



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique



Université Ahmed Draïa Adrar
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département des Sciences et la Technologie

**Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention d'un Diplôme de
Master Académique en Réseaux Electriques**

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Réseaux Electriques

Thème

**Contrôle des tensions d'un Réseaux de
Transport par Les Dispositifs FACTs
« STATCOM »**

Présenté par : SENNI Amina

Soutenu le 19/06/2018

Devant le jury :

Président: Harrouz Abdelekader

Univ. Adrar

Promoteur : Hamouda Messaoud Pr

Univ. Adrar

Examineur : DAHBI Hassan

Univ. Adrar

Année Universitaire : 2017/2018



Remerciements

Je remercié Dieu de nous avoir donné la force physique
et morale pour accomplir ce travail.

je remercié Mr : HAMOUDA Messaoud

Professeur à l'université d'Adrar pour
son encadrement, ses directives et sa disponibilité

J'adresse mes chaleureux remerciements aux membres
du jury :

❖ HARROUZ Abdelkader

❖ DAHBI Hassan

Je souhaite également à remercier tous les enseignants
qui ont participé à ma formation pendant tout le cycle
universitaire.

Dédicace



JE DÉDIÉE CE TRAVAIL À :

❖ Ma Mère,

❖ A mon Père,

❖ A mes frères

Et à tous mes Amis Merci à tous

Nomenclature

V_s :Tension de départ (source)

V_r :Tension d'arrivée

X_s :impédance série de la ligne

P_r : puissance active d'arrivée

Q_r :puissance réactive d'arrivée

P_s :puissance active de départ

Q_r : puissance réactive de départ

θ ; déphasage entre tension d'arrivée et de départ

X_c : impédance de capacité

I_{sh} :Courant (shunt) injecté par le STATCOM

P_{sh} :Puissance active délivrée par le STATCOM

Q_{sh} :Puissance réactive délivrée par le STATCOM.

δ_{sh} : Déphasage du courant injecté par le STATCOM.

V_{sh} :Tension (shunt) injectée par le STATCOM.

P_u : per unite

$I_{bus} ; I_i$:courant de Nœud

$V_{bus} ; V_i$: tension de Nœud

Y_{ij} : admittance de l'élément entre les nœuds i et j.

Liste des abréviations

FACTS : Flexible Alternating Current Transmission Systems

GTO : Gate Turn Off

STATCOM : Static Synchronous Compensator

SVC : Static Var Compensator

UPFC : Unified Power Flow Controller

SSSC : Static Synchronous Series Capacitor

IGBT : Insulate Gâte Bipolaire Transistor

RCT : réactance commandée par thyristor

TCR : thyristor controlled reactor

TSC : thyristor capacitor

CCT : condensateur commutés par thyristor

DVR : **D**ynamic **V**oltage **R**estorer

TCSC : Compensateur Série Contrôlé par Thyristors

TCPAR: Thyristor Controlled Phase Angle Regulator

Sommaire

Introduction Générale.....	10
Chapitre I	4
Généralité sur les Réseaux Electriques	4
I.1 Les réseaux électriques:	5
I.1.1 Le transport et la répartition:.....	5
I.1.2 Distribution	6
I.2 Les problèmes dans les réseaux électriques:	6
I.2.1 Variations de fréquence	6
I.2.2 Creux de tension et coupures brève:.....	7
I.2.3. Chute de tension:.....	7
I.2.4 Déséquilibre de tension:.....	8
I.2.5. Puissance réactive:.....	9
I.3 Les système FACTs :	11
I.3.1 Définition des FACTs :	11
I.3.2 Classification des dispositifs FACTs:.....	11
I.3.2.1 Les dispositifs parallèles (shunt) :	13
I.3.2.2 Compensateur série:.....	16
I.3.2.3 Compensateurs hybrides série – parallèle :.....	18
I.6 Conclusion:	21
Chapitre II	22
les problèmes de répartition de charge	22
II.1 Introduction.....	23
II. 3 Chute de tension dans une ligne :	26
II.4- Modélisation de ligne électrique :	26
II.5- Calcul des matrices admittance et impédance :	28
II.5.1 Dérivation directe de la matrice admittance :	28
II.5-2- Les Contraintes dans les réseaux électriques :.....	29
II.5-2-1-Contraintes d'équilibre entre la production et la consommation :	29
II. 5.2.2 Contraintes sur les modules de la tension :	30
II.6 Contraintes sur la capacité de transit de la ligne :	30
II.7. Ecoulement de puissance.	31
II.7.1. Définition :.....	31

II.7.2. Calcul de l'écoulement de puissance :	31
II.8 Techniques de calcul d'écoulement de puissance :.....	32
II.8.1 Méthode itérative de Gauss-Seidel (G-S) :	32
II.8.2 Application de la méthode de Gauss- Seidel :.....	32
2.8.2 Méthode de Newton- Raphson :.....	34
Chapitre III	39
Etude d'un STATCOM	39
III.1 Introduction:	40
III.2 Définition du STATCOM:	40
III.3 Structure des STATCOM sur les réseaux de transport :	40
III.4 Principe de fonctionnement:.....	41
III.5 Etude de l'écoulement de puissance en présence du STATCOM:	44
III.7 Analyse du réseau sans compensation :.....	46
III.8 Discussion des résultats:	47
III.9 Analyse de réseau avec STATCOM :	47
III.9 Discussion des résultats:	49
III.10 Conclusion :	50
Conclusion général	51
<i>Bibliographie</i>	54
Annexes	57

LISTE DES FIGURES

CHAPITER I

Figure (I-1) :structure de base d'un réseau d'énergie électrique	05
Figure (I-2):variation de fréquence.....	07
Figure(I-3):creux de tension et coupure brève.....	07
Figure (I-4-a): Cas d'une consommation alimentée par une ligne depuis une centrale....	08
Figure (I-4-b): Cas d'une forte consommation alimentée par une ligne depuis une centrale	09
Figure (I-5): Déséquilibre de tension.....	10
Figure (I-6) : les surtensions transitoires.....	10
Figure (I-7): Exemple de surtension.....	11
Figure(I-8): Les grand catégories des dispositifs FACTs.....	13
Figure (I-9): Schéma équivalent d'un SVC.....	14
Figure(I-10): schéma du SVC avec TCB.....	14
Figure(I-11): Schéma équivalent de STATCOM.....	15
Figure(I-12) : Schéma de la Structure d'un DVR.....	16
Figure(I-13): Structure d'un TCSC.....	16
Figure(I-14): Structure de TSSC.....	17
Figure(I-15): Structure d'un TCSR.....	17
Figure (I-16): Schéma équivalent d'un SSSC.....	18
Figure (I-17): Transformateur déphaseur.....	19
Figure(I-18): Schéma équivalent d'un UPFC.....	19
Figure (I-19): Schéma équivalent d'un IPFC.....	20

CHAPITER II

Figure (II-1) : Schéma équivalent monophasé d'un réseau électrique.....	23
Figure (II-2) : diagramme de tension.....	24
Figure(II-3): la variation de la puissance active et réactive en fonction de l'angle de transport...25	
Figure (II-4) :la modélisation de la ligne de transport	27
figure(II-5):méthode de gausse seidel.....	34
Figure (II-6) : Méthode de Newton- Raphson.....	34

CHAPTER III

Figure(III-1): Structure de base d'un STATCOM couplé au réseau.....	40
Figure(III-2): Représentation unifilaire du STATCOM TVA ± 100 MVAR.....	42
Figure (III-3): Schéma de principe d'un STATCOM.....	42
Figure (III-4): Schéma du STATCOM couplé au réseau électrique.....	44
Figure(III-5-a): Fonctionnement capacitif	45
Figure(III-5-b): Fonctionnement inductif.....	46
Figure (III-6): Réseau d'étude a6noeud.....	46
Figure(III-7):les tensions nodal sans compensation.....	47
Figure(III-8):chute de tension nodal sans compensation.....	48
Figure(III-9):tension nodal avec statcom $Q_{sh} = -0.8801$ pu.....	48
Figure (III-10):chute de tension avec statcom $Q_{sh} = -0.8801$ pu.....	48
Figure(III-11):comparaison entre chute de tension sans et avec statcom	49
Figure(III-12):comparaison entre chute de tension sans et avec statcom $Q_{sh} = -0.9322$ pu.....	49

Liste des Tableaux

Tableau (I-1): Contrubition des systèmes FACTs.....	20
Tableau (II-1):Les variables au niveau des différents types de jeu de barres.....	34
Tableau (III-1) : Données de lignes.....	41
Tableau(III-2) : Données de nœuds.....	45
Tableau (III-3):tension et chute de tension nodal sans compensation.....	46

Introduction Générale

Introduction générale

L'énergie électrique est un besoin vital pour l'homme dans sa vie de tous les jours. Elle est l'œuvre de l'implication étroite du maître qu'est l'homme intelligent et la machine qu'est l'esclave. Tous les deux se protègent mutuellement. Le maître ne fait pas confiance à la bête qui est la machine et développe des dispositifs de protection qui entrent dans le cadre de la protection de personnels et de la machine.

Durant les trois dernières décennies du 20^{ème} siècle, l'entreprise a subi une mutation en profondeur. Des changements notables ont modifié l'ensemble des composantes des systèmes industriels. Les éléments à l'origine de cette évolution sont nombreux : évolution rapide et importante de la technologie, rapprochement des frontières et des cultures, ouverture d'un marché au niveau planétaire, mondialisation de l'économie...

L'industrialisation et la croissance de la population sont les premières factures pour lesquels la consommation de l'énergie électrique augmenter régulièrement. Ainsi, pour avoir un équilibre entre la production et la consommation, il est à première vue nécessaire d'augmenter le nombre de centrales électrique, des lignes, des transformateur etc., ce qui implique une augmentation de coût et une dégradation du milieu naturel. Par conséquent, il est aujourd'hui important d'avoir des réseaux maillés et de travailler dans la zone proche des limites de stabilité afin de satisfaire ces demandes. Avec la dérégulation du marché de l'électricité, on s'attend irrémédiablement à une augmentation du nombre des échanges non planifiés. Si ces derniers ne obéissent pas aux lois de Kirchhoff, ne sont pas contrôlés, des problèmes peuvent survenir dans les réseaux certaines lignes situées sur les chemins privilégiés peuvent être surchargées. Dès lors, il est intéressant pour le gestionnaire de réseaux de contrôler ces transites afin d'exploiter les réseaux de manière plus efficace et plus sûre.

Depuis de nombreuses années, le développement de l'énergie électrique dans le monde a conduit à un vaste système de production, transport et distribution d'énergie électrique. Ce système a été en très grande partie conditionné par une contrainte très forte : l'énergie électrique étant très difficilement stockable, elle doit être acheminée en temps réel des centres de production vers les consommateurs finaux, industriels ou domestiques.

Le système d'énergie comprend des sites de production (centrales nucléaires, thermiques, hydrauliques, ou production décentralisée : éoliennes, petite hydraulique, cogénération...), et des lieux de consommation (communes, entreprises...), reliés par le réseau électrique (transport et distribution). Ce dernier a pour rôle d'acheminer

Introduction générale

l'énergie vers les lieux de consommation, avec des étapes d'élévation et de baisse du niveau de tension dans des postes de transformation. La tension à la sortie des grandes centrales est transformée pour limiter les pertes d'énergie sous forme de chaleur dans les câbles. Ensuite, la tension est progressivement réduite au plus près de la consommation, pour arriver aux différents niveaux de tension auxquels sont raccordés les consommateurs.

Le secteur énergétique connaît une évolution sans précédent. Les clients sont de plus en plus exigeants, la conjoncture économique impose de faire le plus avec le moins, et de nouveaux concurrents apparaissent chaque jour. Suivre ce rythme effréné est, selon les distributeurs, un véritable défi et une immense opportunité. Les distributeurs d'énergie électrique s'efforcent de garantir la qualité de la fourniture d'électricité. Les premiers efforts se sont portés sur la continuité de service afin de rendre toujours disponible l'accès à l'énergie chez l'utilisateur.

La réalisation des nouvelles lignes de transport d'énergie électrique permet d'assurer la continuité de service en électricité avant tout, mais elle induit aussi des coûts d'exploitation. Elle se dirige sur la recherche de faisabilité, la configuration, l'exploitation, le rendement des réseaux de transport. Ils peuvent également préparer des estimations de coût et de temps ainsi que des devis de réalisation. D'autre part les évolutions techniques et réglementaires qui ont eu lieu ces dernières années dans le domaine énergétique amènent à revisiter la manière de concevoir et de gérer les réseaux de transport et de distribution de l'électricité. Les exigences de contrôle des flux énergétiques, l'insertion de systèmes de production non conventionnels et enfin la nécessité d'une fourniture d'électricité non seulement disponible mais de qualité, sont autant de corollaires de cette évolution.

Par ailleurs, une évolution d'interrupteurs à la base de semi-conducteur a permis un meilleur contrôle d'écoulement de la puissance et du système électrique entier. Depuis une vingtaine d'années, de nombreux semi-conducteurs ont été développés, et grâce à eux les dispositifs d'électroniques de puissance à grande vitesse de réponse, récemment développés et connus sous l'appellation FACTS (**F**lexible **A**lternative **C**urrent **T**ransmission **S**ystem) pour le contrôle des réseaux. 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

Introduction générale

et les tensions mieux tenues, ce qui permettra d'augmenter les marges de stabilité ou de tendre vers les limites thermiques des lignes.

Des exemples de FACTS sont le SVC (Static Var Compensator), le STATCOM (STATIC COMPensator), le TCSC (Tyristor Controlled Series Compensators), le SSSC (Static Synchronous Series Compensator), l'UPFC (Unified Power Flow Controller). Ces dispositifs agissent sur la tension et/ou l'impédance de la ligne en injectant la quantité de la puissance active et/ou réactive nécessaire à la compensation. Le système UPFC combine à la fois la compensation série et la compensation shunt. C'est le dispositif le plus puissant, dans la mesure où il est permet de régler les trois grandeurs électriques du réseau.

L'objectif de notre travail est le contrôle des tensions de réseau électrique de transport par les dispositifs FACTs (statcom) , on utilise la méthode de gausse Seidel pour l'étude d'une réseau à six nœuds en programme MATLAB.

Ce projet est organisé en trois chapitres :

Dans le premier chapitre, nous décrivons d'une façon générale les réseaux électriques (les types, les problèmes dans les réseaux). Ainsi que les différentes moyennes de compensation (série, shunt, hybride).

Dans le second chapitre on présente la modalisation des réseaux, les problèmes de la répartition des charges et les méthodes pour résoudre ces problèmes.

Le troisième chapitre traite le dispositif STATCOM et on présente le modèle mathématique d'un STATCOM placé dans la ligne.

Ce travail se termine par une conclusion générale dans laquelle on résume les principaux résultats obtenus et on énumérera les perspectives à ce travail

Chapitre I

Généralité sur les Réseaux Electriques

I.1 Les réseaux électriques:

L'énergie électrique est transportée et distribuée par des lignes aériennes et des câbles souterrains ou sous-marins du point de sa production vers celui de son utilisation, constituant ce qui est appelé un réseau électrique. Ces réseaux fonctionnent en courant alternatif à la fréquence de 50Hz, et permettent à l'aide de transformateurs de choisir le niveau de tension le plus adapté techniquement et économiquement, à la production, au transport, à la distribution et à la consommation de l'énergie électrique. En outre, la maîtrise des court-circuités et la coupure des courants en cas de défaut sont nettement plus aisées à réaliser en courant alternatif qu'en courant continu. Les réseaux électriques modernes en courant alternatif sont organisés en deux types, d'une part, les réseaux de transport et de répartition à tension élevée (>30kV jusqu'à 400kV) et à structure maillée, d'autre part, les réseaux de distribution à tension typiquement inférieure à 30kV et à structure radiale [1].

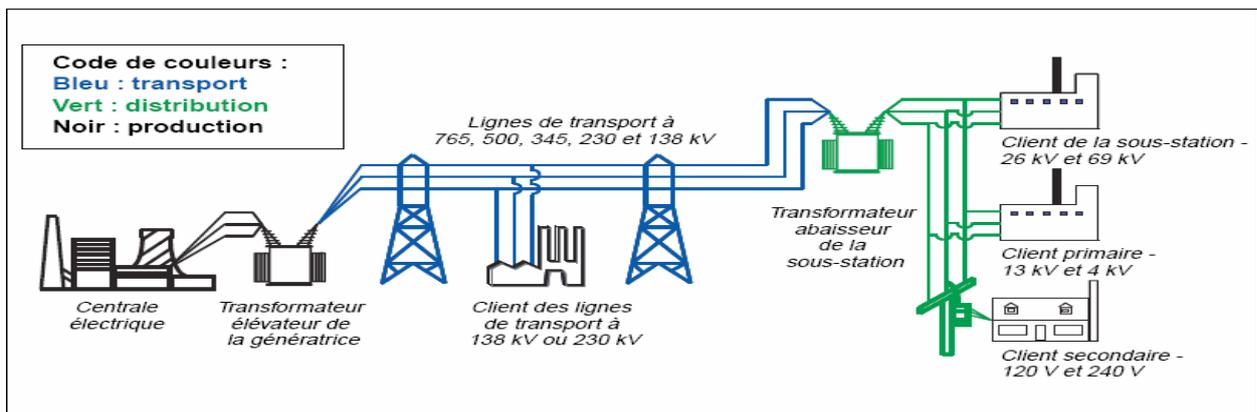


Figure (I-1) : structure de base d'un réseau d'énergie électrique .

