



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique

Université Echahid Hamma Lakhdar - El-Oued



Faculté de science et technologie

Département : Génie Mécanique

MEMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de MASTER ACADEMIQUE

Spécialité : Électromécaniques

THEME

**La sécurité préventive des réseaux électriques en présence du
« thyristor controlled series compensateur (TCSC) »**

Encadré par :

ZOBEIDI Messaoud

Présenté par :

SEBBAK MED Abdelaziz

RAHAL Oussama

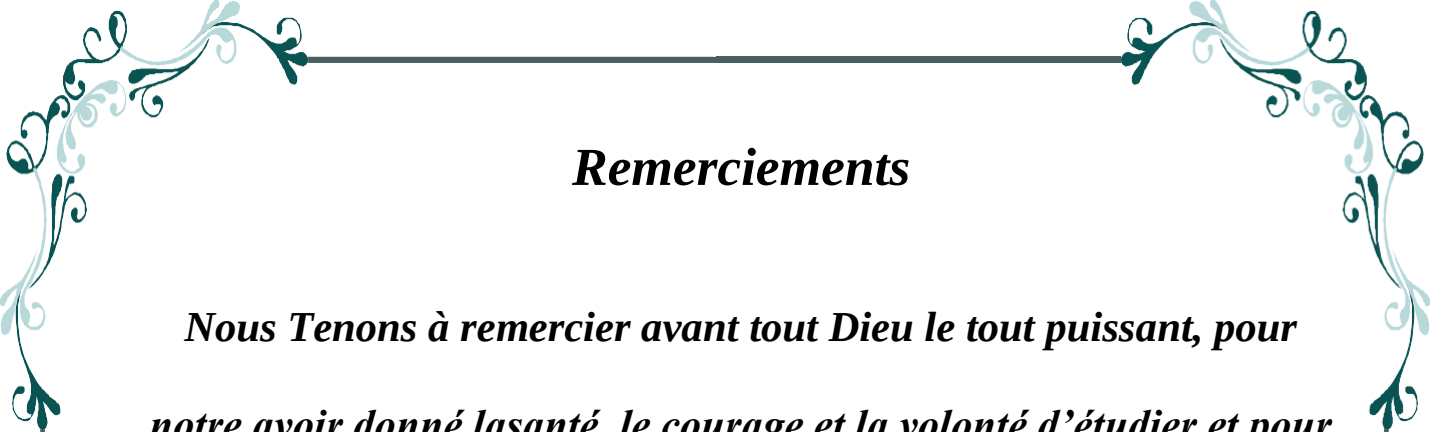
BECER Ridha

GUERFI Ali

Année Universitaire : 2021/2022

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

مِنْ خَلْقِهِ



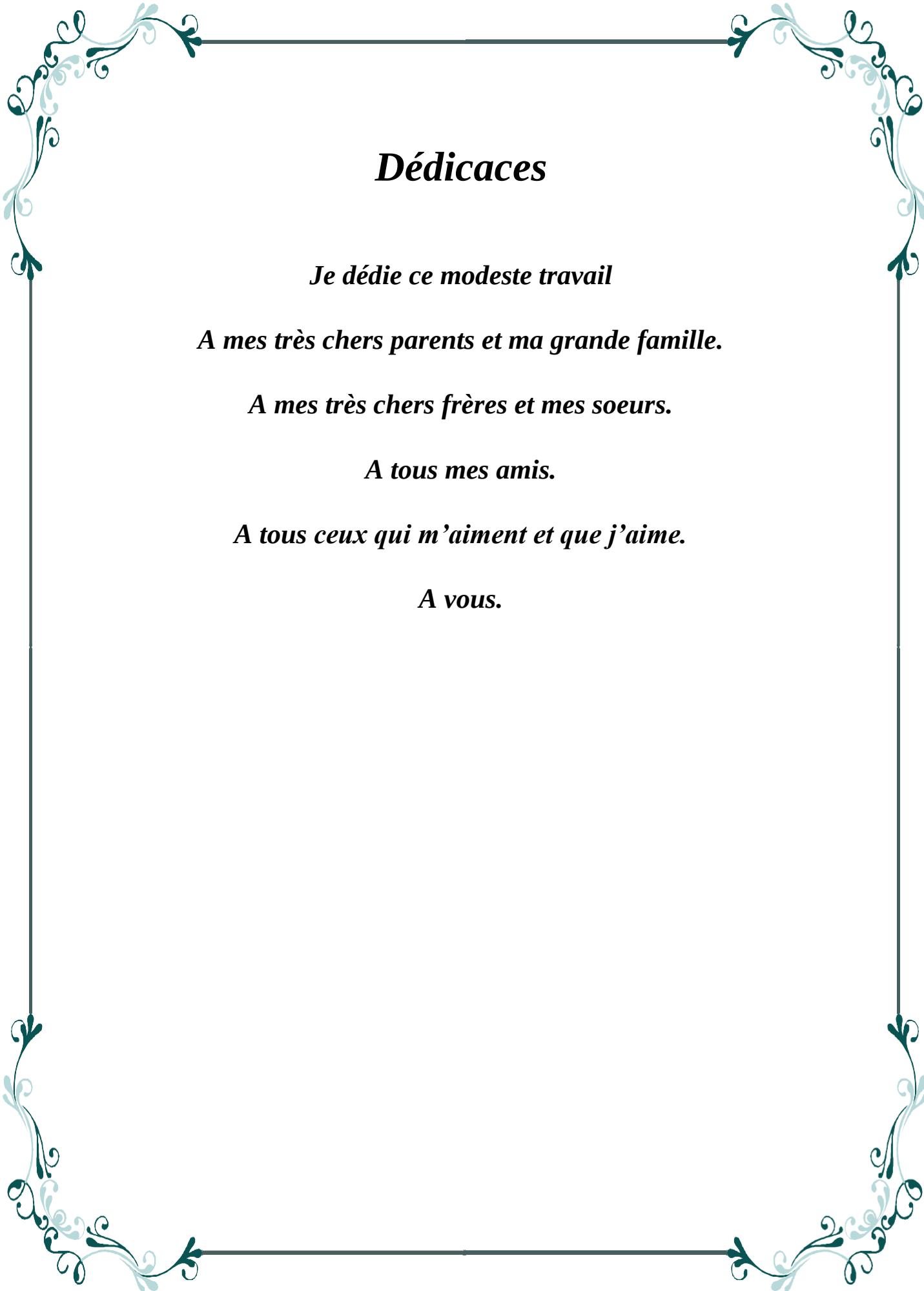
Remerciements

***Nous Tenons à remercier avant tout Dieu le tout puissant, pour
notre avoir donné la santé, le courage et la volonté d'étudier et pour
notre avoir permis de réaliser ce modeste travail dans les meilleures
conditions.***

***Au terme de cette modeste étude, je tiens à exprimer nos profonde
gratitude et nos vifs remerciements à notre promoteur Mr : Zobeidi
Messaoud pour le soutien, l'aide et les conseils qu'il nous a
dispensés pour l'élaboration de ce présent mémoire.***

***Un grand merci pour toutes les personnes qui ont contribué de
près ou de loin
pour la réalisation de ce mémoire.***





Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

A mes très chers parents et ma grande famille.

A mes très chers frères et mes soeurs.

A tous mes amis.

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

A vous.

Résumé :

L'utilisation d'un réseau électrique au plus près de ses limites peut entraîner son instabilité en cas de perturbation. La stabilité du système peut être obtenue par des moyens traditionnels de régulation de la tension et de la vitesse de rotation des générateurs mais aussi par des moyens modernes appelés FACTS (Flexible Alternating Current Transmission System), ces dispositifs sont de plus en plus utilisés dans les réseaux électriques. La contribution principale de ce projet de fin d'étude est de déterminer l'emplacement optimal de FACTS série (TCSC), en utilisant la méthode de la sensibilité, facteur de répartition de puissance (PTDF), Réduction des pertes de puissance réactive d'une ligne particulière (a_{ij}), nous testerons chaque facteur de sensibilité sur différent niveau de réseaux (6, 14 bus).

Mots clés : FACTS, TCSC, facteurs de sensibilités, l'emplacement optimal.

المخلص :

يمكن أن يؤدي استخدام شبكة كهربائية أقرب إلى حدودها إلى عدم استقرارها في حالة حدوث اضطراب. يمكن الحصول على استقرار النظام بالوسائل التقليدية لتنظيم الجهد و سرعة دوران المولدات ولكن أيضًا بالوسائل الحديثة المسماة **FACTS** (نظام نقل التيار المتناوب المرن) ، هذه الأجهزة تستخدم أكثر فأكثر في الشبكات الكهربائية. تتمثل المساهمة الرئيسية لمشروع نهاية الدراسة هذا في تحديد الموقع الأمثل لل **FACTS** التسلسلي (**TCSC**) ، باستخدام طريقة الحساسية ، عامل توزيع الطاقة (**PTDF**) ، تقليل فقد الطاقة التفاعلية بواسطة خط معين (a_{ij}) ، سنختبر كل عامل حساسية على مستوى مختلف من الشبكات (6 ، 14 ناقلًا).

الكلمات المفتاحية : أجهزة نقل التيار المتناوب المرنة، **TCSC**، عوامل الحساسية، الموقع الأمثل.

Table de matière

Table des matières

Introduction générale	1
-----------------------	---

Chapitre I Généralité sur les FACTS

I. Introduction	3
I.1 Définition des dispositifs FACTS	3
I.1.1 Classification des dispositifs FACTS	4
I.1.2 Les avantages des dispositifs FACTS	5
I.1.3 Les inconvénients des dispositifs FACTS	5
I.2 Compensateurs parallèles	5
I.2.1 Compensateur statique de l'énergie réactive (SVC)	6
I.2.1.1 Principe de fonctionnement	7
I.2.1.2 Les avantages de SVC	8
I.2.2 Compensateur statique STATCOM	8
I.2.2.1 Les avantages de STATCOM	8
I.3 Compensateurs série	9
I.3.1 TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor)	10
I.3.2 Static Synchronous Series Compensator (SSSC)	11
I.4 Compensateurs hybrides	12
I.4.1 Régulateur d'angle de phase contrôlé par thyristor (TCPAR)	12
I.4.2 Unified Power Flow Controller (UPFC)	13
I.5 Coût des dispositifs FACTS	14
I.6 Conclusion	15

Chapitre II Compensateur série contrôlé par thyristors

II. Introduction	16
II.1 Définition du TCSC	16
II.2 Principe de fonctionnement de la varistance (MOV)	17
II.3 Principe de fonctionnement du TCSC	18
II.4 Les caractéristiques d'un TCSC sont	19
II.5 Mode de fonctionnement du TCSC	20
II.5.1 Mode de fonctionnement du TCSC en condition normale	20
a) Mode de fonctionnement avec les thyristors bloqués (Blocked-Thyristor Mode)	20
b) Mode by-pass	20
c) Mode de conduction partielle	21
II.5.2 Mode de fonctionnement du TCSC en cas de défaut	22
a) Mode capacitif amplifié sans conduction du MOV	22
b) Mode capacitif amplifié avec conduction du MOV	22
c) Mode de blocage	22
d) Mode by-pass	23
e) Mode by-pass du disjoncteur	23
II.6 Intégration du TCSC dans le système	24
II.7 Influence du TCSC	24
II.8 Modélisation du compensateur série Contrôlé par Thyristors (TCSC)	25
II.9 Protection du TCSC	26
II.10 Les avantages de TCSC	27
II.11 Conclusion	28

Chapitre III L'emplacement optimal du TCSC

III. Introduction	29
Première Partie	
III.1 L'emplacement du TCSC	29
III.2 Types de sensibilité	30
III.2.1 Facteur de répartition de puissance (PTDF)	30
III.2.1.1 Calcul de PTDF	31
III.2.2 Réduction des pertes de puissance réactive d'une ligne particulière	32
Deuxième partie	
III.3 Introduction	33
III.4 Placement optimal d'un TCSC en utilisant le PTDF	34
III.4.1 Résultat de la simulation du système IEEE-14 nœuds	34
1) Exemple 01	34
2) Exemple 02	39
III.5 Placement optimal d'un TCSC en utilisant le facteur de sensibilité a_{ij}	45
III.5.1 Résultat de simulation du système IEEE-6 nœuds	45
III.6 Conclusion	49
Conclusion générale	50
Références Bibliographies	52

Liste des figures et tableaux

Liste des figures

Chapitre I Généralité sur les FACTS

Figure I.1	Schéma principe des dispositifs FACTS	4
Figure I.2	Principe de compensation shunt	6
Figure I.3	Courbe de puissance avec et sans compensation shunt en fonction de l'angle de transmission	6
Figure I.4	structure du SVC	7
Figure I.5	Fonctionnement du compensateur statique SVC	7
Figure I.6	structure du STATCOM	8
Figure I.7	structure du TCPAR	9
Figure I.8	Diagramme des phaseurs du TCPAR	9
Figure I.9	Schéma de base d'un UPFC	10
Figure I.10	Principe de compensation sérié	11
Figure I.11	Courbe de puissance avec et sans compensation	11
Figure I.12	Structure du TCSC	12
Figure I.13	Exemple réelle de TCSC	13
Figure I.14	Schéma de base du SSSC	13
Figure I.15	Caractéristique statique du SSSC	14

Chapitre II Compensateur série controllor par thyristor

Figure II.1	Structure d'un TCSC	17
Figure II.2	Caractéristiques tension-courant du MOV	18
Figure II.3	Insertion d'un TCSC dans la ligne	18
Figure II.4	Impédance du TCSC en fonction de l'angle	19
Figure II.5	TCSC en mode de blocage	20
Figure II.6	TCSC en mode by-pass	21
Figure II.7	TCSC en mode de conduction partielle,(a) avec T_1 amorcé, (b) avec T_2 amorcé	21
Figure II.8	Mode de fonctionnement du TCSC en cas de défaut	23
Figure II.9	TCSC inséré dans la ligne	24
Figure II.10	Influence de TCSC sur la caractéristique PV	25
Figure II.11	Schéma de base d'un module de TCSC	26
Figure II.12	Schéma d'un TCSC composé de plusieurs modules	26
Figure II.13	Protection du TCSC	27

Chapitre III L'emplacement optimal du TCSC

Figure III.1	Différents emplacements du TCSC dans le réseau électrique	30
Figure III.2	Interface programme Power Word	33
Figure III.3	Le système de IEEE 14 noeuds sans TCSC	35
Figure III.4	La première étape (a)	35
Figure III.5	La Deuxième étape (b)	36
Figure III.6	La troisième étape (c)	37
Figure III.7	Le système d'IEEE 14 noeuds avec TCSC dans la ligne (6-13) étape (d)	38
Figure III.8	Les pertes réactive totale avec et sans TCSC	39
Figure III.9	Le système de IEEE 14 noeuds sans TCSC	40
Figure III.10	Le système d'IEEE 14 noeuds avec TCSC dans la ligne (9-14)	42
Figure III.11	Le système d'IEEE 14 noeuds avec TCSC dans la ligne (6-11)	43
Figure III.12	Le système d'IEEE 14 noeuds avec TCSC dans la ligne (7-9)	44
Figure III.13	Les pertes réactive totale avec et sans TCSC	44

Figure III.14	Réseau électrique IEEE 6 noeuds sans TCSC	45
Figure III.15	la première étape (a)	45
Figure III.16	La deuxième étape (b)	46
Figure III.17	la troisième étape (c)	46
Figure III.18	Réseau IEEE 6 bus avec TCSC a placé dans la ligne (3-6)	47
Figure III.19	Comparaison du transit de puissance avec et sans TCSC la ligne (3-6)	49

Liste des tableaux

Chapitre III L'emplacement optimal du TCSC

Tableau III.1	Le PTDF lorsque la ligne (6-12) est surchargée	36
Tableau III.2	La limite de ligne (6-12) avec et sans TCSC	38
Tableau III.3	Le PTDF lorsque la ligne (13-14) est surchargée	41
Tableau III.4	La limite de ligne (13-14) avec et sans TCSC	42
Tableau III.5	Le facteur de sensibilité dans chaque ligne	47
Tableau III.6	Le facteur de sensibilité dans chaque ligne	48

Liste des symboles et abréviations

Liste des symboles et abréviations

Abréviation	Description
EPRI	Electric Power Research Institute
TCSC	Thyristor Controlled Series Capacitor
TSC	Thyristor Switched Capacitor
FACTS	Flexible Alternating Current Transmission Systems
TCPAR	Thyristor Controlled Phase Angle Regulator
STATCOM	Static synchronous compensator
SVC	Static Var Compensator
TCR	Thyristor Controlled Reactor
UPFC	Unified Power Flow Controller
SSSC	Static Synchronous Series Compensator
LTC	Load Tap Changer
MOV	Métal Oxide Varistor
GTO	Gate Turn Off
ZnO	Oxyde de zinc
V	tension de sortie
XC	Condensateur de réactance
AC	Courant alternative
DC	Courant continue
P	Puissance active
X	Réactance de la ligne [Ω]
G	Conductance shunts de la ligne
I	Courant de ligne
Z	L'impédance Série Par Phase
V_{ref}	la tension de référence dans le SVC
XL	Réactance inductive
δ	l'angle de transmission

V_{TCSC}	Tension injecté par le TCSC [V]
α	l'angle d'amorçage
C	capacité de la ligne par unité de longueur
X_{ligne}	l'impédance de la ligne
RCT	Réactances Commandées par Thyristor
X_{TCSC}	réactance du TCSC
PTDF	Facteur de répartition de puissance
a_{ij}	Facteur de sensibilité pour réduction de perte de ligne
Δ	La variation d'une valeur (P, Q, V..ect)
θ	L'angle de la tension
Q	Puissance réactive
V_i	Tension complexe au noeud i
V_j	Tension complexe au nœud j
B	susceptance
R	résistance
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
pu	Grandeur en unité relative (grandeur réduite)

Introduction générale

Introduction générale

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

Les réseaux augmentes continuellement et il devient complexe et plus difficile à contrôler. Ce système doit conduire de grandes quantités de l'énergie en l'absence des dispositifs de contrôle sophistiqués et adéquats, beaucoup de problèmes peuvent survenir sur ce réseau tel que: le transit de la puissance réactive excessif dans les lignes, les creux de tension entre différentes parties du réseau...etc, et de ce fait le potentiel de l'interconnexion du réseau ne sera pas exploiter convenablement. [1]

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

La solution de ces problèmes passe par l'amélioration du contrôle des systèmes électriques déjà en place. Il est nécessaire de doter ces systèmes d'une certaine flexibilité leur permettant de mieux s'adapter aux nouvelles exigences. Le développement rapide de l'électronique de puissance a eu un effet considérable dans l'amélioration des conditions de fonctionnement des réseaux électriques en performant le contrôle de leurs paramètres par l'introduction des dispositifs de contrôle à base des composants d'électronique de puissance très avancés (GTO, IGBT) connus sous l'acronyme FACTS: « Flexible Alternating Current Transmission Systems ». [2]

L'apport de cette technologie « FACTS » pour les compagnies de l'électricité est d'ouvrir de nouvelles perspectives pour contrôler le flux de puissance dans les réseaux et d'augmenter les capacités utilisées des lignes existantes semblables à des extensions dans ces dernières.

La nouvelle génération des systèmes FACTS est constituée principalement par des convertisseurs de tension (ou courant), à base des interrupteurs statiques modernes (GTO ou IGBT) commandées en ouverture et en fermeture, liés à des condensateurs comme source de tension continue.

Ces convertisseurs selon leur connexion au réseau sont distingués en compensateurs shunt, série et hybride tels que : STATCOM, SSSC, UPFC respectivement. [2]

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

Le premier chapitre intitulé « Généralité sur les FACTS », Nous présentons un aperçu du concept de "FACTS". Une classification des différents types est proposée ainsi qu'une description des principaux appareils de chaque famille, et présente également les différentes structures de FACTS (shunt, hybride et série) à base de thyristor ou les (IGBT/GTO).

Le deuxième chapitre, est une l'étude approfondie liée à la modélisation et à l'application du contrôleur de flux de puissance TCSC est consacrée et nous présentons les éléments qui composent ce dispositif.

