

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البليدة
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الآلية و الكهروتقني
Département d'automatique & électronique



Mémoire de Master

Filière : Electrotechnique
Spécialité : Machines électriques

Présenté par

LARADJI YAZID

&

TAIEB SOLIMANE BILLEL

Contrôle de la tension d'un réseau de transport par les dispositifs FACTS

Proposé par : Dr.Belazzoug Messaoud

Année Universitaire 2021-2022

Remerciements

Nous tenons à remercier tout premièrement Dieu le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience, qu'il nous a donné durant toutes ces longues années.

*Ainsi, nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements à notre encadreur **Dr. Belazzoug** pour suivi continuel tout le long de la réalisation de ce mémoire et qui n'a pas cessé de nous donner ses conseils.*

Nous tenons à remercier vivement toutes personnes qui nous ont Aidés à élaborer et réaliser ce mémoire, ainsi à tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin à accomplir ce travail.

Nos remerciements vont aussi à tous les enseignants du département d'Electrotechnique qui ont contribué à notre formation .Nos sincères remerciements à tous les membres du jury qui ont Accepté de juger notre travail.

En fin, nous tenons à exprimer notre reconnaissance à tous nos amis et collègues pour le soutien moral et matériel...

Dédicace

A mes parents pour leurs encouragements, conseils et leurs soutien permanent durant toutes mes années d'études, même si Tous les mots du monde ne sauraient exprimer l'immense amour que je vous porte, ni la profonde gratitude que, je vous témoigne pour tous les efforts et les sacrifices que vous n'avez jamais cessé de consentir pour mon instruction et mon bien-être. Je vous rends hommage par ce modeste travail en guise de ma reconnaissance éternelle et de mon amour infini.

ملخص:

ان دراسة استقرار الشبكات الكهربائية تعد موضوعاً مهماً لتخطيط وتشغيل هذه الشبكات. من بين مؤشرات جودة الطاقة، يمكننا أن نذكر مستوى الجهد و الذي يعتبر من بين الانشغالات المهمة في استقرار الشبكة الهدف الأساسي من هذه الدراسة هو معرفة كيف يمكن تعويض إضراب تواتر التيار الكهربائي الناتج عن خلل في الأطوار و إجراء تحليل لمعرفة القضبان الحساسة في الشبكة من اجل توصيلها بأجهزة FACTS. الجهاز المستعمل خلال هذه الدراسة هو STATCOM تم تنفيذ التطبيق على شبكة IEEE 14 باستخدام PSAT

كلمات المفاتيح: الاستقرار للتوتر, أجهزة

Résumé :

L'étude de la stabilité des réseaux électriques constitue un sujet important pour la planification et l'exploitation de ces réseaux. Parmi les indices de qualité d'énergie, on peut citer le profil de tension considéré comme une préoccupation importante dans l'étude de la stabilité .

L'objectif principal de ce travail est de concevoir comment compensé la tension perdu causé par un défaut de phase et d'effectuer une analyse pour connaître les jeux de barres sensibles dans le réseau électrique pour connecter de ces jeux barre avec le dispositif d'un des FACTS. Le FACTS utilisé au cours de ce travail est un compensateur statique STATCOM. L'application a été effectuée sur le réseau IEEE 14 jeux de barre en utilisant le logiciel PSAT

Mots-clés : stabilité de tension, STATCOM,, dispositifs FACTS, logiciel PSAT

Abstract :

The study of the electrical networks voltage stability is an important topic for the planning and operation of electrical networks. In power quality index, we can cite the voltage profile considered as an important concern in the study of the stability

The main objective of this work is to design how to compensate the lost voltage caused by a phase fault and to perform an analysis to know the sensitive buses in the electrical network to connect these buses with the device of FACTS. The FACTS used in this work is a STATCOM static compensator. The application was carried out on the IEEE 14 buses by using the PSAT software

Keywords : : voltage stability, STATCOM, FACTS devices, PSAT software

Listes des acronymes et abréviations

Listes des acronymes et abréviations

HT : haut tension

THT : tres haut tension

BT : base tension

MT : moyen tension

TBT : tres base tension

FACTs : Flexible Alternating Current Transmission Systems

SVC : Static Var Compensator

TCSC : Thyristor Controlled Series Capacitor

STATCOM: Static Compensator

TCR: Thyristor Controlled Reactor

TSR: Thyristor Switched Reactor

TSC: Thyristor Switched Capacitor

TSSC: Thyristor Switched Series Capacitor

TCSR: Thyristor Controlled Series Reactor

TSSR: Thyristor Switched Series Reactor

SSSC: Static Synchronous Series Compensator

TCPAR: Thyristor Controlled Phase Angle Regulator

IPFC: nterline Power Flow Controller

UPFC : Unified Power Flow Controller

Listes des acronymes et abréviations

f	Fréquence
ΔP	Pertes de puissance actives
ΔQ	Pertes de puissance réactive
S_{ij}	Puissance transitée
S_{ijmax}	Puissance transitée maximale
S_G, S_g	Puissance générée
S_D, S_d	Puissance demandée
Y_s	Admittance série
Y_p	Admittance parallèle ou shunt
V_i	Tension de jeu de barre i
V_k	Tension de jeu de barre k
Y_{ik}	L'admittance de la ligne entre les deux jeux de barres i et k
$V_i Y_p$	La contribution shunt du courant au jeu de barres i
θ	Angle de phase
$ v_i $	module de la tension du jeu de barres i
P_{Gi}	puissance active injectée au jeu de barres i
Q_{Gi}	puissance réactive injectée au jeu de barres i
Q_{Di}	puissance réactive demandée au jeu de barres i
P	Variable de perturbation
U	Variable de contrôle
X	Variable d'état
θ_{ij}	La différence des phases entre les jeux de barres i et j
$G_{ij} + jB_{ij}$	La partie réelle et imaginaire de la matrice Y_{ij}

Remerciements

Dédicace

Résumé

Listes des acronymes et abréviations

Sommaire

Listes des figures

Liste des tableaux

Introduction Générale..... 1

Chapitre I:Généralité sur les réseaux

I.1 Introduction :	4
I.2 Définition d'un réseau électrique	4
I.3 La constitution du réseau électrique :	5
I.3.1 Production :	5
I.3.2 Transport :	5
I.4 Protection de réseau électrique :	6
I.5 Les problèmes dans les réseaux électriques :	6
1.5.1 Variations de fréquence :	6
1.5.2 Creux de tension et coupures brève :	7
1.5.3 Chute de tension :	8
1.5.4 Déséquilibre de tension	9
1.5.5 Puissance réactive	10
1.5.6 Surtensions:	11
I.6.Conclusion :	12

Chapitre II : Écoulement de puissance

II.1 Introduction	14
II.2. Définition :	14
II.3. Le but et l'objectif de l'étude de l'écoulement de puissance :	14

Sommaire

II.4. Problème de l'écoulement de puissance :.....	15
II.4.1.Nœud de charge(PQ) :	16
II.4.2.Nœud générateur(PV) :.....	16
II.4.3.Accès bilan :	16
II.5.Classification des jeux de barres dans un réseau électrique :.....	16
II.5.1.Jeu de barres de charges (PQ) :.....	17
II.5.2.Jeu de barres de contrôle (PV) :	17
II.5.3.Jeu de barres de référence $ V \theta$:.....	17
II.5.4.Jeu de barre de contrôle (PQ) :.....	17
II.6.Classification des variables de l'écoulement de puissance :.....	18
II.6.1. Les variables de perturbation ou non contrôlables :	18
II.6.2.Variables d'état (X) :	18
II.7 Equations de l'écoulement de puissance :.....	19
II.7.1 Equations générales de la puissance :.....	19
II.7.2 Puissances écoulées dans les lignes :	20
II.7.3 Puissance écoulée dans les transformateurs régulateurs :.....	20
II.7.4 Calcul des pertes totales dans le réseau :.....	21
II.8.Résoudre le problème de l'écoulement de puissance :.....	21
II.8.1.La méthode itérative de Newton-Raphson :	21
II.9.Ecoulement de puissance continue :.....	24
II.10.Conclusion :.....	26

Chapitre III : Dispositifs FACTS

III.1.Introduction :.....	28
III.2. Définition et rôles des dispositifs FACTS :.....	28
III.3.Types des Facts :	29
III.4.Structure des Principaux Dispositifs FACTS :.....	29
III.4.1 Compensateurs Séries :.....	29
III.4.1.1 TCSC (Thyristor controlled series capacitor)	30
III.4.1.2 SSSC (Static Synchronous Series Compensator).....	30

Sommaire

III.4.2.Compensateurs parallèle :.....	31
III.4.2.1.Compensateur statique de puissance réactive(SVC) :.....	31
III.4.2.2 Compensateur statique synchrone(STATCOM) :.....	32
III.4.2.2.1 Principe de Fonctionnement	33
III.4.2.2.2. Effet de STATCOM sur le réseau électrique:	36
III.4.2 2.3 Avantages du STATCOM :	37
III.4.3 Compensateurs série-parallèle :.....	37
III.4.3.1 Contrôleur de transit de puissance unifié UPFC :.....	37
III.4.3.2.Transformateur déphaseur commandé par thyristor(TCPST) :	38
III.4.3.3.Régulateur d'angle déphase commandé par thyristor(TCPAR) :	39
III.5 Propriétés des dispositifs FACTS :.....	39
III.5.1.Avantages des dispositifs FACTS :	39
III.5.2.Inconvénients des dispositifs FACTS :	39
III.6.Application des dispositifs FACTS dans les réseaux électriques :	39
III.7.Conclusion :	40

Chapitre 4 : Simulation et résultat

IV.1.Introduction.....	42
IV.2.Analyse des réseaux électriques par le logiciel (PSAT) :.....	42
IV.3.Etude du réseau test IEEE-14 JB :.....	44
IV.4.Cas d'un court-circuit triphasé :	46
IV.5.Effet de STATCOM sur le réseau en défaut :	47
IV.6.Interprétations:	49
IV.7.Analyse de réseau avec la méthode de CPF :.....	50
IV.8.Analyse du réseau IEEE14 JB avec STATCOM :	52
IV.9.Interprétations :	55
IV.10.Conclusion :.....	56

Conclusion générale58

Bibliographie

LISTES DES FIGURES

Chapitre I:Généralité sur les réseaux

Figure I.1 : Schéma du réseau électrique.....	5
Figure I.2 : Variation de fréquence	7
Figure I.3. Creux de tension et coupure brève	7
Figure I.4. Cas d'une consommation alimentée par une ligne depuis une centrale.....	8
Figure I.5. Cas d'une forte consommation alimentée par une ligne depuis une centrale	8
Figure I.6. Cas d'une consommation répartie avec plusieurs centrales	9
Figure I.7. Déséquilibre de tension	10
Figure I.8. Les surtensions transitoires.	11
Figure I.9. Exemple de surtension.....	12

Chapitre II : Écoulement de puissance

Figure II.1 spécification des différentes grandeurs des jeux de barres.....	18
Figure II.2: Principe d'écoulement de puissance en continu.	25

Chapitre III : Dispositifs FACTS

Figure III.1:classification des dispositifs FACTS	29
Figure III.2 TCSC, (a) structure de base, (b) Schéma équivalent [26].....	30
Figure III.3:(a) structure d'un SSSC, (b) schéma équivalent d'un SSSC [26]	30
Figure III.4: Schéma type du SVC en connexion shunt.	31
Figure III.5 (a):structure d'un STATCOM (b) schéma équivalent.....	32
Figure III.6: Commande d'un STATCOM.	33
Figure III.7 : Schéma du STATCOM couplé au réseau électrique.	33
Figure III.8. Courbes simulées du courant et tensions en mode capacitif [31].....	35
Figure III.9 : Courbes simulées du courant et tensions en mode inductif [31].....	35
Figure III.10 Schéma de base d'un UPFC	38

Chapitre 4 : Simulation et résultat

Figure IV.1 : fenêtre principale	43
Figure IV.2 : Bibliothèque de Simulink	43
Figure IV.3 : Représentation du réseau IEEE 14 JB à l'état initial.....	44
Figure IV.4: Profil de tension: Réseau test : IEEE 14-Bus	45
Figure IV.5: Profil de tension avec le défaut au JB 14	46
Figure IV.6 Réseau en défaut étudié avec installation des STATCOM.....	47
Figure IV.7:profil de tension après installation des STATCOM	48
Figure IV.8:Tensions dans chaque jeu de barre après installation du STATCOM.....	49
Figure IV.9: La comparaison entre V_{init} et V_{cpf}	51
Figure IV.10: variation du module de tension	51
Figure IV.11: Le module de tension au niveau les JB en fonction de λ	52
Figure IV.12 : Réseau IEEE 14 JB en présence d'un STATCOM au JB14	53
Figure IV.13: Profil de module de tension avec et sans STATCOM	54
Figure IV.14: Le module de tension au niveau les JB en fonction de λ	54
Figure IV.15: Le module de tension au niveau les JB en fonction de λ	55

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre III : Dispositifs FACTS

Tableau III.1. Domaines d'applications des dispositifs FACTS.....	40
---	----

Chapitre 4 : Simulation et résultat

Tableau IV.1:Caractéristiques du réseau 14 JB	44
---	----

Tableau IV.2:Résultats de l'écoulement de puissance : Régime normal	45
---	----

Tableau IV.3: Niveaux de tensions, Puissances générées et consommées	46
--	----

Tableau IV.4: Niveaux de tensions, Puissances générées et consommées après installation du STATCOM	48
---	----

Tableau IV.5 :Les résultats de l'écoulement de puissance continu(CPF)	50
---	----

Tableau IV.6 : résultats de l'écoulement de puissance avec STATCOM	53
--	----

Introduction Générale

Introduction Générale

L'industrialisation et la croissance de la population sont les premiers facteurs pour lesquels la consommation de l'énergie électrique augmente régulièrement. Ainsi, pour avoir un équilibre entre la production et la consommation, il est nécessaire d'augmenter le nombre de centrales électriques, de lignes, de transformateurs etc..., ce qui implique une augmentation de coût et une dégradation du milieu naturel.

Le maintien de l'équilibre entre la production et la consommation nécessite alors une surveillance permanente du système afin d'assurer la qualité du service (problème de conduite), garantir sa sécurité (problème de protection) et sa stabilité (problème de réglage). D'autre part plus que le réseau augmente plus qu'il devient complexe et plus difficile à contrôler.

Ce système qui doit conduire de grandes quantités de l'énergie en l'absence de dispositifs de contrôle sophistiqués et adéquats beaucoup de problèmes peuvent survenir sur ce réseau tel que : le transit de puissance réactive excessif dans les lignes, les creux de tension entre les différentes parties du réseau...etc.

Les réseaux électriques jusqu'à ces dernières années sont exploités mécaniquement : malgré l'utilisation de la microélectronique, des ordinateurs et des moyens rapides de télécommunication dans le contrôle des réseaux, la dernière action dans ces systèmes de commande est prise avec des dispositifs mécaniques ayant un temps de réponse plus au moins long.

Le développement rapide de l'électronique de puissance a un effet considérable dans l'amélioration des conditions de fonctionnement des réseaux électriques en performant le contrôle de leurs paramètres par l'introduction de dispositifs de contrôle à base des composants d'électronique de puissance très avancés (GTO-Gate Turn Off-, IGBT -Insulated Gate Bipolar Transistors) connus sous l'acronyme FACTS: Flexible Alternatif Current Transmission Systems.

La nouvelle génération des systèmes FACTS est constituée principalement par des convertisseurs de tension (ou courant), à base des interrupteurs statiques modernes (GTO ou

INTRODUCTION GENERALE

IGBT) commandées en ouverture et en fermeture, liés à des condensateurs comme source de tension continue. Ces convertisseurs selon leur connexion au réseau sont distingués en compensateurs shunt, série et hybride tels que : STATCOM, SSSC, UPFC respectivement.

L'objectif de ce modeste travail est d'étudier les fonctions de contrôle offerts par le STATCOM dans la compensation de la puissance réactive aussi que le maintien de la tension au point de raccordement. Cette étude qui est organisée en quatre chapitres :

- Le premier chapitre a donné une brève revue sur l'opération de transport de l'énergie électrique ainsi que les problèmes liés à la tension, la puissance active et réactive.
- Le deuxième chapitre nous avons présenté le problème de l'écoulement de puissance, l'objectif de cette dernière ainsi que les méthodes itératives,
- Le troisième chapitre traite Concept de base des systèmes FACTS qui sont largement utilisés dans la compensation de l'énergie réactive. Parmi ces dispositifs FACTS, notre choix s'est porté sur le STATCOM pour l'amélioration de la stabilité statique de tension.
- Au dernière chapitre on a met en évidence l'efficacité du STATCOM dans l'amélioration de la stabilité de tension d'un système à 14 nœuds a été présentée. La simulation des modèles étudiés sans et avec STATCOM est faite sur le logiciel PSAT sous MATLAB, Puis en fait l'interprétation du résultat de simulation.

Enfin, on présentera une conclusion générale et proposera des perspectives d'études futures permettant de compléter ce travail.

Chapitre I:Généralité sur les réseaux

I.1 Introduction :

La gestion du réseau électrique ne consiste pas seulement à faire en sorte que les transits soient inférieurs aux capacités de transport de chaque ouvrage du réseau. Il faut également surveiller plusieurs paramètres techniques, dont la puissance réactive et le niveau de tension. La tension électrique doit rester dans une plage autorisée en tout point du réseau, dans toutes les situations de production et de consommation prévisibles. En effet, la tension peut localement être dégradée, par exemple les jours de forte consommation, dans ce cas, les transits à travers les lignes du réseau sont importants, ce qui provoque une chute de tension dans ces lignes.

Comme tout générateur d'énergie électrique, un réseau de puissance fournit de l'énergie aux appareils utilisateurs par l'intermédiaire des tensions qu'il maintient à leurs bornes. Il est évident que la qualité et la continuité de la tension est devenue un sujet stratégique pour plusieurs raisons concernant l'exploitation des réseaux électriques [7].

I.2 Définition d'un réseau électrique

Un réseau électrique est l'ensemble des composantes requises pour produire, transporter, distribution l'énergie électrique de la source (générateur) à la charge (consommateur). Cet ensemble comprend des transformateurs, des lignes de transmission, des réactances, des condensateurs, des moyens de mesure et de contrôle, des protections contre la foudre et les courts circuits, ... ; autrement dit, un réseau électrique est l'ensemble des infrastructures permettant d'acheminer l'énergie électrique des centres de production (centrales électriques), vers les consommateurs d'électricité.

Un réseau électrique doit aussi assurer la gestion dynamique de l'ensemble production - transport consommation, mettant en œuvre des réglages ayant pour but d'assurer la stabilité de l'ensemble [8].

