

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur
et de la Recherche scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued
Faculté de Technologie

Mémoire de Fin d'Étude
En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Technologie
Filière : Génie Électrique
Spécialité : Réseaux Électriques

Thème

L'impact technique et économique du système
De compensation dynamique série (TCSC) sur le RE

Encadré par :
M^{er}. Mammeri Oussama

Réalisé par :
Aouadi Adnane

Chehouba Sami

Douis Oualid

Année Universitaire: 2021/2022

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

ملخص :

في هذه المذكرة سنقوم بدراسة تحليل و نمذجة وتكامل أجهزة التعويض الديناميكية (FACTS) في الشبكات الكهربائية لمراقبة سيران القدرة و التقليل من ضياعات الطاقة ورفع التوتر الكهربائي و سنتطرق لدراسة نموذج أساسي المتمثل في نظام التحكم في السعة الخطية (TCSC) و إظهار أهمية وفوائد دمج هذه الاجهزة في شبكات الطاقة ، وللتحقق من صحة نتائجنا عن طريق البرمجة على الشبكات (9 JB ، 30 JB)

الكلمات المفتاحية: FACTS ، TCSC ، أجهزة التعويض الديناميكية

Résumé :

Dans ce mémoire, on va étudier et analyser la modélisation et l'intégration des dispositifs de compensation dynamiques dans les réseaux électriques pour un objectif principal le réglage flexible de la tension ainsi que une réduction des pertes totale dans les réseaux électriques., le model série (TCSC), utilisé comme un régulateur de la puissance active transitée. Afin de prouver l'importance et les avantages d'intégrer ces dispositifs dans les réseaux électriques, et de valider nos résultats obtenus par programmation sur des réseaux test (9JB ,30JB).

Mots clés : TCSC , compensation dynamiques les , réseaux électriques

Remerciements

On remercie DIEU pour nous avoir donné la santé et le courage pour inspirer la connaissance et le savoir.

Au terme de la réalisation de ce mémoire, nous tenons à présenter nos remerciements les plus sincères à notre

Encadreur Mr Maamri Oussama,

Ainsi que les membres de jury d'avoir accepté de juger notre travail, enfin nous témoignons notre gratitude à toutes les personnes ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de cet humble mémoire.

Dédicaces

Afin d'être reconnaissant envers ceux qui m'ont appuyé et encouragé à effectuer ce travail de recherche, je dédie ce modeste travail:

A mes très chers parents qui m'ont guidé durant les moments les plus pénibles de ce long chemin, ma mère qui a été à mes côtés et m'a soutenu durant toute ma vie, et mon père qui a sacrifié toute sa vie afin de me voir devenir ce que je suis, merci mes parents.

A ma chère sœur A mon cher frère

Sans oublier tous mes amis(e) et tous ceux qui me sont

Chers

Sami , Oualid , Adnane

Sommaire

Sommaire

✓	Résumé	
✓	Remerciement	
✓	Dédicaces	
✓	Sommaire.....	i
✓	Liste des figures.....	iv
✓	Liste des tableaux.....	vi
✓	Symboles et abréviations.....	vii
	Introduction générale.....	01

Chapitre I :

Généralités sur les réseaux électriques

I-1. Introduction.....	3
I-2 Définition du Réseau Electrique.....	3
I.3 Les niveaux de tensions des réseaux.....	4
I.4 Différents Type des réseaux électriques.....	5
I.4.1 Le réseau de transport THT.....	5
I.4.2 Le réseau de transport HT.....	6
I.4.3 Le réseau de répartition MT.....	6
I.4.4 Le réseau de distribution BT.....	6
I.5 Les structures topologiques des réseaux électriques.....	7
I.5.1 Les réseaux radiaux.....	7
I.5.2 Les réseaux bouclés.....	7
I.5.3 Les réseaux maillés.....	8
I.6 Types de postes.....	8
I.7 Les différentes centrales électriques.....	9
I.8 Lignes électriques.....	9
I.8.1 Types de lignes.....	10
I.9 Modélisation du réseau électrique.....	10
I.9.1 Introduction.....	10

I.9.2	Modélisation des générateurs.....	10
I.9.3	Modélisation d'une charge.....	12
I.9.4	Modélisation d'une compensation shunt.....	12
I.9.5	Modélisation de ligne longue.....	12
I.9.6	Classification des nœuds des réseaux électrique.....	15
I.10	La Compensation de la puissance réactive.....	15
I.10.1.	Les dispositifs conventionnels.....	16
I.10.2.	Les groupes de production (générateurs)	16
I.10.3.	Les condensateurs.....	16
I.10.4.	Les inductances.....	17
I.10.5.	Les compensateurs synchrones.....	17
I.10.6.	Les compensateurs statiques.....	17
	Conclusion.....	18

Chapitre II :

Compensation dynamique de la puissance réactive FACTS

II.1	Introduction.....	19
II.2	Définition des FACTS.....	20
II.3	Classification des dispositifs FACTS.....	20
II.4	FACTS de type série.....	21
II.4.1	Condensateur série commandé par thyristors.....	21
II.4.2	Réactance Série Contrôlée par Thyristor TCSR: Thyristor Controlled Series Reactor (TCSR).....	22
II.4.3.	Compensateur Série Synchrone Statique (SSSC)	22
II.5	FACTS de type parallèle.....	23
II.5.1	Compensateur Statique Synchrone (STATCOM)	23
II.5.2	Compensateur Statique de Puissance Réactive SVC.....	24
II.6.	FACTS de type hydride.....	25
II.6.1.	Transformateur déphaseur à base de Thyristors (TCPAR)	25
II.6.2.	Contrôleur de flux de puissance d'interligne (IPFC)	25

II.6.3 Variateur de charge universel UPFC.....	26
II.7. Principe de fonctionnement.....	27
II.8. Rôle des dispositifs FACTS.....	27
II.9. Les avantages, les inconvénients et les contraintes de la technologie des dispositifs FACTS..	28
II.10. Comparaison des FACTS.....	29
Conclusion.....	29

Chapitre III :

Modélisation des dispositifs FACTS (TCSC)

III.1. Introduction.....	30
III.2. Control des transits de puissances par dispositif FACTS (TCSC)	30
III.2.1. Modélisation du TCSC	31
III.2.2. Implantation de TCSC dans le problème de l'écoulement de puissance.....	35
III.2.3. L'organigramme globale de l'intégration de TCSC.....	37
III.2.4 Organigramme détaillée.....	38
III.3. Test de Application:(compensation série avec TCSC)	39
III.3.1. Test de Application(1): réseau électrique de 9 jeux de barres.....	39
III.3.2. Test de Application(2): réseau électrique de 30 jeux de barres.....	44
III.4. Interprétation.....	48
Conclusion générale.....	49

Liste de figure

Figure I.1 Schéma du réseau de transport.....	4
Figure I.2 Niveaux de tension normalisés.....	5
Figure I.3 Schéma de description des réseaux électriques.....	6
Figure I.4 un réseau radial.....	7
Figure I.5 un réseaux bouclés	7
Figure I.6 un réseaux maillés.....	8
Figure I.7 Le modèle d'une génératrice.....	11
Figure I.8 Une source de tension.....	11
Figure I.9 Modélisation d'une charge.....	12
Figure I.10 modélisation d'une ligne longue.....	12
Figure II.1 : Classification des dispositifs FACTS selon la catégorie.....	20
Figure II.2 : Schéma de principe de TCSC.....	21
Figure II.3 : : Structure d'un TCSR.....	22
Figure II.4 : Schéma de principe d'un SSSC.....	23
Figure II.5 : Schéma de principe du STATCOM.....	24
Figure II.6 : Schéma de principe d'un SVC.....	24
Figure. II.7 : Schéma de principe d'un TCPAR.....	25
Figure. II.8 : Schéma de principe d'un IPFC.....	26
Figure. II.9 : Schéma de principe d'un variateur de charge universel.....	26
Figure III.1 : Schéma d'un TCSC.....	31
Figure III.2 : Capacitor voltage and thyristor current waveforms for different thyristor firing angles.....	32
Figure III.3 : variation de l'impédance de TCSC en fonction de l'angle d'amorçage avec différent valeur de.....	34
Figure III.4 : Schéma équivalent d'un TCSC.....	35
Figure III.5 : Remplacement VS par I S.....	35
Figure III.6 : Modèle d'injection : puissance injectées équivalentes.....	36
Figure III.7 : Schéma d'un réseau test de 9 jeux de barres.....	40
Figure III.8 : Variation de la tension – cas rupture de la ligne.....	41
Figure III.9 : Schéma d'un réseau de 30 jeux de barres.....	44
Figure III.10 : Variation de la tension – cas rupture de la ligne.....	46

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Tableau Racap pour la Modélisation des paramètres du réseau.....	14
Tableau I.2: Quelques dispositifs de contrôle utilisés dans le problème tension/puissance réactive..	17
Tableau III.1: Résultats des tensions du réseau électrique –cas rupture de la ligne	41
Tableau III.2: Résultats du réseau électrique de 9 jeux de barres. –cas normal	42
Tableau III.3: Résultats du réseau électrique de 9 jeux de barres. Avec Compensation	43
Tableau III.4: Résultats des tensions du réseau électrique –cas rupture de la ligne	45
Tableau III.5: Résultats du réseau électrique de 30 jeux de barres Cas normale	46
Tableau III.6: Résultats du réseau électrique de 9 jeux de barres. Avec Compensation	47

Symboles et abréviations

Symboles :

F	Facteur de puissance
P	Puissance active
Q	Puissance réactive
S	Puissance apparent
I	Courant de ligne
I_a	Courant actif
I_r	Courant réactive
I_t	Courant apparent (total)
R	Résistance série de la ligne
X	Réactance série de la ligne
Z	L'impédance Série Par Phase
Y	L'admittance Shunt Par Phase En (Siemens)
G	Conductance shunts de la ligne
B	Susceptance shunts de la ligne
V_i	la tension du convertisseur
V_1	Tension d'alimentation
V_2	Tension à la borne de la charge
V_{ref}	est la tension de référence dans le SVC
X_C	Condensateur de réactance.
X_L	Réactance inductive

α	angle d'amorçage
ΔV	Chute de tension dans la ligne
V_r	La tension AC au point de connexion
V_i	Tension complexe au nœud i

Abréviations :

THT	Très Haute Tension
FACTS	Systeme de Transmission en Courant Alternatif Flexible
SVC	Compensateur Statique
TCSC	Condensateur série contrôlé par thyristors
TCR	Inductance commutée par thyristors
TSC	Condensateur commuté par thyristors
STATCOM	Compensateur Synchrone Statique
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
TSR	Thyristor Switched Reactor
SSSC	Statice Synchrones Série Compensateur
UPFC	Thyristor Controlled Phase Shifting Transformer.
pu	Grandeur en unité relative (grandeur réduite)
GTO	Gate Turn Off

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. Ainsi, pour avoir un équilibre entre la production et la consommation, il est à première vue nécessaire d'augmenter le nombre de centrales électriques, de lignes, de transformateurs... etc., ce qui implique une augmentation de coût et une dégradation du milieu naturel. En conséquence, il est aujourd'hui important d'avoir des réseaux maillés et de travailler proche des limites de stabilité afin de satisfaire ces nouvelles exigences.

Le fournisseur d'énergie électrique s'efforce de garantir la qualité de l'énergie électrique, pour arriver à augmenter la continuité de service, actuellement les critères de qualité ont évolué avec le développement des équipements où l'électronique prend une place prépondérante dans la production et le transport d'un réseau électrique.

Les réseaux maillés, soumis à des boucles de puissance indésirables entre zones interconnectées, subissent des surcharges de lignes, des problèmes de stabilité et de toute manière un accroissement des pertes. Les moyens classiques de contrôle des réseaux (transformateur à prises réglables en charge, transformateurs déphaseurs, compensateurs série ou parallèle commutés par disjoncteurs, modification des consignes de production, changement de topologie du réseau et action sur l'excitation des générateurs) pourraient dans l'avenir s'avérer trop lents et insuffisants pour répondre efficacement aux perturbations du réseau, compte tenu notamment des nouvelles contraintes.

Il faudra vraisemblablement, dans l'avenir, compléter leur action en mettant en œuvre des dispositifs électroniques de puissance à grande vitesse de réponse, récemment développés et connus sous l'appellation FACTS pour le contrôle des réseaux.

Les systèmes FACTS sont des systèmes de contrôle rapide des réseaux utilisant les ressources offertes par l'électronique de puissance et la micro-électronique de commande ont été récemment étudiés et réalisés, et sont actuellement pour certains en application normale.

Le développement récent des dispositifs FACTS ouvre de nouvelles perspectives pour une exploitation plus efficace des réseaux par action continue et rapide sur les différents paramètres du réseau (déphasage, tension, impédance). Ainsi, les transits de puissance seront mieux contrôlés et les tensions mieux tenues, ce qui permettra d'augmenter les marges de stabilité ou de tendre vers les limites thermiques des lignes.

Généralement, le rôle principal des dispositifs FACTS est la compensation de l'énergie électrique à l'intérieur d'un réseau basée sur les trois domaines de recherche suivants :

- Le Problème des pertes de puissance, des chutes de tension.
- L'optimisation de l'écoulement de puissance (Dispatching).
- La stabilité des tensions

Dans ce projet, on va étudier la modélisation et l'intégration efficace des dispositifs de compensation dynamique (FACTS) pour l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique. atteindre cet objectif de recherche, ce mémoire est organisé en quatre chapitres:

Dans le premier chapitre, Généralités sur les réseaux électriques

Le second chapitre, est une présentation générale du compensation de puissance réactive. On dresse tout ,d'abord les techniques de compensation de puissance réactive classiques. Une classification des différents types de FACTS est proposée et les principaux dispositifs de chaque famille sont décrits de façon plus détaillée.

Le troisième chapitre est consacré à l'étude profonde concerne la modélisation et l'application du contrôleur TCSC dans l'écoulement de puissance et on présente les éléments qui constituent ce dispositif ,on a exposé en détails les résultats de test Programme développé sous l'environnement MATLAB (une application du TCSC dans les réseaux électriques).

Chapitre I :
**Généralités sur les réseaux
électriques**

Chapitre I : Généralités sur les réseaux électriques

I. 1 . Introduction :

L'électricité est une énergie produite à partir de sources naturelles ou primaires, telles que l'énergie éolienne (vents), l'énergie solaire (soleil), l'énergie hydraulique (eau), l'énergie du charbon, du gaz et du pétrole et l'énergie nucléaire par des usines appelées centrales électriques. Ces centrales assurent par l'intermédiaire des machines tournantes, (les alternateurs), la transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique.

L'absence de possibilité de stockage de cette énergie sous sa forme finale pose un grand problème au producteur, elle présente en revanche l'avantage d'être facile à transporter à et grandes distances par des fils conducteurs. Dans ce cas elle doit être consommée à l'instant où elle est produite.

Le transport de l'électricité se fait par des lignes à haute tension au moyen des postes de transformations élévateurs, ensuite à chaque région de distribution d'énergie cette tension sera abaissée, pour qu'elle soit utilisée par les usagers; ainsi on distingue différentes sortes de réseaux électriques.

I. 2. Définition du Réseau Electrique

Un réseau, c'est d'abord un certain nombre de fonctions et de comportements d'ensemble, qu'il faut définir, mettre en œuvre, maîtriser grâce à une conception et une exploitation convenables. Ce sont ensuite des ouvrages et des matériels (lignes aériennes et souterraines, postes, câbles, appareillage, transformateurs, parafoudres, etc.) qui, assemblés, forment le réseau physique; la qualité conditionne très largement celle du réseau, donc celle de la desserte en électricité de ses clients. C'est enfin tout un ensemble d'automatismes et de transmission d'informations et de commandes, ensemble coordonné, donc système nerveux absolument indispensable à la protection des ouvrages et des matériels, à la robustesse du réseau vis-à-vis des défaillances internes et des agressions extérieures telles la foudre et les conditions climatiques extrêmes; système indispensable aussi à la maîtrise par l'exploitant d'un outil technique qui, pour les réseaux publics, du moins, n'est pas concentré en un site, mais couvre des milliers et des centaines de milliers de kilomètres carrés.