Le troisième chapitre, nous discutons l'importance de l'emplacement optimal de TCSC, et citerons les méthodes utilisées pour l'emplacement optimal de dispositifs de contrôle FACTS.

Le quatrième chapitre, nous présentons une illustration, où plusieurs simulations seront réalisées sur les réseaux avec l'insertion du TCSC en utilisant le logiciel Power World.

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

CHAPITRE I

Chapitre I

Généralité sur les dispositifs FACTS

I. Introduction :

Devant les problèmes de transit de puissance, la compagnie américaine EPRI (Electric Power Research Institute) a lancé, en 1988, un projet d'étude des systèmes FACTS afin de mieux maîtriser le transit de puissance dans les lignes électriques. Le concept FACTS regroupe tous les dispositifs à base d'électronique de puissance qui permettent d'améliorer l'exploitation du réseau électrique.

La technologie de ces systèmes (interrupteur statique) leur assure une vitesse supérieure à celle des systèmes électromécaniques classiques. De plus, elles peuvent contrôler le transit de puissance dans les réseaux et augmenter la capacité efficace de transport tout en maintenant voir en améliorant, la stabilité des réseaux. [3]

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

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

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

I.1 Définition les dispositifs FACTS :

Un FACTS (Flexible Alternanig current Transmission system) est un équipement d'électronique de puissance d'appoint utilisé pour contrôler la tension, augmenter les capacités de transit, ou assurer la stabilité dynamique des réseaux de transmission d'électricité. Il agit généralement en fournissant ou en consommant dynamiquement de la puissance réactive sur le réseau.

Ceci a pour effet d'augmenter ou de diminuer l'amplitude de la tension à son point de connexion, et par conséquent la puissance active maximale transmissible.

Les condensateurs shunts fournissent la puissance réactive, et augmentent localement la tension du réseau (utilisé en période de forte consommation ou dans les zones éloignées des centres de production). Les réactances shunts consomment la puissance réactive, et diminuent la tension du réseau (utilisé en période de faible consommation).

Les condensateurs séries permettent de diminuer l'impédance des liaisons électriques et d'augmenter la puissance transmissible par ces liaisons (une liaison électrique haute-tension est en effet essentiellement inductive). Les réactances série augmentent l'impédance d'une liaison électrique, afin de mieux répartir les courants sur les différentes liaisons. [4]

I.1.1 Classification les dispositifs FACTS :

Les systèmes FACTS peuvent être classés en trois catégories : [5]

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

Ces catégories décomposées en deux générations selon la technologie utilisée:

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

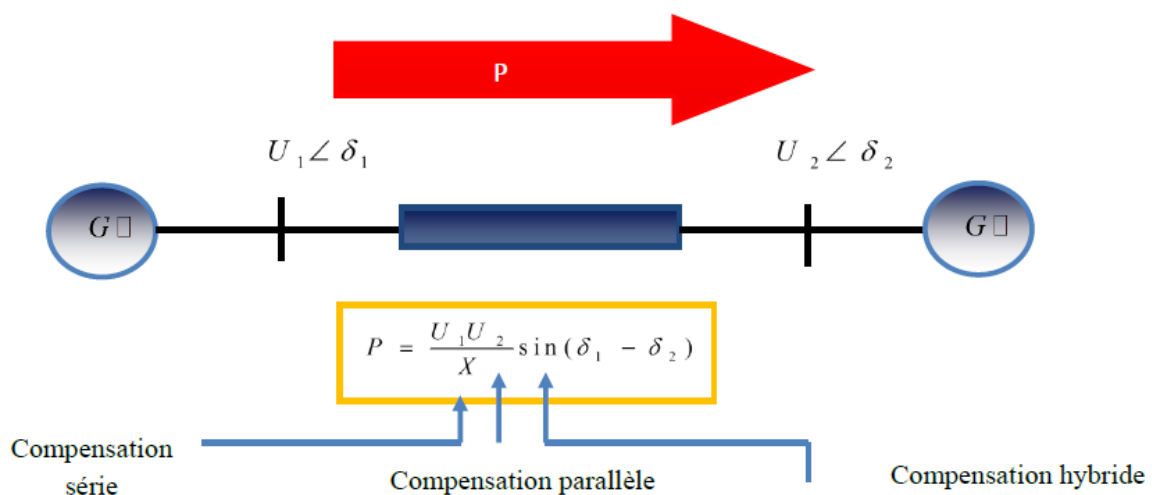


Figure I.1 Schéma principe des dispositifs FACTS

I.1.2 Les avantages des dispositifs FACTS :

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

I.1.3 Les inconvénients des dispositifs FACTS :

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

I.2 Compensateurs parallèles :

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

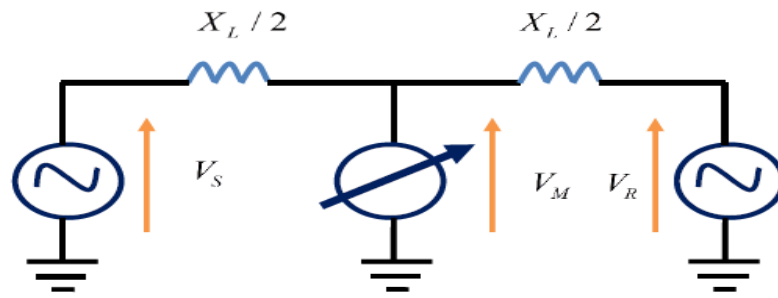


Figure I.2 Principe de compensation shunt

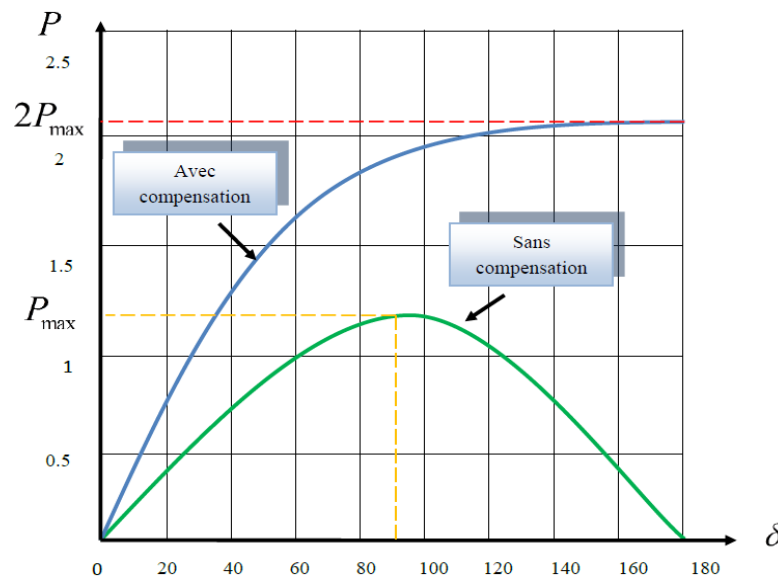


Figure I.3 Courbe de puissance avec et sans compensation shunt en fonction de l'angle de transmission

I.2.1 Compensateur statique de l'énergie réactive (SVC) :

Le SVC (statice var compensateur) est la première génération FACTS qui a été introduite sur le marché il y a presque plus de vingt ans. Il est constitué d'un banc de condensateurs commutés par thyristors (TSC thyristors switched capacitors) et d'un banc de bobines contrôlées par thyristors (TCR thyristor Controlled reactors) comme indiqué par la figure (II.4). Le premier SVC installé sur une ligne de transport d'énergie était en 1979 en Afrique du sud.

Avec une coordination appropriée de l'interrupteur des condensateurs et le contrôle des bobines, la puissance réactive de sortie peut être variée continuellement entre les taux capacitifs et inductifs de l'équipement. [7]

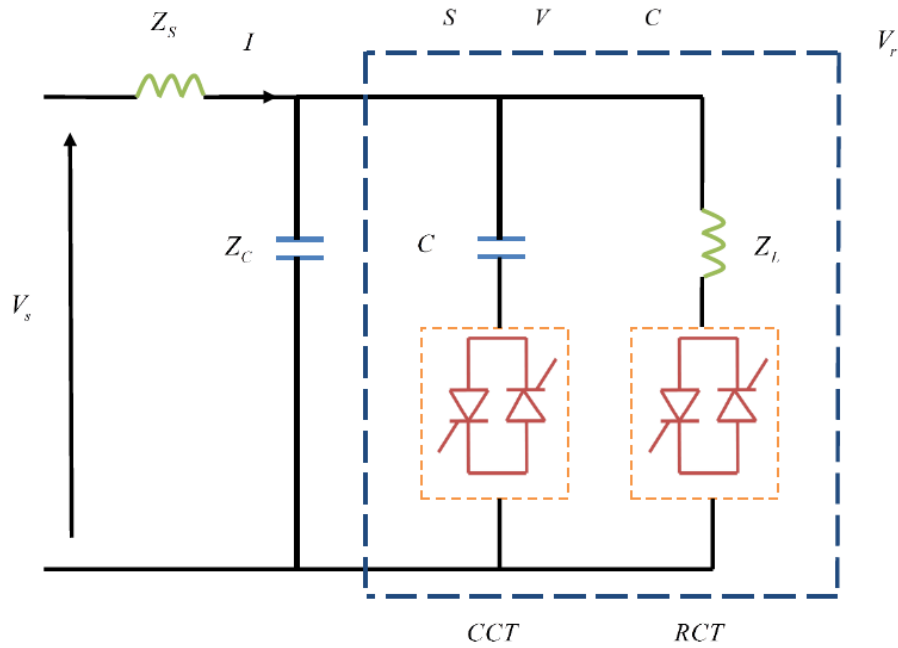


Figure I.4 structure du SVC

I.2.1.1 Principe de fonctionnement : [8]

La caractéristique statique de SVC est donnée par la (figure I.5) Trois zone sont distinctes :

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

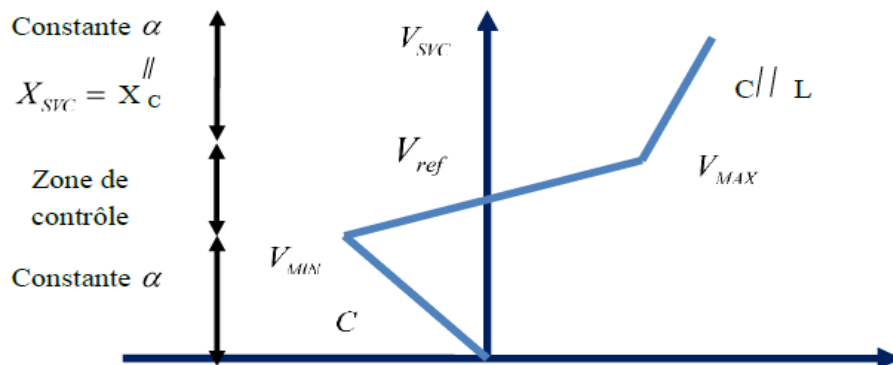


Figure I.5 Fonctionnement du compensateur statique SVC

I.2.1.2 Les avantages de SVC : [8]

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

I.2.2 Compensateur statique STATCOM :

Le STATCOM est un compensateur fonctionnant en parallèle avec la ligne de transmission. Son courant inductif ou capacitif de sortie peut être contrôlé indépendamment du réseau. Le STATCOM est représenté par la (Figure I.6). [9]

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

- ✓ Lier le STATCOM avec le système AC ;

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

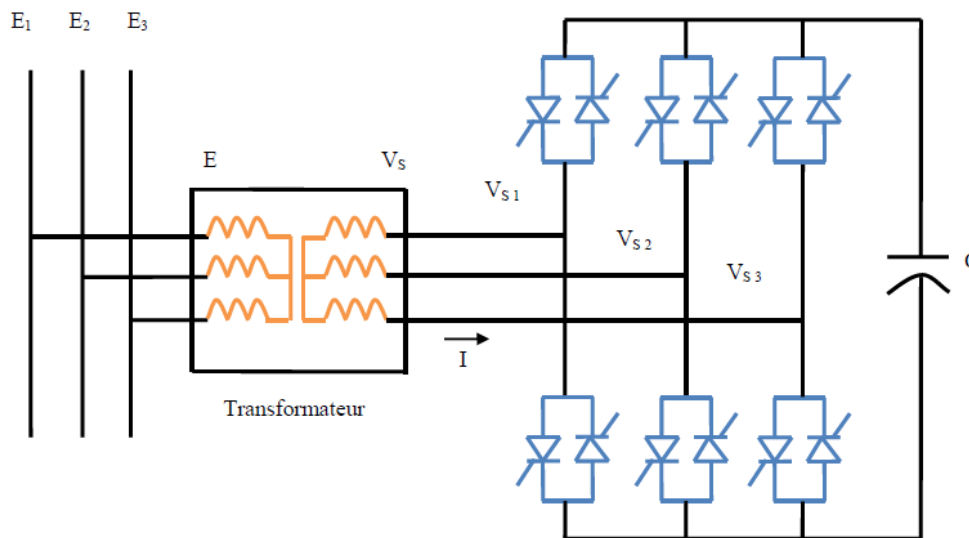


Figure I.6 structure du STATCOM

I.2.2.1 Les avantages de STATCOM : [8]

- Bonne réponse à faible tension : le STATCOM est capable de fournir son courant.
- Nominal, même lorsque la tension est presque nulle.
- Bonne réponse dynamique : Le système répond instantanément.

- L'étendue de la plage de l'opération est plus large qu'avec un SVC classique.
- Pour un contrôle optimal de la tension, les phases sont contrôlées séparément pendant les perturbations du système.
- Un design modulaire du convertisseur permet une adaptation pour une grande plage de puissances nominales.

I.3 Compensateurs série :

Cette compensation a pour principe d'insérer une réactance capacitive sur la ligne toujours dans le but d'en augmenter la puissance transmissible. La ligne étant modélisée par une réactance de type inductive, on comprend aisément que l'on diminue cette réactance en ajoutant une réactance de type capacitive. En conservant le même modèle de ligne. On obtient la compensation série donnée par la Figure I.10. [8]

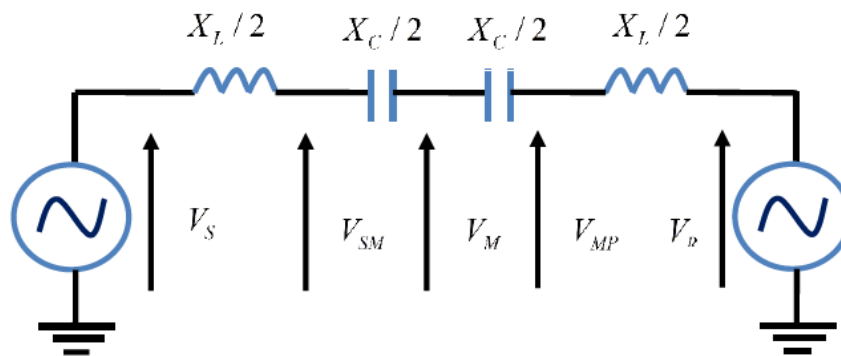


Figure I.7 Principe de compensation sérié

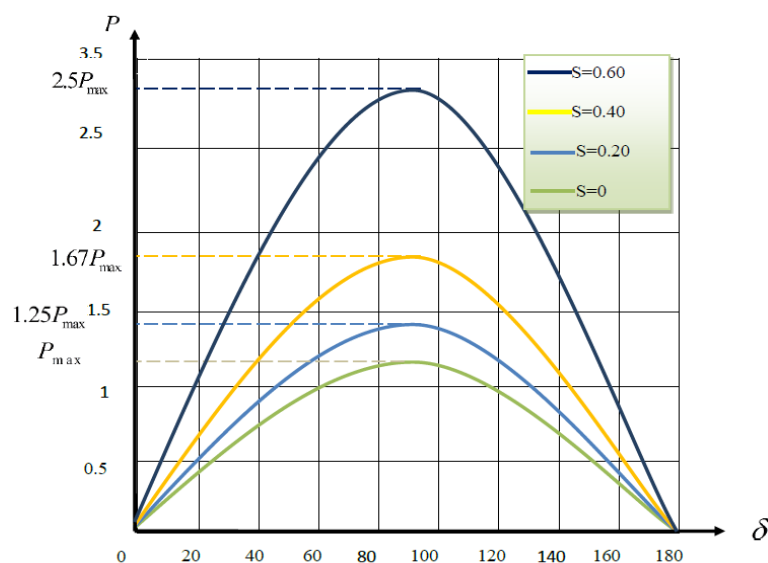


Figure I.8 Courbe de puissance avec et sans compensation

Une modification de X_L augmenter ou diminuer le flux de puissance active pour un angle de phase fixe. De même, la puissance réactive sera modifiée suite à une modification de X_L . La réactance Introduite aura la valeur X_C , donnée par l'équation : [8]

$$X_C = SX_L \quad (I.1)$$

S est le degré de compensation y compris entre :

$$0 \leq S \leq 1 \quad (I.2)$$

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

I.3.1 TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor) :

Un condensateur série commandée par thyristors TCSC (Thyristor Controlled Séries Capacitor), c'est la première génération FACTS qui possède la possibilité de contrôler l'impédance de la ligne. Le TCSC (compensateur série contrôle par thyristor) est composé d'une inductance en série avec un gradateur à thyristors, le tout en parallèle avec un condensateur. Généralement ce dispositif possède un élément de protection contre les surtensions placés en parallèle avec ce dernier, appelé MOV (Métal Oxide Varistor), comme l'indique la (figure I.12). Du point de vue fonctionnement, le TCSC se comporte comme une réactance variable connectée en série avec la ligne de transmission. [13]

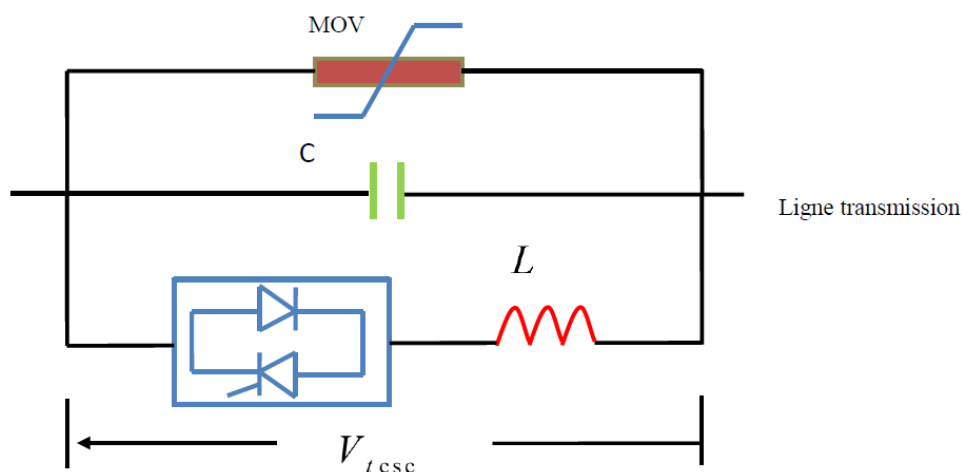


Figure I.9 Structure du TCSC



Figure I.10 Exemple réelle de TCSC

I.3.2 Static Synchronous Series Compensator (SSSC) :

C'est un convertisseur à source de tension placée en série avec la ligne de transport d'énergie électrique à travers un transformateur. Ce type de compensateur est le dispositif le plus important de cette famille. Il est constitué d'un onduleur triphasé couplé en série avec la ligne [12]. La Figure I.14 montre le branchement d'un SSSC sur la ligne de transport.