I.1.1 Le transport et la répartition:

Le rôle du réseau de transport est d'acheminer l'énergie électrique à partir des centrales situées à différents endroits du territoire jusqu'au réseau de distribution qui en dernier lieu alimente les charges. Les lignes de transport assurent aussi l'interconnexion des réseaux régionaux, ce qui permet, non seulement d'assurer une répartition économique de l'énergie électrique dans les régions elles-mêmes dans les conditions normales d'exploitation, mais aussi, un transfert interrégional de l'énergie, dans les situations d'urgence.

Les niveaux de tension utilisés pour le transport diffèrent d'un pays à un autre mais une tendance à une normalisation existe. Font partie du réseau de transport toutes les lignes dont le niveau de tension est supérieur à 60 kV. En Algérie, les tensions usitées pour le transport

sont de 90 kV, 150 kV, 220 kV et en cours de réalisation 400 kV. Aux Etats-Unis, les tensions sont normalisées à 69 kV, 115 kV, 138 kV, 161 kV, 230 kV, 345 kV, 500 kV, et 756 kV .[2]

Les lignes de transport dont la tension est supérieure à 500 kV sont dites à ultra haute tension, celles dont la tension est supérieure à 150 kV, mais inférieure à 500 kV, sont dites à très haute tension (THT). Ces seuils varient d'un pays à un autre. Les lignes de transport aboutissent toutes à des sources dites de répartition. Ces dernières permettent d'assurer la commutation des lignes d'une part, et d'abaisser la tension à des niveaux permettant la répartition de l'énergie électrique d'autre part. Il est à noter que de très grands centres de consommation industriels sont directement alimentés à partir du réseau de transport. [2]

I.1.2 Distribution

Le réseau de distribution est la partie de réseau reliant les postes sources de distribution aux postes de consommateurs. Les lignes du réseau primaire de distribution sont d'un niveau de tension compris entre 5.5 kV et 36 kV et alimentent les charges d'une zone géographique bien précise. Certaines petites unités industrielles sont directement alimentées par le réseau primaire moyen tension (MT). Le réseau secondaire de distribution est généralement à basse tension pour un usage commercial et résidentiel.

En Algérie, la basse tension est de 380/220V triphasé-4 conducteurs. Dans certains pays, elle est encore en triphasé 220/127 V- 4 conducteurs. Le réseau de distribution est à la fois, aérien et souterrain. Ce dernier a connu ces dernières décennies un accroissement rapide qui fait qu'il représente aujourd'hui la majeure partie du réseau de distribution. [2]

I.2 Les problèmes dans les réseaux électriques:

Il existe certaines limitations à la quantité d'énergie transmise par une ligne de transport. Les limites de transmission sont imposées par réseau ou par les contraintes physiques et sont donc sujettes à un certain nombre de facteurs pour le fonctionnement d'un système électrique.

I.2.1 Variations de fréquence

Les variations de fréquence sont très faibles (moins de 1 %) au sein du réseau synchrone européen en régime normal de fonctionnement et ne causent généralement pas de préjudice aux équipements électriques ou électroniques.

La situation peut être différente dans un petit réseau isolé. Certains processus industriels nécessitent un réglage très précis de la vitesse des moteurs et peuvent subir des en cas d'alimentation par un groupe de secours mal conçu[3].

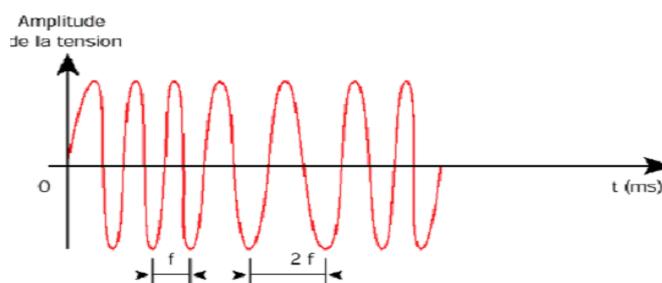


Figure (I-2):variation de fréquence

I.2.2 Creux de tension et coupures brèves:

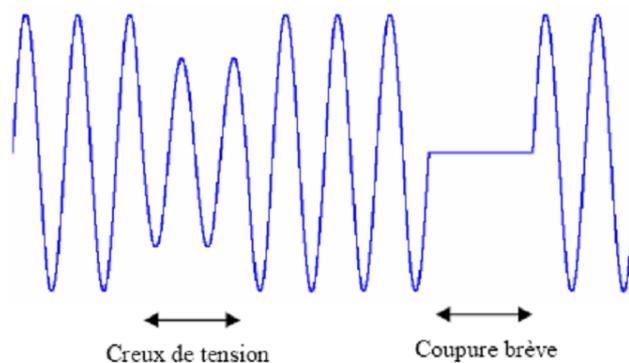
Les creux de tension et les coupures brèves sont principalement causés par des phénomènes conduisant à des courants élevés qui provoquent à travers les impédances des éléments du réseau une chute de tension d'amplitude d'autant plus faible que le point d'observation est électriquement éloigné de la source de la perturbation.

Les creux de tension et les coupures brèves ont différentes causes :

- des défauts sur le réseau de transport (HT) de distribution (BT et MT) ou sur l'installation elle-même [4].

Les creux de tension et les coupures brèves sont causés par des phénomènes aléatoires.

Ces phénomènes concernent soit le réseau du distributeur, soit le réseau de l'utilisateur [4].



Figure(I-3):creux de tension et coupure brève

I.2.3. Chute de tension:

Lorsque le transit dans une ligne électrique est assez important, la circulation du courant dans la ligne provoque une chute de la tension figures (I-4-a) et (I-4-b) La tension est alors plus basse au bout de ligne qu'en son origine, et plus la ligne est chargée en transit de puissance, plus la chute de tension sera importante.

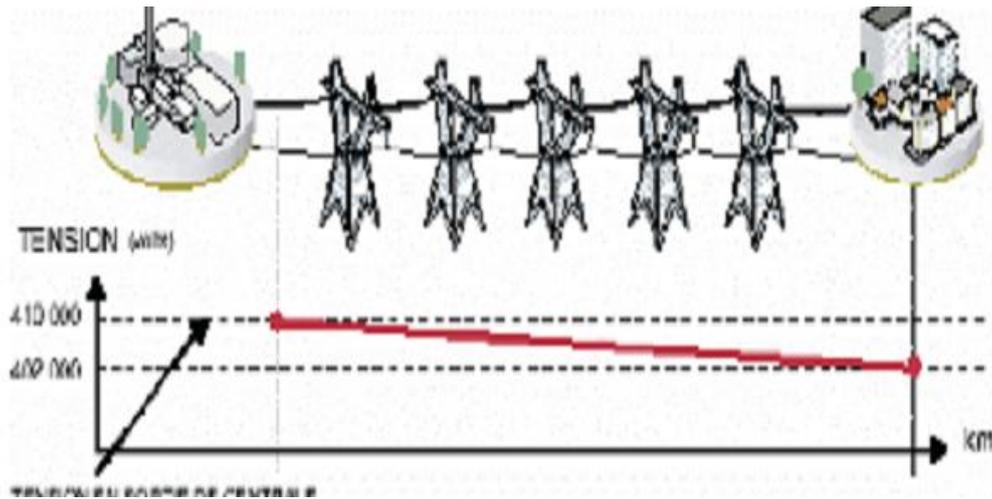


Figure (I-4-a): Cas d'une consommation alimentée par une ligne depuis une centrale

Si la consommation double, la chute de tension double

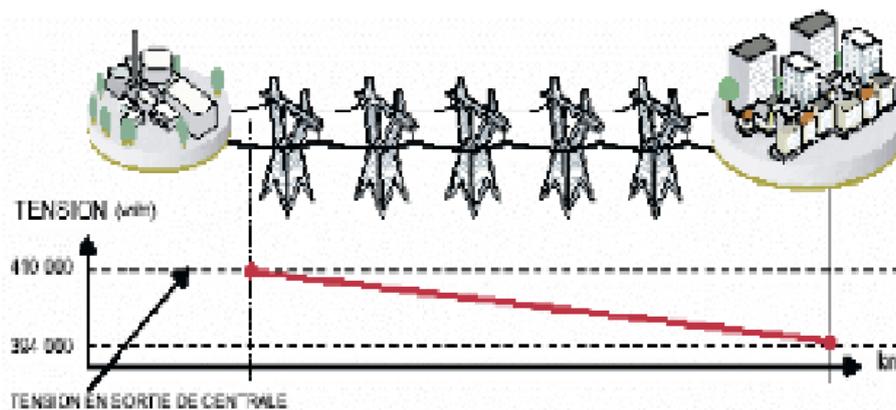


Figure (I-4-b): Cas d'une forte consommation alimentée par une ligne depuis une centrale

Un réseau dans lequel la consommation est éloignée de la production, présentera un profil de tension différent de celui d'un réseau dans lequel production et consommation sont uniformément réparties . Chaque centrale impose la tension à sa sortie, et la tension évolue dans le réseau en fonction de la consommation alimentée.

C'est pourquoi dans les réseaux maillés THT, la tension est différente suivant l'endroit où l'on se trouve. A la pointe de consommation, la tension est forte aux nœuds du réseau où les centrales débitent, et relativement basse aux points de consommation éloignés de centrales.[5]

I.2.4 Déséquilibre de tension:

Un récepteur électrique triphasé, qui n'est pas équilibré et que l'on alimente par un réseau

triphase équilibré conduit à des déséquilibres de tension dus à la circulation des courants non équilibrés dans les impédances du réseau. Ceci est fréquent pour les récepteurs monophasés basse tension. Mais cela peut également être engendré, à des tensions plus élevées, par des machines à souder, des fours à arc ou par la traction ferroviaire .

Un système triphasé est déséquilibré lorsque les trois tensions ne sont pas égales en amplitude et/ou ne sont pas déphasées les unes des autres de 120° [5][1].

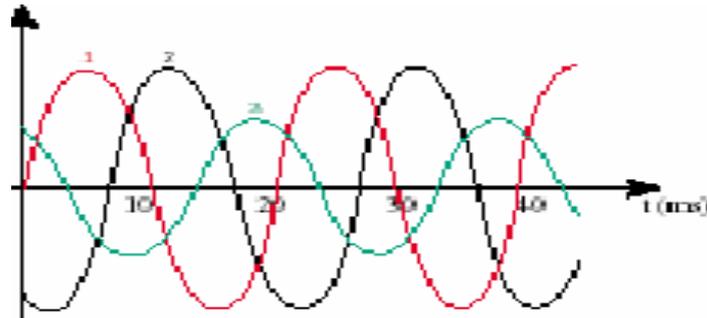


Figure (I-5): Déséquilibre de tension

I.2.5. Puissance réactive:

Le transport de la puissance réactive à longue distance présente une série d'inconvénients tels-que les chutes de tension considérables, les pertes de ligne par effet joule et moins de capacité pour transporter la puissance active.

A l'exception de ces aspects purement statiques, la puissance réactive peut jouer un grand rôle dans d'autres aspects dynamiques, tels-que les fluctuations de tension produites par les variations soudaines des charges et une meilleure marge pour la stabilité.

Actuellement, avec la complexité des réseaux, la participation des générateurs dans la production de l'énergie réactive est devenue insuffisante. Elle est générée en grande partie par les moyens de compensation existants ou en période creuse, par les lignes de transport.

Afin de garantir une bonne qualité d'énergie il est nécessaire de satisfaire l'équilibre offre demande de l'énergie réactive, de fournir une tension aussi régulière que possible et de respecter un certain nombre de contraintes techniques.[1]

I.2.6 Surtensions:

Toute tension appliquée à un équipement dont la valeur de crête sort des limites d'un gabarit défini par une norme ou une spécification est une surtension. Les surtensions sont de trois natures;

- Temporaires à fréquences industriels
- De manœuvre
- D'origine atmosphérique (foudre)

Elles peuvent apparaître

- En mode différentiel (entre conducteurs actifs ph/ph – ph/neutre)
- En mode commun (entre conducteurs actifs et la masse ou la terre).[6]

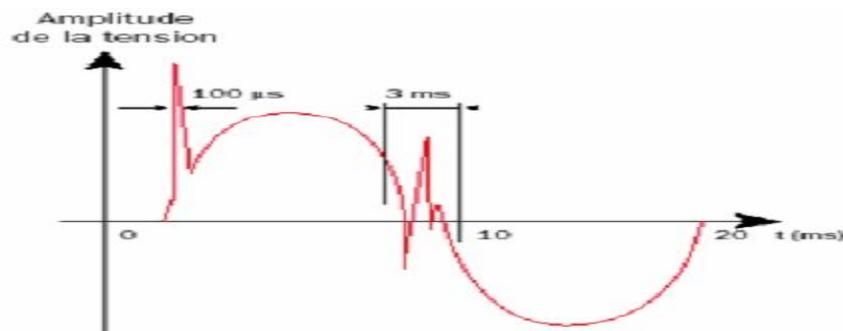


Figure (I-6) : les surtensions transitoires

Les surtensions correspondent à des augmentations de l'amplitude de la tension de 1.1Pu à 1.8 pu Les surtensions sont moins fréquentes que les creux de tension et sont généralement dues à des courts circuits dans les systèmes à neutre isolé qui engendrent à la fois des creux de tension et des surtensions. En cas de court-circuit monophasé dans un tel système, les deux phases non concernées par le défaut peuvent prendre une valeur pouvant aller jusqu'à 1.73 pu c'est à dire la tension composée. En cas de court-circuit biphasé, la phase non affectée par le défaut se caractérise par une surtension qui peut aller jusqu'à 1.5pu.[6]

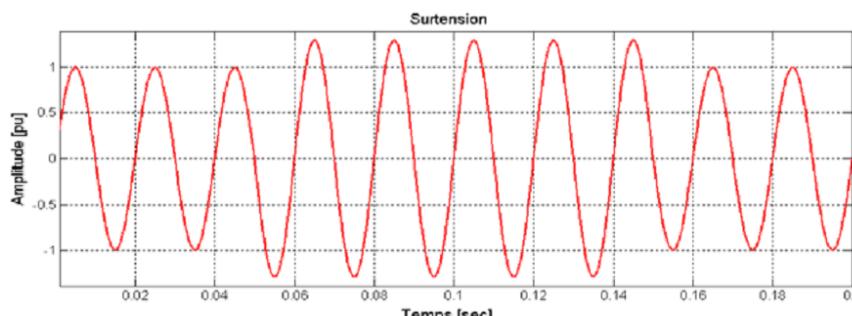


Figure (I-7): Exemple de surtension

Des surtensions peuvent également être provoquées par des phénomènes d'origine atmosphérique (foudre), par des déclenchements de charges importantes, par des mauvais fonctionnements de régulateurs de tensions, par ferrorésonance ou par des manœuvres sur le réseau. Ce type de surtensions se caractérise généralement par une durée très brève et s'assimile le plus souvent à des transitoires[6].

