



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur
et de la Recherche scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued
Faculté de Technologie

Mémoire de Fin d'Étude
En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Electrotechnique

Spécialité : réseaux Electrique

Thème

**L'impact technique et economique du
systeme de compensation dynamique sur
des systemes energitiques**

Réalisé par:

- **OUASSA Mohammed Lamine**
- **DJEDID Larbi**

Encadré par:

DR.: MAMMERI Oussama

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Résumé

ملخص :

هذه المذكرة تعرض نماذج وطرق إدماج مثلى لأنظمة خطوط النقل المتقاربة المطواعة (FACTC) لمراقبة سيران القدرة و التقليل من ضياعات الطاقة ورفع التوتر الكهربائي و الحصول على كلفة إنتاج طاقة اقل . واعتمدنا على خوارزمية غوص سيدال (GS) التقليدية لحل مشكلة سيران القدرة وكذلك نيوتن رافسون (N R) . وسنتطرق لدراسة نموذجين أساسيين المتمثلين في نظام تعديل القدرة الغير فعالة (SVC) ونظام التحكم في السعة الخطية (TCSC) من خلال دراسة مقارنة بينهما وتطبيقها على الشبكات الاختيارية .(9JB ,30JB). عن طريق البرمجة

Résumé :

Dans ce mémoire, on va étudier et analyser la modélisation et l'intégration des dispositifs de compensation dynamiques dans les réseaux électriques pour un objectif principal le réglage flexible de la tension ainsi que une réduction des pertes totale dans les réseaux électriques. Le model de dispositif shunt (SVC) utilisé comme un régulateur efficace de l'énergie réactive, le model série (TCSC), utilisé comme un régulateur de la puissance active transitée ont été intégré dans la méthode de NEWTON RAPHSON et GAUSS_SIEDAL, Afin de prouver l'importance et les avantages d'intégrer ces dispositifs dans les réseaux électriques, et de valider nos résultats obtenus par programmation sur des réseaux test (9JB ,30JB).

Remerciements

Nous rendons nos profondes gratitude à dieu qui nous a aidé réaliser ce modeste travail.

Nous exprimons nos profondes gratitude à nos parents pour leur encouragements, leur soutiens et pour sacrifices qu'ils ont enduré Et à tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin.

Nous remercions nos encadreur "Dr OUSSAMA MEAMRRI" pour les efforts qu'ils ont déployés, pour nous aider conseiller, Encourager et corriger.

Nous remercions aussi tous le corps enseignants et administratifs qui ont contribué a notre formation universitaire.

DEDICACE

Je dédie ce mémoire à

Mes parents, Ma mère, qui a oeuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude.

Mon père, qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie. Puisse Dieu faire en sorte que ce travail porte son fruit ; Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de toi.

Mes frères et soeurs qui n'ont cessé d'être pour moi des exemples de persévérance, de courage et de générosité.

**A tous ceux et toutes celles qui
m'ont accompagné et soutenu
durant cette année de formation,**

Sommaire

✓ Résumé	
✓ Remerciement	
✓ Dédicaces	
✓ Table de matière	
✓ Liste des symboles	
✓ Liste des figures	
✓ Liste des tableaux	
✓ Introduction générale.....	01

Chapitre I

Modélisation et analyse du réseau électrique

I.1. Introduction.....	03
I.2. Modélisation des générateurs	03
I.3. Modélisation d'une charge	04
I.4. Modélisation d'une compensation shunt	04
I.5. Modélisation de ligne longue	05
I.6. Classification des nœuds des réseaux électrique	06
I.7. Les équations de l'écoulement de puissance.....	06
I.7 .1. Calcul de la puissance au niveau de nœud.....	08
I.7.2. Les équations d'écoulement dans les lignes.....	09
I.7.3. Les pertes de puissance dans lignes.....	09
I.7.4. Facteur de puissance	10
I.8. Classification des variables d'équations d'écoulement de puissance	10
I.8.1. Les variables de perturbation	10

I.8.2. Les variables d'état	10
I.8.3. Les variables de contrôle.....	11
I.9. Les méthodes numériques utilisées.....	11
I.9.1. Introduction	11
I.9.2. La méthode itérative de GAUSS-SEIDEL	11
I.9.3. La méthode de Newton-Raphason	13
I.9.4. Résolution d'un système d'équation a ((n)) variables non linéaire	14
I.9.5. Critère d'arrêts des itérations	16
I.10. Les méthodes numériques appliqué aux équations de l'écoulement de puissance	16
I.10.1. la méthode de Gauss Seidel appliqué aux équations de l'écoulement de puissance.....	16
I-10-2 la méthode de Newton-Raphson appliqué auxéquations de l'écoulement de puissance.....	17
I.10.3. Détermination des sous matrices de la Jacobienne J.....	19
I.10.4. Les étapes de calcul	20
I.10.5. Les approximations dans la méthode de Newton-Raphson.....	20
I. 11.Conclusion	20

Chapitre II

Control dynamique de la tension et puissance réactive

II.1. Introduction.....	21
II.2. Compensation Traditionnelle.....	22
II.2.1. Compensation traditionnelle shunt	22

II.2.2. Compensation traditionnelle série	24
II.3. Définition des FACTS.....	25
II.4 Classification des dispositifs FACTS.....	25
II.4.1 Compensateurs shunts.....	25
II-4-1.1.Compensateurs parallèles à base de thyristors.....	26
II.4.2. Compensation série	28
II.4.2.1. Principe de fonctionnement.....	28
II.4.2.2. Application.....	29
II.4.2.3. Compensateurs séries à base de thyristor.....	29
II.5. Compensateurs hybrides série – parallèle.....	30
II.5.1. Contrôleur universelle de l'écoulement de puissance (UPFC)	30
II.6. Comparaison des FACTS les plus utilisés	32
II.7. Rôle des dispositifs FACTS.....	32
II.8. Les avantages, les inconvénients et les contraintes de latechnologie des dispositifs FACTS	33
II.9. Conclusion.....	34

Chapitre III

Étude d'un Compensateur shunt(SVC) et série (TCSC)

III.1. Introduction.....	35
III.2.Caractéristique d'un compensateur statique (SVC).....	35
III.2.1.Caractéristique en V d'un compensateur statique.....	35
III.2.2.Caractéristique $Q_{SVC}(I)$ d'un SVC.....	36

III.3.Modélisation des compensateurs statiques.....	37
III.3.1.Modélisation de SVC.....	37
III.4.Implantation du compensateur statique dans le problème de l'écoulement de puissance	39
III.5. L'organigramme globale de l'intégration de SCV.....	41
III.5.1Organigramme détaillée.....	42
III.6.Control des transits de puissances par dispositif FACTS (TCSC).....	44
III.6.1.Modélisation du TCSC.....	44
III.6.2.Implantation de TCSC dans le problème de l'écoulement de puissance.....	46
III.6.3. L'organigramme globale de l'intégration de TCSC.....	48
III.6.3.1.Organigramme détaillée.....	49
III.7. Conclusion.....	51

Chapitre IV

Application

IV.1. Description générale.....	52
IV.2.Application :(compensation shunt avec SVC).....	52
IV.2.1.Application(1): réseau électrique de 9 jeux de barres.....	52
IV.2.2.les résultats de programmation (réseau 9 jeux de barres).....	53
IV.2.3. Comparaison des résultats du chute de tension dans les deux réseaux (9 jeux de barres).....	60
IV .3.Application :(compensation série avec TCSC).....	60
IV.3.1.Application(1): réseau électrique de 9 jeux de barres.....	60

Sommaire

IV.3.2.Application(2): réseau électrique de 30 jeux de barres.....	62
IV.4:Interprétation.....	63
✓ Conclusion générale.....	64

Symboles et abréviations

Symboles :

F	Facteur de puissance
P	Puissance active
Q	Puissance réactive
S	Puissance apparent
ϕ	Déphasage entre la puissance apparente et la puissance active (égal au déphasage entre le courant et la tension)
I	Courant de ligne
I_a	Courant actif
I_r	Courant réactive
I_t	Courant apparent (total)
R	Résistance série de la ligne
X	Réactance série de la ligne
Z	L'impédance Série Par Phase
Y	L'admittance Shunt Par Phase En (Siemens)
G	Conductance shunts de la ligne
B	Susceptance shunts de la ligne
V_i	la tension du convertisseur
V_1	Tension d'alimentation
V_2	Tension à la borne de la charge
V_{ref}	est la tension de référence dans le SVC
X_C	Condensateur de réactance.
X_L	Réactance inductive
α	angle d'amorçage
ΔV	Chute de tension dans la ligne
V_r	La tension AC au point de connexion
V_i	Tension complexe au nœud i

Abréviations :

THT	Très Haute Tension
FACTS	Système de Transmission en Courant Alternatif Flexible
SVC	Compensateur Statique
TCSC	Condensateur série contrôlé par thyristors
TCR	Inductance commutée par thyristors
TSC	Condensateur commuté par thyristors
STATCOM	Compensateur Synchrone Statique
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
TSR	Thyristor Switched Reactor
SSSC	Statice Synchrone Série Compensateur
UPFC	Thyristor Controlled Phase Shifting Transformer.
pu	Grandeur en unité relative (grandeur réduite)
GTO	Gate Turn Off

Liste de figure

Figure 1.1. Le modèle d'une génératrice.....	03
Figure 1.2. Une source de tension	04
Figure 1.3. Modélisation d'une charge.	04
Figure 1.4. modélisation d'une ligne longue.....	05
Figure 1.5. système a deux J.d.B	06
Figure 2.1.Principe de compensation shunt dans un réseau radial.....	23
Figure 2.2. Principe de compensation série dans un réseau radial.....	24
Figure 2.3. Classification des dispositifs FACTS selon la catégorie.....	25
Figure2.4. Schéma du SVC.....	26
Figure 2.5.présentation d' un Compensateur SVC.....	27
Figure 2.6. Fonctionnement du Compensateur SVC.....	28
Figure 2.7. Principe de la compensation série.....	28
Figure 2.8. Amélioration du profil de tension d'un système de puissance simple	29
Figure2.9. Amélioration de la marge stabilité transitoire à l'aide d'un condensateur série.....	29
Figure 2.10. Insertion d'un TCSC sur une ligne.....	30
Figure.2.11. Deux schémas de compensations série typique avec un condensateur série fixe et un TCSC.....	30
Figure .2.12. Compensateur Unifier UPFC (Unified power flow Controller).....	31
Figure 2.13. Configuration de base du circuit d'un contrôleur de transit de puissance unifié (UPFC).....	31
Figure 3.1.la caractéristique en V d'un SVC.....	36
Figure .3.2. Variation de la puissance réactive en fonction du courant.....	36
Figure .3.3. Présentation d'un compensateur SVC.....	37
Figure .3.4. Représentation du circuit de base pour le compensateur SVC.....	38

Liste de figure

Figure.3.5. la variation de la susceptance en fonction de l'angle d'amorçage.....	38
Figure.3.6. Variation de la susceptance en fonction de l'angle α	39
Figure .3.7.Schéma d'un TCSC.....	45
Figure .3.8. Schéma équivalent d'un TCSC.....	46
Figure .3.9.Remplacement V_s par I_s	47
Figure .3.10. Modèle d'injection : puissance injectées équivalentes.....	47
Figure .4.1.Schéma d'un réseau test de 9 jeux de barres.....	52
Figure .4.2. Variation de la tension – cas normale.....	53
Figure.4.3. Variation de la tension – cas rupture de la ligne (1-2).....	54
Figure .4.4.Variation de la tension en fonction de l'incrémentatation de la charge.....	57
Figure 4.5. la Puissance réactive dans (réseau 9 jeux de barres).....	58
Figure 4.6. la Puissance réactive dans (réseau 9 jeux de barres).....	58
Figure 4.7. Variation l'angle alphas (degré)en fonction de jeux de barres.....	59

Liste des tableaux

Tableau II.1. Comparaison des FACTS les plus utilisés	32
Tableau IV.1:Résultats des tensions du réseau électrique –cas normale.....	53
Tableau IV.2:Résultats des tensions du réseau électrique –cas rupture de la ligne (1-2).....	54
Tableau IV.3.a cas sans compensation:.....	55
Tableau IV.3.b cas avec compensation:.....	56
Tableau IV.4.cas de l'augmentation de la charge avec :20 % , 100% :.....	57
Tableau IV.5. présente(Bilan de la puissance réactive):.....	59
Tableau IV.6. Comparaison des résultats du chute de tension dans les réseaux (9 jeux de barres):.....	60
Tableau IV.7. Résultats programmations réseau électrique de 9 jeux de barres avec compensation série :.....	61
Tableau IV.8. Résultats programmations réseau électrique de 30 jeux de barres avec compensation série.....	62

Introduction générale

Introduction générale

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

Le fournisseur d'énergie électrique s'efforce de garantir la qualité de l'énergie électrique, pour arriver à augmenter la continuité de service, actuellement les critères de qualité ont évolué avec le développement des équipements où l'électronique prend une place prépondérante dans la production et le transport d'un réseau électrique.

Les réseaux maillés, soumis à des boucles de puissance indésirables entre zones interconnectées, subissent des surcharges de lignes, des problèmes de stabilité et de toute manière un accroissement des pertes. Les moyens classiques de contrôle des réseaux (transformateur à prises réglables en charge, transformateurs déphaseurs, compensateurs série ou parallèle commutés par disjoncteurs, modification des consignes de production, changement de topologie du réseau et action sur l'excitation des générateurs) pourraient dans l'avenir s'avérer trop lents et insuffisants pour répondre efficacement aux perturbations du réseau, compte tenu notamment des nouvelles contraintes.

Il faudra vraisemblablement, dans l'avenir, compléter leur action en mettant en œuvre des dispositifs électroniques de puissance à grande vitesse de réponse, récemment développés et connus sous l'appellation FACTS (Flexible Alternative Current Transmission System) pour le contrôle des réseaux.

Les systèmes FACTS (Flexible Alternative Current Transmission Systems) sont des systèmes de contrôle rapide des réseaux utilisant les ressources offertes par l'électronique de puissance et la micro-électronique de commande ont été récemment étudiés et réalisés, et sont actuellement pour certains en application normale.

Le développement récent des dispositifs FACTS ouvre de nouvelles perspectives pour une exploitation plus efficace des réseaux par action continue et rapide sur les différents paramètres du réseau (déphasage, tension, impédance). Ainsi, les transits de puissance seront mieux contrôlés et les tensions mieux tenues, ce qui permettra d'augmenter les marges de stabilité ou de tendre vers les limites thermiques des lignes.

Généralement, le rôle principal des dispositifs FACTS est la compensation de l'énergie électrique à l'intérieur d'un réseau basée sur les trois domaines de recherche suivants :

Le Problème des pertes de puissance, des chutes de tension.

L'optimisation de l'écoulement de puissance (Dispatching).

La stabilité des tensions.

Le sujet de ce projet concerne, en particulier, le contrôle des puissances réactives et des tensions dans un réseau de transport d'énergie électrique au moyen de dispositifs SVC et TCSC . Pour atteindre ces objectifs de recherche ce mémoire est organisé en quatre chapitres.

Dans le premier chapitre, nous décrivons d'une façon générale la modélisation de réseaux électriques et les méthodes d'analyses .

Le second chapitre a été consacré à l'étude les techniques de compensation de puissance réactive classiques. Une classification des différents types de FACTS est proposée et les principaux dispositifs de chaque famille sont décrits de façon plus détaillée.

Le troisième chapitre, est consacré à l'étude profonde concerne la modélisation et l'application du contrôleur SVCet TCSC dans l'écoulement de puissance et on présente les éléments qui constituent ce dispositif.

Le quatrième chapitre; on a exposé en détails les résultats de Programme développé sous l'environnement MATLAB(une application du SVCet TCSC dans les réseaux électriques

Chapitre I:

Modélisation et analyse de réseau électrique

Chapitre I

Modélisation et analyse de réseau électrique

I.1. Introduction :

Un réseau d'énergie électrique comprend des génératrices, des lignes de transport et distribution, et un ensemble de consommateurs, qui constituent la charge de réseau, en outre le réseau comporte également des transformateurs et des appareils de protection. L'ensemble des systèmes électrique comporte en gros trois sous-systèmes :

- Production (génératrice).
- Transport, répartition et distribution (lignes).
- Utilisation (consommateur).

Vu la complexité d'un réseau d'énergie électrique, il faut simplifier leur représentation pour établir des modèles ou schéma équivalent des principaux composant à savoir, des générateurs, les différents types de transformateurs, des lignes et des charges.

I.2. Modélisation des générateurs :

Une machine synchrone est une machine à courant alternatif, dans laquelle la fréquence de la tension induite engendrée et la vitesse sont en rapport constant. Elle est composée : d'un induit fixe, un inducteur tournant. On appelle une machine synchrone toutes les machines qui tournent exactement à la vitesse correspondant à la fréquence des courants et des tensions à ses bornes.

Les machines de faible vitesse angulaire sont à pôles saillants. Pour les grandes machines à grande vitesse (3000 tr/min, dans les centrales à fuel ou charbon), (1500 tr/min dans les centrales nucléaires), on utilise des rotors lisses à entrefer constant.

Le schéma équivalent est représenté par la figure (1.1).

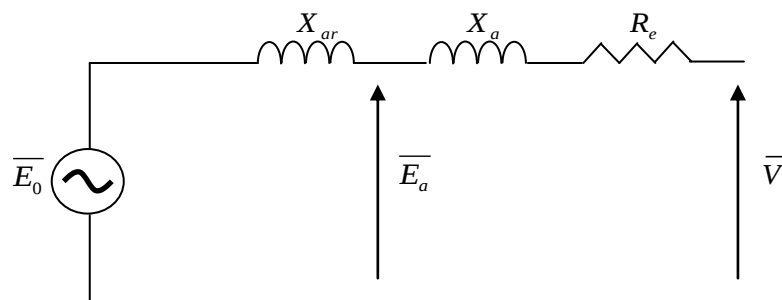


Figure 1.1. Le modèle d'une génératrice

Dans le calcul d'écoulement de puissance, il est représenté par une source de tension.



Figure 1.2. Une source de tension.

$S_i = P_i + jQ_i$: La puissance apparente délivré par le générateur.

$V_i = |V_i|e^{j\delta_i}$: La tension simple.

E_0 : La *f.e.m* à vide.

E_a : La *f.e.m* En charge.

V : tension de sortie.

X_{ar} : Réactance de réaction d'induit.

X_a : Réactance de fuite.

X_s : $X_a + X_{ar}$ Réactance synchrone.

R_e : Résistance d'enroulement.

I.3. Modélisation d'une charge :

Une charge peut être modélisée par une impédance qui consomme une quantité constante de puissance active et réactive (Figures 1.3).



Figure 1.3. Modélisation d'une charge.

I.4. Modélisation d'une compensation shunt :

Une compensation shunt qui peut être fixe ou variable, qui donne au réseau de l'énergie réactive contrôlable.

I.5. Modélisation de ligne longue :

Une ligne peut être considérée comme une série de circuit à constantes répartie uniformément sur toute sa longueur. Ces circuits sont composés d'une infinité d'éléments identiques constitués, d'une inductance linéique, et d'une résistance linéique, dans le sens longitudinal, qui donnent naissance à des chutes de tension. Une conductance linéique et une capacité linéique dans le sens transversale. Le schéma équivalent en Π est représenté par la figure (1.4).

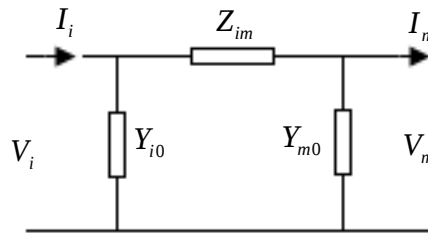


Figure 1.4. modélisation d'une ligne longue

Généralement toute ligne longue se caractérise par les équations suivantes :

$$\begin{aligned} V(X) &= V_i \cosh(\gamma \cdot X) - I_i \cdot Z_c \cdot \sinh(\gamma \cdot X) \\ I(X) &= V_i / Z_c \cdot \sinh(\gamma \cdot X) + I_i \cdot \cosh(\gamma \cdot X) \end{aligned} \quad (\text{I-1})$$

Avec les conditions suivantes :

$$V(X = 0) = V_i$$

$$I(X = 0) = I_i$$

Où : Z (Impédance caractéristique de la ligne (Ω))

(Où $\gamma = \sqrt{Z \cdot Y}$ propagation)

L'équation (I-1) nous donne le courant et la tension de la ligne en fonction de la longueur X

Pour $X = L$ on a

$$V(X = L) = V_m = V_i \cosh(\gamma \cdot L) - I_i \cdot Z_c \cdot \sinh(\gamma \cdot L) \quad (\text{I-2})$$

$$I(X = L) = I_i = V_i / Z_c \cdot \sinh(\gamma \cdot L) + I_i \cdot \cosh(\gamma \cdot L) \quad (\text{I-3})$$

Les équations (I-2), (I-3) nous donnent :

$$\cosh(\gamma \cdot L) = 1 + Z_{im} \cdot Y_{i0} = 1 + Z_{im} \cdot Y_{m0}$$

$$\frac{\sinh(\gamma \cdot L)}{Z_c} = Y_{i0} + Y_{m0} + Z_{im} \cdot Y_{m0} \cdot Y_{i0} \quad (\text{I-4})$$

D'où en tire

$$\begin{aligned} Z_{im} &= Z_c \cdot \sinh(\gamma \cdot L) \\ Y_{i0} = Y_{m0} &= \tanh\left(\frac{\gamma \cdot L}{2}\right) / Z_c \end{aligned} \quad (I-5)$$

Finalement en a les expressions de l'impédance série Z_{im} et de l'admittance transversale ($Y_{i0} = Y_{m0}$) de la ligne de schéma équivalent en Π représenté sur la figure (1.4).