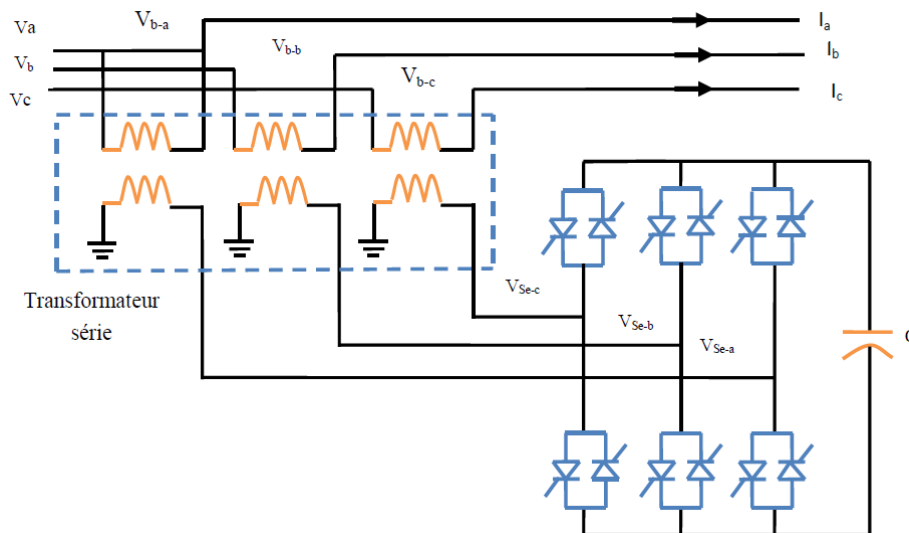


Figure I.11 Schéma de base du SSSC

La caractéristique statique d'un SSSC est donnée sur la Figure I.15.

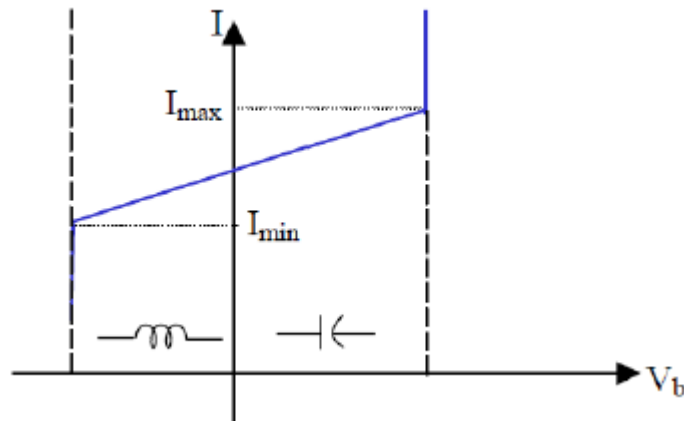


Figure I.12 Caractéristique statique du SSSC

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

I.4 Compensateurs hybrides :

Cette famille de compensateurs est la combinaison des autres groupes. Ils permettent un contrôle multi variables, ils servent à contrôler le flux de puissance active et réactive, la tension et l'angle de transport de l'énergie. On se limite dans ce paragraphe à étudier un seul compensateur : [10]

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

Le TCPAR (Thyristor Controlled Phase Angle Regulator) est un transformateur déphaseur à base de thyristors. Ce dispositif a été créé pour remplacer les déphaseurs à transformateurs à régleur en charge (LTC ; Load Tap Changer) qui sont commandés mécaniquement [11], il est constitué de deux transformateurs, varier la puissance active. Le TCPAR est composé d'un transformateur branché en série avec le réseau, est un deuxième transformateur connecté en parallèle appelé transformateur d'excitation.

L'amplitude de la tension injectée est une combinaison des secondaires du transformateur parallèle dont les rapports de transformation sont (n_1, n_2, n_3). Cette combinaison donne une tension à injecter dont l'amplitude peut prendre 27 valeurs différentes. [10]

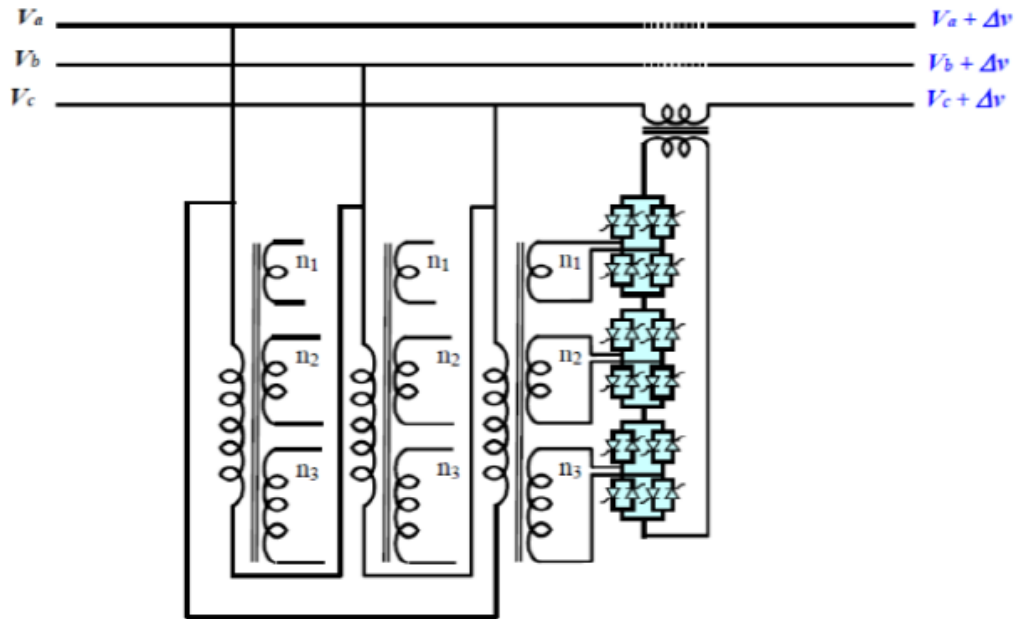


Figure I.13 structure du TCPAR

Le TCPAR possède la capacité de maintenir l'angle effectif maximale de la ligne de transmission durant la première oscillation. En plus, le TCPAR, peut être utilisé aussi pour augmenter la limite de la stabilité transitoire. [3]

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

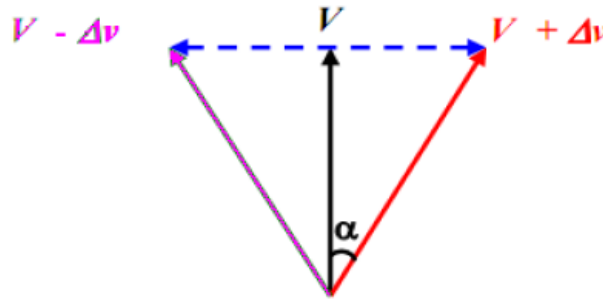


Figure I.14 Diagramme des phasors du TCPAR

I.4.2 Unified Power Flow Controller (UPFC) :

Le contrôleur de transit de puissance unifié UPFC (Unified Power Flow Controller) est composé de deux convertisseurs (redresseur et onduleur) connectés par une liaison continue, l'un étant raccordé en parallèle et l'autre en série. Il s'agit en fait de la combinaison d'un STATCOM et d'un SSSC. Son schéma est représenté par la figure I.9.

Le principe de l'UPFC consiste à dériver un courant et le réinjecter avec un déphasage bien approprié par l'intermédiaire du convertisseur série onduleur générant une tension

contrôlée en phase et en amplitude, ce qui impose le sens, la valeur et la direction des flux de puissance transportés sur la ligne. Donc L'UPFC est un contrôleur dextrement flexible et offre une capacité de contrôleur incomparable.

Le convertisseur parallèle génère une tension U_{pq} , contrôlée en amplitude et en phase, qui est insérée dans la ligne. Donc L'UPFC est un contrôleur dextrement flexible et offre une capacité de contrôleur incomparable [12]. Le convertisseur parallèle génère une tension U_{pq} , contrôlée en amplitude et en phase, qui est insérée dans la ligne.

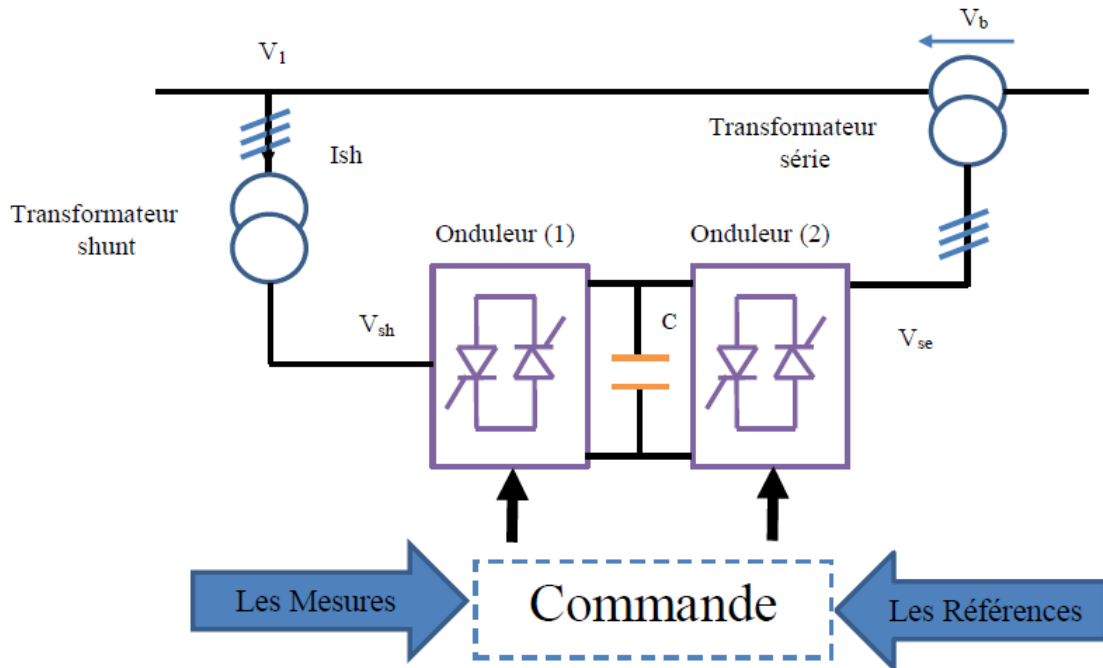


Figure I.15 Schéma de base d'un UPFC

I.5 Coût des dispositifs FACTS :

Mis à part les avantages techniques apportés par les FACTS, d'autres critères liés au coût doivent être pris en considération dans la décision d'installer un dispositif. Sur le plan économique, le critère généralement adopté dans l'évaluation des bénéfices obtenus par un FACTS est que l'accroissement des revenus doit excéder les coûts d'exploitations, de maintenance et d'amortissement de l'installation.

Le coût d'une installation FACTS dépend principalement des facteurs tels que : [14]

- Les performances requises.
- La puissance de l'installation.
- Le niveau de tension du système.

- La technologie du semi-conducteur utilisé.

I.6 Conclusion :

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

Ce chapitre présente aussi une vue globale sur les nouveaux dispositifs de contrôle et de commande des systèmes énergétiques FACTS. Ainsi que La modélisation du TCSC et SSSC, SVC et TCPAR et STATCOM, UPFC. Aussi le principe de fonctionnement et le rôle de ces derniers. [15]

Aujourd'hui cette technologie "FACTS" occupe une place privilégiée pour la gestion de systèmes énergétiques vis-à-vis ces atouts qu'elle offre tout en augmentant la capacité de transport, renforcement de stabilité de tension et le maintien d'une qualité meilleure de l'énergie. [16]

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

CHAPITRE II

CHAPITRE II

Compensateur série contrôlé par thyristor

II. Introduction :

Les dispositifs FACTS permettent donc un contrôle amélioré des systèmes électriques déjà en place. Ces dispositifs font en général appel à de l'électronique de puissance notamment ceux disposant d'une branche le TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor) fait partie. Ces éléments agissent en fait comme des impédances dont la valeur change en fonction de l'angle d'allumage des thyristors. Cet angle d'allumage constitue donc une variable de commande du système.

Notre contribution dans ce travail est de réaliser plusieurs stratégies de positionnements du dispositif de contrôle TCSC qui sont principalement liées au contexte de la dérégulation et plus particulièrement en vue d'une utilisation plus efficace du réseau de transport. L'objectif ultime est la création d'un outil d'optimisation pouvant être utilisé comme aide à la planification par les exploitants du réseau. [17]

II.1 Définition du TCSC :

Un TCSC est constitué de deux branches parallèles. La première comprend deux thyristors T1 et T2 branchés tête-bêche en série avec une inductance L. Cette branche est appelée TCR ou « Thyristor Controlled Reactor » pour inductance contrôlée par thyristor qui peut être comparée à une inductance variable.

La seconde branche ne contient qu'un condensateur C. L'inductance variable, montée en parallèle avec ce condensateur, permet de faire varier l'impédance du TCSC en compensant tout ou partie de l'énergie réactive produite par le condensateur.

La modification de la valeur de cette impédance se fait en jouant sur l'angle d'amorçage des thyristors, i.e. l'instant dans une période où les thyristors commencent à conduire. Il y a une zone critique correspondant à la résonance du circuit LC Figure (II-1). [18]

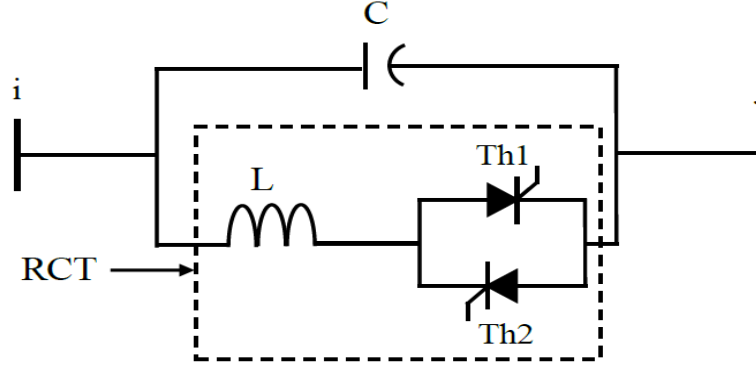


Figure II.1 Structure d'un TCSC

II.2 Principe de fonctionnement de la varistance (MOV) :

Dans la pratique, le TCSC est généralement équipé d'une varistance à oxyde métallique (MOV) pour protéger le condensateur contre les surtensions élevées. L'oxyde de zinc (ZnO) est le type de MOV le plus couramment utilisé. Normalement, lord d'un court-circuit sur la ligne, le MOV (varistance à oxyde métallique) commence à conduire immédiatement après que la tension instantanée aux bornes du condensateur dépasse le niveau de tension de protection. La résistance hautement non linéaire du MOV le rend idéal pour maintenir la tension aux bornes du condensateur dans les limites spécifiées. La caractéristique tension-courant de la varistance est normalement approchée par l'équation exponentielle suivante:

$$i_{MOV} = P \left[\frac{v_x}{V_{REF}} \right]^q \quad (II-1)$$

Dans la relation ci-dessus :

i_{MOV} et v_x sont le courant et la tension de la varistance, respectivement;

P : courant de référence du MOV;

V_{REF} : tension de référence du MOV: $V_{REF} = \sqrt{2} X_C I_P$;

I_P : courant de protection du MOV: $I_P = I_n k$, $k = 2a \text{ à } 2.5$;

q est un exposant de la caractéristique;

X_C : réactance capacitive;

I_n : courant de charge maximum.

La figure II.2 illustre un exemple des caractéristiques tension-courant du MOV indiqué sur une échelle linéaire. On peut voir que le MOV commence à fonctionner juste après que la tension du condensateur dépasse la tension de surcharge maximale. On peut également voir que le courant à travers le MOV augmente (à mesure que la tension augmente) pour

garantir que la tension du condensateur est toujours inférieure au maximum pour éviter toute surtension dangereuse. [19-20]-[21]

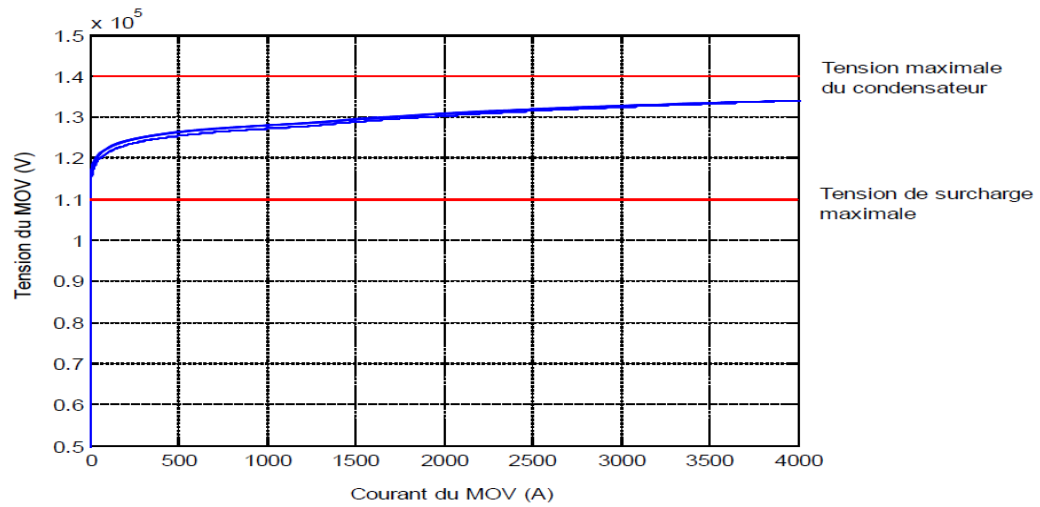


Figure II.2 Caractéristiques tension-courant du MOV

II.3 Principe de fonctionnement du TCSC :

Le TCSC est composé d'une inductance en série avec un gradateur à thyristor, le tout en parallèle avec un condensateur. Le TCSC est inséré sur la ligne de transmission. [22]

Où

X_C : est l'impédance du condensateur du TCSC.

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

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

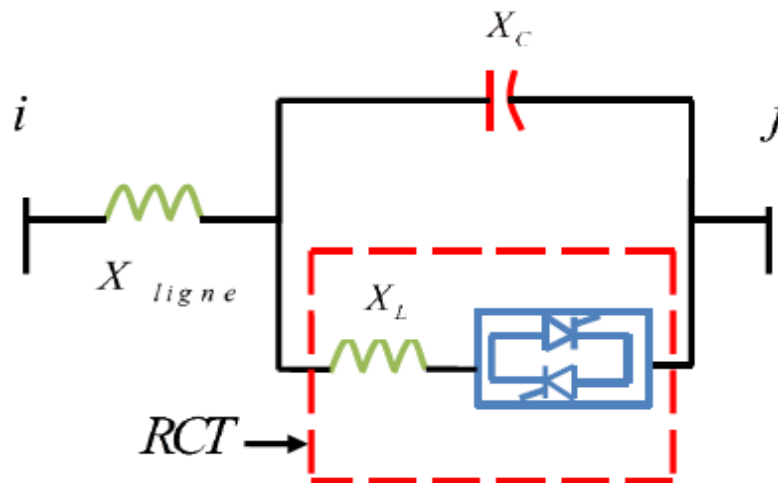


Figure II.3 Insertion d'un TCSC dans la ligne

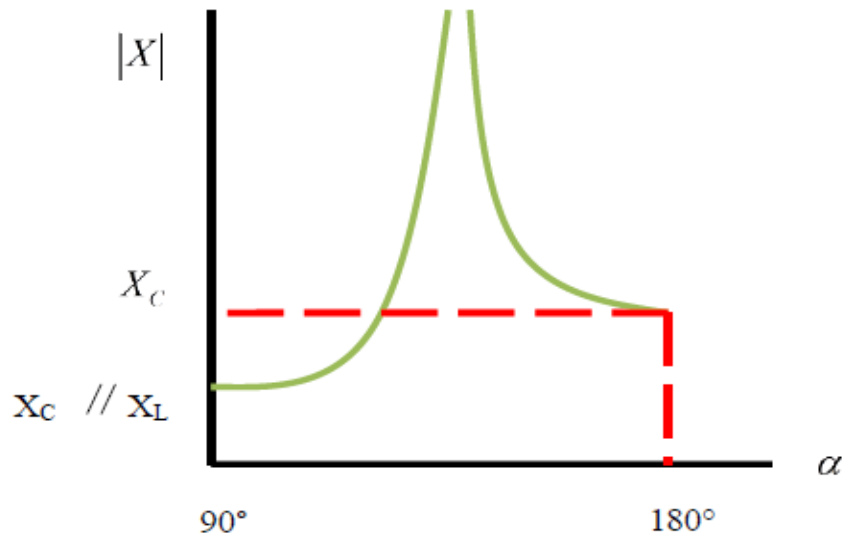


Figure II.4 Impédance du TCSC en fonction de l'angle

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

Quand l'angle d'amorçage du RCT est de 180 degrés, lui des arrêts conduisant, et les actes non contrôlés du réacteur comme limiteur de courant de défaut.