I.3 Les système FACTs :

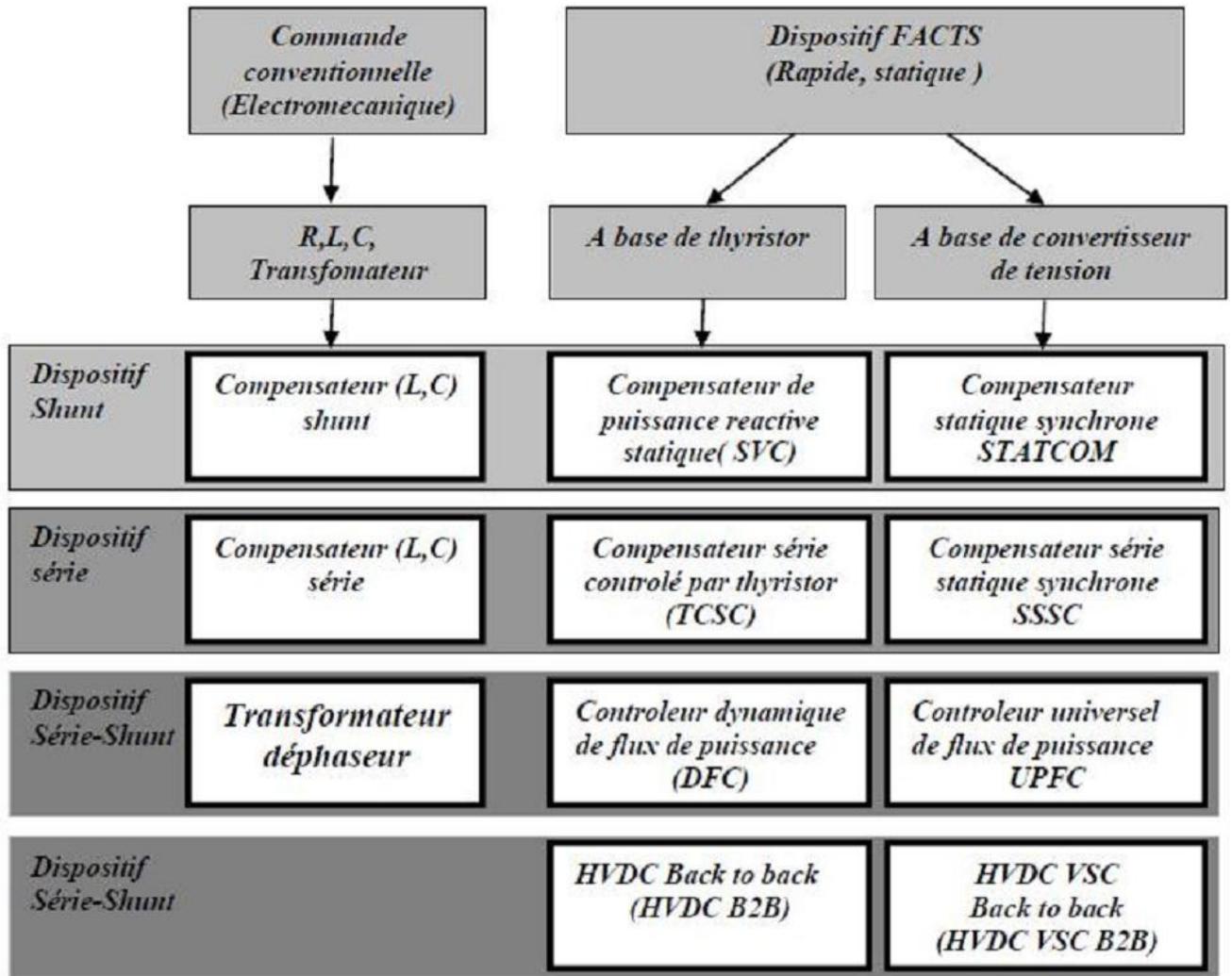
I.3.1 Définition des FACTs :

Les FACTS sont des dispositifs statiques, utilisés pour la transmission et la conversion de l'énergie électrique alternative ou continue. Ils sont composés de transformateurs, d'éléments passifs (capacités, inductances), de composants de puissance (de type thyristor ou transistor) et d'un contrôle spécifique à leur application. Leur fonctionnement repose sur le principe de la compensation parallèle, la compensation série ou la combinaison des deux afin de réaliser les fonctions suivantes[7].

- Augmenter la stabilité réseau en cas de défaut ou pendant les phases transitoires,
- Contrôler dynamiquement la tension réseau et réduire les perturbations,
- Augmenter et contrôler le transfert d'énergie d'une source à une autre,
- Amortir les oscillations entre les générateurs et les résonances sub synchrones qui apparaissent entre la turbine et la génératrice électrique.

I.3.2 Classification des dispositifs FACTs:

La figure(I-8)[7],représente les grandes catégories des dispositifs FACTS de contrôle des réseaux électriques. La colonne sur la gauche contient les systèmes conventionnels constitués de composant de base R L C et transformateurs fixes (compensation fixe) ou variable commandés par des interrupteur mécaniques. Les dispositifs FACTS contiennent également les mêmes composants mais rapidement commander avec des interrupteurs statiques et convertisseurs de l'électronique de puissance. [8]



Figure(I-8): Les grand catégories des dispositifs FACTS

La colonne gauche présente les contrôleurs FACTS à base des thyristors ou bien des convertisseurs à thyristor tel que le SVC et le TCSC qui sont connu depuis plusieurs dizaines d'années à titre de compensateurs shunt et série respectivement et qui ont prouvé leur fiabilité dans le contrôle des réseaux.

Les dispositifs dans la colonne droite, sont des FACTS les plus avancées avec des convertisseurs de source de tension VSC (voltage source converter) à base des interrupteurs statiques sophistiqués IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistors) ou bien les IGCT (Insulated Gate Commutated Thyristors) tel que le STATCOM, SSSC et l'UPFC. Ces VSC fournissent ou injectent une tension totalement contrôlable en amplitude et en phase en série ou en parallèle dans le réseau. Chaque élément de ces colonnes peut être structuré selon sa connexion au réseau.[8]

I.3.2.1 Les dispositifs parallèles (shunt) :

En effet, tous les compensateurs parallèles injectent du courant au réseau via le point de raccordement. Quand une impédance variable est connectée en parallèle sur un réseau, elle consomme (ou injecte) un courant variable. Cette injection de courant modifie Les puissances actives et réactives qui transitent dans la ligne [1].

Les compensateurs parallèles les plus utilisés sont :

a) Compensateurs parallèles à basse thyristor :

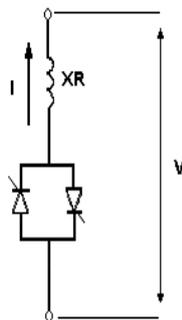
IL s'agit de :

- **TCR (Thyristor Controlled Reactor)**

Le TCR ou RCT : (Réactances Commandées par Thyristors), est une inductance branchée en série avec une valve à thyristors bidirectionnelles. La valeur de l'inductance est continuellement changée par l'amorçage des thyristors[1][9].

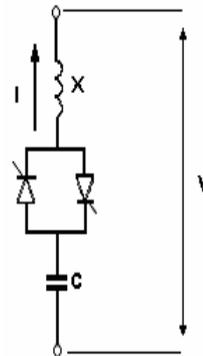
- **TSC (Thyristor Switched Capacitor)**

Dans le TSC ou CCT : (Condensateurs Commandés par Thyristor), les thyristors fonctionnent en pleine conduction[1][9][5].



TCR

Figure(I.9):structure de TCR



TSC

Figure(I.10):structure de TSC

- **SVC (Static Var Compensator)**

L'association des dispositifs TCR, TSC, bancs de capacités fixes et filtres d'harmoniques constitue le compensateur plus connu sous le nom de SVC (compensateur statique de puissance réactive) (CSPR).

Pour augmenter ou diminuer la tension d'une ligne de transport, on peut brancher un condensateur ou une inductance shunt qui génère ou absorbe de la puissance réactive. Cette manœuvre peut se faire automatiquement en utilisant un compensateur statique[9][1].

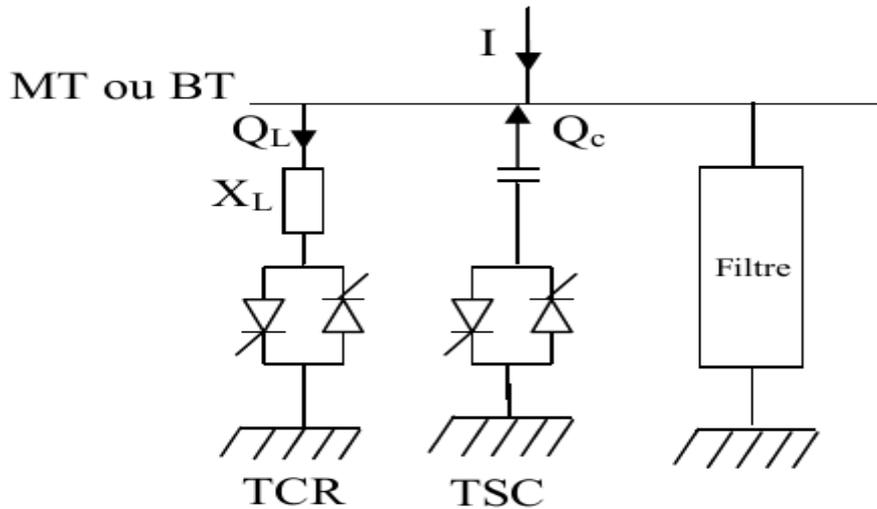
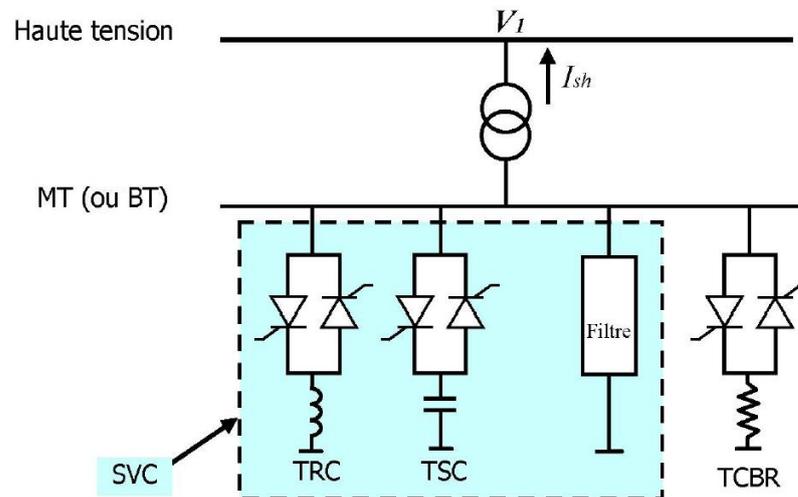


Figure (I-11): Schéma équivalent d'un SVC

- **TCBR** (Thyristor Control Breaking Resistor)

Ce type de compensateur se monte en parallèle, il est utilisé pour améliorer la stabilité du réseau. La figure(1-12) représente un TCBR en parallèle avec un SVC équipé d'un banc de condensateurs et d'un filtre d'harmonique[10]



Figure(I-11): schéma du SVC avec TCBR

- a) **Compensateurs parallèles à basse GTO(convertisseur de tension) :**

Il s'agit de :

- **STATCOM (STATIC COMPensator)**

Ce type de compensateur shunt (compensateur statique synchrone) a connu jusqu'à présent différentes appellations :

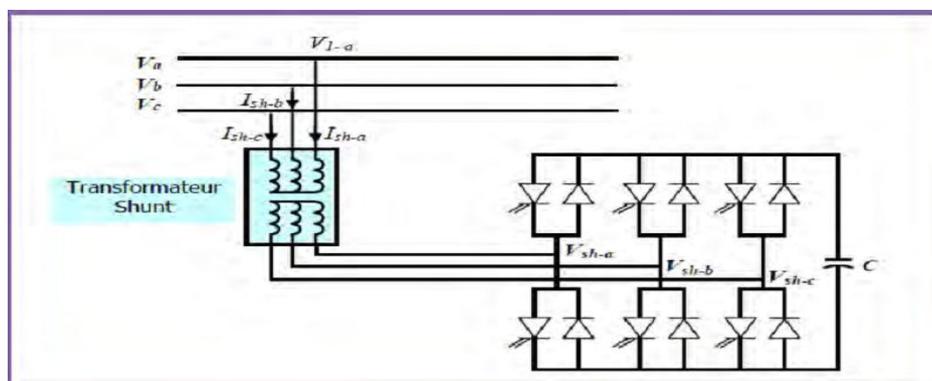
- ASVC (Advanced Static Var Compensator) ;
- SVG (Static Var Generator);
- SVClight;
- SVCplus.[10]

Le STATCOM présente plusieurs avantages:

- ✓ Un contrôle optimale de la tension, les phases sont contrôlées séparément pendant les perturbations du système ;
- ✓ Bonne repense à faible tension : le STATCOM est capable de fournir son courant nominal, même lorsque la tension est presque nulle ;
- ✓ Bonne repense dynamique c.à.d. le système reprend instantanément [9].

C'est en 1990 que le premier STATCOM a été conçu. C'est un convertisseur de tension à base des thyristors GTO ou IGBT alimenté par des batteries de condensateurs. L'ensemble est connecté parallèlement au réseau à travers un transformateur de couplage. Le principe de ce type de compensateur est connu depuis la fin des années 70, mais ce n'est que dans les années 90 que ce type de compensateur a connu un essor important grâce aux développements des interrupteurs GTO de forte Puissance[8].

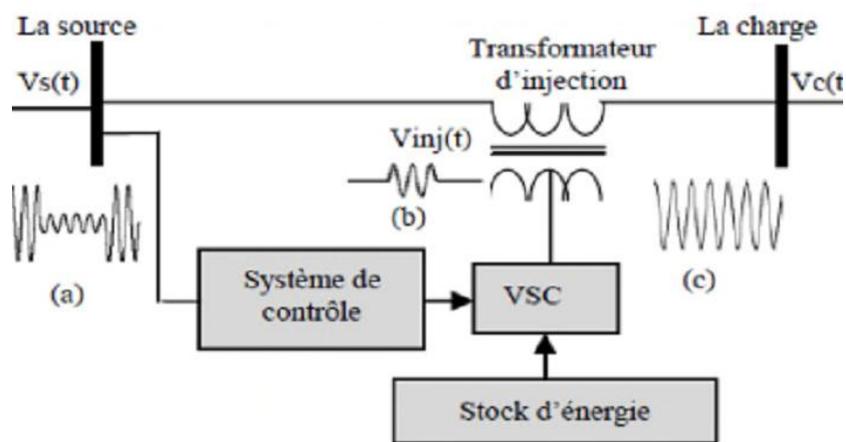
La figure (I-13) représente le schéma de base d'un STATCOM, où les cellules de commutation sont bidirectionnelles formées de GTO et de diodes en antiparallèle. Le rôle du STATCOM est d'échanger l'énergie réactive avec le réseau. Pour se faire, l'onduleur est couplé au réseau par l'intermédiaire d'une inductance de fuite du transformateur de couplage[5].



Figure(I-13): Schéma équivalent de STATCOM

b) Restaurateur dynamique de tension (DVR)

C'est l'un des plus importants dispositifs FACTS; similaire à un STATCOM mais avec une tension de sortie injectée en série dans la ligne, son schéma de principe est donné par la figure (1-13). Ce dispositif appelé aussi DVR (**D**ynamic **V**oltage **R**estorer) lorsque le condensateur est remplacé par une batterie à courant continu, il est utilisé généralement dans les réseaux de distribution afin de résoudre les problèmes de qualité d'énergie tels que les creux de tensions et maintenir ces dernières à des niveaux constants.[10]



Figure(I-14) : Schéma de la Structure d'un DVR

I.3.2.2 Compensateur série:

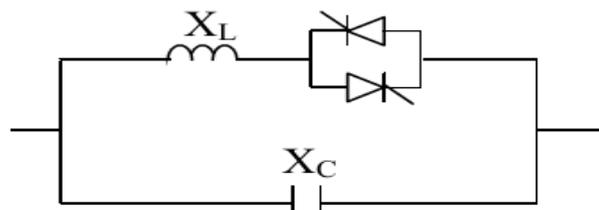
Ces dispositifs sont connectés en série avec le réseau et peuvent être utilisés comme une impédance variable (inductive, capacitive) ou une source de tension variable. En générale, ces compensateurs modifient l'impédance des lignes de transport en insérant des éléments en série avec celle-ci.[5]

a) Compensateurs séries à base de thyristors:

Les plus connus sont :

- **Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC):**

Le TCSC (Compensateur Série Contrôlé par Thyristors) est composé d'une inductance en série avec un gradateur à thyristors, le tout en parallèle avec un condensateur Figure (1-15).

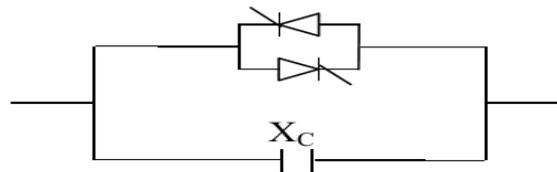


Figure(I-15): Structure d'un TCSC

Si les thyristors sont bloqués, le TCSC a une impédance fixe qui est celle du condensateur. Si les thyristors sont commandés en interrupteur électronique et en pleine conduction, l'impédance du TCSC est encore fixe et vaut l'impédance équivalente du condensateur en parallèle avec l'inductance.[5]

- **Thyristor Switched Série Capacitor (TSSC) :**

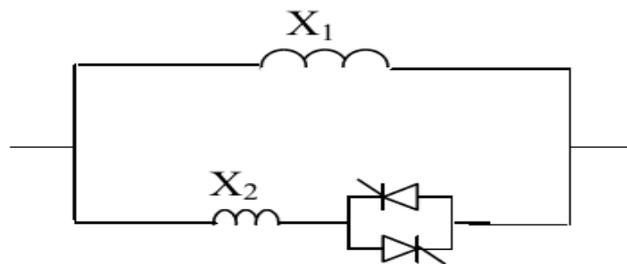
La différence entre ce système et le TCSC est que l'angle d'amorçage est soit de 90° soit de 180° .



Figure(I-16): Structure de TSSC

- **Thyristor Controlled Series Reactor (TCSR):**

TCSR est un compensateur inductif qui se compose d'une inductance en parallèle avec une autre inductance commandée par thyristor afin de fournir une réactance inductive série variable. Lorsque l'angle d'amorçage de la réactance commandé par thyristor est de 180 degrés, il cesse de conduire, et la réactance non contrôlable X_1 agit comme un limiteur de courant de défaut. Pendant que l'angle d'amorçage diminue en dessous de 180 degrés, la réactance équivalente diminue jusqu'à l'angle de 90 degrés, où elle est la combinaison parallèle de deux réactances.[5]



Figure(I-17): Structure d'un TCSR

b) Compensateur série à base de GTO Thyristors :

- **Le SSSC (Static Synchronous Series Compensator) :**

Ce type de compensateur série (Compensateur Synchrone Statique Série)est le plus important dispositif de cette famille. Il est constitué d'un onduleur triphasé couplé en série avec la ligne électrique à l'aide d'un transformateur .Son rôle est d'introduire une tension triphasée, à la fréquence du réseau, en série avec la ligne de transport[11].

