

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



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Electrotechnique
Option : Réseaux électrique

Réf:

**Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme:**

MASTER

Thème

**Etude de l'influence des systèmes FACTS sur
la qualité de l'énergie électrique**

Présenté par :

Kerbaa Amel

Soutenu le : 02 Juin 2013

Devant le jury composé de :

PR. Serairi Kamel

MAA .Naimi Djemai

PR. Mimoune Sourî-Mouhamed

Président

Encadreur

Examineur

Année universitaire : 2012 / 2013

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



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Electrotechnique
Option : Réseaux électrique

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme:

MASTER

Thème

**Etude de l'influence des systèmes FACTS sur
la qualité de l'énergie électrique**

Présenté par :

Kerbaa amel

Avis favorable de l'encadreur :

MAA. Naimi Djemai

signature

Avis favorable du Président du Jury

PR. Serairi Kamel

Signature

Cachet et signature

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



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Electrotechnique
Option : Réseaux électrique

Thème :

Etude de l'influence des systèmes FACTS sur la qualité de l'énergie électrique

Proposé et Dirigé par : Mr. Naimi Djemai

RESUMES (Français et Arabe)

Partant du principe que l'écoulement de puissance est l'indice idéal de l'état de réseau électrique, cette étude a pour objectif d'analyser l'écoulement de puissance du réseau. Cette analyse a révélé des anomalies relatives aux : Profil de la tension au niveau de tous les jeux de barres, les pertes de puissance active et réactive à travers toutes les lignes ainsi que la stabilité statique du réseau. Un recours aux dispositifs FACTS a été fait pour enlever ces anomalies. Cette étude a été appliquée sur le fameux réseau IEEE30JB, en utilisant un logiciel adéquat dit PSAT ou plusieurs comparaisons ont été établies montrant ainsi l'efficacité de cette étude.

Mots-clés : Ecoulement de puissance, Réseau électrique, Stabilité statique, Pertes de puissance, FACTS.

ملخص:

إنطلاقاً من كون حساب سريان القدرة يمثل مؤشراً مثالياً لمعرفة وضعية الشبكة الكهربائية, تهدف هذه الدراسة إلى إستعمال هذا الحساب لتحليل الشبكة الكهربائية في وضعيات مختلفة. هذا التحليل كشف وجود عدة عيوب متعلقة بفرق الكمون على مستوى جميع قضبان التجميع و وضعيات الطاقة عبر كل الخطوط إضافة إلى الإستقرار الساكن للشبكة الكهربائية. طبقت هذه الدراسة على نموذج شبكة تدعى EEEJBI30 باستعمال برنامج ملائم متمثلاً في PSAT حيث أظهرت نتائج المقارنات فعالية هذه الدراسة.

الكلمات المفتاحية: سريان القدرة, شبكة كهربائية, الإستقرار الساكن, ضياعات الطاقة, الوسائل المرنة التعويض الرجعي.

DEDICACE

Je dédie ce travail :

*A ma très chère mère pour sa patience, sa
tendresse et son Affection.*

A mon père pour ses conseils et sa présence.

A mon très chère frère : Mohamed.

A mon très chères sœurs : Amina, Zahra, Mariam.

*A ma grande famille : Kerbaa et Akrou .de
Boumerdes.*

Et à tous mes Amis

REMERCIEMENT

*Au terme de ce travail, Mes remerciements les plus vifs, vont à mon encadreur **MAA. NAIMI DJEMAI** Maître de conférences au département d'électrotechnique de l'Université de Biskra d'avoir accepté d'être le rapporteur de ce mémoire, pour ces précieux conseils et encouragements tout au long de ce travail. pour son aide, son orientation judicieuse et sa disponibilité, aussi pour la confiance.*

*J'adresse mes remerciements le président **PR.SERAIRI KAMEL** et membres du Jury **PR.MIMOUNE SOURI-MOUHAMED** de l'intérêt dont il font preuve à notre égard pour lire ce mémoire et en assistant à notre soutenance..*

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

Enfin, je désire adresser mes remerciements à toutes les personnes qui, par leur assistance, ont contribué de près ou de loin à rendre possible la réalisation de cette recherche.

Liste des Tableaux

	Page
Tableau 1.1 : Les types des variables des Jeux de barres	7
Tableau 2.1 : Application des FACTS a la résolution des problèmes dans le réseau	41
Tableau 3.1 : représente la tension initial et la tension de référence.	50
Tableau 3.2: profil de la tension avec l'évolution de la charge	52
Tableau 3.3: Résultats de programmation: Variation de la tension de réseau test.....	61
Tableau 3.4: Pertes de puissance active, réactive et λ_{\max} avec compensation au niveau de JB..	63

Liste des figures

	Page
Fig 1.1 : formulation de l'équation de l'écoulement de puissance.....	8
Fig 1.2 : Organigramme de la méthode de N-R.....	15
Fig 1.3 : Classification des types de stabilité des réseaux électrique	17
Fig 1.4 : Réseau électrique à deux nœuds	20
Fig 1.5 : Principe d'écoulement de puissance en continu	27
Fig 2.1 : Classification des dispositifs FACTS	32
Fig 2.2 : Schéma type du SVC en connexion shunt	34
Fig 2.3 : Schéma (a) :STATCOM ,(b) :caractéristique tension/courant du STATCOM	35
Fig 2.4 : Schéma d'un TCSC multi gradins pour une compensation série.....	36
Fig 2.5 : Contrôleur de transit puissance unifie	38
Fig 2.6 : Schéma du contrôle de l'angle de transport par TCPAR	39
Fig 2.7 : Diagramme schématique des applications des FACTS dans les réseaux.....	40
Fig 3.1 : Réseau test 30JB.....	45
Fig 3.2: Bibliothèque du similink	48
Fig 3.3 : moudel lé FACTS	48
Fig 3.4 : Réseau test développé sous PSAT	49
Fig 3.5:La variation de module de tension avec N JB.....	51
Fig 3.6: Variation du coefficient de surcharge	51
Fig 3.7: Variation des modules de tension sans compensation et avec compensation au niveau de JB N°18.....	51
Fig3.8 : Variation du coefficient de surcharge JB N°18.....	53
Fig 3.9: Variation des modules de tension sans compensation et avec compensation au niveau de JB N°19.....	54
Fig 3.10: Variation du coefficient de surcharge JB N°19.....	54
Fig 3.11: Variation des modules de tension sans compensation et avec compensation au niveau de JB N°21.....	55
Fig 3.12 : Variation du coefficient de surcharge JB N°21.....	55

Fig 3.13 : Variation des modules de tension sans compensation et avec compensation au niveau de JB N°22.....	56
Fig 3.14: Variation du coefficient de surcharge JB N°22	56
Fig 3.15 : Variation des modules de tension sans compensation et avec compensation au niveau de JB N°23.....	57
Fig3.16: Variation du coefficient de surcharge JB N°23.....	57
Fig 3.17: Variation des modules de tension sans compensation et avec compensation au niveau de JB N°24.....	58
Fig 3.18: Variation du coefficient de surcharge JB N°24	58
Fig 3.19: Variation des modules de tension sans compensation et avec compensation au niveau de JB N°28.....	59
Fig 3.20: Variation du coefficient de surcharge JB N°28.....	60
Fig 3.21: La variation des pertes avec compensation au niveau de JB(18 ,19,21,22,23,24 et28)	62

Liste des Symboles et Acronymes

Symboles	ACRONYMES
<i>JB</i>	Jeux de barre.
<i>pu</i>	Unité relative
FACTS	Flexible Alternating Current Transmission Systems
<i>IGBT</i>	Insulated Gate Bipolar Transistors
TCR	Thyristor Controlled Reactor
TSR	Thyristor Switched Reactor
TSC	Thyristor Switched Capacitor
SVC	Static Var Compensator
STATCOM	Static Compensator
TCSC	Thyristor Controlled Series Capacitor
TSSC	Thyristor Switched Series Capacitor
TSSR	Thyristor Switched Series Reactor
SSSC	Static Synchronous Series Compensator
TCPAR	Thyristor Controlled Phase Angle Regulator
UPFC	Unified Power Flow Controller
P_R	la puissance totale injectée au réseau (W).
X	Vecteurs d'état
U	Vecteur de commande
Y_{sh}	Admittance shunt totale de la ligne ij
Y_{ij}	Admittance série de la ligne ij
S_i^*	Le conjugué de la puissance apparente.
Z_{ser}	Impédance série de la ligne (Ω).
V	. Le module de la tension.
P_{Gi}	La puissance électrique active générée par la centrale i (W).
V_{imax}	La tension maximale au niveau du JB i (V).
V_{imin}	La tension minimale au niveau du JB i (V).
$P_{Gi min}$	La puissance active générée minimale dans le JB i (W).
P_{Gio}	La puissance active générée par la machine i dans le cas initial.

K_{Gi}	La facteur de contribution de chaque générateur i pour satisfaire la demande de la charge .
Q_{Gi}	La puissance électrique réactive générée par la centrale i (VAR).
λ	Multiplicateur de Lagrange concernant les contraintes d'égalités (λ).
S_i	La puissance apparente de jeu de barre i (VA).
B_{ij}	Les conductances et les susceptance entre le nœud i et j .
σ_i	Valeur singulières réelles positives.
ϵ	Tolérance choisie (précision de calcul).
y	le vecteur des fonctions objectives.
\bar{V}_i	La valeur complexe de la tension au niveau du JB i (V).
S_{Di}	La puissance apparente demandée au niveau du JB i (VA)
S_{Gi}	La puissance apparente générée au niveau du JB i (VA).
I_i	Le courant du JB i (A).
ΔV	La valeur de la chute de tension dans la ligne de transport (V).
x	Le vecteur des variables d'état.
U	Le vecteur des variables de contrôle.
a_i, b_i, c_i	Les coefficients des puissances générées pour un générateur i .
S_i	La puissance apparente au niveau du JB i (VA).
S_{Di}	La puissance apparente demandée au niveau du JB i (VA)
S_{Gi}	La puissance apparente générée au niveau du JB i (VA).
I_i	Le courant du JB i (A).
Y_{ij}	L'admittance entre les jeux de barre i et j .
$[J^{(0)}]$	La matrice carrée dite Jacobéenne.
n	Nombre de JB de tout le réseau.
w	le poids affecté au critère.
B_{ij}, G_{ij}	Les conductances et les susceptances entre le nœud i et j

SOMMAIRE

Titres	Page
Remerciement.....	I
Liste des tableaux.....	II
Liste des figures.....	III
Liste des Symboles et Acronymes.....	V
Sommaire.....	VII
INTRODUCTION GENERALE.....	1



*** Écoulement de puissance et Stabilité de Tension ***

Introduction.....	4
1.1 Philosophie de l'écoulement de puissance.....	4
1.2 Objectif de l'étude de l'écoulement de puissance.....	4
1.3 Classification des variables de l'écoulement de puissance.....	5
1.3.1 Les variables de perturbation ou non contrôlables.....	5
1.3.2 Les variables contrôlables (de contrôle et d'état).....	5
1.3.2.1 Variables d'état	6
1.3.2.2 Variables de contrôle.....	6
1.4 Classification des jeux de barre.....	6
1.4.1 Jeu de barres de charges (PQ bus).....	6
1.4.2 Jeu de barres de contrôle (PV bus).....	7
1.4.3 Jeu de barre de référence.....	7
1.4.4 Jeu de barre de contrôle (PQ bus) ou PQ de contrôle.....	7
1.5 Formulation de base de l'équation de l'écoulement de puissance.....	7
1.6 Méthode de Gauss-Seidel.....	11
1.6.1 Principe de la méthode de Gauss Seidel.....	11
1.6.2 Application à la solution des équations de l'écoulement de puissance.....	12
1.7 La Méthode itérative de Newton-Raphson.....	12
1.7.1 Méthode de Newton-Raphson modifié (fastdecoupled)	14

1.7.2 Organigramme de la méthode de Newton Raphson.....	15
1.8 Stabilité de tension	16
1.8.1 Stabilité de tension vis-à-vis des petites perturbations.....	17
1.8.2 Stabilité de tension vis-à-vis des grandes perturbations	17
1.9 Stabilité de Tension	18
1.9.1 Causes d'instabilité de tension.....	19
1.9.1.1 Production trop éloignée de la consommation.....	19
1.9.1.2 Manqué local d'énergie reactive.....	19
1.9.1.3 Charge appelée trop importante.....	21
1.10 Analyse de la stabilité de tension.....	21
1.10.1 Analyse dynamique.....	21
1.10.2 Analyse statique	22
1.10.3 Méthodes d'Analyse de la stabilité statique de tension.....	22
1.10.3.1 Valeur singulière minimale.....	23
1.10.3.2 Valeurs propres	24
1.10.3.3 Marge de charge (loading margin).....	25
1.11 Ecoulement de puissance en continu (Continuation Power Flow).....	26
Conclusion.....	28



CHAPITRE II

*** Etude des dispositifs FACTS***

Introduction.....	30
2.1 Définitions et généralités	30
2.2 Rôle des dispositifs FACTS	31
2.3 Types de FACTS.....	32

2.4 Les différents types des systèmes FACTS.....	33
2.5 Structure des Principaux Dispositifs FACTS.....	33
2.5.1 Compensateurs parallèle.....	33
2.5.1.1 Compensateur statique de puissance réactive(SVC).....	33
2.5.1.2 Compensateur statique synchrone(STATCOM).....	34
2.5.2 Compensateurs Série.....	35
2.5.2.1 Compensateur série commuté par thyristor(TSSC).....	35
2.5.2.2 Compensateur série commandé par thyristor(TCSC).....	36
2.5.2.3 Compensateur série synchrone(SSSC).....	36
2.5.3 Compensateur série parallèle (hybride).....	37
2.5.3.1 Contrôleur de transit de puissance universel (UPFC).....	37
2.5.3.2 Transformateur déphaseur commandé par thyristor(TCPST).....	38
2.5.3.3 Régulateur d'angle déphase commandé par thyristor(TCPAR).....	39
2.5.3.4 Régulateur de tension commandé par thyristor (TCVR).....	39
2.6 Application des FACTS.....	40
2.7 Coût des dispositifs FACTS.....	42
2.8 Les Applications Principales des FACTS.....	42
2.9 Les Avantages et Inconvénients de la Technologie des Dispositifs FACTS	43
Conclusion.....	43



CHAPITRE III

Résultats et interprétations

Introduction.....	45
3.1 Réseaux Tests	45
3.2 Logiciel de Simulation	46

3.3 Les résultats de simulation49

 3.3.1 Cas : Sans compensation49

 3.3.1.1 Analyse de l'état initial de réseau.....51

 3.3.1.2 Détermination de JB rensible à la puissance51

 3.3.1.3 Calcul de sur charge limite52

 3.3.2 Cas :Choix optimal de l'emplacement du STATCOM53

 3.3.2.1 Test avec STATCOM53

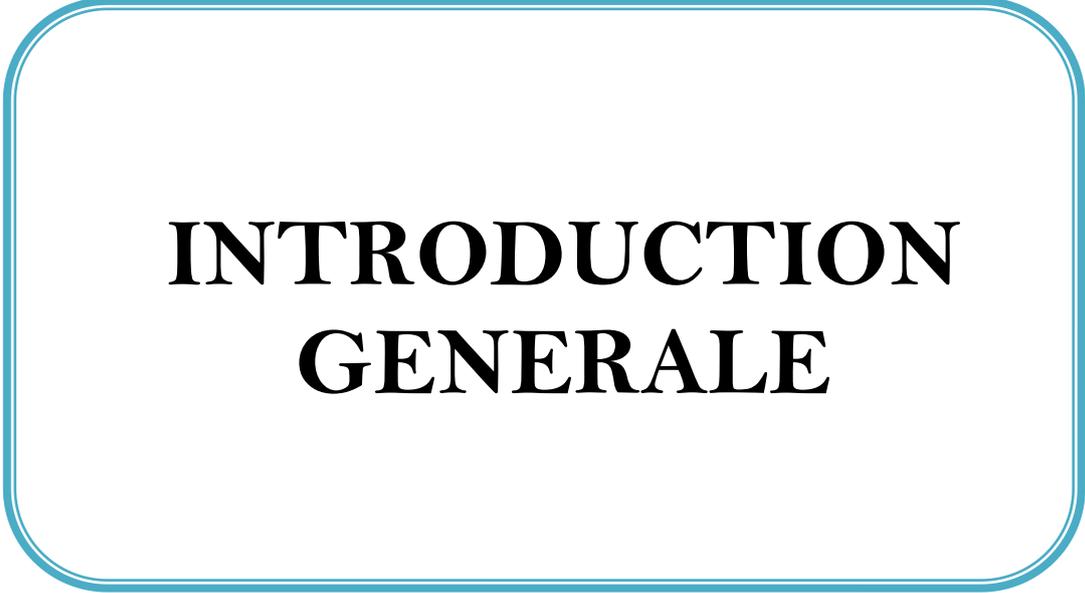
3.4 Discussions des résultats63

Conclusion.....64

CONCLUSION GENERALE.....66

BIBLIOGRAPHIE.....69

ANNEXE



INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Aujourd'hui la consommation de l'énergie électrique et le scénario des systèmes d'alimentation est hautement complexe et interconnecté, il y a un grand besoin d'améliorer l'utilisation d'énergie électrique tout en conservant sa fiabilité et sa sécurité.

L'étude de l'écoulement de puissance et la stabilité dans le langage du système électrique est la solution de l'état d'équilibre des réseaux. Habituellement, une centrale n'est pas située à proximité du centre de charge, mais elle peut être loin du centre de distribution en raison de circonstances diverses. Pour répondre à la demande de puissance, sans cesse croissante, les services publics préfèrent s'appuyer sur la production de l'électricité déjà existante au lieu de construire de nouvelles lignes de transmission qui sont limitées par des contraintes diverses.

Les réseaux électriques jusqu'à ces dernières années sont contrôlés 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 et avec lesquels l'action d'amorçage et de réamorçage ne peut être répétitivement exécuté à une fréquence élevée.

Les éléments proposés qui permettent ce contrôle amélioré des systèmes sont les dispositifs FACTS « Flexible Alternating Current Transmission System ». Les dispositifs FACTS font en général appel à de l'électronique de puissance, des microprocesseurs, de l'automatique, des télécommunications et des logiciels pour parvenir à contrôler les systèmes de puissance. Ce sont des éléments de réponse rapide. Ils donnent en principe un contrôle plus souple de l'écoulement de puissance. Ils donnent aussi la possibilité de charger les lignes de transit à des valeurs près de leur limite thermique, et augmentent la capacité de transférer de la puissance d'une région à une autre. Ils Limitent aussi les effets des défauts et des défaillances de l'équipement, et stabilisent le comportement du réseau électrique.

Le sujet de ce mémoire concerne, en particulier, l'analyse de l'écoulement de puissances dans un réseau de transport d'énergie électrique au moyen de dispositifs STATCOM. Afin d'analyser l'écoulement de puissance et l'influence des FACTS, on a en recours à un logiciel dit "PSAT" pour system analyses toolbox un la grande richesse

Du sa bibliologie simulink. Pour atteindre ces objectifs de recherche, ce mémoire est organisé en trois chapitres:

Dans le premier chapitre, le problème de l'écoulement de puissance sera détaillé ainsi que les méthodes de résolution, notamment, celle de Newton-Raphson. Une partie sera consacrée à la stabilité statique.

Par contre la totalité du deuxième chapitre est consacrée aux dispositifs FACTS en se basant sur leurs modélisations, et leurs types.

Le troisième chapitre vient pour appliquer cette étude sur un modèle de réseau électrique de transport représenté par le fameux IEEE30JB ou plusieurs constatations vont être dégagées.

Finalement une conclusion générale sera établie pour mettre fin à ce mémoire.

Chapitre -1'

Écoulement de puissance et Stabilité de tension



Introduction

L'étude de l'écoulement de puissance consiste à calculer les tensions du réseau électrique pour des extrémités spécifiées et des conditions données aux jeux de barres.

L'étude de l'écoulement de puissance coordonne l'exploitation de toutes les ressources d'énergie et la répartition de la production entre les différents usagers, dont le but est d'obtenir l'exploitation la plus économique qui conduit à la meilleure utilisation de toutes les ressources. Des prévisions concernant la consommation et la production ont été faites par des études approfondies, utilisant les méthodes numériques appliquées en ce domaine. Dans ce chapitre, on va utiliser la méthode de Newton Raphson pour résoudre le problème de l'écoulement de puissance.

1.1 Philosophie de l'écoulement de puissance

Dans les réseaux électriques, il existe de nombreux problèmes qui ont des effets sur le but principal qui est, le maintien du système de puissance fonctionnel dans son état normal. Parmi ces problèmes, on trouve celui 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 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 [01].

