

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Abderrahmane MIRA- BEJAIA



Faculté De Technologie

Département de Génie Électrique

Mémoire de Fin d'Étude

En vue de l'obtention du Diplôme Master II en Électrotechnique

Option : Réseaux Électriques

Thème

Traitement analytique du comportement des réseaux

Électriques en présence de la compensation

Série avancée

Réalisé par :

DJALLIL Massilia

Encadré par :

Dr. AOUZELLAG Narimen

Mr. OUALI Fateh

Année universitaire : 2022/2023

REMERCIEMENTS

*Nous tenons avant tout à exprimer notre gratitude envers **Dieu**, le Tout-Puissant, pour nous avoir accordé la santé, la patience et la volonté d'étudier, et de nous avoir permis de réaliser ce modeste travail.*

*Mes sincères et chaleureux remerciements, vont à ma promotrice Mme **AOUZELLAG Narimen**, Maître de conférences au département d'électrotechnique de l'Université Bejaia, pour son aide, son orientation judicieuse et sa disponibilité, aussi pour la confiance.*

*Également, je tiens à remercier mon Co-encadreur Mr **OUALI Fateh** pour son aide et ses conseils durant la réalisation de ce modeste mémoire.*

J'adresse mes remerciements aux membres du Jury de l'intérêt dont ils font preuve à notre égard pour lire ce mémoire et en assistant à notre soutenance.

Je remercie également tous les enseignants de l'institut d'électrotechnique de l'université de Bejaia qui ont participé à ma formation pendant tout le cycle universitaire.

DEDICACE

Avec tous mes sentiments de respect, avec l'expression de ma reconnaissance.

*Je dédie ma remise de diplôme et ma joie à ceux qui m'ont été une source d'inspiration et de volonté ; A ma mère **Hamani Messaouda**, et mon père **Djallil Taher** pour leurs encouragements et conseils durant la période de mes études ;*

*Je dédie également ce mémoire à mes chères sœurs **Assia et Célia** mon cher frère **Massinissa**, je vous souhaite un avenir radieux plein de réussite, Que Dieu vous protège.*

*Je le dédie à ma tante **Djallil Malika** pour lui dire que je n'oublierai jamais ce que tu as fait pour moi durant toutes ces longues années.*

*A ma chère grande mère **Hamani Tassadit** et a toute ma famille **Djallil et Hamani**.*

Une dédicace à tous mes ami(e)s, et pour tous ceux qui me connaissent.

Table des Matières

Sommaire.....	i
Liste des Figures	iii
Liste des Tableaux.....	v
Introduction Générale.....	1
<u>CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES RESEAUX ELECTRIQUES.....</u>	<u>3</u>
I.1 INTRODUCTION	3
I.2 NIVEAU DE TENSION	3
I.3 STRUCTURE GENERALE D’UN RESEAU ELECTRIQUE.....	4
I.3.1 RESEAUX DE TRANSPORT ET D’INTERCONNEXION	5
I.3.2 RESEAU DE REPARTITION	5
I.3.3 RESEAUX DE DISTRIBUTION	6
I.4 MODES DE DISTRIBUTION DES RESEAUX HTA DE PAR LE MONDE.....	7
I.5 ARCHITECTURE DES RESEAUX ELECTRIQUES	11
I.6 MODELISATION DES NŒUDS DU RESEAU ELECTRIQUE	12
I.7 CONSTRUCTION DE LA MATRICE ADMITTANCE D’UN RESEAU ELECTRIQUE.....	13
I.8 CALCUL L’ECOULEMENT DE PUISSANCE DANS LE RESEAU ELECTRIQUE	15
I.8.1 ÉQUATION DE CALCUL DE L’ECOULEMENT DE PUISSANCE	15
I.8.2 ALGORITHME DE LA METHODE DE NEWTON-RAPHSON.....	19
I.9 CONCLUSION.....	21
<u>CHAPITRE II : LES DISPOSITIFS FACTS</u>	<u>22</u>
II.1 INTRODUCTION	22
II.2 LES DIFFERENTS TYPES DES SYSTEMES FACTS	22
II.2.1 COMPENSATEURS SHUNTS	24
II.2.2 COMPENSATEURS SERIES	24
II.2.3 COMPENSATEURS HYBRIDES SERIE-SHUNT.....	25
II.3 ROLE DES DISPOSITIFS FACTS.....	27
II.4 AVANTAGES DES DISPOSITIFS FACTS.....	28
II.5 INCONVENIENTS DES DISPOSITIFS FACTS.....	29

II.6 COMPENSATEUR SERIE COMMANDEE PAR THYRISTOR (TCSC)	29
II.6.1 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE TCSC.....	31
II.6.2 AVANTAGES DE TCSC	32
II.6.3 INSERTION D'UN TCSC EN MILIEU DE LIGNE.....	32
II.6.4 ÉQUATION D'ÉCOULEMENT DE PUISSANCE DU DISPOSITIF TCSC	33
II.7 CONCLUSION	35
<u>CHAPITRE III : RESULTATS ET INTERPRETATIONS</u>	36
III.1 INTRODUCTION	36
III.2 TOPOLOGIE DU RESEAU ETUDIE	36
III.3 RESULTATS DE SIMULATION	37
III.3.1 RESEAU SANS TCSC	37
III.3.2 INSERTION DU TCSC DANS LE RESEAU	38
III.3.3 INSERTION DU TCSC DANS LE RESEAU SURCHARGE.....	41
III.4 CONCLUSION	43
Conclusion Générale	44
Références	45

Liste des Figures

Fig. I.1. Structure générale d'un réseau électrique	4
Fig. I.2. Schéma d'un réseau électrique	5
Fig. I.3. Réseau rural radial.....	7
Fig. I.4. Réseau en double dérivation	8
Fig. I.5. Coupure d'artère.....	8
Fig. I.6. Le fuseau	9
Fig. I.7. L'épi	10
Fig. I.8. La maille.....	10
Fig. I.9. Boucles ou pétales de marguerite.....	11
Fig. I.10. La grille	11
Fig. I.11. Architecture des réseaux électriques	12
Fig. I.12. Schéma d'un réseau électrique à (n) accès.....	13
Fig. I.13. Système électrique à deux jeux de barres	15
Fig. I.14. Organigramme du programme principal.....	21
Fig. II.1. Classification des dispositifs FACTS selon la catégorie	24
Fig. II.2. Schéma de raccordements parallèles (shunts)	24
Fig. II.3. Schéma de raccordement série	25
Fig. II.4. Schéma de raccordement série-shunt	25
Fig. II.5. Classification des dispositifs FACTS	26
Fig. II.6. Schéma de principe d'un TCSC	29
Fig. II.7. TCSC en mode de blocage	31
Fig. II.8. TCSC en mode de by-pass.....	31
Fig. II.9. TCSC en mode de conduction partielle,	32
Fig. II.10. TCSC inséré en milieu d'une ligne	33

Fig. III.1. Topologie du réseau électrique étudié	36
Fig. III.2. Caractéristique $X_{T\text{CSC}}$ en fonction de α	39
Fig. III.3. Pertes des puissances actives et réactives	42

Liste des Tableaux

Tab .I.1 Tableau des domaines de tension	3
Tab .I.2 Les niveaux essentiels de tension en Algérie (SONELGAZ).....	4
Tab .II.1 Rôle des différents dispositifs FACTS.....	27
Tab .II.2 Comparaison entre les dispositifs FACTS les plus utilisés [31]	28
Tab .III.1 Données des lignes	37
Tab .III.2 Données des nœuds.....	37
Tab .III.3 Amplitudes et déphasages des tensions aux nœuds.....	37
Tab .III.4 Puissances transitées et pertes de puissances dans les lignes	38
Tab .III.5 Paramètres du TCSC pour différents emplacements	39
Tab .III.6 Amplitudes et déphasages des tensions aux nœuds.....	39
Tab .III.7 Puissances transitées dans les lignes.....	40
Tab .III.8 Pertes des puissances actives et réactives.....	40
Tab .III.9 Pertes totales des puissances actives	40
Tab .III.10 Donnés de réseau surchargé.....	41
Tab .III.11 Paramètres des deux TCSC réseau en surcharge	42
Tab .III.12 Amplitudes et déphasages des tensions aux nœuds.....	42
Tab .III.13 Puissances transitées dans les lignes	42
Tab .III.14 Pertes totales des puissances actives	43

INTRODUCTION

GENERALE

Introduction Générale

Depuis le début du XXe siècle, le monde a connu un développement considérable dans les secteurs de l'industrie et de l'énergie, notamment grâce à la révolution industrielle européenne. Cette croissance a entraîné une demande mondiale croissante et rapide en électricité. Cependant, avec l'augmentation des interconnexions entre les réseaux électriques des pays, la fiabilité de ces réseaux varie, ce qui peut compromettre la sécurité globale du système. Ces interconnexions ont pour conséquence une augmentation du transit de puissance dans les lignes de transport, ce qui peut entraîner une dégradation du profil de tension et rendre le réseau plus vulnérable aux perturbations. Dans certains cas, ces perturbations peuvent entraîner des blackouts, c'est-à-dire des pannes de courant. Ces incidents se sont multipliés ces dernières années à travers le monde et face à ces défis, les grands distributeurs d'énergie recherchent des solutions pour améliorer la fiabilité, la stabilité et l'efficacité des réseaux électriques. Parmi les solutions envisagées, on trouve l'utilisation de dispositifs FACTS (Flexible AC Transmission System), tels que le TCSC (*Thyristor Controlled Series Compensator*), qui permettent de contrôler le transit de puissance et d'ajuster les paramètres électriques du réseau en temps réel. Les dispositifs FACTS offrent une flexibilité et une rapidité d'action supérieures aux systèmes mécaniques traditionnels, ce qui permet de mieux gérer les variations de charge, les perturbations et les contraintes de transmission. Ils servent notamment à améliorer le maintien de la tension, réduire les oscillations de puissance ou encore augmenter le transfert de puissance [01].

De plus, l'utilisation de technologies de communication avancées, de systèmes de gestion de l'énergie et de l'intégration des énergies renouvelables sont également des solutions envisagées pour renforcer les réseaux électriques et assurer une alimentation fiable et durable. C'est dans ce contexte que le projet FACTS a été lancé par un consortium de compagnies d'électricité américaines (EPRI) en 1988 FACTS [02]. Les systèmes FACTS est une technologie qui permet le contrôle et la régulation des flux électriques sur les lignes de transmission à haute tension. La modélisation de FACTS implique l'utilisation d'outils mathématiques pour simuler le comportement de divers composants du TCSC. Cela permet de comprendre comment ces composants interagissent entre eux et avec le réseau électrique, et d'optimiser leur configuration pour maximiser l'efficacité et la fiabilité. Les modèles utilisés pour la modélisation du TCSC peuvent varier en fonction de la complexité du système considéré et de son emplacement.

- ❖ Le premier chapitre présente les différentes structures et architectures d'un réseau électrique, et aborde le calcul de l'écoulement de puissance en utilisant la méthode itérative de Newton-Raphson.
- ❖ Le deuxième chapitre examine en détail les systèmes FACTS utilisés dans les réseaux électriques et prépare le terrain pour l'étude spécifique du TCSC et de son impact sur le calcul de l'écoulement de puissance.
- ❖ Le troisième chapitre présente les résultats de simulation obtenus à l'aide d'un programme MATLAB. Ces simulations permettent d'évaluer les paramètres d'un réseau test dans trois scénarios : sans TCSC, avec l'intégration du TCSC à différentes lignes du réseau, et enfin avec deux TCSC. À partir de ces résultats, des conclusions sont tirées concernant l'impact du TCSC sur le réseau.

Enfin, une conclusion générale récapitule les principaux résultats et clôture ce mémoire.

CHAPITRE I

Chapitre I : Généralités sur les réseaux électriques

I.1 Introduction

A l'origine, le réseau électrique a été construit et dimensionné pour transporter l'énergie électrique produite par les centres de production jusqu'aux centres de consommation les plus éloignés. Ainsi, les transits de puissances circulent de l'amont depuis les productions d'énergie électrique de type grosses centrales thermiques, hydraulique ou nucléaire, vers l'aval représenté par les consommateurs. Le système réseau électrique met donc en œuvre des milliers de kilomètres de ligne, des milliers de poste de transformation, ainsi que de nombreux organes de coupure et d'automates de réglage, etc. dimensionnés pour assurer le bon fonctionnement de la fourniture d'énergie électrique [03].

Les réseaux électriques sont décomposés en trois sous-systèmes : la production, le transport et la distribution. Chaque sous-système est relié par des postes chargés de l'adaptation des niveaux de tension [04]. Ces réseaux utilisent des courants alternatifs à basse fréquence (50 Hz ou 60 Hz).

Dans ce présent chapitre, nous allons présenter les différentes structures et architectures du réseau électrique. Le chapitre sera consacré aussi au calcul de l'écoulement de puissance dans le réseau électrique ainsi que les puissances transitées dans les lignes du réseau et ce en utilisant la méthode de Newton Raphson.

Le choix du niveau de tension et de la fréquence dans les réseaux électriques est influencé par des considérations techno-économiques, historiques et réglementaires propres à chaque pays [04].

I.2 Niveau de tension

La nouvelle norme en vigueur en Algérie (SONELGAZ) définit les niveaux de tension en courant alternatif et continu comme suit [11] :

Tab .I.1 Tableau des domaines de tension

Domaine de Tension		Valeur de la Tension Nominale (U_n en Volts)	
		Courant Alternatif	Courant Continu
Très Basse Tension (TBT)		$U_n \leq 50$	$U_n \leq 120$
Basse Tension (BT)	BTA	$50 < U_n \leq 500$	$120 < U_n \leq 750$
	BTB	$500 < U_n \leq 1000$	$750 < U_n \leq 1500$
Haute Tension (HT)	HTA	$1000 < U_n \leq 50000$	$1500 < U_n \leq 75000$
	HTB	$U_n > 50000$	$U_n > 75000$

Tab .I.2 Les niveaux essentiels de tension en Algérie (SONELGAZ).

HTB	60 kV – 90 kV – 150 kV – 220kV – 400 kV
HTA	5.5 kV – 10 kV – 15 kV – 20 kV – 30 kV
BTA	400v

I.3 Structure générale d'un réseau électrique

L'évolution de la production d'énergie électrique est tournée vers des réseaux interconnectés de lignes de transport dépendant des centrales de production aux centres de consommation, tels que les villes et les usines, dans de grands systèmes intégrés (comme présentée sur la figure I.1) [05]. La figure I.1 représente la structure générale d'un réseau électrique.