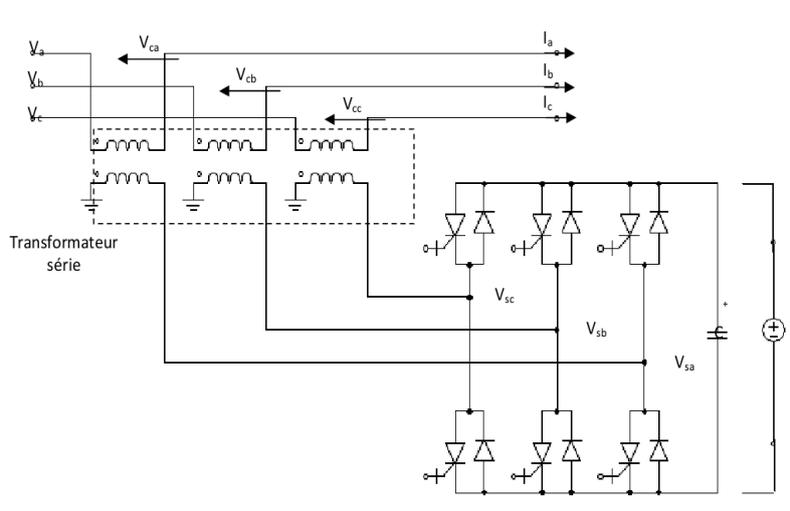


Figure (I-18): Schéma équivalent d'un SSSC

I.3.2.3 Compensateurs hybrides série – parallèle :

C'est une combinaison des dispositifs séries et shunts commandé d'une manière coordonné 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.[9]

a)Compensateurs commandés par thyristors :

• Transformateur déphaseur à thyristor :

Cetypedecompensateuraconnuplusieursappellations:TCPAR(ThyristorControlledPhaseAngle Regulator),TCPST(ThyristorControlledPhaseShiftingTransformer) Ce dispositif a remplacé le régleur en charge mécanique classique (LTC : Load Tap Changer) par un commutateur de prises de réglage à thyristors . 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 transformations.

Les deux transformateurs sont reliés par l'intermédiaire des thyristors. Le transformateur branché en série dans la ligne injecte une tension (V) en quadrature, réglable par changement de prises[12].

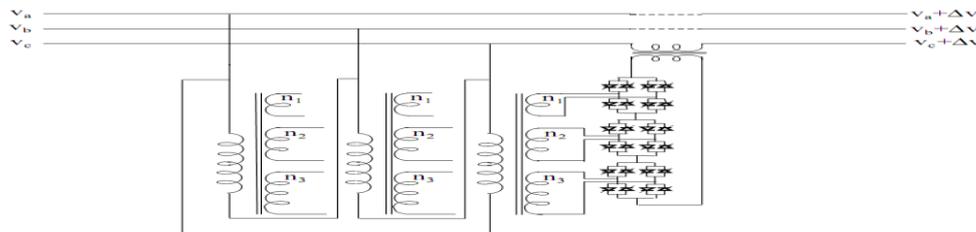
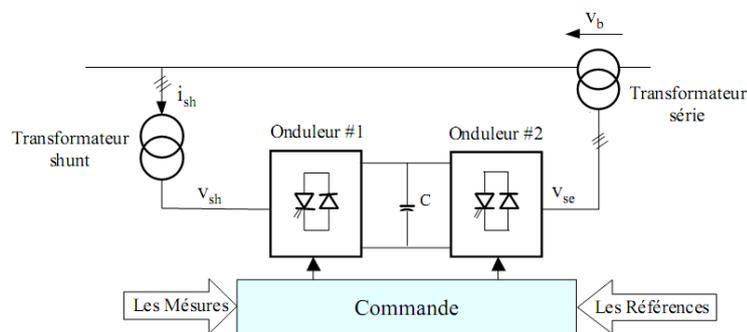


Figure (I-19): Transformateur déphaseur

b) **Compensateurs hybrides à base de GTO Thyristors :**

• **Contrôleur de Transit de Puissance Unifié (Unified Power Flow Controller-UPFC):**

L'UPFC est constitué de deux onduleurs de tension triphasés, l'un est connecté en parallèle au réseau par l'intermédiaire d'un transformateur et l'autre est connecté en série à travers un deuxième transformateur. Les deux onduleurs sont interconnectés par un bus continu représenté par le condensateur.[9]). Gygyi a présenté le concept de ce compensateur en 1990 . 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 déphasage[1].



Figure(I-19): Schéma équivalent d'un UPFC

• **IPFC (Interline Power Flow Controller):**

Appelé aussi contrôleur de transit de puissances entre lignes. Il contrôle les transits dans un système multi lignes, dans lequel au moins deux lignes possèdent une compensation série par SSSC. Il fournit la possibilité d'égaliser les transits de puissances actives et réactives sur les lignes ou de décharger une ligne en surcharge vers une autre moins chargée.[12]

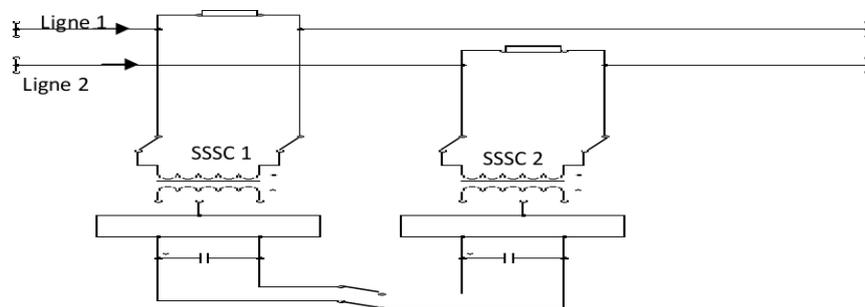


Figure (I-20): Schéma équivalent d'un IPFC

I.4 Coût des dispositifs FACTS :

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

Le coût d'une installation FACTS dépend principalement des facteurs tels que: les performances requises, la puissance de l'installation, le niveau de tension du système et la technologie du semi-conducteur utilisée.[13][5]

I.5 Contribution des systèmes FACTS dans les réseaux électriques:

L'application de compensateurs séries, shunts ainsi que les compensateurs hybrides dépend du problème à résoudre. Le tableau ci-dessous résume l'utilisation des FACTS dans les différents problèmes rencontrés dans les réseaux électriques [13].

Tableau (I-1): Contribution des systèmes FACTS

Sujet	Problème	Action corrective	Eléments FACTS
Limite des tensions	Chute de tension à une charge extrême	Fournir de l'énergie réactive	SVC, STATCOM
		Réduire la réactance de la ligne	TCSC
	Surtension suite à une ouverture d'une grande charge	Absorption de l'énergie réactive	SVC, STATCOM
	Surtension à charge réduite	Absorption de l'énergie réactive	SVC, STATCOM
	Chute de tension suite à un court-circuit	Fournir de l'énergie réactive	SVC, STATCOM
Limite thermique	Surcharge des lignes de transport	Augmenter la capacité de transport	TCSC, SSSC, UPFC
Ecoulement de puissance	Distribution de la puissance sur des lignes en parallèle	Ajuster la réactance de la ligne	TCSC, UPFC, SSSC
		Ajuster l'angle de transport	UPFC, SSSC
	Inverser l'écoulement de puissance	Ajuster l'angle de transport	UPFC, SSSC
Courts-circuits	Les courants intenses des courts-circuits	Limitation des courants des courts-circuits	TCSC, UPFC
Stabilité Puissance	transmissible limitée	Réduire la réactance de la ligne	TCSC, SSSC

I.6 Conclusion:

Dans ce chapitre nous avons présenté un état de l'art sur le fonctionnement des réseaux d'énergie électrique, on commençons par les types de réseaux , les problèmes dans les réseaux électrique qui limitent la puissance transmissible dans les ligne de transport .

En plus on a présenter les différents moyens de compensation (Dispositifs FACTS) ,qui utilise pour contrôle des réseaux électrique :contrôle de la chute de tension par les compensation shunt et le contrôle de puissance active et réactive en utilise les compensations séries.

Nous avons choisi d'étudier le STATCOM pour le contrôle de la tension du réseau d'énergie électrique.

Chapitre II

Les problèmes de répartition des charges

II.1 Introduction

La répartition des charges (load flow ou power flow) est l'un des principaux problèmes qui se pose aux gestionnaires d'un système de production - transport d'énergie électrique. Dans tout ensemble de centrales électriques alimentant un ensemble de consommateurs par l'intermédiaire d'un réseau de transport maillé, on doit déterminer la répartition des puissances fournies par ces centrales à un instant donné tout en respectant un ensemble de contraintes techniques et économiques.

La résolution du problème de la répartition des charges, nous permet de déterminer les valeurs du module et de la phase de la tension en chaque nœud du réseau pour des conditions de fonctionnement données. Ce qui nous permettrons de calculer les puissances transitées et générées et les pertes. Pour résoudre ce problème, il est nécessaire de déterminer les conditions de l'opération en régime permanent, d'un système de puissance, qui sont [1]

- ❖ La formulation d'un modèle mathématique approprié.
- ❖ La spécification d'un certain nombre de variables et de contraintes dans les nœuds du système.
- ❖ La résolution numérique du système.

II.2 Puissance transmise par une ligne électrique:

L'énergie électrique est transportée par des lignes électriques de capacités limitées à cause des limites thermiques des câbles, des tensions appliquées aux bornes et de l'angle de charge .

Les puissances transmises par une électrique radiale sont données par les formule qui suivent:[6][1]

Considérons la figure (II-1) représente une ligne électrique alimentant une charge (P+JQ) en admettant que la résistance de la ligne est très faible vis-à-vis de la réactance l'impédance est donc: $Z_s = jX_s$

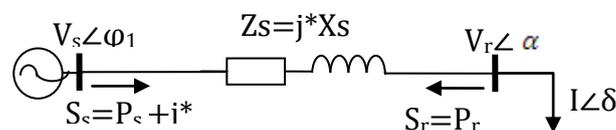


Figure (II-1) : Schéma équivalent monophasé d'un réseau électrique

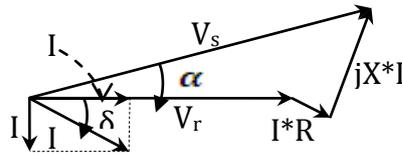


Figure (II-2) : diagramme de tension

En prenant la tension au borne de la charge comme référence des phases et en négligeant la résistance R_s , le courant sera en phase avec, la puissance demandé par la charge sera donnée par les équations qui suivent :

$$S_r = P_r + jQ_r = V_r * I_r \quad (\text{II-1})$$

Avec

$$I_r = \frac{V_s - V_r}{Z_s} \quad (\text{II-2})$$

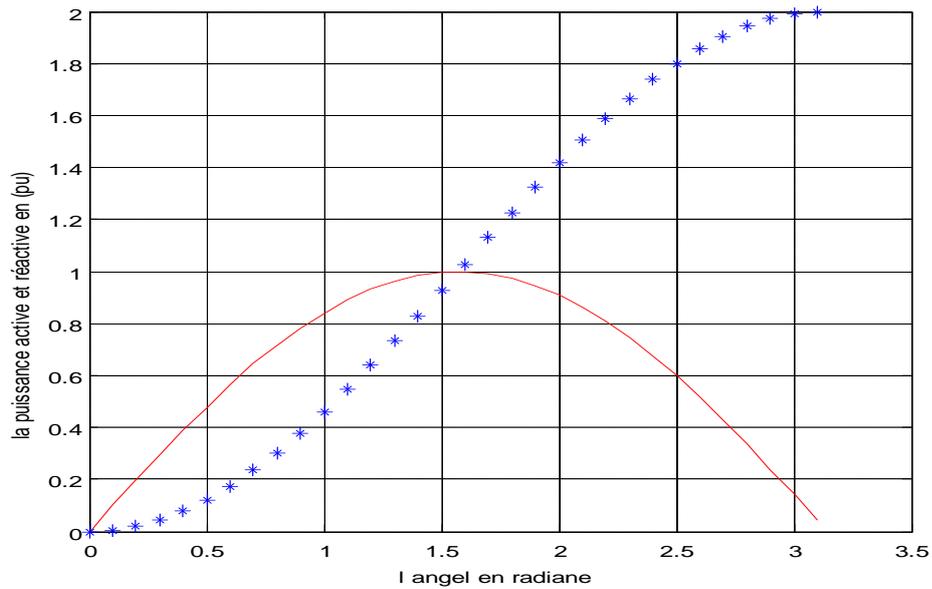
$$P_r = \frac{V_s * V_r}{X_s} * \sin \alpha \quad (\text{II-3})$$

$$Q_r = \frac{V_s * V_r}{X_s} \cos \alpha - \frac{V_r^2}{X_s} \quad (\text{II-4})$$

Après l'analyse des équations ci-dessus, nous pouvons remarquer que le flux de puissance active et réactive peut être commandé par le contrôle de l'angle de phase δ , ou par le contrôle de l'impédance, ou par le contrôle des tensions V_s et V_r [6][1]

La figure(2-3) ,montre la variation de la puissance active et réactive en fonction de déphasage de la tension V_s avec des paramètres suivantes $V_s = V_r = 1 \text{ pu}$, $X = 1 \text{ pu}$,

$$0 \leq \alpha \leq \pi$$



Figure(II-3): la variation de la puissance active et réactive en fonction de l'angle de transport[1]

La relation entre la tension au jeu de barre de charge et le courant de charge I est décrite Par la droite de ligne de charge du système qui définie par l'équation d'une droite qui passe par V_s et de pente $-Z_s$:

$$V_s - V_r = Z_r * I \tag{II-5}$$

$$V_r = -Z_r * I + V_s \tag{II-6}$$

On peut démontrer facilement de besoin du maintien de la tension de aux borne de la charge pour permettre un maximum de puissance à transmettre :

Si la charge varie et aucune précaution n'est prise pour maintenir la tension V_r égale a V_s alors depuis le diagramme de phase de la figure (II-3).

$$V_r = V_s * \cos\alpha \tag{II-7}$$

En remplaçant dans en eura :

$$P = \frac{V_s^2}{2X_s} \sin\alpha * \cos\alpha = \frac{V_s^2}{2X_s} \sin 2\alpha \tag{II-8}$$

Dans ce cas en ne peut transporter qu'une puissance maximale pour un angle $\alpha=45$ égal

$$P_{max} = \frac{V_s^2}{2X_s} \tag{II-9}$$

Dans le cas où on maintient la tension V_r égale à V_s on peut avoir, depuis l'équation, une puissance maximale :[6]

$$P_{max} = \frac{V_s^2}{X_s} \tag{II-10}$$

II. 3 Chute de tension dans une ligne :

Concédons la figure (II-4) qui représente une ligne de transport d'impédance complexe $Z_s = R + jX_s$, d'après la figure (II-2)de diagramme de tension on peut que la chute de tension ΔV égaale à :

$$\Delta V = V \cos\alpha - V_r \tag{II-11}$$

$$\Delta V = RI \cos\theta - XI \sin\theta \tag{II-12}$$

$$\Delta V = RI \frac{V_r}{V_r} \cos\theta + XI \frac{V_r}{V_r} \sin\theta \tag{II-13}$$

Telque $P_r = V_r I \cos\theta$ $Q_r = V_r I \sin\theta$

$$\Delta V = \frac{R P_r + X Q_r}{V_r} \tag{II-14}$$

Dans le réseaux de transport, la réactance est supérieure à la résistance, ainsi si $X \gg R$? la formule de chute de tension peut être simplifiée comme suite :[10]

$$\Delta V = \frac{X Q_r}{V_r} \tag{II-15}$$

L'injection de puissance réactive aura donc plus 'impact sur le niveau de tension que l'injection de puissance active. Dans le réseau de distribution et en particulier en BT, la résistance linéique est plus importante que la réactance linéique $R \gg X$ [1].

$$\Delta V = \frac{R P_r}{V_r} \tag{II-16}$$

II.4- Modélisation de ligne électrique :

la ligne de transport à été modélisée par un schéma équivalent en π qui se compose d'une impédance série (résistance R en série avec une réactance inductive X), et une admittance shunt qui consiste en une susceptance capacitive Y (due a l'effet capacitif de la ligne avec la terre) en parallèle avec une conductance d'isolation G [14]. Voir figure(II-4)

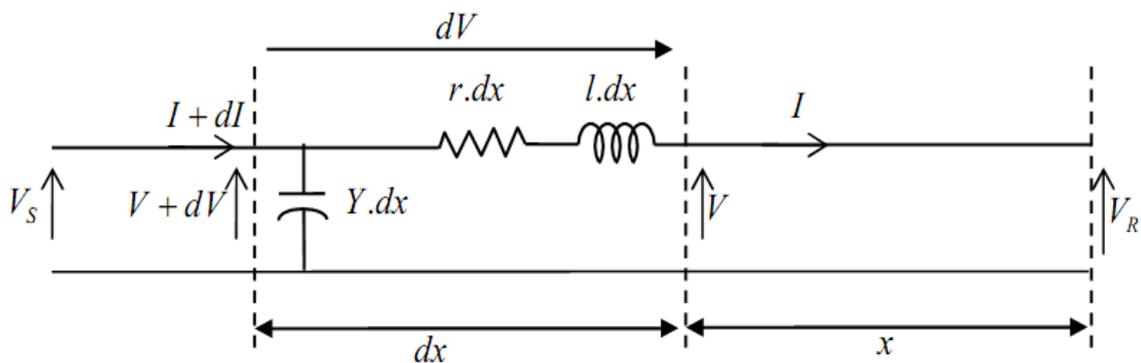


Figure (II-4) :la modél de la ligne de transport .