I.6. Classification des nœuds des réseaux électrique [10] :

Chaque nœud est caractérisé par quatre variables : P_i, Q_i, V_i, θ_i . Si on connaît deux des quatre variables nous permettent de déterminer les deux autres à partir des équations principales de l'écoulement de puissance. En pratique, le problème se pose autrement. Pour cela il faut classer les nœuds du système comme suit :

- **Nœuds P-V.** Pour ce type de nœuds, on associe les centrales de production. On spécifie la puissance active et le module de la tension. Les variables à déterminer sont la phase de la tension et la puissance réactive.
- **Nœuds P-Q.** Pour ce type de nœuds, on associe généralement les charges. Ces dernières sont caractérisées par la consommation des puissances active et réactive. On peut aussi associer des générateurs avec des puissances active et réactive fixées. Les variables à déterminer sont le module et la phase de la tension.
- **Nœuds V-q.** Pour ce type de nœud on associe la centrale de production la plus puissante. Dans un nœud k (nœud de référence ou slack bus), on spécifie la phase et le module de la tension. Les valeurs à déterminer sont les puissances active et réactive.

I.7. Les équations de l'écoulement de puissance :[9]

On considère l'exemple d'un système à deux J.d.B suivant :

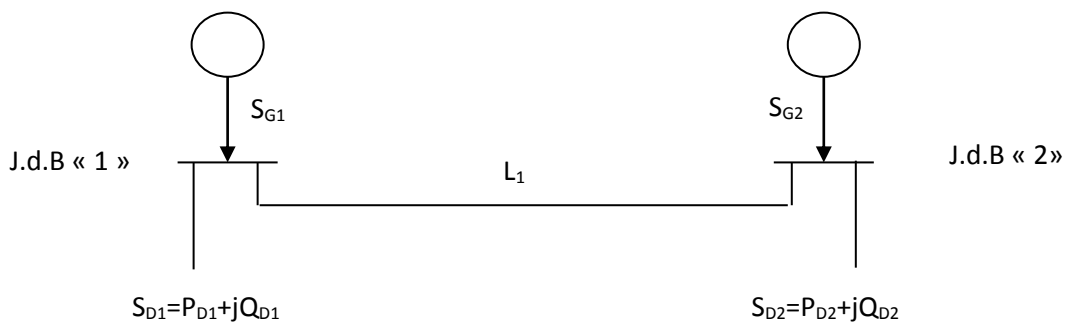


Figure 1.5. système a deux J.d.B

On note que:

$$S_1 = S_{G1} - S_{D1} \quad , \quad S_2 = S_{G2} - S_{D2} \quad (\text{I-6})$$

Et en générale :

$$S_i = S_{Gi} - S_{Di} \quad (\text{I-7})$$

$$S_i = P_i + jQ_i = (P_{Gi} + jQ_{Gi}) - (P_{Di} + jQ_{Di}) \quad (\text{I-8})$$

$$S_i = (P_{Gi} - P_{Di}) + j(Q_{Gi} - Q_{Di}) \quad (\text{I-9})$$

L'application de la loi de KHIRCHOFF sur le système donne :

Au niveau de J.d.B « 1 »

$$I_1 = Y_P \cdot V_1 + Y_S(V_1 - V_2) = (Y_P + Y_S)V_1 - Y_S V_2 \quad (\text{I-10})$$

On sait que :

$$S_1 = V_1 \cdot I_1^* \Rightarrow I_1 = \frac{S_1^*}{V_1} \quad (\text{I-11})$$

Au niveau de J.d.B « 2 »

$$I_2 = Y_P \cdot V_2 + Y_S(V_2 - V_1) = (Y_P + Y_S)V_2 - Y_S V_1 \quad (\text{I-12})$$

Avec :

$$S_2 = V_2 \cdot I_2^* \Rightarrow I_2 = \frac{S_2^*}{V_2} \quad (\text{I-13})$$

Alors on peut écrire (I-10) (I-12) sous la forme :

$$I_1 = Y_{11} \cdot V_1 + Y_{12} \cdot V_2 \quad (\text{I-14})$$

$$I_2 = Y_{21} \cdot V_1 + Y_{22} \cdot V_2$$

Avec

$$Y_{11} = Y_P + Y_S, \quad Y_{22} = Y_P + Y_S$$

$$Y_{12} = -Y_S, \quad Y_{21} = -Y_S$$

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \quad (\text{I-15})$$

On remplace (I-15) en (I-14) :

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (\text{I-16})$$

Et ainsi de suite. On peut généraliser la méthode de formulation comme suit pour le système à « n » J.d.B connectés entre eux.

$$I_1 = \left(\sum_{i=1, i \neq n}^m y_{1i} \right) V_1 + (-y_{12}) V_2 + \dots + (-y_{1n}) V_n$$

•
•
•
•

$$I_n = (-y_{n1}) V_1 + (-y_{n2}) V_2 + \dots + \left(\sum_{i=1, i \neq n}^m y_{ni} \right) V_n$$

La matrice admittance est donc :

$$Y_{bus} = \begin{pmatrix} \sum_{i=1, i \neq n}^n y_{1i} & \cdot & \cdot & (-y_{1n}) \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ (-y_{n1}) & \cdot & \cdot & \sum_{i=1, i \neq n}^m y_{ni} \end{pmatrix} \quad (I-17)$$

$$I_{bus} = \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ I_n \end{pmatrix} \quad V_{bus} = \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ V_n \end{pmatrix}$$

I.7 .1. Calcul de la puissance au niveau de nœud :

On a :

$$S_i = (P_{Gi} - P_{Di}) + j (Q_{Gi} - Q_{Di}) = P_i + jQ_i \quad (I-18)$$

Alors :

$$S_i^* = P_i - jQ_i = V_i^* \cdot I_i \quad (I-19)$$

$$S_i^* = V_i^* \cdot \sum_{j=1}^n y_{ij} V_j \quad (I-20)$$

En coordonnées polaires :

$$V_i = |V_i| \cdot \underline{\delta_i} \quad (\text{I-21})$$

$$y_{ij} = |y_{ij}| \cdot \underline{\gamma_{ij}} \quad (\text{I-22})$$

$$S_i^* = P_i - jQ_i = V_i^* \sum_{j=1} y_{ij} \cdot V_j = \sum |y_{ij}| |V_i| |V_j| e^{j(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij})} \quad (\text{I-23})$$

Donc :

$$\begin{aligned} P_i &= \sum |y_{ij}| |V_i| |V_j| \cos(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}) \\ Q_i &= -\sum |y_{ij}| |V_i| |V_j| \sin(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}) \end{aligned} \quad (\text{I-24})$$

II.7.2. Les équations d'écoulement dans les lignes [9]

Quand la solution itérative des tensions aux J.d.B est achevée, on peut calculer l'écoulement dans les lignes.

Le courant au J.d.B « i » dans la ligne de connexion de nœud « i » vers le nœud « k » est :

$$I_{ik} = (V_i - V_k) y_{ik} + V_i \cdot \frac{y'_{ik}}{2} \quad (\text{I-25})$$

y_{ik} : Admittance de la ligne entre les J.d.B « i » et « k ».

y'_{ik} : Admittance totale de la ligne de charge.

$V_i \cdot \frac{y'_{ik}}{2}$: Contribution du courant au J.d.B « i » due a la ligne de charge.

La puissance écoule, active et réactive, est :

$$P_{ik} - jQ_{ik} = V_i^* \cdot I_{ik} \quad (\text{I-26})$$

$$P_{ik} - jQ_{ik} = V_i^* (V_i - V_k) y_{ik} + V_i^* \cdot V_i \cdot \frac{y'_{ik}}{2} \quad (\text{I-27})$$

Soient P_{ki} et Q_{ki} les puissances active et réactive reparties du J.d.B « k » vers le J.d.B « i ».

$$P_{ki} - jQ_{ki} = V_k^* (V_k - V_i) y_{ik} + V_k^* \cdot V_k \cdot \frac{y'_{ik}}{2} \quad (\text{I-28})$$

Les pertes de puissances dans la ligne « i-k » sont égales à la somme algébrique de la répartition des puissances déterminée a partir des relations (I-27) et (I-28).

I.7.3. Les pertes de puissance dans lignes : [11]

Au niveau de J.d.B la puissance apparente nette est la différence entre la puissance générée et la puissance demandée. Pour un J.d.B « i », On a :

$$S_i = S_{Gi} - S_{Di}$$

$$P_i = P_{Gi} - P_{Di} = F_{ip}$$

$$Q_i = Q_{Gi} - Q_{Di} = F_{iq}$$

$$\sum P_i = \sum F_{ip} = \sum P_{Gi} - \sum P_{Di} \quad (I-29)$$

$$\sum Q_i = \sum F_{iq} = \sum Q_{Gi} - \sum Q_{Di} \quad (I-30)$$

Le système d'équation (I-15) exprime l'expression des pertes. Où bien on peut calculer les pertes par une autre méthode, on calcule les pertes au niveau des lignes puis la somme donne l'expression des pertes.

$$P_{Lij} = P_{ij} + P_{ji}$$

$$Q_{Lij} = Q_{ij} + Q_{ji} \quad (I-31)$$

I.7.4. Facteur de puissance :

$$F = \cos \varphi = \frac{P}{S} \quad (I-32)$$

I.8. Classification des variables d'équations d'écoulement de puissance : [13]

I.8.1. Les variables de perturbation :

Ces sont des variables non contrôlées représentant les puissances demandées par les charges, le vecteur de perturbation est :

$$P = \begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \\ Q_1 \\ Q_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_{D1} \\ P_{D2} \\ Q_{D1} \\ Q_{D2} \end{pmatrix} \quad (I-33)$$

I.8.2. Les variables d'état :

Les tensions en module et en phase représentant l'état du système .Ces sont : $|V_1|, |V_2|, |\delta_1|, |\delta_2|$ qui sont représenté par le vecteur d'état X.

$$X = \begin{pmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ V_1 \\ V_2 \end{pmatrix} \quad (I-34)$$

I.8.3. Les variables de contrôle :

Ce sont généralement les puissances actives et réactive générées. On peut aussi, selon des cas, considérer des tensions aux nœuds de génération ou les rapports de transformation des transformateurs avec régleur en charge, comme variable de contrôle. Ces sont : P_{G1} , P_{G2} , Q_{G1} , Q_{G2} .

$$U = \begin{pmatrix} P_{G1} \\ P_{G2} \\ Q_{G1} \\ Q_{G2} \end{pmatrix} \quad (I-35)$$

L'écoulement de puissance au niveau des J.d.B dans un système de puissance est comme la suite :

1% J.d.B de référence.

80% a 90% J.d.B de charge.

Le reste J.d.B sont de contrôle.

I.9. Les méthodes numériques utilisées :

I.9.1. Introduction :

La modélisation mathématique des systèmes non linéaires qu'il fallait résoudre pour l'étude du phénomène de la répartition de charge, consiste à faire appel aux outils mathématiques tel que, les méthodes itératives sont approximatives par ce que pour les systèmes des équations non linéaires, c'est impossible de les résoudre par les méthodes directes (règle de CRAMER, méthode des racines carrées....).

Ou par les méthodes itératives (méthode de relaxation), pour cela on utilise les méthodes itératives approximatives (méthode de GAUSS, méthode de GAUSS-SEIDEL, méthode de NEWTON-RAPHSON,.....).

Dans ce chapitre; on présente les techniques numériques de quelques méthodes de calculs :

- Méthode de GAUSS-SEIDEL.
- Méthode de NEWTON-RAPHSON.

I.9.2. La méthode itérative de GAUSS-SEIDEL : [12]

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

Principe :

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

Cette méthode est basée sur le changement de l'équation $f(x) = 0$ à la forme $x = g(x)$

Pour une fonction $f(x) = 0$, il est toujours possible de trouver une fonction $g(x)$, tel que $x = g(x)$ ($g(x)$ n'est pas unique).

On estime une valeur initiale x^0

$$\begin{cases} x^1 = g(x^0) \\ x^2 = g(x^1) \\ \cdot \\ \cdot \\ x^{k+1} = g(x^k) \end{cases} \quad (\text{I-36})$$

Où k : numéro d'itération

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

$$|x^{k+1} - x^k| \leq \varepsilon \quad (\text{I-37})$$

Pour un système de n équations :

$$f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0$$

$$f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \quad (\text{I-38})$$

$$f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0$$

Pour trouver la l'algorithme de Gauss-Seidel on a besoin de reformer la fonction $f(x) = 0$ a la forme itérative $x = g(x)$

$$\begin{cases} x^1 = g(x^0) \\ x^2 = g(x^1) \\ \cdot \\ \cdot \\ x^{k+1} = g(x^k) \end{cases} \quad (\text{I-39})$$

A la fin de chaque itération on fait le test de convergence :

$$|x^{k+1} - x^k| \leq \varepsilon \quad (\text{I-40})$$

I.9.3. La méthode de Newton-Raphson : [11]

Principe :

Soit une fonction scalaire $f(x)$. Si f est continue et dérivable au voisinage de x , alors son développement en série de TAYLOR au voisinage $x = x(0)$ est :

$$f(x^{(0)}) + f'(x^{(0)})\Delta x^{(0)} + f''(x^{(0)})\frac{(\Delta x^{(0)})^2}{2} + \dots = 0 \quad (\text{I-41})$$

Si $x^{(0)}$ est une estimation proche de la solution de $f(x) = 0$, alors le carré de l'erreur $\Delta x^{(0)}$ (où $\Delta x^{(0)} = x^{(1)} - x^{(0)}$) et les termes de degrés supérieurs sont négligeables.

On aura l'équation :

$$f(x^{(0)}) + f'(x^{(0)})\Delta x^{(0)} = 0 \quad (\text{I-42})$$

$$\Delta x^{(0)} = -\frac{f(x^{(0)})}{f'(x^{(0)})} \quad (\text{I-43})$$

$$x^{(1)} = x^{(0)} + \Delta x^{(0)} = x^{(0)} - \frac{f(x^{(0)})}{f'(x^{(0)})}$$

En générale :

$$x^{(K+1)} = x^{(K)} - \frac{f(x^{(K)})}{f'(x^{(K)})} \quad (\text{I-44})$$

k : Nombre des itérations, $k = 0, 1, 2, \dots, n$.

Où, sous une forme développée :

$$\left\{ \begin{array}{l} f_1(x) = f_1(x^{(0)}) + \left(\frac{\partial f_1(x^{(0)})}{\partial x_1}\right)\Delta x_1^{(0)} + \dots + \left(\frac{\partial f_1(x^{(0)})}{\partial x_n}\right)\Delta x_n^{(0)} = 0 \\ f_2(x) = f_2(x^{(0)}) + \left(\frac{\partial f_2(x^{(0)})}{\partial x_1}\right)\Delta x_1^{(0)} + \dots + \left(\frac{\partial f_2(x^{(0)})}{\partial x_n}\right)\Delta x_n^{(0)} = 0 \\ \dots\dots\dots \\ f_n(x) = f_n(x^{(0)}) + \left(\frac{\partial f_n(x^{(0)})}{\partial x_1}\right)\Delta x_1^{(0)} + \dots + \left(\frac{\partial f_n(x^{(0)})}{\partial x_n}\right)\Delta x_n^{(0)} = 0 \end{array} \right. \quad (I-53)$$

$$\text{Où } f(x) = f(x_1 + \Delta x_1, x_2 + \Delta x_2, \dots, x_n + \Delta x_n) \quad (I-54)$$

On peut écrire la formule (I-53) sous la forme :

$$f(x^{(0)}) + W(x^{(0)})\Delta x^{(0)} = 0 \quad (I-55)$$

Donc la matrice Jacobienne du système des fonctions $f_1, f_2, \dots, f_n$ des variables $x_1, x_2, \dots, x_n$

$$\begin{bmatrix} f_1(x^{(0)}) \\ f_2(x^{(0)}) \\ \vdots \\ f_n(x^{(0)}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial f_1(x^{(0)})}{\partial x_1}\right) & \left(\frac{\partial f_1(x^{(0)})}{\partial x_2}\right) & \dots & \left(\frac{\partial f_1(x^{(0)})}{\partial x_n}\right) \\ \left(\frac{\partial f_2(x^{(0)})}{\partial x_1}\right) & \left(\frac{\partial f_2(x^{(0)})}{\partial x_2}\right) & \dots & \left(\frac{\partial f_2(x^{(0)})}{\partial x_n}\right) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{\partial f_n(x^{(0)})}{\partial x_1}\right) & \left(\frac{\partial f_n(x^{(0)})}{\partial x_2}\right) & \dots & \left(\frac{\partial f_n(x^{(0)})}{\partial x_n}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1^{(0)} \\ \Delta x_2^{(0)} \\ \vdots \\ \Delta x_n^{(0)} \end{bmatrix} = 0 \quad (I-56)$$

En supposant que la matrice $W(x^{(0)})$ est régulière, on obtient :

$$\Delta x^{(0)} = -W^{-1}(x^{(0)}) \cdot f(x^{(0)}) \quad (I-57)$$

Par conséquent :

$$x^{(1)} = x^{(0)} - W^{-1}(x^{(0)}) \cdot f(x^{(0)}) \quad (I-58)$$

En générale :

$$x^{(P+1)} = x^{(P)} - W^{-1}(x^{(P)}) \cdot f(x^{(P)}) \quad (\text{I-59})$$

$$P = 0, 1, 2, \dots$$

I.9.5. Critère d'arrêts des itérations :

On arrête les opérations par l'un des tests suivants :

$$1/ \quad |x_i^{(K+1)} - x_i^K| < \varepsilon_1$$

$$2/ \quad \frac{|x_i^{(K+1)} - x_i^K|}{x_i^{(K+1)}} < \varepsilon_2$$

$$3/ \quad |f_i(x^{(K+1)})| < \varepsilon_3$$

$$4/ \quad K > K_{\max}$$

Où $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ sont des bornes supérieures de l'erreur fixées a priori et $K_{\max}$ est le nombre maximum admissible d'itérations.

