الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة يحي فارس ـــ المدية

UNIVERSITE YAHIA FARES— MEDEA

Faculté des sciences et de technologie

Département génie électrique



Projet de Fin d'étude Pour l'Obtention du Diplôme
Master II En Electrotechnique

Option :
Réseau électrique

THEME

Apport des STATCOM sur l'écoulement de puissance dans un réseau d'énergie électrique

Proposé et dirigé par
Dr. N.Hanini

Préparé et présenté par
M. Maden Bachir
M. Blaifi Smain

Année Universitaire 2017-2018

ملخص:

إن الوسائل التقليدية لمراقبة الشبكات الكهربائية والمتمثلة في الأجهزة الإلكتروميكانيكية لن تكون في المستقبل قادرة على الرد السريع و الاستجابة بفعالية للاضطرابات التي تصيب الشبكات الكهربائية.لذا من الضروري استكمال حركتها بأجهزة ذات رد فعل و أوقات استجابة سريعة و القائمة على الكترونيات الطاقة والمعروفة باسم أنظمة الطاقة المرنة اختصارا لانجليزية **FACTS** .

هذه الأطروحة تطرح دراسة تدفق الطاقة باستعمال إحدى هذه الأجهزة و المتمثلة. **STATCOM** وتأثير هذا الأخير على معايير الشبكات الكهربائية مثل التوتر الكهربائي ,الزاوية وتعديل قوة رد الفعل في بيئة **Matlab**

كلمات مفتاحية :

الشبكة الكهربائية، تدفق الطاقة ،المعوضات الثابتة الموصلة على التوازي **(statcom)** ، خوارزمية نيوتن رافسون ، نظام نقل الطاقة الكهربائية مرن **(FACTS)** ، التوتر الكهربائي

Résumé :

Les moyens classiques de contrôle des réseaux qui étaient les dispositifs électromécaniques pourraient dans l'avenir s'avérer trop lents et insuffisants pour répondre efficacement aux perturbations des réseaux électriques. Il faudra donc compléter leur action en mettant en œuvre des dispositifs électroniques de puissance ayant des temps de réponse courts, connus sous l'appellation **FACTS** (Flexible Alternative Current Transmission System).

Ce travail, présente l'étude de l'écoulement de puissance en utilisant l'un des plus performants de ces dispositifs, en particulier le **STATCOM**. et l'influence de ce dernier sur les paramètres des réseaux électriques a savoir la tension, l'angle et la compensation de la puissance réactive par logiciel Matlab.

Mots-clés: Réseau électrique, écoulement de puissance, dispositifs **FACTS**, **STATCOM**, profil de tension, **algorithme de Newton-Raphson.**

Abstract:

The traditional methods of control of the networks that were the electromechanical devices could in the future prove too slow and insufficient to answer the disturbances of the electrical supply networks effectively. It will thus be necessary to supplement their action by implementing electronic devices of power having short, known response times under name **FACTS** (Flexible device Alternative Current Systems Transmission).

This work presents the study of lowd flow by using one of powerful of these devices, namely **STATCOM** and the influence of this last on electric network parameters has known voltage, angle and the compensation of the power reactive on Matlab software..

Keywords: Electrical network, power flow, FACTS devices **STATCOM**, voltage profile, **Newton-Raphson's algorithm**.

Remerciements

*Nous remercions en premier lieu « **Allah** » pour nous*
Avoir donné la force, le courage et la volonté
Nécessaire pour réaliser ce travail.

Et nous tenons à remercier notre encadreur
*Dr **Hanini Nourddine***
Pour son soutien et ses conseils.

Nos remerciements vont également à tous les
Personnes qui de loin ou de près ont contribué
A la réalisation de ce modeste travail.
Nous adressons également nos remerciements aux
Personnels (enseignants et administrateurs) de la Faculté
De Technologie et informatique et en particulier Ceux
Du département de Génie Electrique.

Dédicaces

C'est tout plein de joie que je dédie ce travail à ceux qui m'ont été une source d'inspiration et de volonté ;

A ma mère et mon père pour leurs encouragements et conseils durant la période de mes études ;

Je le dédie à mes très chers

frères etsœurs A toute ma

grande famille Madene

Une dédicace à tous mes amis, ET pour tous ceux qui me connaissent ;

A la fin je dédie très chaleureusement

ce mémoire à mon binôme.

Dédicaces

C'est tout plein de joie que je dédie ce travail à ceux qui m'ont été une source d'inspiration et de volonté ;

A ma mère et mon père pour leurs encouragements et conseils durant la période de mes études ;

Je le dédie à mes très chers

frères et sœurs A toute ma

grande famille Blaifi

Une dédicace à tous mes amis, ET pour tous ceux qui me connaissent ;

A la fin je dédie très chaleureusement

ce mémoire à mon binôme.

Liste des abréviations Et symboles

Liste des abréviations

Abréviations	
FACTS	Flexible Alternative Current Transmission Systems
GTO	Gate Turn-Off Thyristor
SVC	Static Var Compensator
TSSC	Thyristor Switched Series Capacitor
TCSC	Thyristor Controlled Series Capacito
TCSR	Thyristor Controlled Series Reactor
TCR	Thyristor Controlled Reactor
TSR	Thyristor SwitchedReactor
TSC	Thyristor Switched Capacitor
STATCOM	Static Synchronous Compensator
SSSC	StaticeSynchronesSérieCompensateur
SPS	Static Phase Shifter
UPFC	Thyristor Controlled Phase Shifting Transformer.
HT	Haute tension
THT	Très haute tension
MT	Moyenne tension
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
EPRI	Electric Power Research Institute
JB	Jeu de barres
pu	Grandeur en unité relative (grandeur réduite)

Liste des symboles

	Symbole	Unité
P_{max}	La puissance maximale de la ligne	Watt
Ibus	Vecteur des courants complexes injectés aux jeux de barres	**V**
Ybus	Matrice admittance nodale	A / V
Vbus	Vecteur des tensions complexes des jeux de barres	V
Yim	Elément im de la matrice admittance	A / V
Ii	Courant net injecté à un jeu de barres i	A
Vm	Tension d'un jeu de barres m	V
Vm et ðm	Module et phase de la tension au jeu de barres m	V et rad
Yim et 8im	Module et argument de l'élément im de la matrice admittance	A / V et rad
Si	Puissance apparente injectée à un jeu de barres i	V A
Pi et Qi	Puissances active et réactive injectées au jeu de barres i	V . A et VAR
PGi et QGi	Puissance active et réactive du générateur i	V . A et VAR
PDi et QDi	Puissance active et réactive demandée au jeu de barres i	V . A et VAR
Pi et Qi	Vecteur écarts de puissances actives et réactives	V . A et VAR
Vm et ðm	Accroissements du module et phase de tension au JB m	V et rad
J1 , J2,J3,J4	Sous matrices du Jacobienne	
Zs	Impédance de la ligne	V/A
Rs	La résistance de la ligne	**Ω**
Xs	La réactance de la ligne	**Ω**
Pc (ð)	La puissance active dans une ligne de transmission	Watt
Qc (ð)	La puissance réactive dans une ligne de transmission	VAR
Xe††	La reactance effective	**Ω**

Liste des figures
Et des tableaux

Liste des figures

Figure I. 1: Le modèle d'un générateur utilisé dans l'étude de l'écoulement de puissance 3
Figure I. 2: Schéma équivalent en π d'une ligne de transmission.....3
Figure I. 3: Modèle de la charge électrique.....4
Figure I. 4: Modèle de l'élément shunt.....4
Figure I. 5: Réseaux à3 nœuds……6
Figure I. 6: Ligne électrique alimentant une charge.....20
Figure II. 7: Compensateur shunt dans un réseau de transmission 23
Figure II. 8: Phases de tension et de compensateur shunt.....24
Figure II. 9: Puissance active et réactive en fonction de δ.....25
Figure II. 10:(a) Schéma de base d'un SVC, (b) Caractéristique d'un SVC.....26
Figure II. 11: Schéma unifilaire du STATCOM.....26
Figure II. 12: Compensateur série dans un réseau de transmission 27
Figure II. 13: Diagramme de phase de la tension et courant du compensateur série 28
Figure II. 14: Puissance active et réactive transportées par une ligne en fonction de δ et K.....29
Figure II. 15:(a) Structure d'un TCSC, (b) Schéma équivalent 30
Figure II. 16: Schéma de principe de TCSR.....30
Figure II. 17:(a) Structure d'un SSSC, (b) Schéma équivalent d'un SSSC.....30
Figure II. 18:(a) Structure du SPS (b) schéma équivalent du SPS 31
Figure II. 19:(a) Schéma représentatif d'un UPFC, (b) Schéma équivalent de l 'UPFC.....32
Figure II. 20: Diagramme schématique pour l'application des FACTS.....33
Figure III. 1: le composants Statcom.....34
Figure III. 2: Circuit équivalent Statcom.....34
Figure III. 3: schéma de base du Statcom.....36
Figure III. 4: *Diagramme vectoriel de* Statcom 37
Figure III. 5: caractéristique du Statcom.....37
Figure III. 6: Schéma du réseau standard IEEE30 nœuds.....39
Figure III. 7: Variation de la tension en fonction des nœuds Sans compensation…….40
Figure III. 8: Variation de la tension en fonction des nœuds(26,30)(avec Statcom)… 41
Figure III. 9:variation de la tension en fonction des nœuds(10,12,19) (avec Statcom)… 42
Figure III.10: variation de la tension en fonction des nœuds(10 ,12,19,26,30)avec Statcom.....43
Figure III. 11: variation de la tension en fonction des noeuds (26,30) avec et sans Statcom……45

Liste des tableaux

Tableau I.1: Variables au niveau des différents types de jeu de barres.....5

Tableau III.1: Résultats de la tension et l'angle d'un réseau IEEE à 30 nœuds obtenus Par la méthode de Newton-Raphson sans compensation.....40

Tableau III. 2: Résultats de la tension et l'angle d'un réseau IEEE à 30 nœuds obtenus Par la méthode de Newton-Raphson avec compensation en [26 30].....41

Tableau III. 3: Les résultats de l'insertion du STATCOM dans les nœuds (26,30) 42

Tableau III.4 : Résultats des tensions et l'angle avec compensation.(10, 12,19).....42

Tableau III.5: les résultats de l'écoulement de puissance(les nœuds 10,12,19)..... .46

Tableau III.6: Résultats de la tension et l'angle avec compensation (10 12 19 26 30).....46

Tableau III.7: les résultats de l'écoulement de puissance les nœuds (10, 12, 19, 26,30).....44

Tableau III.8: la comparaison des résulta de la tension sans et avec compensation d'un statcom.... 44

Table des matières

Sommaire

Liste des abréviations ..... **i**
Liste des symboles ..... **ii**
Liste des figures ..... **iii**
Liste des tableaux ..... **iv**
Introduction Générale **1**

Chapitre I
Généralités sur l'écoulement de puissance

I.1 Introduction 2
I.2 Modélisation simplifiée des éléments du réseau électrique 2
I.2.1 Modèle du générateur 3
I.2.2 Modèle de la Ligne de transmission 3
I.2.3 Modèle de la charge électrique 4
I.2.4 Modèle de l'élément shunt 4
I.3 Classification des jeux de barres 5
I.3.1 Jeu de barres de référence 5
I.3.2 Jeu de barres de contrôle (PV bus) 5
I.3.3 Jeu de barres de charge (PQ bus) 5
I.4 Analyse de l'écoulement de puissance 6
I.4.1 Matrice d'admittance nodale 6
I.4.2 Les équations de l'écoulement de puissance 8
I.4.3 Equations de l'écoulement de puissance dans les lignes 9
I.4.4 Méthodes numériques de résolution d'un problème d'écoulement de puissance 10
I.4.4.1 Méthode de Gauss Seidel 10
I.4.4.2 Méthode de Gauss Seidel avec accélération 11
I.4.4.3 Méthode de Newton-Raphson 12
I.4.4.4 Méthode de Découplée Rapide 17
I.5 Puissance transmise et intérêt de la compensation de la puissance réactive 18
I.6 Moyens de compensation de la puissance réactive 21
I.6.1Compensateur synchrone 21
I.6.2 Condensateurs 20
I.6.3 Inductances 22
I.6.4 Compensateurs statiques 22
I.7 conclusion 22

Chapitre II
Les systèmes Facts

II.7. le system Facts 23
II.7.1 Définition et le rôle d'un dispositif FACTS 23
II.7.2 Type des dispositifs FACTS 23
II.7.2.1 Compensateurs parallèles (shunt) 21
II.7.2.2 Compensateur parallèle à base de thyristor 26
a. Compensateur statique de l'énergie réactive(SVC) 29
b.Compensateur parallèle à base de GTO thyristor(STATCOM) 29
II.7.2.3 Compensateurs series 27
II.7.2.3. 1.Compensateur série à base de thyristor 29
a. Condensateur série commandé par thyristor (TCSC) 29
b. Compensateur série contrôlé par thyristor (TCSR) 30
II.7.2.3.2.Compensateur série à base de GTO thyristor 30
a. Compensateur statique synchrone série (SSSC) 30
II.7.2.4 Compensateurs hybrides ou combinés série-parallèle 31
a. SPS (Static Phase Shifter) 31
b.UPFC (unified power flow controller) 32
II.7.2.5 Application des dispositifs FACTS dans les réseaux électriques 32
II.8 Conclusion 33

Chapitre III
Insertion FACTS shunt « STATCOM » dans un réseau électrique

III.1 Introduction 34
III.2 Etude de l'écoulement de puissance en présence du statcom 34
III.2.1.principe de fonctionnement 36
III.2.2 les avantages du statcom 38
III.2.3 description générale 38
III.3. Application de dispositifs Statcom dans les réseaux électriques 32
III. 3.1 Application sur un réseau IEEE standard à 30 nœuds 39
III. 3.2 interprétation des résultats de la simulation ..... 46..
III.5 Conclusion 46

Conclusion Générale 47
Références bibliographiques 48
Annexe A 49
Annexe B 52

Introduction Générale

Introduction générale

Habituellement, une centrale n'est pas située à proximité du centre de charge, mais elle peut être loin du centre de distribution en raison de circonstances diverses. Pour répondre à la demande de puissance, sans cesse croissante, les services publics préfèrent s'appuyer sur la production de l'électricité déjà existante au lieu de construire de nouvelles lignes de transmission qui sont limitées par des contraintes diverses. Par conséquent, il est impératif d'améliorer l'utilisation de l'énergie électrique en maximisant d'une part les puissances transitées dans les lignes et conservant la fiabilité et la sécurité du réseau d'une autre part.

Les réseaux électriques jusqu'à ces dernières années sont contrôlés avec des dispositifs mécaniques ayant un temps de réponse plus au moins long et avec lesquels l'action d'amorçage et de réamorçage ne peut être répétitivement exécutée à une fréquence élevée. Pour assurer un meilleur contrôle du réseau, des dispositifs connus sous le nom des ***FACTS*** *«* ***Flexible Alternating Current Transmission System*** *» sont de nos jours utilisés. Ces derniers font en général appel à de l'électronique de puissance, des microprocesseurs, de l'automatique, des télécommunications et des logiciels pour parvenir à contrôler les systèmes de puissance. Ce sont des éléments de réponse rapide. Ils donnent en principe un contrôle plus souple de l'écoulement de puissance. Ils donnent aussi la possibilité de charger les lignes de transit à des valeurs près de leur limite thermique, et d'augmenter ainsi la capacité de transfert de puissance d'une région à une autre. Ils Limitent aussi les effets des défauts et des défaillances de l'équipement, et stabilisent le comportement du réseau électrique.*

Le sujet de ce mémoire porte en particulier sur l'analyse de l'écoulement de puissance dans un réseau de transport d'énergie électrique au moyen de dispositifs ***STATCOM****. Afin d'analyser l'écoulement de puissance et l'influence des* ***FACTS****, on a eu recourt à la programmation en utilisant le logiciel « MATLAB »*

Pour atteindre ces objectifs, ce mémoire est organisé en trois chapitres.

Le premier chapitre*, traire le problème de l'écoulement de puissance des réseaux standards IEEE en utilisant les algorithmes de Gauss-Seidel et de Newton-Raphson.*

Le deuxième chapitre *est consacré à la résentation des dispositifs* ***FACTS*** *en décrivant les différents types des systèmes de compensation.*

Le troisième chapitre *vient pour appliquer cette étude sur un modèle de réseau électrique de transport* ***IEEE 30*** *jeux de barres sans et avec la présence du compensateur* ***STATCOM*** *où plusieurs constatations vont être dégagées. Finalement, une conclusion générale Récapitulera les principaux résultats de ce travail et apportera quelques perspectives.*

Chapitre I

Généralités sur l'écoulement de puissance

I.1.Introduction

L'exploitation des réseaux électriques pose de nombreux problèmes d'ordre technique et économique. L'exploitant du réseau doit assurer en tout temps et en tout lieu la couverture de l'énergie demandée, de garantir une qualité acceptable de la puissance livrée et de procurer une sécurité d'alimentation élevée avec un coût aussi faible que possible.