A la fréquence de travail ω , nous avons :

$$Z = r + jL\omega \quad (\text{II-17})$$

$$Y = g + jC\omega \quad \text{Avec} \quad g = 0$$

A partir de la loi de Kirchoff:

$$dV = I \cdot Z \cdot dx \quad (\text{II-18})$$

$$dI = Y dx \cdot (V + dV) \cong V \cdot Y \cdot dx \quad (\text{II-19})$$

$$\frac{dV}{dx} = I \cdot Z \quad (\text{II-20})$$

$$\frac{dI}{dx} = V \cdot Y \quad (\text{II-21})$$

On dérivant : $\frac{dV}{dx}$

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{dV}{dx} \right) = Z \cdot \frac{dI}{dx} = Z Y V \quad (\text{II-22})$$

$$\frac{d^2V}{dx^2} - Z Y V = 0 \quad \text{équation différentielle}$$

On pose que $\gamma = \sqrt{ZY}$.

On résout l'équation différentielle

$$V(x) = c_1 e^{\gamma x} + c_2 e^{-\gamma x} \quad (\text{II-23})$$

$$V(x) = (c_1 + c_2) \left(\frac{e^{\gamma x} + e^{-\gamma x}}{2} \right) + (c_1 - c_2) \left(\frac{e^{\gamma x} - e^{-\gamma x}}{2} \right) \quad (\text{II-24})$$

$$V(x) = K_1 \cosh(\gamma x) + K_2 \sinh(\gamma x) \quad (\text{II-25})$$

$$\text{Si } x=0 \quad K_1 = Vr \quad K_2 = Ir \frac{Z}{Y} \Rightarrow K_2 = \sqrt{\frac{Z}{Y}} Ir \quad (\text{II-26})$$

$$V(x) = Vr \cosh(\gamma x) + \sqrt{\frac{Z}{Y}} Ir \sinh(\gamma x) \quad (\text{II-27})$$

$$\text{Par la même manière : } I(x) = Ir \cosh(\gamma x) + \sqrt{\frac{Z}{Y}} vr \sinh(\gamma x) \quad (\text{II-28})$$

Le schéma équivalent en π d'une ligne de transport est dérivé d'un système quadripôle :

$$\begin{bmatrix} V_s \\ I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_r \\ I_r \end{bmatrix}$$

Tel que :

$$A = \cosh(\gamma x) \quad B = \sqrt{\frac{Z}{Y}} \sinh(\gamma x) \quad C = \sqrt{\frac{Y}{Z}} \sinh(\gamma x) \quad D = \cosh(\gamma x)$$

A partir de ces équations, on peut retrouver les différents modèles des lignes de transport : [2]

Cas de lignes longues ($L > 250$)

$$Z = Z \frac{\sinh \gamma l}{\gamma l}, \quad \frac{Y}{2} = \frac{y \tanh \gamma l / 2}{\gamma L / 2} \quad (\text{II-29})$$

Cas de lignes moyennes ($100 < L < 250$) :

$$Z = z, \quad Y = y$$

Cas de lignes courtes ($L < 100$) :

$$Z = z, \quad Y \text{ est négligé}$$

$$\text{Avec } Z = Z L, \quad y = Y L$$

II.5- Calcul des matrices admittance et impédance :

Une équation matricielle du réseau électrique fournit un modèle convenable pour des solutions avec un ordinateur. Les éléments d'une matrice de réseau dépendent de la sélection des variables indépendantes qui peuvent être des courants ou des tensions. Les éléments de la matrice sont ainsi soit des impédances soit des admittances. La forme de la matrice du réseau dépend de la structure de référence, c'est-à-dire les nœuds ou les boucles.

Dans le cas de nœuds comme structure de référence, les variables sont les tensions et courants des mailles.[2]

II.5.1 Dérivation directe de la matrice admittance :

A l'aide de loi de Kirchhoff, le courant d'injection I_i d'un réseau est égale la somme des courants qui traversent les lignes reliant tous les nœuds connectés au nœud i . En supposant que la tension de chaque nœud est connue par rapport au nœud de référence, le courant d'injection est calculé par :

$$I_i = \sum_{j \neq i} (v_i - v_j) Y_{ij} = v_i \sum_{j \neq i} Y_{ij} - \sum_{j \neq i} v_j Y_{ij} \quad (\text{II-30})$$

Où V_j tension du nœud j par rapport à la référence, Y_{ij} admittance de l'élément entre les nœuds i et j .

Comme j varie de 1 à n (réseau a n nœuds), on peut écrire le vecteur des courants d'injection du système :

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} Y_{11} & \cdots & Y_{n1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & \cdots & Y_{nn} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \quad (\text{II-31})$$

Avec : $Y_{ii} = \sum_{j=1}^n Y_{ij} \qquad Y_{ij} = -Y_{ji} \quad (\text{II-32})$

En fait, les définitions des éléments de cette matrice admittance Y_{ij} sont comme suit :

- Chaque élément diagonal est la somme des admittances connectées au nœud correspondant à la ligne respective de la matrice.
- Chaque élément non diagonal est égal au négatif de l'admittance entre les nœuds correspondants à la ligne et la colonne.

En considérant la modélisation en π des lignes de transport, les effets des admittances shunts correspondantes à chaque section de ligne (line charging admittance) doivent être inclus dans l'expression des éléments de la matrice admittance :

$$Y_{ii} = \sum_{j=1}^n [y_{ij} + \frac{y'_{ij}}{2} + y_i^{sh}] \quad (\text{II-33})$$

$$Y_{ij} = -y_{ij} \quad (\text{II-34})$$

La matrice impédance Z_{bus} est la matrice dont les éléments sont les impédances de point de conduite de circuits ouverts (éléments diagonaux) et l'impédance de transfert (élément non diagonaux) entre les nœuds et la référence.

Soit une matrice impédance Z_{bus}^m définissant un réseau partiel comportant m nœuds. Les tensions des m nœuds existants sont respectivement V_1, V_2, \dots, V_m . Le réseau partiel est décrit par :

$$V_{bus}^m = Z_{bus}^m I_{bus}^m = \begin{bmatrix} Z_{11} & \cdots & Z_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{m2} & \cdots & Z_{mm} \end{bmatrix} I_{bus}^m \quad (\text{II-35})$$

II.5-2- Les Contraintes dans les réseaux électriques :

Les contraintes liées à la sécurité des réseaux sont généralement au nombre de trois :

II.5-2-1-Contraintes d'équilibre entre la production et la consommation :

En régime normal, et à tout moment, l'égalité entre la production et la consommation des puissances active et réactive doit être assurée, soit :

$$\sum_{i=1}^{n_g} P_{gi} - \sum_{i=1}^{n_c} P_{ci} - P_L = 0 \quad (\text{II-36})$$

$$\sum_{i=1}^{n_g} Q_{gi} - \sum_{i=1}^{n_c} Q_{ci} - Q_L = 0 \quad (\text{II-37})$$

P_L : Pertes actives totales

Q_L : Pertes réactives totales.

n_c : Nombre de noeuds de consommation.

n_g : Nombre de nœuds de génération.

Toute atteinte à cet équilibre se répercute sur la valeur de la fréquence et les tensions du réseau.

II. 5.2.2 Contraintes sur les modules de la tension :

Les conditions d'exploitation des réseaux fixent les limites :

- des tensions maximales par la tenue diélectrique du matériel et la saturation des transformateurs.
- des tensions minimales par l'augmentation des pertes et le maintien de la stabilité des alternateurs.

On aura pour tous les nœuds, la condition suffisante et nécessaire à savoir :

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \quad (\text{II-38})$$

$$i = 1, \dots, \dots, \dots, n$$

Avec

V_i : Module de la tension au nœud.

V_i^{\min}, V_i^{\max} : Respectivement limites minimale et maximale de la tension.

Le respect des contraintes de tension est d'une importance primordiale pour la sécurité d'exploitation et du matériel. Une violation de la limite supérieure que l'on observe parfois en faible charge peut constituer un danger pour l'isolation du matériel. Par ailleurs, des tensions trop basses nuisent à l'exploitation rationnelle du réseau, et peuvent conduire à son écroulement.

II.6 Contraintes sur la capacité de transit de la ligne :

La puissance transitée dans une ligne ne doit, en aucun cas, dépasser la limite maximale,

$$S_{ij} \leq S_{ij}^{\max} \quad (\text{II-39})$$

Avec :

$$S_{ij} = (P_{ij}^2 + Q_{ij}^2)^{1/2} \quad (\text{II-40})$$

S_{ij} : Puissance apparente transitée dans la ligne $i - j$.

S_{ij}^{max} : Puissance apparente maximale transitée dans la ligne $i - j$.

P_{ij} : Puissance active transitée dans la ligne $i - j$.

Q_{ij} : Puissance réactive transitée dans la ligne $i - j$.

En général, à partir des contraintes des puissances transitées, nous déterminons les contraintes de courant correspondant aux lignes et aux transformateurs. On limite les courants transités pour des raisons de surcharge et de stabilité.

II.7. Ecoulement de puissance.

II.7.1. Définition :

L'étude de l'écoulement de puissance consiste à rechercher un point de fonctionnement stable à un moment donné à travers une information complète du courant et de la puissance.

En fait, il s'agit principalement de calculer les quatre paramètres suivants au niveau de chaque nœud de réseau : P , Q , V et δ .

En d'autres termes, l'étude de l'écoulement de puissance (Load Flow) permet d'avoir la solution des grandeurs d'un réseau électrique en fonctionnement normal équilibré en régime permanent. Ces grandeurs sont les tensions aux nœuds, les puissances injectées aux nœuds et celles qui transitent dans les lignes. Les pertes et les courants s'en déduisent.

Les études de l'écoulement de puissance permettent de planifier la construction et l'extension des réseaux électriques ainsi que la conduite et le contrôle de ces réseaux. [1]

II.7.2. Calcul de l'écoulement de puissance :

Le calcul de l'écoulement de puissance peut se faire soit en utilisant la matrice admittance Y_{bus} soit la matrice impédance Z_{bus} du réseau électrique. Il est usuel d'utiliser l'approche basé sur l'analyse nodale. Aussi, si les tensions des nœuds sont connues, les courants d'injection peuvent être calculés par : [2]

$$I_{bus} = Y_{bus} V_{bus} \quad (II-41)$$

Par contre, si les courants d'injection sont connues, la forme inverse permet de calculer les tensions aux nœuds :

$$V_{bus} = Y_{bus}^{-1} I_{bus} = Z_{bus} I_{bus} \quad (II-42)$$

Pour chaque type de nœud (quelque soit le type de nœud), on définit la puissance d'injection comme suit : [1]

$$S_i = P_i + j Q_i = (P_{Gi} - P_{Ci}) + j (Q_{Gi} - Q_{Ci}) \quad (\text{II-43})$$

Sachant que l'on a aussi :

$$S_i = P_i + j Q_i = V_i I_i^* \quad (\text{II-44})$$

$$I_i^* = P_i - j Q_i / V_i^* \quad (\text{II-45})$$

II.8 Techniques de calcul d'écoulement de puissance :

Il existe plusieurs méthodes de calcul d'écoulement de puissance, mais nous ne citerons que les deux les plus importantes :

- **Méthode de Gauss-Seidel (G-S);**
- **Méthode de Newton- Raph son (N-R);**

II.8.1 Méthode itérative de Gauss-Seidel (G-S) :

La méthode de Gauss –Seidel est basé sur la détermination des valeurs des n variable indépendantes sur la base des valeurs précédant simultanées, en plus au niveau de chaque itération les toutes dernière valeurs indépendantes calculées.

La forme générale est :

$$X_n^{k+1} = \left(\frac{1}{a_{nn}} \right) [b_n - a_n X_1^{(k+1)} - \dots - a_{n,n-1} X_{n-1}^{k+1}] \quad (\text{II-46})$$

Le critère d'arrête basé sur la comparaison entre la déférence absolue des variables indépendantes de deux ordre successifs et un seul de tolérance \mathcal{E} initialement fixé :

$$|X_i^{k+1} - X_i^k| \leq \varepsilon \quad (\text{II-47})$$

II.8.2 Application de la méthode de Gauss- Seidel :

L'objectif est de déterminer tous les P_i , Q_i , $|V_i|$ et δ_i , pour les n nœuds d'un réseau électrique.

La procédure est de calculer les V_i et δ_i des nœuds PQ, ensuite les Q_i et δ_i des nœuds PV et finalement le P et Q du slack bus :

- **Nœuds PQ :**

On détermine les tensions $|V_i|$ et les angles δ_i par la formulation suivante à programmer

$$V_i^{k+1} = \frac{1}{Y_{ii}} \left(\frac{P_j + jQ_j}{V_i^{(k)*}} - \sum_{j \neq n}^n Y_{ij} V_j^k \right) \quad i = 2..n \quad (\text{II-48})$$

Il faut noter que le nœud n est choisi comme nœud balancier dont l'amplitude et la phase de tension sont connues. Cela explique pour quoi on commence les calculs pour $i = 2$

- **nœuds PV :**

On a à déterminer les Q_i et les δ_i , par les formules suivantes :

$$Q_i^K = -Im \left[V_i^* \left(\sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \right) \right] \quad (\text{II-49})$$

$$\delta_i^K = Arg \left[\frac{1}{Y_{ii}} \left(\frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} - \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j^k \right) \right] \quad (\text{II-50})$$

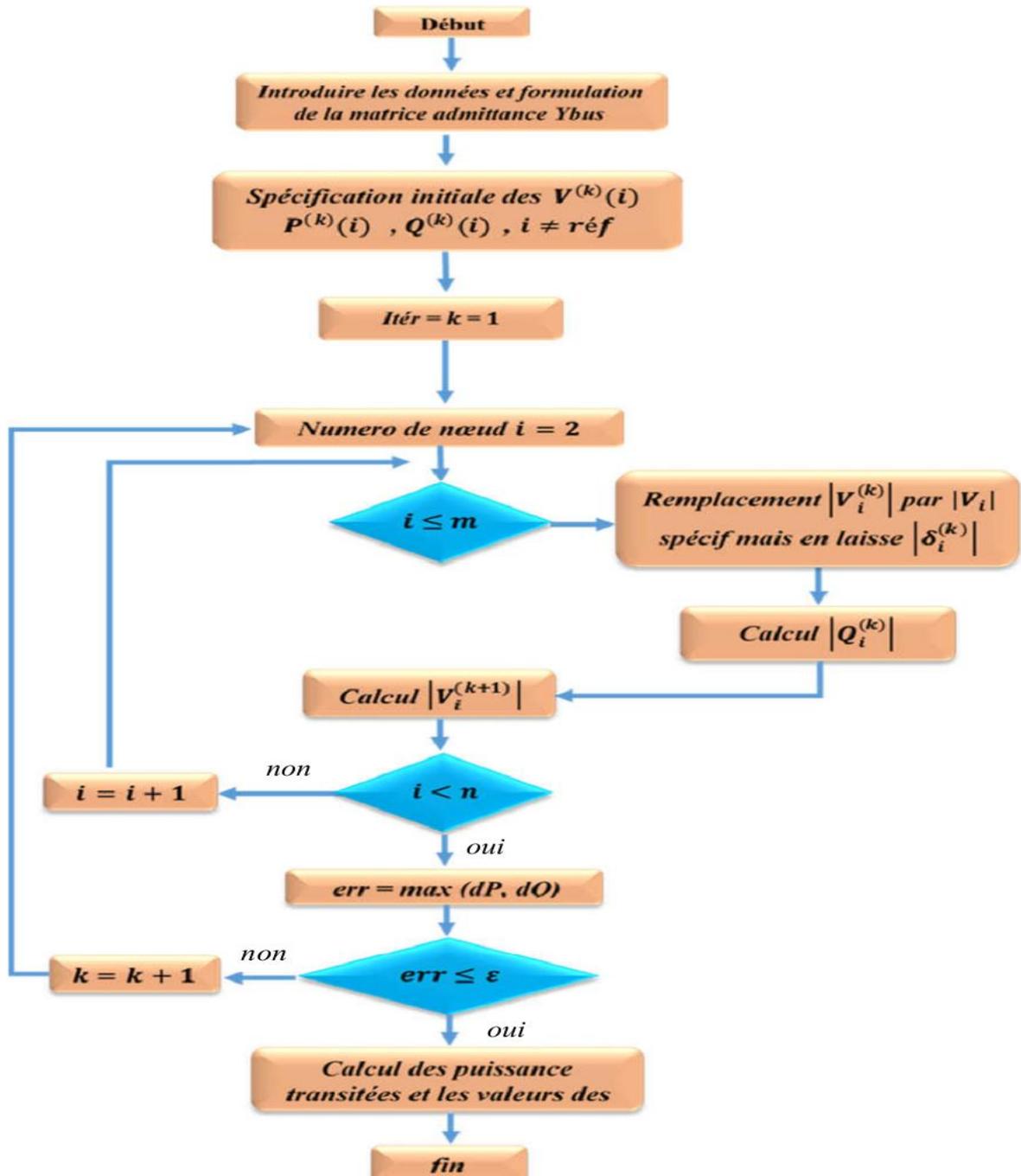
- **Nœud balancier (slack) :**

Une fois que toutes les tensions aux nœuds V_1, \dots, V_n sont solutionnées la puissance du nœud balancier est alors calculée.