I.10. Les méthodes numériques appliqué aux équations de l'écoulement de puissance :

I.10.1. la méthode de Gauss Seidel appliqué aux équations de l'écoulement de puissance:

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

$$I_i = Y_{i1}V_1 + Y_{i2}V_2 + \dots + Y_{in}V_n = \sum_{k=1}^n Y_{ik}V_k \quad (\text{I-60})$$

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

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

$$V_i^{K+1} = \frac{1}{Y_{ii}} \left[\frac{P_i - jQ_i}{(V_i^K)^*} - \sum_{j=1}^{i-1} Y_{ij} \cdot V_j \right]$$

(I-61)

Le processus itératif est obtenu quand l'expression suivante est satisfaite :

$$\max |V_i^{K+1} - V_i^K| \leq \varepsilon \quad (\text{I-62})$$

I-10-2 la méthode de Newton-Raphson appliqué aux équations de l'écoulement de puissance :

D'après la forme générale d'équations de puissance au J.d.B :

$$\left. \begin{aligned} P_i &= \sum_{j=1}^n |y_{ij}| |V_i| |V_j| \cos(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}) = F_{ip} \\ Q_i &= \sum_{j=1}^n |y_{ij}| |V_i| |V_j| \sin(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}) = F_{iq} \end{aligned} \right\} i = 1, 2, \dots, n \quad (\text{I-63})$$

Où :

$i = 1$: J.d.B de référence

n : Nombre de J.d.B

i : Numéro de J.d.B

Après développement de F_{ip} et F_{iq} en série de TAYLOR autour de la première approximation :

$$\left. \begin{aligned} P_i &= F_{ip}^{(0)} + \left(\frac{\partial F_{ip}}{\partial \delta_2}\right)^{(0)} \Delta \delta_2^{(0)} + \dots + \left(\frac{\partial F_{ip}}{\partial \delta_n}\right)^{(0)} \Delta \delta_n^{(0)} + \left(\frac{\partial F_{ip}}{\partial |V_2|}\right)^{(0)} \Delta V_2^{(0)} \\ Q_i &= F_{iq}^{(0)} + \left(\frac{\partial F_{iq}}{\partial \delta_2}\right)^{(0)} \Delta \delta_2^{(0)} + \dots + \left(\frac{\partial F_{iq}}{\partial \delta_n}\right)^{(0)} \Delta \delta_n^{(0)} + \left(\frac{\partial F_{iq}}{\partial |V_2|}\right)^{(0)} \Delta V_2^{(0)} \end{aligned} \right\} \quad (\text{I-64})$$

Avec $F_{ip}^{(0)}$ et $F_{iq}^{(0)}$ sont des fonctions de tension et de phase :

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

$$\text{Avec} \quad \left. \begin{aligned} \Delta P_i^{(0)} &= P_i - F_{ip}^{(0)} \\ \Delta Q_i^{(0)} &= Q_i - F_{iq}^{(0)} \end{aligned} \right\} \quad (\text{I-65})$$

Les deux systèmes d'équation (I-64) et (I-65) donnent :

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2^{(0)} \\ \Delta P_n^{(0)} \\ \Delta Q_2^{(0)} \\ \Delta Q_n^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_{2p}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial F_{2p}}{\partial \delta_n} \frac{\partial F_{2p}}{|V_2|} & \dots & \frac{\partial F_{2p}}{|V_n|} \\ \frac{\partial F_{np}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial F_{np}}{\partial \delta_n} \frac{\partial F_{np}}{|V_2|} & \dots & \frac{\partial F_{np}}{|V_n|} \\ \frac{\partial F_{2q}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial F_{2q}}{\partial \delta_n} \frac{\partial F_{2q}}{|V_2|} & \dots & \frac{\partial F_{2q}}{|V_n|} \\ \frac{\partial F_{nq}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial F_{nq}}{\partial \delta_n} \frac{\partial F_{nq}}{|V_2|} & \dots & \frac{\partial F_{nq}}{|V_n|} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \delta_2^{(0)} \\ \Delta \delta_n^{(0)} \\ \Delta V_2^{(0)} \\ \Delta V_n^{(0)} \end{bmatrix} \quad (I-66)$$

Donc on peut écrire le système comme suit :

$$\begin{bmatrix} \Delta P^{(0)} \\ \Delta Q^{(0)} \end{bmatrix} = [J^{(0)}] \begin{bmatrix} \Delta \delta^{(0)} \\ \Delta V^{(0)} \end{bmatrix} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} \Delta \delta^{(0)} \\ \Delta V^{(0)} \end{bmatrix} = [J^{(0)}]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P^{(0)} \\ \Delta Q^{(0)} \end{bmatrix} \quad (I-67)$$

On rappelle que :

$$\Delta \delta_i^{(K)} = \delta_i^{(K+1)} - \delta_i^{(K)} \quad (I-68)$$

$$i \neq 1(ref), i \neq 2(cont) \quad (I-69)$$

$$\Delta |V_i|^{(k)} = |V_i|^{(K+1)} - |V_i|^{(K)} \quad (I-70)$$

L'adaptation de (I-67) avec (I-70) donne :

$$\begin{bmatrix} \delta_i^{(K+1)} \\ |V|^{(K+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta^{(K)} \\ |V|^{(K)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} \delta_i^{(K+1)} \\ |V|^{(K+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta^{(K)} \\ |V|^{(K)} \end{bmatrix} + [J^{(K)}]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P^{(k)} \\ \Delta Q^{(k)} \end{bmatrix} \quad (I-71)$$

D'une manière générale :

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = [J] \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad (I-72)$$

$$J = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \quad (I-73)$$

J_1, J_2, J_3, J_4 Sont les sous matrice de Jacobienne.

I.10.3. Détermination des sous matrices de la Jacobienne J :

A partir du système d'équations (I-63) on peut déterminer les éléments de J

Sous matrice J_1 :

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = -|V_i||V_j||y_{ij}|\sin(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}), i \neq j \quad (\text{I-74})$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j=1, i \neq j}^n |V_i||V_j||y_{ij}|\sin(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}), i = j$$

Sous matrice J_2 :

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = |V_j||y_{ij}|\cos(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}), \quad (\text{I-75})$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = 2|V_i||y_{ij}|\cos(\gamma_{ij}) + \sum_{j=1, i \neq j}^n |V_j||y_{ij}|\cos(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}), i = j$$

Sous matrice J_3 :

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = |V_i||V_j||y_{ij}|\cos(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}), i \neq j \quad (\text{I-76})$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j=1, i \neq j}^n |V_i||V_j||y_{ij}|\cos(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}), i = j$$

Sous matrice J_4 :

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = -|V_j||y_{ij}|\sin(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}), i \neq j \quad (\text{I-77})$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = -\sum_{j=1, i \neq j}^n |V_j||y_{ij}|\sin(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}) - 2|V_i||y_{ij}|\sin(\gamma_{ij}), i = j$$

I.10.4. Les étapes de calcul :

1. A partir des données du système, on prend la matrice d'admittance Y_{bus} .
2. On estime les valeurs initiales $|V_i|^{(0)}$ et $\delta_i^{(0)}$ pour les J.d.B de charge et $\delta_i^{(0)}$ pour les J.d.B de contrôle.
3. On calcule P , Q qui nous donne ΔP , ΔQ .
4. Formation de la matrice Jacobienne J .
5. On trouve l'inverse de Jacobienne.
6. On calcule
$$\begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} = [J]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}$$

On obtient :

$$\begin{aligned} \delta_i^{(1)} &= \delta_i^{(0)} + \Delta \delta_i^{(0)} \\ |V_i|^{(1)} &= |V_i|^{(0)} + \Delta |V_i|^{(0)} \end{aligned}$$

7. le processus se répète jusqu'à ce que la tolérance suivante se vérifie.
 $\max(\Delta P, \Delta Q) \leq \varepsilon$.
8. On prend les résultats obtenus.

I.10.5. Les approximations dans la méthode de Newton-Raphson :

Pour une petite variation dans le module de la tension au J.d.B, la puissance active au J.d.B ne varie pas d'une façon appréciable. Même aussi pour une petite variation de l'angle de phase de la tension au J.d.B, la puissance réactive ne subit pas une variation appréciable. Donc on suppose que les éléments J2 et J3 de la matrice Jacobienne sont nuls :

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & 0 \\ 0 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad (\text{I-78})$$

I. 11. Conclusion :

L'importance de l'étude de l'écoulement de puissance est capitale pour l'obtention de tous les paramètres du réseau électrique, pour chaque nœud dont ils : Puissance (Active et Réactive) Tension (Module et Angle) Parmi les méthodes de résolution. Cette dernière a été appliquée dans différents réseaux avec et sans incorporation des dispositifs de compensation FACTS.

Chapitre II:

Control dynamique de la tension et puissance réactive

Chapitre II

Control dynamique de la tension et puissance réactive

II.1. Introduction :

La dérégulation du marché de l'électricité, qui concerne progressivement tous les pays, modifie profondément l'approche technico-économique dans l'exploitation et l'optimisation des réseaux électriques. C'est dans ce nouveau contexte que les spécialistes des réseaux électriques se voient de plus en plus confrontés à de nombreux défis. Le développement des dispositifs FACTS (*Flexible AC Transmission System*) ouvre de nouvelles perspectives pour une meilleure exploitation des réseaux par leur action continue et rapide sur les différents paramètres du réseau.

Les dispositifs FACTS, peuvent aider à s'affranchir de ces contraintes, C'est une alternative très favorable du point de vue technique, économique et environnement. Les dispositifs FACTS sont insérés dans un réseau pour satisfaire plusieurs besoins tels que :

- Améliorer le contrôle de la tension et la stabilité du réseau.
- Réduire des pertes actives totales.
- Compenser l'énergie réactive.
- Amortir les oscillations de puissance.
- Augmenter la capacité de transport de la puissance active.
- Maîtriser la répartition et les transits des puissances.
- Améliorer des oscillations de puissance et de tension susceptibles d'apparaître dans les réseaux à la suite d'un défaut.
- Améliorer la stabilité électromécanique des groupes de production.
- permettre un meilleur contrôle et une meilleure gestion de l'écoulement de puissance.
- Augmenter la capacité de transmission de puissance des lignes en s'approchant des limites thermiques de celle-ci.

Les dispositifs FACTS en générale permettent donc un contrôle amélioré des systèmes électriques déjà en place. Ces dispositifs font en général appel à de l'électronique de puissance. Ces éléments agissent en fait comme des impédances dont la valeur change enfonctions de l'angle d'amorçage. Cet angle d'amorçage constitue donc une variable décommande du système. Pour les différentes raisons évoquées dans l'introduction générale,

les dispositifs FACTS ont un rôle important à jouer dans le contrôle des transits de puissances dans le maintien de conditions d'exploitation sûres du réseau de transport. Ce chapitre a pour but de mettre en évidence les caractéristiques et le potentiel des différents FACTS développés à ce jour. Il commence par un bref rappel sur les différentes techniques de compensation (shunt, série et shunt-série). Le concept FACTS est ensuite présenté de manière générale et une classification des dispositifs est proposée.

II.2. Compensation Traditionnelle:

II.2.1. Compensation traditionnelle shunt: [15,04]

La compensation parallèle (*shunt*) consiste à enclencher des condensateurs shunt et/ou des disjoncteurs à différents endroits sur le réseau pour -modifier l'impédance des lignes, dans le but de maintenir des niveaux de tension acceptables suivant l'état de charge du réseau. Ces éléments permettent de compenser les réseaux en puissance réactive et de maintenir la tension dans les limites contractuelles. Cette technique de compensation est dite passive car elle fonctionne en tout ou rien. C'est-à dire qu'elle est soit en service, par exemple lorsqu'une inductance shunt est enclenchée, soit complètement hors service lorsque l'inductance est retirée. Lorsqu'elle est en service, aucune modification des inductances ou des condensateurs n'est effectuée pour essayer de contrôler la tension ou l'écoulement de puissance.

D'après la figure 2.1, on voit que ces équipements permettent aussi d'augmenter la puissance active transitée. La puissance transitée peut être augmentée de 50% pour une compensation au niveau de la charge et de 100% pour une compensation au point milieu.

Lorsque le réseau n'est pas ou peu chargé, c'est-à-dire que l'impédance de la charge est très élevée, la tension sur la ligne a tendance à monter considérablement (effet FERRANTI), cette augmentation de tension est d'autant plus importante que le réseau est exploité à tension élevée et que les lignes sont longues. Pour réduire la tension en bout de ligne, il faut augmenter artificiellement l'impédance caractéristique de la ligne en diminuant sa capacité shunt. Des inductances shunt sont enclenchées à différents postes sur le réseau. Cependant, lorsque le réseau est fortement chargé, dans ce cas l'impédance de la charge est très faible et la tension a tendance à diminuer sur le réseau. Pour compenser cet effet, il s'agit de diminuer artificiellement l'impédance caractéristique de la ligne pour la rendre égale, ou la plus près possible, de l'impédance de la charge. Les réactances shunt deviennent inutiles. Pour maintenir la tension dans les limites contractuelles, le gestionnaire du réseau doit donc augmenter la capacité shunt de la Ligne et connecter des condensateurs shunt dans différents postes du réseau selon la charge.

Les batteries de condensateurs vont compenser la puissance réactive absorbée par la charge et ainsi éviter la transmission de puissance réactive sur de longues distances. De même que les réactances, ces batteries de condensateurs doivent être connectées/déconnectées par des disjoncteurs.

Dans le cas théorique où la compensation est répartie sur toute la longueur de la ligne, le degré de compensation shunt d'une ligne est défini comme étant le rapport de la valeur absolue de la Susceptance du compensateur par unité de longueur (B_{sh}) sur la Susceptance de capacité de ligne par unité de longueur.

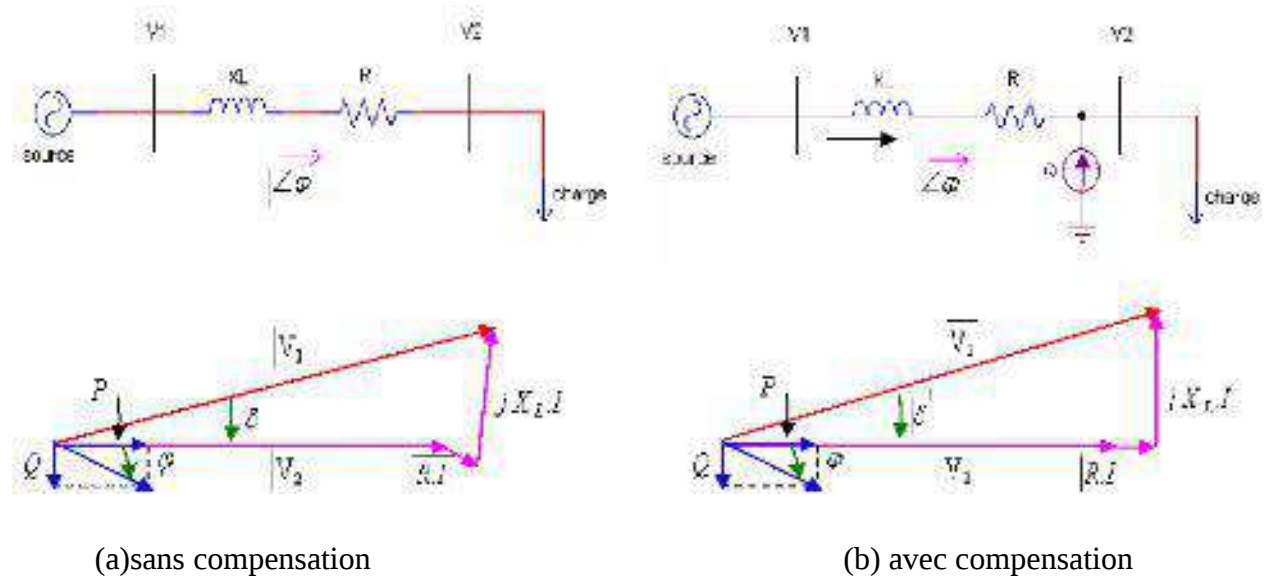


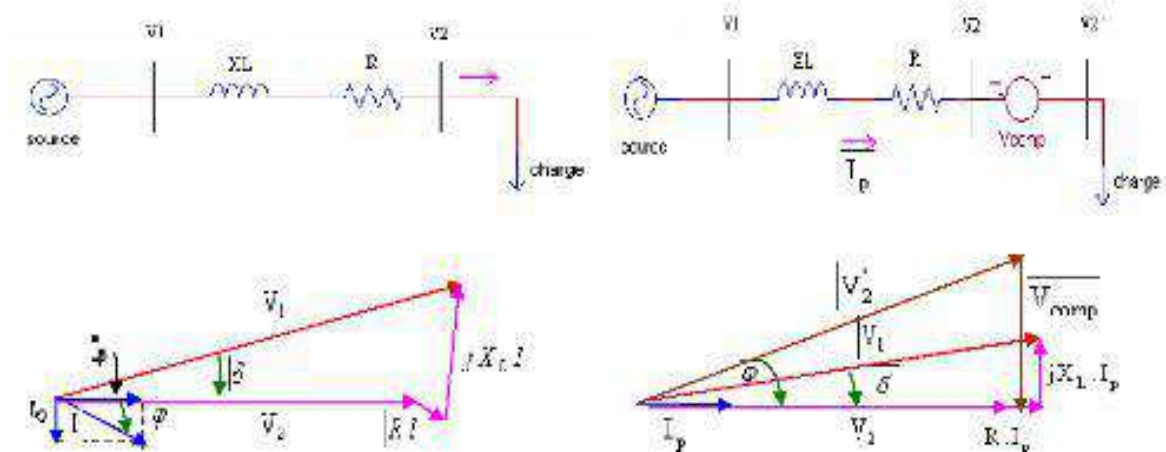
Figure 2.1. Principe de compensation shunt dans un réseau radial

On constate aussi que la longueur électrique de la ligne est également modifiée avec la compensation shunt. La compensation réactive shunt est un bon moyen pour contrôler l'impédance caractéristique, dans le but de maintenir un niveau de tension acceptable sur les lignes de transport d'électricité. Par contre, elle ne constitue pas un bon moyen pour augmenter la puissance maximale transportable. En pratique, la compensation shunt passive est utilisée principalement pour maintenir la tension à toutes les barres du réseau à un niveau proche de la tension nominale, et ce pour les différents niveaux de charge du réseau. Il est clair que les équipements de compensation ne sont pas distribués de façon uniforme le long de la ligne comme le sont les inductances et les condensateurs du circuit équivalent d'une ligne. La compensation est localisée dans des postes qui sont répartis à des endroits stratégiques sur la ligne. Puisque la compensation n'est pas répartie d'une façon uniforme, il est impossible de maintenir la tension à sa valeur nominale tout point de la ligne. Il est donc important de bien sélectionner les endroits où la compensation shunt est installée pour éviter que la tension s'écarte trop de sa valeur nominale.

II.2.2. Compensation traditionnelle série: [03]

la puissance active échangée entre deux systèmes peut être augmentée si l'on réduit l'impédance de la liaison. C'est ce que réalise la compensation série par l'adjonction d'une batterie de condensateurs d'impédance X_c en série avec la ligne. Les condensateurs ajoutés ont une capacité fixe qui ne varie pas dans le temps.

Cette compensation permet d'une part de diminuer Z_o et d'autre part de diminuer la longueur électrique de la ligne.



(a) sans compensation

(b) avec compensation

Figure 2.2. Principe de compensation série dans un réseau radial

Artificiellement l'impédance de la ligne est donc réduite de X_L à $(X_L - X_C)$ et le transit de puissance est augmenté. De plus, comme le montre le diagramme de Fresnel illustré sur la figure 2.2. En pratique, la compensation série est localisée dans des postes situés à des endroits stratégiques sur les lignes. Pour mieux comprendre son influence il est utile de considérer qu'elle est répartie uniformément sur toute la longueur de la ligne. Dans ce cas, le degré de compensation série se définit comme étant la valeur absolue du rapport de la susceptance inductive série de la ligne par unité de longueur sur la susceptance par unité de longueur de la capacité série qui est ajoutée. Plus le degré de compensation est élevé plus l'impédance virtuelle est faible, ce qui contribue à augmenter la puissance maximale transportable par la ligne. D'autre part, la longueur électrique virtuelle de la ligne s'écrit

Pour transporter la puissance de façon stable il est nécessaire que l'angle de transmission α soit inférieur à 90 degrés, et idéalement assez faible pour prévoir les cas d'un appel de puissance à la suite d'une perturbation sur le réseau. Si le profil de la tension sur la ligne compensée est pratiquement plat, ce qui est le cas lorsque la ligne est bien compensée, la

puissance absorbée par la charge est pratiquement égal à la puissance virtuelle de la ligne. La compensation série augmente la puissance maximale transportable, en diminue l'angle de transmission de la ligne. Ces deux effets font en sorte qu'elle est un moyen très efficace d'augmenter la limite de stabilité en régime permanent du réseau et par conséquent la stabilité dynamique et transitoire. Cependant du fait du nombre limité d'opérations et des délais d'ouverture/fermeture des disjoncteurs, ces réactances et condensateurs connectés en parallèles ou en séries ne doivent pas être commutés trop souvent et ne peuvent pas être utilisés pour une compensation dynamique des réseaux. Dans le cas où le contrôle du réseau nécessite des commutations nombreuses et/ou rapides, on fera appel à des dispositifs FACTS.

II.3. Définition des FACTS:

les systèmes de dispositifs FACTS sont employés pour le contrôle dynamique de tension, impédance et angle de phase de tension afin d'améliorer le comportement dynamique des réseaux ainsi que la répartition et l'écoulement des puissance dans les réseaux. Selon IEEE, les FACTS, sont définis comme suit:

Ce sont des systèmes à courant alternatif incorporant des éléments d'électronique de puissance et d'autres contrôleurs statiques pour l'amélioration de la contrôlabilité et la capacité du transit de la puissance [14].