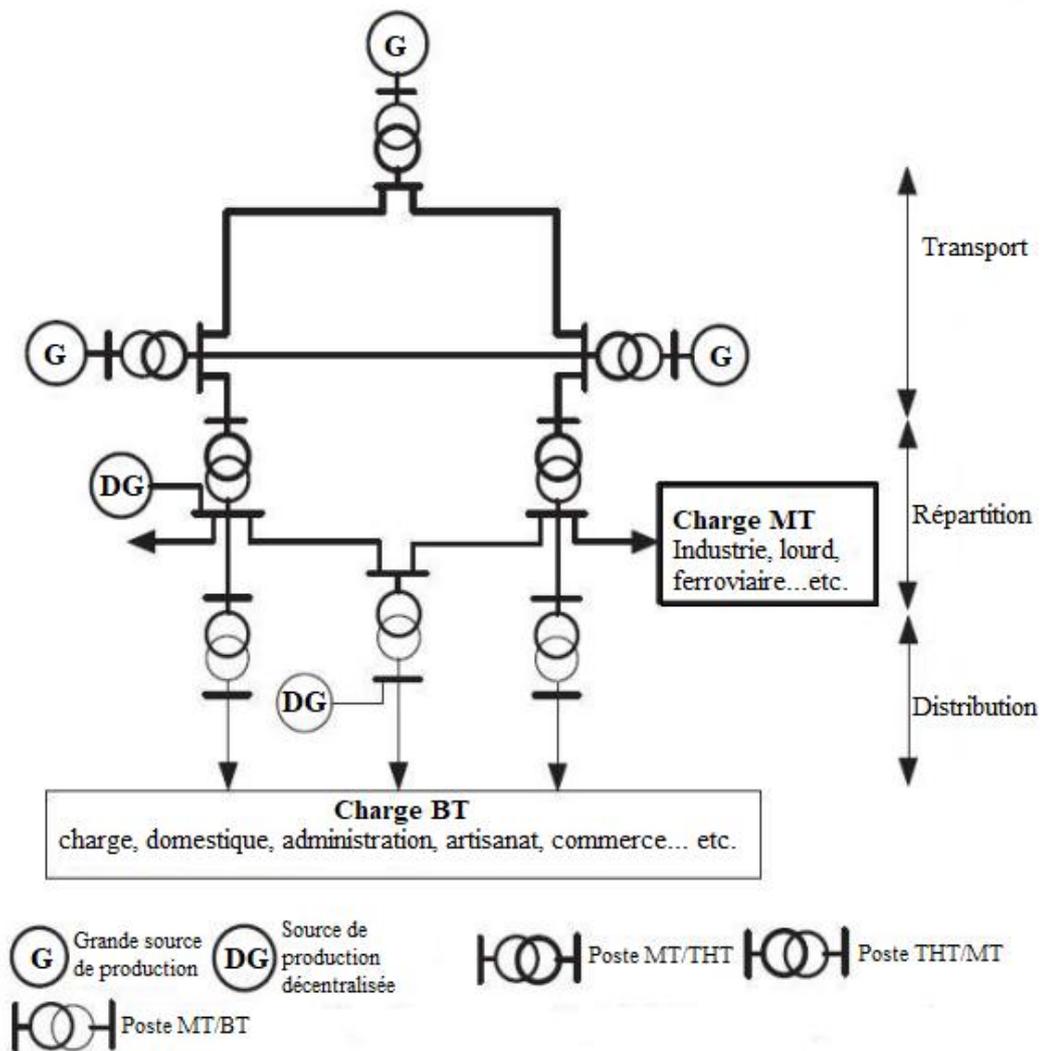


Fig. I.1. Structure générale d'un réseau électrique

Figure I.2 représente un schéma d'un réseau électrique [04].

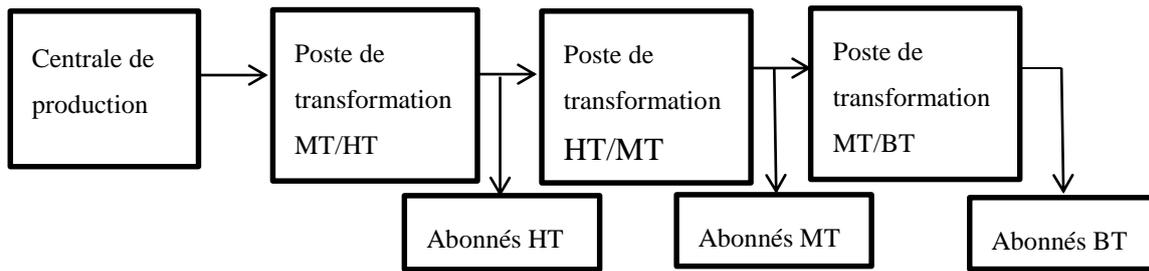


Fig. I.2. Schéma d'un réseau électrique

I.3.1 Réseaux de transport et d'interconnexion

Le réseau de transport et d'interconnexion est responsable du transport de l'énergie électrique depuis les centres de production éloignés vers les centres de consommation. Son rôle principal est de faciliter le transfert efficace de l'électricité sur de longues distances. Ce réseau est composé de lignes à haute tension qui permettent un transfert efficace de l'électricité sur de longues distances avec des pertes minimales, de transformateurs et d'équipements de contrôle et de protection qui assurent le transfert sûr et fiable de l'énergie électrique [06].

Les réseaux de transport et d'interconnexion ont principalement pour :

- Collecter l'électricité produite par les centrales importantes et de l'acheminer par grand flux vers les zones de consommation (fonction transport).
- Permettre une exploitation économique et sûre des moyens de production en assurant une compensation des différents aléas (fonction interconnexion) [07].
- La tension est 150 kV, 220 kV et dernièrement 400 kV.
- Neutre directement mis à la terre.
- Réseau maillé [08].

I.3.2 Réseau de répartition

Les réseaux de répartition, également appelés réseaux Haute Tension (HT), sont responsables de la distribution régionale de l'énergie provenant du réseau de transport. Ces réseaux sont principalement composés de lignes aériennes, plus de 60 MVA sur des distances allant jusqu'à plusieurs dizaines de kilomètres. Ils sont généralement conçus selon une structure en boucle ouverte, bien que certaines sections puissent être en boucle fermée. Certains postes de transformation marquent la fin du réseau de répartition et agissent comme des points d'extrémité en forme d'antenne [09].

En zone urbaine dense, il est courant que les réseaux de répartition utilisent des câbles souterrains sur des distances relativement courtes, généralement inférieures à quelques kilomètres. Ces réseaux souterrains permettent de fournir l'électricité à deux types de destinataires principaux. D'une part, ils alimentent les réseaux de distribution à travers des postes de transformation HT/MT. D'autre part, ils fournissent également de l'énergie aux utilisateurs industriels situés dans ces zones urbaines denses. [07].

- La tension est 90 kV ou 63 kV.
- Neutre à la terre par réactance ou transformateur de point neutre.
 - Limitation courant neutre à 1500 A pour les 90 kV.
 - Limitation courant neutre à 1000 A pour les 63 kV.
- Réseaux en boucle ouverte ou fermée.

I.3.3 Réseaux de distribution

Les réseaux de distribution électrique acheminent l'énergie électrique depuis les postes de transformation HTB/HTA à des tensions inférieures à 63 kV. Les lignes ou câbles de moyenne tension sont utilisés pour transporter l'énergie électrique vers les postes de répartition HTA/HTA. Le poste de transformation HTA/BTA constitue le dernier maillon de la chaîne de distribution et concerne tous les usages du courant électrique [07].

a. Réseaux de distribution à moyenne tension

- 10 et 30 kV le plus répandu.
- Neutre à la terre par une résistance.
- Limitation du courant neutre à 300 A pour les réseaux aériens.
- Limitation du courant neutre à 1000 A pour les réseaux souterrains.
- Réseaux souterrains en boucle ouverte [07].

b. Réseaux de distribution à basse tension

- BTA (230 / 400 V) ;
- Neutre directement à la terre ;
- Réseaux de type radial, maillés et bouclés [07].

I.4 Modes de distribution des réseaux HTA de par le monde

L'architecture des réseaux de distribution ainsi que le placement des appareils de coupure dépend de plusieurs paramètres technico-économiques comme le type de zone (rurale ou urbaine), la qualité de service désirée (temps moyen de coupure par client) et donc l'investissement que l'on est prêt à engager.

a. Les réseaux ruraux

En milieu rural, on trouve des architectures arborescentes bouclables mais exploitées en radial. Les boucles peuvent se situer entre les postes HTB/HTA ou entre départs voisins (du même poste source). La Figure I.3 illustre la structure radiale [10].

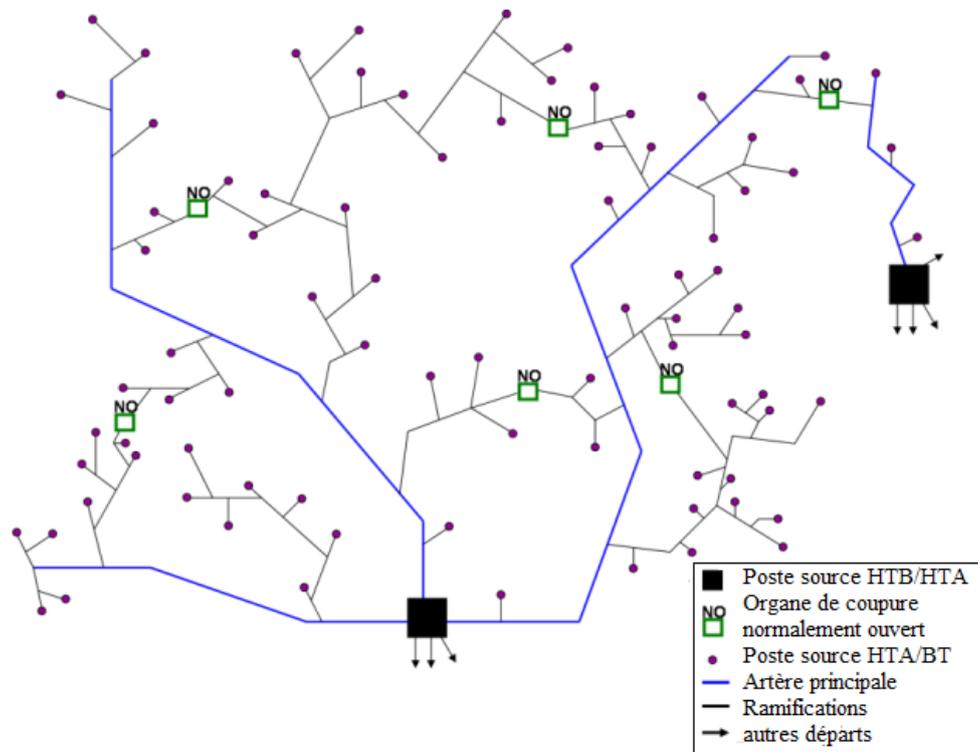


Fig. I.3. Réseau rural radial

b. Les réseaux urbains : réseaux en double dérivation simple

Le réseau radial en antenne est doublé à partir du jeu de barre du poste source HTB/HTA. Ainsi chaque transformateur HTA/BTA est connecté à un câble normal et à un câble de secours par le biais de dispositifs inverseurs comme le montre la Figure I.4. C'est une structure difficilement exploitable manuellement mais facilement automatisable malgré les coûts [10].

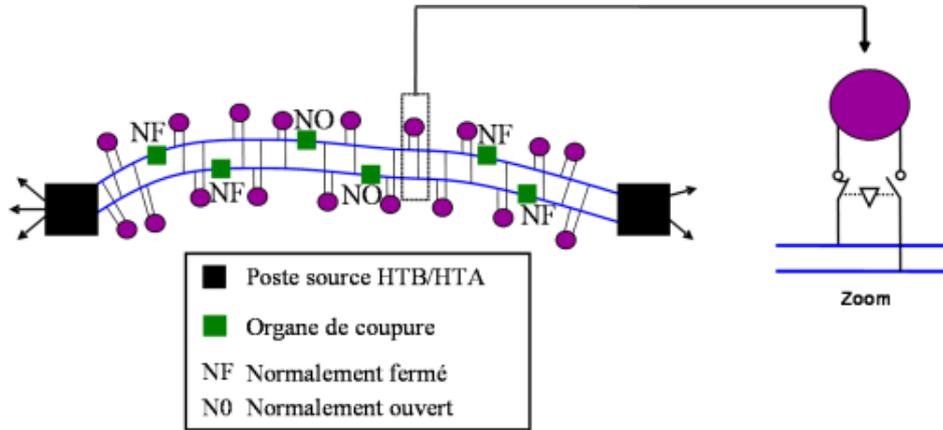


Fig. I.4. Réseau en double dérivation

c. Les réseaux urbains : Structures en coupure d'artère

Dans cette architecture, un câble part d'un poste source HTB/HTA, passe successivement par les postes HTA/BTA à desservir avant de rejoindre soit un autre poste source HTB/HTA, soit un départ différent du même poste source HTB/HTA, soit un câble secours [10].

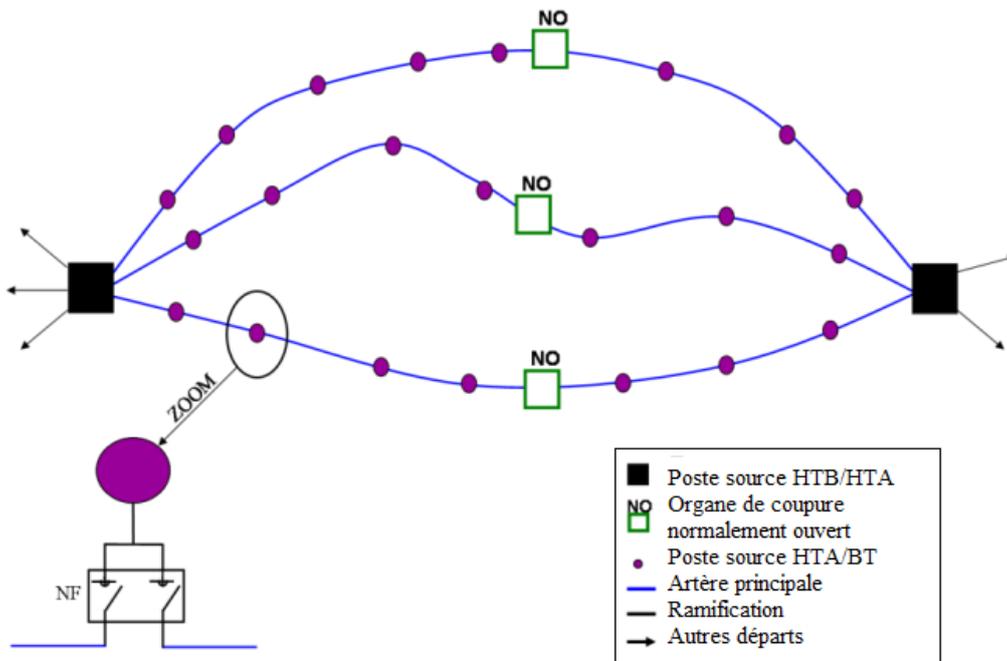


Fig. I.5. Coupure d'artère

La coupure d'artère présente plusieurs variantes que nous allons détailler ci-dessous :

○ *Les réseaux urbains : le fuseau*

Dans le cas du fuseau (Figure I.6), tous les câbles issus d'un même poste convergent vers un même point appelé point de réflexion (PR sur la figure). Ce point pourrait constituer le lieu privilégié pour la création future d'un poste source HTB/HTA. Lorsqu'il s'agit d'un point de réflexion, alors il peut être intéressant de mettre un câble de secours. Dans ce cas, la structure est alors dite à secours spécialisé (un câble secours pour, au maximum six câbles « travail »). Cette structure est simple et son exploitation facile. Par ailleurs, la qualité de fourniture est bonne [10].