$$P_s - jQ_s = V_s^* \sum_{j=1}^n Y_{sj} V_j^{(k)} \quad (\text{II-51})$$

Tableau (II-1) : Les variables au niveau des différents types de jeu de barres

Type de jeu de barres	Variable connues	Variabes inconnues
Charge(P,Q)	P,Q	$ V , \delta$
Contrôle (P,V)	P, $ V $	Q, δ
Référence (slack/swing bus)	$ V , \delta$	P,Q



figure(II-5): l'organigramme méthode de gausse seidel

2.8.2 Méthode de Newton- Raphson :

Cette méthode se base sur le développement en série de Taylor de l'équation. Cette dernière s'obtient successivement à partir des approximations du premier ordre :

$$f(x) \approx f(x^k) + f'(x^k) \cdot (x^{k+1} - x^k) = 0 \tag{II-52}$$

Où $f' = \frac{\partial f}{\partial x}$ est le *Jacobien* de $f(x)$. A partir d'une valeur initiale x_0 , on obtient les

Corrections Δx^k en résolvant le système linéaire :
$$\Delta x^k = \frac{f(x^k)}{f'(x^k)} \quad (\text{II-53})$$

Et les nouvelles valeurs x^{k+1} de :
$$x^{k+1} = x^k + \Delta x^k \quad (\text{II-54})$$

Dans le réseau, on corrige l'angle et le module de la tension qui sont donnés par les deux équations

$$V_i = |V_i| < \delta_i \quad (\text{II-55})$$

$$Y_{ij} = |Y_{ij}| < \theta_{ij} \quad (\text{II-56})$$

Alors :

$$I = \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j = \sum_{j=1}^n |V_i| |Y_{ij}| < -\theta_{ij} + \delta_j \quad (\text{II-57})$$

D'où on a :

$$S_i = P_i + jQ_i = V_i I_i^* = \sum_{j=1}^n |V_i| |Y_{ij}| e^{-j(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j)} \quad (\text{II-58})$$

Les puissances actives et réactives déduite s'écrivent alors :[04]

$$P_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |Y_{ij}| |V_j| \cos(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) \quad (\text{II-59})$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |Y_{ij}| |V_j| \sin(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) \quad (\text{II-60})$$

Les variations des puissances sont également liées aux variations des amplitudes et phases de tension :

$$\begin{pmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_3 \\ J_2 & J_4 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \Delta \delta \\ \Delta \theta \end{pmatrix} \quad (\text{II-61})$$

$(J_1 J_2 J_3 J_4)$ les éléments des matrices jacobine ;

Détermination des éléments de la matrice jacobienne : [2]

$$J_1 = \frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = |V_i| |Y_{ij}| |V_j| \sin(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) \quad (\text{II-62})$$

$$J_1 = \frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = -Q_i + |V_i|^2 |Y_{ij}| \sin \theta_{ii} \quad (\text{II-63})$$

$$J_2 = \frac{\partial P_i}{\partial |V_j|} = |V_i| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) \quad (\text{II-64})$$

$$J_2 = \frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = \frac{P_i}{|V_i|} + 2 |Y_{ij}| |V_j| \cos \theta_{ii} \quad (\text{II-65})$$

$$J_3 = \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = Q_i - |V_i|^2 |Y_{ij}| \cos \theta_{ii} \quad (\text{II-66})$$

$$J_3 = \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} = -|V_i| |Y_{ij}| |V_j| \cos(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) \quad (\text{II-67})$$

$$J_4 = \frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = \frac{Q_i}{|V_i|} + 2 |Y_{ij}| |V_j| \sin \theta_{ii} \quad (\text{II-68})$$

$$J_4 = \frac{\partial Q_i}{\partial |V_j|} = |V_i| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) \quad (\text{II-69})$$

Dans le cas un nœud contrôlé est présent dans le réseau l'équation générale doit être modifiée :

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta |V| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \\ J_5 & J_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad (\text{II-70})$$

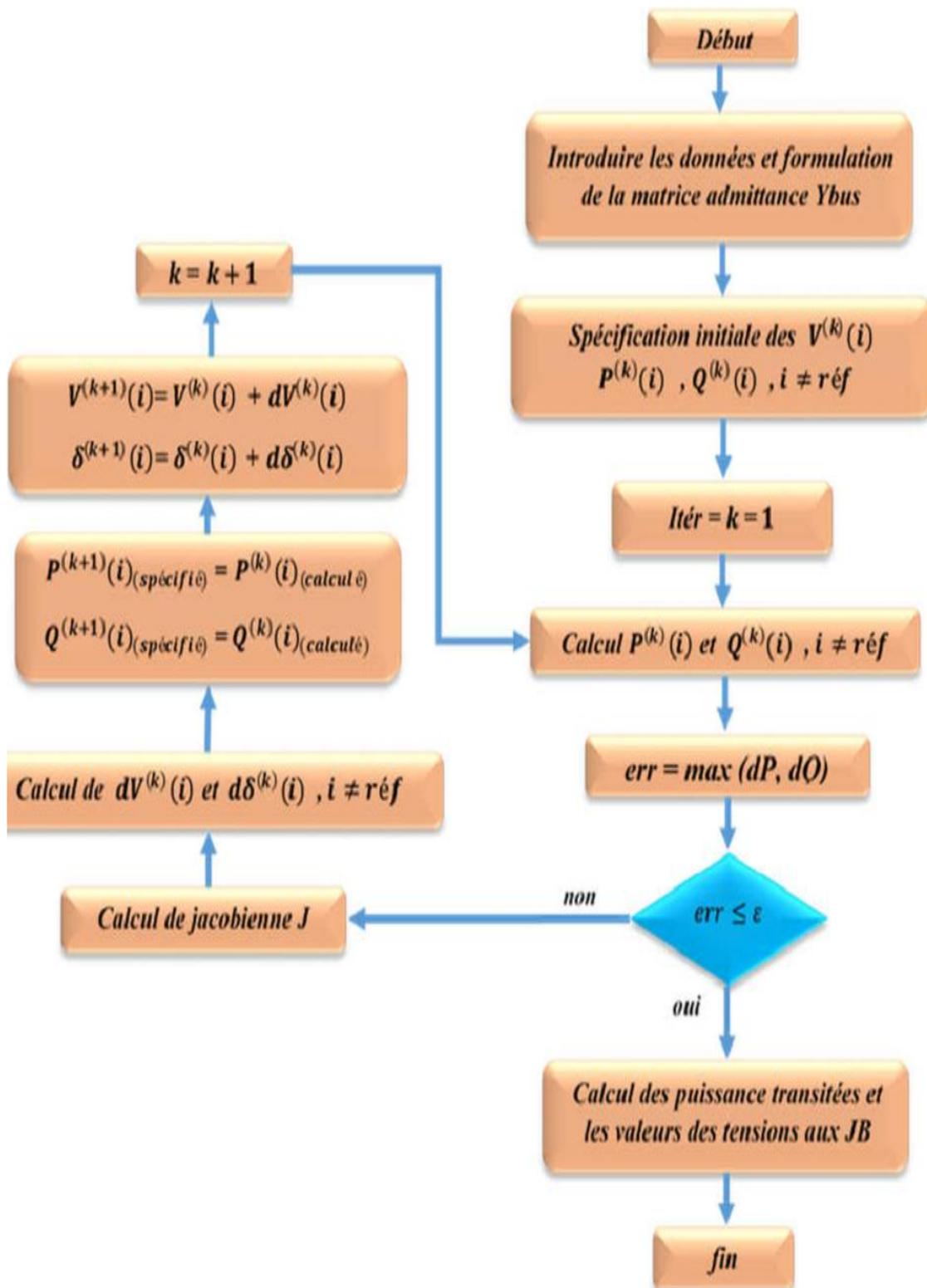


Figure (II-6): l'organigramme Méthode de Newton- Raphson

II.9. CONCLUSION:

Nous avons présenté dans ce chapitre la modélisation de ligne électrique, la puissance transmise par ligne électrique et le problème de l'écoulement de puissance, nécessaire pour le calcul des pertes totales dans le réseau. Nous avons opté pour la méthode classique de Gauss Seidel. Ce choix n'a été pas arbitraire mais basé surtout sur la simplicité et l'efficacité de la méthode.

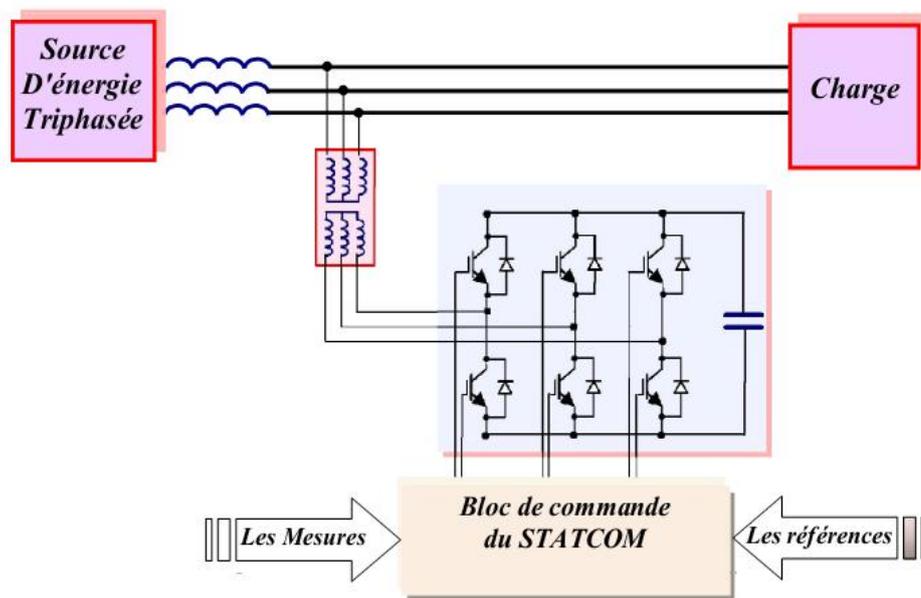
Chapitre III

Etude d'un STATCOM

III.1 Introduction:

Un STATCOM, plus récent et plus élaboré, est une source de tension variable contrôlée en amplitude et en phase. Ce dispositif est très différent du point de vue construction, commande, et fonctionnement, mais leur fonction, et leur apport au réseau électrique est sensiblement le même que le dispositif SVC.

Dans ce travail, nous adopterons la convention suivante : l'injection de la puissance réactive au nœud correspond à l'injection de la puissance réactive capacitive alors que l'absorption concerne l'injection de puissance réactive inductive. Aussi, nous parlerons de courant capacitif positif et de courant inductif négatif.[13]



Figure(III-1): Structure de base d'un STATCOM couplé au réseau.

III.2 Définition du STATCOM:

Le STATCOM est un générateur synchrone statique fonctionnant comme un SVC (Static Var Compensator) connecté en parallèle dont le courant de sortie (capacitif ou inductif) peut être contrôlé indépendamment de la tension AC du réseau .[9]

III.3 Structure des STATCOM sur les réseaux de transport :

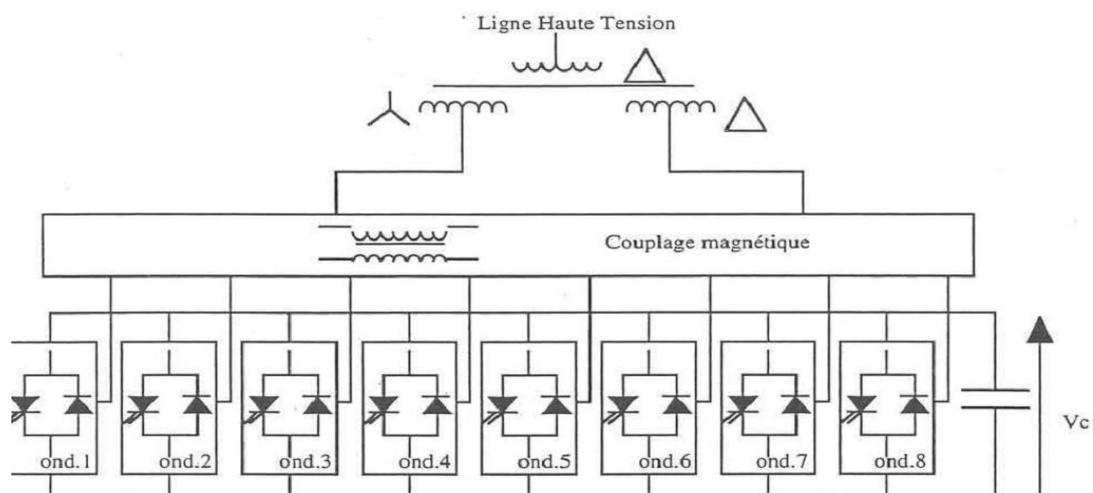
L'installation d'un STATCOM sur le réseau de transport devra comporter un nombre bien supérieur d'onduleurs. Afin de ne pas ajouter de filtres passifs, le nombre d'impulsions doit être au moins de 24 (association de 4 onduleurs) aussi les deux seuls STATCOM actuellement en service ont tous deux une structure à 48 impulsions, soit une association de 8 onduleurs. Afin d'associer un grand nombre d'onduleurs, les

'structures sont associées en série et en parallèle. Les caractéristiques de ces deux ST ATCOM sont les suivantes :

- Le premier ST ATCOM (appelé SVG, Statique Var Generator) en service a une puissance de ± 80 MV AR et est implanté au Japon [MO-93.1]. Il est connecté sur un nœud de 154 kV. Les GTO utilisés sont donnés à 3000 A, 4,5 kV et les diodes 1000 N 4,5 kV, chaque bras d'onduleur est muni de 3 GTO en série. Le bus continu est de 4150 V.

- Beaucoup de publications concernent le ST ATCON ± 100 MVAR installé aux États Unis dans le Tennessee [SC-94, SC-96, ME-92, SC-97]. La structure 48 impulsions est donnée à la figure (III -2). Ce ST A TCOM est connecté à un nœud 161 kV /60 Hz. Le transformateur de couplage avec le réseau abaisse la tension à 5,1 kV entre phase.

- Chaque bras d'onduleur est constitué de cellules de 5 GTO de 4,5 kV/4000 A et la tension continue est de 6,6 kV. Ce STATCOM est constitué de 240 GTO et 240 diodes refroidis à l'eau. La difficulté réside en l'intégration des éléments de l'électronique de puissance, et la mise en série des GTO.[15]

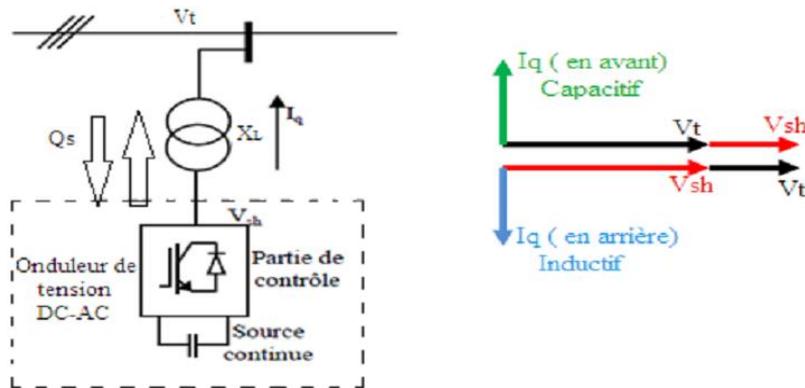


Figure(III-2) : Représentation unifilaire du STATCOM TVA ± 100 MVAR

III.4 Principe de fonctionnement:

Les compensateurs shunts sont bien reconnus dans la compensation de l'énergie réactive et par conséquent la régulation de la tension au jeu de barre où ils sont connectés. Le STATCOM est un générateur synchrone statique qui génère une tension alternative triphasé synchrone avec la tension du réseau à partir d'une source de tension continue. L'amplitude de la tension du STATCOM peut être contrôlée afin d'ajuster la quantité de l'énergie réactive à échanger avec le réseau.

En général la tension du STATCOM V_{sh} est injectée en phase avec la tension V_t de la ligne, dans ce cas il n'y a pas d'échange de l'énergie active avec le réseau mais seulement la puissance réactive qui sera injectée (ou absorbée) par le STATCOM comme le résume la figure(III -2) [3].



$V_{sh} > V_t$ Compensation capacitive.

$V_{sh} < V_t$ Compensation inductive.