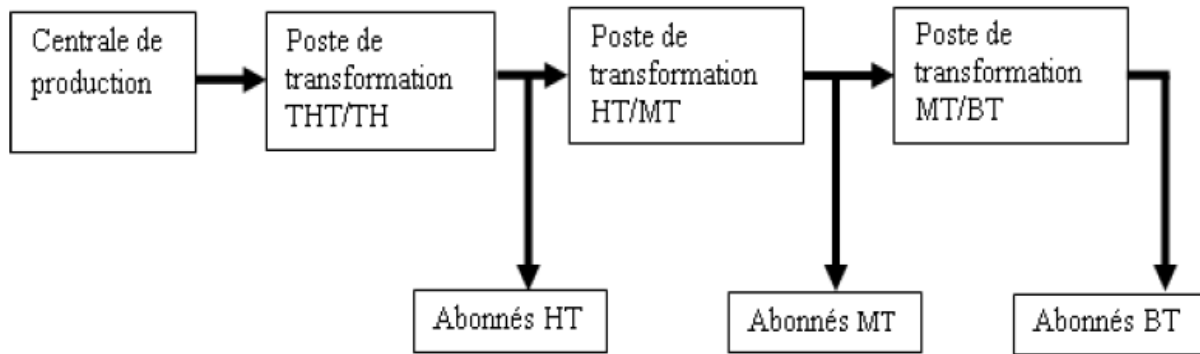


Figure I.1 : Schéma du réseau électrique

I.3 La constitution du réseau électrique :

I.3.1 Production :

La production d'électricité se répartie sur deux bases principales : Les énergies non renouvelables, comprenant les énergies fossiles que sont le pétrole, le gaz naturel et le charbon, et l'énergie nucléaire pour les principales. Les énergies renouvelables qui sont des énergies dites «vertes » à divers degrés. Ce sont : les énergies solaires photovoltaïques et thermiques, l'énergie éolienne, L'énergie hydraulique, la biomasse et l'énergie géothermique.

I.3.2 Transport :

Le transport de l'énergie électrique se fait en plusieurs étapes :
Au départ de la centrale de production, la tension délivrée par l'alternateur est de 20 kV ; Cette tension subit une première transformation, il s'agit d'une élévation vers 400 kV ou 225 kV ; Avec cette valeur on assure un transport longue distance ; D'autre transformation sont faites sur la tension pour différents niveaux de distribution ; En parle alors de la THT, HT, MT, BT, TBT ; Le transport de l'énergie.

I.3.3 Distribution :

Le réseau de distribution des lignes moyenne et basse tension :

- Les lignes MT permettent le transport de l'électricité à l'échelle locale vers les petites industries, Les lignes MT ont une tension comprise entre 15kV et 30 Kv [9].

GENERALITE SUR LES RESEAUX

- Les lignes BT sont les plus petites lignes du réseau. Leur tension est comprise entre 230 et 380 volts. Donc la distribution d'énergie. Électrique vers les ménages et les artisans et représentent plus de la moitié du réseau national avec 654 000 kilomètres dont 213 000 kilomètres en souterrain [9].

I.4 Protection de réseau électrique :

Tout réseau électrique possède des systèmes de protection pour déconnecter le système de production en cas de défaut sur la ligne. L'objectif est de protéger les 3 constituants d'un système électrique :

- les organes de production (alternateur) ;
- les composants des réseaux de transport et de distribution (lignes aériennes et souterraines, transformateurs, jeux de barre) ;
- les organes de consommation (clients finaux) [10]

1.5 Les problèmes dans les réseaux électriques :

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

1.5.1 Variations de fréquence :

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

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

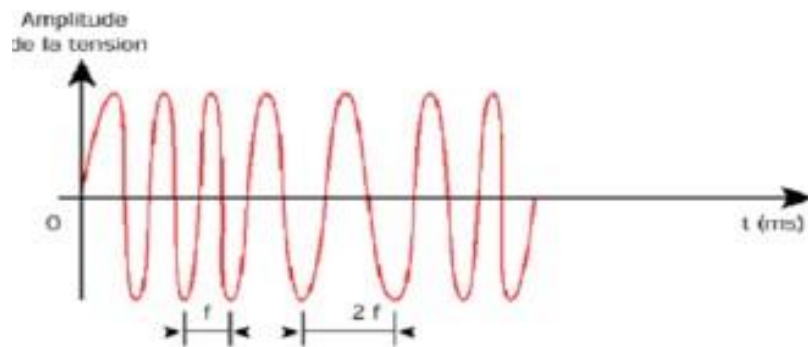


Figure II : Variation de fréquence

1.5.2 Creux de tension et coupures brève :

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

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

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

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

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

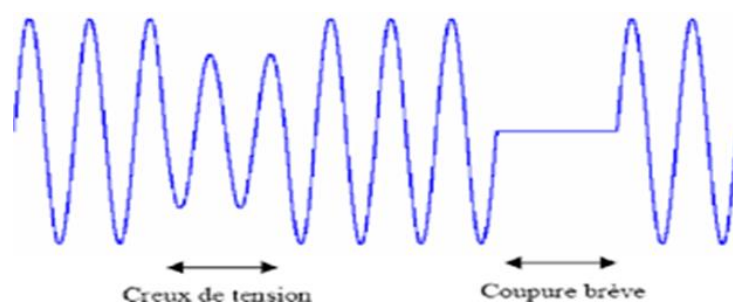


Figure I.3. Creux de tension et coupure brève

GENERALITE SUR LES RESEAUX

1.5.3 Chute de tension :

Lorsque le transit dans une ligne électrique est assez important, la circulation du courant dans la ligne provoque une chute de la tension figures (I.4) et (I.5) La tension est alors plus basse au bout de ligne qu'en son origine, et plus la ligne est chargée en transit de puissance, plus la chute de tension sera importante.

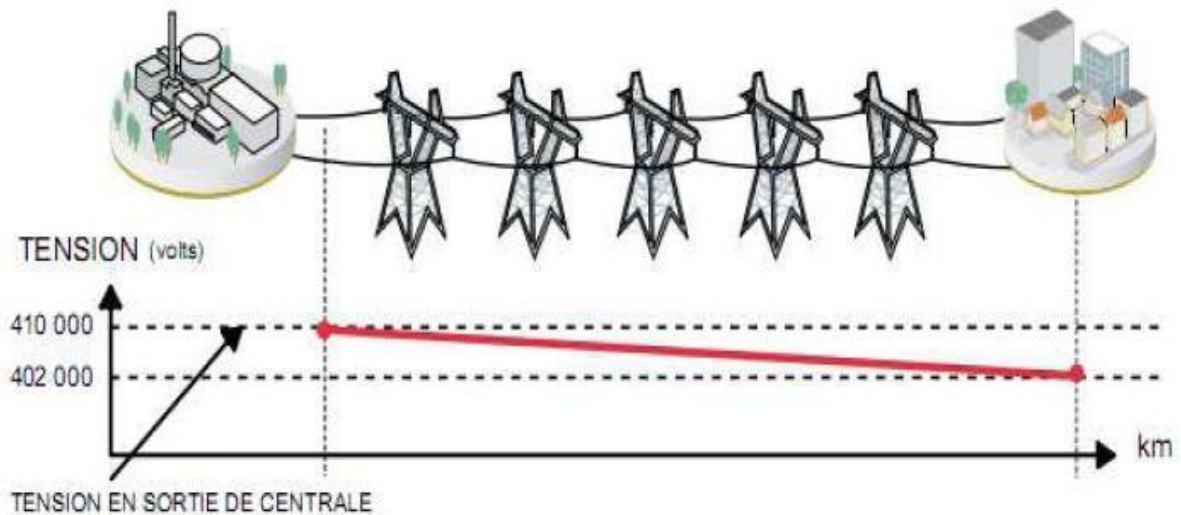


Figure I.4. Cas d'une consommation alimentée par une ligne depuis une centrale

Si la consommation double, la chute de tension double

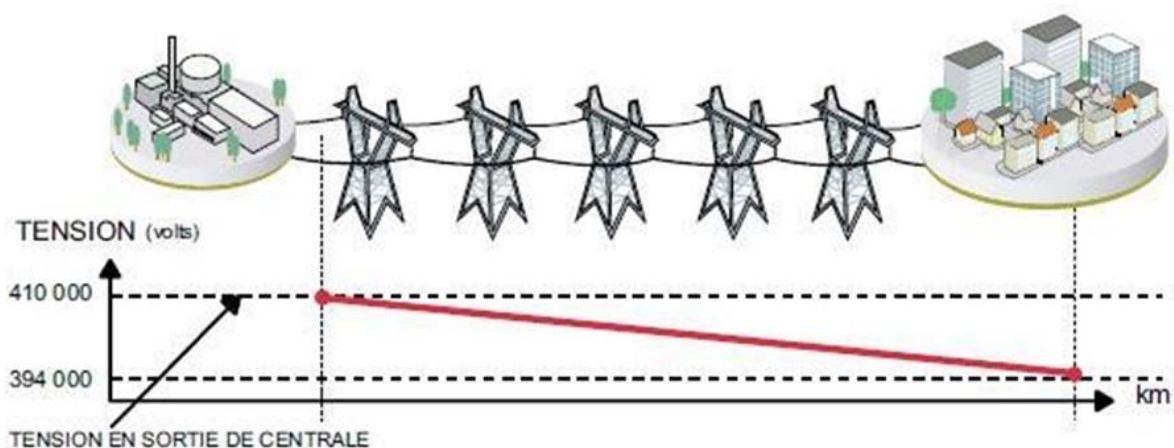


Figure I.5. Cas d'une forte consommation alimentée par une ligne depuis une centrale

GENERALITE SUR LES RESEAUX

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

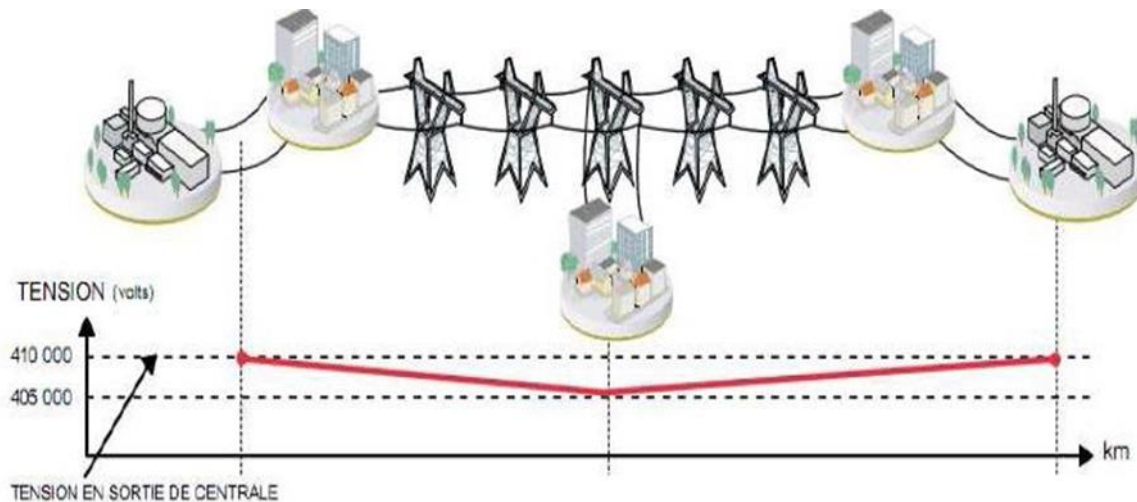


Figure I.6. Cas d'une consommation répartie avec plusieurs centrales

C'est pourquoi dans les réseaux maillés THT, la tension est différente suivant l'endroit où l'on se trouve. A la pointe de consommation, la tension est forte aux nœuds du réseau où les centrales débitent, et relativement basse aux points de consommation éloignés de centrales. Figure (I.4) (I.5) (I.6) sont valables pour un instant donné, à un niveau de consommation donné.

Lorsque la consommation varie au cours du temps, la tension évolue, baissant lorsque la consommation augmente, remontant lorsque la consommation diminue. Le fait que la tension ne soit pas identique en tout point du réseau est normal. Cette différence est compensée par des réglages de tension réalisés dans les postes de transformation. Cela permet de garantir que la tension reste dans la plage admissible en tout point de livraison [5]

1.5.4 Déséquilibre de tension

Un récepteur électrique triphasé, qui n'est pas équilibré et que l'on alimente par un réseau triphasé équilibré conduit à des déséquilibres de tension dus à la circulation des courants non équilibrés dans les impédances du réseau. Ceci est fréquent pour la réceptrice

GENERALITE SUR LES RESEAUX

monophasée basse tension. Mais cela peut également être engendré, à des tensions plus élevées, par des machines à souder, des fours à arc ou par la traction ferroviaire.

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

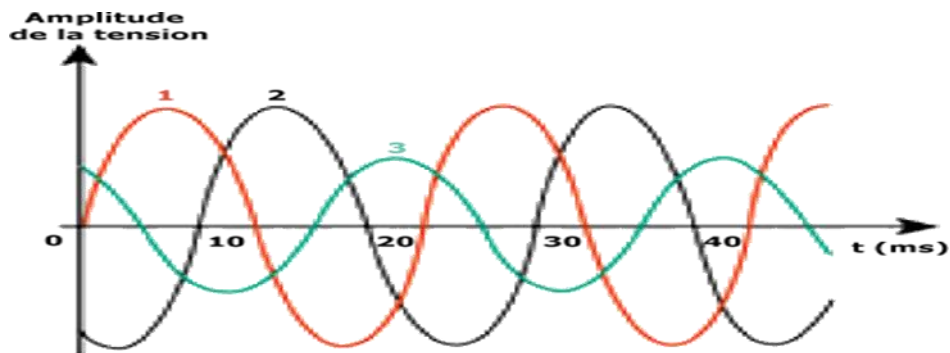


Figure I.7. Déséquilibre de tension

1.5.5 Puissance réactive

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

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

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

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

GENERALITE SUR LES RESEAUX

1.5.6 Surtensions:

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

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

Elles peuvent apparaître

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

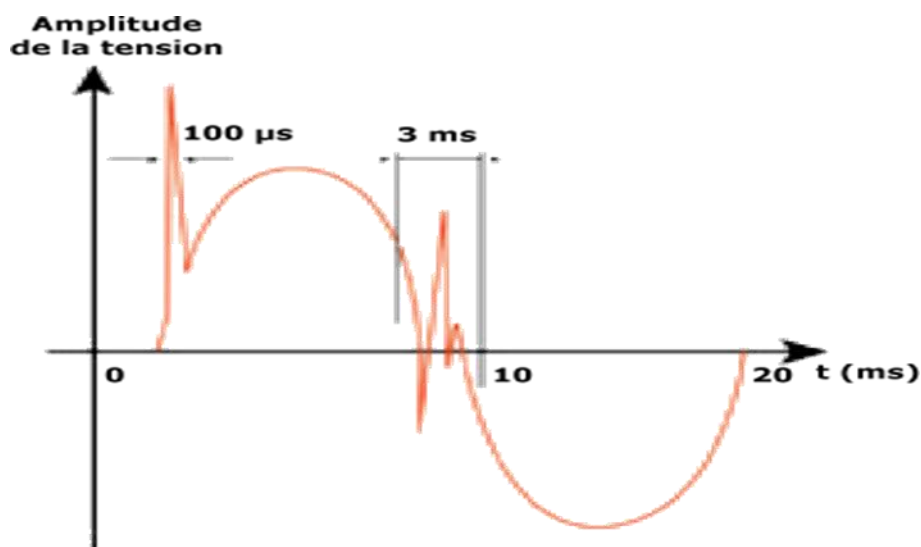


Figure I.8. Les surtensions transitoires.

Les surtensions correspondent à des augmentations de l'amplitude de la tension de 1.1Pu à 1.8 pu. Les surtensions sont moins fréquentes que les creux de tension et sont généralement dues à des courts-circuits dans les systèmes à neutre isolé qui engendrent à la fois des creux de tension et des surtensions. En cas de court-circuit monophasé dans un tel système, les deux phases non concernées par le défaut peuvent prendre une valeur pouvant

GENERALITE SUR LES RESEAUX

aller jusqu'à 1.73 pu c'est à dire la tension composée. En cas de court-circuit biphasé, la phase non affectée par le défaut se caractérise par une surtension qui peut aller jusqu'à 1.5pu. [6]

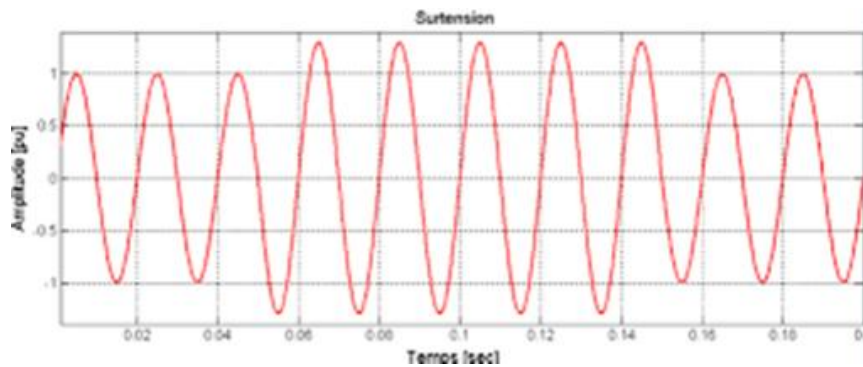


Figure I.9. Exemple de surtension.

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

I.6.Conclusion :

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

Actuellement il existe une méthode moderne et sophistiqué 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) qu'ils seront traités en détail dans le prochain chapitre.

Chapitre II : Écoulement de puissance

ÉCOULEMENT DE PUISSANCE

II.1 Introduction

L'objectif principal de l'étude de l'écoulement de puissance est de déterminer les conditions de fonctionnement du système électrique en régime permanent ; telles que les puissances et les tensions au niveau de tous les jeux de barres de sorte que les charges soient maintenues à des niveaux de tension convenables. L'analyse de l'écoulement de puissance consiste en la détermination des points d'équilibre du modèle de système électrique. Depuis longtemps, plusieurs méthodes ont été proposées par différents auteurs pour la résolution des systèmes d'équations de grande taille modélisant le fonctionnement en régime permanent du système électrique. Le problème de calcul de l'écoulement de puissance peut se partager aux problèmes suivants :

- La formulation d'un modèle mathématique convenable au réseau électrique : ce modèle doit décrire les relations entre les tensions et les puissances dans le système interconnecté.
- Spécification des limites de puissance (active et réactive) et de tension qui doivent être appliquées aux différents jeux de barres.
- L'application des méthodes numériques pour résoudre les équations de l'écoulement de puissance. Ces méthodes fournissent les solutions du problème (tensions, puissances, pertes dans les lignes) avec une précision admissible.
- Si une fois toutes les tensions aux jeux de barres déterminés, les puissances dans chaque ligne de transmission sont ensuite calculées.

II.2. Définition :

L'analyse de la répartition des puissances dans un réseau électrique composé de plusieurs nombres de générateurs, lignes de transmission et des charges est très importante pour les études, la planification et l'exploitation d'un réseau électrique. Cela permet de connaître les conditions de production et de charge et les niveaux des tensions du réseau. Les calculs permettant d'obtenir ces informations sont connus sous le nom (écoulement des puissances ou encore power flow) [2].