II.4. Classification des dispositifs FACTS:

Les dispositifs FACTS peuvent être classés en trois catégories figure (2.3)

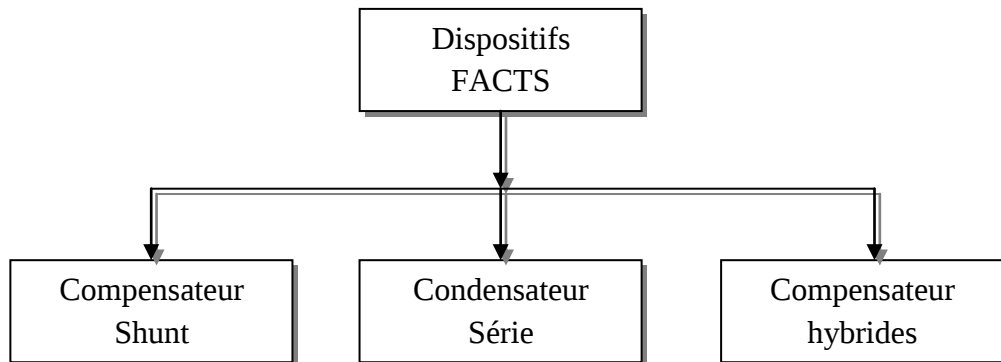


Figure 2.3. Classification des dispositifs FACTS selon la catégorie

II.4.1 Compensateurs shunts:

Les compensateurs shunts injectent du courant au réseau via le point de leur raccordement. Leur principe est basé sur une impédance variable est connectée en parallèle sur un réseau, qui consomme (ou injecte) un courant variable. Cette injection de courant modifie les puissances actives et réactives qui transitent dans la ligne. Les compensateurs shunts les plus utilisés sont les SVC et les STATCOM. [16, 17]

II-4-1.1. Compensateurs parallèles à base de thyristors:

a- SVC (Statice Var Compensator):

Compensateur Statique de Puissance Réactive (CSPR) (acronyme anglais de Stat Var Compensator SVC) est un équipement de compensation parallèle à base d'électronique de puissance (Thyristor) capable de réagir en quelques cycles aux modifications du réseau. Il permet entre autres la connexion de charges éloignées des centres de production et la diminution des effets des défauts ou des fluctuations de charges.

Un SVC est généralement constitué d'un ou plusieurs batteries de condensateurs fixes (CF) commutables soit par disjoncteur, ou bien par thyristors (Thyristor Switched Capacitor TSC) et d'un banc de réactances contrôlable (Thyristor controlled Reactor) (RCT) et par des réactances commutables (Thyristor Switched Reactor TSR), et d'autre part on trouve des filtres d'harmoniques. Pour avoir un temps de réponse plus rapide et pour éliminer les parties mécaniques les RCT (Réactances commandés par thyristor) ont fait leur apparition vers la fin de années soixante. Elles sont constituées d'une inductance en série avec un gradateur (deux thyristor tête-bêche). Chaque thyristor conduit pendant moins demi-période de la pulsation du réseau. Le retard à l'amorçage α permet de régler l'énergie réactive absorbée par le dispositif. (Figure 2.4)[18]

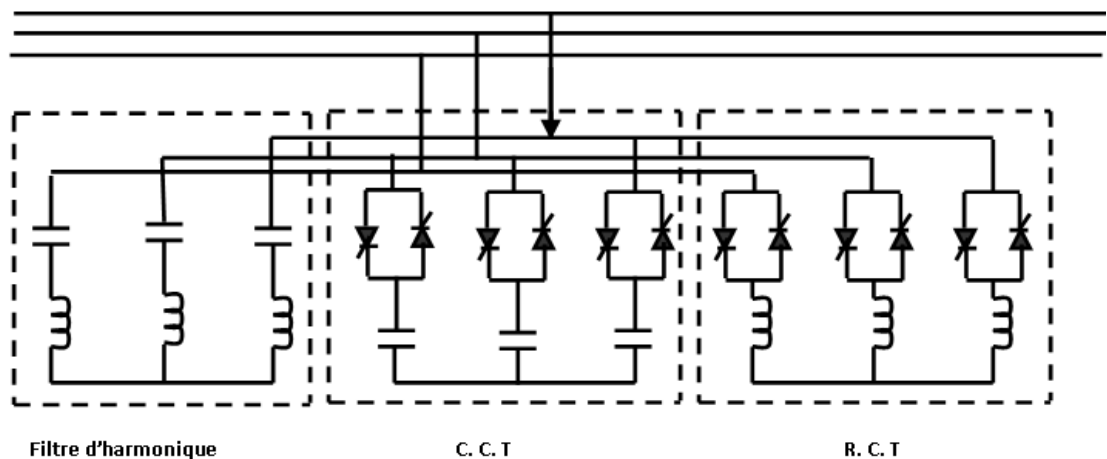


Figure2.4. Schéma du SVC

b- Principe de fonctionnement

La figure (2.5) 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 continu[19]

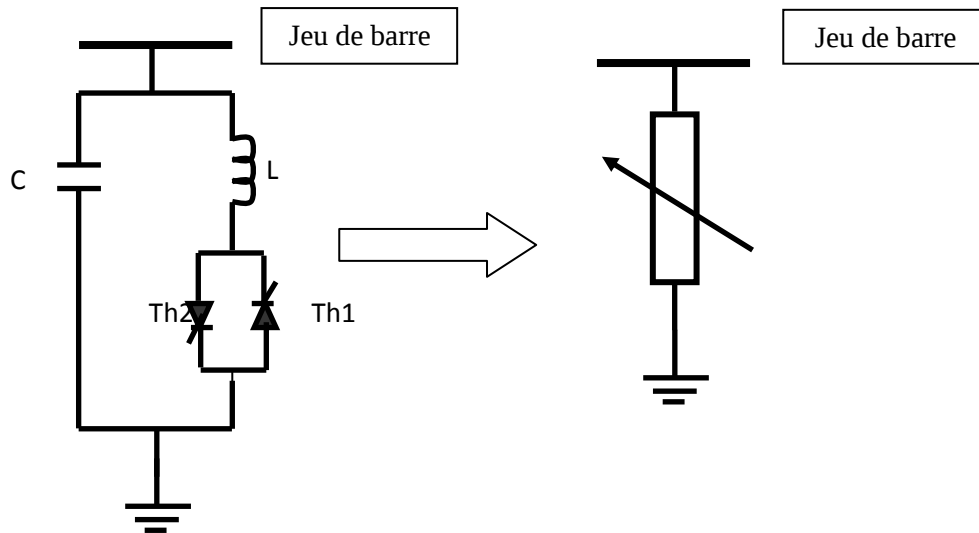


Figure 2.5.présentation d' un Compensateur SVC

Le RCT ne peut absorber que de l'énergie réactive, puisque il est constitué d'élément inductif. 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 sur les harmoniques à éliminer. L'association 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 a été installé en 1979 en Afrique de Sud. La caractéristique statique de SVC est donnée par la figure (2.6) trois zones sont distinctes :

- Pour $V_{MIN} \leq V \leq V_{MAX}$: est une zone de réglage où l'énergie réactive est une combinaison des CCT et RCT.
- Pour $V > V_{MAX}$: est une zone où le RCT donne son énergie maximale (butée de réglage). Les condensateurs sont déconnectés.
- Pour $V < V_{MIN}$: est une zone où seule les capacités sont connectées au réseau.

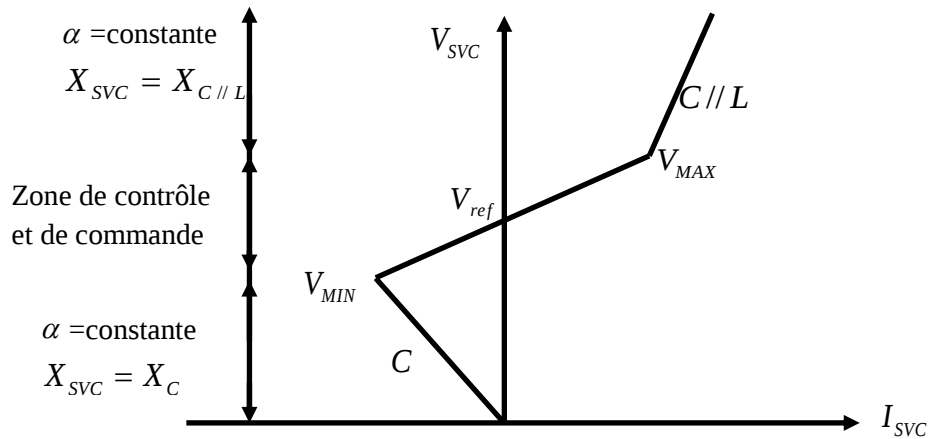


Figure 2.6. Fonctionnement du Compensateur SVC

II.4.2. Compensation série

Des condensateurs série ont été utilisés avec succès pendant de nombreuses années pour améliorer la stabilité et les aptitudes de charge de réseaux de transport haute tension. Ils travaillent par l'insertion de tension capacitive pour compenser la chute de tension inductive sur les lignes, c'est-à-dire qu'ils réduisent la réactance effective des lignes de transport.

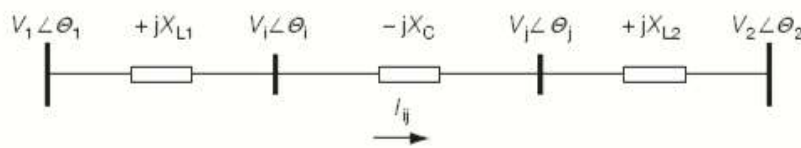


Figure 2.7. Principe de la compensation série

II.4.2.1. Principe de fonctionnement

Les effets de la compensation série sur un système énergétique peuvent se résumer comme suit. La tension insérée par un condensateur série est proportionnelle et perpendiculaire au courant de la ligne. Ce faisant, la puissance réactive fournie par le condensateur est proportionnelle au carré du courant. Il en résulte que le condensateur série a un effet d'autorégulation. Lorsque la charge du système croît, la puissance réactive produite par le condensateur série augmente également. Régulation de la tension en régime permanent et prévention des chutes de tension.

Un condensateur série est en mesure de compenser la chute de tension sur une ligne de transport due à l'inductance série. A faible charge, la chute de tension est plus faible et la tension de compensation série est plus basse. Lorsque la charge augmente et que la chute de tension devient plus importante, la contribution par le compensateur série augmente et la tension du système est réglée de manière correspondante. La compensation série élargit aussi

la zone de stabilité de la tension en réduisant la réactance de la ligne. De cette façon, elle aide à prévenir les chutes de tension. Montre que la stabilité de la tension s'accroît de P_1 au niveau P_2 plus élevé [19]

II.4.2.2. Application

a- Amélioration du profil de tension d'un système de puissance simple

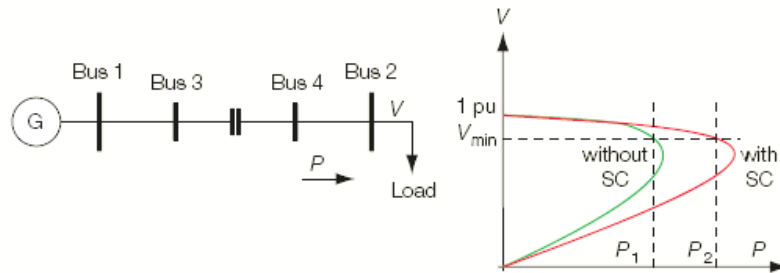


Figure 2.8. Amélioration du profil de tension d'un système de puissance simple

b- Amélioration de la marge stabilité transitoire à l'aide d'un condensateur série

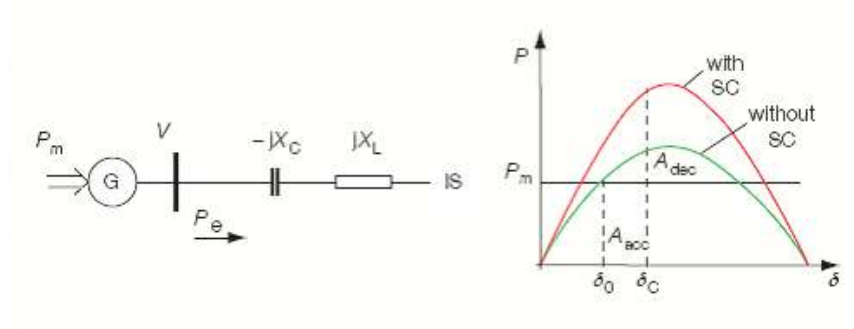


Figure 2.9. Amélioration de la marge stabilité transitoire à l'aide d'un condensateur série

c- Commande du flux d'énergie

La compensation série peut être utilisée dans les systèmes énergétiques pour la commande du flux d'énergie en régime permanent. En cas de lignes de transport avec une capacité thermique suffisante, la compensation peut soulager des surcharges éventuelles sur d'autres lignes parallèles.[20]

II.4.2.3. Compensateurs séries à base de thyristor

a- Le Compensateur Série Contrôlé par Thyristors (TCSC)

Est composé d'une inductance en série avec un gradateur à thyristors, tout en parallèle avec un condensateur. Si les thyristors sont bloqués, le TCSC a une impédance fixe qui est celle du condensateur. Si les thyristors sont commandés en interrupteur électronique et en pleine

conduction, l'impédance du TCSC est encore fixe et vaut l'impédance équivalente du condensateur en parallèle avec l'inductance.

b- Principe de fonctionnement

Les configurations TCSC comprennent des inductances commandées par thyristors en parallèle avec des sections d'un banc de condensateurs. Cette combinaison permet la régulation douce sur une vaste gamme de la réactance capacitive à la fréquence fondamentale. Le banc de condensateurs de chaque phase est monté sur une plate-forme pour assurer l'isolation complète contre la terre. La valve contient une chaîne de thyristors haute puissance branchés en série. La bobine d'inductance est du type sans fer. Une varistance à oxyde métallique est brochée sur le condensateur pour éviter les surtensions.

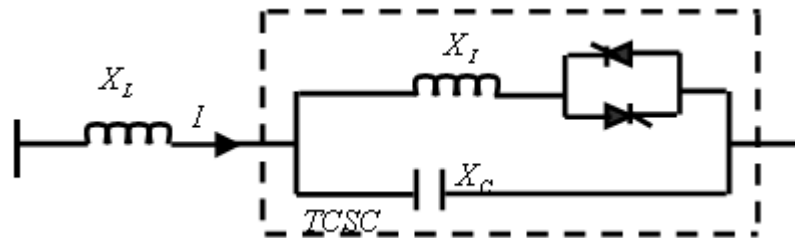


Figure 2.10. Insertion d'un TCSC sur une ligne

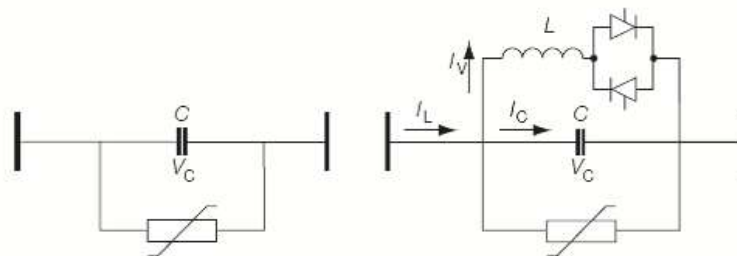


Figure.2.11. Deux schémas de compensations série typique avec un condensateur série fixe et un TCSC

II.5. Compensateurs hybrides série – parallèle :

II.5.1. Contrôleur universelle de l'écoulement de puissance (UPFC) :

Le contrôleur unifié d'écoulement de puissance (UPFC) est un dispositif FACTS qui combine à la fois les avantages de contrôle de la compensation série et shunt, par son ajustement simultané ou séparé des paramètres clés du réseau électrique.

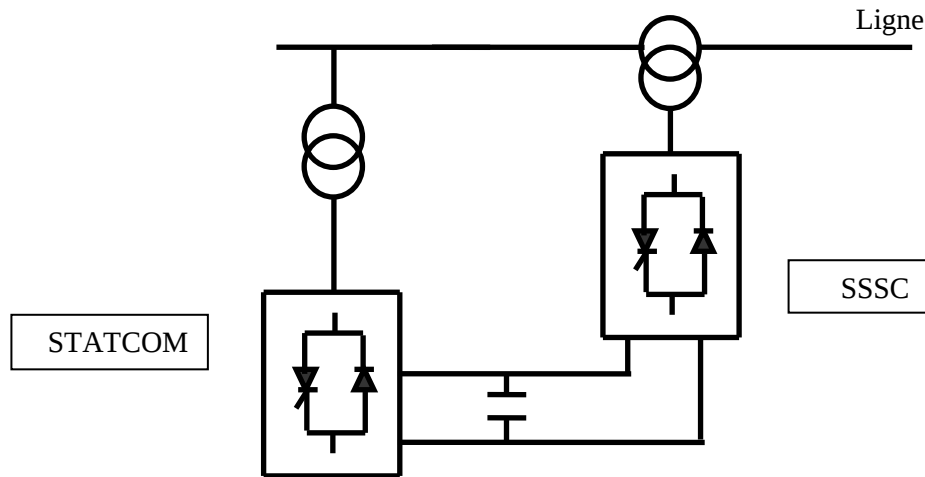


Figure .2.12. Compensateur Unifier UPFC (Unified power flow Controller)

Le contrôleur de transit de puissance unifié UPFC (Unified Power Flow Controller) est constitué de deux convertisseurs de commutation exploités avec une liaison CC commune.

a- Principe de fonctionnement :

Dans, le convertisseur 2 accomplit la fonction principale de l'UPFC, en injectant en série une tension CA avec une amplitude et un angle de phase réglable dans la ligne de transport à l'aide d'un transformateur série. La fonction fondamentale du convertisseur 1 réside dans la livraison ou l'absorption de puissance effective demandée par le convertisseur 2 à la liaison CC commune. Il peut aussi produire ou absorber de la puissance réactive selon la demande et fournir une compensation shunt réactive indépendante à la ligne de transport. Le convertisseur 2 produit ou absorbe la puissance réactive nécessaire localement et produit de la puissance active comme résultat de l'injection série de tension.

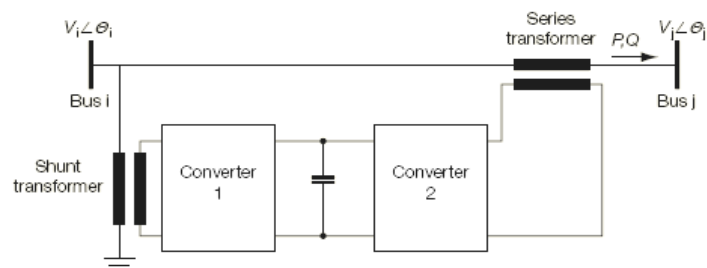


Figure 2.13. Configuration de base du circuit d'un contrôleur de transit de puissance unifié (UPFC)

b- Application :

Un UPFC peut régler simultanément la puissance active et la puissance réactive. En général, il possède trois variables de commande et peut s'exploiter en différents modes. Le convertisseur

branché en dérivation règle la tension du bus i dans et le convertisseur branché en série règle les puissances active et réactive, ou la puissance active et la tension au nœud de branchement série. En principe, un UPFC est capable d'accomplir les fonctions des autres dispositifs FACTS qui ont été décrits, à savoir le réglage de la tension, la répartition du flux d'énergie et l'amélioration de la stabilité. [20]

II.6. Comparaison des FACTS les plus utilisés :

Le tableau (II.1) suivant montre les performances qui guident l'utilisateur dans son choix pour chaque compensateur. [26]

FACTS Performance	SVC	TCSC	UPFC
Transit de puissance active	+	+++	+++
Contrôle de la puissance réactive	+++	/	+++
Contrôle de la tension	+++	+	+++
Contrôle de l'angle de transport	/	+++	+++
Contrôle dynamique de la tension	++	/	+++
Stabilité	++	++	+++
Oscillation de puissance	++	+++	+++

II.7. 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.

Dans les dispositifs FACTS, les interrupteurs électroniques disposent de vitesses de commande très élevées être rencontrent pas les problèmes d'usure de leurs prédécesseurs. De

ce fait, les FACTS possèdent une très grande fiabilité et une flexibilité pratiquement sans limite. Dans un réseau électrique, les FACTS permettent de remplir des fonctions tant, en régime stationnaire qu'en régime transitoire. Ils agissent généralement en absorbant ou en fournissant de la puissance réactive, en contrôlant l'impédance des lignes ou en modifiant les angles des tensions. En régime permanent, les FACTS sont utilisés principalement dans les deux contextes suivants :

- ❖ Le maintien de la tension à un niveau acceptable en fournissant de la puissance réactive lorsque la charge est élevée et que la tension est trop basse, alors qu'à l'inverse ils en absorbent si la tension est trop élevée.
- ❖ Le contrôle des transits de puissances de manière à réduire voire supprimer les surcharges dans les lignes ou les transformateurs ainsi que pour éviter les flux de bouclage dans le réseau. Ils agissent alors en contrôlant la réactance des lignes et en ajustant les déphasages.[21]

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.[21]

II.8. Les avantages, les inconvénients et les contraintes de latechnologie des dispositifs FACTS :[7]

A. Les avantages des dispositifs FACTS :

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

B. Les inconvénients :

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

II.9. Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre, en premier lieu les techniques de compensation conventionnelles (série et shunt), ainsi nous avons donné une définition et une classification des divers types de contrôleurs FACTS comme le SVC, TCSC, UPFC. Cette classification est adoptée comme classification universelle des systèmes FACTS. La plupart d'entre eux sont déjà en service dans la pratique. Si aujourd'hui les FACTS sont encore peu utilisés par rapport à leur potentiel, les évolutions techniques de l'électronique de puissance vont rendre les solutions FACTS de plus en plus compétitives face aux renforcements des réseaux.

