الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DR. YAHIA FARES DE MEDEA

FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE

**Département du Génie Électrique
et de l'Informatique**



# Mémoire de Fin d'Études

***Présenté pour l'obtention du Diplôme
de Master en Electrotechnique***

*Option : Réseau Électrique*

*Thème*

*Ecoulement de puissances optimales en présence des FACTS*

***Préparé et présenté par*:**

⇨TOUMI Abdelbassite

⇨AMAROUAYACHE Kheireddine

***Proposé et dirigé par*:**

⇨ Dr. SEBAA Karim

⇨Dr.HENINI Noureddine

# Remerciement

Tout d’abord, Je remercie Allah, le tout puissant, le miséricordieux, de m’avoir appris ce que J’ignorais, de m’avoir donné la santé et tout dont je nécessitais pour l’accomplissement de cette thèse.

J’adresse de chaleureux remerciements au directeur de thèse monsieur M. *SEBAA* karim, Docteur à l’université Yahia Fares de Médéa pour son encadrement, ses directives et sa disponibilité. Aussi, je le remercie pour ses encouragements, son indulgence, et sa sympathie tout au long des années de travail.

J’adresse de chaleureux remerciements au directeur de thèse monsieur M. *HENNENE* Noureldine, Docteur à l’université Yahia Fares de Médéa pour son encadrement, ses directives et sa disponibilité. Aussi, je le remercie pour ses encouragements, son indulgence, et sa sympathie tout au long des années de travail.

Je voudrais remercie les membres du jury pour la pertinence de leurs remarques avisées, qui vont permettre l’amélioration de la qualité du manuscrit et l’essor vers de nouvelles perspectives.

Je remercie également tous les enseignants de département d’électrotechnique de l’université Yahia Fares de Médéa qui ont participé à ma formation pendant tout le cycle universitaire.

Enfin, je ne peux oublier de remercier nos familles pour leur soutien au cours de ces Cinq années et sans lesquels nous n'en serais pas là aujourd'hui.

# Dédicaces

*Que ce travail témoigne de mes respects :*

*A mes parents:*

*A mon cher frère Yassine et Abdelwahab et mes très chères belles sœurs.*

*A Islam et Abdelmadjid*

*A la famille TOUMI.*

*A mes amis Hamadi Zakaria ; khaireeldine et Mohamed Meziane tous mes amis.*

*Toumi abdelbassite.*

## Liste des acronyms at symbols

| | |
|---|---|
| $\mathbf{V_i}$ | Module de tension au jeu de barres i (v) |
| $\mathbf{I_{ij}}$ | le courant dans la ligne i et k (A) |
| $\delta_i$ | Angle de tension au jeu de barres i (degré) |
| $\delta_k$ | Angle de tension au jeu de barres k (degré) |
| $\mathbf{T_{ik}}$ | Prise du transformateur entre deux jeux de barres i et k |
| $\alpha_{ik}$ | Angle de phase du transformateur entre deux jeux de barres i et k (degré) |
| $\theta_{ik}$ | Angle de l'admittance aux linges i et k (degré) |
| **PGi** | Puissance active générée au jeu de barres i (Mw) |
| **QGi** | Puissance réactive générée au jeu de barres i (Mvar) |
| $\mathbf{P_i^{spic}}$ | Puissance active spécifique au jeu de barres i (Mw) |
| $\mathbf{Q_i^{spic}}$ | Puissance réactive spécifique au jeu de barres i (Mvar) |
| **Si** | Puissance apparente au jeu de barres i (Mva) |
| $\mathbf{S_{Pij}}$ | la perte de puissance au linge i et j (Mva) |
| **Pi** | Puissance active au jeu de barres i (Mw) |
| **Qi** | Puissance réactive au jeu de barres i (Mvar) |
| **Pi**j | Transit de puissance active du jeu de barres i vers le jeu de barres j (Mw) |
| **Qi**j | Transit de puissance réactive du jeu de barres i vers le jeu de barres j(Mvar) |
| **Si**j | Transit de puissance apparente du jeu de barres i vers le jeu de barres j(Mva) |
| **J** | matrice jacobienne |
| **NG** | Nombre de générateurs interconnectés |
| $\mathbf{Y_{bus}}$ | Matrice admittance |
| **bik** | Un élément de la partie imaginaire de la matrice admittance du réseau |
| **gik** | Un élément de la partie réelle de la matrice admittance du réseau |
| $\mathbf{Y_{ik}}$ | Module d'un élément de la matrice admittance aux linges i et k |
| $\mathbf{Y_{ii}}$ | élément diagonale de la matrice admittance |
| **F ( )** | Fonction objective |
| $\mathbf{C_{PGi}}$ | cout de générateur i(dollar) |
| **g( )** | Contraintes d'égalités |
| **h ( )** | Contraintes d'inégalités |
| $\mathbf{PD_i}$ | puissance active demandé au jeu de barre i (Mw) |

| | |
|---|---|
| **$QD_i$** | puissance réactive demandé au jeu de barre i (Mvar) |
| **$A_i$, $B_i$, *et* $C_i$** | Coefficients de la courbe du coût quadratique du générateur i |
| **OPF** | Optimal Power Flow (Ecoulement de Puissance Optimal) |
| **FACTS** | Flexibles Alternating Current Transmission Systems |
| **SVC** | Static Var Compensator |
| **TSSC** | Thyristor Switched Series Capacitor |
| **TCSC** | Thyristor Controlled Serie Capacitor |
| **SSSC** | *Static Synchronous Series Compensator* |
| **TCPST** | *Thyristor Controlled Phase Shifting Transformer* |
| **STATCOM** | Static Synchronous Compensator |
| **TCVR** | *Thyristor Controlled Voltage Regulator* |
| **UPFC** | Unified Power flow Controller |
| **GTO** | Gate Turn Off |
| **$X_{TCSC}$** | Réactance du TCSC (ohm) |
| **$X_C$** | Réactance capacitive (ohm) |
| **$X_L$** | Réactance inductive (ohm) |
| **R** | la résistance (ohm) |
| **H** | matrice Hessienne |
| $\mu$ | Facteur de perturbation |
| SIGMA | Paramètre de direction |
| **N** | nombre d nœuds du réseau électrique |
| **KKT** | Karuch-Kuhn- |

# Liste des figures

Figure 1-1 .Modèle d'un Générateur. 3
Figure 1-2 .Modèle d'un Lignes de transport. 4
Figure 1-3 .Modèle d'un Générateur Transformateur de puissance. 5
Figure 1-4.Modèle des éléments shunts. 5
Figure 1-5 : Organigramme de méthode de Newton –Raphson. 9
Figure 1-6 : Organigramme de méthode de découplée rapide. 11
Figure 1-7 : Organigramme de méthode de gausse Seidel. 13
Figure 1-8 : Organigramme de méthode de point intérieur. 19
Figure 2-1 schémas de base d'un SVC. 23
Figure 2-2 schémas de base d'un STATCOM. 24
Figure 2.3. Caractéristique tension courant V-I a. STATCOM b. SVC 25
Figure 2-4 schémas de base d'un CSST. 26
Figure 2-5 schémas de base d'un CSCT. 26
Figure 2-6schémas de base d'un CSSS. 28
Figure 2-7 schémas de base d'un TSPCT. 30
Figure 2-8 schémas de base d'un UPFC. 31
Figure 2-9. Modèle mathématique de l'UPF Cet le système de transmission 34
Figure. 3.1 La relation vectorielle entre la tension série Vse et le courant de ligne Ise. 35
Figure. 3.2 Construction de l'UPFC. 36

Figure 3.3 : Schéma unifilaire du réseau électrique IEEE 13-jeux de barres avec quatre générateurs 37
Figure 3-4. Schéma unifilaire du réseau électrique IEEE 30-jeux de barres avec six générateurs 38

Figure. 3.5. Variation de la tension en fonction des nœuds avec et sans UPFC 44
Figure 3.6 : Variation de la tension en fonction des nœuds avec et sans UPFC 51

# Liste des tableaux

**Tableau 2.1** Domaines d'applications des dispositifs FACTS 31

**Tableau 3-1** : résulta de la matrice admittance ($Y_{bus}$) 39

**Tableau 3-2** : résulta de la puissance active et la puissance réactive 40

**Tableau 3-3** : résulta de la tension et l'angle 40

**Tableau 3.4** : résulta de la Puissance transite dans les lignes 41

**Tableau 3.5** : résulta de la tension et l'angle avec CFPU (nœud 8-9) 42

**Tableau 3.6** : résulta de la puissance active et la puissance réactive avec CFPU (nœud 8-9) 43

**Tableau 3.7** : résulta de la Puissance transite dans les lignes avec CFPU (8-9) 45

**Tableau 3.8** : résulta de la tension et l'angle 45

**Tableau 3.9** : résulta de la Puissance active et la puissance réactive 46

**Tableau 3.10** : résulta de la tension et l'angle avec CFPU (18-15) 46

**Tableau 3.11** : résulta de la puissance active et la puissance réactive avec CFPU (18-15) 47

**Tableau 3.12** : résulta de la tension et l'angle avec CFPU (18-15 ; 22-21) 48

**Tableau 3.13:**résulta de la puissance active et la puissance réactive avec CFPU (18-15 ; 22-21) 49

**Tableau 3.14** : résulta de la tension et l'angle avec CFPU (18-15 ; 22-21 ; 28-27 ; 17-10) 49

**Tableau 3.15 :** résulta de la puissance active et la puissance réactive avec upfc (18-15 ; 22-21 ; 28-27 ; 17-10) 50

**3.4. Tableau 3.16 :** les résultats de la puissance active et la puissance réactive avec et sans UPFC de réseau à 13 nœud 51

**Tableau 3.17 :** les résultats de la puissance active et la puissance réactive avec et sans UPFC de réseau à 30 nœud 52

## Liste des matières


**Introduction générale** 1

**1. Chapitre 01 : calcul écoulement de puissance**

1.1. Introduction 3
1.2. Modélisation des éléments de puissance d'un réseau électrique 3
1.2.1. Générateur de puissance 3
31.2.2. Lignes de transport 4
1.2.3. Transformateur de puissance 4
1.2.4. Les charges électriques 5
1.2.5. Eléments shunts 5
1.3. Formulation des équations de l'écoulement de puissance 6
1.4. Modèles des nœuds du réseau 7
1.5. Des méthodes qui résoudre le problème 8
1.5.1. Méthode de Newton –Raphson 8
1.5.2. Méthode découplée rapide 10
1.5.3. Méthode de gausse Seidel 12
1.6. Dispatching économique 14
1.6. 1.Méthode de piont intérieur 15
1.6. 1.1.La fonction objective 15
1.6. 1.2.Les contraintes d'égalité 15
1.6. 1.3.Les contraintes d'inégalité 15
1.7. Conclusion 20

**Chapitre 02 généralités sur les FACTS**

2.1.Introduction 21
2.2. Définitions et généralités 21
2.2.1. Rôle des dispositifs FACTS 21
2.3. Les avantages de la technologie des dispositifs FACTS 22
2.4. Types des dispositifs FACTS 22
2.4.1 .Compensateurs Parallèles 22

2.4.1.1 .Compensateur statique de puissance réactive (SVC) 23
2.4.2.2 Compensateur statique synchrone (STATCOM) 24
2.4.2. Compensateurs Séries 25
2.4.2.1. Compensateur série commuté par thyristor (TSSC) 26
2.4.2.2. Compensateur série commandé par thyristor (TCSC) 26
2.4.2.3. Compensateur série synchrone (SSSC) 27
2.3. Compensateur série parallèle (hybride) 29
2.3.1. Transformateur déphaseur commandé par thyristor (TSPCT) 29
2.3.2. Régulateur de tension commandé par thyristor (TCVR) 30
2.3.3. Contrôleur de transit de puissance universel (UPFC) 30
2.4. Coût des dispositifs FACTS 31
2.5. Synthèse 31
2.6. Modélisation mathématique du compensateur universel 'UPFC' 32
1.7. Conclusion 34

**3. Chapitre 03 calcule de l'écoulement de puissance avec l'intégration d'un UPFC**

3.1. Introduction 35
3.2. L'UPFC: construction et exploitation 35
3.3. Les résulta de programmation (réseau 13 nœuds) 39
3.4. Les résulta de programmation (réseau 30 nœuds) 45
3. 5 conclusions 52

**Conclusion générale** 53

## ملخص

المساهمة المهمة لهذه المذكرة هو تطبيق طريقة غوص-سيدال, نيوتن-رافصن, فاصت-ديكوبلد وكذا النقطة الداخلية من ـأجل حل مشكل حل معادلات سيلان الطاقة الكهربائية وكذالك من أجل إنقاص التكلفة استغلال الشبكة الكهربائية مع وجود وغياب FACTS .

أجرينا حساباتنا على شبكتين (13 عقدة وكذا 30 )عقدة مما جعلنا نقول ان وجود UPFC على الشبكة الكهربائية (التوتر –الطاقة الفعالة وغير الفعالة).

## Résumé

La contribution principale de ce mémoire est l'application des méthodes de gauss-seidel, newton raphson,fast découplé et point intérieur pour résoudre le problème d'optimisation de l'écoulement de puissance et pour minimiser le cout d'exploitation du réseau électrique avec et sans FACTS.

L'application de l'approche proposée sur les deux réseaux test (13 et 30 jeux de barres) nous a permis de constater les effets positives de l'introduction d'UPFC sur le réseau électrique ( phase et module de la tension, puissance active et réactive).

## Abstract

The main contribution of this memory is the application of methods gauss-seidel,newton-raphson, fast decoupled and interior point to solve the problem of electric optimization with and without facts the applicationn, of the proposed approach the grids test (13 and 30 bus) enabled us to consult the positive effects of the introduction of UPFC on the electric grid ( phase and module of voltage, power active or reactive).

**Introduction générale**

L'industrialisation et la croissance de la population sont les premiers facteurs pour lesquels la consommation de l'énergie électrique augmente régulièrement. ainsi, pour avoir un équilibre entre la production et la consommation, il est à première vue nécessaire d'augmenter le nombre de centrales électriques, de lignes, de transformateurs etc.., ce qui implique une augmentation de cout et une d'dégradation du milieu naturel en conséquence, il est aujourd'hui important d'avoir des réseaux maillés et de travailler proche des limites de stabilité afin de satisfaire ces nouvelles exigences.

Il est intéressant pour le gestionnaire du réseau de disposer des moyens permettant de contrôler les puissances réactives, les tensions et les transits de puissances dans les lignes afin que le réseau de transport existant puisse être exploité de la manière la plus efficace et la plus sure possible.

Jusqu'à la fin des années quatre-vingt, les seuls moyens permettant de remplir ces fonctions étaient des dispositifs électromécanique, à savoir les transformateur avec régulateur en charge, les bobines d'induction et les condensateurs commutés par disjoncteurs pour le maintien de la tension et la gestion du réactif. Toutefois, des problèmes d'usure ainsi que leurs relative lenteur ne permet pas d'actionner ces dispositifs plus de quelques fois par jour, ils sont par conséquent difficilement utilisables pour un contrôle continu des flux de puissance.

Une autre technique de réglage et de contrôle des puissances réactives, des tensions et des transits de puissance utilisant l'électronique de puissance a fait ses preuves. La solution de ces problèmes passe par l'amélioration du contrôle des systèmes électriques déjà en place. IL est nécessaire de doter ces systèmes d'une certaine flexibilité leur permettant de mieux s'adapter aux nouvelles exigences.

Les éléments proposés qui permettent ce contrôle amélioré des systèmes sont les dispositifs FACTS " flexible alternating curent transmission system ".Les disposais FACTS font général appel à de l'électronique de puissance des microprocesseurs, de l'automatique, des télécommunications et des logiciels pour parvenir cController 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 prés de leur limite thermique, et augmentant 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.

La recherche rapportée dans ce mémoire est motivée par le souci de perfectionner le

contrôle des puissance actives et réactives et des tensions dans un réseau de transport d'énergie électrique au moyen des dispositifs FACTS, comme celle comportant une branche de réactance commandée par thyristors (GTO, IGBT) .

Le sujet de ce mémoire concerne en particulier l'étude des FACTS dans l'écoulement de puissance pour atteindre ces objectifs de recherche, ce mémoire est organisé en trois chapitres :

Le premier chapitre a été consacré à l'étude de l'écoulement de puissance, ou différentes méthodes ont été exposées et nous avons opté pour la méthode de rueiretni tniop

Dans le second chapitre, nous décrivons d'une façon générale des concepts de base sur les dispositifs FACTS, leurs nécessités d'application dans les réseaux électrique et leurs différentes structures de bases, puis on présente quelques ouvrages comprenant des disposait FACTS autours du monde, et on discute l'avantage apporté par ces dispositifs au réseau électrique.

Le troisième chapitre est consacré à l'application du contrôleurs UPFC dans l'écoulement de puissance, on a exposé en détails les résultats du programme développé sous l'environnent MATLAB ( une application du UPFC dans les réseaux électriques).

# chapitre 1

# Calcul de l''écoulement de puissance

## 1.1. Introduction

L'optimisation de l'écoulement de puissance consiste à répartir les puissances actives et réactives demandées entre les différentes centrales interconnectées dans un réseau électrique avec un coût minimal. Cette distribution doit évidemment respecter les limites de production des centrales et les capacités de transport des lignes électriques et des transformateurs. La variable à optimiser est donc le coût de production. En outre, la description générale de la topologie du système en utilisant les admittances est nécessaire. Le but de ce chapitre est de montrer comment peut-on résoudre le problème d'optimisation de l'écoulement de puissance avec un coût de production minimal en utilisant des méthodes d'optimisation classiques.[1]

## 1.2. Modélisation des éléments de puissance d'un réseau électrique:

Un réseau de transport ou de distribution électrique contient un ensemble de composant qu'on doit modélises afin d'établir les équations qui gouvernent le système électrique .dans les sections qui suivent, on va exposer quelque modèle algébrique de base relatifs aux composants du réseau qui sont nécessaires pour le calcul de l'écoulement de puissance.

### 1.2.1. Générateur de puissance

Les générateurs sont modélisés comme des injecteurs de courant. Dans l'état stationnaire, un générateur est généralement contrôlé de sorte que la puissance injectée au jeu de barres et la tension aux bornes du générateur soit maintenue constantes. La puissance active délivrée par le générateur est réglée à travers le contrôle de la turbine qui doit être dans les limites de capacité du système turbine-générateur. La tension est liée principalement à l'injection de la puissance réactive au jeu de barres de production [3].