Le dispositif peut opérer en trois modes différents :

Mode hors circuit : les thyristors sont en pleine conduction.

Mode bloqué : les thyristors sont bloqués.

Mode variable : la conduction des thyristors est contrôlée par un signal d'amorçage.

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

II.4 Les caractéristiques d'un TCSC sont : [22]

- La conception matérielle est adaptée à la tension maximale qui doit être supportée.
- Le débit $MVar$ du banc de condensateurs est proportionnel à la tension maximale produite et le courant maximal correspondant.

- Un control avancé, particulièrement pour le mode atténuation des résonances synchrones(SSR).
- Un nombre sans restriction d'opérations et de séquences.
- Un ajustement fréquent du degré de compensation pour l'atténuation des SSR et de l'amortissement des oscillations de courant.

II.5 Mode de fonctionnement du TCSC

II.5.1 Mode de fonctionnement du TCSC en condition normale : [23-24]

Le TCSC peut travailler en plusieurs modes en variant les valeurs de son impédance X . Trois régimes de fonctionnement de TCSC peuvent être distingués :

a) *Mode de fonctionnement avec les thyristors bloqués (Blocked-Thyristor Mode) :*

Lorsque la valve à thyristors n'est pas enclenchée et que les thyristors restent à l'état non passant, le TCSC travaille en mode de blocage. Le courant de la ligne passe uniquement à travers le banc de condensateurs (Figure. II.5).

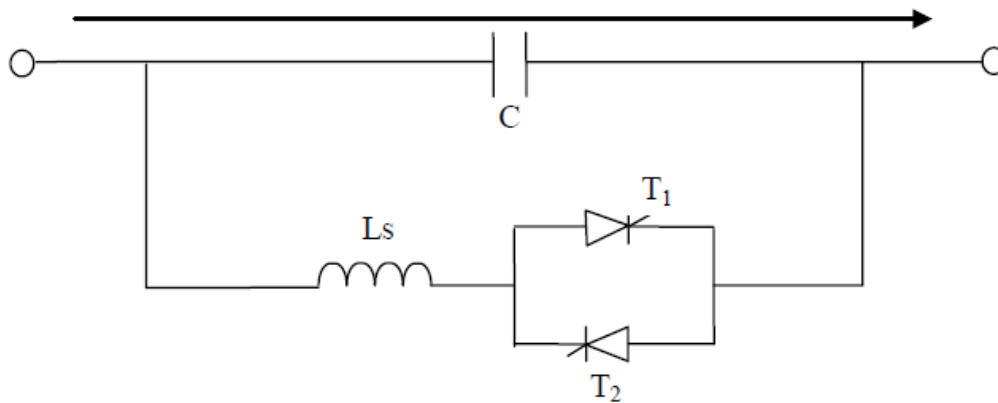


Figure II.5 TCSC en mode de blocage

La tension aux bornes de banc du condensateur (U_C), est donnée par l'équation suivante :

$$U_C = j \cdot X_C \cdot I_C \quad \text{Tel que : } X_C < 0 \quad (\text{II-2})$$

Dans ce mode, le TCSC fonctionne comme un condensateur série fixe.

b) *Mode by-pass :*

Si la valve à thyristors 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 la réactance de la branche de la valve à thyristors (Figure. II.6).

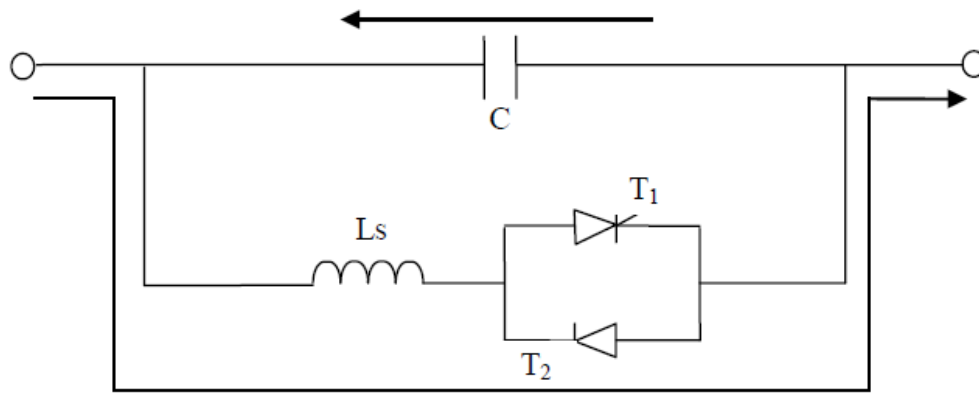


Figure II.6 TCSC en mode by-pass

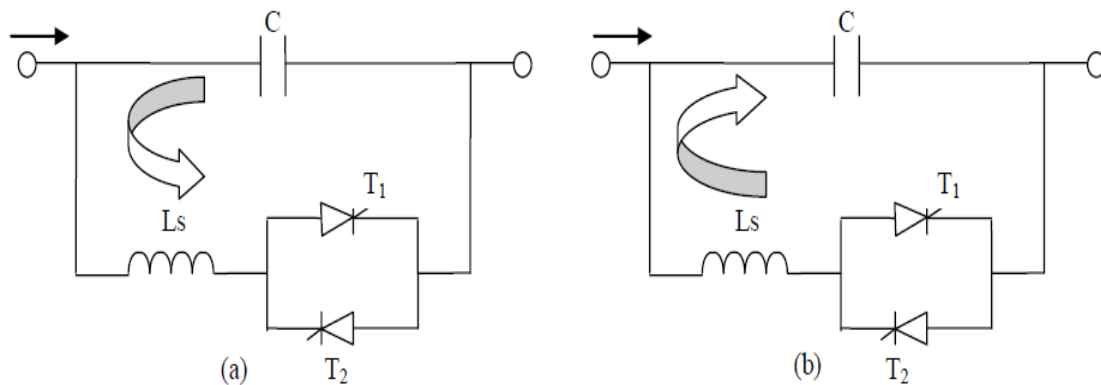
La réactance totale du TCSC est donnée par l'équation suivante :

$$X_{TCSC} = \frac{X_C X_L}{X_L - X_C} \quad (II-3)$$

Dans ce mode, la tension du condensateur pour un courant de ligne donné est beaucoup plus faible qu'en mode de blocage. Par conséquent, le mode by-pass est utilisé pour réduire la sollicitation du condensateur pendant les défauts du système.

c) Mode de conduction partielle :

Les thyristors sont commandés en conduction partielle. Un courant de boucle circule dans le TCSC et la réactance apparente de ce dernier est supérieure à celle de la capacité (ou de l'inductance) seule (Figure. II.7).

Figure II.7 TCSC en mode de conduction partielle, avec T₁ amorcé, (b) avec T₂ amorcé

Si le thyristor T₁ est amorcé, le thyristor T₂ est bloqué et vice versa. Quand T₁ conduit l'impédance équivalente est inductive (Figure. II.7. (a)) et si T₂ est amorcé, l'impédance équivalente est capacitive (Figure. II.7. (b)).

II.5.2 Mode de fonctionnement du TCSC en cas de défaut ; [25-26]

En cas de défaut, différents modes de fonctionnement pourraient apparaître, intégrant les équipements de protection du TCSC. Ces modes sont les suivants:

a) Mode capacitif amplifié sans conduction du MOV :

Pour un courant de défaut faible, le système de protection (MOV) du TCSC ne fonctionne pas; par conséquent, le TCSC reste constamment dans son mode de fonctionnement normal; c'est-à-dire qu'aucune transition depuis le mode capacitif amplifié n'est effectuée. Dans ce cas, il existe une compensation importante, de telle sorte que les zones de protection du relais de distance conventionnel sont étendues ; et le relais peut également perdre son intégrité directionnelle. Cette condition se produit généralement lorsque le défaut est dans les lignes adjacentes.

b) Mode capacitif amplifié avec conduction du MOV :

Pour le cas d'un défaut à courant fort, le MOV fonctionne est diminuer la tension aux bornes du condensateur. Cependant, le MOV est assez rapide pour conduire et se réinitialiser dans un demi-cycle. Dans ce cas, Le MOV ne court-circuiterait pas le condensateur comme le ferait le disjoncteur. Cette condition est généralement très courte mais peut être répétée plusieurs fois pendant la période de défaut. Dans cette condition, l'impédance du TCSC serait la combinaison parallèle du condensateur et de la faible résistance du MOV. À ce moment, les zones de protection du relais de distance conventionnel sont étendues, mais moins que le cas précédent (sans conduction du MOV).

c) Mode de blocage :

Dans certains cas, pendant le régime transitoire en cas de défaut, l'angle de phase de la tension aux bornes du condensateur change rapidement, ce qui modifie l'angle d'amorçage du TCSC. Pour éviter des surintensités dans ce cas, les thyristors sont bloqués. Dans cette condition, le TCSC agit uniquement comme un condensateur série fixe. Les zones de protection du relais sont étendues, mais moins que le cas du mode capacitif amplifié. Si la surtension et la surintensité sont éliminées, le système retourne au mode normal, sinon l'énergie absorbée par le MOV dépasse ses limites et le TCSC passe du mode de blocage au mode by-pass pour protéger le MOV et le condensateur.

d) Mode by-pass :

Si le courant de défaut est relativement élevé et l'opération du MOV ne suffit pas pour diminuer la tension du condensateur, l'énergie du MOV dépasse une certaine valeur, le TCSC passe en mode by-pass. Dans ce cas, les zones de protection du relais de distance sont réduites.

e) Mode by-pass du disjoncteur :

Si le défaut n'est pas éliminé dans un certain délai (défaillance de protection principale), le disjoncteur se ferme. Comme la réactance série dans le circuit du disjoncteur est très petit, le relais se trouve dans une situation normale. Ce mode est utilisé uniquement comme protection de secours (Figure.II.8).

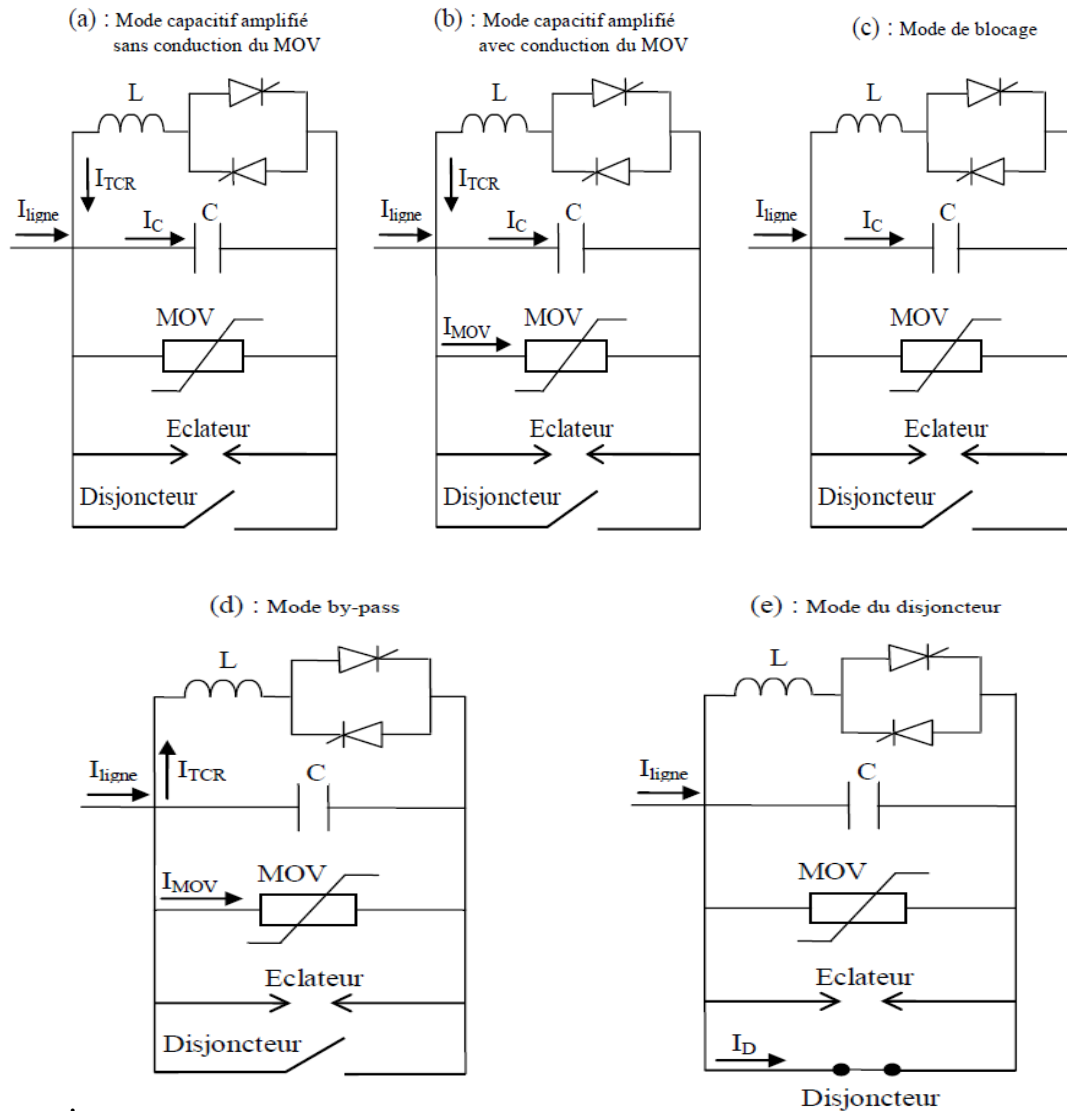


Figure II.8 Mode de fonctionnement du TCSC en cas de défaut

II.6 Intégration du TCSC dans le système :

Lorsqu'un TCSC est placé dans une ligne reliant les noeuds « i » et « k », il est directement intégré dans le schéma en π de la ligne selon le modèle de la (figure II.9). [27]

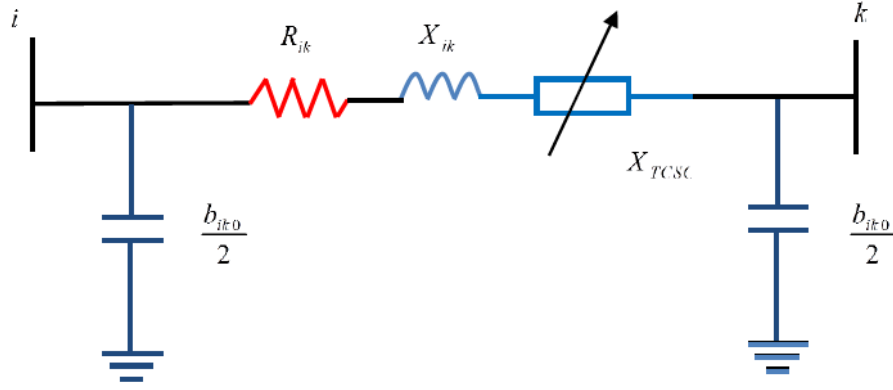


Figure II.9 TCSC inséré dans la ligne

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

$$Y = \begin{pmatrix} \bar{Y}_{ik} + \frac{\bar{Y}_{ik0}}{2} & -\bar{Y}_{ik} \\ -\bar{Y}_{ki} & \bar{Y}_{ik} + \frac{\bar{Y}_{ik0}}{2} \end{pmatrix} \quad (\text{II-4})$$

Pour :

$$\bar{Y}_{ik} = \frac{1}{r_{ik} + j(x_{ik} + x_{TCSC})} \quad (\text{II-5})$$

II.7 Influence du TCSC :

La Figure (II.10) montre l'influence du TCSC sur la caractéristique *PV* (la courbe d'effondrement). Comme déjà mentionné précédemment ; le TCSC est un équipement FACTS série qui contrôle la puissance transmise dans une ligne par la variation de la réactance de cette dernière. Dans notre application, la variation de la réactance est effectuée avec un pourcentage de $\pm 50\%$. Les caractéristiques *PV* obtenues, pour différentes valeurs de X , montrent que la marge de stabilité de la tension augmente quand la réactance de la ligne diminue. Ce résultat apparaît très logique, car l'augmentation de la réactance de la ligne (cas des lignes longues) augmente les pertes réactives, ce qui provoque un déséquilibre entre la demande et la production de l'énergie réactive. Ainsi, le réseau ne peut pas satisfaire la demande de charge. Cette situation favorise un effondrement de tension pour des niveaux de charge relativement faibles. D'autre part, la compensation de la ligne par le TCSC diminue la réactance apparente de la ligne, ce qui fait réduire les pertes réactives et augmenter ainsi la marge de stabilité de tension.

Remarquons que dans la courbe en pointillée, la tension critique reste constante pour les trois cas de test, malgré l'intervention du TCSC. Ce résultat confirme l'utilisation

spécifique du TCSC comme un contrôleur efficace d'écoulement de puissance et non de contrôle de la tension.

Dans la pratique, l'augmentation de la réactance de la ligne peut se traduire par un incident d'ouverture d'une ligne ou lorsque la production est très éloignée de la consommation. Dans ces deux cas, on a vu qu'une compensation série est pratiquement bénéfique. [28]

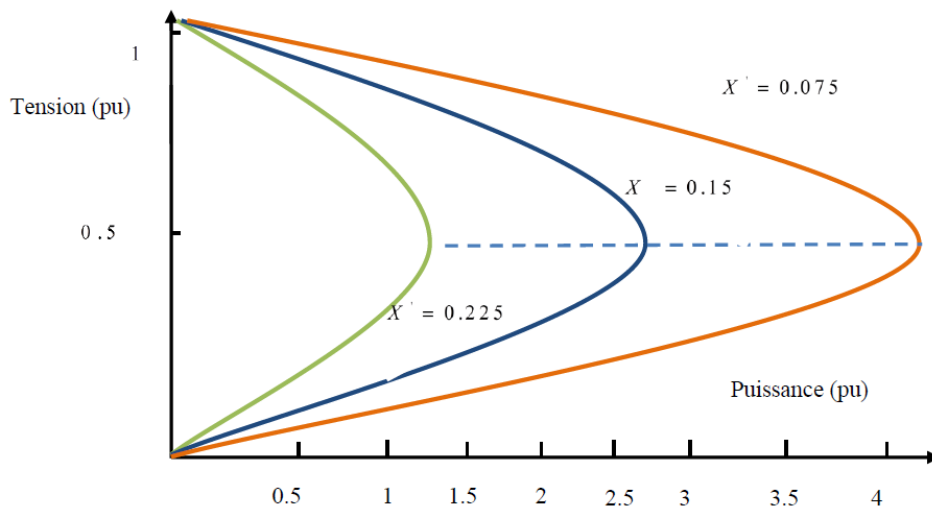


Figure II.10 Influence de TCSC sur la caractéristique PV

II.8 Modélisation du compensateur série Contrôlé par Thyristors (TCSC):

Un condensateur série commandée par thyristors TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor) est constitué de deux branches parallèles. La première comprend deux thyristors T_1 et T_2 branchés en tête-bêche en série avec une inductance L . Cette branche est appelée TCR ou « Thyristor Controlled Reactor » inductance contrôlée par thyristor qui peut être comparée à une inductance variable. La seconde branche ne contient qu'un condensateur C . Ce montage permet un réglage continu sur une large gamme de la réactance capacitive à la fréquence fondamentale du réseau. Les montages peuvent varier selon les fabricants. La (figure II.11), illustre le schéma de base d'un module de TCSC.