II.3. Le but et l'objectif de l'étude de l'écoulement de puissance :

L'étude de l'écoulement de puissance permet d'avoir la solution des grandeurs d'un réseau électrique en fonctionnement normal, équilibré en régime permanent. Ces grandeurs

ÉCOULEMENT DE PUISSANCE

sont les tensions aux nœuds, les puissances injectées aux nœuds et celles qui transitent dans les lignes. Les pertes et les courants s'en déduisent [20].

Le but de calcul des écoulements de puissance permet d'investiguer les points suivants :

- la détermination des tensions en tout point du réseau
- la détermination des puissances actives et réactives
- l'effet de la modification de la topologie du réseau
- l'étude des pertes (perte d'un générateur, d'une ligne ou autre)
- l'optimisation du fonctionnement du réseau
- l'optimisation des pertes

L'objectif fondamental des opérateurs des réseaux électriques est d'assurer la continuité de service (alimentation de leurs consommateurs), tout en respectant plusieurs exigences :

- Les tensions et la fréquence de réseau doivent d'être dans les limites acceptables
 $V_{min} < V < V_{max} = f_{min} < f < f_{max}$
- La forme d'onde du courant et de la tension doit être sinusoïdale et périodique (Éviter les harmoniques).
- Avoir le minimum des pertes de puissance P_{min} et Q_{min}
- Éviter le dépassement du I_{max} ou ($S_{ij, max}$) puissance transitée maximale $S_{ij} < S_{ij, max}$
- Les lignes de transmission doivent fonctionner dans leurs limites thermiques et de stabilité. ($P_{tr} < P_{max}$ pour la dégradation totale de chaleur et plus durée de vie des câbles).
- La durée de coupure de l'alimentation doit être au minimum possible.
- En outre, à cause de la dérégulation (ouverture) du marché d'électricité, le coût de kWh doit être le plus bas possible.

Pour évaluer toutes ces conditions, on doit procéder à des méthodes qui déterminent l'état des grandeurs électriques.

II.4. Problème de l'écoulement de puissance :

Le calcul de l'écoulement de puissance consiste à déterminer l'ensemble des transits de puissance et des tensions dans un réseau contenant un nombre de charges donné.

ÉCOULEMENT DE PUISSANCE

Pour chaque nœud du système on associe quatre grandeurs : puissance active et réactive, module et phase de la tension. Sur ces quatre grandeurs seules deux sont connues en un nœud, les deux autres sont déterminées par calcul. [12]

Trois types de nœuds sont utilisés :

II.4.1.Nœud de charge(PQ) :

Il est connecté directement avec la charge. Il ne possède aucune source d'énergie. Les deux Puissances P et Q sont considérées connus.

II.4.2.Nœud générateur(PV) :

Il est connecté directement à une source d'énergie réactive ou avec un générateur. La puissance active et la tension sont connues. La production de l'énergie réactive est limitée par des valeurs inférieures et supérieures, Q_{gimin} et Q_{gimax} respectivement. Si l'une des deux limites est atteinte, la valeur de la puissance réactive se fixe à cette limite et la tension se libère, le nœud devient alors un nœud charge (PQ).

II.4.3.Accès bilan :

Il est connecté directement avec un générateur relativement puissant, on le considère dans le calcul de l'écoulement de puissance pour compenser les pertes actives et assurer l'égalité entre la demande et la génération de la puissance active. L'amplitude et l'angle de la tension sont supposé connus.

II.5.Classification des jeux de barres dans un réseau électrique :

Chaque jeu de barre (i) est caractérisé par quatre variables qui sont :

- $|V_i|$: Module de la tension du jeu de barre i.
- θ_i : phase de la tension du jeu de barre i.
- P_i : puissance active nette injectée au jeu de barre i.
- Q_i : puissance réactive nette injectée au jeu de barre i.

La puissance nette injectée à un jeu de barre, est égale à la différence entre la puissance générée (S_{gi}) puissance demandée (S_{di})iveau de ce jeu de barre

ÉCOULEMENT DE PUISSANCE

$$S_i = S_{gi} - S_{di}$$

$$P_i = P_{gi} - P_{di}$$

$$Q_i = Q_{gi} - Q_{di}$$

On peut classer les jeux de barres en trois catégories en fonction des spécifications des variables utilisées:

II.5.1. Jeu de barres de charges (PQ) :

Ce sont les jeux de barres de la demande clientèles, pour ce genre, les puissances actives et réactives sont données, mais l'amplitude et l'argument de la tension sont à déterminer [31]. ou bien c'est le JB où il n'y a pas de générateur ou un connaît

II.5.2. Jeu de barres de contrôle (PV) :

Ce sont les jeux de barres de générateurs du réseau où la puissance active et le module de la tension sont connus, puisqu'elles sont contrôlables ; par contre la puissance réactive et l'argument de la tension sont inconnus. [31]

II.5.3. Jeu de barres de référence $|V|\theta$:

C'est un jeu de barres connecté a une source de tension considérée constante, et son Angle de phase est pris comme référence de calcul. Ses puissances actives et réactives, doivent être calculées d'après le calcul de la puissance pour s'adapter aux exigences de jeu de barres de contrôle. [31]

II.5.4. Jeu de barre de contrôle (PQ) :

Dans le calcul des variables inconnus (Q et θ) d'un jeu de barre de contrôle on peut trouver la valeur de l'énergie réactive Q dépasse les limites d'égalité ou d'inégalité de cette dernier ; on est obligés donc de fixer la valeur de Q, ce jeu de barre reçoit un jeu de barre de contrôle (P,Q). [31]

Le tableau suivant résume tous les types des variables des Jeux de barre existants:

ÉCOULEMENT DE PUISSANCE

Types de jeux de barres	Grandeurs connues	Grandeurs inconnues
Jeu de barre de référence	V, θ	P, Q
Jeu de barre de génération	P, V	Q, θ
Jeu de barre de charge	P, Q	V, θ

Figure II.1 spécification des différentes grandeurs des jeux de barres

II.6. Classification des variables de l'écoulement de puissance :

On peut résumer toutes les grandeurs électriques qui participent à déterminer l'état électrique de réseau en quatre variables : la puissance active (P), la puissance réactive (Q), le module de tension et l'angle θ . La nature de ces variables permet leur distinction [13].

II.6.1. Les variables de perturbation ou non contrôlables :

Parmi les variables des équations de l'écoulement de puissance, les variables de la demande (charge) PD et QD qu'elles ne sont pas contrôlables car elles dépendent seulement des abonnés de la puissance. Les variables de perturbation avec cette définition constituent les composantes du vecteur de perturbateur y. [14]

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \\ y_{n+1} \\ y_{n+2} \\ \vdots \\ y_{2n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{D1} \\ P_{D2} \\ \vdots \\ P_{Dn} \\ Q_{D1} \\ Q_{D2} \\ \vdots \\ Q_{Dn} \end{bmatrix} \quad (\text{II-1})$$

II.6.2. Variables d'état (X) :

Ce sont l'amplitude V_i et l'angle θ_i des tensions au niveau des jeux de barres i ($i = 1 \dots n$), elles sont qualifiées de variables d'état, suite à leur valeur déterminant l'état de réseau. Ces variables à déterminer sont représentées par le vecteur d'état X.

$$X = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_n \\ X_{n+1} \\ X_{n+2} \\ \vdots \\ X_{2n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \vdots \\ \delta_n \\ |V_1| \\ |V_2| \\ \vdots \\ |V_n| \end{bmatrix} \quad (\text{II-2})$$

n : nombre de jeux de barres de tout le réseau.

II.6.3. Variables de contrôle :

Les puissances générées à savoir PG ou QG (actives ou réactives) sont des variables de contrôle représentées par le vecteur de contrôle U.

$$U = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_n \\ U_{n+1} \\ U_{n+2} \\ \vdots \\ U_{2n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{G1} \\ P_{G2} \\ \vdots \\ P_{Gn} \\ Q_{G1} \\ Q_{G2} \\ \vdots \\ Q_{Gn} \end{bmatrix} \quad (\text{II-3})$$

II.7 Equations de l'écoulement de puissance :

II.7.1 Equations générales de la puissance :

La puissance complexe $S_i = P_i + jQ_i$ au noeud i, en fonction des tensions aux noeuds et les éléments de la matrice admittance nodale Ybus, en tenant compte de l'expression du courant injecté Ii au noeud i, est donnée par la relation suivante. [15]

En exprimant la tension sous sa forme polaire en module $|V_i|$ argument θ_i , l'expression de la puissance complexe devient :

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{S}_i^* = Y_{ii} |V_i|^2 + |V_i| \sum_{j=1, j \neq i}^n Y_{ij} |V_j| \\ P_i = \text{Réel}(\bar{S}_i^*) = \text{Réel}\{V_i^* \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j\} \\ Q_i = -\text{Imag}(\bar{S}_i^*) = -\text{Imag}\{V_i^* \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j\} \end{array} \right. \quad .4)$$

II.7.2 Puissances écoulées dans les lignes :

Pour calculer la puissance qui s'écoule dans la branche reliant les accès i et j, le courant qui circule entre les accès i et j a pour expression : [42]

$$I_{ij} = y_{ij}(V_i - V_j) + y_{io}V_i$$

Où $\bar{y}_{io} = \sum_{j=1}^n \bar{y}_{ij}$ (II-5)

Et la puissance apparente :

$$\left\{ \begin{array}{l} S_{ij} = V_i I_{ij}^* \\ \bar{S}_{ij} = \bar{V}_i [\bar{y}_{ij}(\bar{V}_i - \bar{V}_j) + y_{io} \bar{V}_i]^* \\ \bar{S}_{ij} = |\bar{V}_i|^2 \bar{y}_{ij}^* - \bar{V}_i \bar{V}_j^* \bar{y}_{ij} + |\bar{V}_i|^2 \bar{y}_{io}^* \end{array} \right. \quad (II-6)$$

De même la puissance apparente qui s'écoule de l'accès j vers l'accès i vaut :

$$S_{ji} = |\bar{V}_j|^2 y_{ij}^* - \bar{V}_j \bar{V}_i^* y_{ij} + |\bar{V}_j|^2 \bar{y}_{jo}^* \quad (II-7)$$

II.7.3 Puissance écoulee dans les transformateurs régulateurs :

Considérant un transformateur régulateur dont sa matrice admittance est :

$$[Y] = \begin{bmatrix} \frac{y_{ij}}{a^2} & \frac{-y_{ij}}{a} \\ \frac{-y_{ij}}{a} & y_{ij} \end{bmatrix} \quad (II-8)$$

Le courant qui circule entre les accès i et j est donné comme suit :

$$\bar{I}_{ij} = \frac{y_{ij}}{a^2} \bar{V}_i - \frac{y_{ij}}{a} \bar{V}_j = \frac{1}{a} \bar{y}_{ij} \left(\frac{1}{a} \bar{V}_i - \bar{V}_j \right) \quad (II-9)$$

Et la puissance \bar{S}_i^* a pour valeur :

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{a^2} (\bar{V}_i)^2 \cdot \bar{y}_{ij}^* - \frac{1}{a} \bar{y}_{ij}^* \bar{V}_j^* \bar{V}_i \quad (II-10)$$

D'autre part le courant qui circule de l'accès j vers l'accès i :

ÉCOULEMENT DE PUISSANCE

$$I_{ji} = \frac{1}{a} \bar{y}_{ij} (V_j - \frac{1}{a} V_i)$$
$$S_{ji} = \frac{1}{a^2} (V_j)^2 \bar{y}_{ij} - \frac{1}{a} \bar{y}_{ij} V_j^* V_i \quad (\text{II-11})$$

II.7.4 Calcul des pertes totales dans le réseau :

Pour un élément du réseau reliant deux accès i et j on a : [15]

$$\bar{S}_{lossk} = \bar{S}_{ij} + \bar{S}_{ji} \quad (\text{II-12})$$

Tel que :

\bar{S}_{Lossk} : Puissance apparente perdue dans la branche (i et j).

\bar{S}_{ij} : Puissance apparente qui transite de l'accès i vers l'accès j.

\bar{S}_{ji} : Puissance apparente qui transite de l'accès j vers l'accès i.

D'où

$$P_{lossk} = \text{Réal}\{\bar{S}_{lossk}\} \quad (\text{III-21})$$

$$Q_{lossk} = \text{Imag}\{\bar{S}_{lossk}\} \quad (\text{III-22})$$

\bar{P}_{Lossk} : Puissance active perdue dans la branche (i et j)

\bar{Q}_{Lossk} : Puissance réactive perdue dans la branche (i et j)

La puissance totale perdue dans le réseau est égale à la somme des puissances perdues dans toutes les branches du réseau.

$$\bar{S}_{loss} = \sum \bar{S}_{lossk}$$
$$\bar{P}_{loss} = \text{Réal}\left\{\sum \bar{S}_{lossk}\right\}$$
$$Q_{loss} = \text{Imag}\left\{\sum \bar{S}_{lossk}\right\}$$

II.8. Résoudre le problème de l'écoulement de puissance :

II.8.1. La méthode itérative de Newton-Raphson :

Le problème de l'écoulement de puissance peut être résolu par la méthode de Newton-Raphson. En réalité, parmi les nombreuses méthodes disponibles pour l'analyse de

ÉCOULEMENT DE PUISSANCE

l'écoulement de puissance, la méthode de Newton-Raphson est considérée comme la plus raffinée et la plus importante. Elle n'est pas plus simple que la méthode de Gauss-Seidel, mais elle est plus rapide (convergence) surtout pour les réseaux de tailles importantes. Equation de puissance réelle [16].

$$I_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \quad , i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (\text{II-23})$$

$$S_i = V_i \left(\sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \right)^* = V_i \left(\sum_{j=1}^n y_{ij}^* V_j^* \right) \quad (\text{II-24})$$

$$\text{Alors : } V_i = |V_i| \angle \theta_i \quad (\text{II-25})$$

On définit :

$$\theta_{ij} = \theta_j - \theta_i \quad (1.32)$$

$$Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij} \quad (1.33)$$

$$S_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| (\cos(\theta_i - \theta_j) + j \sin(\theta_i - \theta_j) \omega (G_{ij} - jB_{ij})) \quad (\text{II-34})$$

θ_{ij} : La différence des phases entre les jeux de barres i et j

$G_{ij} + jB_{ij}$: La partie réelle et imaginaire de la matrice Y_{ij} .

Etape 1 : on définit le type de jeu de barres $i=1$, un jeu de barre référence (V_1, θ_1) connues

(P_1, Q_1) a déterminer [16].

$$\theta = \begin{bmatrix} \theta_2 \\ \vdots \\ \theta_n \end{bmatrix}$$

$$v = \begin{bmatrix} V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix}$$

$$x = \begin{bmatrix} \theta \\ v \end{bmatrix}$$

Etape 2 : On définit les fonctions de $P_i(x)$ et $Q_i(x)$:

ÉCOULEMENT DE PUISSANCE

$$P_i = \sum |V_i||V_j|w(G_{ij} \cos(\theta_{ij}) + B_{ij} \sin(\theta_{ij}))$$

$$Q_i = \sum |V_i||V_j|w(G_{ij} \sin(\theta_{ij}) + B_{ij} \cos(\theta_{ij}))$$

Etape 3 : On forme l'équation $F_i(X) = 0$

$$\begin{cases} P_i(X) - P_i = 0 \\ Q_i(X) - Q_i = 0 \end{cases}$$

- Ou P_i, Q_i sont des puissances spécifiées.

$$F(X) = \begin{pmatrix} P_2(x) - p_2 \\ P_3(x) - p_3 \\ P_x(x) - p_x \\ \dots \\ Q_2(x) - q_2 \\ Q_3(x) - q_3 \\ Q_x(x) - q_x \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{pmatrix} = (0)$$

Etape 4 :

$$J_{11} = \frac{\delta P_i(x)}{\delta \theta_j}, \quad J_{12} = \frac{\delta P_i(x)}{\delta V_j}$$

$$J_{21} = \frac{\delta Q_i(x)}{\delta \theta_j}, \quad J_{22} = \frac{\delta Q_i(x)}{\delta V_j}$$

Alors :

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix}$$

J=matrice de jacobienne.

II.8.2.La méthode de NR modifié (fast-decoupled):

En se basant sur les cas des différents réseaux étudiés à constater les valeurs des Submatrices J_{12} et J_{21} que sont très petites. [MER 14]

ÉCOULEMENT DE PUISSANCE

$$J = \begin{bmatrix} J_{11} & 0 \\ 0 & J_{22} \end{bmatrix}$$

L'explication de ces faibles valeurs revient au fait que la puissance active P dépend nécessairement du θ_i ; et non du $|V_i|$ par contre Q_i dépend essentiellement du $|V_i|$ et non θ_i . Généralement $B_{ij} \approx 0$ et $\theta_{ij} \approx 0$ d'où $\theta_i - \theta_j = 0$ alors $\sin\theta_{ij} = 0$. La conductance est presque nulle car les éléments connectés aux réseaux sont d'origine réactive.

II.9.Écoulement de puissance continue :

L'une des méthodes simples de calcul de la marge de charge est le calcul d'écoulement de puissance à chaque incrémentation de la charge, jusqu'à la divergence du programme. Malheureusement cette méthode fournit des résultats non précis à cause de singularité ou de mauvais conditionnement de la matrice Jacobienne autour du point d'effondrement [17]. En plus, cette méthode classique ne trace pas la partie inférieure de la courbe de tension qui est utilisée par d'autres méthodes d'analyse [17]. Ajjarapu et al. [18] proposent une méthode efficace nommée Ecoulement de Puissance en Continu (CPF : Continuation Power Flow) afin d'éviter la singularité de la matrice Jacobienne près du point d'effondrement. L'algorithme est basé sur une reformulation légère des équations d'écoulement de puissance et l'application d'une méthode de paramétrisation locale [18]. Durant l'application de cette méthode, la matrice Jacobienne reste bien conditionnée même autour du point d'effondrement [18].

L'avantage de l'écoulement de puissance en continu réside, non seulement dans sa capacité de trouver le point critique d'effondrement de tension mais aussi la détermination du tracé de la courbe PV complète (partie supérieure et inférieure) d'une façon exacte. Ses caractéristiques intéressantes amènent plusieurs compagnies de production d'énergie électrique à utiliser cette méthode comme pourvoyeur d'un indice efficace d'évaluation de la proximité du système du point d'effondrement [19].

L'écoulement de puissance en continu se base sur la méthode Prévision correction afin de résoudre le problème d'écoulement de puissance avec un bon conditionnement de la matrice jacobienne. Dans cette méthode, l'incrément de la charge est considéré comme une nouvelle variable du problème d'écoulement de puissance [18]. La figure 1.5, illustre le principe de base de l'écoulement de puissance en continu. D'après la figure on peut remarquer que la méthode démarre par une solution de base (solution initiale du programme d'écoulement de puissance classique), puis elle estime la prochaine solution correspondant à

ÉCOULEMENT DE PUISSANCE

une valeur différente de la charge [18]. La solution estimée est alors corrigée en utilisant la méthode classique de Newton-Raphson en la considérant comme solution initiale du programme d'écoulement de puissance conventionnel [18].

