

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE ABDERAHMANE MIRA BEJAIA  
FACULTE DE TECHNOLOGIE  
DEPARTEMET DE GENIE ELECTRIQUE  
OPTION : RESEAUX ELECTRIQUES



جامعة بجاية  
Tasdawit n'Bgayet  
Université de Béjaïa



# Mémoire de Fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme de master  
en Electrotechnique  
Option : Réseaux Electrique

## THEME

*Amélioration de la qualité de la tension d'un  
réseau électrique par l'utilisation d'un  
STATCOM*

**Rédigé par :**

Mr : AZZOUG NASSIM

Mr : BENHEMANA FOUAD

**Encadré par :**

M<sup>me</sup>: S.CHEKKAL

*Année universitaire : 2016/2017*

# *Remerciements*

A l'issue de ce travail, nous tenons à remercier en premier lieu le bon Dieu de nous avoir donné l'aide afin de réaliser ce projet ce projet et surtout de nous avoir donné du courage pour le finir

Nous souhaitons d'abord exprimer notre profonde reconnaissance à notre encadreur M<sup>me</sup> S.CHEKKAL, pour son aide et ses critiques.

Enfin, nous remercions toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

# *Dédicaces*

*Je Dédie Ce Mémoires*

*À ma très chère Mère et à mon Père, en témoignage et en gratitude de leur dévouement, de leur soutien permanent durant toutes mes années d'études, leurs sacrifices illimités, leur réconfort moral, eux qui ont me voir atteindre ce but, pour tout cela et pour ce qui ne peut être dit, mes affectations sans limite.*

*A ceux qui sont la source de mon inspiration et mon courage, à qui je dois de l'amour et de la reconnaissance.*

*A mes chers Frères*

*A mon binôme : Nassim*

*A mes chers amis.*

*Et à ceux qui croiront toujours en moi.*

*A vous tous un grand merci.*

***Fouad***

# *Dédicaces*

*Je Dédie Ce Mémoires*

*À ma très chère Mère et à mon Père, en témoignage et en gratitude de leur dévouement, de leur soutien permanent durant toutes mes années d'études, leurs sacrifices illimités, leur réconfort moral, eux qui ont me voir atteindre ce but, pour tout cela et pour ce qui ne peut être dit, mes affectations sans limite.*

*A ceux qui sont la source de mon inspiration et mon courage, à qui je dois de l'amour et de la reconnaissance.*

*A mes chers Frères*

*A mes sœurs*

*A mon binôme : FOUAD*

*A mes chers amis.*

*Et à ceux qui croiront toujours en moi.*

*A vous tous un grand merci.*

**NASSIM**

## SOMMAIRE

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

### **Chapitre I:Généralités sur les réseaux électriques et les systèmes FACTS**

Introduction.....	3
I.1. Généralités sur les réseaux électriques .....	3
I.1.1. Réseaux de Transports et lignes d'interconnexion .....	4
I.1.2. Réseaux de Répartitions .....	5
I.1.3. Réseaux de Distribution .....	5
I.2. Architecture des réseaux.....	6
I.3. Qualité de l'énergie électrique .....	7
I.3.1 Types de perturbations qui peuvent dégrader la qualité de l'Energie .....	7
I.3.1.1 Variations de fréquence .....	7
I.3.1.2 Creux de tension et les coupures brèves .....	8
I.3.1.3 Fluctuations de tension-flicker .....	9
I.3.1.4 Déséquilibre de tension .....	9
I.3.1.5 Surtensions transitoires.....	10
I.3.1.6 Perturbations harmoniques et inter-harmoniques .....	11
I.4. Concept générale et définition de Flexible AC Transmission System (FACTS).....	13
I.4.1. Procédé d'amélioration des réseaux avec les systèmes FACTS.....	14
I.4.2. Rôle des FACTS dans un réseau électrique .....	14
I.4.3. Types de FACTS .....	15
I.5. Application du dispositif FACTS dans les réseaux électriques .....	15

## SOMMAIRE

I.5.1. Type de connexion et applications associées.....	16
I.5.2. Compensateurs shunt.....	16
I.5.2.1. Principe de fonctionnement des compensateurs shunts.....	16
I.5.3. Compensateurs shunt à base de thyristor.....	16
I.5.3.1. Principe de fonctionnement des compensateurs shunts à base de thyristor .	19
I.5.4. STATCOM.....	20
I.5.4.1. Principe de fonctionnement d'un STATCOM.....	21
I.5.4.2. Avantages d'un STATCOM.....	21
I.5.4.3. Différents types de STATCOM :.....	21
I.5.4.3.1. STATCOM conventionnel.....	21
I.5.4.3.2. STATCOM à MLI.....	22
I.5.4.4. Effet de la Compensation Shunt STATCOM sur le Réseau Electrique.....	22
Conclusion.....	23

## **Chapitre II : Étude et modélisation des différents éléments du réseau électrique**

Introduction.....	25
II.1 Modélisation des éléments du réseau électrique.....	25
II.1.1 Modélisation des générateurs.....	25
II.1.2 Modélisation des charges.....	26
II.1.3 Modélisation des lignes aériennes.....	27
II.2 Modélisation du transformateur.....	33
II.2.1 Transformateur à gradins.....	33

## SOMMAIRE

II.2.2 Transformateur déphaseur .....	35
II.3 Static synchronous compensator (STATCOM) .....	36
II.3.1. Description.....	36
II.3.2. fonctionnement du STATCOM.....	37
II 4. Modélisation et commande du STATCOM.....	40
II.4.1. Modélisation du STATCOM .....	41
II.4.1.1 Modèle mathématique simplifié du STATCOM .....	41
II.4.1.2 Modèle Mathématique en Considérant le Circuit DC :.....	44
Conclusion .....	46

### **Chapitre III : simulation et interprétation des résultats**

Introduction.....	47
III.1. Etat initial du réseau (sans STATCOM) .....	47
III.2 Insertion d'un STATCOM .....	52
Conclusion .....	58
Conclusion générale .....	59

### Chapitre I : Généralités sur les réseaux électrique et les systèmes FACTS

Fig. I.1 : Architecture traditionnelle des différents sous-systèmes des réseaux électriques .....	4
Fig. I.2 : Structure bouclée.....	6
Fig. I.3 : Structure radiale .....	6
Fig. I.4 : Structure maillé .....	7
Fig. I.5 : La variation de la fréquence.....	8
Fig. I.6 : Forme d'onde d'un creux de tension ( $\Delta V$ ) et coupure.....	8
Fig. I.7 : Variation rapide de la tension. ....	9
Fig. I.8 : Déséquilibre de tension.....	9
Fig. I.9 : Forme d'onde d'une surtension.....	10
Fig. I.10 : Distorsion provoquée par un seul harmonique ( $h=5$ ) .....	11
Fig. I.11 : Distorsion provoquée par un seul inter harmonique ( $h=3$ ) .....	11
Fig. I.12 : Synthèse d'un signal à partir des harmoniques. ....	12
Fig. I.13 : Schéma d'un système de transmission.....	14
Fig. I.14 : L'effet FACTS sur le transit de la puissance active.....	15
Fig. I.15 : Structure du TCR(TSR). ....	17
Fig. I.16 : Structure du TSC.....	17
Fig. I.17 : Structure d'un TCR-TSC.....	18
Fig. I.18 : Structure du TCBR.....	19
Fig. I.19 : Schéma de base d'un STATCOM.....	19
Fig. I.20 : Schéma de principe d'un SVC .....	20

### Chapitre II : Etude et modilisation des déferents éléments du éléments du réseau électrique

Fig. II.1 : Modèle du générateur .....	25
Fig. II.2 : Modèle de la charge.....	26
Fig. II.3 : Modèle d'une ligne courte .....	28



## Liste des figures

Fig. II.4 : Diagramme vectoriel d'une ligne courte .....	28
Fig. II.5 : Ligne de longueur moyenne, représentation en $\Pi$ .....	29
Fig. II.6 : Schéma unifilaire d'une ligne longue avec les paramètres par unité de longueur .....	31
Fig. II.7: Modèle général d'un transformateur .....	33
Fig. II.8 : Modèle approximatif du transformateur .....	34
Fig. II.9 : Modèle du transformateur déphaseur .....	35
Fig. II.10 : Compensateur STATCOM .....	37
Fig. II.11 : Courant du convertisseur en fonction de la tension de réseau.....	37
Fig. II.12 : Schéma de principe d'un STATCOM .....	37
Fig. II.13 : Schéma du STATCOM couplé au réseau électrique .....	38
Fig. II.14 : Fonctionnement en mode capacitif .....	40
Fig. II.15 : Fonctionnement en mode inductif .....	40
Fig. II.16 : Schéma équivalent du STATCOM connecté au réseau.....	41
Fig. II.17 : Passage du repère (abc) vers le repère (dq) .....	43
Fig. II.18 : Schéma équivalent du circuit DC du STATCOM .....	44

## Chapitre III : Simulation et interprétation des résultats

Fig. III.1 : Réseau de distribution radial à 10 jeux de barres.....	47
Fig. III.2 : Tensions au réseau à l'état initial .....	47
Fig. III.3 : Tensions aux nœuds du réseau .....	48
Fig. III.4 : Chute dans les branches.....	49
Fig. III.5 : Pertes de puissance active et réactive dans les branches.....	49
Fig. III.6 : Schéma globale de la simulation .....	51
Fig. III.7 : Schéma du réseau avec STATCOM.....	52
Fig. III.8 : Tensions aux jdbs avec compensation.....	52
Fig. III.9 : Tensions aux niveaux de chaque jdbs après compensation.....	53
Fig. III.10 : Chute de tension dans les branches après compensationns .....	54
Fig.III.11 : Pertes de puissance active et réactive après compensation. ....	55

## Liste des figures

Fig.III.12 : Courbe de puissance réactive injectée par le STATCOM.....	55
Fig.III.13 : Tension aux jdbs avant et après la compensation .....	56
Fig.III.14 : Comparaison des chutes de tension dans les branches.....	57

## Liste des tableaux

Tab.III.1 : Tension aux jdbs à l'état initiale.....	48
Tab.III.2 : Pertes de puissances active et réactive dans les branches avant la compensation.....	49
Tab.III.3 : Tensions aux jdbs avec compensation.....	53
Tab.III.4 : Pertes de puissances active et réactive dans les branches après la compensation .....	54
Tab.III.5 : Somme des pertes actives et réactive dans les deux cas.....	55
Tab.III.6 : Chutes de tension dans les branches avant et après compensation....	56
Tab.III.7 : Puissance apparente totale fournie par la source au réseau .....	57

## Liste des symboles et abréviations

<b>FACTS</b>	Flexible Alternatif Curant Transmission Systems.
<b>STATCOM</b>	Static Synchronous Compensator.
<b>GTO</b>	Gate Turn-Off Thyristor
<b>IGBT</b>	Isulated Gate Commutated Thyristors.
<b>TCR</b>	Thyristor Controlled Reactor.
<b>TSR</b>	Thyristor Switched Reactor.
<b>RCT</b>	Réactance Commandées par Thyristors.
<b>TSC</b>	Thyristor Switched Capacitor.
<b>CCT</b>	Condensateurs Commandés par Thyristor.
<b>SVC</b>	Static Var Compensator.
<b>SVG</b>	Advenced Static Var Compensator
<b>TCBR</b>	Thyristor Control Breaking Resistor.
<b>CSERA</b>	Compensateur statique d'énergie réactive de type avancé.
<b>ASVC</b>	Advanced Static Var Compensator.
<b>MLI</b>	Modulation par largeur d'impulsion.
<b>SSG</b>	Stacit Synchronous Generators.
$P_{Gi}$	Puissance active délivrée par le générateur au nœud 'i'.
$Q_{Gi}$	Puissance active délivrée par le générateur au nœud 'i'.
$V_i$	Tension au nœud 'i'.
$\theta_i$	Angle de phase de la tension au nœud 'i'.
$\bar{S}_{chi}$	La puissance apparente en complexe de la charge.
$P_{chi}$	La puissance active de la charge.
$Q_{chi}$	La puissance réactive de la charge.
$V_s$	Tension de la source.
$V_R$	Tension de récepteur.
$I_s$	Courant de source.

## Liste des symboles et abréviations

$I_R$	Courant de récepteur.
$\bar{z}$	Impédance série de la ligne par unité de longueur.
$\bar{y}$	Admittance shunt de la ligne par unité de longueur.
$\bar{Z}$	Impédance série total de la ligne.
$\bar{Y}$	Admittance shunts total de la ligne.
$\delta_R$	Angle de phase de la tension de récepteur.
$\delta_s$	Angle de phase de la tension de la source.
$Z_1$	Impédance de l'enroulement primaire du transformateur.
$Z_2$	Impédance de l'enroulement secondaire du transformateur.
$Y_T$	Admittance shunt du transformateur.
$V_m$	Tension au primaire du transformateur.
$V_k$	Tension au secondaire du transformateur.
$I_m$	Courant au primaire du transformateur.
$I_k$	Courant au secondaire du transformateur.
$E_1$	F.e.m primaire au primaire du transformateur.
$E_2$	F.e.m au secondaire du transformateur.
$I_0$	Courant qui traverse la branche magnétisante.
$\mu$	Rapport de transformation.
$V_{sh}$	Tension shunt injectée par le STATCOM.
$I_{sh}$	Courant shunt injectée par le STATCOM.
$V_t$	Tension au jeu de barre "t".
$P_{sh}$	Puissance active délivrée par le STATCOM..
$Q_{sh}$	Puissance réactive délivrée par le STATCOM.

### Introduction générale

De nos jours, les problèmes liés au fonctionnement des réseaux de transport et de production d'énergie électrique ont pris une importance considérable. Face à une consommation d'électricité qui ne cesse d'augmenter ainsi que les conditions d'environnement très contraignantes, les réseaux d'énergie électrique ont tendance à s'accroître et deviennent de plus en plus maillés et interconnectés. Le transport se fait, en outre, sur de longues distances en utilisant des lignes de grande capacité de transport. Cette complexité de structure a de très nombreuses conséquences. La difficulté de maintenir un profil de tension acceptable a substantiellement augmenté. La stabilité de tension du réseau est alors caractérisée par sa capacité de maintenir la tension aux bornes de la charge dans les limites spécifiées dans le fonctionnement normale [1].

L'étude du comportement de la tension dans les réseaux électriques est devenue une préoccupation majeure des exploitants et planificateurs de ces systèmes. En fait, plusieurs incidents généralisés survenus dans le monde ont été associés à des instabilités de tension [1]. Ce mode d'instabilité n'est pas encore bien maîtrisé, comparé au mode d'instabilité angulaire (dynamique et transitoire). En effet, le mécanisme causant l'instabilité de tension semble l'un des plus importants problèmes à clarifier [2]. Aujourd'hui encore, il n'y a pas une théorie disponible et largement acceptée pour l'analyse de la stabilité de tension. Les problèmes liés à ce type d'instabilité constituent alors, dans plusieurs pays, un axe de recherche très important.

Des relevés sur les incidents survenus durant les dernières décennies ont montré que l'effondrement de tension intervient généralement suite à une perturbation majeure ou à une augmentation importante de la charge sur un réseau électrique soumis à de fortes contraintes. Ce réseau s'affaiblit et sa consommation réactive s'accroît. Le phénomène est alors caractérisé par une baisse progressive de la tension dans une ou plusieurs régions consommatrices, et qui va en s'accélération au bout de quelques minutes [3]. La dégradation de la tension au niveau des charges est alors telle qu'elle entraîne des interruptions de service dont les causes directes peuvent être : le manque de tension, l'augmentation des pertes réactive du réseau. La défaillance du réglage de la tension a pour conséquence une accélération de la dégradation du plan de la tension qui peut aller jusqu'à des déclenchements des groupes et des lignes et un effondrement général du réseau.

Dans cette situation, les moyens classiques de contrôle des réseaux (transformateur à prises réglables en charge, transformateurs déphaseurs, compensateurs série ou parallèle commutés par disjoncteurs, modification des consignes de trop lents et insuffisants pour

répondre efficacement aux problèmes d'instabilité du réseau), ne suffisent plus. Il faudra donc compléter leur action en mettant en œuvre des dispositifs électroniques de puissance ayant des temps de réponse courts, connus sous l'appellation FACTS (Flexible Alternative Current Transmission Systems) pour le contrôle des réseaux [4].

Le développement des dispositifs FACTS a ouvert de nouvelles perspectives pour une exploitation plus efficace des réseaux par action continue et rapide sur les différents paramètres (déphasage, tension, impédance). Ainsi, l'intérêt de ces systèmes est 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 améliorant la stabilité des réseaux électriques et la qualité de la tension au niveau des jeux de barres.

De manière à atteindre ces objectifs, ce mémoire sera divisé en trois chapitres :

Le premier chapitre est une présentation générale sur les réseaux électriques, les perturbations qui peuvent apparaître dans ce dernier sont exposées leurs causes et leurs conséquences avec leurs solutions de dépollution existantes. Ce chapitre recense aussi les généralités sur les systèmes FACTS.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation des différentes parties du réseau électrique tel que les générateurs, les charges, les lignes aériennes (courtes, moyennes et longues), les transformateurs (transformateur à gradins, transformateur déphaseur,) et à la modélisation du STATCOM.

Dans le troisième chapitre, on a met en évidence l'efficacité du STATCOM dans l'amélioration de la qualité de la tension d'un réseau électrique. La simulation du système étudié est faite sur le logiciel MATLAB, suivi de l'analyse des résultats de simulation.

# CHAPITRE

## I



## Introduction

L'énergie électrique est produite en même temps qu'elle est consommée, donc, en permanence, la production doit s'adapter à la consommation. Le premier but de l'énergie est de pouvoir alimenter la demande des consommateurs. Comme on ne peut encore stocker économiquement et en grande quantité l'énergie électrique, il faut pouvoir maintenir en permanence l'égalité entre la production et la consommation.

L'électricité est connue universellement comme étant un vecteur de développement. Par ailleurs, sa production, son exploitation (transport, répartition, distribution et conduite) ainsi que son utilisation doivent être bien maîtrisées et gérées au mieux l'amplitude, la fréquence, et la forme d'onde.

L'architecture centralisée des systèmes énergétiques actuels résulte d'une évolution historique qui a atteint son apogée au dernier tiers du XXème siècle. Au cours de la première moitié du siècle, les différents pays industrialisés ont organisé leur secteur électrique selon un modèle industriel fondé sur le monopole de production-transport-distribution.

### I.1. Généralités sur les réseaux électriques

Les réseaux électriques sont décomposés en trois sous-systèmes : la production, le transport et la distribution. Chaque sous-système est relié par des postes sources chargés de l'adéquation des niveaux de tension telle que, les réseaux de grand transport fonctionnent à des tensions élevées de manière à transmettre la puissance sous des courants moins élevés avec, par conséquent, des sections de conducteurs et des pertes de transport plus faibles.

Le cas de la L'Algérie par exemple, les niveaux de tension les plus employés sont : 400kV/225 kV pour le transport, 90kV/63kV pour la répartition et 20kV/400V pour la distribution comme la montre la figure I.1.

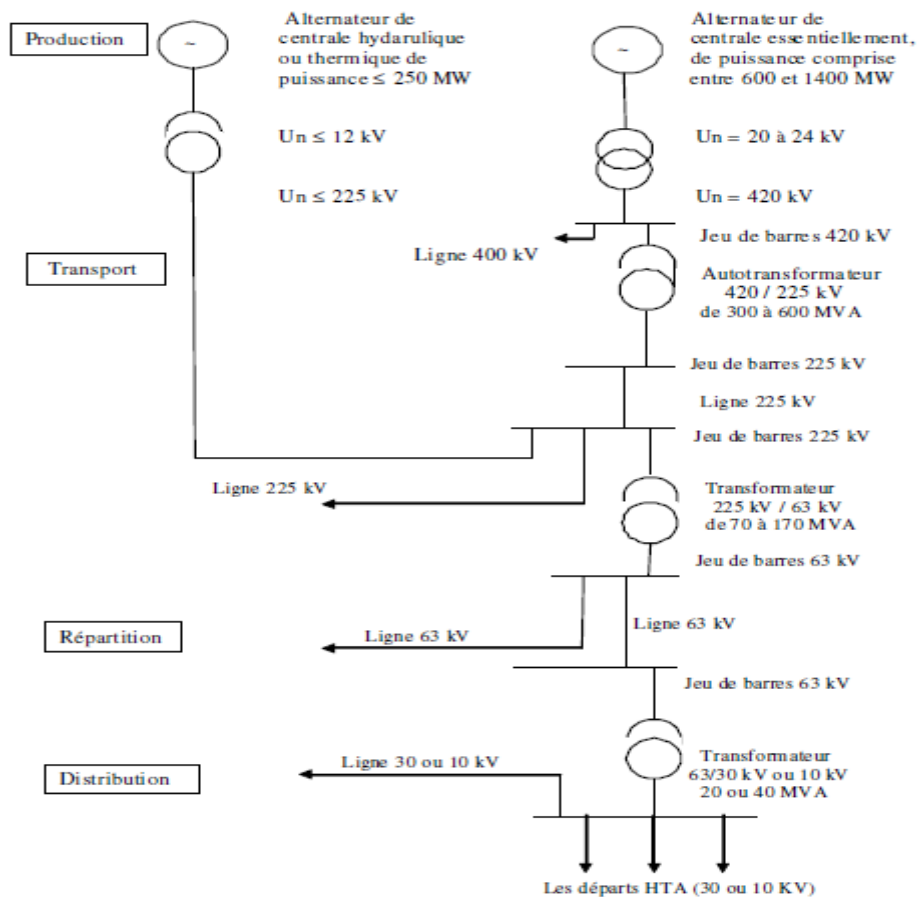


Fig. I.1 - Architecture générale de réseaux d'énergies électrique en Algérie.