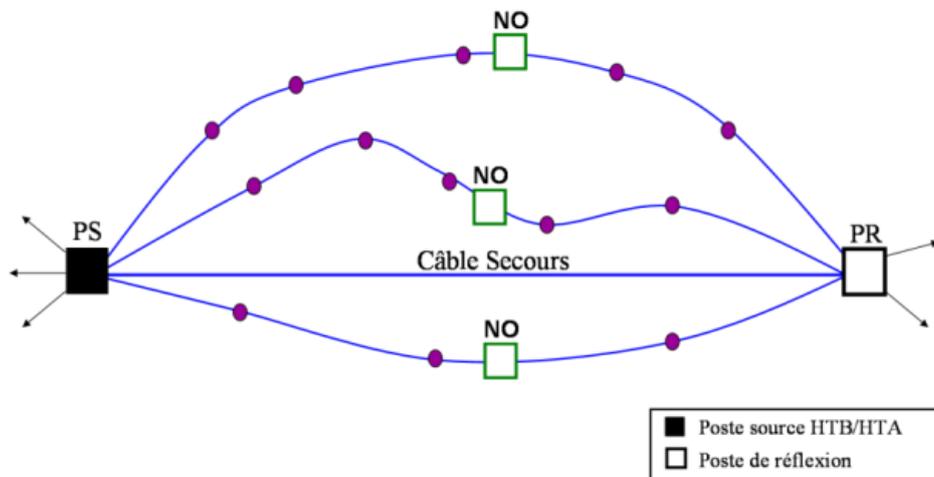


Fig. I.6. Le fuseau

○ *Les réseaux urbains : l'épi*

Il s'agit d'une variante du fuseau où il y a plusieurs points de réflexion répartis sur le câble secours. Il n'y a pas plus de six câbles travail pour un câble secours. Les câbles de travail partent du poste source et rejoignent un câble de secours qui suit une certaine direction. Le développement autour d'un même poste est économique et plus souple que le fuseau. En effet, cette structure tient compte de la réelle répartition des charges. La longueur des câbles de travail dépend de la répartition des charges alors que pour le fuseau, il faut tirer à chaque fois un câble depuis le poste source jusqu'au point de réflexion. La longueur des câbles est bien adaptée à la répartition des charges. On peut pallier une double indisponibilité et enfin ce réseau peut évoluer vers le fuseau [10].

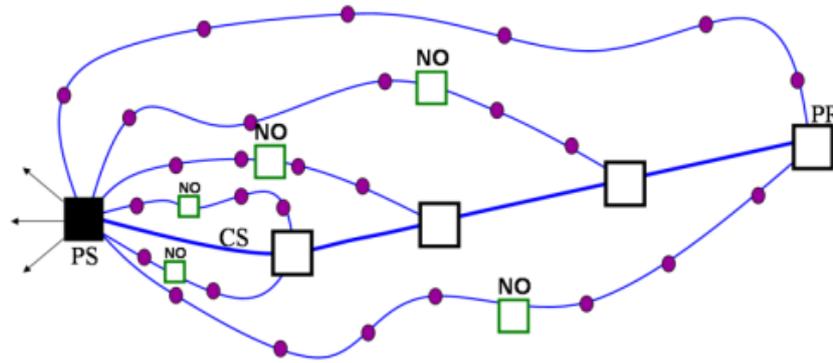


Fig. I.7. L'épi

○ *Les réseaux urbains : la maille*

Cette structure est composée de boucles alimentées directement par les sources HTB/HTA ou via des postes têtes de boucle reliée aux sources HTB/HTA par des conducteurs de section importante appelés câbles de structure. Les postes têtes de boucle ont la même structure que les postes source sauf qu'il n'y a pas de transformateur HTB/HTA. Des liaisons inter-boucles permettent le report de charge d'une boucle sur l'autre en cas de perte d'un câble de structure [10].

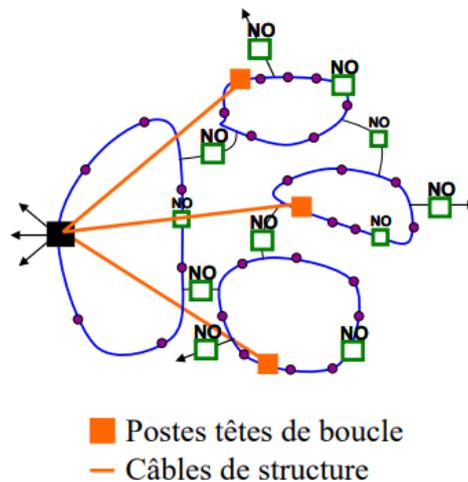


Fig. I.8. La maille

○ *Les réseaux urbains : boucles ou pétales de marguerite*

Cette structure est pratique lorsque le centre de gravité des charges est excentré par rapport au poste source. Dans ce cas, on alimente un poste nommé poste tête de pétales par un ou deux départs issus du poste source HTB/HTA. Par ailleurs, la puissance des câbles est limitée à la puissance maximale divisée par deux pour que ceux-ci puissent tenir en cas de défaut. Contrairement à la maille, il n'y a plus de liaisons entre les boucles [10].

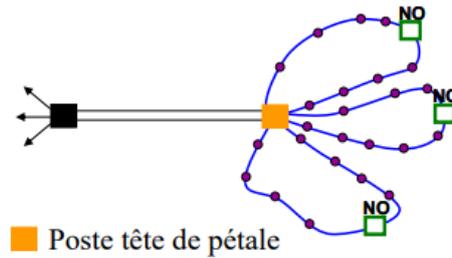


Fig. I.9. Boucles ou pétales de marguerite

- *Les réseaux urbains : structure maillée*

La structure maillée est composée de conducteurs intra postes et inter postes. Les conducteurs intra poste relient deux postes sources HTB/HTA. Les conducteurs inter poste relient des conducteurs intra poste entre eux. Des organes de coupure normalement ouverts sont répartis dans la structure maillée afin de permettre une exploitation radiale [08].

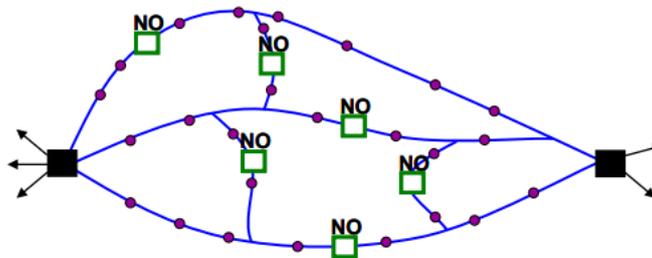


Fig. I.10. La grille

I.5 Architecture des réseaux électriques

L'énergie électrique produite est directement injectée sur le réseau de transport maillé à très haute tension pour être transportée sur de grandes distances avec un minimum de pertes. Elle "descend" ensuite sur les réseaux de répartition, puis ceux de distribution d'où elle est distribuée aux gros consommateurs et aux réseaux de distribution à basse tension [12].

Les réseaux de transport d'énergie et d'interconnexion sont liés entre eux sous forme de boucles, réalisant ainsi une structure semblable aux mailles d'un filet (figure I.11.a).

Les réseaux de répartition qu'ils alimentent ont fréquemment une structure bouclée (figure I.11.b) et peuvent alors être exploités soit en boucle fermée (le réseau est dit bouclé) soit en boucle ouverte (le réseau est alors dit débouclé). Certaines alimentations se font aussi en antenne (poste G, figure I.11.b) ou encore en piquage en prélevant une partie de l'énergie circulant sur une ligne reliant deux postes (poste H, figure I.11.b) [06].

Ces réseaux de répartition à caractère régional fournissent l'énergie aux réseaux de distribution à moyenne tension assurant l'alimentation d'un grand nombre d'utilisateurs, soit directement, soit après transformation en basse tension. Leur configuration et leur mode d'exploitation sont variables. On peut trouver, selon les pays, des réseaux maillés exploités débouclés, des réseaux à structure radiale (figure I.11.d) ou des réseaux à structure arborescente (figure I.11.c) [06].

D'une façon générale, ce sont les caractéristiques des sources de production, les besoins des utilisateurs et l'expérience d'exploitation qui, ajoutés à des considérations économiques, conduisent à choisir la structure topologique des réseaux [06].

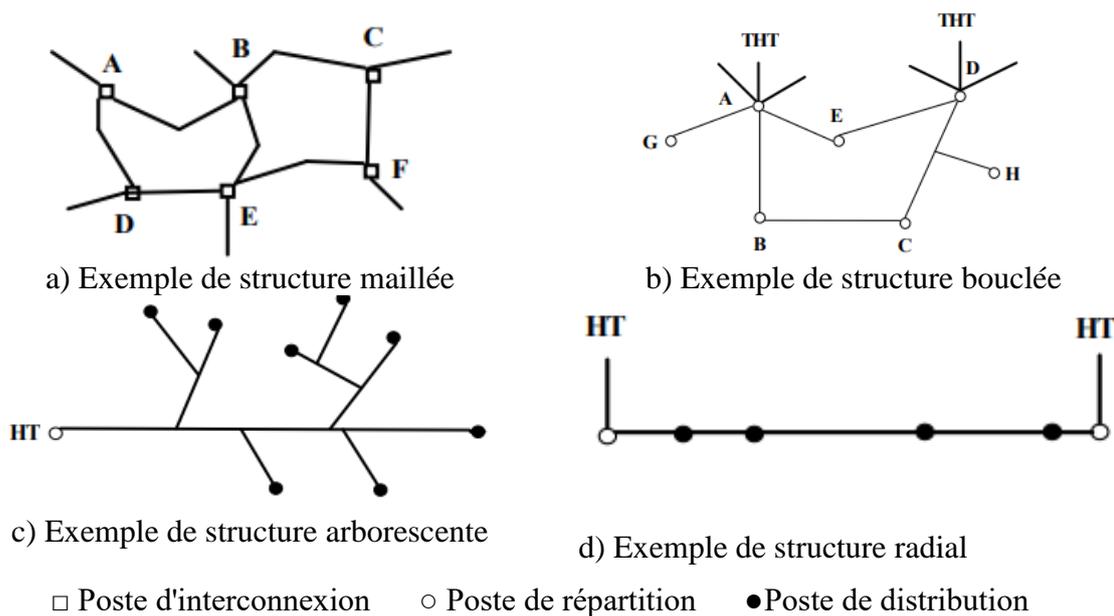


Fig. I.11. Architecture des réseaux électriques

I.6 Modélisation des nœuds du réseau électrique

Chaque nœud d'un réseau est caractérisé par quatre variables, P_i , Q_i , V_i et δ_i . Si on connaît deux des quatre variables on pourra 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 [13] [14]:

a. Nœud générateur (P , V)

C'est un nœud connecté directement avec un générateur ou une source d'énergie réactive. La puissance active et le module de la tension sont spécifiés et il reste à déterminer la puissance réactive Q et l'angle de phase. La production de l'énergie réactive est limitée par des valeurs inférieures et supérieures Q_{Gmin} et Q_{Gmax} respectivement. Si l'une des deux limites

est atteinte, la valeur se fixe à cette limite et la tension se libère, le nœud devient alors un nœud charge (P, Q).

b. Nœud charge (P, Q)

C'est un nœud connecté directement avec la charge, il ne possède aucune source d'énergie. Les puissances active et réactive sont spécifiées et il reste à déterminer l'amplitude de la tension $|V|$ et l'angle de phase qui varient avec la demande en énergie électrique.

c. Nœud bilan ($|V| \delta$)

C'est un nœud connecté avec un générateur relativement puissant ; il est considéré dans le calcul d'écoulement de puissance afin de compenser les pertes actives et assurer l'égalité entre la demande et la génération de la puissance active. Dans un nœud bilan, l'amplitude de la tension et l'angle de phase sont spécifiés et il reste à déterminer P et Q.

I.7 Construction de la matrice admittance d'un réseau électrique

Soit un réseau électrique à (n) accès indépendants, montré sur la figure I.12 [13].

On considère un accès (i) parmi les (n) accès différents de celui de référence.

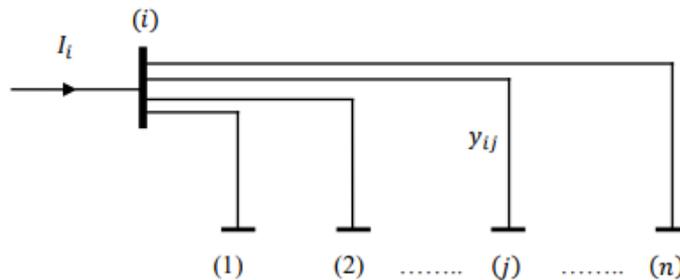


Fig. I.12. Schéma d'un réseau électrique à (n) accès

En appliquant la loi des nœuds sur l'accès (i) on aura :

$$I_i = \sum_{j=1}^n I_{ij} \tag{I.1}$$

I_i : Courant injecté à l'accès (i) ;

I_{ij} : Courant circulant entre l'accès (i) et l'accès (j) à travers la branche ($i - j$).

On peut écrire :

$$I_{ij} = (V_i - V_j) \cdot y_{ij} \tag{I.2}$$

Telle que :

V_i et V_j : Tensions aux accès (i) et (j) respectivement ;

y_{ij} : Admittance propre de la branche $(i - j)$.

En remplaçant l'équation (I.2) dans (I.1) et en considérant l'accès de référence, on aura :

$$I_i = \sum_{j=0}^n y_{ij} \cdot (V_i - V_j) = y_{i0}(V_i - V_0) + y_{i1}(V_i - V_1) + y_{i2}(V_i - V_2) + \dots + y_{in}(V_i - V_n) \quad (I.3)$$

Telle que : $V_0 = 0$ et $i=1, n$

y_{i0} : La somme des admittances transversales des lignes reliées à l'accès (i) .

Alors :

$$I_i = V_i \cdot [y_{i0} + \sum_{j=1}^n y_{ij}] - y_{i1} \cdot V_1 - y_{i2} \cdot V_2 - y_{i3} \cdot V_3 - \dots - y_{in} \cdot V_n \quad (I.4)$$

Pour $i = 1, n$

Sous forme matricielle pour les n accès on aura :

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_i \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{i1} & Y_{i2} & \dots & Y_{in} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_i \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \quad (I.5)$$

$$[I] = [Y_{bus}] \cdot [V] \quad (I.6)$$

Avec :

$$\begin{cases} Y_{ii} = y_{i0} + \sum_{j=1}^n y_{ij} \\ Y_{ij} = -y_{ij} \end{cases} \quad (I.7)$$

$[Y_{bus}]$: Matrice nodale des admittances d'ordre $(n \times n)$.

Pour déterminer les éléments diagonaux (Y_{ii}) de la matrice admittance nodale $[Y_{bus}]$ à l'accès (i) , on doit faire la somme de toutes les admittances des branches reliées à cet accès y compris les admittances de la connexion à l'accès de référence si elles existent.

Pour calculer les éléments hors diagonale de la matrice admittance $[Y_{bus}]$, on prend directement l'admittance propre de l'élément qui relie les accès (i) et (j) et on inverse son signe.

I.8 Calcul l'écoulement de puissance dans le réseau électrique

L'écoulement de puissance est un élément essentiel dans l'analyse des réseaux électriques, car il permet de déterminer les amplitudes et les angles de phase des tensions aux différents points d'accès, ainsi que les puissances actives et réactives qui circulent entre ces points. Résoudre ce problème revient à résoudre un système de $(2n)$ d'équations algébriques non linéaires à (n) accès.

Plusieurs méthodes existent pour la résolution de ce type de calcul, mais les plus utilisées restent les méthodes de Gauss-Seidel et Newton-Raphson [15] [16]. La méthode de Newton-Raphson, qui présente une convergence rapide par rapport aux autres méthodes, est largement utilisée pour le calcul de l'écoulement de puissance. Dans notre travail on utilisera la méthode de Newton-Raphson qui sera définie par la suite.