1.2 Objectif de l'étude de l'écoulement de puissance

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

1-Les tensions et la fréquence de réseau doivent d'être dans les limites acceptables:

$$V_{min} < V < V_{max} \quad (1.1)$$

$$f_{min} < f < f_{max} \quad (1.2)$$

2-La forme d'onde du courant et de la tension doit être sinusoïdale (éviter les harmoniques).

3-Les lignes de transmission doivent fonctionner dans leurs limites thermiques et de stabilité. ($P_R < P_{max}$).

4-La durée de coupure de l'alimentation doit être au minimum possible.

5-En outre, à cause de la dérégulation (ouverture) du marché d'électricité, le courant 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, on doit calculer ainsi les tensions (modules et arguments) au niveau de tous les jeux de barres qui forment le réseau. Ainsi que toutes les puissances qui transitent les lignes de transmission.

1.3 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 [01].

1.3.1 Variables de perturbation ou non contrôlables

Parmi les variables des équations de l'écoulement de puissance, les variables de la demande (charge) P_D et Q_D 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 perturbation P.

$$P = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \vdots \\ P_n \\ P_{n+1} \\ P_{n+1} \\ \vdots \\ P_{2n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{D1} \\ P_{D2} \\ \vdots \\ P_{Dn} \\ Q_{D1} \\ Q_{D2} \\ \vdots \\ Q_{Dn} \end{bmatrix}$$

1.3.2 Variables contrôlables (de contrôle et d'état)

Ces variables peuvent être regroupées en deux catégories : les variables d'état et les variables de contrôle.

1.3.2.1 Variables d'état

Ce sont l'amplitude et l'angle de la tension au niveau de jeux de barres, ils sont qualifiés d'état suite à leur valeur qui peut déterminer l'état de réseau .Elles sont représentés par le vecteur d'état X.

$$X = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ X_n \\ X_{n+1} \\ X_{n+2} \\ \cdot \\ \cdot \\ X_{2n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \delta_n \\ |V_1| \\ |V_2| \\ \cdot \\ \cdot \\ |V_n| \end{bmatrix}$$

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

1.3.2.2 Variables de contrôle

Les puissances générées, à savoir P_G ou Q_G (actives ou réactives) sont des variables de contrôles représentées par le vecteur de contrôle U.

$$U = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ U_n \\ U_{n+1} \\ U_{n+2} \\ \cdot \\ \cdot \\ U_{2n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{G1} \\ P_{G2} \\ \cdot \\ \cdot \\ P_{Gn} \\ Q_{G1} \\ Q_{G2} \\ \cdot \\ \cdot \\ Q_{Gn} \end{bmatrix}$$

1.4 Classification des jeux de barre

Les jeux de barres sont classés suivant les deux variables connus parmi les quatre variables citées ultérieurement. Généralement on les classe sous trois types [02], mais l'actualité du réseau oblige un quatrième type :

1.4.1 Jeu de barres de charges (PQ bus)

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.

1.4.2 Jeu de barres de contrôle (PV bus)

Ce sont les jeux de barres générateurs de 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.

1.4.3 Jeu de barre de référence

C’est un jeu de barre connecté à une source de tension considérée constante, et sans angle de phase, il 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 du jeu de barre de contrôle.

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

Tableau 1.1 Les types des variables des Jeux de barres			
Type de Jeux de barre (JB)	Variable connue	Nombre de jeux de barre	Existence dans le réseau (%)
Charge (P, Q)	P, Q	$n - m$	≥ 80
Contrôle (P, V)	$P, V $	$m - 1$	≤ 20
Référence (slack/swing bus)	$ V , \theta_i$	1	1

1.4.4 Jeu de barre de contrôle (PQ bus) ou PQ de contrôle

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

1.5 Formulation de base de l’équation de l’écoulement de puissance

Pour élaborer les équations de l’écoulement de puissance en possède comme suit :

-On a un réseau quelconque de 'n' jeux de barre [01].

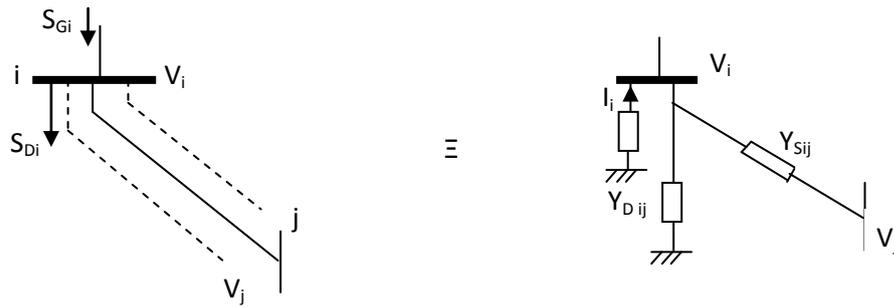


Fig 1.1:Formulation de l'équation de l'écoulement de puissance.

-On considère un jeu de barre i parmi 'n' jeu de barre du réseau a analysé. Les puissances générées et demandées son respectivement S_{Gi} et S_{Di} .

$$S_{Di} = P_{Di} + jQ_{Di} \tag{1.3}$$

-Ainsi les puissances injectés dans le JB k peuvent être représentées par :

$$S_i = S_{Gi} - S_{Di} = (P_{Gi} - P_{Di}) + (Q_{Gi} - Q_{Di}) \tag{1.4}$$

Dans le cas général, la relation d'injection de puissance de toute barre i d'un réseau électrique de n nœuds.

$$S_i^* = P_i - jQ_i = V_i^* I_i \tag{1.5}$$

$$I_i = \frac{S_i^*}{V_i^*} = \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} \quad ; i = 1, 2 \dots n \tag{1.6}$$

Le membre de gauche de l'équation (1.6) peut être remplacé par l'expression de l'équation (1.7).

$$I_i = \frac{S_i^*}{V_i^*} = V_i Y_{sh} + \frac{(V_i - V_j)}{Z_{ser}} \tag{1.7}$$

Écrite en fonction des éléments de la matrice des admittances de nœuds. On obtient alors:

$$\frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} = V_1 Y_{i1} + V_2 Y_{i2} + \dots + V_n Y_{in} \tag{1.8}$$

Ou :

$$P_i - jQ_i = V_i^* [V_1 Y_{i1} + V_2 Y_{i2} + \dots + V_n Y_{in}] \tag{1.9}$$

Équation (1.9) peut être écrite sous forme de sommation mathématique compacte pour obtenir:

$$S_i^* = P_i - jQ_i = V_i^* \sum_{j=1}^n V_j Y_{ij} \quad (1.10)$$

Le courant sortant de la barre i et s'écoulant dans la ligne ij (de i vers j) à partir des composants du modèle en π , s'exprime par:

$$I_{ij} = (V_i - V_j)Y_{ij} + V_i Y_{sh} \quad (1.11)$$

Où : Y_{ij} = admittance série de la ligne ij ;

Y_{sh} = admittance shunt totale de la ligne ij .

Alors, l'écoulement de puissance active et réactive est:

$$S_{ij}^* = P_{ij} - jQ_{ij} = V_i^* I_{ij} = V_j^* (V_j - V_i) Y_{ij} + V_j^* V_j Y_{sh} \quad (1.12)$$

Où, à partir de la barre i , P_{ij} et Q_{ij} sont respectivement les puissances active et réactive s'écoulant dans la ligne ij .

Par similitude, les écoulements de puissance de j à i sont:

$$S_{ji}^* = P_{ji} - jQ_{ji} = V_j^* (V_j - V_i) Y_{ij} + V_j^* V_j Y_{sh} \quad (1.13)$$

La puissance complexe perdue dans la ligne ij due à la transmission est obtenue en faisant la somme algébrique des écoulements de puissances déterminés par les équations (1.12) et (1.13)

Ce qui suit est le développement détaillé des équations (1.5) et (1.13) Considérons le nœud 1 comme la référence du réseau caractérisé par une tension de module V_1 et de phase $\theta_1 = 0$.

L'expression de toute autre tension peut s'écrire:

$$V_i = |V_i| e^{j\theta_i} = |V_i| (\cos\theta_i + j \sin\theta_i) = |V_i| \angle\theta_i \quad (1.14)$$

On sait d'une part:

$$V_i^* = |V_i| \angle(-\theta_i) \quad (1.15)$$

$$V_j = |V_j| \angle\theta_j \quad (1.16)$$

Ainsi:

$$V_i^* V_j = |V_i| |V_j| \angle(-\theta_{ij}) = |V_i| |V_j| (\cos \theta_{ij} - j \sin \theta_{ij});$$

$$\text{Où : } \theta_{ij} = \theta_i - \theta_j \quad (1.17)$$

Ainsi que chaque élément de la matrice admittance est en type complexe :

$$Y_{ij} = |Y_{ij}| \angle\delta_{ij} \quad (1.18)$$

D'ici on peut écrire les équations de l'écoulement de puissance en séparant les parties réelles et imaginaires [1]:

$$\begin{cases} P_i = \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_i| |V_j| \cos(\theta_i - \theta_j + \delta_{ij}) \\ Q_i = -\sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_i| |V_j| \sin(\theta_i - \theta_j + \delta_{ij}) \end{cases} \quad (1.19)$$

D'autre part, tout élément Y_{ij} de la matrice des admittances de barre peut être écrit en fonction de sa partie réelle et imaginaire comme suit:

$$Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij} \quad (1.20)$$

D'où:

$$V_i^* V_j Y_{ij} = |V_i| |V_j| (\cos \theta_{ij} - j \sin \theta_{ij})(G_{ij} + jB_{ij}) \quad (1.21)$$

On obtient une autre forme générale des équations de l'écoulement de puissance:

$$\begin{aligned} S_i^* = P_i - jQ_i &= \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ &\quad - j \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{aligned} \quad (1.22)$$

En comparant et en identifiant la partie réelle des deux membres, puis l'imaginaire des deux membres de l'équation de l'écoulement de puissance, on constate que les puissances active et la puissance réactive injectée en tout nœud i du réseau est [02]:

$$\begin{cases} P_i = P_{Gi} - P_{Di} = |V_i| \sum_{j=1}^n |V_j| (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) & (1.23) \\ Q_i = Q_{Gi} - Q_{Di} = |V_i| \sum_{j=1}^n |V_j| (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) & (1.24) \end{cases}$$

La solution des équations algébriques, décrivant le système de puissance, est basée sur une méthode itérative qui doit satisfaire la loi de Kirchhoff.

1.6 Méthode de Gauss-Seidel

Cette méthode est considérée comme l'une des plus simples des méthodes itératives, à savoir que la méthode la plus efficace est la méthode de Newton-Raphson, mais la méthode de Gauss-Seidel s'intervient pour les raisons suivantes[02]:

- 1-Elle possède une valeur scientifique sûre grâce à sa simplicité.
- 2-Elle est utilisée dans les systèmes à faible puissance, dans les quelles les programmes sont simples.
- 3-Elle s'utilise dans de nombreux cas des grands systèmes pour obtenir une solution approximative.

1.6.1 Principe de la méthode de Gauss Seidel

Soit à résoudre la fonction : $f(x) = 0$

Il faut changer cette formule par $X=g(x)$, il est toujours possible de trouver une fonction $g(x)$, telle que : $X=g(x) \ll g(x) \text{ n'est pas unique} \gg$

On estime une valeur initiale X_0 ; $X_1 = g(X_0)$, $X_2 = g(X_1)$, $X_{j+1} = g(X_j)$
où k est le numéro d'itération.

Le processus itératif se termine si la différence entre deux valeurs successives vérifie le test de Convergence :

$$|x_{j+1} - x_j| < \varepsilon \tag{1.25}$$

ε : tolérance choisie.

1.6.2 Application à la solution des équations de l'écoulement de puissance

$$S_i^* = P_i - jQ_i = V_i^* \cdot \sum_{j=1}^n Y_{ij} \cdot V_j \tag{1.26}$$

On a alors :

$$V_i = \frac{1}{Y_{ii}} \cdot \frac{P_i - jQ_i}{V_i} - \sum_{j \neq i} Y_{ij} \cdot V_j \tag{1.27}$$

Donc :

$$V_i^{k+1} = \frac{1}{Y_{ii}} \cdot \left[\frac{P_i - jQ_i}{V_i^{k*}} - \sum_{j \neq i} Y_{ij} \cdot V_j \right] \tag{1.28}$$

1.7 La Méthode itérative de Newton-Raphson

Le problème de l'écoulement de puissance peut être résolu aussi par la méthode de Newton-Raphson. En réalité, parmi les nombreuses méthodes disponibles pour l'analyse de 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 [02]:

$$I_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \quad , i = 1, 2, 3, \dots, n \tag{1.29}$$

$$S_i = V_i \left(\sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \right)^* = V_i \left(\sum_{j=1}^n Y_{ij}^* V_j^* \right) \tag{1.30}$$

Alors:

$$V_i = |V_i| \angle \theta_i \tag{1.31}$$

On définit:

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

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

$$S_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| (\cos(\theta_i - \theta_j) + j\sin(\theta_i - \theta_j)) \omega (G_{ij} - jB_{ij}) \quad (1.34)$$

Etape 1: On définit le type de jeux de barres $i=1$, un jeux de barre référence (θ_1, V_1) connues (P_1, Q_1) a déterminer [03]:

$$\theta = \begin{bmatrix} \theta_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \theta_n \end{bmatrix} \quad (1.35)$$

$$V = \begin{bmatrix} V_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ V_n \end{bmatrix} \quad (1.36)$$

$$X = \begin{bmatrix} \theta \\ V \end{bmatrix} \quad (1.37)$$

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

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

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

$$P_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| \omega (G_{ij} \cos (\theta_{ij}) + B_{ij} \sin (\theta_{ij})) \quad (1.38)$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| \omega (G_{ij} \sin (\theta_{ij}) + B_{ij} \cos (\theta_{ij})) \quad (1.39)$$

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

$$\begin{cases} P_i(x) - P_i = 0 \\ Q_i(x) - Q_i = 0 \end{cases} \quad (1.40)$$

•Ou P_i , Q_i sont des puissances spécifiques.

$$F(x) = \begin{bmatrix} P_2(x) - P_2 \\ P_3(x) - P_3 \\ \vdots \\ P_n(x) - P_n \\ Q_2(x) - Q_2 \\ Q_3(x) - Q_3 \\ \vdots \\ Q_n(x) - Q_n \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = [0] \quad (1.41)$$

Etape 4:

$$\begin{aligned} J_{11} &= \delta P_i(x) / \delta \theta_j \\ J_{12} &= \delta P_i(x) / \delta V_j \\ J_{21} &= \delta Q_i(x) / \delta \theta_j \\ J_{22} &= \delta Q_i(x) / \delta V_j \end{aligned} \quad (1.42)$$

Alors :

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (1.43)$$

J : matrice jacobienne.

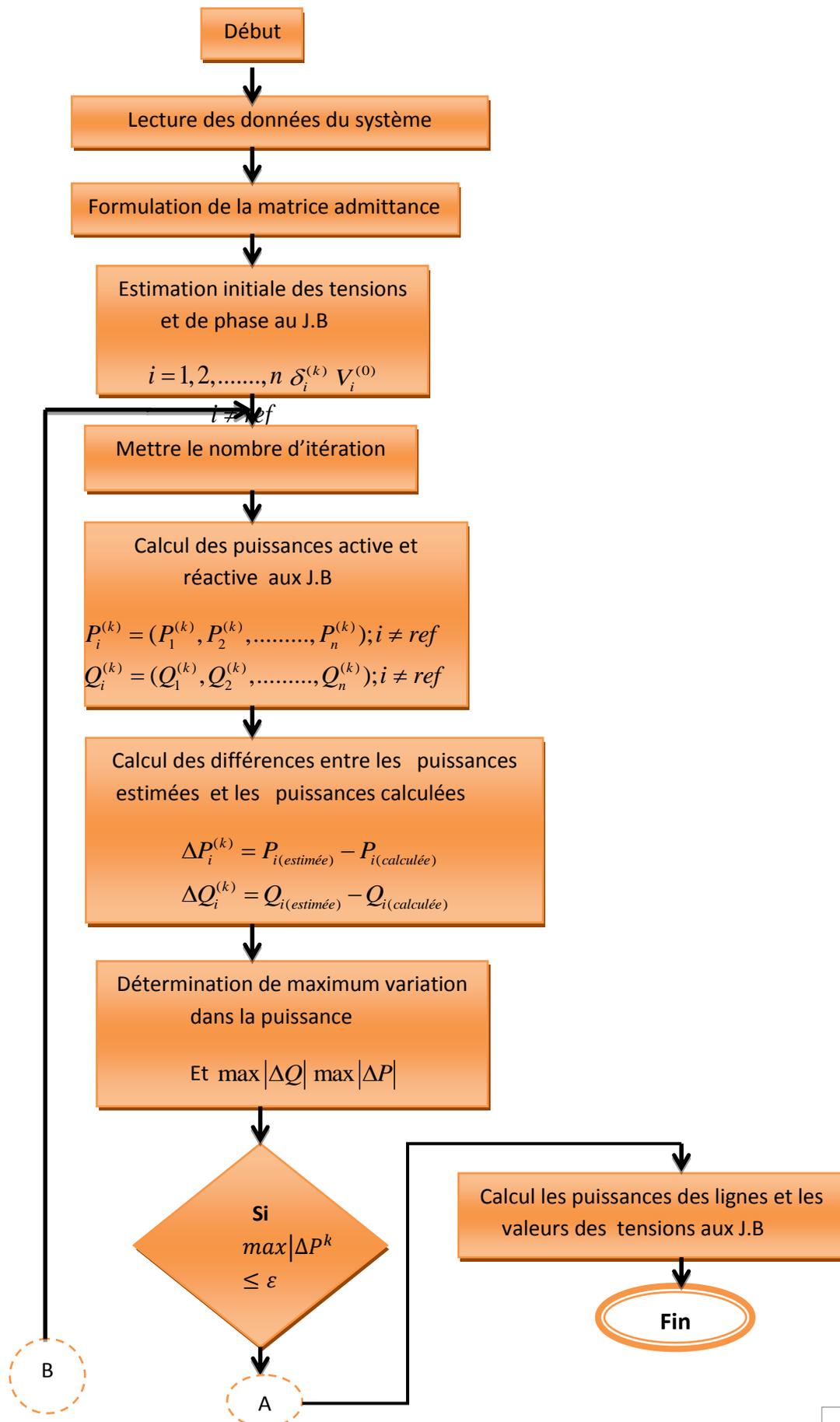
1.7.1 Méthode de Newton-Raphson modifié (fastdecoupled)

En se basant sur les cas des différents réseaux étudiés à constater les valeurs des sub-matrices J_{12} et J_{21} que sont très petites

$$J = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} J_{11} & 0 \\ 0 & J_{22} \end{bmatrix}; J_{12} = \frac{\partial Q}{\partial |V|} \approx 0; J_{21} = \frac{\partial Q}{\partial \theta} \approx 0$$

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.

1.7.2 Organigramme de la méthode de Newton Raphson



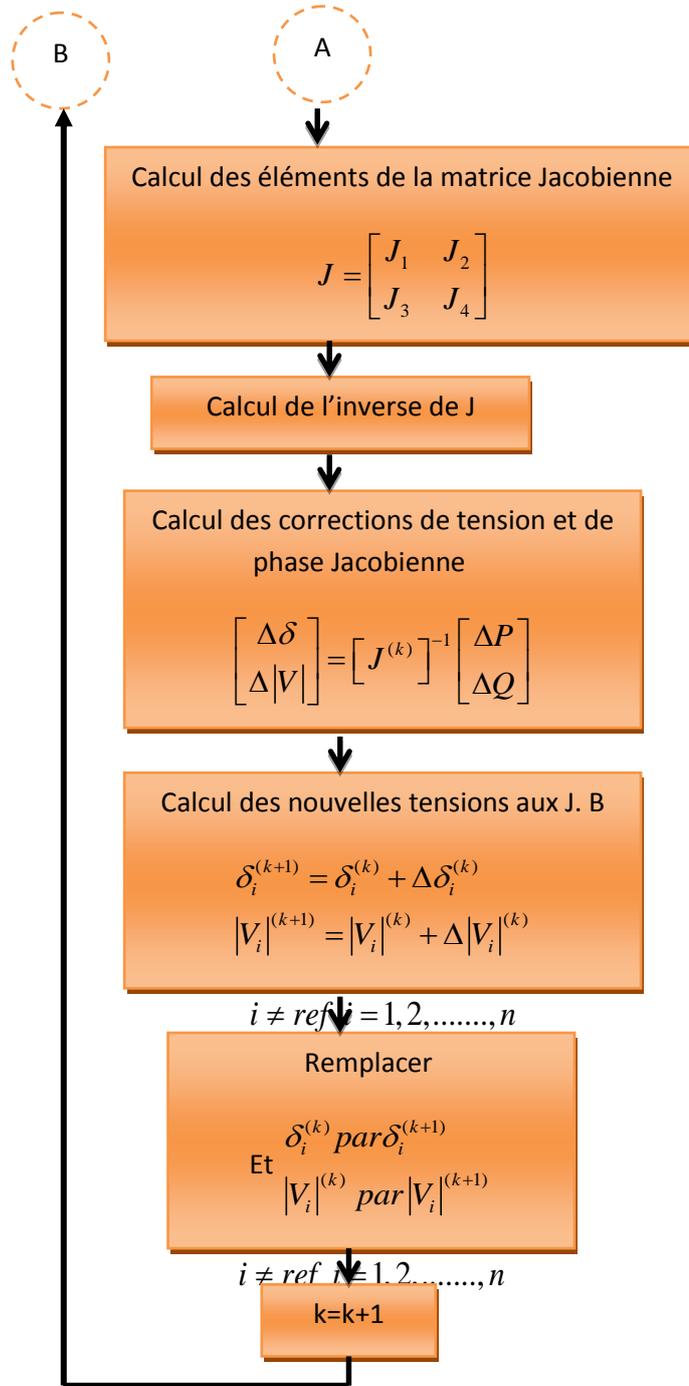


Fig 1.2: Organigramme de la méthode de N-R.