Nous avons choisi d'étudier le SVC (Static Var Compensator) et TCSC, comme dispositifs FACTS pour contrôler et améliorer la tension et la puissance réactive dans un réseau de transport d'énergie électrique. Une étude profonde concerne la modélisation et l'application du contrôleur SVC dans l'écoulement de puissance sera détaillée dans le prochain chapitre.

Chapitre III:
Étude d'un
Compensateur
shunt(SVC) et série
(TCSC)

Chapitre III

Étude d'un Compensateur shunt(SVC) et série (TCSC)

III.1. Introduction :

Après avoir nous avons une présentation générale du concept « FACTS ». Une classification des différents types est proposée et les principaux dispositifs de chaque famille sont décrits, et présente aussi les différentes structures de FACTS (shunt, hybride et série).

Pour pouvoir observer l'impact de dispositif FACTS (TCSC) et (SVC) dans un réseau électrique, il est nécessaire de le représenté par de modèle mathématique approprié. Le modèle mathématique des convertisseurs de tension pour les différentes connexions dans un réseau électriques, série ou parallèle. [17]

Nous présentons la modélisation générale des deux dispositifs FACTS tels que le compensateur SVC et le compensateur TCSC.

III.2. Caractéristique d'un compensateur statique :

III.2.1. Caractéristique en V d'un compensateur statique :

Ajustons l'angle α des thyristors commandant la branche inductive à 90° , de façon à obtenir la pleine conduction. Le courant est alors à sa valeur maximal, la droite L//C (figure (3.1)) montre la relation entre la tension U et le courant I_{SVC} .

$$I_{SVC} = \frac{U}{X_L // X_C} \quad (III-1)$$

$$Q = \frac{U^2}{X_L} - \frac{U^2}{X_C} \quad (III-2)$$

Lorsque l'inductance est débranchée alors l'angle des thyristors est 180° et que le condensateur est en service, le courant total par phase sous une tension U est égale $\frac{U}{X_C}$.

La coutume est d'apposer un signe (-) à ce courant capacitif pour le distinguer du courant inductif. La relation entre le courant et la tension est alors une nouvelle droite, désignée C (figure (3.1)).

$$I_{SVC} = \frac{U}{X_C} \quad (III-3)$$

$$Q = -\frac{U^2}{X_C} \quad (III-4)$$

Les droites $L//C$ et C forment ensemble une « courbe en V » qui correspond aux limites inductive et capacitive du compensateur statique.

Cette figure pour : $X_C = 2 * X_L$

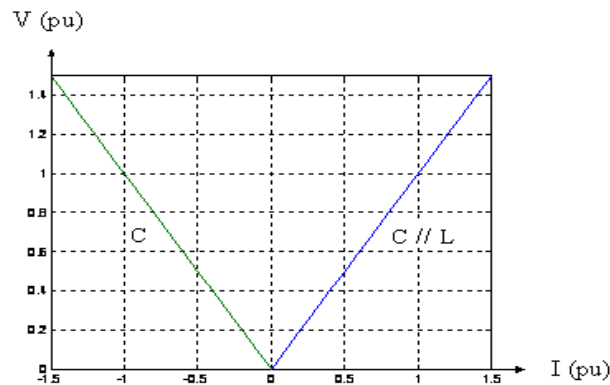


Figure 3.1.la caractéristique en V d'un SVC

D'après cette courbe, on a un courant capacitif lorsque le condensateur est en service et l'inductance est débranchée donc le montage génère une puissance réactive et cette puissance est en fonction de la capacité du condensateur et de la tension. Lorsque les deux sont en service le montage génère ou consomme une puissance réactive. [21]

III.2.2. Caractéristique $Q_{SVC}(I)$ d'un SVC :

Pour fixer le signe de la puissance réactive Q . Le compensateur est considéré comme un consommateur. La puissance réactive Q est positive lorsqu'elle est absorbée par le compensateur (comportement inductif). Si par contre le compensateur fournit de la puissance réactive (comportement capacitif), ce dernier est considéré comme étant négative, aussi bien un courant I .

Ces relations sont prises en compte sur la figure (3.2). Par conséquent, suivant les exigences imposées par les consommateurs et les lignes de transmission dans une sous-station, la puissance réactive Q doit varier entre une certaine valeur inductive Q_L et une certaine valeur capacitive Q_C avec : $Q_C = \frac{U^2}{X_C}$ [25].

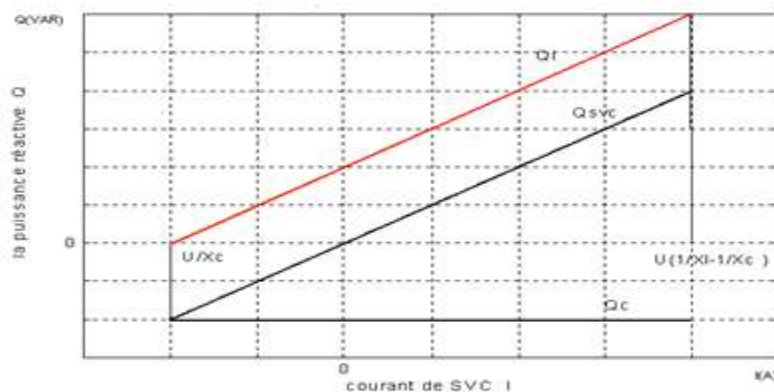


Figure 3.2. Variation de la puissance réactive en fonction du courant

III.3.Modélisation des compensateurs statiques : [26], [27]

Les modèles de SVC les plus courants sont des modèles statiques, car conçus pour des logiciels de répartition de charges[28].Lesquels sont destinés à des études statiques de réseau. Ils sont constitués d'éléments de réseaux : réactances, susceptance, nœuds, etc...

Le modèle statique est constitué d'une susceptance B_e reliée entre le nœud de charge et le potentiel nul. La susceptance est définie comme la partie imaginaire de l'admittance.

III.3.1.Modélisation de SVC :

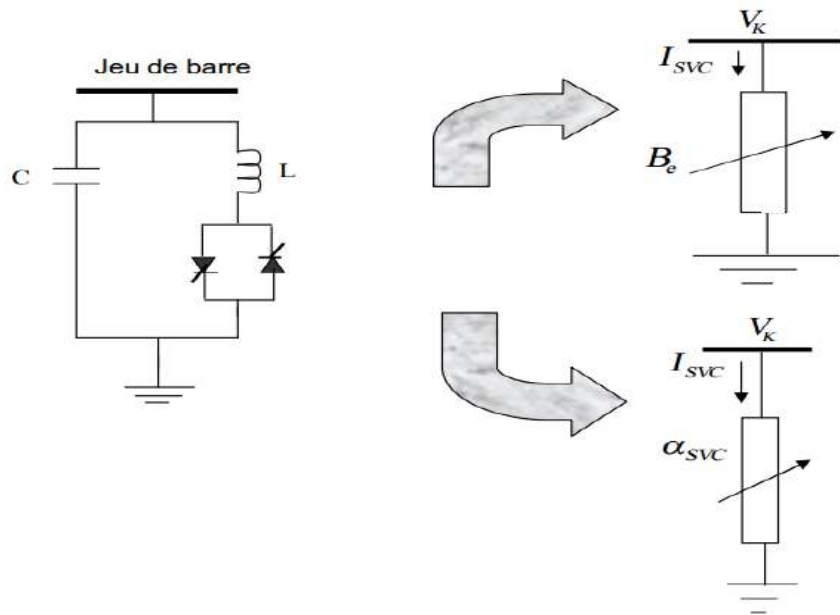


Figure .3.3. Présentation d'un compensateur SVC.

V_K : est la tension du réseau où est connecté le SVC.

B_e : ce la susceptance

V_{ref} : est la tension de référence dans le SVC

I_{SVC} : est le courant dans le SVC.

-On définit B_e la susceptance de SVC : $B_e = \frac{1}{X_e}$

$$B_e = \frac{\sin(2\alpha) - 2\alpha + \pi \left(2 - \frac{X_L}{X_C}\right)}{\pi X_L} \longrightarrow X_e = \frac{\pi X_L}{\sin(2\alpha) - 2\alpha + \pi \left(2 - \frac{X_L}{X_C}\right)} \quad (\text{III-5})$$

$$\text{Avec : } V = V_{ref} + X_{SL} I \quad (\text{III-6})$$

Et $X_{SL} = \{\pm 5\% \text{ où } \pm 2\%\}$ de la valeur de V_{ref} [29].

-Les équations qui décrivent le comportement du SVC dans le réseau sont :

$$V_I - V_{REF} + X_{SL} V_K B_e = 0$$

$$Q_{SVC} - V_K^2 B_e = 0$$

$$\pi X_C X_L B_e + \sin 2\alpha + \pi \left(2 - \frac{X_L}{X_C}\right) = 0$$

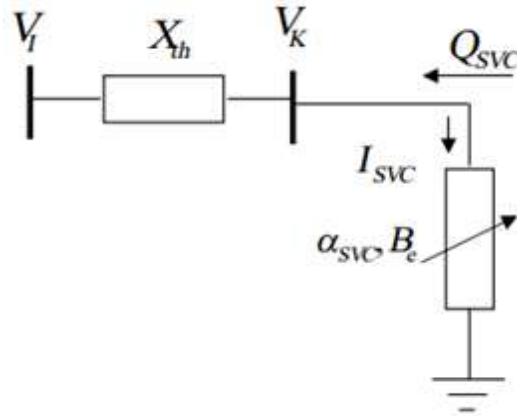


Figure .3.4.Représentation du circuit de base pour le compensateur SVC

Avec α représente la variation de l'angle d'amorçage des thyristors : α compris entre $[90^\circ \text{ et } 180^\circ]$.

La réactance contrôlée par les thyristors est en fonction de $X_L X_C$, α . On peut tracer la courbe de $B_e = f(\alpha)$, si $X_C = 1(pu)$, $X_L = 0.5(pu)$.

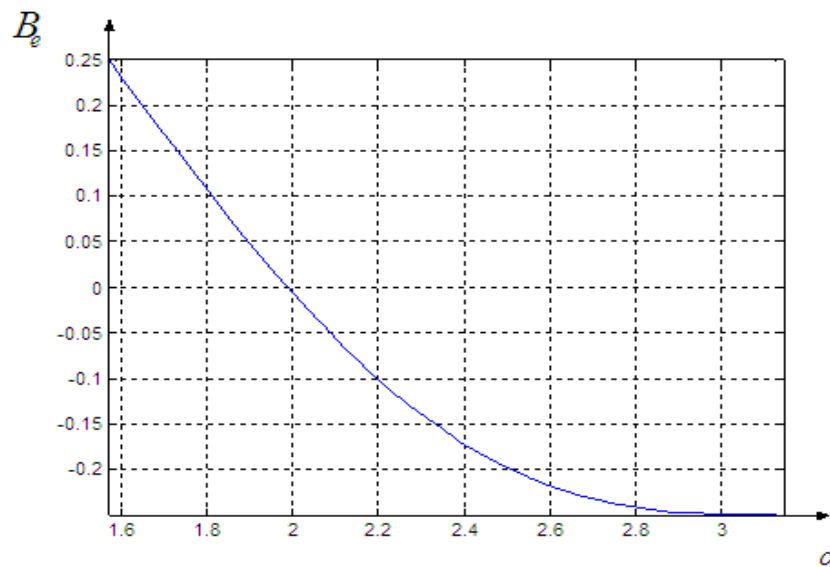


Figure .3.5.: la variation de la susceptance en fonction de l'angle d'amorçage.

On remarque que B_e change de signe lorsque α varie (figure (3.5))

- ✓ Pour certains valeurs de α , β est positif, donc le montage fonctionné en mode inductif .
- ✓ Pour les autres valeurs, B_e est négatif, donc le montage fonctionné en mode capacitif.
- ✓ Pour $\alpha = \alpha_0$, B_e est nulle donc le montage est représenté par une charge infinie.

Pour chaque valeur de X_L (X_C fixe), on obtient une caractéristique de B_e et pour choisir la première valeur il faut tenir compte de la nature de la charge à compenser et le type de ligne.

Par exemple :

-Pour $X_L=1(\text{pu}) = B_e \leq 0$, donc le SVC est toujours en mode capacitive.

-Par contre $X_L \leq 1(\text{pu})$, le SVC fonctionne en mode capacitive ou inductive, d'après l'angle α

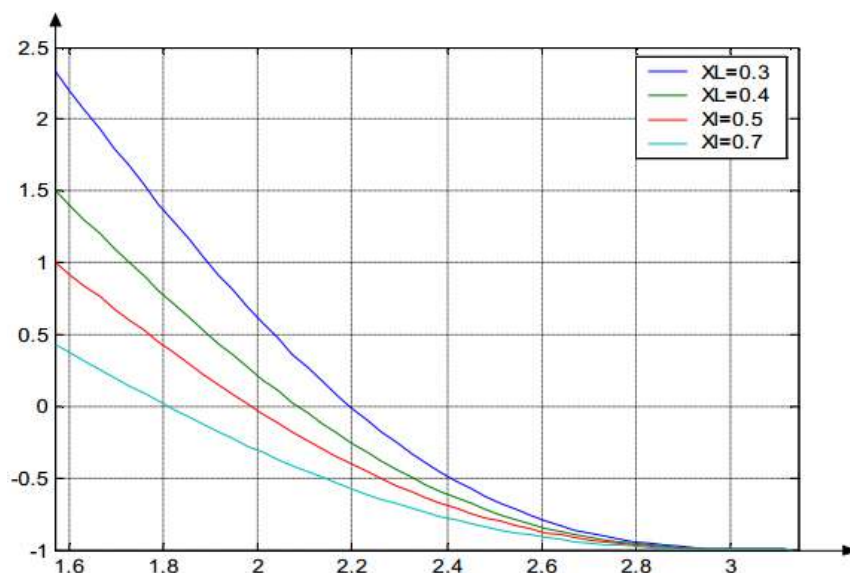


Figure .3.6. Variation de la susceptance en fonction de l'angle α

III.4. Implantation du compensateur statique dans le problème de l'écoulement de puissance :

L'étude de l'écoulement de puissance coordonne l'exploitation de toutes les ressources d'énergie et la répartition de la production entre les différents usagers[28], dont le but est d'obtenir l'exploitation la plus économique qui conduit à la meilleure utilisation de toutes les ressources. Des prévisions concernant la consommation et la production ont été faites par études approfondies, utilisant les méthodes numériques appliquées dans ce domaine.

On peut démontrer les propriétés de l'étude de l'écoulement de puissance par la discussion d'un système de n jeux de barres.

Chaque jeu de barres est alimenté d'un générateur. Les générateurs fournissent les énergies $S_{G1}, S_{G2}, \dots, S_{Gn}$, les jeux de barres. Les charges demandées sont prises de chaque jeu de barres à des quantités $S_{D1}, S_{D2}, \dots, S_{D3}$, les jeux de barres sont liés par des lignes qui sont caractérisés par Y_{bus} .

Les tensions des jeux de barres sont symbolisées par $V_1, V_2, \dots, V_n$

Respectivement. Pour ce réseau la puissance de chaque jeu de barres est donné par :

$P_i + jQ_i = (P_{G1} - P_{D1}) + j(Q_{G1} - Q_{D1})$ (III-7) La puissance apparente S_i injectée au jeu de barres i est donnée par l'équation

$$S_i = V_i \cdot I_i^* \rightarrow I_i = \frac{S_i^*}{V_i^*} = \sum_{K=1}^{K=n} Y_{i,K} V_K \quad (\text{III} - 8)$$

$$S_i^* = P_i - jQ_i = \left(\sum_{K=1}^{K=n} Y_{i,K} V_K \right) V_i^* \quad (\text{III} - 9)$$

I_i : le courant qui entre dans le jeu de barres i .

$$V_i = \frac{1}{Y_{i,i}} \left(\frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} - \left(\sum_{K=1, K \neq i}^{K=n} Y_{i,K} V_K \right) \right) \quad (\text{III} - 10)$$

-Pour le jeu de barres de contrôle :

$$Q_i = Q_{SVC} - Q_D \rightarrow Q_{SVC} = Q_i + Q_D \quad (\text{III-11})$$

Pour le réglage flexible de la tension au niveau des jeux de barres, on calcule la valeur de L'énergie réactive Q_i nécessaire pour ramener la tension V_i à la tension désiré V_{ref} puis on calcule la susceptance en aboutissant enfin à la valeur de l'angle.

Cette tension varie suivant une pente de régulation du compensateur statique. On peut donner un organigramme qui décrit les étapes de fonctionnement du SVC dans un réseau électrique.

Le système de commande est basé sur les équations de la tension, susceptance et l'énergie réactive fournie par le compensateur.

Le compensateur statique SVC permet de stabiliser très rapidement la tension de réseau à la valeur de consigne. Le système de commande lit en permanence la tension mesurée au

primaire du transformateur de couplage. Cette tension est comparée avec la valeur de consigne. Si la tension change à la suite d'une manœuvre ou d'une instabilité de réseau.

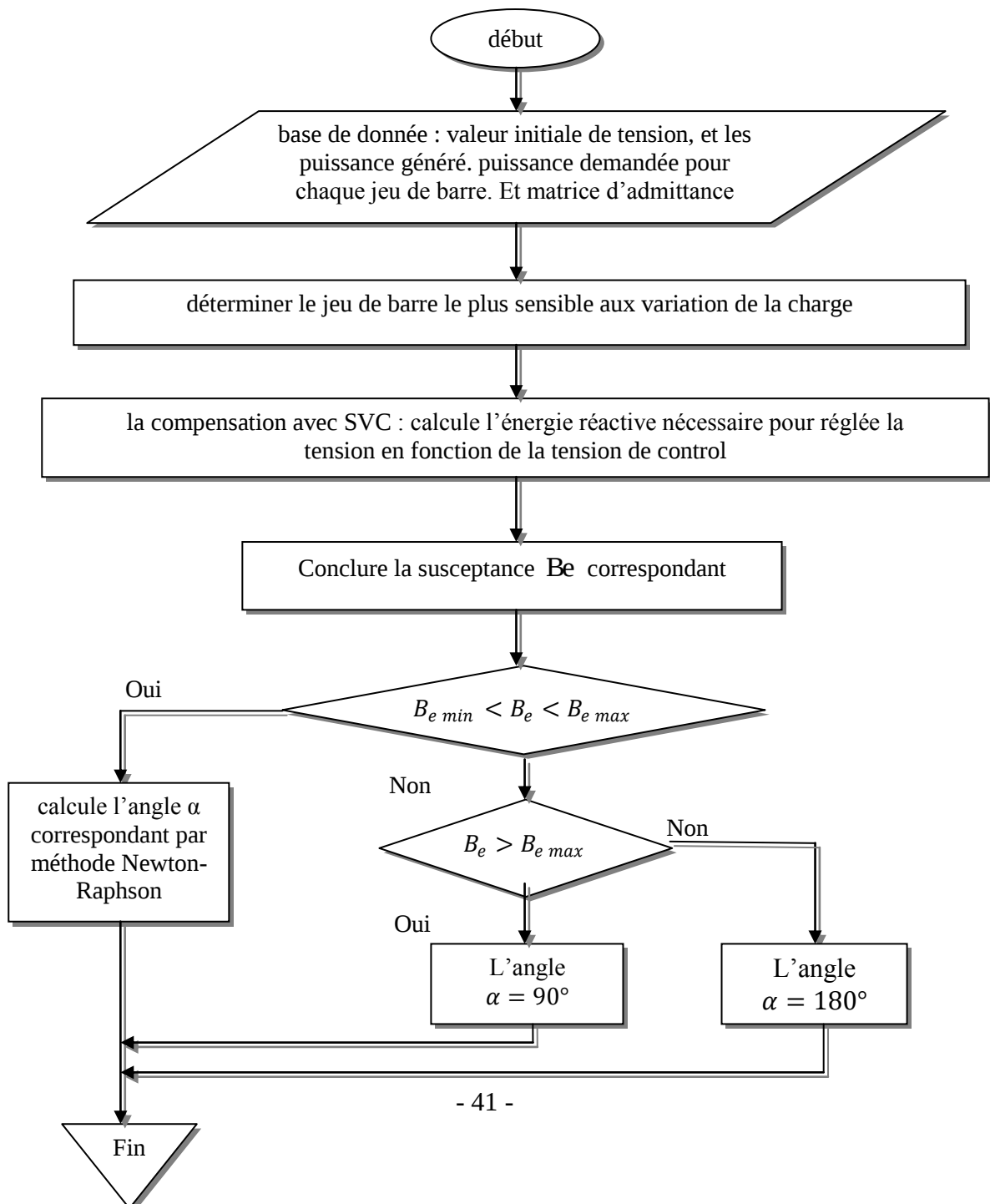
L'erreur est détectée par le système de commande. Celui-ci réajuste automatiquement la puissance réactive absorbée ou générée, et l'angle α de l'inductance. La susceptance du SVC vue du primaire du transformateur :

$$B_p = \frac{1}{X_T + X_e} \quad (\text{III} - 12)$$

Les limites de B_p sont déterminées à partir $B_e(\min)$ et $B_e(\max)$.