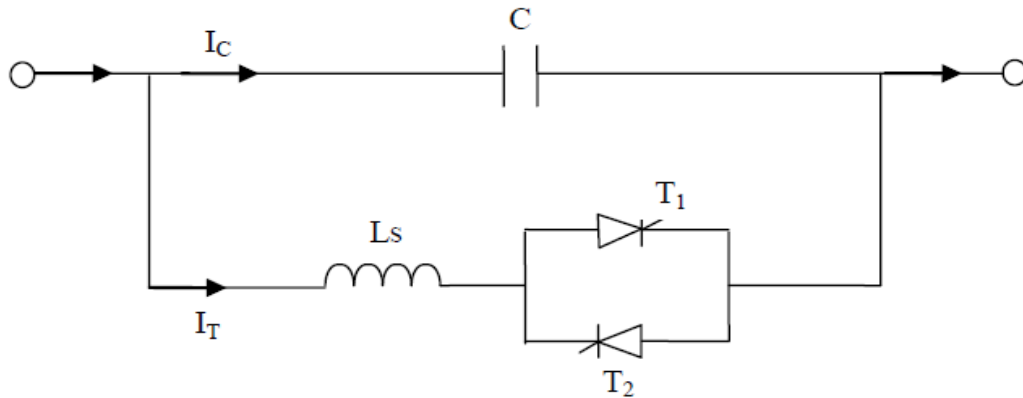


Figure II.11 Schéma de base d'un module de TCSC

Un système TCSC réel comprend généralement une combinaison en cascade de plusieurs modules identiques tous contrôlés de la même façon. Un tel schéma est utilisé afin de minimiser les coûts d'installation. Un système TCSC conceptuel avec des modules TCSC de base est illustré à la (figure. II.12). Les condensateurs - $C_1, C_2, \dots, C_n$ - dans les différents modules TCSC peuvent avoir des valeurs différentes pour fournir une plus large gamme de contrôle de la réactance. De plus, l'inducteur du TCR peut également être divisé en deux moitiés pour éviter d'endommager les thyristors dans le cas des défauts internes dans l'inductance. [23-24]

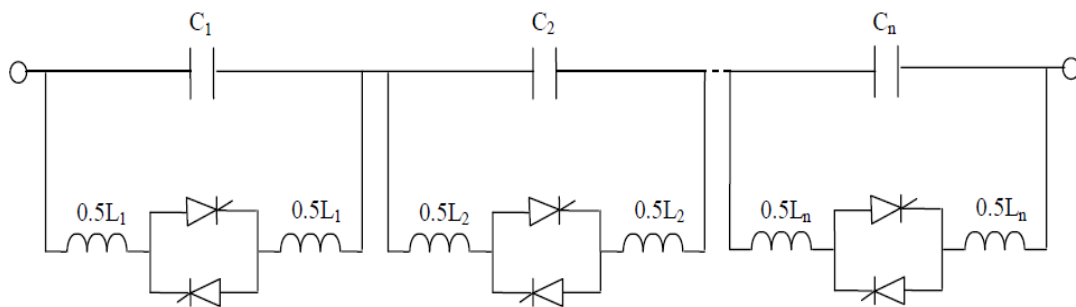


Figure II.12 Schéma d'un TCSC composé de plusieurs modules

II.9 Protection du TCSC :

Dans les installations typiques de condensateur série commandée par thyristors, il existe plusieurs techniques utilisées pour protéger les condensateurs. Lors d'un court-circuit sur la ligne, la tension aux bornes du condensateur peut dépasser le seuil admissible. Afin de limiter la surtension, on installe une varistance à oxyde de métal (MOV) et un commutateur de dérivation comme dispositifs de protection, comme le montre la (figure II.13).

La varistance, qui est essentiellement une résistance non linéaire, protège le TCSC contre les surtensions élevée en mode capacité en fournissant un nouveau chemin pour le courant

de défaut. De plus, Par mesure de sécurité supplémentaire, on ajoute un éclateur et un disjoncteur en parallèle avec l'ensemble. Lorsque l'éclateur est amorcé, il court-circuite le condensateur et la varistance. Ensuite, le courant important est détecté par les relais de protection qui font ouvrir les disjoncteurs à chaque extrémité de la ligne.

Le disjoncteur permet de contourner le tout et de mettre la compensation hors service. L'ouverture de ce disjoncteur permet aussi de remettre la compensation en service lorsque la ligne est en charge. [29]

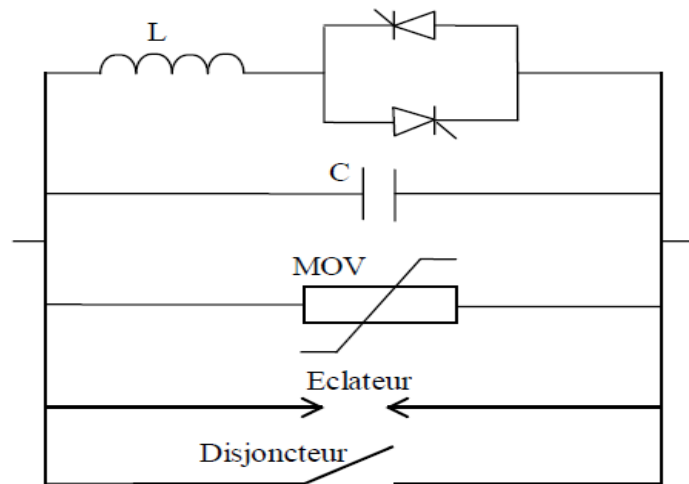


Figure II.13 Protection du TCSC

II.10 Les avantages de TCSC : [30]

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

II.11 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une définition générale et le principe de fonctionnement du TCSC et ses caractéristiques ainsi que le mode de fonctionnement et le modèle mathématique qui traduit son comportement et la protection du TCSC.

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

CHAPITRE III

CHAPITRE III

L'emplacement optimal du TCSC

III. Introduction

L'analyse de sensibilité devient de plus en plus importante dans les opérations pratiques des systèmes électriques, y compris les opérations sur le marché de l'électricité.

Les chercheurs utilisent les sensibilités pour étudier et surveiller le comportement du marché et du système électrique, ainsi que pour détecter les problèmes éventuels de son exploitation.

Ces calculs de sensibilité déterminent si la capacité en ligne indiquée dans le plan des ressources est située au bon endroit du réseau pour répondre à la demande prévue.

En cas de congestion ou de violation, le programme de génération basée sur les calculs de sensibilité peut déterminer si une allocation différente des ressources disponibles peut résoudre le problème de congestion ou de violation.

Ce chapitre présente les différents types de facteurs de sensibilité tels que, la Facteur de répartition de puissance (PTDF), la réduction de perte réactive. Nous avons testé chaque facteur de sensibilité sur différents niveaux de réseaux (6 noeuds et 14 noeuds).

Première Partie :

III.1 L'emplacement du TCSC :

Le compensateur série commandée par thyristors (TCSC) et ses dispositifs de protection associés peuvent être installés à l'une ou dans les deux extrémités de la ligne au même temps, comme indiqué respectivement dans les figure.III.1a et figure.III.1b. Les extrémités de ligne sont des emplacements typiques de compensateur TCSC, car il est généralement possible d'utiliser l'espace disponible dans la sous-station. Cela réduit également les coûts d'installation. Une autre possibilité consiste à installer le TCSC au milieu de la ligne. Cette configuration est plus efficace surtout pour les lignes de transmission très longues. Par conséquent, cette étude se concentrera sur le système où le TCSC est installé au milieu de la ligne, comme représenté sur la Figure III.1. [31]

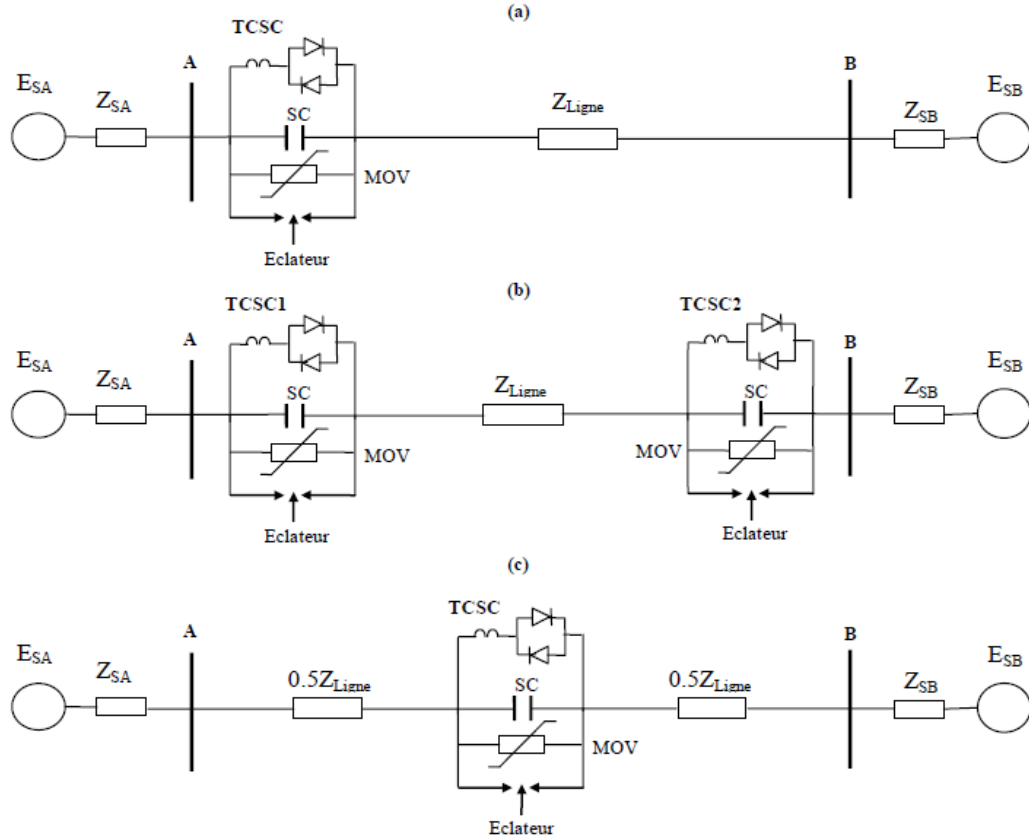


Figure III.1 Différents emplacements du TCSC dans le réseau électrique

III.2 les facteurs de sensibilité :

III.2.1 Facteur de répartition de puissance (PTDF) : [32, 33, 34, 35 ,36]

Le facteur de répartition de puissance (PTDF) permet de prévoir les changements de l'écoulement de puissance d'une ligne l lorsqu'il y a un transfert de puissance active entre deux noeuds i et j .

Le $PTDF_{ij,l}$ signifie que le facteur de répartition de puissance de la ligne l lorsqu'il y a un transfert de puissance active (ΔP) de noeud i à le noeud j .

L'expression suivante exprime le PTDF de la ligne l :

$$PTDF_{l,j,1} = \frac{\Delta f_l}{\Delta P} \quad (III.1)$$

Avec, i : noeud d'injection ; j : noeud de reçoit.

Δf_l : Le changement en MW de flux de puissance dans la ligne L lorsque la puissance de transfert P est effectuée entre i et j .

ΔP : La puissance transférée de bus i à j .

III.2.1.1 Calcul de PTDF :

Supposant, qu'il existe une seule transaction dans le système, la transaction prend une valeur 1 MW au noeud 'i' et -1 MW au noeud 'j', ensuite les entrées correspondantes dans l'équation 3.2 seront $P_i = 1$ et $P_j = -1$, et les autres entrées sont nuls.

$$[\theta_l] = [X_{l,1} \quad L \quad X_{l,n-1}] \begin{bmatrix} 0 \\ +1 \\ M \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (III.2)$$

Et :

$$[\theta_m] = [X_{m,1} \quad L \quad X_{m,n-1}] \begin{bmatrix} 0 \\ +1 \\ M \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (III.3)$$

$$\theta_l = X_{l,i} - X_{l,j} \quad (III.4)$$

$$\theta_m = X_{m,i} - X_{m,j} \quad (III.5)$$

$$PTDF_{lm,ij} = \frac{X_{l,i} - X_{m,i} - X_{l,j} + X_{m,j}}{x_{lm}} \quad (III.6)$$

X_{lm} : la réactance de la ligne lm.

X_{li} : la réactance de la ligne li.

$L^{ème}$ est la ligne, $i^{ème}$ la colonne de la matrice de réactance X,

Le changement de l'écoulement de la ligne associé à un nouveau transfert de puissance, donc :

$$\Delta P_{lm} = PTDF_{l,m,ij} P_{ij} \quad (III.7)$$

Où :

l et m : extrémités de la ligne surveillée.

i et j : les noeuds pour les nouvelles transactions proposées.

P_{ij} : la nouvelle quantité de la transaction en MW.

Les facteurs PTDF sont des estimations linéaires de la variation de flux sur une ligne avec un changement de puissance d'un noeud à l'autre.

III.2.2 Réduction des pertes de puissance réactive d'une ligne particulière :

Beaucoup de méthodes ont été proposées pour optimiser l'emplacement des dispositifs FACTS, ces méthodes sont différentes selon le type du compensateur (shunt, série ou hybride).

Pour les compensateurs FACTS type sérié, plusieurs indices ont été proposés pour le choix optimal de leurs l'emplacement [37,38]. Dans cette étude l'indice suivant est utilisé pour le choix de l'emplacement du compensateur TCSC.

$$\alpha_{ij} = \frac{\partial Q_L}{\partial x_{i,j}} \quad (\text{III.8})$$

$$\alpha_{ij} = \frac{\partial Q_L}{\partial x_{i,j}} = [V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos(\delta_i - \delta_j)] \frac{R_{ij}^2 - x_{ij}^2}{(R_{ij}^2 + x_{ij}^2)^2} \quad (\text{III.9})$$

Les équations de l'écoulement de puissance active et réactive aux nœuds i et j avec une nouvelle réactance de ligne donnée sont comme suit :

$$P_{ij}^c = V_i^2 G_{ij} - V_i V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad (\text{III.10})$$

$$P_{ji}^c = V_j^2 G_{ij} - V_i V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} - B_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad (\text{III.11})$$

$$Q_{ij}^c = -V_i^2 (B_{ij} + B_{sh}) - V_i V_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \quad (\text{III.12})$$

$$Q_{ji}^c = -V_j^2 (B_{ij} + B_{sh}) - V_i V_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} + B_{ij} \cos \delta_{ij}) \quad (\text{III.13})$$

La perte de puissance réactive de chaque ligne peut être formulée comme suit :

$$Q_L = Q_{ij} + Q_{ji} \quad (\text{III.14})$$

$$Q_L = -(B_{ij} + B_{sh})(V_i^2 + V_j^2) + 2V_i V_j B_{ij} \cos \delta_{ij} \quad (\text{III.15})$$

Avec : $G_{ij} = \frac{r_{ij}}{r_{ij}^2 + (x_{ij} - x_c)^2}$ et $B_{ij} = \frac{(x_c - x_{ij})}{r_{ij}^2 + (x_{ij} - x_c)^2}$

V_i, V_j : La tension au niveau du noeud i et j.

δ_{ij} : Le déphasage entre les noeuds i et j ($\delta_i - \delta_j$).

x_c : La réactance capacitive de TCSC.

x_{ij} : La réactance de ligne i-j.

r_{ij} : La résistance de ligne i-j.

G_{ij} : La conductance de ligne i-j avec TCSC.

B_{ij} : La susceptance de ligne i-j avec TCSC.

B_{sh} : Susceptance shunt de la ligne i-j.

P_{ij}^c : Le transfert de puissance active entre les noeuds i et j avec TCSC.

Q_{ij}^c : Le transfert de puissance réactive entre les noeuds i et j avec TCSC.

Q_L : La perte réactive sur la ligne i-j.

Deuxième partie :

III.3 Introduction :

Power World Simulator (Simulator) est un progiciel de simulation de système électrique conçu dès le départ pour être convivial et hautement interactif. Le simulateur a le pouvoir d'effectuer des analyses techniques sérieuses, mais il est également si interactif et graphique qu'il peut être utilisé pour expliquer les opérations du système électrique à un public non technique. Avec la version 19.0, nous avons rendu Simulator plus facile à utiliser, mais encore plus puissant et plus visuel.



Figure III.2 Interface programme PowerWord

Simulator est en fait un certain nombre de produits intégrés. À la base se trouve un moteur de solution de flux de puissance complet et robuste capable de résoudre efficacement des systèmes comptant jusqu'à 60 000 bus.

Cela rend Simulator très utile en tant que package d'analyse de flux de puissance autonome. Contrairement à d'autres packages de flux de puissance disponibles dans le

commerce, Simulator permet à l'utilisateur de visualiser le système grâce à l'utilisation de schémas unifilaires animés en couleur avec une capacité de zoom et de panoramique complète. De plus, les modèles de système peuvent être modifiés à la volée ou même construits à partir de zéro à l'aide de l'éditeur de cas graphique complet de Simulator.

Les lignes de transmission peuvent être mises en service ou hors service, une nouvelle transmission ou génération peut être ajoutée et de nouvelles transactions peuvent être établies, le tout en quelques clics de souris.

L'utilisation intensive de graphiques et d'animations par Simulator augmente considérablement la compréhension de l'utilisateur des caractéristiques, des problèmes et des contraintes du système, ainsi que de la manière d'y remédier. Le simulateur fournit également un support pratique pour simuler l'évolution du système électrique dans le temps. Des variations de charge, de génération et d'horaire d'échange dans le temps peuvent être prescrites, et les changements résultants dans les conditions du système électrique peuvent être visualisés.

Cette fonctionnalité peut être utile, par exemple, pour illustrer les nombreux problèmes associés à la restructuration de l'industrie. En plus de ces fonctionnalités, Simulator propose une répartition économique intégrée, une analyse économique des transactions de zone, un calcul du facteur de distribution de transfert de puissance (PTDF) et une analyse des contingences, tous accessibles via une interface visuelle cohérente et colorée. Ces fonctionnalités sont si bien intégrées que vous serez opérationnel quelques minutes après l'installation.

III.4 Placement optimal d'un TCSC en utilisant le PTDF :

III.4.1 Résultat de la simulation du système IEEE-14 nœuds :

1) Exemple 01 :

Le réseau électrique IEEE 14 nœuds représente une approximation du système d'alimentation électrique d'Américaine, il comporte cinq générateurs et 11 charges (Figure III.3).

En supposant que la ligne (6-12) soit surchargée (102%). L'objectif principal de cette simulation est la résolution de la surcharge en utilisant l'emplacement optimal de TCSC par le facteur de répartition de puissance active PTDF.

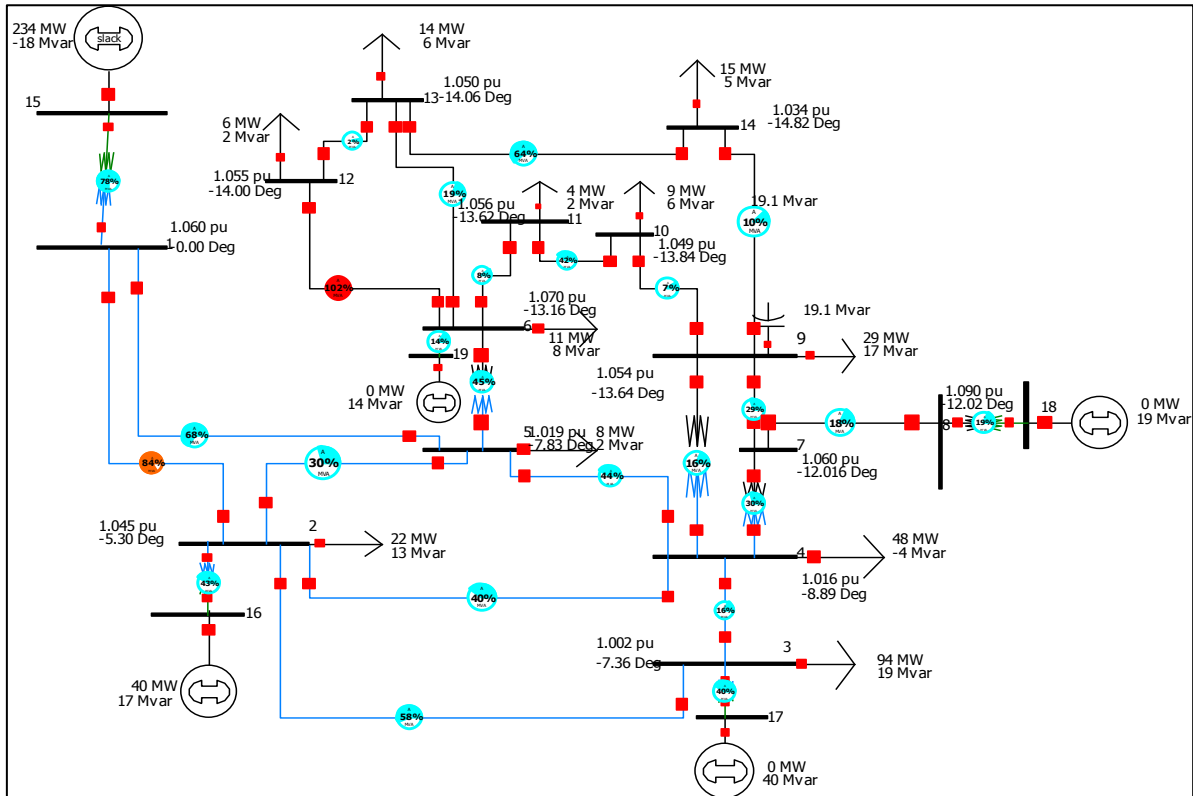


Figure III.3 Le système de IEEE 14 noeuds sans TCSC

Étapes de la méthode du facteur PTDF pour trouver l'emplacement optimal du TCSC :

- a) Après être entré dans le programme, nous cliquons sur **sensitivités** de la porte **tools**, (Figure III.4), puis choisissons **power transfer distribution factors (PTDFs)**.