Les réseaux électriques ont pour fonction d'interconnecter les centres de production tels que les centrales hydrauliques, thermiques..., avec les centres de consommation (villes, usines...). L'énergie électrique est transportée en haute tension, voir très haute tension pour limiter les pertes joules (les pertes étant proportionnelles au carré de l'intensité puis progressivement abaissée au niveau de la tension de l'utilisateur final (Fig.I.1).

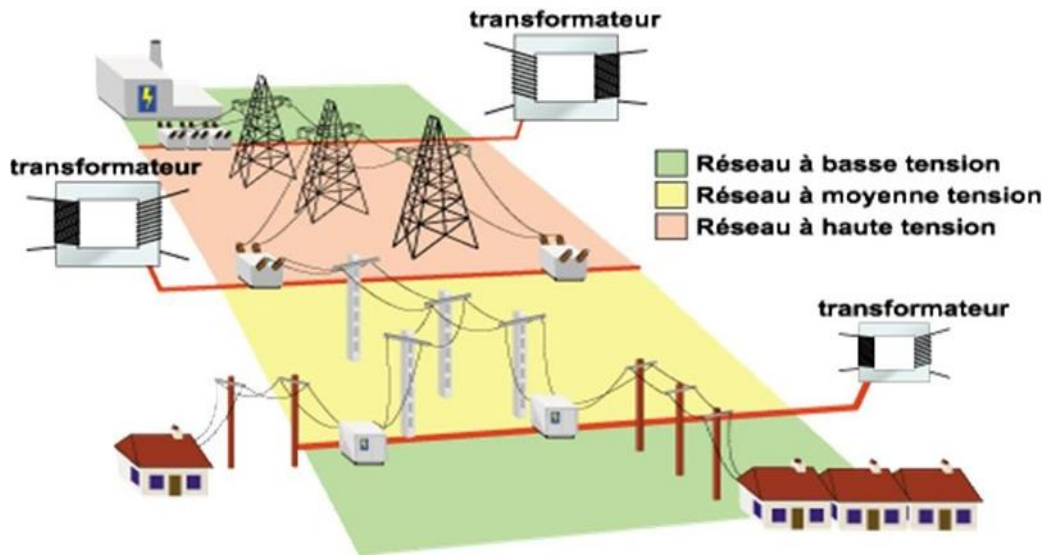


Figure I.1: Schéma du réseau de transport

Un réseau électrique est un système maillé mettant en œuvre :

- **Des nœuds** (ou postes) où sont raccordés : les centrales (centre de production), les charges (consommation) et les lignes électrique (élément du réseau).
- **Des branches** (ou lignes électrique) : qui interconnectent les nœuds.

Le maillage du réseau améliore la disponibilité de l'alimentation en énergie aux usagers, la stabilité et la qualité du produit électrique car les deux dépendent de la puissance de court circuit, laquelle augmente avec le maillage ou plus exactement avec le nombre et la puissance des centres de production installés et raccordés. [1]

I. 3. Les niveaux de tensions des réseaux

Les tensions normalisées selon la CEI (Commission électrotechnique internationale):

La nouvelle norme CEI (ainsi que les textes législatifs en vigueur en Algérie depuis juin 2002) définissent les niveaux de tension alternative

- HTB : pour une tension composée supérieure à 50 kV.
- HTA : pour une tension composée comprise entre 1 kV et 50 kV.

- BTB : pour une tension composée comprise entre 500 V et 1 kV.
- BTA : pour une tension composée comprise entre 50 V et 500 V.
- TBT : pour une tension composée inférieure ou égale à 50 V.

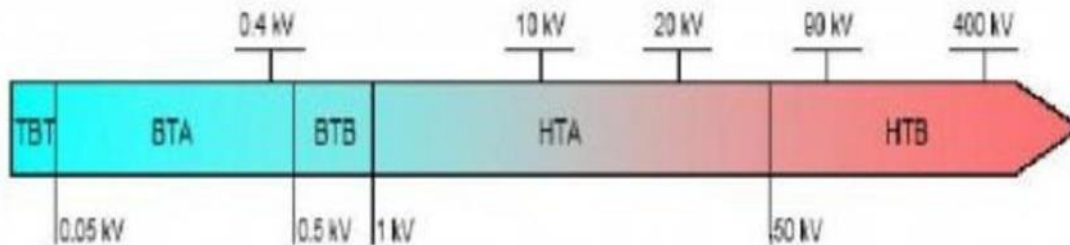


Figure I.2 : Niveaux de tension normalisés

Nous prendrons par convention dans ce qui suit :

- HTB désignera la Haute Tension HT.
- HTA désignera la Moyenne Tension MT.
- BTB et BTA désignerons le domaine de la Basse Tension BT. [2]

I. 4. Différents Type des réseaux électriques

I. 4.1. Le réseau de transport THT

C'est généralement le réseau qui permet le transport de l'énergie depuis les centres éloignés de production vers les centres de consommation. C'est sur le réseau THT que sont en principe branchées les centrales de grandes puissances (> 300 MW).

Les réseaux de transport constituent une vaste grille couvrant le territoire, à laquelle sont raccordées les sources et les utilisations (groupes, transformateurs). Chaque nœud A, B et C constitue un « poste d'interconnexion ». Ce poste est en général constitué par un collecteur principal appelé « jeu de barres » sur lequel se raccordent les lignes, au moyen d'appareils.

Les protections de ces réseaux doivent être très performantes. Quant à leur exploitation, elle est assurée au niveau national par un centre de conduite ou dispatching

à partir duquel l'énergie électrique est surveillée et gérée en permanence [3].

I. 4.2 Le réseau de transport HT

La finalité de ce réseau est avant tout d'acheminer l'électricité du réseau de transport vers Les grands centres de consommation qui sont :

- Soit du domaine public avec l'accès au réseau de distribution MT,
- Soit du domaine privé avec l'accès aux abonnés à grande consommation (supérieure à 10 MV A) livrés directement en HT. Il s'agit essentiellement d'industriels tels la sidérurgie, la cimenterie, la chimie, le transport ferroviaire.[4]

La structure de ces réseaux est généralement de type aérien (parfois souterrain à proximité de sites urbains). Les protections sont de même nature que celles utilisées sur les réseaux de transport, les centres de conduite étant régionaux [3].

I.4.3 . Le réseau de répartition MT :

Les utilisateurs peuvent être groupés d'une façon très dense comme dans les villes ou bien séparés les uns des autres par des distances plus ou moins grandes comme dans les campagnes. Ils sont desservis par un réseau de distribution alimenté par un poste de répartition qui reçoit l'énergie, provenant de centrales éloignées, par l'intermédiaire du réseau de transport.

Des lignes de distribution à moyenne tension (MT) partent des postes de répartition et alimentent des postes de transformation répartis en différents endroits de la zone à desservir; ces postes de transformation abaissent la tension à une valeur convenable pour alimenter le réseau de distribution publique auquel les abonnés sont raccordés par des branchements [3].

I.4.4. Le réseau de distribution BT

C'est le réseau qui nous est en principe familier puisqu'il s'agit de la tension 220/380 V en Algérie. Nous le rencontrons dans nos maisons via la chaîne : compteur, disjoncteur, fusibles (micro disjoncteurs).

La finalité de ce réseau est d'acheminer l'électricité du réseau de distribution MT aux points de faible consommation dans le domaine public avec l'accès aux abonnés BT. Il représente le dernier niveau dans une structure électrique [5].

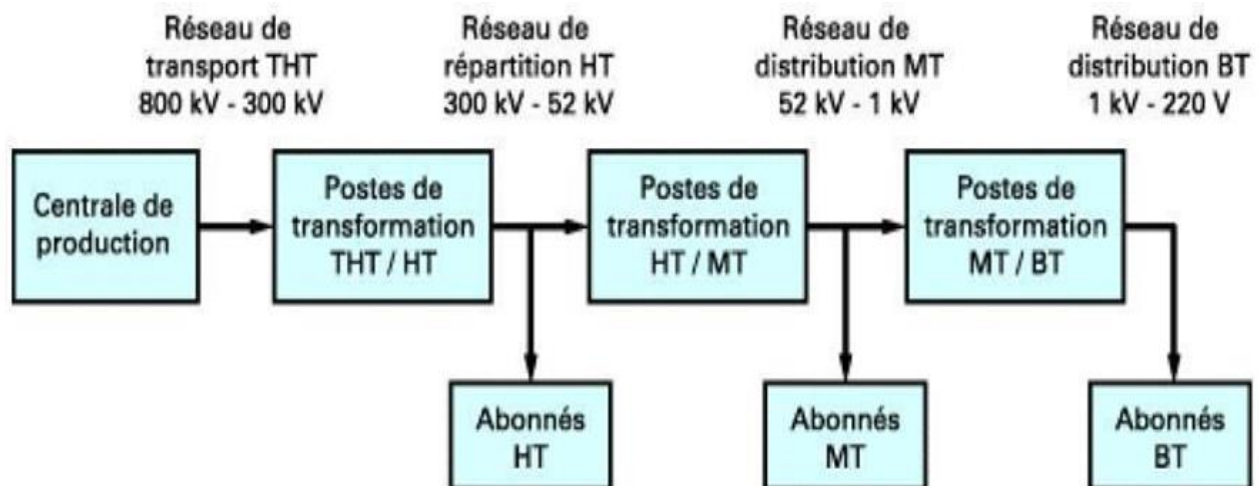


Figure I.3: Schéma de description des réseaux électriques

I.5. Les structures topologiques des réseaux électriques :

I.5.1 Les réseaux radiaux :

Sont, à partir d'un poste d'alimentation, constituées de plusieurs artères (figure 4). En pratique si l'on regarde une carte de tel réseau, on aperçoit des points communs. Mais ces réseaux sont en fait « bouclables mais non bouclés » car en ces points est toujours placé un appareil de coupure, ouvert en exploitation normale. Cette disposition, permet en cas d'incident sur une artère de reprendre l'alimentation de certaines dérivations par les artères voisines.

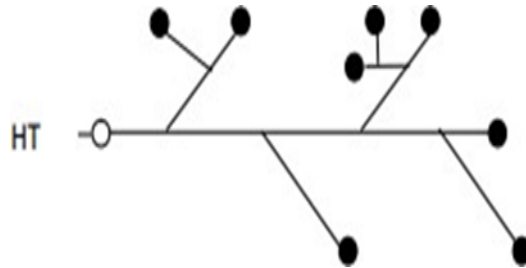


Figure I.4 un réseau radial

I.5.2 Les réseaux bouclés :

Sont alimentés à la fois par plusieurs sources (en général 2 ou 3 rarement plus). L'existence de plusieurs sources en parallèle (figure 5) augmente la sécurité

d'alimentation, en cas d'avarie de l'une d'elles (transformateur) ou sur une boucle.

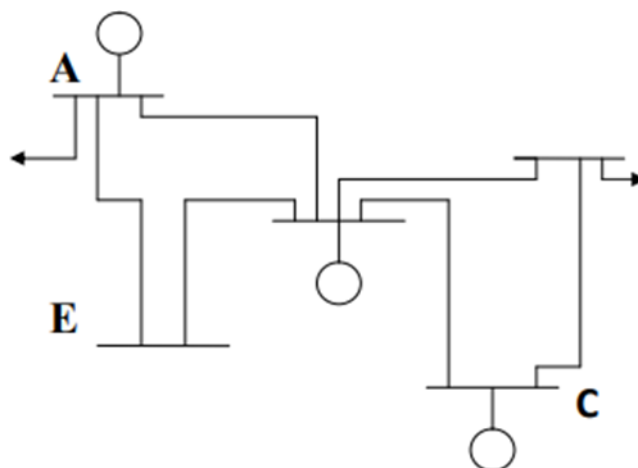


Figure I.5: un réseau bouclé

I.5.3. Les réseaux maillés :

Sont des réseaux où toutes les lignes sont bouclées. Cette structure (figure 6) nécessite que tous les tronçons de lignes soient capables de surcharges permanentes, et qu'il soit muni, à leurs deux extrémités, d'appareils de coupure. On obtient ainsi la meilleure sécurité, mais au prix le plus élevé. [6]

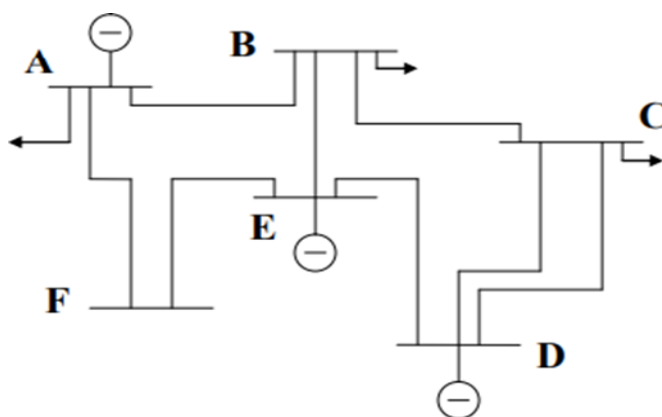


Figure I.6: un réseaux maillés

I.6. Types de postes

On distingue, suivant les fonctions qu'ils assurent, plusieurs types de postes :

- **Les postes à fonction d'interconnexion**, qui comprennent à cet effet un ou plusieurs points communs triphasés appelés jeu de barres, sur lesquels différents départs (lignes, transformateurs, etc.) de même tension peuvent être aiguillés ;
- **Les postes de transformation**, dans lesquels il existe au moins deux jeux de barres à des tensions différentes liés par un ou plusieurs transformateurs ;
- **Les postes mixtes**, les plus fréquents, qui assurent une fonction dans le réseau d'interconnexion et qui comportent en outre un ou plusieurs étages de transformation.

Les actions élémentaires inhérentes aux fonctions à remplir sont réalisées par l'appareillage à haute et très haute tension installé dans le poste et qui permet :

- D'établir ou d'interrompre le passage du courant, grâce aux disjoncteurs.
- D'assurer la continuité ou l'isolement d'un circuit grâce aux sectionneurs.
- De modifier la tension de l'énergie électrique, grâce aux transformateurs de puissance.

Un ensemble de protections et d'automates contrôle les grandeurs électriques réduites, élaborées par des réducteurs de mesure (tension et courant principalement) et agit sur l'appareillage à haute tension afin d'assurer les conditions d'exploitation pour lesquelles le réseau a été conçu.

Nous retiendrons donc que, par définition, les appareils de coupure, ainsi que l'appareillage de mesure et de protection propre à un départ, sont regroupés dans une cellule.

Un poste comporte donc autant de cellules que de départs qui sont raccordés à ses jeux de barres.

En outre, les jeux de barres sont susceptibles de constituer plusieurs nœuds électriques par l'ouverture de disjoncteurs ; on appelle alors sommet le jeu de barres ou le tronçon de jeu de barres ainsi constitué. Le nombre des sommets d'un poste caractérise ainsi son aptitude à former des nœuds électriques. [7]

I.7. Les différentes centrales électriques

Une centrale de production d'énergie électrique est un site industriel qui produit de l'électricité selon la demande. Les centrales électriques transforment des sources d'énergie naturelles en énergie électrique, afin d'alimenter en électricité des consommateurs, particuliers ou industriels relativement lointains. On distingue Cinq types de centrales de production d'énergie électrique:

- Centrales thermiques classiques.
- Centrales nucléaires.
- Centrales hydroélectriques.
- Centrales solaires ou photovoltaïques.
- Centrales éoliennes. [1]

I.8. Ligne électrique

Une ligne électrique est un ensemble de conducteurs, d'isolants et d'éléments accessoires destinés au transport de l'énergie électrique. **Les lignes électriques** assurent la fonction « transport de l'énergie » sur les longues distances. Elles sont constituées de 3 phases, et chaque phase peut être constituée d'un faisceau de plusieurs conducteurs (de 1 à 4) espacés de quelques centimètres afin de limiter l'effet couronne qui entraîne des pertes en lignes, différentes des pertes Joule. L'ensemble de ces 3 phases électriques constitue un terna.

a- Un pylône électrique peut supporter plusieurs ternes : en France rarement plus de 2, mais d'autres pays comme l'Allemagne ou le Japon font supporter à leur pylône jusqu'à 8 ternes. Les pylônes sont tous soigneusement reliés à la terre par un réseau de terre efficace. Les pylônes supportent les conducteurs par des **isolateurs** en verre ou en porcelaine qui résistent aux tensions élevées des lignes électriques.