La distinction des différents sous-systèmes se base, non seulement sur une différence de niveau de tension mais aussi sur les fonctions que chacun doit assumer [5] :

### I.1.1. Réseaux de Transports et lignes d'interconnexion

Ces réseaux lient les principaux centres de production avec les zones de consommation. Le niveau de tension pour le transport est établi entre 220kV et 800 kV. Les distances géographiques entre les centres de consommation, la variabilité ou la versatilité de la charge et l'impossibilité de stocker l'énergie en grande quantité ont créé le besoin d'un système électrique capable de transmettre l'énergie électrique sur de longues distances. Ces lignes de transport et d'interconnexion peuvent avoir des milliers de kilomètres. Les missions des réseaux de transport sont : le transport de l'énergie, l'interconnexion nationale et l'interconnexion internationale pour échanger des puissances et favoriser la solidarité des systèmes en cas d'urgence. Le niveau de la tension doit être élevé car les pertes Joules sont

inversement proportionnelles au carré de la tension ( $p = k/U^2$ ) avec 'U' : la tension du réseau, et 'k' : une constante qui dépend des lignes. Le transport d'énergie électrique est réalisé avec des liaisons à courant continu (DC) ou à courant alternatif (AC). Les lignes AC pour les longues distances ont des inconvénients liés aux problèmes de stabilité et de compensation de l'énergie réactive pour conserver un bon niveau de tension. Les liaisons à courant continu n'ont pas ces problèmes et ont même un coût plus bas sur des distances suffisamment longues. Par contre, ils nécessitent l'utilisation de convertisseurs AC/DC et DC/AC. Enfin, les réseaux de transport sont souvent maillés, les sections des lignes varient de 570 à 1200 mm<sup>2</sup>.

### I.1.2. Réseaux de Répartitions

Le but de ces réseaux est d'amener l'énergie du réseau de transport aux centres de consommation d'énergie les plus importants. Ces centres de consommation sont publics ou privés (plus de 10 MVA), essentiellement des industries de l'acier, des produits chimiques, le chemin de fer, pour ne citer que les plus importants. Leur niveau de tension, est souvent compris entre 45kV et 160 kV. Il est organisé normalement sous forme de boucle et avec un transit de l'énergie souvent bidirectionnel. La structure de ces réseaux est essentiellement aérienne. Par contre, lorsqu'ils sont proches des villes, les ligne sont remplacée par des câbles enterrés [5].

### I.1.3. Réseaux de Distribution

Les réseaux de distribution acheminent l'énergie électrique du réseau de répartition (ou de transport) aux clients résidentiels et aux petits clients industriels. Les tensions des réseaux de distribution sont comprises entre 230V à 400V pour la basse tension et 4kV à 45 kV pour la moyenne tension. La structure des réseaux de distribution est bouclée et exploitée en radial, ou des réseaux à structure arborescente. Certains pays disposent de réseaux maillés et avec la possibilité d'une exploitation débouclés.

La conduite et l'exploitation d'un tel type de système, aux fins d'assurer, à tout instant, l'équilibre consommation/production aux pertes près, passe par la prévision des charges et la mise à disposition des consignes de génération nécessaires pour faire face à la demande d'énergie. La variabilité de la charge avec les contraintes sociales et environnementales comme la variation de la charge avec la température (exemple 1200MW/°C), l'augmentation de la charge à cause des retransmissions sportives, programmes spéciaux ou autres, font que le gestionnaire du réseau de transport doit planifier non

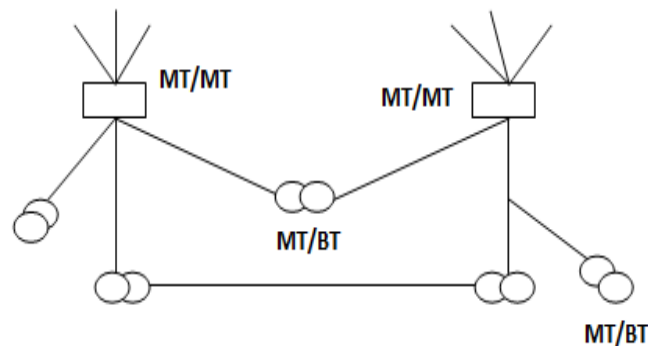
seulement les générations d'énergie pour couvrir la demande prévue mais aussi les réserves pour fournir l'énergie des aléas et incidences possibles [5].

## I.2. Architecture des réseaux

Il existe trois structures qu'on peut emprunter pour la réalisation d'un réseau électrique qui sont les suivantes :

- **Structure bouclée**

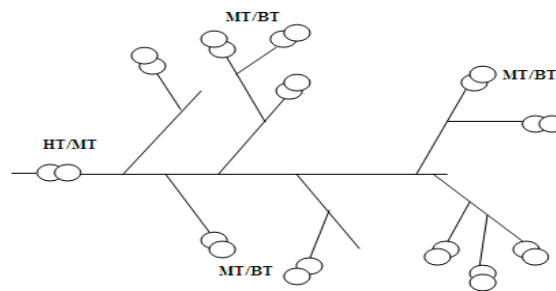
L'assemblage en boucle des lignes permet de mettre hors circuit une partie de la ligne défectueuse grâce à ses points de séparation. L'alimentation électrique est interrompue uniquement dans cette partie jusqu'à la réparation de la panne ; le reste du réseau peut continuer à fonctionner [é6].



**Fig. I.2 :** Structure bouclée

- **Structure radiale**

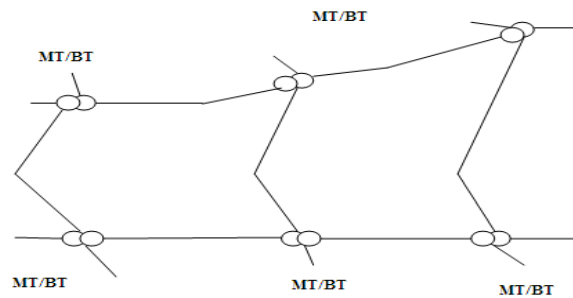
Elle représente le réseau sous sa forme la plus simple ; les lignes partent d'un point central, par exemple une station de transformation locale et rayonnent depuis celui-ci. Si une perturbation se produit sur ce type de réseau, l'alimentation électrique de tous les clients rattachés à ce rayon défectueux est interrompue, jusqu'à ce que la panne soit réparée. La panne d'une station de transformation peut paralyser tout un quartier [6].



**Fig. I.3 :** Structure radiale

- **Structure maillé**

Lorsque des lignes en boucle sont regroupées pour relier des points très éloignés les uns des autres, elles forment un réseau maillé. Ce type de réseau offre une très grande fiabilité d’approvisionnement car chaque tronçon de ligne peut être alimenté via différentes voies. Même une défaillance sur plusieurs tronçons ne s’engendre pas une grosse perturbation [06].



**Fig. I.4 :** Structure maillé

### I.3. Qualité de l'énergie électrique

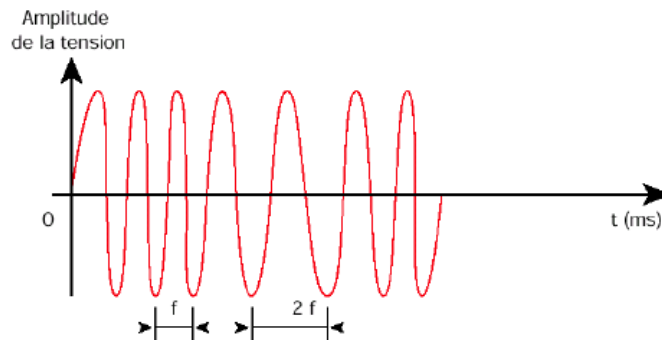
L'objectif fondamental des réseaux électriques est de fournir aux clients de l'énergie électrique avec une parfaite continuité, sous une forme de tension sinusoïdale, avec des valeurs d'amplitude et de fréquence préétablies. Cependant cet objectif semble idéal et n'est jamais facile à assurer, car le réseau électrique aujourd'hui est appelé à fonctionner sous un environnement de plus en plus agressif, et par conséquent il doit faire face à de nombreux types de perturbations qui être peuvent d'origine interne comme l'évolution et la complexité du réseau et des charges qui lui sont connectées, ou externe liées aux phénomènes des changements climatiques. Afin d'éviter le dysfonctionnement, voir la destruction des composants du réseau électrique ou des récepteurs finaux, il est indispensable de comprendre l'origine des perturbations et de chercher les solutions adéquates pour les supprimer [7].

#### I.3.1 Types de perturbations qui peuvent dégrader la qualité de l'Energie

##### I.3.1.1 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.

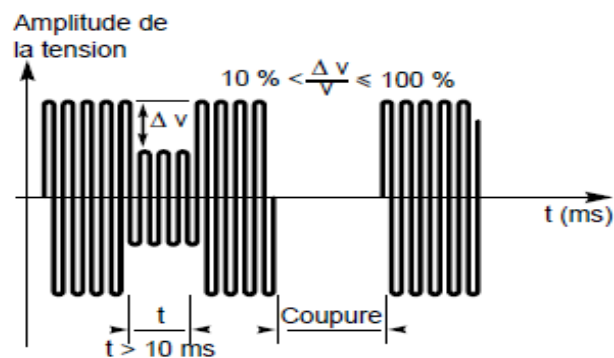
La situation peut être différente dans un petit réseau isolé. Certains processus industriels nécessitent un réglage très précis de la vitesse des moteurs et peuvent subir des dysfonctionnements en cas d'alimentation par un groupe de secours mal conçu [8].



**Fig. I.5 :** La variation de la fréquence.

### I.3.1.2 Creux de tension et les coupures brèves

Les creux de tension sont dus aux courts-circuits survenant dans le réseau en général ou dans les installations de la clientèle. Seules les chutes de tension supérieures à 10% sont considérées ici. Leur durée peut aller de 10ms à plusieurs secondes, en fonction de la localisation du court-circuit et du fonctionnement des organes de protection. Les creux de tension peuvent provoquer le déclenchement de l'élément en défaut, lorsque leur profondeur et leur durée excèdent certaines limites. Les conséquences peuvent être extrêmement coûteuses [9].



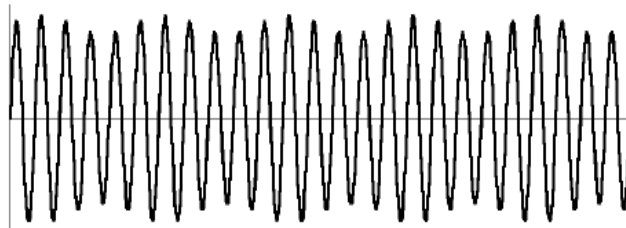
**Fig. I.6 :** forme d'onde d'un creux de tension ( $\Delta V$ ) et coupure.

Ces creux de tensions sont dus aux commutations des charges de forte puissance (démarrage moteur) ainsi que les courts-circuits (enclenchement de gros moteur) et ont pour conséquences : Perturbation ou arrêt du procédé, pertes de données ou données erronées, ouverture de contacteurs, verrouillage de variateurs de vitesse, ralentissement ou décrochage de moteurs, extinction de lampes à décharge.

Les remèdes utilisables en cas de besoin sont : Régulateur électronique dynamique de tension, démarreur progressif, compensateur électronique série, augmentation de la puissance de court-circuit, modification de la sélectivité des protections.

### I.3.1.3 Fluctuations de tension-flicker

Des variations rapides de tension, répétitives ou aléatoire, sont provoquées par des variations rapides de puissance absorbée ou produite par des installations telles que les soudeuses, fours, éolienne, etc. Ces fluctuations de tension peuvent provoquer un papillotement de l'éclairage (flicker), qu'est gênant pour la clientèle, même si les variations individuelles ne dépassent pas quelques dixièmes de pour-cent. Les autres applications de l'électricité ne sont normalement pas affectées par ces phénomènes, tant que l'amplitude des variations reste inférieure à 10% [9].

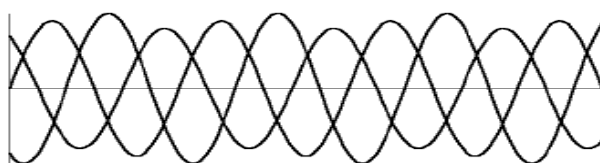


**Fig. I.7 :** Variation rapide de la tension.

Les Solutions proposées pour remédier au problème de creux de tensions sont: Compensateur synchrone, compensateur statique de puissance réactive, conditionneur actif, condensateur série

### I.3.1.4 Déséquilibre de tension

Le déséquilibre de récepteurs électriques (triphases ou monophasés) alimentés par un réseau triphasé s'observe lorsque les trois tensions ne sont pas égales en amplitude et/ ou lorsqu'elles sont déphasées de  $120^\circ$  les unes par rapport aux autres, comme illustré par la figure (I.8) [10].



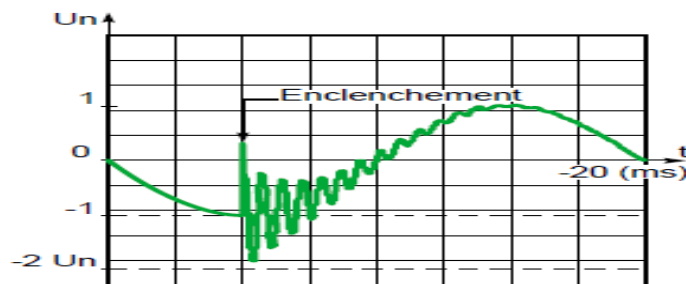
**Fig. I.8 :** Déséquilibre de tension.

Ces déséquilibres sont essentiellement dus à la circulation de courants non équilibrés à travers les impédances du réseau et ont pour conséquence des couples de freinage parasites et des échauffements qui conduisent à une dégradation prématurée des équipements tels que des moteurs ou toute autre machine asynchrone.

Les solutions possibles pour équilibrer les trois tensions : équilibrer les charges utiliser les compensateurs électroniques shunts, augmenter la puissance de court-circuit  $P_{cc}$ .

### I.3.1.5 Surtensions transitoires

Les surtensions transitoires sont des phénomènes brefs dans leur durée, et aléatoires dans leur apparition. Elles sont considérées comme étant des dépassements d'amplitude du niveau normal de la tension fondamentale à la fréquence 50Hz pendant une durée inférieure à une seconde.



**Fig. I.9** : forme d'onde d'une surtension.

Les surtensions sont de trois natures ; surtensions à la fréquence industrielle (50 Hz) surtensions de manœuvre et surtensions atmosphériques. Elles apparaissent selon deux modes : mode commun (entre conducteurs actifs et la masse ou la terre) et le mode différentiel (entre conducteurs actifs, phase – phase ou phase – neutre) [11].

Les surtensions à la fréquence industrielle prennent naissance suite à un défaut d'isolement entre phase et terre, lors d'une surcompensation de l'énergie réactive ou encore lors d'une Ferro-résonance provoquée par un circuit inductif et un condensateur.

Les surtensions de manœuvre découlent d'une modification de la structure du réseau par la mise en service de gradins de condensateur ou d'une ligne à vide.

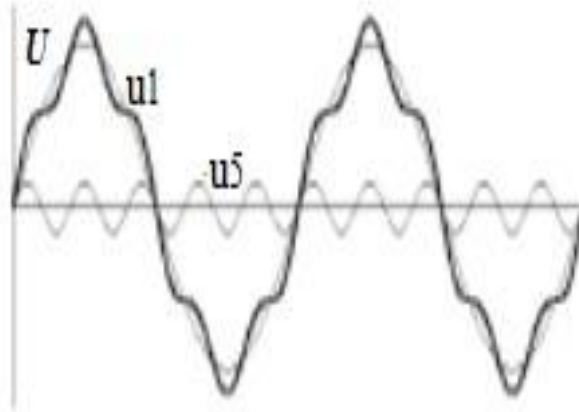
Les surtensions atmosphériques sont provoquées par la foudre soit directement, soit indirectement par augmentation du potentiel de la terre [11].

Les solutions possibles pour éliminer le dépassement d'amplitude sont : Para-foudre, parasurtenseur, enclenchement synchronisé, résistance de pré-insertion, self de choc, compensateur automatique statique.



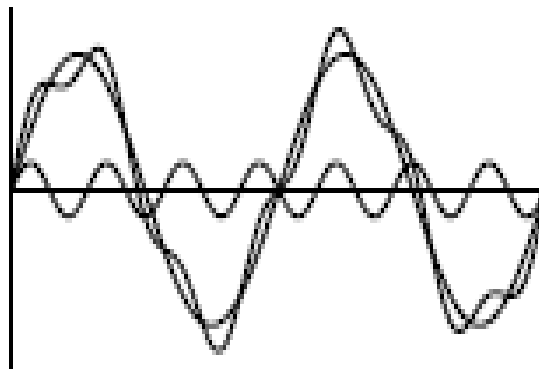
### I.3.1.6 Perturbations harmoniques et inter-harmoniques

Les harmoniques sont des perturbations permanentes affectant la forme d'onde de la tension du réseau. Ces perturbations résultent de la superposition, sur l'onde fondamentale à 50Hz, d'ondes également sinusoïdales mais de fréquences multiples de celle du fondamental qui provoquent une distorsion de l'onde sinusoïdale [12].(fig.I.10)



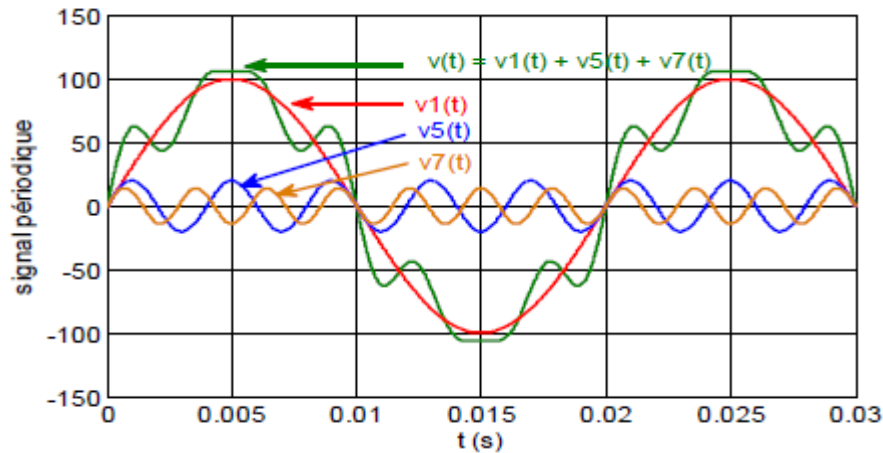
**Fig. I.10 :** Distorsion provoquée par un seul harmonique ( $h=5$ )

Les composantes des harmonique dont la fréquence  $n$ 'est pas un multiple entier du fondamental sont rares. Elles sont appelées inter harmoniques. Ces dernières sont plus souvent dues à des installations produisant des harmoniques rapidement variables, tels que les fours à arc, les cyclo-convertisseurs, et les variateurs de vitesse employés dans certaines conditions. La présence de filtres d'harmoniques peut considérablement aggraver le phénomène (amplification de fréquences intermédiaires, phénomène d'instabilité dans les convertisseurs...).



**Fig. I.11 :** Distorsion provoquée par un seul inter harmonique ( $h=3$ )

La figure I.12 illustre un exemple de forme d'onde d'une tension distordue contenant, en plus du terme fondamental de fréquence 50Hz, deux harmoniques de rang impair 5 et 7.



**Fig. I.12** : Synthèse d'un signal à partir des harmoniques.

Dans la plupart des cas, les harmoniques présents sur les réseaux électriques proviennent de l'utilisation de charges non linéaires. Une charge non linéaire consomme un courant non sinusoïdal, même si elle est alimentée par une tension sinusoïdale. Ces charges se comportent approximativement comme des sources de courant harmonique dont les fréquences sont des multiples entiers de la fréquence fondamentale. c'est-à-dire que le courant harmonique est quasiment fixé par la charge non linéaire et non pas par l'impédance de court-circuit du réseau auquel elles sont raccordées [12].

Toutes les charges non linéaires consomment un courant non sinusoïdal et génèrent des courants harmoniques.

Les causes des harmoniques électriques sont : les onduleurs, les hacheurs, les ponts redresseurs (machine à souder, électrolyse, ...etc.), les variateurs de vitesse, les convertisseurs de fréquence, les appareils domestiques, les éclairages, les fours à induction, fours à arc, les circuits magnétiques saturés.

Les conséquences des harmoniques peuvent être extrêmement coûteuses ; la surcharges (du conducteur de neutre, des sources...), déclenchements intempestifs, vieillissement accéléré, dégradation du rendement énergétique, perte de productivité.

Pour diminuer les problèmes dus aux harmoniques, les solutions possibles sont données par : Self anti-harmonique, de filtre passif ou actif, de filtre hybride, d'inductance de ligne, par l'augmentation la Pcc ou confiner les charges polluantes.

Le contrôle de tension et l'optimisation de la puissance réactive est un objectif important pour maintenir un profil adéquat dans les réseaux électriques. D'autre part il doit

maintenir des réserves de puissance réactive dans les différentes zones du système pour faire face aux incidents de tension.

Actuellement il existe une méthode moderne pour le contrôle de tension et pour optimiser la puissance réactive dans les réseaux électriques. Cette méthode utilise les dispositifs FACTS (basées sur l'électronique de puissance) qui seront traités en détail dans la prochaine étape [13].

#### **I.4 Concept générale et définition de Flexible AC Transmission System (FACTS)**

Au cours des dernières années, l'augmentation croissante de la demande d'énergie, les contraintes également croissantes de la préservation de l'environnement, les difficultés d'obtention des droits de bâtir ainsi que les coûts relatifs à la construction de nouvelles lignes et centrales posent de nouveaux défis aux exploitants des réseaux [14]. Cette situation a entraîné des recherches intensives. Pour optimiser l'exploitation des réseaux électriques, et tenter d'atteindre les limites thermiques des lignes.