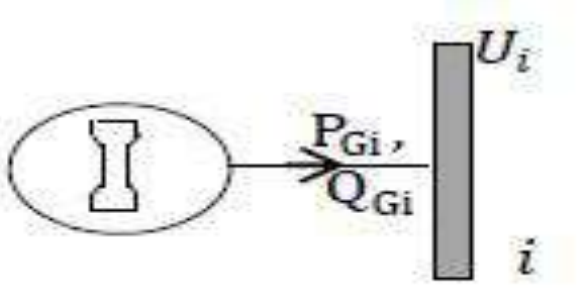



Figure 1-1 .Modèle d'un Générateur

### 1.2.2. Lignes de transport

Une ligne électrique entre les jeux de barres i et j sera donc représentée par le schéma équivalent en π, illustré dans la figure (1.2):

Les pertes longitudinales totales par effet joule dans l'ensemble des conducteurs de la ligne sont représentée par la résistance $R(\Omega)$;

L'énergie magnétique emmagasinée dans l'ensemble de conducteurs de la ligne est représentée par la réactance longitudinale total $X(\Omega)$;

La capacité totale de la ligne est répartie équitablement aux deux jeux de barres et les pertes transversales par effet couronne dans le cas des lignes de transport sont négligeables. Dans la plupart des cas la valeur de $G$ est si petite qu'on peut la négliger.

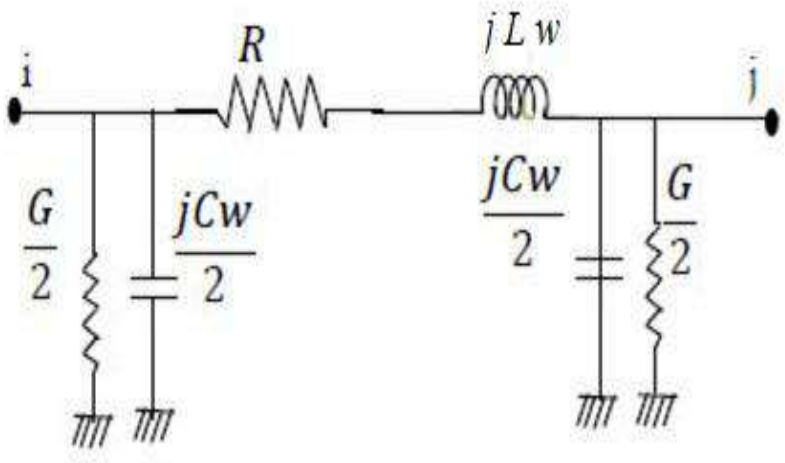



Figure 1-2 .Modèle d'une Ligne de transport

### 1.2.3. Transformateur de puissance

Il ya deux types de transformateur à modéliser: le transformateur régulateur de tension à changeur de prises de charges et le transformateur déphaseur. Dans la modélisation des systèmes électriques, les rapports de déviations et les décalages de phase sont typiquement représentés comme des modifications à la matrice admittance. La figure (1.3) présente le schéma unifilaire équivalent d'un transformateur triphasé symétrique à changeur de prises de charge et déphaseur [1].

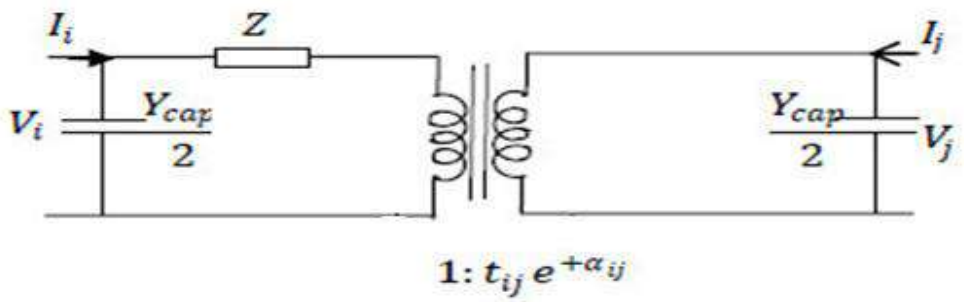



Figure 1-3 .Modèle d'un Générateur Transformateur de puissance

**1.2.4. Les charges électriques:**

La modélisation de la charge joue un rôle très important dans l'étude de l'écoulement de puissances. Ces charges sont souvent des sous-stations qui alimentent les réseaux de distribution, on les modélise statiquement comme des injecteurs négatifs de puissance dans les jeux de barres. La connexion de la charge au réseau est réalisée par l'intermédiaire d'un transformateur à prises de charge qui maintient le niveau de tension constant, cela signifie que les puissances active et réactive de la charge peuvent être représentées par des valeurs constantes. Il existe aussi la modélisation dynamique des charges qui est relativement compliquée car la puissance consommée par la charge est en fonction de la tension et du temps, et elle est utilisée généralement pour l'étude et l'analyse de la stabilité transitoire [3].

**1.2.5. Eléments shunts**

Dans la plus part des cas, les éléments shunts sont des dispositifs destinés à la compensation de l'énergie réactive et d'ajuster la tension à savoir : les moteurs synchrones, les batteries de condensateur et inductances fixes et les compensateurs statiques (SVC). La modélisation de ces éléments sera effectuée par une admittance équivalente ou par injection de puissance [4].

$$Y_{i0}=G_{i0}+j.B_{i0}$$

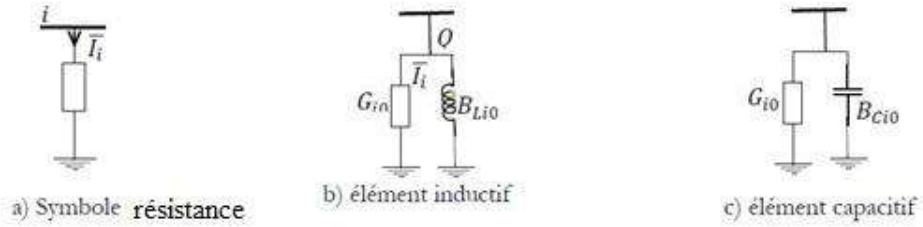



Figure 1-4.Modèle des éléments shunts

### 1.3. Formulation des équations de l'écoulement de puissance:

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, les puissances générées et les modules de tensions dans tous les jeux de barres, qui à partir desquelles les courant dans les lignes de transport, les puissances et les pertes de puissances peuvent être obtenus .Les équations des tensions nodales d'un réseau électrique de N jeux de barres sont écrites sous la forme matricielle suivante:

$$Y_{BUS}=\begin{bmatrix} \mathbf{Y_{11}} & \mathbf{Y_{12}} & \cdots & \mathbf{Y_{1n}} \\ \mathbf{Y_{21}} & \mathbf{Y_{22}} & \cdots & \mathbf{Y_{2n}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{Y_{n1}} & \mathbf{Y_{n2}} & \cdots & \mathbf{Y_{nn}} \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

$$Y_{ii}= \sum_{\mathbf{k=0}}^{\mathbf{n}} \mathbf{y_{ik}} + \mathbf{y_{i0}} \quad (1.2)$$

$$Y_{ki=-} \sum_{\mathbf{i\neq k}} \mathbf{y_{ik}} \quad (1.3)$$

$V_{BUS} = [V_1, V_2 \dots V_n]^T$ ; (1.4)

$I_{BUS} = [I_1, I_2 \dots]^T$ ; (1.5)

$I_{BUS} = Y_{BUS} . V_{BUS}$

$V_{sub}$: Le vecteur des tensions complexes de chaque nœud

$Y_{BUS}$ : la matrice admittance nodale du système de taille $(N * N)$.

$I_{BUS}$ : Le vecteur des courants injectés dans chaque nœud

eluclac les puissances dans les nœuds :

$S_i=P_i+j.Q_i$ (1.6)

$P_i = \sum_{k=1}^{n} \boldsymbol{V_i}.\boldsymbol{V_k}.\boldsymbol{Y_{ik}}.\boldsymbol{cos}(\boldsymbol{\theta_{ik}} + \delta_k - \delta_i)$ (1.7)

$Q_i=\sum_{k=1}^{n} \boldsymbol{V_i}.\boldsymbol{V_k}.\boldsymbol{Y_{ik}}.\boldsymbol{sin}(\boldsymbol{\theta_{ik}} + \delta_k - \delta_i)$ (1.8)

$P_i$ : sont respectivement les puissances active au nœud i.

$Q_i$ : sont respectivement les puissances réactives au nœud i.

Calcule la puissance transite dans les lignes :

Une fois les tensions des nœuds sont calculées, les puissances transitées dans les différentes lignes du réseau peuvent être calculées :

$I_{série} = (V_i-V_j).Y_{ij}$ (1.9)

$I_{shunt}= V_i.Y_{i0}/2$ (1.10)

$I_{ij} = (V_i - V_j).Y_{ij} + V_i . Y_{i0}/2$ (1.11)

La puissance apparente transitée de i vers j exprimée par :

$S_{ij} = V_i . I_{ij}^*$ (1.12)

$S_{ij} = V_i . (V_i^* - V_j^*) + V_i V_i^* (Y_{i0}/2)$ (1.13)

La puissance apparente transitée de j vers i exprimée par :

$S_{ji} = V_j (V_j^* - V_i^*) + V_j V_j^* (Y_{i0}/2)$ (1.14)

Calcul des pertes de puissance

Soient :

$S_{Pij} = S_{ij} + S_{ji}$ (1.15)

$S_{Pij=} (P_{ij} + P_{ji}) + j*(Q_{ij} + Q_{ji})$ (1.16)

La puissance totale perdue dans le réseau est égale à la somme des puissances perdues dans l'ensemble de ces branches.

### 1.4. Modèles des nœuds du réseau:

1- nœud bilan (slack bus) : c'est un nœud connecté avec un générateur relativement puissant ; il est considéré dans le calcul d'écoulement de puissance afin de compenser les pertes actives et assurer l'égalité entre la demande et la génération de la puissance active. Dans un nœud bilan, l'amplitude et l'angle de la tension sont supposés connus et les puissances actives et réactives sont inconnues.

2- Nœud générateur (*PV*) : c'est un nœud connecté directement avec un générateur ou une source d'énergie réactive. La puissance active et l'amplitude de tension sont considérées connues et les puissances réactives et les angles de tension sont inconnus.

3- Nœud de charge (*PQ*) : c'est un nœud connecté directement avec la charge, qui ne possède aucune source d'énergie. Les puissances active et réactive sont connues, l'amplitude et l'angle de la tension sont inconnus [5].

Il est claire que les équations (1.7) et (1.8) sont non linéaire ce qui pose un problème dont il faut y avoir une solution adéquate.

### 1.5. Des méthodes qui résoudre le problème :

#### 1.5.1. Méthode de Newton –Raphson:

Cette méthode implique des résolutions répétées d'un système d'équations linéaires, qui sont une approximation linéaire du système original d'équations non linéaires décrit par (1.7) et (1.8). Cette approximation linéaire est obtenue par un développement en série de Taylor de ces deux expressions .On est ainsi conduit à formuler le système linéaire :

$$dP_i = \sum_{k=1}^{n}\left(\left[\frac{dP_i}{d\delta_k}\right].\boldsymbol{d}\delta_k + \left[\frac{dP_i}{dV_k}\right].\boldsymbol{dV_k}\right) \quad (1.17)$$

$$dQ_i = \sum_{k=1}^{n}\left(\left[\frac{dQ_i}{d\delta_k}\right].\boldsymbol{d}\delta_k + \left[\frac{dQ_i}{dV_k}\right].\boldsymbol{dV_k}\right) \quad (1.18)$$

Ou sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix}\Delta\mathbf{P}\\ \Delta\mathbf{Q}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}\boldsymbol{j_1} & \boldsymbol{j_2}\\ \boldsymbol{j_3} & \boldsymbol{j_4}\end{bmatrix}.\begin{bmatrix}\Delta\delta\\ \Delta\mathbf{V}\end{bmatrix} \quad (1.19)$$

Les éléments de la matrice jacobéenne présenté par :

$$j_1 = \partial P/\partial\delta \quad (1.20)$$

$$J_2 = \partial P/\partial V \quad (1.21)$$

$$J_3 = \partial Q/\partial\delta \quad (1.22)$$

$$J_4 = \partial Q/\partial V \quad (1.23)$$

$$\partial P_i/\partial\delta_i = \sum_{k=1}^{n}\boldsymbol{V_i}.\boldsymbol{V_k}.\boldsymbol{Y_{ik}}.\boldsymbol{sin}(\boldsymbol{\theta_{ii}}) \quad (1.24)$$

$$\partial P_i/\partial\delta_k = -\boldsymbol{V_i}.\boldsymbol{V_k}.\boldsymbol{Y_{ik}}.\boldsymbol{sin}(\boldsymbol{\theta_{ik}} + \delta_k - \delta_i) \quad (1.25)$$

$$\partial P_i/\partial V_i = \mathbf{2}.\boldsymbol{V_i}.\boldsymbol{Y_{ii}}.\boldsymbol{cos}(\boldsymbol{\theta_{ii}}) + (\sum_{k=1}^{n}\boldsymbol{V_k}.\boldsymbol{Y_{ik}}.\boldsymbol{cos}(\boldsymbol{\theta_{ik}} + \delta_k - \delta_i) \quad (1.26)$$

$$\partial P_i/\partial V_k = \boldsymbol{V_i}.\boldsymbol{Y_{ik}}.\boldsymbol{cos}(\boldsymbol{\theta_{ik}} + \delta_k - \delta_i) \quad (1.27)$$

$$\partial Q_i/\partial\delta_i = \sum_{k=1}^{n}\boldsymbol{V_i}.\boldsymbol{V_k}.\boldsymbol{Y_{ik}}.\boldsymbol{cos}(\boldsymbol{\theta_{ii}}) \quad (1.28)$$

$$\partial Q_i/\partial\delta_k = -\boldsymbol{V_i}.\boldsymbol{V_k}.\boldsymbol{Y_{ik}}.\boldsymbol{cos}(\boldsymbol{\theta_{ik}} + \delta_k - \delta_i) \quad (1.29)$$

$$\partial Q_i/\partial V_i = \sum_{k=1}^{n}\boldsymbol{V_k}.\boldsymbol{Y_{ik}}.\boldsymbol{sin}(\boldsymbol{\theta_{ik}} + \delta_k - \delta_i) \quad (1.30)$$

$$\partial Q_i/\partial V_k = \boldsymbol{V_i}.\boldsymbol{Y_{ik}}.\boldsymbol{sin}(\boldsymbol{\theta_{ik}} + \delta_k - \delta_i) \quad (1.31)$$

La procédure de calcul de l'écoulement de puissance en utilisant la méthode de Newton –Raphson est résumée dans les étapes suivantes :

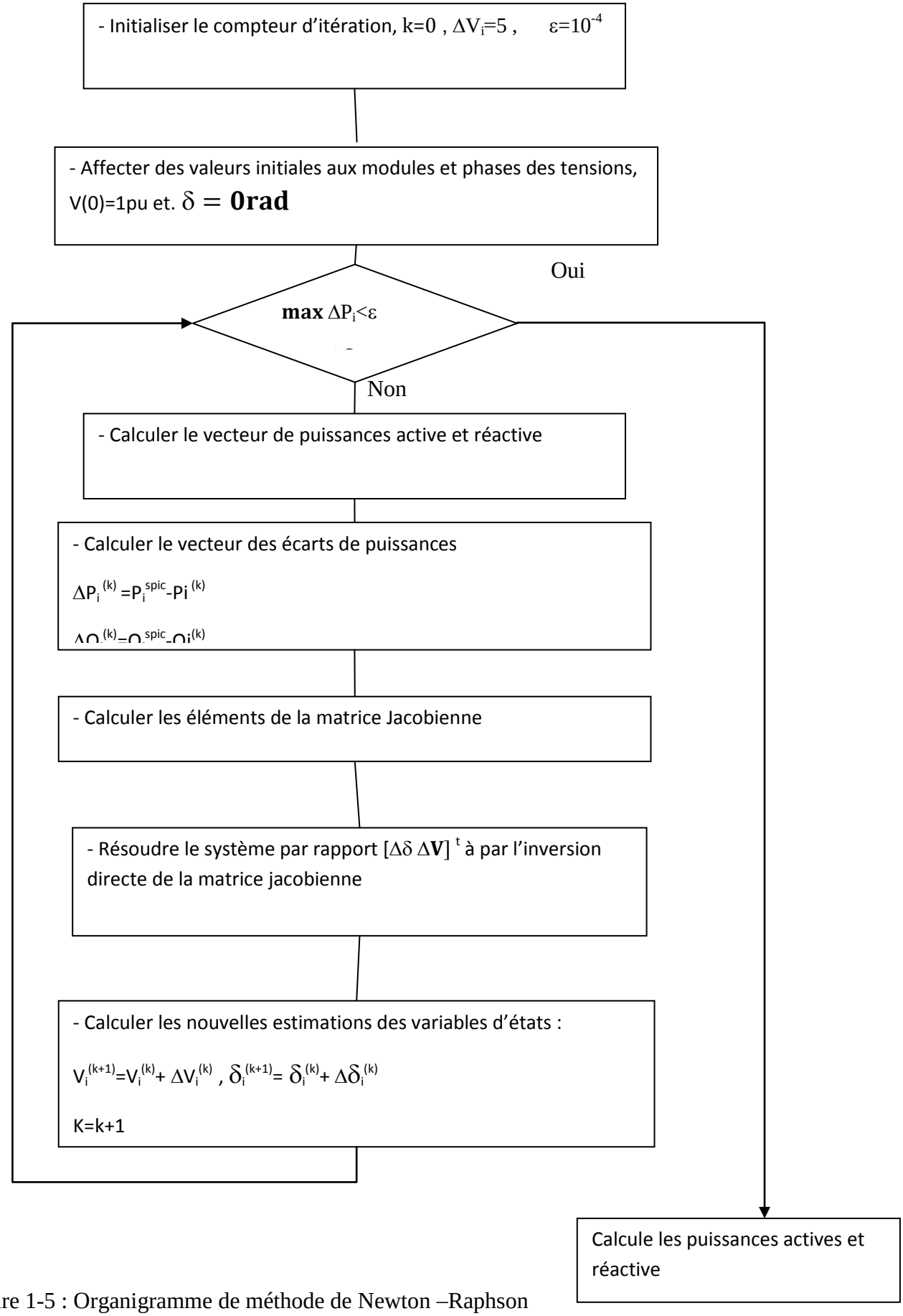



Figure 1-5 : Organigramme de méthode de Newton –Raphson

### 1.5.2. Méthode découplée rapide :

La variable de la puissance active est moins sensible à la variation de la tension V, par contre, elle est plus sensible à celle de la phase δ.