1.8 Stabilité de tension

La stabilité de tension concerne la capacité d'un système de puissance à maintenir des tensions acceptables à tous ses nœuds, dans des conditions de fonctionnement normales ou suite à une perturbation. L'instabilité de tension résulte de l'incapacité du système production-transport à fournir la puissance demandée par la charge. Elle se manifeste généralement sous forme d'une décroissance monotone de la tension.

Selon l'amplitude de la perturbation, on distingue la stabilité de tension de petites perturbations et celle de grandes perturbations.

1.8.1 Stabilité de tension vis-à-vis des petites perturbations

La stabilité de tension de petites perturbations concerne la capacité du réseau électrique à maintenir la tension dans les limites permises en présence de perturbations telles que: une variation faible de la charge, de la production,...etc.

1.8.2 Stabilité de tension vis-à-vis des grandes perturbations

Elle est définie comme la capacité du réseau électrique à maintenir les tensions des nœuds dans les limites de fonctionnement permises en présence des grandes perturbations à savoir la perte d'équipement de transport ou de production, le court circuit,...etc.

Dans ce mémoire, nous nous intéressons seulement à la stabilité de tension. Une étude détaillée sera présentée dans la section suivante.

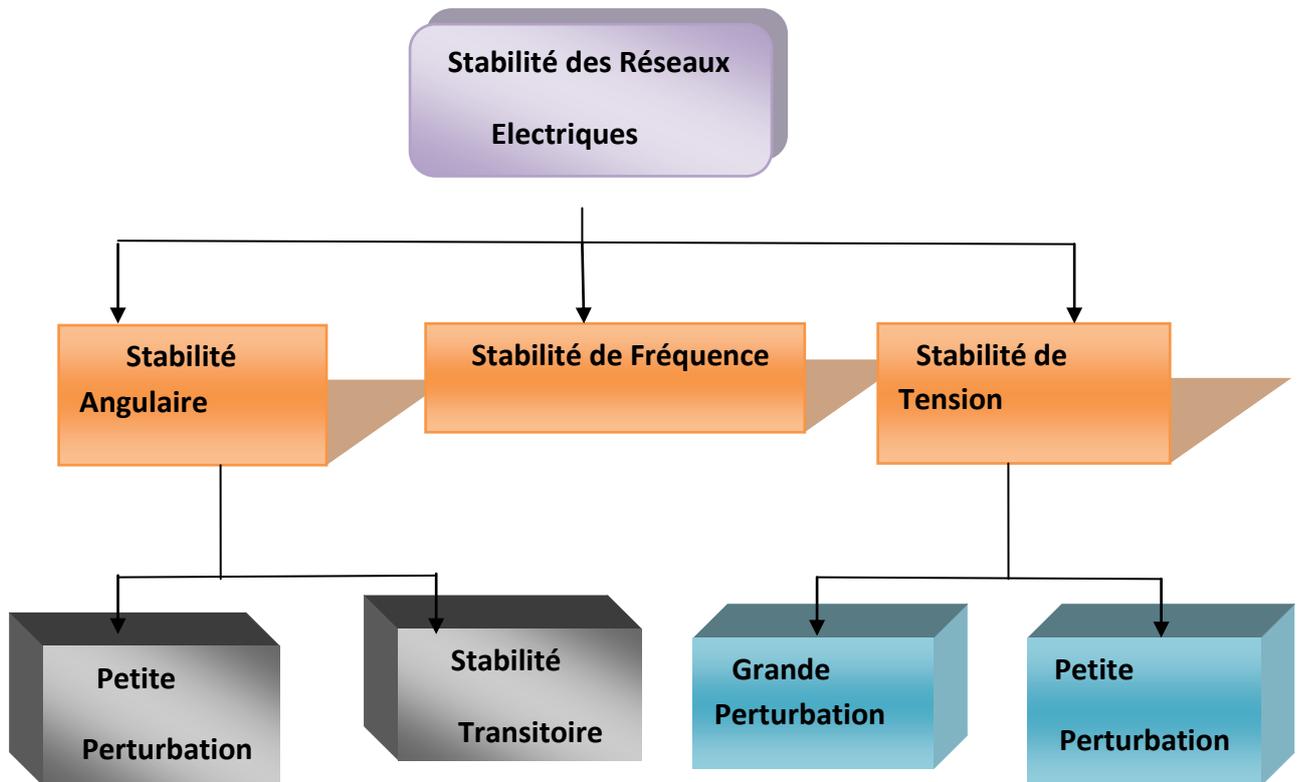


Fig 1.3 : Classification des types de stabilité des réseaux électriques.

1.9 STABILITE DE TENSION

Dans les années précédentes, la stabilité angulaire a été le sujet préférentiel de nombreuses d'études et de recherches après la multiplication des réseaux interconnectés [06]. Ces travaux ont contribué à l'émergence de nouvelles technologies qui ont considérablement contribué à l'atténuation des oscillations dues à l'instabilité angulaire [06]. Cependant, sous l'influence des perturbations, apparaît un autre type d'instabilité, caractérisé par des chutes de tension dans certaines zones, sans altérer systématiquement le synchronisme entre les générateurs [06]. Ce phénomène est désigné sous le nom d'effondrement de tension. L'analyse des événements d'instabilité de tension, montre que les autres types d'instabilité peuvent se produire à différentes étapes d'un effondrement de tension [06].

L'instabilité de tension englobe plusieurs phénomènes qui se produisent simultanément. Pour cela il existe plusieurs définitions de la stabilité de tension dans la littérature.

Définition IEEE [06]

- La stabilité de tension est la capacité du réseau à maintenir la tension dans les limites permises de sorte que, lorsque l'admittance de charge augmente, la puissance demandée par la charge augmente, dans ce cas la puissance et la tension doivent être contrôlables.
- L'effondrement de tension est le processus par lequel l'instabilité de tension conduit à une tension très faible dans une partie ou dans la totalité du réseau qui cause un effondrement en cascade du réseau, sans détruire nécessairement le synchronisme entre les générateurs.
- D'autre part, la notion de la sécurité de tension et plus large que la stabilité de tension, elle est définie comme la capacité du réseau électrique à maintenir son fonctionnement stable après chaque perturbation ou changement défavorable du système.

1.9.1 Causes d'instabilité de tension

Les problèmes d'apparition du phénomène d'écroulement de tension sont toujours liés à la difficulté de régler la tension au dessus d'une certaine valeur appelée tension critique [07]. Généralement, l'effondrement de tension se produit dans les réseaux électriques qui sont fortement chargés, court-circuités et/ou ont un manque de la puissance réactive [08] ; dans cette situation le réseau électrique ne peut pas assurer la puissance réactive demandée par la charge. Ceci est du à des limitations sur la production et la transmission de la puissance réactive, de telle sorte que, la puissance réactive des générateurs et des systèmes FACTS est limitée par des contraintes physiques. En plus, la puissance réactive générée par des bancs de condensateur est relativement réduite à des tensions basses. La limite sur le transport d'énergie réactive est due principalement aux pertes réactives élevées dans les lignes électriques fortement chargées. Les principales causes de l'instabilité de tension sont présentées dans la section suivante.

1.9.1.1 Production trop éloignée de la consommation

Dans la plupart du temps les sources d'énergie électrique se trouvent loin des zones de consommation. Cette situation rend le transport de l'énergie réactive très difficile à cause des pertes réactives très élevées. Cette difficulté de transport d'énergie réactive augmente la probabilité d'apparition d'une instabilité ou d'un effondrement de tension.

1.9.1.2 Manqué local d'énergie réactive

L'effondrement de tension est fortement lié au manque de la puissance réactive requise pour maintenir le profil de tension dans une marge de fonctionnement permise [06]. A un certain niveau de charge, le réseau électrique ne satisfait pas la puissance réactive demandée par la charge à cause des limitations sur la production et la transmission de celle-ci. La limitation de production de la puissance réactive inclut les générateurs et les équipements FACTS ainsi que la puissance réactive limitée des condensateurs [08]. La limite de production de la puissance réactive des générateurs est due principalement aux contraintes thermiques exercées sur le bobinage rotorique et statorique. Sans la limitation thermique, l'instabilité et l'effondrement de tension sont souvent impossibles. Dans le même contexte, les équipements FACTS sont de très grande dimension.

Pour bien comprendre l'influence de la puissance réactive sur l'effondrement de tension, on considère un réseau simple à deux nœuds de la figure 1.4.

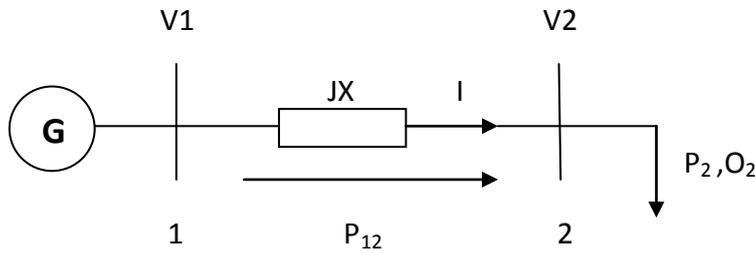


Fig 1.4 : Réseau électrique à deux nœuds.

$$\bar{S}_2 = P_2 + jQ_2 \quad (1.44)$$

$$= \left[\frac{V_1 \cos \delta + j V_2 \sin \delta - V_2}{jX} \right]^*$$

$$= \frac{V_1 V_2}{X} \sin \delta + j \left[\frac{V_1 V_2 \cos \delta - V_2^2}{X} \right]$$

$$P_2 = \frac{V_1 V_2}{X} \sin \delta = P_{\max} \sin \delta \quad (1.45)$$

$$Q_2 = \frac{V_1 V_2 \cos \delta - V_2^2}{X} \quad (1.46)$$

De même pour le nœud 1 :

$$P_1 = \frac{V_1 V_2}{X} \sin \delta = P_{\max} \sin \delta \quad (1.47)$$

$$Q_1 = \frac{V_1^2 - V_1 V_2 \cos \delta}{X} \quad (1.48)$$

Pour la puissance active au bus 2, l'équation (1.45) montre clairement que lorsque la puissance P_2 augmente, la turbine doit fournir plus d'énergie pour augmenter l'angle de puissance δ afin de satisfaire la demande de la charge.

Par conséquent, la puissance réactive Q_2 diminuera ou même reviendra négative à cause de la diminution du $\cos \delta$. Autrement, l'équation (1.48) montre que la puissance réactive Q_1 augmentera brusquement. Donc la différence entre la puissance réactive aux nœuds 1 et 2 (pertes réactives) augmentera rapidement. On peut conclure

que le transport de la puissance réactive n'est pas économique à cause de l'augmentation des pertes réactives à des niveaux de charge relativement élevés.

La meilleure solution à ce problème est de produire cette énergie localement, proche de la consommation, par l'installation de batteries de condensateurs, de compensateurs synchrones (génératrices synchrones avec $P=0$) ou des compensateurs statiques (FACTS).

1.9.1.3 Charge appelée trop importante

L'une des causes de l'instabilité de tension correspond à une charge élevée. Ceci est du à l'augmentation croissante de la demande et à un large transfert d'énergie entre compagnies [04, 05,09, 10]. Une instabilité de tension peut se produire en particulier lorsque la charge élevée est plus importante que celle prévue et le risque est d'autant plus grand que la consommation réactive est également plus grande que prévue.

1.10 Analyse de la stabilité de tension

Il y a deux types d'analyse de la stabilité de tension : dynamique et statique .L'analyse dynamique se base sur des simulations dans le temps afin de résoudre des équations non linéaires différentielles/algébriques du système. Par contre, l'analyse statique est basée sur la solution des équations conventionnelles ou modifiées du problème d'écoulement de puissance [06].

1.10.1 Analyse dynamique

L'analyse elle fournit des réponses temporelles précises dans le domaine de simulation des réseaux électriques. La détermination précise des temps critiques des différents événements menant à l'instabilité de tension est essentielle pour l'analyse post-perturbation et la coordination de la protection et de la commande. Cependant, l'analyse dynamique consomme beaucoup de temps en termes de calculs et de traitement des résultats. En outre, l'analyse dynamique ne fournit pas aisément l'information concernant la sensibilité ou le degré d'instabilité de tension, ce qui la rend impraticable pour l'analyse de certaines conditions du fonctionnement du système ou pour déterminer les limites de stabilité de la tension [06].

1.10.2 Analyse statique

A l'inverse de l'analyse dynamique, l'analyse statique de la stabilité de tension implique seulement la solution des équations algébriques du problème d'écoulement de puissance. De ce fait, du point de vue calcul, elle est beaucoup plus efficace que l'analyse dynamique. L'analyse statique est idéale pour la majeure partie des études dans lesquelles des limites de stabilité de tension pour des pré-contingences et des post-contingences doivent être déterminées [06]. Généralement, l'analyse de la stabilité statique de tension est utilisée afin de vérifier si un point de fonctionnement est stable ou instable, évaluer la marge de stabilité d'un point de fonctionnement et identifier le point d'effondrement de tension [12]. Dans notre travail, on s'intéressera seulement aux méthodes d'analyse statique. La section suivante comporte quelques méthodes populaires dédiées à ce type de problème.

1.10.3 Méthodes d'Analyse de la stabilité statique de tension

Dans cette partie, des indices de la stabilité de tension sont proposés avec un modèle standard d'écoulement de puissance où on assumera que la variation des puissances active et réactive est le paramètre essentiel qui conduit le réseau à un effondrement de tension (ou à la singularité de la matrice Jacobienne). Les écarts des puissances active et réactive du problème d'écoulement de puissance sont définis par les équations suivantes.

$$\begin{bmatrix} \Delta P(x, \lambda) \\ \Delta Q(x, \lambda) \end{bmatrix} = f(x, \lambda) = 0 \quad (1.49)$$

Où X représente le vecteur d'état du problème d'écoulement de puissance qui englobe les vecteurs tensions V et déphasages δ ; la variable λ représente un paramètre scalaire ou le facteur de charge utilisé pour simuler l'augmentation de la charge qui conduit à l'effondrement du système. La variation de la charge et de la génération, est exprimée par les équations (1.50).

$$\begin{aligned} P_{Di} &= \lambda P_{Di0} \\ Q_{Di} &= \lambda Q_{Di0} \\ P_{Gi} &= \lambda K_{Gi} P_{Gi0} \end{aligned} \quad (1.50)$$

Tel que :

- P_{i0} et Q_{i0} les puissances active et réactive au nœudi.
- P_{Gi0} la puissance générée par la machine i dans le cas initial.
- K_{Gi} le facteur de contribution de chaque générateur i pour satisfaire la demande de la charge.

1.10.3.1 Valeur singulière minimale

Les valeurs singulières ont été utilisées dans les réseaux électriques en raison de leur décomposition ortho-normale utilisée dans la matrice Jacobienne. Pour une matrice carrée A de dimension $n \times n$, nous avons :

$$A = X \Sigma Y^t = \sum_{i=1}^n x_i \sigma_i Y_i^t \quad (1.51)$$

Où, les valeurs singulières x_i et y_i sont les thi colonnes des matrices unitaires X et V . Σ est une Matrice diagonale des valeurs singulières réelles positives σ_i , telle que:

$$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_i \geq 0 \quad (1.52)$$

L'application de la méthode de décomposition en valeurs singulières dans l'étude de stabilité statique de tension est utilisée pour suivre la valeur singulière minimale qui se rapproche du zéro lors de l'effondrement de tension.

Pour l'analyse des réseaux électriques, la matrice A correspond à la matrice Jacobienne d'écoulement de puissance.

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \delta} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \delta} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix} \quad (1.53)$$

Comme il est signale dans [12], [13], la valeur singulière minimale de la matrice Jacobienne de problème d'écoulement de puissance peut être utilisée comme un indice qui caractérise la proximité du système au point d'effondrement de tension. Pour une matrice Jacobienne J de dimension $n \times n$:

$$J = X \Sigma Y^t = \sum_{i=1}^n x_i \sigma_i Y_i^t \quad (1.54)$$

En utilisant le modèle d'écoulement de puissance de l'équation (1.55). Les équations linéarisées peuvent être exprimées comme suit :

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \Delta V \\ \Delta \delta \end{bmatrix} \quad (1.55)$$

L'équation (1.48) peut être écrite comme suit :

$$\begin{bmatrix} \Delta V \\ \Delta \delta \end{bmatrix} = V \Sigma^{-1} U^t \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^n \sigma_i^{-1} v_i u_i^t \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (1.56)$$

La valeur singulière minimale est une mesure relative de la proximité de la matrice Jacobienne à la singularité et en conséquence à la proximité du système au point d'effondrement de tension.

L'équation (1.49) peut être re-écrite comme suit :

$$\begin{bmatrix} \Delta V \\ \Delta \delta \end{bmatrix} = \sigma_n^{-1} v_n u_n^t \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (1.57)$$

Nous pouvons obtenir les informations suivantes à partir des vecteurs singuliers droit et gauche:

- Les entrées maximales dans v_n indiquent les tensions et les angles les plus sensibles aux variations de la puissance réactive.
- Les entrées maximales dans u_n indiquent les nœuds les plus sensibles aux variations de la puissance active.

1.10.3.2 Valeurs propres

Les valeurs propres sont très semblables à la méthode de la décomposition en valeurs singulières. Cependant elles sont utilisées pour déterminer la proximité du point d'effondrement de tension. La décomposition des valeurs propres de la matrice Jacobienne standard J peut être écrite comme suit :

$$J = W \Delta U^t = \sum_{i=1}^n w_i \mu_i U_i^t \quad (1.58)$$

Où la matrice W représente la matrice des vecteurs propres droits w_i , la matrice U représente la matrice des vecteurs propres gauches u_i , et Δ représente la matrice diagonale des valeurs propres μ_i .

Dans cette méthode, l'amplitude des valeurs propres donne une information sur la proximité du système du point d'effondrement, lequel est caractérisé par une valeur propre presque nulle. D'autre part l'amplitude des vecteurs propres fournit des

informations sur le mécanisme d'effondrement de tension, qui se résument dans les points suivants:

- ❖ L'entrée maximale du vecteur propre droite correspond au nœud le plus critique en terme de la stabilité de tension.
- ❖ L'entrée maximale du vecteur propre gauche indique le nœud le plus critique en terme de la variation de la puissance active.

L'inconvénient majeur de la méthode des valeurs singulières ainsi que la méthode des valeurs propres est leur comportement fortement non linéaire près du point d'effondrement de tension lorsque les limites de production d'énergie réactive des générateurs sont considérées [12]. Les deux indices montrent aussi une chute importante brusque près du point d'effondrement. Ces inconvénients rendent les deux indices insuffisants pour une évaluation efficace de la stabilité de tension.

1.10.3.3 Marge de charge (loading margin)

La marge de charge est l'indice le plus utilisé dans l'évaluation de la stabilité statique de tension: c'est la quantité de la charge additionnelle qui causerait un effondrement de tension. En termes plus simples, c'est la distance entre le point de fonctionnement actuel et le point qui causerait l'effondrement de tension. Dans la plupart des études de stabilité statique de tension, la charge est choisie comme paramètre essentiel qui conduit le système à l'effondrement.

Les avantages de la marge de charge, pris comme indice de stabilité de tension, peut se résumer dans les points suivants :

- Simple à calculer, bien admis, et facile à comprendre.
- Exige seulement un modèle statique du réseau électrique.
- La marge de charge est un indice précis qui tient en compte la non linéarité du réseau électrique ainsi que certaines limites telles que les limites sur la production d'énergie réactive.
- Une fois la marge de charge calculée, il est facile de déterminer sa sensibilité vis-à-vis de n'importe quel paramètre du réseau.