Selon l'IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), la définition du terme FACTS est la suivante: Système de Transmission en Courant Alternatif comprenant des dispositifs basés sur l'électronique de puissance (diodes, thyristors, GTO, IGBT.....) et d'autres dispositifs statiques utilisés pour accroître la contrôlabilité et augmenter la capacité de transfert de puissance du réseau [15].

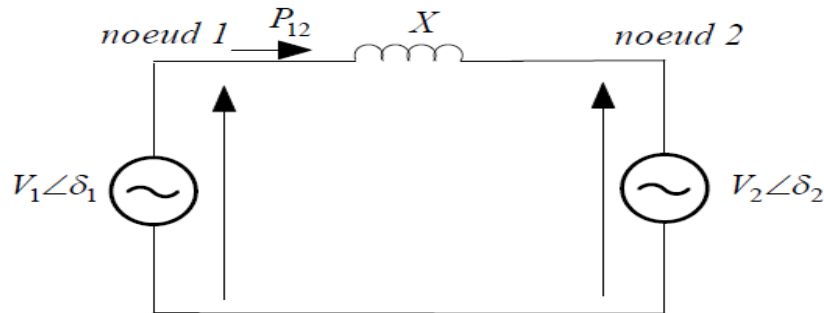
Les systèmes FACTS représentent les dispositifs ou contrôleurs qui ont pour principaux avantages un certain nombre de fonctions dont :

- un meilleur contrôle du flux de puissance de sorte qu'elle suive les couloirs prescrits de transmission.
- permettre un chargement sécurisé des lignes de transmission à un niveau proche des limites thermiques, tout en évitant la surcharge et réduire les marges de génération avec la capacité de transférer plus de puissance actives entre les zones contrôlées.
- atténuation des oscillations de puissance, qui pourraient endommager les équipements et/ou limiter la capacité utilisable de transmission en modulant rapidement l'impédance effective des lignes en réponse à la dynamique du système de puissance.
- prévenir les pannes en cascade en limitant l'impact des défauts et les pannes d'équipement.

### I.4.1 Procédé d'amélioration des réseaux avec les systèmes FACTS

La puissance active  $P_{12}$  transitée entre deux source de tensions  $V_1$  et  $V_2$  présentant un angle de transport  $\delta$  (déphasage entre  $V_1$  et  $V_2$ ) et connectés par une liaison d'impédance  $X$  est représentée dans la figure (I.13) et est donnée par l'équation :

$$P_{12} = \frac{V_1 V_2}{X} \sin \delta \quad (\text{I.1})$$



**Fig. I.13** : Schéma d'un système de transmission

$V_1$  : Tension à la source ;

$V_2$  : Tension à la réception ;

$\delta$  : Déphasage entre les tensions aux bornes de la ligne ;

$X$  : Réactance de la ligne.

D'après l'équation (I.1), le transit de puissance dépend de l'impédance de la ligne, de la tension, et de l'angle de phase.

Pour contrôler le transit de puissance on peut agir sur les trois paramètres de l'équation :

- La tension,
- L'impédance de la ligne,
- Déphasage entre les tensions aux bornes de la ligne.

### I.4.2 Rôle des FACTS dans un réseau électrique

Dans un réseau électrique, les FACTS permettent de remplir des fonctions tant en régimes stationnaires qu'en régimes transitoires. Ils agissent généralement en absorbant ou en fournissant de la puissance réactive, en contrôlant l'impédance des lignes ou en modifiant les angles des tensions. En régimes permanents, les FACTS sont utilisés principalement dans les deux contextes suivants [16] :

- le maintien de la tension à un niveau acceptable en fournissant de la puissance réactive lorsque la charge est élevée et que la tension est trop basse, alors qu'à l'inverse ils en absorbent si la tension est trop élevée,

- le contrôle des transites de puissances de manière à réduire, voir supprimer, les surcharges dans les lignes ou les transformateurs ainsi que pour éviter des flux de bouclage dans le réseau. Ils agissent alors en contrôlant la réactance des lignes et en ajustant les déphasages.

Les dispositifs FACTS peuvent aussi être utilisés pour la segmentation de lignes de transport afin d'accroître leur capacité [16].

### I.4.3 Types de FACTS

Il existe quatre grandes familles d'éléments FACTS :

- Les compensateurs de type shunt;
- Les éléments en série;
- Les déphaseurs régulateurs de tension;
- Le contrôleur universel de transit de puissance (UPFC).

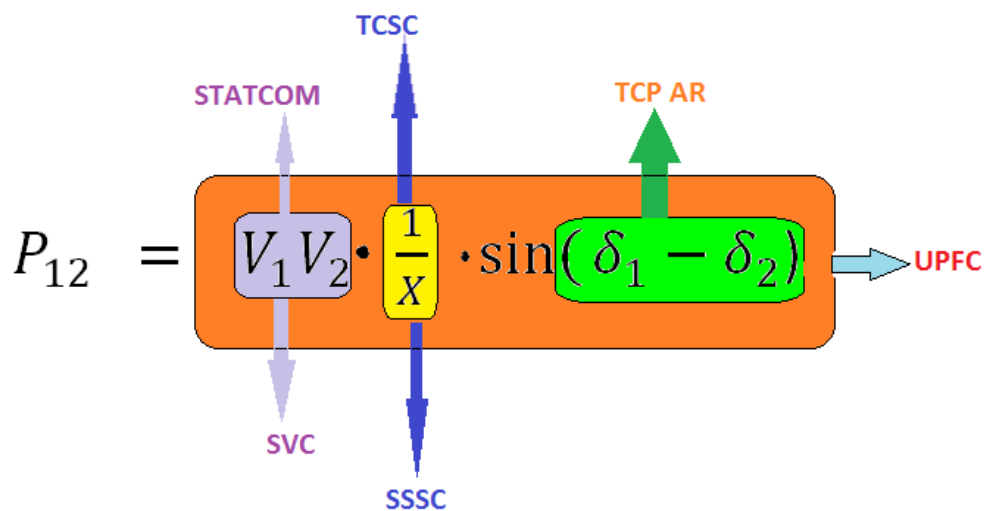


Fig. I.14 : L'effet FACTS sur le transit de la puissance active.

### I.5 Application du dispositif FACTS dans les réseaux électriques

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

### I.5.1. Type de connexion et applications associées

- **Série**

La connexion série permet la réduction des creux et déséquilibre de tensions, Compensation harmonique de tension, le réglage d'impédances de lignes et de flux de puissance [17].

- **Shunt**

La connexion shunt permet le filtrage actif de courant, réglage de plan de tension, compensation de réactif, soutien de réseau, réduction de l'effet de Flicker, équilibre de charge [17].

### I.5.2. Compensateurs shunt

Ce sont le plus souvent des éléments statiques qui génèrent ou absorbent de l'énergie réactive. Ce contrôle de l'énergie réactive injectée permet de maintenir le niveau de tension à une valeur consigne. En effet, la chute de tension dans une ligne peut être réduite en jouant sur la valeur de l'énergie réactive.

Ils sont le plus souvent utilisés pour résoudre les problèmes d'instabilité dynamique ou transitoire de la tension [18]. On compte dans cette famille plusieurs dispositifs :

- La machines synchrone couple au réseau et fonctionnement à vide,
- Les inductances,
- Les condensateurs,
- Transformateurs avec prises réglables en charge,
- Les systèmes FACTS.

#### I.5.2.1. Principe de fonctionnement des compensateurs shunts

- En régime permanent, la compensation réactive est utilisée pour la sectionnalisation des lignes ainsi que le maintien de la tension aux nœuds, en contrôlant le flux de puissance réactive.
- En régime transitoire, les dispositifs shunt permettent un contrôle dynamique de la tension pour l'amélioration de la stabilité transitoire, l'amortissement des oscillations de puissance et la réduction des oscillations de tension (flicker) [15].

### I.5.3. Compensateurs shunt à base de thyristor

Ces équipements sont constitués essentiellement d'une inductance en série avec un gradateur. Le retard à l'amorçage des thyristors permet de régler l'énergie électrique réactive absorbée par l'inductance du dispositif. Il s'agit de:

- **Thyristor Controlled Reactor / Thyristor Switched Reactor (TCR/ TSR)**

Dans le TCR (RCT: Réactance Commandées par Thyristors), le circuit est composé d'une réactance placée en série avec deux thyristors montés en antiparallèle (Fig.I.15). La valeur de l'inductance est continuellement changée par l'amorçage des thyristors. Un thyristor se met à conduire quand un signal de gâchette lui est envoyé. La tension à ses bornes est positive, il s'arrête de conduire lorsque le courant qui le traverse s'annule. Un dispositif TCR seul n'est pas suffisant pour pouvoir compenser la puissance dans un réseau, car il ne dispose pas de source de puissance réactive. Généralement on dispose avec un TCR des bancs de condensateurs comme source de puissance réactive, et le TCR contrôle cette source de puissance [13].

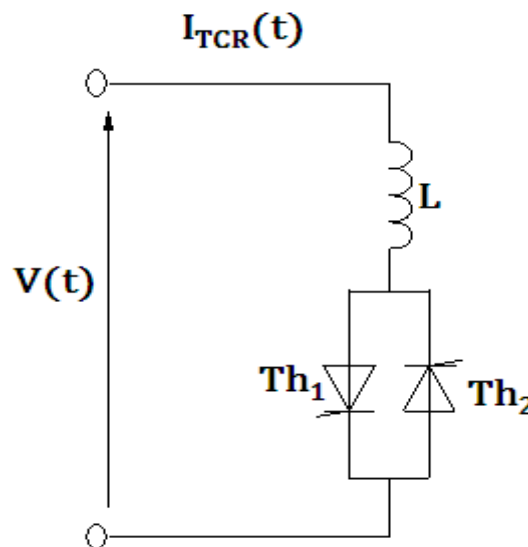


Fig. I.15 : Structure du TCR(TSR).

- **Thyristor Switched Capacitor (TSC)**

Dans le TSC (CCT: Condensateurs Commandés par Thyristor), le circuit est composé d'un condensateur placée en série avec deux thyristors montés en antiparallèle. Les thyristors fonctionnent en pleine conduction [13].

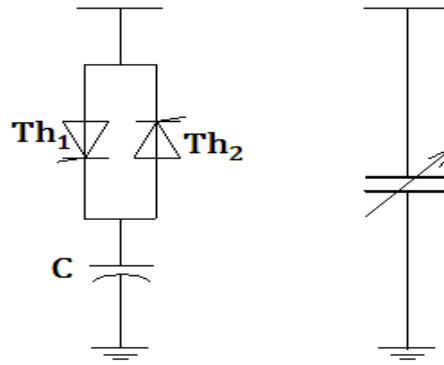


Fig. I.16 : Structure du TSC

- **Static Var Compensator (SVC)**

Le **SVC** est composé de thyristors commandés par des capacités (TSC) et d'autres par des réactances (TCR). Ce dispositif est relié à la ligne de transport via un transformateur de couplage. La génération de la puissance réactive varie constamment entre des valeurs capacitives et inductives mises en jeu dans le circuit. Le SVC est utilisé afin de réguler la tension des systèmes de transport, à la valeur de référence. L'installation d'un SVC à un ou plusieurs points appropriés dans le réseau peut augmenter la capacité de transfert et réduire les pertes tout en maintenant le profile de la tension pendant le régime perturbé [19].

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.

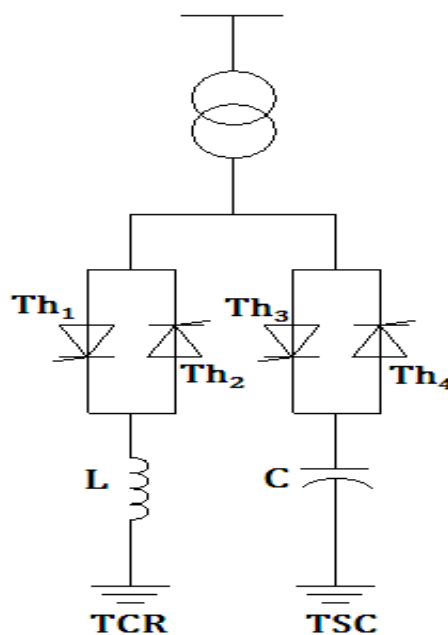


Fig. I.17 : Structure d'un TCR-TSC



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

Ce type de compensateur TCBR (Résistance de freinage contrôlée par thyristors); connecté en parallèle et utilisée pour améliorer la stabilité du réseau ou pour diminuer l'accélération des générateurs en cas de la présence des perturbations. La figure I.18 représente un TCBR en parallèle avec un SVC équipé d'un banc de condensateurs et d'un filtre d'harmonique.

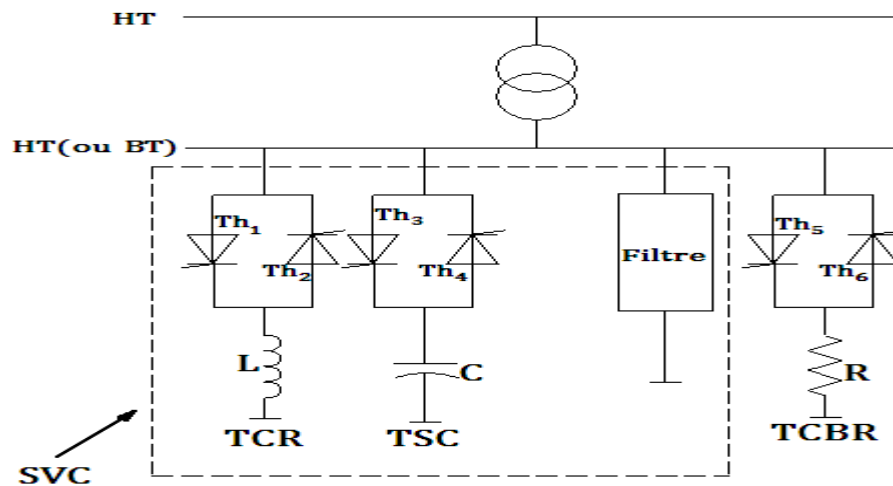


Fig. I.18 : Structure du TCBR.

• **STATIC synchronous Compensator (STATCOM)**

Le STATCOM (Statique Compensateur) a connu jusqu'à maintenant différentes appellations, CSERA (Compensateur statique d'énergie réactive de type avancé). ASVC (Advanced Static Var Compensator). SVG (Static Var Generator) et STATCON (Static Condenser).

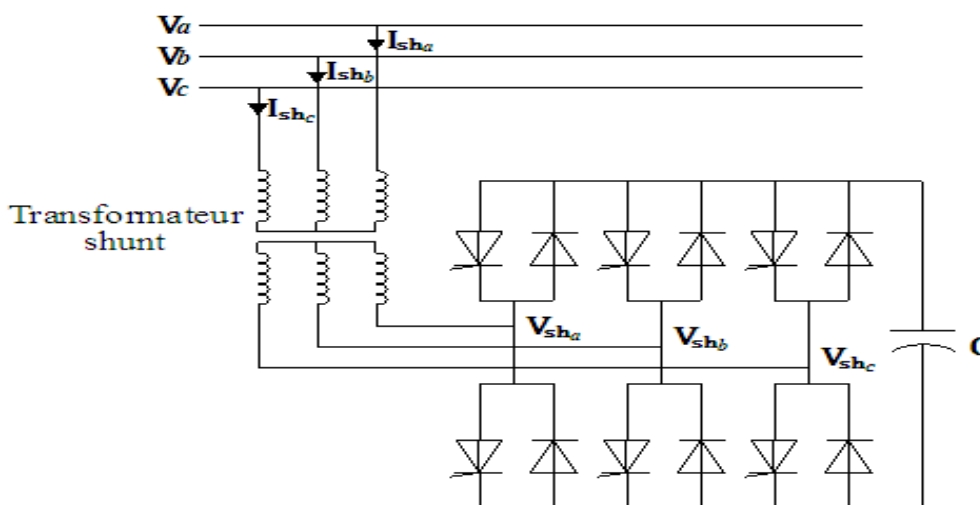


Fig. I.19 : Schéma de base d'un STATCOM

### I.5.3.1. Principe de fonctionnement des compensateurs shunts à base de thyristor

La figure (I.20) donne une représentation schématique monophasée d'un compensateur statique. Il est composé d'un condensateur avec une réactance capacitive  $X_C$  et d'une bobine d'inductance avec la réactance  $X_L$ . Ce système utilise l'angle d'amorçage  $\alpha$  des thyristors pour contrôler le courant dans la réactance, le contrôle de la puissance réactive par cette méthode est rapide et d'une façon continu [20].

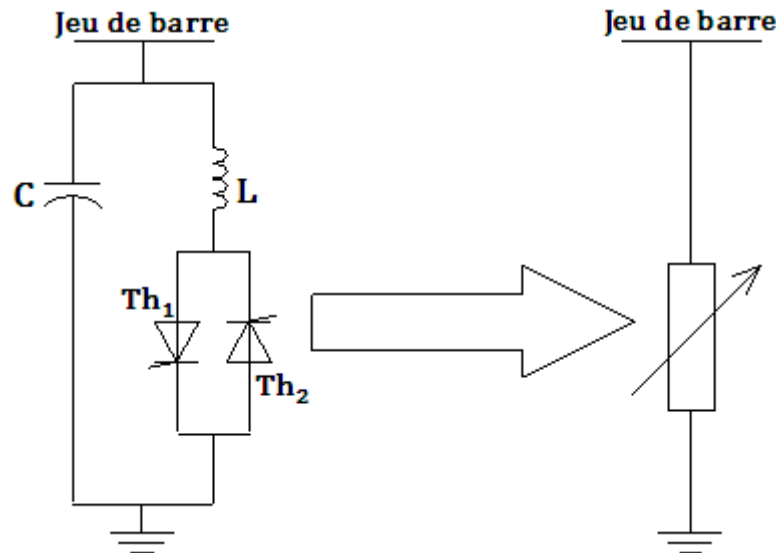


Fig. I.20 : Schéma de principe d'un SVC.

Nous avons exploré le contenu du système FACTS destiné à répondre aux problèmes des réseaux. Les différentes compensations permettent de donner des solutions en tenant compte des différentes contraintes, et surtout d'améliorer le contrôle du transit de puissance dans les réseaux.

Dans la suite de ce mémoire nous nous intéresserons à la compensation shunt et surtout au compensateur statique (STATCOM).

### I.5.4. STATCOM

Le STATCOM est un convertisseur à source de tension connectée en parallèle à un réseau alternatif (transmission ou distribution), en général, par le biais d'un transformateur abaisseur. Si l'on règle l'amplitude de la tension du VSC de façon à ce qu'elle soit supérieure à la tension du réseau, une puissance réactive est fournie et augmente la tension au point de connexion. De la même façon, si l'on règle la tension du VSC à une valeur inférieure à la tension du réseau, une puissance réactive est absorbée par le VSC et la tension au point de connexion est réduite. La plage de fonctionnement du STATCOM est pratiquement

symétrique, ce qui signifie qu'il peut fournir ou absorber des quantités de puissance réactive [20].

Un STATCOM est composé des éléments suivants :

- Une source de tension synchrone (SVS), générée par un convertisseur statique à base de VSI (GTO, IGBT ...),
- Des condensateurs dans son coté continu,
- Des transformateurs de couplages.

#### I.5.4.1. Principe de fonctionnement d'un STATCOM

Le rôle du STATCOM est d'échanger de l'énergie réactive avec le réseau. Pour ce faire, l'onduleur est couplé au réseau par l'intermédiaire d'une inductance triphasée, celle-ci est en général l'inductance de fuite du transformateur de couplage. L'échange d'énergie réactive se fait par le contrôle de la tension de sortie de l'onduleur  $V_s$ , laquelle est en phase avec la tension du réseau  $E$  [21].

Le fonctionnement peut être décrit de la façon suivante:

Si  $V_s < E$ , le courant circulant dans l'inductance est déphasé de  $+\frac{\pi}{2}$  par rapport à la tension

$E$  et le courant est capacitif

Si  $V_s > E$ , le courant circulant dans l'inductance est déphasé de  $-\frac{\pi}{2}$  par rapport à la tension

$E$  et le courant est inductif

Si  $V_s = E$ , le courant circulant dans l'inductance est nul, il n'y a pas d'échange d'énergie.

#### I.5.4.2. Avantages d'un STATCOM

- ✓ Bonne réponse à faible tension: le STATOM est capable de fournir son courant nominal même lorsque la tension est presque nulle.
- ✓ IL ne présente pas d'élément capacitif qui puisse provoquer des résonances avec des éléments inductifs du réseau.
- ✓ Un contrôle optimal de la tension, les phases sont contrôlées séparément pendant les perturbations du système.
- ✓ Une flexibilité opérationnelle maximale est obtenue par la disponibilité de cabines ré-localisables.
- ✓ Un design modulaire du convertisseur permet une adaptation pour une grande plage de puissance.

### I.5.4.3. Différents types de STATCOM :

Nous présenterons deux types de STATCOM différenciés par la technique de commutation qu'ils utilisent : le STATCOM dit conventionnel et le STATCOM à MLI.

#### I.5.4.3.1. STATCOM conventionnel

Ce STATCOM est dit conventionnel à cause de la technique de commutation qu'il utilise à savoir la technique pleine onde.

Ce modèle de STATCOM est le premier à être proposé. Au début des années 1990, seuls les GTO étaient suffisamment puissants pour être utilisés avec des dispositifs de forte puissance. Les GTO sont très lents et ne permettent pas une fréquence de commutation élevée, c'est pourquoi seules des méthodes conventionnelles de commutation sont utilisables. L'amplitude de la tension de sortie  $V$  du STATCOM, est directement proportionnelle à l'amplitude de tension continue aux bornes du condensateur  $V_c$ . Pour pouvoir varier  $V$ , on doit varier  $V_c$ . [22].