Par contre, la variation de la puissance réactive est plus sensible à la variation de la tension V, et est moins sensible à celle de la phase δ

On calcule les éléments du jacobien :

$\boldsymbol{\theta_{ii}} \approx \mathbf{90}$ $\delta_k = \delta_i$

$$\partial P_i/\partial \delta_i = \sum_{k=1}^{n} \boldsymbol{V_i . V_k . Y_{ik} sin(\theta_{ii})} \quad (1.32)$$

$$\partial P_i/\partial \delta_k = -\boldsymbol{V_i V_k Y_{ik} sin(\theta_{ik})} \quad (1.33)$$

$$\partial P_i/\partial \delta_k = -\boldsymbol{V_i . V_k . Y_{ik}} \quad (1.34)$$

$$\partial P_i/\partial V_k = \boldsymbol{V_i . Y_{ik} . cos(\theta_{ik} + \delta_k - \delta_i)} \quad (1.35)$$

$$\partial P_i/\partial V_k \approx \boldsymbol{V_i . Y_{ik} . cos(90)} = 0 \quad (1.36)$$

$$\partial Q_i/\partial \delta_k = -\boldsymbol{V_i . V_k . Y_{ik} . cos(\theta_{ik} + \delta_k - \delta_i)} \quad (1.37)$$

$$\partial Q_i/\partial \delta_k = -\boldsymbol{V_i . V_k . Y_{ik} . cos(90)} = 0 \quad (1.38)$$

$$\partial Q_i/\partial V_i = \sum_{k=1}^{n} \boldsymbol{V_k . Y_{ik} . sin(\theta_{ik} + \delta_k - \delta_i)} \quad (1.39)$$

$$\partial Q_i/\partial V_k = \boldsymbol{V_i . Y_{ik} . sin(\theta_{ik} + \delta_k - \delta_i)}$$

$$\Delta \mathbf{P} = \mathbf{j1} . \Delta\delta = \left(\frac{\partial \mathbf{P}}{\partial \delta}\right) . \Delta\delta \quad (1.40)$$

$$\Delta \mathbf{Q} = \mathbf{j4} . \Delta \mathbf{V} = \left(\frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial \mathbf{V}}\right) . \Delta \mathbf{V} \quad (1.41)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \mathbf{P} \\ \Delta \mathbf{Q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{j1} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \boldsymbol{j4} \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta \mathbf{V} \end{bmatrix} \quad (1.42)$$

$$J1 = \partial P_i/\partial \delta_k \quad (1.43)$$

$$j4 = \partial Q_i/\partial \delta_k \quad (1.44)$$

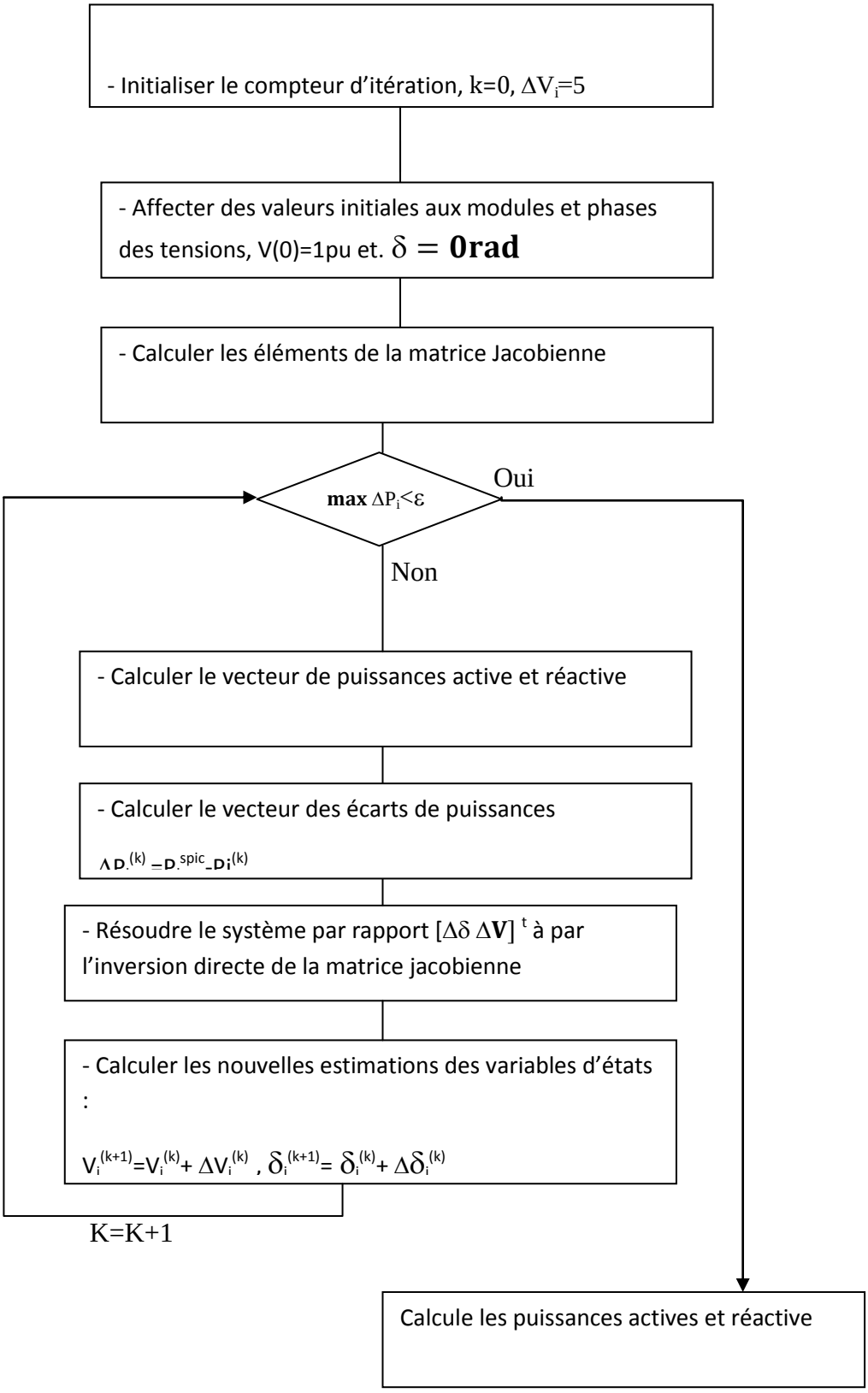



Figure 1-6 : Organigramme de méthode de découplée rapide

### 1.5.3. Méthode de gausse Seidel :

Les premières méthodes étaient basées sur la méthode itérative de gauss Seidel relative à la matrice admittance Y. Elle ne nécessite par beaucoup d'espace mémoire et sa programmation est relativement simple.

Pour système à plusieurs variables, la méthode de gauss-Seidel utilise, à chaque itération, la valeur la plus récente calculée.

La tension dans les nœuds calculés par la relation suivante :

$$\boldsymbol{I = \frac{S_i^*}{V_i^*} = (P_i - j.Q_i)/V_i^*} \quad (1.45)$$

$$\mathbf{\frac{Pi-j.Qi}{Vi^*} = \sum_{j=1}^{n} V_k . Y_{ik}} \quad (1.46)$$

$$\mathbf{\frac{Pi-j.Qi}{Vi^*} = V_i . Y_{ii} + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{n} V_k . Y_{ik}} \quad (1.47)$$

$$\mathbf{V_i = \frac{1}{Yii} . [\frac{Pi-j.Qi}{Vi^*} - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{n} V_k . Y_{ik}]} \quad (1.48)$$

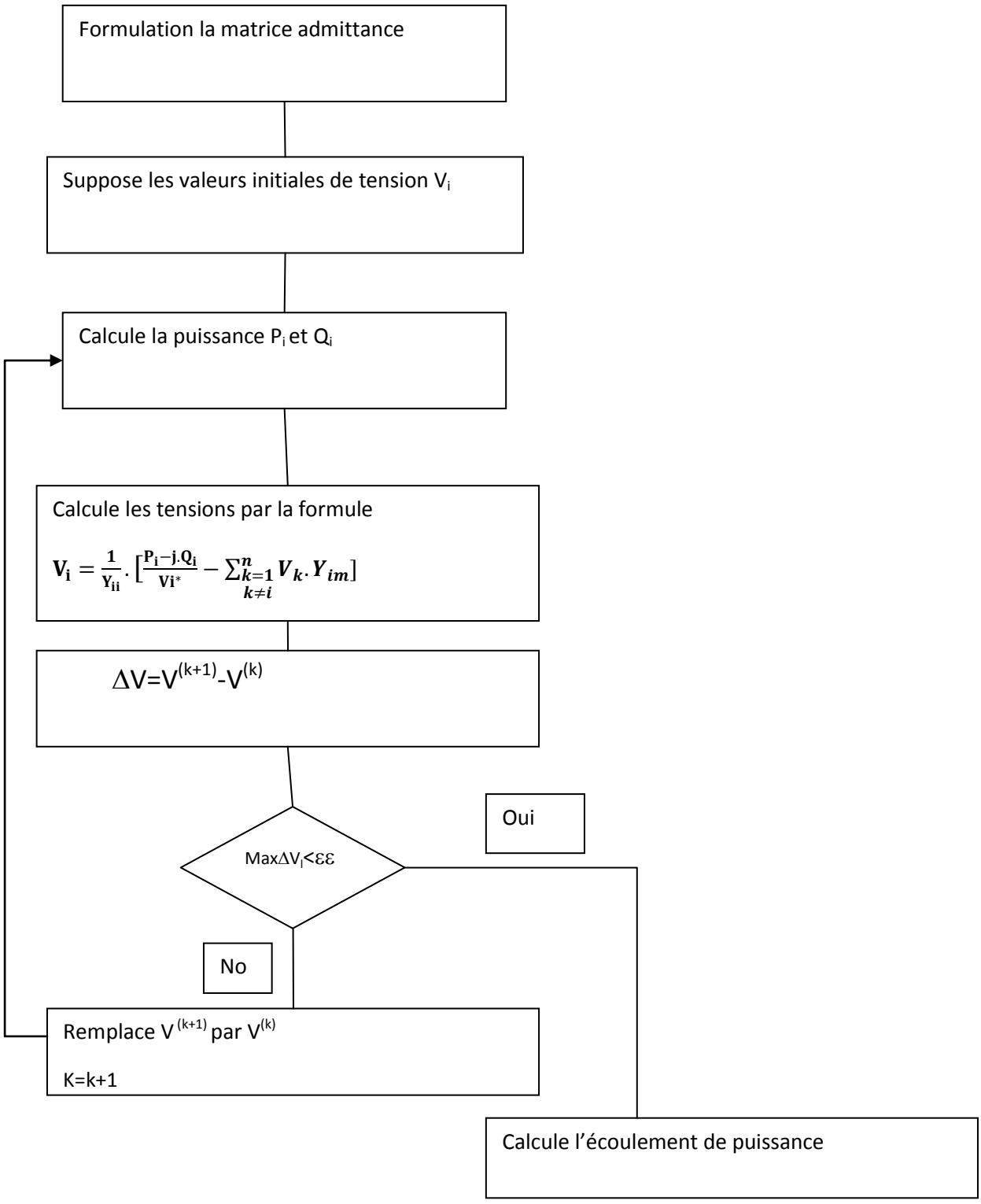



Figure 1-7 : Organigramme de méthode de gausse Seidel

### 1.6. Dispatching économique

L'objectif principal du dispatching économique est de trouver la contribution en puissance de chaque groupe de production du système électrique, de sorte que le coût total de production soit minimisé que possible pour n'importe quelle condition de charge tout en respectant les contraintes physiques de ces générateurs.

Pour un système électro énergétique avec Ng unités de production, le coût total du combustible est simplement égal à la somme des coûts élémentaires du combustible des différentes unités [7], soit :

$$Ct=\sum_{i=1}^{ng} \boldsymbol{C_i} \quad (1.72)$$

$$Ci=A_i+B_i.P_i+C_i.P_i^2 \quad (1.73)$$

Tel que :

$P_i$: C'est la puissance active produite par le générateur *i*.

Ct: Représente le coût total de production.

Ci: Représente le coût de chaque générateur.

$A_i$, $B_i$, $C_i$ représentent les coefficients de la fonction coût.

Il est évident que la somme de toutes les puissances actives générées, doit être égale à la charge totale du système plus les pertes totales de transmission.

Cette distribution doit en plus respecter les limites admissibles de production de chaque générateur de production $Pg^{min}$ et$Pg^{max}$. Par conséquent, le problème du dispatching économique se formule mathématiquement comme suit :

Min (Ct) (fonction objectif à minimiser) sujet de [8] :

$$\sum_{i=1}^{ng} \boldsymbol{Pg}_i=P_D+P_{loss} \quad (1.74)$$

$$Pg_i^{min}\leq Pg_i\leq Pg_i^{max} \quad (1.75)$$

Avec :

$P_{D\,:\,la}$ puissance demandée.

$P_{loss}$: Pertes actives de toutes les lignes électriques.

### 1.6. 1.Méthode de piont intérieur :

Tout d'abord, la fonction objective f(x) sera introduite .elle reflétera le désir de minimiser les couts du système ; Les contraintes d'égalité et d'inégalité. Seront discutées .Finalement, tous les termes dans le lagrangien, gradient, hessian seront résumés [6].

### 1.6. 1.1.La fonction objective pour (OPF) :

Le modèle quadratique du cout pour les puissances générées sera utilise

$C_{PGi}=A_i+B_iP_{Gi}+CP_{Gi}^2$ (1.49)

La fonction cout de l'écoulement de puissance détermine les couts associés avec les puissances générées du système .elle peut être écrire comme le somme des couts à chaque générateur

$$F(x) = \sum_{i=1}^{ng} \mathbf{A_i + B_iP_{Gi} + C_iPG_{Gi}^2} \quad (1.50)$$

### 1.6. 1.2.Les contraintes d'égalité :

Le système de puissance est mis en vigueur à traverse les équations de l'écoulement de puissance qui exigent que l'injection de la puissance active et réactive à chaque nœud doit être égale à zéro

$\Delta P_i = 0$

$$= \mathbf{V_i} \sum_{i=1}^{ng} \mathbf{V_k\, G_{ik} \cos(\theta_i - \theta_k) + B_{ik} \sin(\theta_i - \theta_k) - PG_i + PD_i} \quad (1.51)$$

$\Delta Q_i = 0$

$$= V_i \sum_{i=1}^{ng} \mathbf{V_k\, [G_{ik} \sin(\theta_i - \theta_k) + B_{ik} \cos(\theta_i - \theta_k)] - QG_i + QD_i} \quad (1.52)$$

### 1.6. 1.3.Les contraintes d'inégalité :

Les contraintes d'inégalités de l'écoulement de puissance reflètent les limites sur les paramétrés physique du système de puissance pour assurer la sécurité du système.

Les générateurs ont un maximum et minimum de production active et réactive, qui nous donnent les équations d'égalité et d'inégalité suivante :

$PG_{min} \leq PG \leq PG_{max}$ (1.53)

$QG_{min} \leq QG \leq QG_{max}$ (1.54)

D'autre part, chaque générateur doit avoir des limites sur sa tension :

$V_{i\,min} \leq V_i \leq V_{i\,max}$ (1.55)

En se référant aux applications précédents dans le calcule des réseaux électrique, on aura :

Min f(x) (1.56)

St: h(x) =0 (1.57)

g(x)≤0 (1.58)

1.6. 1.4.Calcul des éléments du gradient du lagrangien :

L(x) =f(x) + λ.h(x) + μ.g(x)

$$\nabla_x L(x,\lambda_h,\lambda_g)=\begin{bmatrix} \frac{\partial L}{\partial PGi} \\ \frac{\partial L}{\partial QGi} \\ \frac{\partial L}{\partial VGi} \\ \frac{\partial L}{\partial \delta i} \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda pi} \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda qi} \end{bmatrix} = 0 \quad (1.59)$$

**1.6. 1.5.Calcul des éléments du hessian H :**

$$\nabla_{xx} L(x,\lambda_h,\lambda_g)=\begin{bmatrix} \frac{\partial^2 L}{\partial PGi\partial PGi} & \frac{\partial^2 L}{\partial QGi\partial PGi} & \frac{\partial^2 L}{\partial Vi\partial PGi} & \frac{\partial^2 L}{\partial \delta i\partial PGi} \\ \frac{\partial^2 L}{\partial PGi\partial QGi} & \frac{\partial^2 L}{\partial QGi\partial QGi} & \frac{\partial^2 L}{\partial Vi\partial QGi} & \frac{\partial^2 L}{\partial \delta i\partial QGi} \\ \frac{\partial^2 L}{\partial PGi\partial Pvi} & \frac{\partial^2 L}{\partial QGi\partial Vi} & \frac{\partial^2 L}{\partial Vi\partial Vi} & \frac{\partial^2 L}{\partial \delta i\partial Vi} \\ \frac{\partial^2 L}{\partial PGi\partial \delta i} & \frac{\partial^2 L}{\partial QGi\partial \delta i} & \frac{\partial^2 L}{\partial Vi\partial \delta i} & \frac{\partial^2 L}{\partial \delta i\partial \delta i} \end{bmatrix} \quad (1.60)$$

**1.6. 1.6.Calcul des éléments du jacobien :**

En fin la grande matrice J est finalement construite ; le bloc $J^{-1}$ on déduit que la grande matrice [A] est construite .qui possède une densité d'élément fiable et non nul. On qualifie une telle matrice de « matrice creuse »

$$[A]=\begin{bmatrix} \boldsymbol{H} & \boldsymbol{J} \\ \boldsymbol{J^t} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (1.61)$$

**1.6. 1.7.Calcule des éléments du second membre t1 :**

$$\nabla g\,(x)^t.[s^t]\{\mu.e+[\lambda_g].g(x)^t=\begin{bmatrix} \frac{\mu+\lambda_{pimax}[PG_i-PG_{imax}]}{SPG_{imax}} - \frac{\mu+\lambda_{pimin}[PG_i-PG_{imin}]}{SPG_{imin}} \\ \frac{\mu+\lambda_{qimax}[QG_i-QG_{imax}]}{SQG_{imax}} - \frac{\mu+\lambda_{pimin}[QG_i-QG_{imin}]}{SQG_{imin}} \\ \frac{\mu+\lambda_{Vimax}[V_i-V_{imax}]}{SV_{imax}} - \frac{\mu+\lambda_{Vimin}[V_i-V_{imin}]}{SV_{imin}} \end{bmatrix}$$