I.8.1 Équation de calcul de l'écoulement de puissance

Soit le système a deux jeux de barres "JB" représenté sur la figure I.13 [17] [18].

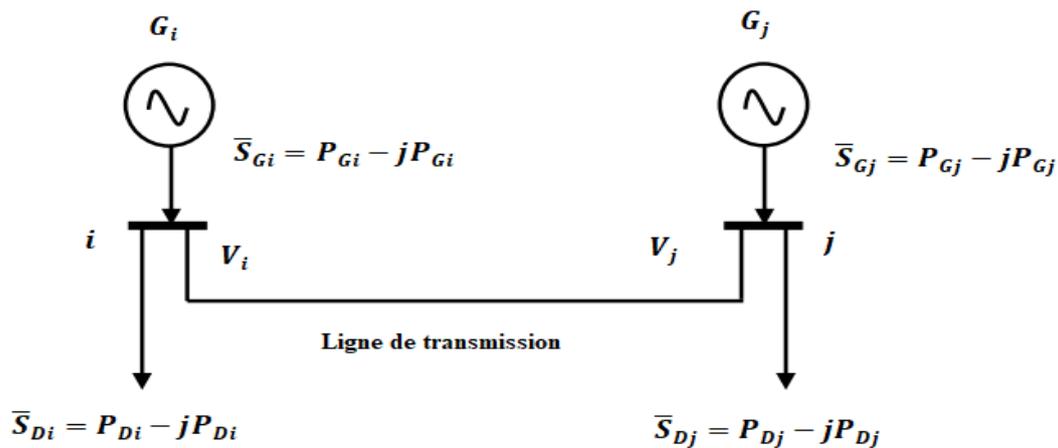


Fig. I.13. Système électrique à deux jeux de barres

On combine les puissances générées et demandées à chaque barre pour obtenir une puissance nette S , définie comme la différence entre la production et la consommation de puissance du jeu de barre en question. On note que :

P_G, Q_G : Puissances active et réactive respectivement générées.

P_D, Q_D : Puissances active et réactive respectivement demandées.

P_i, Q_i : Puissances active et réactive respectivement nettes.

$$\bar{S}_i = (P_{Gi} - P_{Di}) + j(Q_{Gi} - Q_{Di}) \quad (\text{I.8})$$

$$\begin{cases} \bar{P}_i = P_{Gi} - P_{Di} \\ \bar{Q}_i = Q_{Gi} - Q_{Di} \end{cases} \quad (\text{I.9})$$

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

$$\bar{S}_i^* = P_{Gi} - jQ_{Di} = \bar{V}_i^* \cdot \bar{I}_i \quad (\text{I.10})$$

Pour $i = 1$

Sachant que :

V_i, V_j : Modules des tensions aux nœuds i et j ;

δ_i, δ_j : Phases des tensions aux nœuds i et j ;

Y_{ij}, θ_{ij} : Module et phase de l'admittance reliant les nœuds i et j .

Alors :

$$\bar{S}_i^* = \bar{V}_i \cdot \sum_{j=1}^n \bar{Y}_{ij} \bar{V}_j \quad (\text{I.11})$$

On coordonnées polaires

$$\bar{V}_i = |V_i| e^{j\delta_i} \quad , \quad \bar{V}_j = |V_j| e^{j\delta_j} \quad , \quad \bar{Y}_{ij} = |Y_{ij}| e^{j\theta_{ij}}$$

$$\bar{S}_i^* = P_{Gi} - jQ_{Di} \quad (\text{I.12})$$

$$\bar{S}_i^* = \bar{V}_i^* \cdot \sum_{j=1}^n \bar{Y}_{ij} \bar{V}_j \quad (\text{I.13})$$

$$\bar{S}_i^* = |V_i| \cdot \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| \cdot |V_j| \cdot e^{j(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j)} \quad (\text{I.14})$$

D'où

$$P_i = |V_i| \cdot \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| \cdot |V_j| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (\text{I.15})$$

$$Q_i = -|V_i| \cdot \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| \cdot |V_j| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (\text{I.16})$$

Les relations (I.15), (I.16) représentent les équations de calcul de l'écoulement de puissance.

En dérivant les équations de puissance active réactive par rapport à $\delta \text{et} |V|$ et on aura [17]:

A. *Eléments de J_1*

- Eléments de la diagonale

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j \neq i} |V_i| \cdot |V_j| \cdot |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (\text{I.17})$$

- Eléments hors de la diagonale

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = -|V_i| \cdot |V_j| \cdot |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (\text{I.18})$$

 B. *Eléments de J_2*

- Eléments de la diagonale

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = 2|V_i| \cdot |Y_{ii}| \cdot \cos(\theta_{ii}) + \sum_{j \neq i} |V_j| \cdot |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (\text{I.19})$$

- Eléments hors de la diagonale

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_j|} = |V_i| \cdot |Y_{ij}| \cdot \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (\text{I.20})$$

 C. *Eléments de J_3*

- Eléments de la diagonale

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j \neq i} |V_i| \cdot |V_j| \cdot |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (\text{I.21})$$

- Eléments hors de la diagonale

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} = -|V_i| \cdot |V_j| \cdot |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (\text{I.22})$$

 D. *Eléments de J_4*

- Eléments de la diagonale

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = -2|V_i| \cdot |Y_{ii}| \cdot \sin(\theta_{ii}) - \sum_{j \neq i} |V_j| \cdot |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (\text{I.23})$$

➤ Eléments hors de la diagonale

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} = -|V_i| \cdot |V_j| \cdot |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (\text{I.24})$$

$$[J] = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \quad (\text{I.25})$$

Après développement de (I.15) et (I.16) en série de TAYLOR autour de la première approximation et l'élimination des éléments d'ordre supérieur.

On peut écrire le système comme suit [17]:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta P_n^{(k)} \\ \Delta Q_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta Q_n^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\begin{array}{ccc} \left(\frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} \right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial P_2}{\partial \delta_n} \right)^{(k)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{\partial P_n}{\partial \delta_2} \right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial P_n}{\partial \delta_n} \right)^{(k)} \end{array} \right) & \left(\begin{array}{ccc} \left(\frac{\partial P_2}{\partial |V_2|} \right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial P_2}{\partial |V_n|} \right)^{(k)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{\partial P_n}{\partial |V_2|} \right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial P_n}{\partial |V_n|} \right)^{(k)} \end{array} \right) \\ \left(\begin{array}{ccc} \left(\frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} \right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial Q_2}{\partial \delta_n} \right)^{(k)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{\partial Q_n}{\partial \delta_2} \right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial Q_n}{\partial \delta_n} \right)^{(k)} \end{array} \right) & \left(\begin{array}{ccc} \left(\frac{\partial Q_2}{\partial |V_2|} \right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial Q_2}{\partial |V_n|} \right)^{(k)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{\partial Q_n}{\partial |V_2|} \right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial Q_n}{\partial |V_n|} \right)^{(k)} \end{array} \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta(\delta_2)^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta(\delta_n)^{(k)} \\ \Delta(V_2)^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta(V_n)^{(k)} \end{bmatrix} \quad (\text{I.26})$$

$$\begin{bmatrix} \Delta P^{(k)} \\ \Delta Q^{(k)} \end{bmatrix} = [J^{(k)}] * \begin{bmatrix} \Delta \delta^{(k)} \\ \Delta |V|^{(k)} \end{bmatrix} \quad (\text{I.27})$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta^{(k)} \\ \Delta |V|^{(k)} \end{bmatrix} = [J^{(k)}]^{-1} * \begin{bmatrix} \Delta P^{(k)} \\ \Delta Q^{(k)} \end{bmatrix} \quad (\text{I.28})$$

Tel que :

Les $\Delta \delta^{(k)}$ et $\Delta |V|^{(k)}$ sont les vecteurs de variation des tensions et de phases.

Les $\Delta P^{(k)}$ et $\Delta Q^{(k)}$ sont les vecteurs des puissances actives et réactives.

L'exposant (k) renvoie à l'itération à laquelle le calcul est fait tandis que [J] est la matrice Jacobien.

Il en résulte que les vecteurs tensions et phases a l'itération (k+1) peuvent être déduits selon les formules :

$$\Delta \delta^{(k+1)} = \Delta \delta^{(k)} + \delta^{(k)} \quad (\text{I.29})$$

$$\Delta |V|^{(k+1)} = \Delta |V|^{(k)} + |V|^k \quad (\text{I.30})$$

Remplaçant (I.29) et (I.30) dans (I.28), on aura :

$$\begin{bmatrix} \delta^{(k+1)} \\ |V|^{(k+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta^{(k)} \\ |V|^{(k)} \end{bmatrix} + [J^{(k)}]^{-1} * \begin{bmatrix} \Delta P^{(k)} \\ \Delta Q^{(k)} \end{bmatrix} \quad (\text{I.31})$$

A chaque itération, on calcul les termes de l'équation (I.28) et on vérifie si la convergence a été atteinte. Si ce n'est pas le cas, le résultat ainsi trouvé nous permet de déterminer les nouvelles valeurs des amplitudes et des phases des tensions grâce aux équations (I.29) et (I.30).

I.8.2 Algorithme de la méthode de Newton-Raphson

La figure I.14 représente l'organigramme du programme principal utilisé pour effectuer le calcul de l'écoulement de puissance à l'aide de la méthode de Newton-Raphson.

Tel que les valeurs limites de la puissance réactive pour :

Les nœuds générateurs sont : $Q_{\min} = -5$ et $Q_{\max} = 5$.

Les nœuds charges sont : $Q_{\min} = -3$ et $Q_{\max} = 3$.

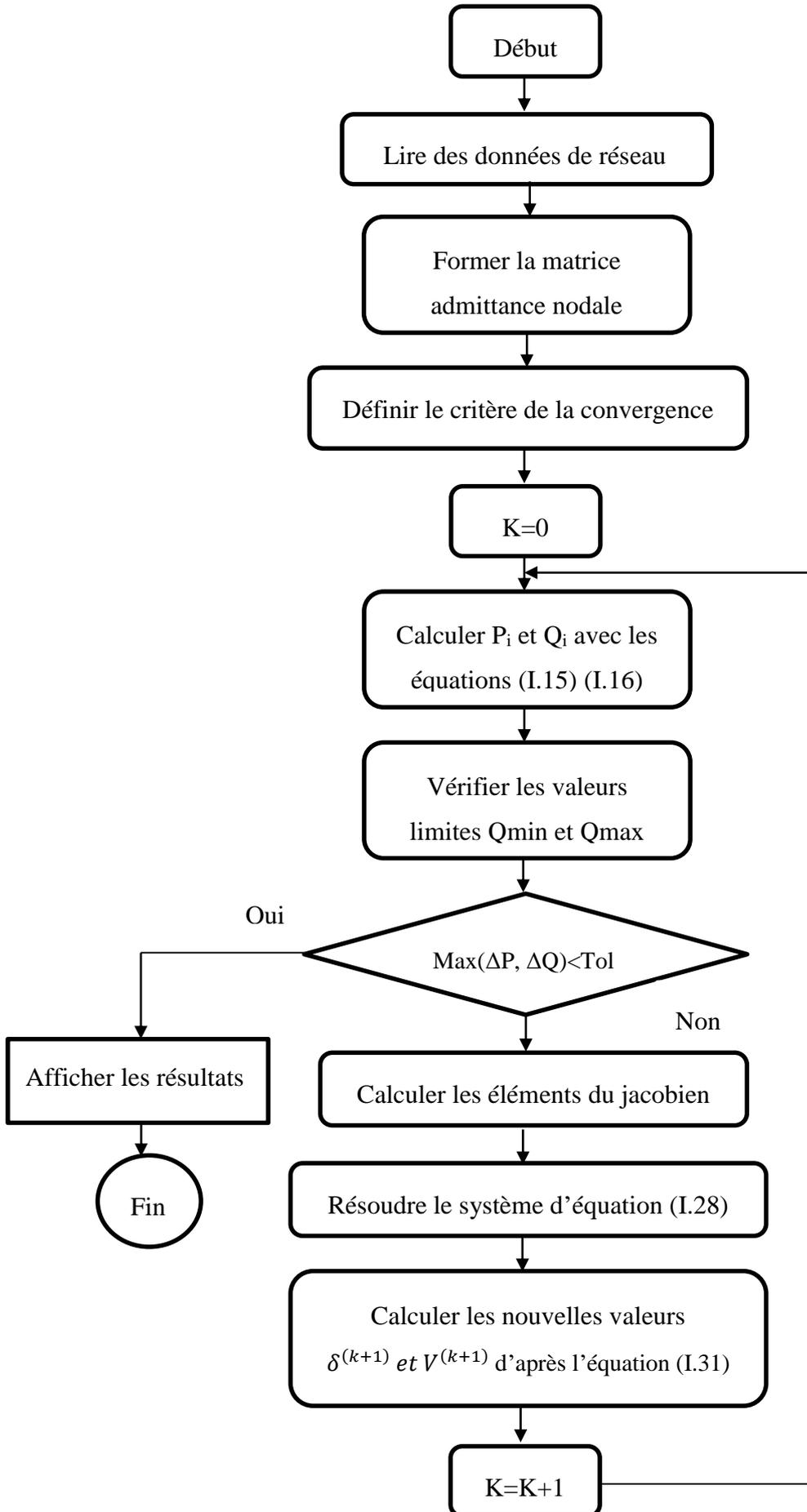


Fig. I.14. Organigramme du programme principal

I.9 Conclusion

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons introduit les concepts et les différentes structures des réseaux électriques. Nous avons discuté des caractéristiques et des architectures des réseaux de transport, de distribution, et de répartition

Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous avons abordé le calcul de la matrice d'admittance du réseau électrique, en considérant un réseau avec un certain nombre d'accès indépendants. L'objectif principal de cette partie était d'étudier l'écoulement de puissance à l'aide de la méthode de Newton-Raphson, afin d'obtenir des informations détaillées sur l'état du réseau pour des paramètres précis.

Dans prochain chapitre, nous étudierons les différents moyens et techniques de compensation des systèmes FACTS, et nous allons nous concentrer sur une étude détaillée du dispositif TCSC.

CHAPITRE II

Chapitre II : Les dispositifs FACTS

II.1 Introduction

Avec l'évolution technologique et industrielle mondiale, la demande en énergie électrique est en augmentation continue. Face à ce problème et devant les contraintes environnementale, écologique et économique, *Electric Power Research Institute* (EPRI), une compagnie américaine, a lancé en 1988 un projet d'étude des systèmes FACTS (*Systèmes de Transmission en Courant Alternatif*) [02]. L'objectif était de contrôler le transit de puissance dans les lignes électriques, améliorer la qualité de l'énergie et augmenter la capacité de transmission. Les systèmes FACTS, tels que le TCSC, le SVC et le STATCOM, ont été développés pour optimiser la gestion du flux de puissance et la stabilité du système électrique.

Le concept FACTS regroupe tous les dispositifs à base d'électronique de puissance qui permettent d'améliorer l'exploitation du réseau électrique [19]. La technologie de ces systèmes (interrupteur statique) leur assure une vitesse supérieure à celle des systèmes électromécaniques classiques. Ces dispositifs ont démontré leur efficacité pour réduire les pertes d'énergie, améliorer la stabilité des réseaux et augmenter la capacité de transmission. Grâce au projet FACTS de l'EPRI, de nombreux dispositifs FACTS ont été déployés dans les réseaux électriques du monde entier, contribuant ainsi à l'efficacité et à l'optimisation des réseaux électriques.