La tension aux bornes d'un condensateur est fonction de l'énergie emmagasinée dans celui-ci, en créant un déphasage  $\delta$  entre la tension du STATCOM et celle du nœud de connexion. Un écoulement de puissance active s'établit à travers le STATCOM, qui fait charger ou décharger le condensateur ce qui permet de varier la tension  $V_c$ , et  $V$  en même temps.

#### I.5.4.3.2. STATCOM à MLI

Ce type de STATCOM ne diffère du STATCOM conventionnel que par la méthode de contrôle et de commutation. Comme son nom l'indique ce dispositif utilise la technique MLI qui assume une fréquence élevée de commutation, mais garde le même principe de fonctionnement.

### I.5.4.4. Effet de la Compensation Shunt STATCOM sur le Réseau Electrique

Les générateur Var Statique (SVG) génèrent ou absorbent une puissance réactive contrôlée par commutation de la réactance ou des batteries de condensateurs 'dans' ou 'hors' du réseau. L'objectif de cette approche est de produire une impédance shunt variable qui peut être ajustée (d'une manière continue ou discrète) pour répondre aux exigences de compensation du réseau de transmission. La possibilité de générer directement une puissance réactive contrôlable, sans l'utilisation des capacités ou des réactances (alternative), par

différent convertisseur a été divulguée par Gyugyi en 1976. Ces convertisseurs (DC/AC ou AC/DC) sont actionnés comme des sources de tension et de courant qui produisent essentiellement l'énergie réactive, sans un composant de stockage d'énergie réactive, par circulation du courant alternative à travers les phases du système alternative [16].

Du point de vue de la production d'énergie réactive, leur fonctionnement est similaire à celui d'une machine synchrone idéale, dont la puissance réactive de sortie est modifiée par action sur l'excitation de la machine. Comme les machines synchrones réelles, les SVG peuvent également échanger de l'énergie active avec le système AC s'il est fourni par une source, généralement source d'énergie DC.

En raison de ces similitudes avec un générateur synchrone en rotation, ils sont appelés 'Static Synchronous Generators (SSG)'. Quand un SSG fonctionne sans source d'énergie et avec contrôles appropriés pour fonctionner comme un compensateur réactif shunt, il est appelé, de manière analogue au Compensateur synchrone tournant (MS), un condensateur synchrone statique STATCOM.

La puissance réactive contrôlée, peut être générée par tous types de convertisseurs de puissance DC/AC et AC/DC. Le premier groupe est généralement appelé convertisseur DC/AC ou seulement convertisseurs, alors que le dernier est considéré comme changeur de fréquence ou convertisseurs de fréquence ou cyclo-convertisseurs. Le fonctionnement normal du convertisseur et de changer l'alimentation DC en AC ou fonctionnement normale des cyclo-convertisseurs AC/AC et de changer la fréquence d'alimentation à une autre fréquence [16].

## Conclusion

L'industrie de l'énergie électrique a subi des changements profonds, suite aux différents bouleversements politiques et économiques de plusieurs pays dans le monde. Ce nouvel environnement du marché de l'électricité, a mis en évidence une clientèle plus importante et plus exigeante vis à vis du fonctionnement des réseaux électriques à travers la flexibilité dans leur contrôle, la fiabilité et la qualité de l'énergie offerte sur le marché.

Cette recherche bibliographique présente et explique la qualité d'énergie et les types de perturbation qui peuvent dégrader cette qualité. Et comme solution pour améliorer la qualité d'énergie, on explique un nouveau concept utilisé dans le domaine des réseaux électriques, appelé FACTS (Flexible AC Transmission Systems) et ce concept permet aux systèmes de production et de transport d'énergie électrique une meilleure adaptation à ce nouvel

environnement en offrant une plus grande flexibilité et une possibilité de prise en charge rapide et efficace de la demande ou du fonctionnement de ces systèmes d'énergie en général.

Ce travail permet d'avoir une idée actualisée sur différents schémas et dispositifs rentrant dans le cadre de ce concept FACTS. Il faut noter que ces dispositifs prennent de plus en plus de l'importance dans la conduite et le contrôle des réseaux électriques et contribuent à atténuer de manière significative les effets d'un certain nombre de problèmes qui nuisent à la marge de stabilité des systèmes, la tension, et la capacité de transfert d'énergie à travers les lignes.

Les qualités du STATCOM attirent de plus en plus les opérateurs des réseaux électriques, l'augmentation continue de la puissance, et de la rapidité des éléments électronique comme IGBT. Leur moindre cout et pertes font que les STATCOM remplaceront les SVC. Le STATCOM a l'avantage du prix, une moindre teneur en harmoniques, et une réponse plus rapide.

# CHAPITRE

## II

## Introduction

Après les généralités présentées dans le chapitre précédant concernant les systèmes de compensation dynamique FACTS dans les réseaux électriques, il est intéressant d'entamer dans ce présent chapitre un modèle de types FACTS STATCOM visant son effet sur le perfectionnement du réseau, et son comportement dynamique vis-à-vis à des perturbations de tension et de puissance réactive exposé par le réseau électrique telle que : l'augmentation de la charge, augmentation ou diminution de la tension.

Avant d'entamer l'étude sur la modélisation de STATCOM, nous voulons introduire en bref la modélisation des éléments du réseau

### II.1 Modélisation des éléments du réseau électrique

Un réseau de transport ou de distribution électrique contient un ensemble de composants qu'on doit modéliser afin d'établir les équations qui gouvernent le système électrique. Dans les sections qui suivent, on va exposer quelques modèles algébriques de base relatifs aux composants du réseau [23].

#### II.1.1 Modélisation des générateurs

Les générateurs sont des éléments qui permettent la conversion d'énergie (mécanique, photonique, chimique...) en une énergie électrique. Ils peuvent fournir de la puissance active, et aussi fournir ou consommer de la puissance réactive de manière à maintenir un certain niveau de tension. Les limites de production des générateurs définies par rapport à plusieurs facteurs comme la limite thermique et la limite de stabilité en régime permanent sont :

$$P_{Gi \min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi \max}$$

$$Q_{Gi \min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi \max}$$

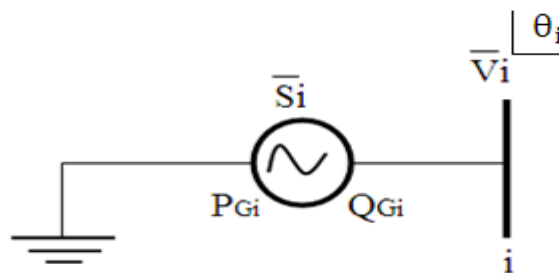


Fig. II.1 : Modèle du générateur



Tel que :

$P_{Gi}$  : Puissance active délivrée par le générateur au nœud 'i'.

$Q_{Gi}$  : Puissance réactive délivrée par le générateur au nœud 'i'.

$V_i$  : Tension au nœud 'i'.

$\theta_i$  : Angle de phase de la tension au nœud 'i'.

Pour le calcul du transit de puissance, la puissance  $P_{Gi}$  produite et le module de la tension  $V_i$  sont maintenues à des valeurs constantes. La phase  $\theta_i$  et la puissance réactive dépendent de l'état du réseau. Lorsque  $Q_{Gi}$  dépasse une de ces limites, elle est fixée à cette dernière et la tension ne peut plus être contrôlée. Le nœud se comporte alors comme un nœud charge [24].

### II.1.2 Modélisation des charges

Les charges représentent les consommateurs connectés au réseau. Elles correspondent à des injections négatives aux nœuds [23]. Les charges sont modélisées par des puissances constantes indépendantes de la tension nodale :

$$\bar{S}_{chi} = P_{chi} + jQ_{chi} \quad (\text{II.1})$$

Tel que :

$\bar{S}_{chi}$  : La puissance apparente en complexe.

$P_{chi}$  : La puissance active.

$Q_{chi}$  : La puissance réactive.

La puissance réactive peut être positive ou négative selon la nature de la charge qui est inductive ou capacitive respectivement.

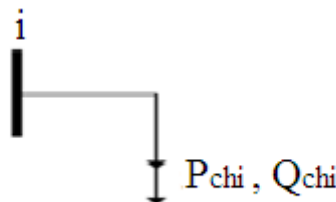


Fig. II.2 : Modèle de la charge

### II.1.3 Modélisation des lignes aériennes

Les lignes aériennes constituent des circuits de transmission des réseaux triphasés reliant des générateurs aux charges. Une ligne électrique peut être considérée comme une succession de circuits dont les paramètres sont uniformément répartis sur toute sa longueur. Ces circuits se composent d'une infinité d'éléments identiques tels que, résistances et inductances linéiques dans le sens longitudinal et des capacités linéiques dans le sens transversal [17].

Le fonctionnement de la ligne bifilaire par unité de longueur est modélisé par un tronçon de ligne où la tension  $V_S$  et le courant  $I_S$  d'entrée (source) sont reliés à la tension  $V_R$  et le courant  $I_R$  de sortie (récepteur) à travers les paramètres d'un quadripôle  $A$ ,  $B$ ,  $C$  et  $D$ , tel que:

$$\begin{cases} \bar{V}_S = A\bar{V}_R + B\bar{I}_R & (V) \\ \bar{I}_S = C\bar{V}_R + D\bar{I}_R & (A) \end{cases} \quad (\text{II.2})$$

Ou bien, sous la forme matricielle,

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_S \\ \bar{I}_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{A} & \bar{B} \\ \bar{C} & \bar{D} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{V}_R \\ \bar{I}_R \end{bmatrix} \quad (\text{II.3})$$

$A$ ,  $B$ ,  $C$  et  $D$  sont les paramètres qui dépendent des constantes de la ligne de transmission  $R$ ,  $L$ ,  $C$  et  $G$ . Les paramètres ABCD sont, en général, des nombres complexes.  $A$  et  $D$  sont sans dimensions.  $B$  a l'unité en Ohm et  $C$  a l'unité en Siemens. Dans ce qui suit, nous allons identifier les paramètres  $A$ ,  $B$ ,  $C$  et  $D$ .

Pour éviter la confusion entre l'impédance série totale et l'impédance série par unité de longueur, la notation suivante est employée :

$\bar{Z} = \gamma + jL \cdot \omega$  ( $\Omega/m$ ), impédance série par unité de longueur ;

$\bar{y} = G + jC \cdot \omega$  ( $S/m$ ), admittance shunt par unité de longueur ;

$\bar{Z} = \bar{z}l$  ( $\Omega$ ), Impédance série totale;

$\bar{Y} = \bar{y}l$  ( $S$ ), admittance shunt totale;

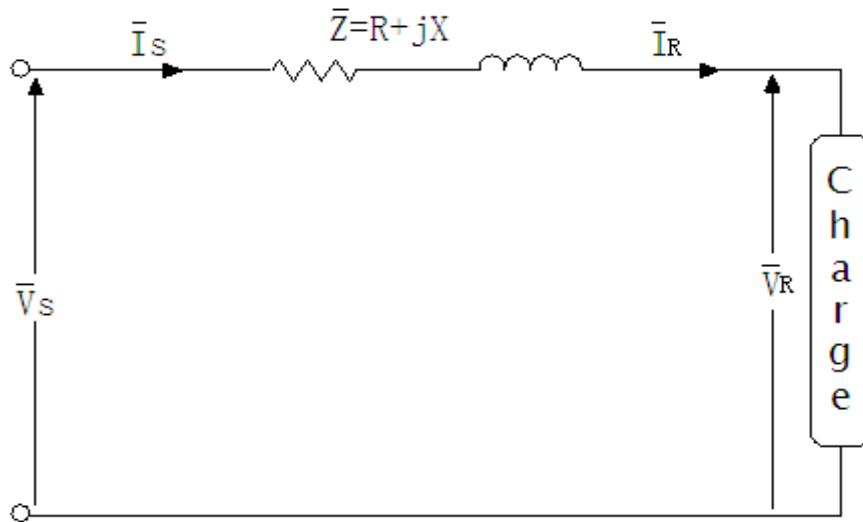
$l(m)$ , longueur de la ligne.

La conductibilité shunt, est habituellement négligée pour le système aérien de transmission.

On classe les lignes de transmission d'énergie en fonction de leur longueur en trois catégories: les lignes courtes, les lignes moyennes et les lignes longues.

**i. Ligne de transmission courte**

La capacité de la ligne peut être ignorée quand celle-ci ne dépasse pas 80 kilomètres [24] ou si le niveau de tension ne dépasse pas 66 kV, ainsi les courants de dérivation peuvent être négligés. Il s'ensuit que l'intensité du courant peut être considérée comme constante tout au long de la ligne et en particulier identique aux générateur et au récepteur. Le modèle de ligne courte par phase est illustré par la figure (II.3).

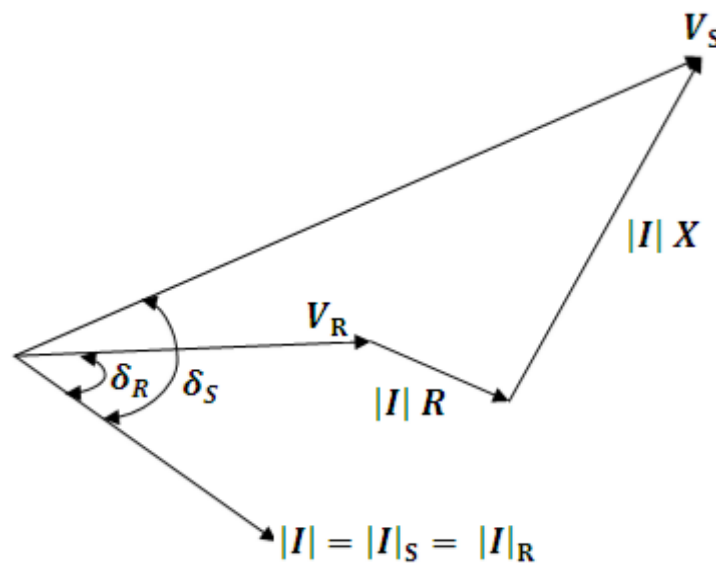


**Fig. II.3 :** Modèle d'une ligne courte

Le rapport entre les courants et les tensions de chaque extrémité de la ligne (entre la source et la charge) peut être écrit comme:

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_S \\ \bar{I}_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \bar{Z} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{V}_R \\ \bar{I}_R \end{bmatrix} \tag{II. 4}$$

Le diagramme vectoriel correspondant est celui de la figure (II.4).



**Fig. II.4 :** Diagramme vectoriel d'une ligne courte

Tel que :

$\delta_R$  : Angle de phase de la tension  $V_R$  ;

$\delta_S$  : Angle de phase de la tension  $V_S$  ;

A partir de la figure (II.4), on peut écrire

$$|V_S| \cos(\delta_S - \delta_R) = |I|R \cos(\delta_R) + |I|X \sin(\delta_R) + |V_R| \quad (II.5)$$

$$(\delta_S - \delta_R) \ll , \cos(\delta_S - \delta_R) \approx 1$$

$$|V_S| = |I|[R \cos(\delta_R) + X \sin(\delta_R)] + |V_R| \quad (II.6)$$

### ii. Ligne de transmission moyenne

Pour les lignes de longueurs comprises entre 80 km et 250 km sont considérées comme des lignes de longueurs moyennes, le courant de ligne devient appréciable et la capacité shunt doit être considérée. La moitié de la capacité shunt peut être considérée à chaque extrémité de la ligne. Ce modèle doit être utilisé dès que le courant capacitif total dépasse les 3% du courant total mais ne dépasse pas les 10%. Ceci est désigné sous le nom du modèle nominal en II.

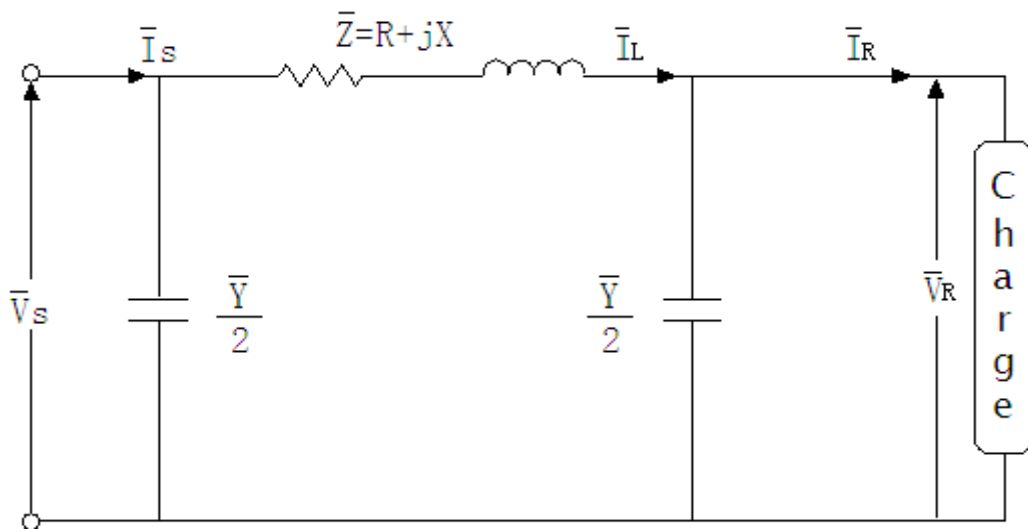


Fig. II.5 : Ligne de longueur moyenne, représentation en  $\Pi$

A partir de la figure (II.5), on écrit :

Le courant dans l'impédance série est désigné par

$$\bar{I}_L = \bar{I}_R + \frac{\bar{Y}}{2} \bar{V}_R \quad (II.7)$$

La tension à la source est exprimée comme:

$$\bar{V}_S = \bar{V}_R + \bar{Z} \bar{I}_L \quad (II.8)$$

A partir des équations (II.7) et (II.8) on obtient :

$$\bar{V}_S = \left(1 + \frac{\bar{Z}\bar{Y}}{2}\right) \bar{V}_R + \bar{Z} \bar{I}_R \quad (\text{II.9})$$

Le courant à la source est :

$$\bar{I}_S = \bar{I}_L + \frac{\bar{Y}}{2} \bar{V}_S \quad (\text{II.10})$$

Des équations (II.7), (II.9) et (II.10), on trouve :

$$\bar{I}_S = \bar{Y} \left(1 + \frac{\bar{Z}\bar{Y}}{4}\right) \bar{V}_R + \left(1 + \frac{\bar{Z}\bar{Y}}{2}\right) \bar{I}_R \quad (\text{II.11})$$

Les équations (II.9) et (II.10) peuvent être écrites sous la forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_S \\ \bar{I}_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(1 + \frac{\bar{Z}\bar{Y}}{2}\right) & \bar{Z} \\ \left(1 + \frac{\bar{Z}\bar{Y}}{4}\right) & \left(1 + \frac{\bar{Z}\bar{Y}}{2}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_R \\ \bar{I}_R \end{bmatrix} \quad (\text{II.12})$$

Donc :

$$\bar{A} = 1 + \frac{\bar{Z}\bar{Y}}{2},$$

$$\bar{B} = \bar{Z},$$

$$\bar{C} = 1 + \frac{\bar{Z}\bar{Y}}{4},$$

$$\bar{D} = 1 + \frac{\bar{Z}\bar{Y}}{2}.$$

### iii. Ligne de transmission longue

Pour les longueurs de lignes courtes et moyennes, les modèles ont été obtenus en supposant que les paramètres de la ligne sont des valeurs exactes. Dans le cas où la longueur de la ligne est supérieure à 250km, pour des solutions plus précises, les paramètres doivent être donnés comme une distribution uniformément répartie le long de la longueur. Dans ce cas, les tensions et les courants varient d'un point à l'autre sur la ligne. La figure (II.6) illustre un schéma unifilaire en  $\Pi$  d'une ligne par unité de longueur [17].