Généralement la longueur d'un isolateur dépend directement de la tension de la ligne électrique qu'il supporte. Les isolateurs sont toujours munis d'éclateurs qui sont constitués de deux pointes métalliques se faisant face. Leur distance est suffisante pour qu'en régime normal la tenue de tension puisse être garantie. Leur utilité apparaît lorsque la foudre frappe la ligne électrique : un arc électrique va alors s'établir au niveau de l'éclateur qui contournera l'isolateur. S'il n'y avait pas d'éclateur, la surtension entre le pylône et la ligne électrique foudroyée détruirait systématiquement l'isolateur.

b- Un câble de garde, constitué d'un seul conducteur, surplombe parfois les lignes électriques. Il est attaché directement au pylône, et ne transporte aucune énergie : il est relié au réseau de terre et son but est d'attirer la foudre afin qu'elle ne frappe pas les 3 phases de la ligne, évitant ainsi les "creux de tension" perturbant les clients. Au centre du câble de garde on place parfois un câble fibre optique qui sert à la communication de l'exploitant. Si on décide d'installer la fibre optique sur un câble de garde déjà existant, on utilise alors un robot qui viendra enrouler en spirale la fibre optique autour du câble de garde.

I.8.1 Types de lignes

Elles peuvent être classées selon plusieurs critères :

- Suivant les fonctions qu'elles assurent dans le réseau :
 - Lignes de grand transport ;
 - Lignes d'interconnexion ;
 - Lignes de répartition ;
 - Lignes de distribution.
- Suivant la situation dans l'espace :
 - Lignes aériennes.
 - Lignes souterraines (câble). [1]

I.9. Modélisation du réseau électrique [8]

I.9.1. Introduction

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-système :

- 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.9.2. 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.7).

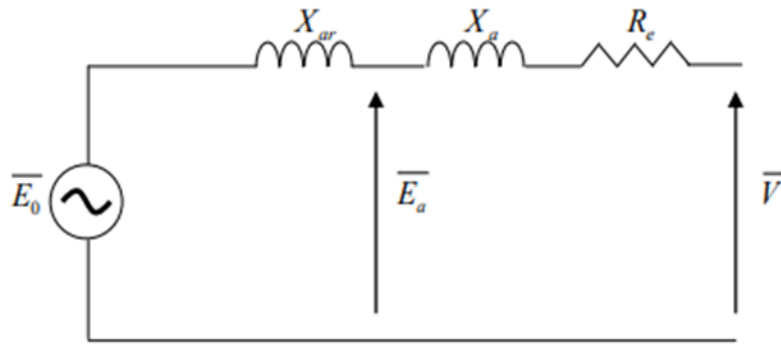


Figure. I.7: Le modèle d'une génératrice

Dans le calcul d'écoulement de puissance, il est représenté par une source de tension.



Figure. I.8: Une source de tension

$S_i = P_i + jQ_i$: La puissance apparente délivré par le générateur.

$V_i = |V| e^{j\delta_i}$: La tension simple.

E_0 : La *f.e.m* à vide .

E_0 : La *f.e.m* En charge.

V : tension de sortie.

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

X_a : Réactance de fuite.

X_s : $X_a + X_{ar}$ Réactance synchrone.

R_e : Résistance d'enroulement.

I.9.3. Modélisation d'une charge

Une charge peut être modélisée par une impédance qui consomme une quantité constante de puissance active et réactive (Figures 2.3).



Figure I.9: Modélisation d'une charge.

I.9.4. Modélisation d'une compensation shunt

Une compensation shunt qui peut être fixe ou variable, qui donne au réseau de l'énergie réactive contrôlable.

I.9.5. Modélisation de ligne longue [9]

Une ligne peut être considérée comme une série de circuit à constantes réparties uniformément sur toute sa longueur. Ces circuits sont composés d'une infinité d'éléments identiques constitué, d'une inductance linéique, et d'une résistance linéique, dans le sens longitudinal, qui donnent naissance à de 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.10).

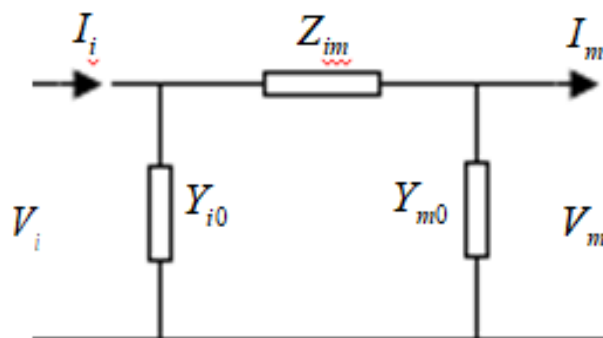


Figure I.10: modélisation d'une ligne longue

Généralement toute ligne longue se caractérise par les équations suivantes :

$$V(X) = V_i \cosh(\gamma \cdot X) - I_i \cdot Z_c \cdot \sinh(\gamma \cdot X) \quad (\text{I.1})$$

$$I(X) = \frac{V_i}{Z_c} \sinh(\gamma \cdot X) - I_i \cdot \cosh(\gamma \cdot X) \quad (\text{I.2})$$

Avec les conditions suivantes :

$$V(X = 0) = V_i$$

$$I(X = 0) = I_i$$

Où : Z (Impédance caractéristique de la ligne (Ω))

$$\gamma = \sqrt{Z \cdot \bar{Y}} \quad (\text{Constante de propagation})$$

L'équation (II-1) nous donne le courant et la tension de la ligne en fonction de la longueur X

Pour $X = L$ on a

$$V(X = L) = V_m = V_i \cosh(\gamma \cdot L) - I_i \cdot Z_c \cdot \sinh(\gamma \cdot L) \quad (\text{I.3})$$

$$I(X = L) = I_l = \frac{V_i}{Z_c} \sinh(\gamma \cdot L) - I_i \cdot \cosh(\gamma \cdot L) \quad (\text{I.4})$$

Les équations (II-2), (II-3) nous donne :

$$\cosh(\gamma \cdot L) = 1 + Z_{im} \cdot Y_{i0} = 1 + Z_{im} \cdot Y_{m0} \quad (\text{I.5})$$

$$\frac{\sinh(\gamma \cdot L)}{Z_c} = Y_{i0} + Y_{m0} + Z_{im} \cdot Y_{m0} \cdot Y_{i0} \quad (\text{I.6})$$



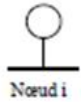

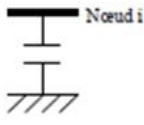
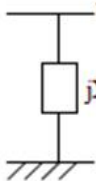
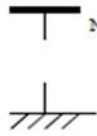
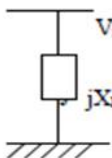
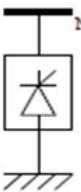
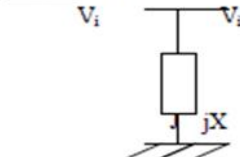

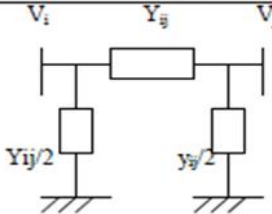

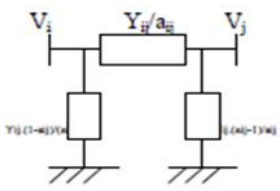
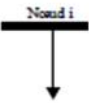
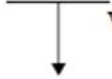
D'où en tire

$$Z_{im} = Z_c \cdot \sinh(\gamma \cdot L) \quad (\text{I.7})$$

$$Y_{i0} = Y_{m0} = \frac{\tanh\left(\frac{\gamma \cdot L}{2}\right)}{Z_c} \quad (\text{I.8})$$

Finalement en 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.10).

Tableau I.1 : Tableau Racap pour la Modélisation des paramètres du réseau.

Composants	Symbole	Représentation	Observation
Générateurs	 Nœud i	P_g, Q_g 	Puissances active et réactives générées.
Compensateurs Synchrones	 Nœud i	$P_g=0, Q_g$ 	Puissance réactive générée.
Capacités shunts	 Nœud i		Considérées comme impédance capacitive constante au nœud i, où comme puissance réactive injectée.
Self shunt (reactance)	 Nœud i		Considérée comme impédance inductive constante ou comme puissance réactive injectée.
Compensateurs statiques (SVC).	 Nœud i	Q_g Ou 	La puissance réactive des compensateurs statiques (SVC), peut être calculée, à tension fixe au nœud i.
Lignes du réseau	 Nœud i Nœud j		
Transformateur avec régulateur en charge (taps)	 Nœud i Nœud j $t_{ij}:1$ Y_{ij}		
La charge	 Nœud i P_c, Q_c	 P_c, Q_c	Les puissances active et réactive, sont fixes.

I.9.6. Classification des nœuds des réseaux électrique [10]

Chaque nœud est caractérisé par quatre variables : P_i , Q_i , V_i , θ_i . Si on connaît deux des quatre variables nous permettent de déterminer les deux autres à partir des équations principales de l'écoulement de puissance. En pratique, le problème se pose autrement. Pour cela il faut classer les nœuds du système comme suit :

- **Nœuds P-V.** Pour ce type de nœuds, on associe les centrales de production. On spécifie la puissance active et le module de la tension. Les variables à déterminer sont la phase de la tension et la puissance réactive.
- **Nœuds P-Q.** Pour ce type de nœuds, on associe généralement les charges. Ces dernières sont caractérisées par la consommation des puissances active et réactive. On peut aussi associer des générateurs avec des puissances active et réactive fixées. Les variables à déterminer sont le module et la phase de la tension.
- **Nœuds V-q.** Pour ce type de nœud on associe la centrale de production la plus puissante. Dans un nœud k (nœud de référence ou slack bus), on spécifie la phase et le module de la tension. Les valeurs à déterminer sont les puissances active et réactive.

I.10. La Compensation de la puissance réactive

Le bilan global de la puissance réactive produite et consommée dans l'ensemble du système électrique doit être équilibré. Toutefois, l'équilibre local n'est pas naturel. Il en résulte des transits de la puissance réactive. Or, ces transits provoquent des chutes de tension et des pertes. Il faut, donc, éviter ces transits par la production de la puissance réactive, autant que possible, à l'endroit où elle est consommée.

Les variations de tension du réseau sont étroitement liées aux fluctuations de la puissance réactive dans le système de production et de transport. Ceci tient au fait que la puissance réactive intervient de manière importante dans l'expression de la chute de tension.

L'analyse des variations de la demande de la puissance réactive montre que le problème de l'adaptation offre-demande présente deux aspects qui nécessitent l'emploi de dispositifs aux caractéristiques très différentes . [11]

- le premier consiste à suivre les fluctuations périodiques. Celles-ci sont connues, tout au moins pour les charges dans une large mesure prévisible. Une grande part de l'ajustement peut donc être réalisée à l'aide de moyens dont l'action est discontinue et le temps de réponse relativement long. Cette catégorie comprend les batteries de condensateurs et les inductances installées sur les réseaux .
- le second consiste à faire face aux variations brusques et aléatoires. Ceci nécessite la mise en oeuvre de moyens dont le temps de réponse est très court. Cette catégorie comprend les groupes de production ainsi que les compensateurs synchrones et les compensateurs statiques.

I.10.1. Les dispositifs conventionnels

Le réseau en lui-même est une source non négligeable de puissance réactive. Ainsi, en dehors de la production de l'énergie réactive par les générateurs, le réseau doit faire appel à d'autres sources ou plutôt d'autres moyens de compensation, qui finalement sont au moins aussi souvent consommateurs que fournisseurs d'énergie réactive.*

I.10.2. Les groupes de production (générateurs)

Les groupes de production sont bien situés pour satisfaire les besoins en énergie réactive. D'autant plus, leurs performances dynamiques leur permettent de faire face aux fluctuations brusques de la demande. En revanche, ils ne peuvent compenser que partiellement les charges réactives, en raison des chutes de tension importantes que créent les transits d'énergie réactive sur les réseaux.

I.10.3. Les condensateurs

Ils ont pour rôle de fournir une partie de l'énergie réactive consommée par les charges dans le réseau. On distingue deux types :

- a) Des batteries de condensateurs HT, raccordées aux jeux de barres HT des postes THT/HT. Elles sont essentiellement destinées à compenser les pertes réactives sur les réseaux HT et THT.
- b) Des batteries de condensateurs MT, raccordées aux jeux de barres MT des postes HT/MT ou THT/MT. Ces batteries servent à compenser l'appel global de l'énergie réactive des réseaux de distribution aux réseaux de transport. Elles sont localisées et dimensionnées individuellement en fonction du réglage de tension. [9]

I .10.4. Les inductances

Elles sont utilisées pour compenser l'énergie réactive fournie en heures creuses par les lignes à très haute tension ou par les câbles. Elles sont soit directement raccordées au réseau, soit branchées sur les tertiaires des transformateurs. Par conséquent, elles permettent une limitation des surtensions dans le réseau.

I .10.5. Les compensateurs synchrones

Les compensateurs synchrones sont des machines tournantes qui ne fournissent aucune puissance active, mais qui peuvent suivant qu'elles soient sous ou surexcitées, fournir ou absorber de la puissance réactive.

I .10.6. Les compensateurs statiques

Ils sont constitués par l'ensemble de condensateurs et d'inductances commandées par thyristors, montés en tête-bêche dans chaque phase. Chacun d'entre eux étant ainsi conducteur pendant une demi- période. La puissance réactive absorbée par l'inductance varie en contrôlant la valeur efficace du courant qui la traverse par action sur l'angle d'amorçage des thyristors. [11].

Tableau I.2: Quelques dispositifs de contrôle utilisés dans le problème tension/puissance réactive.

Contrôles par génération de la puissance réactive					
	Ajustable en Continu	Capacitive	Inductive	Réponse rapide	Control local
Générateurs synchrones	Oui	Oui	Oui	Oui, dépend du système d'excitation	Oui
Condensateurs synchrones	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Batteries de condensateurs	Non, plusieurs gradins. (discret)	Oui	Non	Dépend de l'automatisation	Oui
Réactances	Non, (discret) Généralement une ou deux unités par ligne	Non	Oui	Dépend de l'automatisation	-

I11.Conclusion :

Dans ce chapitre on a analysé les composants des réseaux et la manière d'exploiter pour le transport de l'électricité et les types des réseaux (réseau radial, réseaux bouclés, réseaux mailles), et on arrive à une autre problématique qui nous permet de commencer le chapitre deuxième : ((Comment le transfert d'énergie électrique à moindre coût et assurance de la qualité conformément aux normes techniques)).

Chapitre II:
Compensation dynamique de
la puissance réactive
FACTS

Chapitre II: Compensation dynamique de la puissance réactive 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 thermiques des lignes, doivent s'élargir et de nouvelles lignes d'extension seront ajoutées. Face à ce problème et devant les contraintes environnementales, écologiques et économiques 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. Le concept FACTS regroupe tous les dispositifs à base d'électronique de puissance qui permettent d'améliorer l'exploitation du réseau électrique. Aussi ces réseaux électriques de taille importantes seront confrontés par divers problèmes de fonctionnement à cause du contrôle traditionnel utilisant des systèmes de commande électromécaniques de temps de réponse lent par rapport à ces nouveaux systèmes FACTS à base d'interrupteurs statiques et de court temps de réponse (moins d'une seconde). Aujourd'hui cette technologie "FACTS" s'impose pour les systèmes énergétiques en augmentant leurs capacités de transport, en améliorant le contrôle des paramètres de ces derniers donc leur assurer une flexibilité du transfert de l'énergie et améliorer sa stabilité. Le concept FACTS (Flexible AC Transmission System) est né pour répondre aux différentes difficultés croissantes de transmission dans les réseaux et surtout la maîtrise de transit de puissance (compensateur de puissance réactive, variateur de charge universel,...) ces dispositifs peuvent améliorer le comportement dynamique des réseaux électriques [12].