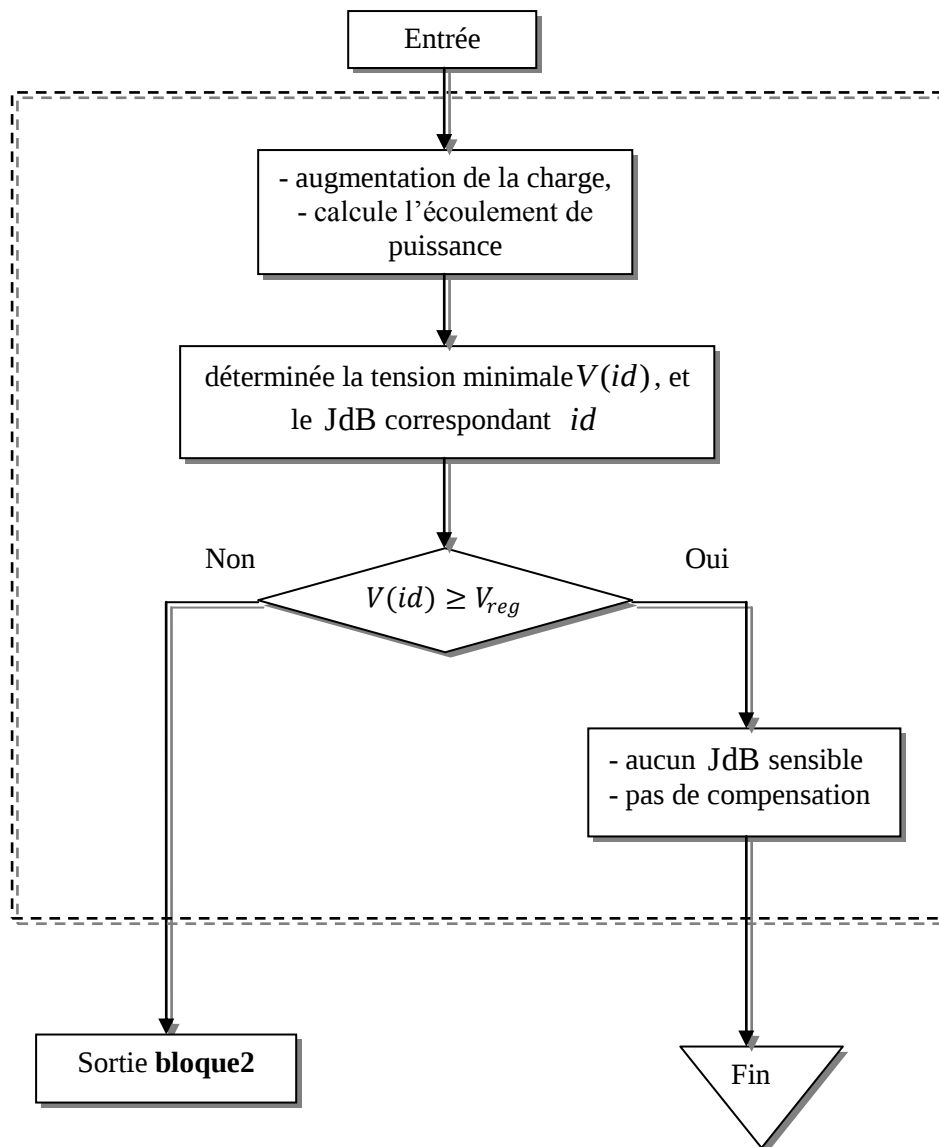
La tension est réglée suivant la caractéristique représentée par l'équation (III – 12). [27]

III.5. L'organigramme globale de l'intégration de SVC [27. 30]:

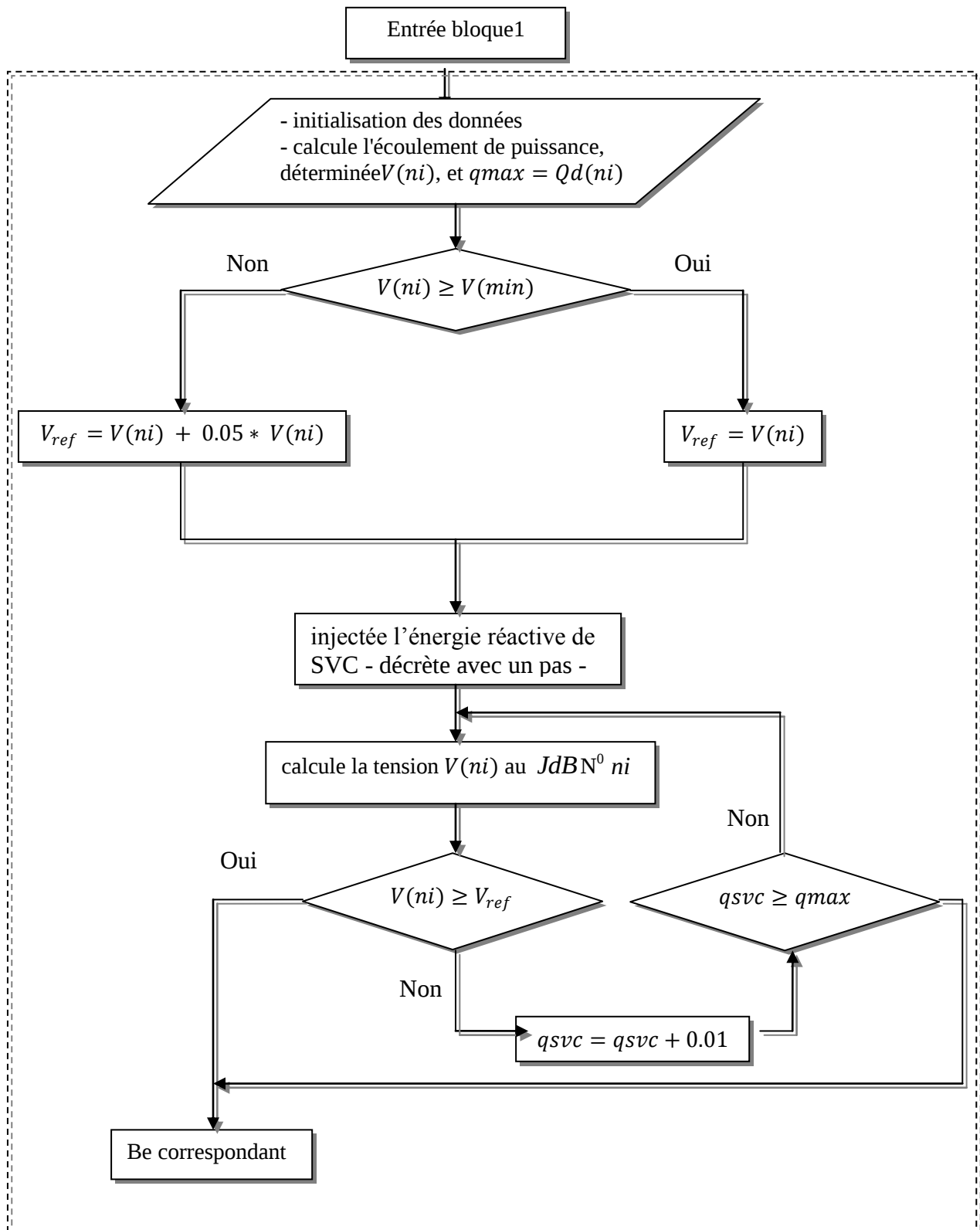


III.5.1. L'organigramme détaillée :

Bloque 1 : déterminer le jeu de barre le plus sensible aux variation de la charge.



Bloque 2 : la compensation avec SVC : calcule nécessaire l'énergie réactive pour régler la tension en fonction de la tension de control.



III.6.Control des transits de puissances par dispositif FACTS (TCSC) :

Les capacités séries contrôlées par thyristor (TCSC), utilisant une électronique de puissance dernier cri, peuvent aider à s'affranchir de ces contraintes, dans tous les cas où il est nécessaire de transporter de grandes quantités d'énergie sur de longues distances ou lors de la mise en place de liaisons entre pays ou entre régions [24]. C'est une alternative très favorable du point de vue technique, économique et environnemental.

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, de l'amortissement des oscillations de puissance et de la stabilité de la tension.
- ❖ Réduction des risques de résonance hypo synchrone.
- ❖ Interconnexion des réseaux
- ❖ Compensation séries contrôlée.

Les caractéristiques d'un TCSC sont :

- La conception matérielle est adaptée à la tension maximale qui doit être supportée.
- Le débit $MVar$ du banc de condensateurs est proportionnel à la tension maximale produite et le courant maximal correspondant.
- Un control avancé, particulièrement pour le mode atténuation des résonances synchrones(SSR).
- Un nombre sans restriction d'opérations et de séquences.
- Un ajustement fréquent du degré de compensation pour l'atténuation des SSR et de l'amortissement des oscillations de courant.

III.6.1.Modélisation du TCSC :

La compensation série est la meilleure technique actuellement connue pour accroître la capacité de transfert de puissance des lignes de transmission. Les condensateurs séries fonctionnent en insérant une source de tension en série avec la ligne de transmission avec une polarité inverse à celle de la chute de tension à travers la ligne.

L'effet apparent est la diminution de la réactance apparente de la ligne de transmission.

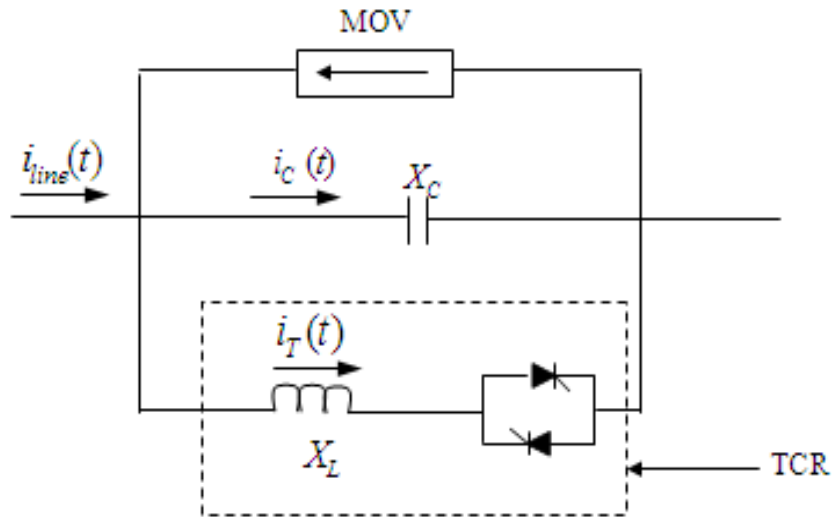


Figure .3.7.:Schéma d'un TCSC.

$u_{c(t)}$: est la tension en borne de la condensateur

$i_{t(t)}$: est le courant a travers le thyristor.

$i_{line(t)}$: est le courant transite dans la ligne.

—Analyse du circuit d'un TCSC et ses principales fonctionnalités comme les composantes fondamentales de la tension et du courant sont contrôlés, le TCSC devient analogue à une impédance contrôlable, qui est le résultat de la mise en parallèle de la réactance équivalente d'un composant TCR et une capacité.

Notons par :

$$Z_{TCSC} = jX_{TCSC}$$

L'impédance équivalente du TCSC.

$$Z_{TCR} = jX_{TCR} = j \frac{X_L \pi}{2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha}$$

L'impédance équivalente du TCR.

$$Z_C = -jX_C$$

L'impédance de la capacité

On peut écrire :

$$Z_{TCSC} = Z_C // Z_{TCR} = \frac{jX_C \cdot jX_{TCR}}{-jX_C + jX_{TCR}} = j \frac{X_C X_L}{X_C - X_{TCR}} = j \frac{X_C X_L}{\frac{X_C}{\pi} (2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha) - X_L}$$

D'où :

$$X_{TCSC}(\alpha) = j \frac{X_C X_L}{\frac{X_C}{\pi} (2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha) - X_L}$$

$$X_{TCSC} = X_C - (X_C + X_{LC}) \frac{2\sigma + \sin 2\sigma}{\pi} + \frac{4X_{LC}^2 \cos^2 \sigma}{X_L} \left(\frac{\rho \tan \rho \sigma - \tan \sigma}{\pi} \right) \quad (\text{III-13})$$

$$\sigma = \pi - \alpha, \omega_0 = 1/\sqrt{LC} \cdot \rho = \omega_0/\omega, X_{LC} = \frac{X_C X_L}{X_C - X_L}$$

X_C : La réactance capacitive nominale ;

X_L : La réactance inductive.

α :Angle d'amorçage

Le dispositif peut opérer en trois modes différents :

- a) Mode hors circuit : les thyristors sont en conduction pleine
- b) Mode bloqué : les thyristors sont bloqués
- 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° jusqu'à une valeur maximum dans une plage de fonctionnement inductif et de fonctionnement capacitif.

La valeur maximale de l'impédance inductive et la valeur minimale de l'impédance capacitive devraient être prises en compte dans la conception du dispositif pour empêcher une résonance parallèle entre le condensateur et le TCR .à la fréquence fondamentale.

III.6.2.Implantation de TCSC dans le problème de l'écoulement de puissance :

Le modèle d'injection de TCSC sans et avec pertes est dérivé. Figure (3-8) montre le schéma de circuit équivalent d'un TCSC ce qui est :

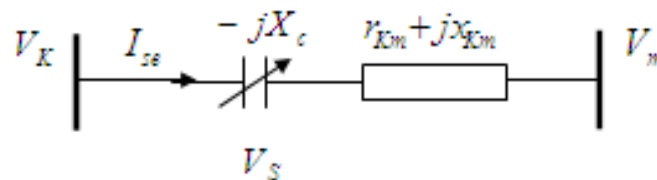


Figure .3.8. Schéma équivalent d'un TCSC.

Situé entre les jeux de barres K et m dans le système de transmission.
du schéma 2, nous avons :

$$\bar{I}_{se} = \frac{\bar{V}_K - \bar{V}_m}{r_{Km} + j(x_{Km} - x_c)} \quad (\text{III-14})$$

L'influence du condensateur est équivalente à une source de tension qui dépend des tensions $\bar{V}_K$ et $\bar{V}_m$. Le modèle d'injection est obtenu en remplaçant la tension de la source par une source de courant équivalent I_S comme montré dans la figure (3.9)

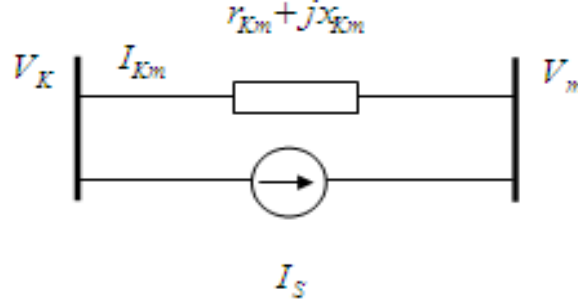


Figure .3.9. Remplacement V_s par I_s

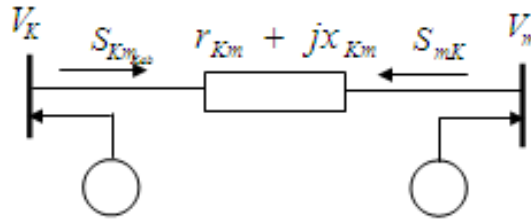
$\bar{V}_s = -jX_C I_{se}$, nous avons.

$$\bar{I}_s = \frac{\bar{V}_s}{r_{Km} + jx_{Km}} = \frac{-jx_c \bar{I}_{se}}{r_{Km} + jx_{Km}} \quad (\text{III-15})$$

Le source de courant correspondent aux puissances injectées $\bar{S}_{Ks}$ et $\bar{S}_{ms}$ montré dans figure(III.10),ce qui sont définis par:

$$\bar{S}_{Ks} = \bar{V}_K (-\bar{I}_s)^* = \bar{V}_K \left(\frac{jx_c}{r_{Km} + jx_{Km}} \frac{\bar{V}_K - \bar{V}_m}{r_{Km} + j(x_{Km} - x_c)} \right)^* \quad (\text{III-16})$$

$$\bar{S}_{ms} = \bar{V}_m (-\bar{I}_s)^* = \bar{V}_m \left(\frac{jx_c}{r_{Km} + jx_{Km}} \frac{\bar{V}_K - \bar{V}_m}{r_{Km} + j(x_{Km} - x_c)} \right)^* \quad (\text{III-17})$$



$$\bar{S}_{Ks} = P_{Ks} + jQ_{Ks} \quad \bar{S}_{ms} = P_{ms} + jQ_{ms}$$

Figure .3.10: Modèle d'injection : puissance injectées équivalentes.

Si($r_{Km} = 0$)

$$P_{Ks} = -B_e V_K V_m \sin(\theta_K - \theta_m) \quad (\text{III-18})$$

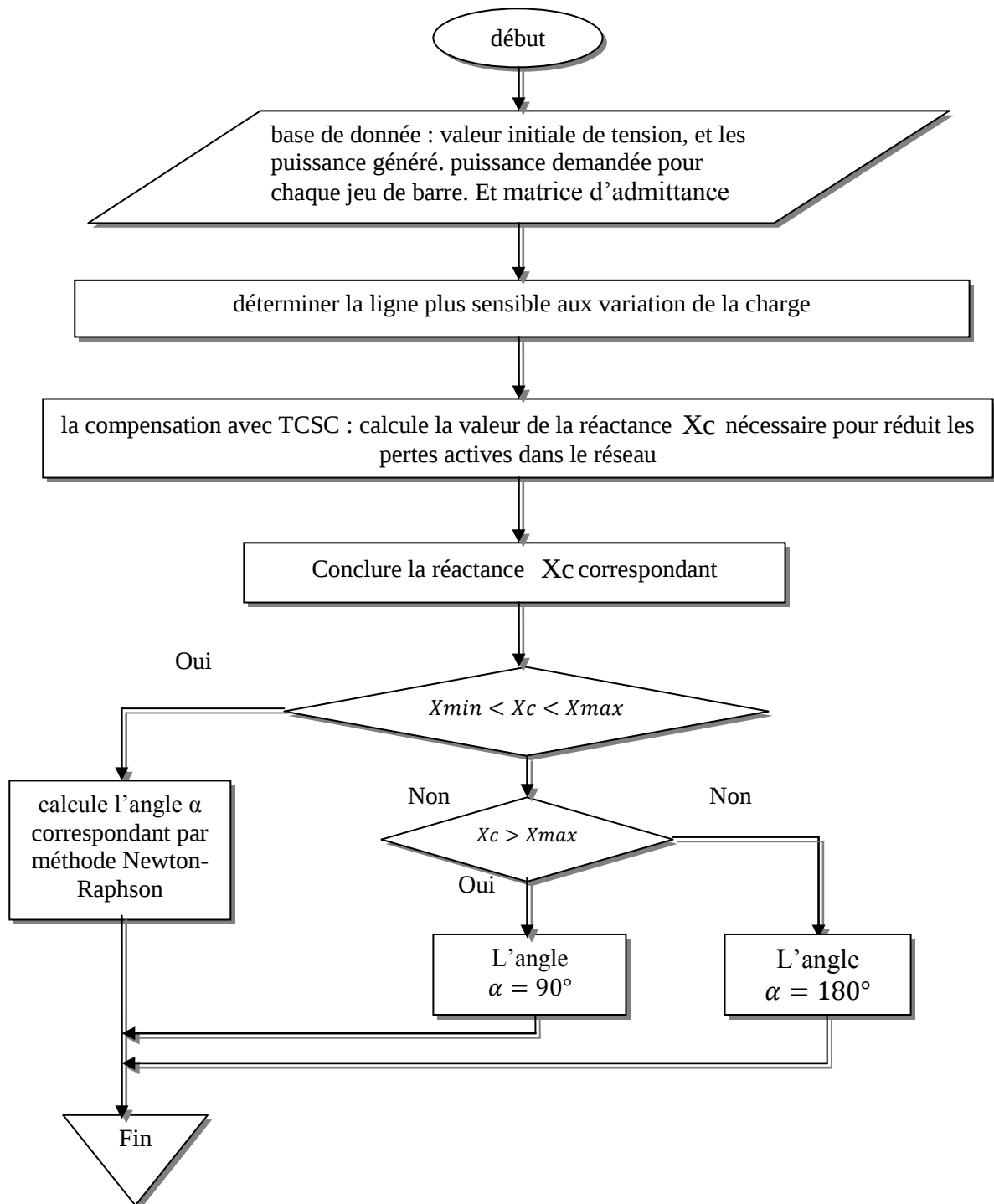
$$P_{ms} = -P_{Ks} \quad (\text{III-19})$$

$$Q_{Ks} = -B_e (V_K^2 - V_K V_m \cos(\theta_K - \theta_m)) \quad (\text{III-20})$$

$$Q_{ms} = -B_e (V_m^2 - V_m V_K \cos(\theta_m - \theta_K)) \quad (\text{III-21})$$