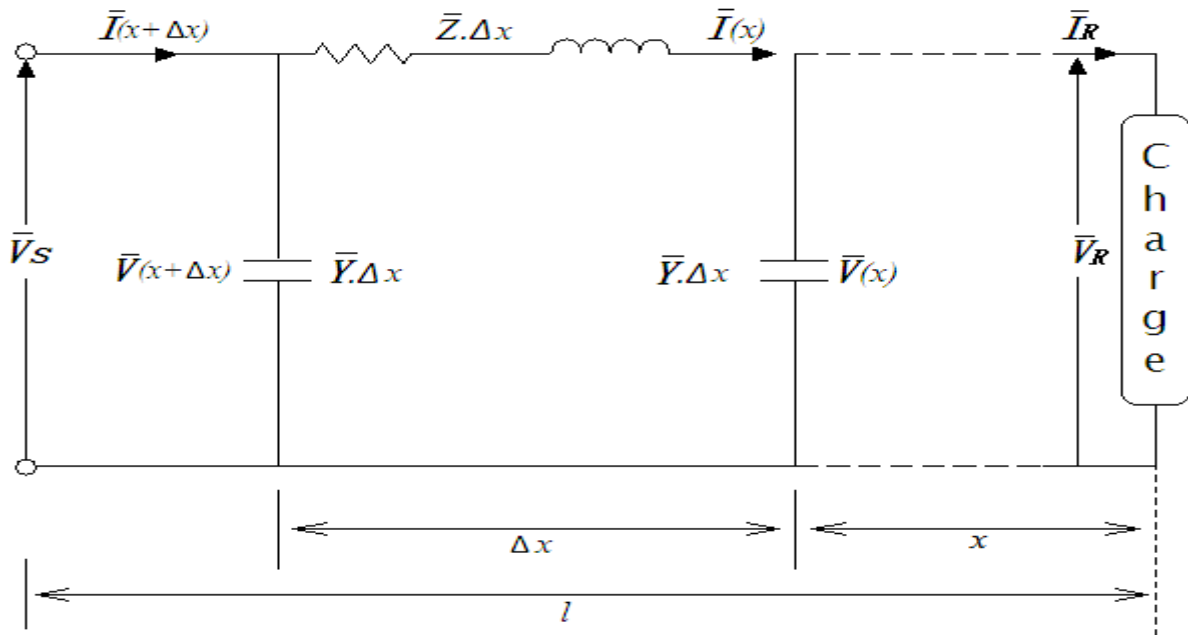


Fig. II.6 : Schéma unifilaire d'une ligne longue avec les paramètres par unité de longueur

On peut écrire pour la tension:

$$\begin{aligned} \bar{V}(x + \Delta x) &= \bar{Z} \cdot \Delta x \cdot \bar{I}(x) + \bar{V}(x) \\ \frac{\bar{V}(x + \Delta x) - \bar{V}(x)}{\Delta x} &= \bar{Z} \cdot \bar{I}(x) \end{aligned} \quad (\text{II. 13})$$

Quand  $\Delta x$  tend vers 0 :

$$\frac{d\bar{V}(x)}{dx} = \bar{Z} \cdot \bar{I}(x) \quad (\text{II. 14})$$

Pour le courant :

$$\begin{aligned} \bar{I}(x + \Delta x) &= \bar{I}(x) + \bar{Y} \cdot \Delta x \cdot \bar{V}(x + \Delta x) \\ \frac{\bar{I}(x + \Delta x) - \bar{I}(x)}{\Delta x} &= \bar{Y} \cdot \bar{V}(x + \Delta x) \end{aligned} \quad (\text{II. 15})$$

Quand  $\Delta x$  tend vers 0 :

$$\frac{d\bar{I}(x)}{dx} = \bar{Y} \cdot \bar{V}(x) \quad (\text{II. 16})$$

$$\frac{d^2\bar{V}(x)}{dx^2} = \bar{Z} \frac{d\bar{I}(x)}{dx} = \bar{Z} \cdot \bar{Y} \cdot \bar{V}(x)$$

Or  $\gamma^2 = \bar{Z} \cdot \bar{Y}$

Donc :

$$\frac{d^2 \bar{V}(x)}{dx^2} = \gamma^2 \bar{V}(x) = 0 \quad (\text{II.17})$$

La solution de l'équation différentielle (II.17) est sous forme :

$$\bar{V}(x) = C_1 e^{\gamma x} + C_2 e^{-\gamma x} \quad (\text{II.18})$$

La constante de propagation  $\gamma$  est définie par la relation

$$\gamma = \sqrt{\bar{Z} \cdot \bar{Y}}$$

A partir de l'équation (1.14), on obtient :

$$\bar{I}(x) = \frac{1}{\bar{Z}_C} (C_1 e^{\gamma x} + C_2 e^{-\gamma x}) \quad (\text{II.19})$$

$\bar{Z}_C$  : L'impédance caractéristique donnée par la relation  $\bar{Z}_C = \sqrt{\frac{\bar{Z}}{\bar{Y}}}$

On développant les équations précédentes on aboutit à :

$$\begin{cases} \bar{V}(x) = \cosh(\bar{\gamma}x) \bar{V}_R + \bar{Z}_C \sinh(\bar{\gamma}x) \bar{I}_R \\ \bar{I}(x) = \frac{1}{\bar{Z}_C} \sinh(\bar{\gamma}x) \bar{V}_R + \cosh(\bar{\gamma}x) \bar{I}_R \end{cases} \quad (\text{II.20})$$

Alors quand  $x = l$ , l'expression (II.20) permet de trouver les grandeurs courant et tension à la source, avec  $\bar{V}_S = \bar{V}(l)$  et  $\bar{I}_S = \bar{I}(l)$ , le résultat est:

$$\begin{cases} \bar{V}(l) = \cosh(\bar{\gamma}l) \bar{V}_R + \bar{Z}_C \sinh(\bar{\gamma}l) \bar{I}_R \\ \bar{I}(l) = \frac{1}{\bar{Z}_C} \sinh(\bar{\gamma}l) \bar{V}_R + \cosh(\bar{\gamma}l) \bar{I}_R \end{cases} \quad (\text{II.21})$$

La forme matricielle de ces dernières est :

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_l \\ \bar{I}_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\bar{\gamma}l) & \bar{Z}_C \sinh(\bar{\gamma}l) \\ \frac{1}{\bar{Z}_C} \sinh(\bar{\gamma}l) & \cosh(\bar{\gamma}l) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{V}_R \\ \bar{I}_R \end{bmatrix} \quad (\text{II.22})$$

Cependant, les constantes ABCD sont:

$$\begin{bmatrix} \bar{A} & \bar{B} \\ \bar{C} & \bar{D} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\bar{\gamma}x) & \bar{Z}_C \sinh(\bar{\gamma}x) \\ \frac{1}{\bar{Z}_C} \sinh(\bar{\gamma}x) & \cosh(\bar{\gamma}x) \end{bmatrix}$$

## II.2 Modélisation du transformateur

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

Le transformateur de puissance, tel qu'il est connu actuellement, répond à ce besoin avec des rendements approchant l'unité. Il existe plusieurs types de transformateurs. Deux modèles des plus usités sont représentés dans ce qui suit [17]:

### II.2.1 Transformateur à gradins

Le transformateur à gradin est un transformateur dont le rapport de transformation est réglable, on peut le modéliser par le schéma de la figure (II.7)

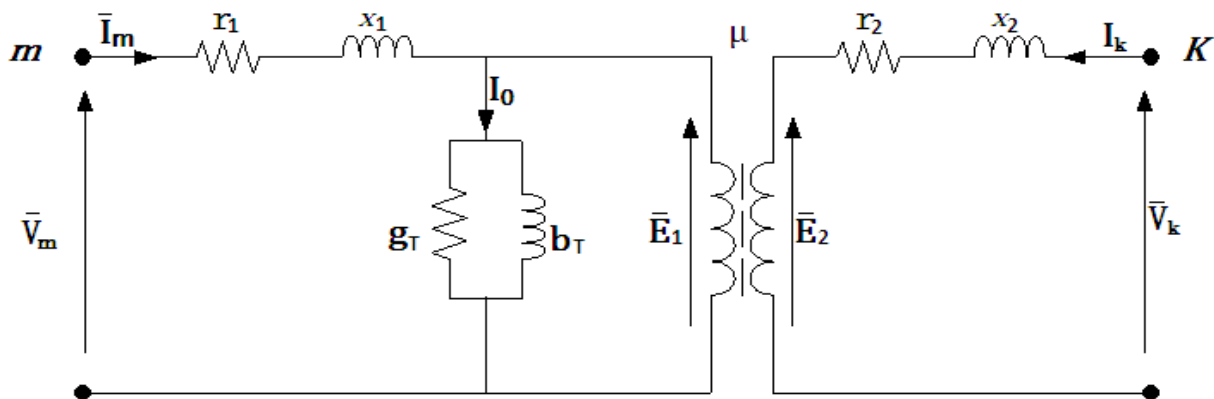


Fig. II.7: Modèle général d'un transformateur

Tel que :

$Z_1 = r_1 + jx_1$  : Impédance de l'enroulement primaire;

$Z_2 = r_2 + jx_2$  : Impédance de l'enroulement secondaire;

$Y_T = g_T + jb_T$ : Admittance shunt;

$V_m, I_m$  : Tension et courant au primaire du transformateur ;

$V_k, I_k$ : Tension et courant au secondaire du transformateur ;



$E_1, E_2$ : F.e.m primaire et secondaire ;

$I_0$ : Courant qui traverse la branche magnétisante ;

$\mu$ : Rapport de transformation.

Si on néglige l'effet de la branche magnétisante, ce qui est admis par rapport à la puissance transistée, et en ramenant l'impédance du primaire au secondaire, on obtient le nouveau modèle de la figure (II.8):

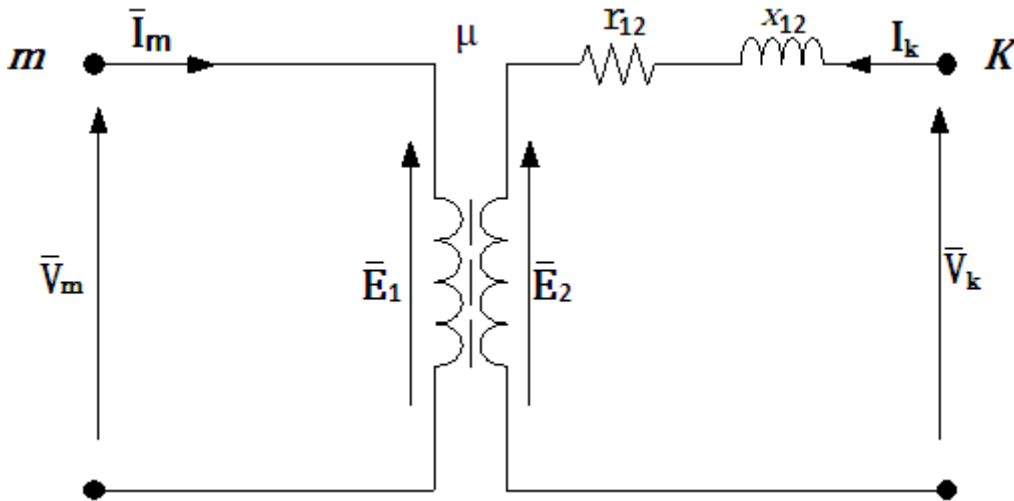


Fig. II.8 : Modèle approximatif du transformateur

Avec :

$r_{12}, x_{12}$  : Résistance et réactance respectivement du transformateur équivalentes ramené au secondaire.

Donc on aura :

$$\mu = \frac{\bar{E}_1}{\bar{E}_2} = -\frac{\bar{I}_k}{\bar{I}_m} \quad (\text{II. 23})$$

Et

$$\bar{V}_m = \bar{E}_1 \quad (\text{II. 24})$$

$$\bar{V}_k = \bar{E}_2 + (r_{mk} + jx_{mk})\bar{I}_k \quad (\text{II. 25})$$

D'après ces équations, on déduit :

$$\begin{cases} \bar{I}_m = \frac{\bar{y}_{mk}}{\mu^2} \bar{V}_m + \frac{-\bar{y}_{mk}}{\mu} \bar{V}_k \\ \bar{I}_k = \frac{-\bar{y}_{mk}}{\mu} \bar{V}_m + \bar{y}_{mk} \bar{V}_k \end{cases} \quad (\text{II. 26})$$

Tel que :

$$\bar{y}_{mk} = \frac{1}{r_{12} + jx_{12}}$$

La matrice admittance nodale du transformateur est donnée par :

$$\bar{Y}_{Trans} = \begin{bmatrix} \bar{y}_{mk} & -\bar{y}_{mk} \\ \mu^2 & \mu \\ -\bar{y}_{mk} & \bar{y}_{mk} \\ \mu & \bar{y}_{mk} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 27})$$

### II.2.2 Transformateur déphaseur

Lorsque le rapport de transformation  $\mu$  est complexe, on parle de transformateur déphaseur figure (II.9). On le modélise comme la combinaison d'un transformateur idéal à rapport de transformation complexe et d'une admittance de fuite.

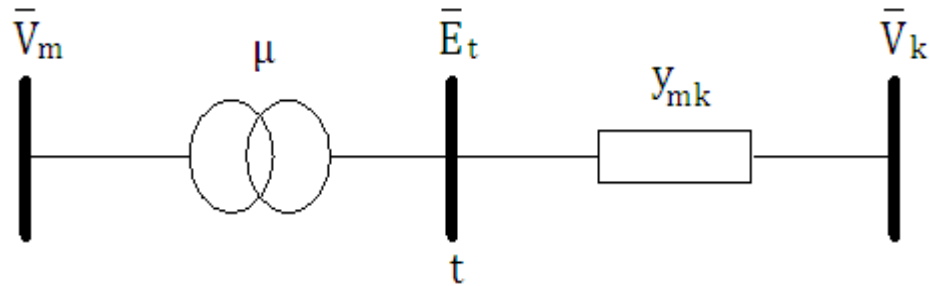


Fig. II.9 : Modèle du transformateur déphaseur

Étant donné que le transformateur est idéal on aura :

$$\bar{S}_m = \bar{S}_t \quad (\text{II. 28})$$

$$\text{Donc, } \bar{E}_m \cdot \bar{I}_m^* = \bar{E}_t \cdot \bar{I}_t^* \Rightarrow \bar{I}_m = \frac{\bar{E}_t^*}{\bar{E}_m^*} \bar{I}_t$$

$$\text{Avec, } \bar{I}_t = \bar{I}_k, \text{ ce qui donne } \bar{I}_m = -\frac{\bar{E}_t^*}{\bar{E}_m^*} \bar{I}_k$$

$$\text{Sachant que, } \bar{\mu} = \frac{\bar{E}_m}{\bar{E}_m} \text{ et } \bar{E}_m = \bar{V}_m$$

Alors :

$$\bar{I}_k = (\bar{V}_k - \bar{E}_t) \bar{y}_{mk} = \left( \bar{E}_t - \frac{\bar{V}_m}{\bar{\mu}} \right) \bar{y}_{mk} \quad (\text{II. 29})$$

$$\left( \bar{E}_t - \frac{\bar{V}_m}{\bar{\mu}} \right) \bar{y}_{mk} = -\frac{\bar{y}_{mk}}{\bar{\mu}} \bar{V}_m + \bar{y}_{mk} \bar{V}_k \quad (\text{II. 30})$$

Finalement, on obtient :

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_m \\ \bar{I}_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\bar{y}_{mk}}{\mu^2} & \frac{-\bar{y}_{mk}}{\bar{\mu}^*} \\ \frac{-\bar{y}_{mk}}{\bar{\mu}} & \bar{y}_{mk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_m \\ \bar{V}_k \end{bmatrix} \quad (\text{II. 31})$$

Alors, on en déduit la matrice admittance du transformateur déphaseur donnée par :

$$\bar{Y}_{Trans} = \begin{bmatrix} \frac{\bar{y}_{mk}}{\mu^2} & \frac{-\bar{y}_{mk}}{\bar{\mu}^*} \\ \frac{-\bar{y}_{mk}}{\bar{\mu}} & \bar{y}_{mk} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 32})$$

## II.3 Static synchronous compensator (STATCOM)

### II.3.1. Description

Ce type de compensateur shunt a connu jusqu'à présent différentes appellations :

ASVC (Advanced Static Var Compensator),

SVG (Static Var Generator),

SVC light

SVC plus.

Le compensateur STATCOM est composé d'un convertisseur de tension triphasé générant une tension alternative dont l'amplitude et la phase sont réglables indépendamment. Il est constitué de composants d'électronique de puissance commandés (GTO, IGBT, IGCT ...) et d'au moins une source de tension continue appelée bus DC. La tension de sortie d'un tel convertisseur est discrète (tension découpée à une fréquence de plusieurs centaines de hertz). Ce compensateur est connecté en parallèle du réseau par l'intermédiaire d'une inductance de couplage. Cette inductance de couplage, d'une impédance de l'ordre de 10 à 20% (base convertisseur) permet de contrôler convenablement le courant du convertisseur vis-à-vis du réseau qui présente une puissance de court-circuit beaucoup plus importante. Comparativement au SVC, le convertisseur peut fournir son courant maximal pour des variations importantes de la tension du réseau [25].

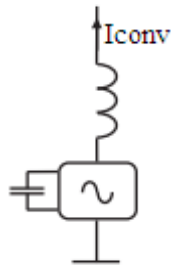


Fig. II.10 : Compensateur STATCOM.

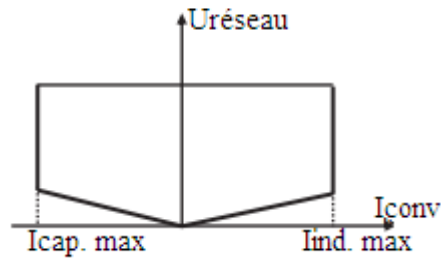
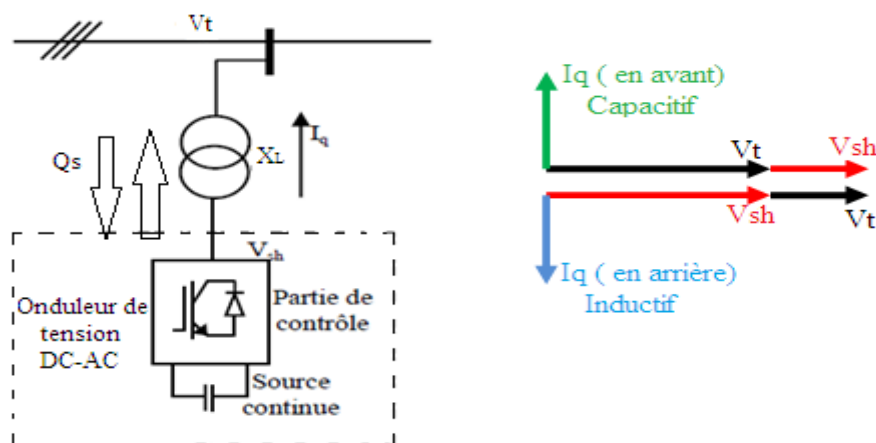


Fig. II.11 : Courant du convertisseur en fonction de la tension réseau.

### II.3.2. fonctionnement du STATCOM

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 (II.12) [25].



$$V_{sh} > V_t \text{ Compensation capacitive.}$$

$$V_{sh} < V_t \text{ Compensation inductive.}$$

Fig. II.12 : Schéma de principe d'un STATCOM

Considérant le STATCOM de la figure (II.12) 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 (II.13).

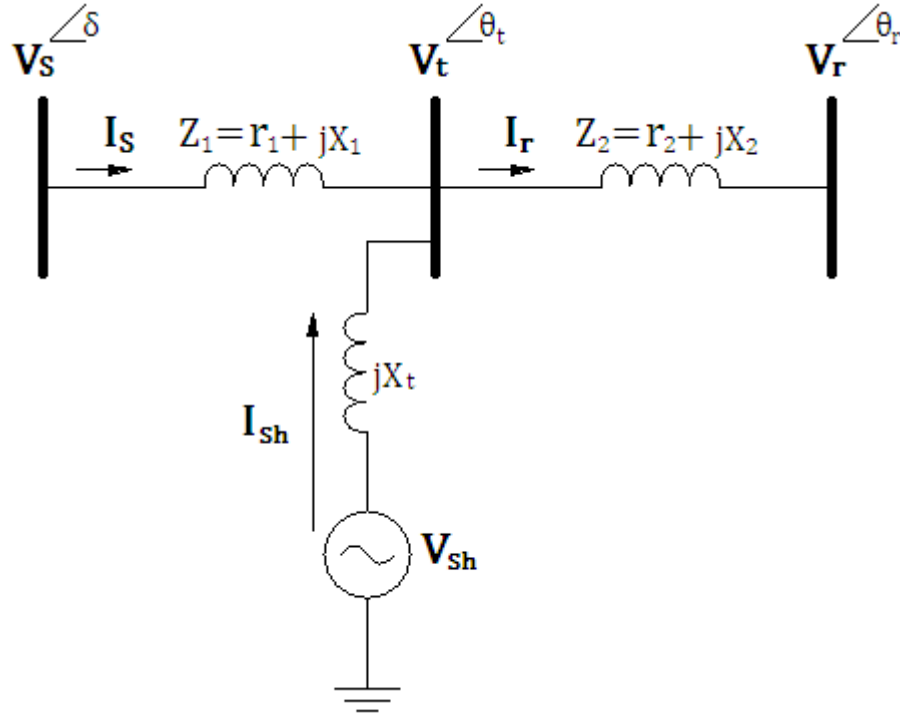


Fig. II.13 : Schéma du STATCOM couplé au réseau électrique.

Le courant injecté par le STATCOM est donné par:

$$\bar{I}^*_{sh} = \frac{\bar{V}_{sh} - \bar{V}_t}{jX_t} \quad (\text{II.33})$$

La puissance injectée au jeu de barre " t " est donnée par l'équation (II.2) :

$$\bar{S}_{sh} = \bar{V}_{sh} \cdot \bar{I}_{sh} = \frac{\bar{V}_{sh}(\bar{V}^*_{sh} - \bar{V}^*_t)}{-jX_t} = \frac{\bar{V}_{sh} \cdot \bar{V}^*_{sh} - \bar{V}_{sh}\bar{V}^*_t}{-jX_t} \quad (\text{II.34})$$

D'où on abouti aux puissances active et réactive injectées par le STATCOM au jeu de barre " t " exprimées par les formules (III.35.a) (III.35.b) :

$$P_{sh} = -V_t V_{sh} \cdot \sin(\theta_t - \theta_{sh}) / X_t \quad (\text{II.35.a})$$

$$Q_{sh} = V_{sh} (V_{sh} \cdot \cos(\theta_t - \theta_{sh}) - V_t) / X_t \quad (\text{II.35.b})$$

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 :

$$P_{sh} = -V_t V_{sh} \cdot \sin(\theta_t - \theta_{sh}) / X_t = 0 \quad (\text{II.36})$$

D'où la condition:

$$\theta_t - \theta_{sh} = 0 \Rightarrow \theta_t = \theta_{sh} \quad (\text{II.37})$$

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.