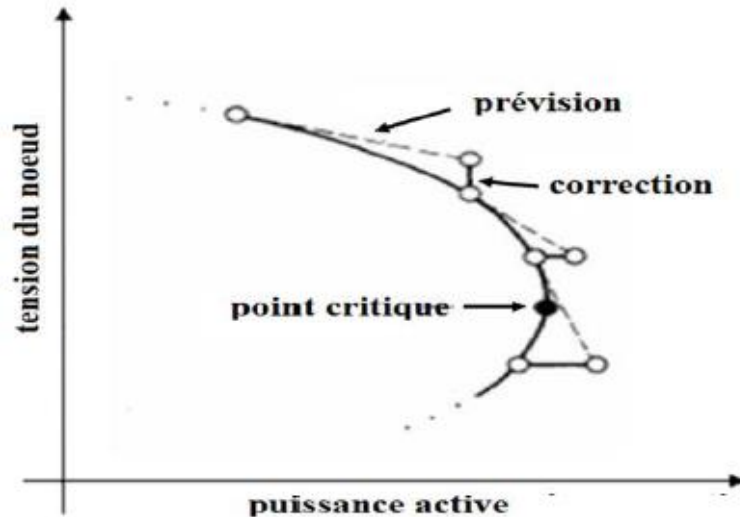


Figure II.2: Principe d'écoulement de puissance en continu.

Comme nous l'avons mentionné précédemment, l'écoulement de puissance en continu se base sur une nouvelle formulation du problème d'écoulement de puissance classique. En plus des variables d'état standard (amplitudes et angles de la tension), la charge est considérée comme une nouvelle entrée dans le calcul. L'équation (1.59) représente la nouvelle formulation du problème d'écoulement de puissance.

$$F = (\delta, V, \lambda) = 0 \quad 0 \leq \lambda \leq \lambda_{critique} \quad (1.59)$$

Où, δ représente le vecteur des angles des tensions nodales, V est le vecteur des amplitudes des tensions nodales et λ représente le facteur de la charge.

Ainsi, la dimension de F devient $2n_1+2n_2+1$, tel que n_1 représente le nombre de noeuds PQ et n_2 représente le nombre de noeuds PV. La solution de base $(\delta_0, V_0, \lambda_0)$ est connue en utilisant l'écoulement de puissance conventionnel, dans ce cas $\lambda_0=0$ (cas de base).

II.10.Conclusion :

Dans ce chapitre, afin d'analyser le réseau électrique, il nous faut déterminer l'écoulement de puissance dont le calcul doit passer par la résolution des équation non linéaires, où le recours aux méthodes numériques est inévitable. Quelques méthodes sont étudiées et nous avons détaillé que la méthode de Newton-Raphson représente des avantages énormes par rapport aux autres méthodes, c'est pour cette raison que nous allons l'utiliser dans la partie du calcul de l'écoulement de puissance.

Chapitre III : Dispositifs FACTS

III.1.Introduction :

L'un des problèmes les plus importants lors de l'étude d'un réseau d'énergie électrique (R.E.E) complexe, est celui de sa stabilité. Ceci est dû au développement important des réseaux ces dernières années, mais aussi à l'objectif de ce type d'étude qui est d'examiner le comportement du réseau face à des faibles ou importantes perturbations. Les variations continues de charge sont un exemple de petites perturbations, les défauts comme les courts-circuits et la perte de synchronisme d'un générateur de forte puissance sont des exemples de grandes perturbations.

L'amélioration des systèmes de courant alternatif existants augmenterait de manière significative avec l'utilisation des compensateurs réactifs électroniquement commandés extrêmement rapides qui ont été développés dans le cadre des systèmes flexibles de transmission à courant alternatif « alternative current A.C ». Cette nouvelle génération de compensateurs est appelée FACTS : «Flexible Alternative Currents Transmission Systems ».

Dans ce chapitre nous présenterons ces compensateurs en général afin d'envisager leurs applications pour améliorer la stabilité des réseaux électriques. [21]

III.2. Définition et rôles des dispositifs FACTS :

Le concept FACTS « Flexible Alternative Currents Transmission Systems » est un terme générique qui caractérise l'ensemble des équipements mettant en jeu de l'électronique de puissance (diodes, thyristors, GTO, IGBT.....). Ces équipements permettent d'améliorer l'exploitation du réseau électrique c'est-à-dire les différents paramètres du réseau électrique tension, impédance, la phase du réseau....

La technologie de ces systèmes (interrupteur statique) leur assure une vitesse supérieure à celle des systèmes électromécaniques classiques. De plus, elles peuvent contrôler le transit de puissance dans les réseaux et augmenter la capacité efficace de transport tout en maintenant voir en améliorant, la stabilité des réseaux [22]. Les dispositifs FACTS sont insérés dans un réseau pour satisfaire plusieurs besoins tels que :

- 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;

DISPOSITIFS FACTS

- Le contrôle des transits de puissances de manière à réduire, voire supprimé, les surcharges dans les lignes ou les transformateurs ainsi que pour éviter les flux de bouclage dans le réseau. Ils agissent alors en contrôlant la réactance des lignes et en ajustant les déphasages. De par leur vitesse de commande élevée. [23]

III.3.Types des Facts :

Les dispositifs FACTS peuvent être classés en trois types, série, parallèle, hybride (série -parallèle ; série- série). [24]

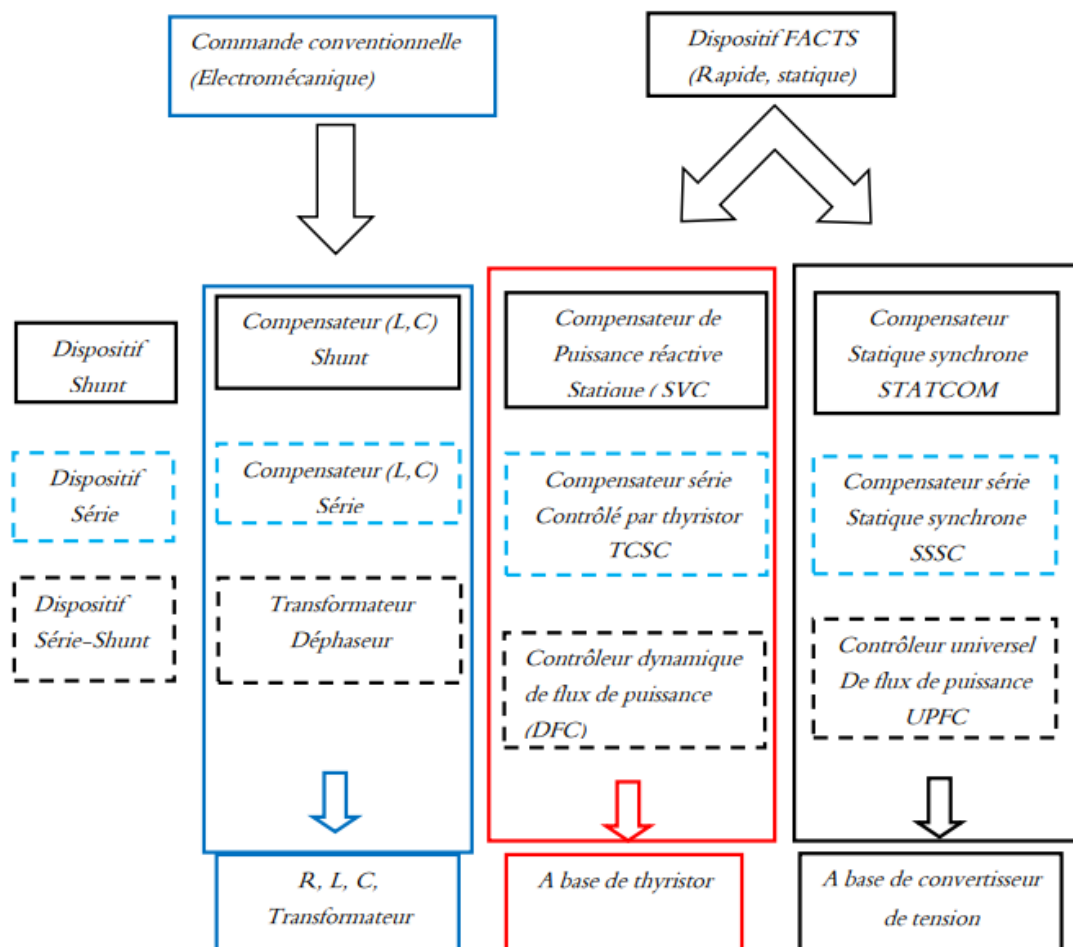


Figure III.1:classification des dispositifs FACTS

III.4.Structure des Principaux Dispositifs FACTS :

III.4.1 Compensateurs Séries :

La réactance des lignes est une des limitations principales de la transmission de courant alternatif dans les longues lignes. Pour remédier à ce problème, la compensation série capacitive a été introduite afin de réduire la partie réactive de l'impédance de la ligne. Les

DISPOSITIFS FACTS

dispositifs FACTS de compensation série sont des évolutions des condensateurs série fixes. Ils agissent généralement en insérant une tension capacitive sur la ligne de transport qui permet de compenser la chute de tension inductive. [23]

III.4.1.1 TCSC (Thyristor controlled series capacitor)

Le Compensateur Série Contrôlé par Thyristors (TCSC) est composé d'une inductance en série avec un gradateur à thyristors, le tout en parallèle avec un condensateur. La représentation schématique et son circuit équivalent de ce compensateur sont donnés par la (Figure III.2) [25].

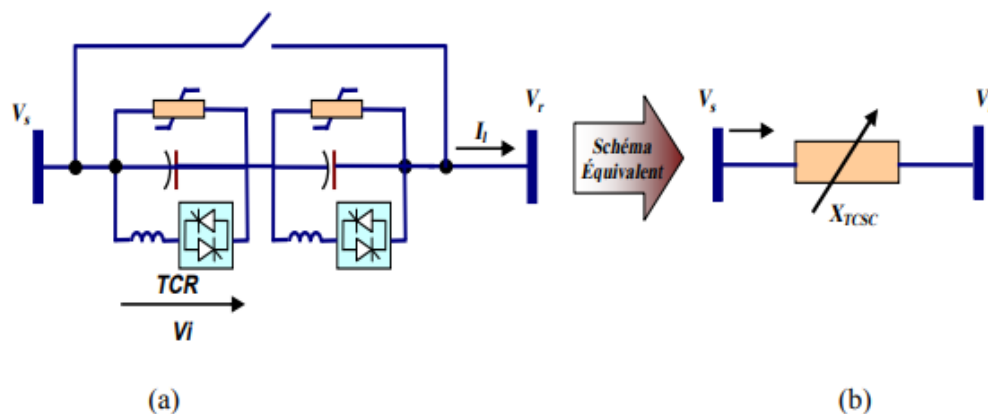


Figure III.2 TCSC, (a) structure de base, (b) Schéma équivalent [26]

III.4.1.2 SSSC (Static Synchronous Series Compensator)

C'est le type le plus important de dispositifs FACTS, similaire à un STATCOM mais avec une tension de sortie injectée en série dans la ligne. Ce dispositif appelé aussi DVR (Dynamic Voltage Restorer) est utilisé généralement dans les réseaux de distribution afin de résoudre les problèmes de qualité d'énergie tel que les creux de tensions et maintenir ces dernières à des niveaux constants [24]

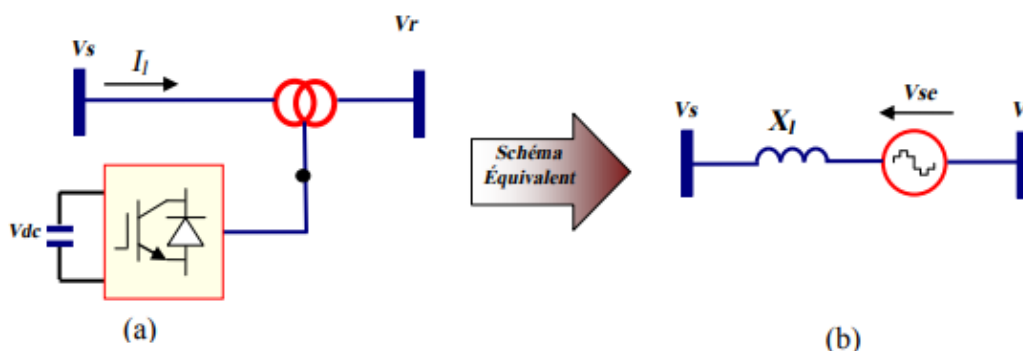


Figure III.3:(a) structure d'un SSSC, (b) schéma équivalent d'un SSSC [26]

DISPOSITIFS FACTS

III.4.2. Compensateurs parallèle :

La compensation shunt est utilisée pour soulager les lignes existantes, augmenter la puissance transmise durant le régime statique et contrôler la tension le long de la ligne. En effet tous les compensateurs parallèles injectent du courant au réseau via le point de raccordement. Quand une impédance variable est connectée en parallèle sur un réseau, elle consomme (ou injecte) un courant variable. Cette injection de courant modifie les puissances réactives et actives qui transitent dans la ligne. Les compensateurs parallèles les plus utilisés sont : [21]

III.4.2.1. Compensateur statique de puissance réactive (SVC) :

IEEE définit le SVC (Static Var Compensator) comme un générateur (ou absorbeur) statique d'énergie réactive, shunt, dont la sortie est ajustée en courant capacitif ou inductif afin de contrôler des paramètres spécifiques du réseau électrique, typiquement la tension des nœuds .

Le compensateur statique de puissance réactive SVC est le premier dispositif FACTS qui apparaît dans les années 1970 pour répondre à des besoins de stabilisation de tension rendue fortement variable du fait de charges industrielles très fluctuantes telles les laminoirs et les fours à arc. Les SVC sont des FACTS de première génération. Ils utilisent des thyristors classiques, commandables uniquement à l'amorçage. [27]

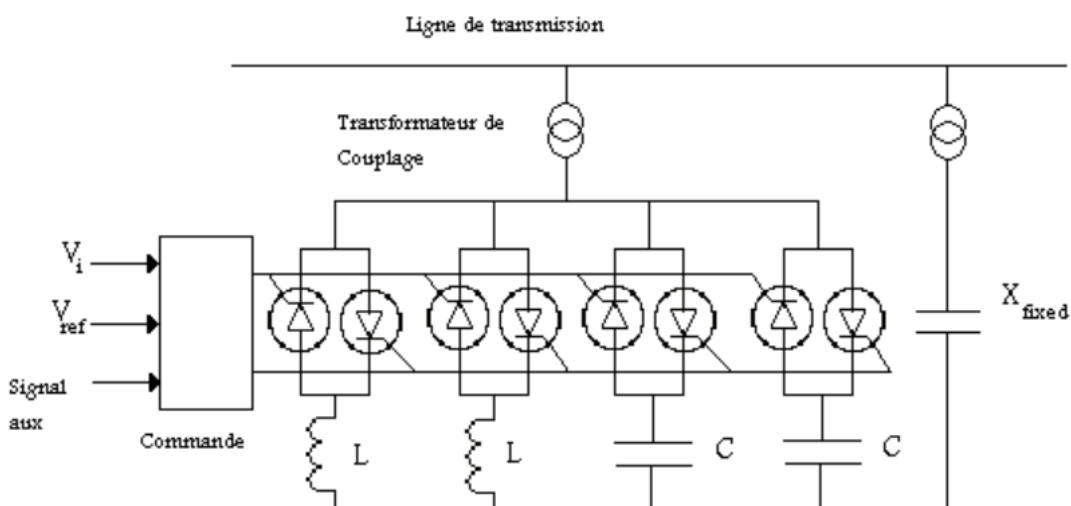


Figure III.4: Schéma type du SVC en connexion shunt.

III.4.2.2 Compensateur statique synchrone(STATCOM) :

STATCOM (STATic COMPensator): C'est en 1990 que le premier STATCOM a été conçu, c'est un convertisseur de tension à base de GTO ou de IGBT alimenté par des batteries de condensateur, l'ensemble est connecté parallèlement au réseau à travers un transformateur de couplage Fig1.3-a. Ce dispositif est l'analogie d'un compensateur synchrone; et comme c'est un dispositif électronique il n'a pas d'inertie mécanique présentant alors de meilleures caractéristiques tel que sa dynamique rapide et son faible coût d'installation et de sa maintenance devant les compensateurs synchrones.

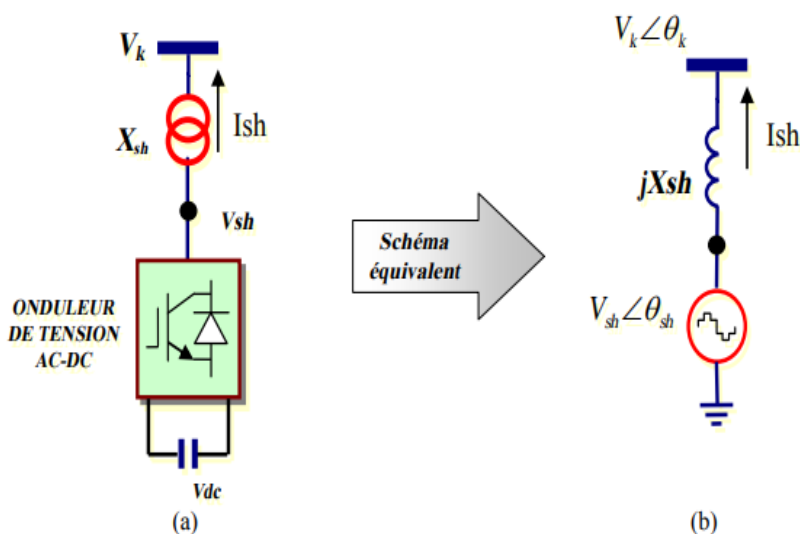


Figure III.5 (a):structure d'un STATCOM (b) schéma équivalent

Le STATCOM permet le même contrôle q'un SVC mais avec plus de robustesse, ce dispositif est capable de délivrer la puissance réactive même si la tension du jeu de connexion est très faible, d'après sa caractéristique en constate que le courant maximal du STATCOM est indépendant de la tension du nœud. [26].

Pour un STATCOM idéal, n'ayant pas des pertes actives, l'équation de la puissance réactive (1.14) suivante décrit le transfert de cette dernière avec le réseau électrique.

$$Q_{SH} = \frac{|V_K|^2}{X_{SH}} - \frac{|V_K||V_{SH}|}{X_{SH}} \cos(\theta_K - \theta_{SH}) = - \frac{|V_K|^2 - |V_K||V_{SH}|}{X_{SH}} \quad 1.14$$

- Si $|V_k| > |V_{SH}|$ alors Q_{SH} devient positive et le STATCOM absorbe de la puissance réactive.
- Si $|V_k| < |V_{SH}|$ alors Q_{SH} devient négative et le STATCOM fournit de la puissance réactive.