Dans ce chapitre, nous rappelons d'abord les notions des réseaux électriques ;puis nos présentons l'analyse de l'écoulement de puissance en décrivant les méthodes numériques utilisées pour l'étude de la répartition de charge dans un réseau électrique et finirons par une présentation des systèmes de compensation d'énergie réactive à savoir les dispositifs FACTS.

I.2.Modélisation simplifiée des éléments du réseau électrique

Un réseau d'énergie électrique est un système d'éléments interconnectés conçu :

- ✓ *Pour convertir d'une façon continue l'énergie qui n'est pas sous forme électrique en énergie électrique.*
- ✓ *Pour transporter l'énergie électrique sur de longues distances.*
- ✓ *Pour transformer l'énergie électrique sous des formes spécifiques soumises à des contraintes bien déterminées.*

Les éléments principaux d'un réseau peuvent être classés en trois sous-systèmes [1] :

- ✓ *Production (génératrices).*
- ✓ *Transport, répartition et distribution (lignes).*
- ✓ *Utilisation (consommateurs).*

Pour étudier un réseau d'énergie électrique complexe, des modèles ou schémas équivalents de ces principaux composants (générateurs, différents types de transformateurs, lignes et charges) sont établis.

I.2.1Modèle du générateur

Le générateur est considéré comme le cœur du réseau électrique. Il assure la production de l'énergie électrique demandée par le consommateur.

Dans l'analyse de l'écoulement de Puissance, le générateur est modélisé comme une source de tension constante V_g qui injecte de la puissance active P_g et réactive Q_g (figure I.1).

La puissance réactive du générateur s'adapte de façon à maintenir la tension au nœud i constante. Aussi, le générateur est caractérisé par deux limites de puissance réactive $Q_{g_{max}}$ et $Q_{g_{min}}$.Lorsque l'une de ces limites est atteinte, la puissance Q_c reste inchangée et la tension au nœud n'est plus fixe.

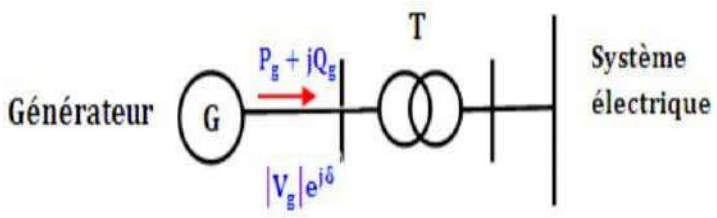


Figure I. 2
Modèle d'un générateur utilisé dans l'étude de l'écoulement de puissance

I.2.2.Modèle de la ligne de transmission

La ligne de transmission de l'énergie électrique située entre les nœuds i et m est généralement représentée par le schéma équivalent par phase de type (n) comme indiqué sur la figure I.2.

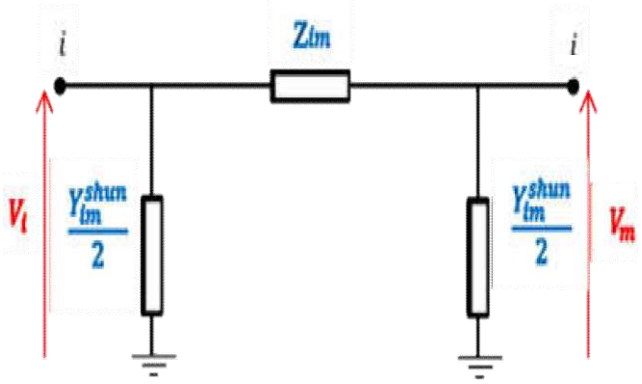


Figure I. 2:
Schéma équivalent en n d'une ligne de transmission

Z_{im}: *Impédance série par phase :* $Z_{im} = R + jX$

R et X : sont respectivement, la résistance et la réactance série de la ligne entre les jeux de barres i et m.

Y_{im}^{shunt} *: L'admittance shunt.*

I.2.3.Modèle de la charge électrique

La charge électrique est souvent modélisée sous forme d'une impédance Z_{charge} qui consomme de la puissance active P_L et réactive Q_L constantes (figure I.3). Cette charge Représente souvent des postes de répartition (sous stations) qui alimentent des réseaux de distribution.

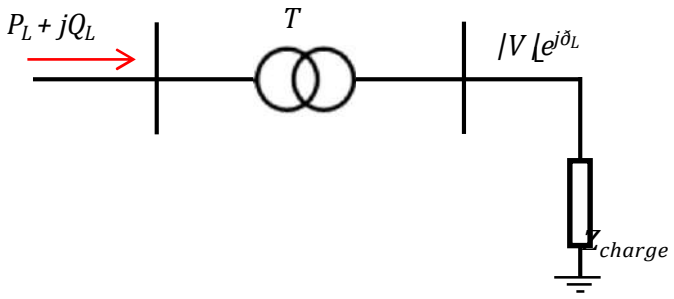


Figure I. 3: *Modèle de la charge électrique*

I.2.4.Modèle de l'élément shunt

Dans la plupart des cas, des éléments shunt (batteries de condensateurs ou réactances) sont insérés dans le réseau électrique pour fournir ou absorber de la puissance réactive afin d'obtenir un meilleur profil de tension [2].

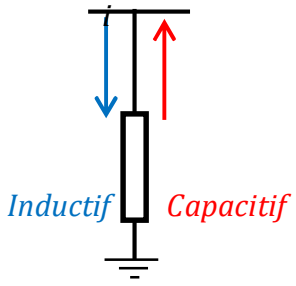


Figure I. 4: *Modèle de l'élément shunt.*

I.3.Classification des jeux de barres

Il y a quatre grandeurs fondamentales associées à chaque jeu de barres i du réseau, à savoir le module de tension V_i, la phase de tension δ_i, la puissance active injectée P_i et la puissance réactive injectée Q_i. Pour chaque jeu de barres, deux variables doivent être spécifiées au préalable et les deux autres sont à calculer [3].

Dans l'analyse de l'écoulement de puissance, les jeux de barres du système sont classés en trois catégories :

I.3.1 Jeu de barres de référence

Le jeu de barres de référence est choisi parmi ceux où un générateur est connecté. Le rôle de ce jeu de barres est de fournir la puissance supplémentaire nécessaire pour compenser les pertes de transmission, car celles-ci ne sont pas connues d'avance. En plus, ce jeu de barres sert de référence pour les phases des tensions. Par convention, ce jeu de barres est identifié par le jeu de barres N°1, dont le module et la phase de tension sont toujours spécifiés (V_1 = 1 pu et δ_1 = 0°). Par conséquent, les puissances P_1 et Q_1 sont inconnues, du fait que P_{G1} et Q_{G1} ne sont pas spécifiées d'avance [4].

I.3.2.Jeu de barres de contrôle (PV bus)

Chaque jeu de barres du système dont le module de tension est maintenu constant est considéré comme un jeu de barres à tension contrôlée ou jeu de barres générateur. Ce type de jeux de barres est connecté avec un générateur. Au niveau de ce jeu de barres, P_i et V_i sont des grandeurs spécifiées (connues). Donc, Q_i n'est pas connu à l'avance étant donné que Q_{Gi} est inconnue. Il en est de même pour δ_i [4].

I.3.3 Jeu de barres de charge (PQ bus)

Tous les jeux de barres du réseau dont l'injection des puissances actives et réactives est donnée, sont considérés comme des jeux de barres de charge. Pour ce type de nœud, les puissances active P_i et réactive $Q_i$sont connues et la procédure de l'écoulement de puissance donne les valeurs de V_i et δ_i auparavant inconnues [4].

Le tableau I.1ci-dessous donne les variables connues et inconnues pour chaque type de jeu de barres.

Type du jeu de barres	Variables connues	Variables inconnues
Charge (P, Q)	P, Q	|V|, δ
Contrôle (P, V)	P, |V|	Q, δ
Référence (slack/swing bus)	|V|, δ	P, Q

Tableau I.1: *Les variables au niveau des différents types de jeu de barres*

I.4.Analyse de l'écoulement de puissance

L'étude de l'écoulement de puissance est une étape primordiale de toute analyse sérieuse d'un réseau électrique. En effet, elle nous permet de calculer les grandeurs d'un réseau en régime permanent équilibré à savoir les modules et phases des tensions en tout point du réseau. A partir de ces dernières, on peut calculer les courants dans les lignes de transport, les puissances actives et réactives transitées et les pertes de puissances provoquées lors du transport d'énergie électrique. Cette analyse est très importante pour les études, la planification et l'exploitation d'un réseau électrique.

I.4.1.Matrice d'admittance nodale

Les équations de l'écoulement de puissance utilisant la formulation des admittances nodales pour un réseau à trois nœuds, sont d'abord développées, puis elles sont généralisées pour un système à n nœuds.

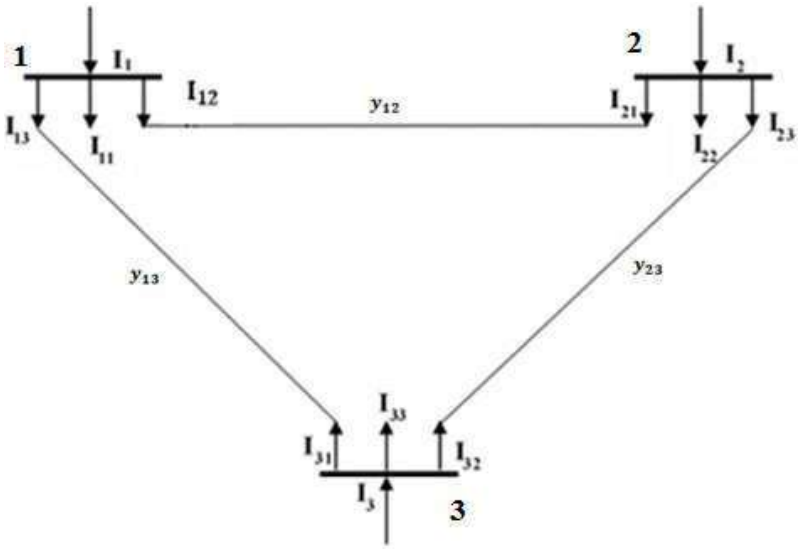


Figure I. 5: *Réseaux à 3 nœuds*

$$I_1 = I_{11} + I_{12} + I_{13} \quad \text{(I. 1)}$$

$$I_1 = V_1 y_{11} + (V_1 - V_2) y_{12} + (V_1 - V_3) y_{13} \quad \text{(I. 2)}$$

$$I_1 = V_1 (y_{11} + y_{12} + y_{13}) - V_2 y_{12} - V_3 y_{13} \quad \text{(I. 3)}$$

En posant :

$$Y_{11} = y_{11} + y_{12} + y_{13} \quad \text{(I. 4)}$$

$$Y_{12}=-y_{12} \quad \text{(I. 5)}$$

$$Y_{13}=-y_{13} \quad \text{(I. 6)}$$

On aura l'expression du courant ci-dessous :

$$I_1=V_1Y_{11}+V_2Y_{12}+V_3Y_{13} \quad \text{(I. 7)}$$

De la même manière, on trouve les équations des courants nodaux pour les autres nœuds.

$$I_2=V_1Y_{21}+V_2Y_{22}+V_3Y_{23} \quad \text{(I. 8)}$$

$$I_3=V_1Y_{31}+V_2Y_{32}+V_3Y_{33} \quad \text{(I. 9)}$$

Ces équations peuvent être écrites sous la forme matricielle:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} \quad \text{(I. 10)}$$

Le courant injecté au jeu de barres i peut se mettre sous la forme :

$$I_i = \sum_{m=1}^{3} Y_{im} \cdot V_m \quad \text{(I. 11)}$$

Cette dernière équation, qui traite un système à trois nœuds, peut être généralisée pour un système à n nœuds:

$$I_i = \sum_{m=1}^{n} Y_{im} \cdot V_m \qquad i=1,2,\ldots,n \quad \text{(I. 12)}$$

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \ldots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \ldots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \ldots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \quad \text{(I. 13)}$$

I.4.2.Les équations de l'écoulement de puissance

Le bilan de puissance électrique à un jeu de barres i d'un réseau électrique de n jeux de barres est égal à la différence entre la puissance générée SGi et la puissance demandée SDi au niveau du même jeu de barres.

$$S_i = S_{Gi} - S_{Di} = (P_{Gi} - P_{Di}) + j(Q_{Gi} - Q_{Di}) \qquad \text{(I. 14)}$$

$$S_i^* = P_i - jQ_i = V_i^* . I_i \quad i = 1,2,\cdots,n \qquad \text{(I. 15)}$$

Le courant Ii peut se mettre sous la forme suivant :

$$I_i = \sum_{m=1}^{n} |Y_{im}||V_m| \angle(\theta_{im} + \delta_m) \qquad \text{(I. 16)}$$

En remplaçant l'expression du courant, l'équation (I.15) peut d'écrire:

$$S_i^* = P_i - jQ_i = |V_i| \angle -\delta_i \sum_{m=1}^{n} |Y_{im}||V_m| \angle(\theta_{im} + \delta_m) \qquad \text{(I. 17)}$$

En séparant la partie réelle et la partie imaginaire de l'équation (I.17) on aura les équations (I.18) et (I.19) des puissances actives et réactives au jeu de barres i :

$$P_i = \sum_{m=1}^{n} |V_i||V_m||Y_{im}| \cos(\theta_{im} - \delta_i + \delta_m) \qquad i = 1,2,\ldots,n \qquad \text{(I. 18)}$$

$$Q_i = -\sum_{m=1}^{n} |V_i||V_m||Y_{im}| \sin(\theta_{im} - \delta_i + \delta_m) \qquad i = 1,2,\ldots,n \qquad \text{(I. 19)}$$

I.4.3. Equations de l'écoulement de puissance dans les lignes et les pertes

La détermination des valeurs des puissances réparties dans les lignes de transport est indispensable afin de localiser les lignes électriques surchargées et de calculer la valeur des pertes de puissance. Le courant circulant entre les deux jeux de barres i et k est considéré positif lorsqu'il est dirigé de i vers k et sont expression est la suivante [5] :

$$I_{ik} = y_{ik}(V_i - V_k) + V_i y_p \qquad \text{(I. 20)}$$

yik : L'admittance de la ligne entre les deux jeux de barres i et k ;
ViYp: La contribution shunt du courant au jeu de barres i
yp: L'admittance shunt au jeu de barres.

De la même manière, le courant qui circule du nœud k vers le nœud i donne par :

$$I_{ki} = y_{ki}(V_k - V_i) + V_k y_p \qquad \text{(I. 21)}$$

$$P_{ik} - jQ_{ik} = V_i^* I_{ik} \qquad \text{(I. 22)}$$

$$P_{ik} - jQ_{ik} = V_i^*(V_i - V_k) y_{ik} + V_i^* V_i y_p \qquad \text{(I. 23)}$$

$$P_{ki} - jQ_{ki} = V_k^*(V_k - V_i) y_{ik} + V_k^* V_k y_p \qquad \text{(I. 24)}$$

La valeur des pertes de puissance dans la ligne entre les deux jeux de barres i et k est la somme algébrique de répartition des puissances déterminées à partir des équations (I.23) et (I.24).

I.4.4.Méthodes numériques de résolution d'un problème d'écoulement de puissance

I.4.4.1.Méthode de Gauss Seidel

La méthode de GAUSS-SEIDEL est l'une des plus simples méthodes itératives utilisées pour la résolution du problème de l'écoulement de puissance ou généralement pour la résolution d'un ensemble très large d'équations algébriques non linéaires.

