



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 : Commande Electrique

Thème

**Calcul de la puissance réactive dans un
nœud à charge en présence d'un system de
compensation de l'énergie (FACTS)**

Réalisé par :

HAMIED Baha eddine
BEBBOUKHA Houcine

Encadré par :

Oussama MAMMERI

Soutenu en Mai 2017

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Liste De Symbole

b : susceptance shunt.

B : matrice susceptance du système.

B_{ij} et B_{i0} B_{00} : Coefficients de pertes.

Nbr : est le nombre total des lignes de transporte (branches).

D : Matrice carrée.

F : Facteur de puissance.

g : Conductance shunt.

$g_i(x)$: Contraintes d' égalité.

$h_i(x)$: Contraintes d' inégalités.

i : Numéro du J.d.B.

I_i : Courant injecte au J.d.B « i ».

J : Matrice Jacobienne .

J.d.B : Jeux de barres.

k : Numéro d'itération.

n : Nombre de J.d.B.

ng : est le nombre total des générateurs.

NR: Newton-Raphson.

OPF: Ecoulement de Puissance Optimal.

P : Puissance active.

P_D : Puissance active demandée.

P_G : Puissance active générée.

P_L : Perte active de ligne.

$p.u$: Unité relative.

Q : Puissance réactive.

Q_D : Puissance réactive demandée.

Q_G : Puissance réactive générée.

Q_L : Perte réactive de ligne.

R : Résistance

S : Puissance apparente.

S_b : Valeur de base.

S_D : Puissance apparente demandée.

S_G : Puissance apparente générée.

V_i : Tension au J.d.B.

Y : Matrice admittance.

G_{ij} : La partie réelle de la matrice admittance Y .

B_{ij} : La partie imaginaire de la matrice admittance Y .

γ : Phase d'admittance.

δ : Phase de tension.

ε : Tolérance estimée.

Z : matrice impédance.

X : vecteur d'état.

U : vecteur de contrôle

$x_{\min} \leq x \leq x_{\max}$

: Limites minimales et maximales des variables d' état et de

$u_{\min} \leq u \leq u_{\max}$

contrôle.

$[P_B]$: Vecteur des puissances actives transmises par les lignes de transport.

$[J_{n\delta}]$, $[J_{hv}]$: Sous matrices jacobéennes.

Liste de Tableau

Comparaison des FACTS les plus utilisés	38
résultats de programmation (réseau 9 jeux de barres)	
Résultats des tensions du réseau électrique –cas normale.....	54
Résultats des tensions du réseau électrique –cas rupture de la ligne.....	55
Les résultats de programmation (cas sans compensation).....	56
Les résultats de programmation (cas avec compensation).....	57
Les résultats de programmation (cas de l'augmentation de la charge).....	58
résultats de programmation (réseau 30 jeux de barres)	
Résultats des tensions du réseau électrique –cas normale.....	60
Résultats des tensions du réseau électrique –cas rupture de la ligne.....	61
Les résultats de programmation(cas sans compensation).....	63
Les résultats de programmation(cas avec compensation).....	64
Les résultats de programmation(cas de l'augmentation de la charge).....	65
Comparaison des résultats du chute de tension dans les deux réseaux (9 jeux de barres- 30 jeux de barres).....	66

Liste De Figure

Figure I-1 : Exemple d'un réseau électrique à deux jeux de barres	9
Figure I-2 : Représentation géométrique de la méthode de N-R	18
Figure II-1 : Schéma du SVC.....	26
Figure II-2 : présentation d' un Compensateur SVC	27
Figure II-3 : fonctionnement du Compensateur SVC	28
Figure II-4 : Principe d'un compensateur synchrone statique	28
Figure II-5 : Structure de STATCOM	30
Figure (II-5.a) : Courant capacitive IIseae réactive avec le réseau.	30
Figure (II-5.b) : Courant inductive.....	30
Figure II-6 : Caractéristique statique du STATCOM	31
Figure II-7 :Principe de la compensation série	31
Figure II-8 : Amélioration du profil de tension d'un système de puissance simple	32
Figure II-9 : Amélioration de la marge stabilité transitoire à l'aide d'un condensateursérie	33
Figure II-10 : Deux schémas de compensations série typiques avec un condensateur série fixe et un TCSC.....	34
Figure II-11.a : Insertion d'un TCSC sur une ligne	34
Figure II-11.b : Schéma de base du SSSC	35
Figure II-12 : Configuration de base d'un compensateur série synchrone statique (SSSC).....	36
Figure II-13 : Caractéristique statique du SSSC	36
Figure II-14 : Compensateur Unifier UPFC (Unified power flow Controller	37
Figure II-15 : Configuration de base du circuit d'un contrôleur de transit de puissance unifié (UPFC)	37
Figure III-1 : la caractéristique en V d'un SVC.....	41
Figure III-2 : Variation de la puissance réactive en fonction du courant	42
Figure III-3 : SVC idéal	42
Figure III-4 : Caractéristiques idéale $V=f(I_s)$ du SVC.....	42
Figure III-5 : Caractéristiques d'un SVC réel.....	4Error! Bookmark not defined.
Figure III-6 :Organigramme représentant la variation de l'angle d'amorçage en fonction du tension à régler.	45

Figure III-7 : la variation de susceptance en fonction de l'angle d'amorçage	45
Figure III-8 : Variation de la susceptance en fonction alpha pour valeur de X_L	46
Figure IV-1: Schéma d'un réseau test de 9 jeux de barres	53
Figure IV-2: Variation de la tension – cas normale	54
Figure IV-3: Variation de la tension – cas rupture de la ligne (1-2).....	55
Figure IV-4: Variation de tension dans les deux jeux de barres sensibles-cas normale.	57
Figure IV-5: Variation de la tension en fonction de l'incrémentation de la charge	59
Figure IV-6: Schéma d'un réseau de 30 jeux de barres	59
Figure IV-7: Variation de la tension – cas normale	62
Figure IV-8: Variation de la tension – cas rupture de la ligne (27-30).....	62
Figure IV-9: Variation de la tension en fonction de l'incrémentation de la charge.....	68

Table de matière

Introduction Général.....	1
---------------------------	---

Chapitre I

Méthode de calcul de la puissance réactive dans le R.E

I.1. Introduction.....	4
I.2. Modélisation des éléments du réseau électrique.....	5
I.2.1. Générateur de puissance (Machine synchrone).....	5
I.2.2. Ligne de transport.....	6
I.2.3. Transformateur	6
I.2.4. Charge électrique.....	7
I.2.5. Élément shunt.....	7
I.3. Classification des jeux de barres selon leurs spécifications	7
a) Jeu de barre de référence	7
b) Jeu de barre générateur.....	8
c) Jeu de barre de charge	8
I.4. Généralisation à un système de n jeux de barres.....	8
I.5. Exemple de démonstration pour deux jeux de barres.....	8
I.5.1. Les équations de l'écoulement de puissance.....	9
I.5.2. Les équations d'écoulement dans les lignes.....	11
I.5.3. Equations de l'écoulement de puissance (sous forme réelle).....	12
I.5.4. Les pertes de puissance dans lignes.....	13
I.5.5. Facteur de puissance	13
I.6. Classification des variables de l'écoulement de puissance.....	13
I.6.1. Les variables de perturbation ou non contrôlables.....	14
I.6.2. Les variables de contrôle et d'état.....	14
I.7. les méthodes numériques itératives.....	15
I.7.1. Méthode la itérative de Gauss-Seidel.....	15
I.7.1.1. Principe	15

I.7.1.2. La méthode de Gauss Seidel appliqué aux équations de l'écoulement de puissance.....	16
I.7.2. Méthodes de Newton-Raphson.....	17
I.7.2.1.Représentation géométrique de la méthode de N-R.....	17
I.7.2.2. Résolution d'un système d'équation à (n) variables non linéaire.....	18
I.7.2.3. Arrêt des opérations.....	19
I.7.2.4. La méthode de Newton-Raphson appliquée aux équations d'écoulement de puissance.....	19
I.7.2.4.1. Détermination des sous matrices de la Jacobéenne J.....	21
I.7.2.4.2. Algorithme de Newton-Raphson.....	22
I.8. Conclusion.....	23

Chapitre II

Etude les dispositif FACTS

II.1. Introduction.....	24
II.2. Dispositifs FACTS.....	25
II.2.1. Classification des dispositifs FACTS.....	25
II.2.2. Compensateurs shunts.....	26
II.2.2.1. Compensateurs parallèles à base de thyristors.....	26
a) - SVC (Static Var Compensator)	26
b) -Principe de fonctionnement.....	27
II.2.2.2. Compensateurs parallèles à base de GTO thyristors.....	28
a) -(STATCOM) Compensateur synchrone statique.....	28
b)--Principe du fonctionnement.....	29
II.2.3. Compensation série.....	31
II.2.3.1. Principe de fonctionnement.....	32

II.2.3.2. Application.....	32
II.2.3.3. Compensateurs séries à base de thyristor.....	33
a)-Le TCSC (Compensateur Série Contrôlé par Thyristors)	33
b)-Principe de fonctionnement.....	33
II.2.3.4. Compensateurs séries à base de GTO thyristor.....	34
a)-SSSC (Static Synchronous Series Compensator)	34
b)-Principe de fonctionnement.....	35
II.2.4. Compensateurs hybrides série – parallèle.....	36
II.2.4. 1. UPFC (Contrôleur universelle de l'écoulement de puissance).....	36
a)-Principe de fonctionnement.....	36
b) –Application.....	37
II.2.4. 2. IPFC (Interline Power Flow Controller).....	37
II.3. Comparaison des FACTS les plus utilisés.....	38
II.4. Les avantages de la technologie des dispositifs FACTS.....	38
II.5. Conclusion.....	38

Chapitre III

Etude d'un compensateur shunt : SVC

III.1 . Introduction.....	40
III.2. Caractéristique d'un compensateur statique.....	40
III.2.1. Caractéristique en V d'un compensateur statique.....	40
III.2.2. Caractéristique $Q_{SVC}(I)$ d'un SVC.....	41
III.2.3. Caractéristique de SVC idéal.....	42
III.2.4. caractéristique d'un SVC réel.....	43
III.3. Les équations de SVC.....	43

III.4. Implantation du compensateur statique dans le problème de l'écoulement de puissance.....	46
III.5.1. L'organigramme globale de l'intégration de SVC.....	49
III.5.2. Organigramme détaillée.....	50
III.6. Conclusion.....	52

Chapitre IV

Application

IV.1. Description générale.....	53
IV.2. Application:(programmation); compensation shunt avec SVC.....	53
IV.2.1. Application.....	53
IV.2.2. les résultats de programmation (réseau 9 jeux de barres)	54
IV.2.3. Application.....	59
IV.2.4. les résultats de programmation (réseau 30 jeux de barres).....	60
IV.2.5. Comparaison des résultats du chute de tension dans les deux réseaux (9 jeux de barres- 30 jeux de barres)	66
IV.3. Interprétation.....	66

Conclusion Générale	68
---------------------------	----

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 [1].

Durant les dernières années, l'industrie de l'énergie électrique est confrontée à des problèmes liés à de nouvelles contraintes qui touchent différents aspects de la production, du transport et de la distribution de l'énergie électrique. On peut citer entre autres les restrictions sur la construction de nouvelles lignes de transport, l'optimisation du transit dans les systèmes actuels, la Cogénération de l'énergie, les interconnexions avec d'autres compagnies d'électricité et le respect de l'environnement [2].

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

Jusqu'à la fin des années 1980, les seuls moyens permettant de remplir ces fonctions étaient des dispositifs électromécaniques, à savoir les transformateurs avec régleur en charge, les bobines d'inductance et les condensateurs commutés par disjoncteurs pour le maintien de la tension et la gestion du réactif. Toutefois, des problèmes d'usure ainsi que leur relative lenteur ne permet pas d'actionner ces dispositifs plus de quelques fois par jour ; ils sont par conséquent difficilement utilisables pour un contrôle continu des flux de puissance.