Les systèmes FACTS peuvent être classés en trois catégories :

1. Les compensateurs parallèles.
2. Les compensateurs séries.
3. Les compensateurs hybrides (séries – parallèles).

Dans ce chapitre, nous aborderons les compensateurs utilisés dans les réseaux électriques, en mettant l'accent sur le compensateur série avancé TCSC.

II.2 Les différents types des systèmes FACTS

Les systèmes de transmission à courant alternatif (FACTS) traduisent un concept qui regroupe tous les dispositifs à base d'électronique de puissance qui permettent d'améliorer l'exploitation du réseau électrique. Par action de contrôle rapide de ces systèmes sur l'ensemble de paramètres du réseau : tension, impédance, déphasage ...etc. l'intérêt de ces

systèmes et non seulement de pouvoir contrôler l'écoulement de puissance dans les réseaux électriques mais aussi d'augmenter la capacité effective de transport jusqu'à leur limite thermique maximale tout en maintenant voire en améliorant la stabilité des réseaux électriques [20].

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 selon [21] comme suit :

- 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 commandés 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 les transformateurs pour le couplage avec le réseau.

Une autre classification des contrôleurs FATCS est basée sur cinq caractéristiques indépendantes selon :

- Le type de raccordement sur le réseau (connexion) ;
- Le mode de commutation ; la fréquence de commutation ;
- Le mode de stockage d'énergie et enfin le mode de connexion au port DC.

Selon ces critères, trois familles de dispositifs FACTS peuvent être mises en évidence :

- Les dispositifs shunt connectés en parallèle dans les postes du réseau ;
- Les dispositifs séries insérés en série avec les lignes de transport ;
- Les dispositifs combinés série-parallèle qui recourent simultanément aux deux couplages.

Les dispositifs FACTS peuvent être classés en trois catégories, comme présenter dans la figure II.1 :

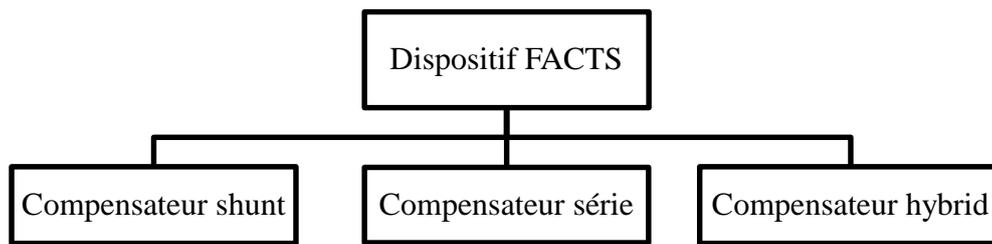


Fig. II.1. Classification des dispositifs FACTS selon la catégorie

II.2.1 Compensateurs shunts

Ils consistent en une impédance variable, source variable ou une combinaison des deux. Ils injectent un courant dans le réseau à travers le point de connexion. Ils sont principalement destinés pour la compensation de la puissance réactive et par conséquent pour contrôler la tension des nœuds, en plus de la fonctionnalité précédente il peut réaliser du filtrage actif d'harmoniques de courant [22]

La figure II.2 représente le schéma de raccordement parallèle [23].

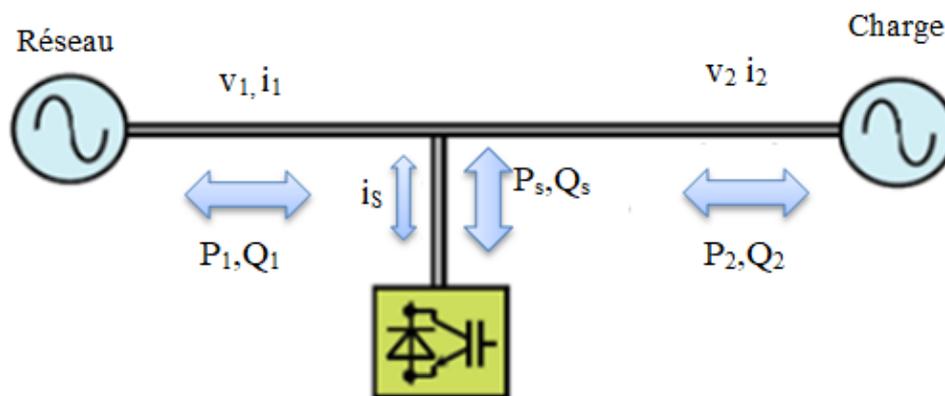


Fig. II.2. Schéma de raccordements parallèles (shunts)

II.2.2 Compensateurs séries

Ces compensateurs sont connectés en série avec le réseau comme une impédance variable (inductive ou capacitive) ou une source de tension variable. Ils sont utilisés pour la compensation série de la puissance réactive et par leur influence sur l'impédance effective des lignes, ils interviennent dans le contrôle du flux de puissance et la stabilité de ce dernier. En général ces dispositifs séries injectent une tension en série avec la ligne de transmission [22]. La figure II.3 représente le schéma de raccordement série [24].

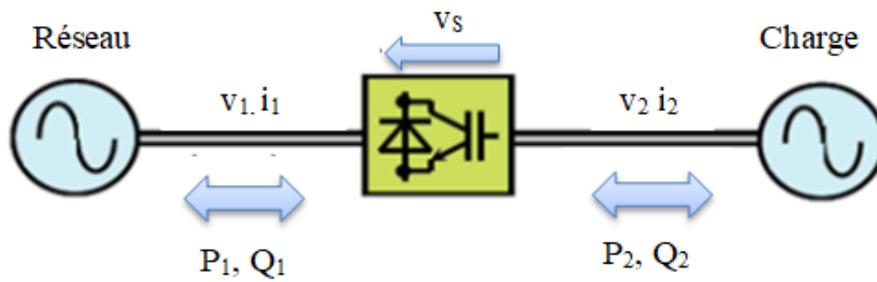


Fig. II.3. Schéma de raccordement série

II.2.3 Compensateurs hybrides série-shunt

C'est une combinaison des dispositifs séries et shunts commandé d'une manière coordonnée afin d'accomplir un contrôle prédéfini. Ils permettent un contrôle multi variables, ils servent à contrôler le flux de puissance active et réactive, la tension et l'angle de transport de l'énergie [25]. La figure II.4 représente le schéma raccordement hybrides [26].

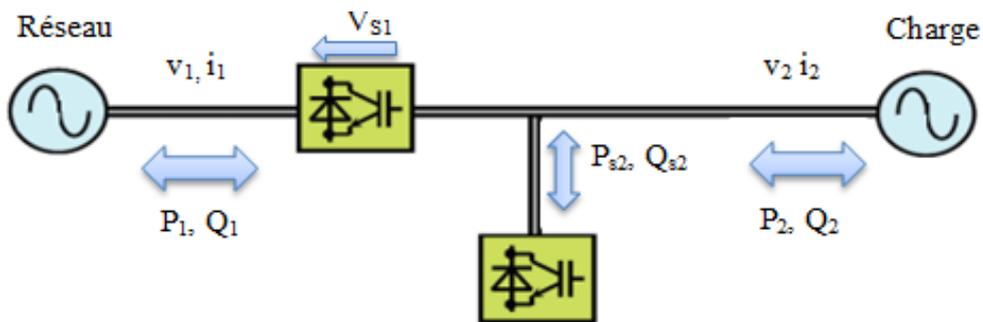


Fig. II.4. Schéma de raccordement série-shunt

On peut résumer la classification des dispositifs FACTS selon la figure suivante [27] :

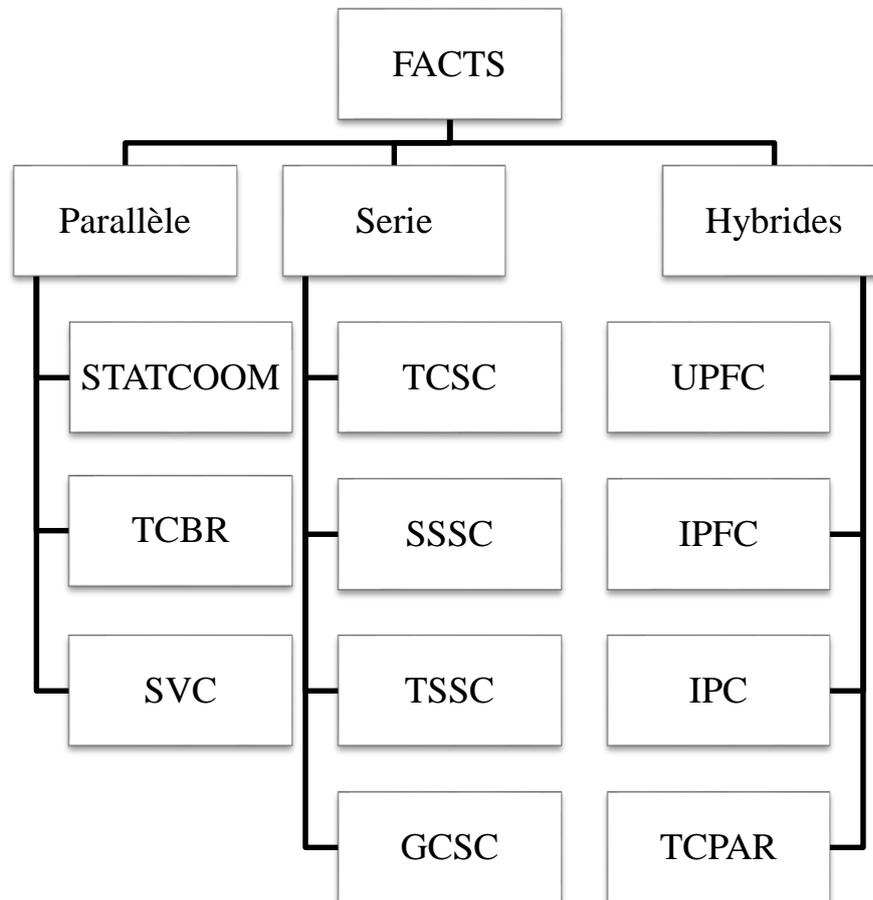


Fig. II.5. Classification des dispositifs FACTS

Selon les dispositifs d'électroniques de puissance utilisés dans le contrôle des réseaux, il y a deux approches distinctes à la réalisation des dispositifs FACTS, la première est basée sur la technologie de thyristor classique et la seconde utilise des convertisseurs de source de tension [28][29]. Différents types des dispositifs FACTS qui sont disponibles peuvent être classés comme :

A. Type à impédance variable commandée par thyristor

- ✓ Compensateur Statique d'Energie Réactive (SVC), (connectés en parallèle) ;
- ✓ Condensateur commandé par thyristors en série (TCSC, TSSC) ;
- ✓ Réactance commandée par thyristors en série (TCSR, TSSR) ;
- ✓ Compensateur statique VAR, SVC, TCR, TCS, TRS.

B. Convertisseurs de source de tension (VSC) (Voltage Source Converter)

- ✓ Compensateur Statique d'Energie Réactive de type Avancé (STATCOM) ;
- ✓ Statique série synchrones compensateurs (SSSC) (connectés en série) ;
- ✓ Régulateur unifié d'écoulement de puissance (UPFC).

II.3 Rôle des dispositifs FACTS

La compensation de l'énergie réactive au niveau des lignes de transmission permet la régulation du profil de la tension le long de ces lignes avec un bon contrôle de la puissance active transmise. Il est reconnu que, la stabilité peut être améliorée, quel que soit son type, si la compensation réactive du système de transmission varie rapidement. Les FACTS possèdent une très grande fiabilité et une flexibilité pratiquement sans limite [30].

Les lignes de transport constituent une composante importante du réseau. Elles sont constituées d'impédances série et shunt. L'impédance série peut affecter le maximum de puissance transmise à travers la ligne et l'impédance shunt est à prédominance capacitive. L'impédance série de la ligne, les tensions de départ et d'arrivée ainsi que le déphasage entre les tensions, déterminent la puissance transitée. Les FACTS sont utilisés afin de changer les paramètres série et shunt ainsi que le déphasage des tensions d'arrivées des lignes de transport dans le but de contrôler l'écoulement de puissance [31].

Les méthodes de compensation de l'énergie réactive classiques se basent sur les batteries de condensateurs ou les bobines fixes ou commandées mécaniquement. Ces méthodes sont non efficaces dans le contrôle du réseau électrique quand il est sévèrement perturbé. Grâce aux avancées récentes dans la technologie des IGBT et GTO, le temps de réaction de ces dispositifs a diminué à quelques milli secondes. Il est possible donc de répondre à la demande par l'utilisation d'une compensation rapide en utilisant les dispositifs FACTS [30].

Le rôle des différents dispositifs FACTS peut être indiqué sur le tableau II.1 [32] :

Tab .II.1 Rôle des différents dispositifs FACTS

	Problème	Action à mener	Solutions conventionnel	Dispositifs FACTS
Limite de la Tension	Chute de tension ou surtension	Fourniture ou absorption de l'énergie réactive	Condensateurs séries et shunts	STATCOM SVC
Limites thermiques	Surcharge des lignes	Réduction des charges	Ajouter de nouvelles lignes	TCSC UPFC
Courants de boucles	Répartition de La puissance transférée	Réajustement de la réactance de ligne	Ajouter des condensateurs en série	SVC TCSC UPFC
Niveaux des Courts-circuits	Court-circuit très élevé	Limitation du courant de court- circuit	Ajouter des condensateurs en série	TCSC UPFC
Résonances subsynchrones	Emballement des générateurs	Atténuation des oscillations	Compensation série	TCSC

II.4 Avantages des dispositifs FACTS

Les dispositifs FACTS sont considérés comme des solutions auxiliaires pour les systèmes électriques. Parmi ces avantages, nous mentionnons les suivants [33][34] :

- Permettent d'obtenir des vitesses de commande nettement supérieures à celles des systèmes mécaniques.
- Un niveau de maintenance bien inférieur car les systèmes mécaniques s'usent beaucoup plus rapidement que les systèmes statiques.
- 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.
- Capacité et stabilité accrue de transmission de puissance.
- Facilite la connexion de production renouvelable de la grille.
- Améliore l'interconnexion et l'échange énergétique.

Tab .II.2 Comparaison entre les dispositifs FACTS les plus utilisés [31]

	SVC	STATCOOM	TCSC	UPFC
Transit de puissance active	*	*	***	***
Contrôle de la puissance réactive	***	***	/	***
Contrôle de la tension	***	***	*	***
Contrôle de l'angle de transport	/	/	***	***
Stabilité	**	***	**	***
Oscillation de puissance	**	***	***	***

Influence :

- Performance moyenne *
- Bonne performance **
- Excellente performance ***

II.5 Inconvénients des dispositifs FACTS

Les dispositifs FACTS sont considérés comme des solutions pour aider les systèmes électriques mais ils présentent des inconvénients, en plus qu'ils ne sont pas une solution universelle, ils existent plusieurs contraintes pour que ces dispositifs soient efficaces et rentables [35].

- Le choix du 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.

Notre attention est portée sur le dispositif FACTS TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor). Nous allons examiner en détail le fonctionnement et les caractéristiques techniques du TCSC dans la section suivante :

II.6 Compensateur série commandée par thyristor (TCSC)

Le TCSC est un dispositif série qui permet le contrôle de l'énergie active transitant dans une ligne de transport et cela par l'introduction d'une réactance variable en série avec l'impédance de la ligne. Ce système utilise des condensateurs à valeurs fixes placés en parallèle sur des inductances contrôlées par un variateur de courant à thyristors, de manière à rendre le réglage de la compensation capacitive ou inductive, respectivement, au-delà et en deçà de la fréquence de résonance [01]. Le schéma de principe d'un TCSC est décrit par la figure (II.6) [06].