II.2. Définition des FACTS :

les systèmes de dispositifs FACTS sont employés pour le contrôle dynamique de tension, impédance et angle de phase de tension afin d'améliorer le comportement dynamique des Chapitre II Compensation dynamique de la puissance réactive FACTS 18 réseaux ainsi que la répartition et l'écoulement des puissance dans les réseaux. Selon IEEE, les FACTS, sont définis comme suit: Ce sont des systèmes à courant alternatif incorporant des éléments d'électronique de puissance et d'autres contrôleurs statiques pour l'amélioration de la contrôlabilité et la capacité du transit de la puissance [13]

II.3. Classification des dispositifs FACTS

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

- a- **La première génération** : est basée sur les thyristors classiques. Ceux-ci sont généralement utilisés pour enclencher ou déclencher les composants afin de fournir ou absorber de la puissance réactive dans les transformateurs de réglage.
- b- **La deuxième génération** : dite avancée, est née avec l'avènement des semi-conducteurs de puissance commandables à la fermeture et à l'ouverture, comme le thyristor GTO. Ces éléments sont assemblés pour former les convertisseurs de tension ou de courant afin d'injecter des tensions contrôlables dans le réseau.
- c- **Une troisième génération** de FACTS utilisant des composants hybrides et qui est adaptée à chaque cas. Contrairement aux deux premières générations, celle-ci n'utilise pas de dispositifs auxiliaires encombrants tels que des transformateurs pour le couplage avec le réseau. Les dispositifs FACTS peuvent être classés en trois catégories figure (II.13). [8]

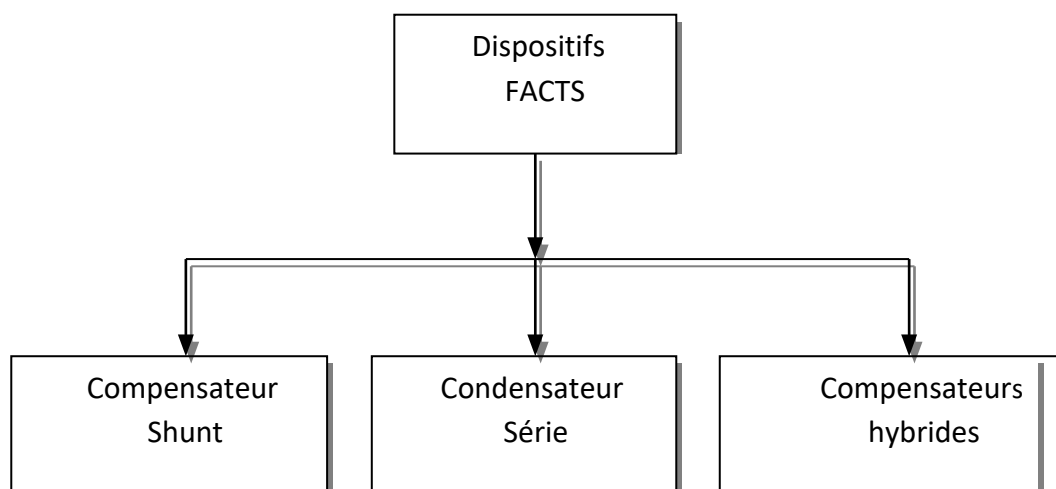


Figure II.1: Classification des dispositifs FACTS selon la catégorie.

II.4. FACTS de type série :

Ces types de FACTS connectés en série avec le réseau peuvent être utilisés comme une impédance variable (inductive, capacitive) ou une source de tension variable. En général, ces compensateurs modifient l'impédance des lignes de transport en insérant des éléments en série avec celles-ci.[19]

II.4.1. Condensateur série commandé par thyristors :

Ceci peut être réalisé de deux manières:

- Par un contrôle continue :

Un module de TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor) (figure II.1.a.) est composé d'un banc de condensateurs X_C en parallèle avec une inductance X_{ind} contrôlée par deux thyristors.

L'impédance totale X_{TCSC} vue par la ligne est une combinaison parallèle de la capacité et de l'inductance équivalente variable selon l'angle d'amorçage des thyristors. On peut aligner plusieurs modules commandés en série dans la ligne à compenser. Ce système permet:

- D'accroître la longueur électrique d'une ligne de transmission à courant alternatif;
- 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 sub-synchrone.

- Par une commande discrète :

La différence entre TSSC (*Thyristor Switched Series Capacitor*) (figure II.1.b) et le TCSC est que l'angle d'amorçage est soit de 90 degrés soit de 180 degrés.

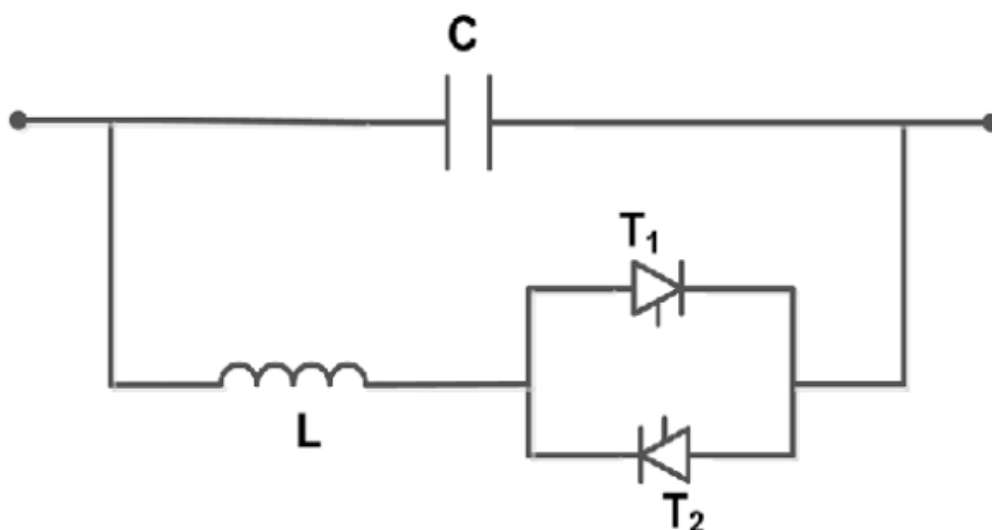


Figure II.2 : Schéma de principe de TCSC

II.4.2. Réactance Série Contrôlée par Thyristor TCSR: Thyristor Controlled Series Reactor (TCSR):

Le TCSR (Figure II.2.) est un compensateur inductif placé en série avec la ligne de transmission, qui se compose d'une inductance X_{ind1} en parallèle avec une autre inductance X_{ind2} commandée par thyristor afin de fournir une réactance inductive série variable. Lorsque l'angle d'amorçage de la réactance commandée par thyristor est de 180° , le thyristor cesse de conduire, et la réactance non contrôlable X_{ind1} agit comme un limiteur de courant de défaut. Pendant que l'angle d'amorçage diminue au-dessous de 180° , la réactance équivalente diminue jusqu'à l'angle de 90° , où elle est la combinaison parallèle de deux réactances. [20]

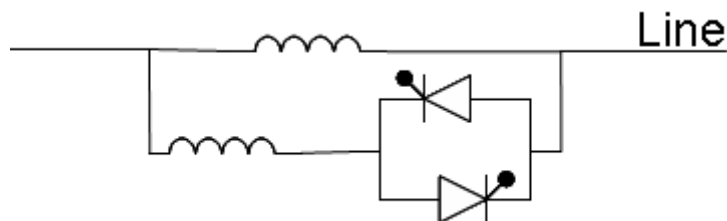


Figure II.3: Structure d'un TCSR.

II.4.3. Compensateur Série Synchrone Statique (SSSC):

Static Synchronous Series Compensator (SSSC):

Le SSSC est constitué d'un convertisseur statique avec une source d'énergie V_{dc} , connectée en série avec la ligne de transmission à travers un transformateur de tension placé en série comme le montré la figure II.3.

Le SSSC injecte en série une tension alternative V_C en quadrature avec le courant de ligne I_L à l'aide d'un transformateur série. Le SSSC peut produire ou absorber la puissance réactive Q suivant la commande D du convertisseur statique (prend la mesure de la tension à l'aide d'un transformateur de tension TT , et du courant à l'aide d'un transformateur de courant TC).

Le SSSC a une fonction comparable au TCSC. Mais contrairement à ce dernier qui présente une zone morte à la résonance parallèle, le réglage est continu. De plus, l'introduction d'un stockage d'énergie est possible du fait de la structure du convertisseur VSC. En distribution, il a des niveaux de puissance plus faibles, cette topologie est utilisée pour fiabiliser les utilisations critiques, face aux microcoupures: celle-ci porte alors le nom de DVR stockage dynamique de tension, (Dynamics Voltage Restorer). [20]

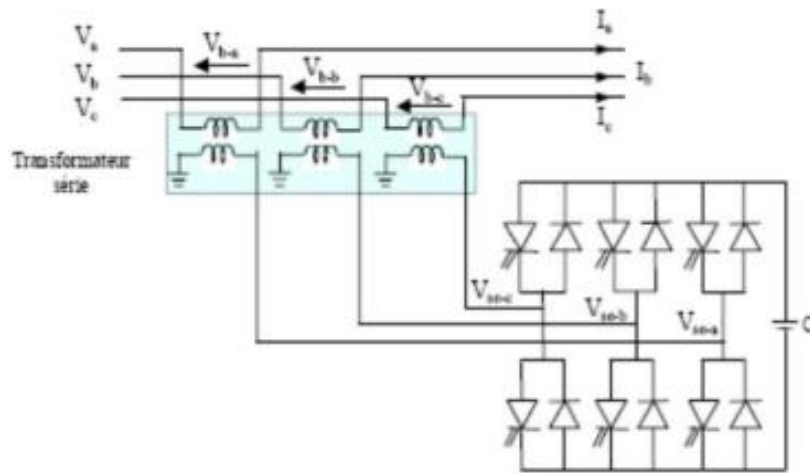


Figure II.4: Schéma de principe d'un SSSC.

II.5. FACTS de type parallèle:

II.5.1. Compensateur Statique Synchrone (STATCOM):

Static synchronous compensator (STATCOM):

Le compensateur statique synchrone STATCOM est constitué d'un convertisseur source de tension, d'un transformateur d'accouplement et d'un circuit de commande. Dans cette application, la source d'énergie V_{dc} peut être remplacée par un condensateur C , de sorte que l'échange d'énergie en régime permanent entre le compensateur statique et le réseau soit uniquement réactif, comme il est illustré dans la figure II.4 où I_C est le courant de sortie du convertisseur, perpendiculaire à la tension du convertisseur V_C . L'amplitude de la tension du convertisseur et la puissance réactive à la sortie du convertisseur sont réglables. Si V_C est supérieure à la tension V_L du réseau, le compensateur statique fournit la puissance réactive au système, si V_C est inférieure à V_L le compensateur statique absorbe la puissance réactive. [23]

Le modèle simplifié du STATCOM considère le STATCOM comme une source de tension variable qui est ajustée automatiquement pour atteindre la tension désiré, le jeu de barres où il est connecté est considéré comme un jeu de barres où l'amplitude de la tension et la puissance active et réactive sont spécifiés. [21]

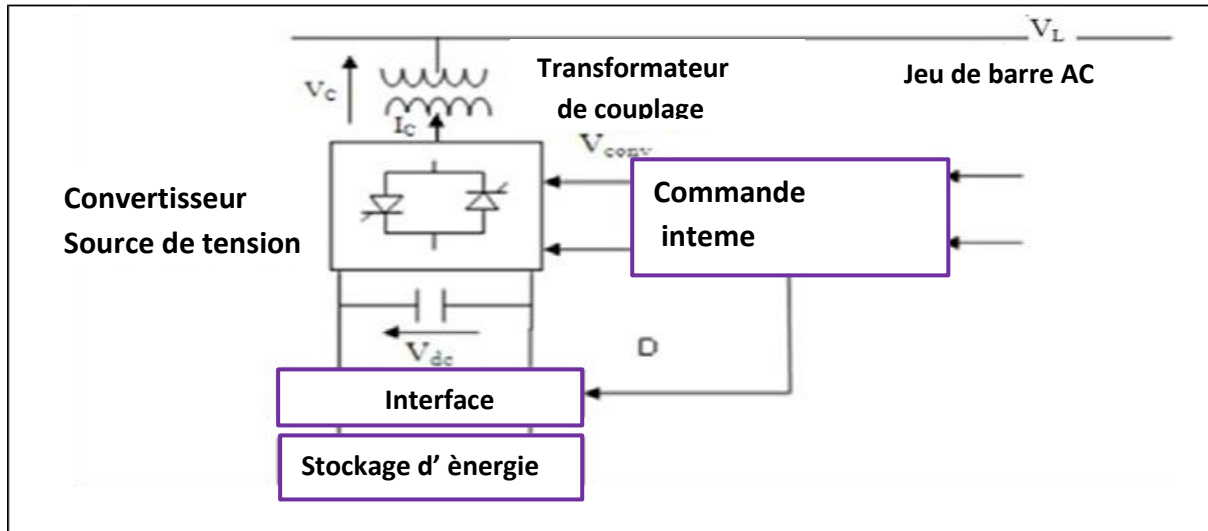


Figure II.5: Schéma de principe du STATCOM.

II.5.2. Compensateur Statique de Puissance Réactive SVC Static Var Compensator (SVC)

Dans la pratique, il y a plusieurs modèles de SVC, le modèle défini par (Conférence Internationale des Grands Réseaux Electric) et considère le SVC comme un générateur synchrone qui ne produit aucune puissance active, identique à un condensateur synchrone en parallèle avec une réactance inductive. Le jeu de barres au point de raccordement est comme un jeu de barres PV bus, devient PQ bus quand le SVC fonctionne à sa limite. [21]

Le compensateur statique de puissance réactive SVC rend possible le contrôle rapide de la tension. La figure II.5 ci- dessous illustre le schéma d'un SVC.

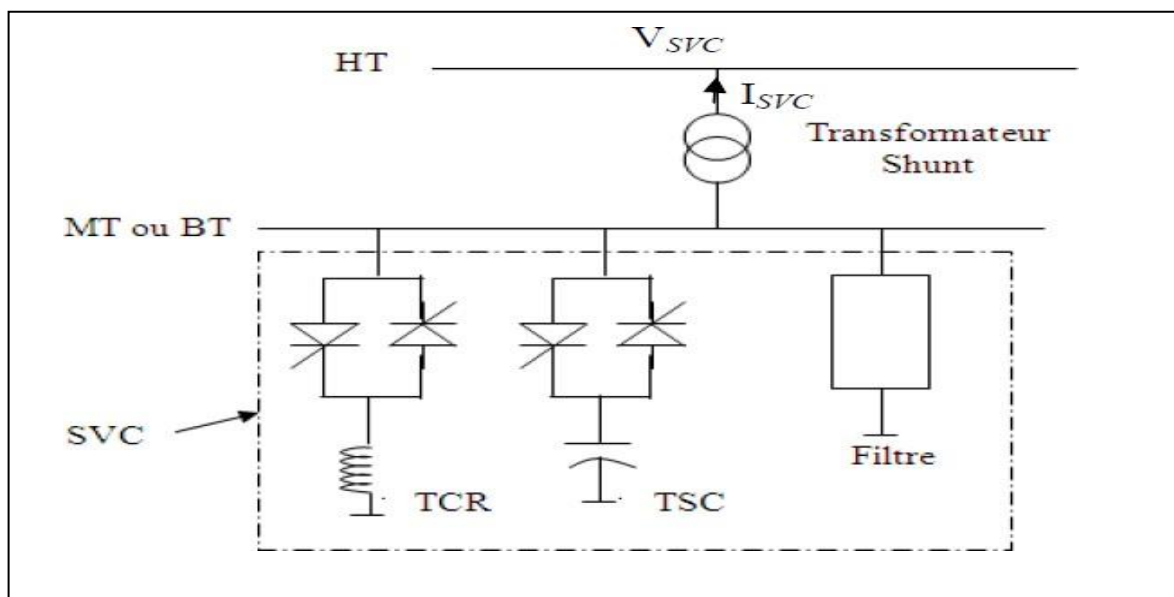


Figure II.6. Schéma de principe d'un SVC.