Cette méthode consiste à enlever séquentiellement chaque nœud et actualiser sa tension en fonction des valeurs disponibles de toutes les tensions des autres nœuds. Pour le cas de l'étude de l'écoulement de puissance, les solutions recherchées sont déduites de la résolution de l'équation nodale suivante :

$$I_i = Y_{i1}V_1 + Y_{i2}V_2 \ldots + Y_{in}V_n = \sum_{m=1}^{n} Y_{im}V_m \qquad \text{(I. 25)}$$

En général, on calcule le vecteur V qui satisfait le système non linéaire et qui est donné par :

$$V_i^{(k+1)} = \frac{1}{Y_{ii}}\left[\frac{P_i - jO_i}{(V_i^*)^k} + \sum_{\substack{i=1 \\ i\neq m}}^{n} Y_{im}V_m^{(k)}\right] \qquad \text{(I. 26)}$$

Pour les expressions des puissances actives et réactives, elles sont calculées à partir des deux expressions ci-après respectivement.

$$P_i^{(k+1)} = \Re\left[V_i^{*(k)}\left[V_i^{(k)}Y_{ii} - \sum_{\substack{i=1 \\ i\neq m}}^{n} Y_{im}V_m^{(k)}\right]\right] \qquad \text{(I. 27)}$$

$$Q_i^{(k+1)} = -\Im\left[V_i^{*(k)}\left[V_i^{(k)}Y_{ii} - \sum_{\substack{i=1 \\ i\neq m}}^{n} Y_{im}V_m^{(k)}\right]\right] \qquad \text{(I. 28)}$$

La convergence du système est atteinte lors que la condition suivante est satisfaite:(10^{-3})

$$max\left|V^{k+1}-V^{k}\right| \leq \varepsilon \qquad \text{(I. 29)}$$

Dans le cas pratique, la condition d'arrêt est choisie par rapport aux puissances actives et réactives.

$$max\left|P^{k+1}-P^{k}\right| \leq \varepsilon \qquad \text{(I. 30)}$$

$$max\left|Q^{k+1}-Q^{k}\right| \leq \varepsilon \qquad \text{(I. 31)}$$

M

I.4.4.2.Méthode de Gauss Seidel avec accélération

La méthode de Gauss-Seidel avec accélération utilise le même processus que celle de Gauss-Seidel sans accélération sauf que la valeur calculée sera accélérée avant d'être introduite dans le calcul de la prochaine valeur (nouvelle itération). La valeur accélérée est calculée à partir de l'expression suivante :

$$V_i^{(K+1)} = V_i^{(K)} + \alpha \times \Delta V_i^{(K+1)} \qquad \text{(I. 32)}$$

On calcule $V^{(k+1)}$ après chaque itération en utilisant l'expression suivante :

$$\Delta V_i^{(K+1)} = V_i^{(K+1)} - V_i^{(K)} \qquad \text{(I. 33)}$$

Les calculs s'arrêtent lorsque la condition suivante est vérifiée :

$$\left|\Delta V_i^{(K+1)}\right| \leq \varepsilon \qquad \text{(I. 34)}$$

Le coefficient α est dit « cœfficient d'accélération de convergence ». Chaque réseau possède son propre facteur optimal qui permet de réduire considérablement le nombre d'itération, par conséquent le temps de calcul. Ce facteur est compris généralement entre 1.4 et 1.8 [16].

I.4.4.3.Méthode de Newton-Raphson

Cette méthode nécessite plus de temps par itération que celle de Gauss-Seidel, alors qu'elle ne demande que quelques itérations même pour les grands réseaux. Par conséquent, cette méthode permet de réduire fortement le temps d'exécution du calcul de l'écoulement de puissant surtout pour les grands réseaux. Par contre, elle nécessite une très grande mémoire de stockage.

Les expressions des puissances actives et réactives de chaque nœud i du réseau peuvent se mettre sous la forme ci-dessous :

$$\left.\begin{aligned} P_i &= \sum_{m=1}^{n} |V_i||V_m||Y_{im}| \cos(\delta_m - \delta_i + \theta_{im}) \\ Q_i &= -\sum_{m=1}^{n} |V_i||V_m||Y_{im}| \sin(\delta_m - \delta_i + \theta_{im}) \end{aligned}\right\} i=1,2\ldots,n \qquad \text{(I. 35)}$$

Avec :

i = 1: Représente le nœud de référence

n : Nombre de nœuds

i : Numéro du nœud

Après développement de P_i et Q_i en série de TAYLOR autour de la première approximation :

$$\left.\begin{aligned} P_i &= P_i^{(0)} + \left(\frac{\partial P_i}{\partial \delta_2}\right)^{(0)} \Delta\delta_2^{(0)} + \ldots + \left(\frac{\partial P_i}{\partial \delta_n}\right)^{(0)} \Delta\delta_n^{(0)} + \left(\frac{\partial P_i}{\partial |V_2|}\right)^{(0)} \Delta|V_2|^{(0)} + \ldots + \left(\frac{\partial P_i}{\partial |V_n|}\right)^{(0)} \Delta|V_2|^{(0)} \\ Q_i &= Q_i^{(0)} + \left(\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_2}\right)^{(0)} \Delta\delta_2^{(0)} + \ldots + \left(\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_n}\right)^{(0)} \Delta\delta_n^{(0)} + \left(\frac{\partial Q_i}{\partial |V_2|}\right)^{(0)} \Delta|V_2|^{(0)} + \ldots + \left(\frac{\partial Q_i}{\partial |V_n|}\right)^{(0)} \Delta|V_2|^{(0)} \end{aligned}\right\} \text{(I. 36)}$$

A partir de la relation de $\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}$

Avec

$$\left.\begin{aligned} \Delta P^{(0)}_i &= P_i - P_i^{(0)} \\ \Delta Q^{(0)}_i &= Q_i - Q_i^{(0)} \end{aligned}\right) \qquad \text{(I. 37)}$$

Les deux systèmes d'équation (I.36)et (I.37)donnent

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2^{(0)} \\ \vdots \\ \Delta P_n^{(0)} \\ \Delta Q_2^{(0)} \\ \vdots \\ \Delta Q_n^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{\Delta P_2}{\partial \delta_2}\right)^{(0)} & \cdots & \left(\frac{\Delta P_2}{\partial \delta_n}\right)^{(0)} & \left(\frac{\Delta P_2}{\partial |V_2|}\right)^{(0)} & \cdots & \left(\frac{\Delta P_2}{\partial |V_n|}\right)^{(0)} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{\Delta P_n}{\partial \delta_2}\right)^{(0)} & \cdots & \left(\frac{\Delta P_n}{\partial \delta_n}\right)^{(0)} & \left(\frac{\Delta P_n}{\partial |V_2|}\right)^{(0)} & \cdots & \left(\frac{\Delta P_n}{\partial |V_n|}\right)^{(0)} \\ \left(\frac{\Delta Q_2}{\partial \delta_2}\right)^{(0)} & \cdots & \left(\frac{\Delta Q_2}{\partial \delta_n}\right)^{(0)} & \left(\frac{\Delta Q_2}{\partial |V_2|}\right)^{(0)} & \cdots & \left(\frac{\Delta Q_2}{\partial |V_n|}\right)^{(0)} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{\Delta Q_n}{\partial \delta_2}\right)^{(0)} & \cdots & \left(\frac{\Delta Q_n}{\partial \delta_n}\right)^{(0)} & \left(\frac{\Delta Q_n}{\partial |V_2|}\right)^{(0)} & \cdots & \left(\frac{\Delta Q_n}{\partial |V_n|}\right)^{(0)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2^{(0)} \\ \vdots \\ \Delta \delta_n^{(0)} \\ \Delta V_2^{(0)} \\ \vdots \\ \Delta V_n^{(0)} \end{bmatrix} \qquad \text{(I. 38)}$$

Donc on peut écrire le système comme suit :

$$\begin{bmatrix} \Delta P^{(0)} \\ \Delta Q^{(0)} \end{bmatrix} = \left[J^{(0)}\right] \begin{bmatrix} \Delta \delta^{(0)} \\ \Delta |V|^{(0)} \end{bmatrix} \quad \text{(I. 39)}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta^{(0)} \\ \Delta |V|^{(0)} \end{bmatrix} = \left[J^{(0)}\right]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P^{(0)} \\ \Delta Q^{(0)} \end{bmatrix} \quad \text{(I. 40)}$$

On rappelle que

$$\Delta \delta^{(k)} = \delta_i^{(k+1)} - \delta_i^{(k)} \quad \text{(I. 41)}$$

$$\Delta |V_i|^{(k)} = |V_i|^{(k+1)} - |V_i|^{(k)} \quad \text{(I. 42)}$$

L'adaptation (I.40) avec (I.42) donne :

$$\begin{bmatrix} \delta_i^{(k+1)} \\ |V|^{(k+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta^{(k)} \\ |V|^{(k)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad \text{(I. 43)}$$

$$\begin{bmatrix} \delta_i^{(k+1)} \\ |V|^{(k+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta^{(k)} \\ |V|^{(k)} \end{bmatrix} + \left[J^{(k)}\right]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P^{(k)} \\ \Delta Q^{(k)} \end{bmatrix} \quad \text{(I. 44)}$$

En remplacent l'expression de l'équation (I.40) dans l'équation ci-dessus on aura :

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = [J] \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad \text{(I. 45)}$$

$$J = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \quad \text{(I. 46)}$$

Avec J_1,J_2, J_3 et J_4 : sont les sous-matrices de Jacobéenne

Détermination des sous-matrices de Jacobienne J_i

A partir du système (I.35), on peut déterminer les éléments de J.

Sous matrice J_1 **:**

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = -|Y_{im}||V_i||V_m|\sin(\delta_m - \delta_i + \theta_{im}), \quad i \neq m \qquad \text{(I. 47)}$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = \sum_{\substack{m=1 \\ i \neq m}}^{n} |Y_{im}||V_i||V_m|\sin(\delta_m - \delta_i + \theta_{im}), \quad i = m \qquad \text{(I. 48)}$$

Sous matrice J_2 **:**

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = |Y_{im}||V_m|\cos(\delta_m - \delta_i + \theta_{im}), \quad i \neq m \qquad \text{(I. 49)}$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = 2|Y_{im}||V_m|\cos(\theta_{im}) + \sum_{\substack{m=1 \\ i \neq m}}^{n} |Y_{im}||V_m|\cos(\delta_m - \delta_i + \theta_{im}), \quad i = m \qquad \text{(I. 50)}$$

Sous matrice J_3**:**

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = -|Y_{im}||V_m||V_i|\cos(\delta_m - \delta_i + \theta_{im}), \quad i \neq m \qquad \text{(I. 51)}$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = \sum_{\substack{m=1 \\ i \neq m}}^{n} |Y_{im}||V_m||V_i|\cos(\delta_m - \delta_i + \theta_{im}), \quad i = m \qquad \text{(I. 52)}$$

Sous matrice J_4**:**

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = -|V_{im}||V_m|\sin(\delta_m - \delta_i + \theta_{im}), \quad i \neq m \qquad \text{(I. 53)}$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = -\sum_{\substack{m=1 \\ i \neq m}}^{n} |Y_{im}||V_m|\sin(\delta_m - \delta_i + \theta_{im}) - 2|Y_{im}||V_i|\sin(\theta_{im}), \quad i = m \qquad \text{(I. 54)}$$

Les étapes de calcul

I. *A partir des données du système, on prend la matrice d'admittance bus Ybuc.*

II. *On estime les valeurs initiales V(0) et ð(0)pour les nœuds de charge et ð(0) pour les nœuds de contrôle.*

III. *On calcule Pi, Qi qui nous donne AP, AQ.*

IV. *Formation de la matrice Jacobienne J.*

V. *On trouve l'inverse de Jacobienne.*

VI. *On calcule :*

$$\begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta|V| \end{bmatrix} = [J]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \qquad \text{(I. 55)}$$

On obtient :

$$\delta_i^{(K+1)} = \delta_i^{(K)} + \Delta\delta_i^{(K)} \qquad \text{(I. 56)}$$

$$\left|V_i^{(K+1)}\right| = \left|V_i^{(K)}\right| + \left|\Delta V_i^{(K)}\right| \qquad \text{(I. 57)}$$

VII. *Le processus se répète jusqu'à ce que la tolérance suivante se vérifie.*

$$max\left|\Delta P_i^K\right| \leq \varepsilon \qquad \text{(I. 58)}$$

$$max\left|\Delta Q_i^K\right| \leq \varepsilon \qquad \text{(I. 59)}$$

On prend les résultats obtenus.

I.4.4.4.Méthode de Découplée Rapide

En observant la valeur numérique des éléments du Jacobienne utilisé dans plusieurs systèmes, on découvre que les éléments de J_1et J_4sont invariablement beaucoup plus grands que ceux de J_2 et J_3. Et, en se basant sur les découplés (P ð) et (Q V), on peut supposer queJ_2 et J_3à partir de cela, on peut avoir deux systèmes d'équations linéaires indépendantes pour chaque itération.

On calcule les éléments du Jacobien J_2:

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_m|} = |V_i||Y_{im}|\cos(\delta_m - \delta_i + \theta_{im})$$

$$\theta_{im} \approx 90^\circ \qquad \delta_i \approx \delta_m \qquad \text{(I. 60)}$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_m|} = |V_i||Y_{im}|\cos(90^\circ) = 0$$

On calcule les éléments du Jacobien J_3 :

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_m} = -|V_i||V_m||Y_{im}|\cos(\delta_m - \delta_i + \theta_{im})$$

$$\theta_{im} \approx 90^\circ \;\; \delta_i \approx \delta_m \qquad \text{(I. 61)}$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_m} = -|V_i||V_m||Y_{im}|\cos(90^\circ) = 0$$

Par conséquent, les sous matrices du JacobineJ_2 etJ_3 sontnules.et l'équation (I.45) s'écrit :

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & 0 \\ 0 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} \Delta P = J_1 \Delta \delta = \dfrac{\partial P}{\partial \delta} \Delta \delta \\ \Delta Q = J_4 \Delta |V| = \left[\dfrac{\partial P}{\partial |V|} \right] \Delta |V| \end{cases} \qquad \text{(I. 62)}$$

Il nous reste à calcule les éléments du Jacobien J_1 et J_4.

Calcul du Jacoubien J_1

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = ?$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = \sum_{\substack{m=1 \\ i \neq m}}^{n} |V_i||V_m||Y_{im}| \sin(\delta_m - \delta_i + \theta_{im})$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = -|V_i|^2 |Y_{im}| \sin(\theta_{im}) - Q_i \text{ avec } Q_i = \sum_{m=1}^{n} |V_i||V_m||Y_{im}| \sin(\delta_m - \delta_i + \theta_{im}) \quad \text{(I. 63)}$$

$$B_{ii} = |Y_{ii}| \cdot \sin(\theta_{ii}) \; B_{ii} \rangle\rangle Q_i \; \frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = -|V_i|^2 \cdot B_{ii}$$

$$|V_i|^2 \approx |V_i| = \rangle \; \frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = -|V_i| \cdot B_{ii}$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_m} = ?$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_1} = -|V_i||V_m||Y_{im}| \sin(\delta_m - \delta_i + \theta_{im})$$

$$\delta_m - \delta_i \approx 0$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_m} = -|V_i||V_m||Y_{im}| \sin(\theta_{im}) \quad \text{(I. 64)}$$

$$B_{im} = |Y_{im}| \cdot \sin(\theta_{im})$$

$$|V_m \approx 1|$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_m} = -|V_m| \cdot B_{im}$$

Calcule les éléments du Jacobien J_4 :

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = -|V_i||Y_{im}|\sin(\theta_{im}) + \sum_{\substack{m=1 \\ i\neq m}}^{n} |V_m||Y_{im}|\sin(\delta_m - \delta_i + \theta_{im})$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = -|V_i||Y_{im}|\sin(\theta_{im}) + Q_i \qquad \text{(I. 65)}$$

$$B_{ii} = |Y_{ii}| \cdot \sin(\theta_{ii}) \quad B_{ii} \rangle\rangle Q_i \quad \frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = -|V_i|^2 \cdot B_{ii}$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = -|V_i| \cdot B_{ii}$$

$$\delta_m - \delta_i + \delta_{im} \approx 0$$
$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_m} = -|V_m| \cdot B_{im} \qquad \text{(I. 66)}$$

Les équations de changement de puissance individuel dans J_1 et J_4 sont :

$$\Delta P = \sum_{m=1}^{n} -|V| \cdot B_{im} \cdot \Delta\delta_i \quad \Rightarrow \quad \frac{\Delta P}{|V_i|} = \sum_{m=1}^{n} -B_{im} \cdot \Delta\delta_i$$

$$\Delta Q = \sum_{m=1}^{n} -|V| \cdot B_{im} \cdot \Delta|V_i| \quad \Rightarrow \quad \frac{\Delta Q}{|V_i|} = \sum_{m=1}^{n} -B_{im} \cdot \Delta|V_i| \qquad \text{(I. 67)}$$

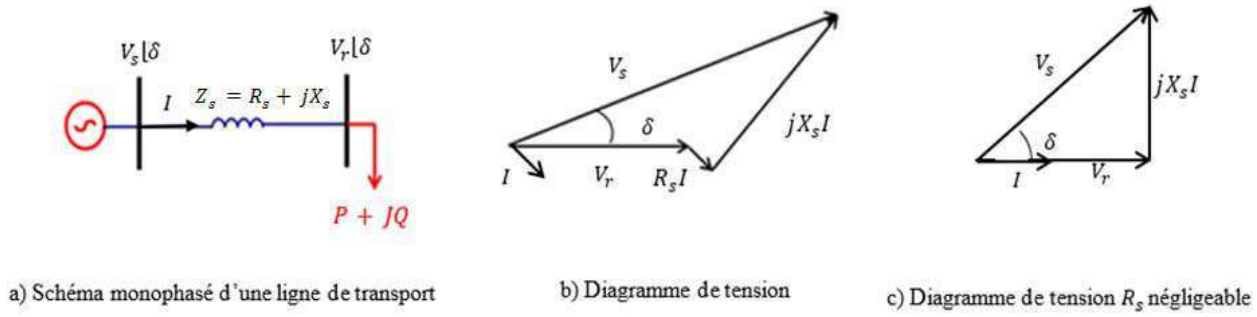
$$\frac{\Delta P}{|V_i|} = -[B]' \Delta\delta \qquad \Rightarrow \Delta\delta = -[B']^{-1} \frac{\Delta P}{|V_i|}$$

$$\frac{\Delta Q}{|V_i|} = -[B]'' \Delta|V| \qquad \Rightarrow \Delta|V| = -[B'']^{-1} \frac{\Delta Q}{|V_i|}$$

I.5.Puissance transmise par une ligne et intérêt de la compensation de la puissance réactive

Le transport de puissance réactive par les lignes sur de longues distances provoque des chutes de tension et des pertes. Par conséquent, il faut éviter ces transits par la production de la puissance réactive, autant que possible, à l'endroit où elle est consommée.