Pendant 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 (II.38) (II.39). En admettant que la tension  $V_{sh}$  est sur l'axe "d" (comme référence des phases) :

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

$$|I_{sh}| = I_{sh} = \frac{V_{sh} - V_t}{X_t} \quad (\text{II.38})$$

$$Q_{sh} = V_{sh} I_{sh} = \frac{V_{sh}^2}{X_t} \left( 1 - \frac{V_t}{V_{sh}} \right) \quad (\text{II.39})$$

A partir de l'équation (II.39), il apparaît claire que si le module de la tension du STATCOM  $V_{sh}$  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 (II.14).

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 inductive, voir figure (II.15).

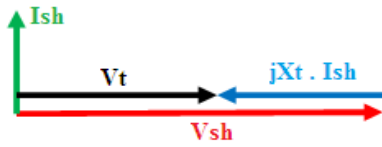


Fig. II.14 : Fonctionnement en mode capacitif

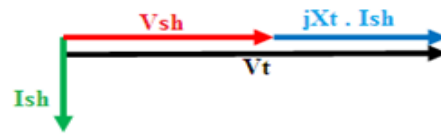


Fig. II.15 : Fonctionnement en mode inductif

Le STATCOM est capable de délivrer la puissance réactive même si la tension de jeu de barre de connexion est faible [25]. 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 (II.40) de la puissance réactive, décrit le transfert d'énergie réactive avec le réseau électrique [24] :

$$Q_{sh} = \frac{|V_t|^2}{X_{sh}} - \frac{|V_t||V_{sh}|}{X_{sh}} \cdot \cos(\theta_t - \theta_{sh}) \quad (\text{II.40})$$

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

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

#### II.4. Modélisation et commande du STATCOM

Pour pouvoir observer l'impacte des dispositifs FACTS (STATCOM) dans un réseau électrique, il est nécessaire de représentés par des modèles mathématiques appropriés.

Les modèles mathématiques des convertisseurs de tension pour les différentes connexions dans un réseau électriques, série ou parallèle, sont très utiles si no obligatoire pour analyser leurs fonctionnements et déterminer des lois de commande de ces dispositifs (FACTS) à base de ces convertisseurs.

Dans ce cadre, plusieurs modèles de FACTS ont été développés dans la littérature. La description mathématique est basée sur la transformation du système biphasé orthogonal stationnaire ou tournant au synchronisme par la transformation de PARK afin d'aboutir à un système d'équations différentielles d'état dans le plan (d,q). Pour cette modélisation nous avons opté pour les hypothèses suivantes :

- Tous les interrupteurs sont supposés idéals,
- Les trois tensions de la source alternative sont équilibrées,
- Les harmoniques causées par l'action d'ouverture et de fermeture des interrupteurs sont négligées et on ne considère que le fondamental,
- L'inductance de fuite du transformateur de couplage du STATCOM est représentée par l'inductance  $L_{sh}$ .

Pour simplifier le modèle mathématique, il est utile de travailler avec le système d'unité relative [P.U] :

$$\begin{cases} Z_{PU} = \frac{U_b}{I_b} \\ U_{PU} = \frac{U}{U_b} \\ I_{PU} = \frac{I}{I_b} \end{cases} \quad \text{Et} \quad \begin{cases} L_{PU} = \frac{X_{PU}}{\omega_b} \\ R_{PU} = \frac{R}{Z_b} \\ C_{PU} = \frac{1}{\omega_b C Z_b} \end{cases}$$

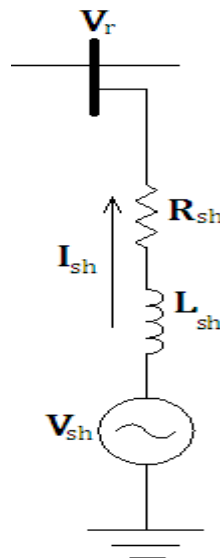
$\omega_b$  : est la vitesse angulaire de la composante fondamentale de la tension du réseau.

$I_b$  et  $U_b$  sont des grandeurs de base.

## II.4.1. Modélisation du STATCOM

### II.4.1.1 Modèle mathématique simplifié du STATCOM

Le STATCOM comme il était déjà décrit précédemment, peut être représenté par le schéma équivalent qu'on reproduit sur la figure (II.16) en tenant compte uniquement du jeu de barre où est connecté ce dispositif:



**Fig. II.16** : Schéma équivalent du STATCOM connecté au réseau



Pour le modèle simplifié du STATCOM on suppose que le circuit continu consiste en une source de tension constante, et le circuit DC ne sera pas inclus dans ce modèle. Le schéma équivalent de ce dispositif donc est une source de tension sinusoïdale connectée à un nœud du réseau par l'inductance  $L_{sh}$  du transformateur de couplage ; le circuit contient aussi une résistance en série pour représenter les pertes ohmiques du transformateur et les pertes dans les interrupteurs de l'onduleur.

Le courant du STATCOM dépend de la différence entre la tension du système  $V$  au nœud et la tension ajustable du STATCOM [26].

On appliquant la loi d'ohm on a :

$$\bar{V}_r - \bar{V}_{sh} = R_{sh} \bar{I}_{sh} + L_{sh} \frac{d\bar{I}_{sh}}{dt} \quad (II. 41)$$

Où les grandeurs en triphasée sont :

$$\bar{V}_r = \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} ; \bar{V}_{sh} = \begin{bmatrix} V_{sha} \\ V_{shb} \\ V_{shc} \end{bmatrix} \text{ et } \bar{I}_{sh} = \begin{bmatrix} I_{sha} \\ I_{shb} \\ I_{shc} \end{bmatrix}$$

Alors on peut écrire l'équation (II. 41) sous la forme matricielle comme suivant :

$$\begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_{sha} \\ V_{shb} \\ V_{shc} \end{bmatrix} = R_{sh} \begin{bmatrix} I_{sha} \\ I_{shb} \\ I_{shc} \end{bmatrix} + L_{sh} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{sha} \\ I_{shb} \\ I_{shc} \end{bmatrix} \quad (II. 42)$$

Pour simplifier ces équations on utilise la transformation de Park dite « des deux axes » (en1920). La matrice de Park modifiée est :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} * \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos \theta & -\sin \theta \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \end{bmatrix}$$

La transformation de Park est constituée d'une transformation triphasée - biphasé, Elle permet de passer du repère (abc) vers le repère (dq).

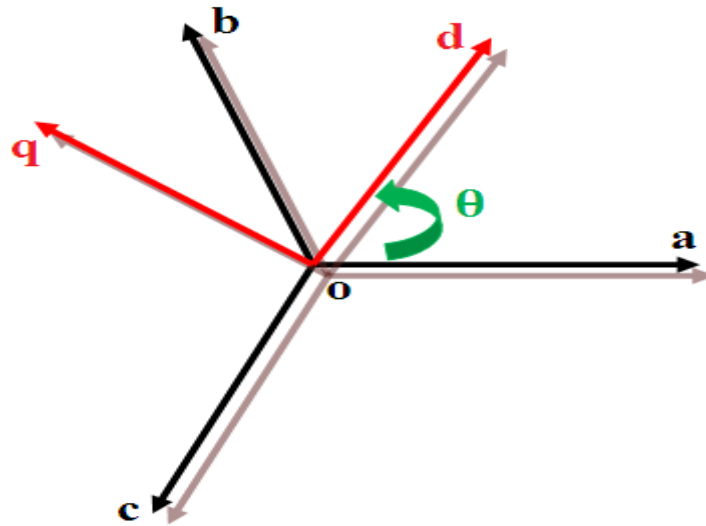


Fig. II.17 : Passage du repère (abc) vers le repère (dq)

Généralement on peut écrire :

$$[X_{abc}] = [P(\theta)] [X_{odq}] \quad (II. 43)$$

Alors :

$$[X_{odq}] = [P(\theta)]^{-1} [X_{abc}] \quad (II. 44)$$

L'équation (II.41) est de la forme :

$$[\Delta V_{abc}] = [R][I_{abc}] + L \frac{d[I_{abc}]}{dt} \quad (II. 45)$$

Alors :

$$[V_{r_{abc}} - V_{sh_{abc}}] = R_{sh}[I_{sh_{abc}}] + L_{sh} \frac{d[I_{sh_{abc}}]}{dt} \quad (II. 46)$$

Après le développement de cette équation on a trouvé :

$$[V_{r_{dq}} - V_{sh_{dq}}] = R_{sh} [I_{sh_{dq}}] + \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} L_{sh} \frac{d\theta}{dt} [I_{sh_{dq}}] + L_{sh} \frac{d[I_{sh_{dq}}]}{dt} \quad (II. 47)$$

Tel que :  $\frac{d\theta}{dt} = \omega$ .

Donc :

$$\begin{cases} V_{r_d} - V_{sh_d} = R_{sh} I_{sh_d} - L_{sh} \omega I_{sh_q} + L_{sh} \frac{dI_{sh_d}}{dt} \end{cases} \quad (II. 48)$$

$$\begin{cases} V_{r_q} - V_{sh_q} = R_{sh} I_{sh_q} + L_{sh} \omega I_{sh_d} + L_{sh} \frac{dI_{sh_q}}{dt} \end{cases} \quad (II. 49)$$

À partir de l'équation (II. 48) et (II. 49) on aura le modèle de l'équation (II. 47) :

$$\begin{bmatrix} V_{r_d} - V_{sh_d} \\ V_{r_q} - V_{sh_q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{sh} & 0 \\ 0 & R_{sh} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sh_d} \\ I_{sh_q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -L_{sh}\omega \\ L_{sh}\omega & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sh_d} \\ I_{sh_q} \end{bmatrix} + L_{sh} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{sh_d} \\ I_{sh_q} \end{bmatrix}$$

Ce qui nous ramène à trouver que :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{sh_d} \\ I_{sh_q} \end{bmatrix} = \frac{1}{L_{sh}} \begin{bmatrix} V_{r_d} - V_{sh_d} \\ V_{r_q} - V_{sh_q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{-R_{sh}}{L_{sh}} & \omega \\ -\omega & \frac{-R_{sh}}{L_{sh}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sh_d} \\ I_{sh_q} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 50})$$

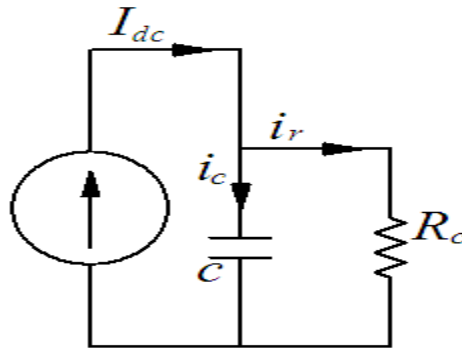
Où le vecteur  $\begin{bmatrix} V_{r_d} - V_{sh_d} \\ V_{r_q} - V_{sh_q} \end{bmatrix}$  présente le vecteur de commande du système.

### II.4.1.2 Modèle Mathématique en Considérant le Circuit DC :

Le modèle simplifié est dérivé sous l'hypothèse d'aucune variation de la tension continue  $U_{dc}$  durant les petits échanges de l'énergie active entre le réseau et la source DC.

Lorsque la capacité de la source DC est relativement petite, le modèle mathématique doit être amélioré par l'équation du circuit continu [26].

Le circuit continu est représenté par une source de courant connecté au condensateur C et une résistance shunt pour exprimer les pertes Joule dans le circuit continu donner par la figure (II.18)



**Fig. II.18 :** Schéma équivalent du circuit DC du STATCOM

On va supposer que :

$$\bar{V}_{sh}^{(d,q)} = V_{sh_d} + jV_{sh_q} = v \cos \theta + jv \sin \theta \quad (\text{II. 51})$$

$v$  : Le module de la tension injectée qui dépend directement de la tension continue  $U_{dc}$ .

Elle est exprimé par :

$$v = mU_{dc} \quad (\text{II. 52})$$

$m$  : L'indice de modulation il ne dépend que du type de l'onduleur.

On remplace les équations (II. 51) et (II. 52) dans les équations (II. 48) et (II. 49) on obtient :

$$\begin{cases} V_{r_d} - mU_{dc} \cos \theta = R_{sh}I_{sh_d} - L_{sh}\omega I_{sh_q} + L_{sh} \frac{dI_{sh_d}}{dt} \\ V_{r_q} - mU_{dc} \sin \theta = R_{sh}I_{sh_q} + L_{sh}\omega I_{sh_d} + L_{sh} \frac{dI_{sh_q}}{dt} \end{cases} \quad (II.53)$$

La puissance circulant entre le condensateur et l'onduleur de tension peut être décrite par l'équation (II.55) :

$$P_{sh} = U_{dc}I_{dc} = \frac{3}{2} (V_{sh_d}I_{sh_d} + V_{sh_q}I_{sh_q}) \quad (II.55)$$

Le courant  $I_{dc}$  est défini comme étant la somme du courant capacitif  $i_c$  et le courant résistif  $i_r$  dans la branche de la résistance  $R_c$  :

$$I_{dc} = i_c + i_r$$

$$\text{Avec } i_c = c \frac{dU_{dc}}{dt} \text{ et } i_r = \frac{U_{dc}}{R_c}$$

Ce qui nous donne :

$$I_{dc} = c \frac{dU_{dc}}{dt} + \frac{U_{dc}}{R_c} \quad (II.56)$$

De ces équations on peut tirer l'équation dynamique du coté continue du STATCOM suivante:

$$c \frac{dU_{dc}}{dt} = \frac{3}{2} m (I_{sh_d} \cos \theta - I_{sh_q} \sin \theta) - \frac{U_{dc}}{R_c} \quad (II.57)$$

Les équations (II.53), (II.54) et (II.57) forme le système d'équation d'état du STATCOM en tenant compte des variations de la tension du circuit continu qu'on écrit sous forme matricielle suivante:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{sh_d} \\ I_{sh_q} \\ U_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{sh}}{L_{sh}} & \omega & -\frac{m}{L_{sh}} \cos \theta \\ \omega & -\frac{R_{sh}}{L_{sh}} & \frac{m}{L_{sh}} \sin \theta \\ \frac{3m}{2c} \cos \theta & -\frac{3m}{2c} \sin \theta & -\frac{1}{R_c c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sh_d} \\ I_{sh_q} \\ U_{dc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{sh}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_{sh}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{r_d} \\ V_{r_q} \end{bmatrix} \quad (II.58)$$

On peut observer qu'il y a deux paramètres de commande dans ce système avec trois paramètres d'état à contrôler et uniquement deux grandeurs peuvent être commandées indépendamment. Ce système qu'on doit être linéaires autour d'un point de fonctionnement sera de la forme suivante :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \\ U_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{sh}}{L_{sh}} & \omega & -\frac{m}{L_{sh}} \cos \theta_0 \\ \omega & -\frac{R_{sh}}{L_{sh}} & \frac{m}{L_{sh}} \sin \theta_0 \\ \frac{3m}{2c} \cos \theta_0 & -\frac{3m}{2c} \sin \theta_0 & -\frac{1}{R_c c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \\ U_{dc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{sh}} & 0 & \frac{m}{L_{sh}} U_{dc0} \sin \theta_0 \\ 0 & \frac{1}{L_{sh}} & \frac{m}{L_{sh}} U_{dc0} \cos \theta_0 \\ 0 & 0 & -\frac{3m}{2c} (I_{shd} \sin \theta_0 - I_{shq} \cos \theta_0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{rd} \\ V_{rq} \\ \theta \end{bmatrix} \quad (II.59)$$

Le courant réactif est commandé indépendamment pour contrôler le flux de puissance réactive et les autres paramètres sont utilisés pour maintenir la tension continue  $U_{dc}$  constante[26].

## Conclusion

Dans ce chapitre, on a expliqué les modèles mathématiques des différents éléments du réseau électrique tel que les générateurs, les charges, les lignes aériennes (courtes, moyennes et longues) ainsi les transformateurs de puissance (à gradins, déphaseurs).

Par la suite, nous avons donné un modèle du dispositif FACTS qui est le STATCOM comme un élément essentiel pour la compensation de l'énergie réactive, et au même temps on a présenté son modèle mathématique pour lequel on a identifié les références de son système de commande.

Les résultats de la simulation de fonctionnement de STATCOM coupler dans un réseau électrique seront traitées en détaille dans le chapitre qui suit.

# CHAPITRE

## III

### Introduction

Dans ce chapitre nous allons effectuer une simulation sous MATLAB. En premier lieu nous allons présenter un réseau de distribution radial à 10 jeux de barres dans son état initial. Les différentes grandeurs obtenues du développement de cette simulation seront par la suite présentées et discutées.

Nous allons intégrer par la suite à ce même réseau un STATCOM dont le but est de voir le comportement du réseau et d'évaluer par la suite les paramètres du réseau.

Les calculs sont effectués en unités relatives, les valeurs initiales des tensions égales a 1 pu pour les modules et 0 radian pour l'argument. La puissance de base est égale à 4186 KVA, et 23 KV pour la tension

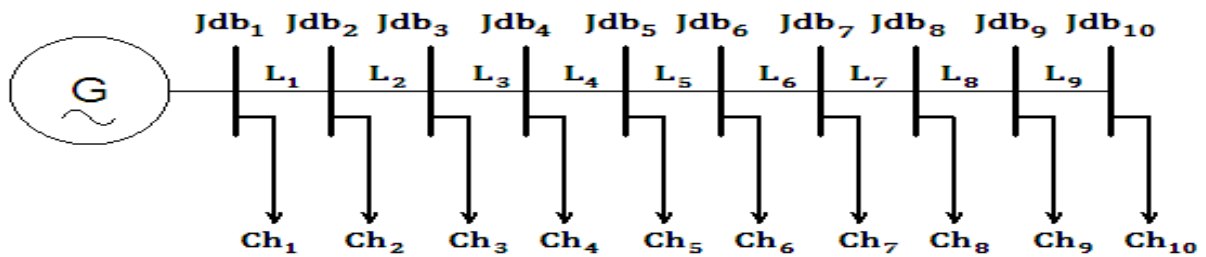


Figure III.1 : Réseau de distribution radial à 10 jeux de barres

La simulation est effectuée en deux états du réseau :

#### III.1. Etat initial du réseau (sans STATCOM)

Les résultats obtenus sont présentés dans la figure (III.2) et les tableaux (III.1) et (III.2).

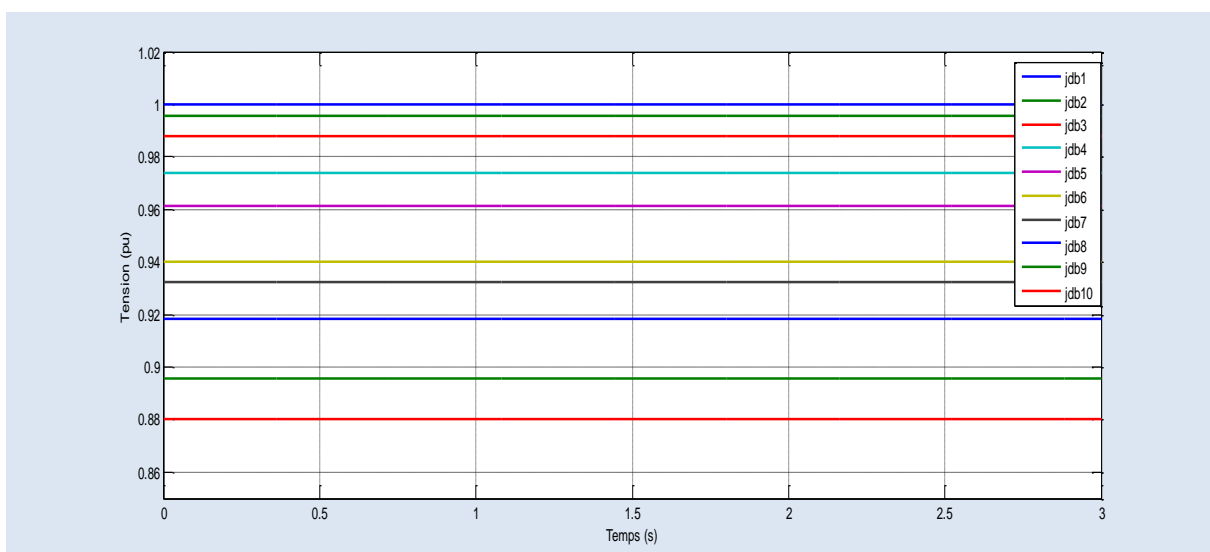
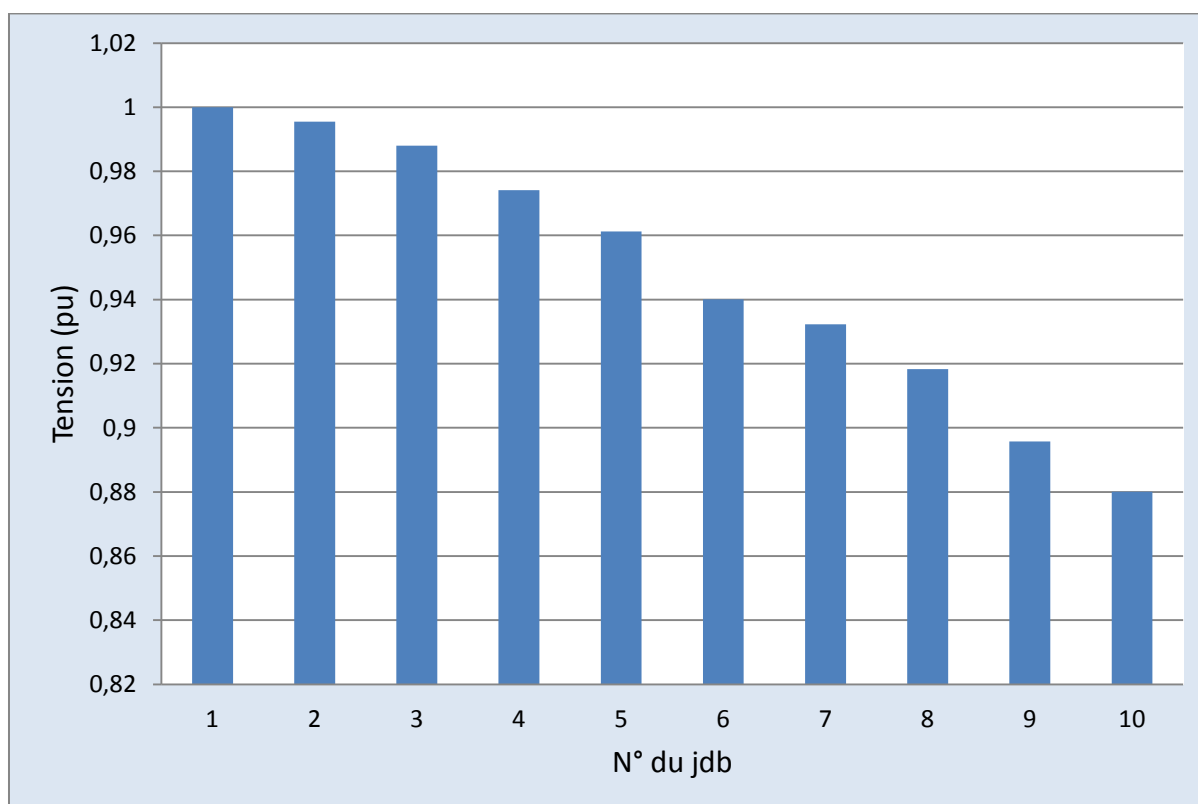