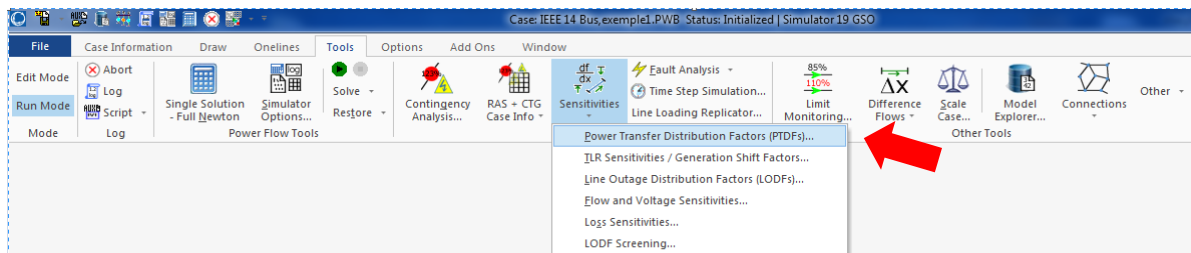


Figure III.4 La première étape (a)

- b) Sélectionnez le bus surchargé, cliquez sur **calculate PTDFs**, cliquez sur **Line/transformers**, puis arrangez le **PTDF FROM bus** (Figure III.5).

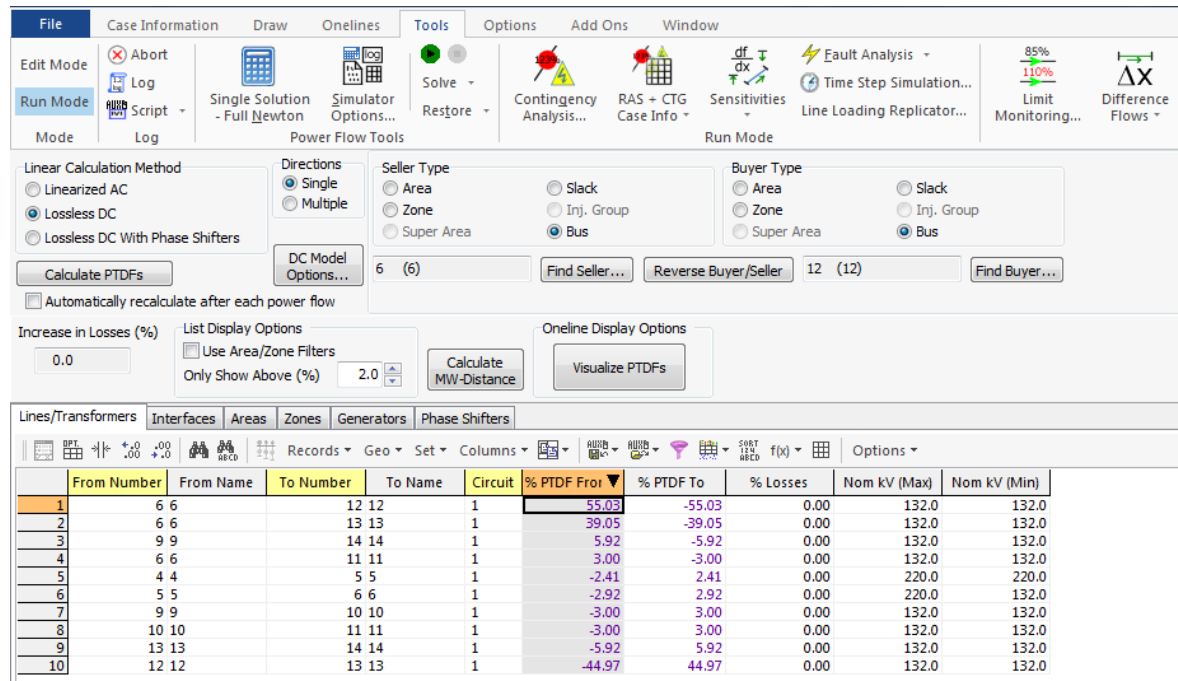


Figure III.5 La Deuxième étape (b)

Le tableau III.1 présente le PTDF de chaque ligne lorsque la ligne (6-12) est surchargée. Nous remarquons que le ligne (6-13) sont plus sensibles avec comme pourcentage 39.05%.

Tableau III.1 Le PTDF lorsque la ligne (6-12) est surchargée

Ligne	PTDF%	La limite maximale de puissance (MVA) en %
6-12	55.03	102.0
6-13	39.05	19.0
9-14	5.92	10.3
6-11	3.00	8.0
4-5	-2.41	44.0
5-6	-2.92	44.8
9-10	-3.00	6.8
10-11	-3.00	42.4
13-14	-5.92	63.9
12-13	-44.97	1.8

c) Nous choisissons la ligne la plus sensible pour la ligne surchargée, double-cliquez sur la ligne la plus sensible, On change la valeur de X en le multipliant par 0,3 (Figure III.6).

Figure III.6 La troisième étape (c)

Avant l'emplacement du TCSC pour chaque cas, on doit déterminer l'impédance totale de la ligne, en supposant que la compensation est 70%, nous pourrions trouver les valeurs totales des impédances (X_{total}) de lignes en utilisant l'équation (III.16).

$$X_{total} = X_{ligne} - X_{TCSC} \quad (III.16)$$

$$X_{TCSC} = 70\% X_{ligne} \quad \text{ou} \quad X_{TCSC} = 0.7 X_{ligne}$$

Donc ;

$$X_{total} = X_{ligne} - 0.7 X_{ligne} = 0.3 X_{ligne}$$

La nouvelle impédance de chaque ligne peut être donnée comme suit :

$$X_{total(6-13)} = 0.130270 \times 0.3 = 0.039081 \text{ pu}$$

d) Nous enregistrons les modifications et cliquons sur **solve**.

Tableau III.2 La limite de ligne (6-12) avec et sans TCSC

Placement de TCSC	La limite de ligne 2-4 (MVA) %	
	Sans TCSC	Avec TCSC
6-13	102	79

- **Discussion des résultats**

1) TCSC à la ligne (6-13)

Après avoir installé le TCSC sur la ligne (6-13), (figure III.7), nous avons observé que la surcharge sur la ligne (6-12) avait diminué de 102% à 79 %. Le TCSC a réduit la surcharge sur la ligne (6-12) Donc, la ligne (6-13) l'endroit optimal de l'emplacement de TCSC.

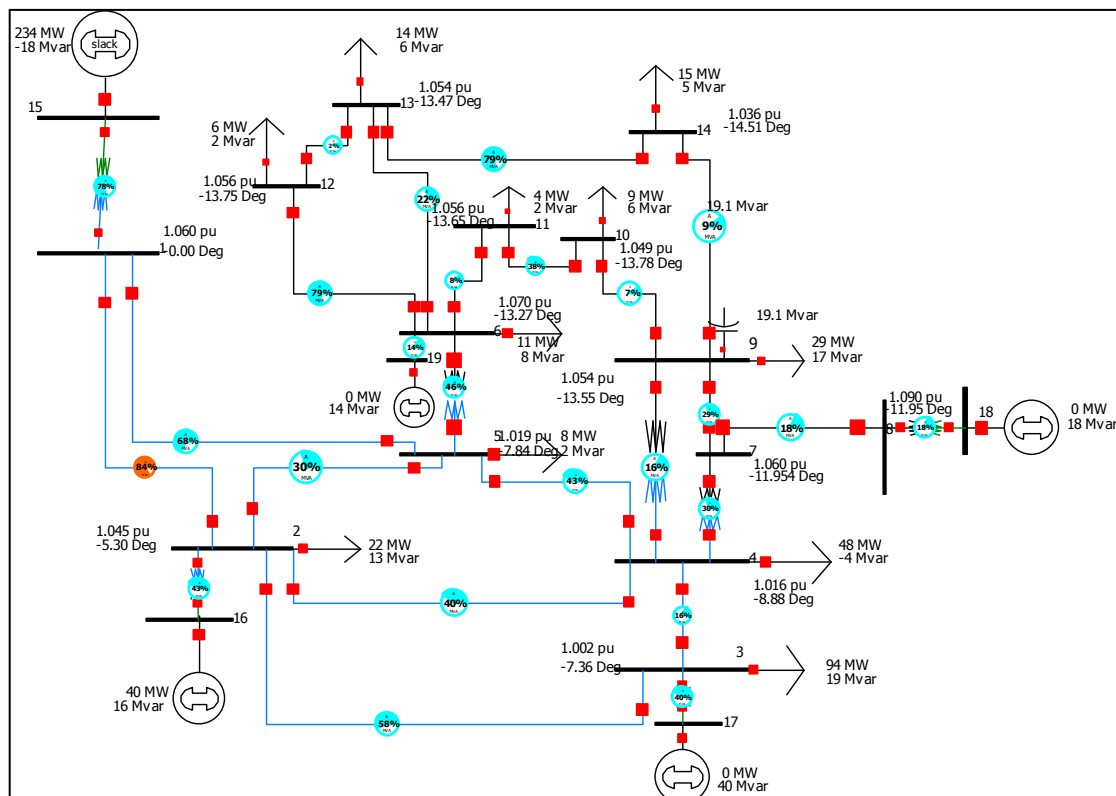


Figure III.7 Le système d'IEEE 14 nœuds avec TCSC dans la ligne (6-13), étape (d)

D'après les résultats précédents les l'endroit optimal de l'emplacement de TCSC sont la ligne (6-13).

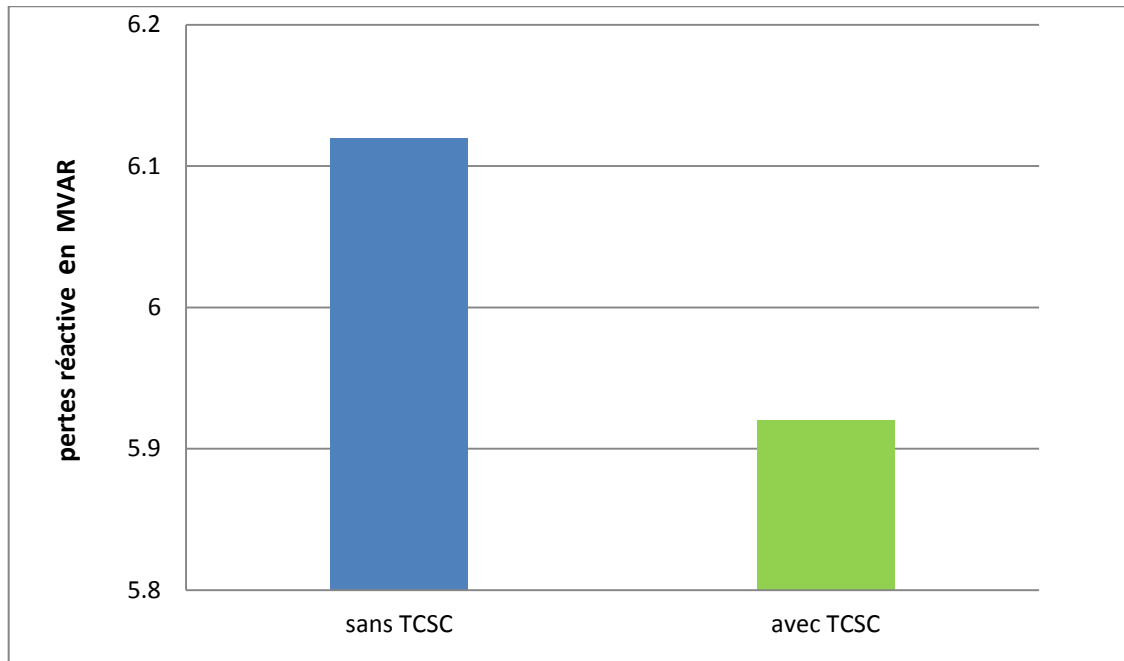


Figure III.8 Les pertes réactive totale avec et sans TCSC

2) Exemple 02 :

Le réseau électrique IEEE 14 noeuds représente une approximation du système d'alimentation électrique d'Américaine, il comporte cinq générateurs et 11 charges (figure III.9).

En supposant que la ligne (6-12) et (13-14) soit surchargée (103%). L'objectif principal de cette simulation est la résolution de la surcharge en utilisant l'emplacement optimal de TCSC par le facteur de répartition de puissance active PTDF.

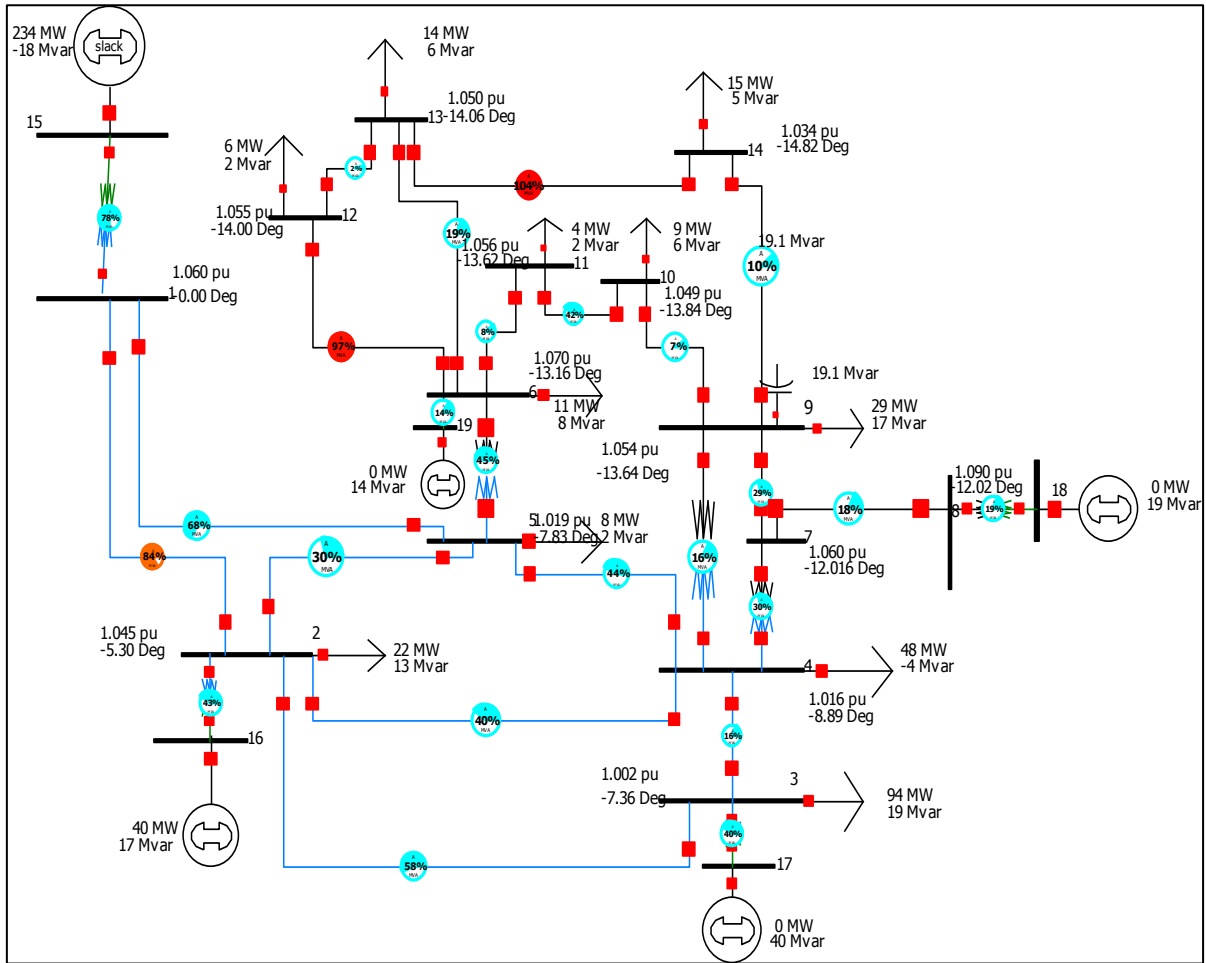


Figure III.9 Le système de IEEE 14 noeuds sans TCSC

Nous avons utilisé la méthode du facteur PTDF pour trouver l'endroit optimal de l'emplacement du TCSC, les résultats de PTDF sont affichés sur le tableau III.3.

Le tableau III.3 présente le PTDF de chaque ligne lorsque la ligne (13-14) est surchargée. Nous remarquons que les lignes (9-14), (6-11), (7-9) et (4-7) sont plus sensibles avec comme pourcentage 36.22 %, 18,37 %, 11,34 % et 11.34% respectivement. Les lignes (7-9) et (4-7) ayant de même PTDF, cela signifie les mêmes paramètres.