Considérant la figure I.6 qui représente une ligne électrique alimentant une charge(P + jQ). En admettant que la résistance de la ligne est très faible par rapport sa réactance, l'impédance $Z_c$peut s'écrire: $Z_c = jX_c$.



a) Schéma monophasé d'une ligne de transport b) Diagramme de tension c) Diagramme de tension R_s négligeable

Figure I. 6: *Ligne électrique alimentant une charge*

En prenant la tension aux bornes de la charge comme référence des phases (figure I.6(b)) et en négligeant la résistance R_c, le courant sera en phase avec V_r(figure I.6 (c)). La puissance demandée par la charge sera donnée par les équations qui suivent :

$$S_t = P + jQ = V_r I_r^* \quad avec \quad I_r = \frac{V_s - V_r}{Z_s} \qquad (I.\ 68)$$

$$P = \frac{V_s V_r}{X_s} \sin\delta \qquad (I.\ 69)$$

$$Q = \frac{V_s V_r}{X_s} \cos\delta - \frac{V_r^2}{X_s} \qquad (I.\ 70)$$

D'après le diagramme de la (figure I.6 (c)), la tension au jeu de barres côté charge est donnée par :

$$V_r = V_s \cos\delta \qquad (I.\ 71)$$

En remplaçant cette expression dans l'équation (1.69) en aura :

$$P = \frac{V_s^2}{X_s} \sin\delta \cdot \cos\delta = \frac{V_s^2}{2X_s} \sin 2\delta \qquad (I.\ 72)$$

D'après cette équation, on ne peut transporter qu'une puissance maximale pour un angle ð = 45°égale à :

$$P_{max} = \frac{V_s^2}{2X_s} \qquad \text{(I. 73)}$$

Maintenant, si des précautions ont été prises pour maintenir la tension V_r égale à V_c, la puissance maximale qu'on peut transmettre à la charge dans ce cas sera doublée :

$$P_{max} = \frac{V_s^2}{X_s} \qquad \text{(I. 74)}$$

I.6.Moyens de compensation de la puissance réactive

I.6.1.Compensateur synchrone

Les compensateurs synchrones sont des machines tournantes qui ne fournissent aucune puissance active, mais qui peuvent suivant qu'elles soient sous ou surexcités, fournir ou absorber de la puissance réactive [6].

I.6.2.Condensateurs

Ils ont pour rôle de fournir une partie de l'énergie réactive consommée par les charges dans le réseau. On distingue deux types [6] :

- *Des batteries de condensateurs HT, raccordées aux jeux de barres HT des postes THT/HT. Elles sont essentiellement destinées à compenser les pertes réactives sur les réseaux HT et THT.*
- *Des batteries de condensateurs MT, raccordées aux jeux de barres MT des postes HT/MT ou THT/MT. Ces batteries servent à compenser l'appel global de l'énergie réactive des réseaux de distribution aux réseaux de transport. Elles sont localisées et dimensionnées individuellement en fonction du réglage de tension.*

I.6.3.Inductances

Elles sont utilisées pour compenser l'énergie réactive fournie en heures creuses par les lignes à très haute tension ou par les câbles. Elles sont soit directement raccordées au réseau, soit branchées sur les tertiaires des transformateurs. Par conséquent, elles permettent une limitation des surtensions dans le réseau [9].

I.6.4.Compensateurs statiques

Ils sont constitués par l'ensemble de condensateurs et d'inductances commandées par thyristors, montés en tête-bêche dans chaque phase. La puissance réactive absorbée par l'inductance varie en contrôlant la valeur efficace du courant qui la traverse par action sur l'angle d'amorçage des thyristors [6].

I.7.Conclusion

Dans ce chapitre, Nous avons vu l'objectif de l'analyse de l'écoulement de puissance ainsi que les méthodes de résolution de ce problème puis on a vu l'importance de la compensation de puissance réactive ainsi que leurs dispositifs.

Chapitre II

Les systèmes Facts

II.7. le system Facts

II.7.1.Définition et rôle d'un dispositif FACTS

*Le concept FACTS « **Flexible Alternative Currents Transmission System** » est un terme générique qui caractérise l'ensemble des équipements mettant en jeu de l'électronique de puissance (diodes, thyristors, GTO, IGBT…). [Différents paramètres du réseau électrique tension, impédance, la phase du réseau etc. …]*

La technologie de ces systèmes (interrupteur statique) leur assure une vitesse supérieure à celle des systèmes électromécaniques classiques. De plus, ils peuvent contrôler le transit de puissance dans les réseaux et augmenter la capacité efficace de transport tout en maintenant voir en améliorant, la stabilité des réseaux. Les systems FACTS peuvent être classes en trios categories [8] :

- ✓ *Les compensateurs parallèles*
- ✓ *Les compensateurs série*
- ✓ *Les compensateurs hybrides (série -parallèle)*

II.7.2.Type des dispositifs FACTS

En général, les FACTS sont devisés en trois grandes catégories principales :

II.7.2.1Compensateurs parallèles (shunt)

Ces équipements ont fait leur apparition vers la fin des années 60. Ils sont constitués essentiellement d'une inductance en série avec un gradateur. Le retard à l'amorçage des thyristors permet de régler l'énergie réactive absorbée par le dispositif. En effet, tous les compensateurs parallèles injectent du courant au réseau via le point de raccordement [9].

Considérant un réseau électrique de transmission avec un compensateur idéal connecté au point milieu de la ligne de transmission représenté sur la figure I.7.

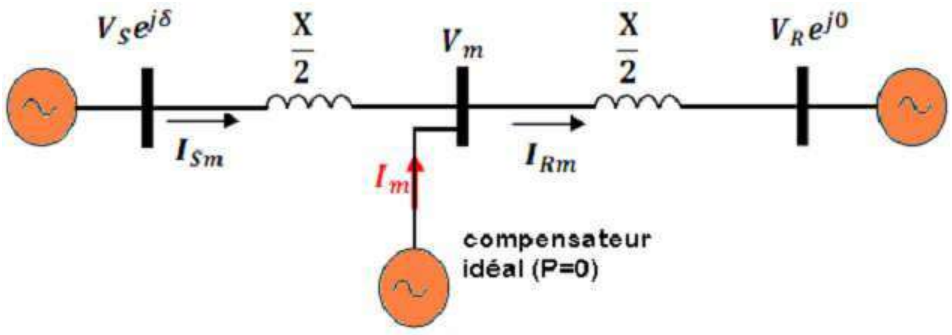


Figure II. 7: *Compensateur shunt dans un réseau de transmission*

Ce compensateur est représenté par une source de tension alternative en phase avec la tension V_m du point milieu de la ligne ; le compensateur échange uniquement la puissance réactive avec le réseau.
Le compensateur partage la ligne de transmission en deux parties : la première partie est caractérisée par une impédance (X/2) qui transporte la puissance à partir de la source V_c au point milieu alors que, la deuxième partie est caractérisée par autre impédance (X/2) qui transfert cette puissance du point milieu au récepteur [7].

Les relations entre les tensions V_o, $V_r$et V_m ainsi que les courants I_{cm} et I_{rm} sont données par les équations suivantes.[9]

$$V_m(t) = V_r + j\frac{X}{2} I_{rm} \qquad \text{(I. 75)}$$

$$V_m(t) = V_s + j\frac{X}{2} I_{sm} \qquad \text{(I. 76)}$$

Donc

$$I_m = I_{rm} - I_{sm} \qquad \text{(I. 77)}$$

Donc on peut représenter les équations précédentes par un diagramme de phase (figureI.8).

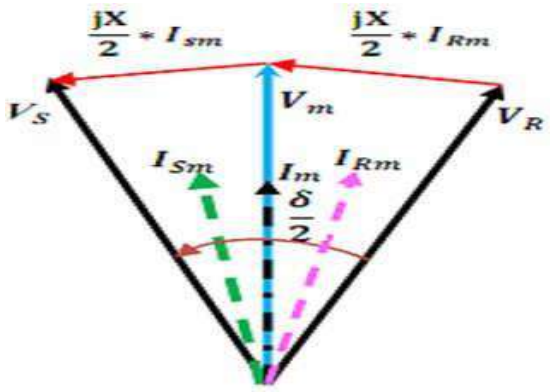


Figure II. 8: *Phases de tension et de compensateur shunt*

D'autre part les équations de puissance active et réactive dans une ligne de transmission sont données par les relations suivantes :

$$P_c(\delta) = \frac{V_s V_r}{X_s}\sin(\delta) \qquad \text{(I. 78)}$$

$$Q_c(\delta) = \frac{V_s V_r}{X_s}\cos(\delta) \qquad \text{(I. 79)}$$

Connexion l'emplacement l'implantation d'un compensateur shunt au point milieu d'une ligne de transmission conduit à une modification des puissances active et réactive. Dans ce cas, les puissances active et réactive compensées $P_c(ð)$ et $Q_c(ð)$ sont respectivement donné es par les relations suivantes:

$$P_c(\delta) = 2\frac{V_s V_r}{X_s}\sin(\frac{\delta}{2}) \qquad \text{(I.80)}$$

$$Q_c(\delta) = \left(\frac{V_r^2}{X_s} - \frac{V_s V_r}{X_s}\cos(\frac{\delta}{2})\right) \qquad \text{(I. 81)}$$

La variation de la puissance active et réactive en fonction de l'angle de charge δ comparée avec les puissances de la ligne non compensée est représentée par la figure I.9 [7].

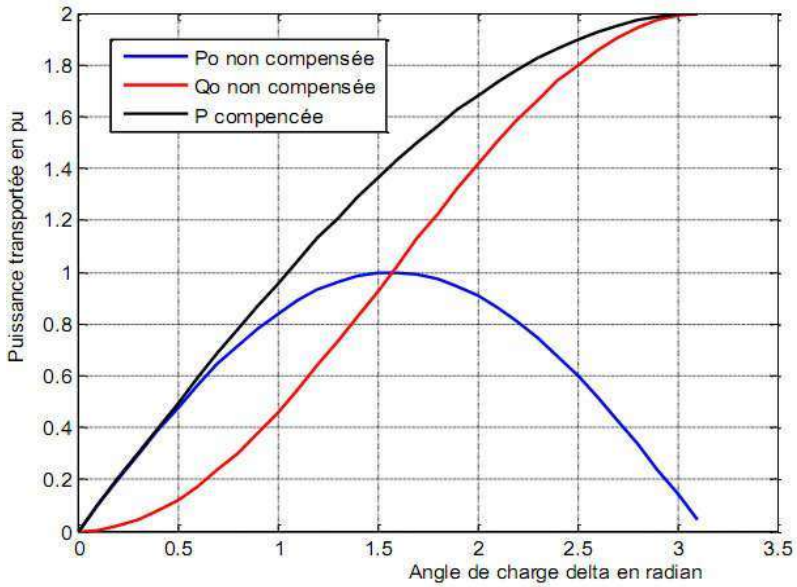


Figure II. 9: *Puissance active et réactive en fonction de δ [7]*

On constate à partir de la courbe que le compensateur shunt peut :

- *Augmenter la puissance active transmissible (deux fois plus grande que la puissance non compensée pour une valeur ð =n).*
- *Une augmentation très rapide de la puissance reactive transmissible.*

Ce type de compensateur est très utilisé pour le contrôle de tension lorsque la variation de la charge est lente. De plus le compensateur shunt placé au point milieu de la ligne de transmission donne des solutions aux problèmes de la stabilité [7].

II.7.2.2.Compensateur parallèle à base de thyristor

a. Compensateur statique de l'énergie réactive(SVC)

Le SVC (statice var compensateur) est la première génération FACTS qui a été introduite sur le marché il y a presque plus de vingt ans [8]. Il est constitué d'un banc de condensateurs commutés par thyristors (TSC thyristors switched capacitors) et d'un banc de bobines contrôlées par thyristors (TCR thyristor controlled reactors) comme indiqué par la figure I.10 [7].

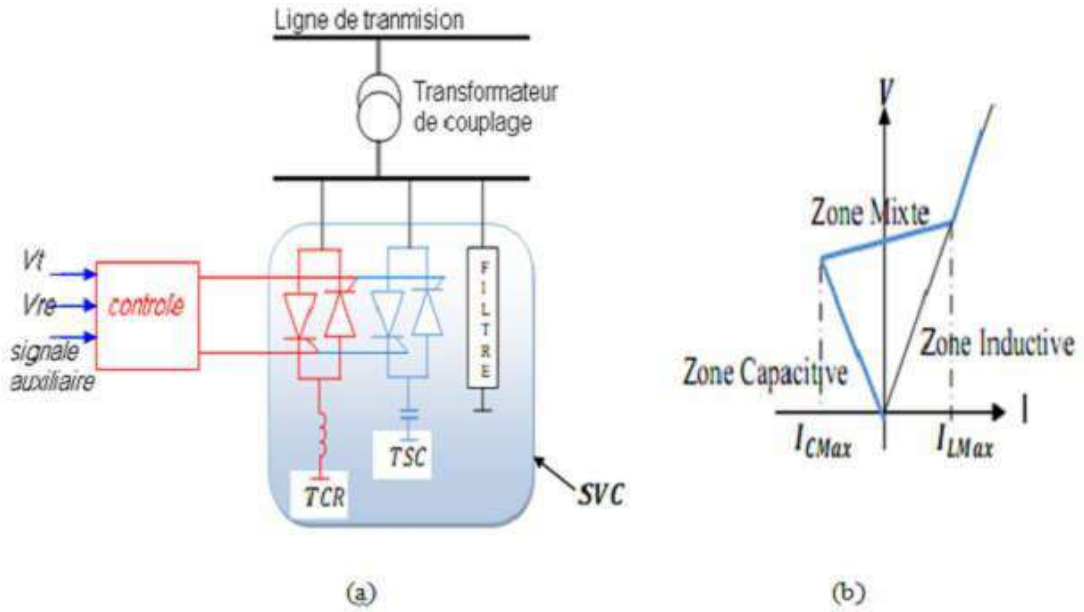


Figure II. 10:*(a) Schéma de base d'un SVC, (b) Caractéristique d'un SVC*

b.Compensateur parallèle à base de GTO thyristor (compensateur statique statcom)

Le STATCOM (Statice Compensateur) appelé aussi en anglais Advanced Statice Var Générateur ASVG, représente la deuxième génération de FACTS. Le STATCOM est un nouveau compensateur de puissance réactive qui surmonte les limitations techniques et le cout élevé du SVC [9]. Il se compose d'un onduleur triphasé à base de thyristor GTO et de diode en antiparallèle, couplé au réseau à travers un transformateur comme illustré par la figure II.11.

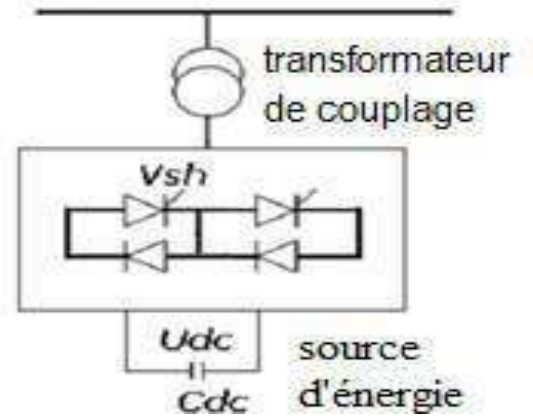


Figure II. 11: *Schéma unifilaire du STATCOM*

II.7.2.3.Compensateurs série

Ces compensateurs sont connectés en série avec le réseau et peuvent être utilisés comme une impédance variable (inductive, capacitive) ou une source de tension variable. En générale, l'objective principale de ces compensateurs est de modifier l'impédance des lignes de transport (modifier le flux de puissance active pour un angle de phase fixe, de même que la puissance réactive) en insérant des éléments en série avec celles-ci, pour annuler une partie de la réactance actuelle (X_{eff}) et de cette façon réduire l'impédance effective de la ligne [11].