Figure (III-3) : Schéma de principe d'un STATCOM

Considérant le STATCOM de la figure (III-4) connecté à un jeu de barre dans le système énergétique (source de tension, ligne et charge), le schéma équivalent de ce dispositif est présenté par la figure (III -4).

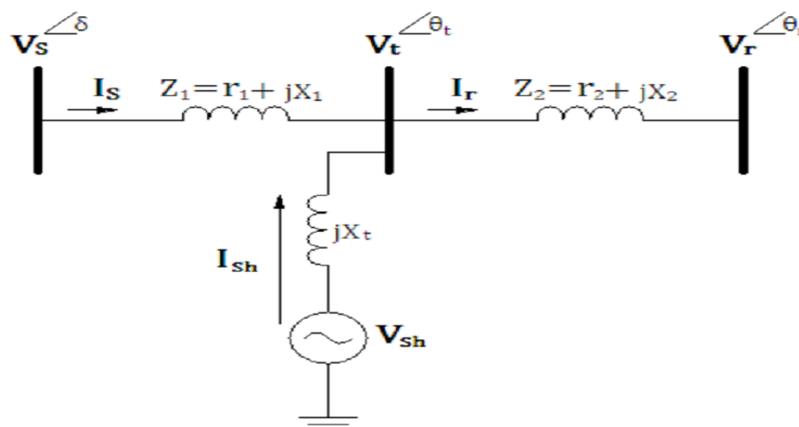


Figure (III-4): Schéma du STATCOM couplé au réseau électrique.

$$I_{sh} = \frac{V_{sh} - V_t}{jX_t} \tag{III-1}$$

La puissance injectée au jeu de barre " t " est donnée par l'équation

$$S = V_t + I_{sh} = \frac{V_t(V_{sh} - V_t)}{-jX_t} = \frac{V_t V_{sh} - V_t^2}{-jX_t} \quad (\text{III-2})$$

D'où on abouti aux puissances active et réactive injectées par le STATCOM au jeu de barre " t " exprimées par les formules(III-3) (III -4).

$$P_{sh} = -V_t V_{sh} \frac{\sin(\theta_t + \theta_{sh})}{X_t} \quad (\text{III-3})$$

$$Q_{sh} = V_t \left(\frac{V_{sh} \cos(\theta_t - \theta_{sh}) - V_t}{X_t} \right) \quad (\text{III-4})$$

Avec l'hypothèse d'un STATCOM idéal (convertisseur sans pertes), la contrainte de fonctionnement que doit satisfaire le STATCOM est de ne pas échanger la puissance active avec le réseau. Donc

$$P_{sh} = -\frac{V_t V_{sh} \sin(\theta_t - \theta_{sh})}{X_t} = 0 \quad (\text{III-5})$$

D'où la condition:

$$\theta_t - \theta_{sh} = 0 \text{ tel que } \theta_t = \theta_{sh} \quad (\text{III-6})$$

D'après cette condition la tension injectée par le STATCOM V_{sh} doit être en phase avec la tension du jeu de barre de raccordement[13][3].

Cependant il y a toujours, dans la pratique, une petite quantité de la puissance active absorbée à partir du réseau pour couvrir les pertes des interrupteurs du convertisseur du STATCOM et les pertes au niveau du transformateur de couplage et pour maintenir la tension DC aux bornes du condensateur constante.

Comme les tensions V_{sh} et V_t sont en phase, le courant I_{sh} du STATCOM en quadrature avec la tension V_t , est donc un courant réactif son amplitude et sa puissance réactive correspondante échangée avec le réseau sont données par les équations(III-7) (III-8) . En admettant que la tension V_{sh} est sur l'axe "d" (comme référence des phases) :

$$V_{shd} = V_{sh} \text{ et } V_{shq} = 0$$

$$|I_{sh}| = I_{sh} = \frac{V_{sh} - V_t}{X_t} \quad (\text{III-7})$$

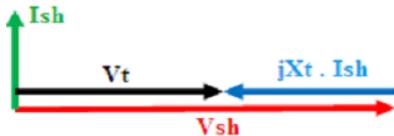
$$Q_{sh} = V_{sh} I_{sh} = \frac{V_{sh}^2}{X_t} \left(1 - \frac{V_t}{V_{sh}} \right) \quad (\text{III-8})$$

A partir de l'équation (III -8), il apparait claire que si le module de la tension V_{sh} du

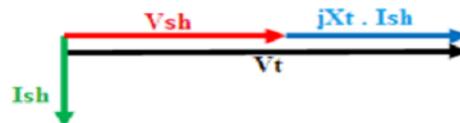
STATCOM égale le module de la tension V_t du réseau aucun transfert de l'énergie n'est effectué.

Si $V_{sh} > V_t$, donc $Q_{sh} > 0$, le STATCOM fonctionne en mode capacitif et fournit une puissance réactive au réseau comme montre la figure(III -4).

Si $V_{sh} < V_t$, donc $Q_{sh} < 0$, le STATCOM dans ce cas absorbe la puissance réactive à partir du réseau et fonctionne en mode inductif, voir figure (III -4).



Figure(III-5-a): Fonctionnement capacitif



Figure(III-5-b): Fonctionnement inductif

Le STATCOM est capable de délivrer la puissance réactive même si la tension de jeu de barre de connexion est faible. Avec l'hypothèse d'un STATCOM idéal (convertisseur sans pertes), la contrainte de fonctionnement que doit satisfaire le STATCOM est de ne pas échanger la puissance active avec le réseau.

L'équation (III-9) de la puissance réactive, décrit le transfert d'énergie réactive avec le réseau électrique [03].

$$Q_{sh} = \frac{|V_t|^2}{X_{sh}} - \frac{|V_t||V_{sh}|}{X_t} \cdot \cos(\theta_t - \theta_{sh}) \quad (III -9)$$

Si $|V_{sh}| > |V_t|$ alors Q_{sh} devient positive et le STATCOM absorbe de la puissance réactive.

Si $|V_{sh}| < |V_t|$ alors Q_{sh} devient négative et le STATCOM fournit de la puissance réactive.

III.5 Etude de l'écoulement de puissance en présence du STATCOM:

Les équations de l'écoulement de puissance du système avec STATCOM connecté au jeu de barres, sont les mêmes que les équations de l'écoulement de puissance du système sans STATCOM exprimées par les équations (III-10) (III-11), pour tous les jeux de barres, sauf pour le jeu de barres de connexion équation (III -12).

Pour les jeux de barre autres que le jeu de barres :[14]

$$P_i = \sum_1^n |V_t||V_m||Y_{im}| \cos(\delta_m - \delta_i + \theta_{km}) \quad (III-10)$$

$$Q_i = - \sum_1^n |V_t||V_m||Y_{im}| \sin(\delta_m - \delta_i + \theta_{km}) \quad (III -11)$$

$i=1,2,\dots,n$

Pour le jeu de barres où le STATCOM est implanté :

$$Q_k = Q_p + \sum_{m=1}^n |V_k| |V_m| |Y_{km}| \sin(\delta_m - \delta_k + \theta_{km}) \quad \text{(III-12)}$$

m=1,2,.....n

Les termes (P_p et Q_p) représentent les puissances injectées active et réactive pour le système dû es à l'intégration du STATCOM qui sont représentés par :

$$Q_p = -B_p V_p^2 - V_k E_p Y_p \sin(\delta_m - \delta_k + \theta_{km}) \quad \text{(III-13)}$$

III.6 Exemple d'application dans un réseau à 6 nœuds:

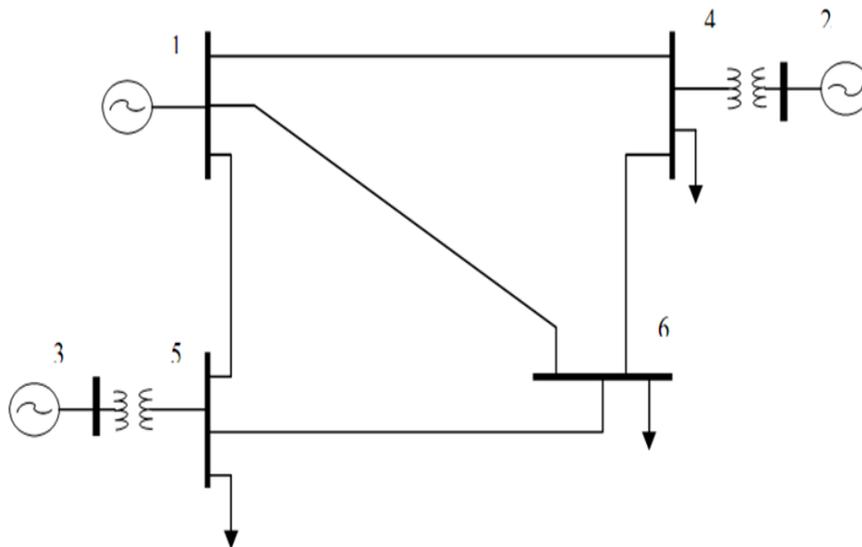


Figure (III-6) : Réseau d'étude à 6 nœuds

Tableau (III-1) : Données de lignes.

Ligne	R [pu]	X [pu]	B [pu]
1 - 4	0.035	0.225	0.0065
1 - 5	0.025	0.105	0.0045
1 - 6	0.040	0.215	0.0055
2 - 4	0.000	0.035	0.0000
3 - 5	0.000	0.042	0.0000
4 - 6	0.028	0.125	0.0035
5 - 6	0.026	0.175	0.0300

Tableau (III-2) : Données de nœuds

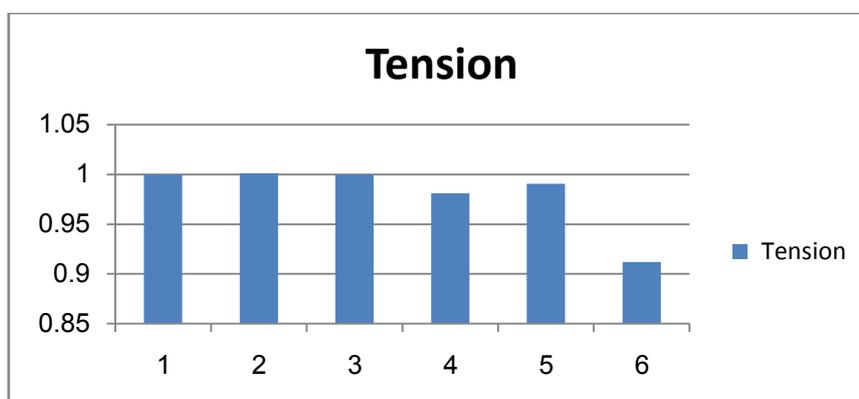
Nœud	V[pu]	Phase de tension	Charge		Production	
			MW	Mvar	MW	Mvar
1	1.06	00				00
2	1.04	00			150.00	00
3	1.03	00			100	00
4	1.00	00	100	70		00
5	1.00	00	90	30		00
6	1.00	00	160	110		

III.7 Analyse du réseau sans compensation :

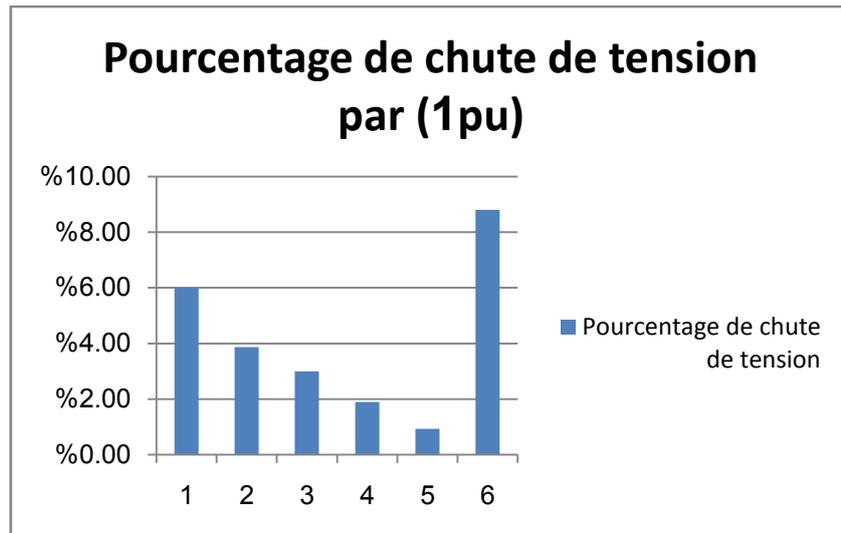
L'analyse de notre réseau est réalisée avec un programme que nous avons développé sous MATLAB. Ce programme nous permet de suivre l'évolution de tension et de chute de tension du réseau par la méthode de gausse Seidel du calcul d'écoulement de puissance.

Tableau (III-3):tension et chute de tension nodal sans compensation

Nœud	1	2	3	4	5	6
Tension	1.0000	1.0013	1.0000	0.9810	0.9907	0.9119
Chute de tension	0.0600	0.0387	0.0300	0.0190	0.0093	0.0881
Pourcentage de chute de tension par (1pu)	6.0000 %	3.8727%	3.0000 %	1.8963 %	0.9308 %	8.8052%



Figure(III-7) :les tensions nodal sans compensation



Figure(III -8):chute de tension nodal sans compensation par (1pu)

III.8 Discussion des résultats:

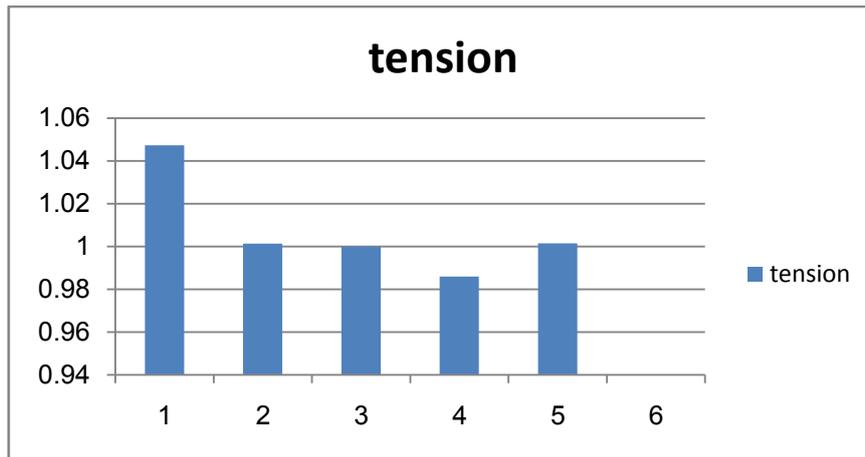
Les résultats de notre programme en MATLAB sont résumés dans le tableaux (III-3). On remarque que la plus grande tension atteint une amplitude de **1.0013** pu au deuxième jeu de barre, le premier étant celui du générateur dont la tension est imposée et fixe à 1 pu. La plus faible tension est observée au niveau du quatrième jeu de barre , Mais les chutes de tension dans les branches le plus grand chute de tension c'est le seizième jeu de barre de **8.8052%** , et la premier nœud avec de chute de tension **6.00%**.

III.9 Analyse de réseau avec STATCOM :

- Si on insère une **Statcom** de valeur de puissance réactive $Q_{sh} = -0.8801$ pu au nœud (6).