### 1.6. 1.8.Calcule des éléments du second membre t2 :

T2= -h(x) (1.62)

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{H} & \boldsymbol{J} \\ \boldsymbol{J^t} & \boldsymbol{0} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \boldsymbol{x} \\ \Delta \lambda_{\boldsymbol{h}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{t1} \\ \boldsymbol{t2} \end{bmatrix} \quad (1.63)$$

Calcule de variation de la variable d'écart $\Delta \boldsymbol{S}$ :

$\Delta \boldsymbol{S}$=-g(x)-S-$\nabla$g(x). $\Delta \boldsymbol{x}$ (1.64)

On aura:

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_{\boldsymbol{pgimax}} \\ \Delta\lambda_{\boldsymbol{pgimin}} \\ \Delta\lambda_{\boldsymbol{Qgimax}} \\ \Delta\lambda_{\boldsymbol{Qgimin}} \\ \Delta\lambda_{\boldsymbol{Vimax}} \\ \Delta\lambda_{\boldsymbol{Vimin}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\Delta\lambda_{\boldsymbol{pgimax}} + \frac{\mu - \Delta\lambda_{\boldsymbol{pgimax}} . \Delta \boldsymbol{S}_{\boldsymbol{pgimax}}}{\boldsymbol{S}_{\boldsymbol{pgimax}}} \\ -\Delta\lambda_{\boldsymbol{pgimin}} + \frac{\mu - \Delta\lambda_{\boldsymbol{pgimin}} . \Delta \boldsymbol{S}_{\boldsymbol{pgimin}}}{\boldsymbol{S}_{\boldsymbol{pgimin}}} \\ -\Delta\lambda_{\boldsymbol{qgimax}} + \frac{\mu - \Delta\lambda_{\boldsymbol{qgimax}} . \Delta \boldsymbol{S}_{\boldsymbol{qgimax}}}{\boldsymbol{S}_{\boldsymbol{qgimax}}} \\ -\Delta\lambda_{\boldsymbol{qgimin}} + \frac{\mu - \Delta\lambda_{\boldsymbol{qgimin}} . \Delta \boldsymbol{S}_{\boldsymbol{qgimin}}}{\boldsymbol{S}_{\boldsymbol{qgimin}}} \\ -\Delta\lambda_{\boldsymbol{Vimax}} + \frac{\mu - \Delta\lambda_{\boldsymbol{Vimax}} . \Delta \boldsymbol{S}_{\boldsymbol{Vimax}}}{\boldsymbol{S}_{\boldsymbol{Vimax}}} \\ -\Delta\lambda_{\boldsymbol{Vimin}} + \frac{\mu - \Delta\lambda_{\boldsymbol{Vimin}} . \Delta \boldsymbol{S}_{\boldsymbol{Vimin}}}{\boldsymbol{S}_{\boldsymbol{Vimin}}} \end{bmatrix} \quad (1.65)$$

1.6. 1..9.Calcule des limites de correction $\alpha_{\boldsymbol{p}}$et $\alpha_{\boldsymbol{d}}$

$\alpha_{\boldsymbol{p}}$=min [$\mathbf{min}_{\Delta \boldsymbol{sj}<0} \frac{\boldsymbol{S_j}}{|\Delta \boldsymbol{SJ}|}$,1.0] (1.66)

$\alpha_{\boldsymbol{d}}$=min [$\mathbf{min}_{\Delta\lambda \boldsymbol{gj}<0} \frac{\lambda_{\boldsymbol{gj}}}{|\Delta\lambda_{\boldsymbol{gJ}}|}$,1.0] (1.67)

Ainsi, les nouvelles valeur de $P_{Gi}$ , $Q_{Gi}$, $V_i$, $\lambda P_{Gi}$ , $\lambda Q_{Gi}$ ,$S_i$ et$\lambda g_i$ sont calculées en utilisant la formule suivante :

$$\begin{cases} \boldsymbol{x^{(k+1)}} = \boldsymbol{X^{(k)}} + \mathbf{0.99995}. \alpha_{\boldsymbol{p}}. \Delta \boldsymbol{x} \\ \boldsymbol{S^{(k+1)}} = \boldsymbol{S^{(k)}} + \mathbf{0.99995}. \alpha_{\boldsymbol{p}}. \Delta \boldsymbol{S} \\ \lambda_{\boldsymbol{h}}{}^{(\boldsymbol{k+1})} = \lambda_{\boldsymbol{h}}{}^{(\boldsymbol{k})} + \mathbf{0.99995}. \alpha_{\boldsymbol{d}}. \Delta\lambda_{\boldsymbol{h}} \\ \lambda_{\boldsymbol{g}}{}^{(\boldsymbol{k+1})} = \lambda_{\boldsymbol{g}}{}^{(\boldsymbol{k})} + \mathbf{0.99995}. \alpha_{\boldsymbol{d}}. \Delta\lambda_{\boldsymbol{g}} \end{cases} \quad (1.68)$$

### 1.6. 1.10.Calcul du paramètre de perturbation μ :

μ= **SIGMA**. $\frac{\lambda_{\boldsymbol{g}}{}^{\boldsymbol{T}}}{\boldsymbol{N_{iq}}}$ (1.69)

$N_{iq}$=2. (n+ng) (1.70)

$$\mu = \frac{\mathbf{SIGMA}.}{\mathbf{2}.(\mathbf{n}+\mathbf{ng})} [\sum_{i=1}^{ng} \lambda PG_{max}.SP_{Gmax} + \sum_{i=1}^{ng} \lambda P_{Gmin}.SP_{Gmin} + \sum_{i=1}^{ng} \lambda Q_{Gmax}.SQ_{Gmax} + \sum_{i=1}^{ng} \lambda Q_{Gmin}.SQG_{min} + \sum_{i=1}^{ng} \lambda \boldsymbol{V}_{imax}.SV_{imax} + \sum_{i=1}^{ng} \lambda \boldsymbol{V}_{imin}.SV_{imin}] \quad (1.71)$$

Un test est effectué sur μ ,qui doit être inferieur à un certain ε choisi par l'utilisation, qui nous assure de l'approche de la solution optimale ,sinon le processus est répété itérativement

Les valeurs des $P_{Gi}$, $Q_{Gi}$, et $V_{Gi}$ correspondant les valeurs optimales des puissances activent, des puissances réactives et des tensions respectivement.

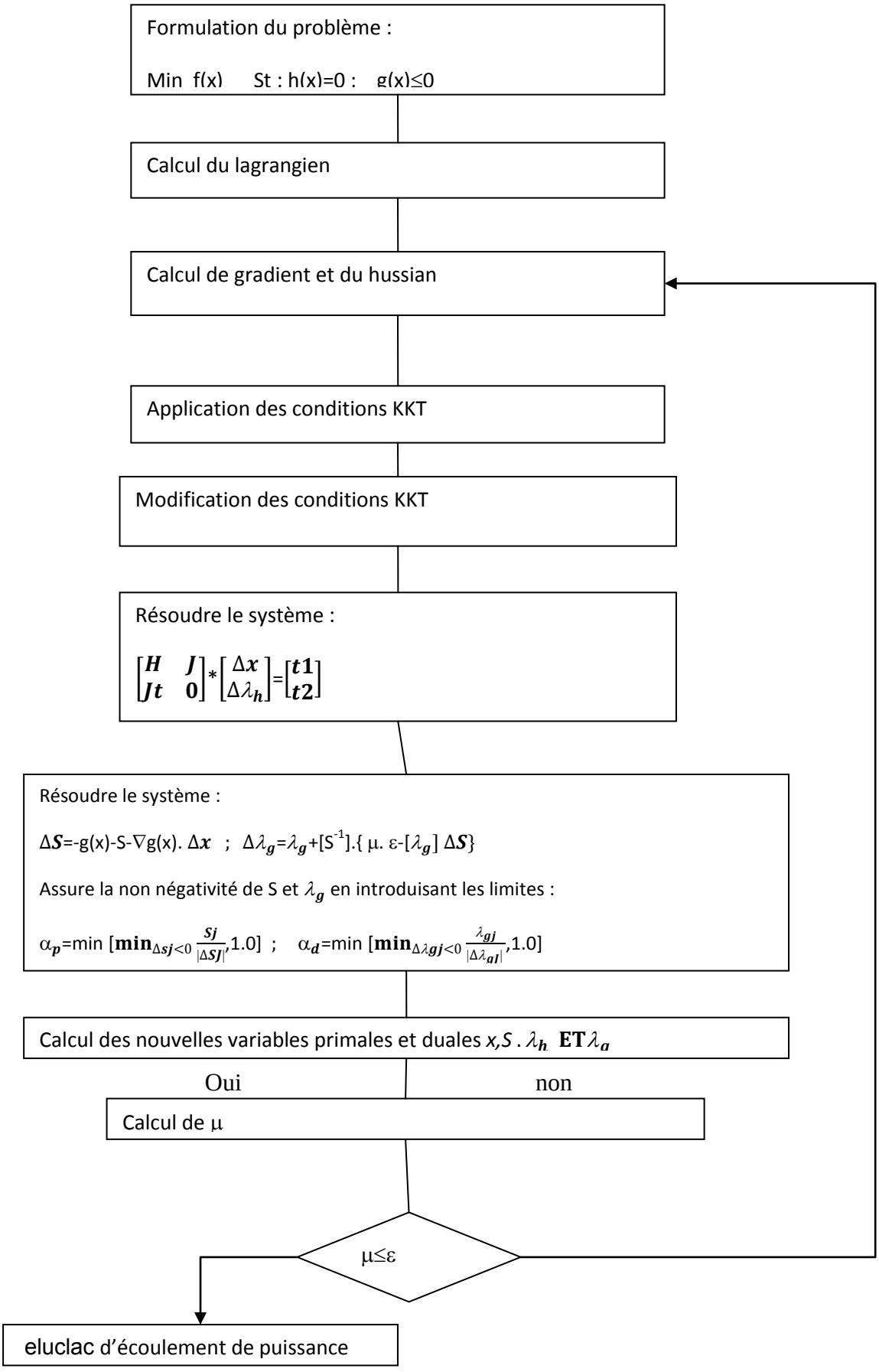



Figure 1-8 : Organigramme de méthode de point intérieur

## 1.7. Conclusion :

Dans ce chapitre, on a fait la modélisation de quelques éléments de puissance constituants le réseau de transport et dont leur modélisation entre directement dans le calcul de l'écoulement de puissance. Le problème de écoulement de puissance peut être donc résolu par la technique de Newton raphson qui converge avec une même vitesse, mesurée par le nombre d'itération, pour les large et courte de systèmes, le problème le plus important dans l'industrie d'électrique est réduire maximum le cout de la production de l'énergie électrique générée par l'ensemble des centrales interconnectées. Ce problème ne peut être résolu par l'écoulement de puissance mais par l'optimisation de l'écoulement de puissance.

# Chapitre 02

# Généralité sur les FACTS

## 2.1.Introduction :

Les dispositifs FACTS (Flexible Alternative Current Transmission Systems) peuvent contribuer à faire face aux problèmes rencontrés à l'exploitation des réseaux électriques. Le concept FACTS, introduit en 1986 par Electric Power Research Institute (EPRI), regroupe l'ensemble des dispositifs, basés sur l'électronique de puissance, qui permettent d'améliorer l'exploitation d'un réseau électrique. Son développement est étroitement lié aux progrès réalisés dans le domaine des semi-conducteurs de puissance et plus particulièrement des éléments commandables tels que le thyristor et le thyristor GTO. Ces éléments jouent le rôle d'interrupteurs très rapides ; ce qui confère aux dispositifs FACTS une vitesse et une fiabilité bien supérieures à celles des systèmes électromécaniques classiques [9].

### 2.2. 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 la puissance du réseau.

#### 2.2.1. 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 d'une vitesse de commande très élevées et ne rencontrent pas de problèmes d'usure comme 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 [10]:

- 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 même supprimé, les surcharges dans les lignes ou les transformateurs ainsi que pour éviter les flux de bouclage dans le réseau. Ils agissent alors en contrôlant la réactance des lignes et en ajustant les déphasages.

De par leur vitesse de commande élevée, les FACTS possèdent de nombreuses qualités en régime dynamique. Ils permettent en particulier :

- D'accroître la réserve de stabilité transitoire.
- D'amortir les oscillations de puissance.
- De supporter de manière dynamique la tension.
- D'accroître la réserve de stabilité statique.

Les dispositifs FACTS ont également une action bénéfique sur les niveaux des courants de court-circuit ainsi qu'en cas de résonance hypo-synchrone.

**2.3. Les avantages de la technologie des dispositifs FACTS** [11]:

- Contrôle de l'écoulement de puissance : c'est la fonction principale des FACTS. L'utilisation du contrôle de l'écoulement de puissance peut satisfaire les demandes de charge, atteindre un fonctionnement optimal, et surmonter les conditions d'urgence.
- Amélioration de la stabilité dynamique. Cette fonction supplémentaire des FACTS comprenne l'amélioration de la stabilité transitoire, l'amortissement des oscillations de puissance et le contrôle de stabilité de la tension.
- Augmenter la capacité de transport de lignes à leurs capacités thermiques, y compris les demandes à court terme et saisonnière.
- Fournir des connections sécurisées entre les compagnies de production et les régions par la diminution de la réserve de la puissance à générer requise par les deux zones.
- La réduction de l'écoulement de la puissance réactive, ce qui permettra ainsi à la ligne de transporter plus de puissance active.
- Contrôle de la boucle de l'écoulement de puissance**.**

**2.4. Types des dispositifs FACTS :**

Les systèmes FACTS peuvent être classés en trois catégories, Dans cette section, nous essayons de présenter les FACTS les plus populaires appartenant à chaque catégorie :

### 2.4.1 .Compensateurs Parallèles

Les compensateurs parallèles sont utilisés depuis longtemps dans les réseaux électriques principalement pour contrôler les tensions aux niveaux désirés lorsque les conditions du système changent. Des réactances fixes ou mécaniquement commutés sont appliquées pour réduire au minimum les surtensions du système dans des conditions de faible charge et des condensateurs shunt fixés ou mécaniquement commutés sont appliqués afin de maintenir des niveaux de tension dans des conditions de forte charge. Dans les deux cas, les compensateurs shunts produisent une impédance réactive shunt, variable qui est ajustée en fonction des conditions du réseau de transport [12].

#### 2.4.1.1 .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.

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 [13].

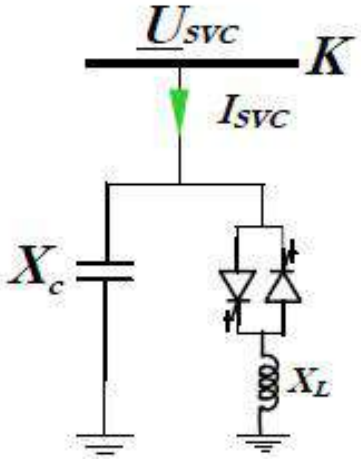


**Figure 2-1** schémas de base d'un SVC.

- **Principe de fonctionnement**

La figure. 2.1 donne une représentation schématique monophasée d'un compensateur statique. Il est composé d'un condensateur avec une réactance capacitive $X_C$ et d'une bobine d'inductance avec la réactance $X_L$ .Ce système utilise l'angle d'amorçage α des thyristors pour contrôler le courant dans la réactance alors que le contrôle de la puissance réactive par cette méthode est rapide et d'une façon continue .Le RCT ne peut absorbée que de l'énergie réactive, puisque il est constitue d'élément inductifs. C'est pour cela que l'on associe ses dispositifs avec des bancs de condensateur commandé par thyristor (CCT) qui fournit de l'énergie réactive au réseau. Des thyristors fonctionnent cette fois en pleine conduction (une période complète de la pulsation du réseau). Le réglage de l'énergie absorbée par RCT, le bilan global est la somme de deux énergies.

Ce dispositif est associé à des filtres LC accordés pour éliminer les harmoniques de ces dispositifs RCT, CCT, bancs des capacités fixes et filtres d'harmoniques constitue le compensateur hybride, plus connu sous le nom de SVC dont le premier dispositif à été installé en 1979 en Afrique du Sud [2].

### 2.4.2.2 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. 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 [14].

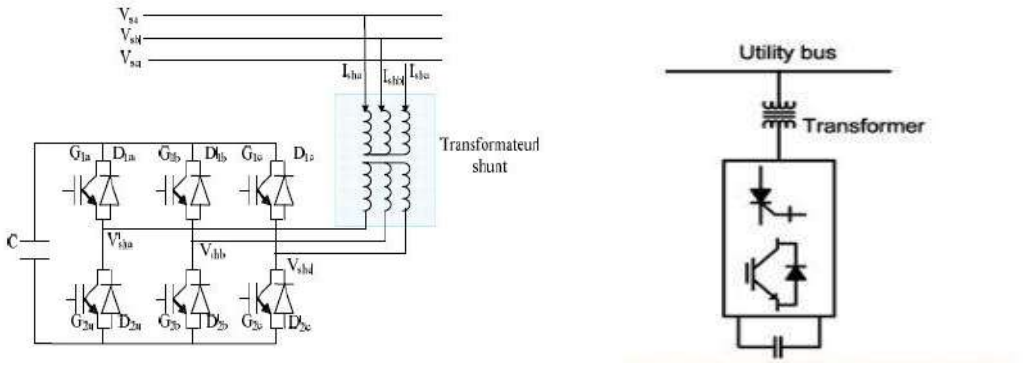



**Figure 2-2** schémas de base d'un STATCOM.

- **Principe de fonctionnement**

Le principe de fonctionnement de STATCOM est similaire à celui du compensateur synchrone. Les tensions de sortie sont générées par un onduleur au lieu d'avoir créées par un groupe tournant. Ce principe a pu être mis en œuvre grâce à l'évolution des composants de l'électronique de puissance, et surtout grâce à l'apparition des GTO de forte puissance. Les cellules de commutation sont bidirectionnelles, c'est -à –dire formés de GTO et de diodes en antiparallèle. Le rôle de STATCOM est d'échanger l'énergie réactive avec les réseaux électriques. L'échange d'énergie réactive se fait par le contrôle de la tension de sortie de l'onduleur $V_S$, laquelle est en phase avec la tension du réseau $E$.