Tableau III.3 Le PTDF lorsque la ligne (13-14) est surchargée

Ligne	PTDF %	La limite maximale de puissance (MVA) en %
13-14	63.78	104.5
9-14	36.22	10.3
6-11	18.37	8.0
7-9	11.34	29.4
4-7	11.34	30.9
4-9	6.51	16.5
6-12	-8.05	97.1
12-13	-8.05	1.8
4-5	-14.73	44.0
5-6	-17.84	44.8
10-11	-18.37	42.2
9-10	-18.37	6.8
6-13	-28.17	19.0

Avant l'emplacement du TCSC pour chaque cas, on doit déterminer l'impédance totale de la ligne, en supposant que la compensation est 70%, nous pourrions trouver les valeurs totales des impédances (X_{total}) de lignes en utilisant l'équation (III.2) :

$$X_{total} = X_{ligne} - X_{TCSC} \quad (III.2)$$

$$X_{TCSC} = 70\% X_{ligne} \quad \text{ou} \quad X_{TCSC} = 0.7 X_{ligne}$$

Donc ;

$$X_{total} = X_{ligne} - 0.7 X_{ligne} = 0.3 X_{ligne}$$

La nouvelle impédance de chaque ligne peut être donnée comme suit :

$$X_{total(9-14)} = 0.270380 \times 0.3 = 0.081114 \text{ pu}$$

$$X_{total(6-11)} = 0.198900 \times 0.3 = 0.05967 \text{ pu}$$

$$X_{total(7-9)} = 0.110010 \times 0.3 = 0.033003 \text{ pu}$$

Le tableau III.4 représente la limite de la ligne (13-14) avec et sans TCSC

Tableau III.4 La limite de ligne (13-14) avec et sans TCSC

Placement de TCSC	La limite de ligne 6-13(MVA) %	
	Sans TCSC	Avec TCSC
9-14	104	74
6-11	104	96
7-9	104	92

- **Discussion des résultats :**
- **TCSC à la ligne (9-14) :**

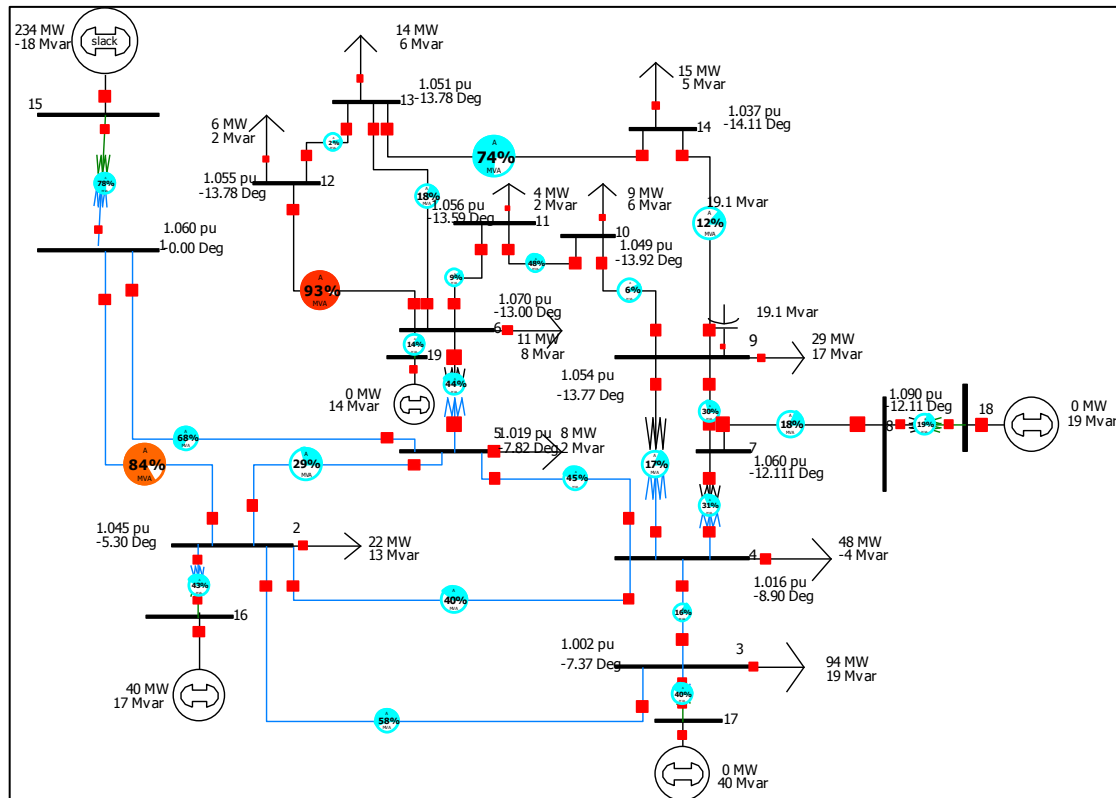


Figure III.10 Le système d'IEEE 14 noeuds avec TCSC dans la ligne (9-14)

Après avoir installé le TCSC sur la ligne (9-14) , (figure III.10), nous avons observé que la surcharge sur la ligne (13-14) avait diminué de 104% à 74 %. Le TCSC a réduit la surcharge sur la ligne (13-14).

- TCSC à la ligne (6-11) :

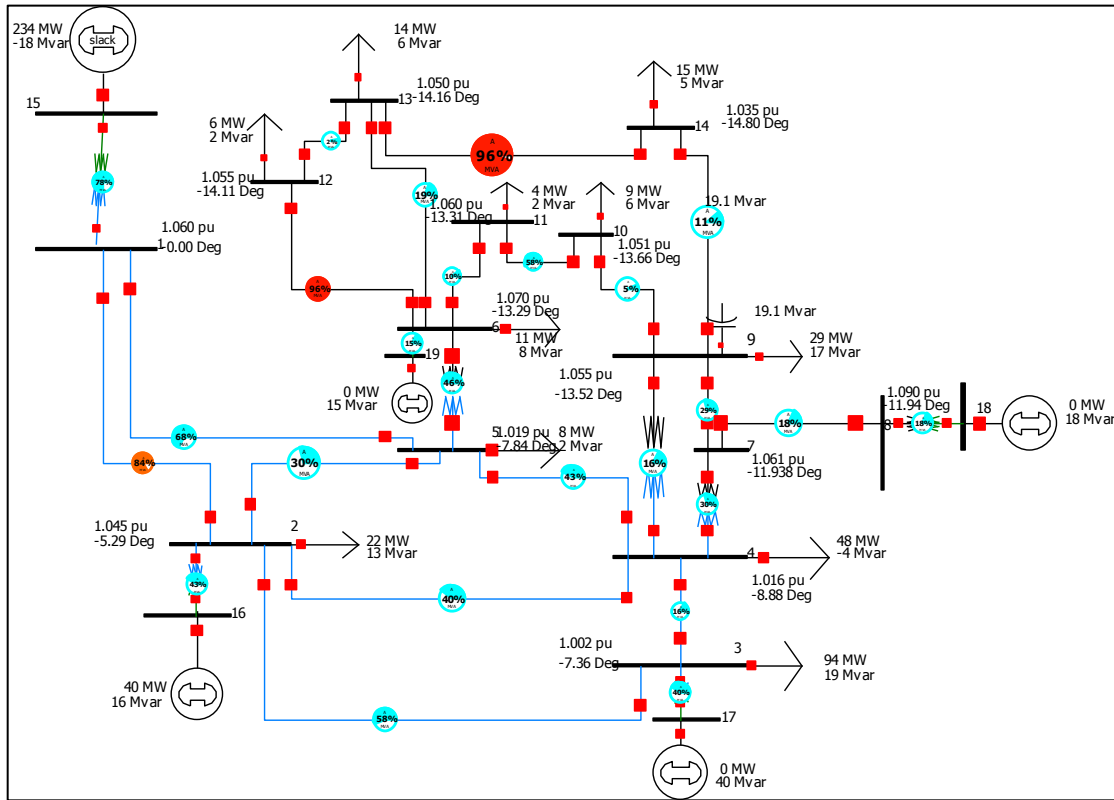


Figure III.11 Le système d'IEEE 14 noeuds avec TCSC dans la ligne (6-11)

Après avoir installé le TCSC sur la ligne (6-11) , (figure III.11), nous avons observé que la surcharge sur la ligne (13-14) avait diminué de 104% à 96 %. Le TCSC a réduit la surcharge sur la ligne (13-14).

- TCSC à la ligne (7-9)

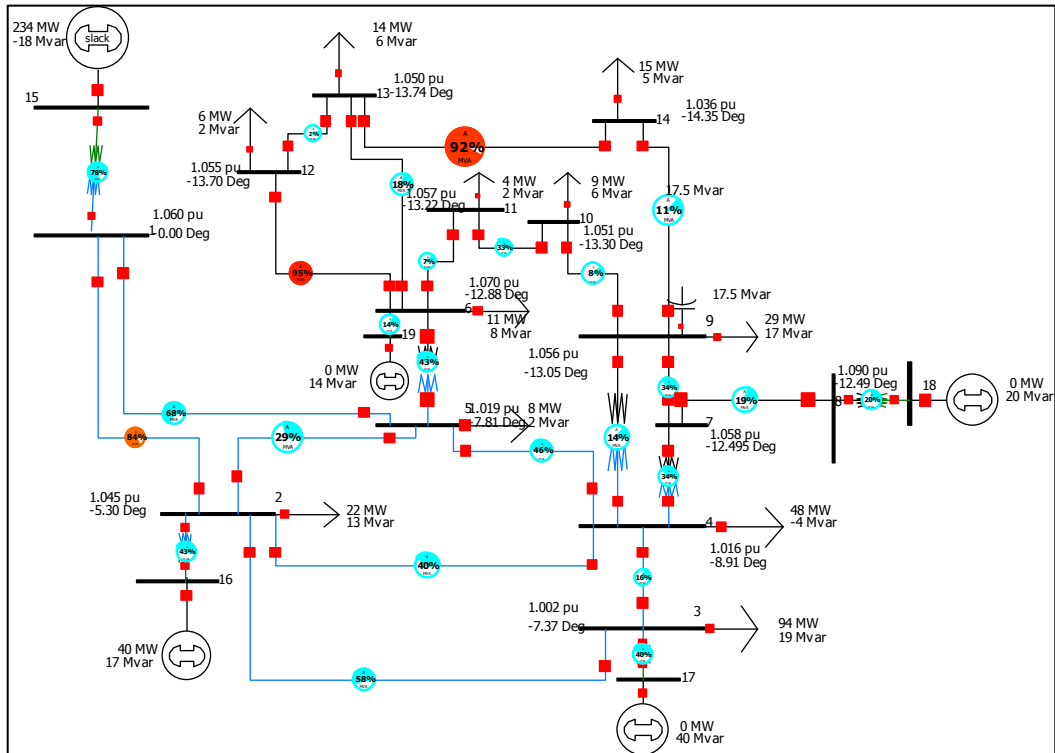


Figure III.12 Le système d'IEEE 14 noeuds avec TCSC dans la ligne (7-9)

Si le TCSC est installé sur la ligne (7-9) (figure III.12), la surcharge de la ligne (13-14) a diminué de 104% à 92%.

D'après les résultats précédents le meilleur emplacement de TCSC sont le ligne (9-14).

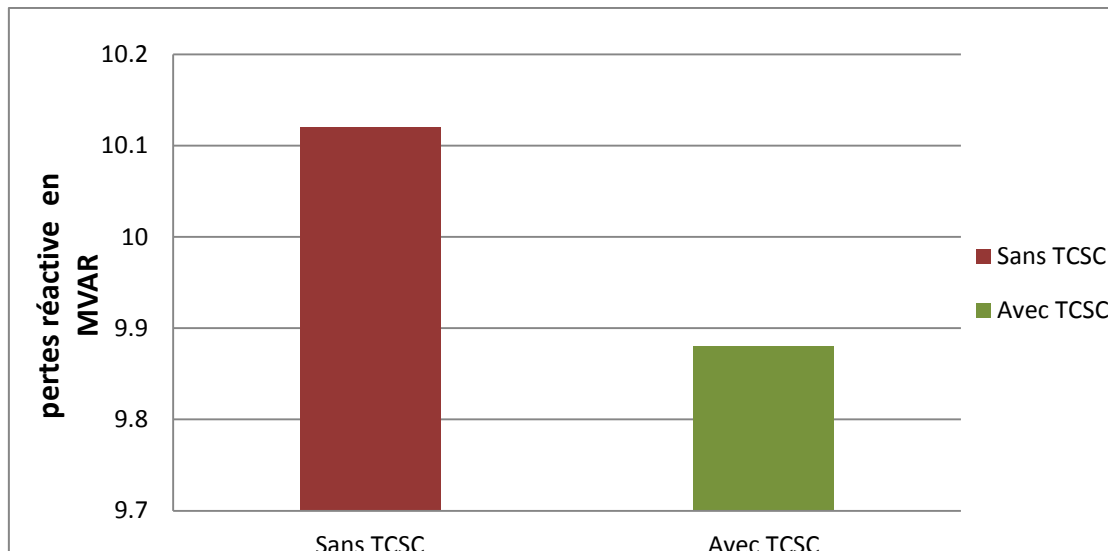


Figure III.13 Les pertes réactive totale avec et sans TCSC

III.5 Placement optimal d'un TCSC en utilisant le facteur de sensibilité a_{ij}

III.5.1 Résultat de simulation du système IEEE-6 nœuds

Dans cette étude, un réseau IEEE de six nœuds modifiés a été analysé pour l'emplacement optimal de TCSC en utilisation un logiciel de simulation Power World basé sur les indices de sensibilité.

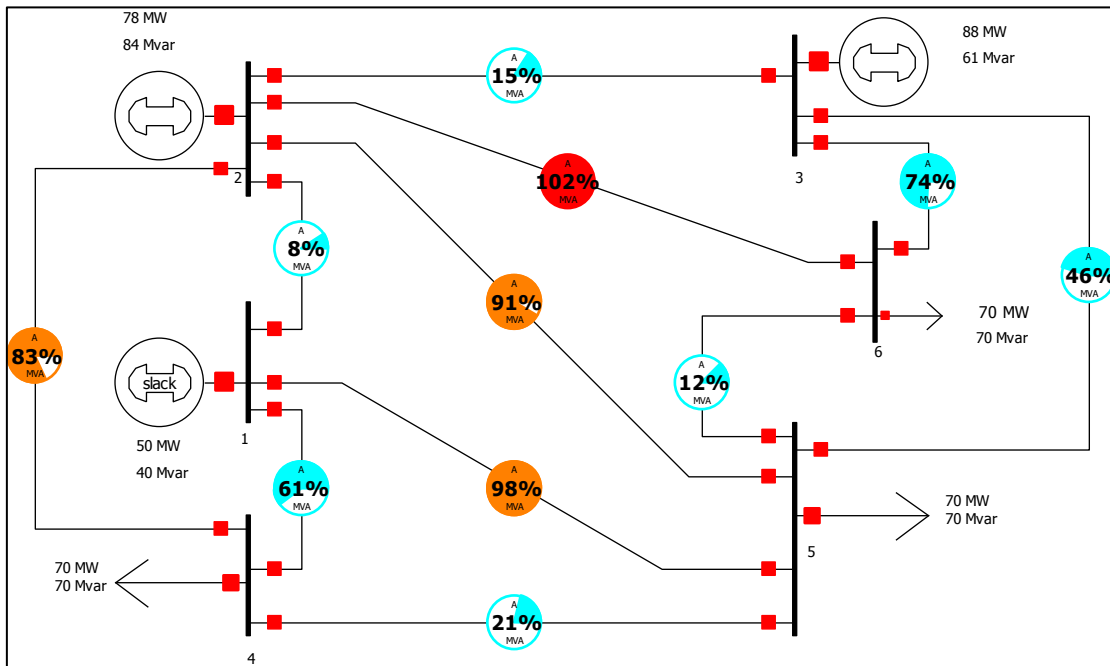


Figure III.14 Réseau électrique IEEE 6 nœuds sans TCSC

La figure III.14 montre un système IEEE 6 nœuds sans TCSC, nous pouvons voir que les lignes (2-5), (2-6), (5-1) et (2-4) sont surchargées. Pour obtenir l'emplacement optimal du TCSC, utilisez l'analyse de sensibilité selon les étapes suivantes :

- a) Après être entré dans le programme, nous allons à la fenêtre **Case information**, puis choisissons **Network** et appuyez sur **Ligne and transformers** (figure III.15).

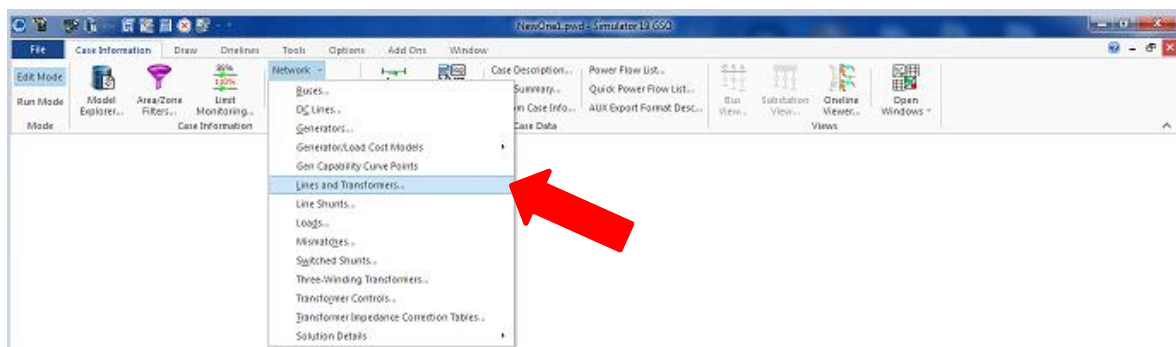


Figure III.15 la première étape (a)

b) Faites un clic droit dans l'espace et sélectionnez **Define expression.** (figure III.16)

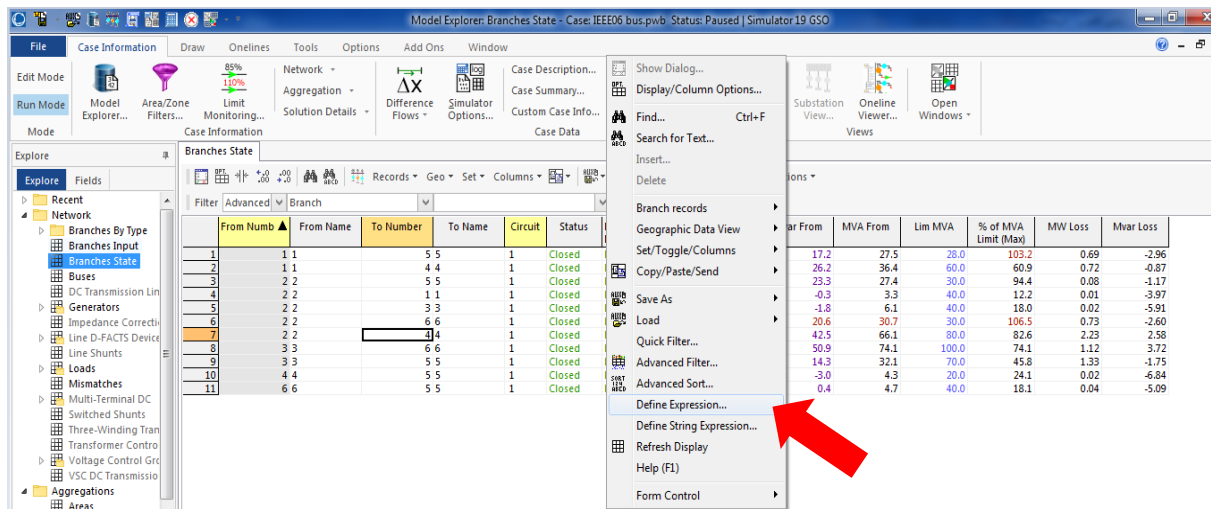


Figure III.16 La deuxième étape (b)

c) Nous écrivons l'équation a_{ij} puis définissons les variables $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6$ (figure III.17).

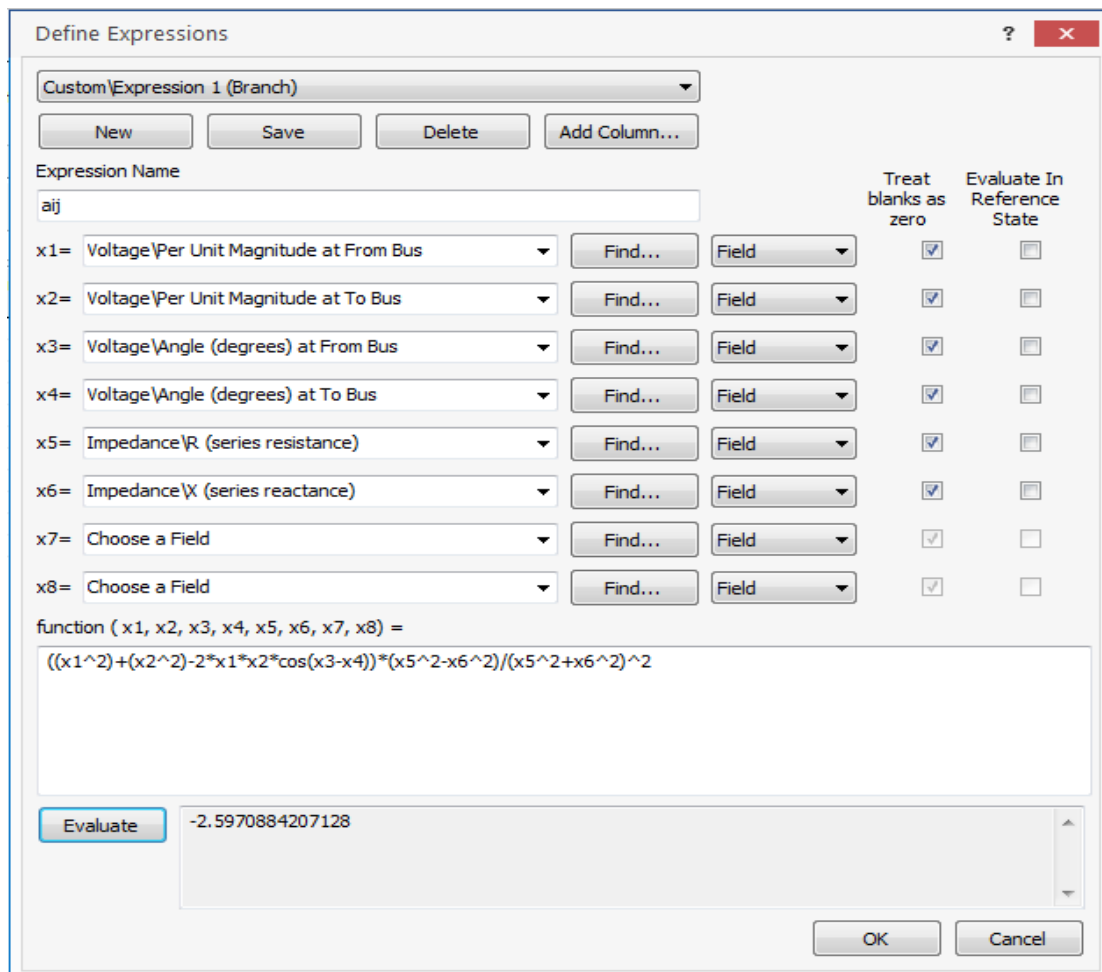


Figure III.17 la troisième étape (c)

d) Nous organisons les valeurs a_{ij} (**prenons les valeurs a_{ij} en termes absolus**).

