qui sont incontrôlable créent une perturbation à ces derniers d'où la mauvaise répartition des puissances ainsi que les tensions et leurs qualités. Pour garantir aux consommateurs une bonne qualité d'énergie, les compagnies électriques ont mis en œuvre grâce à l'électronique de puissance des Systèmes de réglage et de compensation sous l'appellation FACTS pour remédier à ces problèmes.

Ce mémoire présente et explique le contrôle de l'écoulement des puissances dans une ligne de transport par un système FACTS, les deux dispositifs choisis pour ce contrôle sont les : compensateur statique de l'énergie réactive SVC et le Condensateur Série Commandé par thyristor TCSC. Ces dispositifs sont capables de contrôler les puissances transitées dans la ligne, ils peuvent contrôler les trois paramètres associés au transit de puissance, à savoir, la tension, l'angle de transport et l'impédance de ligne, pour améliorer les performances du réseau électrique. Afin d'atteindre cet objectif, nous sommes passés par les étapes suivantes :

- ✓ Dans la première étape nous avons présenté en bref un aperçu sur le fonctionnement des réseaux électriques avec modélisation des différentes parties du réseau, on a montré les facteurs qui limitent la puissance transmissible dans une ligne de transport, on a analysé également l'écoulement de puissance dans cette étape.
- ✓ La deuxième étape de notre travail a été consacrée à la description des différents systèmes permettant 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). Nous avons présenté la structure de base et le principe de fonctionnement, nous avons développé son modèle mathématique quand il est raccordé au réseau électrique. Afin d'analyser leur influence sur le réseau.
- ✓ Dans la dernière étape, nous avons présenté le schéma électrique équivalent du réseau étudié en grandeurs réduites. Afin de voir le comportement des deux dispositifs FACTS connecté au réseau pour le contrôle de transit de puissance nous avons fait

des simulations par le logiciel MATLAB. Les résultats obtenus par les différentes simulations effectuées ont validé d'une manière générale les modèles des deux compensateurs SVC et TCSC.

Enfin nous pouvons dire que les systèmes FACTS découlent d'un concept qui a tendance à élargir son champ d'intervention, il nous semble prioritaire de poursuivre une étude approfondie sur les modes et stratégies de contrôle des réseaux de transport d'énergie électrique.

Références

Bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] **A. HELLAL, M. BONDOUR**, livre : sur "les réseaux électriques fondamentaux et concept de base", édition la page Bleu, 2011.
- [2] **Z. SEDDIKI**, "optimisation de l'écoulement de puissances dans un système d'énergie électrique par la méthode du point intérieur", Mémoire magister Université H. BEN-BOUALI de CHLEF, 2009.
- [3] **L. DELENDI**, "Contrôle de l'écoulement de puissance active par système FACTS", Mémoire magister, Université de BATNA, 2009.
- [4] **O. MAMMERI**, "différentes méthodes de calcul de la puissance réactive dans un nœud à charge non linéaire en présence d'un système de compensation de l'énergie". Mémoire de Magister Université de BATNA, 2012.
- [5] **N. Lahaçani AOUZELLAG**, "Contribution à l'Amélioration de la Flexibilité dans les Réseaux Electriques liée à l'Intégration des Générateurs Eoliens", Thèse de doctorat de l'université A.MIRA de Bejaïa, 2011.
- [6] **M.CHABANE, F.TAHIR**, "Etude du transit de puissances dans un réseau muni d'aérogénérateur", Mémoire d'ingénieur, option : Réseau électrique, A.MIRA de BEJAIA, 2008.
- [7] **A.Alibi**, "Contrôle des réseaux électriques par les systèmes FACTS", Mémoire de magistère, option: électricité industrielle, Université de BATNA, 2009.
- [8] **N. MANCER**, "Contribution à l'optimisation de la puissance réactive en présence de dispositifs de compensation dynamique (FACTS)", Mémoire magister Université M.KHIDER, BISKRA, 2012.

- [9] **R. Benabid**, "Optimisation Multi-objectif de la Synthèse des FACTS par les Particules en Essaim pour le Contrôle de la Stabilité de tension des réseaux électriques", Mémoire de magister, Université de LAGHOUAT, 2007.
- [10] **Xiao-Ping Zhang, Christian Rehtanz, Bikash Pal**, livre: "Flexible AC Transmission systems: Modelling and Control", Springer 2005.
- [11] **Enrique Acha, R.Claudio. Fuerte-Esquivel, Hugo Ambriz-Pérez, César Angeles-Camacho**, "FACTS Modeling and Simulation in Power Networks", John Wiley & Sons Ltd, 2004.
- [12] **H. Madi, C. Teghidet**, "Etude de l'influence des systèmes FACTS-séries sur les réglages du transit de puissance et des dispositifs de protection", A.MIRA de BEJAIA, 2006.
- [13] **E.Acha, V.G.Angelidis, O.Anaya-Lara, T.J.E.Miller**, "Power Electronic Control in Electrical Systems", Newness power engineering series, 2002.
- [14] **S. MOUASSA**, "Optimisation de l'écoulement de puissance par une méthode métaheuristique (technique des abeilles) en présence d'une source renouvelable (éolienne) et des dispositifs FACTS", Mémoire magistère, Université Farhet ABBAS SETIF, 2012.
- [15] **M. Mezaache**, "Analyse et traitement de la qualité d'énergie électrique en utilisant des dispositifs de contrôle des réseaux électriques à UPFC dans le cas de stabilité de la tension ", Mémoire de magister, option : réseaux électriques, université de Batna, 2011.
- [16] **H. SEKHANE**, " L'optimisation de la puissance réactive et le contrôle de tension à travers l'incorporation des dispositifs FACTS", Mémoire magistère, Université de Constantine, 2013.
- [17] **T. ZABAIYOU**, "Coordination des régulateurs conventionnels des machines synchrones et des compensateurs statiques (SVCS) ", Thèse de doctorat, Ecole supérieure Université de QUEBEC, 2010.

- [18] **L. Kartobi**, "Optimisation de la Synthèse des FACTS par les Algorithmes Génétiques et les Essais Particulaires pour le contrôle des Réseaux Electriques", Mémoire de magistère, option : réseaux électriques et haute tension, école nationale polytechnique Alger, 2006.
- [19] **S. TOUATI, M. KHALDI**, "Répartition économique des puissances actives utilisant le dispositif TCSC", Mémoire de master, option : réseaux électriques, A.MIRA de BEJAIA, 2012.
- [20] **E. CATZ**, (non-Membre IEEE), "Evolutions techniques du système de transport et de distribution d'électricité", 2006.
- [21] **G. GLANZAMNN, G. ANDERSSON**, "Using FACTS devices resolve congestion in transmission grids", Swiss Federal Institute of Technology in ZURICH, 2005.