- **Comparaison entre le SVC et le STATCOM**

Le SVC et le STATCOM sont très proches dans leur pouvoir de compensation, mais très différents dans le principe de fonctionnement. Le STATCOM est une source de tension synchronisée en shunt avec le réseau électrique tandis que le SVC est une admittance (inductive ou capacitive) shunte contrôlée. Le STATCOM présente une caractéristique supérieure au SVC, beaucoup plus performant et surtout ne nécessite pas un même banc de batterie que le SVC pour la même puissance.

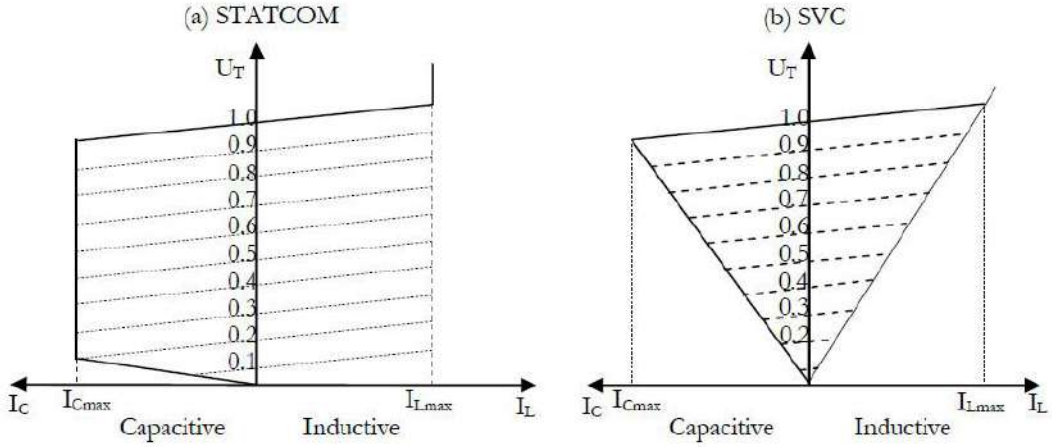



**Figure 2.3**. Caractéristique tension courant V-I a. STATCOM b. SVC

## 2.4.2. Compensateurs Séries

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

### 2.4.2.1. 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 .Le Compensateur série commuté par thyristor TSSC, 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 [14].

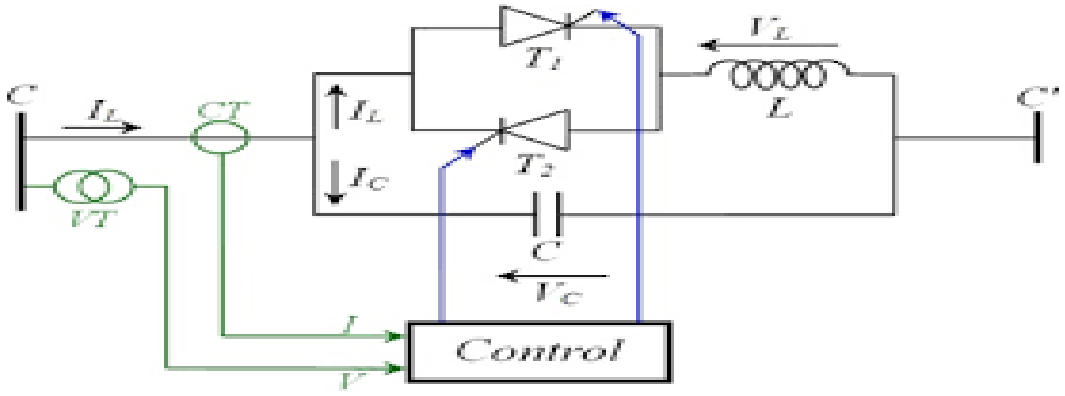



**Figure 2-4** schémas de base d'un CSST

### 2.4.2.2. 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 thyristor afin de pouvoir assurer une variation homogène de la réactance capacitive. Le TCSC permet une compensation qui varie entre 20% inductive et 80% capacitive [15].

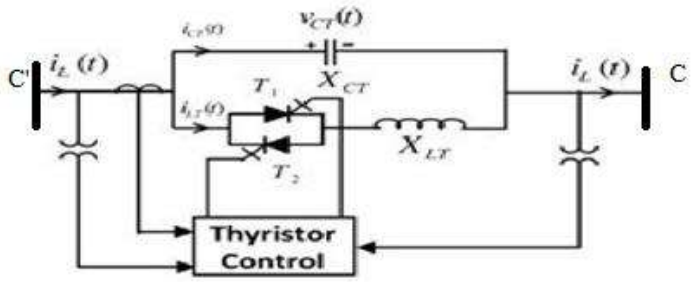



**Figure 2-5** schémas de base d'un CSCT

- **Principe de fonctionnement**

Le TCSC est composé d'une inductance en série avec un gradateur à thyristor, le tout en parallèle avec un condensateur. Le TCSC est inséré sur la ligne de transmission (Figure. 2.5).

Où

$X_{CT}$ : est l'impédance du condensateur du TCSC.

$X_{LT}$ : est l'impédance du l'inductance du TCSC.

A la réactance variable tel qu'un RCT (Réactances Commandées par Thyristor) et relier a travers un condensateur en série. Quand l'angle d'amorçage de RCT est de

180 degrés, le réacteur devient non conduire et le condensateur en série à sa impédance normale. Pendant que l'angle est avance de 180 degrés, l'impédance capacitive augmentée. A l'autre extrémité, quand l'angle d'amorçage de RCT est de 90 degrés, le réacteur devient entièrement conduisant, et toute impédance devienne inductive, par ce que l'impédance du réacteur est conçue pour être beaucoup inferieure au condensateur en série impédance. Avec 90 degré, le TCSC aide en limitant le courant de défaut.

Quand l'angle d'amorçage du RCT est de 180 degrés, lui des arrêts conduisant, et les actes non contrôles du réacteur comme limiteur de courant de défaut.

Le dispositif peut opérer en trois modes différents :

a) Mode hors circuit : les thyristors sont en pleine conduction.

b) Mode bloque : les thyristors sont bloques.

c) Mode variable : la conduction des thyristors est contrôlée par un signal d'amorçage et donc le TCSC a une réactance contrôlables dans les régions inductives et capacitives. Ce dernier cas a un grand intérêt. Les angles d'amorçage des thyristors peuvent changer de 90 degrés jusqu'a une valeur maximale dans une plage de fonctionnement inductif et de fonctionnement capacitif.

Les principaux avantages de l'insertion de TCSC dans un réseau électrique sont :

- Compensation du déséquilibre des courants de charge.
- Amélioration de la stabilité dynamique, par l'amortissement des oscillations de puissance et de la stabilité de tension.
- Réduction des risques de résonance hypo-synchrone**.**

### 2.4.2.3. 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.

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 sa taille est réduite en comparaison au celle du TCSC [14].
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.

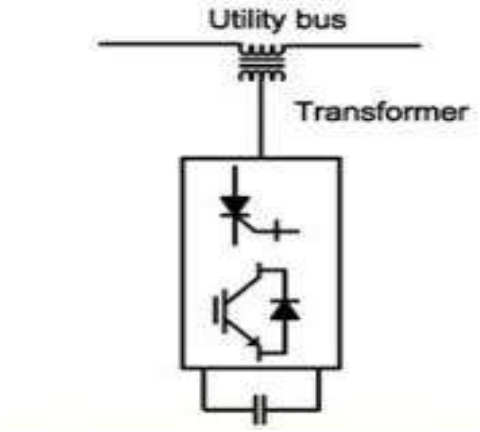



**Figure 2-6** schémas de base d'un CSSS

.

- ## Comparaison entre les différents types de FACTS séries

-Le SSSC est une source de tension contrôlée. Le TSSC et le TCSC sont des compensateurs à impédance effective variable. Issus de différentes structures, il y a des différences essentielles dans les caractéristiques et les fonctionnalités de ces appareils.

- Le SSSC est capable de générer en interne une tension variable indépendamment du courant qui passe à travers la ligne. La tension de compensation du TSSC sur une plage de réglage donnée est proportionnelle au courant de la ligne. Le TCSC peut maintenir une bonne compensation lorsque le courant de la ligne diminue dans des limites définies par les caractéristiques électriques des thyristors.
- Le SSSC offre la possibilité d'acquérir une source d'énergie dans le bus continue. Il peut donc assurer une compensation de la résistance de ligne par injection de puissance active ainsi que pour la réactance de ligne par l'injection de puissance réactive. Le TSSC et le TCSC ne peuvent pas échanger de la puissance active avec la ligne de transmission et ne peuvent assurer que de la compensation réactive.
- Le SSSC avec un élément de stockage d'énergie active améliore encore l'efficacité d'amortissement des oscillations de puissance transmises par la modulation de la compensation série sur un signal pris du réseau comme la puissance active, la vitesse des générateurs et les angles de charge.

## 2.3. 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.

### 2.3.1. Transformateur déphaseur commandé par thyristor (TSPCT)

IEEE définit le TCPST (*Thyristor Controlled Phase Shifting Transformer*) comme étant un transformateur déphaseur ajusté par thyristor afin de fournir un angle de phase rapidement variable.

Transformateur déphaseur commandé par thyristor TCPST, est le premier équipement FACTS combiné [14].

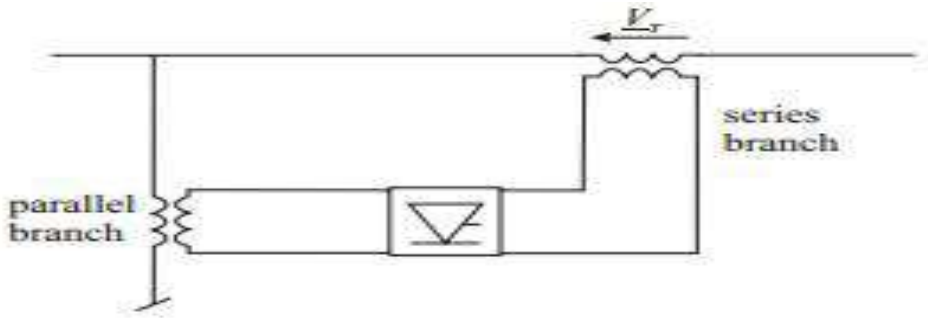



**Figure 2-7** schémas de base d'un TSPCT.

### 2.3.2. 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.

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 [14].

### 2.3.3. Contrôleur de transit de puissance universel (UPFC)

IEEE définit l'UPFC (Unified Power flow Controller) 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. L'UPFC est capable de remplir toutes les fonctions des autres dispositifs FACTS [14].

- **Principe de fonctionnement :**

Le dispositif UPFC est constitué de deux onduleurs triphasés de tension à thyristors GTO, l'un connecté en parallèle au réseau par l'intermédiaire d'un transformateur triphasé , l'autre connecté en série avec le réseau via trois transformateurs monophasés dont les primaires sont reliés, entre eux, en étoile.

Les deux onduleurs sont interconnectés par un bus continu et par un condensateur de filtrage comme indiqué sur la Figure. 2.8. L'onduleur série injecte une tension à la même fréquence que celle du réseau et dont l'amplitude et la phase est ajustable.

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.

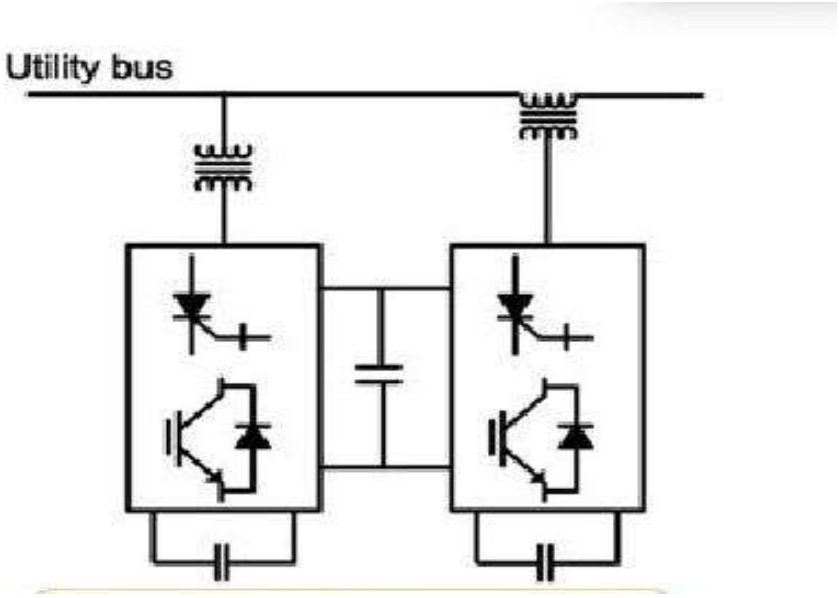



**Figure 2-8** schémas de base d'un UPFC

### 2.4. Coût des dispositifs FACTS

Mis à part les avantages techniques apportés par les FACTS, d'autres critères liés au coût doivent êtres 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 revenues 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 [16].

### 2.5. Synthèse

Les différents dispositifs FACTS présentés dans cette section possèdent tous leurs propres caractéristiques tant en régime permanent qu'en régime transitoire. Chaque type de dispositif sera donc utilisé pour répondre à des objectifs bien définis. Des

considérations économiques entrant également dans le choix du type d'installation sont à discuter. Le tableau 2.1 synthétise les domaines d'applications des différentes technologies de FACTS. Le nombre
« +» est proportionnel à l'efficacité du dispositif [16].

**Tableau 2.1** Domaines d'applications des dispositifs FACTS

| Dispositif | Contrôle du transit de puissance | Contrôle de la tension | Stabilité transitoire | Stabilité statique |
|---|---|---|---|---|
| SVC | + | +++ | + | ++ |
| STATCOM | + | +++ | ++ | ++ |
| TCSC | ++ | + | +++ | ++ |
| SSSC | ++ | + | +++ | ++ |
| TCPST | +++ | + | ++ | ++ |
| UPFC | +++ | +++ | +++ | +++ |

## 2.6. Modélisation mathématique du compensateur universel 'UPFC'

Le modèle mathématique de l'UPFC est établi dans le but d'étudier les relations entre le réseau électrique et l'UPFC en régime stationnaire. Le schéma de base est donné sur la figure. 2.9. Cette figure représente un schéma unifilaire d'un réseau électrique et d'un UPFC installé dans une ligne de transport [17].
Du point de vu puissance, le fonctionnement de l'UPFC basé sur la compensation shunt et série de la puissance réactive et régulation de l'angle de charge.

Afin de montrer comment les écoulements de puissance en ligne peuvent être affectées et exploité par l'UPFC est placé au début de la ligne de transmission connexion bus k et m, comme indiqué dans la figure. 2.9. UPFC est représentée par deux sources de tension idéale est contrôlable les l'amplitude et angle de phase. La tension de le UPFC donne par :

$E_{VR}=V(\cos\delta_{VR}+j\sin\delta_{VR})$

$E_{CR}=V(\cos\delta_{CR}+j\sin\delta_{CR})$

Avec

$V_{VR}$ , $\delta_{CR}$ sont l'amplitude contrôlable , $V_{VR\min} \leq V_{VR} \leq V_{VR,\max}$ et l'angle de phase,

$0 \leq \delta_{VR} \leq 2\pi$ de tension de la source de tension de la partie shunte. $V_{CR}$ , $\delta_{CR}$ repesent l'amplitude et l'angle de phase de tension du partie série

Pour le jeu de par *k* :

$$P_K=V_k^2\, Y_{KK} \cos(\theta_{kk}) + V_k\, V_m\, Y_{km} \cos(\theta_{km}+\delta_m-\delta_k) + V_k\, V_{VR}\, Y_{kVR} \cos(\theta_{k\,VR}+\delta_{VR}-\delta_k) + V_k\, V_{CR}\, Y_{k\,CR} \cos(\theta_{k\,CR}+\delta_{CR}-\delta_k)$$

$$Q_K=-[V_k^2\, Y_{KK} \sin(\theta_{kk}) + V_k V_m Y_{km} \sin(\theta_{km}+\delta_m-\delta_k) + V_k V_{VR} Y_{k\,VR} \sin(\theta_{k\,VR}+\delta_{VR}-\delta_k) + V_k V_{CR} Y_{k\,CR} \sin(\theta_{k\,CR}+\delta_{CR}-\delta_k)]$$

Pour le jeu de par *m* :

$$P_m=V_m^2\, Y_{mm} \cos(\theta_{mm}) + V_k\, V_m\, Y_{km} \cos(\theta_{km}-\delta_m+\delta_k) + V_m\, V_{CR}\, Y_{m\,CR} \cos(\theta_{m\,CR}+\delta_{CR}-\delta_m)$$

$$Q_m=-[V_m^2\, Y_{mm} \sin(\theta_{mm}) + V_k V_m Y_{km} \sin(\theta_{km}-\delta_m+\delta_k) + V_m V_{CR} Y_{m\,CR} \sin(\theta_{m\,CR}+\delta_{CR}-\delta_m)]$$

Parti séries:

$$P_{CR}=V_{CR}^2\, Y_{CRCR} \cos(\theta_{CRCR}) + V_{CR}\, V_m\, Y_{CRm} \cos(\theta_{CRm}+\delta_m-\delta_{CR}) + V_k\, V_{CR}\, Y_{k\,CR} \cos(\theta_{k\,CR}-\delta_{CR}+\delta_k)$$

$$Q_{CR}=-[V_{CR}^2\, Y_{CRCR} \sin(\theta_{CRCR}) + V_{CR} V_m Y_{CRm} \sin(\theta_{CRm}+\delta_m-\delta_{CR}) + V_k V_{CR} Y_{k\,CR} \sin(\theta_{k\,CR}+\delta_{CR}-\delta_k)]$$

Parti shunts:

$$P_{VR}=V_{VR}^2\, Y_{VRVR} \cos(\theta_{VRVR}) + V_k\, V_{VR}\, Y_{k\,VR} \cos(\theta_{k\,VR}-\delta_{VR}+\delta_k)$$

$$Q_{VR}=-[V_{VR}^2\, Y_{VRVR} \sin(\theta_{VRVR}) + V_k\, V_{VR}\, Y_{k\,VR} \sin(\theta_{k\,VR}-\delta_{VR}+\delta_k)]$$

En assumant valves de convertisseur sans perte, la puissance active fournie au convertisseur shunt, $P_{VR}$ Égale a la puissance actif exigé par le convertisseur de série $P_{CR}$ ; c'est-à-dire :

$$P_{VR}+P_{CR}=0$$

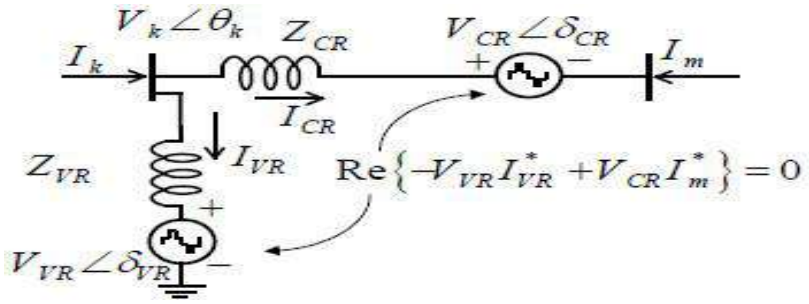



**Figure 2-9**. Modèle mathématique de l'UPFC et le système de transmission

## 1.7. Conclusion :

Nous avent présenté dans ce chapitre, en premier lieu les techniques de compensation conventionnel (série ; shunt et hybride) ainsi nous avons donné une définition et une classification des divers types de contrôle FACTS comme le SVC, STATCOM, TCSC, SSSC, TSSC, UPFC, TCPST, TCVR .cette classification est adoptée comme classification universelle des system FACTS .la plupart d'entre eux sont déjà en service dans la pratique .le choix des contrôleurs particuliers cependant, dépend de la condition d'application et de l'exécution désirée les début d'analyse avec l'étude et les problèmes d'identification de système se sont associés au système existant. Si aujourd'hui les FACTS sont encore peu utilises par rapport à leur potentiel, les évolutions technique de l'électronique de puissance vont rendre les solutions FACTS de plus en plus compétitive face aux renforcements des réseaux.