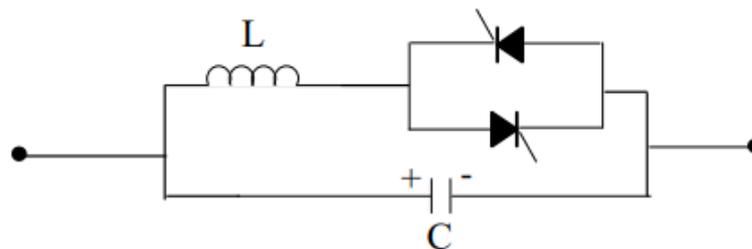


Fig. II.6. Schéma de principe d'un TCSC

Le TCSC est composé d'une réactance couplée à un variateur de courant à thyristors composant un TCR qui est mis en parallèle avec un condensateur à capacité fixe. Ce dispositif permet un contrôle continu de la réactance offerte par le TCSC. Avec l'introduction de cette réactance X_{TCSC} [36] [37], la réactance équivalente du TCSC peut être calculée comme suit :

$$X_{TCSC}(\alpha) = \frac{X_c \cdot X_L(\alpha)}{X_c + X_L(\alpha)} \quad (II.1)$$

L'expression de la réactance X_L est en relation directe avec l'angle d'amorçage des thyristors (α) qui varie entre 90° et 180° selon la relation ci-dessus :

$$X_L(\alpha) = X_L \left[\frac{\pi}{2\pi - 2\alpha - \sin(2\alpha)} \right] \quad (II.2)$$

$$X_L = jL\omega \quad (II.3)$$

$$X_C = 1/jC\omega \quad (II.4)$$

Tel que :

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$$

f : Fréquence industrielle du réseau (50Hz).

C : Capacitance du banc de condensateurs.

L : Réactance inductive de l'inductance parallèle.

L'expression de l'impédance est donnée par l'équation (II.2) où α représente l'angle de retard à l'amorçage des thyristors.

Alors X_{TCSC} peut-être écrite sous la forme :

$$X_{TCSC}(\alpha) = \left[\frac{\pi X_L}{2(\pi - \alpha) + \sin(2\alpha) - \pi \frac{X_L}{X_C}} \right] \quad (II.5)$$

Et l'admittance du TCSC sera calculée comme suit :

$$\bar{y}_{TCSC} = \frac{1}{jX_{TCSC}} \quad (II.6)$$

La tension contrôlée par le TCSC est :

$$V_{TCSC} = I_L * X_{TCSC}(\alpha) \quad (II.7)$$

La puissance réactive contrôlée par le TCSC est :

$$Q_{TCSC}(\alpha) = \frac{V_{tcsc}(\alpha)^2}{X_{tcsc}(\alpha)} \quad (II.8)$$

Avec, I_L le courant de la ligne, et V_{max} et Q_{max} sont la tension et la puissance réactive maximale respectivement contrôlée par le TCSC.

II.6.1 Principe de fonctionnement de TCSC

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 blocage

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.7) [38].

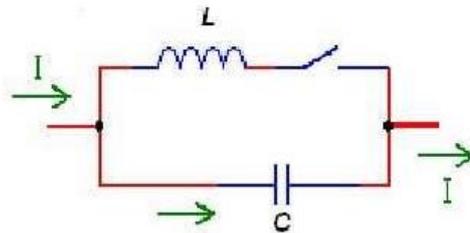


Fig. II.7. TCSC en mode de blocage

La tension aux bornes de banc du condensateur (U_C), est donnée par l'équation (II.9) :

$$U_C = j.X_C.I_C \quad (\text{II.9})$$

Tel que : $X_C < 0$

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

a. 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.8) [38].

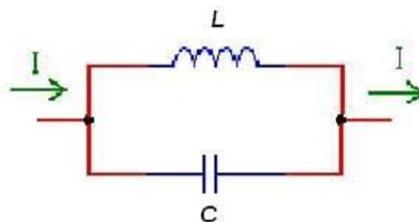


Fig. II.8. TCSC en mode de by-pass

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

$$X_{TCSC} = \frac{X_L \cdot X_C}{X_L + X_C} \quad (\text{II.10})$$

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 [38].

a. 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.9) [39].

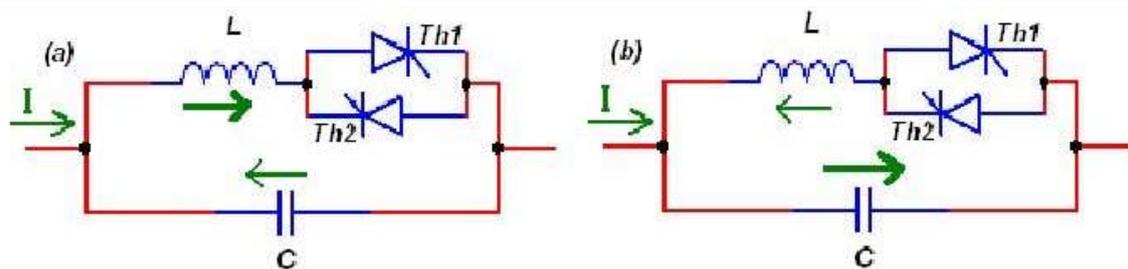


Fig. II.9. TCSC en mode de conduction partielle,
(a) avec Th_1 amorcé, (b) avec Th_2 amorcé

Si le thyristor Th_1 est amorcé, le thyristor Th_2 est bloqué et vice versa. Quand Th_1 conduit l'impédance équivalente est inductive (Figure.II.9(a)) et si Th_2 est amorcé, l'impédance équivalente est capacitive (Figure. II.9(b)).

II.6.2 Avantages de TCSC

On peut citer quelque avantage du TCSC [40] :

- 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 à inductive) ;
- La réduction des problèmes dus au phénomène de résonance sous synchrone (prévention des risques de rupture des arbres mécaniques).

II.6.3 Insertion d'un TCSC en milieu de ligne

Lorsqu'un TCSC est placé dans une ligne reliant les nœuds m et k, il est directement intégré dans le schéma en Π de la ligne selon le modèle de la figure (II.10) [04].

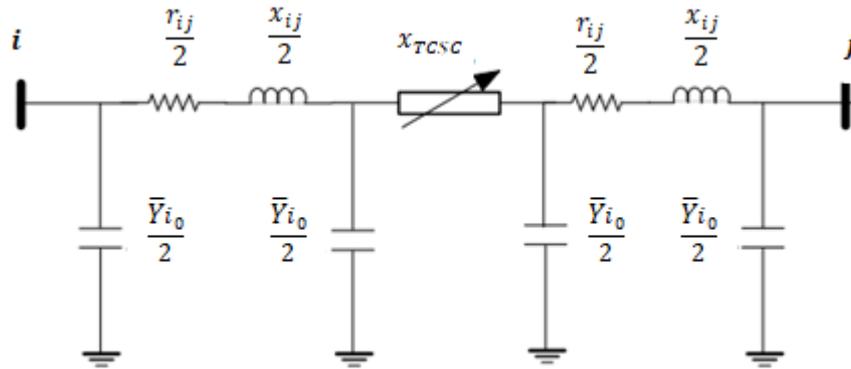


Fig. II.10. TCSC inséré en milieu d'une ligne

La réactance effective de la ligne vaut :

$$x'_{ij} = x_{ij} + x_{TCSC} \quad (\text{II.11})$$

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

$$\bar{Y} = \begin{pmatrix} \bar{y}'_{ij} + \bar{y}'_{i0} & -\bar{y}'_{ij} \\ -\bar{y}'_{ij} & \bar{y}'_{ij} + \bar{y}'_{j0} \end{pmatrix} \quad (\text{II.12})$$

Tel que

$$\bar{y}'_{ij} = \frac{1}{r_{ij} + j(x_{ij} + x_{TCSC})} \quad (\text{II.13})$$

II.6.4 Équation d'écoulement de puissance du dispositif TCSC

L'expression fondamentale de l'impédance du TCSC, comme une fonction de l'angle d'amorçage des thyristors, est donnée par l'expression suivante [36] :

$$X_{TCSC} = -X_C + C_1 \{2(\pi - \alpha_{TCSC}) + \sin(2(\pi - \alpha_{TCSC}))\} - C_2 \cos^2(\pi - \alpha_{TCSC}) \times \{\bar{\omega} \cdot \tan(\bar{\omega} \cdot (\pi - \alpha_{TCSC})) - \tan(\pi - \alpha_{TCSC})\} \quad (\text{II.14})$$

$$X_{LC} = \frac{X_C \cdot X_L}{X_C - X_L}$$

$$C_1 = \frac{X_C + X_L}{\pi}$$

$$C_2 = \frac{4 + X_{LC}^2}{\pi \cdot X_L}$$

$$\bar{\omega} = \sqrt{\frac{X_L}{X_C}}$$

Avec $X_C = \frac{1}{C\omega}$ la réactance du banc de capacités et $X_L = L\omega$ est la réactance de l'inductance linéaire.

$$\omega = 2\pi f$$

α_{TCSC} : l'angle d'allumage après le passage par zéro de la tension aux bornes de la capacité.

Les équations des puissances active et réactive du TCSC au nœud (i) sont données par :

$$\begin{cases} P_i = V_i \cdot V_j \cdot Y_{ij} \cdot \sin(\delta_i - \delta_j) \\ Q_i = -V_i^2 \cdot Y_{ii} - V_i \cdot V_j \cdot \sin(\delta_i - \delta_j) \end{cases} \quad (\text{II.15})$$

Ou,

$$Y_{ii} = -Y_{ij} = Y_{TCSC}$$

$$Y_{TCSC} = -\frac{1}{X_{TCSC}}$$

Pour les équations au nœud m , l'indice k est échangé par l'indice m dans les équations (II.16). Pour le cas où le TCSC contrôle la puissance active transitant du nœud k au nœud m , à une valeur spécifiée, l'ensemble des équations d'écoulement de puissances est :

$$\begin{bmatrix} \Delta P_i \\ \Delta P_j \\ \Delta Q_i \\ \Delta Q_j \\ \vdots \\ \Delta P_{ij}^{(\alpha_{TCSC})} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} & \frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} & & & & \\ & & \frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} & \frac{\partial P_j}{\partial |V_j|} & \frac{\partial P_i}{\partial \alpha_{TCSC}} & \\ \frac{\partial P_j}{\partial \delta_i} & \frac{\partial P_j}{\partial \delta_j} & & & & \\ & & \frac{\partial P_j}{\partial |V_i|} & \frac{\partial P_j}{\partial |V_j|} & \frac{\partial P_j}{\partial \alpha_{TCSC}} & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \\ \frac{\partial \Delta P_{ij}^{(\alpha_{TCSC})}}{\partial \delta_i} & \frac{\partial \Delta P_{ij}^{(\alpha_{TCSC})}}{\partial \delta_j} & \frac{\partial \Delta P_{ij}^{(\alpha_{TCSC})}}{\partial |V_i|} & \frac{\partial \Delta P_{ij}^{(\alpha_{TCSC})}}{\partial |V_j|} & \frac{\partial \Delta P_{ij}^{(\alpha_{TCSC})}}{\partial \alpha_{TCSC}} & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_i \\ \Delta \delta_j \\ \Delta V_i \\ \Delta V_j \\ \Delta \alpha_{TCSC} \end{bmatrix} \quad (\text{II.16})$$

Où, $\Delta P_{ij}^{(\alpha_{TCSC})}$ est donnée par :

$$\Delta P_{ij}^{(\alpha_{TCSC})} = P_{ij}^{reg} - P_{ij}^{(\alpha_{TCSC}).cal} \quad (\text{II.17})$$

Qui est l'erreur sur la puissance active transitée pour le module TCSC, $\Delta \alpha_{TCSC}$ est donnée par :

$$\Delta \alpha_{TCSC} = \alpha_{TCSC}^{k+1} - \alpha_{TCSC}^k \quad (\text{II.18})$$

Qui est le changement incrémental dans l'angle d'allumage du TCSC à la k ème itération, et $\Delta P_{ij}^{(\alpha_{TCSC}).cal}$ est la puissance calculée en utilisant équation (II.15).

Les éléments du Jacobien pour la réactance série, comme fonction de l'angle d'allumage α_{TCSC} sont donnés comme suit :

$$\frac{\partial P_i}{\partial \alpha_{TCSC}} = P_i \cdot Y_{TCSC} \cdot \frac{\partial X_{TCSC}}{\partial \alpha_{TCSC}}$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \alpha_{TCSC}} = Q_i \cdot Y_{TCSC} \cdot \frac{\partial X_{TCSC}}{\partial \alpha_{TCSC}}$$

$$\frac{\partial Y_{TCSC}}{\partial \alpha_{TCSC}} = Y_{TCSC}^2 \cdot \frac{\partial X_{TCSC}}{\partial \alpha_{TCSC}}$$

Avec :

$$\begin{aligned} \frac{\partial X_{TCSC}}{\partial \alpha_{TCSC}} = & -2C_1[1 + \cos(2\alpha_{TCSC})] + C_2 \sin(2\alpha_{TCSC}) + [\bar{\omega} \tan(\bar{\omega}(\pi - \alpha_{TCSC})) \\ & - \tan(\alpha_{TCSC})] + C_2(\bar{\omega}^2 \frac{\cos^2(\pi - \alpha_{TCSC})}{\cos^2(\bar{\omega} \cdot (\pi - \alpha_{TCSC}))} - 1) \end{aligned}$$

II.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé de manière globale les dispositifs FACTS en fournissant une définition, une classification, les différents types, leur rôle, leurs avantages et leurs inconvénients, ainsi que leurs principes de fonctionnement. Nous nous sommes ensuite concentrés sur l'étude détaillée du dispositif série TCSC.

Nous avons examiné l'effet de l'introduction d'un TCSC dans une ligne électrique, notamment en termes de modification de la matrice d'admittance. Ces nouvelles matrices nous serviront à étudier dans le prochain chapitre l'impact de dispositif TCSC sur le réseau.

CHAPITRE III

Chapitre III : Résultats et Interprétations

III.1 Introduction

Le présent chapitre se concentre sur l'étude de l'efficacité des dispositifs de régulation de type série et leurs influences sur les paramètres du réseau électrique. Pour cette étude, nous utiliserons un environnement MATLAB afin de simuler l'insertion du TCSC à différents emplacements du réseau, et d'analyser son influence sur les paramètres du système.

La méthode de résolution privilégiée pour cette analyse sera la méthode de Newton-Raphson, reconnue pour sa précision. En l'appliquant pour le calcul de l'écoulement de puissances, nous serons en mesure d'obtenir des résultats précis concernant les tensions nodales et les puissances transitant dans les lignes du réseau. Ces paramètres nous permettront d'évaluer l'effet du TCSC sur le niveau de tensions et la capacité de transfert de puissance.