Malgré ces avantages, la marge de charge dispose de quelques inconvénients, qui peuvent être résumés dans les points suivants :

- Le calcul de la marge de charge est plus coûteux, comparée à d'autres indices.
- La marge de charge est basée sur la prévision de la direction d'augmentation de la charge ,mais cette information n'est pas toujours aisément disponible.

Dans la pratique, la méthode directe et la méthode continue sont utilisées pour l'évaluation de la marge de charge [14]. Dans ce mémoire, on s'intéressera seulement à la méthode continue à cause de ses avantages cités précédemment.

1.11 Ecoulement de puissance en continu (Continuation Power Flow)

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 [08]. 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 [08]. Ajarapu et al. [14] 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 [14]. Durant l'application de cette méthode, la matrice Jacobinne reste bien conditionnée même autour du point d'effondrement [14].

- ✓ 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 [12].

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'incrémentatation de la charge est considérée comme une nouvelle variable du

problème d'écoulement de puissance [14]. 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 une valeur différente de la charge [14]. 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 [14].

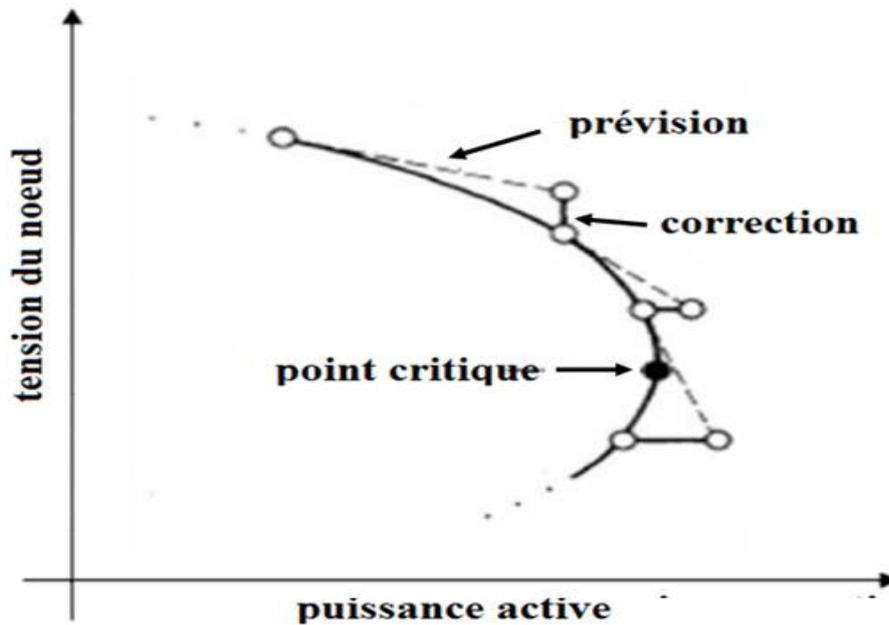


Fig 1.5 : Principe d'écoulement de puissance en continu.

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 $2n_1 + n_2 + 1$, tel que n_1 représente le nombre de nœuds PQ et n_2 représente le nombre de nœuds 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).

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 équations différentielles non linéaires, où le recours aux méthodes numériques est inévitable. Quelques méthodes sont étudiées et nous avons conclu 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

Une analyse efficace de la stabilité de tension reste la solution appropriée pour s'éloigner du point d'effondrement. Dans ce mémoire, nous avons présenté les deux types d'analyse qui existent, à savoir, l'analyse statique et l'analyse dynamique. Puis nous avons focalisé notre étude sur l'analyse statique de la stabilité de tension. Trois indices d'évaluation de la stabilité de tension sont présentés : les valeurs propres, la valeur minimale singulière, et la marge de stabilité de tension.

Chapitre -2'

Etude de Dispositifs FACTS

Introduction

Avec le développement technologique et industriel que vit le monde entier la demande en énergie électrique est en augmentation continue et sans cesse. Pour satisfaire ces besoins et acheminer cette énergie aux points de consommation dispersés sur un large espace géographique; les réseaux électriques, ayant des capacités de transit limitées à cause des limites thermiques des lignes, doivent s'élargir et de nouvelles lignes d'extension seront ajoutées. Face à ce problème et devant les contraintes environnementales, écologiques et économiques de reconstructions de nouvelles lignes, la compagnie américaine EPRI (Electric Power Research Institute) a lancé, en 1988, un projet d'étude des systèmes FACTS afin de mieux maîtriser le transit de puissance dans les lignes électriques et d'augmenter leurs capacités de transfert.

Aussi ces réseaux électriques de taille importantes seront confrontés par divers problèmes de fonctionnement à cause du contrôle traditionnel utilisant des systèmes de commande électromécaniques de temps de réponse lent par rapport à ces nouveaux systèmes FACTS à base d'interrupteurs statiques et de courts temps de réponse (moins d'une seconde). Aujourd'hui cette technologie "FACTS" s'impose pour les systèmes énergétiques en augmentant leurs capacités de transport, en améliorant le contrôle des paramètres de ces derniers donc leur assurer une flexibilité du transfert de l'énergie et améliorer sa stabilité.

2.1 Définitions et généralités

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

Avec leurs aptitudes de modifier les caractéristiques apparentes des lignes, les FACTS sont capables d'accroître la capacité du réseau dans son ensemble en contrôlant les transits de puissances. Il est donc important de souligner que les dispositifs FACTS ne peuvent pas augmenter la capacité thermique des lignes de transport. En revanche, ils

permettent d'utiliser les lignes plus proches de leurs limites en repoussant d'autres limitations, en particulier celles liées à la stabilité.

Finalement, il faut noter que les FACTS ne remplacent pas la construction de nouvelles lignes, Ils sont un moyen de différer les investissements en permettant une utilisation plus efficace du réseau existant.

2.2 Rôle des dispositifs FACTS

Le développement des dispositifs FACTS est essentiellement dû aux progrès réalisés dans le domaine des semi-conducteurs de puissance et plus particulièrement des éléments commandables tels le thyristor et le thyristor GTO. Les FACTS représentent une alternative aux dispositifs de réglage de puissance utilisant des techniques passives : bobine d'induction et condensateur déclenchés par disjoncteur, transformateur déphaseur à régleur en charge mécanique, etc. dans les dispositifs FACTS, les interrupteurs électromécaniques sont remplacés par des interrupteurs électroniques. Ils disposent ainsi de vitesses de commande très élevées et ne rencontrent pas les problèmes d'usure de leurs prédécesseurs. De ce fait, les FACTS possèdent une très grande fiabilité et une flexibilité pratiquement sans limite.

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

- Le maintien de la tension à un niveau acceptable en fournissant de la puissance réactive lorsque la charge est élevée et que la tension est trop basse, alors qu'à l'inverse ils en absorbent si la tension est trop élevée;
- Le contrôle des transits de puissances de manière à réduire, voire supprimer, les surcharges dans les lignes ou les transformateurs ainsi que pour éviter les flux de bouclage dans le réseau. Ils agissent alors en contrôlant la réactance des lignes et en ajustant les déphasages. De par leur vitesse de commande élevée, les FACTS possèdent de nombreuses qualités en régime dynamique [15]. Ils permettent en particulier:
 - D'accroître le réserve de stabilité transitoire;

- D’amortir les oscillations de puissance;
- De supporter de manière dynamique la tension.

Les dispositifs FACTS ont également une action bénéfique sur les niveaux des courants de court circuit ainsi qu’encas de résonance hypo synchrone.

2.3 TYPES DE FACTS

Nous citons ici les principaux de ces systèmes :

- Compensateur statique de puissance réactive SVC (Static Var Compensator).
- Compensateur synchrone statique STATCOM (Synchrone Static Compensator).
- Contrôleur universel de flux de puissance UPFC (Universel Power Flow Controller)
- Compensateur série synchrone statique SSSC (Synchrone Static Compensator).
- Condensateur série fixe et commandé par thyristor TCSC (Thyristor Controlled Série Capacitor).
- Transformateur déphaseur PST (Phase- Shifiting compensateur).

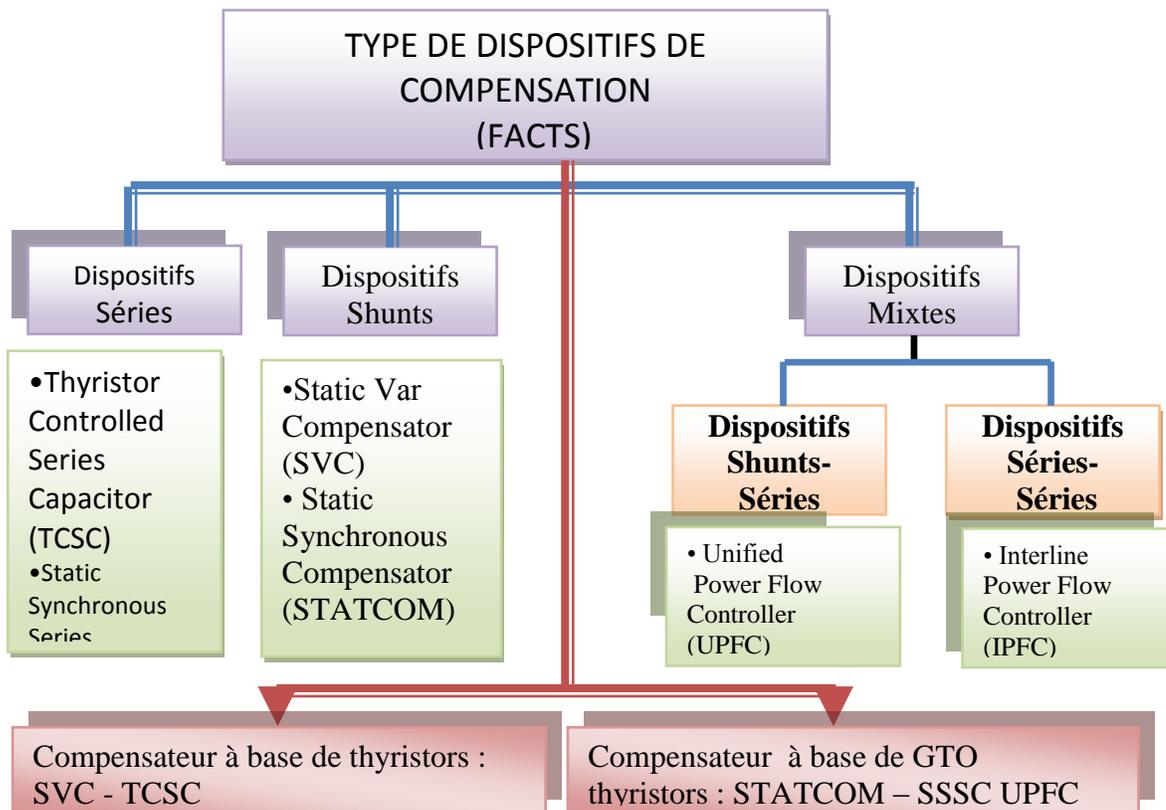


Fig 2.1: classification des dispositifs FACTS[16]

2.4 différents types des systèmes FACTS

Les systèmes de transmission à courant alternatif (FACTS) traduisent un concept qui regroupe tous les dispositifs à base d'électronique de puissance qui permettent d'améliorer l'exploitation du réseau électrique. La technologie de ces systèmes (interrupteur statique) leur assure une vitesse beaucoup plus que celle des systèmes électromécaniques classiques, l'intérêt de ces systèmes et non seulement de pouvoir contrôler l'écoulement de puissance dans les réseaux électriques mais aussi d'augmenter la capacité effective de transport jusqu'à leur limite thermique maximale tout en maintenant voir en améliorant la stabilité des réseaux électriques [17], [18].

Les systèmes "FACTS" peuvent être classés en trois catégories.

- ❖ Les compensateurs parallèles.
- ❖ Les compensateurs séries.
- ❖ Les compensateurs hybrides (série – parallèle).

2.5 Structure des Principaux Dispositifs FACTS

2.5.1 Compensateurs parallèle

Vers la fin des années 60, plusieurs équipements utilisant l'électronique de puissance ont fait leurs apparitions. Ces derniers avaient l'avantage d'éliminer les parties mécaniques et d'avoir un temps de réponse très court. Ces équipements étaient constitués essentiellement d'une inductance en série avec un gradateur. Le retard à l'amorçage des thyristors permettait de régler l'énergie réactive absorbée par le dispositif. 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 active et réactive qui transitent dans la ligne [16]

Les compensateurs parallèles les plus utilisés

2.5.1.1 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 [15].

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.

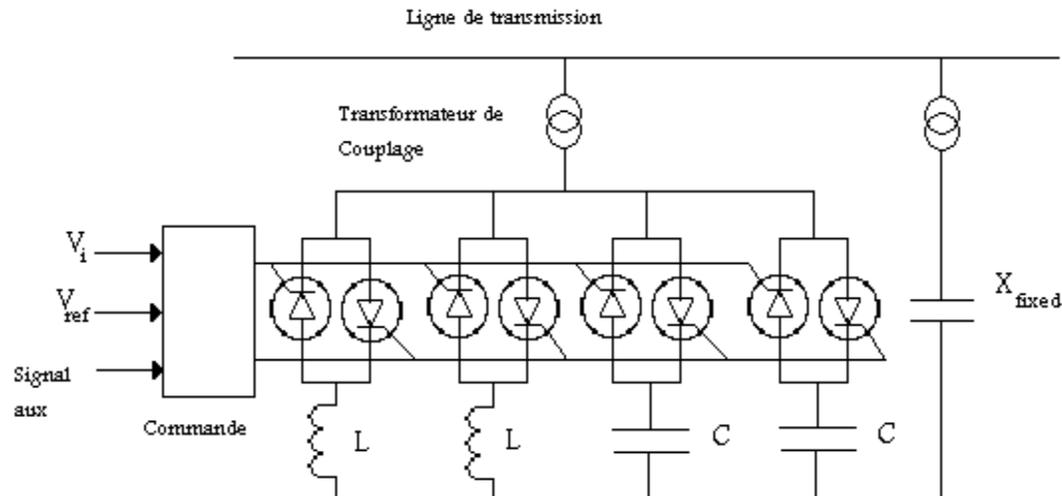


Fig 2.2 : Schéma type du SVC en connexion shunt.

2.5.1.2 Compensateur statique synchrone (STATCOM)

IEEE définit le STATCOM (Static Synchronous Compensator) comme un générateur synchrone fonctionnant comme un compensateur parallèle de l'énergie réactive dont le courant capacitif ou inductif généré peut être contrôlé séparément de la tension du réseau [15]. Le compensateur statique synchrone STATCOM, autrefois appelé compensateur statique de puissance réactive avancé fait partie de la deuxième génération des FACTS. Il correspond à l'équivalent statique exact de la machine synchrone classique fonctionnant en compensateur, mais sans inertie. Il est principalement utilisé pour la compensation dynamique des réseaux, afin de faciliter la tenue de tension, d'accroître la stabilité en régime transitoire et d'amortir les oscillations de puissance.

Le STATCOM génère ou absorbe la puissance réactive Figure (2.3). Ce qui lui permet d'amortir les oscillations du réseau.

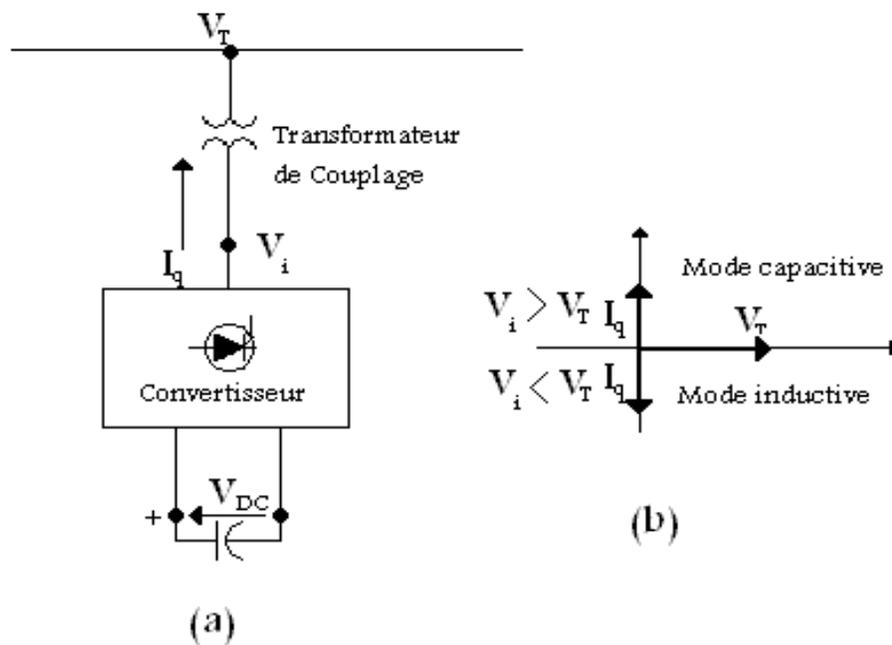


Fig 2.3 :Schéma: (a) STATCOM. (b) caractéristiques tension / courant du STATCOM

2.5.2 Compensateurs Série

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 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. [15]

2.5.2.1 Compensateur série commuté par thyristor(TSSC)

IEEE définit le TSSC (Thyristor Switched Series Capacitor) comme un compensateur capacitif qui se compose de plusieurs condensateurs en série. Chaque condensateur commandée par un commutateur de thyristor qui assure une compensation par palier [15]. Le Compensateur série commuté par thyristor TSSC (Thyristor Switched Series Capacitor), est le premier qui apparaît dans la famille des compensateurs série.

Il est constitué de plusieurs capacités montées en série, chacun étant shunté par une valve à thyristors montée en dérivation.

2.5.2.2 Compensateur série commandé par thyristor(TCSC)

IEEE définit le TCSC comme étant un compensateur à réactance capacitif qui consiste en une série de condensateurs en parallèle avec des inductances commandées par thyristor afin de pouvoir assurer une variation homogène de la réactance capacitive [15]. Le TCSC permet une compensation N qui varie entre 20% inductive et 80% capacitive [20].

La figure (2.4) décrit le schéma de compensation série d'une ligne de transmission, dans lequel est inclus un TCSC à plusieurs modules. Il est possible de varier l'impédance totale de compensateur en modifiant l'angle d'amorçage du thyristor. La compensation série de la ligne de transmission, commandé par thyristor permet d'amortir les fluctuations de puissance car le TCSC est essentiellement utilisé afin de contrôler l'écoulement de puissance

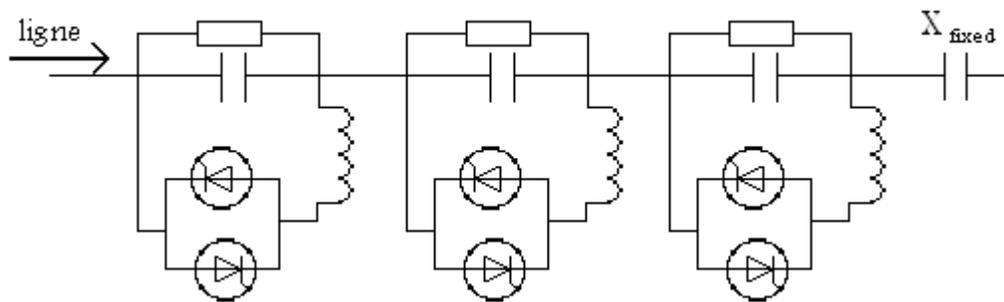


Fig 2.4:Schéma d'un TCSC multi gradins pour une compensation série.

2.5.2.3 Compensateur série synchrone(SSSC)

IEEE définit le SSSC (Static Synchronous Series Compensator) comme étant un générateur synchrone statique fonctionnant sans source d'énergie électrique extérieure comme les compensateurs série, dont la tension de sortie est contrôlable indépendamment du courant de ligne afin d'augmenter ou de diminuer la chute de tension globale, et ainsi de contrôler la puissance électrique transmise [15].