DISPOSITIFS FACTS

III.4.2.2.1 Principe de Fonctionnement

Le STATCOM est un générateur synchrone statique qui génère une tension alternative triphasé synchrone avec la tension du réseau à partir d'une source de tension continue. L'amplitude de la tension du STATCOM peut être contrôlée afin d'ajuster la quantité de l'énergie réactive à échanger avec le réseau.

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

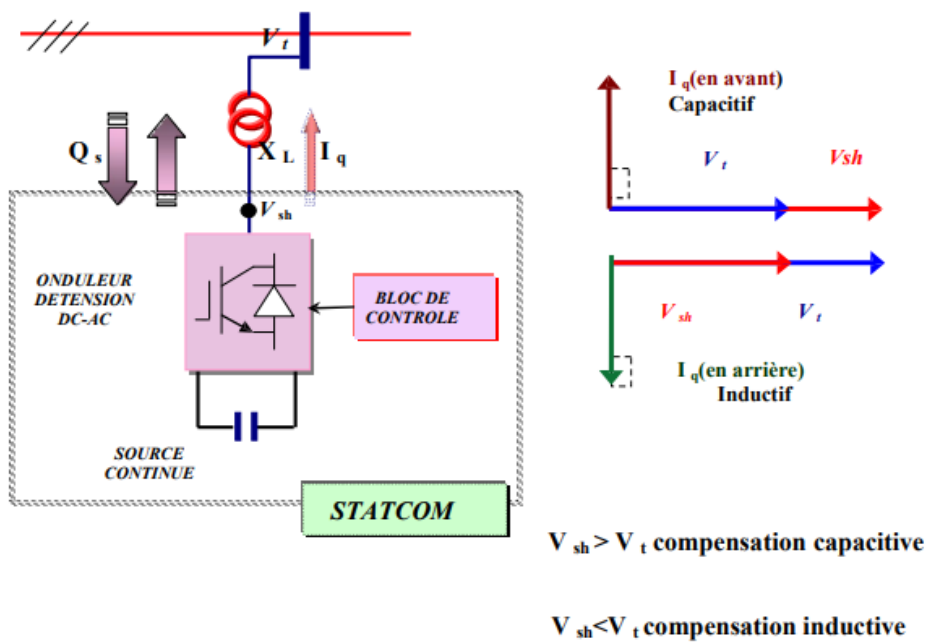


Figure III.6: Commande d'un STATCOM.

le schéma équivalent de ce dispositif avec le système énergétique (source, ligne et charge) est donné par la figure (III.7)

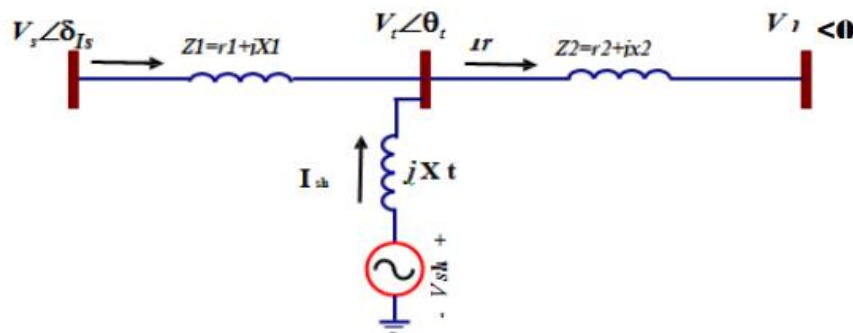


Figure III.7 : Schéma du STATCOM couplé au réseau électrique.

DISPOSITIFS FACTS

Le courant injecté par le STATCOM est donné par:

$$\bar{I}_{SH} = \frac{\bar{V}_{sh} - \bar{V}_t}{jX_t} \dots \text{III.1}$$

La puissance injectée au jeu de barre " t " est donnée par

$$\bar{S} = \bar{V}_t \cdot \bar{I}_{sh} = \frac{\bar{V}_t(\bar{V}_{sh}^* - \bar{V}_t^*)}{-jX_t} = \frac{\bar{V}_t \bar{V}_{sh}^* - \bar{V}_t^2}{-jX_t} \dots \text{III.2}$$

D'où on aboutit aux puissances active et réactive injectées par le STATCOM au nœud "t" exprimées par les formules qui suivent: [03]

$$P_{sh} = \frac{V_{sh} V_t}{X_t} \sin(\theta_t - \delta_{sh}) \dots \text{III.3}$$

$$Q_{sh} = \frac{V_{sh} V_t}{X_t} \cos(\theta_t - \delta_{sh}) - \frac{V_t^2}{X_t} \dots \text{III.4}$$

Avec l'hypothèse d'un STATCOM idéal (convertisseur sans pertes), la contrainte de fonctionnement que doit satisfaire le STATCOM est de ne pas échanger la puissance active avec le réseau. [03]

Donc :

$$P_{sh} = \frac{V_{sh} V_t}{X_t} \sin(\theta_t - \delta_{sh}) = 0$$

D'où a la condition :

$$\theta_t - \delta_t = 0 \Rightarrow \theta_t = \delta_{sh}$$

D'après cette condition la tension injectée par le STATCOM V_{sh} doit être en phase avec la tension du nœud de raccordement.

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 suivantes : [07]

En passant au repère (dq) et en admettant que la tension V_{sh} est sur l'axe d (comme référence des phases) :

$$V_{shd} = V_{sh} ; V_{shq} = 0$$

$$|I_{sh}| = I_{shq} = \frac{V_{sh} - V_t}{X_t} \dots \text{III.5}$$

$$Q_{sh} = V_{sh} * I_{shq} = \frac{V_{sh}^2}{X_t} \left(1 - \frac{V_t}{V_{sh}}\right) \dots III.6$$

A partir de l'équation (III.6) il paraît clair que si le module de la tension du D-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, le STATCOM fonctionne en mode capacitif et fournit une puissance réactive au réseau **Figure III.8.** [07]

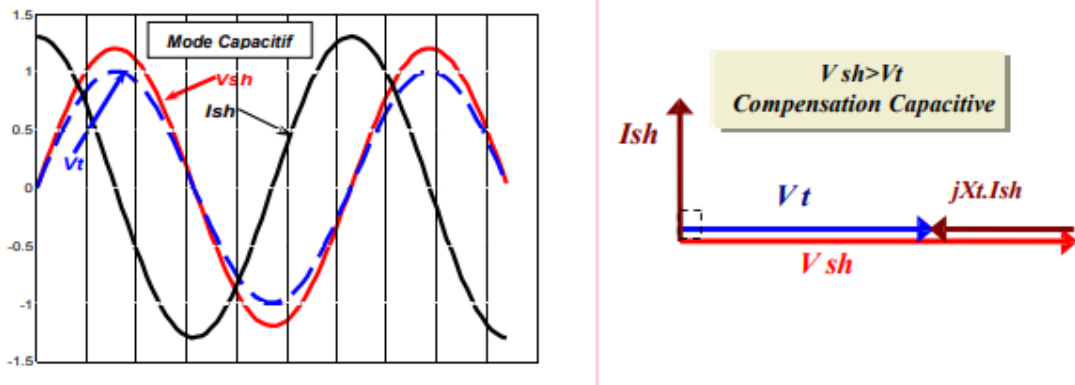


Figure III.8. Courbes simulées du courant et tensions en mode capacitif [31]

* $V_{sh} < V_t$ alors, le STATCOM dans ce cas absorbe la puissance réactive à partir du réseau et fonctionne en mode inductif **Figure III.9.**

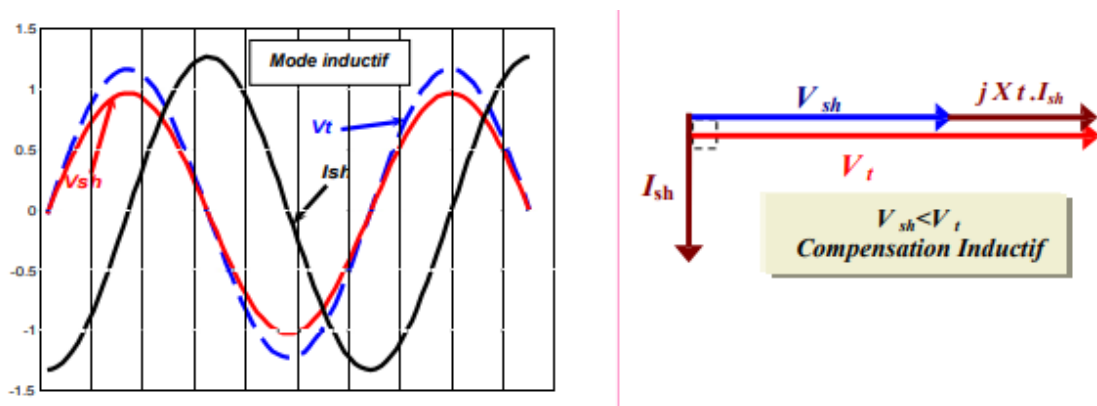


Figure III.9 : Courbes simulées du courant et tensions en mode inductif [31]

DISPOSITIFS FACTS

Cependant il y a toujours, dans la pratique, une petite quantité de la puissance active absorbée à partir du réseau pour couvrir les pertes des interrupteurs du convertisseur du STATCOM et les pertes au niveau du transformateur de couplage et pour maintenir la tension DC aux bornes du condensateur constante. [03]

Physiquement, le fonctionnement d'un STATCOM peut être expliqué de la façon suivante : la différence dans l'amplitude et dans la valeur efficace entre la tension produite par l'onduleur et la tension du réseau provoque la circulation du courant. La tension alternative produit par l'onduleur étant synchronisée avec celle du réseau (déphasage zéro en régime permanent) empêche l'échange net de l'énergie entre le réseau et l'onduleur en régime permanent, mais quand même, l'échange de la puissance instantanée prend la place. La tension et le courant de chaque phase de l'onduleur sont décalés de 90 degrés l'un par rapport à l'autre. Dans un système triphasé et équilibré la puissance instantanée est constante et elle dépend seulement de l'angle de déphasage entre la tension et le courant. Étant donné que cet angle est de 90 degrés, on peut dire que la puissance instantanée qui circule du réseau vers les condensateurs du côté CC de l'onduleur par une phase est égale à celle qui circule des condensateurs du côté CC vers le réseau par deux autres phases et vice versa. Donc, l'onduleur interconnecte les phases d'un système triphasé de façon à permettre l'échange de la puissance réactive entre elles. [03]

III. 4.2.2.2 Effet de STATCOM sur le réseau électrique:

Pour étudier les relations entre le réseau électrique et le STATCOM on va adopter pour cela le modèle mathématique de la **figure III.6** qui représente le schéma unifilaire d'un réseau électrique de distribution et d'un STATCOM installé dans un nœud. Les équations des courants \mathbf{I}_s , \mathbf{I}_{sh} et \mathbf{I}_r sont les suivants : [18]

$$\bar{\mathbf{I}}_s = \frac{(\bar{\mathbf{Z}}_2 + j\mathbf{X}_t)\bar{\mathbf{V}}_s - \bar{\mathbf{Z}}_2\bar{\mathbf{V}}_{sh} - j\mathbf{X}_t\bar{\mathbf{V}}_r}{\bar{\mathbf{Z}}_1\bar{\mathbf{Z}}_2 + j\mathbf{X}_t(\bar{\mathbf{Z}}_1 + \bar{\mathbf{Z}}_2)} \dots \text{III.7}$$

$$\bar{\mathbf{I}}_{sh} = \frac{(\bar{\mathbf{Z}}_1 + \bar{\mathbf{Z}}_2)\bar{\mathbf{V}}_{sh} - \bar{\mathbf{Z}}_2\bar{\mathbf{V}}_s - \bar{\mathbf{Z}}_1\bar{\mathbf{V}}_r}{\bar{\mathbf{Z}}_1\bar{\mathbf{Z}}_2 + j\mathbf{X}_t(\bar{\mathbf{Z}}_1 + \bar{\mathbf{Z}}_2)} \dots \text{III.8}$$

$$\bar{\mathbf{I}}_r = \frac{-(\bar{\mathbf{Z}}_1 + j\mathbf{X}_t)\bar{\mathbf{V}}_r + \bar{\mathbf{Z}}_1\bar{\mathbf{V}}_{sh} + j\mathbf{X}_t\bar{\mathbf{V}}_s}{\bar{\mathbf{Z}}_1\bar{\mathbf{Z}}_2 + j\mathbf{X}_t(\bar{\mathbf{Z}}_1 + \bar{\mathbf{Z}}_2)} \dots \text{III.9}$$

Les puissances injectées par la source \mathbf{V}_s peuvent être calculée à partir des équations : [18]

$$\mathbf{P}_s = \mathbf{R}_e(\bar{\mathbf{V}}_s \cdot \bar{\mathbf{I}}_s^*) = \mathbf{R}_e \left[\bar{\mathbf{V}}_s * \left(\frac{(\bar{\mathbf{Z}}_2 + j\mathbf{X}_t)\bar{\mathbf{V}}_s - \bar{\mathbf{Z}}_2\bar{\mathbf{V}}_{sh} - j\mathbf{X}_t\bar{\mathbf{V}}_r}{\bar{\mathbf{Z}}_1\bar{\mathbf{Z}}_2 + j\mathbf{X}_t(\bar{\mathbf{Z}}_1 + \bar{\mathbf{Z}}_2)} \right)^* \right] \dots \text{III.10}$$

$$Q_s = I_m(\overline{V_s} \cdot \overline{I_s}^*) = I_m \left[\overline{V_s} * \left(\frac{(\overline{Z}_2 + jX_t)\overline{V_s} - \overline{Z}_2\overline{V}_{sh} - jX_t\overline{V}_r}{\overline{Z}_1\overline{Z}_2 + jX_t(\overline{Z}_1 + \overline{Z}_2)} \right)^* \right] \dots \text{III.11}$$

Les puissances délivrées par le STATCOM données par les équations **III.12** et **III.13** sont représentées sur la **figure III.10**

$$P_{sh} = R_e(\overline{V}_{sh} \cdot \overline{I}_{sh}^*) = R_e \left[\overline{V}_{sh} * \left(\frac{(\overline{Z}_1 + \overline{Z}_2)\overline{V}_{sh} - \overline{Z}_2\overline{V}_s - \overline{Z}_1\overline{V}_r}{\overline{Z}_1\overline{Z}_2 + jX_t(\overline{Z}_1 + \overline{Z}_2)} \right)^* \right] \dots \text{III.12}$$

$$Q_{sh} = I_m(\overline{V}_{sh} \cdot \overline{I}_{sh}^*) = I_m \left[\overline{V}_{sh} * \left(\frac{(\overline{Z}_1 + \overline{Z}_2)\overline{V}_{sh} - \overline{Z}_2\overline{V}_s - \overline{Z}_1\overline{V}_r}{\overline{Z}_1\overline{Z}_2 + jX_t(\overline{Z}_1 + \overline{Z}_2)} \right)^* \right] \dots \text{III.13}$$

III.4.2.2.3 Avantages du STATCOM :

- Bonne réponse à faible tension : Il est capable de fournir son courant nominal, même lorsque la tension est presque nulle.
- Bonne réponse dynamique : Le système répond instantanément, l'étendue de la plage de l'opération est plus large qu'avec un SVC classique.

Pour un contrôle optimal de la tension, les phases sont contrôlées séparément pendant les perturbations du système. Un design modulaire du convertisseur permet une adaptation pour une grande plage de puissances nominales. [28]

III.4.3 Compensateurs série-parallèle :

Les dispositifs FACTS présentés aux sections I.4.1, I.5.1 permettent d'agir uniquement sur un des trois paramètres déterminant la puissance transmise dans une ligne (tension, impédance et angle). Par une combinaison des deux types de dispositifs (shunt et série), il est possible d'obtenir des dispositifs hybrides capables de contrôler simultanément les différentes variables précitées. [29]

III.4.3.1 Contrôleur de transit de puissance unifié UPFC :

Le contrôleur de transit de puissance unifié UPFC (*Unified Power Flow Controller*) est composé de deux convertisseurs (redresseur et onduleur) connectés par une liaison continu, l'un étant raccordé en parallèle et l'autre en sérié. Il s'agit en fait de la combinaison d'un STATCOM et d'un SSSC. Son schéma est représenté à la **Figure III.10**

DISPOSITIFS FACTS

Le principe de l'UPFC consiste à dériver un courant et le réinjecter avec un déphasage bien approprié par l'intermédiaire du convertisseur série onduleur générant une tension contrôlée en phase et en amplitude et donc un impose le sens la valeur et la direction des flux de puissance transportés sur la ligne, donc L'UPFC est un contrôleur dextrement flexible et offre une capacité de contrôleur incomparable [1]. Le convertisseur 2 génère une tension U_{pq} contrôlée en amplitude et en phase, qui est insérée dans la ligne. [29]

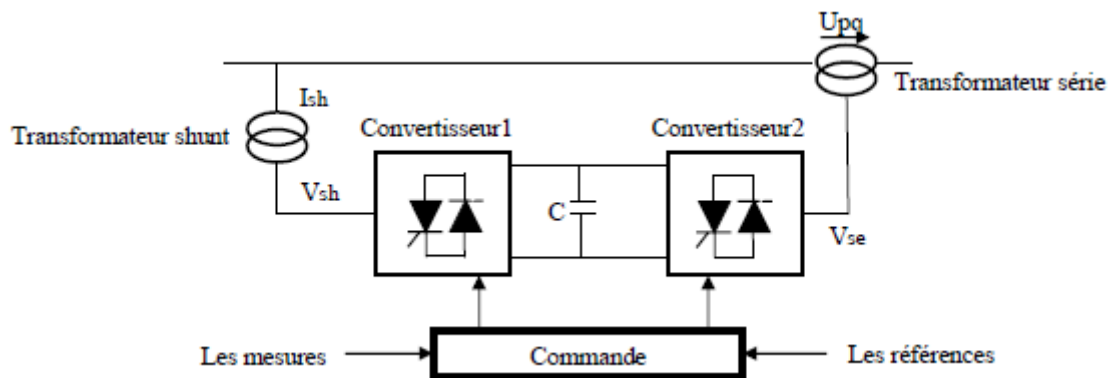


Figure III.10 Schéma de base d'un UPFC .