Une autre technique de réglage et de contrôle des puissances réactives, des tensions et des transits de puissance utilisant l'électronique de puissance a fait ses preuves.

La solution de ces problèmes passe par l'amélioration du contrôle des systèmes électriques déjà en place. Il est nécessaire de doter ces systèmes d'une certaine flexibilité leur permettant de mieux s'adapter aux nouvelles exigences.

Les éléments proposés qui permettent ce contrôle amélioré des systèmes sont les dispositifs FACTS « *Flexible Alternating Current Transmission System* ». Les dispositifs FACTS font en général appel à de l'électronique de puissance, des microprocesseurs, de l'automatique, des télécommunications et des logiciels pour parvenir à contrôler les systèmes de puissance.

Ce sont des éléments de réponse rapide. Ils donnent en principe un contrôle plus souple de l'écoulement de puissance. Ils donnent aussi la possibilité de charger les lignes de transit à des valeurs près de leur limite thermique, et augmentent la capacité de transférer de la puissance d'une région à une autre. Ils limitent aussi les effets des défauts et des défaillances de l'équipement, et stabilisent le comportement du réseau [3].

La recherche rapportée dans ce mémoire est motivée par le souci de perfectionner le contrôle des puissances réactives et des tensions dans un réseau de transport d'énergie électrique au moyen de dispositifs FACTS, comme celle comportant une branche de réactance commandée par thyristors, tel que le compensateur statique de puissance réactive SVC « *Static Var Compensator SVC* ».

Le compensateur statique SVC est un dispositif qui sert à maintenir la tension en régime permanent et en régime transitoire à l'intérieur de limites désirées. Le SVC injecte ou absorbe de la puissance réactive dans le nœud où il est branché de manière à satisfaire la demande de puissance réactive de la charge .

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

Dans le premier chapitre, nous décrivons d'une méthode de calcul de la puissance réactive dans le réseau électrique .

Le second chapitre a été consacré à l'étude des dispositifs FACTS,

Le troisième chapitre est consacré à l'étude profonde concerne la modélisation et l'application du contrôleur SVC 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 SVC dans les réseaux électriques).

Chapitre I

Chapitre : I

Méthode de calcul de la puissance réactive dans le réseaux électrique

I.1. Introduction [4]

L'étude de la répartition de charge coordonne la projection d'extension future des systèmes de puissance (dans les réseaux électriques). Ainsi que la détermination du régime de fonctionnement des réseaux existants dans le but d'obtenir l'exploitation la plus économique conduisant à la meilleure utilisation de toutes les sources. Pour ce fait les prévisions concernant la consommation et la production sont faites par des études approfondies qui ont à faire aux méthodes numériques appliquées en ce domaine. Ces études ont pour but, le contrôle de l'exécution des programmes ainsi d'établir la surveillance et le maintien de la puissance, la tension, le courant et la fréquence exigée, de façon à réaliser une utilisation optimale des sources énergétiques.

La résolution du problème de l'écoulement de puissance, nous permet de déterminer les valeurs du module et de la phase de la tension en chaque nœud du réseau pour des conditions de fonctionnement données. Ce qui nous permettra de calculer les puissances transitées et générées et les pertes. Pour résoudre ce problème, il est nécessaire de déterminer les conditions de l'opération en régime permanent, d'un système de puissance, qui sont :

- La formulation d'un modèle mathématique appropriée.
- La spécification d'un certain nombre de variables et de contraintes dans les nœuds du système.
- La résolution numérique du système.

L'étude de l'écoulement de puissance permet :

- L'équilibre entre la production et la demande de l'énergie électrique.
- La précise des valeurs limites de la stabilité technique, pour éviter la détérioration de certains éléments du réseau.

- Le maintien des tensions aux J.D.B entre les limites tolérées ($V_{min} < V < V_{max}$), pour éviter l'endommagement de certains récepteurs et l'excès des pertes de puissance dans les lignes et les transformateurs ...etc.
- Le contrôle de la puissance réactive c'est-à-dire, le maintien de cette puissance entre deux limites ($Q_{min} < Q < Q_{max}$), pour éviter l'excès des coûts d'utilisation de la puissance réactive.
- L'interconnexion entre les centrales et les réseaux qui permet d'améliorer la qualité d'énergie fournit en tension et fréquence.
- La planification des réseaux (étude prévisionnelle répandant à la demande des usagers dans l'avenir).

I.2. Modélisation des éléments du réseau électrique [5]

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-système :

- 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.2.1. Générateur de puissance (Machine synchrone) [4]

Dans l'analyse de l'écoulement de puissance, les générateurs sont modélisés comme des injecteurs des courants. Dans l'état stationnaire, un générateur est généralement contrôlé de sorte que la puissance active (P_g) injectée au jeu de barre et la tension aux bornes du générateur soient maintenues constantes.

La puissance active du générateur est déterminée par le contrôle de la turbine, qui doit être dans la capacité du système turbine – générateur. La tension (V_g) est

principalement déterminée par l'injection de la puissance réactive au jeu de barre de production.

I.2.2. Ligne de transport [4]

La ligne de transport est modélisée par le schéma unifilaire en π à paramètres distribués. Ces paramètres dépendent de la nature du conducteur et de leurs géométries :

· Des paramètres linéaires série par phase :

r : résistance linéique ou série (Ω/km).

x : réactance linéique ou série (Ω/km).

· Des paramètres shunt par phase :

b : susceptance shunt ($1/\Omega.km$).

g : conductance shunt ($1/\Omega.km$).

Dans la plupart des cas, la conductance shunt est négligeable ($g \approx 0$).

Les lignes électriques peuvent être classées suivant plusieurs critères.

*- Situation dans l'espace : lignes aériennes, lignes souterraines (câbles).

*- Classe de tension : lignes à basse tension ($<1kV$) et ligne à haute tension ($>1kV$).

*- Suivant la longueur:-Ligne courte $L < 80km$.

-Ligne moyenne $80km < L < 240km$.

-Ligne longue $L > 240km$.

I.2.3. Transformateur [5]

Le transformateur est un appareil statique très robuste. Il est utilisé pour modifier la présentation de l'énergie électrique alternative, afin de la rendre aussi commode que possible à tous les stades de la production, de la distribution et de l'utilisation.

C'est cette facilité de transformation qui explique l'abandon du continu pour l'alternatif dans les réseaux de distribution.

Dans le réseau d'énergie électrique les transformateurs rencontrés sont:

-les transformateurs fonctionnant en régime nominal c'est-à-dire avec un rapport de transformation nominale.

- les transformateurs à pas variables, le rapport de transformation est réglable.

- les transformateurs déphaseurs dont le rapport de transformations peut être représenté par un nombre complexe.

I.2.4. Charge électrique [4]

La charge électrique est souvent modélisée sous forme d'une impédance constante. La plupart des charges représentent une sous-station (système de distribution). Ces charges sont connectées au réseau électrique à travers un transformateur à prises de charges variables, où le niveau de tension de la charge est maintenu pratiquement constant. Dans ce cas, les puissances actives et réactives de la charge peuvent être représentées par des valeurs constantes.

I.2.5. Élément shunt

Dans la plupart des cas, les éléments shunt sont les batteries de condensateurs et les réactances qui sont utilisés pour fournir ou absorber la puissance réactive afin d'obtenir un meilleur profil de tension.

I.3. Classification des jeux de barres selon leurs spécifications [7]

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

- a. Jeu de barres de référence
- b. Jeu de barres de charge
- c. Jeu de barres générateur (à tension contrôlée)

Notons que dans un réseau électrique, les jeux de barres de charge forment de 80 à 90% de la totalité des jeux de barres, et 1% J.d.B de référence et le reste J.d.B de contrôle.

Pour chaque jeu de barre, deux variables doivent être spécifiées au préalable et les deux autres sont à calculer.

a) Jeu de barre de référence :

C'est un jeu de barre générateur où le module et la phase de tension (V, δ) sont les deux spécifiés. Les puissances (P, Q) sont inconnues et doivent être calculées à la fin.

Le jeu de barre de référence, est choisi parmi les jeux de barres générateurs dont la puissance active est la plus importante. Ce jeu de barre est pris comme référence des angles de tension.

b) Jeu de barre générateur :

Ce jeu de barre est connecté à un générateur délivrant une puissance active P sous une tension constante V contrôlée par un régulateur automatique de tension (AVR). Donc (P, V) sont spécifiées alors que (Q, δ) sont à calculer.

c) Jeu de barre de charge :

Ce jeu de barre alimente une charge caractérisée par sa puissance active P et réactive Q . Donc (P, Q) sont spécifiées, alors que (V, δ) sont à calculer.

I.4. Généralisation à un système de n jeux de barres [8]

Les réseaux électriques réels peuvent contenir des centaines de jeux de barres, de générateurs et de milliers de branches, donc pour un système de n jeux de barres on aura :

- ✓ n variables : $|V_i|$ (module de la tension du jeu de barres i)
- ✓ n variables : δ_i (angle de phase de la tension du jeu de barres i)
- ✓ n variables : P_{Gi} (puissance active injectée au jeu de barres i)
- ✓ n variables : Q_{Gi} (puissance réactive injectée au jeu de barres i)
- ✓ n variables : P_{Di} (puissance active demandée au jeu de barres i)
- ✓ n variables : Q_{Di} (puissance réactive demandée au jeu de barres i)

Avec $i=1,2,\dots, n$. Donc nous avons en tout $6n$ inconnues.

La puissance nette injectée à un jeu de barre, est égale à la différence entre la puissance générée S_{Gi} et la puissance demandée S_{Di} au niveau de ce jeu de barre .

I.5. Exemple de démonstration pour deux jeux de barres [8]

On peut démontrer d'une façon simple les propriétés fondamentales de l'étude de l'écoulement de puissance par la discussion d'un système à deux jeux de barres qui est montré à la figure (I-1).

Un réseau électrique réel ne peut pas être de cette simplicité, mais cela va seulement servir comme objet de démonstration. Chaque jeu de barres est alimenté d'un générateur. Les générateurs fournissent les énergies S_{G1} et S_{G2} aux jeux de barres. Les charges demandées sont prises de chaque jeu de barres à des quantités S_{D1} et S_{D2} , les deux jeux de barres sont liés par une ligne de transmission caractérisée par une admittance série Y_s et une admittance parallèle Y_p .

Les tensions des jeux de barres sont symbolisées par V_1 et V_2 respectivement. Pour ce réseau les puissances des deux jeux de barres sont :

$$\begin{cases} P_1 + jQ_1 = P_{G1} - P_{D1} + j(Q_{G1} - Q_{D1}) \\ P_2 + jQ_2 = P_{G2} - P_{D2} + j(Q_{G2} - Q_{D2}) \end{cases}$$

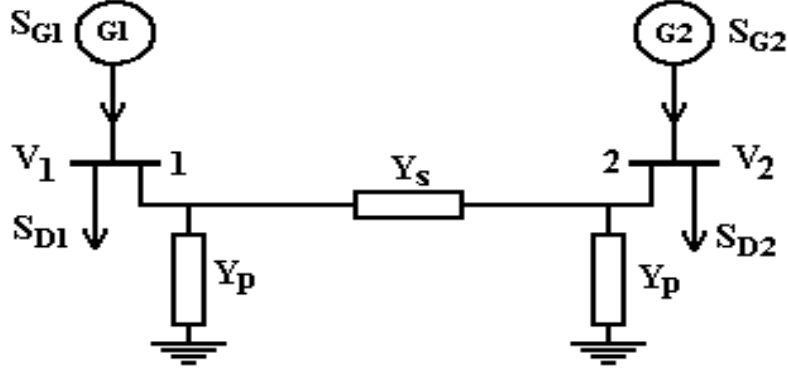


Figure I -1 : Exemple d'un réseau électrique à deux jeux de barres

I.5.1. Les équations de l'écoulement de puissance [8]

La construction du modèle mathématique duquel on peut prédire la forme (aspect) de l'écoulement de puissance, est essentielle pour la compréhension du mécanisme de l'écoulement de puissance.