Le compensateur série synchrone SSSC est un dispositif FACTS de deuxième génération. Il est formé d'un convertisseur de tension inséré en série dans la ligne par l'intermédiaire d'un transformateur. Le SSSC agit sur le courant de la ligne en insérant une tension en quadrature avec ce dernier, la tension pouvant être capacitive ou inductive. Un SSSC est capable d'augmenter ou de diminuer le flux de puissance dans une ligne. Le comportement d'un SSSC peut être assimilé à celui d'un condensateur ou d'une inductance série réglable. La différence principale réside dans le fait que la tension injectée n'est pas en relation avec le courant de ligne. De ce fait, le SSSC présente l'avantage de pouvoir maintenir la valeur de tension insérée constante, indépendamment du courant. Il est donc efficace tant pour des petites charges (faibles courants) que pour des grandes charges. Un autre avantage du SSSC réside dans le fait que ce type de compensateur n'insère pas de condensateur en série avec la ligne de transport. De ce fait, il ne peut pas provoquer de résonance hypo synchrone. De plus, la sataille est réduite en comparaison au celle du TCSC. Les applications pour les quelles sont utilisées les SSSC sont identiques à celles où l'on a recours à des condensateurs séries réglables. Ce sont plus particulièrement :

- La commande statique et dynamique des flux de puissances ;
- Amélioration de la stabilité angulaire;
- Atténuation des oscillations électromécaniques.

2.5.3 Compensateur série parallèle (hybride)

Les compensateurs FACTS cités précédemment (série ou parallèle), 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, il est possible d'obtenir des dispositifs hybrides capables de contrôler simultanément les différentes variables précitées.

2.3.3.3.1 Contrôleur de transit de puissance universel (UPFC)

IEEE définit l'UPFC comme étant une combinaison entre un STATCOM et un SSSC couplés via une liaison à courant continu, pour permettre un écoulement bidirectionnel de la puissance active entre la sortie du SSSC et celle du STATCOM.

L'UPFC permet le contrôle de la tension, de l'impédance, et de l'angle ou d'écoulement de la puissance active et réactive de la ligne [15].

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 ;
- ✓ Amortissement des oscillations de puissance.

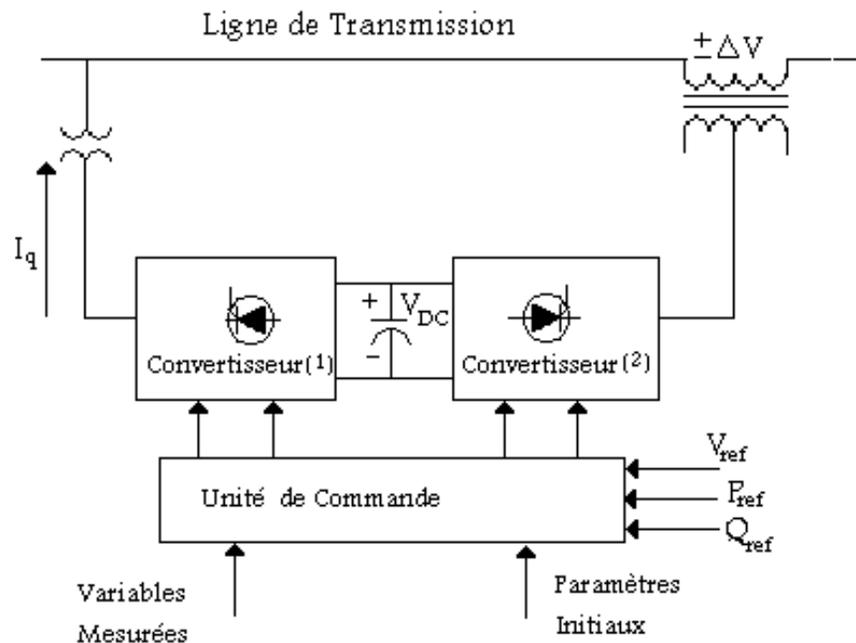


Fig 2.5: Contrôleur de transit puissance unifié

2.5.3.2 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 [15].

Transformateur déphaseur commandé par thyristor TCPST, est le premier équipement FACTS combiné.

2.5.3.3 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.

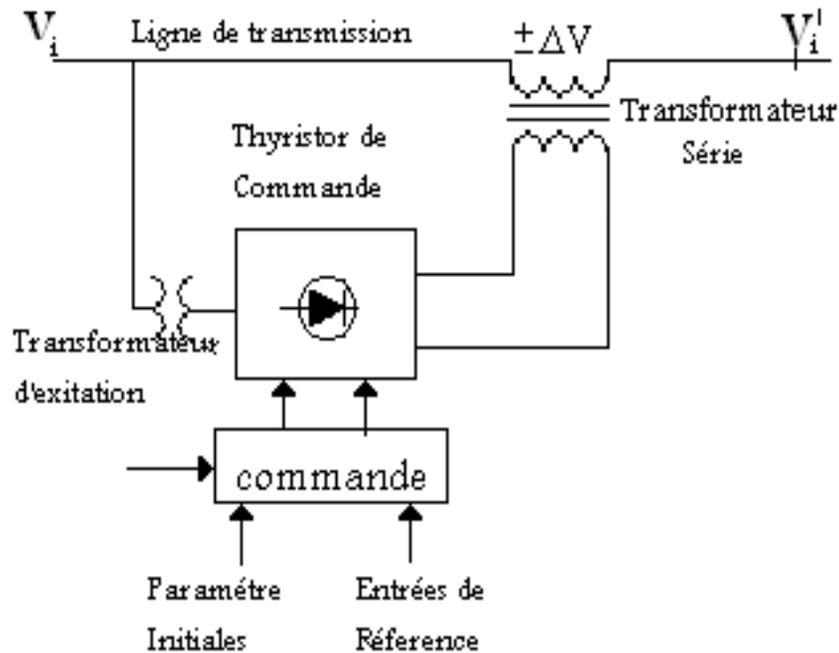


Fig 2.6 : Schéma du contrôle de l'angle de transport par TCPAR

2.5.3.4 Régulateur de tension commandé par thyristor (TCVR)

IEEE définit le TCVR (Thyristor Controlled Voltage Regulator) comme étant un transformateur Contrôlé par thyristor qui permet la commande de la phase de tension d'une manière continue [15].

Le régulateur de tension commandé par thyristor TCVR, est un autre membre de la famille des FACTS combinés. Leur prix relativement réduit, leur confère un avantage certain dans le contrôle de l'écoulement d'énergie réactive.

2.6 Application des FACTS :

L'idée principale des FACTS peut être expliquée par l'équation de base de la puissance transmise à travers une ligne de transport à courant alternatif.

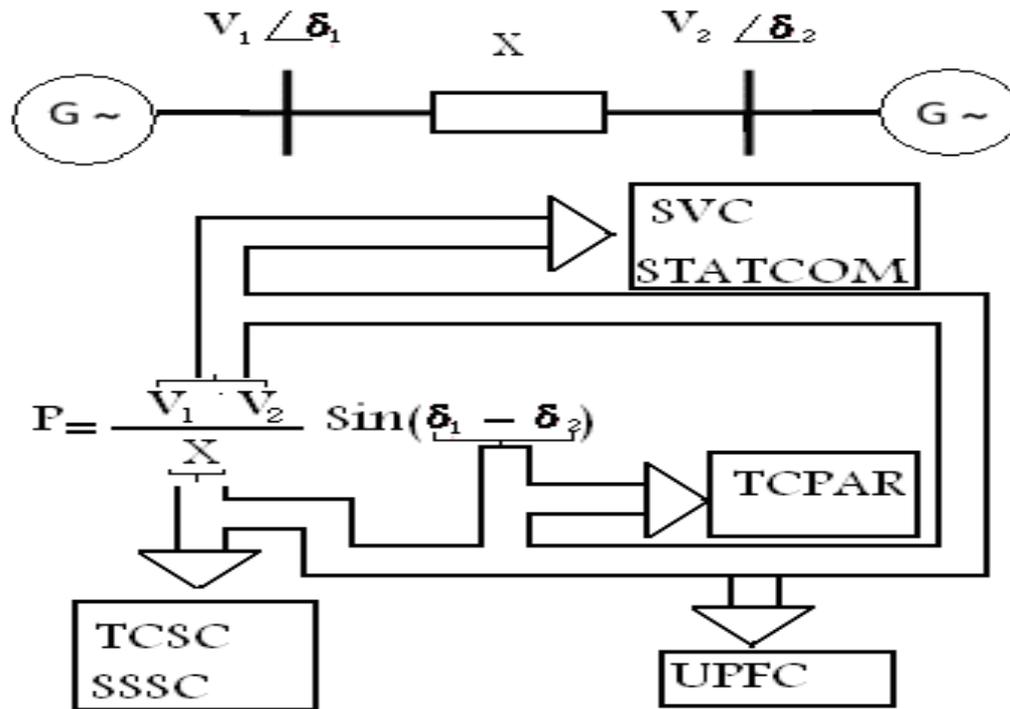


Fig 2.7 : Diagramme schématisant les applications des FACTS dans les réseaux.

La figure I.8 représente la puissance transmise entre deux nœuds du système. Elle dépend des tensions aux deux extrémités de l'interconnexion, de l'impédance de la ligne et de la différence d'angle de phase entre les deux systèmes. Les différents dispositifs de FACTS peuvent activement influencer un ou plusieurs de ces paramètres pour la commande du flux de puissance et pour l'amélioration de la stabilité de tension aux nœuds de l'interconnexion.

Selon la configuration du système, les tâches des FACTS peuvent être récapitulées comme suit:

- Systèmes maillés: Commande du transit de puissance.
- Systèmes radiaux et lignes parallèles: commande de l'impédance.

- Systèmes faiblement connectés: commande de la tension.

Le tableau 2.1 résume d'une manière simple l'impact de l'utilisation de chaque FACTS, à la résolution des différents problèmes qui entravent le bon fonctionnement du réseau électrique.[16]

Tableau 2.1: Application des FACTS a la résolution des problèmes dans le réseau

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

Influence:

Petite → ★.

Moyenne → ★★.

Forte → ★★★.

Les lignes de transport constituent une composante importante du réseau. Elles sont constituées d'impédances série et shunt. L'impédance série peut affecter le maximum de puissance transmise à travers la ligne et l'impédance shunt est à prédominance capacitive. L'impédance série de la ligne, les tensions de départ et d'arrivée ainsi que le déphasage entre les tensions, déterminent la puissance transitée. Les FACTS sont utilisés afin de changer les paramètres série et shunt ainsi que le déphasage des tensions d'arrivées des lignes de transport dans le but de contrôler l'écoulement de puissance [16].

2.7 Coût des dispositifs FACTS

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

Le coût d'une installation FACTS dépend principalement des facteurs tels que les performances requises, la puissance de l'installation, le niveau de tension du système ou encore la technologie du semi-conducteur utilisé.[15]

2.8 Les Applications Principales des FACTS

type	Application
SVC	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Stabilisation dynamique de tension, la capacité de transfert accrue de puissance, variation réduite de tension ➤ Améliorations de stabilité d'angle et de tension ➤ Équilibrage de charge dynamique <p>Appui équilibré de tension</p>
TCSC	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Améliorer la stabilité de coupure et de tension ➤ Commander la ligne flux de puissance ➤ Augmenter la capacité de transfert d'énergie ➤ Atténuation de l'oscillation électromécanique <p>Faciliter des oscillations de subsynchronus d'atténuation</p>
STATCOM	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Stabilisation dynamique de tension ➤ Système d'alimentation amélioré atténuant, atténuation de SSR ➤ Équilibrage de charge dynamique <p>Amélioration de la qualité de puissance</p>

5. Les Avantages et Inconvénients de la Technologie des Dispositifs FACTS [20]

✚ Avantages

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

✚ Inconvénients

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

CONCLUSION

Après l'étude et l'analyse des différents modèles des dispositifs FACTS, on a pu conclure que chaque dispositif impose un modèle bien déterminé d'une part, d'autre part la modélisation de ces dispositifs dynamiques (shunt, série, mixte) facilitent leur intégration dans les méthodes numériques tel que la méthode Newton- Raphson qu'on a utilisé comme un outil de base dans notre travail.

Chapitre -3'

Résultats et interprétations

INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous allons procéder à l'implantation des dispositifs FACTS dans un réseau électrique et voir leurs influences sur l'amélioration du profil de tension et sur les pertes réactives dans le régime normal.

Le réseau test a été utilisé pour valider l'efficacité du modèle du STATCOM intégré dans le programme standard de Newton-Raphson (N-R).

3.1 Réseaux Tests

C'est le réseau test IEEE 30Bus qui représente une portion du système de puissance électrique américain (in the Midwestern US) pour Décembre 1961. La tension est de 135 kV. [15]

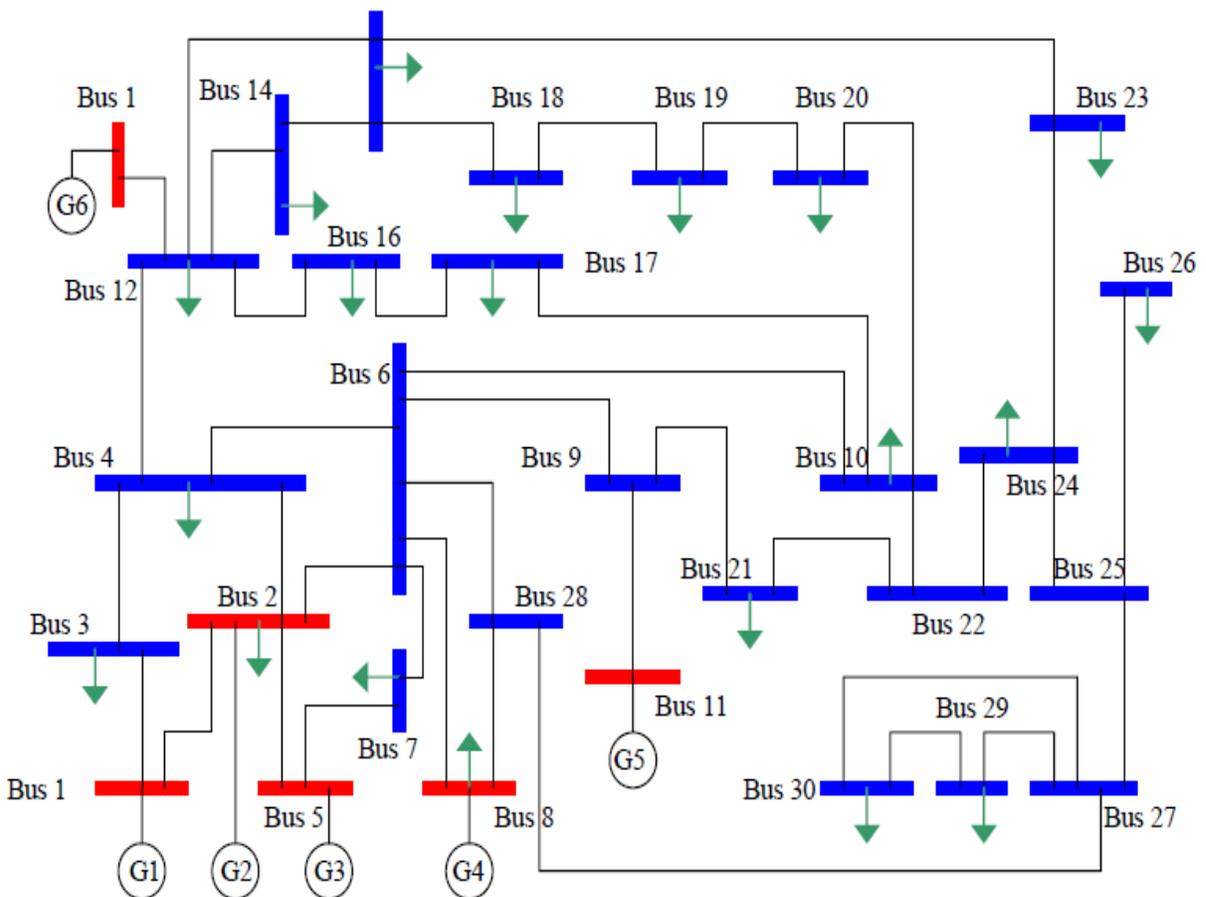


Fig.3.1 : Réseau test 30JB

Ce réseau électrique est constitué de 30 jeux de barres et 6 générateurs (aux jeux de barres $n=^{\circ} 1, 2, 5, 8, 11$ et 13) injectant leurs puissances à un système alimentant 20 charges à travers 37 lignes de transport et 4 transformateur Fig (3.1). La tension de base pour chaque jeu de barres est de 100kV.

3.2 Logiciel de simulation :

PSAT : est une boîte à outils Matlab pour l'analyse statique et dynamique et le contrôle des systèmes d'alimentation électrique, le choix de ce logiciel est justifié par la richesse de sa bibliothèque (similitude).

Le Power System Analysis Toolbox (PSAT)

- PSAT est écrit par Federico Milano, en Septembre 2001, alors qu'il était étudiant en doctorat étudiant à l'Université di Genova, Italie
- Première version publique de la psat achevée en Novembre 2002, quand il a été chercheur invité à l'Université de Canada
- ✚ Simuling bibliothèque pour dessiner des réseaux.
- ✚ Des interfaces graphiques pour le système et les paramètres de réglage de routine.
- ✚ L'utilisateur définit la construction du modèle et de l'installation.
- ✚ Les filtres définit la construction du données vers et à partir d'autres formats Buches de commande.

Modèle de système électrique

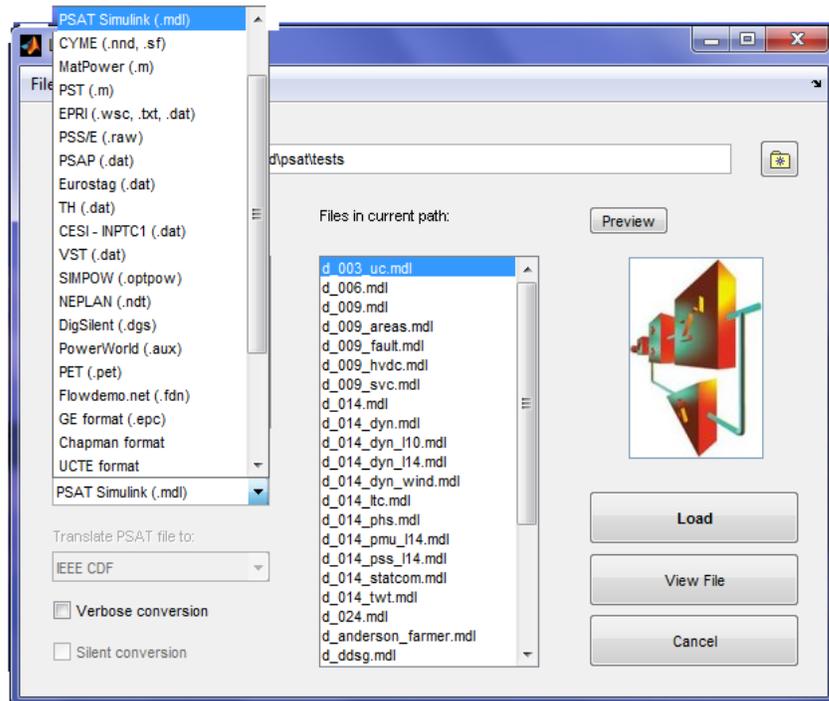
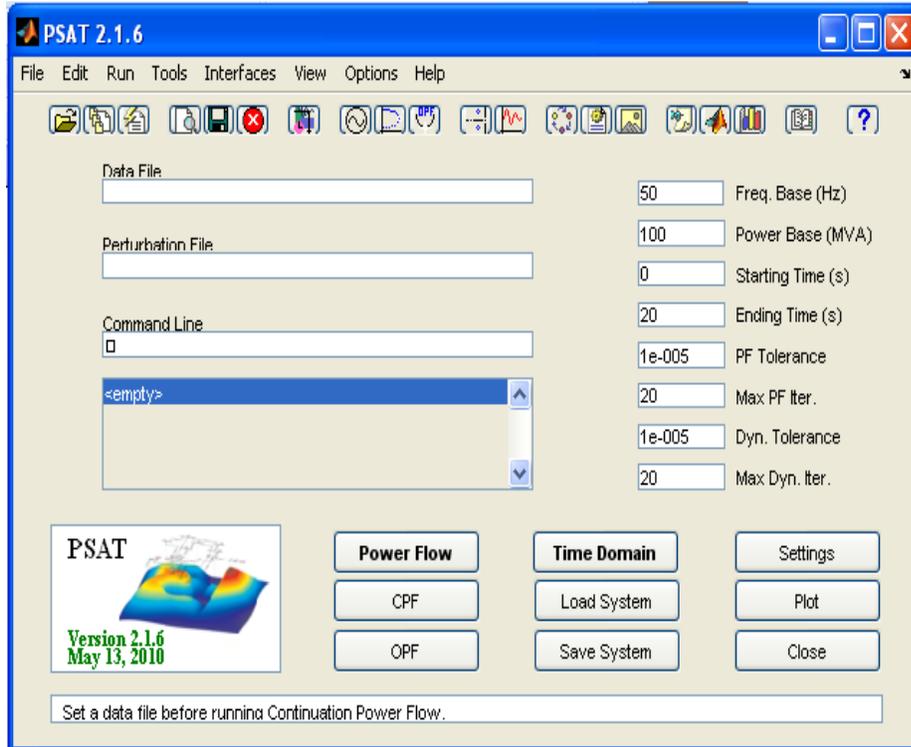
- Power Flow
- Répartition de puissance optimale
- Stabilité petits signaux

Obtenir une version récente de l'application «MATLAB».