La figure I.13, montre un réseau simple de transmission à courant alternatif avec un compensateur série connecté en série avec les conducteurs de la ligne de transmissions.

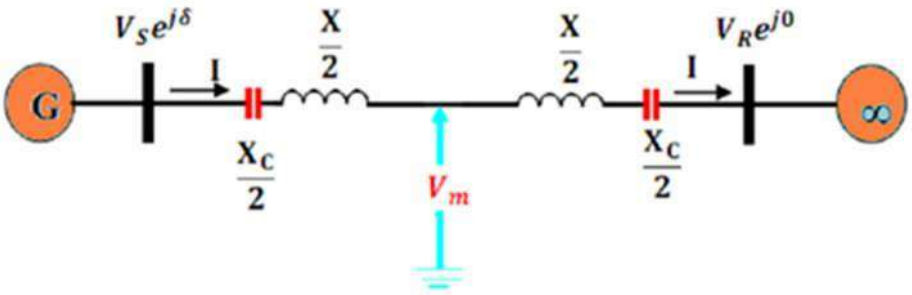


Figure II. 12: *Compensateur série dans un réseau de transmission*

La réactance effective et donnée par la relation suivante :

$$X_{effe} = X - X_c \qquad \text{(I. 82)}$$

On pose que K = X_c /X (coefficient de compensation série) tel que :0<K ≤ 1

d'où

$$X_{effe} = X \cdot (1 - K) \qquad \text{(I. 83)}$$

Si K=1 ⟹ $X_{effe}=0$

Si K=1/2 ⟹ $X_{effe}=X/2$

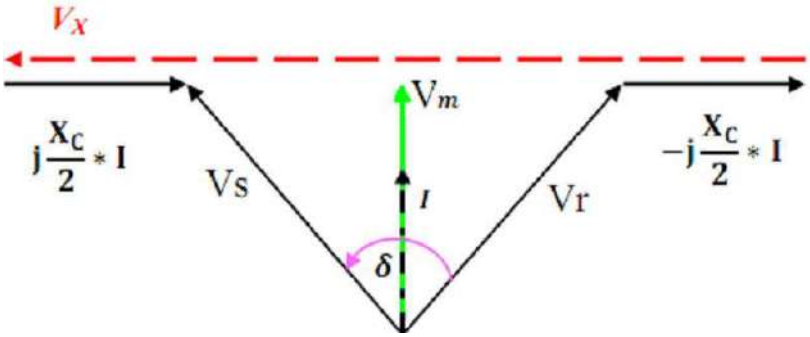


Figure II. 13: *Diagramme de phase de la tension et courant du compensateur série.*

La puissance active et réactive transmises sur les lignes de transport d'énergie électrique sont données par les relations suivantes :

$$P_c(\delta, K) = \frac{V_s V_r}{X(1-K)} \sin(\delta) \qquad \text{(I. 84)}$$

$$Q_c(\delta, K) = \left(\frac{V_r^2}{X(1-K)} - \frac{V_s V_r}{X(1-K)} \cos\left(\frac{\delta}{2}\right) \right) \qquad \text{(I. 85)}$$

Les variations des puissances active et réactive en fonction du coefficient de compensation K sont illustrées sur la figure I.15.

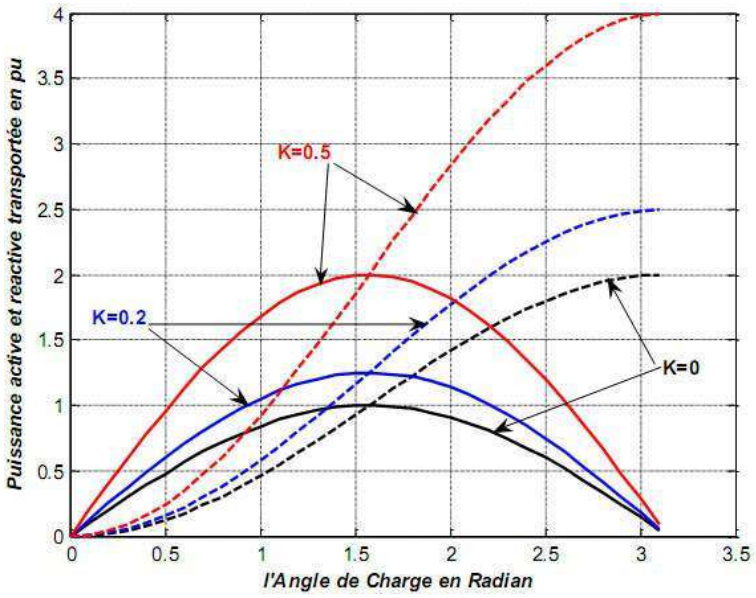


Figure II. 14: *Puissance active et réactive transportées par une ligne en fonction de ð et K*

On constate que, le compensateur série, permet de contrôler le transit des puissances actives et réactives, en agissant sur le coefficient de compensation« K ».

Pour K = 1/2, la puissance active transmise peut prendre le double de sa valeursans compensateur avec un angle de phase ð = n/2 tel que (P_c= 2 P_0). Dans les mêmes conditions, la puissance réactive est de quatre fois la valeur de la puissance réactive non compenséeQ_c= 4Q_0.

II.7.2.3. 1.Compensateur série à base de thyristors

Deux conceptions principales de compensateurs séries à thyristors peuvent être distinguées :

- ✓ *Le condensateur série commandé par thyristors (TCSC);*
- ✓ *Le compensateur série contrôle par thyristors (TCSR);*

a. Condensateur série commandé par thyristor(TCSC)

Un condensateur série commandé par thyristors TCSC (Thyristor Controlled Séries Capacitor), est la première génération FACTS qui possède la possibilité de contrôler l'impédance de la ligne. Il est composé d'une inductance en série avec un gradateur à thyristors, le tout en parallèle avec un condensateur [12].

Généralement, ce dispositif possède un élément de protection contre les surtensions placé en parallèle avec ce dernier, appelé MOV (Métal Oxide Varistor) [10] comme l'indique la figure I.16. Du point de vue fonctionnement, le TCSC se comporte comme une réactance variable connectée en série avec la ligne de transmission.

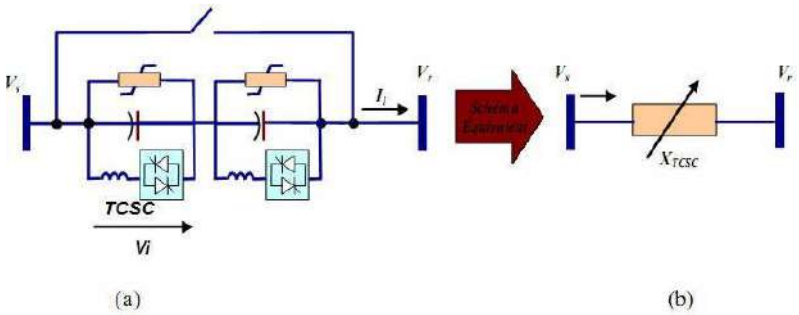


Figure II. 15:*(a) Structure d'un TCSC, (b) Schéma équivalent*

b. Compensateur série contrôlé par thyristor(TCSR)

Le TCSR (thyristor controlled séries Reactor) est un compensateur inductif qui se compose d'une inductance en parallèle avec une autre inductance commandée par thyristor comme indiqué sur la figure I-17, afin de fournir une réactance inductive série variable.

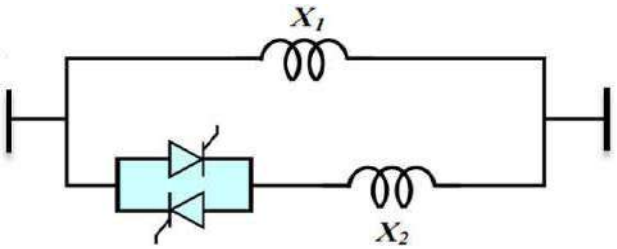


Figure II. 16: *Schéma de principe de TCSR*

II.7.2.3.2.Compensateur série à base de GTO thyristor

a. Compensateur statique synchrone série(SSSC)

Ce type de compensateur série (SSSC : Statice Synchrones Série Compensateur) est le plus important dispositif de cette famille. Il est constitué d'un onduleur triphasé couplé en série avec la ligne électrique à l'aide d'un transformateur comme le montre la figureI-18.

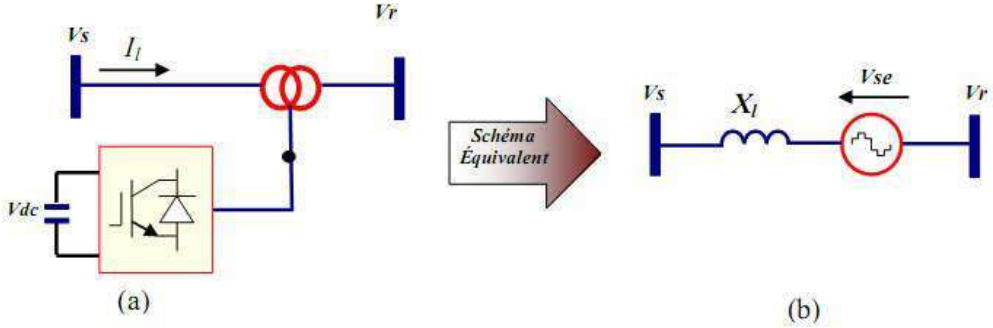


Figure II. 17:*(a) Structure d'un SSSC, (b) Schéma équivalent d'un SSSC*

Le rôle de ce compensateur est d'introduire une tension triphasée, à la fréquence du réseau, en série avec la ligne de transport. Cette tension est en quadrature avec le courant de ligne. Cette dernière est injectée pour l'augmentation ou la diminution de la tension qui traverse l'impédance inductive de la ligne et par conséquent le courant fondamental ainsi que la puissance transitée [7].

- *Si l'injection de la tension s'effectue avec un angle de 90° en arrière par rapport au courant de la ligne, on obtient une compensation série qu'est équivalente à un condensateur série à la fréquence fondamentale.*
- *Si par contre, la tension injectée est en avance de 90° par rapport au courant, la compensation a le même effet que celui d'augmenter l'impédance réactive de laligne.*

II.7.2.4.Compensateurs hybrides ou combinés série-parallèle

Cette famille de compensateurs est la combinaison des autres groupes. Ils permettent un contrôle multi variables, ils servent à contrôler le flux de puissance active et réactive, la tension et l'angle de transport de l'énergie. On d'écrira ci-après les principaux types de ce compensateur.

a. SPS (Static Phase Shifter)

Le déphaseur statique est un transformateur déphaseur à base de thyristors, ce dispositif a été conçu pour remplacer les anciens transformateurs déphaseurs commandés mécaniquement. Il est constitué de deux transformateurs l'un branché en série avec la ligne et l'autre en parallèle, la figure I.19 donne un schéma de principe de ce dispositif et son schéma équivalent [14].

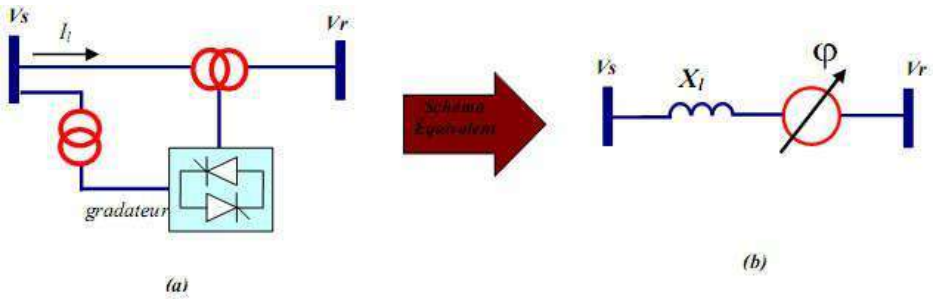


Figure II. 18:*(a) structure du SPS (b) schéma équivalent du SPS*

Cet équipement permet aussi un contrôle rapide du flux de la puissance active. La variable de contrôle de ce dispositif est l'angle de phase de la tension injectée "8".La puissance active qui transite dans cette ligne à travers le SPS est donnée par la formule suivante :

$$P_{sr}^{reg} = \frac{|V_r||V_s|}{X_l}\sin(\delta_s - \delta_r - \theta) \qquad \text{(I. 86)}$$

Un ajustement approprié de l'angle de phase θ permet un contrôle précis du flux de puissance active à travers le SPS.

b. UPFC (unified power flow controller)

L'UPFC est composé de deux convertisseurs de tension (onduleur) qui partagent le même condensateur dans leurs côtés continus et possédant un système de commande unifié, la figure II.20 donne son schéma de principe et son schéma équivalent [13].

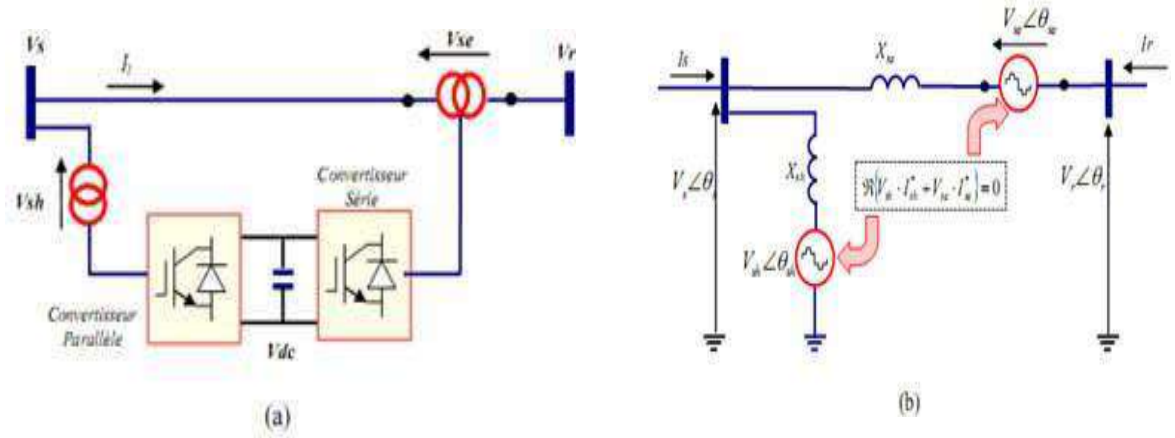


***Figure II. 19:*(a)** *Schéma représentatif d'un UPFC,* **(b)** *Schéma équivalent de l'UPFC*

Ce compensateur est de pouvoir contrôler simultanément la puissance active, la puissance réactive et les tensions peuvent extrémités de la ligne. Ces possibilités sont acquises par l'échange d'énergie entre les deux convertisseurs : la puissance active demandée par le convertisseur série est tirée du réseau par le convertisseur shunt à travers la partie continue DC pour l'acheminer au jeu de barres "R". La tension de sortie du convertisseur série V_{se} est ajoutée à la tension du jeu de barre de départ "S" pour soutenir la tension du jeu de barre "R" de ce fait l'amplitude de la tension injectée V_{ch}permet une régulation de la tension et la phase $ð_{ch}$[15].

II.7.2.5.Application des dispositifs FACTS dans les réseaux électriques

Possibilités du contrôle grâce à l'application des dispositifs FACTS dans les réseaux électriques sont résumées dans la figure II.21.

L'équation de la figure I.21, définit la puissance transmise entre les deux systèmes.

- *$V_c$et $V_r$sont les tensions aux extrémités de la ligne*
- *X représente l'impédance série de la ligne,*
- *$(ð_1 – ð_2)$ est l'angle de phase entre les deux systèmes.*

Il est clair que les trois paramètres tension, impédance, et angle de phase influencent la puissance Transmise entre les deux systèmes. Comme il est illustré sur la figure II.21.

Chaque dispositif FACTS peut influencer un des trois paramètres, et par conséquence le contrôle de l'écoulement de puissance.