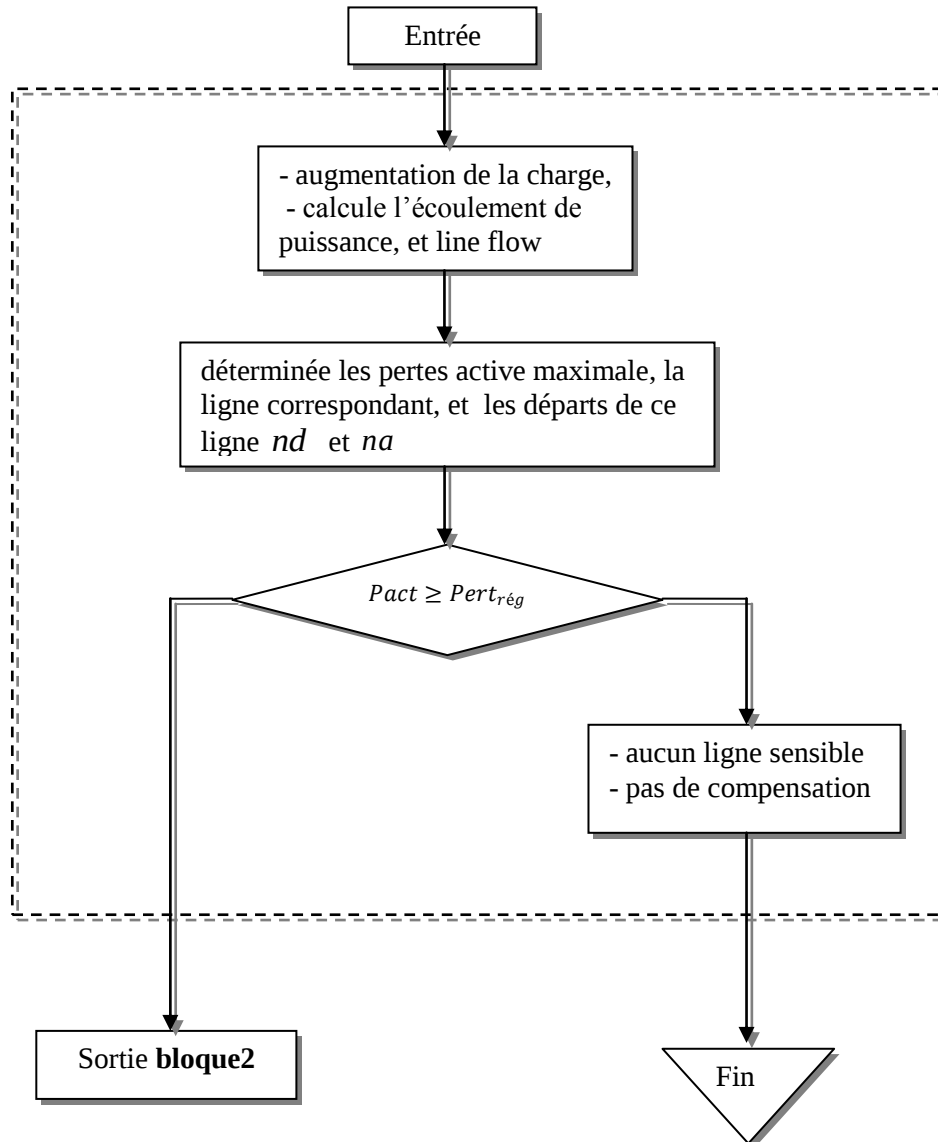
$$B_e = \frac{-x_c}{x_{Km} - x_c} \frac{1}{x_{Km}} \quad (\text{III-22})$$

III.6.3. L'organigramme globale de l'intégration de TCSC:

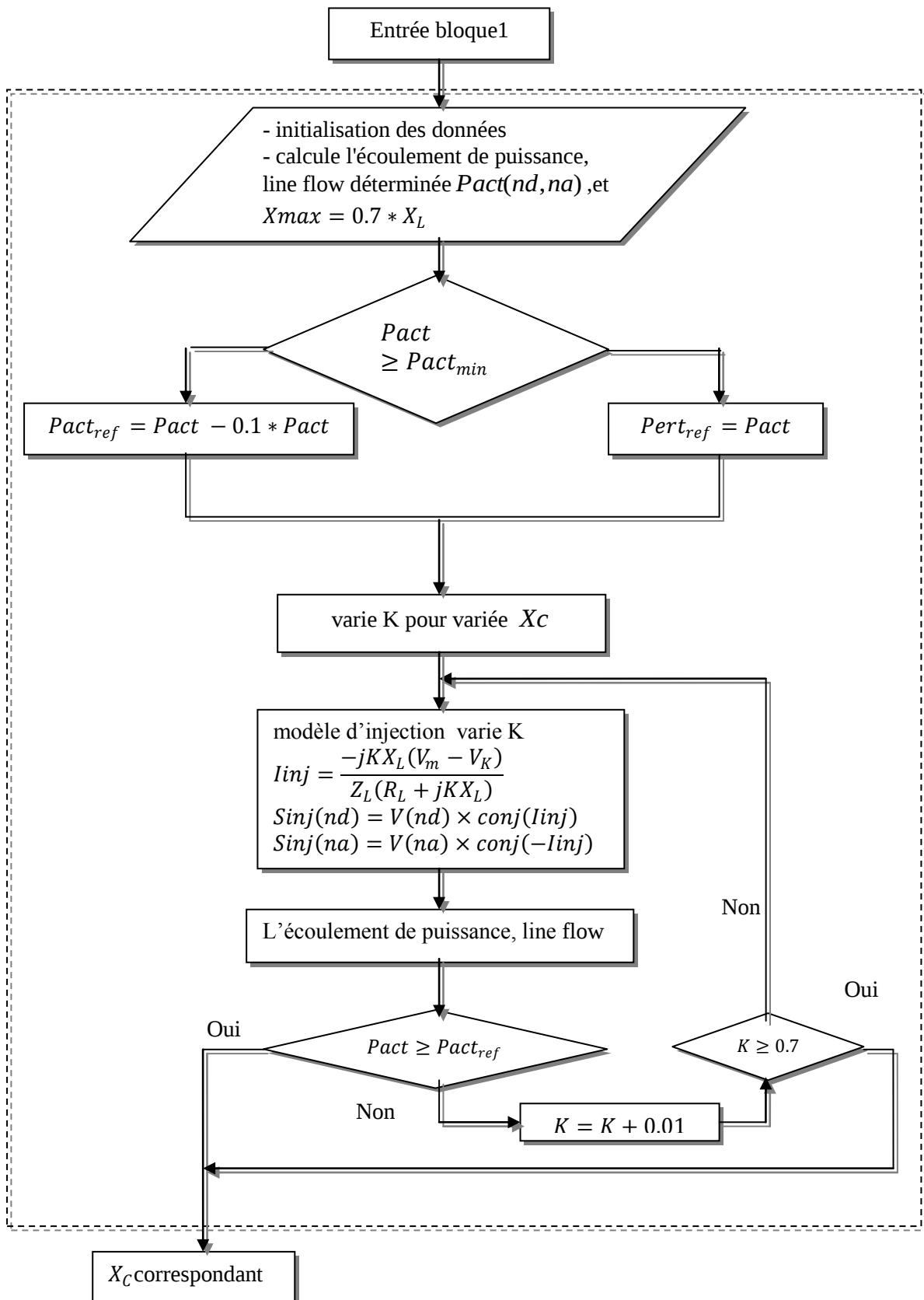


III.6.3.1. Organigramme détaillée :

Bloque 1 : déterminer la ligne le plus sensible aux variations de la charge



Bloque 2 : la compensation avec TCSC : calcule la valeur de la réactance X_c nécessaire pour réduit les pertes actives dans le réseau



III.7. Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre, une modélisation de deux types de dispositif FACTS, (SVC et TCSC) avec l'installation, d'un seul dispositif FACTS par nœud ou par ligne. Face à ce problème d'optimisation de nature combinatoire, et de grande complexité. [24]

Parmi tous ces nombreux types de compensateurs, on a choisi le compensateur série le TCSC qui peut réduire la réactance de la ligne et contrôler la puissance transmise et SVC. Ceci fera l'objet du prochain chapitre.

Chapitre IV:

Application

Chapitre IV

Application

IV.1. Description générale :

Dans tous les réseaux de transport, il est nécessaire de maintenir la tension aux différents 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 SVC est un dispositif FACTS qui permet de régler la tension et d'amortir les oscillations dues à des perturbations dans les réseaux électriques.

IV.2. Application:(programmation); compensation shunt avec SVC:

IV.2.1. Application(1) : réseau électrique de 9 jeux de barres :

Au départ, un simple réseau électrique de 9 jeux de barres est utilisé juste pour illustrer l'effet du dispositif de Compensation (FACTS). Ce réseau test est constitué de 6 lignes électriques, 3 générateurs, 3 transformateurs et 3 charges.

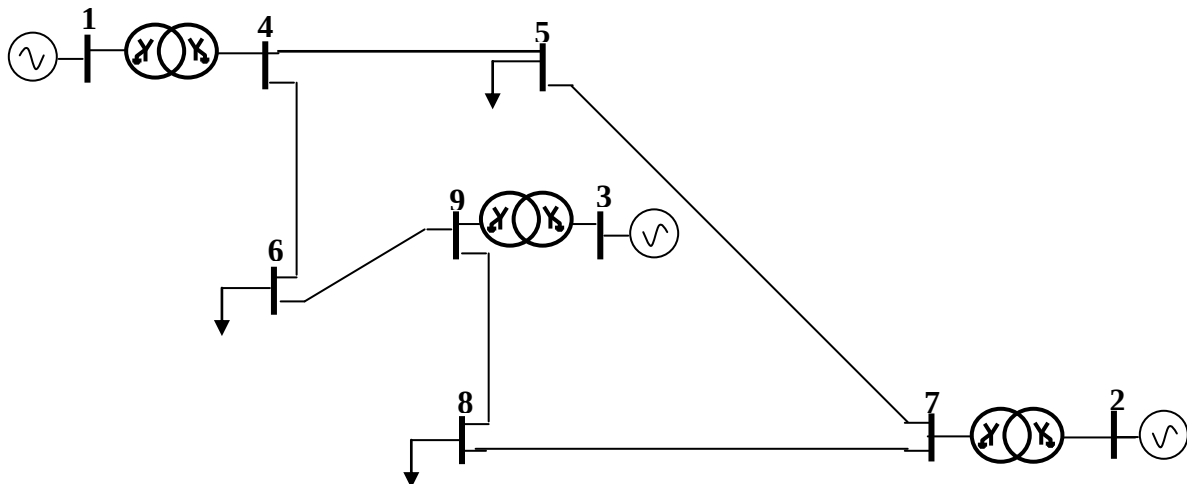


Figure4.1. Schéma d'un réseau test de 9 jeux de barres

Le tableau (IV .1) , la Figure(4.2) montrent les tensions au niveau des jeux de barres du réseau test trouvées sans et par l'intégration du dispositif shunt avec SCV dans la méthode de calcul de l'écoulement de puissance (méthode de GAUSS-SEIDEL). On remarque une amélioration des tensions au niveau des jeux de barres due à la présence de ce dispositif

shunt. Alors que le tableau (IV.2.2.a,b) visualise les résultats du réseau 9 bus obtenu avec et sans l' SCV,(les résultats de programmation).

IV.2.2. les résultats de programmation :(réseau 9 jeux de barres)

a.-tableau (IV-1):Résultats des tensions du réseau électrique –cas normal

- Méthode de GAUSS-SEIDEL-

Bus	Sans compensation	Avec compensation
	V(p.u)	V(p.u)
1	1.06	1.0600
2	1.025	1.0251
3	1.009	1.0129
4	0.998	1.0019
5	0.987	0.9871
6	0.982	0.9877
7	0.967	0.9819
8	0.970	0.9703
9	0.960	0.9874

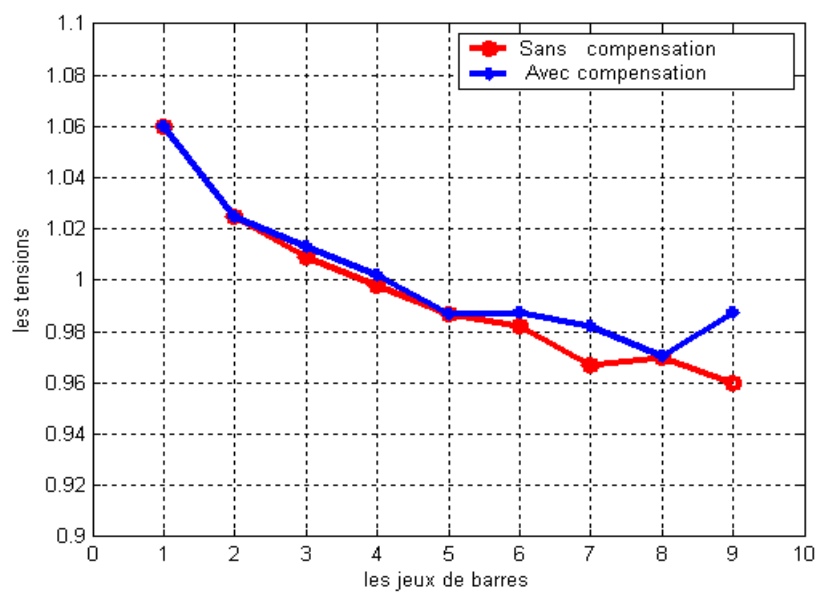


Figure 4.2 . Variation de la tension – cas normale

b- tableau (IV-2):Résultats des tensions du réseau électrique –cas rupture de la ligne (1-2):

Bus	Sans compensation	Avec compensation
	V(p.u)	V(p.u)
1	1.06	1.0600
2	0.890	0.8920
3	0.908	0.9130
4	0.885	0.8913
5	0.867	0.8686
6	0.872	0.8798
7	0.854	0.8732
8	0.872	0.8730
9	0.847	0.8795

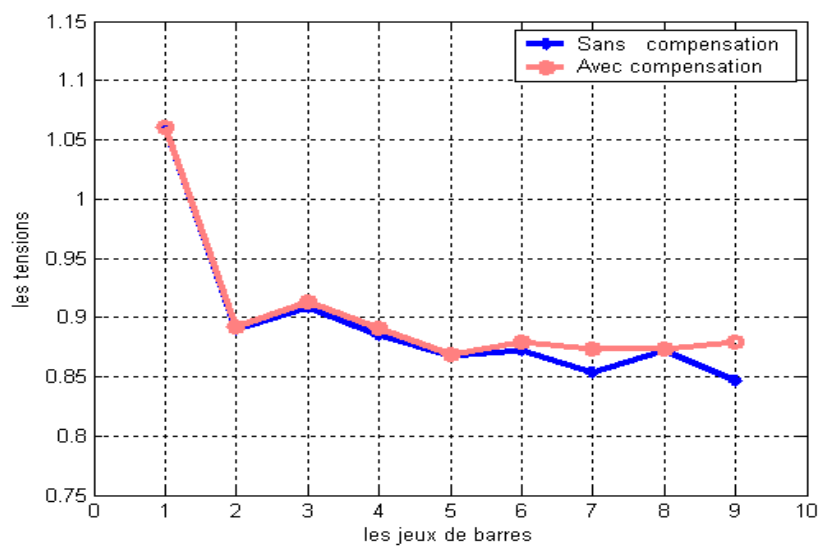


Figure 4.3. Variation de la tension – cas rupture de la ligne (1-2)

c- Les résultats de programmation(Puissance générée, Pertes, Coût optimal.....) de réseau 9 jeux de barres:

- Les jeux de barres le plus sensible c'est : 9et7
- La puissance demandée active: 203.700 MW .
- La puissance demandée réactive: 90.400 MVAR.

c-1-(tableau IV.3.a) cas sans compensation :

Résultats	Sans Compensation	
	Cas normale	Cas rupture de la ligne(1-2)
Tension 9 (pu)	0.960	0.847
Tension 7 (pu)	0.967	0.854
Puissance active générée (MW)	212.452	236.595
Puissance réactive générée ($MVAR$)	101.046	197.649
Pertes active (MW)	9.939	33.831
Pertes réactive ($MVAR$)	10.770	107.498
Coût optimal (\$/h)	3132.924	3560.155
Susceptible Be J.d.B 9	////////////////	////////
Susceptible Be J.d.B 7	////////////////	////////
α J.d.B 9	////////////////////	////////////////////
α J.d.B 7	////////////////////	////////////////////
Puissance réactive injectée (SVC) ($MVAR$)	00	00

c-2-(tableau IV.3.b) cas avec compensation:

Résultats	Avec Compensation	
	Cas normale	Cas rupture de la ligne(1-2)
Tension 9 (pu)	0.9874	0.8795
Tension 7 (pu)	0.9819	0.8732
Puissance active générée (MW)	213.540	236.840
Puissance réactive générée (MVAR)	89.545	185.142
Pertes active (MW)	9.846	33.148
Pertes réactive(MVAR)	10.147	104.742
Coût optimal (\$/h)	3120.347	3542.077
Susceptible Be J.d.B 9	0.1032	0.1305
Susceptible Be J.d.B 7	0.1130	0.1430
α J.d.B 9	110.90	90
α J.d. 7	110.87	90
Puissance réactive injectée(SVC) (MVAR)	11	10

d-(tableau IV.4.) cas de l'augmentation de la charge avec :20 % , 100%

Résultats	Sans Compensation			Avec Compensation		
	KK=1	KK=1.2	KK=2	KK=1	KK=1.2	KK=2
Tension	0.960	0.946	0.884	0.9874	0.9793	0.9353
Puissance active généré (MW)	212.452	259.3	455.154	213.540	259.122	455.39
Puissance réactive généré ($MVAR$)	101.046	137.394	335.045	89.545	123.359	309.566
Pertes active (MW)	9.939	14.860	48.780	9.846	14.682	47.990
Pertes réactive $MVAR$	10.770	29.122	154.562	10.147	28.079	150.666
Susceptible Be J.d.B	////////	////////	////////	0.1032	0.1261	0.1891
α J.d.B	////////	////////	////////	110.90	110.83	110.65
Puissance réactive injectée (SVC) ($MVAR$)	00	00	00	11	13.2	21.9
Coût optimal (\$/h)	3132.924	3983.685	9297.443	3120.347	3980.086	9270.775

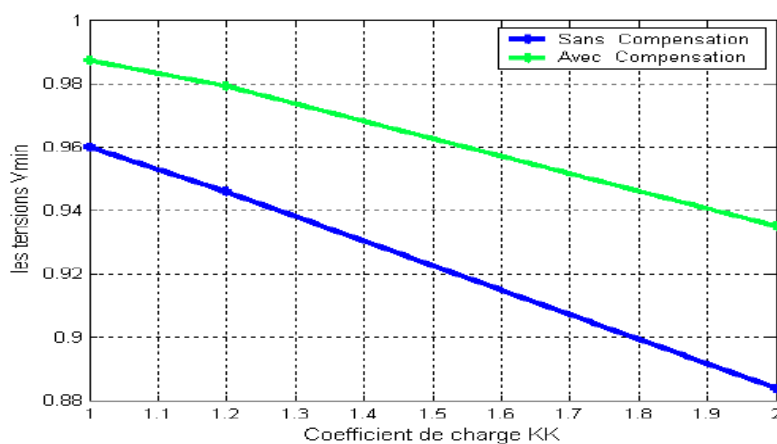


Figure 4.4. Variation de la tension en fonction de l'incrément de la charge

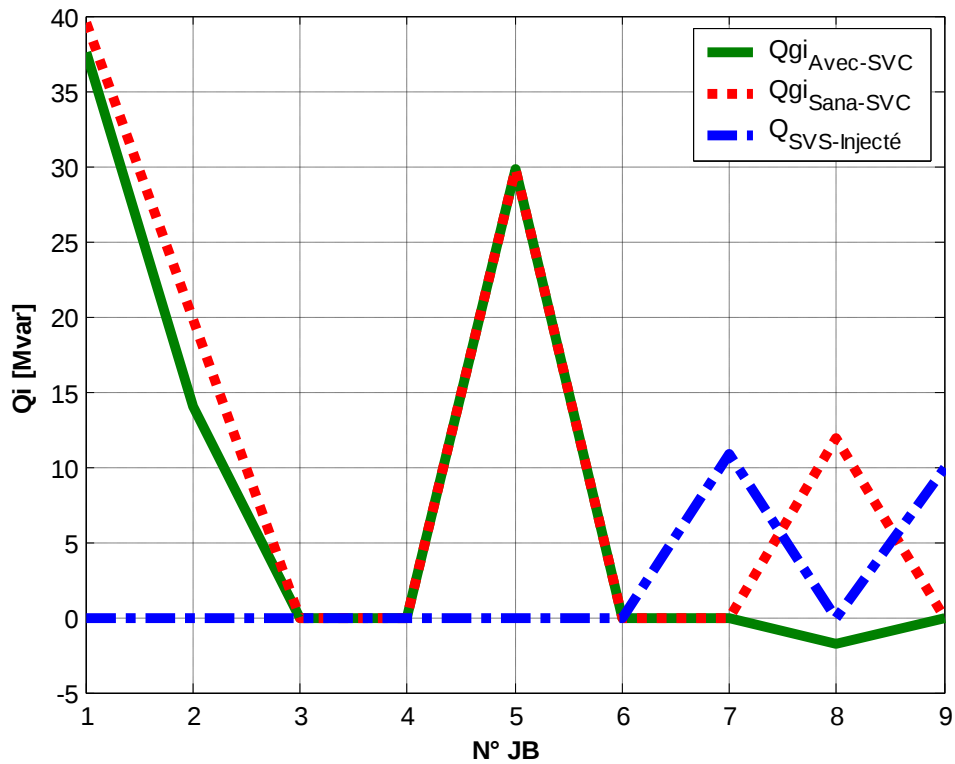


Figure 4.5. la Puissance réactive dans (réseau 9 jeux de barres)