Dans la formulation des équations de l'écoulement de puissance l'une des deux matrices (admittance ou impédance est nécessaire).

La puissance apparente S_1 injectée au jeu de barres 1 est donnée par l'équation $S_1 = V_1 I_1^*$ où I_1 est le courant qui entre dans le jeu de barres 1. Ce courant est composé de deux composantes, une composante $Y_p V_1$ qui s'écoule à travers l'admittance shunt, et une composante $(V_1 - V_2) Y_s$ qui s'écoule à travers l'admittance série de la ligne équivalente du réseau. D'après la loi de Kirchhoff appliquée à un jeu de barres, nous avons :

$$I_1 = \frac{S_1^*}{V_1} = V_1 Y_p + (V_1 - V_2) Y_s \quad (\text{I-1})$$

$$I_2 = \frac{S_2^*}{V_2} = V_2 Y_p + (V_2 - V_1) Y_s \quad (\text{I-2})$$

NB : Les équations (I-1) et (I-2) sont données pour une seule phase.

On peut écrire ces deux dernières équations d'une manière plus simple :

$$\begin{cases} I_1 = \frac{S_1^*}{V_1^*} = Y_{11}V_1 + Y_{12}V_2 \\ I_2 = \frac{S_2^*}{V_2^*} = Y_{21}V_1 + Y_{22}V_2 \end{cases} \quad (I-3)$$

Avec :

$$\begin{aligned} Y_{11} &= Y_{22} = Y_p + Y_s \\ Y_{12} &= Y_{21} = -Y_s \end{aligned}$$

Maintenant on va introduire les matrices et les vecteurs suivants :

$$I_{BUS} = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \text{ Vecteur de courants des jeux de barres}$$

$$V_{BUS} = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \text{ Vecteur de tensions des jeux de barres}$$

$$Y_{BUS} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \text{ La matrice admittance du réseau}$$

$$Z_{BUS} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \text{ La matrice impédance du réseau}$$

On peut écrire les équations (I-3) d'une manière plus simple

$$I_{BUS} = Y_{BUS}V_{BUS} \quad (I-4)$$

$$V_{BUS} = Z_{BUS}I_{BUS} \quad (I-5)$$

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix}$$

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

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

⋮
⋮
⋮

$$I_n = (-y_{n1})V_1 + (-y_{n2})V_2 + \dots \dots \dots + (-y_{nn})V_n$$

La matrice admittance est donc :

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1, i \neq n}^n y_{1n} & \dots & (-y_{1n}) \\ \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots \\ (-y_{n1}) & \dots & \dots \\ (-y_{n1}) & \dots & \sum_{i=1, i \neq n}^m y_{ni} \end{bmatrix}$$

Ces équations sont complexes, linéaires. La caractéristique de linéarité assure une simple solution des inconnues. Les courants aux jeux de barres seront calculés par la substitution directe dans (I-3), et vice versa. Si les courants sont des inconnus, les tensions aux jeux de barres seront calculées d'après (I-4). Naturellement on a besoin d'inverser la matrice Y_{BUS} .

En réalité, ce sont les puissances qui seront connues et pas les courants, ce qui change la forme des équations (I-3) à :

$$\begin{cases} S_1^* = P_1 - jQ_1 = (Y_{11}V_1 + Y_{12}V_2)V_1^* \\ S_2^* = P_2 - jQ_2 = (Y_{21}V_1 + Y_{22}V_2)V_2^* \end{cases} \quad (I-6)$$

Ces équations sont les équations de "l'écoulement de puissance" ou "l'écoulement de charge" recherchées.

La solution de ces équations est plus difficile que la solution du système d'équations linéaires (I-4) et (I-5), car elles ne sont pas linéaires.

I.5.2. Les équations d'écoulement dans les lignes [8]

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 :

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

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 à la ligne de charge.

La puissance qui écoule, active et réactive, est :

$$P_{ik} - jQ_{ik} = V_i^* \cdot I_{ik}$$

$$P_{ik} - jQ_{ik} = V_i^* (V_i - V_k) y_{ik} + V_i^* \cdot V_i \cdot \frac{y_{ik}}{2} \quad (\text{I-7})$$

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

$$P_{ki} - jQ_{ki} = V_k^* (V_k - V_i) y_{ik} + V_k^* \cdot V_k \cdot \frac{y_{ik}}{2} \quad (\text{I-8})$$

Les pertes de puissances dans la ligne « i-k » sont égales à la somme algébrique de la répartition des puissances déterminées à partir des relations (I-7) et (I-8).

I.5.3. Equations de l'écoulement de puissance (sous forme réelle) [8]

On peut écrire les équations (1-6) comme suit :

$$S_1^* = P_1 - jQ_1 = V_1^* \sum_{k=1}^2 Y_{1k} V_k, \quad S_2^* = P_2 - jQ_2 = V_2^* \sum_{k=1}^2 Y_{2k} V_k$$

D'une manière plus compacte on a :

$$S_i^* = P_i - jQ_i = V_i^* \sum_{k=1}^2 Y_{ik} V_k \quad i=1,2 \quad (\text{I-9})$$

Chaque tension au jeu de barres V_i a une amplitude $|V_i|$ et un angle de phase δ_i ainsi que chaque élément de la matrice admittance est en général de type complexe donc on peut écrire $V_i = |V_i| \angle \delta_i$, $Y_{ij} = |Y_{ij}| \angle \gamma_{ij}$

D'ici on peut écrire les équations de l'écoulement de puissance

$$P_i - jQ_i = \sum_{k=1}^2 |Y_{ik}| |V_i| |V_k| \exp(\delta_k - \delta_i + \gamma_{ik}) \quad (\text{I-10})$$

Séparons les parties réelles et imaginaires

$$P_i = \sum_{k=1}^2 |Y_{ik}| |V_i| |V_k| \cos(\delta_k - \delta_i + \gamma_{ik}) \quad (\text{I-11})$$

$$Q_i = \sum_{k=1}^2 |Y_{ik}| |V_i| |V_k| \sin(\delta_k - \delta_i + \gamma_{ik}) \quad (\text{I-12})$$

$i=1,2$

Pour l'exemple à deux jeux de barres on a :

$$\begin{cases} P_1 = P_{G1} - P_{D1} = |Y_{11}| |V_1|^2 \cos(\gamma_{11}) + |Y_{12}| |V_1| |V_2| \cos(\delta_2 - \delta_1 + \gamma_{12}) = f_{1p} \\ P_2 = P_{G2} - P_{D2} = |Y_{22}| |V_2|^2 \cos(\gamma_{22}) + |Y_{21}| |V_1| |V_2| \cos(\delta_1 - \delta_2 + \gamma_{21}) = f_{2p} \\ Q_1 = Q_{G1} - Q_{D1} = -|Y_{11}| |V_1|^2 \sin(\gamma_{11}) - |Y_{12}| |V_1| |V_2| \sin(\delta_2 - \delta_1 + \gamma_{12}) = f_{1q} \\ Q_2 = Q_{G2} - Q_{D2} = -|Y_{22}| |V_2|^2 \sin(\gamma_{22}) - |Y_{21}| |V_1| |V_2| \sin(\delta_1 - \delta_2 + \gamma_{21}) = f_{2q} \end{cases} \quad (I-13)$$

I.5.4. Les pertes de puissance dans lignes [6]

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 :

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

Avec :

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

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

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

$$\sum Q_i = \sum F_{iq} = \sum Q_{Gi} - \sum Q_{Di} \quad (I-14)$$

Le système d'équations (I-14) exprime l'expression des pertes.

Ou 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

$$\begin{aligned} P_{Lij} &= P_{ij} + P_{ji} \\ Q_{Lij} &= Q_{ij} + Q_{ji} \end{aligned} \quad (I-15)$$

I.5.5. Facteur de puissance

Le facteur de puissance est défini par le rapport suivant :

$$F = \cos \varphi = \frac{P}{S} \quad (I-16)$$

I.6. Classification des variables de l'écoulement de puissance

La dernière observation nous permet de remarquer une des plus importantes spécifications du problème. Donc il est impératif d'introduire un certain ordre sur les variables. Pour cette raison on les partage en ces groupes naturels suivants :

I.6.1. Les variables de perturbation ou non contrôlables [8]

Parmi les douze variables des équations de l'écoulement de puissance, les variables de la demande $P_{D1}, P_{D2}, Q_{D1}, Q_{D2}$ ne sont pas contrôlables car elles dépendent seulement des utilisateurs de la puissance. Les variables de perturbation avec cette définition constituent les composantes du vecteur de perturbation P.

$$P = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ Q_1 \\ Q_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{D1} \\ P_{D2} \\ Q_{D1} \\ Q_{D2} \end{bmatrix} \quad (I-17)$$

I.6.2. Les variables de contrôle et d'état

Les huit variables $|V_1|, |V_2|, \delta_1, \delta_2, P_{G1}, P_{G2}, Q_{G1}, Q_{G2}$ peuvent facilement être groupées en deux groupes, les variables de "contrôles" et variables "d'état".

- ✓ Les variables $|V_1|, |V_2|, \delta_1, \delta_2$ sont définies comme variables d'état. Pour utiliser la notation connue dans la théorie de contrôle ces variables doivent être représentées par les variables $X_1, \dots, X_4$
- ✓ Les variables $P_{G1}, P_{G2}, Q_{G1}, Q_{G2}$ sont des variables de contrôle, et qu'on préfère le symboliser par $U_1, \dots, U_4$, donc nous aurons:

$$X = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ |V_1| \\ |V_2| \end{bmatrix} \quad X : \text{vecteur d'état} \quad (I-18)$$

$$U = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{G1} \\ P_{G2} \\ Q_{G1} \\ Q_{G2} \end{bmatrix} \quad U : \text{vecteur de contrôle} \quad (I-19)$$

I.7. les méthodes numériques itératives

Il existe deux méthodes de base pour la résolution des équations non linéaires de l'écoulement de puissance : Gauss- Seidel (GS) et Newton-Raphson (NR). Dans ce chapitre, on va présenter la méthode de NR, ainsi Gauss- Seidel (GS).

Dans notre projet on a utilisée la programmation en MATLAB

I.7.1. Méthode la itérative de Gauss-Seidel [9]

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.

I.7.1.1. Principe

Soit à résoudre l'équation : $f(x) = 0$

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

$$\begin{cases} x^1 = g(x^0) \\ x^2 = g(x^1) \\ \cdot \\ \cdot \\ x^{k+1} = g(x^k) \end{cases}$$

Où k : numéro d'itération

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

$$|x^{k+1} - x^k| \leq \varepsilon$$

Pour un système de n équations :

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

$$f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0$$

.

.

.

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

Pour trouver l'algorithme de Gauss-Seidel on a besoin de reformer la fonction

$f(x) = 0$ à la forme itérative $x = g(x)$

$$\begin{cases} x^1 = g(x^0) \\ x^2 = g(x^1) \\ \cdot \\ \cdot \\ x^{k+1} = g(x^k) \end{cases}$$

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

$$|x^{k+1} - x^k| \leq \varepsilon$$

I.7.1.2. La méthode de Gauss Seidel appliqué aux équations de l'écoulement de puissance [12]:

Soit un réseau de n J.d.B :

On a :

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & \cdots & Y_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix}$$

Donc, la tension à $(k+1)^{\text{ième}}$ itération s'exprime à partir du système ci-dessus quand

V_i^k et I_i^k sont trouvés à la $(k)^{\text{ième}}$ itérations par :

$$V_1^{k+1} = \frac{1}{Y_{11}} [I_1^k - Y_{12}V_2^k - Y_{13}V_3^k - \cdots - Y_{1n}V_n^k]$$

.