# Chapitre 03

# Calcul de l'écoulement de puissance avec l'intégration d'un UPFC

## 3.1. Introduction :

Le programme en MATLAB des principales des méthodes présente dans le chapitre (1) sont exécutées et testé sur les deux réseaux (IEEE).

Pour mieux comprendre le principe de fonctionnement du dispositif FACTS(UPFC) on vat utilisé xued exemples

- ✓ (13) nœud, deux charge et 14 ligne (voir les paramètres de réseau étudiés dans l'annexe)
- ✓ 30 nœuds, deux charges et 41 lignes (voir les paramètres de réseau étudiés dans l'annexe).

## 3.2. L'UPFC: construction et exploitation

Les sources de tension *Vsh* et *Vse* mentionné dans la section 3.1 sont obtenues en convertissant la tension continue en tension alternative. La conversion du continue en alternative est obtenue en utilisant des circuits à pont standard. Ces circuits utilisent des thyristors GTO comme blocs de construction. Étant donné que ces circuits convertis la tension continue en tension alternative, elles sont définies comme des convertisseurs de source de tension (VSC). Le système de contrôle associé au VSC lui permet d'ajuster son amplitude et son angle de phase. Le terme "convertisseur" a également été utilisé pour désigner le VSC.

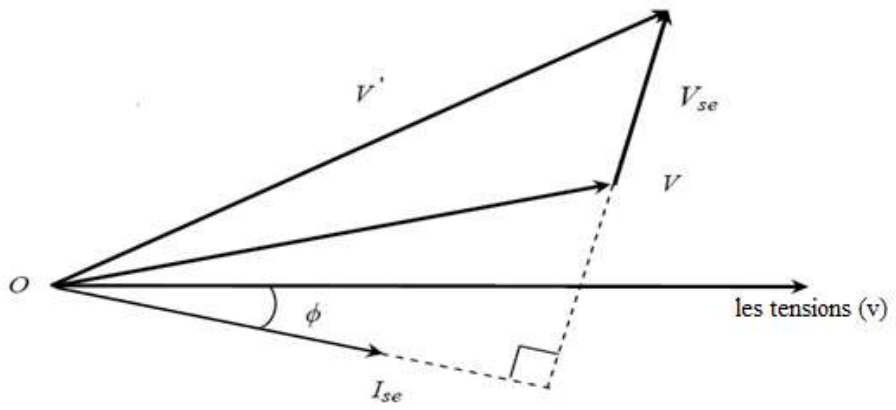



**Figure. 3.1** La relation vectorielle entre la tension série $V_{se}$ et le courant de ligne $I_{se}$.

Considérons maintenant la connexion de deux VSC connectés dos à dos avec un condensateur de liaison continue "C", comme le montre la Figure 3.2. Une telle disposition permet d'assure les trois fonctions à savoir la compensation série, la compensation shunt et la compensation de l'angle de phase et de les unifiés en un seul appareil. Le convertisseur 1 est relié à un transformateur shunt T1 et l'onduleur 2 est connecté à un transformateur série T2.

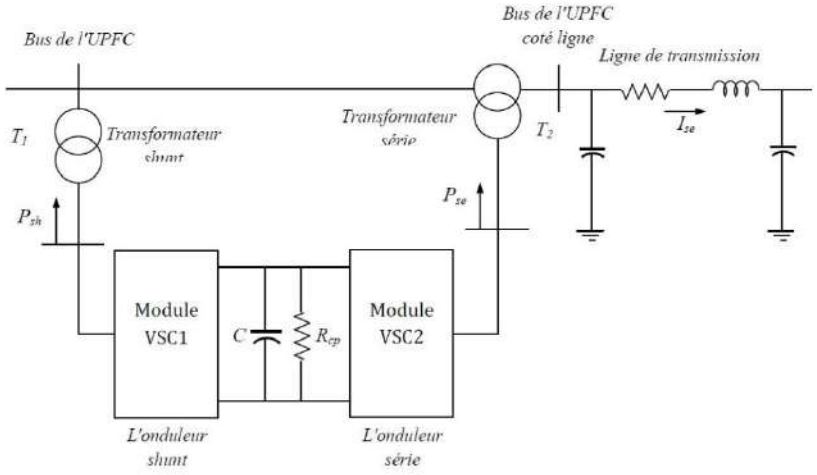



**Figure. 3.2 Construction de l'UPFC**

Il est facile de remarquer que le VSC relié au transformateur shunt peut jouer le rôle d'une source de puissance réactive variable semblable à celle du compensateur shunt. En outre, le convertisseur 1 peut charger le condensateur de liaison. Le convertisseur 2 peut fournir de la compensation série ou la compensation de l'angle de phase par injection d'une tension série suivant une propre relation vectorielle. Dans le cas de la compensation série, le convertisseur 2 peut fonctionner indépendamment de le convertisseur 1 dés le moment que le convertisseur 2 ne fournit/consomme que la puissance réactive et n'a aucune puissance réelle échangée avec e convertisseur 1. Dans un tel cas, la tension du condensateur de liaison sera idéalement constante.

Dans le cas de la compensation de l'angle de phase, la source de tension série $V_{se}$ a une relation de phase arbitraire avec le courant de la ligne de transmission *Ise*, et n'a aucun échange de puissance active ou réactive avec la ligne de transmission. En vertu de ce mode de fonctionnement, la puissance active produite ou consommée par le convertisseur 2 ($P_{SE}$) conduira à la décharge ou à la charge du condensateur de liaison, respectivement. Dans le cas de production de la puissance active par l'onduleur 2 ($P_{SE}$), le condensateur se décharge, et la diminution de la tension reflétera comme une charge sur le convertisseur 1.

Dans cette circonstance, le convertisseur 1 fournira de la puissance active nécessaire ($P_{SH}$) et charge le condensateur de liaison. Dans le cas où le convertisseur 2 consomme de la puissance active ($P_{SE}$) conduisant à la charge du condensateur de liaison, par conséquence une augmentation de sa tension, le convertisseur 1 fournira l'excès de la puissance active ($P_{SH}$) vers la ligne de transmission à travers le

transformateur shunt. En effet, l'UPFC fournit une autre voie au transit de la puissance active ; Du bus où le transformateur shunt est connecté, à travers le convertisseur 1 à la capacité, et à travers le convertisseur 2 et la ligne de transmission via le transformateur série. Le convertisseur 1 et le convertisseur 2 peuvent générer de la puissance réactive de manière indépendante.

En résumé, l'arrangement ci-dessus de deux VSC connectés dos à dos et couplés par un condensateur de liaison peuvent accomplir le fonctionnement des trois types de compensation [18].

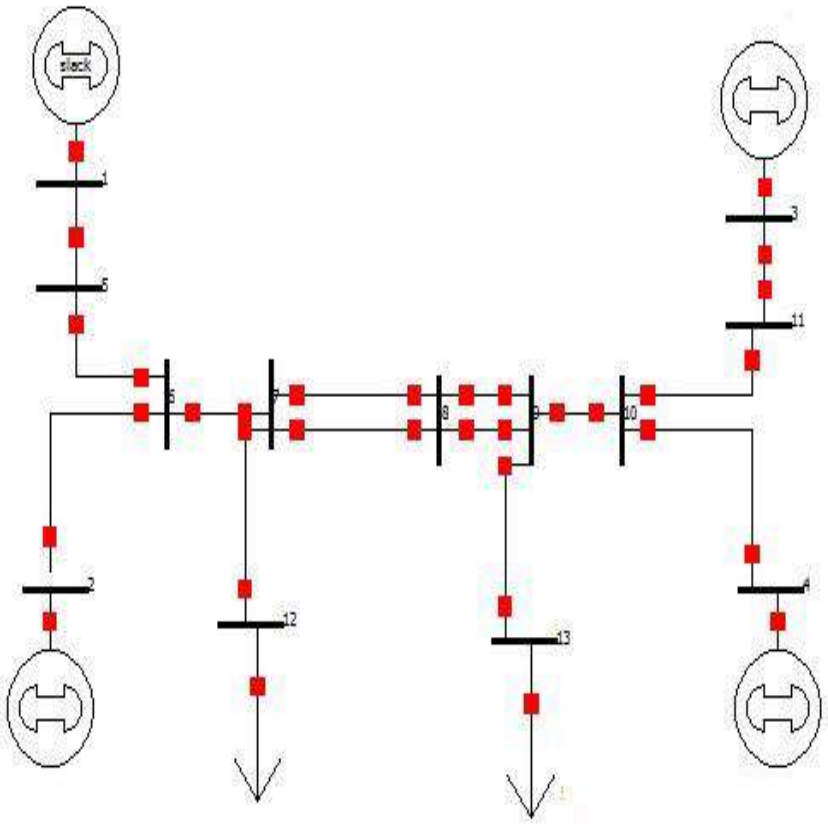



**Figure 3.3** : Schéma unifilaire du réseau électrique IEEE 13-jeux de barres avec quatre générateurs

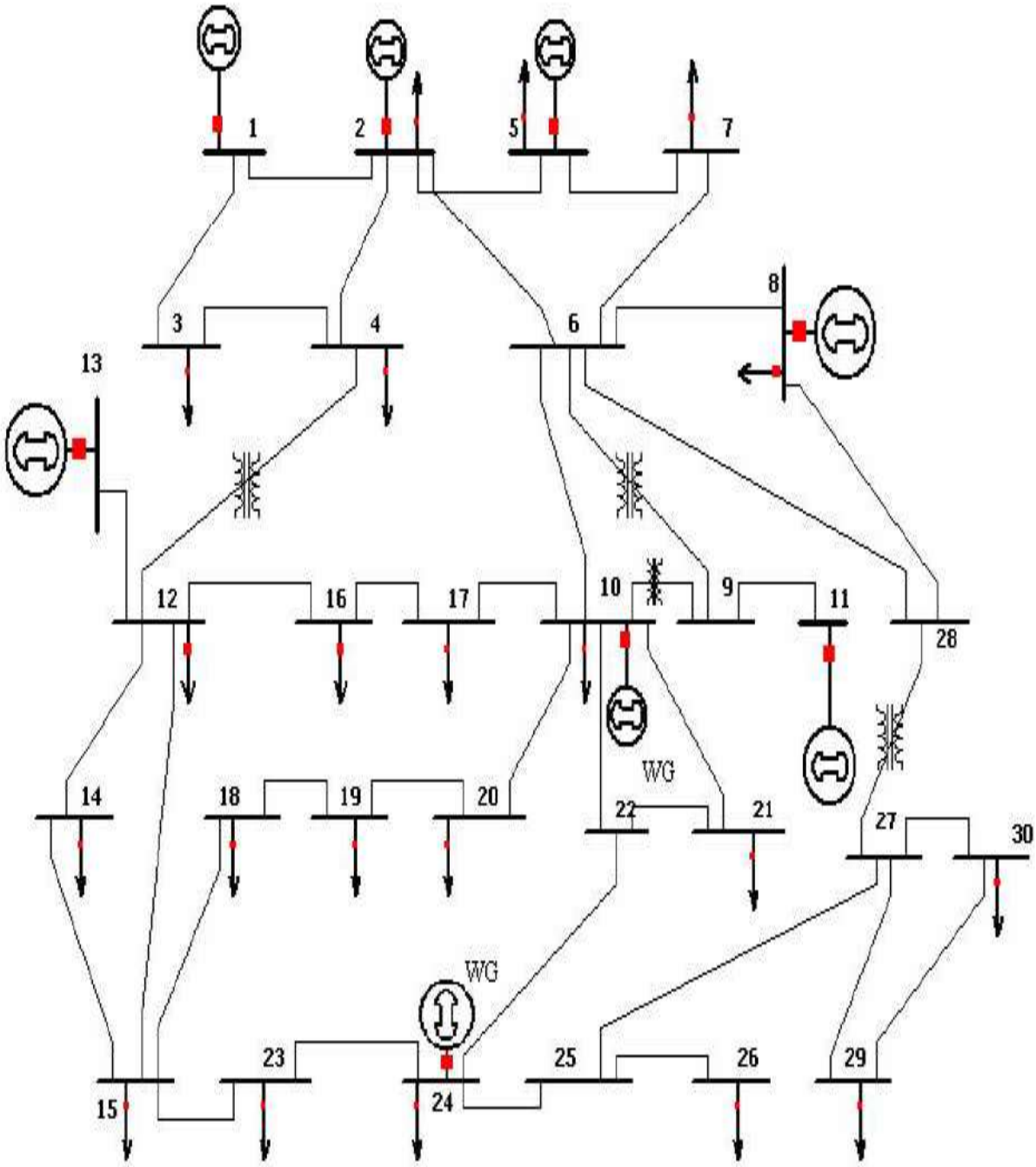



**Figure 3-4.** Schéma unifilaire du réseau électrique IEEE 30-jeux de barres avec six générateurs

## 3.2. Les résultats de programmation (réseau 13 nœuds) :

**3.2.1. Tableau (3-1)** : les résultats de la matrice admittance (Ybus)

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0 - 0.5988i | | | | 0 + 0.5988i | | | | | | | | |
| 2 | | 0 - 0.5988i | | | | 0 + 0.5988i | | | | | | | |
| 3 | | | 0 - 0.5988i | | | | | | | | 0 + 0.5988i | | |
| 4 | | | | 0 - 0.5988i | | | | | | 0 + 0.5988i | | | |
| 5 | 0 + 0.5988i | | | | 0.0396 - 0.9946i | -0.0396 + 0.3960i | | | | | | | |
| 6 | | 0 + 0.5988i | | | -0.0396 + 0.3960i | 0.1386 - 1.9846i | -0.0990 + 0.9901i | | | | | | |
| 7 | | | | | | -0.0990 + 0.9901i | 0.1170 - 3.1331i | -0.0180 + 0.1800i | | | | 0 + 2.0000i | |
| 8 | | | | | | | -0.0180 + 0.1800i | 0.0360 - 0.3562i | -0.0180 + 0.1800i | | | | |
| 9 | | | | | | | | -0.0180 + 0.1800i | 0.1170 - 3.1181i | -0.0990 + 0.9901i | | | 0 + 2.0000i |
| 10 | | | | 0 + 0.5988i | | | | | -0.0990 + 0.9901i | 0.1386 - 1.9846i | -0.0396 + 0.3960i | | |
| 11 | | | 0 + 0.5988i | | | | | | | -0.0396 + 0.3960i | 0.0396 - 0.9946i | | |
| 12 | | | | | | | 0 + 2.0000i | | | | | 0 - 2.0000i | |
| 13 | | | | | | | | | 0 + 2.0000i | | | | 0 - 2.0000i |

**3.2.2. Tableau (3-2)** : les résultats de la puissance active et la puissance réactive (sans UPFC)

| nœud | Puissance active dans les générateurs (pu) | Puissance réactive dans les générateurs (pu) |
|---|---|---|
| N1 | 6.4984 | 1.1266 |
| N2 | 6.8567 | 0.8463 |
| N3 | 7.1819 | 2.2326 |
| N4 | 7.6369 | 3.2374 |

**3.2.3 Tableau (3-3)** : les résultats de la tension et l'angle

| nœud | Tension (pu) | Angle (degré) |
|---|---|---|
| 1 | 1.03 | 18.5 |
| 2 | 1.01 | 9.9469 |
| 3 | 1.03 | 1.1569 |
| 4 | 1.01 | -8.5184 |
| 5 | 1.0172 | 12.5546 |
| 6 | 1.0024 | 3.4530 |
| 7 | 1.0027 | -4.1503 |
| 8 | 1.00 | -14.6287 |
| 9 | 0.9599 | -25.1526 |
| 10 | 0.9648 | -16.0391 |
| 11 | 1.0006 | -5.5260 |
| 12 | 0.9965 | -6.9499 |
| 13 | 0.9501 | -30.7052 |

**3.2.4. Tableau 3.4** : les résultats de la Puissance transitent dans les lignes :

| Début de la ligne | Fin de la ligne | Puissance transite (pu) | Puissance réactive (pu) |
|---|---|---|---|
| 1 | 5 | 6.4984 | -1.1266 |
| 5 | 1 | -6.4984 | 0.4419 |
| 2 | 6 | 6.8567 | -0.8463 |
| 6 | 2 | -6.8567 | 0.0649 |
| 7 | 12 | 9.7600 | -1.4847 |
| 12 | 7 | -9.7600 | 1.0000 |
| 7 | 6 | -13.0776 | -2.2153 |
| 6 | 7 | 13.0776 | 0.4654 |
| 7 | 8 | 3.3176 | -0.0211 |
| 8 | 7 | -3.2574 | -0.5811 |
| 5 | 6 | 6.4984 | -0.4645 |
| 6 | 5 | 6.4984 | -0.4645 |
| 3 | 11 | 7.1819 | -2.2326 |
| 11 | 3 | 24.2205 | -8.4323 |
| 4 | 10 | 7.6369 | -3.2374 |
| 10 | 4 | -7.6369 | 2.1110 |
| 9 | 8 | -3.1963 | 0.0864 |
| 8 | 9 | 3.2574 | -0.6967 |
| 9 | 13 | 17.6500 | -2.7309 |
| 13 | 9 | -17.6500 | 1.0000 |
| 9 | 10 | -14.4537 | -2.1481 |
| 10 | 9 | 14.6854 | -0.1692 |
| 11 | 10 | 7.1819 | -1.3641 |
| 10 | 11 | -7.0485 | 0.0297 |