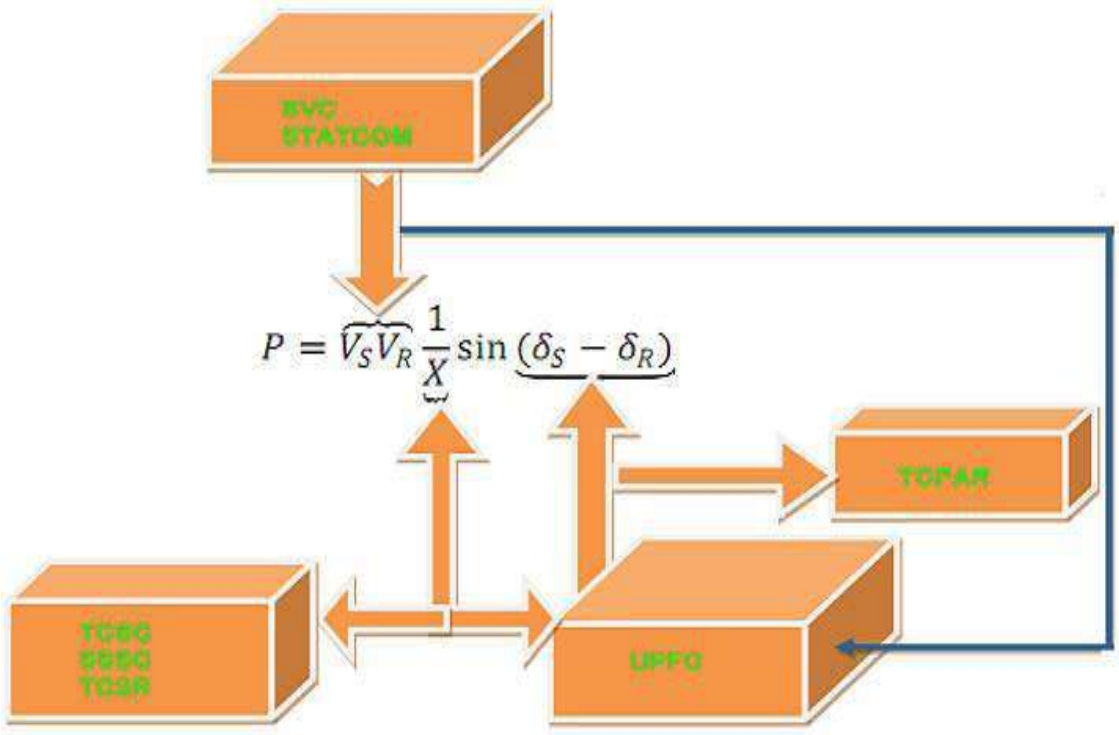


Figure II. 20: *Diagramme schématique pour l'application des FACTS*

II.8. Conclusion

Nous avons présenté a ce chapitre un aperçu global sur les nouveaux dispositifs de contrôle et de commande des réseaux électriques appelés FACTS comme le SVC, STATCOM, TCSC, SSSC, UPFC. Ces systèmes améliorent le transit de puissance dans les lignes et la stabilité du réseau. Grace à la grande rapidité de réaction des contrôler d'électronique constituants les FACTS, ces dernier sont caractérises par une grande fiabilité

Chapitre III

Insertion FACTS shunt « STATCOM » Dans un réseau électrique

III.1.Introduction

Au cours des dernières années il ya des FACTS à base de convertisseurs contrôleurs disponibles, ces faits ont beaucoup plus fortes capacités de contrôle de tension que celle de SVC; En outre, en outre Ceux-ci sauf les contrôleurs de shunt FACTS Ont des Capacités du Contrôle du flux de puissance. Dans la famille des FACTS à base de convertisseur contrôleurs, il y a des contrôleurs de la fonction seuls tel que le STATCOM, SSSC, et aussi FACTS à fonctions multiples et multi – convertisseurs contrôleurs tel que l'UPFC .

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à l'étude en régime permanent de l'écoulement de puissance d'un réseau standard IEEE 30 nœuds équilibré en se basant sur la méthode numérique itérative à de Newton-Raphson.

Nous allons procéder à l'implantation des dispositifs ***FACTS*** *dans un réseau électrique et voir leurs influences sur l'amélioration du profil de tension et sur le transit de puissance. Le réseau IEEE à 30 nœuds a été utilisé pour valider l'efficacité du modèle du* ***STATCOM*** *intégré dans le programme standard de Newton-Raphson.*

III.2. Etude de l'écoulement de puissance en présence du STATCOM

UN STATCOM est utilisé pour contrôler la tension de transmission par compensation du puissance réactive habituellement. Typiquement, un STATCOM consiste en un transformateur du couplage, un invertir et un condensateur DC qui sont montrés dans Fig. (III.1). Pour un tel arrangement, dans analyse de l'état stable idéale, il peut être supposé que l'échange du pouvoir actif entre le système AC et le STATCOM peut être négligé, et seulement la puissance réactive peut être échangée entre eux. Le circuit équivalent d'un STATCOM st donné dans Fig. (III.2).

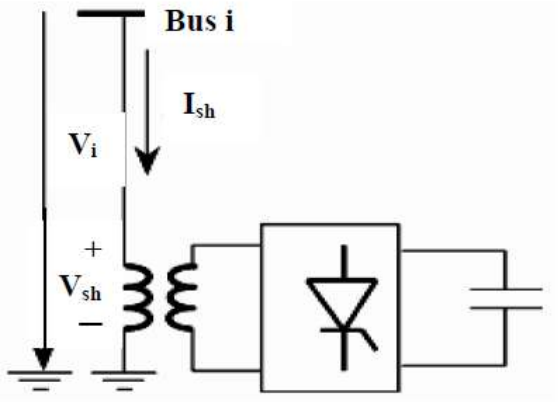


Figure.III.1*. le composants STATCOM*

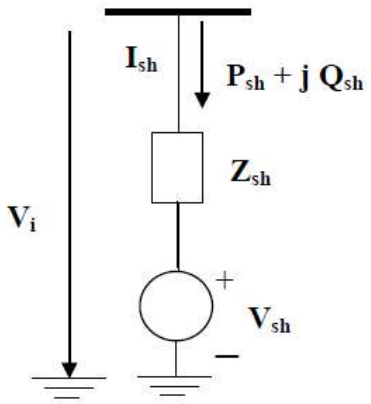


Figure.III.2*. Circuit équivalent STATCOM*

En principe, la tension du sortie de STATCOM peut être réglé tel que la puissance réactive du STATCOM peut être changé. D'après le circuit équivalent du STATCOM montré dans Fig. (III.2) les contraintes de l'écoulement de puissance du STATCOM sont

$$P_{sh} = V_i^2 g_{sh} - V_i V_{sh}(g_{sh}\cos(\theta_i - \theta_{sh}) + b_{sh}\cos(\theta_i - \theta_{sh})) \qquad \text{(III-1)}$$

$$P_{sh} = -V_i^2 b_{sh} - V_i V_{sh}(g_{sh}\sin(\theta_i - \theta_{sh}) - b_{sh}\sin(\theta_i - \theta_{sh})) \qquad \text{(III-2)}$$

Alors :gsh + j bsh = 1/Zsh .

Contrainte du fonctionnement du STATCOM–l'échange actif par la liaison DC est zéro, qui est décrit par

$$PE = Re\,(V_{sh}.I_{sh}^*) = 0 \qquad \text{(III-3)}$$

Ou $Re\,(V_{sh}.I_{sh}^*) = V_{sh}^2 g_{sh} - V_i V_{sh}(g_{sh}\cos(\theta_i - \theta_{sh}) - b_{sh}\sin(\theta_i - \theta_{sh}))$

Le contrôle du voltage du noeud comme suit, $V_i - V_i^{spec}$ *ou* V_i^{spec} *L'injection de tension équivalente et ses contraintes angle* θ_{sh} *de phase liés:*

$$V_{sh}^{min} \le V_{sh} \le V_{sh}^{max} \qquad \text{(III-4)}$$

$$-\pi \le \theta_{sh} \le \pi \qquad \text{(III-5)}$$

Où Vsh max est la tension nominale de la STATCOM, tandis que Vsh min est la limite de tension minimale du STATCOM.

III.2.1. Principe du fonctionnement

Un compensateur synchrone statique est constitué d'un convertisseur à source de tension, d'un transformateur de couplage et de la commande. Dans cette application, la source d'énergie CC peut être remplacée par un condensateur CC, de sorte que l'échange d'énergie en régime permanent Entre le compensateur statique et le système CA peut être uniquement réactif,. Iq (est le courant de sortie du convertisseur), perpendiculaire à la tension du convertisseur Vi(L'amplitude de la tension du convertisseur), et donc la sortie réactive du convertisseur, sont réglables

Il s'agit du STATCOM (Static Compensator) qui a connu jusqu'à présents différents appellations: ASVC (Advanced Static Var Compensator).

- *STATCON (Static Condenser).*
- *SVG (Static Var Generator).*
- *SVC light.*
- *SVC plus .*

Le principe de ce type de compensateur est connu depuis la fin des années 70, mais ce n'est que dans Les années 90 que ce type de compensateur a connu un essor important grâce aux développements des interrupteurs GTO de forte puissance.

***Le STATCOM** présente plusieurs avantages :*

- *Bonne réponse à faible tension : le STATCOM est capable de fournir son courant nominal, Même lorsque la tension est presque nulle.*
- *Bonne réponse dynamique : Le système répond instantanément.*

***Le STATCOM** peut être conçu pour agir également en tant que filtre active pour absorber les harmoniques du système. Les cellules de commutation sont bidirectionnelles, c'est -à –dire formés de GTO et de diodes en antiparallèle.*

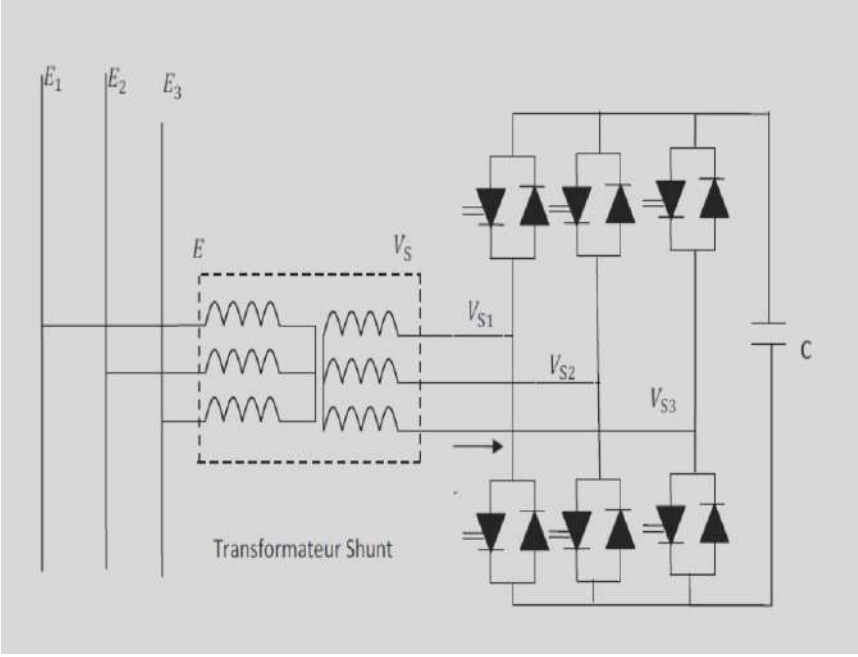


Figure III.3
Schéma de base du statcom

Le rôle de STATCOM est d'échanger d'énergie réactive avec le réseau. Pour ce faire, l'onduleur est couplé au réseau par l'intermédiaire d'une inductance triphasée, celui-ci est en général l'inductance de fuite du transformateur de couplage. L'échange d'énergie réactive se fait par le control de la tension de sortie de l'onduleur, laquelle est en phase avec la tension du réseau E. Le fonctionnement peut être décrit de façon suivante :

- *Si Vs<E , le courant circulant dans l'inductance est déphasé de* ***+ π2/2****par rapport à la tension E et le courant est capacitif (Figure 3.4).*
- *Si Vs>E , le courant circulant dans l'inductance est déphasé de* ***- π2/2****par rapport à la tension E et le courant est capacitif (Figure 3.5).*
- *Si Vs=E , le courant circulant dans l'inductance est nul, il n'y a pas d'échange d'énergie*



Figure III.4*: Diagramme vectoriel de STATCOM*

On considère dans ce fonctionnement que les tensions sont triphasées et équilibrée. Par ailleurs, l'amplitude de la tension de sortie Vs est proportionnelle à la tension continue auxbornes du condensateur D'avantage de ce dispositif est pouvoir échange de l'énergie avec un comportement inductif et capacitif uniquement à l'aide d'une inductance.

Contrairement au SVC, il n'y a pas d'élément capacitif qui peut entraîner des résonances avec les éléments inductifs. La caractéristique statique de ce convertisseur est donnée par la figure (2.6) ce dispositif à l'avantage de pouvoir fournir un courant constant important mêmelorsque la tension E diminue, contrairement au SVC [29].

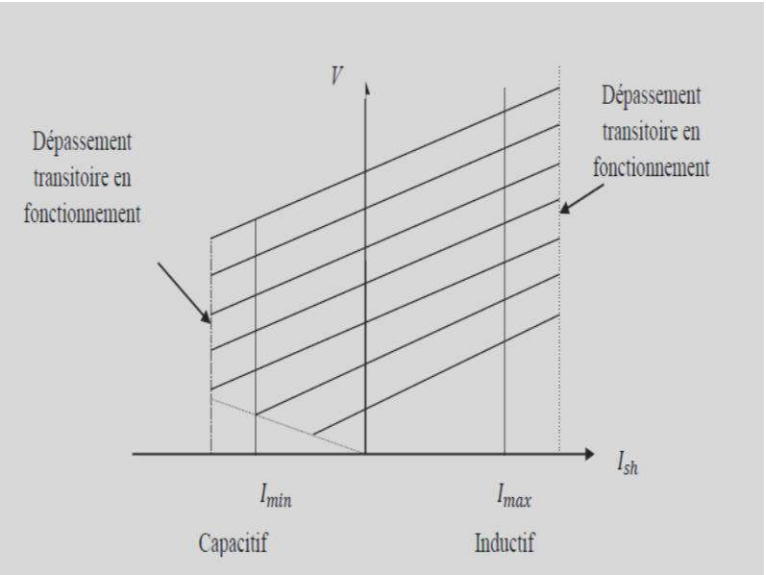


Figure III.5
Caractéristique du statcom

III.2.2. les avantage du STATCOM :

Le STATCOM présente plusieurs avantages [31], [32] à savoir :

- *L'étendue de la plage d'opération est plus large qu'un SVC classique.*
- *Les performances dynamiques sont plus élevées qu'avec un SVC classique.*
- *Bonne réponse à faible tension : le STATCOM est capable de fournir son courant nominal même lorsque la tension est presque nulle.*
- *Il ne présente pas d'élément capacitif qui puisse provoquer des résonances avec des éléments inductifs du réseau.*
- *Un contrôle optimal de la tension, les phases sont contrôlées séparément pendant les perturbations du système.*
- *Une flexibilité opérationnelle maximale est obtenue par la disponibilité de cabines ré localisables.*
- *Un design modulaire du convertisseur permet une adaptation pour une grande plage de puissance.*

III.2.3 Description générale :

Dans tous les réseaux de transport, il est nécessaire de maintenir la tension au différent des jeux de barres dans des limites acceptables. Les systèmes de transmission flexibles en courant alternatif (FACTS) sont des moyens de contrôle rapides et flexibles capables de faciliter le transit des puissances et d'améliorer la stabilité des réseaux électriques.

Le contrôleur dynamique shunt ***STATCOM*** *est un dispositif qui fournit une puissance réactive variable et régule la tension du jeu de barres où il est connecté [19]. Il est analogue à un compensateur synchrone.*

Ce dispositif est capable de fournir la puissance réactive même si la tension du jeu de barres de connexion est très faible. D'après sa caractéristique on constate que le courant maximal du STATCOM est indépendant de la tension du nœud [23].

III.3 Application de dispositifs Statcom dans les réseaux électriques

III.3.1 Application sur un réseau IEEE standard à 30 nœuds:

Cette étude nous permettra à partir des données topologiques du réseau (nœuds, lignes et impédances des lignes), des données des charges (puissance active et réactives) et des données des générateurs (puissance actives, tensions et limites en puissance réactives) d'avoir le module et la phase de la tension en chaque nœud, les pertes et les transits de puissance actives et réactives dans chaque ligne.

Deux cas a était testés pour calculer la répartition de charge dans le réseau à commencer par sans compensation énergie réactive, ensuite par la compensation. Ces différents cas seront testés par la méthode itérative de newton raphson sur un réseau IEEE standard à 30 nœuds Le réseau électrique étudié est un réseau standard IEEE équilibré à 30 nœuds présenté sur La ***figure III.7*** *Il est constitué de :*

- *6 nœuds générateurs (PV)*
- *26 nœuds de charge (PQ)*
- *Le nœud de référence où le module de sa tension est fixée à 1.06 p.net la phase de référence quant à elle est égale à 0°.*
- *40 lignes.*

Une description plus détaillée du réseau standard IEEE à 30 nœuds est illustrée en Annexe A.