.

.

$$V_n^{k+1} = \frac{1}{Y_{nn}} [I_n^k - Y_{1n}V_1^k - Y_{2n}V_2^k - \cdots - Y_{n-1n}V_{n-1}^k]$$

Tous les courants dans le système sont inconnus ils sont donnée par :

$$I_i = \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*}$$

D'où la formule générale pour déterminer la tension de noeud $i^{\text{ième}}$, qui s'écrit par :

$$V_i^{k+1} = \frac{1}{Y_{ii}} \left[\frac{P_i - jQ_i}{V_i^{*(k)}} - \sum_{j=1, j \neq i}^n Y_{ij} V_j^k \right], i = 1, 2, \dots, n$$

Où: k est le numéro d'itération

$$P_i^{k+1} = \text{Re} \left\{ V_i^{*(k)} \left[V_i^k Y_{ii} - \sum_{j=1, j \neq i}^n Y_{ij} V_j^k \right] \right\}$$

$$Q_i^{k+1} = -\text{Im} \left\{ V_i^{*(k)} \left[V_i^k Y_{ii} - \sum_{j=1, j \neq i}^n Y_{ij} V_j^k \right] \right\}$$

I.7.2. Méthodes de Newton-Raphson [8]

La technique itérative de Newton Raphson converge avec une même vitesse, mesurée par le nombre d'itérations, pour les larges et courts systèmes, en moins de quatre à cinq itérations en général. C'est pour cette raison que la méthode de N-R est la plus utilisée pour l'étude des larges systèmes.

I.7.2.1. Représentation géométrique de la méthode de N-R

Elle est basée sur la détermination de la tangente à la courbe $f(x)$ à chaque point $(x^{(k)}, f(x^{(k)}))$. L'intersection de cette tangente avec l'axe des x fournit le point $x^{(k+1)}$, ($\Delta x^{(k)}$ étant une approximation de l'erreur commise sur x à l'itération (k)).

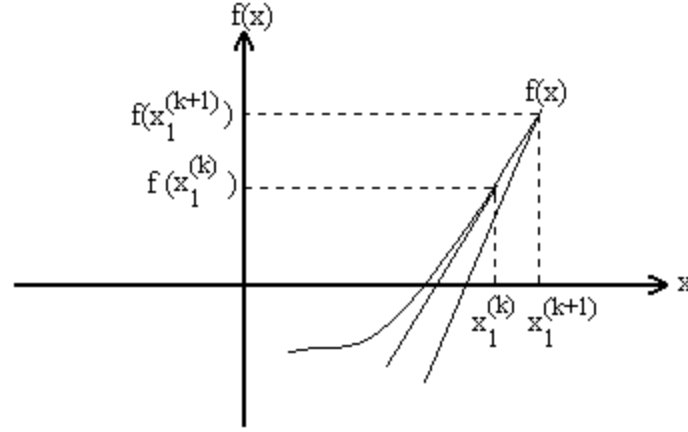


Figure I-2 : Représentation géométrique de la méthode de N-R

I.7.2.2. Résolution d'un système d'équation à (n) variables non linéaire

Soit la fonction $f(x) = 0$ de dimension n , tel que :

$$f(x) = \begin{bmatrix} f_1(x) \\ f_2(x) \\ \vdots \\ f_n(x) \end{bmatrix} \quad x^{(0)} = \begin{bmatrix} x_1^{(0)} \\ x_2^{(0)} \\ \vdots \\ x_n^{(0)} \end{bmatrix}$$

On estime que $x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}$ sont les solutions de ces n équations. L'exposant $^{(0)}$ indique que ces valeurs sont des estimations initiales.

On désigne par $\Delta x_1^{(0)}, \Delta x_2^{(0)}, \dots, \Delta x_n^{(0)}$ les valeurs à ajouter à $x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}$ pour trouver les solutions correctes.

Lorsqu'on développe toutes les fonctions en série de Taylor au voisinage du point d'estimation initiale on aura :

$$\begin{aligned} f_1(x^{(0)}) + \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_1}\right)^{(0)} \Delta x_1^{(0)} + \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_2}\right)^{(0)} \Delta x_2^{(0)} + \dots + \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_n}\right)^{(0)} \Delta x_n^{(0)} &= 0 \\ f_2(x^{(0)}) + \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_1}\right)^{(0)} \Delta x_1^{(0)} + \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_2}\right)^{(0)} \Delta x_2^{(0)} + \dots + \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_n}\right)^{(0)} \Delta x_n^{(0)} &= 0 \\ \vdots & \\ f_n(x^{(0)}) + \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_1}\right)^{(0)} \Delta x_1^{(0)} + \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_2}\right)^{(0)} \Delta x_2^{(0)} + \dots + \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_n}\right)^{(0)} \Delta x_n^{(0)} &= 0 \end{aligned}$$

On peut écrire le système de n équations linéaires comme suit :

$$\begin{bmatrix} f_1(x^{(0)}) \\ f_2(x^{(0)}) \\ \vdots \\ f_n(x^{(0)}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_1}\right)_0 & \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_2}\right)_0 & \cdots & \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_n}\right)_0 \\ \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_1}\right)_0 & \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_2}\right)_0 & \cdots & \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_n}\right)_0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_1}\right)_0 & \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_2}\right)_0 & \cdots & \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_n}\right)_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1^{(0)} \\ \Delta x_2^{(0)} \\ \vdots \\ \Delta x_n^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{I-20})$$

Les termes $\left(\frac{\partial f_1}{\partial x_1}\right)_0, \dots, \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_n}\right)_0$ correspondent à la dérivée partielle évaluée avec les valeurs $x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}$.

Ou dans une notation compacte : $f(x^{(0)}) + j^{(0)} \Delta x^{(0)} \approx 0$

La matrice carrée dite Jacobéenne : $[J^{(0)}]$

De cette dernière équation on tire ensuite le vecteur erreur $\Delta x^{(0)} = -[j^{(0)}]^{-1} f(x^{(0)})$

Mais $\Delta x^{(0)} = x^{(1)} - x^{(0)}$ donc $x^{(1)} = x^{(0)} - [j^{(0)}]^{-1} f(x^{(0)})$

En général : $x^{(k+1)} = x^{(k)} - [j^{(k)}]^{-1} f(x^{(k)})$

I.7.2.3. Arrêt des opérations

On a vu que théoriquement la solution n'est atteinte qu'après une infinité d'itérations. En pratique, on arrête les opérations pour l'un des tests suivants:

1. Si $f(x^{(k)})$ est quasiment nulle.
2. Si l'amélioration de $x^{(k)}$ d'une itération à la suivante ne justifie pas l'effort de calcul supplémentaire.
3. Si la convergence n'est pas obtenue avant un nombre d'itérations fixe .Le processus est considéré comme non convergent pour l'estimation initiale $(x^{(0)})$ donnée.

I.7.2.4. La méthode de Newton-Raphson appliquée aux équations d'écoulement de puissance [10]

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

$$\left. \begin{aligned} P_i &= \sum_{j=1}^n |y_{ij}| |V_i| |V_j| \cos(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}) = F_{ip} \\ Q_i &= \sum_{j=1}^n |y_{ij}| |V_i| |V_j| \sin(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}) = F_{iq} \end{aligned} \right\} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (\text{I-21})$$

n : Nombre de J.d.B

i : Numéro de J.d.B

Après le développement de F_{ip} et F_{iq} en série de Taylor autour de la première

approximation :

$$\left. \begin{aligned} P_i &= F_{ip}^{(0)} + \left(\frac{\partial F_{ip}}{\partial \delta_2}\right)^{(0)} \Delta \delta_2^{(0)} + \dots + \left(\frac{\partial F_{ip}}{\partial \delta_n}\right)^{(0)} \Delta \delta_n^{(0)} + \left(\frac{\partial F_{ip}}{\partial |V_2|}\right)^{(0)} \Delta V_2^{(0)} \\ Q_i &= F_{iq}^{(0)} + \left(\frac{\partial F_{iq}}{\partial \delta_2}\right)^{(0)} \Delta \delta_2^{(0)} + \dots + \left(\frac{\partial F_{iq}}{\partial \delta_n}\right)^{(0)} \Delta \delta_n^{(0)} + \left(\frac{\partial F_{iq}}{\partial |V_2|}\right)^{(0)} \Delta V_2^{(0)} \end{aligned} \right\} \quad (\text{I-22})$$

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

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

$$\text{Avec} \quad \left. \begin{aligned} \Delta P_i^{(0)} &= P_i - F_{ip}^{(0)} \\ \Delta Q_i^{(0)} &= Q_i - F_{iq}^{(0)} \end{aligned} \right\} \quad (\text{I-23})$$

Les deux systèmes d'équations (I-22) et (I-23) donnent :

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

Donc on peut écrire le système comme suit :

$$\begin{bmatrix} \Delta P^{(0)} \\ \Delta Q^{(0)} \end{bmatrix} = [J^{(0)}] \begin{bmatrix} \Delta \delta^{(0)} \\ \Delta V^{(0)} \end{bmatrix} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} \Delta \delta^{(0)} \\ \Delta V^{(0)} \end{bmatrix} = [J^{(0)}]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P^{(0)} \\ \Delta Q^{(0)} \end{bmatrix} \quad (\text{I-24})$$

On rappelle que :

$$\Delta\delta_i^{(K)} = \delta_i^{(K+1)} - \delta_i^{(K)} \quad i \neq 1(\text{ref}), i \neq 2(\text{cont}) \quad (\text{I-25})$$

$$\Delta|V_i|^{(K)} = |V_i|^{(K+1)} - |V_i|^{(K)}$$

L'adaptation de (I-24) avec (I-25) donne :

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

D'une manière générale

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = [J] \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta|V| \end{bmatrix}$$

$$J = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j_1 & j_2 \\ j_3 & j_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta|V| \end{bmatrix} \quad (\text{I-26})$$

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

1.7.2.4.1. Détermination des sous matrices de la Jacobéenne J

A partir du système d'équations (I-21) on peut déterminer les éléments de J

Sous matrice J_1 :

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = -|V_i||V_j||y_{ij}|\sin(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}), \quad i \neq j \quad (\text{I-27})$$

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

Sous matrice J₂:

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

(I-28)

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

Sous matrice J₃:

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

(I-29)

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

Sous matrice J₄:

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

(I-30)

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

1.7.2.4.2. Algorithme de Newton-Raphson [11]

Etape (1) : Formuler la matrice admittance (Y).

Etape (2) : Initialiser le compteur d'itération ($K = 0$), ainsi que les modules et les angles de tensions : $V_i = 1.0$ p.u et $\delta_i = 0$.

Etape (3) : Déterminer le vecteur des écarts de puissance $\Delta U^{(K)}$.

Etape (4) : Déterminer la matrice jacobienne $[J]^{(K)}$.

Etape (5) : Déterminer le vecteur d'erreur. $[\Delta X]^{(K)} = ([J]^{(K)})^{-1} \cdot [\Delta U]^{(K)}$.

Vérifier si le vecteur d'erreur est inférieur à une certaine tolérance ε : $[\Delta X]^{(K)} \leq \varepsilon$.

Si l'inégalité est vérifiée, le processus converge, aller à l'étape (6).

Sinon, calcule la valeur de $[X]$ à l'itération $(K + 1)$, c à d :

$$[X]^{(K+1)} = [X]^{(K)} + [\Delta X]^{(K)}$$

Incrémente le nombre d'itérations(K) de 1 et retourne à l'étape (3).