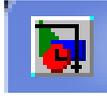
1- Intégrer le programme PSAT dans le logiciel Matlab :

On applique le programme de (PSAT) dans la Matlab

2-L'affichage du modèle voulu:



3-Choisir le thème à partir de la bibliothèque de simuling :



: c'est un symbole de la bibliothèque de simuling.

Pour afficher la bibliothèque de simuling on clique dessus

-Choisir le thème à partir de la bibliothèque de simuling

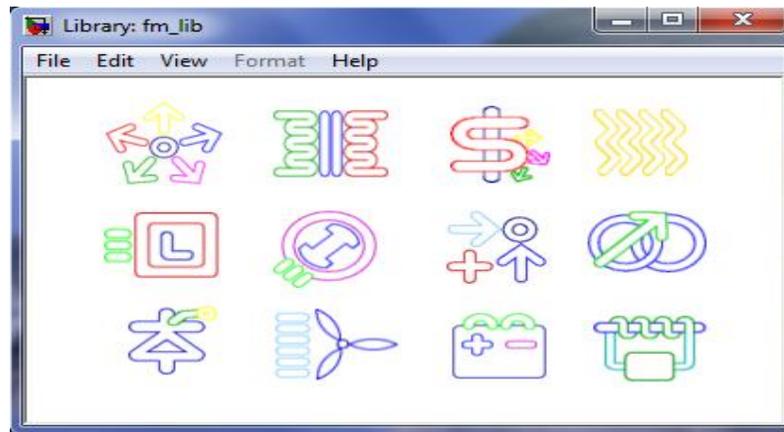


Fig 3.2: Bibliothèque du Simulink.

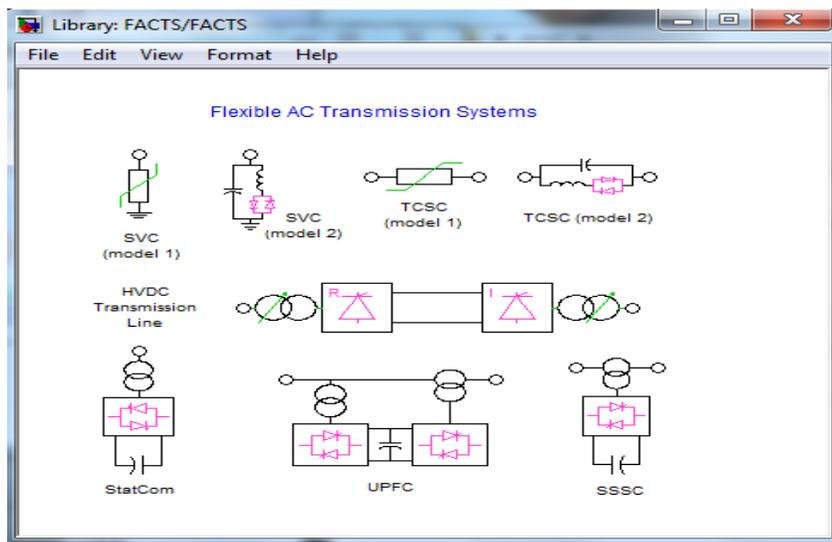


Fig 3.3 : moudele de FACTS

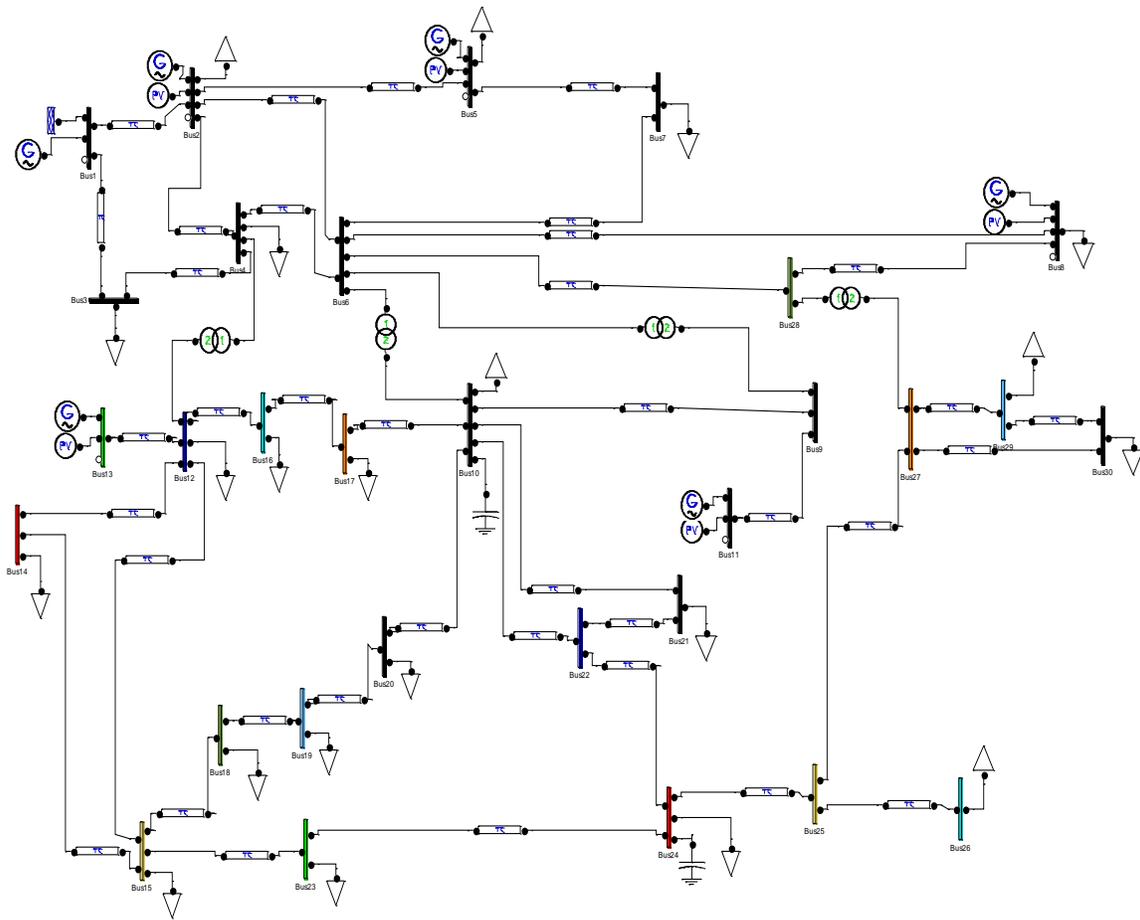


Fig 3.4 : Réseau test développé sous PSAT

3.3 Les résultats de Simulation

Le programme de Newton-Raphson (N-R) est appliqué au réseau test IEEE30JB, les résultats de programmation sans compensation et avec intégration du STATCOM sont analysés comme suit.

3.3.1 Cas : Sans compensation

Dans cette première partie, le programme est testé sur le réseau 30jeux de barres dans le cas normal .Afin de détecter les jeux de barres les plus sensibles, nous avons appliqués une méthode simple en utilisant l'écoulement de puissance

Tableau 3.1: représentent la tension initial et la tension de référence.

JB	 Vi [pu]	 Vref [pu]
1	1.0600	1.0600
2	1.0450	1.0450
3	1.0210	1.0254
4	1.0120	1.0175
5	1.0100	1.0100
6	1.0100	1.0120
7	1.0020	1.0034
8	1.0100	1.0100
9	1.0510	1.0267
10	1.0450	1.0065
11	1.0820	1.0820
12	1.0570	1.0245
13	1.0710	1.0710
14	1.0420	1.0122
15	1.0370	1.0108
16	1.0440	1.0167
17	1.0400	1.0044
18	1.0280	0.9968
19	1.0250	0.9917
20	1.0300	0.9946
21	1.0330	0.9933
22	1.0330	0.9937
23	1.0270	0.9944
24	1.0210	0.9803
25	1.0170	0.9787
26	0.9990	0.9603
27	1.0230	0.9866
28	1.0070	1.0077
29	1.0030	0.9660
30	0.9920	0.9540
Perte active totale [pu]	0.17432	
Perte reactive totale [pu]	0.37353	

3.3.1.1 Analyse de l'état initial de réseau

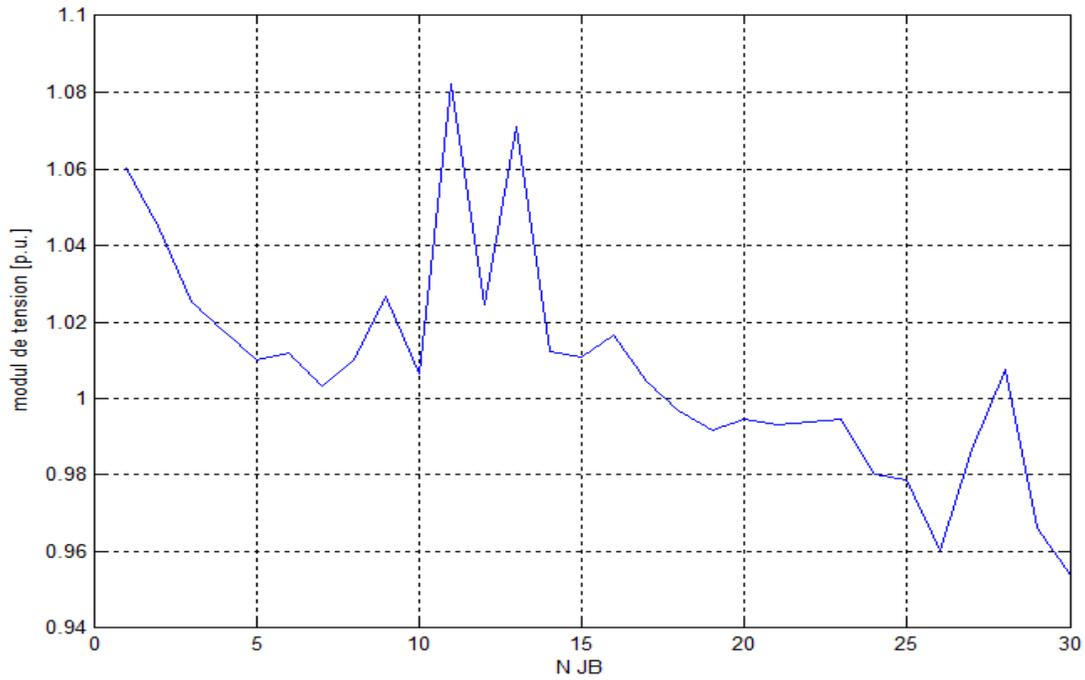


Fig 3.5: Variation de module de tension avec N JB

3.3.1.2 Détermination de JB renvable à la puissance

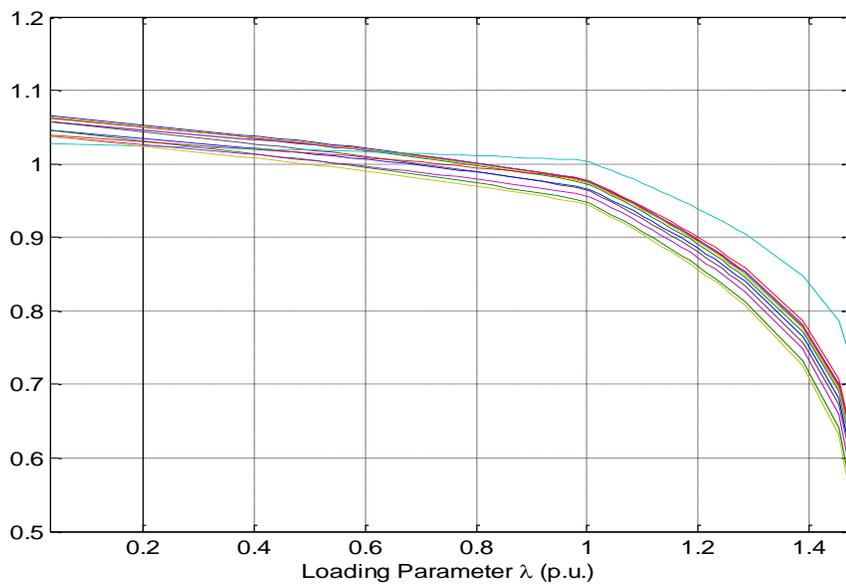


Fig 3.6: Variation du coefficient de surcharge

3.3.1.3 Calcul de surcharge limité

Tableau 3.2: profil de la tension avec l'évolution de la charge

JB	Tension iniale	Cas 10%	Cas 20%	Cas 30%	Cas 40%
1	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06
2	1.045	1.045	1.045	1.045	1.045
3	1.0254	1.0343	1.0293	1.0276	1.0351
4	1.0175	1.0276	1.0219	1.02	1.0285
5	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01
6	1.012	1.0196	1.0153	1.0139	1.0203
7	1.0034	1.0114	1.0068	1.0053	1.0122
8	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01
9	1.0267	1.0386	1.0318	1.0269	1.0397
10	1.0065	1.262	1.0148	1.0112	1.0281
11	1.082	1.082	1.082	1.082	1.082
12	1.0245	1.0388	1.0306	1.028	1.0402
13	1.071	1.071	1.071	1.071	1.071
14	1.0122	1.0312	1.0202	1.0168	1.0331
15	1.0108	1.0302	1.019	1.0155	1.032
16	1.0167	1.0336	1.0238	1.0207	1.0352
17	1.0044	1.0253	1.0133	1.0094	1.0274
18	0.99676	1.0214	1.0071	1.0026	1.0238
19	0.99166	1.0181	1.0028	0.99796	1.0207
20	0.99457	1.0196	1.0051	1.0006	1.0221
21	0.99326	1.0182	1.0038	0.99922	1.0206
22	0.99371	1.0184	1.0041	0.99961	1.0208
23	0.95401	1.0195	1.005	1.0004	1.022
24	0.98029	1.0099	0.99276	0.98736	1.0128
25	0.97869	1.0058	0.99022	0.98524	1.0085
26	0.96029	0.99507	0.97499	0.96863	0.99845
27	0.98662	1.0085	0.996	0.99196	1.0106
28	1.0077	1.0163	1.0114	1.0098	1.0171
29	0.96596	0.99654	0.97898	0.97336	0.99948
30	0.99442	0.9896	0.96912	0.9626	0.99304

On constate qu' avec l'évolution de la charge, le coefficient de sur charge (λ_{\max}) diminue ce qui est explique (justifié) par le fait que capacité du réseau de garder sa stabilité se dégrade avec l'augmentation de la charge

3.3.2 Choix optimal de l'emplacement du STATCOM

Tension de référence du STATCOM est fixe Dans cette phase le compensateur shunt STATCOM est installé dans le réseau afin résoudre le problème de variation de tension du au chutes de tensions et aussi aux problèmes liés aux sur tensions. Pour ce cas la tension de contrôle du STATCOM est considéré fixe . Au début nous avons intégré le STATCOM au JB les plus sensibles puis le comportement du réseau est évalué par l'intégration du STATCOM dans différentes points.

3.3.2.1 Test avec STATCOM

Les figures suivantes, illustrent clairement les résultats de programmation correspondant à cette étape.

Nous avons présenté la variation des modules de tension sans compensation et avec compensation au niveau des différents points dans le réseau. La Fig(3.7) montre les tensions aux niveaux des jeux de barres, pour un seul STATCOM installée au niveau au jeu de barre 18. La Fig(3.9) montre les tensions aux niveaux des jeux de barres, pour un seul STATCOM installée au jeu de barre 19.

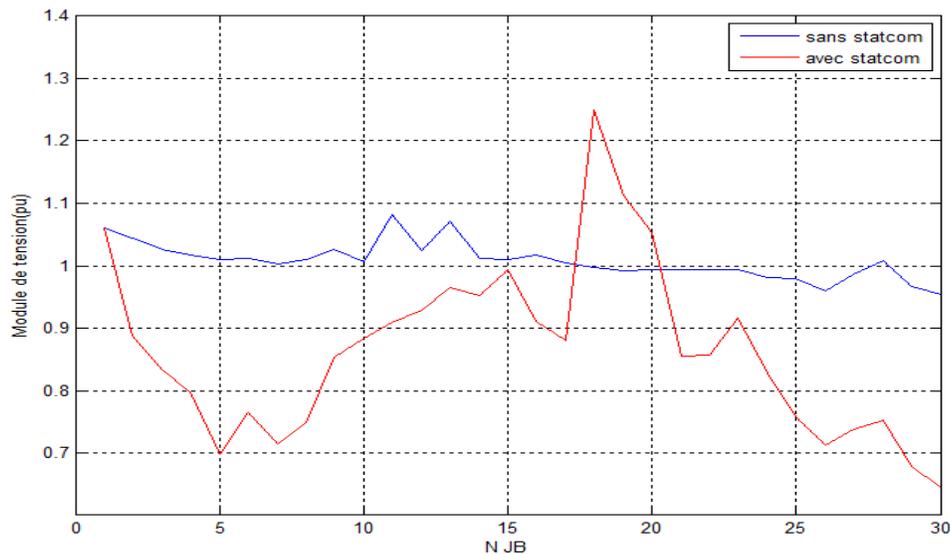


Fig 3.7: Variation des modules de tension sans compensation et avec compensation au niveau de JB N°18

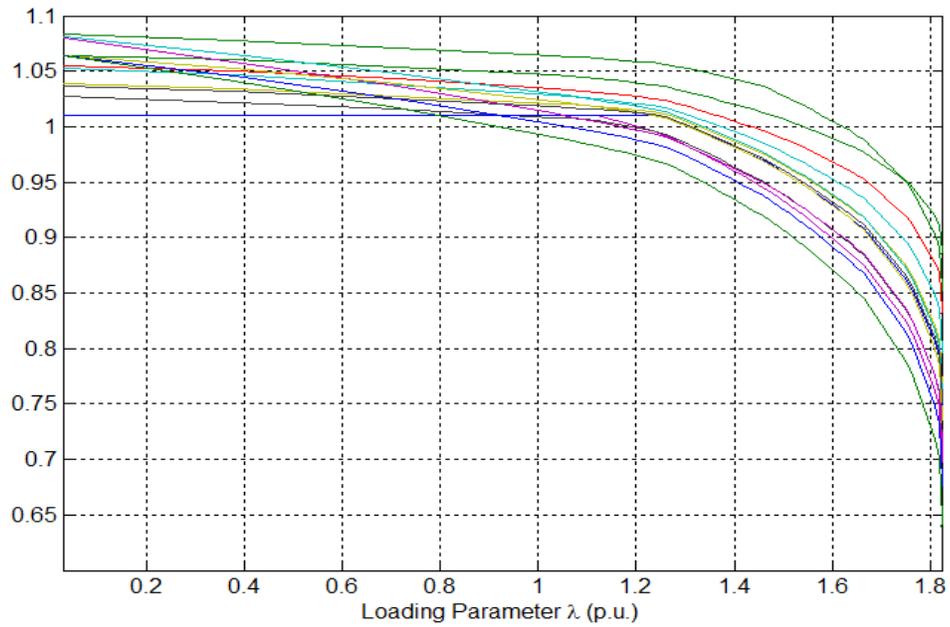


Fig3.7 :Coefficient de surcharge maximale JB N°18

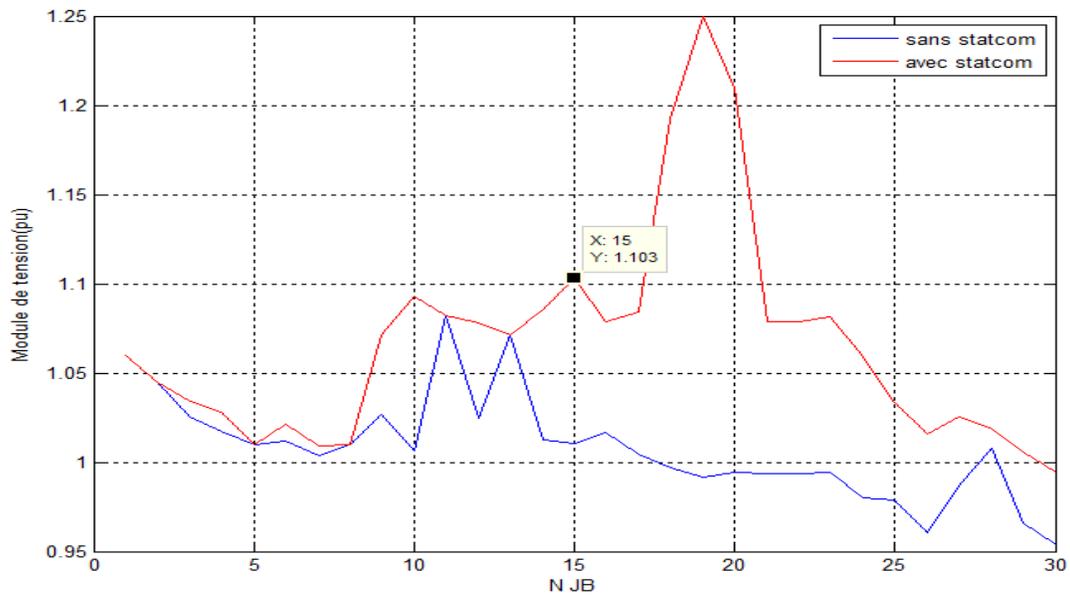


Fig 3.9: Variation des modules de tension sans compensation et avec compensation au niveau de JB N°19