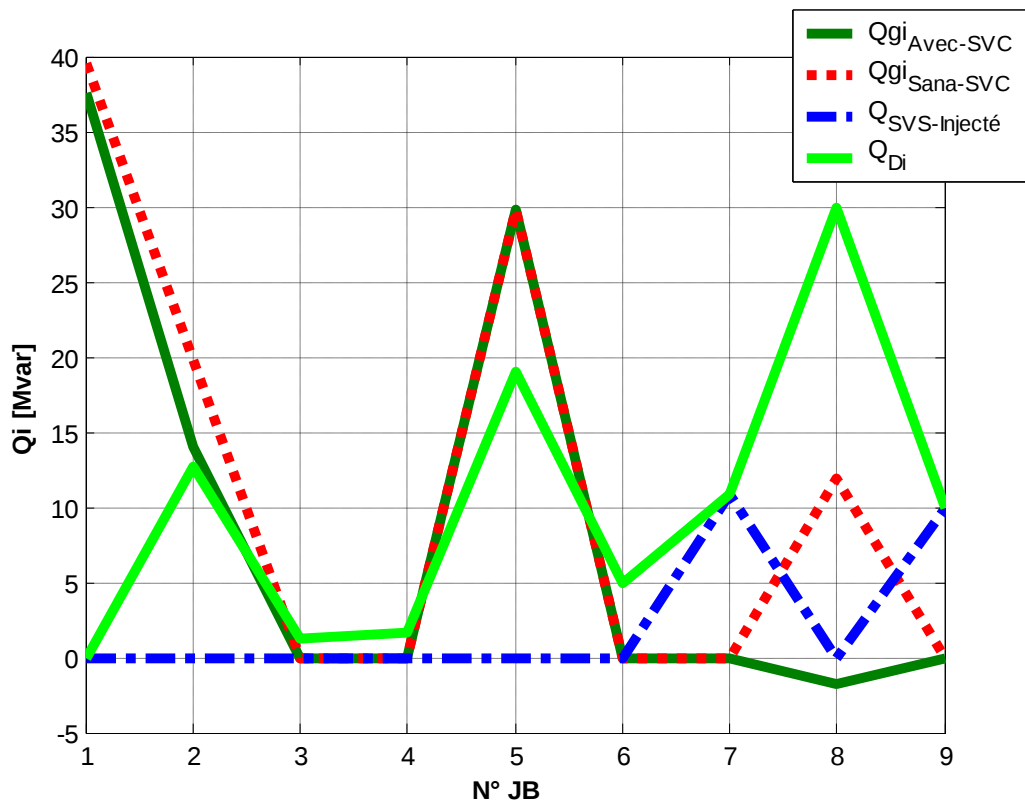


Figure 4.6. la Puissance réactive dans (réseau 9 jeux de barres)

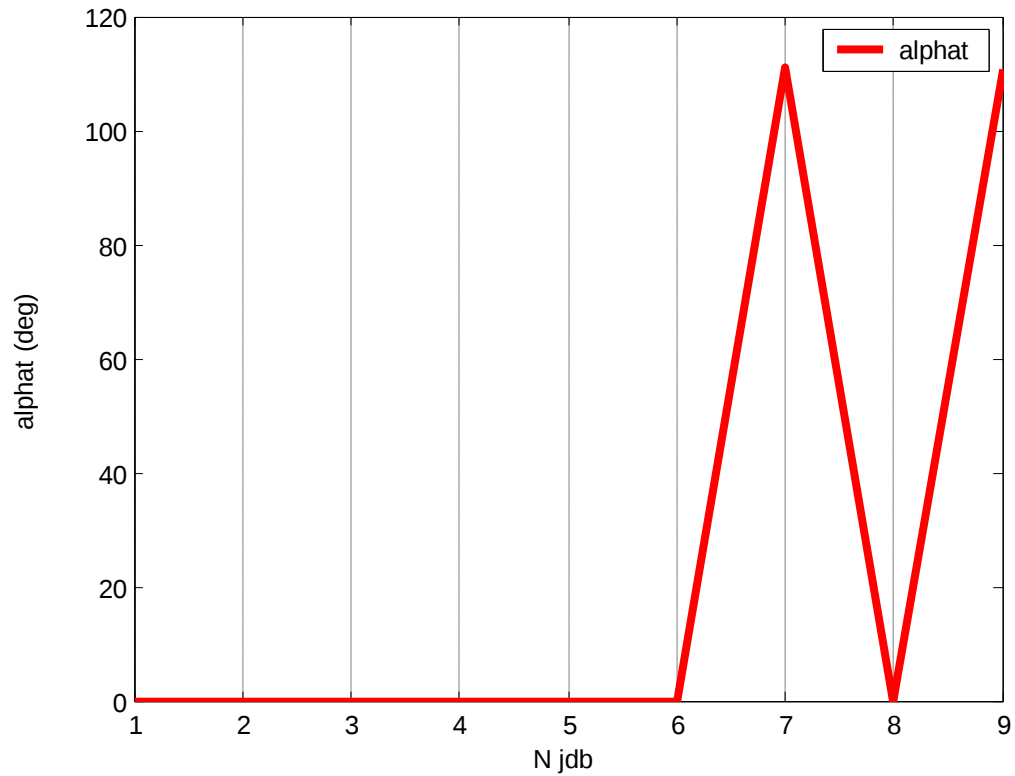


Figure 4.7. Variation l'angle alphas (degré) en fonction de jeux de barres e-(tableau IV.5.) présente(Bilan de la puissance réactive) :

bus	Puissance réactive généré ($MVAR$)	La puissance demandée réactive ($MVAR$)	Puissance réactive injectée (SVC) ($MVAR$)	Pertes réactive $MVAR$
1	37.539	0.000	0.000	
2	13.972	12.700	0.000	
3	0.000	1.200	0.000	
4	0.000	1.600	0.000	
5	29.826	19.000	0.000	
6	0.000	5.000	0.000	
7	0.000	10.900	10.900	
8	-1.816	30.000	0.000	
9	0.000	10.000	10.000	
Totale	79.521	90.400	20.900	10.147

IV2.3. Comparaison des résultats du chute de tension dans les réseaux (9 jeux de barres):

$$\Delta V = \frac{V_{ref} - V}{V_{ref}} \quad \text{tel que : } V_{ref} = 1.0182 \quad (\text{pu})$$

(tableau IV.6.) Comparaison des résultats du chute de tension dans les réseaux (9 jeux de barres):

	Réseau 9 jeux de barres	
	Cas normale	rupture ligne 1,2
Sans compensation	JdB9 : $\Delta V = 5.71 \%$	JdB9 : $\Delta V = 16.81 \%$
Avec compensation	JdB9 : $\Delta V = 3.02 \%$	JdB9 : $\Delta V = 12.62 \%$

IV .3.Application :(compensation série avec TCSC):

IV.3.1.Application(1): réseau électrique de 9 jeux de barres :

Application 1 : réseau 9 jeux de barres

La ligne le plus sensible c'est : 2,5

Le jeu de barre le plus sensible c'est : 9

La puissance demandée active, et réactive : 203,700 MW , et 90,400 MVAR

(tableau IV.7.) Résultats programmations réseau électrique de 9 jeux de barres avec compensation série :

	Résultats	Cas normale
Sans Compensation	Tension 2 (pu)	1,028
	Tension 5 (pu)	1,005
	Tension 9 (pu)	0,962
	Pertes active 2,5 (MW)	4,341
	Pertes réactive 2,5 (MVAR)	13,922
	Puissance active généré (MW)	213,704
	Puissance réactive généré (MVAR)	100,588
	Perte active (MW)	9,861
	Pertes réactive (MVAR)	10,315
Avec Compensation	Tension 2 (pu)	1,025
	Tension 5 (pu)	0,997
	Tension 9 (pu)	0,961
	Pertes active 2,5 (MW)	2,198
	Pertes réactive 2,5 (MVAR)	2,285
	Puissance active généré (MW)	211,698
	Puissance réactive généré (MVAR)	92,256
	Perte active (MW)	7,892
	Pertes réactive (MVAR)	1,976
	K	0,13
	X_{tcsc} (pu)	0,026
	α (degré)	118,875

IV.3.2.Application(2): réseau électrique de 30 jeux de barres :

Application 2 : réseau 30 jeux de barres

La ligne le plus sensible c'est : 2,5

Le jeu de barre le plus sensible c'est : 9

La puissance demandée active, et réactive : 283,400 *MW* , et 136,200 *MVAR*

(tableau IV.8.) Résultats programmations réseau électrique de 30 jeux de barres avec compensation série :

	Résultats	Cas normale
Sans Compensation	Tension 2 (pu)	1,020
	Tension 5 (pu)	0,953
	Tension 30 (pu)	0,918
	Pertes active 2,5 (<i>MW</i>)	3,460
	Pertes réactive 2,5 (<i>MVAR</i>)	10,463
	Puissance active générée (<i>MW</i>)	301,695
	Puissance réactive générée (<i>MVAR</i>)	145,385
	Perte active (<i>MW</i>)	19,703
	Pertes réactive (<i>MVAR</i>)	24,740
Avec Compensation	Coût optimal (\$/h)	835,362
	Tension 2 (pu)	1,019
	Tension 5 (pu)	0,967
	Tension 30 (pu)	0,961
	Pertes active 2,5 (<i>MW</i>)	1,526
	Pertes réactive 2,5 (<i>MVAR</i>)	2,285
	Puissance active générée (<i>MW</i>)	292.622
	Puissance réactive générée (<i>MVAR</i>)	145.385
	Perte active (<i>MW</i>)	15,881
	Pertes réactive (<i>MVAR</i>)	9,033
	Coût optimal (\$/h)	822,084
	K	0,13
	X_{tcsc} (pu)	0,026
	α (degré)	118,875

IV .4:Interprétation :

-D'après les résultats de programmation, le J.d.B le plus sensible si les jeux de barres 9 et 7 dans le réseau test 9 jeux de barres.

Donc on remarque que :

- Pour cet situation, nous avons montrée la possibilité d'améliorée la niveau de tension en utilisant le dispositif SVC .
- le compensateur dynamique shunt SVC 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.

Le jeu de barre le plus sensible est le jeu de barre '9' dans le réseau test 9 jeux de barres .

Donc on remarque que :

- la tension est améliorée.
- Réduction faible des pertes de l'énergie active .
- amélioration de cout de production
- le dispositif de contrôle SVC peut jouer un rôle très important dans le domaine de la compensation des puissances réactives et le contrôle des tensions des différents nœuds .

-Les modèles de SVC les plus courants sont des modèles statiques, car conçus pour des logiciels de répartition de charges. Lesquels sont destinés à des études statiques de réseau. Ils sont constitués d'éléments de réseaux : réactances, susceptance, nœuds,etc...

-D'après ces résultats, nous remarquons que selon l'emplacement TCSC, le système compensée pouvant provoquée plus ou moins de pertes par rapport aux cas de non compensation .Ces pertes sont réduites avec un emplacement optimale du TCSC, qui sont d'après nos résultats, relatif au ligne 2,5.

En effet, pour un niveau de compensation de 13%, les pertes de puissance de transmission obtenus après l'injection de modèle TCSC sont réduits à 10%, pour les deux réseau test 9 JdB et 30JdB

Conclusion générale

Conclusion générale

Nous avons traité le problème de la répartition des puissances réactives et le contrôle des tensions des réseaux d'énergie électrique en incorporant les dispositifs SVC. Une étude sur les dispositifs FACTS a été réalisée et en plus une étude détaillée sur les dispositifs SVC (définition, modélisation, incorporation dans le load flow).

Les résultats obtenus par notre programme développé dans ce travail sous l'environnement (MATLAB), montre clairement l'avantage d'intégrer des dispositifs, un contrôle flexible de l'énergie réactive est réalisé par un emplacement efficace du dispositif shunt (SVC).

Dans notre travail, nous avons essayé d'illustrer l'utilité, l'efficacité et la rapidité de contrôle des tensions par l'insertion du contrôleur SVC.

Les résultats obtenus montrent que le dispositif de contrôle SVC peut jouer un rôle très important dans le domaine de la compensation des puissances réactives et le contrôle des tensions des différents nœuds.

Enfin si les systèmes SVC sont surtout destinés au réseau de transport, des applications en réseau à moindre tension sont envisageables pour résoudre des problèmes liés notamment aux nouvelles contraintes nées de la production décentralisée.

Les résultats obtenus montrent que le dispositif de contrôle TCSC peut jouer un rôle très important dans le domaine de la compensation des puissances actives et la réduction des pertes dans les lignes électriques.

En fin notre travail s'inscrit dans le cadre global de l'amélioration de la qualité d'énergie électrique, il a particulièrement pour objet d'étude les problèmes de chute de tension et comment résoudre ce problème avec l'utilisation des bons du réactif « condensateurs ».

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Henri Persoz, Gérard Santucci, Jean-Claude Lemoine, Paul Sapet « La planification des réseaux électriques » Editions EYROLLES 1984.
- [2] Michel Crappe « Commande et régulation des réseaux électriques » Traité EGEM série génie électrique, LAVOISIER 2003.
- [3] Hanane Kouara « Application d'un filtre actif série au contrôle de la tension d'un réseau basse tension » mémoire de magister, université de Batna 28/02/2006.
- [4] Boudjella Houari « contrôle des puissances et des tensions dans un réseau de transport au moyen de dispositifs FACTS (SVC) » mémoire de magister ,université de Sidi Bel-Abbes *23 Janvier 2008*.
- [5] Jacques .C, Guillaume de Preville, Jean-Louis Sanhet « Fluctuations de tension et Flicker- Évaluation et atténuation» Techniques de l'ingénieur D4315.
- [6] Abdelaziz Chaghi « documents pédagogiques et didactiques» université de Batna 2000/2001.
- [7] Haimour Rachida« Contrôle des Puissances Réactives et des Tensions par les Dispositifs FACTS dans un Réseau Electrique» mémoire de magister, Ecole Normale Supérieure de l'Enseignement Technologique d'Oran 2008-2009.

[8]: BOUAKAZ Hacène, SEGGA Salim« Calcul de la répartition de charge avec compensation dans le réseau électrique » mémoire de fin d'étude; université de Biskra (promotion 1998).

[9] Computer methods in power system analysis (chapter 08) ALLEN W.stagg, Ahmed, Abier, International Student Edition .

[10]William D.Stevenson, “Element of power system analyse”, Mc.Graw-Hill.

[11] Z.F.Fethi et G.Abdelmalek et D.Mohammed ,« L'application de la Méthode Newton-Raphson à L'écoulement de Puissance Dans Le Système Electrique». Mémoire de fin d'étude université EL-OUDE Promotion (2007).

[12] MANSOURI Dris , GUMMOUDI Mohammed, FERHAT Abdelhamid . « Calcule d'écoulement de puissance par la méthode GAUSS-SEIDEL» , Mémoire de fin d'étude Université de Biskra (promotion 1996)

[13] Olle I. Elgerd: Electric Energy Systems Theory—An Introduction McGraw-Hill 1970

[14] Khiat Mounir « Répartition optimale des puissances réactives dans un réseaud'énergie électrique sous certaines contraintes de sécurité » Thèse de doctorat d'état Oran 2003

[15]Rolf Grünbaum, Åke. Petersson, Björn Thorvaldsson, « FACTS-Pour des réseaux électriques Plus Performants », ABB Utilities AB Power System SE-72164Västerås, Suède,-2002

[16] T. Gönen « Electric Power System Engineering: Analysis and Design » John Wiley & Sons, 1988.

- [17] B.De Metz-Noblat, G .Jeanjean « Stabilité dynamiques des réseaux électrique industriels» Cahier Technique n° 185.
- [18]Lakdja Fatiha « Contrôle des transits de puissance par dispositif facts » Mémoire de magister en Commande des processus Oran 2005.
- [19] : Salhi Abd Alfattah et Mehellou Yuocéf «Contrôle de la puissance réactive du système électrique par SVC », université Batna, 2008
- [20]Fild/ FACTS – les systèmes performants pour le transport flexible de l'énergie électrique.
- [21]Ben Alia Khaled et Zahnite Hakim «Etude des compensateurs statiques de l'énergie réactive SVC dans un réseau électrique » , université Biskra promotion juin 2005.
- [22]GlaudioA.Canizares ,et ZenoT.Faur « Analysis of SVC and TCSC controllers in voltage collapse », IEEE Trans power systems ,Vol .14, N -1 February 1999,pp.158.164.
- [23]D.SALAH sabry .L.Salah; B.Ahcen « Amélioration de la marge de la stabilité transitoire par l'utilisation des contrôleurs unifiés de l'écoulement de Puissance –UPFC-», Second international conference on electrical system , May 08-10-2006, oum elbouaghi .ALGERIA
- [24]Geidl, M., « Implementation of FACTS and Economic Generation Dispatch in an Interactive Power Flow Simulation Platform », ETH Zürich.
- [25] Gaboussa seddik et dob Med lakhdar «l'impact des dispositifs de compensation dynamique –FACTS- sur les réseaux de transport », université Biskra promotion juin 2006.
- [26] Allen J. Wood & Bruce F: Wollenberg: «Power Generation And Operation And Control» John Wiley & Sons
- [27] J. C. Das: « Power System Analysis /Short-Circuit Load Flow And Harmonics» .Marcel Dekker 2002,

- [28] Leonard L. Grigsby & Andrew P. Hanson: «Power Flow Analysis». Taylor & Francis 2006.
- [29] Guide de compensation des réseaux électriques industriels / Schneider Electric
- [30] Stéphane GERBEX, “ Metaheuristique Appliquées Au Placement Optimal De Dispositifs FACTS dans un Réseau Electrique, “ thèse PHD, Ecole polytechnique de Lausanne, Lausanne 2003.
- [31] A. Laifa, ”Evaluation de la Stabilité de Tension d’un Réseau d’énergie électrique Développement et Application Des Indices De Stabilité “, thèse de Magister, Ecole Nationale polytechnique, 27 juin 1995.
- [32] F. D. Galiana, “Load Flow Feasibility and the Voltage Collapse Problem”, Proceedings of 23rd conference on Decision and control, IEEEWP5-4:30, pp.485-487, December 1984.
- [33] Fuerte-Esquivel, C.R., Acha, E., Ambriz-Pérez, H., « A Thyristor Controlled Series Compensator Model for the Power Flow Solution of Practical Power Electronic », IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 15, no 1, February 2000.
- [34] CHOKRI Ben Salah Belhadj Ahmed « Contribution à l’analyse de la stabilité statique de la tension » thèse de doctorat, Ecole Polytechnique de MONTRÉAL Juin 1996.
- [35] Pierre Alexandre Bohême « Simulation of Power System Response To Reactive Power Compensation » thèse de Master, Université de Tennessee, Knoxville 2006.

[36] A.A. Ladjici, '' Calcul évolutionnaire application sur l'optimisation de la planification de la puissance réactive'', thèse de Magister, Ecole Nationale polytechnique, 2005.

[37] F. L. Alvarado, "Solving Power Flow Problems with a MATLAB Implementation of the Power System Application Data Dictionary", Proc of the 32nd Hawaii International Conference on System Sciences, IEEE, 1999.

[38] H. Ambriz-Pérez, E. Acha, C. R. Fuerte-Esquivel, « Advanced SVC Models for Newton-Raphson Load Flow and Newton Optimal Power Flow Studies », IEEE Transactions on Power Systems, 2000.

[39] TOUIL Salim, BOULBIR Abdel-Baki «Analyse de la stabilité transitoire d'un réseau électrique» .Mémoire de fin d'étude centre universitaire d'Oum El-bouaghi (promotion 2001)

[40]Ahmed H. El-Abiad & Glenn W. Stagg: Computer Metho
Power Analysis. McGraw-Hill .