Etape (6) : Calculer les puissances actives et réactives à générer par le jeu de barre de référence.

Etape (7) : Calculer les puissances apparentes qui transitent à travers les lignes, les pertes,...etc.

I.8. 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 noeud dont ils : Puissance (Active et Réactive) Tension (Module et Angle) Parmi les méthodes de résolution, on a choisi la méthode de GAUSS-SEIDEL. Cette dernière a été appliquée dans différents réseaux avec et sans incorporation des dispositifs de compensation FACTS (SVC).

Chapitre II

Chapitre II

Etude les Dispositifs FACTS

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 en fonction de l'angle d'amorçage. Cet angle d'amorçage constitue donc une variable de commande du système. Pour les différentes raisons évoquées dans l'introduction générale, les dispositif FACTS ont un rôle important à jouer dans le contrôle des transits de puissance

et 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. Dispositifs FACTS:

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

Avec leurs aptitudes à modifier les caractéristiques apparentes des lignes, les FACTS sont capables d'accroître la capacité du réseau dans son ensemble en contrôlant les transits de puissances. Les dispositifs FACTS ne remplacent pas la construction de nouvelles lignes. Ils sont un moyen de différer les investissements en permettant une utilisation plus efficace du réseau existant.

II.2.1. Classification des dispositifs FACTS

Depuis les premiers compensateurs, trois générations de dispositifs FACTS ont vu le jour. Elles se distinguent par la technologie des semi-conducteurs et des éléments de puissance utilisés.

a)- La première génération est basée sur les thyristors classiques. Ceux-ci sont généralement utilisés pour enclencher ou déclencher les composants afin de fournir ou absorber de la puissance réactive dans les transformateurs de réglage.

b)- La deuxième génération, dite avancée, est née avec l'avènement des semi-conducteurs de puissance commandables à la fermeture et à l'ouverture, comme le thyristor GTO. Ces éléments sont assemblés pour former les convertisseurs de tension ou de courant afin d'injecter des tensions contrôlables dans le réseau.

c) - Une troisième génération de FACTS utilisant des composants hybrides et qui est adaptée à chaque cas. Contrairement aux deux premières générations, celle-ci n'utilise pas de dispositifs auxiliaires encombrants tels que des transformateurs pour le couplage avec le réseau.

II.2.2. 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. [13, 14]

II.2.2.1. Compensateurs parallèles à base de thyristors

a) - SVC (Static Var Compensator)

Compensateur Statique de Puissance Réactive (*CSPR*) (acronyme anglais de *Static 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 II-1).[15]

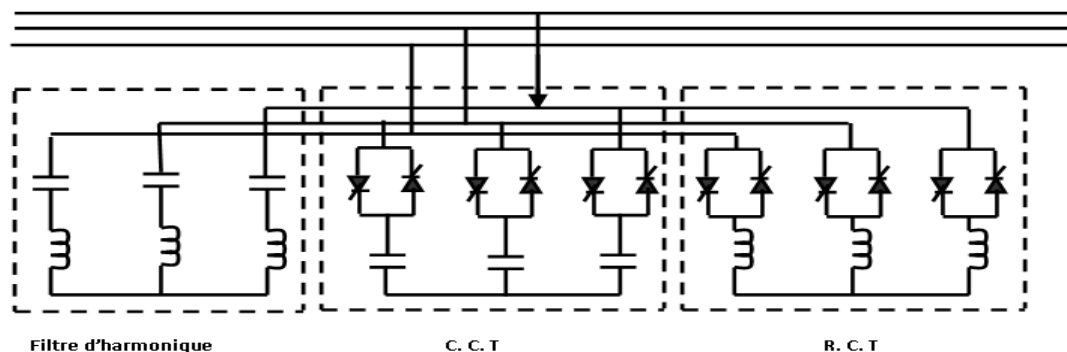


Figure II-1: Schéma du SVC

b) -Principe de fonctionnement : La figure (II-2) 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[16].

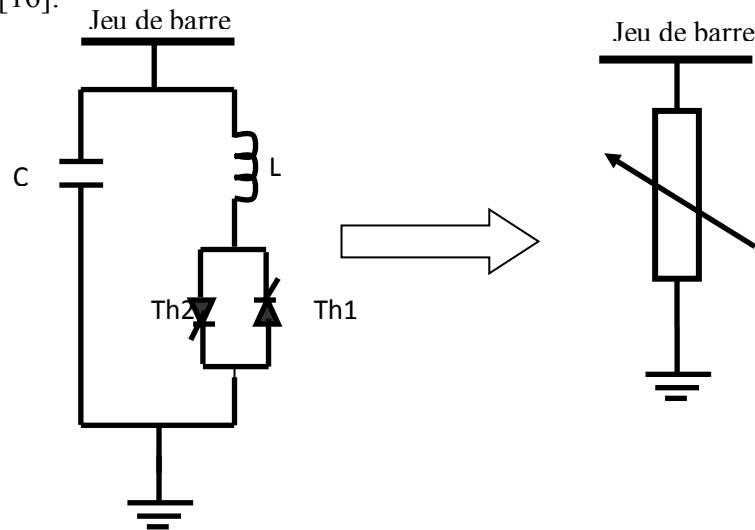


Figure II-2: présentation d'un Compensateur SVC

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 (II-3) 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.

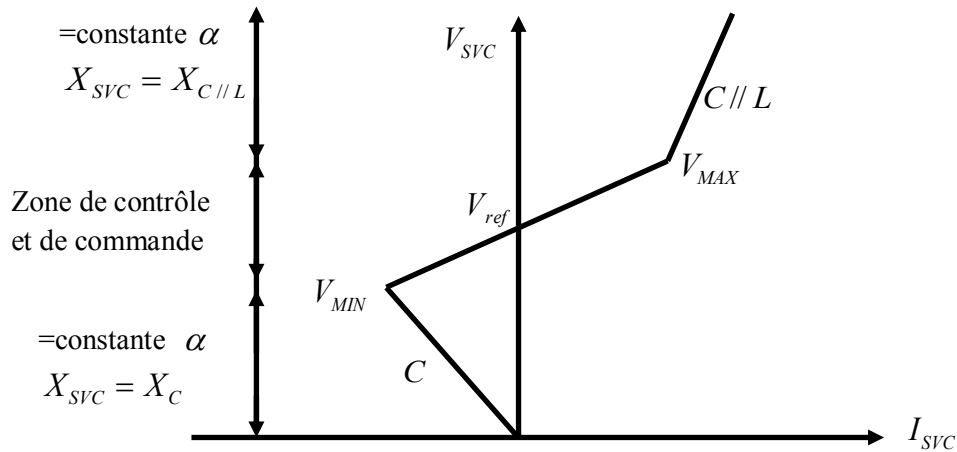


Figure II-3: fonctionnement du Compensateur SVC

II.2.2.2. Compensateurs parallèles à base de GTO thyristors

a) -(STATCOM) Compensateur synchrone statique

Le compensateur synchrone statique STATCOM (Static Synchronous Compensator) est fondé sur une source de tension synchrone à semi-conducteurs, analogue à une machine synchrone qui fournit un ensemble équilibré de trois tensions sinusoïdales à la fréquence fondamentale, avec des amplitudes et des angles de phases réglables. Un tel dispositif est toutefois exempt d'inertie. [15]

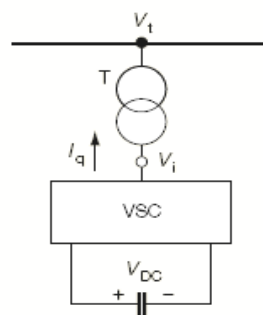


Figure II-4: Principe d'un compensateur synchrone statique

b)--Principe du fonctionnement

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

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

- ASVC (Advanced Static Var Compensator)
- STATCON (Static Condenser)
- SVG (Static Var Generator)
- SVC light
- SVC plus

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

Le STATCOM présente plusieurs avantages :

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

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

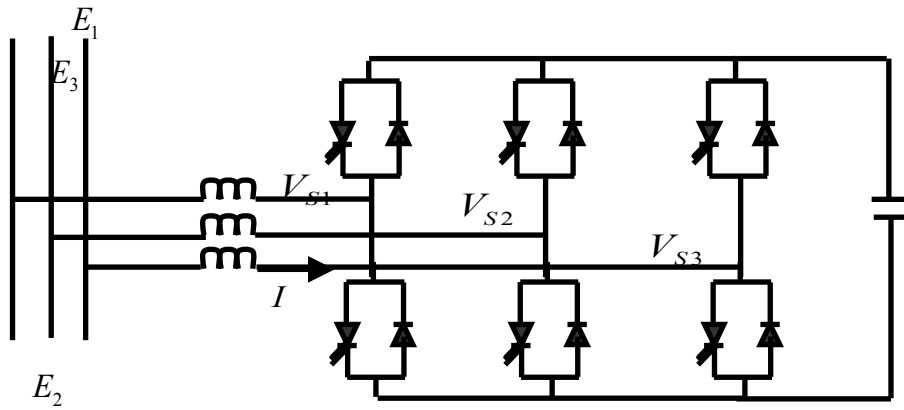


Figure II-5: Structure de STATCOM

Le rôle de STATCOM est d'échanger d'énergie réactive avec le réseau

Pour ce faire, l'onduleur est couplé au réseau par l'intermédiaire d'une inductance triphasée, celui-ci est en général l'inductance de fuite du transformateur de couplage.

L'échange d'énergie réactive se fait par le control de la tension de sortie de l'onduleur V_s , laquelle est en phase avec la tension du réseau E .

Le fonctionnement peut être décrit de façon suivante :

- Si $V_s < E$, le courant circulant dans l'inductance est déphasé de $+\frac{\pi}{2}$ par rapport à la tension E et le courant est capacitif (Figure II-5.a).
- Si $V_s > E$, le courant circulant dans l'inductance est déphasé de $-\frac{\pi}{2}$ par rapport à la tension E et le courant est inductive (Figure II-5.b).
- Si $V_s = E$, le courant circulant dans l'inductance est nul, il n'y a pas d'échange d'énergie.

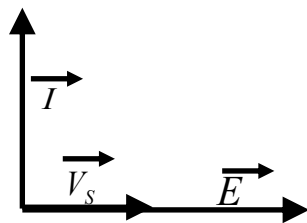


Figure (II-5.a): Courant capacitif

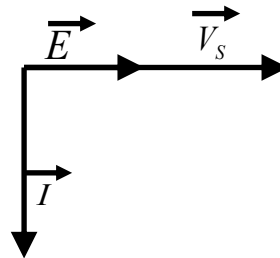


Figure (II-5.b): Courant inductive

On considère dans ce fonctionnement que les tensions sont triphasées et équilibrée. Par ailleurs, l'amplitude de la tension de sortie V_s est proportionnelle à la tension continue aux bornes du condensateur.

D'avantage de ce dispositif est pouvoir échange de l'énergie avec un comportement inductif et capacitif uniquement à l'aide d'une inductance.

Contrairement au SVC, il n'y a pas d'élément capacitif qui peut entraîner des résonances avec les éléments inductifs. La caractéristique statique de ce convertisseur est donnée par la figure (II-6) ce dispositif à l'avantage de pouvoir fournir un courant constant important même lorsque la tension E diminue, contrairement au SVC [19].

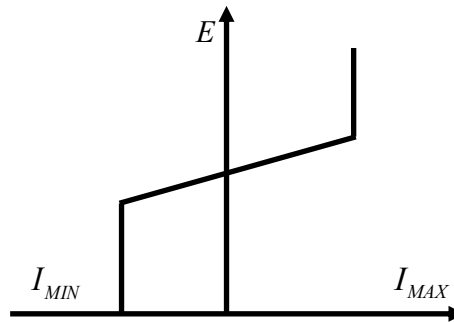


Figure II-6 : Caractéristique statique du STATCOM

II.2.3. 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.