Cout Ct= 17052.4746 $/h

Génération total = 2817.3961 MW 744.2907 MVars

etrep totale= 76.3961 MW 433.5703 MVars

**3.2.5. Tableau 3.5** : les résultats de la tension et l'angle avec UPFC (nœud 8-9) :

| Nombre de nœud | La tension (pu) | La phase (degré) |
|---|---|---|
| 1 | 1.0300 | 18.5000 |
| 2 | 1.0100 | 14.5533 |
| 3 | 1.0300 | 20.0343 |
| 4 | 1.0100 | 9.0016 |
| 5 | 1.0231 | 14.5336 |
| 6 | 1.0109 | 8.5179 |
| 7 | 1.0111 | 2.4527 |
| 8 | 1.0000 | -0.2295 |
| 9 | 0.9598 | -10.2900 |
| 10 | 0.9718 | 0.2079 |
| 11 | 1.0009 | 12.3215 |
| 12 | 1.0050 | -0.2999 |
| 13 | 0.9500 | -15.8442 |
| 14 | 0.9676 | -7.3615 |
| 15 | 0.9000 | -0.0000 |
| 16 | 0.0496 | 36.3416 |

**3.2.6. Tableau 3.6** : les résultats de la puissance active et la puissance réactive avec UPFC (nœud 8-9) :

| Nœud | Puissance active (pu) | Puissance réactive (pu) |
|---|---|---|
| 1 | 436.49 | 57.46 |
| 2 | 642.81 | 28.51 |
| 3 | 828.53 | 235.10 |
| 4 | 898.49 | 300.26 |
| 14 | 0.00 | -0.01 |
| 15 | 3.61 | -89.99 |
| 16 | -3.60 | -2.68 |

**3.2.7. Tableau 3.7** : les résultats de la Puissance transitent dans les lignes avec UPFC (8-9)

| Départ de ligne | Fin de ligne | Puissance active (pu) | Puissance réactive (pu) |
|---|---|---|---|
| 1 | 5 | 4.3649 | -0.5746 |
| 5 | 1 | -4.3649 | 0.2695 |
| 2 | 6 | 6.4281 | -0.2851 |
| 6 | 2 | -6.4281 | -0.3927 |
| 7 | 12 | 9.7600 | -1.4765 |
| 12 | 7 | 9.7600 - | 1.0000 |
| 7 | 6 | -10.6340 | -1.6591 |
| 6 | 7 | 10.7473 | 0.5261 |
| 8 | 7 | -0.8698 | 0.0951 |
| 7 | 8 | 0.8740 | -0.1372 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| 5 | 6 | 4.3649 | -0.2924 |
| 6 | 5 | 4.3649 | -0.2924 |
| 3 | 11 | 8.2853 | -2.3510 |
| 11 | 3 | -8.2853 | -9.7954 |
| 4 | 10 | 8.9849 | -3.0026 |
| 10 | 4 | -8.9849 | 1.5334 |
| 16 | 8 | 0.2954 | 0.3736 |
| 8 | 16 | -0.2954 | -9.6018 |
| 9 | 13 | 17.6500 | -2.7314 |
| 13 | 9 | -17.6500 | 1.0000 |
| 9 | 10 | -16.7846 | -2.0872 |
| 10 | 9 | 17.0952 | -1.0184 |
| 11 | 10 | 8.2853 | -1.2053 |
| 10 | 11 | -8.1103 | -0.5439 |
| 15 | 8 | 0.0361 | -1.0001 |
| 8 | 15 | -0.0361 | 0.8999 |
| 16 | 14 | 0.3315 | 0.3222 |
| 14 | 16 | -0.3315 | -9.0150 |
| 14 | 9 | 0.8698 | -0.0722 |
| 9 | 14 | -0.8654 | 0.0275 |

Cout CT= 17441.7072 $/h

Génération totale = 2806.3179 MW 621.3311 MVars

etrep seL totale= 65.3179 MW 399.9938 MVars

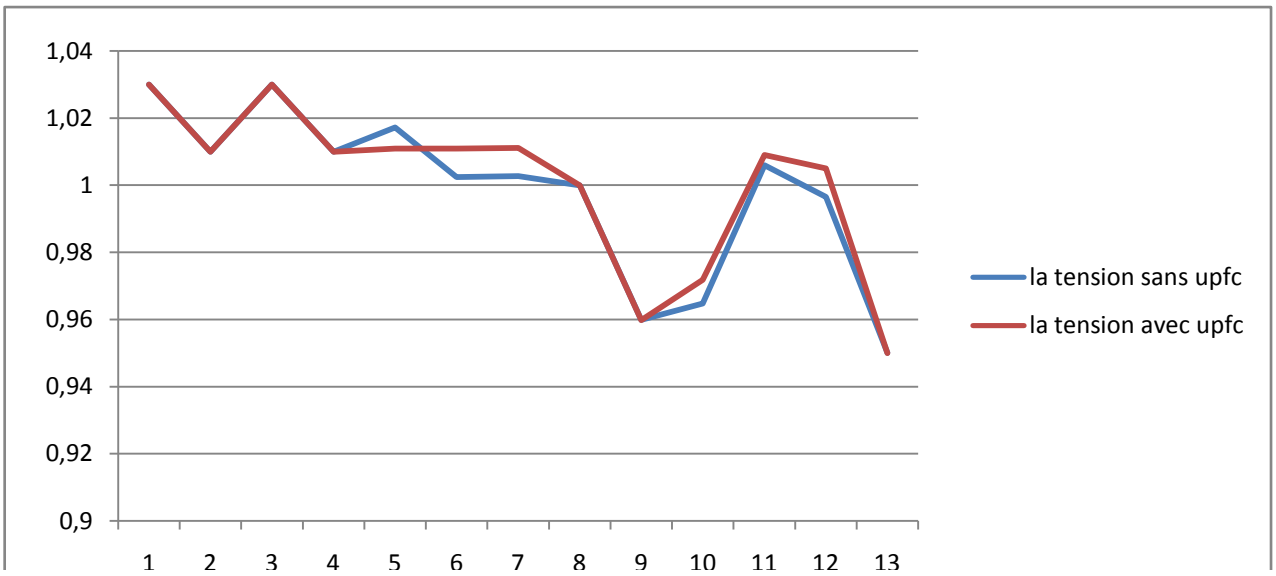



**Figure. 3.5**. Variation de la tension en fonction des nœuds avec et sans UPFC

## 3.3. Les résultats de programmation (réseau 30 nœuds) :

**3.3.1. Tableau 3.8** : les résultats de la tension et l'angle

| Nœud | sel tensions (pu) | Les angles (degré) |
|---|---|---|
| 1 | 1.0600 | 0 |
| 2 | 1.0430 | -6.4524 |
| 3 | 1.0212 | -8.5706 |
| 4 | 1.0126 | -10.3528 |
| 5 | 1.0100 | -15.2416 |
| 6 | 1.0120 | -12.1544 |
| 7 | 1.0034 | -13.9484 |
| 8 | 1.0100 | -12.8724 |
| 9 | 1.0510 | -15.1801 |
| 10 | 1.0443 | -16.7651 |
| 11 | 1.0820 | -15.1801 |
| 12 | 1.0573 | -16.0189 |
| 13 | 1.0710 | -16.0189 |
| 14 | 1.0424 | -16.9109 |
| 15 | 1.0377 | -17.0010 |
| 16 | 1.0446 | -16.6072 |
| 17 | 1.0390 | -16.9250 |
| 18 | 1.0279 | -17.6128 |
| 19 | 1.0252 | -17.7850 |
| 20 | 1.0292 | -17.5874 |
| 21 | 1.0320 | -17.2090 |
| 22 | 1.0326 | -17.1950 |
| 23 | 1.0272 | -17.3917 |
| 24 | 1.0215 | -17.5684 |

| | | |
|---|---|---|
| 25 | 1.0188 | -17.1692 |
| 26 | 1.0011 | -17.5876 |
| 27 | 1.0256 | -16.6621 |
| 28 | 1.0107 | -12.8132 |
| 29 | 1.0059 | -17.8862 |
| 30 | 0.9944 | -18.7647 |

**3.3.2. Tableau 3.9** : les résultats de la Puissance active et la puissance réactive

| Les nœuds | Puissance active (pu) | Puissance réactive (pu) |
|---|---|---|
| N1 | 2.9630 | -0.2395 |
| N2 | 0.0698 | 0.6270 |
| N5 | 0 | 0.3601 |
| N8 | 0 | 0.3096 |
| N11 | 0 | 0.1615 |
| N13 | 0 | 0.1046 |
| N10 | 0 | 0.1900 |
| N24 | 0 | 0.0430 |

Cout Ct= 382.0968 $/h
Génération total =157.3776 MW 70.6246 MVars
Perte totale= 19.8776 MW 29.4246 MVars

**3.3.3. Tableau 3.10** : les résultats de la tension et l'angle avec UPFC (18-15)

| Nœud | Les tensions (pu) | Les 'angle (degré) |
|---|---|---|
| 1 | 1.0600 | 0 |
| 2 | 1.0430 | 4.7007 |
| 3 | 1.0241 | 2.0696 |
| 4 | 1.0173 | 2.6215 |
| 5 | 1.0100 | 9.2744 |
| 6 | 1.0129 | 2.8947 |
| 7 | 1.0002 | 4.9573 |
| 8 | 1.0100 | 2.8594 |
| 9 | 1.0451 | 0.5985 |
| 10 | 1.0312 | -0.6210 |
| 11 | 1.0820 | 0.5985 |
| 12 | 1.0470 | 1.7435 |
| 13 | 1.0710 | 5.3960 |
| 14 | 1.0221 | 0.7364 |
| 15 | 1.0073 | 0.7701 |

| | | |
|---|---|---|
| 16 | 1.0324 | 0.4740 |
| 17 | 1.0260 | -0.5026 |
| 18 | 1.0000 | 0.0458 |
| 19 | 1.0017 | -0.6453 |
| 20 | 1.0082 | -0.7062 |
| 21 | 1.0181 | -1.0256 |
| 22 | 1.0184 | -0.9944 |
| 23 | 1.0023 | -0.2035 |
| 24 | 1.0047 | -1.1353 |
| 25 | 1.0066 | -1.2745 |
| 26 | 0.9888 | -1.7033 |
| 27 | 1.0166 | -1.0880 |
| 28 | 1.0105 | 2.4503 |
| 29 | 0.9966 | -2.3344 |
| 30 | 0.9851 | -3.2294 |
| 31 | 0.9500 | 0.7120 |
| 32 | 0.9754 | 0.0000 |
| 33 | 0.0709 | 360.0000 |

**3.3.4. Tableau 3.11** : les résultats de la puissance active et la puissance réactive avec UPFC (18-15)

| Nœud | Puissance active (pu) | Puissance réactive (pu) |
|---|---|---|
| N1 | 1.4556 | 1.0074 |
| N2 | 1.6746 | -0.1973 |
| N5 | 1.9129 | -0.2100 |
| N8 | 0.3000 | 0.2000 |
| N11 | 0.0000 | 0.1920 |
| N13 | 0.5102 | 0.2002 |
| N10 | 0.0000 | 0.1900 |
| N24 | 0.0000 | 0.0430 |
| N31 | 0.0000 | 0.000 |
| N32 | -0.0078 | -0.2403 |
| N33 | 0.0078 | 0.0147 |

Cout CT=1415.8707 $/h

Génération totale= 148.3175 MW 57.5335 MVars

Perte totale = 10.8175 MW -6.2273 MVars

**3.3.5. Tableau 3.12** : les résultats de la tension et l'angle avec UPFC (18-15 ; 22-21)

| Nombre de nœuds | Les tensions (pu) | Les angles(degré) |
|---|---|---|
| 1 | 1.0600 | 0 |
| 2 | 1.0430 | 2.0092 |
| 3 | 1.0249 | 1.1681 |
| 4 | 1.0179 | 1.5225 |
| 5 | 1.0100 | 7.5732 |
| 6 | 1.0131 | 1.8978 |
| 7 | 1.0009 | 3.6737 |
| 8 | 1.0100 | 1.8701 |
| 9 | 1.0363 | 1.5261 |
| 10 | 1.0129 | 0.3344 |
| 11 | 1.0820 | 3.2798 |
| 12 | 1.0455 | 0.9976 |
| 13 | 1.0710 | 5.6205 |
| 14 | 1.0205 | -0.4973 |
| 15 | 1.0023 | -0.9578 |
| 16 | 1.0243 | 0.4486 |
| 17 | 1.0109 | 0.1550 |
| 18 | 1.0000 | 5.4233 |
| 19 | 0.9945 | 3.3044 |
| 20 | 0.9975 | 2.4912 |
| 21 | 0.9939 | -0.0597 |
| 22 | 0.9875 | -0.0000 |
| 23 | 0.9901 | -1.2116 |
| 24 | 0.9825 | -1.1772 |
| 25 | 0.9909 | -1.7922 |
| 26 | 0.9727 | -2.2350 |
| 27 | 1.0053 | -1.8772 |
| 28 | 1.0096 | 1.4992 |
| 29 | 0.9851 | -3.1523 |
| 30 | 0.9734 | -4.0686 |
| 31 | 0.9500 | -4.0980 |
| 32 | 0.9799 | 5.4460 |
| 33 | 0.2000 | 72.8910 |
| 34 | 0.9925 | -0.0157 |
| 35 | 0.9662 | 0.0000 |
| 36 | 0.0010 | -0.0000 |

**3.3.6. Tableau 3.13:les** résultats de la puissance active et la puissance réactive avec UPFC (18-15 ; 22-21)

| Nœud | Puissance active (pu) | Puissance réactive (pu) |
|---|---|---|
| 1 | 0.5751 | 0.6608 |
| 2 | 0.4465 | 0.1470 |
| 5 | 1.9435 | -0.2100 |
| 8 | 0.3000 | 0.2000 |
| 11 | 0.1650 | 0.2400 |
| 13 | 0.6446 | 0.2214 |
| 31 | 0.0000 | 0.0000 |
| 32 | 0.0039 | -0.1969 |
| 33 | -0.0039 | 0.0614 |
| 34 | 0.0000 | 0.0000 |
| 35 | 0.0000 | -0.2055 |
| 36 | -0.0000 | 0.0001 |

Cout Ct=1060.6701 $/h

Génération totale= 146.5430 MW 64.2223 MVars

Perte totale =9.0430 MW -11.0700 MVars

Les résultats du réseau de 30 nœuds avec UPFC (18-15 ; 22-21 ; 28-27 ; 17-10)

**3.3.7. Tableau 3.14**: les résultats de la tension et l'angle avec UPFC (18-15 ; 22-21 ; 28-27 ; 17-10)

| Numéro de nœuds | Les tensions (pu) | Les angles (degré) |
|---|---|---|
| 1 | 1.0600 | 0 |
| 2 | 1.0430 | 0.9267 |
| 3 | 1.0220 | 1.3383 |
| 4 | 1.0144 | 1.7345 |
| 5 | 1.0100 | 1.5941 |
| 6 | 1.0108 | 3.0503 |
| 7 | 1.0025 | 1.9218 |
| 8 | 1.0100 | 3.5564 |
| 9 | 1.0375 | 2.8299 |
| 10 | 1.0177 | 0.8787 |
| 11 | 1.0820 | 6.0906 |
| 12 | 1.0466 | -1.9995 |
| 13 | 1.0710 | -0.8917 |
| 14 | 1.0289 | -3.1902 |
| 15 | 1.0197 | -3.5047 |
| 16 | 1.0197 | -0.9328 |
| 17 | 1.0000 | 0.3659 |
| 18 | 1.0000 | 4.4932 |

| | | |
|---|---|---|
| 19 | 0.9966 | 2.8474 |
| 20 | 1.0005 | 2.2851 |
| 21 | 1.0010 | 0.2388 |
| 22 | 1.0000 | 0.0002 |
| 23 | 1.0062 | -3.3339 |
| 24 | 0.9966 | -2.7331 |
| 25 | 1.0112 | -5.3886 |
| 26 | 0.9934 | -5.8135 |
| 27 | 1.0310 | -6.6964 |
| 28 | 1.0000 | 6.1799 |
| 29 | 1.0157 | -8.0306 |
| 30 | 1.0051 | -8.9137 |
| 31 | 1.0006 | -5.8903 |
| 32 | 0.9911 | 4.5019 |
| 33 | 0.2000 | 89.2362 |
| 34 | 1.0003 | 0.2002 |
| 35 | 0.9831 | -0.0000 |
| 36 | 0.0010 | 0.0000 |
| 37 | 1.0500 | -4.9938 |
| 38 | 0.9840 | 6.0905 |
| 39 | 0.2000 | 106.7325 |
| 40 | 1.0080 | 0.7361 |
| 41 | 0.9782 | 0.3655 |
| 42 | 0.0010 | 0.0000 |

**3.3.8. Tableau 3.15 :** les résultats de la puissance active et la puissance réactive avec UPFC (18-15 ; 22-21 ; 28-27 ; 17-10)

| Nœud | Puissance active (pu) | Puissance réactive (pu) |
|---|---|---|
| 1 | 0.2633 | 0.5633 |
| 2 | 0.2170 | 0.2676 |
| 5 | 0.9420 | 0.0591 |
| 8 | 0.3000 | 0.3178 |
| 11 | 0.307 | 0.24 |
| 13 | 0.01548 | 0.1882 |
| 31 | -0.0000 | 0.0000 |
| 32 | 0.0015 | -0.0884 |
| 33 | -0.0015 | 0.0379 |
| 34 | -0.0000 | -0.0000 |
| 35 | -0.0000 | -0.1664 |
| 36 | 0.0000 | 0.0000 |
| 37 | -0.0000 | 0.0000 |
| 38 | -0.0154 | -0.1572 |
| 39 | 0.0154 | -0.0111 |
| 40 | 0.0000 | 0.0000 |
| 41 | -0.0001 | -0.2136 |
| 42 | 0.0001 | 0.0001 |