L'UPFC est capable de remplir toutes les fonctions des autres dispositifs FACTS. Il

peut être utilisé particulièrement pour:

- Réglage de la tension ;
- Contrôle de flux de puissance active et réactive;
- Amélioration de la stabilité;
- Limitation des courants de court-circuit ;

III.4.3.2. Transformateur déphaseur commandé par thyristor (TCPST) :

IEEE définit le TCPST (Thyristor Controlled Phase Shifting Transformer) comme étant un transformateur déphaseur ajusté par thyristor afin de fournir un angle de phase rapidement variable. Transformateur déphaseur commandé par thyristor TCPST, est le premier équipement FACTS combiné. [27]

DISPOSITIFS FACTS

III.4.3.3. Régulateur d'angle déphase commandé par thyristor (TCPAR) :

IEEE définit le TCPAR (Thyristor Controlled Phase Angle Regulator), comme étant un Transformateur déphaseur qui permet le contrôle du déphasage entre ses tensions terminales tout en gardant leurs amplitudes invariables [15]. Le régulateur d'angle de phase commandé par thyristor TCPAR, contrairement au TCPST, est capable de fournir (ou d'absorber) l'énergie réactive au réseau. [27]

III.5 Propriétés des dispositifs FACTS :

L'utilisation de la nouvelle technologie FACTS est un moyen susceptible d'apporter des solutions qui semble meilleurs, les systèmes FACTS permettent aux circuits de transmission d'être utilisés à leur capacité thermique maximale et aussi offre au système de puissance une plus grande flexibilité. [29]

III.5.1. Avantages des dispositifs FACTS :

Les avantages apportés aux réseaux électriques sont :

- Grande fiabilité grâce à l'utilisation de contrôleur d'électronique de puissance caractérisée par une grande rapidité de réaction.
- Une grande flexibilité dans le contrôle de la puissance de telle sorte qu'elle s'écoule le long de l'itinéraire de transmission prescrit.
- Amélioration de la stabilité transitoire. [29]

III.5.2. Inconvénients des dispositifs FACTS :

Les dispositifs FACTS sont considérés comme des solutions pour aider les systèmes électriques, mais ils présentent des inconvénients, en plus qu'ils ne sont pas une solution universelle, ils existent plusieurs contraintes pour que ces dispositifs soient efficaces et rentables: [29]

- Le choix du FACTS.
- Le choix du modèle du FACTS.
- Le choix de la localisation du FACTS.
- Protection pour les FACTS et pour le réseau.





















III.6. Application des dispositifs FACTS dans les réseaux électriques :

Les différents dispositifs Facts présentés dans ce chapitre possèdent tous leurs propres caractéristiques tant en régime permanent qu'en régime transitoire. Chaque type de dispositif

DISPOSITIFS FACTS

sera donc utilisé pour répondre à des objectifs bien définis. Des considérations économiques entreront également dans le choix du type d'installation à utiliser. Le **Tableau III.1.** résume les principaux bénéfices techniques des différentes technologies de Facts. [11]

Tableau III.1. Domaines d'applications des dispositifs FACTS

	Contrôle de Charge	Contrôle de Tension	Stabilité Transitoire	Amplitude des Oscillations
SVC STATCOM				
TCSC				
SSSC				
TCPAR				
UPFC				

Influence:

Petite  

Moyenne  

Forte  

III.7.Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté un aperçu global sur les dispositifs FACTS (définition, le rôle, classification, catégories, structure et principe de fonctionnement de chaque dispositif). Une étude détaillée sur les dispositifs shunt comme le STATCOM a été présentée dans ce chapitre pour les appliquer dans des modèles de réseau électrique dans le chapitre suivant et cela en vue d'étudier leurs effets sur la stabilité de tension.

Chapitre 4 : Simulation et résultat

IV.1.Introduction

Dans ce chapitre, nous allons procéder à l'implantation des dispositifs FACTS dans le réseau électrique et voir leurs influences sur l'amélioration du profil de tension en utilisant le logiciel PSAT (Power System Analysis Toolbox)

- Le premier parti et faire une simulation sur le réseau IEEE 14 nœuds a l'état normal après on ajoute un défaut (court-circuit triphasé) au nœud 14 puis on intègre des dispositifs STATCOM
- Le deuxième partie et l'analyse de la stabilité de la tension de réseaux IEEE 14 nœuds en utilisant la méthode CPF (l'écoulement de puissance continue)

IV.2.Analyse des réseaux électriques par le logiciel (PSAT) :

PSAT (Power System Analysis Toolbox) est un outil de simulation basé sur MATLAB utilisé pour la simulation et l'analyse des réseaux électriques (Voir figure (II.3.a)). Le projet a d'abord été lancé par Federico Milano en septembre 2001, PSAT est l'un des logiciels les plus préférables parmi divers logiciels car il donne une réponse directe aux problèmes de flux de puissance et la stabilité de tension.

PSAT permet à l'utilisateur de calculer :

- Ecoulement de puissance (Power Flow) par la méthode de Newton Raphson.
- Accroissement continue de la charge (Continuation power flow)
- Optimisation de l'écoulement de puissance (Optimal power flow)
- Analyse de la stabilité des réseaux électriques.
- Intégration des systèmes FACTS dans les réseaux de transport.

Toutes les opérations de PSAT peuvent être réparties en deux genres d'analyse:

- La première analyse est de résoudre les problèmes de l'écoulement de puissance. Cette application s'effectue dans une page de commande ou un éditeur comme montre la figure IV.1
- La seconde analyse est d'implanter le réseau à étudier en utilisant une bibliothèque de Simulink qui contient de nombreux modèles pour l'implantation des systèmes électriques, comme montré dans la figure IV.2

SIMULATION ET RESULTAT

IV.3. Etude du réseau test IEEE-14 JB :

Le réseau test IEEE-14 JB contient deux générateurs, seize lignes de transmission, onze charges, trois compensateurs synchrones et un condensateur statique.

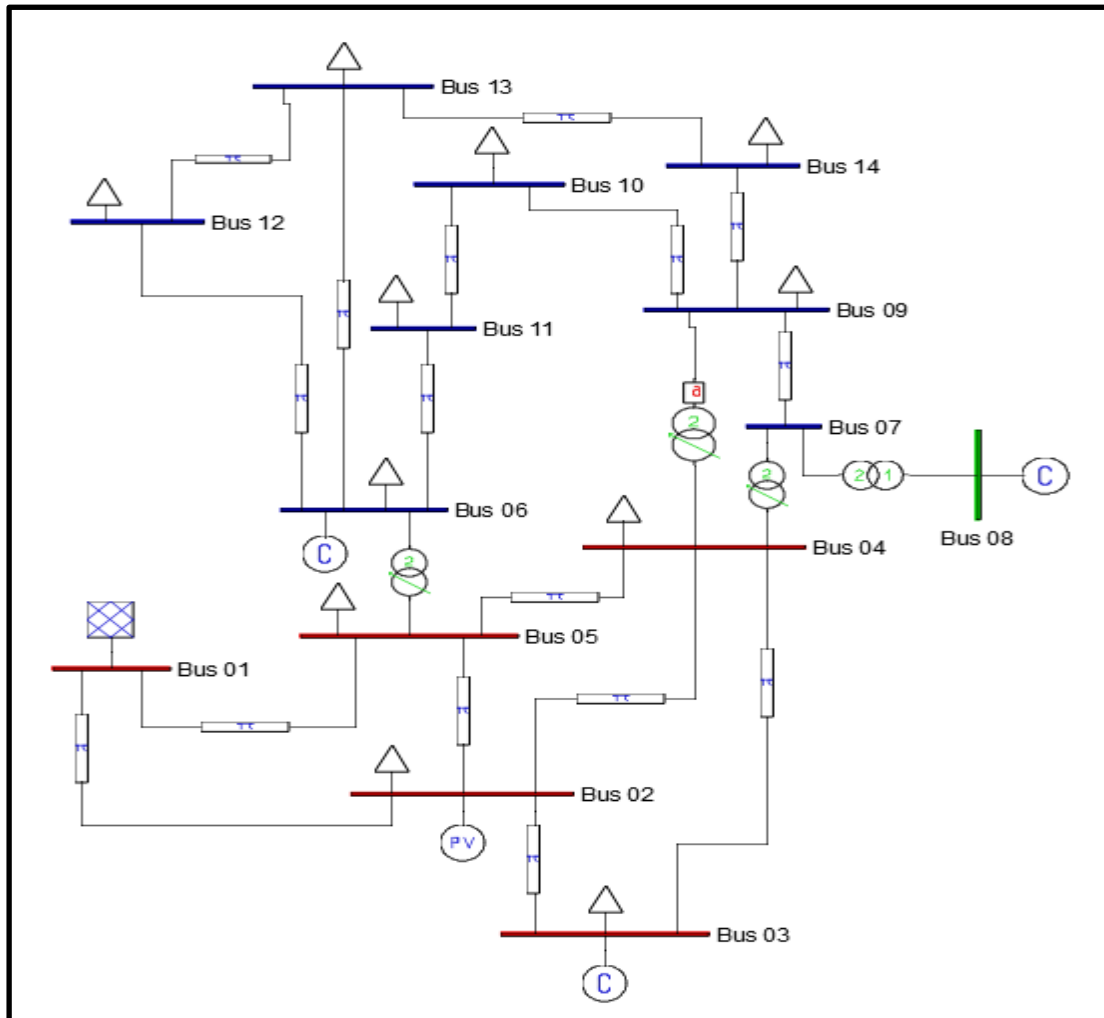


Figure IV.3 : Représentation du réseau IEEE 14 JB à l'état initial

Tableau IV.1: Caractéristiques du réseau 14 JB

Nombre de jeux de barres	Nombre de charges	Nombre de ligne	Nombre de générateurs	Nombre de Transformateur
14	11	16	5	4

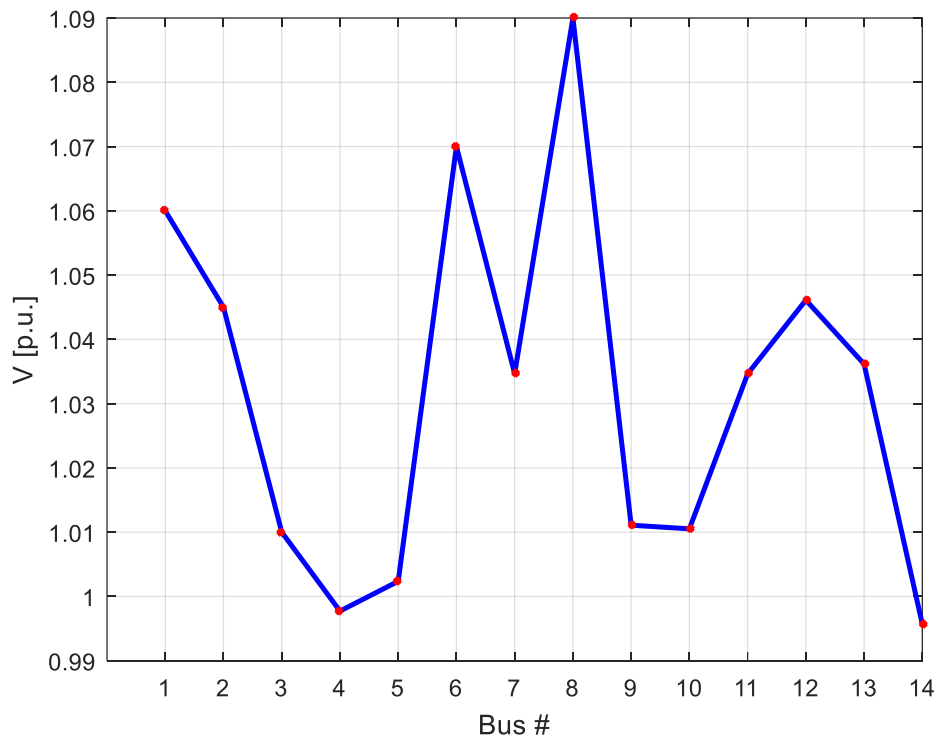
On analyse ce réseau à l'état initial et on obtient les résultats suivants de « static report

» :

SIMULATION ET RESULTAT

Tableau IV.2: Résultats de l'écoulement de puissance : Régime normal

Bus	V [p.u.]	Phase [rad]	P gen [p.u.]	Q gen [p.u.]	P load [p.u.]	Q load [p.u.]
Bus 01	1.06	0	3.520	-0.278	0	0
Bus 02	1.045	-0.1355	0.4	0.95	0.3038	0.1778
Bus 03	1.01	-0.3315	0	0.597	1.3188	0.266
Bus 04	0.9977	-0.263	0	0	0.6692	0.056
Bus 05	1.002	-0.227	0	0	0.1064	0.0224
Bus 06	1.07	-0.379	0	0.442	0.1568	0.105
Bus 07	1.034	-0.353	0	0	0	0
Bus 08	1.09	-0.353	0	0.342	0	0
Bus 09	1.011	-0.401	0	0	0.413	0.2324
Bus 10	1.01	-0.404	0	0	0.126	0.0812
Bus 11	1.034	-0.395	0	0	0.049	0.0252
Bus 12	1.046	-0.401	0	0	0.0854	0.0224
Bus 13	1.036	-0.403	0	0	0.189	0.0812
Bus 14	0.995	-0.428	0	0	0.2086	0.07



La

Figure IV.4: Profile de tension: Réseau test : IEEE 14-Bus

Figure IV.4 représente les tensions du réseau dans son fonctionnement normal dans chaque nœud. D'après les résultats obtenus, nous constatons que toutes les tensions des nœuds du réseau sont dans des plages acceptables (0.99-1.09) p.u

SIMULATION ET RESULTAT

IV.4.Cas d'un court-circuit triphasé :

Comme deuxième application, on ajoute un défaut (court-circuit triphasé) au nœud 14, l'outil "time domaine" de PSAT permet de relever l'évolution temporelle pendant et après le défaut. Les résultats du calcul de l'écoulement de puissance sont montrés sur les Tableau IV.3 et. La Figure IV.5 illustre la variation de tension dans chaque nœud après création du défaut au JB 14

Tableau IV.3: Niveaux de tensions, Puissances générées et consommées

Bus	V [p.u.]	Phase [rad]	P gen [p.u.]	Q gen [p.u.]	P load [p.u.]	Q load [p.u.]
Bus 01	1.06	0	3.52	-0.278	0	0
Bus 02	1.045	-0.181	0.4	0.951	0.3038	0.1778
Bus 03	1.01	-0.411	0	0.597	1.3188	0.266
Bus 04	0.934	-0.345	0	0	0.6692	0.056
Bus 05	0.9475	-0.316	0	0	0.1064	0.0224
Bus 06	1.07	-0.664	0	0.442	0.1568	0.105
Bus 07	0.89	-0.498	0	0	0	0
Bus 08	1.09	-0.498	0	0.342	0	0
Bus 09	0.742	-0.601	0	0	0.413	0.2324
Bus 10	0.79	-0.619	0	0	0.126	0.0812
Bus 11	0.922	-0.644	0	0	0.049	0.0252
Bus 12	0.942	-0.694	0	0	0.0854	0.0224
Bus 13	0.8262	-0.658	0	0	0.189	0.0812
Bus 14	0.077	-0.227	0	0	0.2086	0.07

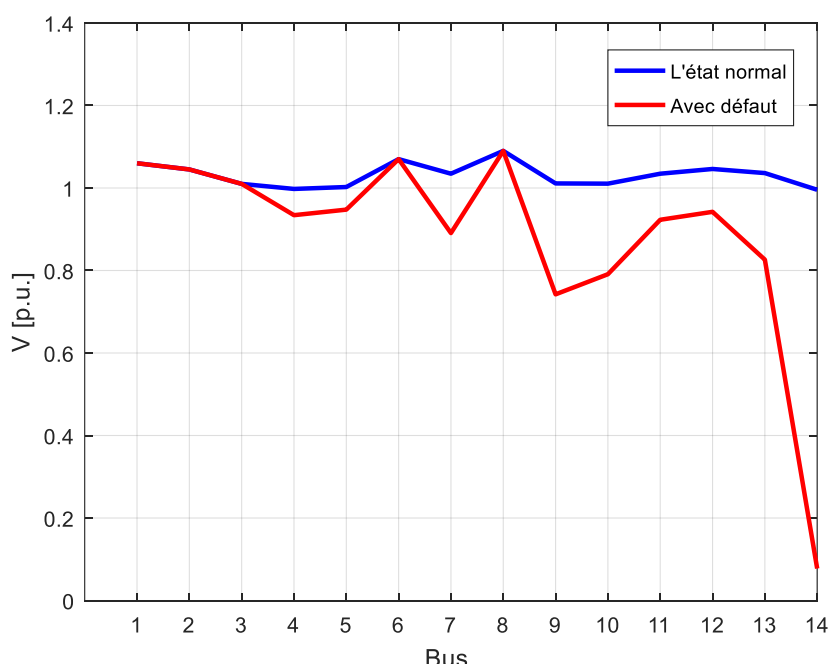


Figure IV.5: Profile de tension avec le défaut au JB 14

SIMULATION ET RESULTAT

A partir des résultats présentés dans le **Tableau IV.3** et **Figure IV.5** On peut détecter des jeux de barres les plus sensibles.