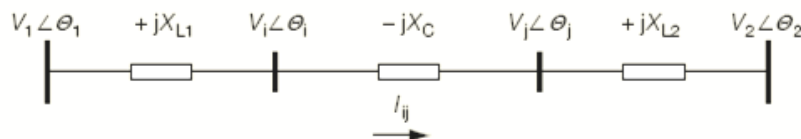


Figure II-7: Principe de la compensation série

II.2.3.1. 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 [16]

II.2.3.2. Application

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

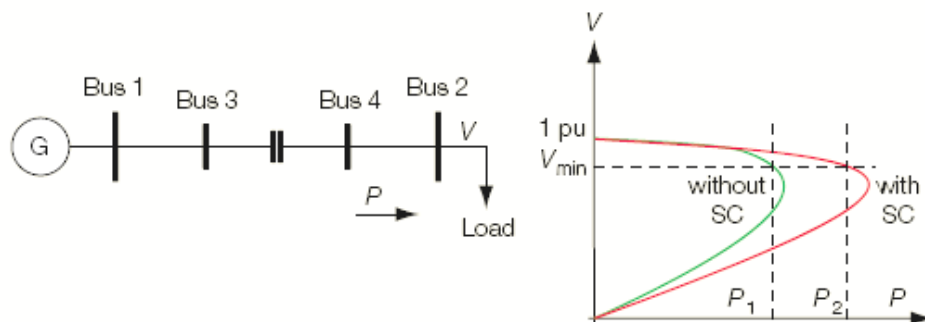


Figure II-8: Amélioration du profil de tension d'un système de puissance simple

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

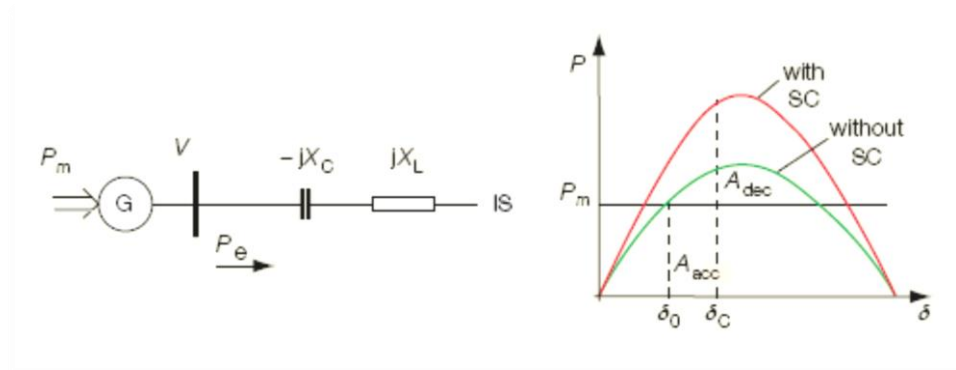


Figure II-9: Amélioration de la marge stabilité transitoire à l'aide d'un condensateur série

- 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.[17]

II.2.3.3. Compensateurs séries à base de thyristor

a)-Le TCSC (Compensateur Série Contrôlé par Thyristors)

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.

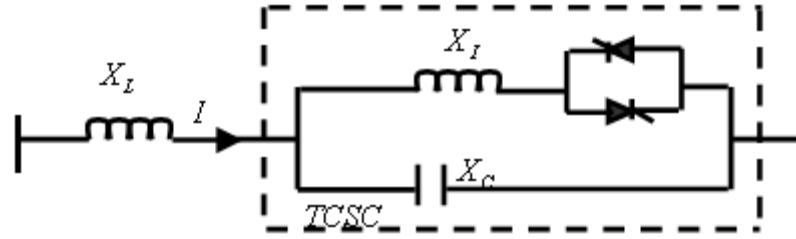


Figure II-10 : Insertion d'un TCSC sur une ligne

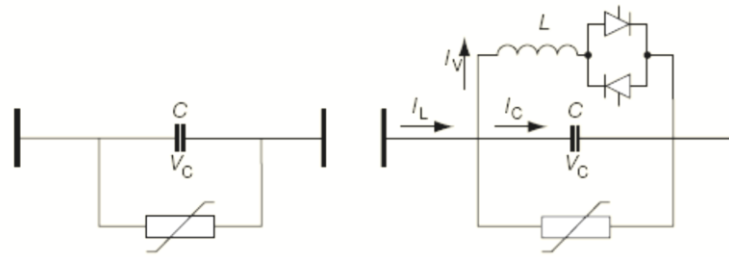


Figure II-11.a: Deux schémas de compensations série typiques avec un condensateur série fixe et un TCSC

II.2.3.4. Compensateurs séries à base de GTO thyristor

a)-SSSC (Static Synchronous Series Compensator) :

Ce type de compensateur série (Compensateur Synchrone Statique Série) est le plus important dispositif de cette famille. Il est constitué d'un onduleur triphasé couplé en série avec la ligne électrique à l'aide d'un transformateur (Fig. II-11).

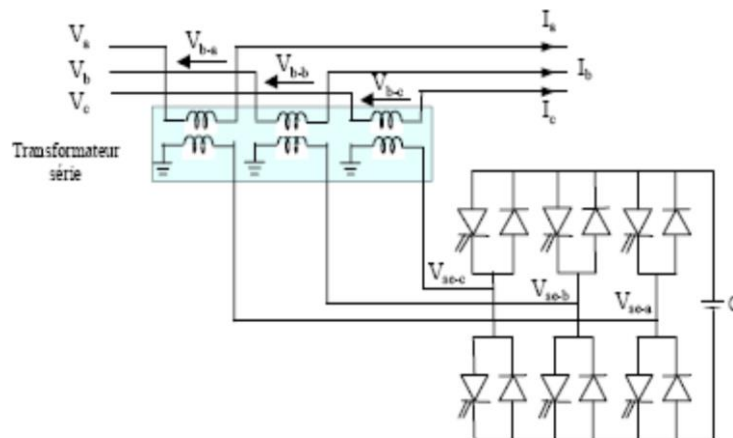


Figure II-11.b : Schéma de base du SSSC

Un convertisseur à source de tension peut être utilisé dans un système de transport d'énergie. Un tel système porte la désignation compensateur série synchrone statique SSSC (Static Synchronous Series Compensator)[17].

b)-Principe de fonctionnement

Montre un convertisseur à source de tension branché en série sur une ligne de transport via transformateur. Une source d'énergie est nécessaire pour fournir la tension CC à travers le condensateur et pour compenser les pertes du VSC. En principe, un SSSC est capable d'échanger de la puissance active et de la puissance réactive avec le système de puissance. Pourtant, si on ne désire que la compensation de puissance réactive, la source d'énergie peut être très petite. Si la source d'énergie est suffisamment puissante, la tension injectée peut être commandée en amplitude et en phase. En cas de compensation de puissance réactive, seule l'amplitude de la tension est commandable, puisque le vecteur de la tension injectée est perpendiculaire au courant de la ligne. Dans ce cas, la tension injectée en série peut faire avancer ou retarder le courant de la ligne de 90 degrés. Cela signifie que le SSSC peut être commandé en douceur à une valeur d'avance ou de retard quelconque à l'intérieur de la plage de travail du VSC. Ce faisant, un SSSC peut se comporter de manière analogue à un condensateur série et à une inductance série réglables. La différence fondamentale réside dans le fait que la tension injectée par un SSSC n'est pas en relation avec le courant de la ligne et qu'elle peut être réglée indépendamment de celui-ci. Cette caractéristique importante signifie que le SSSC peut être utilisé efficacement, tant pour les petites charges que pour les charges élevées. [15]

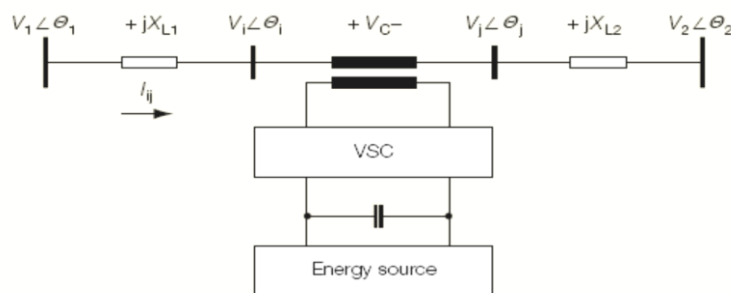


Figure II-12: Configuration de base d'un compensateur série synchrone statique (SSSC)

La caractéristique statique d'un Compensateur Synchrone Statique Série est donnée sur la figure suivante :

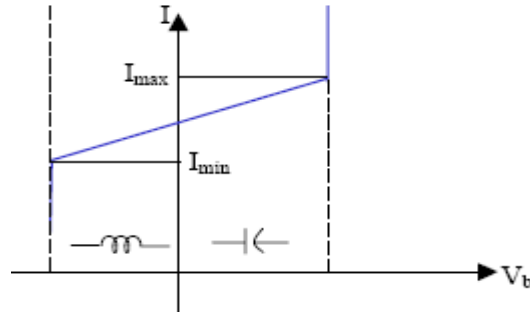


Figure II-13 : Caractéristique statique du SSSC

II.2.4. Compensateurs hybrides série – parallèle

II.2.4. 1. UPFC (Contrôleur universelle de l'écoulement de puissance) :

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.

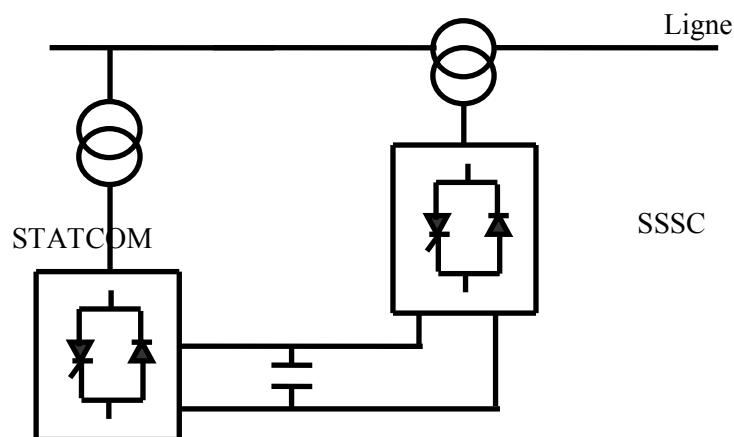


Figure II-14: Compensateur Unifier UPFC (Unified power flow Controller)

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.

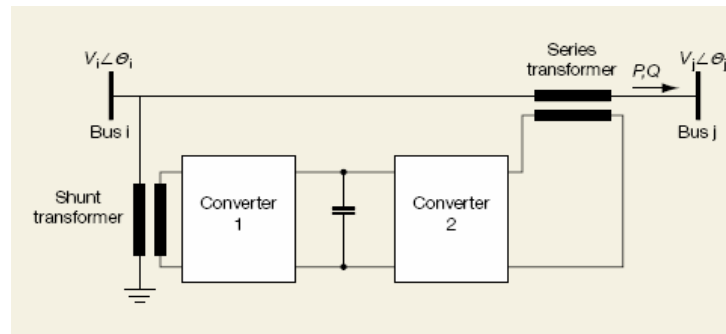


Figure II-15: Configuration de base du circuit d'un contrôleur de transit de puissance unifié (UPFC)

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. [17]

II.2.4. 2. IPFC (Interline Power Flow Controller)

L'IPFC a été proposé par Gyugyi, Sen et Schuder en 1998 afin de compenser un certain nombre de lignes de transmission d'une sous-station. Sous sa forme générale, l'IPFC utilise des convertisseurs DC-DC placés en série avec la ligne à compenser. En d'autres termes, l'IPFC comporte un certain nombre de SSSC. Il peut être utilisé afin de conduire des changements de puissances entre les lignes du réseau. [19]

II.3. Comparaison des FACTS les plus utilisés

Le tableau suivant montre les performances qui guident l'utilisateur dans son choix pour chaque compensateur. [20]

FACTS \ Performance	SV	SVC	STATCOM	TCSC	SSSC	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.4. Les avantages de la technologie 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.
- Améliorée l'interconnexion et l'échange énergétique.