II.6. FACTS de type hybride

II.6.1. Transformateur déphaseur à base de Thyristors (TCPAR)

Thyristor Controlled Phase Angle Regulator (TCPAR):

La figure II.6, montre le schéma d'un TCPAR :

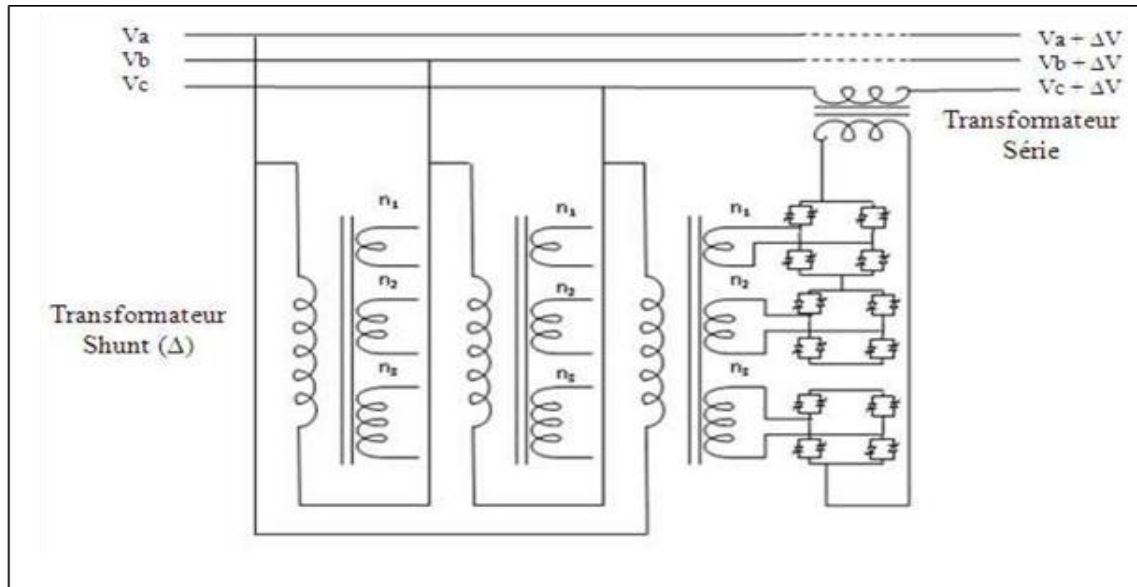


Figure II.7: Schéma de principe d'un TCPAR.

C'est un transformateur déphaseur à base de thyristors. Ce dispositif a été créé pour remplacer les déphaseurs à transformateurs à réglage en charge (LTC; Load Tap Changer) qui sont commandés mécaniquement. Il est constitué de deux transformateurs, l'un est branché en série avec la ligne et l'autre en parallèle. Ce dernier possède différents rapports de transformation (n_1 , n_2 , n_3). Ces deux transformateurs sont reliés par l'intermédiaire des thyristors. Son principe de fonctionnement est d'injecter, sur les trois phases de la ligne de transmission, une tension ΔV en quadrature avec la tension à déphaser. Il a l'avantage de ne pas générer d'harmoniques car les thyristors sont commandés en interrupteurs en pleine conduction. Par contre, comme le déphasage n'a pas une variation continue, il est nécessaire d'ajouter un compensateur shunt, ce qui entraîne des surcoûts d'installation. L'amplitude de la tension injectée est une combinaison des secondaires du transformateur parallèle dont les rapports de transformation sont n_1 , n_2 , n_3 . [22]

II.6.2. Contrôleur de flux de puissance d'interligne (IPFC)

Interline Power Flow Controller (IPFC)

L'IPFC a été proposé afin de compenser un certain nombre de lignes de transmission d'une sous-station. Sous sa forme générale, l'IPFC utilise des convertisseurs DC-DC placés en série avec la ligne à compenser. En d'autres termes, l'IPFC comporte un certain nombre de SSSC et peut ajouter le STATCOM.

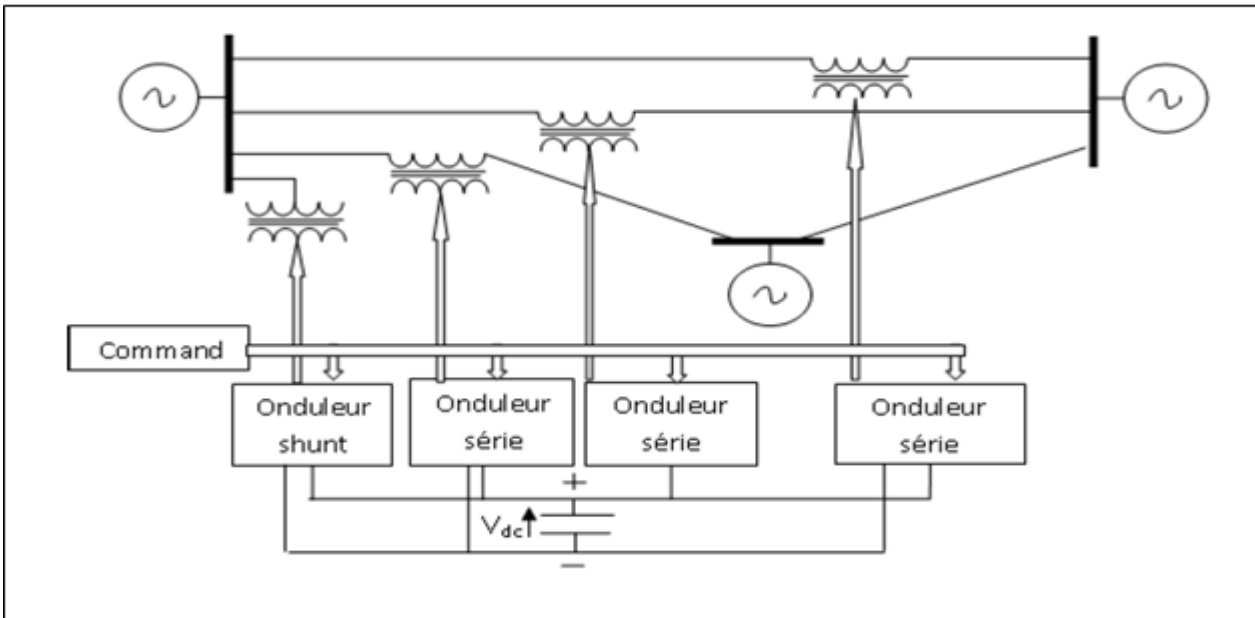


Figure II.8: Schéma de principe d'un IPFC.

II.6.3 Variateur de charge universel UPFC :

Unified Power Flow Controller (UPFC):

En principe, le variateur de charge universel l'UPFC possède à la fois la fonctionnalité des autres compensateurs FACTS (parallèle, série et déphaseur), à savoir le réglage de la tension, le flux de puissances, l'atténuation des oscillations de puissance et l'amélioration de la stabilité. L'originalité de ce dispositif est de pouvoir contrôler les trois paramètres associés au transit de puissance dans une ligne électrique à savoir : la tension, l'impédance de la ligne, le déphasage des tensions aux extrémités de la ligne où il est installé. La configuration de l'UPFC comprend un compensateur shunt STATCOM et un compensateur série SSSC. Les deux compensateurs sont interconnectés avec un jeu de barres de tension continue V_{dc} comme le montre la figure II.8. [22] :

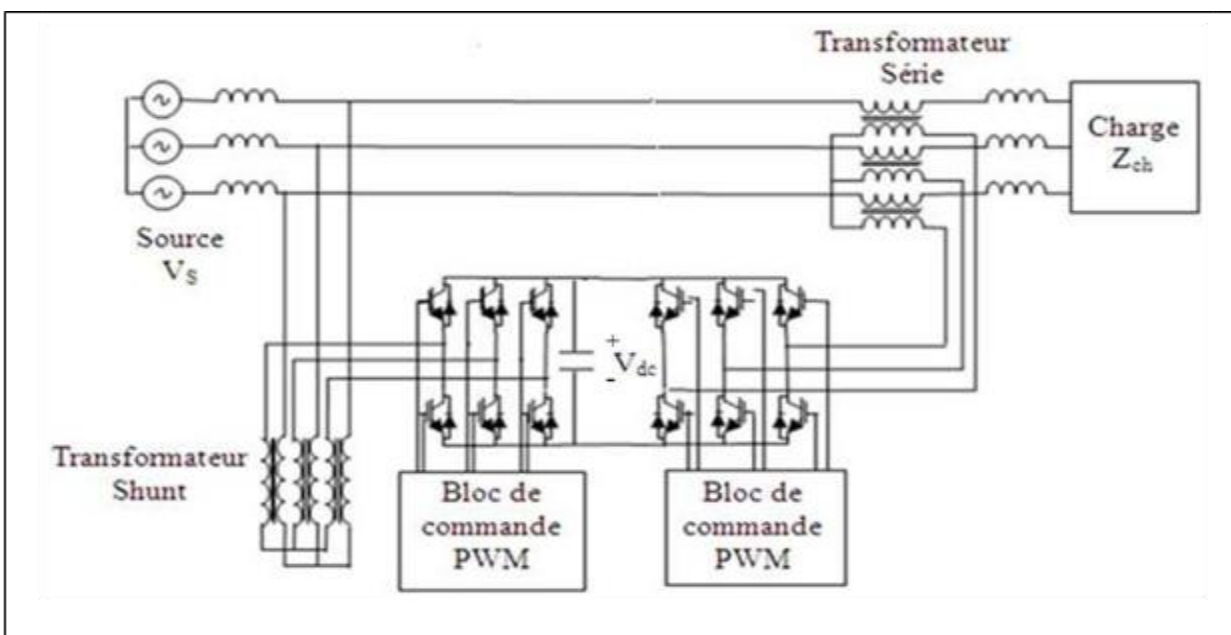


Figure II.9: Schéma de principe d'un variateur de charge universel.

II.7. Principe de fonctionnement

Les effets de la compensation série sur un système énergétique peuvent se résumer comme suit. La tension insérée par un condensateur série est proportionnelle et perpendiculaire au courant de la ligne. Ce faisant, la puissance réactive fournie par le condensateur est proportionnelle au carré du courant. Il en résulte que le condensateur série a un effet d'autorégulation. Lorsque la charge du système croît, la puissance réactive produite par le condensateur série augmente également. Régulation de la tension en régime permanent et prévention des chutes de tension.

Un condensateur série est en mesure de compenser la chute de tension sur une ligne de transport due à l'inductance série. A faible charge, la chute de tension est plus faible et la tension de compensation série est plus basse. Lorsque la charge augmente et que la chute de tension devient plus importante, la contribution par le compensateur série augmente et la tension du système est réglée de manière correspondante. La compensation série élargit aussi la zone de stabilité de la tension en réduisant la réactance de la ligne. De cette façon, elle aide à prévenir les chutes de tension. Montre que la stabilité de la tension s'accroît de P1 au niveau P2 plus élevé .

II.8. Rôle des dispositifs FACTS

Le développement des dispositifs FACTS est essentiellement dû aux progrès réalisés dans le domaine des semi-conducteurs de puissance et plus particulièrement des éléments commandables 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 régulateur 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.

Dans un réseau électrique, les FACTS permettent de remplir des fonctions tant en régime stationnaire qu'en régime transitoire. Ils agissent généralement en absorbant ou en fournissant de la puissance réactive, en contrôlant l'impédance des lignes ou en modifiant les angles des tensions. En régime permanent, les FACTS sont utilisés principalement dans les deux contextes suivants :

- Le maintien de la tension à un niveau acceptable en fournissant de la puissance réactive lorsque la charge est élevée et que la tension est trop basse, alors qu'à l'inverse ils en absorbent si la tension est trop élevée;
- Le contrôle des transits de puissances de manière à réduire, voire supprimer, les surcharges dans les lignes ou les transformateurs ainsi que pour éviter les flux de bouclage dans le réseau. Ils agissent alors en contrôlant la réactance des lignes et en ajustant les déphasages.

De par leur vitesse de commande élevée, les FACTS possèdent de nombreuses qualités en régime dynamique [17]. Ils permettent en particulier :

- D'accroître le réserve de stabilité transitoire ;
- D'amortir les oscillations de puissance ;
- De supporter de manière dynamique la tension.

Les dispositifs FACTS ont également une action bénéfique sur les niveaux des courants de court-circuit ainsi qu'en cas de résonance hypo synchrone.[18]

II.9. Les avantages, les inconvénients et les contraintes de la technologie des dispositifs

FACTS : [7]

a. Les avantages des dispositifs FACTS :

- Contrôle le transit de la puissance active.
- Augmente la sécurité des systèmes énergétiques (augmentation de la limite de la stabilité transitoire, amortissement des oscillations ...).
- Réduit le transit de l'énergie réactive.
- Optimise les puissances générées, donc réduit le coût de production de l'énergie.
- Agir comme filtre actif.
- Améliorée l'interconnexion et l'échange énergétique.

b. Les inconvénients :

L'introduction des harmoniques du réseau électrique ce qui le rend pollué, c'est-à-dire le signal sera tendu et non sinusoïdale. Il rend le réseau vulnérable à la surtension dûe aux commutations répétitives.

II.10. Comparaison des FACTS

les plus utilisés Le tableau suivant montre les performances qui guident l'utilisateur dans son choix pour chaque compensateur .

FACTS \ Performance	SV	SVC	STATCOM	TCSC	SSSC	UPFC
Transit de puissance active	+	+	+	+++	+++	+++
Contrôle de la puissance réactive	+++	+++	+++	/	/	+++
Contrôle de la tension	+++	+++	+++	+	+	+++
Contrôle de l'angle de transport	/	/	/	+++	+++	+++
Contrôle dynamique de la tension	/	++	+++	/	/	+++
Stabilité	/	++	+++	++	+++	+++
Oscillation de puissance	/	++	+++	+++	+++	+++

Conclusion

Dans ce chapitre, Nous avons vu l'objectif de l'analyse de l'écoulement de puissance ainsi que les méthodes de résolution de ce problème puis on a vu l'importance de la compensation de puissance réactive ainsi que leurs dispositifs.

Nous avons aussi présenté un aperçu global sur les nouveaux dispositifs de contrôle et de commande des réseaux électriques appelés FACTS comme le SVC, STATCOM et TCSC. Ces systèmes améliorent le transit de puissance dans les lignes et la stabilité du réseau. Grace à la grande rapidité de réaction des contrôler d'électronique constituants les FACTS, ces dernier sont caractérisés par une grande fiabilité.

Chapitre III :
Modélisation des dispositifs
FACTS (TCSC)

Chapitre III: Modélisation des dispositifs FACTS (TCSC)

III.1. Introduction

Dans tous les réseaux de transport, il est nécessaire de maintenir la tension aux différents jeux de barres dans des limites acceptables. Les systèmes de transmission flexibles en courant alternatif (FACTS) sont des moyens de contrôle rapides et flexibles capables de faciliter le transit des puissances et d'améliorer la stabilité des réseaux électriques. Le contrôleur dynamique série TCSC est un dispositif FACTS qui permet de régler la tension et d'amortir les oscillations dues à des perturbations dans les réseaux électriques.

III.2. Contrôle des transits de puissances par dispositif FACTS (TCSC)

Les capacités séries contrôlées par thyristor (TCSC), utilisant une électronique de puissance de dernière génération, peuvent aider à s'affranchir de ces contraintes, dans tous les cas où il est nécessaire de transporter de grandes quantités d'énergie sur de longues distances ou lors de la mise en place de liaisons entre pays ou entre régions.

C'est une alternative très favorable du point de vue technique, économique et environnemental [23].

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

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

Les caractéristiques d'un TCSC sont :

- 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 contrôle 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 del'amortissement des oscillations de courant.

III.2.1 Modélisation du TCSC

La compensation série est la meilleure technique actuellement connue pour accroître la capacité de transfert de puissance des lignes de transmission. Les condensateurs séries fonctionnent en insérant une source de tension en série avec la ligne de transmission avec une polarité inverse à celle de la chute de tension à travers la ligne.

L'effet apparent est la diminution de la réactance apparente de la ligne de transmission.

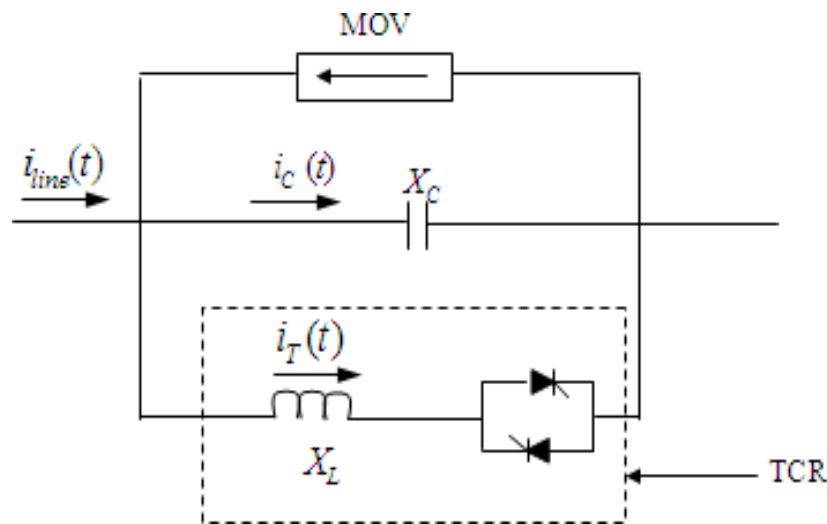


Figure III.1: Schéma d'un TCSC.