Le tableau suivant représente le facteur de sensibilité « a_{ij} » dans chaque ligne.

Tableau III.5 Le facteur de sensibilité dans chaque ligne

Ligne	a_{ij}	Ligne	a_{ij}
3-6	314.3	3-5	28.8
2-4	107.9	2-3	10.2
1-4	63.0	6-5	3.5
2-6	39.6	2-1	2.6
2-5	37.1	4-5	1.3
1-5	33.1		

e) Nous mettons TCSC dans la ligne la plus positive nous appuyons sur **Solve**.

Placer le TCSC dans cette ligne permet de réduire les pertes réactives. Le résultat du calcul, tableau III.5, montre que la ligne (3-6) est l'endroit optimal pour TCSC. (figure III.18).

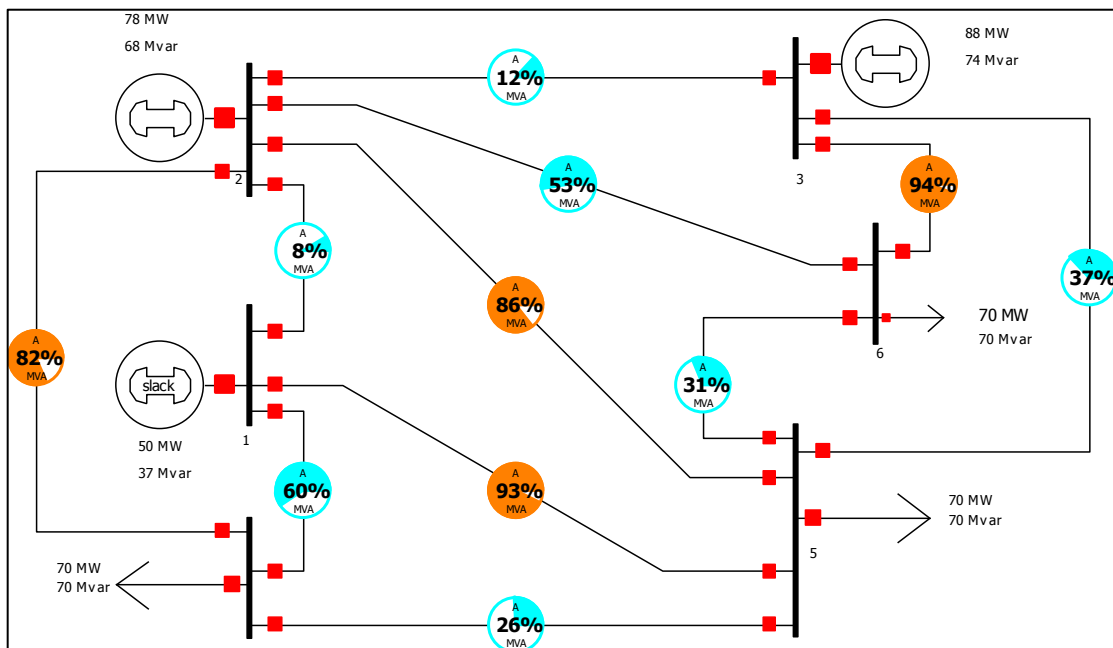


Figure III.18 Réseau IEEE 6 bus avec TCSC a placé dans la ligne (3-6)

Après avoir installé le TCSC dans la ligne (3-6), nous observons que les lignes (2-6), (2-5), (1-5) et (2-4) sont soulagées et les pourcentages de limites pour les lignes violées sont minimisés par l'effet d'emplacement adéquat de TCSC, les pourcentages des lignes sont comme suivante :

53% pour la ligne (2-6), 86% pour la ligne (2-5), 93% pour la ligne (1-5) et 82% pour la ligne (2-4).

La nouvelle réactance de la ligne est :

$$X_{eq} = 0.072 \text{ pu}$$

$$X_{TCSC} = -0.168 \text{ pu} \quad \text{car :}$$

$$X_{TCSC} = 0.7 X_{ligne} \quad \text{et} \quad X_{eq} = X_{ligne} + X_{TCSC}$$

Tableau III.6 Comparaison du flux de puissance avec et sans TCSC dans la ligne (3-6)

Ligne	Nœuds départ – Nœuds arrive	Sans TCSC	Avec TCSC
1	3-6	74.1	94.0
2	2-4	66.0	65.3
3	1-4	36.5	36.0
4	2-6	30.7	16.0
5	2-5	27.4	25.7
6	1-5	27.5	26.1
7	3-5	32.0	25.7
8	2-3	6.1	5.0
9	6-5	4.7	12.4
10	2-1	3.4	3.2
11	4-5	4.3	5.2

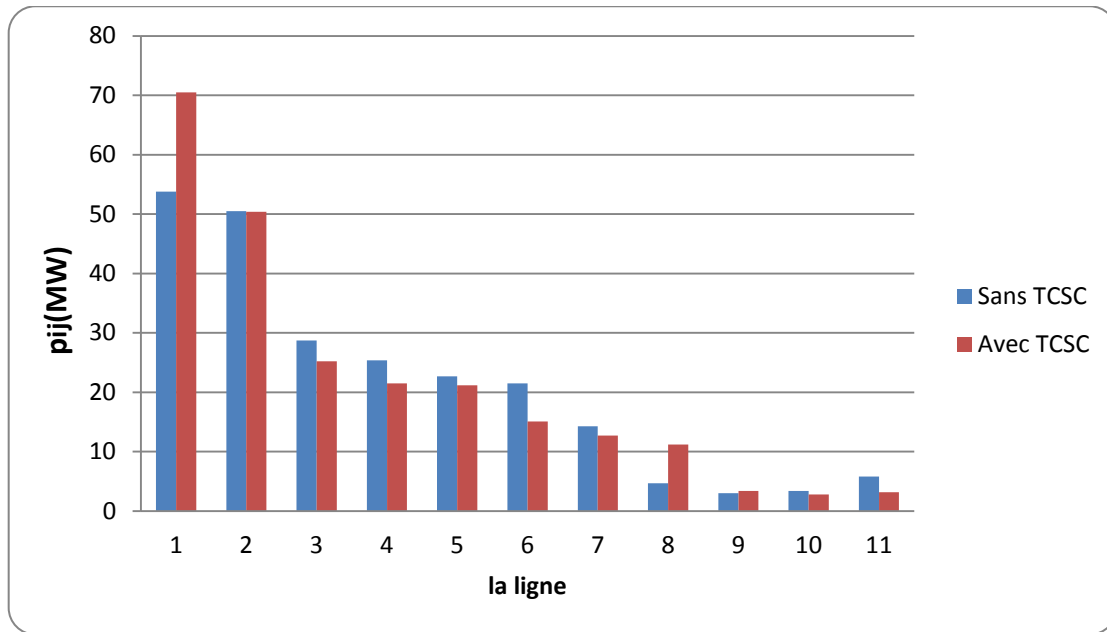


Figure III.19 Comparaison du transit de puissance avec et sans TCSC la ligne (3-6)

III.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté différents facteurs de sensibilité ou nous avons montrés comment les utilisés pour trouver l'endroit optimal des dispositifs FACTS. L'utilisation de ces facteurs de sensibilité dépend de type de FACTS (paramètre de contrôle) dans ce travail, nous avons testés ces facteurs sur un type de FACTS ; série (TCSC).

Les méthodes : PTDF et le facteur de sensibilité a_{ij} sont utilisés pour l'emplacement optimal de dispositifs FACTS série qui est le TCSC.

Les méthodes citées précédemment sont expliqué par des simulations visualisées dans le logiciel Power Wolrd, pour plusieurs réseaux tests de différentes tailles (6 bus IEEE, 14 bus IEEE).

D'après les résultats de simulation, le critère de l'emplacement optimal de FACTS basé sur le choix de valeur le plus positive, mais parfois on prend la deuxième ou la troisième valeur. Il y a deux avantages très intéressants de l'emplacement optimal de FACTS :

- Le dispositif FACTS devient plus efficace dans les réseaux électriques.
- Réduction du coût (réduction du nombre de FACTS).

Conclusion

Générale

Conclusion générale

Dans cette thèse nous avons accompli plusieurs objectives sur la sécurité des réseaux électriques d'où nous avons discuté les points suivants :

- Facteurs de sensibilité de localisation optimaux pour TCSC Comme nous avons fourni des exemples d'applications utilisant des réseaux IEEE standard.
- Améliorer la capacité et éliminer la surcharge d'une ligne de transmission en utilisant l'emplacement optimal de TCSC.
- L'insertion du TCSC dans un réseau réel pour donner une dimension un peu plus pratique à notre travail.

Généralement, l'analyse de sensibilité est appliquée dans les domaines de l'optimisation, tel que la gestion du marché électrique, gestion de congestion sur le réseau électrique, aussi nous pouvons l'utiliser pour insérer les équipements comme les générateurs, les dispositifs FACTS.

Après avoir présenté le concept de FACTS en général, qui est la classification et la citation les plus courantes des méthodes utilisées pour améliorer les consoles FACTS au premier chapitre. Aussi nous avons est une l'étude approfondie liée à la modélisation et à l'application du contrôleur de flux de puissance TCSC est consacrée et nous présentons les éléments qui composent ce dispositif dans le chapitre deux. Le troisième chapitre a été discuté sur les facteurs de sensibilité ou nous avons fait plusieurs tests sur différents systèmes, nous avons utilisé ces facteurs pour l'emplacement optimal de dispositifs FACTS, l'étude vise a appliqué un type de FACTS série (TCSC).

Nous pouvons récapituler des méthodes de facteurs de sensibilité utilisées dans notre travail en les résumant par une claire et courte définition comme suit:

- Par définition, le facteur de sensibilité de perte ligne est la dérivée de la puissance réactive (QL) par rapport aux variables de contrôle des FACTS, dans ce cas de TCSC la variable de contrôle est l'impédance de la ligne. Le TCSC doit être placé sur la ligne la plus positive.
- Le facteur de répartition de puissance (PTDF) permet de prévoir les changements de l'écoulement de puissance d'une ligne l lorsqu'il y a un transfert de puissance active entre deux nœuds i et j . La méthode d'analyse utilisée pour développer ce modèle est la méthode de Newton-Raphson. En

dérivant les équations impliquées dans l'analyse de l'écoulement de puissance de la méthode Newton-Raphson.

Dans nos simulations, nous avons appliqués les méthodes de sensibilité cités comme suit :

Nous avons inséré le TCSC dans un réseau à 6 nœuds IEEE, en utilisant le facteur de sensibilité a_{ij} , et le TCSC doit être placés dans la ligne la plus sensible.

Nous avons réinséré le TCSC dans réseaux (14 nœuds):

- En utilisant le facteur (PTDF), ces dernières sont efficaces et rapides pour trouver l'endroit optimal de TCSC.

D'après les travaux réalisés dans cette thèse qui ont ouvert un grand univers de recherche pour nous, nos perspectives visent les points suivant:

- Trouver des facteurs de sensibilités pour d'autre type de FACTS.
- Gestion de la congestion du marché électrique en utilisant le FACTS par des méthodes de sensibilités.

Références
Bibliographiques

Références Bibliographies

- [1] **Sekhan Hocine** « L'optimisation de la puissance réactive et le contrôle de tension à travers l'incorporation des dispositifs FACTS » mémoire de magister, université de Constantine1 Hadj Lakhdar – Constantine 2013.
- [2] **Abdelaàli Alibi**, « contrôle des réseaux électriques par les systèmes FACTS », mémoire de magistère, option : électricité industrielle, université de Batna 2009.
- [3] **Lamia Kartobi** « Optimisation de la Synthèse des FACTS par les Algorithmes Génétiques et les Essaims Particulaires pour le contrôle des Réseaux Electriques » Technique de l'ingénieur Ecole Nationale Polytechnique – Alger.
- [4] **K. Belacheheb** « Contribution à l'étude des systèmes de compensation FACTS en général, UPFC en particulier, pour le contrôle du transit de puissance dans un réseau de transport » , Thèse de doctorat de l'université de HENRI POINCARÉ NANCY I, 21 Juin 2001.
- [5] **Tarik ZABAIYOU** « Coordination Des Régulateurs Conventionnels Des Machines Synchrones Et Des Compensateurs Statiques (SVCS) », Thèse de Doctorat, UNIVERSITÉ DU QUÉBEC, Canada, 2010.
- [6] **Nabil Mancer** « Contribution à l'optimisation de la puissance réactive en présence de dispositifs de compensation dynamique », mémoire de magister, université Mohamed khider – Biskra 2012
- [7] **Abdelaàli Alibi**, « contrôle des réseaux électriques par les systèmes FACTS », mémoire de magistère, option : électricité industrielle, université de Batna 2009.
- [8] **Oussama Mammeri** « Puissance réactive dans une noeud a charge non linéaire en présence d'un système de compensation de l'énergie », mémoire de magister université de Batna 2011/2012.
- [9] **Laid Hichem** « Contribution à l'étude du contrôle du flux de puissance par l'UPFC » mémoire de magister, université de Batna 2009.
- [10] **E.G. Shahraki** « Apport de l'UPFC à l'amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques » Mémoire de doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy-I, 13 Octobre 2003.
- [11] **Belguidoum Hocine** « Les Systemes FACT utilisé les convertisseurs entièrement commandés » mémoire de magister, université Ferhat Abbas – Sétif 2012.

- [12] **Zitouni Fares** « Amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électrique par l'utilisation des systèmes FACTS » mémoire de magister, université Ferhat Abbas – Sétif 2013.
- [13] **B. Houari** « Contrôle des puissance réactive et des tension dans un réseau de transport au moyen de dispositifs FACTS (SVC) » Mémoire de Magister de l'Université de Sidi Bel Abbes 2008.
- [14] **Rabah. Benabid**, «Optimisation Multi objectif de la Synthèse des FACTS par les Particules en Essaim pour le Contrôle de la Stabilité de Tension des Réseaux électriques», mémoire de magistère ,option : Analyse ,Conduite et Commande des réseaux électriques ,université Amar Telidji Laghouat, soutenue le 04/09/2007.
- [15] **Ay Abdelouahab** « Modélisation et Analyse d'un Compensateur Statique SVC » mémoire de magister, université El Hadj Lakhdar – Batna 2013.
- [16] **Daniel J. Sullivan** « Improvements in voltage control and dynamic performance of power transmission systems using Static Var Compensators (SVC) » mémoire de Master, université de Pittsburgh, Pennsylvania, USA 5 Avril 2006.
- [17] **R. Founie, JCPELLE** (Condensateurs de puissance) 2012.
- [18] **C. Ca-nizares, S. Corsi, M. Pozzi**, " Modeling and Implementation of TCR and VSI Based FACTS Controllers", December 1999.
- [19] **Makwana, Vijay H., Bhalja, Bhavesh R.** “Transmission Line Protection Using Digital Technology ” *Springer eBooks* 2016.
- [20] **Ramadan elmoudi**” Thyristor controlled series compensated transmission lines protection using artificial neural networks based symmetrical components analyser” *Ph.D. Dissertation may 2013, University of new york at buffalo.*
- [21] **Shantanu Padmanabhan** ” Fault Location on Series Compensated Transmission Lines” *Ph.D. Dissertation 2014, University of Manchester.*
- [22] **Nabil Mancer** « Contribution à l'optimisation de la puissance réactive en présence de dispositifs de compensation dynamique », mémoire de magister, université Mohamed khider – Biskra 2012.
- [23] **N. G. Hingorani and L. Gyugyi**, “ Understanding FACTS”. *New York: IEEE Press, 2000.*
- [24] **R.M. Mathur and R.K, Varma**, “Thyristor-Based FACTS Controllers for Electrical Transmission Systems”. *IEEE Press and Wiley Interscience, New York, USA, 2002.*

- [25] **Mojtaba Khederzadeh and Tarlochan S. Sidhu, Fellow**, “Impact of TCSC on the Protection of Transmission Lines”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Volume: 21, Issue: 1, Jan. 2006.
- [26] **V Bhargav, M Rudra Prakash, D Biswarup**, “Protection of Series Compensated Transmission Line: Issues and State of Art” *Electric Power Systems Research* 107, 93-108.
- [27] **Stéphan Gerbex** « Méta heuristiques Appliquées au placement optimal de dispositifs FACTS dans un réseau électrique » mémoire d’ingénieur, Ecole Polytechnique fédérale-Lausanne 2003
- [28] **Rabah Benabid** « Optimisation Multi objectif de la Synthèse des FACTS par les Particules en Essaim pour le Contrôle de la Stabilité de Tension des Réseaux Electriques » mémoire de magister, l’Université de Jijel 2007.
- [29] **Eder ernesto fernandez ramirez** “Optimisation du taux de compensation série d'une longue ligne de distribution : cas de l'Hydro-Québec : Abitibi Témiscamingue”
Collaborateur industrielle, université de Québec .Canada juin 2005.
- [30] **Nicolas Retière** « Modéliser et Concevoir Les réseaux d’énergie électrique » mémoire de magister, université Joseph Fourier – Grenoble 2003.
- [31] **Ramadan El Moudi**” Thyristor controlled series compensated transmission lines protection using artificial neural networks based symmetrical components analyser” *Ph.D. Dissertation may 2013, University of new york at buffalo.*
- [32] **F. Boussadia, S. Belkhiat**, “Voltage Stability Assessment based on a Load Flow Sensitivity Method”, International Conference and Exposition on Electrical And Power Engineering (EPE), Iasi, Romania, 18-19 Oct 2018.
- [33] **Zobeidi, Messaoud, Lakdja, Fatiha, Gherbi, Yamina Ahlem**, et al. Effect of a wind generator on the optimal location of FACTS. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2020, Vol. 20, No. 9, pp: 43-47.
- [34] **Allen J. Wood, Bruce F. Wollenberg, and Gerald B**, “Power Generation, Operation and Control”, 3 thrd edition, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. 2013. p 336-338.
- [35] **Chong Suk Song, Chang Hyun Park, Minhan Yoon & Gilsoo Jang**, “Implementation of PTDFs and LODFs for Power System Security”, *Journal of International Council on Electrical Engineering*, 2011, Vol 1, Issue1, pp. 49-53.

Références Bibliographies

- [36] **S.A. Khaparde, A.R. Abhyankar**, “Web course, Restructured Power Systems Electrical Engineering”, university of IIT Delhi, 2012.
<http://nptel.ac.in/courses/108101005/20>.
- [37] **Zobeidi, Messaoud, Lakdja, Fatiha, et Gherbi, Fatima Zohra**, “The sensitivity approach method with optimal placement of thyristor-controlled series compensator”. Leonardo Journal of Sciences, 2016, no 29, p. 43-54.
- [38] **G. Vinod Kumar, J. Srinivasa Rao, J. Amarnath**, “Transmission Congestion Management by Using Series Facts Devices and Changing Participation Factors of Generators”. International Journal of Modern Engineering Research (IJMER), 2013, Vol. 3, Issue. 4, pp-2111-2118.