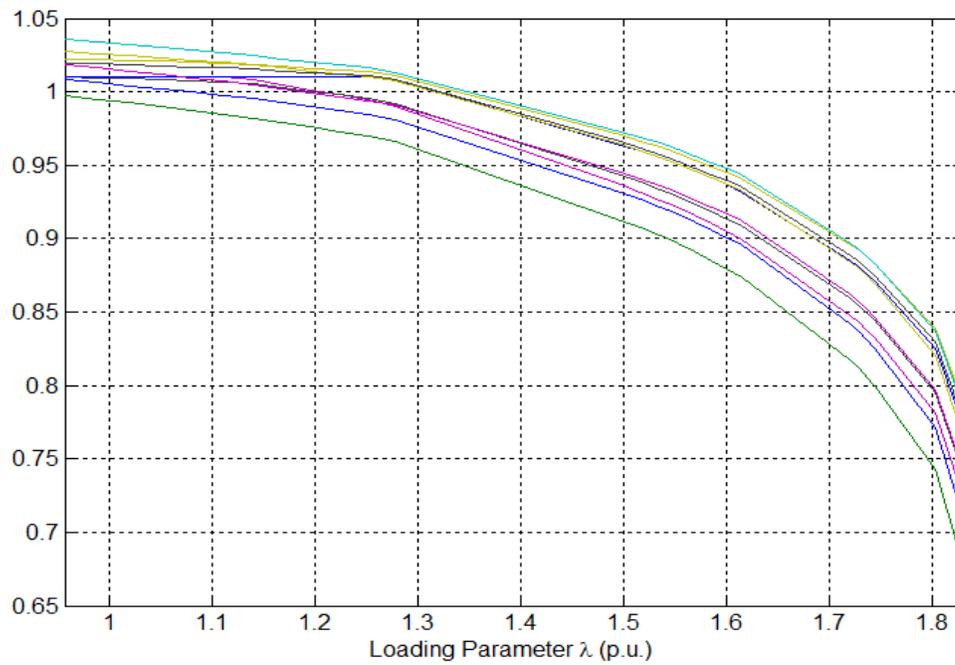


Fig 3.10: Coefficient de sur charge maximale JB N°19

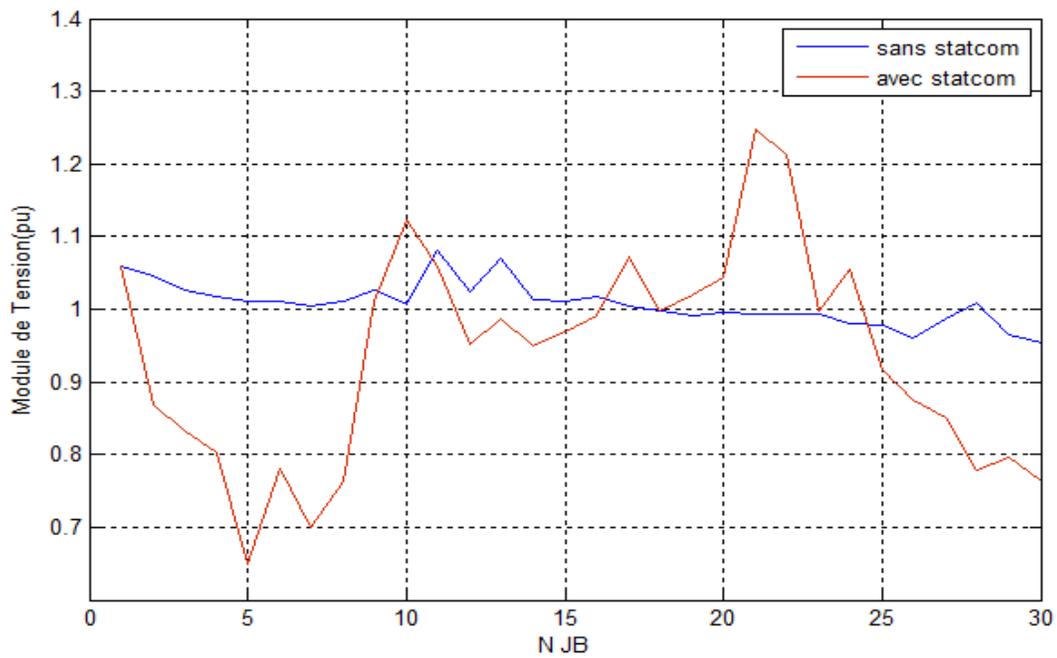


Fig 3.11: Variation des modules de tension sans compensation et avec compensation au niveau de JB N°21

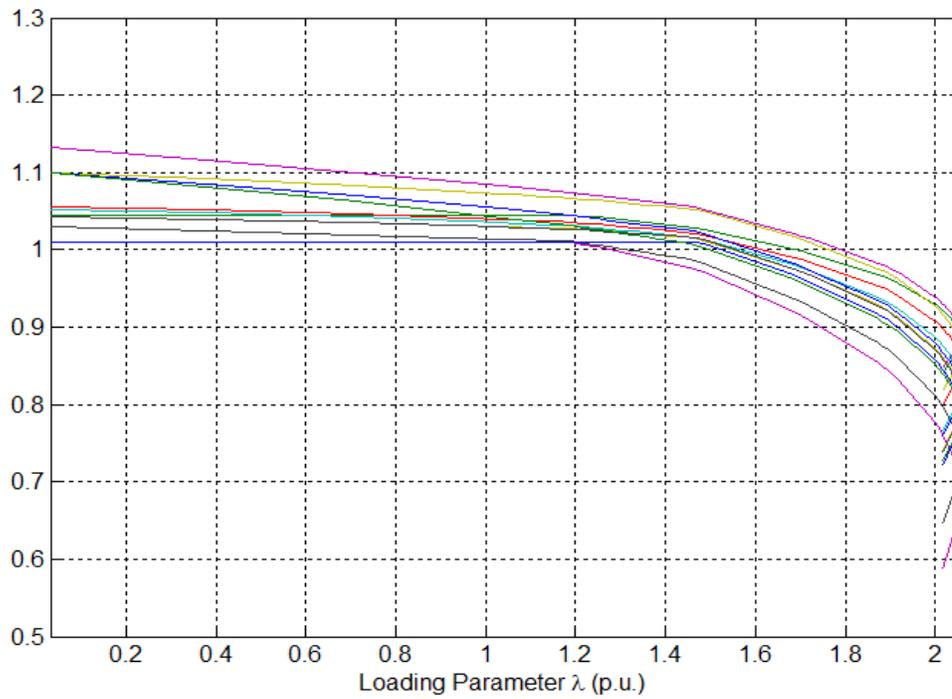


Fig 3.12 : Coefficient de sur charge maximale JB N°21

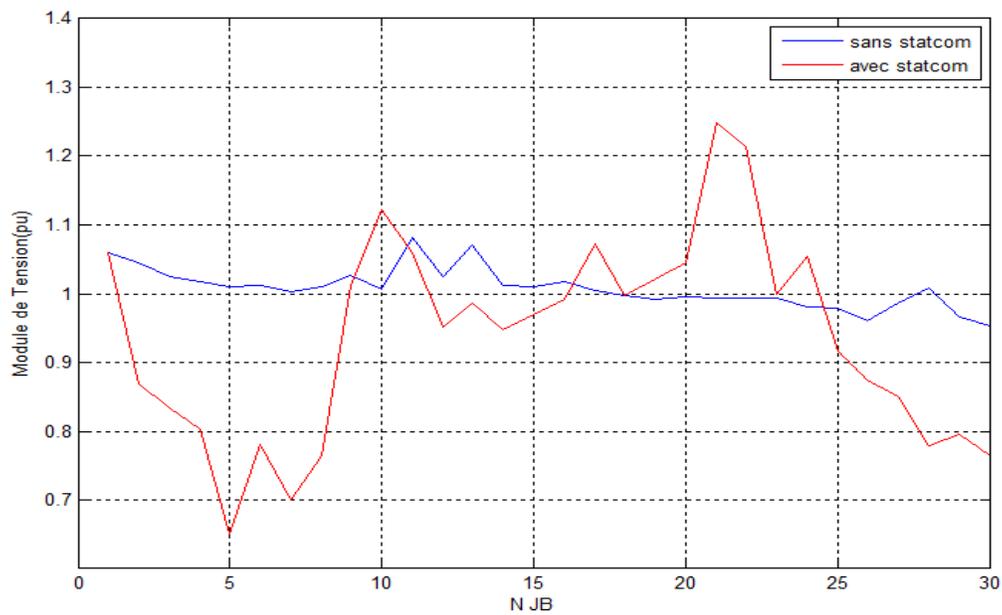


Fig 3.13 : Variation des modules de tension sans compensation et avec compensation au niveau de JB N°22

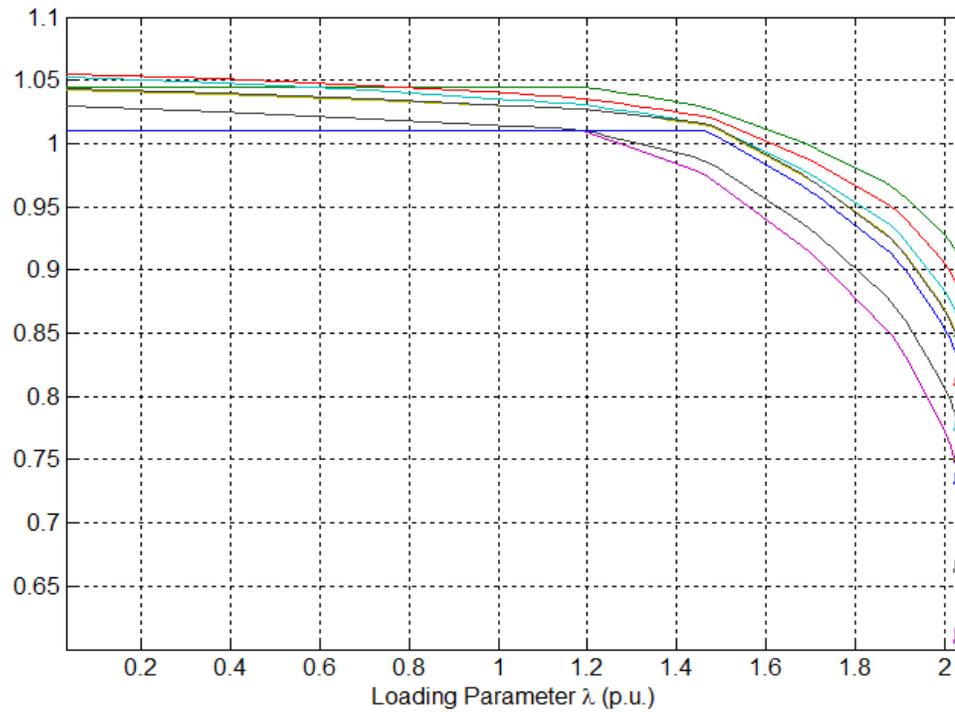


Fig 3.14: Coefficient de sur charge maximale JB N°22

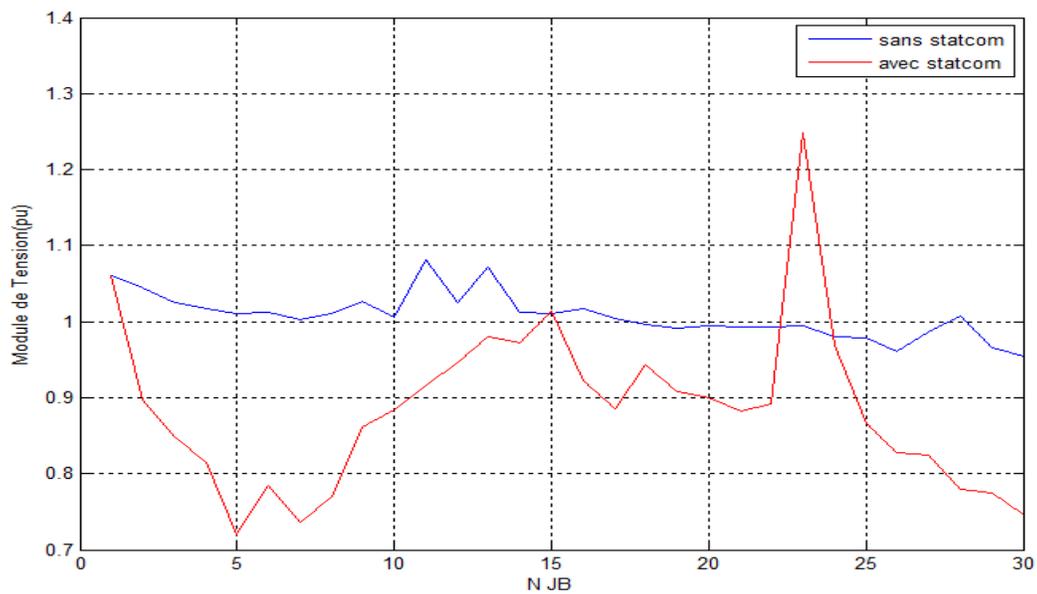


Fig 3.15 : Variation des modules de tension sans compensation et avec compensation au niveau de JB N°23

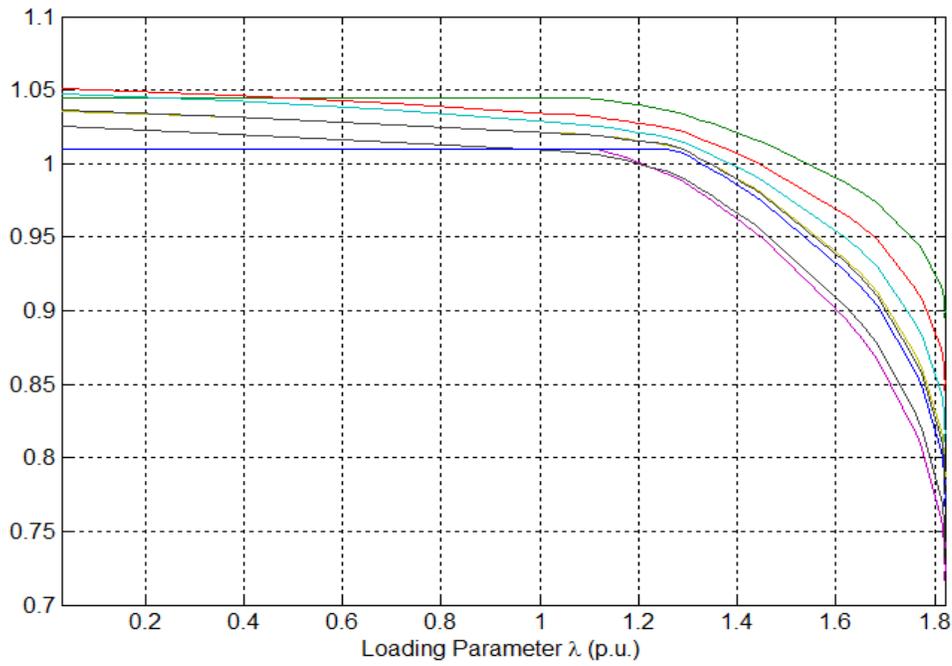


Fig3.16: Coefficient de sur charge maximale JB N°23

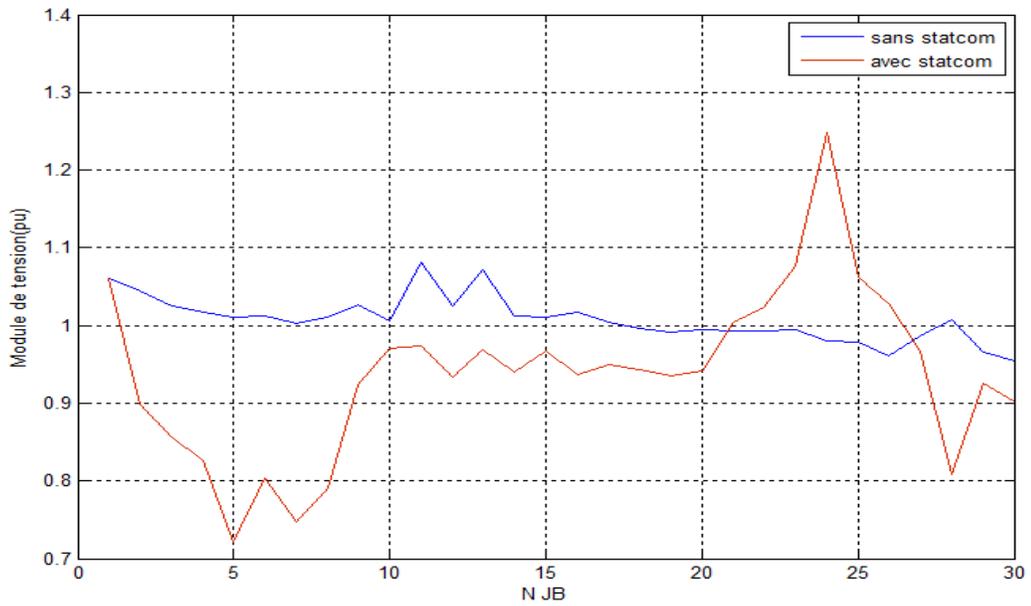


Fig 3.17: Variation des modules de tension sans compensation et avec compensation au niveau de JB N°24

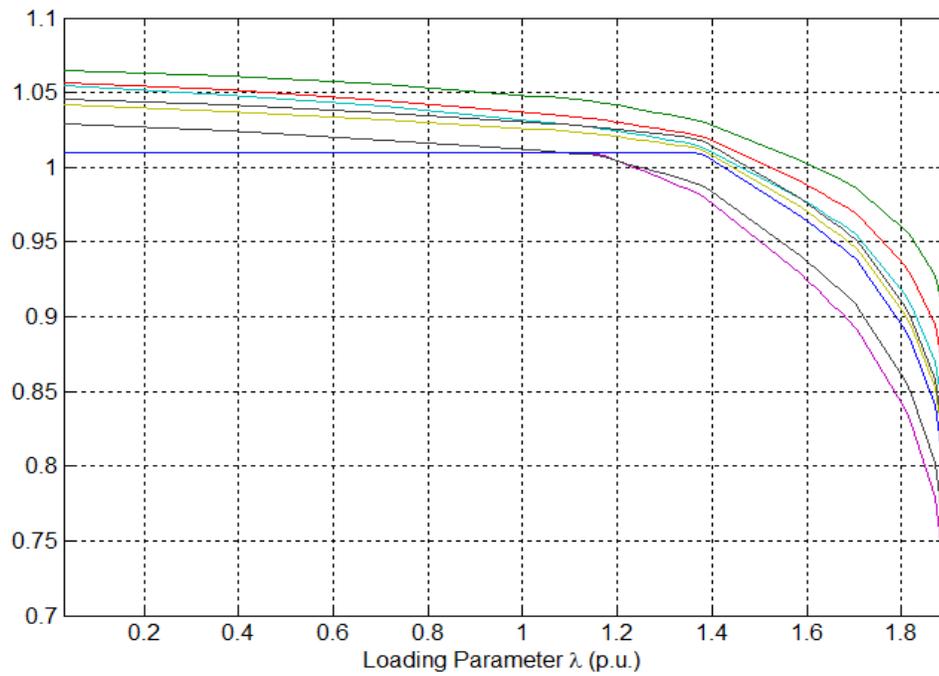


Fig 3.18: Coefficient de sur charge maximale JB N°24

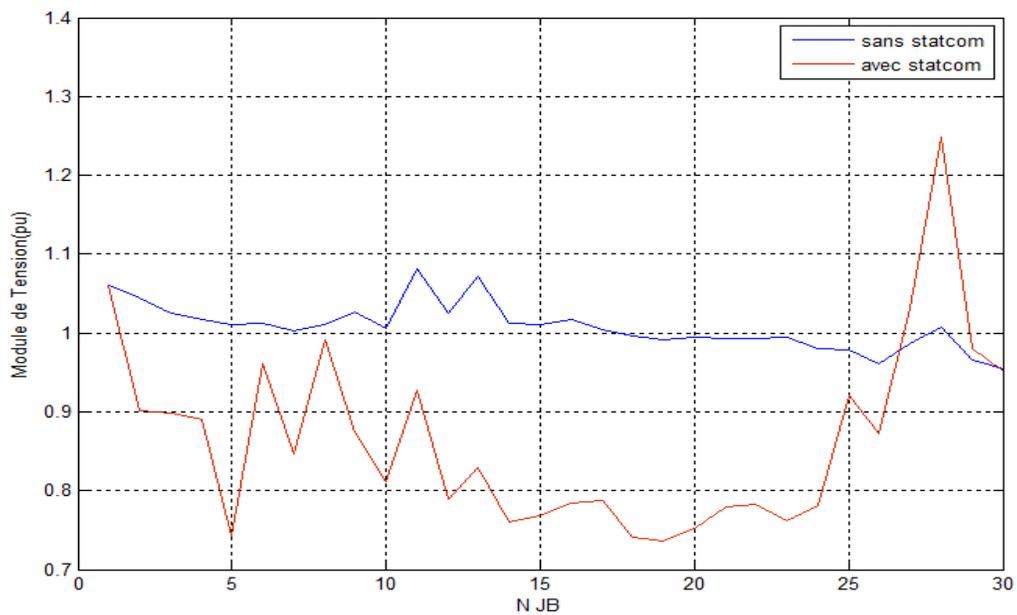


Fig 3.19: Variation des modules de tension sans compensation et avec compensation au niveau de JB N°28