$u_c(t)$: est la tension en borne de la condensateur.

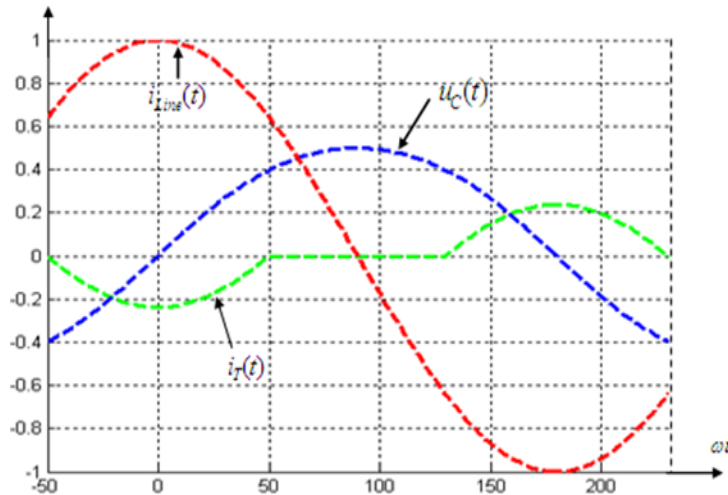
$i_t(t)$: est le courant a travers le thyristor .

$i_{line}(t)$: est le courant transite dans la ligne .

$i_T(\omega t), u_c(\omega t)$ pour $\pi - \sigma \leq \omega t \leq \pi + \sigma$ est donne par l'expression analytique suivant:

$$i_T(\omega t) = \begin{cases} A \left(\cos(\omega t) - \frac{\cos\sigma}{\cos\rho\sigma} \cos(\rho\omega t) \right) & \text{for } -\sigma \leq \omega t \leq \sigma \\ 0 & \text{for } \sigma \leq \omega t \leq \pi - \sigma \\ A \left(\cos(\omega t) + \frac{\cos\sigma}{\cos\rho\sigma} \cos(\rho(\omega t - \pi)) \right) & \text{for } \pi - \sigma \leq \omega t \leq \pi + \sigma \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

$$u_c(\omega t) = \begin{cases} -AX_L \sin(\omega t) + \frac{A\rho X_L \cos(\rho)}{\cos(\rho\sigma)} \sin(\rho\omega t) & \text{for } -\sigma \leq \omega t \leq \sigma \\ X_c(\sin(\omega t) - \sin(\sigma)) - AX_L(\sin(\sigma) - \rho \cos(\sigma) \tan(\rho\sigma)) & \text{for } \sigma \leq \omega t \leq \pi - \sigma \\ -AX_L \sin(\omega t) - \frac{A\rho X_L \cos(\sigma)}{\cos(\rho\sigma)} \sin(\rho(\omega t - \pi)) & \text{for } \pi - \sigma \leq \omega t \leq \pi + \sigma \end{cases} \quad \text{(III.2)}$$



$\alpha = 130^\circ$

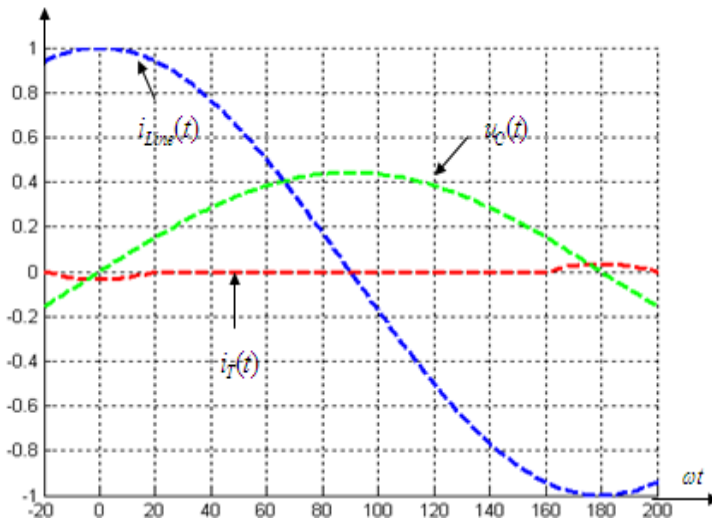


Figure III.2:Capacitor voltage and thyristor current waveforms for different thyristor firing angles

Analyse du circuit d'un TCSC et ses principales fonctionnalités comme les composantes fondamentales de la tension et du courant sont contrôlés, le TCSC devient analogue à une impédance contrôlable, qui est le résultat de la mise en parallèle de la réactance équivalente d'un composant TCR et une capacité [24].

Notons par:

$$Z_{TCSC} = jX_{TCSC}$$

L'impédance équivalent du TCSC.

$$Z_{TCR} = jX_{TCR} = j \frac{X_L \pi}{2(\pi - \alpha) + \sin(2\alpha)} \quad (III.3)$$

L'impédance équivalente du TCR.

$$Z_C = -jX_C$$

L'impédance de la capacité

On peut écrire:

$$\begin{aligned} Z_{TCSC} &= Z_C / Z_{TCR} = \frac{jX_C \cdot jX_{TCR}}{-jX_C \cdot jX_{TCR}} & (III.4) \\ &= j \frac{X_C X_L}{X_C - X_{TCR}} \\ &= j \frac{X_C X_L}{\frac{X_C}{\pi} (2(\pi - \alpha) + \sin(2\alpha)) - X_L} \end{aligned}$$

D'où

$$X_{TCSC}(\alpha) = j \frac{X_C X_L}{\frac{X_C}{\pi} (2(\pi - \alpha) + \sin(2\alpha)) - X_L} \quad (III.5)$$

$$X_{TCSC} = X_C - (X_C + X_{LC}) \frac{2\sigma + \sin(2\sigma)}{\pi} + \frac{4X_{LC}^2 \cos(\sigma^2)}{X_L} \left(\frac{\rho \tan(\rho\sigma) - \tan(\sigma)}{\pi} \right) \quad (III.6)$$

$$\sigma = \pi - \alpha, \omega_0 = 1/\sqrt{LC} \cdot \rho = \omega_0/\omega, X_{LC} = \frac{X_C X_L}{X_C - X_L}$$

X_C : la réactance capacitive nominal ;

X_L : la réactance inductive.

α : angle d'amorçage

Le dispositif peut opérer en trois modes différents :

- Mode hors circuit : les thyristors sont en conduction pleine.
- Mode bloqué : les thyristors sont bloqués.
- Mode variable : la conduction des thyristors est contrôlée par un signal d'amorçage et donc 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 90^0 jusqu'à une valeur maximum dans une plage de fonctionnement inductif et de fonctionnement capacitif.

La valeur maximale de l'impédance inductive et la valeur minimale de l'impédance capacitive devraient être prises en compte dans la conception du dispositif pour empêcher une résonance parallèle entre le condensateur et le TCR à la fréquence fondamentale. figure (III.26) montre l'impédance caractéristique de l'état d'équilibre du TCSC à la fréquence fondamentale.

On peut observer dans cette figure la caractéristique non linéaire du dispositif et de sa région de résonance [24].

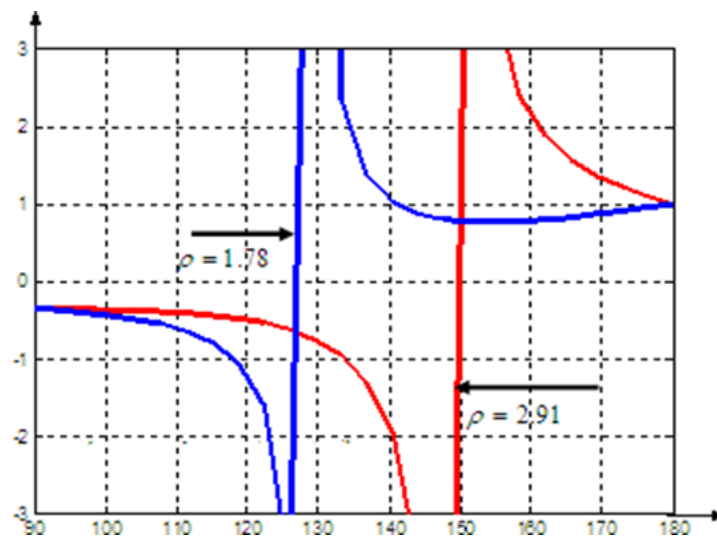


Figure III.3: variation de l'impédance de TCSC en fonction de l'angle d'amorçage

avec différent valeur de .

III.2.2. Implantation de TCSC dans le problème de l'écoulement de puissance

Le modèle d'injection de TCSC sans et avec pertes est dérivé. Figure(III.28) montre le schéma de circuit équivalent d'un TCSC ce qui est :

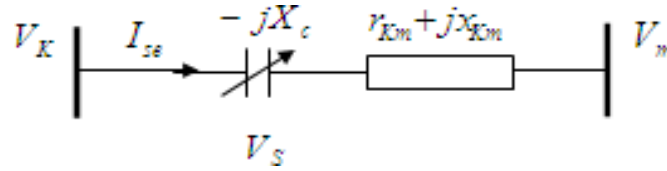


Figure III.4: Schéma équivalent d'un TCSC.

Situé entre les jeux de barres K et m dans le système de transmission du schéma 2, nous avons:

$$\bar{I}_{se} = \frac{\bar{V}_K - \bar{V}_m}{r_{km} + j(x_{km} - x_c)} \quad (III.7)$$

L'influence du condensateur est équivalente à une source de tension qui dépend des tensions \bar{V}_K et \bar{V}_m . Le modèle d'injection est obtenue en remplaçant la tension de la source par une source de courant équivalent I_S comme montré dans la figure (III.5).

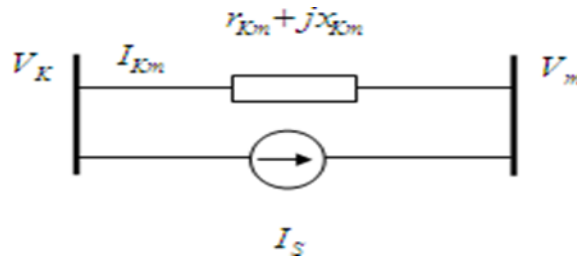


Figure III.5: Remplacement V_S par I_S

Dans la figure (III.26), $\bar{V}_S = -jX_c I_{se}$ et de figure(III.27), nous avons.

$$\bar{I}_S = \frac{\bar{V}_S}{r_{km} + jx_{km}} = \frac{-jx_c \bar{I}_{se}}{r_{km} + jx_{km}} \quad (III.8)$$

Le source de courant correspondent aux puissances injectées \bar{S}_{ks} et \bar{S}_{ms} montré dans figure (III.30), ce qui sont définis par:

$$\bar{S}_{ks} = \bar{V}_k (-\bar{I}_S)^* = \bar{V}_k \left(\frac{jx_c}{r_{km} + jx_{km}} \frac{\bar{V}_k - \bar{V}_m}{r_{km} + j(x_{km} - x_c)} \right)^* \quad (III.9)$$

$$\bar{S}_{ms} = \bar{V}_m (-\bar{I}_S)^* = \bar{V}_m \left(\frac{jx_c}{r_{km} + jx_{km}} \frac{\bar{V}_k - \bar{V}_m}{r_{km} + j(x_{km} - x_c)} \right)^* \quad (III.10)$$

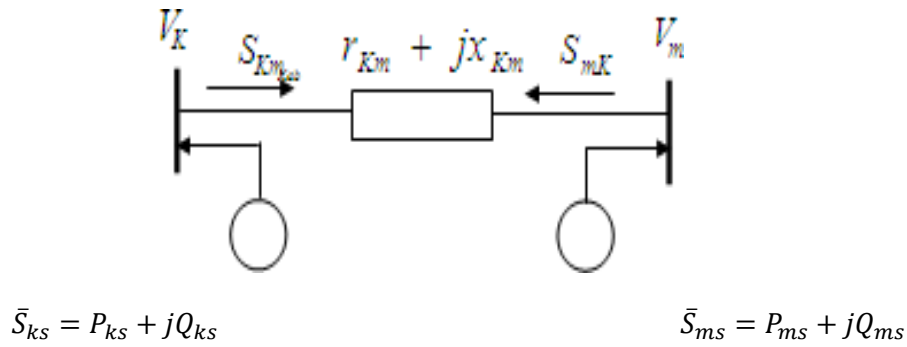


Figure III.6: Modèle d'injection : puissance injectées équivalentes.

Si ($r_{km} = 0$)

$$P_{Ks} = -B_e V_K V_m \sin(\theta_K - \theta_m)$$

$$P_{ms} = -P_{Ks}$$

$$Q_{Ks} = -B_e (V_k^2 - V_K V_m \cos(\theta_K - \theta_m))$$

$$Q_{ms} = -B_e (V_m^2 - V_m V_k \cos(\theta_m - \theta_k))$$

$$B_e = \frac{-x_c}{x_{km} - x_c} \frac{1}{x_{km}} \quad (\text{III.11})$$

Si la résistance $r_{km \neq 0}$, alors on définit :

$$g'_{km} + j b'_{km} = \frac{j x_c}{r_{km} + j x_{km}} \frac{1}{r_{km} + j(x_{km} + x_c)} \quad (\text{III.12})$$

Dans ce cas nous avons un modèle avec des pertes des composants actifs et réactifs peuvent être calculées comme :

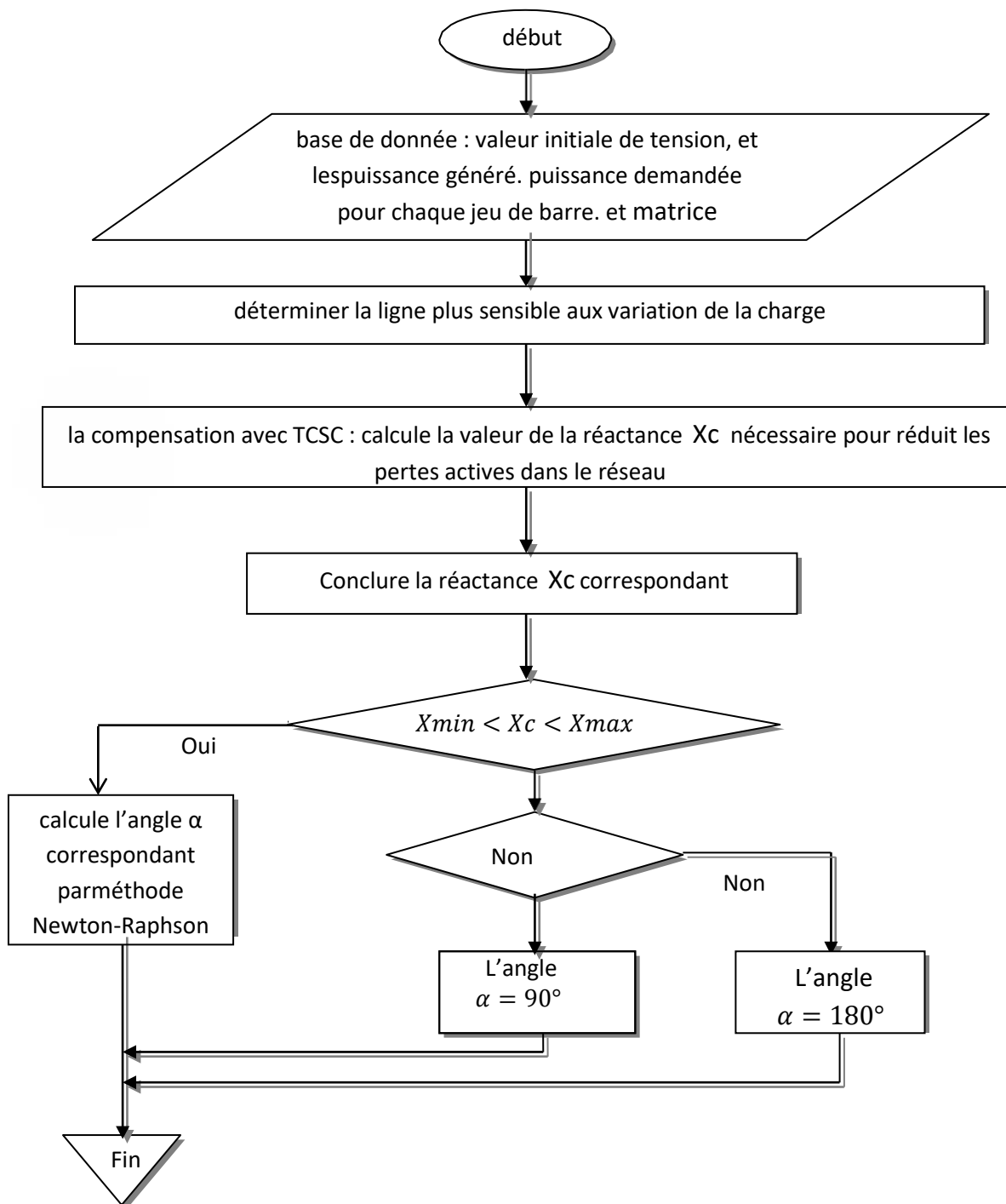
$$P_k = -g'_{km} (V_k^2 - V_k V_m \cos(\theta_k - \theta_m)) - b'_{km} V_k V_m \sin(\theta_k - \theta_m) \quad (\text{III.13})$$

$$Q_a = -V_k^2 \left(\frac{b'_{km}}{b_{sh}} \right) / (V_k V_m b'_{ab} \cos(\theta_k - \theta_m)) - V_k V_m g'_{km} \sin(\theta_k - \theta_m) \quad (\text{III.14})$$

$$P_m = -g'_{km} (V_m^2 - V_m V_k \cos(\theta_k - \theta_m)) - b'_{km} V_k V_m \sin(\theta_k - \theta_m) \quad (\text{III.15})$$