Tableau(III-4):Nouvel paramètre des nœuds

Nœud	1	2	3	4	5	6
Tension	1.0473	1.0013	1.0000	0.9859	1.0015	0.9778
Chute de tension	0.0127	0.0387	0.0300	0.0141	0.0015	0.0222
pourcentage de chute de tension par (1pu)	1.266	3.8727	3.0000	1.4071	0.1475	2.2180



Figure(III-9):tension nodal avec statcom $Q_{sh} = -0.8801$

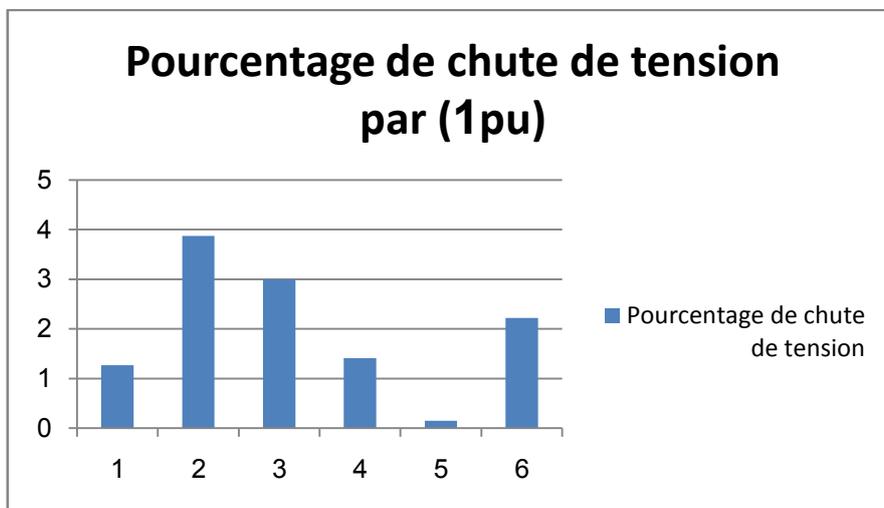
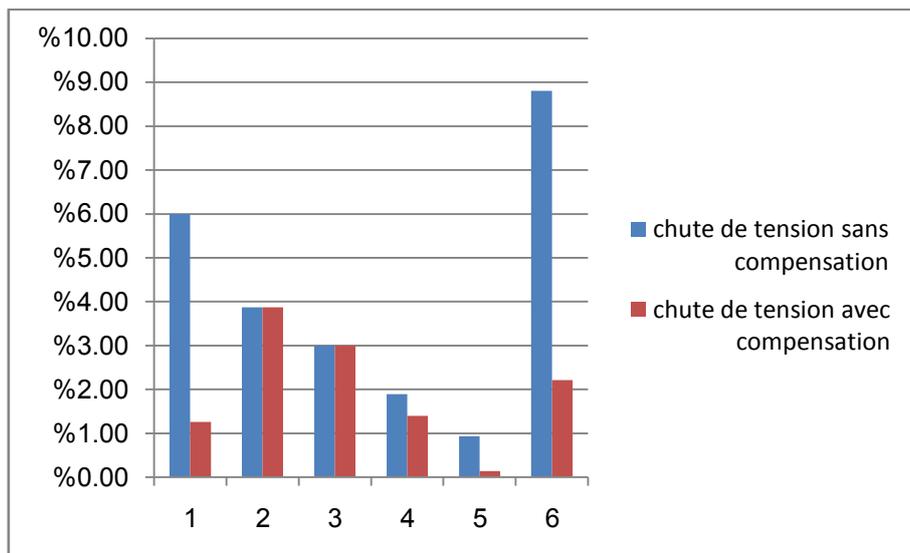


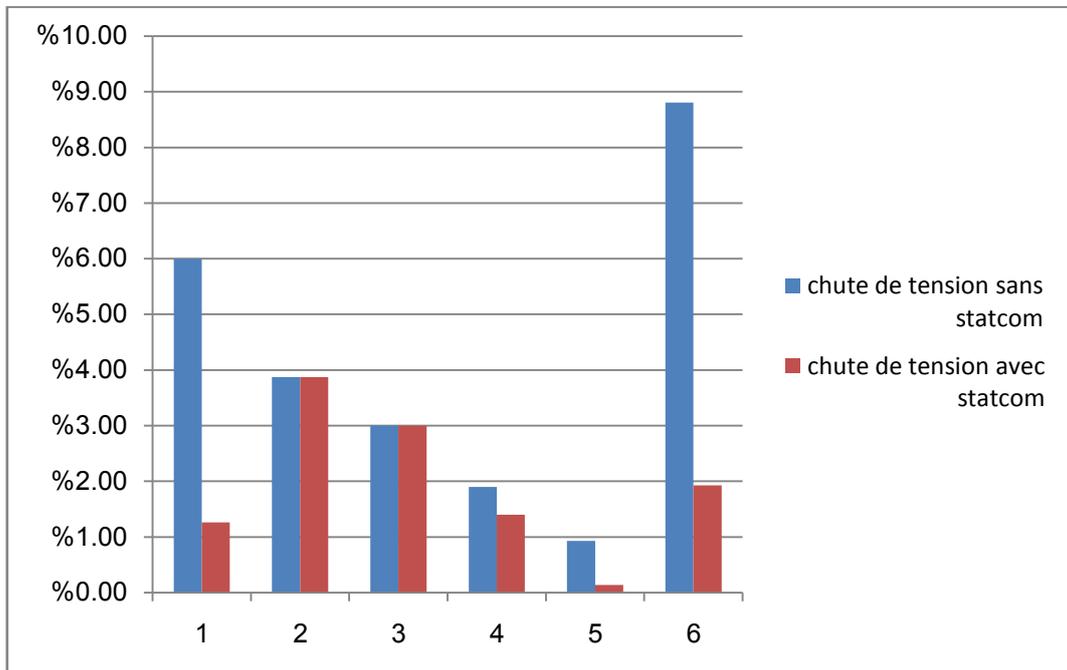
Figure (III-10):chute de tension avec STATCOM $Q_{sh} = -0.8801pu$



Figure(III-11):comparaison entre chute de tension sans et avec STATCOM

- Si on insère une **Statcom** de valeur de puissance réactive $Q_{sh} = -0.9322$ pu au nœud (6).

Nœud	1	2	3	4	5	6
Tension	1.0473	1.0013	1.0000	0.9859	1.0015	0.9807
Chute de tension	0.0127	0.0387	0.0300	0.0141	0.0015	0.0193
Pourcentage de chute de tension par	1.266	3.8727	3.0000	1.4071	0.1475	1.9316



Figure(III-12):comparaison entre chute de tension sans et avec STATCOM, $Q_{sh} = -0.9322$ pu

III.9 Discussion des résultats:

La première chose à remarquer dans les résultats est l'amélioration de l'amplitude des tensions, spécialement le nœud où le STATCOM a été installé de(- 0.8801 pu) et de(-0.9322 pu). L'augmentation des tensions aux jeux de barres est dus au fait que le courant de ligne à diminué, ce qui a pour effet de réduire les chutes de tension .

Le chute de tension diminué dans plusieurs jeu de barre de réseau.

III.10 Conclusion :

Ce chapitre est divisé en deux parties essentielles ,la premier est la modélisation de dispositif FACTs "STATCOM" la définition et le modèle mathématique de l'emplacement dans un réseau électrique. La deuxième partie c'est une application de réalisation d'un réseau a 6 nœuds sans et avec "STATCOM.

Conclusion général

Conclusion général

Dans ce travail Nous avons traité le contrôle des tensions des réseaux d'énergie électrique en incorporant les dispositifs STATCOM .Nous avons étudié et plus précisément les dispositifs STATCOM (définition ,modélisation, incorporation dans load flow).

Le logiciel MATLAB utilisé a donné des résultats très satisfaisants pour divers cas de simulation ,ou on a amélioré avec succès les tensions des nœuds et une répartition adéquate des puissances réactives . Dans notre modeste travail ,nous avons essayé d'illustrer l'utilité, l'efficacité et la rapidité de contrôle des tensions par l'insertion du STATCOM.

Les résultats obtenus montrent clairement que le dispositif de contrôle STATCOM peut jouer un rôle très important dans le domaine de la compensation des puissances réactives et le contrôle des tensions des différents nœuds. En effet, il permet l'amélioration du niveau de tension du nœud où il est incorporé, ainsi que les nœuds voisins. Les systèmes FACTS shunt soutiennent la tension de façon homogène sur l'ensemble du réseau.

En perspective, nous suggérons une continuité dans les domaines suivants:

- La réalisation d'un système global de contrôle de la tension et de la puissance réactive ,a partir des sous systèmes .
- Etude de l'impact des autres dispositifs FACTs sur les réseaux d'énergie électriques.
- L'optimisation des puissances réactives et le contrôle des tensions avec l'incorporation des dispositifs FACTs.

Bibliographies

Bibliographie

Bibliographie

- [1] A. Senni et F.Azizi ."control de tension de réseau de transport par les dispositif FACTs (SVC)".projet fine d'étude Pour l'obtention du diplôme de licence LMD, université d'Adrar le 6/6/2013.
- [2] M .Boudor , A. Hellal" Réseaux Electriques Fondamentaux et Concept de Base ". Copyright Eurl pages Bleues Internationales 2010
- [3] N. Azzoug , F.Ben hamama ,"Amélioration de la qualité la tension d'un réseau électrique par l'utilisation d'un statcom ", mémoire de master, université de Bejaia 2016/2017
- [4] M. B.Ouadaya et M.Drissi , "Amélioration de la stabilité de tension par l'emplacement optimal des dispositif FACTs" , mémoire Master Académique ,université Taher Molay Saida soutenu le 03/07/2017.
- [5] S. Boutaba ."Amélioration de la stabilité d'un réseau électrique par l'utilisation d'un SVC". mémoire de magister ,université Hassiba ben Bouali .soutenu le 09/06/2009
- [6] Mr ABDElmalek, Meftouhi . "Influence des FACTs sur l'écoulement de puissance dans les réseaux d'énergie électriques ", mémoire de magister ,université des Mohamed Boudiaf ORAN 2012/2013
- [7] M. Morati ."contribution l'étude et contrôle des convertisseurs multi niveaux ", thèse docteur de l'université de Lorraine, soutenu 11 Juin 2014
- [8] M.A. Ben rass etS. Laroui .mémoire master académique "utilisation d'un dispositif STATCOM pour l'amélioration du transit de puissance d'un réseau de transport d'énergie alternatif "université Ouargla .soutenu le 09/06/2015
- [9] H. Sekhane . mémoire magister "l'optimisation de la puissance réactive et le contrôle de tension a travers l'incorporation des dispositifs FACTs ".université de Constantine 1 .2013
- [10] R , Ibazine Mr M.Fersaoui . Mémoire de fine de cycle "interactions d'un dispositif FACTs dans un réseau électrique (STATCOM)";2015/2016.
- [11] AMIAR Adèle thèse de doctorat ." Apport du STATCOM et du SSSC a l'amélioration du comportement des réseaux électriques ". université ANNABA
- [12] BERRAHAL Khoukha mémoire magister "Modélisation et simulation d'un système FACTs :UPFC "université de Batna soutenu le 29/01/2009

Bibliographie

- [13] HAMADOU Zakaria ."Optimisation des paramètres d'un système électrique " , mémoire de magister ,université de Stif ,soutenu le 20/06/2012
- [14] Patrice Peticlaire, "Modélisation et commande de structures FACTs: Application au statcom", pour obtenir le grade de docteur , soutenance:16/7/1997
- [15] Ben Chikh abdelhak, Derouich abdelghani , "Etude de l'écoulement de puissance sur un réseau électrique en présence des systèmes FACTs ", Mémoire de mastère académique ;université Kasdi merbah ourgla. soutenu le 02/06/2016
- [16] M. Mezache , "contribution a l'Etude du choix optimal de l'emplacement du dispositif UPFC dans les Réseaux Electriques en utilisant une des Méthode Artificielle " , mémoire de magister , université de batna2 ,soutenu 30/04/2016
- [17] L, Kartoubi , "Optimisation de la synthèse des FACTs par les algorithmes génétiques et les essais particuliers pour le contrôle des réseaux électriques " , mémoire de Magister ,École Nationale Polytechnique Soutenu le 29/11/2006
- [18] Jean Christophe Passelergue "Interaction des dispositifs FACTs dans les grands réseaux électriques ",institut national polytechnique de Grenoble Arrêté ministériel du 30mars1992
- [19] H. gaztanaga . "étude de structures d'intégration des systèmes de génération décentralisée: application aux micro réseaux ' , thèse de docteur ,institut national polytechnique de Grenoble. Soutenu le 15Decembre 2006
- [20] A. Ben chikh et A. Berouiche , "Etude de l'écoulement de puissance sur un réseau électrique en présence de système FACTs ". master académique ,université KASDI Merbah Ouargla .soutenu le 2/6/2016
- [21] R. Ben abid, "Optimisation Multi objectif de la synthèse des FACTs par les particules en essaim pour le contrôle de la stabilité de tension des réseaux électriques " , mémoire de magister université de L'Aghout , soutenu le 4/9/2007.
- [22] L'arbi Boumediene ."Placement des dispositifs "D FACTs " .et contrôle des tensions dans un réseau de Distribution " , thèse de doctorat, université Mohamed Boudiaf ORAN .04/01/2010
- [23] Gueye Assane, "Etude de contrôles des Réseaux de distribution dans l'analyse d'écoulement de puissance Multi phase", en vue de l'obtention de diplôme de Maitrise essence appliqué ,04/2014

Bibliographie

[24] N. Mezhoud, laboratoire de université SKIKDA , "étude de l'écoulement de puissance optimal par la méthode de Newton au présence des dispositifs FACTs",20/Aout/1955.

Annexes

Annex01:

```
Clear
clc
% calcul de la matrice admittance :
y14=0.675-4.339i;
y15=2.1459-9.0129i;
y16=0.8364-4.4956i;
y24=0-28.5714i;
y35=0-23.8095i;
y46=1.7064 - 7.6178i;
y56=0.8306-5.5909i;
y=[y14+y15+y16 0 0 -y14 -y15 -y16 ;
  0 y24 0 -y24 0 0;
  0 0 y35 0 -y35 0;
  -y14 -y24 0 y24+y14+y46 0 -y46;
  -y15 0 -y35 0 y15+y35+y56 -y56;
  -y16 0 0 -y46 -y56 y16+y46+y56];
% les donnees des noeuds:
% les tensions initial
v1(1)=1.06 ; d1(1)=0;
v2(1)=1.04 ; d2(1)=0;
v3(1)=1.03 ; d3(1)=0;
V4(1)=1.00 ; d4(4)=0;
v5(1)=1.00 ; d5(5)=0;
v6(1)=1.00 ; d6(6)=0;
% vecteur de tension
vo=[1.06 ;1.04 ; 1.03 ;1.00 ;1.00; 1.00 ];
% les puissances initiale
% puissance des charges
p4=1.00; q4=0.70;
p5=0.90; q5=0.30;
p6=1.60; q6=1.10;
% puissance des generation
p1=00.00; q1=00.00;
p2=1.50; q2=00.00;
p3=00.00; q3=00.00;
% calcul les courantes
i1=(p1-q1*i)/conj(vo(1));
i2=(p2-q2*i)/conj(vo(2));
i3=(p3-q3*i)/conj(vo(1));
i4=(-p4+q4*i)/conj(vo(4));
i5=(-p5+q5*i)/conj(vo(5));
i6=(-p6+q6*i)/conj(vo(6));
% vecteur des courantes
I=[i1;i2;i3;i4;i5;i6];
epsilon=1e-3;
inter=30;
n=length(vo);
% methode de gauss -siedel.

for k=1:inter
  for j=1:n
    if j==1
      v(1)=(I(1)-y(1,2:n)*vo(2:n))/y(1,1);
```

Annexes

```
elseif j==n
    v(n)=(I(n)-y(n,1:n-1)*(v(1:n-1)))/y(n,n);
else
    v(j)=(I(j)-y(j,1:j-1)*(v(1:j-1))-y(j,j+1:n)*vo([j+1:n]))/y(j,j);
end
end
dv=norm(v'-vo);
if dv<epsilon
    break
end
end
% .....affichage de resultat.....
disp(['la solution de systeme est v= ',num2str(v)])
v=abs(v)
% calcule de la chute de tension.....
for j=1:n
    if j==1
        Dv(1)=abs(v(1))-vo(1);
    elseif j==n
        Dv(n)=abs(v(n))-vo(n);
    else
        Dv(j)=abs(v(j))- vo(j);
    end
end
disp('les chutes de tensions'),Dv;
Dv=abs(Dv)
Dvu=(Dv*100)/1;
disp('les pourcentage de chute de tension'),Dvu
```

Résumé:

L'énergie électrique est transportée et distribuée par des lignes aériennes et des câbles souterrains ou sous –marins ce qui est appelé un réseau électrique.

Lorsque le transit dans une ligne électrique est assez important ,la circulation du courant dans la ligne provoque une chute de tension ,la tension est alors plus basse en bout de ligne qu'en son origine ,et plus la ligne est chargée en transit de puissance ,plus la chute de tension sera importante .pour minimisé ce problème on ajoute des moyennes qui ces appelés dispositifs FACTs, dans notre travail on a choisi les dispositifs STATCOM comme exemple pour étudier l'efficacité de ces moyennes.

Notre travail est basé sur la modélisation des lignes électriques et le calcul des matrices admittances et les méthode numériques pour résoudre les problèmes de la répartition des charges.

Mots-clés : Dispositif FACTs , système de compensation, modélisation des lignes ,STATCOM, chute de tension.

Abstract:

Electrical energy is transported and distributed by overhead lines and underground or submarine cables which is called an electrical network.

When the transit in a power line is quite important, the flow of current in the line causes a voltage drop, the voltage is then lower at the end of line than at its origin, and the line is loaded in transit of power , the more the voltage drop will be important. To minimize this problem we add averages which called these devices FACTs, in our work we chose the STATCOM devices as an example for studying the efficiency of these averages.

Our project is based on the modeling of power lines and the calculation of admittance matrices and numerical methods to solve the problems of load distribution.

Keywords: FACTs device, compensation system, line modeling, STATCOM, voltage drop.

خلاصة :

يتم نقل الطاقة الكهربائية وتوزيعها بواسطة أسلاك هوائية وكبلات تحت الأرض أو تحت الماء تسمى شبكة كهربائية. عندما يكون العبور في خط كهرباء مهمًا تمامًا، يتسبب تدفق التيار في الخط في انخفاض الجهد ، ويكون الجهد عندئذٍ أقل في نهاية الخط عن الأصل، ولتقليل هذه المشكلة، نضيف أجهزة تسمى هذه الأجهزة FACTs ، اخترنا في عملنا أجهزة STATCOM كمثال لدراسة كفاءة هذه الأجهزة.

يعتمد مشروعنا على نمذجة خطوط الطاقة وحساب مصفوفات القبول والطرق العددية لحل مشاكل توزيع الحمولة.

الكلمات المفتاح:

FACTs الجهاز ، ونظام التعويض ، ونمذجة الخط ، STATCOM ، انخفاض الجهد