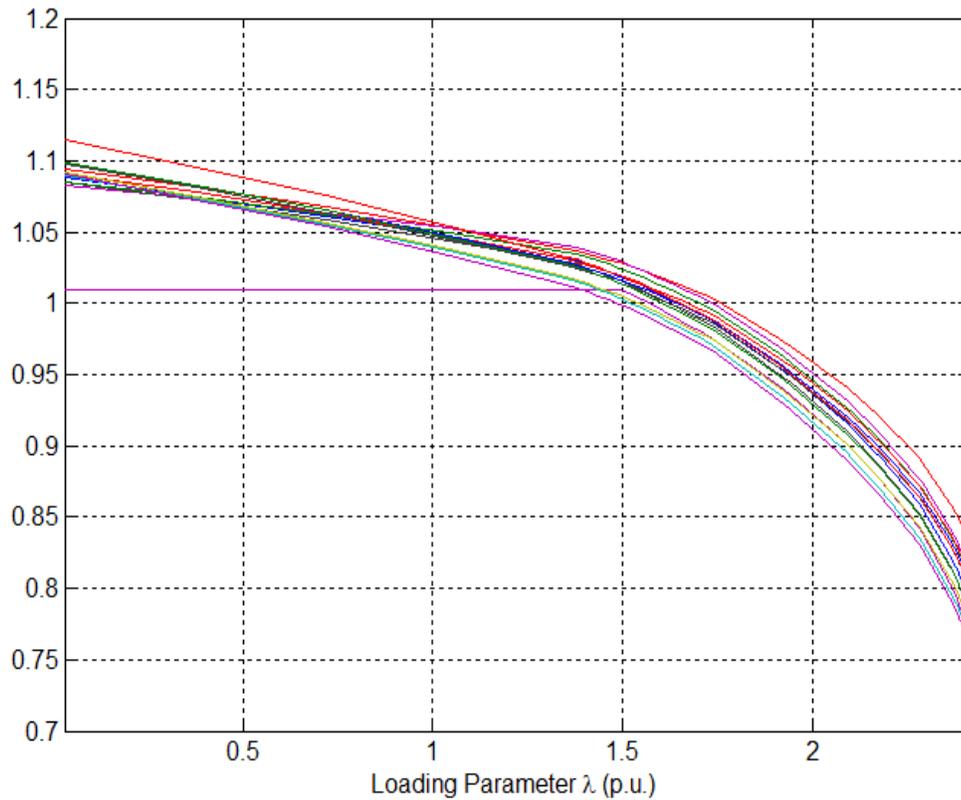


Fig 3.20: Coefficient de sur charge maximale JB N°28

Interprétation

D'après les courbes précédentes, on peut remarquer qu'après compensation par un seul STATCOM le profile de tension s'améliore relativement à l'emplacement du STATCOM.

Dans le cas où la compensation est placé au niveau du jeu de barre 18, 19, 22, 23,24 et 28 le profile de la tension s'est amélioré mais d'une façon très faible représentant des chutes de tension au niveau du jeu de barre 21 qui rendent leur tension au dessous de la normale

Par contre, lorsqu'on a changé le lieu de l'emplacement du STACOM dans les jeu de barres les plus affectés par la chute de tension (JB N° 21) le profile de la tension s'est nettement amélioré comme le montre les figures 3.10

Ainsi on peut constater que le choix l'emplacement de STATCOM joue un rôle très important dans l'amélioration de profile de la tension.

Tableau 3.3: Résultats de programmation: Variation de la tension de réseau test

JB	 Vi [pu]	 Vref [pu]	 Vstatc [pu]	Δ Vi [pu]	Δ Vstatc [pu]
1	1.0600	1.0600	1.0600	0	0
2	1.0450	1.0450	0.8683	0	0.1767
3	1.0254	1.0210	0.8342	0.0044	0.1868
4	1.0175	1.0120	0.8031	0.0055	0.2089
5	1.0100	1.0100	0.6498	0	0.3602
6	1.0120	1.0100	0.7816	0.0020	0.2284
7	1.0034	1.0020	0.7000	0.0014	0.3020
8	1.0100	1.0100	0.7635	0	0.2465
9	1.0267	1.0510	1.0120	0.0243	0.0390
10	1.0065	1.0450	1.1220	0.0385	0.0770
11	1.0820	1.0820	1.0592	0	0.0228
12	1.0245	1.0570	0.9518	0.0325	0.1052
13	1.0710	1.0710	0.9859	0	0.0851
14	1.0122	1.0420	0.9486	0.0298	0.0934
15	1.0108	1.0370	0.9699	0.0262	0.0671
16	1.0167	1.0440	0.9910	0.0273	0.0530
17	1.0044	1.0400	1.0720	0.0356	0.0320
18	0.9968	1.0280	0.9973	0.0312	0.0307
19	0.9917	1.0250	1.0208	0.0333	0.0042
20	0.9946	1.0300	1.0443	0.0354	0.0143
21	0.9933	1.0330	1.2483	0.0397	0.2153
22	0.9937	1.0330	1.2134	0.0393	0.1804
23	0.9944	1.0270	0.9984	0.0326	0.0286
24	0.9803	1.0210	1.0550	0.0407	0.0340

25	0.9787	1.0170	0.9160	0.0383	0.1010
26	0.9603	0.9990	0.8744	0.0387	0.1246
27	0.9866	1.0230	0.8508	0.0364	0.1722
28	1.0077	1.0070	0.7792	0.0007	0.2278
29	0.9660	1.0030	0.7956	0.0370	0.2074
30	0.9540	0.9920	0.7639	0.0380	0.2281
$\Sigma \Delta V_i [\text{pu}]$	0.0380				
$\Sigma \Delta V_{\text{statc}} [\text{pu}]$	0.2281				

$\Delta|V_i|$: la variation de la tension au niveau de tous le JB

$\Delta|V_{\text{statc}}|$: la variation de la tension au niveau de tous le JB avec STATCOM

$\Sigma \Delta |V_i|$: la somme total de la variation de la tension au niveau de tous le JB(sans STATCOM)

$\Sigma \Delta |V_{\text{statc}}|$: la somme total de la variation de la tension au niveau de tous le JB(avec STATCOM)

Les résultats de l'exécution du programme d'écoulement de puissance par la méthode (N-R) avec intégration du STATCOM nous permet d'avoir de meilleurs résultats.

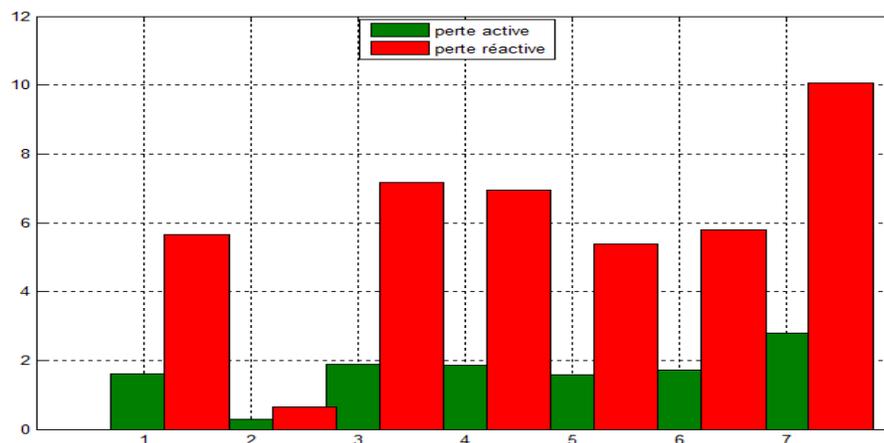


Fig 3.21: La variation des pertes avec compensation au niveau

de JB(18 ,19,21,22,23,24et28)

Cas	1	2	3	4	5	6	7
JB	18	19	21	22	23	24	28

D'après la figure ci-dessus, on peut dire que l'amélioration de profile de la tension due a l'intégration du STATCOM a influencé la réduction des pertes active et réactive totale , particulièrement dans le cas où le STACOM est placé au niveau du JB21

Ansi, il est clair qu'après compensation avec un bon choix du lieu de l'emplacement du STATCOM, on a pu réduire les pertes réactives dans notre réseau.

Tableau 3.4: Pertes de puissance active, réactive et λ_{\max} avec compensation au niveau de JB

JB	18	19	21	22	23	34	28
Perte active totale [pu]	1.6071	0.27989	1.8967	1.854	1.5912	1.7285	2.78
Perte réactive totale [pu]	5.6432	0.63583	7.1834	6.9462	5.393	5.7917	10.0673
λ_{\max}	1.823	1.8293	2.0521	2.0462	1.8205	1.8915	2.40

3.4 Discussions des résultats

- D'après les résultats de programmation, le Jeu de barre le plus sensible et le jeu de barre 21 pour le réseau test.
- Parmi les paramètres que nous avons utilisés pour choisir l'emplacement du STATCOM :

Module de la tension (V), la variation du module de la tension (ΔV), le paramètre du module de la tension permet le bon choix d'emplacement d'un compensateur Shunt STATCOM.

- L'intégration d'un compensateur Shunt STATCOM dans tous les JB n'influe pas sur le niveau de tension aux JB10.
- Pour les JB sensibles, l'emplacement d'un compensateur permet l'amélioration du niveau de tension mais d'une façon non régulières, c'est-à-dire en fonction de l'emplacement du STATCOM.
- Les résultats obtenus confirment que l'emplacement optimale est au niveau de jeu de barre 21.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons décrit le réseau dans lequel nous avons introduit le contrôleur FACTS « parallèle STATCOM » afin de compenser la puissance réactive et maintenir la tension du jeu de barre où il est connecté.

D'après les résultats de programmation on peut conclure que le compensateur statique STATCOM a le pouvoir d'améliorer le niveau de tension par l'injection de puissance réactive prédéterminé pour ajuster la tension aux différents jeux de barres du réseau et fournir la puissance réactive pour soutenir les générateurs, comme on peut conclure que les compensateurs statiques se placent à côté des charges (jeu de barres de charge).

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

On a décrit, dans ce travail l'importance de l'écoulement de puissance et la stabilité de tension, en abordant les méthodes de résolution des équations non-linéaires de Newton-Raphson pour le calcul de l'écoulement de puissance.

En introduisant un nouveau concept par le système de transmission de l'énergie à courant alternatif flexible appelée FACTS, avec lesquels le contrôle du flux de puissance active et réactive ce qui nous a permis d'améliorer la gestion des réseaux électriques.

Nous avons traité le problème de l'écoulement des puissances réactives et le contrôle des tensions des réseaux d'énergie électrique en incorporant les dispositifs STATCOM. Une étude sur les dispositifs FACTS a été réalisée et en plus une étude détaillée sur les dispositifs STATCOM

Dans la dernière étape, nous avons présenté le schéma électrique équivalent du réseau étudié détaillé à savoir (IEEE30JB) où nous avons intégré un STATCOM aux différents jeux de barres, à fin de voir le comportement du STATCOM connecté au réseau pour le contrôle de la puissance réactive et par la suite son influence sur le profil de la tension.

Le choix de l'emplacement efficace du dispositif shunt "STATCOM", permet d'améliorer considérablement les indices de qualité d'énergie. Il faut noter que le rôle principal est le contrôle dynamique de la tension par le dispositif 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.

L'intégration du STATCOM s'avère très efficace pour l'amélioration du profil de la tension surtout si on choisit bien le nombre et le lieu de l'emplacement influant par la suite nettement sur les pertes réactives en les réduisant par rapport à l'état du réseau avant compensation.

Comme perspective de ce travail, nous proposons d'introduire l'optimisation de l'emplacement des FACTS série et parallèle pour avoir le meilleur profile de la tension et le minimum de pertes de puissance tout en respectant toutes les contraintes techniques imposées préalablement et ce en appliquant des méthodes d'optimisation évolutionnaires.

BIBLIOGRAPHIE

- [01] J.B.Gupta, "A cours in power systems", 14 juillet 2005.
- [02] Arthur R.Bergen et Vijay Vittal, Power System Analysis, 2000.
- [03] Ramasamy Natarajan, "Computer-Aided Power System Analysis" MARCEL DEKKER, USA, 2002.
- [04] P.A. Lof et al. "Voltage Stability Indices for Stressed Power Systems." IEEE Trans. PS, Vol.8No.1, pp.326-335, February 1993.
- [05] B. Ha Lee and K. Y. Lee, "A Study on Voltage Collapse Mechanism in Electric Power System." IEEE Trans. PS, Vol.6No.3, pp.966-974, August 1991.
- [06] Yanfeng Gong, "Development of an Improved On-Line Voltage Stability Index Using Synchronized Phasor Measurement." PHD thesis, Mississippi State University, Mississippi, USA, December 2005.
- [07] A. Laifa, "Evaluation de la Stabilité de Tension d'un Réseau d'énergie électrique Développement et Application Des Indices De Stabilité", thèse de Magister, Ecole Nationale polytechnique, 27 juin 1995.
- [08] 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.
- [09] G. K. Morison et al. "Voltage stability Analysis using static and dynamic approaches", IEEE Trans. on Power Systems, Vol.8, No.3, pp.1159-1171, August 1993.
- [10] T.G. Overbye et al. "Improved Techniques for Power System Voltage Stability Assessment Using Energy Methods", IEEE Trans. on Power Systems, Vol, No.4, pp.1446-1452, November 1991.
- [11] Bodapati Nageswararao, B .E, "Fuzzy-Expert System for Voltage Stability Monitoring and Control", Master thesis, Faculty of Engineering and Applied Science Memorial University of Newfoundland, Canada, February, 1998.

- [12] 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
- [13] Tiranuchit. A, Thomas, R. J., "A posturing strategy against voltage instability in electric power systems," IEEE Transactions on Power Systems, Vol.3,No.1,pp.87-93,
- [14] Venkataramana Ajarapu 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.
- [15] 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 électriques",thèse de magister,Université de jijel,04/09/2007.
- [16] Lajadi.B et kherifi.M.S, 3 , "compensation dynamique de l'énergie réactive dans les réseaux électriques",mémoire d'ingénieur en électrotechnique ,université de Biskra , promotion 2005.
- [17] E.GH.sahraki,"Apport de l'UPFC à l'amélioration de la stabilité transitoire des R-E",thèse de Doctorat,univarsité de Henri poincaré,Nancy,13 octobre2003.
- [18] T.Allaoui , "Réglage robuste de l'UPFC pour optimiser l'écoulement des puissance dans un R-E", thèse de magister, univarsité des sciences et de la technologie d'Oran Mohamed Boudiaf , avril 2002.
- [19] Lerch.D.P.E,Xu.L,Advanced SVC Control for damping power système oxillations,IEEE transactions on power systems, vol.6.pp.524-535,1991.
- [20] Abdelaàli.Alibi,"Controle des réseau électriques par les systems FACTS , thèse de magister, université des Batna,13/06/2009.

Annexe A

Les données de réseau test 30 jeux de barres

Concernant les JB

Bus-data du réseau IEEE30JB

jeux de barres		tension	Angle	Générateur		charge		Qmin	Qmax
No	code	Module [pu]	Degré	PGi [MW]	QGi [Mvar]	PLi [MW]	QLi [Mvar]		
1	1	1.06	0	0	0	0	0	0	0
2	2	1.043	0	40	50.0	21.7	12.7	-40	50
3	3	1.0	0	0	0	2.4	1.2	0	0
4	3	1.0	0	0	0	7.6	1.6	0	0
5	2	1.01	0	0	37.0	94.2	19.0	-40	40
6	3	1.0	0	0	0	0.0	0.0	0	0
7	3	1.0	0	0	0	22.8	10.9	0	0
8	2	1.01	0	0	37.3	30.0	30.0	-10	40
9	3	1.0	0	0	0	0.0	0.0	0	0
10	3	1.0	0	0	0	5.8	2.0	0	0
11	2	1.082	0	0	16.2	0.0	0.0	-6	24
12	3	1.0	0	0	0	11.2	7.5	0	0
13	2	1.071	0	0	10.6	0.0	0.0	-6	24
14	3	1.0	0	0	0	6.2	1.6	0	0
15	3	1.0	0	0	0	8.2	2.5	0	0
16	3	1.0	0	0	0	3.5	1.8	0	0
17	3	1.0	0	0	0	9.0	5.8	0	0
18	3	1.0	0	0	0	3.2	0.9	0	0
19	3	1.0	0	0	0	9.5	3.4	0	0
20	3	1.0	0	0	0	2.2	0.7	0	0
21	3	1.0	0	0	0	17.5	11.2	0	0
22	3	1.0	0	0	0	0.0	0.0	0	0
23	3	1.0	0	0	0	3.2	1.6	0	0

Annexe A

24	3	1.0	0	0	0	8.7	6.7	0	0
25	3	1.0	0	0	0	0.0	0.0	0	0
26	3	1.0	0	0	0	3.5	2.3	0	0
27	3	1.0	0	0	0	0.0	0.0	0	0
28	3	1.0	0	0	0	0.0	0.0	0	0
29	3	1.0	0	0	0	2.4	0.9	0	0
30	3	1.0	0	0	0	1	1.9	0	0

Concernant les lignes

Informations des lignes du réseau IEEE30JB				
Les lignes		Résistance	Réactance	substance
de	vers	R(pu)	X(pu)	B/2 (pu)
1	2	0.0192	0.0575	0.0264
1	3	0.0452	0.1652	0.0204
2	4	0.0570	0.1737	0.0184
3	4	0.0132	0.0379	0.0042
2	5	0.0472	0.1983	0.0209
2	6	0.0581	0.1763	0.0187
4	6	0.0119	0.0414	0.0045
5	7	0.0460	0.1160	0.0102
6	7	0.0267	0.0820	0.0085
6	8	0.0120	0.0420	0.0045
6	9	0.0	0.2080	0.0
6	10	0.0	0.5560	0.0
9	11	0.0	0.2080	0.0
9	10	0.0	0.1100	0.0
4	12	0.0	0.2560	0.0
12	13	0.0	0.1400	0.0
12	14	0.1231	0.2559	0.0
12	15	0.0662	0.1304	0.0
12	16	0.0945	0.1987	0.0
14	15	0.2210	0.1997	0.0
16	17	0.0824	0.1923	0.0
15	18	0.1073	0.2185	0.0
18	19	0.0639	0.1292	0.0
19	20	0.0340	0.0680	0.0

Annexe A

10	20	0.0936	0.2090	0.0
10	17	0.0324	0.0845	0.0
10	21	0.0348	0.0749	0.0
10	22	0.0727	0.1499	0.0
21	23	0.0116	0.0236	0.0
15	23	0.1000	0.2020	0.0
22	24	0.1150	0.1790	0.0
23	24	0.1320	0.2700	0.0
24	25	0.1885	0.3292	0.0
25	26	0.2544	0.3800	0.0
25	27	0.1093	0.2087	0.0
28	27	0.0000	0.3960	0.0
27	29	0.2198	0.4153	0.0
27	30	0.3202	0.6027	0.0
29	30	0.2399	0.4533	0.0
8	28	0.0636	0.2000	0.0214
6	28	0.0169	0.0599	0.065