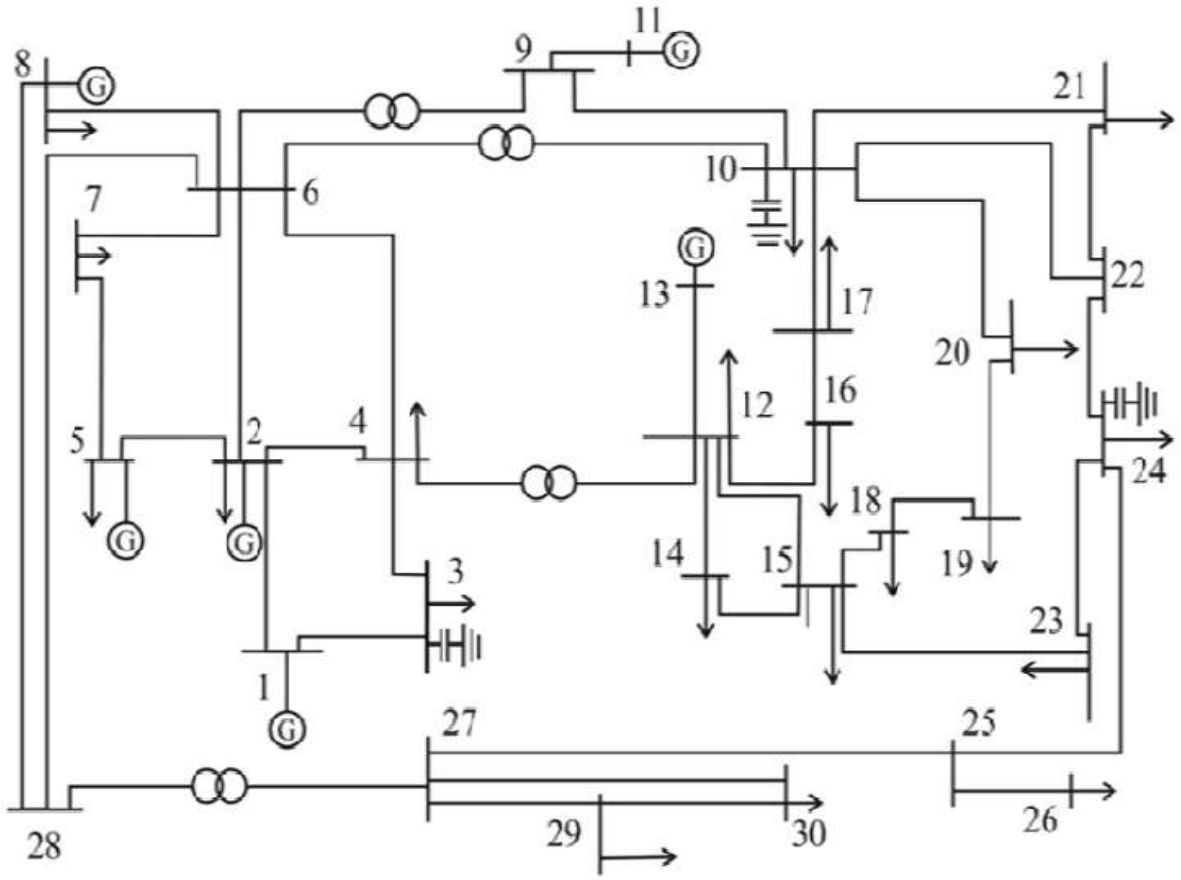


Figure III. 6 : *Schéma du réseau standard IEEE 30 nœuds.*

A. Tableau III. 1: *Résultats de la tension et l'angle d'un réseau IEEE à 30 nœuds obtenus par méthode de Newton-Raphson sans compensation*

Bus N°	Tension	
	Amplitude (pu)	Phase (degré)
1	1.0600	0.0000
2	1.0430	-5.3543
3	1.0196	-7.5308
4	1.0104	-9.2840
5	1.0100	-14.1738
6	1.0096	-11.0581
7	1.0020	-12.8649
8	1.0100	-11.8193
9	1.0392	-14.0644
10	1.0215	-15.6706
11	1.0820	-14.0644
12	1.0496	-15.1245
13	1.0710	-15.1245
14	1.0320	-16.0018
15	1.0251	-16.0084
16	1.0304	-15.6251
17	1.0188	-15.8687
18	1.0114	-16.6067
19	1.0066	-16.7658
20	1.0095	-16.5502
21	1.0082	-16.2178
22	1.0120	-15.9811
23	1.0085	-16.2294
24	0.9991	-16.3007
25	1.0032	-16.0720
26	0.9852	-16.5038
27	1.0145	-15.6559
28	1.0078	-11.7163
29	0.9944	-16.9077
30	0.9828	-17.8067

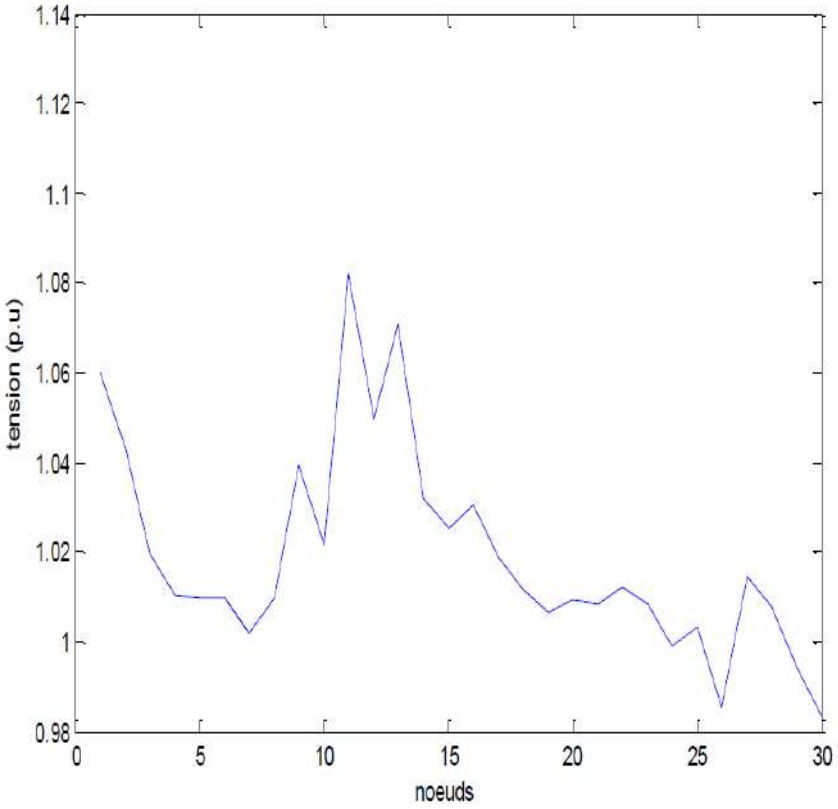


Figure.III.7
Variation de la tension en fonction des nœuds
Sans compensation

B. Tableau III. 2: *Résultats de la tension et l'angle d'un réseau IEEE à 30 nœuds obtenus par la méthode de Newton-Raphson avec compensation en [26 ، 30]*

Bus N°	Tension	
	Amplitude (pu)	Phase (degré)
1	1.0600	0.0000
2	1.0430	-5.3525
3	1.0200	-7.5318
4	1.0108	-9.2848
5	1.0100	-14.1692
6	1.0101	-11.0627
7	1.0023	-12.8655
8	1.0100	-11.8168
9	1.0402	-14.0508
10	1.0231	-15.6455
11	1.0820	-14.0508
12	1.0503	-15.0935
13	1.0710	-15.0935
14	1.0330	-15.9691
15	1.0263	-15.9809
16	1.0315	-15.5967
17	1.0202	-15.8422
18	1.0128	-16.5781
19	1.0080	-16.7371
20	1.0110	-16.5223
19	1.0080	-16.7371
20	1.0110	-16.5223
21	1.0102	-16.1952
22	1.0147	-15.9655
23	1.0106	-16.2084
24	1.0033	-16.3066
25	1.0125	-16.1605
26	1.0000	-16.7794
27	1.0240	-15.7112
28	1.0091	-11.7434
29	1.0076	-17.0359
30	1.0000	-18.0205

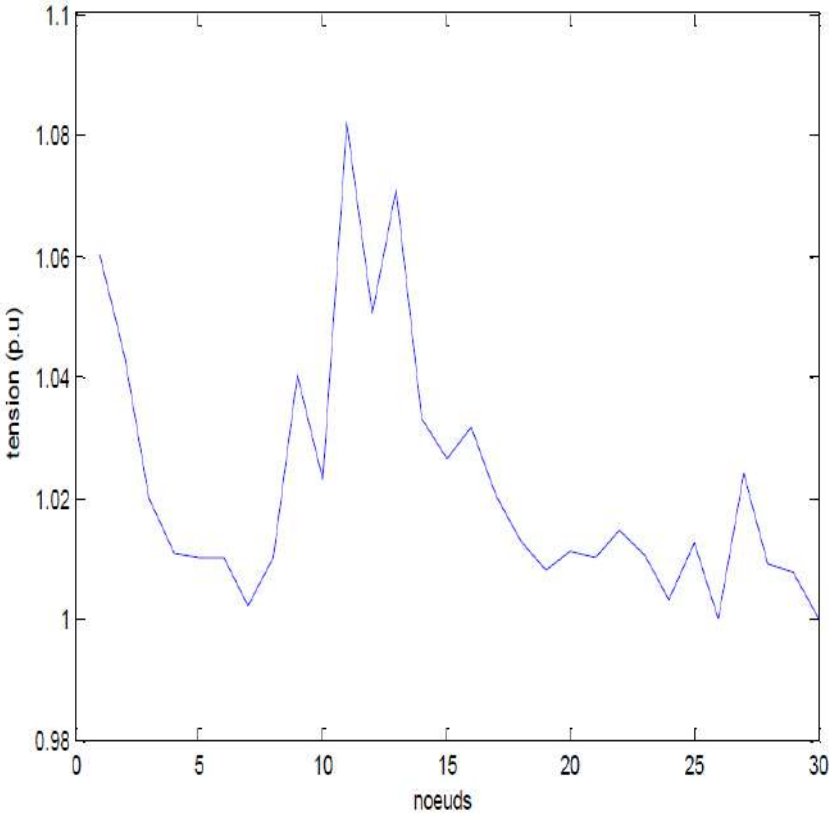


Figure.III.8
Variation de la tension en fonction des nœuds(26,30)(avec Statcom)

C- Tableau III.3.*Les résultats de l'insertion du STATCOM dans les nœuds (26,30).*

STATCOM	Vsh	Thst	Qsh
26	1.0014	-16.7872	-0.0137
30	1.0020	-18.0321	-0.0202

Les résultats de l'écoulement de puissance lorsqu'on a inséré un STATCOM dans les nœuds (26,30).

D-Tableau (III.4) : *Résultats des tensions et l'angle du réseau électrique (avec compensation. (10, 12,19)*

Bus N°	Tension	
	Amplitude (pu)	Phase (degré)
1	1.0600	0.0000
2	1.0430	-5.3844
3	1.0131	-7.4390
4	1.0023	-9.1775
5	1.0100	-14.2611
6	1.0046	-11.0806
7	0.9990	-12.9164
8	1.0100	-11.9337
9	1.0223	-14.3013
10	1.0000	-16.0502
11	1.0620	-14.3013
12	1.0000	-14.9714
13	1.0310	-14.9714
14	0.9893	-15.9943
15	0.9890	-16.2379
16	0.9923	-15.7409
17	0.9921	-16.1886
18	0.9938	-17.2986
19	1.0000	-17.7150
20	0.9992	-17.3548
21	0.9836	-16.5874
22	0.9905	-16.3552
23	0.9830	-16.5869
24	0.9777	-16.6663
25	0.9881	-16.4139
26	0.9698	-16.8592
27	1.0033	-15.9693
28	1.0030	-11.7731
29	0.9831	-17.2496
30	0.9713	-18.1698

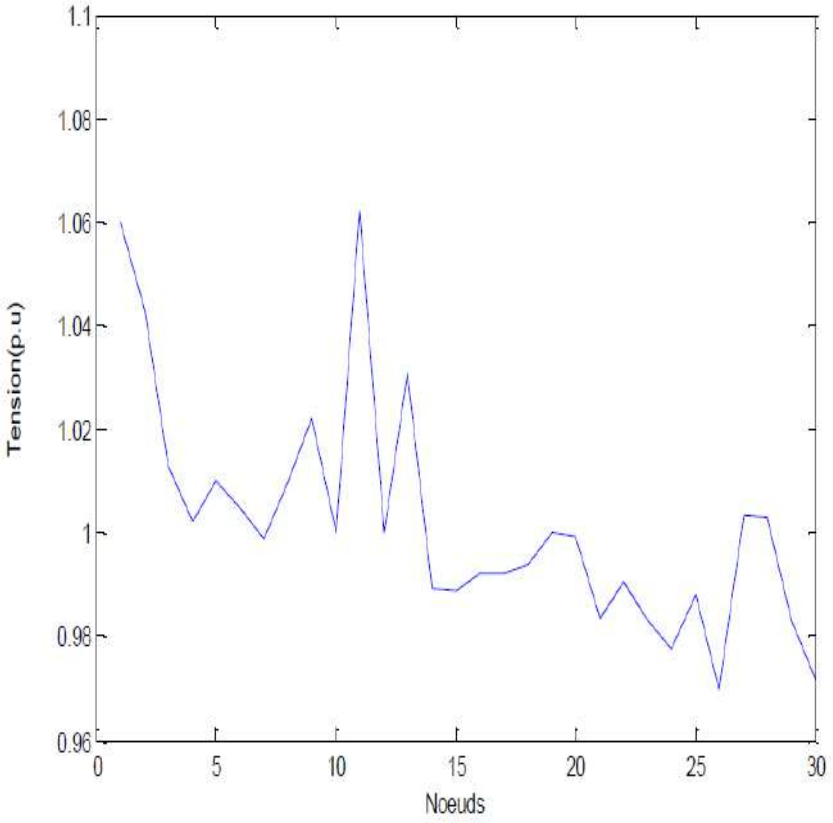


Figure.III.9
variation de la tension en fonction des nœuds (10,12,19) (avec Statcom)

E-Tableau (III.5):*les résultats de l'écoulement de puissance(les nœuds 10,12,19).*

STATCOM	Vsh	Thst	Qsh
10	0.9970	-16.0328	0.0303
12	0.9594	-14.7391	0.4055

les résultats de l'écoulement de puissance lorsqu'on a inséré un STACOM dans les nœuds (10,12,19).

F -Tableau (III.6):*Résultats de la tension et l'angle du réseau électrique (avec compensation. (10 ,12,19,26,30).*

Bus N°	Tension	
	Amplitude (pu)	Phase (degré)
1	1.0600	0.0000
2	1.0430	-5.3833
3	1.0134	-7.4404
4	1.0026	-9.1789
5	1.0100	-14.2576
6	1.0051	-11.0884
7	0.9993	-12.9193
8	1.0100	-11.9348
9	1.0224	-14.2695
10	1.0000	-15.9978
11	1.0620	-14.2695
12	1.0000	-14.9392
13	1.0310	-14.9392
14	0.9894	-15.9588
15	0.9894	-16.2033
16	0.9924	-15.7001
17	0.9921	-16.1397
18	0.9940	-17.2545
19	1.0000	-17.6656
20	0.9992	-17.3047
21	0.9845	-16.5498
22	0.9931	-16.3302
23	0.9843	-16.5547
24	0.9835	-16.6975
25	1.0049	-16.6378
26	1.0000	-17.5538
27	1.0199	-16.0983
28	1.0051	-11.8255
29	1.0055	-17.4900
30	1.0000	-18.5423

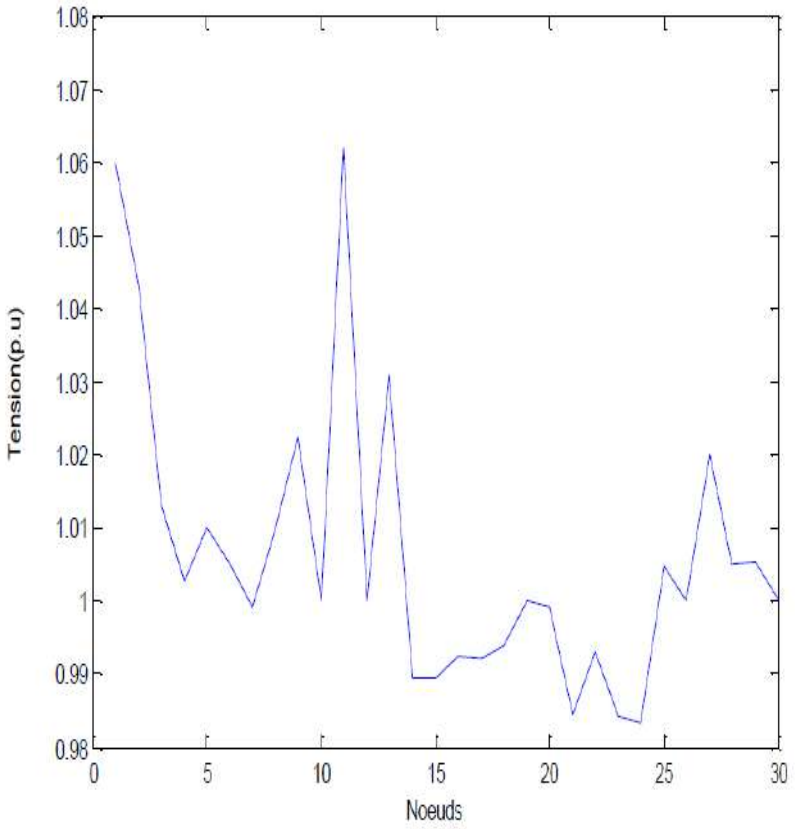


Figure.III.10
Variation de la tension en fonction des nœuds (10, 12,19,26,30) avec Statcom

G-Tableau (III.7): *les résultats de l'écoulement de puissance les nœuds (10, 12, 19, 26,30).*

Les résultats de l'écoulement de puissance lorsqu'on a inséré un STACOM dans les nœuds (10, 12, 19, 26,30).