II.5. 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, STATCOM, TCSC, SSSC, IPFC. 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*) 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

Chapitre III

Etude d'un Compensateur shunt : SVC

III.1 . Introduction

Les dispositifs FACTS sont des moyens de contrôle rapide et flexibles insérés dans un réseau pour satisfaire plusieurs besoins, tels que la réparation correct des puissances actives, la compensation de la puissance réactive et le renforcement de la stabilité des réseaux électriques.

Les dispositifs FACTS ils sont capable de réaliser plusieurs fonctions, telles que : augmentation de la capacité de transfert, renforcement de la stabilité et amélioration économique du réseau électrique.

L'implantation d'un dispositif nécessite de nouvelles méthodes d'études et d'analyses des réseaux électriques.

Dans ce chapitre, nous donne un exemple du modèle utilisée au l'implantation de dispositif dans le réseau, et quelques modèles des régulations SVC.

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 (III-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 (III-1)).

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

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

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 : $X_C = 2 * X_L$

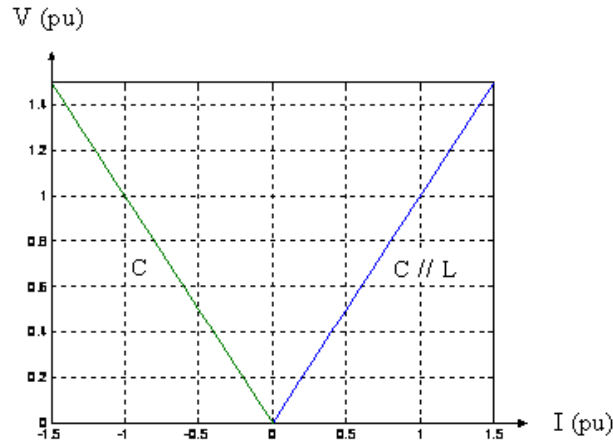


Figure III-1 : la caractéristique en V d'un SVC

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. [18]

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 (III-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 : $Q_C = \frac{U^2}{X_C}$ [21].

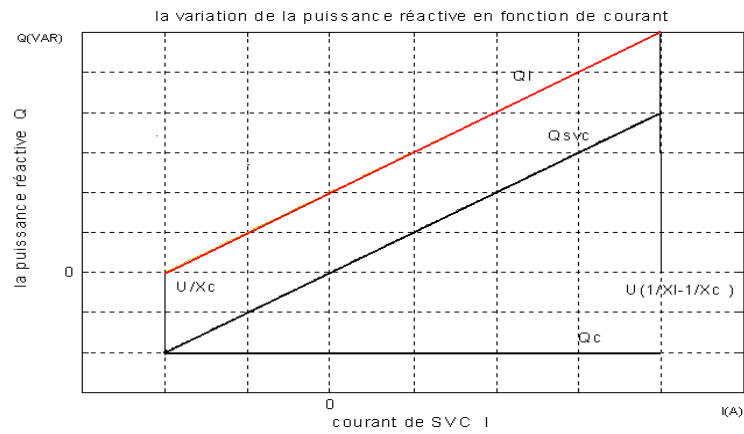


Figure III-2 : Variation de la puissance réactive en fonction du courant

III.2.3. Caractéristique de SVC idéal

Il est considéré comme une inductance variable en parallèle avec un condensateur variable pour régler la tension au point où il est shunté.[18]

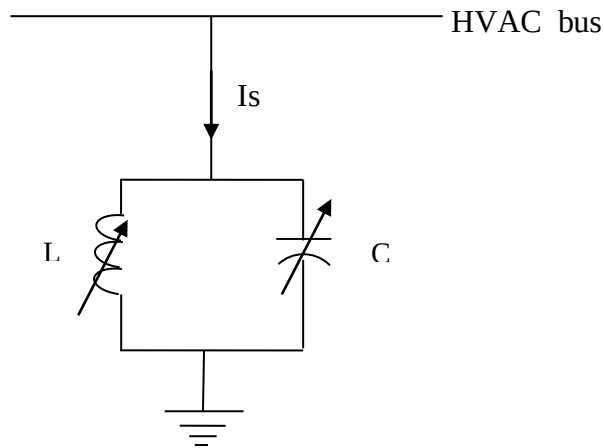


Figure III-3 : SVC idéal

La caractéristique V en fonction de Is est comme suit :

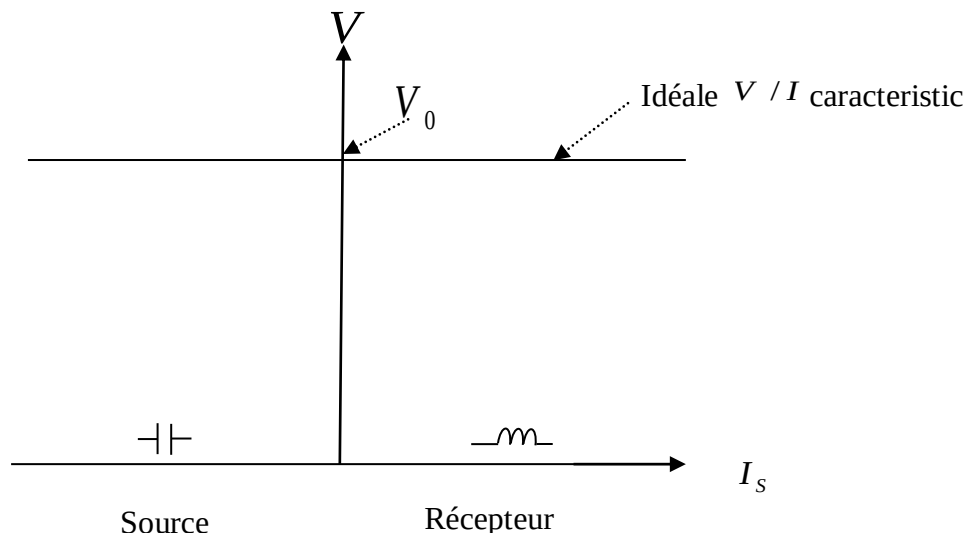


Figure III-4 : Caractéristiques idéale $V=f(I_s)$ du SVC

III.2.4. caractéristique d'un SVC réel

En pratique, on assimile le SVC à un compensateur avec une bobine contrôlable et un condensateur fixe (FC). On schématise ce système comme le montre la figure (III-5)

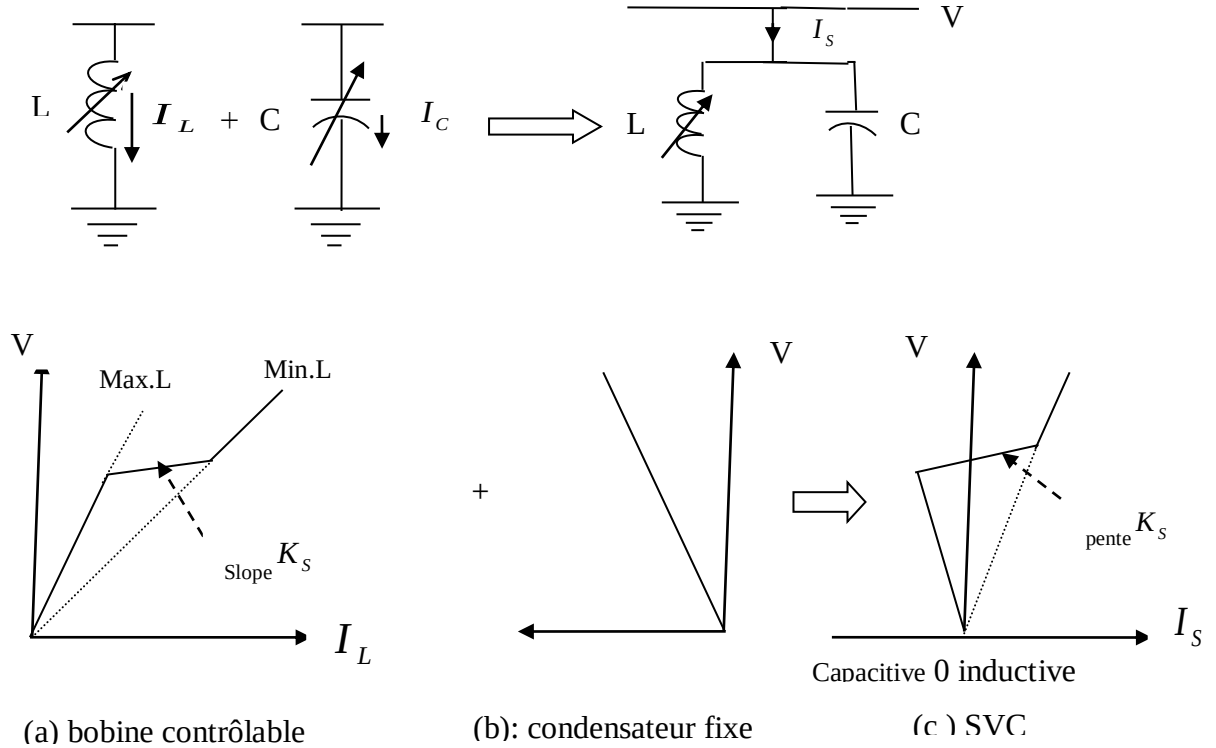


Figure III-5 : Caractéristiques d'un SVC

III.3. Les équations de SVC : [20]

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...

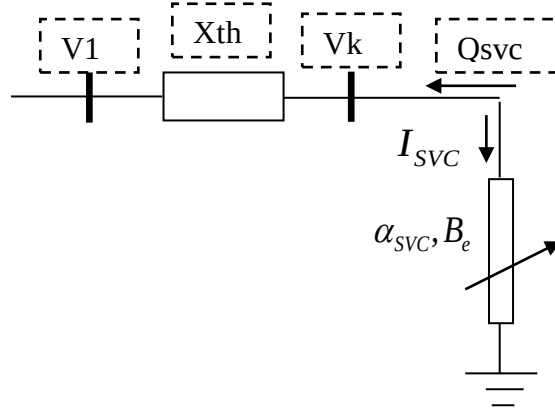
Le modèle statique est constitué d'une susceptance B_e reliée entre le nœud de charge et le potentiel nul. La susceptance est définie comme la partie imaginaire de l'admittance.

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

$$V_1 - V_{REF} + X_{SL} V_K B_e = 0 \quad (\text{III.5})$$

$$Q_{SVC} - V_K^2 \beta_e = 0 \quad (\text{III.6})$$

$$\pi X_c X_L \beta_e + \sin 2\alpha + \pi \left(2 - \frac{X_L}{X_c} \right) = 0 \quad (\text{III. 7})$$



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 c'est la susceptance de SVC : $B_e = \frac{1}{X_e}$

$$B_e = \frac{\sin(2\alpha) - 2\alpha + \pi \left(2 - \frac{X_L}{X_c} \right)}{\pi X_L} \quad (\text{III .8})$$

$$X_e = \frac{\pi X_L}{\sin(2\alpha) - 2\alpha + \pi \left(2 - \frac{X_L}{X_c} \right)} \quad (\text{III . 9})$$

Avec α représente la variation de l'angle d'amorçage des thyristors : α compris entre $[90^0 \text{ et } 180^0]$.

la figure(3-6) représente Organigramme de la variation de l'angle d'amorçage en fonction de la tension à régler .