Les JB 9, 10, et 13, sont les jeux de barres les plus sensibles car il présente la tension la plus basse par rapport à celles de l'état normal

IV.5.Effet de STATCOM sur le réseau en défaut :

Pour un bon fonctionnement d'un réseau électrique, on doit maintenir les tensions des différents jeux de barres dans les limites autorisées, on intègre les facts statcom dans notre réseau au niveau des JB 5 et ,9 13 le plus sensible

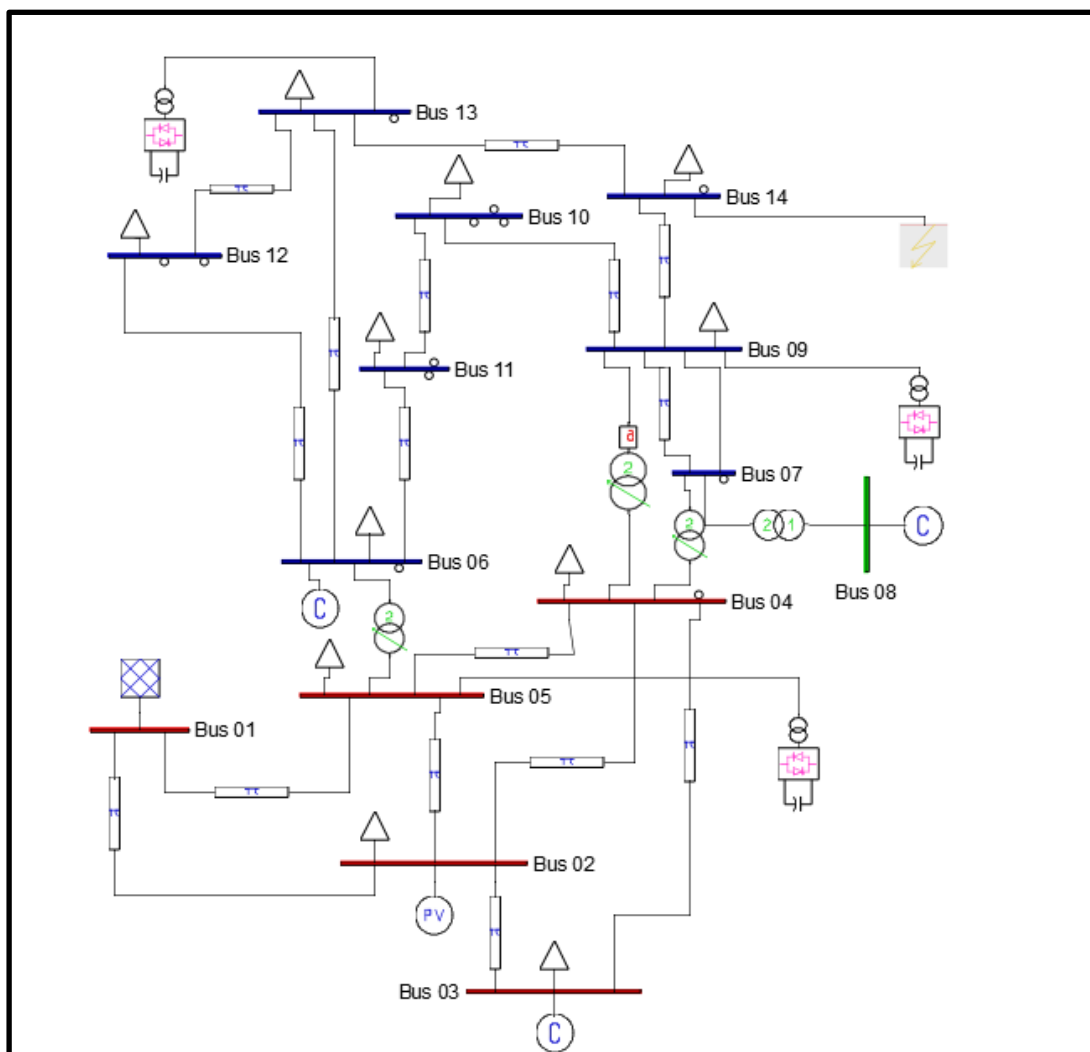


Figure IV.6 Réseau en défaut étudié avec installation des STATCOM

SIMULATION ET RESULTAT

Tableau IV.4: Niveaux de tensions, Puissances générées et consommées après installation du STATCOM

Bus (N)	V [p.u.]	Phase [rad]	P gen [p.u.]	Q gen [p.u.]	P load [p.u.]	Q load [p.u.]
Bus 01	1.06	0	3.520	-0.278	0	0
Bus 02	1.045	-0.2280	0.4	0.9513	0.303	0.177
Bus 03	1.01	-0.4816	0	0.5979	1.318	0.266
Bus 04	0.985	-0.4617	0	0	0.669	0.056
Bus 05	1.011	-0.4193	0	0	0.106	0.022
Bus 06	1.07	-0.7901	0	0.4426	0.156	0.105
Bus 07	1.022	-0.6970	0	0	0	0
Bus 08	1.09	-0.6970	0	0.3424	0	0
Bus 09	1.010	-0.8197	0	0	0.413	0.232
Bus 10	1.009	-0.8214	0	0	0.126	0.081
Bus 11	1.034	-0.8085	0	0	0.049	0.025
Bus 12	1.052	-0.8647	0	0	0.085	0.022
Bus 13	1.030	-0.9231	0	0	0.189	0.081
Bus 14	0.101	-0.4648	0	0	0.208	0.07

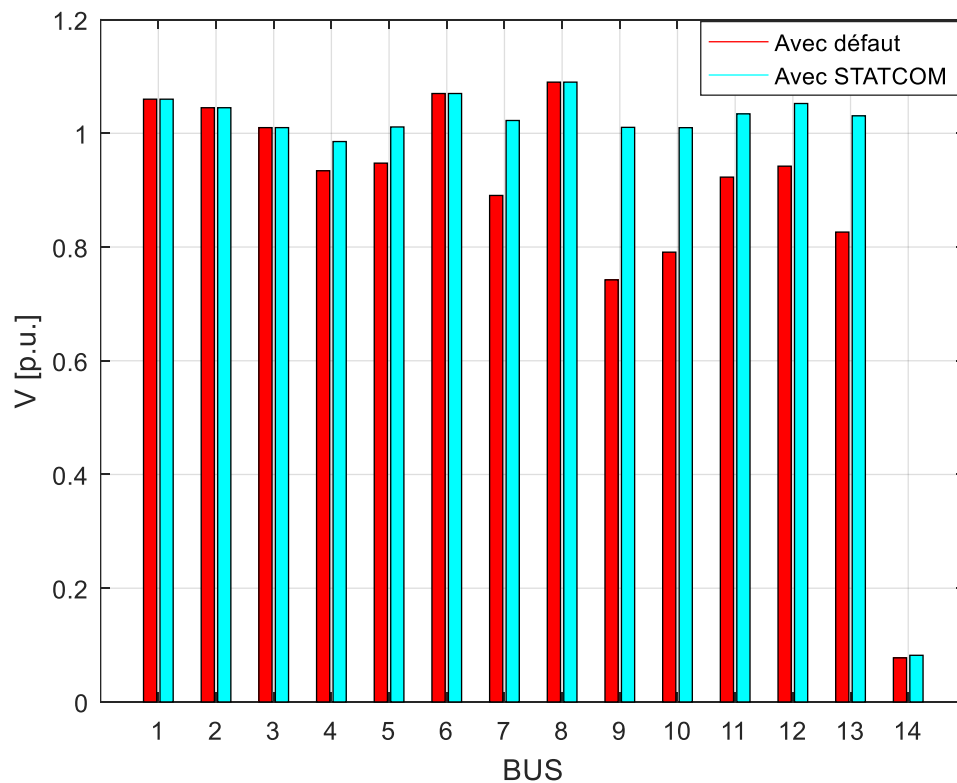


Figure IV.7: profil de tension après installation des STATCOM

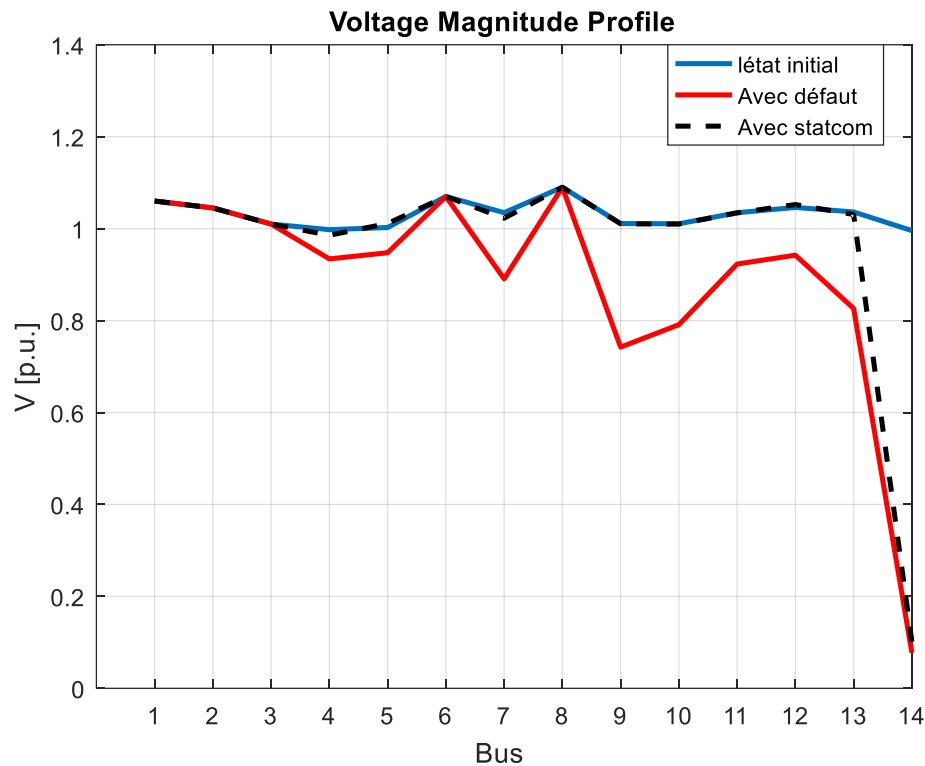


Figure IV.8: Tensions dans chaque jeu de barre après installation du STATCOM.

IV.6. Interprétations:

D'après les résultats obtenus on remarque que lorsque le défaut apparaît dans le réseau le STATCOM compense la tension quel que soit la valeur de la chute de tension, et il permet de garder la tension autour de la valeur admissible (entre 0.9 et 1.1 pu)

Donc on peut conclure que le STATCOM est un moyen efficace pour améliorer la tension dans les réseaux.

SIMULATION ET RESULTAT

IV.7. Analyse de réseau avec la méthode de CPF :

Dans cette partie en utilisant l'écoulement de puissance continu (CPF) on fait évaluer les profils de tension des jeux de barres de réseau 14 JB en fonction de la variation de la charge.

CPF (Continuation Power Flow) : Augmentation du facteur de charge progressivement jusqu'à atteindre le facteur de charge maximal. Où le réseau ne peut plus supporter cette charge, Il vous permet de :

- Connaître la capacité maximale que le réseau peut supporter en cas de surcharge
- Conclure le JB le plus sensible pour l'emplacement des éléments de compensation tels que les condensateurs de compensation et les dispositifs FACTS

(λ_{max}). C'est le facteur que peut supporter un réseau sans perdre sa stabilité.

On a effectué l'étude d'abord sans intégration des dispositifs STATCOM et on a prélevé les jeux de barres ayant le profil de tension le plus bas, puis on a inséré le dispositif STATCOM dans le jeu de barre le plus faible en tension et on a réévalué les profils de tensions des jeux de barres

Tableau IV.5 : Les résultats de l'écoulement de puissance continu (CPF)

Bus (N°)	V [p.u.]	Phase [rad]	P gen [p.u.]	Q gen [p.u.]	P load [p.u.]	Q load [p.u.]
Bus 01	1.06	0	3.52	-0.278	0	0
Bus 02	1.045	-0.1814	0.4	0.951	0.3038	0.1778
Bus 03	1.01	-0.4113	0	0.597	1.3188	0.266
Bus 04	0.934	-0.3451	0	0	0.6692	0.056
Bus 05	0.947	-0.3160	0	0	0.1064	0.0224
Bus 06	1.07	-0.6640	0	0.442	0.1568	0.105
Bus 07	0.890	-0.4981	0	0	0	0
Bus 08	1.09	-0.4981	0	0.3424	0	0
Bus 09	0.742	-0.6014	0	0	0.413	0.2324
Bus 10	0.790	-0.6199	0	0	0.126	0.0812
Bus 11	0.922	-0.6449	0	0	0.049	0.0252
Bus 12	0.942	-0.6941	0	0	0.0854	0.0224
Bus 13	0.826	-0.6584	0	0	0.189	0.0812
Bus 14	0.077	-0.2270	0	0	0.2086	0.07

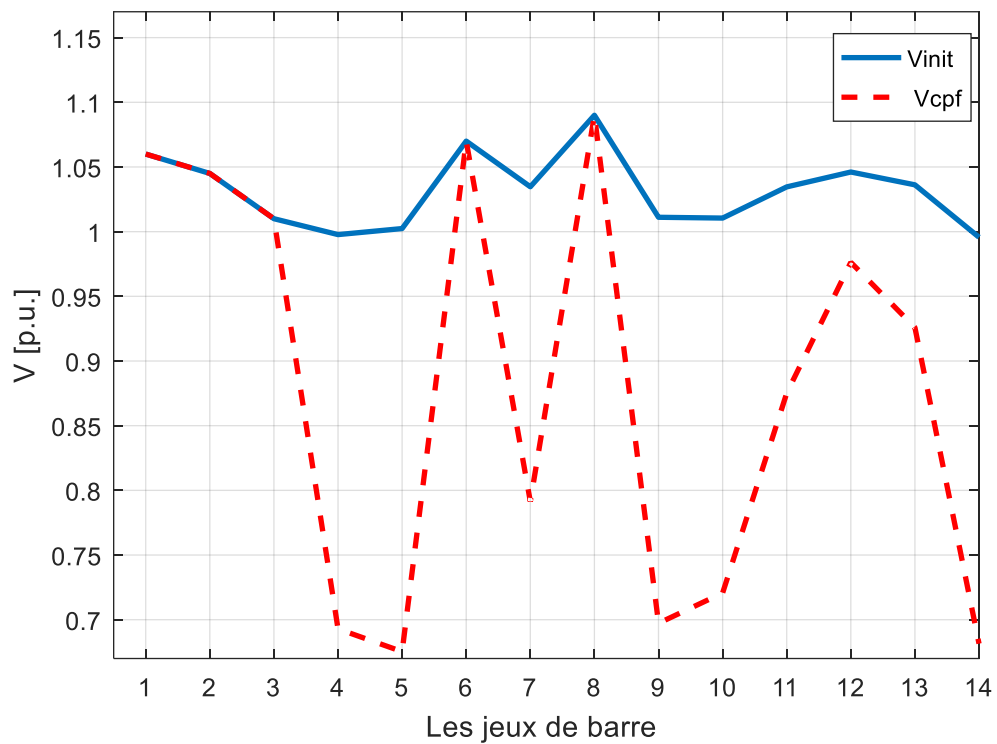


Figure IV.9: La comparaison entre V init et V cpf

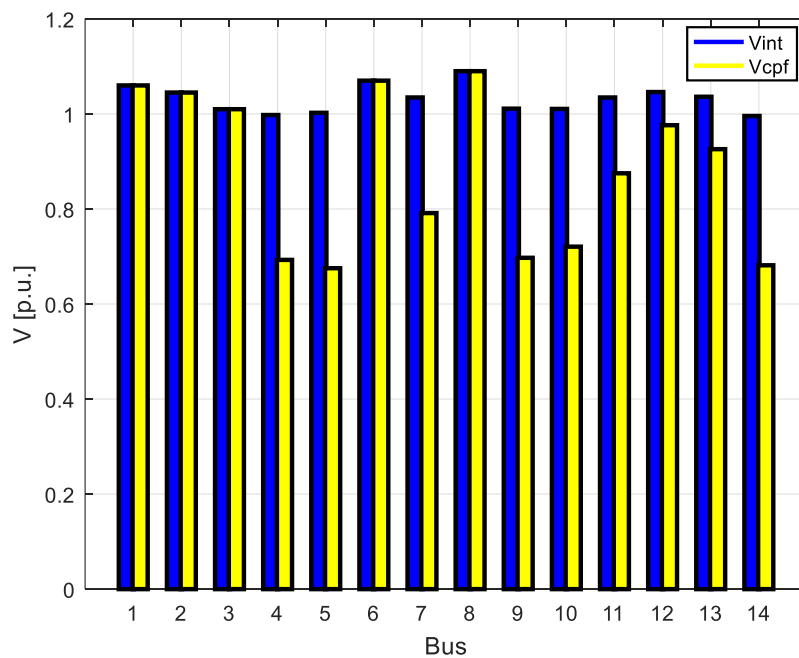


Figure IV.10: variation du module de tension

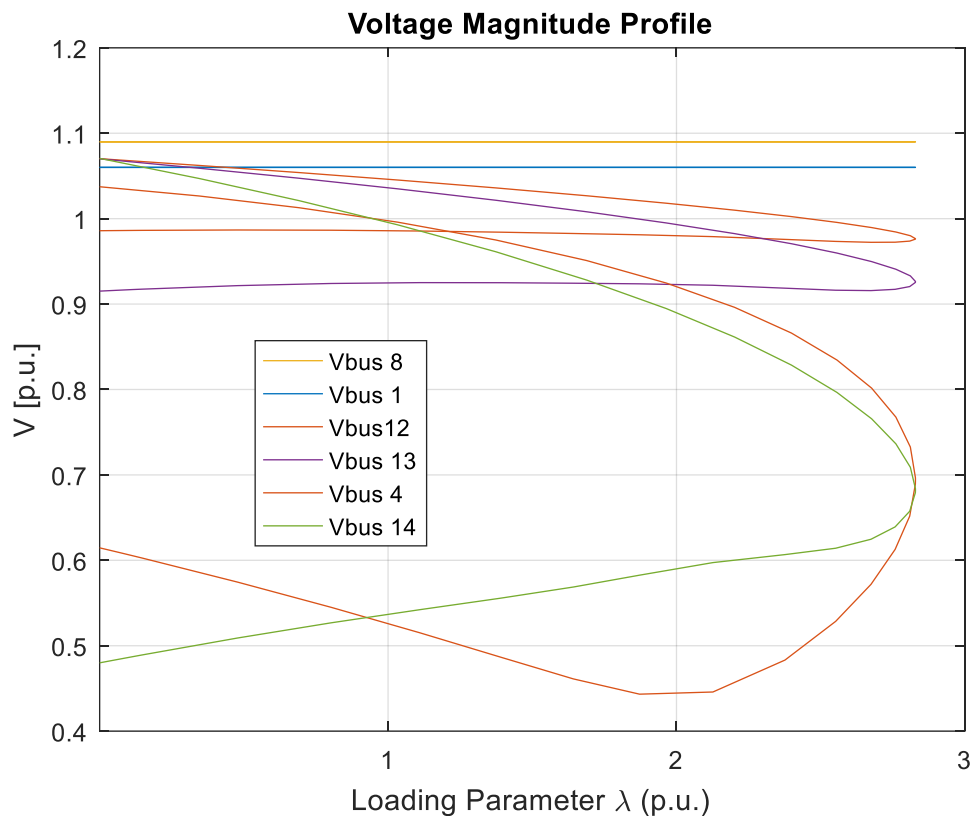


Figure IV.11: Le module de tension au niveau les JB en fonction de λ

D'après les résultats, On constate que dans l'état étudié du CPF, la chute de tension est plus importante que dans l'état initial ,parce que la méthode de CPF fonctionne de augmente progressivement les valeurs de charges au niveau de chaque JB

Les tensions dans les bus 3,6 et 8 sont restées les mêmes grâce aux compensateurs qui y sont raccordés.

les pertes actives totale 5.90 (p.u) et les pertes réactives 23 (p.u)

IV.8.Analyse du réseau IEEE14 JB avec STATCOM :

À partir de ces résultats, on peut constater e les jeux de barres les plus sensibles (Appelés aussi nœuds critiques du réseau) Pour l'emplacement optimal d'un STATCOM.