III.2 Topologie du réseau étudié

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

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

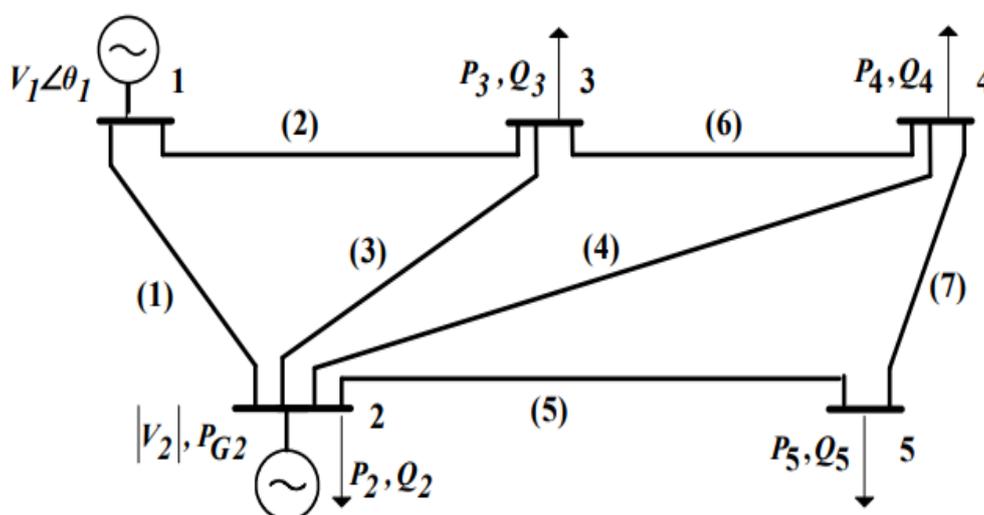


Fig. III.1. Topologie du réseau électrique étudié

Les données des lignes et des nœuds du réseau sont regroupées dans les tableaux (III.1) et (III.2) pour une puissance de base 100 MVA :

Tab .III.1 Données des lignes

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

Tab .III.2 Données des nœuds

Nœud	V (pu)	δ (deg)	Générateur		Charge	
			P (pu)	Q (pu)	P (pu)	Q (pu)
1	1.06	0.0	0	0	0	0
2	1.00	0.0	0.40	0	0.20	0.10
3	1.00	0.0	0	0	0.45	0.15
4	1.00	0.0	0	0	0.40	0.05
5	1.00	0.0	0	0	0.60	0.10

III.3 Résultats de simulation

Le calcul de l'écoulement de puissance par l'application de la méthode de Newton-Raphson sur le réseau test IEEE à 5 Jeux de barres, a permis d'effectuer une étude comparative entre les résultats obtenus sans et avec la présence des dispositifs TCSC à différents emplacements dans le réseau. Les principaux résultats tirés sont détaillés dans ce qui suit pour trois scénarios, à savoir :

- ✓ Réseau à son état initial (sans la présence du TCSC);
- ✓ Réseau avec insertion du TCSC aux différentes lignes du réseau ;
- ✓ Réseau avec présence de deux TCSC.

III.3.1 Réseau sans TCSC

La simulation du réseau dans son état initial, est effectuée pour établir une référence ou un point de comparaison. De cette manière, le comportement initial du réseau électrique peut être compris et ses performances peuvent être évaluées avant l'introduction du dispositif FACTS. Ainsi, une base solide est fournie pour évaluer l'effet du TCSC sur ces paramètres et pour déterminer les améliorations potentielles qu'il peut apporter. Le calcul d'écoulement de puissances a permis d'évaluer les tensions aux nœuds, les puissances transitant ainsi que les pertes de puissances dans les lignes. Les résultats sont regroupés dans les tableaux (III.3), (III.4).

Tab .III.3 Amplitudes et déphasages des tensions aux nœuds

N° JB	1	2	3	4	5
V (pu)	1.06	1	0.9598	0.9477	0.9601
δ (°)	0	-3.1164	-6.3030	-6.9180	-7.1753

Tab .III.4 Puissances transitées et pertes de puissances dans les lignes

N° de Lignes	P (pu)	Q (pu)	ΔP (pu)	ΔQ (pu)
(1)	1.1902	0.6557	0.0337	0.0373
(2)	0.5593	0.2535	0.0279	0.0326
(3)	0.3362	0.0993	0.0076	0.0155
(4)	0.4048	0.1472	0.0115	0.0034
(5)	0.6155	0.1327	0.0160	0.0193
(6)	0.4099	0.2442	0.0025	0.0106
(7)	0.0007	-0.0714	0.0002	0.0449

Les pertes totales des puissances actives dans les lignes sont évaluées à 0.062272 pu.

III.3.2 Insertion du TCSC dans le réseau

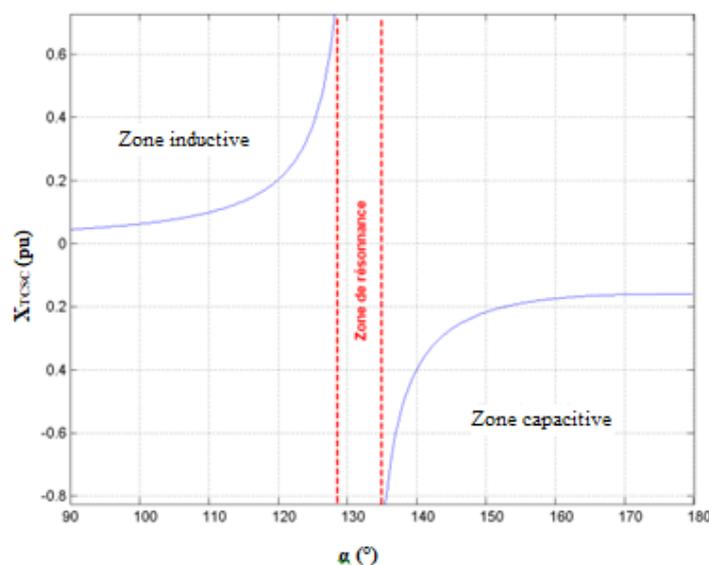
Cette section se concentre sur l'objectif qui est d'étudier en détail l'influence de la présence du TCSC sur le réseau électrique. Afin de comprendre son impact, nous procéderons à l'insertion du TCSC à différents emplacements du réseau et analyserons les variations des puissances transitées dans les lignes, les pertes totales ainsi que les tensions aux nœuds. Nous utiliserons des données spécifiques du TCSC, garantissant ainsi des résultats précis et pertinents pour l'analyse. Un nouveau calcul d'écoulement de puissances est effectué afin de déterminer la valeur optimale de l'angle d'amorçage des thyristors du TCSC qui est considéré comme une variable d'état à déterminer.

Les données du TCSC utilisé pour la simulation sont les suivantes :

- ✓ La susceptance X_C est de 0.09375pu ;
- ✓ La réactance X_L est de 0.01625pu ;
- ✓ L'angle d'amorçage initial $\alpha_{init}=95^\circ$;
- ✓ Les valeurs limites de l'angle d'amorçage sont : $\alpha_{min}=90^\circ$ et $\alpha_{max}=180^\circ$

Limites de fonctionnements

La figure (III.2) montre la réactance du TCSC en fonction de l'angle d'amorçage des thyristors.


 Fig. III.2. Caractéristique X_{TCS} en fonction de α

La caractéristique X_{TCS} en fonction de α présente trois zones principales. Pour des valeurs de α allant de 90° à 129° , le TCSC est en fonctionnement inductif, et de 135° à 180° celui-ci agit comme une capacité variable. Entre ces deux zones se trouve la zone de résonance où la réactance du TCSC tend vers l'infini ; cette zone est à éviter dans l'exploitation du TCSC.

Résultats

Les tableaux de (III.5) à (III.9) regroupent les résultats obtenus pour différents emplacements du TCSC, à savoir, l'angle d'amorçage optimal du TCSC et sa réactance équivalente, le nombre d'itérations pour atteindre la précision désirée, le comportement du TCSC ainsi que les amplitudes des tensions aux nœuds, les puissances transitées et les pertes de puissances.

Tab .III.5 Paramètres du TCSC pour différents emplacements

Emplacement du TCSC	Ligne 3	Ligne 4	Ligne 5	Ligne 6	Ligne 7
Nombre d'itération	300	111	110	10	300
Angle d'amorçage ($^\circ$)	180	132.9	134.65	161.11	180
X_{TCS} (pu)	-0.09375	0.095535	0.1194	-0.10451	-0.09375
Comportement du TCSC	Capacitif	Inductif	Inductif	Capacitif	Capacitif

Tab .III.6 Amplitudes et déphasages des tensions aux nœuds

Emplacement du TCSC	Ligne 3		Ligne 4		Ligne 5		Ligne 6		Ligne 7 (Divergence)	
	V(pu)	$\delta(^\circ)$	V(pu)	$\delta(^\circ)$	V(pu)	$\delta(^\circ)$	V(pu)	$\delta(^\circ)$	V(pu)	$\delta(^\circ)$
1	1.06	0	1.06	0	1.06	0	1.06	0	1.06	0
2	1.0226	-3.094	0.9420	-1.451	0.9194	-1.119	1	-1.913	1	/
3	1.0194	-2.329	0.9594	-3.263	0.9460	-3.144	0.9832	-5.201	/	/
4	0.9887	-7.049	0.9288	-3.860	0.8907	-5.233	0.9785	-3.877	/	/
5	0.9853	-6.991	0.9097	-5.264	0.8998	-4.143	0.9668	-5.566	/	/
6	1.0228	-1.844	0.9345	-3.317	0.9064	-3.582	0.9815	-3.34	/	/

Tab .III.7 Puissances transitées dans les lignes

Emplacement du TCSC	Ligne 3		Ligne 4		Ligne 5		Ligne 6	
	N° lignes	P(pu)	Q(pu)	P(pu)	Q(pu)	P(pu)	Q(pu)	P(pu)
1	1.0838	0.2921	1.0065	1.7207	1.0313	2.1083	0.85198	0.75217
2	0.21954	0.08155	0.35247	0.30558	0.35913	0.36169	0.6414	0.17495
3	-0.0640	0.01886	0.11632	-0.14507	0.11386	-0.18772	0.31256	-0.02216
4	0.41041	0.048103	0.20579	-0.01331	0.34134	0.02778	0.20434	0.03494
5	0.61466	0.11606	0.51153	0.08553	0.37548	0.02239	0.51117	0.10508
6	0.3	0.006547	0.3	0.06837	0.3	0.09265	0.3	-0.01121
7	0.000475	-0.01079	0.10183	0.01964	-0.06707	-0.03053	0.10073	-0.00833

Tab .III.8 Pertes des puissances actives et réactives

Emplacement du TCSC	Ligne 3		Ligne 4		Ligne 5		Ligne 6	
	N° lignes	ΔP (pu)	ΔQ (pu)	ΔP (pu)	ΔQ (pu)	ΔP (pu)	ΔQ (pu)	ΔP (pu)
1	0.022799	0.003313	0.07281	0.15812	0.1006	0.24274	0.02391	0.00803
2	0.004287	0.041209	0.01677	0.00078	0.02	0.00953	0.01809	0.00201
3	0.000326	0.040721	0.00201	0.03012	0.00299	0.02583	0.00586	0.02175
4	0.009937	0.010652	0.00286	0.02640	0.00841	0.00754	0.00268	0.03110
5	0.015115	0.015096	0.01223	0.01098	0.00672	0.00463	0.01102	0.00406
6	0.000863	0.018266	0.00109	0.01406	0.00121	0.01265	0.00093	0.01640
7	1.52°-05	0.048668	0.00111	0.03890	0.00046	0.03868	0.00086	0.04470

Tab .III.9 Pertes totales des puissances actives

Emplacement du TCSC	Ligne 3	Ligne 4	Ligne 5	Ligne 6	Ligne 7
Pertes actives totales (pu)	0.053343	0.10892	0.14042	0.06338	8.0471

Interprétation des résultats

L'intégration du TCSC sur la ligne 3 a entraîné une amélioration significative du niveau de tension, tandis que sur la ligne 6, le niveau de tension est resté satisfaisant. Ces résultats indiquent que l'ajout du TCSC a été bénéfique pour maintenir la stabilité de tension sur ces lignes.

- ✓ En revanche, lorsque le TCSC a été intégré aux lignes 4, 5 et 7, cela a entraîné une dégradation du profil de tension. De plus, l'intégration du TCSC dans les lignes 1 et 2 n'a produit aucun résultat significatif et a conduit à une divergence.
- ✓ L'intégration du TCSC sur la ligne 3 a permis de réduire les pertes de puissance totales à 0.053343 pu par rapport à leur valeur initiale, avec une valeur X_{TCSC} de 0.09375 pu. Sur la ligne 6, les pertes totales de puissance ont également été faibles, atteignant seulement

0.06338 pu. En revanche, lorsque le TCSC a été intégré aux lignes 4, 5 et 7, les pertes totales de puissance sont devenues importantes.

✓ Il est crucial de comprendre que l'intégration du TCSC sur une ligne de transmission peut avoir des effets variés. Ces effets dépendent de facteurs tels que la configuration du réseau, les caractéristiques de la ligne et les paramètres du TCSC. Par conséquent, une analyse minutieuse des caractéristiques du réseau et des études de simulation approfondies sont essentielles et ce qu'on va présenter si le réseau est surchargé.

III.3.3 Insertion du TCSC dans le réseau surchargé

L'étude de l'influence de l'insertion d'un dispositif TCSC dans un réseau surchargé est une approche pertinente pour évaluer les effets du TCSC. En modifiant les paramètres des charges, notamment en augmentant les charges, nous pouvons observer l'impact de cette surcharge sur le système et analyser comment l'ajout du TCSC peut aider à atténuer les effets négatifs.

Tab .III.10 Données de réseau surchargé

Nœud	Charges	
	P (pu)	Q (pu)
1	0	0
2	0.2000	0.1000
3	0.4500	0.0500
4	0.8000	0.4500
5	0.6000	0.0500

Dans cette partie, nous avons d'abord effectué un calcul d'écoulement de puissance avec la présence d'un seul TCSC au niveau de la ligne 6. Par la suite, nous avons inséré un deuxième au niveau de la ligne 4 qui a donné un meilleur comportement par rapport au niveau de tension et les pertes de puissances.

Les données des deux TCSC utilisés pour la simulation sont les suivantes :

- ✓ Pour TCSC 1 : $X_{C1}=0.009375$ pu et $X_{L1}=0.001625$ pu avec $\alpha_{1init}=95^\circ$
- ✓ Pour TCSC 2 : $X_{C2}=0.09375$ pu et $X_{L2}=0.1625$ pu avec $\alpha_{2init}=95^\circ$

Les tableaux de (III.11) à (III.14) et la figure III.3 regroupent les résultats obtenus avec l'insertion des deux TCSC, à savoir, l'angle d'amorçage optimal du TCSC et sa réactance équivalente, le nombre d'itérations pour atteindre la précision désirée, le comportement des TCSC ainsi que les amplitudes des tensions aux nœuds, les puissances transitées et les pertes de puissances.