Fig.III.2 : Tensions aux jdb's à l'état initial

**Tab. III.1** : Tensions aux jdb à l'état initial

N° de jdb	tension (pu)
1	1.0000
2	0,9955
3	0,9880
4	0,9741
5	0,9612
6	0,9401
7	0,9323
8	0,9183
9	0,8957
10	0,8801

**Fig. III.3** : Tensions aux nœuds du réseau



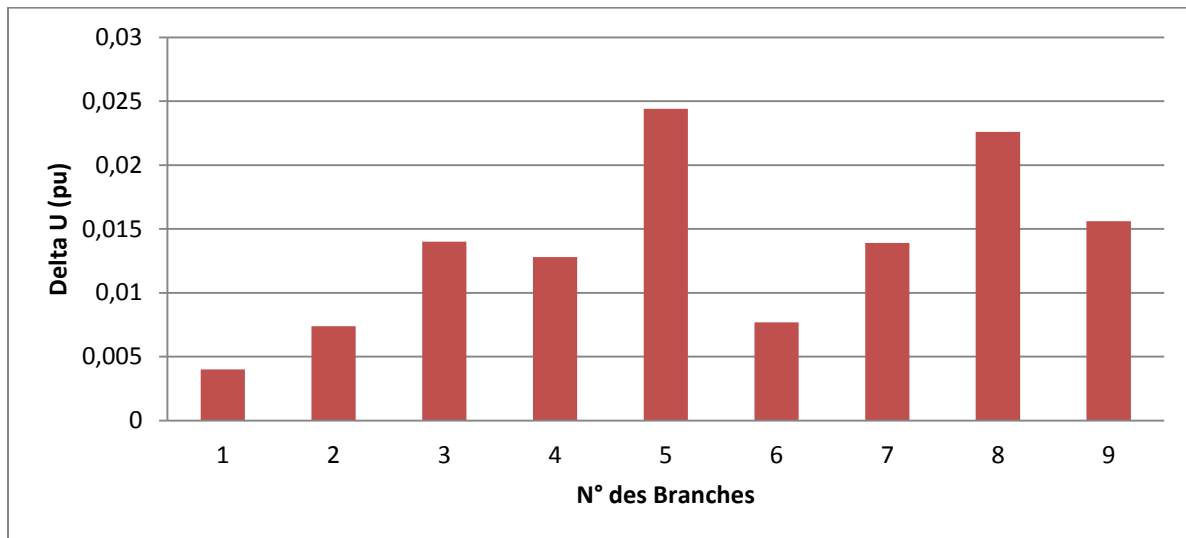


Figure .III.4 : Chutes de tension dans les branches

Tab.III.2. Pertes de puissances active et réactive dans les branches

Numéro de branche	Pertes de puissance active (KW)	Pertes de puissance réactive (KVAR)	Les pertes totales
1	53.735	93.466	Puissance active : 785.576 KW  Puissance réactive : 724.462 KVAR
2	77.036	127.6	
3	161.9	132.38	
4	117.2	102.95	
5	158.42	130.54	
6	43.741	38.419	
7	67.121	38.331	
8	74.399	42.488	
9	32.024	18.288	

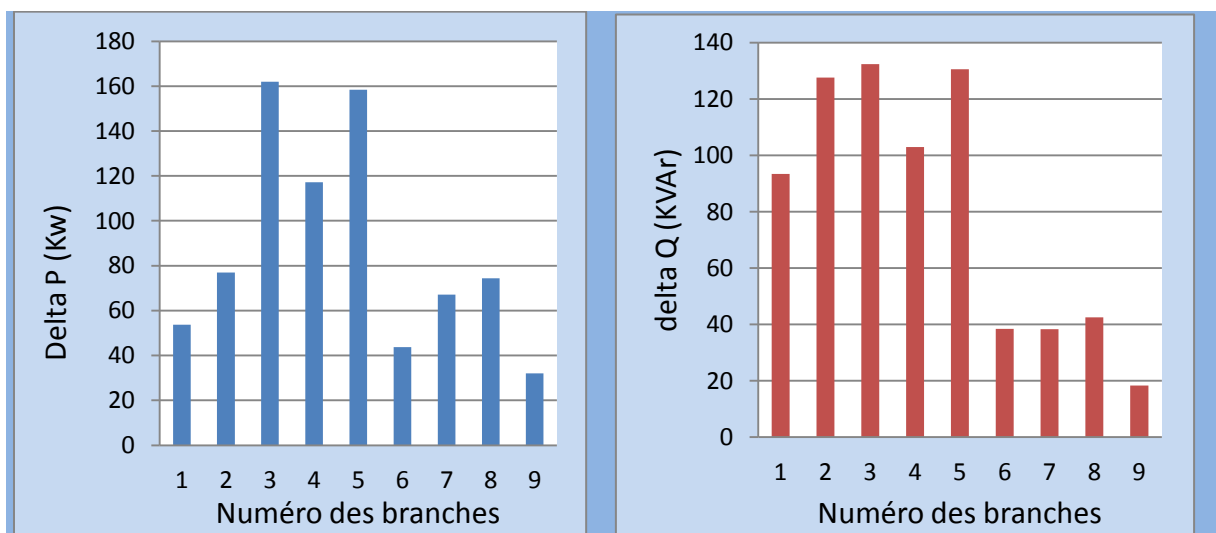


Fig. III.5 : Pertes de puissances active et réactive dans les branches

### ✚ Discussion des résultats

Les résultats de la simulation sont résumés dans les tableaux (III.1) et (III.2). On remarque que la plus grande tension atteint une amplitude de 0.9955 pu au deuxième jeu de barre, le premier étant celui du générateur dont la tension est imposée et fixe à 1 p.u. La plus faible tension est observée au niveau du dernier jeu de barre, cela justifié par l'accumulation des chutes de tension dans les branches. Pour les pertes totales de puissances active et réactive, nous notons qu'elles sont respectivement 785.576 KW et 724.462 KVAR. Les plus grandes pertes de puissances active et réactive son enregistrée au niveau da la 3<sup>ème</sup> branche avec des valeurs de 161.9 KW et 132.38 KVAR, cela justifié par la valeur de l'impédance de la ligne.

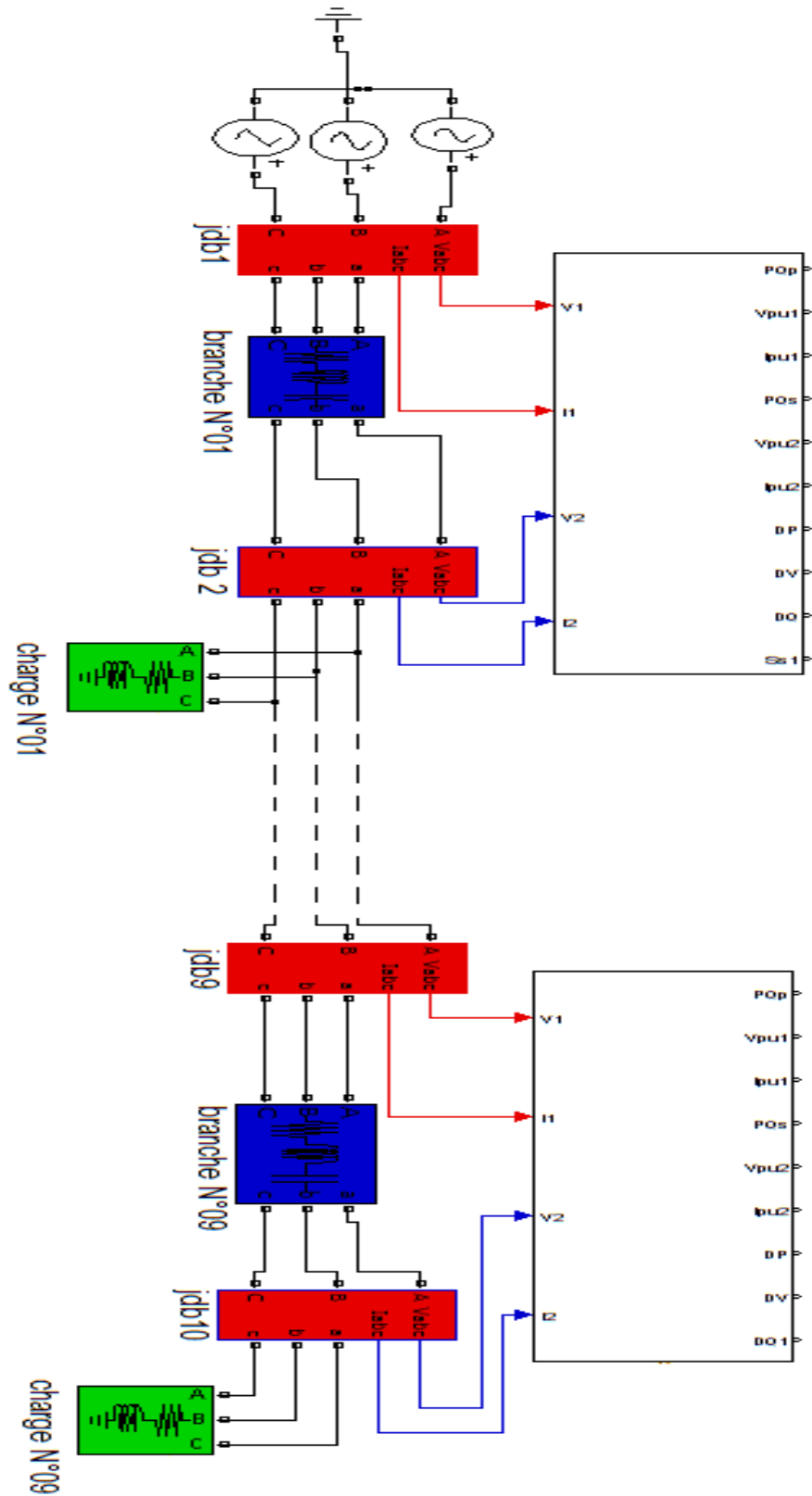


Fig. III.6 : Schéma globale de la simulation

### III.2. Insertion d'un STATCOM

Nous avons vu dans la figure (III.4) qu'il y a des chutes de tension aux niveaux de chaque jeu de barre, pour ce la une compensation est nécessaire afin de réguler ces tensions.

La compensation s'est portée sur le dernier nœud ou la chute de tension est plus importante.

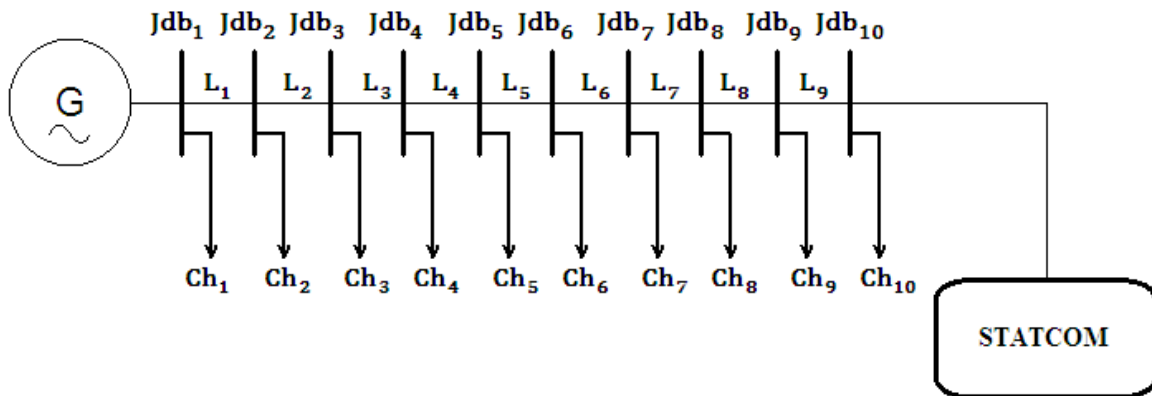


Fig. III.7 : Schéma du réseau avec STATCOM

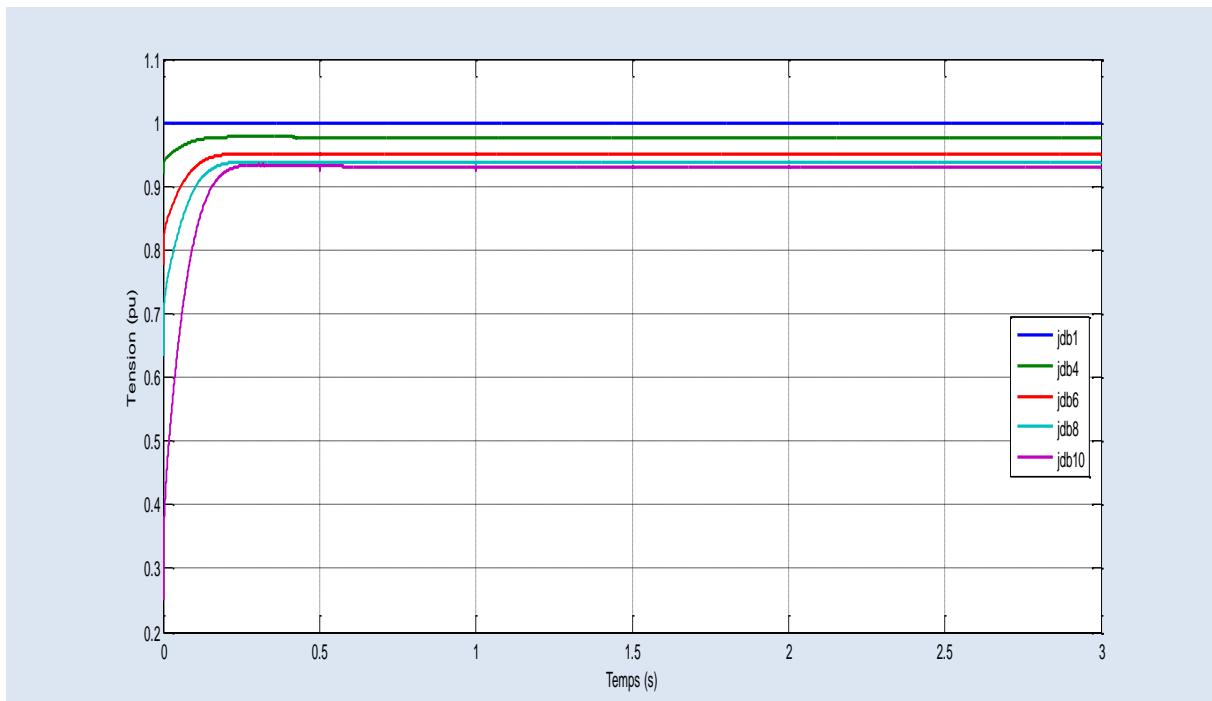
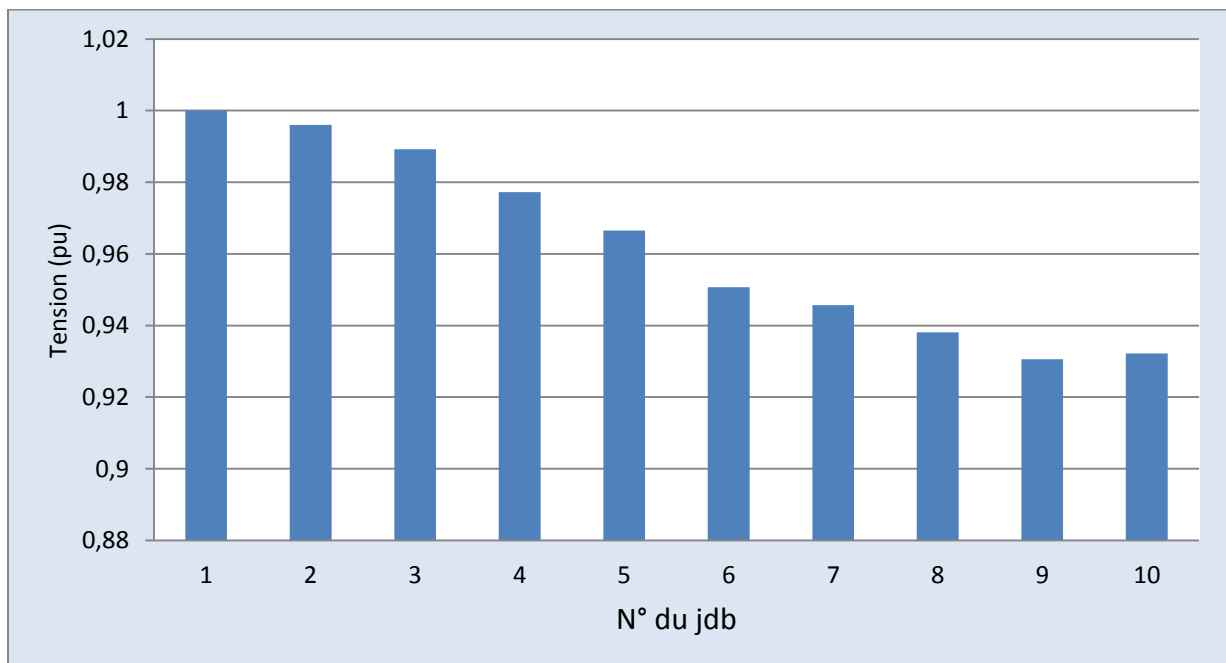


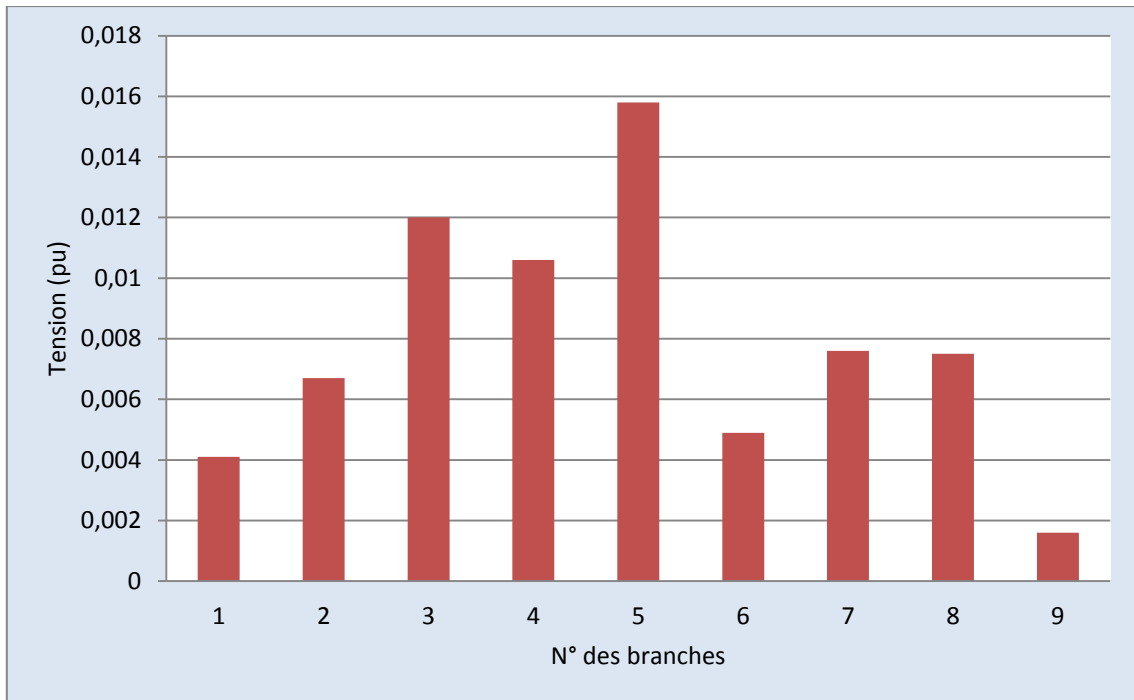
Fig. III.8 : Tensions aux jdb's avec compensation

**Tab .III.3 :** Tensions aux jdb's avec compensation

jdb	Tension (pu)
1	1.0000
2	0,9960
3	0,9892
4	0,9772
5	0,9665
6	0,9507
7	0,9457
8	0,9381
9	0,9306
10	0,9322