D'après la **Figure IV.11** le jeu de barre qui tend vers le pointe l'effondrement de la tension avant les autres jeux de barre c'est le JB 14 et en même temps c'est le JB qui a la plus faible grandeur du module de tension

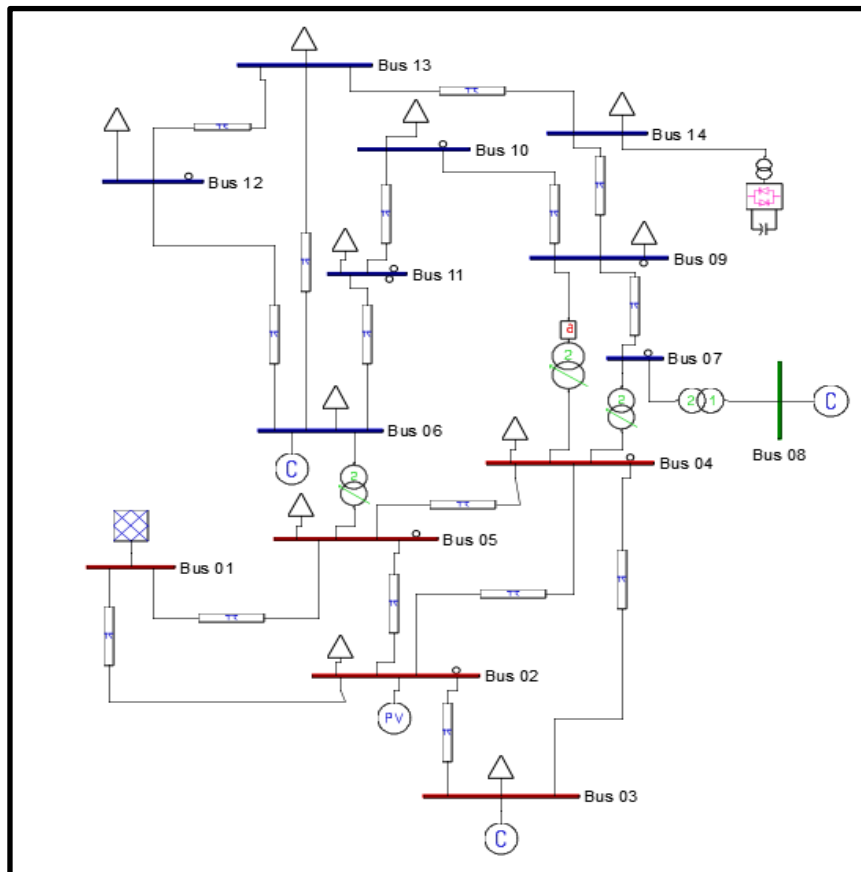


Figure IV.12 : Réseau IEEE 14 JB en présence d'un STATCOM au JB14

On a effectué l'écoulement de puissance continu dans le réseau, les résultats obtenus sont illustrés dans le tableau IV-6.

Tableau IV.6 : résultats de l'écoulement de puissance avec STATCOM

Bus	V [p.u.]	phase [rad]	P gen [p.u.]	Q gen [p.u.]	P load [p.u.]	Q load [p.u.]
Bus 01	1.06	0	14.506	2.476	0	0
Bus 02	1.045	-0.623	1.149	10.54	0.873	0.511
Bus 03	1.01	-1.45	0	4.955	3.79	0.764
Bus 04	0.745	-1.18	0	0	1.923	0.16
Bus 05	0.731	-1.012	0	0	0.305	0.0643
Bus 06	1.07	-1.696	0	3.125	0.45	0.301
Bus 07	0.86	-1.55	0	0	0	0
Bus 08	1.09	-1.558	0	1.37	0	0
Bus 09	0.82	-1.735	0	0	1.187	0.668
Bus 10	0.83	-1.755	0	0	0.3622	0.233
Bus 11	0.931	-1.732	0	0	0.1408	0.072
Bus 12	1.01	-1.769	0	0	0.245	0.064
Bus 13	0.99	-1.788	0	0	0.54	0.233
Bus 14	0.971	-1.937	0	0	0.599	-0.865

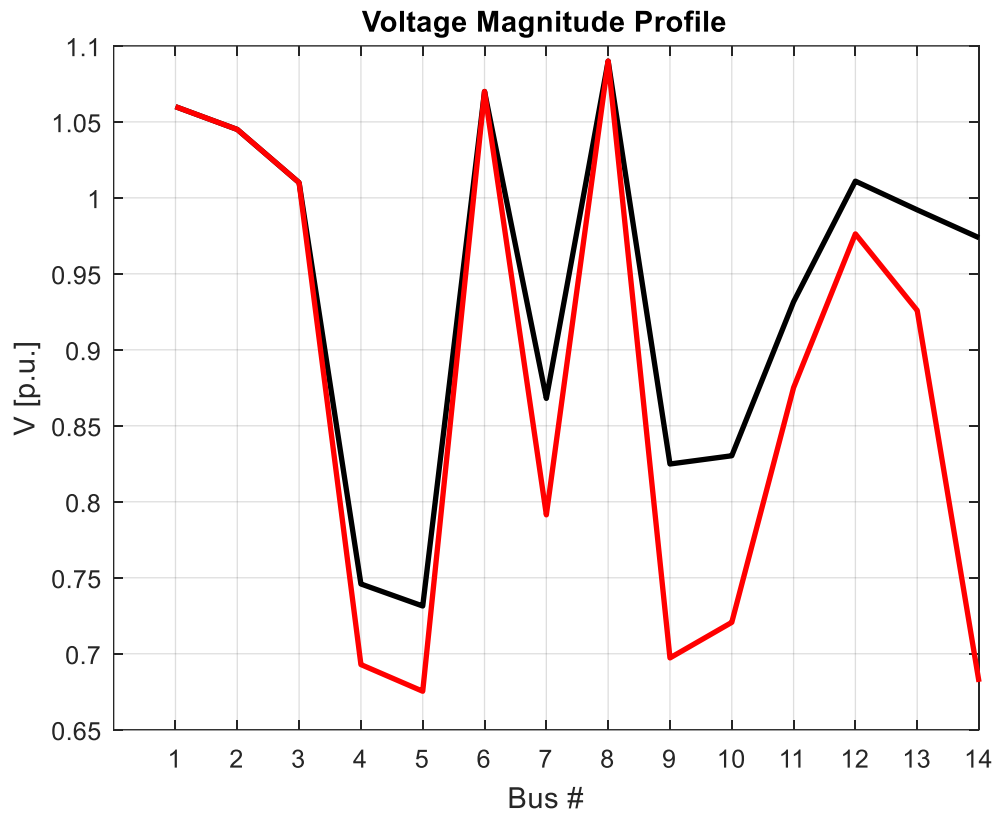


Figure IV.13: Profile de module de tension avec et sans STATCOM

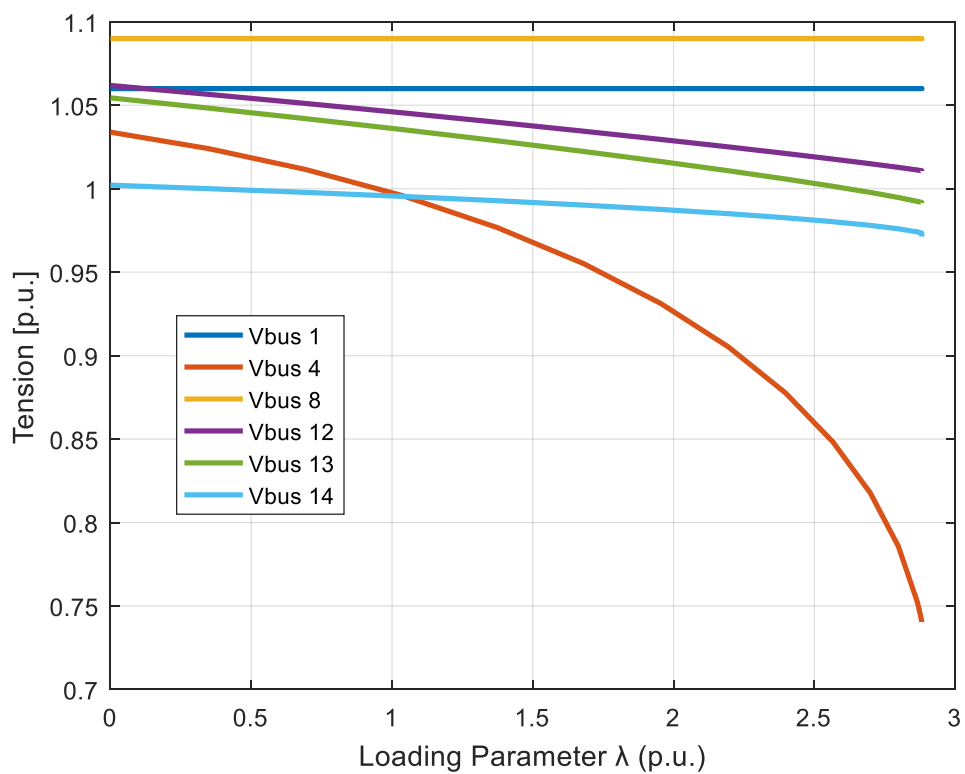


Figure IV.14: Le module de tension au niveau les JB en fonction de λ

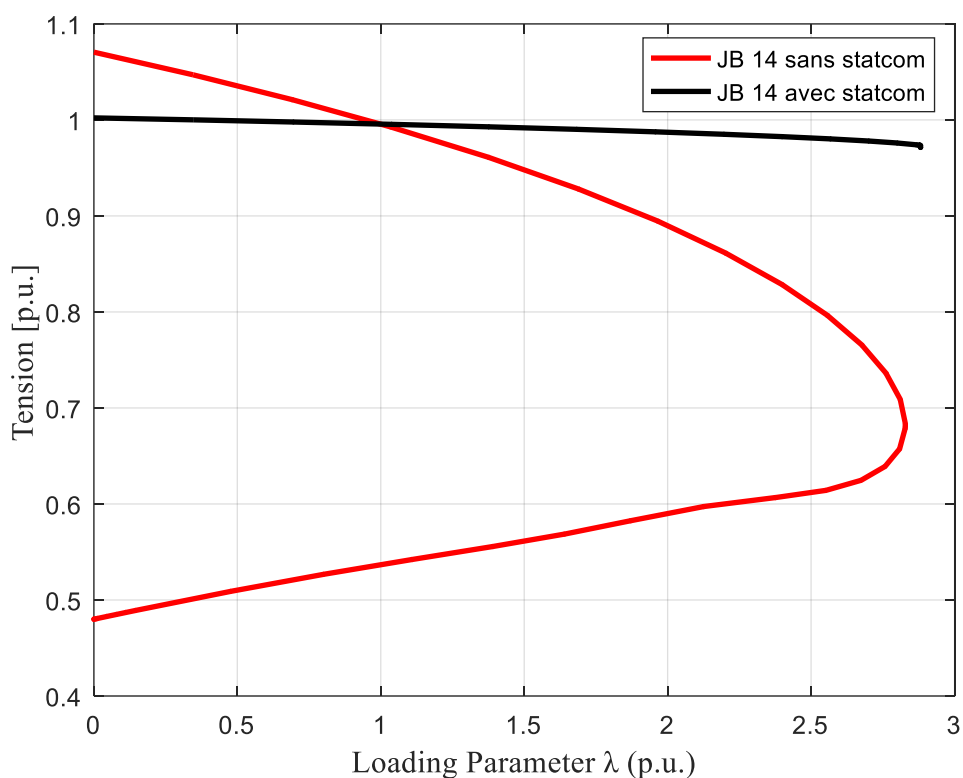


Figure IV.15: Le module de tension au niveau les JB en fonction de λ

IV.9. Interprétations :

D'après les **Figures (IV.13 et IV.14)**, Nous avons remarqué une amélioration significative du profil de tension au niveau du JB-14 (ainsi qu'aux JB voisins) par rapport à l'état initial, parce qu'il est lié directement aux les dispositifs STATCOM qui constituent un support du module de tension

On remarque que le JB 4 est le prochain JB le plus faible si le STATCOM est introduit au bus 14.

l'installation du STATCOM au JB 14 augment λ_{max} de 2.82 à 2.87 est diminué les pertes active totale dans le réseau de 5.90 (p.u) a 5.2 (p.u) , et réactives de 23 (p.u) à 20.26 (p.u) .

IV.10.Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté une étude sur l'amélioration de la stabilité des réseaux électriques par l'insertion de systèmes FACTS : STATCOM.

L'analyse de la stabilité du réseau IEEE 14 JB se concentre sur l'amélioration du profil de tension

Dans la première partie nous avons traité le problème de stabilité de la tension du réseau IEEE 14 JB en cas de court-circuit et examinons l'effet de STATCOM sur l'amélioration de la tension dans ce cas

La deuxième partie On a traité l'analyse du réseau IEEE 14 par la méthode la méthode de CPF après on a déduire les nœuds critiques du réseau Pour l'emplacement d'un optimal STATCOM.

D'après les résultats de simulation, on peut conclure que le STATCOM est un moyen efficace pour améliorer les performances du réseau électrique

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans ce travail Nous avons traité le contrôle des tensions des réseaux d'énergie électrique en incorporant les dispositifs STATCOM .Nous avons étudié et plus reprécisèrent les dispositifs STATCOM (définition, modélisation, incorporation dans load flow). Le logiciel PSAT utilisé a donné des résultats très satisfaisants pour divers cas de simulation, ou on a amélioré avec succès les tensions des nœuds et une répartition adéquate des puissances réactives. Dans notre modeste travail, nous avons essayé d'illustrer l'utilité, l'efficacité et la rapidité de contrôle des tensions par l'insertion du STATCOM. Les résultats obtenus montrent clairement que le dispositif de contrôle STATCOM peut jouer un rôle très important dans le domaine de la compensation des puissances réactives et le contrôle des tensions des différents nœuds. En effet, il permet l'amélioration du niveau de tension du nœud où il est incorporé, ainsi que les nœuds voisins. Les systèmes FACTS shunt soutiennent la tension de façon homogène sur l'ensemble du réseau. En perspective, nous suggérons une continuité dans les domaines suivants:

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

Bibliographie

- [1] A. Senni et F.Azizi . "control de tension de réseau de transport par les dispositif FACTs (SVC)".projet fine d'étude Pour l'obtention du diplôme de licence LMD, université d'Adrar le 6/6/2013.
- [2] Delendi Louardi, «Contrôle de l'écoulement de puissance active par système FACTS », Thèse de Magister, Université de Batna, Décembre 2009.
- [3] N. Azzoug , F.Ben hamama , "Amélioration de la qualité la tension d'un réseau électrique par l'utilisation d'un statcom ", mémoire de master, université de Bejaia 2016/2017
- [4] M. B.Ouadaya et M.Drissi , "Amélioration de la stabilité de tension par l'emplacement optimal des dispositif FACTs" , mémoire Master Académique ,université Taher Molay Saida soutenu le 03/07/2017.
- [5] S. Boutaba ."Amélioration de la stabilité d'un réseau électrique par l'utilisation d'un SVC". mémoire de magister ,université Hassiba ben Bouali .soutenu le 09/06/2009
- [6] Mr ABDEmalek, Meftouhi . "Influence des FACTs sur l'écoulement de puissance dans les réseaux d'énergie électriques ", mémoire de magister ,université des Mohamed Boudiaf ORAN 2012/2013
- [7] Michel Crappe : « Commande et régulation des réseaux électriques » Chap.2 Traité EGEM série génie électrique, LAVOISIER 2003.
- [8] Oussama Mammeri« Différentes méthodes de calcul de la puissance réactive Dans un noeud a charge non linéaire en présence d'un systeme de compensation de l'énergie», Mémoire Magister, l'université de Batna,2012.
- [9] Hassi Aneur Etude Des Régimes De Fonctionnement Et De L'amélioration Des Performances a. Des Longues Lignes 400kv Et Plus. PFE USTO 2010/2011
- [10] DES RESEAUX ELECTRIQUES A HAUTE TENSION Janvier 2014 (version finale)
- [11] Youness Magnoun «Placement optimal de dispositif FACTs dans un réseau de puissance». Energie électrique. 2014. ffdumas-01224006f

Bibliographie

- [12] N. Mancor, "Contribution à l'optimisation de la puissance réactive en présence de dispositifs de compensation dynamique FACTS", Mémoire de magister, Université Mohamed Khider, Biskra, 2012.
- [13] J.B.Gupta, "A cours in power systems", 14 juillet 2005.
- [14] A. Bergen et V. Vittal, "Power System Analysis", Butterworth-Heinemann second Edition 2000.
- [15] A. Ould Nagi, "Optimisation de l'écoulement de puissance Par algorithmes : AG et PSO-TVAC", Mémoire Master en Electrotechnique, Université Mohammed khider Biskra, juin 2014.
- [16] Arthur R.Bergen et Vijay Vittal, Power System Analysis, 2000.
- [17] A. Kazemi, and B. Badrzadeh, " Modeling and Simulation of SVC and TCSC to Study their Limits on Maximum Loadability Point," Electrical Power and Energy Systems, Vol. 26, pp. 619-626, Apr. 2004.
- [18] Venkataramana Ajjarapu and Colin Cristy, "The Continuation Power Flow: A tool For Steady State Voltage Stability Analysis, " IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 7, No. 1, pp.416-423,1992.
- [19] Talpasai Lakkaraju, "Selection of Pilot Buses for VAR Support and Voltage Stability Risk Analysis", Master of Science thesis, Lane Department of Computer Science and Electrical Engineering Morgantown, West Virginia, USA, 2006
- [20] J.B, GUPTA, « A cours in power systems », 14 juillet 2005
- [21] Mohamed BOUHENDIA, « Etude d'un D-STATCOM », thèse de magister, université de Djilali Liabés Sidi bel abbés, 2011
- [22] E.G. Shahraki «Apport de l'UPFC à l'amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques» Mémoire de doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy-I, 13 Octobre 2003.

Bibliographie

- [23] Rabah.Benabid «Optimisation Multi-Objectif de la synthèse des FACTS par les particules en Essaim pour le contrôle de la stabilité de tension des réseaux électrique» thèse de magister, Université de jijel 04/09/2007.
- [24] Zobeidi Messaoud «Amélioration de la sécurité des systèmes électriques à travers l'approche de sensibilité pour l'emplacement optimal des dispositifs FACTS» thèse de Doctorat Université Djillali Liabes de Sidi-Bel-Abbes 27/05/ 2021
- [25] Harrat Ahlem «Amélioration de la stabilité de tension d'un réseau électrique par système FACTS» MEMOIRE DE MAGISTER, Université Mohammed Seddik Ben Yahia Jijel 2021
- [26] Abdelaàli ALIBI, « Contrôle des réseaux Electriques par les systèmes FACTS », MEMOIRE DE MAGISTER , Université de Batna 2009
- [27] Kerbaa Amel «Etude de l'influence des systèmes FACTS sur la qualité de l'énergie électrique» Mémoire de Fin d'Etudes Université Mohamed Khider Biskra 2013
- [28] ABAIDIA FATMA ZOHRA «Contribution du STATCOM dans l'amélioration du comportement du réseau électrique» MEMOIRE DE MASTER, Université Badji Mokhtar Annaba juin 2018
- [29] MESSALTI SABIR «AMELIORATION DES RESEAUX ELECTRIQUES PAR LES DISPOSITIFS"FACTS" LORS D'UN DEFAUT» mémoire d'ingénieur Université Mohamed Boudiaf-M'sila 2009
- [31] Merzougui Nassima, « gestion de congestion dans les réseaux électriques », Mémoire de fin d'étude Master, Université Mohamed Khider, Biskra 03Juin 2014.