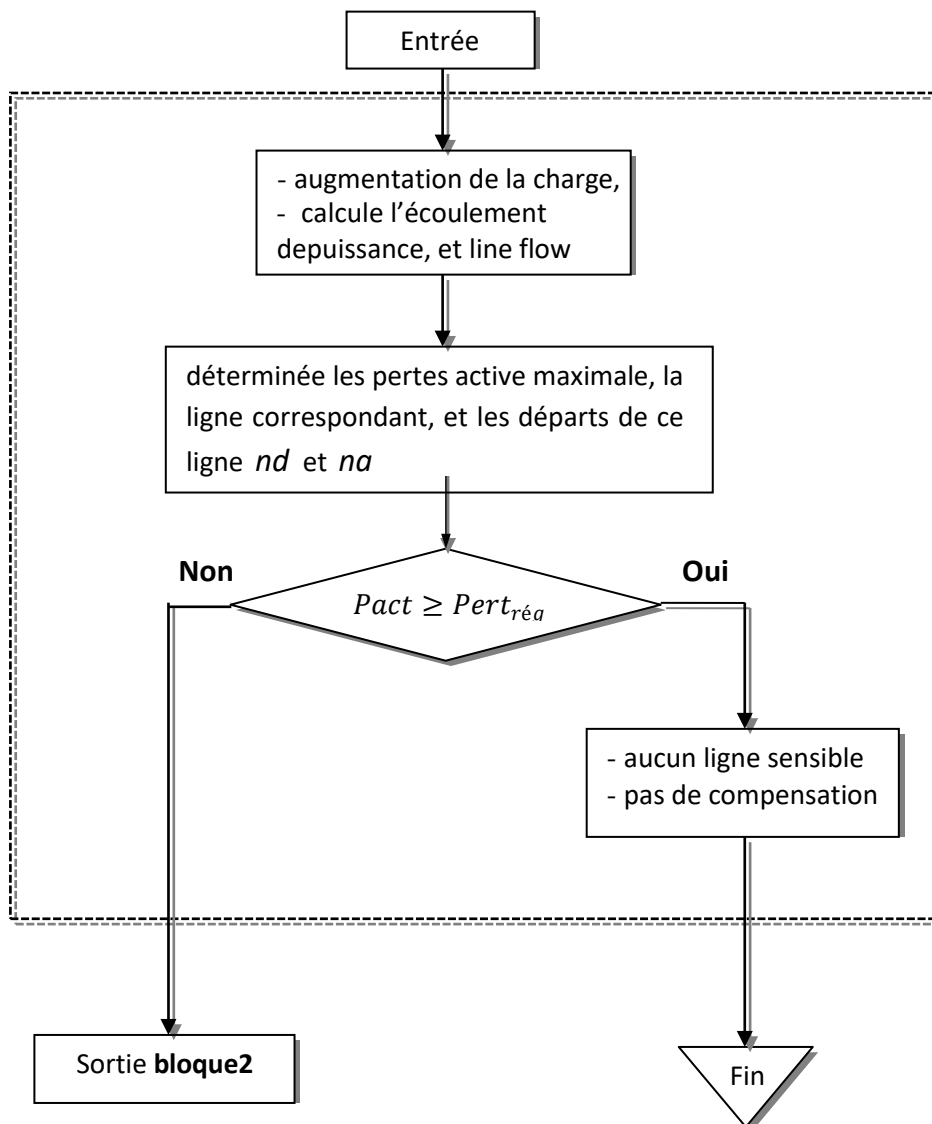
$$Q_m = -V_m^2 \left(\frac{b'_{km}}{b_{sh}} \right) / (V_k V_m b'_{km} \cos(\theta_k - \theta_m)) - V_k V_m g'_{km} \sin(\theta_k - \theta_m) \quad (\text{III.16})$$

III.2.3. L'organigramme globale de l'intégration de TCSC

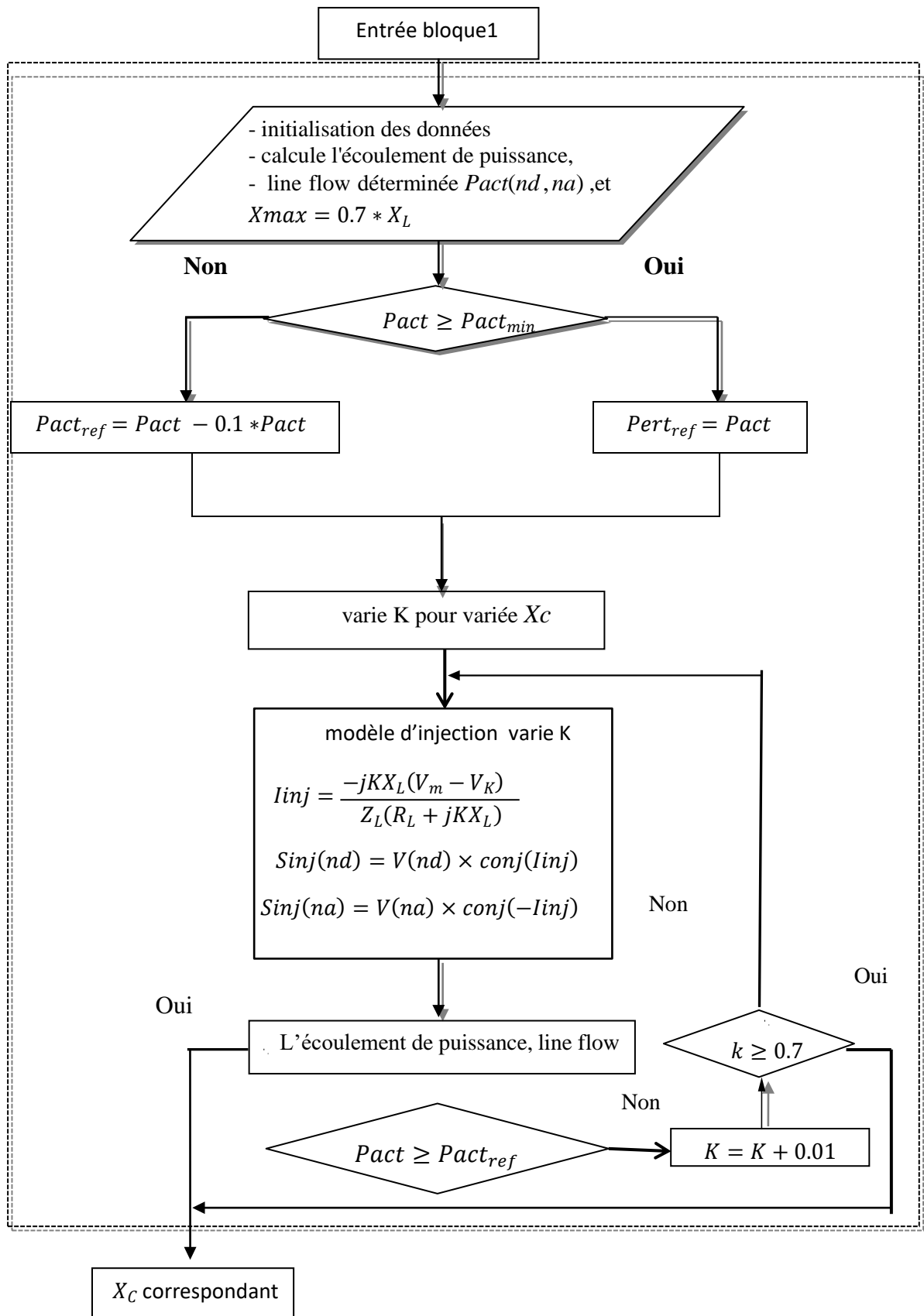


III.2.4 Organigramme détaillée

Bloque 1 : déterminer la ligne le plus sensible aux variation de la charge



Bloque 2 : la compensation avec TCSC : calcule la valeur de la réactance X_c nécessaire pour réduit les pertes actives dans le réseau.



Test de Application

III.3. Test de Application: (compensation série avec TCSC)

III.3.1. Test de Application(1): réseau électrique de 9 jeux de barres

Au départ, un simple réseau électrique de 9 jeux de barres est utilisé juste pour illustrer l'effet du dispositif de Compensation (FACTS). Ce réseau test est constitué de 6 lignes électriques, 3 générateurs, 3 transformateurs et 3 charges.

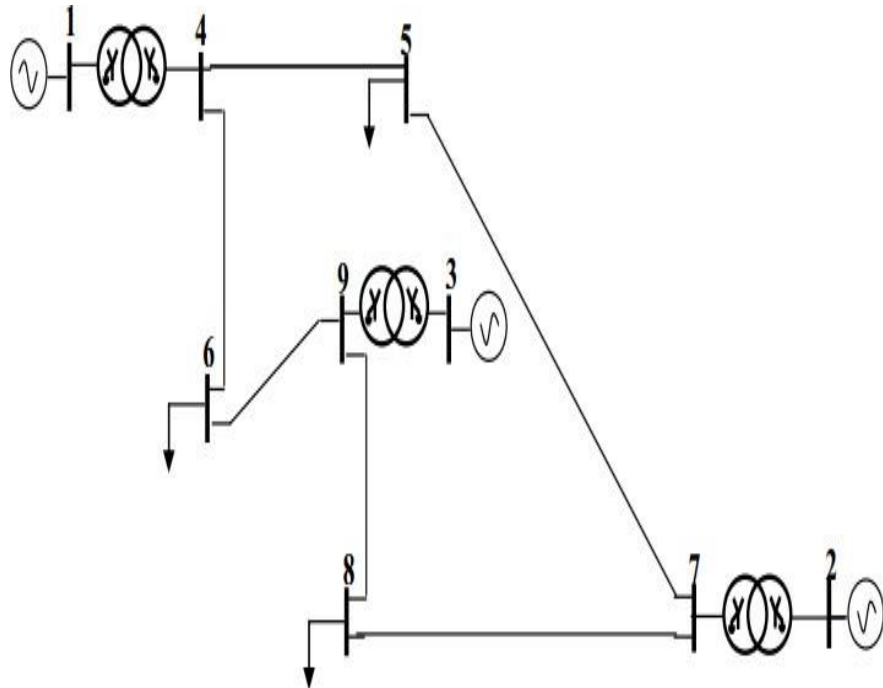


Figure III.7: Schéma d'un réseau test de 9 jeux de barres.

La ligne la plus sensible c'est : 2,5

Le jeu de barre le plus sensible c'est : 9

La puissance demandée active, et réactive : 203,700 MW , et 90,400 MVAR

Tableau III.1: Résultats des tensions du réseau électrique –cas rupture de la ligne

Bus	Sans compensation	Avec compensation
	V(p.u)	V(p.u)
1	1.06	1.0600
2	0.890	0.8920
3	0.908	0.9130
4	0.885	0.8913
5	0.867	0.8686
6	0.872	0.8798
7	0.854	0.8732
8	0.872	0.8730
9	0.847	0.8795

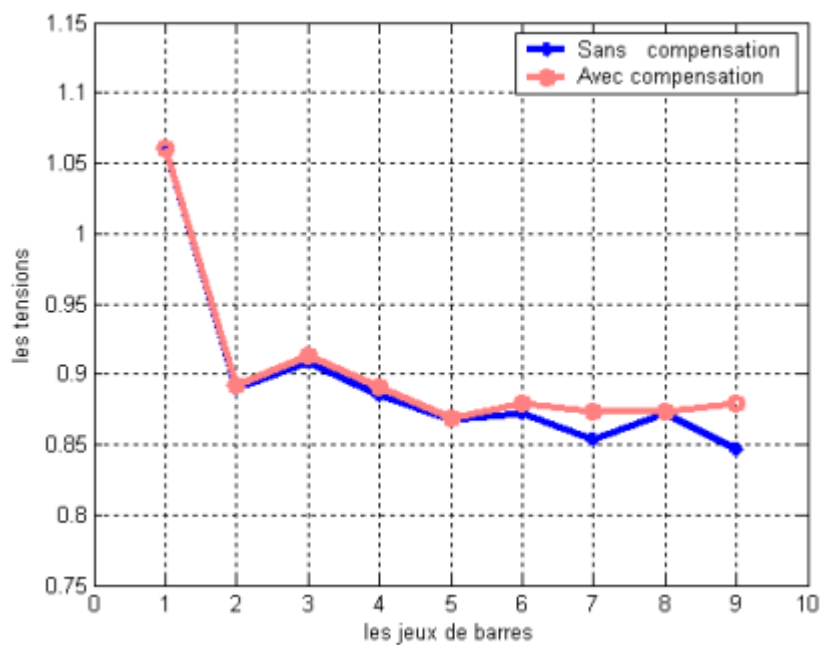


Figure III.8: Variation de la tension – cas rupture de la ligne

Tableau III.2: Résultats du réseau électrique de 9 jeux de barres. –cas normal

	Résultats	Cas normale
Sans Compensation	Tension 2 (pu)	0.890
	Tension 7 (pu)	0.854
	Tension 9 (pu)	0.847
	Pertes active 2,5 (MW)	4,341
	Pertes réactive 2,5 (MVAR)	13,922
	Puissance active généré (MW)	213,704
	Puissance réactive généré (MVAR)	100,588
	Perte active (MW)	9,861
	Pertes réactive (MVAR)	10,315
	Coût optimal (\$/h)	332.924

Tableau III.3: Résultats du réseau électrique de 9 jeux de barres. Avec Compensation

	Résultats	Cas normale
Avec Compensation	Tension 2 (pu)	0.8920
	Tension 7 (pu)	0.8732
	Tension 9 (pu)	0.8795
	Pertes active 2,5 (MW)	4,341
	Pertes réactive 2,5 (MVAR)	13,922
	Puissance active généré (MW)	213,704
	Puissance réactive généré (MVAR)	100,588
	Perte active (MW)	9,861
	Pertes réactive (MVAR)	10,315
	K	0,13
	X_{tcsc} (pu)	0,026
	α (degré)	118,875
	Coût optimal (\$/h)	3120.347

III.3.2. Test de Application (2): réseau électrique de 30 jeux de barres

Les réseaux électriques actuellement implantés sont caractérisés par leurs charges électriques qui sont nombreuses et distantes des centres de production d'énergie . on propose un réseau électrique de moyen taille , constitué de 30 jeux de barres, 6 générateur ,24charges et 40 lignes électriques.