Tab .III.11 Paramètres des deux TCSC réseau en surcharge

	Sans TCSC	Avec un seul TCSC	Avec deux TCSC	
		Ligne 6	Ligne 6	Ligne 4
Nombre d'itération	5	12	61	
Angle d'amorçage (°)	/	142.41	143.07	124.24
X_{TCSC} (pu)	/	0.087963	-0.20467	-0.11619
Comportement	/	Inductif	Capacitif	Capacitif

Tab .III.12 Amplitudes et déphasages des tensions aux nœuds

N° JB	Sans TCSC		Avec un seul TCSC		Avec deux TCSC	
	V(pu)	δ (deg)	V(pu)	δ (deg)	V(pu)	δ (deg)
1	1.06	0	1.06	0	1.06	0
2	1	-3.1164	1	-3.2791	1	-3.1781
3	0.95984	-6.303	0.96741	-5.7475	0.96128	-5.6669
4	0.9477	-6.918	0.93759	-7.837	0.9628	-5.0548
5	0.96006	-7.1753	0.9564	-7.5917	0.96118	-7.3753
6	/	/	0.94763	-7.397	1.0165	-2.0643
7	/	/	/	/	1.0049	-1.1804

Tab .III.13 Puissances transitées dans les lignes

N° lignes	Sans TCSC		Avec un seul TCSC		Avec deux TCSC	
	P(pu)	Q(pu)	P(pu)	Q(pu)	P(pu)	Q(pu)
1	1.1902	0.65568	1.2362	0.64317	1.2294	0.7308
2	0.55928	0.25349	0.51423	0.23091	0.51434	0.25722
3	0.33619	0.099303	0.26414	0.07799	0.2652	0.08353
4	0.40481	0.1472	0.48149	0.18267	0.21123	0.09098
5	0.61554	0.13272	0.65517	0.15254	0.61569	0.08223
6	0.40992	0.24423	0.3	0.20881	0.3	0.28381
7	0.000698	-0.07145	-0.03641	-0.08325	0.3	0.09025

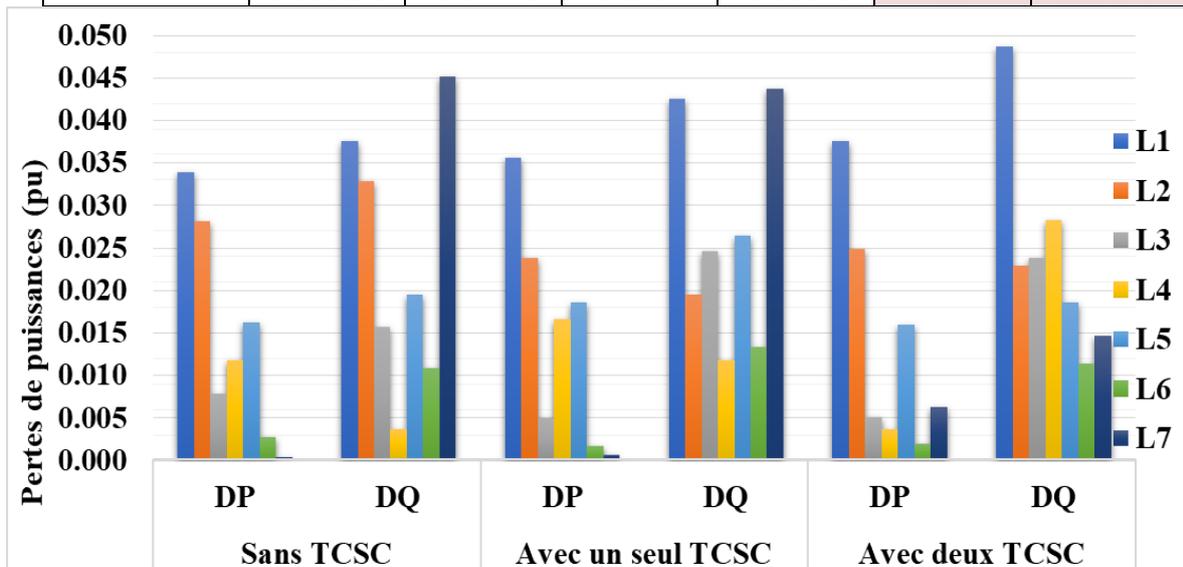


Fig. III.3. Pertes des puissances actives et réactives

Tab .III.14 Pertes totales des puissances actives

	Sans TCSC	Avec un seul TCSC	Avec deux TCSC
Pertes actives totales (pu)	0.0995	0.10038	0.09377

Interprétation des résultats

Dans un réseau surchargé, le TCSC agit comme un outil efficace pour atténuer les effets négatifs de la surcharge. Il régule les tensions, contrôle les pertes de puissance, améliore la stabilité et gère l'écoulement de puissance, contribuant ainsi à maintenir les performances du système électrique dans des limites acceptables dans des cas mal conditionnés.

L'efficacité du TCSC se résume dans ce qui suit :

- ✓ Compensation de la réactance : Lorsqu'un réseau est surchargé, la réactance de la ligne de transmission peut augmenter en raison de l'effet de peau. Le TCSC peut réguler la réactance en ajustant la tension et la fréquence de commutation des thyristors, ce qui permet de maintenir une impédance constante et d'améliorer la capacité de transfert de puissance.
- ✓ Stabilisation de la tension : Une surcharge peut entraîner une chute de tension sur la ligne de transmission, ce qui peut affecter le fonctionnement normal du réseau. Le TCSC peut injecter ou absorber de la réactance de manière contrôlée pour réguler la tension dans la ligne, assurant ainsi une stabilité de tension appropriée.
- ✓ Contrôle du flux de puissance : Le TCSC peut contrôler le flux de puissance actif sur la ligne de transmission en ajustant sa réactance. Cela permet de réduire les congestions et de répartir efficacement la charge dans le réseau surchargé.

III.4 Conclusion

L'utilisation du dispositif TCSC dans le réseau électrique a été étudiée par le calcul de l'écoulement de puissance en se basant sur la méthode de Newton-Raphson. Nous avons comparé le comportement du réseau dans deux scénarios, sans et avec l'insertion d'un seul dispositif TCSC puis de deux à différents emplacements.

Les résultats de ce travail ont démontré que l'intégration du TCSC permet efficacement d'améliorer le niveau des tensions et de réduire les pertes de puissance. En particulier, l'utilisation de deux TCSC a conduit à des améliorations significatives dans le réseau. Cela dépendra évidemment du choix des paramètres initiaux du dispositif et de son emplacement dans le réseau.

CONCLUSION

GENERALE

Conclusion Générale

Dans le cadre de ce travail, il nous a semblé nécessaire de donner des informations suffisantes sur le réseau électrique et leurs différents types de structures et types d'architecture. On a décrit l'importance de l'écoulement de puissance et la stabilité de tension, en abordant la méthode de Newton-Raphson qui résout les équations non linéaires.

En introduisant un nouveau concept par le système de transmission de l'énergie à courant alternatif flexible appelée FACTS, avec lesquels le contrôle du flux de puissance active et réactive nous a permis d'améliorer la gestion des réseaux électriques. De plus, nous explorons dans cette étude et en considérant l'angle d'amorçage du TCSC comme une variable d'état dans l'écoulement de puissance. Cela permet de prendre en compte l'effet de cette variable sur les performances du réseau électrique et d'optimiser son réglage pour maximiser l'efficacité et la fiabilité.

Nous avons traité le problème de l'écoulement des puissances et le contrôle des tensions des réseaux d'énergie électrique en incorporant le dispositif TCSC. Une étude sur les dispositifs FACTS a été réalisée et en plus une étude détaillée sur le dispositif TCSC. Nous avons, dans ce cadre, choisi d'étudier trois cas :

- Le réseau à cinq nœuds sans insertion TCSC;
- Le réseau avec insertion de ce dernier à différentes lignes du réseau;
- Le réseau avec présence de deux TCSC.

Les résultats soulignent l'importance de l'analyse et de l'optimisation de l'emplacement des dispositifs TCSC dans le réseau électrique. Une configuration adéquate des TCSC peut améliorer la stabilité et les performances du système, en minimisant les pertes d'énergie et en maintenant des niveaux de tension optimaux.

Il est essentiel de noter que les effets du TCSC peuvent varier en fonction des caractéristiques du réseau, de l'emplacement des dispositifs et des paramètres utilisés. Par conséquent, des études de simulation approfondies et une analyse précise sont nécessaires pour déterminer l'emplacement optimal et les réglages appropriés du TCSC.

Enfin, nous souhaitons que ce travail constitue le point de départ d'autres travaux qui permettront la construction d'une base de connaissances des dispositifs FACTS vu leur importance actuelle et future dans la planification et l'exploitation des réseaux électriques dans le monde, et dans notre pays.

REFERENCES

Références

- [01] **A. JOHN WILEY & SONS** « Power system restructuring and deregulation », IEEE Press, 2001
- [02] **B.CRAPPE**, « Commande et Régulation des Réseaux Electriques », Hermès sciences, 2003.
- [03] **J.F.CANARD**, « Impact de la génération d'énergie dispersée dans les réseaux de distribution », Thèse de doctorat de l'INPG, Décembre 2000.
- [04] **A.HAMMOUD**, « Etude des convertisseurs haute tension pour la protection et la coordination de réseau de distribution ». Thèse pour le grade de Docteur en Génie Electrique, INSA de Lyon, 2010.
- [05] **DOULET, J.BONAL et ALAIN** « Réseaux électriques de transport et de répartition - Techniques de l'Ingénieur », Article D 42261, Paris : 2006.
- [06] **N.AOUZELLAG**, «Contribution à l'Amélioration de la Flexibilité dans les Réseaux Electriques liée à l'Intégration des Générateurs Eoliens », Thèse de doctorat, Université de Bejaia, 2011.
- [07] **M.BOUGHEZLA**, «Etude et simulation d'un coupleur de signaux HF pour réseaux d'énergie électrique », thèse de doctorat, Université de Biskra, 2013.
- [08] **SIEMENS**, « Power Engineering Guide - Transmission and Distribution » 4th Edition, 2005.
- [09] **M. ZELLAGUI**, « Etudes des protections des réseaux électriques MT (30 & 10kV) », Mémoire de Magistère en Electrotechnique, Université Mentouri Constantine, 2010.
- [10] **M.CECILE ALVAREZ-HÉRAULT**, «ARCHITECTURES DES RÉSEAUX DE DISTRIBUTION DU FUTUR EN PRÉSENCE DE PRODUCTION DÉCENTRALISÉ», 2009.
- [11] **SONELGAZ Prévention et Sécurité**, « Prévention du Risque Electrique », Carnet de Prescriptions au Personnel du Groupe SONELGAZ, Edition 2001.
- [12] **O.RICHARDOT**, « Réglage Coordonné de Tension dans les Réseaux de Distribution à l'aide de la Production Décentralisée», Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2006.
- [13] **S. BENMEZIANE, L. ALI CHERIF**, « Le calcul de l'écoulement de puissance par les réseaux de neurones artificiels », Mémoire de fin d'études Ingénieur d'état, Université A.MIRA de Bejaïa, Promotion 2005.
- [14] **R.BENABID**, « Optimisation Multi objectif de la Synthèse des FACTS par les Particules en Essaim pour le Contrôle de la Stabilité de Tension des Réseaux Electriques », Mémoire de Magister en Electrotechnique, Université Amar Telidji, Laghouat, 2007.
- [15] **J. ARRILLAGE, C.P. ARLOLD**, « Computer Analysis of Power Systems », John Wiley & Sons, 1990

- [16] **C.A.GROSS**, «Power System Analysis », John Wiley and Sons, 1980
- [17] **ADAMA D.DIARRA**, « La répartition optimale de la puissance réactive pour le contrôle des tensions de barre d'un réseau électrique par SIMPLEX LP », Comme exigence partielle de la maîtrise en sciences appliquées (Ressources et systèmes), Université du Québec, 1984.
- [18] **O.MAMMERI**, « Différentes méthodes de calcul de la puissance réactive dans un nœud à charge non linéaire en présence d'un système de compensation de l'énergie », Mémoire de Magister en électrotechnique, Université Hadj Lakhder de Batna, 2011-2012.
- [19] **N.G.HINGIRANI** , « FACTS technology and opportunities », IEE FACTS Colloquium, pp. 1-10, 1994.
- [20] **E.GH.SAHRABI**, « Apport de l'UPFC à l'amélioration de la stabilité transitoire des R-E », Thèse de Doctorat, Université de Henri Poincaré, Nancy, 2003.
- [21] **H.SEKHANE**, « L'optimisation de la puissance réactive et le contrôle de la tension à travers l'incorporation des dispositifs FACTS », Mémoire De Magistère, Université De Frères Mentouri Constantine 1, Constantine ,2013.
- [22] **ZHANG XIAO-PING, C.REHTANZ, B.PAL**, « Flexible AC Transmission Systems, Modelling And Control », Springer 2005.
- [23] **H.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.
- [24] **A.ALIBI**, « Contrôle des Réseaux Electriques par les Systèmes FACTS: (Flexible AC Transmission Systems) », Mémoire de Magister, Université Hadj Lakhder de Batna, 2009.
- [25] **H.AFAF**, « Analyse Du Réseau Electrique Par Le Logiciel Le Power World », Mémoire De Master, Université Mohamed Khider, Biskra, 2019.
- [26], **F. LAKDJA**, « contrôle des transits de puissance par dispositif FACTS », Mémoire de Magister en commande des processus, Oran, 2005.
- [27] **M.CRAPPE**, « L'exploitation des réseaux électriques avec l'électronique de puissance », ISBN 2-7462-1198-X, Lavoisier, 2006.
- [28] **N.G.HINGORANI; L.GYUGYI**, « Understanding FACTS concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems », IEEE Press, New York - USA, 2000.
- [29] **K.R.PADIYAR**. « FACTS controllers in power transmission and distribution », New age international publisher, 2007.
- [30] **Z.HAMADOU**, « Optimisation Des Paramètres D'un FACTS Shunt Pour L'amélioration De La Stabilité Transitoire D'un Système Electrique », Mémoire De Magistère, Université Ferhat Abbas, Sétif, 2012.

- [31] **B.LAJADI et M.S.KHERIFI**, « compensation dynamique de l'énergie réactive dans les réseaux électriques », Mémoire d'ingénieur en électrotechnique, Université de Biskra, promotion 2005.
- [32] **R.IBAZIZEN, M.FERSAOUI**, « Interactions d'un dispositif FACTS dans un réseau électrique (STATCOM) », Mémoire De Master, Université, Bejaïa, 2015/2016.
- [33] **R.GRUNBAUM R.SANNINO et C.WAHLBERG**, « Use Of Facts For Enhanced Flexibility And Ef-Ficiency In Power Transmission And Distribution Grids », Inproc Of World Energy Congress, Montreal, 2010.
- [34] **S.AMMARI**, « Interaction Des Dispositifs FACTS Avec Les Charges Dynamique Dans Les Réseaux De Transport Et D'interconnexion », Thèse De Doctorat, Institut National Polytechnique De Grenoble, 2000.
- [35] **A.ALLIBI**, « Contrôle des réseaux électriques par les systèmes FACTS », Thèse de Magister, Université des Batna, 2009.
- [36] **H.AMBRIZ-Perez, E.ACHA, C.R.FUERTE-ESQUIVEL**, « TCSC-Firing Angle Model for Optimal Power Flow Solutions Using Newton's Method », Electrical Power and Energy Systems, Elsevier, issue 28, pp 77–85, 2006.
- [37] **R. M. MATHUR, R.K.VARMA**, « Thyristor Based FACTS Controllers for Electrical Transmission Systems », JOHN WILEY & SONS PUBLICATION, 2002.
- [38] **S.TOUATI, M.KHALDI**, « Répartition économique des puissances actives utilisant le dispositif TCSC », Thèse de Magister, Option : Réseaux Electriques, A. Mira de Bejaia, 2012.
- [39] **H.BENMAACHOU**, « Apport des FACTS dans les réseaux électriques », Mémoire d'Ingénieur, Université Sidi bel Abbas, 2007.
- [40] **NICOLE RETIERE**, « Modéliser et concevoir les réseaux d'énergie électrique », Mémoire de Magister, Université Joseph Fourier, Grenoble 2003.