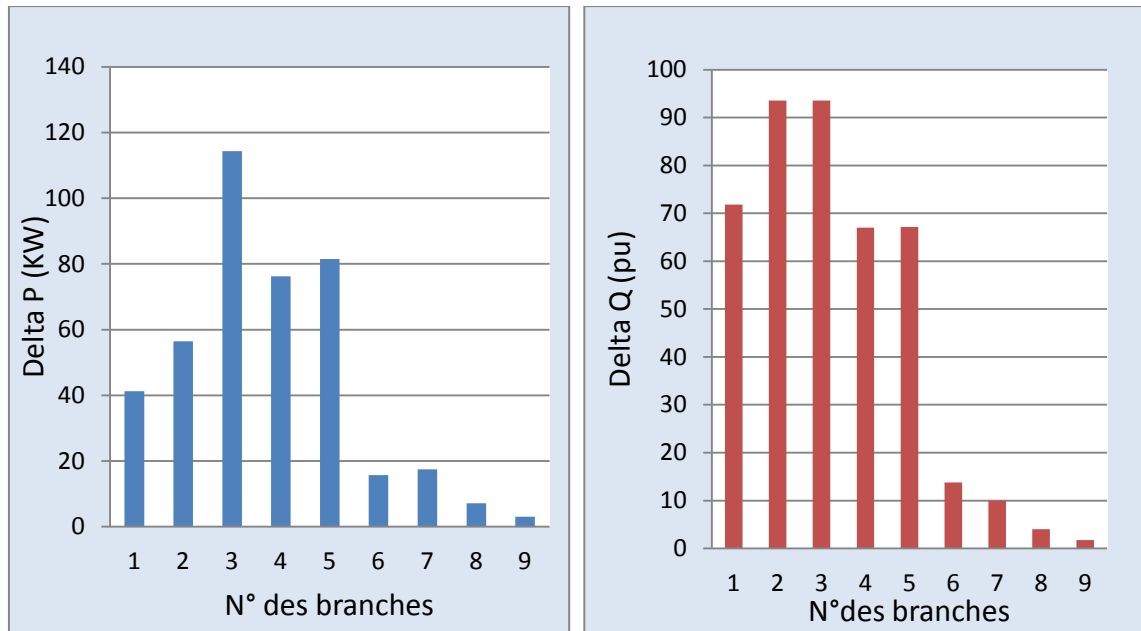
**Fig. III.9 :** Tensions aux niveaux de chaque jdb's après compensation



**Fig.III.10 :** Chutes de tension dans les branches après compensation

**Tab.III.4.** Pertes de puissances active et réactive dans les branches après compensation

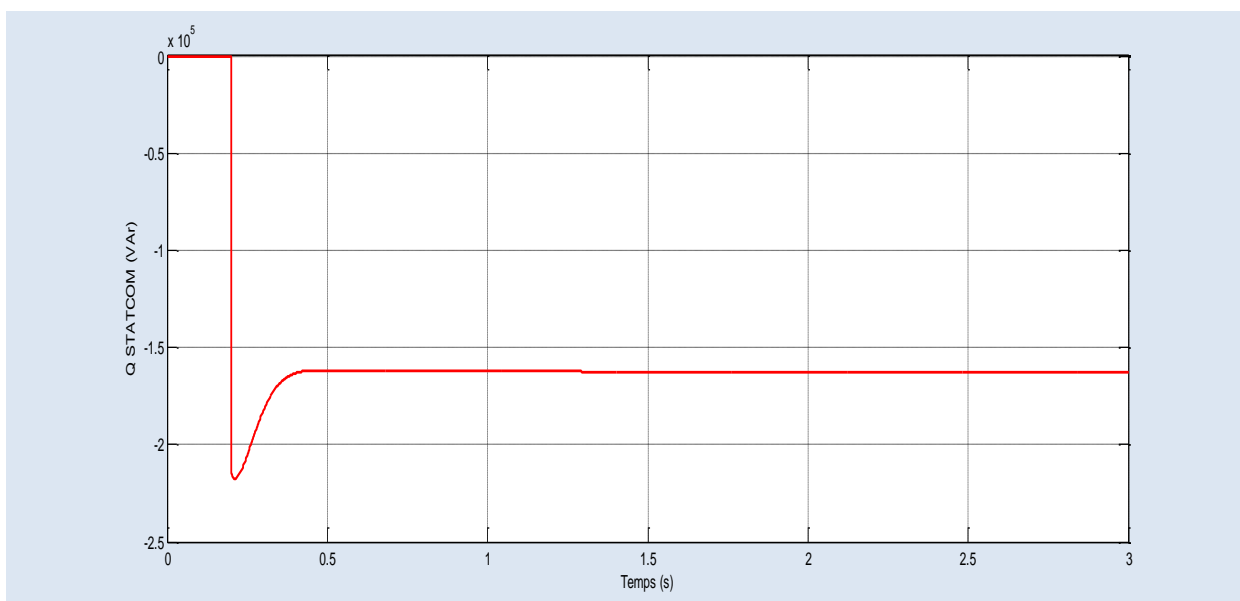
Numéro de branche	Pertes de puissance active (KW)	Pertes de puissance réactive (KVAr)	Pertes totales
1	41.288	71.818	Puissance active : 413.097 KW  Puissance réactive : 422.516 KVAr
2	56.405	93.426	
3	114.37	93.52	
4	76.270	66.992	
5	81.476	67.133	
6	15.663	13.758	
7	17.457	9.970	
8	7.1000	4.055	
9	3.060	1.750	



**Fig.III.11:** Pertes de puissances active et réactive après compensation

**Tab.III.5 :** Somme de pertes actives et réactive dans les deux cas

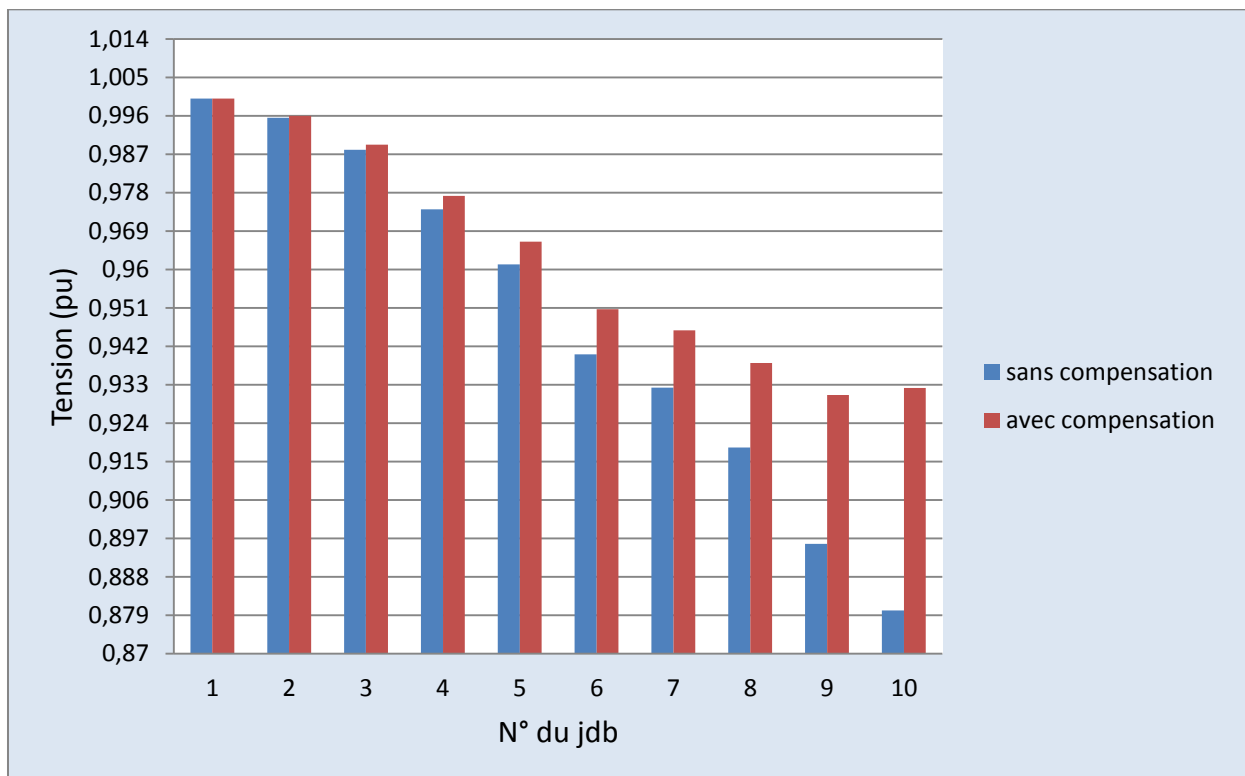
Pertes	Réseau sans compensation	Réseau avec compensation
Pertes actives (KW)	785.576	413.097
Pertes réactive (KVAr)	724.462	422.516



**Fig. III.12 :** Courbe de puissance réactive injectée par le STATCOM

**Tab. III.6 :** Chutes de tension dans les branches avant et après compensation

Numéro de branche	Avant Compensation (pu)	Après compensation (pu)
1-2	0.0050	0.0041
2-3	0.0074	0.0067
3-4	0.0140	0.0120
4-5	0.0128	0.0106
5-6	0.0244	0.0158
6-7	0.0077	0.0049
7-8	0.0139	0.0076
8-9	0.0226	0.0075
9-10	0.0156	0.0016



**Fig. III.13 :** Tension aux jdb avant et après la compensation



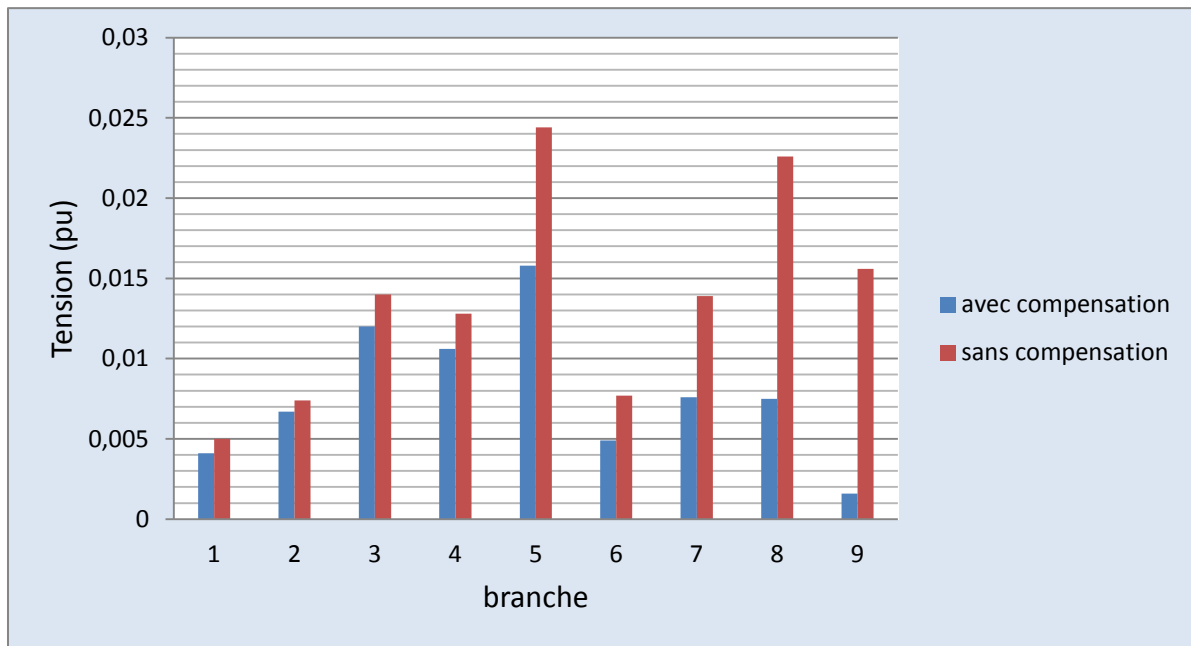


Fig. III.14 : Comparaison des chutes de tension dans les branches

Tab.III.7. Puissance apparente totale fournie par la source au réseau

Puissance apparente totale Avant la compensation	Puissance apparente totale Après la compensation
12397 KVA	10867 KVA

### Discussion des résultats

La première chose à remarquer dans les Figures (III.13) et (III.14) est l'amélioration de l'amplitude des tensions, spécialement le nœud où le STATCOM a été installé (de 0.8801 p.u à 0.9322 p.u). L'augmentation des tensions aux jeux de barres est due au fait que le courant de ligne a diminué, ce qui a pour effet de réduire les chutes de tension (tableau III.6).

Nous observons aussi la diminution remarquable des pertes de puissance Active et réactive. Avant l'intégration de STATCOM, la somme des pertes Active était de 785.576 KW, mais après, elle a diminué jusqu'à atteindre 413.097KW. La puissance réactive qui était à 724.462 KVAR, elle a baissé jusqu'à 422.516 KVAR.

Les chutes de tension, par conséquent, ont diminué dans tous les branches.

## Conclusion

Ce chapitre est divisé en deux parties essentielles. La première consiste à évaluer les différentes grandeurs caractérisant le réseau de distribution radial à 10 jdb (Tensions, puissances) dans son état initial. En deuxième partie, nous avons inséré un STATCOM au nœud qui représente la tension la plus faible, et étudié l'intégration STATCOM sur le plan de tension. Nous avons remarqué la baisse des chutes tension dans les branches ainsi les pertes en puissance active et réactive. En revanche, cette insertion a conduit à un soulagement de la source principale et ça se confirme par la valeur de puissance apparente totale fournie au réseau qui est passée de 12397 KVA à 10867 KVA après son insertion, c.-à-d une baisse de 20%.

### Conclusion générale

L'industrie de l'énergie électrique a subi des changements profonds, suite au différent bouleversement politique et économique de plusieurs pays dans le monde. Ce nouvel environnement du marché de l'électricité, a mis en évidence une politique une clientèle plus importante et plus exigeante vis-à-vis du fonctionnement des réseaux électrique à travers la flexibilité dans leur contrôle, la fiabilité et la qualité de l'énergie offerte sur le marché.

Ce mémoire présente et explique un nouveau concept utilisé dans le domaine des réseaux électrique, appelée FACT (Flexible AC Transmission Systems) et dont les systèmes sont mis en exergue pour permettre aux systèmes de production et de transport d'énergie une possibilité de prise en charge rapide et efficace de la demande ou du fonctionnement de ces systèmes d'énergie en général.

Ce travail permet à tout d'avoir une idée et une information actualisée sur différents schémas et dispositifs rentrant dans le cadre de ce concept FACTS. El faut noter que ces dispositifs prennent de plus en plus de l'importance dans la conduite et le contrôle des réseaux électriques et contribuent à atténuer de manière significative les effets d'un certain nombre de problèmes qui de transfert d'énergie à travers les lignes, etc. Le point le plus importants traité dans ce mémoire est d'améliorer la qualité de la tension. Afin d'arriver à cet objectif, nous avons partagé notre mémoire en trois chapitre.

Dans le premier chapitre, nous avons mené des généralités sur les réseaux électrique compris leur architecture. Ainsi nous avons mis en évidence la qualité de l'énergie et les différents types de perturbations qui peuvent dégrader cette qualité d'énergie avec leurs solutions pour l'améliorer qui est basé sur des dispositifs FACTS.

Le seconde chapitre était dédié à la modélisation des différents éléments du réseau tel que les générateurs, les charges, les lignes et les transformateurs et sur la modélisation du STATCOM. Nous avons présenté le modèle mathématique du STATCOM connecté à un réseau, afin d'analyser son influence sur le système étudié.

Le dernier chapitre est consacré à l'intert de l'intégration d'un STATCOM dans le réseau. Le compensateur connecté au réseau est l'un des moyens d'échange de puissances actives et réactive avec le réseau. Il est donc nécessaire d'évaluer des stratégies de commande pour garantir que cette tension reste dans des niveaux acceptables quelque soit l'état de la charge sur le réseau à un instant donné. Afin d'effectuer le réglage de cette tension, une

compensation avec contrôle de la puissance réactive nous a permis d'améliorer la qualité de la tension. Cette technique a permis d'obtenir un système qui s'adapte aux différentes conditions de fonctionnement du réseau et maintient la tension au point de raccordement dans sa plage de tolérance. Les résultats de simulation montrent que le STATCOM à participer au réglage de la tension au nœud de connexion et permet de préserver la stabilité de tension dans le réseau.

## Référence bibliographique

- [1] C.Barbier et J.P. Barret, “Analyse des Phénomènes d’écroulement de Tension sur un Réseau de Transport. “, RGE, Tome89, No.10, pp.672-690, Octobre 1980.
- [2] N. Yorino et al., “An Investigation of Voltage Instability Problems.” IEEE Trans. PS, Vol.7 No.4, pp.1529-1542, November 1992.
- [3] B. Ha Lee and K. Y. Lee, “A Study on Voltage Collapse Mechanism in Electric Power System.” IEEE Trans. PS, Vol.6 No.3, pp.966-974, August 1991.
- [4] N.G. Hingorani and L. Gyugyi, “Understanding FACTS”, IEEE Press., NewYork, 2000.
- [5] M. A. FONTELA GARCIA, « Interaction des réseaux de transport et de distribution en présence de production décentralisée », thèse de doctorat, L’Institut Polytechnique de Grenoble, 2008.
- [6] P.BORNARD, « conduite d’un système de production transport ».
- [7] N. DOUKHI, « contribution a l’étude de la qualité de l’énergie », mémoire de magister, Université EL-HADJ LAKHDER BATNA, 2016.
- [8] Eric Félice Philippe Révilla « Qualité des réseaux électriques et efficacité énergétique »ISBN 978-2-10-051591-2, Dunod, Paris, 2009
- [9] C. Michel, « Commande et régulation des réseaux électriques », Hermès science publications, Lavoisier, 2003.
- [10] A. Yousfi, « Amélioration de la Qualité de l’Energie Electrique en utilisant un onduleur de tension à cinq niveaux », Mémoire de Magister, Université HASSIBA BEN BOUALI CHLEF, 2008.
- [11] C. Bertrand, « Qualité de l’Energie Electrique Et Enseignement de l’Electrotechnique».
- [12] K. DJAZIA, « Etude des filtres actifs pour réseaux déséquilibrés et distordus », thèse de doctorat, Université FERHAT ABBAS – SETIF 1, 2015.
- [13] H. SEKHANE, « L’optimisation de la puissance réactive et le contrôle de tension à travers l’incorporation des dispositifs FACTS », mémoire de magister, Université de Constantine 1, 2013.
- [14] J. NDAYIZAMBA, « Contribution à l'analyse de la compensation série avancée dans les réseaux de transport d'énergie électrique », thèse de doctorat, Ecole polytechnique de Montréal, 1996.

## Référence bibliographique

- [15] S. BOUTABA, « Amélioration de la stabilité d'un réseau électrique par l'utilisation d'un ASVC », mémoire de magister, Université HASSIBA BEN BOUALI CHLEF, 2009.
- [16] Y. MAGNOUN, «Placement optimal de dispositif FACTS dans un réseau de puissance», thèse présentée en vue d'obtenir le diplôme d'ingénieur, CNAM, Maroc, 2014.
- [17] N. AOUZELLAG, « Contribution à l'Amélioration de la Flexibilité dans les Réseaux Electriques Liée à l'Intégration des Générateurs Eoliens », thèse doctorat Université A/MIRA de Bejaïa, 2011.
- [18] A. A. EDRIS, «Proposed Terms And Definitions for FACTS», IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, pp. 1848-1853, 1997.
- [19] L. KARTOBI, « Optimisation de la Synthèse des FACTS par les Algorithmes Génétiques et les Essaims Particulaires pour le contrôle des Réseaux Electriques », mémoire de magister, Ecole nationale polytechnique, 2006.
- [20] A. HELLAL, « Extension de stabilité à la compensation statique », Projet de recherche N° 01/93.
- [21] P. Petitclair, « Modélisation et Commande de structures FACTS : (Flexible Alternative CUITent Transmission System) Application au STATCOM (STATic COMPensator) », thèse de Doctorat, L'institut national polytechnique de GRENOBLE, 1997
- [22] C. A. C. Cavaliere, E. H. Watanabe, M. Aredes, « Comparison between the Conventional STATCOM and the PWM STATCOM », UFRJ, Rio de Janeiro, 1999.
- [23] N. MANCER, « Contribution à l'optimisation de la puissance réactive en présence de dispositifs de compensation dynamique (FACTS) », mémoire de magister, université Mohamed Khider – Biskra, 2012.
- [24] A. OUNISSA, «Étude de l'intégration de la production éolienne dans un réseau de distribution», mémoire de master II, université Abderrahmane-Mira de Bejaia, 2011.
- [25] M. Mathieu, «Contribution a l'étude et au contrôle des convertis-sertisseurs multi niveaux application à la compensation des fours à arc», thèse de doctorat, lorraine, juin 2014.

## **Référence bibliographique**

- [26] B. Boubekeur, «Amélioration de la Stabilité Transitoire des Fermes Eoliennes par l'utilisation du STATCOM», mémoire de magister, université FERHAT ABBAS-SETIF, 2011.

# ANNEXES

## Annexe 1

Les données du réseau radial avec une seule branche à 10 jeux de barres sont consignées dans le tableau.1.

La tension de base est égale à 23 KV, la puissance de base 4186 KVA.

**Tableau. A.1** : Données de la ligne de 10 jeux de barres

Numéro de branche	Départ de nœud	Nœud d'arrivé	R (ohm)	X (ohm)	P (KW)	Q (KVA)
1	1	2	0.1233	0.2127	1840	460
2	2	3	0.2466	0.4051	980	340
3	3	4	0.6363	0.5160	1790	446
4	4	5	0.6984	0.6084	1598	1840
5	5	6	1.7131	1.4000	1610	600
6	6	7	0.9053	0.7886	780	110
7	7	8	2.0552	1.1640	1150	60
8	8	9	4.7953	2.7160	980	130
9	9	10	5.3434	3.0264	1640	200