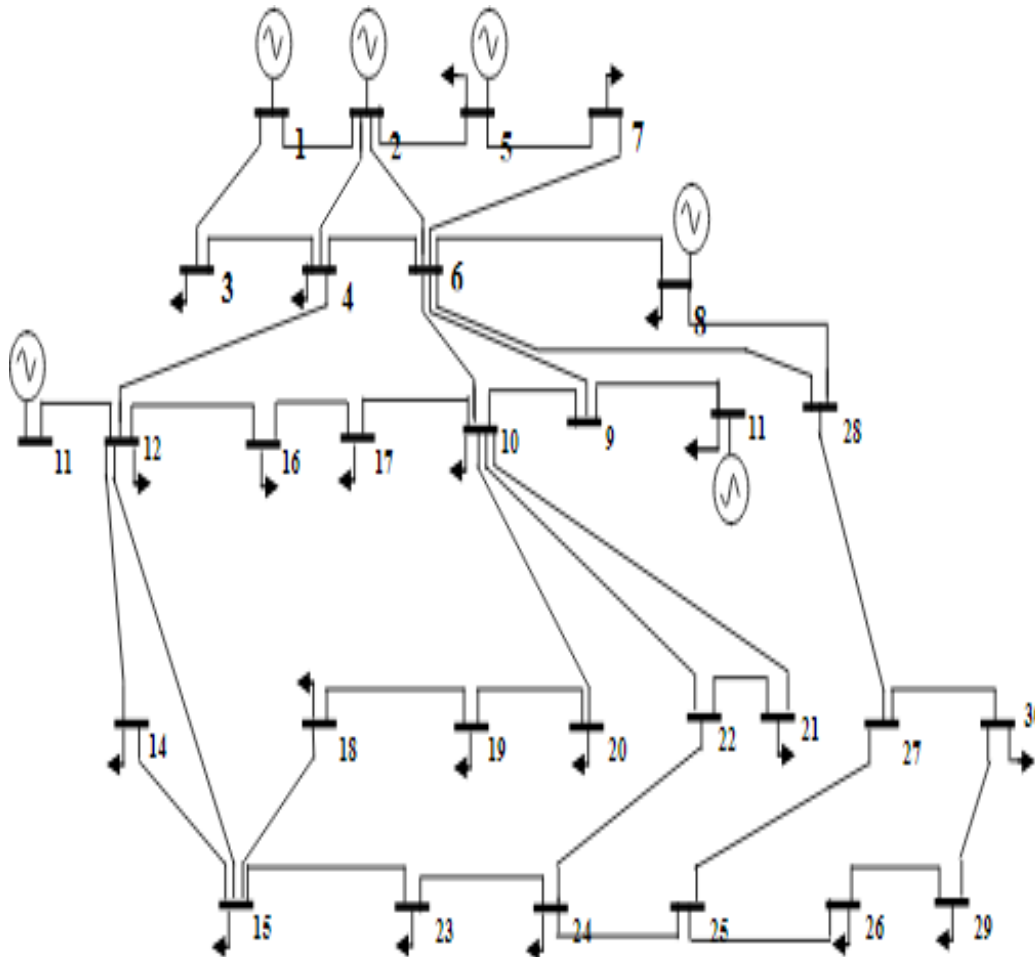


Figure III.9:Schéma d' un réseau de 30 jeux de barres.

La ligne le plus sensible c'est : 2,5

Le jeu de barre le plus sensible c'est : 9

La puissance demandée active, et réactive : 283,400 MW , et 136,200 MVAR

Tableau III.4: Résultats des tensions du réseau électrique –cas rupture de la ligne

Bus	Sans compensation	Avec compensation
	V(p.u)	V(p.u)
1	1.060	1.0600
2	1.020	1.0200
3	1.005	1.0052
4	0.982	0.9927
5	0.951	0.9516
6	0.975	0.9758
7	0.957	0.9575
8	0.965	0.9647
9	1.000	1.0002
10	0.970	0.9705
11	1.083	1.0831
12	1.011	1.0117
13	1.072	1.0724
14	0.991	0.9919
15	0.983	0.9834
16	0.986	0.9868
17	0.969	0.9698
18	0.965	0.9660
19	0.958	0.9589
20	0.960	0.9610
21	0.955	0.9573
22	0.957	0.9580
23	0.952	0.9637
24	0.934	0.9462
25	0.930	0.9447
26	0.900	0.9256
27	0.946	0.9530
28	0.971	0.9720
29	0.896	0.9121
30	0.854	0.8816

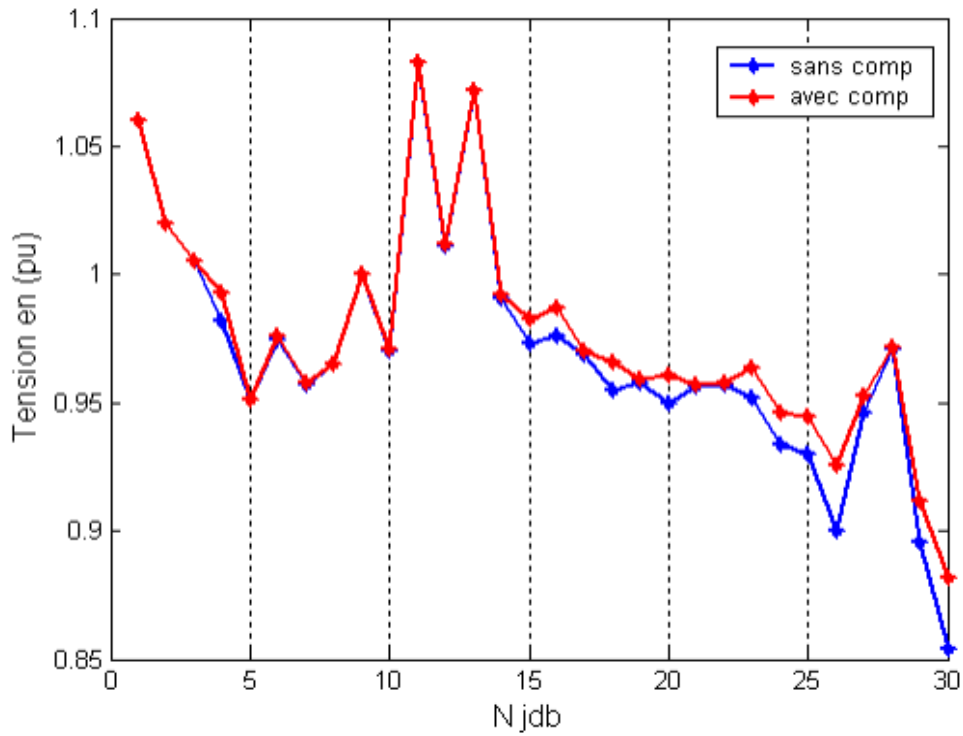


Figure III.10. Variation de la tension – cas rupture de la ligne

Tableau III.5: Résultats du réseau électrique de 30 jeux de barres Cas normale.

	Résultats	Cas normale
Sans Compensation	Tension 2 (pu)	1.020
	Tension 5 (pu)	0.951
	Tension 30 (pu)	0.854
	Pertes active 2,5 (MW)	3,460
	Pertes réactive 2,5 (MVAR)	10,463
	Puissance active générée (MW)	301,695
	Puissance réactive générée (MVAR)	145,385
	Perte active (MW)	19,703
	Pertes réactive (MVAR)	24,740
	Coût optimal (\$/h)	4899.136

Tableau III.6: Résultats du réseau électrique de 9 jeux de barres. Avec Compensation.

	Résultats	Cas normale
Avec Compensation	Tension 2 (pu)	1.0200
	Tension 5 (pu)	0.9516
	Tension 30 (pu)	0.8816
	Pertes active 2,5 (MW)	1,526
	Pertes réactive 2,5 (MVAR)	2,285
	Puissance active générée (MW)	292.622
	Puissance réactive générée (MVAR)	145.385
	Perte active (MW)	15,881
	Pertes réactive (MVAR)	9,033
	K	0.13
	X_{tcsc} (pu)	0.026
	α (degré)	118,875
	Coût optimal (\$/h)	4888.953

III.4. Interprétation

-Donc il y a une amélioration sur les indices de qualité de l'énergie, en particulier la tension.

Le jeu de barre le plus sensible est le jeu de barre '9' dans le réseau test 9 jeux de barres .Le jeu de barre le plus sensible est le '30' dans le réseau 30 jeux de barres.

Donc on remarque que :

- la tension est améliorée.
- Réduction faible des pertes de l'énergie active .
- amélioration de cout de production

-D'après ces résultats, nous remarquons que selon l'emplacement TCSC, le système compensée pouvant provoquée plus ou moins de pertes par rapport aux cas de non compensation Ces pertes sont réduites avec un emplacement optimale du TCSC, qui sont d'après nos résultats, relatif au ligne 2,5.

-En effet, pour un niveau de compensation de 13%, les pertes de puissance de transmission obtenus après l'injection de modèle TCSC sont réduits à 10%, pour les deux réseau test 9 JdB et 30JdB.

Conclusion générale

Conclusion générale

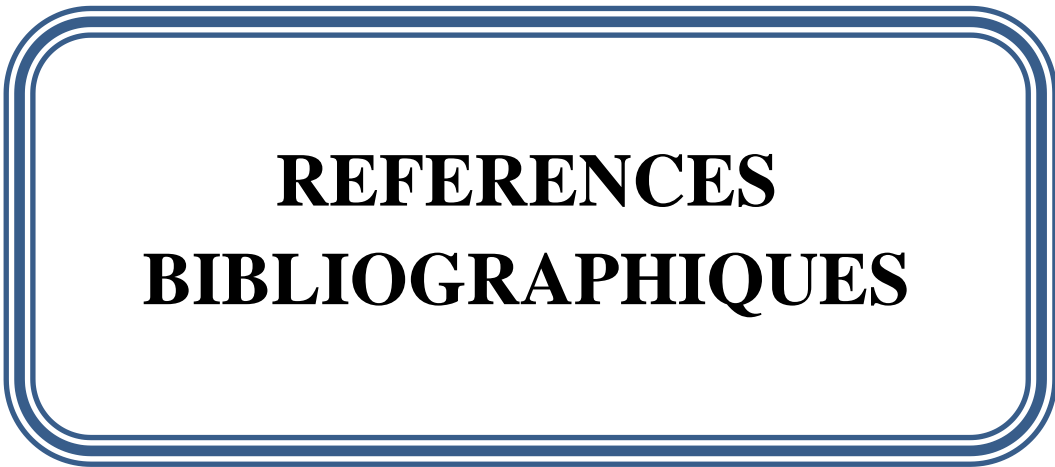
Nous avons traité le problème de la répartition des puissances réactives et le contrôle des tensions des réseaux d'énergie électrique en incorporant les dispositifs TCSC. Une étude sur les dispositifs FACTS a été réalisée et en plus une étude détaillée sur les dispositifs TCSC (définition, modélisation, incorporation dans le load flow).

Les résultats obtenus par notre programme développé dans ce travail sous l'environnement (MATLAB), montre clairement l'avantage d'intégrer des dispositifs, un contrôle flexible de l'énergie réactive est réalisé par un emplacement efficace du dispositif shunt (TCSC).

Dans notre travail, nous avons essayé d'illustrer l'utilité, l'efficacité et la rapidité de contrôle des tensions par l'insertion du contrôleur TCSC.

Les résultats obtenus montrent que le dispositif de contrôle TCSC peut jouer un rôle très important dans le domaine de la compensation des puissances réactives et le contrôle des tensions des différents nœuds.

Enfin si les systèmes TCSC sont surtout destinés au réseau de transport, des applications en réseau à moindre tension sont envisageables pour résoudre des problèmes liés notamment aux nouvelles contraintes nées de la production décentralisée.



REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] L. Boufenneche ; RESEAUX ELECTRIQUES ; Université des Frères Mentouri Constantine 1.
- [2] BELLAREDJ Amina et GAOUAR Youcef ; Conception et simulation d'une ligne aérienne de transport électrique 220KV ; Université AboubakrBelkaïd– Tlemcen – Faculté de TECHNOLOGIE ; 06/2016
- [3] CHERIF Med Foudhil et CHERIF Khayr Eddine « CALCUL DES PROTECTIONS D'UNE LIGNE DE TRANSPORT ELECTRIQUE HTB-220KV», Mémoire MASTER ACADEMIQUE, UNIVERSITE KASDI MERBAH – OUARGLA.
- [4] Guillaume RAMI « contrôle de tension auto adaptatif pour des productions décentralisées d'énergies connectées au réseau électrique de distribution» Thèse de doctorat INPG, 2006.
- [5] J.M. DELBARRE « Postes à HT et THT - Rôle et Structure », Techniques de l'Ingénieur, Traité Génie électrique, D 4570, 2004.
- [6] P-A CHAMOREL « Energie Electrique II : paramètres électriques des lignes » Ecole d'ingénieur LAUSANE (EIL), 1994.
- [7] Ph. CARRIVE « Réseaux de Distribution - Structure et Planification », Techniques de l'Ingénieur, Traité Génie électrique D 4210, 2006.
- [8] Oussama MAMMERI «DIFFERENTES METHODES DE CALCUL DE LA PUISSANCE REACTIVE DANS UNE NŒUD A CHARGE NON LINEAIRE EN PRESENCE D'UN SYSTEME DE COMPENSATION DE L'ENERGIE» mémoire de magister, université de Batna 2011/2012.
- [9] Abdelaziz Chaghi « documents pédagogiques et didactiques»université de Batna 2000/2001.
- [10] William D.Stevenson, "Element of power system analyse", Mc.Graw-Hill.
- [11] Haimour Rachida« Contrôle des Puissances Réactives et des Tensions par les Dispositifs FACTS dans un Réseau Electrique» mémoire de magister, Ecole Normale Supérieure de l'Enseignement Technologique d'Oran 2008-2009.
- [12] Larbi Boumediene, «Placement Des Dispositifs «D-FACTS» e contrôle des tensions dans un réseau de distribution », Thèse de doctorat es-science, l'USTO, 04 Janvier 2010.
- [15] MAGNOUN Youness «Placement optimal de dispositif FACTS dans un réseau de puissance» Mémoire d'ingénieur, Centre De Maroc,2014.
- [16] Hanane Kouara « Application d'un filtre actif série au contrôle de la tension d'un réseau basse tension » mémoire de magister, université de Batna 28/02/2006.

- [17] Stéphane GERBEX, «Meta heuristique Appliquées Au Placement Optimal De Dispositifs FACTS dans un Réseau Electrique», thèse PHD, Ecole poly technique de Lausanne, Lausanne 2003.
- [18] 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, Université Amar Telidji,2007.
- [13] K. R. Padiyar . "FACTS controllers in power transmission and distribution ", New age international publishers, 2007.
- [14] Abdelaàli ALIBI," Contrôle des Réseaux Electriques par les Systèmes FACTS: (Flexible AC Transmission Systems)" Magister de l'Université de Batna 2009.
- [19] : Théodore WILDI, Gilbert SYBILLE ' 'Electrotechnique'' 3^{eme} edition Edition de Boeck Université 2000.
- [20] : Gabriela, Glanzmann, " Flexible Alternating Current Transmission Systems ", EEH – Power Systems Laboratory, 14. January 2005.
- [23] : David C. Hamill, "A Classification Scheme for FACTS Controllers", School of Electronic Engineering, Information Technology and Mathematics University of Surrey, Guildford GU2 5XH, United Kingdom.
- [21] : Gyu-ha Choe, K Wallace, Min ho Park "An improved PWM techniques for ac-chopper" IEEE transaction on power electronic vol 4 NO 1 October 1989.
- [22] : Mohamed.E,Elhawari "Thyristor-Based FACTS Controllers and Electrical Transmission System ", A John Wiley & sons inc publication,
- [23] Derdouri Abdelghani "Compensation dynamique de la puissance réactive (Etude comparative SVC et TCSC) ", Mémoire MASTER ACADEMIQUE, Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued 2018/2019.
- [24] Stéphan Gerbex « Méta heuristiques Appliquées au placement optimal de dispositifs FACTS dans un réseau électrique» mémoire d'ingénieur , Ecole Polytechnique fédérale-Lausanne 2003.