Cout Ct= 509.7277 $/h
Génération total = 119.8453 MW 101.8993 MVars
latot etreP= 8.4547 MW 9.4372 MVars

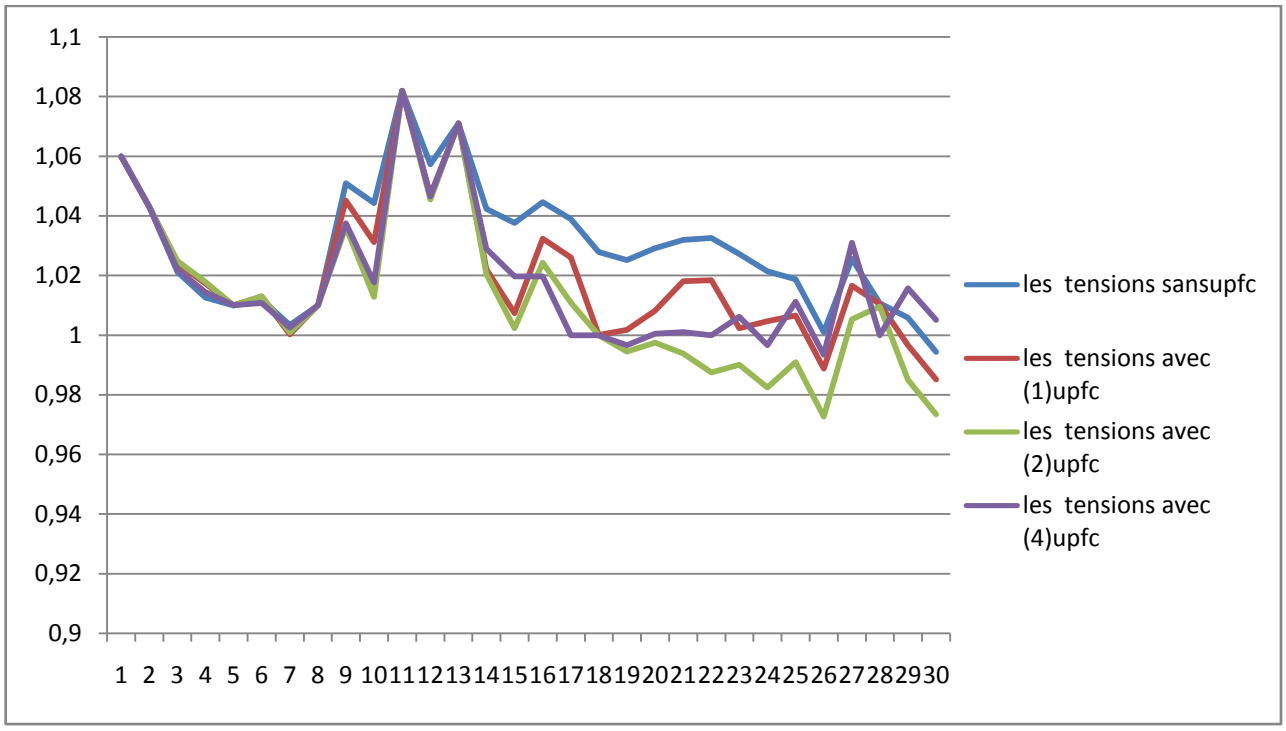



**Figure 3.6** : Variation de la tension en fonction des nœuds avec et sans UPFC

**3.4. Tableau 3.16 :** les résultats de la puissance active et la puissance réactive avec et sans UPFC de réseau à 13 nœud

| nœud | Sans UPFC | | Avec UPFC | |
|---|---|---|---|---|
| | Puissance active (MW) | Puissance réactive (MVAR) | Puissance active (MW) | Puissance réactive (MVAR) |
| G1 | 649.84 | 112.66 | 436.49 | 57.46 |
| G2 | 685.67 | 084.63 | 642.81 | 28.51 |
| G3 | 718.19 | 223.26 | 828.53 | 235.10 |
| G4 | 763.69 | 323.74 | 898.49 | 300.26 |
| génération Totale | 2817.3961 | 744.2907 | 2806.3179 | 621.3311 |
| cout | 17052.4746 $/h | | 17441.7072 $/h | |

**3.5. Tableau 3.17 :** les résultats de la puissance active et la puissance réactive avec et sans UPFC de réseau à 30 nœud

| nœud | Sans UPFC | | Avec 1 UPFC | | Avec 2 UPFC | | Avec 4 UPFC | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Puissance active (MW) | Puissance réactive (MVAR) | Puissance active (MW) | Puissance réactive (MVAR) | Puissance active (MW) | Puissance réactive (MVAR) | Puissance active (MW) | Puissance réactive (MVAR) |
| G1 | 296.30 | -023.95 | 145.56 | 100.74 | 57.51 | 66.08 | 26.33 | 56.33 |
| G2 | 6.98 | 0.6270 | 167.46 | -19.73 | 44.65 | 14.70 | 21.70 | 26.76 |
| G5 | 0 | 36.01 | 191.29 | -21.00 | 194.35 | -21.00 | 94.20 | 5.91 |
| G8 | 0 | 30.96 | 30.00 | 20.00 | 30.00 | 20.00 | 30.00 | 31.78 |
| G11 | 0 | 16.15 | 0.0000 | 19.20 | 16.50 | 24.00 | 30.7 | 2400 |
| G13 | 0 | 10.46 | 51.02 | 20.02 | 64.46 | 22.14 | 1.548 | 18.82 |
| Totale génération | 157.3776 | 70.6246 | 148.3175 | 57.5335 | 146.5430 | 64.2223 | 119.8453 | 101.8993 |
| Cout | 382.0968 $/h | | 1415.8707$/h | | 1060.6701$/h | | 509.7277$/h | |

En analysons les deux tableaux (3.1.5, 3.1.6) qui résument les résultats obtenus sur nos deux réseaux (13et 30 nœuds) en remarque une diminution de la valeur de la génération totale en présence d'UPFC par rapport à celle ou elle est absente avec une diminution de plus en plus importante de ce dernier avec l'augmentation du nombre d'UPFC (30 nœuds).

## 3. 4 conclusions

Dans ce dernier chapitre nous avons présenté les réseaux étudiés par son schéma électrique, nous avons aussi présenté le schéma équivalent du réseau étudié en grandeurs réduites. Enfin nous avons fait des calculs sous l'environnement MATLAB et compare entre les résultats.

## Conclusion générale :

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

Ce mémoire présente et explique le contrôle de l'écoulement de puissance active dans une ligne de transport par un système FACTS, le dispositif choisi pour ce contrôle est le variateur de charge universel UPFC. Ce dispositif est capable de contrôler simultanément et indépendamment, la puissance active et la puissance réactive, il peut contrôler les trois paramètres associés au transit de puissance, à savoir, la tension, l'angle de transport et l'impédance de ligne, pour améliorer les performances du réseau électrique et sa stabilité. Afin d'atteindre cet objectif, nous somme passés par les étapes suivantes :

Dans la première étape nous avons présenté en bref un aperçu sur le fonctionnement des réseaux électriques, on a montré les facteurs qui limitent la puissance transmissible dans une ligne de transport et la chute tension provoquée par le transit de puissance, on a analysé également l'écoulement de puissance dans cette étape, enfin nous avons présenté les différents méthodes de calcule (G-S, N-R, FASTE DICOUPLED, PIONT INTERIEUR)

La deuxième étape de notre travail a été consacrée à la description des différents systèmes permettant d'assurer le transport d'énergie électrique dans les meilleures conditions et qui sont rangés sous l'appellation systèmes FACTS. Les dispositifs FACTS peuvent être classés en trois catégories : les compensateurs parallèles, les compensateurs séries et les compensateurs hybrides (parallèle-série).

Dans la dernière étape, nous avons présenté le schéma électrique équivalent du réseau étudié en grandeurs réduites. Afin de voir le comportement du dispositif UPFC connecté au réseau pour le contrôle de la tension (angle et le module), la puissance active et réactive nous avons fait des simulations par le logiciel MATLAB.

Enfin nous pouvons dire que les systèmes FACTS découlent d'un concept qui a tendance à élargir son champ d'intervention, il nous semble prioritaire de poursuivre

une étude approfondie sur les modes et stratégies de contrôle des réseaux de transport d'énergie électrique par le dispositif UPFC.

## Bas data (13n)

| Bus no | Bus cod | Voltage (pu) | Angle (degré) | charge (MW) | charge (Mvar) | Générateur (Mw) | Générateur (Mvar) | Générateur (Qmin) | Générateur (Qmax) | Injection (Mvar) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 1.03 | 18.5 | 0 | 0 | 707.21 | 900 | -500 | 500 | 0 |
| 2 | 2 | 1.01 | 8.8 | 0 | 0 | 700 | 376 | -500 | 500 | 0 |
| 3 | 2 | 1.03 | -6.8 | 0 | 0 | 716 | 149 | -500 | 500 | 0 |
| 4 | 2 | 1.01 | -16.9 | 0 | 0 | 700 | 0 | -500 | 500 | 0 |
| 5 | 0 | 1.0119 | 12.1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | 0 | 0.992 | 2.1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7 | 0 | 0.9862 | -6.1 | 0 | 0 | 0 | 109 | 0 | 0 | 350 |
| 8 | 2 | 1.00 | -19.3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 9 | 0 | 0.9866 | -31.8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 500 |
| 10 | 0 | 0.9920 | -23.6 | 0 | 200 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 11 | 0 | 1.0118 | -13.4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 12 | 0 | 0.9799 | -10 | 976 | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 13 | 0 | 0.9774 | -35 | 1765 | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

## Ligne data (13n)

| Bus (nl) | Bus (nr) | R (pu) | X (pu) | ½B (pu) |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 5 | 0.0 | 0.0167 | 0.00 |
| 2 | 6 | 0.0 | 0.0167 | 0.00 |
| 7 | 12 | 0.0 | 0.005 | 0.00 |
| 7 | 6 | 0.001 | 0.01 | 0.0175 |
| 7 | 8 | 0.011 | 0.11 | 0.1925 |
| 7 | 8 | 0.011 | 0.11 | 0.1925 |
| 5 | 6 | 0.0025 | 0.025 | 0.0437 |
| 3 | 11 | 0.0 | 0.0167 | 0.0 |
| 4 | 10 | 0.0 | 0.0167 | 0.0 |
| 9 | 8 | 0.011 | 0.11 | 0.1925 |
| 9 | 8 | 0.011 | 0.11 | 0.1925 |
| 9 | 13 | 0.0 | 0.005 | 0.0 |
| 9 | 10 | 0.001 | 0.01 | 00175 |
| 11 | 10 | 0.0025 | 0.025 | 0.0437 |

## Bas data (30n)

| Bus no | Bus cod | Voltage (pu) | Angle (degré) | charge (MW) | charge (Mvar) | Générateur (Mw) | Générateur (Mvar) | Générateur (Qmin) | Générateur (Qmax) | Injection (Mvar) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 1.06 | 0 | 0 | 0.0 | 0 | 0 | -999 | 999 | 0 |
| 2 | 2 | 1.043 | 0 | 21.7 | 12.7 | 40 | 0 | -40 | 50 | 0 |
| 3 | 0 | 1.0 | 0 | 2.4 | 1.2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 0 | 1.06 | 0 | 7.6 | 1.6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 2 | 1.01 | 0 | 94.2 | 19 | 0 | 0 | -40 | 40 | 0 |
| 6 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7 | 0 | 1 | 0 | 22.8 | 10.9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | 2 | 1.011 | 0 | 30 | 30 | 0 | 0 | -10 | 24 | 0 |
| 9 | 0 | 1 | 0 | 0.0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | 0 | 1.082 | 0 | 5.8 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 19 |
| 11 | 2 | 1 | 0 | 0.0 | 0 | 0 | 0 | -6 | 24 | 0 |
| 12 | 0 | 1.071 | 0 | 11.2 | 7.5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 13 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -6 | 24 | 0 |
| 14 | 0 | 1 | 0 | 6.2 | 1.6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 15 | 0 | 1 | 0 | 8.2 | 2.5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 16 | 0 | 1 | 0 | 3.5 | 1.8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 17 | 0 | 1 | 0 | 9 | 5.8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 18 | 0 | 1 | 0 | 3.2 | 0.9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 19 | 0 | 1 | 0 | 9.5 | 3.4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 20 | 0 | 1 | 0 | 2.2 | 0.7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 21 | 0 | 1 | 0 | 17.5 | 11.2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 22 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 23 | 0 | 1 | 0 | 3.2 | 1.6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 24 | 0 | 1 | 0 | 8.7 | 6.7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4.3 |
| 25 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 26 | 0 | 1 | 0 | 3.5 | 2.3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 27 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 28 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 29 | 0 | 1 | 0 | 2.4 | 0.9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 30 | 0 | 1 | 0 | 10.6 | 1.9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Ligne data (30n)

| Bus (nl) | Bus (nr) | R (pu) | X (pu) | ½B (pu) |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 0.0192 | 0.0575 | 0.0264 |
| 1 | 3 | 0.0452 | 0.1852 | 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 | 0.2080 | 0 |
| 6 | 10 | 0 | 0.5560 | 0 |
| 9 | 11 | 0 | 0.2080 | 0 |
| 9 | 10 | 0 | 0.1100 | 0 |
| 4 | 12 | 0 | 0.2560 | 0 |
| 12 | 13 | 0 | 0.1400 | 0 |
| 12 | 14 | 0.1231 | 0.2559 | 0 |
| 12 | 15 | 0.0662 | 0.1304 | 0 |
| 12 | 16 | 0.0945 | 0.1987 | 0 |
| 14 | 15 | 0.2210 | 0.1997 | 0 |
| 16 | 17 | 0.0824 | 0.1923 | 0 |
| 15 | 18 | 0.1073 | 0.2185 | 0 |
| 18 | 19 | 0.0639 | 0.1292 | 0 |
| 19 | 20 | 0.0340 | 0.0680 | 0 |
| 10 | 20 | 0.0936 | 0.2090 | 0 |
| 10 | 17 | 0.0324 | 0.0845 | 0 |
| 10 | 21 | 0.0348 | 0.0749 | 0 |
| 10 | 22 | 0.0727 | 0.1499 | 0 |
| 21 | 22 | 0.0116 | 0.0236 | 0 |
| 15 | 23 | 0.1000 | 0.2020 | 0 |
| 22 | 24 | 0.1150 | 0.1790 | 0 |
| 23 | 24 | 0.1320 | 0.2700 | 0 |
| 24 | 25 | 0.1885 | 0.3292 | 0 |
| 25 | 26 | 0.2544 | 0.3800 | 0 |
| 25 | 27 | 0.1093 | 0.2087 | 0 |
| 28 | 27 | 0 | 0.3960 | 0 |
| 27 | 29 | 0.2198 | 0.4153 | 0 |
| 27 | 30 | 0.3202 | 0.6027 | 0 |
| 29 | 30 | 0.2399 | 0.4533 | 0 |
| 8 | 28 | 0.0636 | 0.2000 | 0.0214 |
| 6 | 28 | 0.0169 | 0.0599 | 0.0650 |

## Bibliographique

[1] L.Slimani , "optimisation de l'écoulement de puissance par une méthode de colonie de fourmis," Université de Sétif mémoire de Magister, 2006.

[2] N.Mancer "Contribution à l'optimisation de la puissance réactive en présence de dispositifs de compensation dynamique (FACTS) " Université Mohamed Khider – Biskra mémoire de Magister, 2012.

[3]S.Sayah , "Application de l'intelligence artificiel pour le fonctionnement optimal des systèmes électriques," Université de Sétif Thèse de Doctorat , 2010.

[4] T. Kritsana, "Development of efficient calculation method based on evolutionary programming for optimal power flow considering transient and voltage stabilities," university of Tokyo Thèse de Doctorat , December 2009.

[5] R.benabid Optimisation Multiobjectif de la Synthèse des FACTS par les Particules en Essaim pour le Contrôle de la Stabilité de Tension des Réseaux Electriques Université Amar Telidji, Laghouat mémoire de Magister, 2007.

[6] Decomposition model and interior point methods for optimal spot pricing of in deregulation environment.

[7] T. Bouktir ; ''Application de la programmation orientée objet à l'optimisation de l'écoulement de puissances'', Thèse de doctorat d'état. Université de Batna, Algérie, juin 2004.

[8] M. A. Abido,"Multiobjective Evolutionary Algorithms for Electric Power Dispatch Problem," IEEE
Trans on Evolutionary computation, vol. 10, NO.3, June .2006.

[9] N.G Hingorani. "FACTS Technology and Opportunities," IEE FCATS Colloquium, pages 1-10, 1994.

[10] Stéphane GERBEX, " Metaheuristique Appliquées Au Placement Optimal De Dispositifs FACTS dans un Réseau Electrique, " thèse PHD, Ecole polytechnique de Lausanne, Lausanne 2003.

[11] Mancer N, Aggouni Y'' modélisation et integration des dispositifs de compensation dynamique FACT'', Mémoire de l'ingénieur d'état Juin 2007

[12] G. Eskandar, "Apport de l'UPFC à l'amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques ," Université Henri Poincaré Nancy-I Thèse Doctorat , Octobre-2003.

[13] R. Haimour. , "Contrôle des Puissances Réactives et des Tensions par les Dispositifs FACTS dans un Réseau Electrique," Ecole Normale Supérieure de l'Enseignement Technologique d'Oran Mémoire Magister, 2009.
[14] A. Edris et al. '' Proposed Terms and Definition of FACTS," IEEE trans. on power delivery, 12(4):1884-1853, October 1997.
[15] Bodapatti 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.
[16] Stéphane GERBEX, " Metaheuristique Appliquées Au Placement Optimal De DispositifsFACTS dans un Réseau Electrique, " thèse PHD, Ecole polytechnique de Lausanne,Lausanne 2003.
[17] D.louardi "CONTROLE DE L'ECOULEMENT DE PUISSANCE ACTIVE PAR SYSTEME FACTS" UNIVERSITE DE BATNA 2009

[18] K.S. Smith, L. Ran, J. Penman, " Dynamic Modeling of a Unified Power Flow Controller", IEE proceedings-Generation, Transmission and Distribution, Vol. 144, No. 1, January 1997, pp. 7-12.