STATCOM	Vsh	Thsh	Qsh
10	0.9940	-15.9634	0.0601
12	0.9590	-14.7045	0.4095
19	1.0140	-17.7457	-0.1398
26	1.0034	-17.5732	-0.0339
30	1.0032	-18.5606	-0.0320

H-Tableau (III.8): *la comparaison des résulta de la tension sans et avec compensation d'un STATCOM*

Bus	Sans compensation V(p.u)	Avec compensation V(p.u)
1	1.0600	1.0600
2	1.0430	1.0430
3	1.0196	1.0200
4	1.0104	1.0108
5	1.0100	1.0100
6	1.0096	1.0101
7	1.0020	1.0023
8	1.0100	1.0100
9	1.0392	1.0402
10	1.0215	1.0231
11	1.0820	1.0820
12	1.0496	1.0503
13	1.0710	1.0710
14	1.0320	1.0330
15	1.0251	1.0263
16	1.0304	1.0315
17	1.0188	1.0202
18	1.0114	1.0128
19	1.0066	1.0080
20	1.0095	1.0110
21	1.0082	1.0102
22	1.0120	1.0147
23	1.0085	1.0106
24	0.9991	1.0033
25	1.0032	1.0125
26	0.9852	1.0000
27	1.0145	1.0240
28	1.0078	1.0091
29	0.9944	1.0076
30	0.9828	1.0000

*Le tableau (III .7) , la Figure(III.10**)** montrent les tensions au niveau des jeux de barres du réseau test trouvées sans et par l' intégration du dispositif shunt STATCOM dans la méthode de calcul de l' écoulement de puissance (méthode de NEWTON -RAPHSON).On remarque une amélioration des tensions au niveau des jeux de barres due à la présence de ce dispositif .*

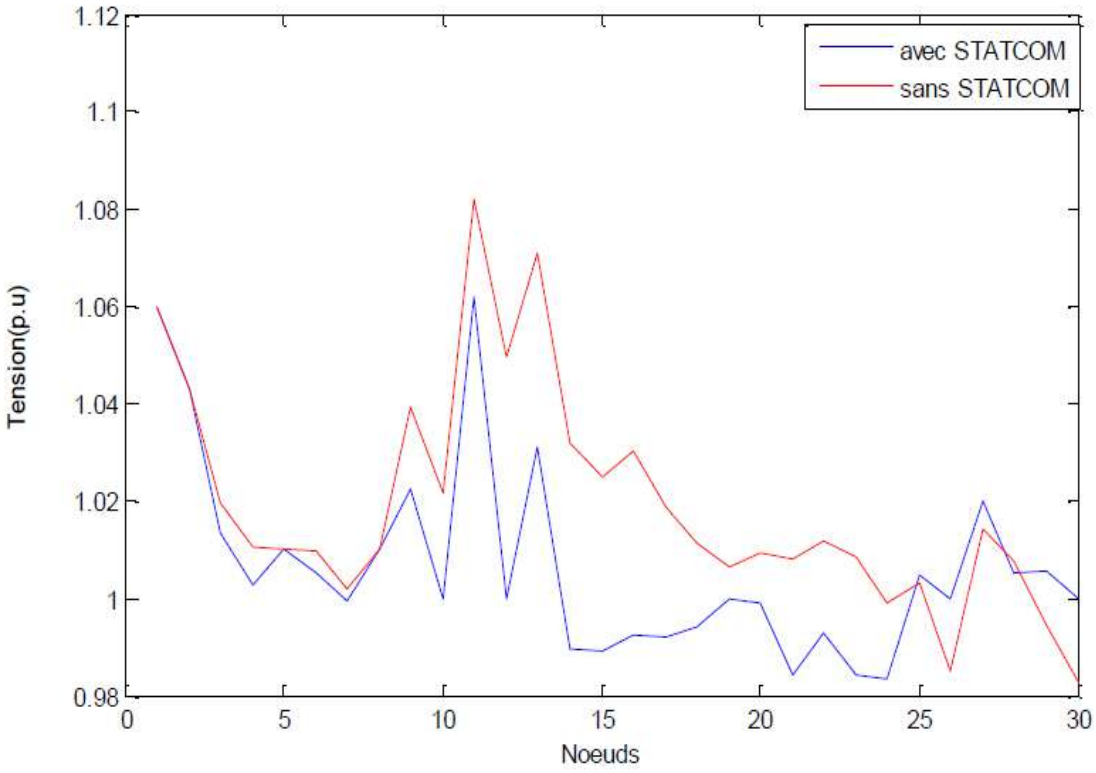


Figure.III.11 : *variation de la tension en fonction des nœuds (26 , 30) avec et sans Statcom*

III.3.2. interprétation des résultats de la simulation :

On remarque que :

- *Une amélioration du niveau de tension en utilisant le dispositif STATCOM.*
- *le compensateur dynamique shunt STATCOM qui a été injecté dans le réseau, a influé positivement sur le réseau qu'on a étudié.*

Donc il y a une amélioration sur les indices de qualité de l'énergie, en particulier la tension.

On remarque par la suite :

- *La tension est améliorée.*
- *Réduction faible des pertes de l'énergie active.*
- *le dispositif de contrôle STATCOM peut jouer un rôle très important dans le domaine De la compensation des puissances réactives des différents nœuds.*

III.5. Conclusion

*Dans ce chapitre, on s'est intéressé au dispositif **STATCOM**. Nous avons cité le principe de fonctionnement, les avantages, le rôle, la modélisation et l'incorporation du **STATCOM** dans l'étude de l'écoulement de puissance par la méthode de NEWTON RAPHSON.*

*Les différents résultats obtenus montrent que le compensateur statique **STATCOM** améliore les performances du réseau en terme de niveau de tension en injectant de la puissance réactive prédéterminée dans le nœud de charge le plus faible du réseau pour ajuster la tension aux différents jeux de barres du réseau et éviter que cette puissance réactive soit fournie par les générateur et transité à travers les lignes du réseau. Le **STATCOM** a peu d'effet sur l'augmentation de la puissance active transitée dans la ligne.*

Conclusion Générale

Conclusion général

*Dans ce travail, on a décrit l'effet du dispositif **FACTS** shunt sur l'écoulement de puissance et en particulier le profil des tensions d'un réseau électrique en se basant sur les méthodes de résolution des équations non-linéaires de Newton-Raphson pour le calcul de la répartition de charge.*

*Dans la dernière étape, nous avons présenté le schéma électrique équivalent du réseau étudié détaillé à savoir (IEEE 30 JB) et nous avons étudié l'écoulement de puissance de ce réseau en régime équilibré sans la présence du **STATCOM**. Par la suite, le réseau a été étudier au niveau de sa zone faible et nous avons refait l'étude de l'écoulement avec la présence du compensateur **STATCOM**.*

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

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

Références bibliographiques

References' Bibliographies

[1] O. MAMMERI, « Différentes Méthodes De Calcul De La Puissance Réactive Dans un Nœud A Charge Non Linéaire En Présence D'un Système De Compensation De L'énergie », Mémoire de Magister, Université de Batna 2012.

[2] G. Abdelmalek, « Utilisation des méthodes d'optimisations méta heuristiques pour La résolution du Problème de répartition optimale de La Puissance dans les réseaux électriques », mémoire de Magister, Université d'El-oued, 2010.

[3] M. RAHLI, « Contribution à l'étude de la répartition optimale des puissances actives dans un réseau d'énergie électrique ». Thèse de Doctorat, Université de UST Oran, 1996.

[4] SAYAH Samir, « Application de l'intelligence artificielle pour le fonctionnement optimal des systèmes électriques », Thèse de doctorat, Université de SETIF 1, 2009.

[5] R. Missoum, « Etude d'un dispatching économique des puissance active par les algorithmes de fourmis », Mémoire de Magister, Université de Chlef 2008

[6] HAIMOUR Rachida, « Contrôle des puissances réactives et des tensions par les dispositifs FACTS dans un réseau électrique », Mémoire de magister, Ecole normale supérieure de l'enseignement technologique d'Oran, 2009.

[7] Abdelali. Alibi, « Contrôle des réseaux électrique par les systèmes FACTS : Flexible AC Transmission Systems » Mémoire magister, Université de Batna 2009.

[8] E.G. Shahraki, « Apport de l'UPFC à l'amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques » Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré Nancy-I, 2003.

[9] Laid Hichem, « Contribution à l'étude du contrôle du flux de puissance par l'UPFC », Mémoire de magister, Université de Batna 2009.

[10] K. Lamia, « Optimisation de la synthèse des FACTS par les Algorithmes génétiques et le Essaim particulaires pour le contrôle des réseaux électrique » Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique Alger, 2006.

[11] Leonard L.Grigsoby, «Power Systems » electric Power engineering handbook second edition 2006.

[12] J. Lucthomus « Les systèmes flexibles de transport et de distribution électrique FACTS », 10^{eme} entretiens physique d'industrie, PARIS, 0ctobre 2008.

[13]E.Acha, V.G. Agelidis, O. Anaya-Lara, T.J.E. Miller, "Power electronic control in electrical systems", Newnes 2002.

[14] Enrique Acha, Claudio R. Fuerte-Esquivel, Hugo Ambriz-Pérez, César Angeles- Camacho," FACTS Modeling and Simulation in Power Networks", John Wiley & Sons Ltd, 2004.

[15] Xiao-Ping Zhang, Christian Rehtanz, Bikash Pal, "Flexible AC Transmission systems: Modelling and Control", Springer 2005.

[16] Stagg, G.W. and El-Abiad, A.h., « Computer methode in Power System Analysis ». Mc Graw Hill, 1968.

References' Bibliographies

[17] Nour el Iman Sabour , Hajer benaija « Apport des Statcom sur l'écoulement de puissance » Mémoire de Master 2 , Université de medea 2014

[18] M. Z. EL-Sadek, A. Ahmed, INCORPORATING COMBINED FACTS IN LOAD FLOW STUDIES Electrical Engineering Department, Faculty of Engineering, University Assiut, Egypt 2015

[19] BENCHEIKH Abdelhak , DEROUICHE Abdelghani « Etude de l'écoulement de puissance sur un réseau électrique en présence des systèmes FACTS » Mémoire de Master 2 ,Université de *Kasdi Merbah Ouargla 2016*

.

LES ANNEXES

Annexe A

Tableau A. 1: Classification des jeux de barres

Type des Jeux de barres (JB)	Code
Charge (P, Q)	0
Générateur (P, V)	2
Référence (slack/swing bus)	1

Tableau A. 2: Données des lignes de transport du réseau IEEE 30 nœuds

Line Number	Between buses	Line Impedance		Half line charging susceptance (per unit)	Tap setting
		R(per unit)	X(per unit)		
1	1-2	0.0192	0.0575	0.0264	1.0
2	1-3	0.0452	0.1852	0.0204	1.0
3	2-4	0.0570	0.1737	0.0184	1.0
4	3-4	0.0132	0.0379	0.0042	1.0
5	2-5	0.0472	0.1983	0.0209	1.0
6	2-6	0.0581	0.1763	0.0187	1.0
7	4-6	0.0119	0.0414	0.0045	1.0
8	5-7	0.0460	0.1160	0.0102	1.0
9	6-7	0.0267	0.0820	0.0085	1.0
10	6-8	0.0120	0.0420	0.0045	1.0
11	6-9	0.0	0.2080	0.0	1.078
12	6-10	0.0	0.5560	0.0	1.069
13	9-11	0.0	0.2080	0.0	1.0
14	9-10	0.0	0.1100	0.0	1.0
15	4-12	0.0	0.2560	0.0	1.032
16	12-13	0.0	0.1400	0.0	1.0
17	12-14	0.1231	0.2559	0.0	1.0
18	12-15	0.0662	0.1304	0.0	1.0
19	12-16	0.0945	0.1987	0.0	1.0
20	14-15	0.2210	0.1997	0.0	1.0
21	16-17	0.824	0.1923	0.0	1.0
22	15-18	0.1073	0.2185	0.0	1.0

Suite Tableau A.2

Line Number	Between buses	Line Impedance		Half line charging susceptance (per unit)	Tap setting
		R(per unit)	X(per unit)		
23	18-19	0.0639	0.1292	0.0	1.0
24	19-20	0.0340	0.0680	0.0	1.0
25	10-20	0.0936	0.2090	0.0	1.0
26	10-17	0.0324	0.0845	0.0	1.0
27	10-21	0.0348	0.0749	0.0	1.0
28	10-22	0.0727	0.1499	0.0	1.0
29	21-22	0.0116	0.0236	0.0	1.0
30	15-23	0.1000	0.2020	0.0	1.0
31	22-24	0.1150	0.1790	0.0	1.0
32	23-24	0.1320	0.2700	0.0	1.0
33	24-25	0.1885	0.3292	0.0	1.0
34	25-26	0.2544	0.3800	0.0	1.0
35	25-27	0.1093	0.2087	0.0	1.0
36	28-27	0.0	0.3960	0.0	1.068
37	27-29	0.2198	0.4153	0.0	1.0
38	27-30	0.3202	0.6027	0.0	1.0
39	29-30	0.2399	0.4533	0.0	1.0
40	8-28	0.0636	0.2000	0.0214	1.0
41	6-28	0.0169	0.0599	0.0650	1.0

Tableau A. 3: Données des jeux de barres du réseau IEEE 30 nœuds

Bus N°	Bus Code	Tension		Générateur		Charge		puissance Réactive limite	
		Amplitue (pu)	Phase (degré)	P MW	Q Mvar	P MW	Q Mvar	Qmin Mvar	Qmax Mvar
1	Slack	1.06	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0
2	PV	1.043	0	80.0	27.6	21.7	12.7	-40	50
3	PQ	1	0	0.0	0.0	2.4	1.2	0	0
4	PQ	1.06	0	0.0	0.0	7.6	1.6	0	0
5	PV	1.01	0	50.0	21.5	94.2	19.0	-40	40
6	PQ	1	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0
7	PQ	1	0	0.0	0.0	22.8	10.9	0	0
8	PV	1.01	0	20	22.9	30.0	30.0	-10	40
9	PQ	1	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0
10	PQ	1	0	0.0	0.0	5.8	2.0	0	0
11	PV	1.082	0	20.0	38.5	0.0	0.0	-6	24
12	PQ	1	0	0.0	0.0	11.2	7.5	0	0
13	PV	1.071	0	20.0	40.3	0.0	0.0	-6	24
14	PQ	1	0	0.0	0.0	6.2	1.6	0	0
15	PQ	1	0	0.0	0.0	8.2	2.5	0	0
16	PQ	1	0	0.0	0.0	3.5	1.8	0	0
17	PQ	1	0	0.0	0.0	9.0	5.8	0	0
18	PQ	1	0	0.0	0.0	3.2	0.9	0	0
19	PQ	1	0	0.0	0.0	9.5	3.4	0	0
20	PQ	1	0	0.0	0.0	2.2	0.7	0	0
21	PQ	1	0	0.0	0.0	17.5	11.2	0	0
22	PQ	1	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0
23	PQ	1	0	0.0	0.0	3.2	1.6	0	0
24	PQ	1	0	0.0	0.0	8.7	6.7	0	0
25	PQ	1	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0
26	PQ	1	0	0.0	0.0	3.5	2.3	0	0
27	PQ	1	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0
28	PQ	1	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0
29	PQ	1	0	0.0	0.0	2.4	0.9	0	0
30	PQ	1	0	0.0	0.0	10.6	1.9	0	0

Annexe B

Organigramme de la méthode de NETWON-RAPHSON