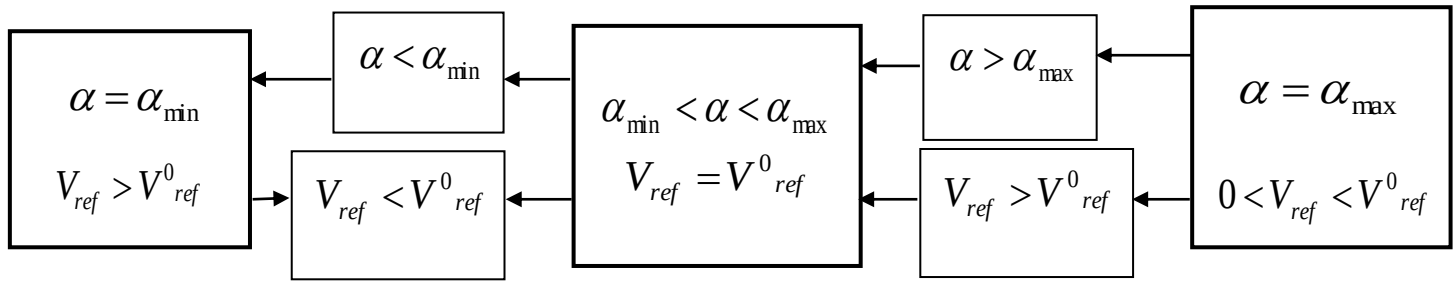


Figure III-6 : Organigramme représentant la variation de l'angle d'amorçage en fonction de la tension à régler.

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 $X_C = 1(pu)$, $X_L = 0.5(pu)$.

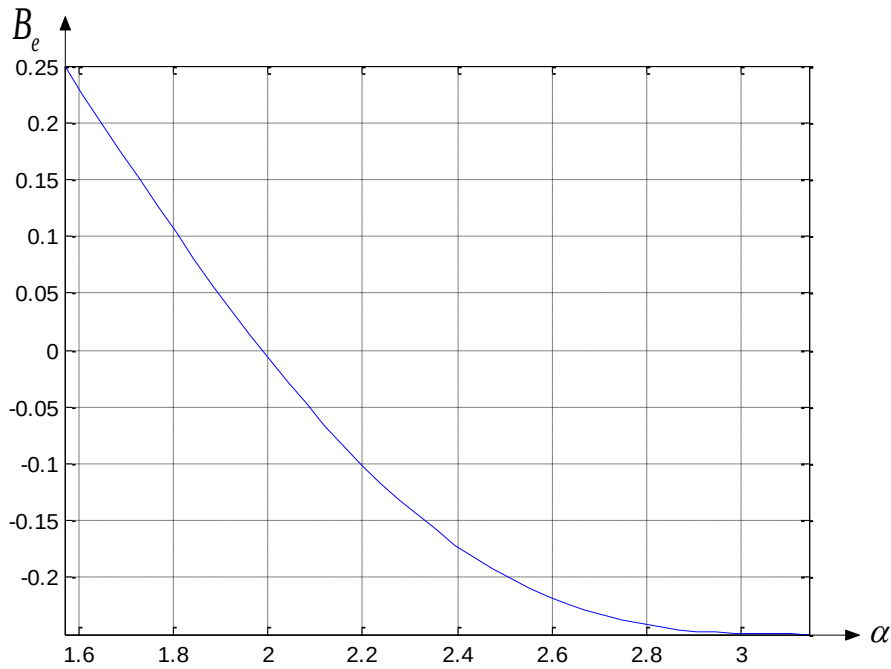


Figure III-7 : la variation de susceptance en fonction de l'angle d'amorçage

On remarque que B_e change de signe lorsque α varie (Figure(III-7))

- ✓ Pour certaines valeurs de α , B_e est positif donc le montage fonctionné en mode inductif.
- ✓ Pour des 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 $X_L = 1(pu) = B_e \leq 0$, donc le SVC est toujours en mode capacitive.

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

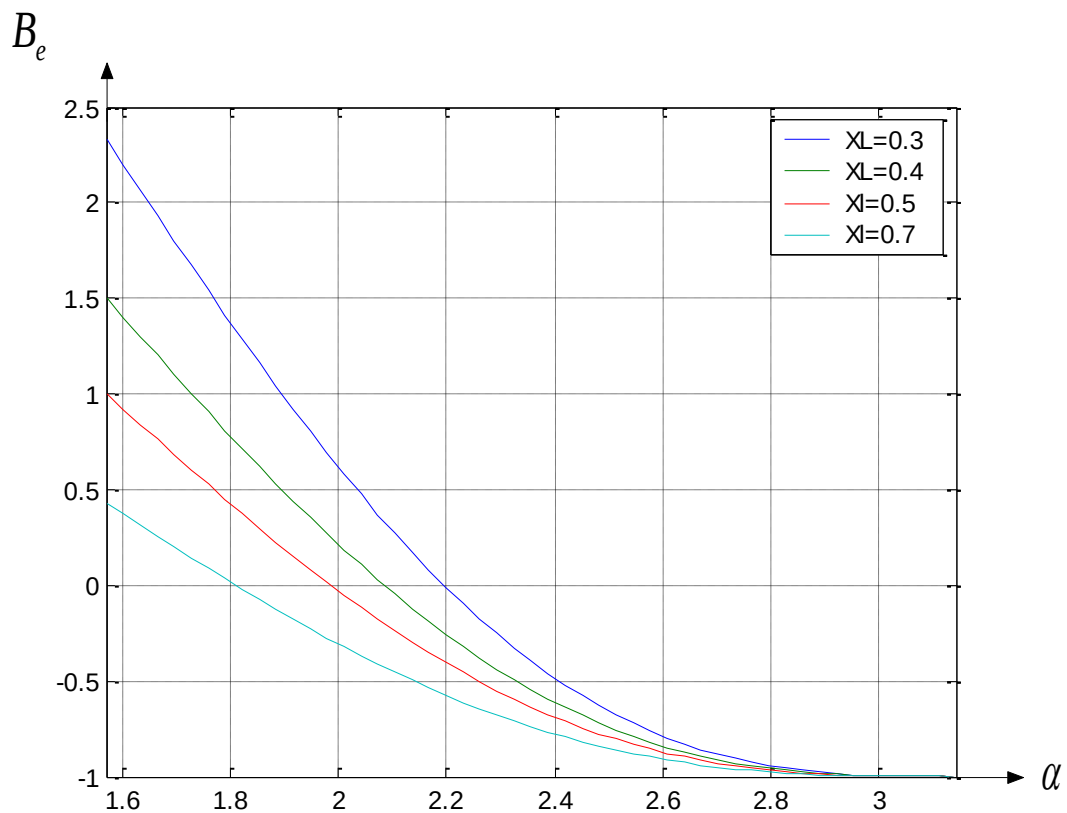


Figure III-8 : Variation de la susceptance en fonction alpha pour valeur de X_L

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, 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 faits par études approfondies , utilisant les méthodes numérique appliqués 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 :

$$P_i + jQ_i = (P_{G1} - P_{D1}) + j(Q_{G1} - Q_{D1}) \quad (\text{III. 10})$$

La puissance apparente S_i injectée au jeu de barres i est donnée par l'équation

$$S_i = V_i \cdot I_i^* \quad \rightarrow \quad I_i = \frac{S_i^*}{V_i^*} = \sum_{K=1}^{K=n} Y_{i,K} V_K$$

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

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

$$V_i = \frac{1}{Y_{i,i}} \left(\frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} - \left(\sum_{K=1, K \neq i}^{K=n} Y_{i,K} V_K \right) \right) \quad (\text{III. 11})$$

Pour le jeu de barres de contrôle :

$$Q_i = Q_{SVC} - Q_D \rightarrow Q_{SVC} = Q_i + Q_D \quad (\text{III.12})$$

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 α .

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 du 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.

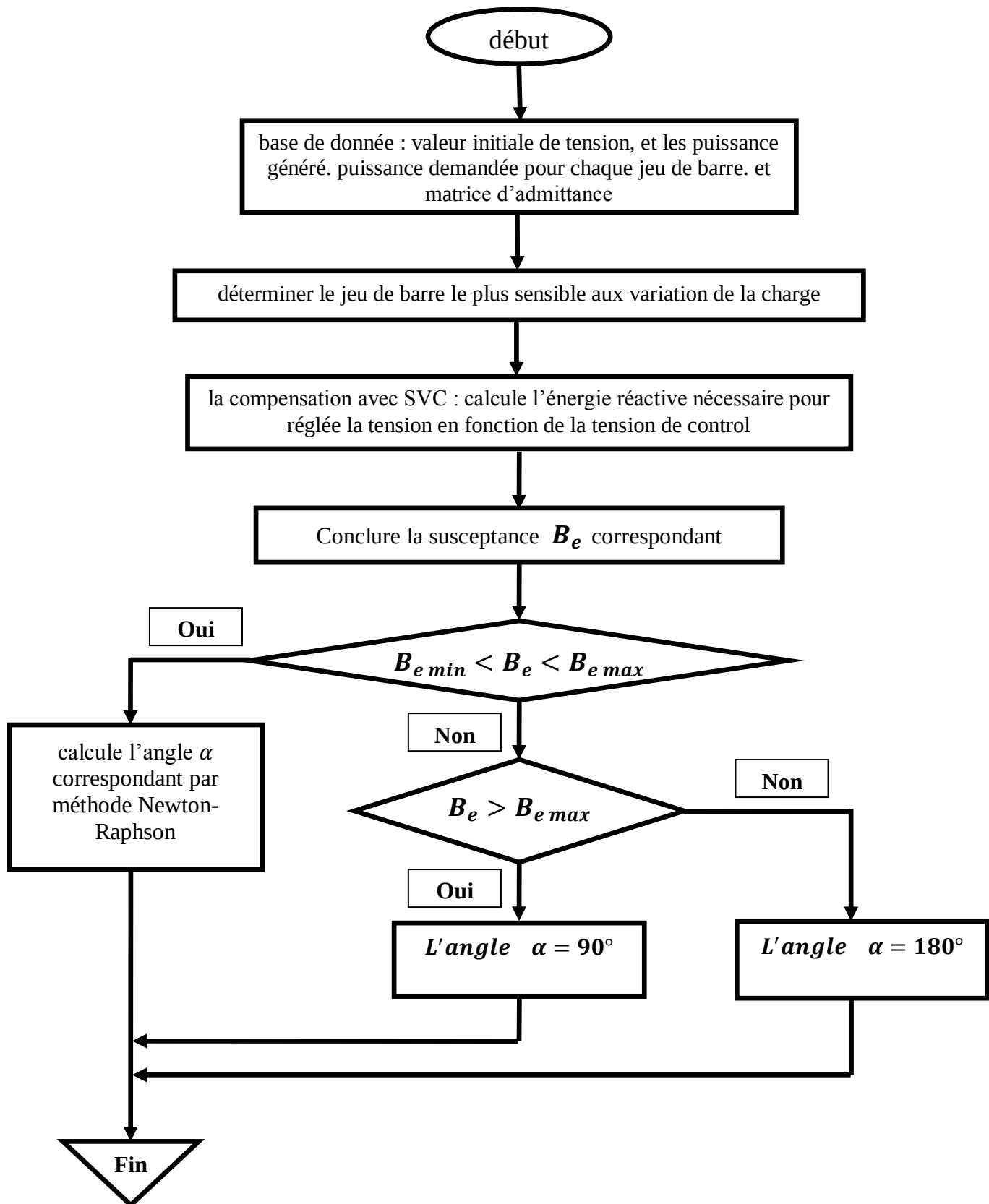
L'erreur est détectée par le système de commande. Celui-ci réajuste automatiquement la puissance réactive absorbée ou générée, et l'angle α de l'inductance. La susceptance du SVC vue du primaire du transformateur

$$B_p = \frac{1}{X_T + X_e} \quad B \quad (\text{III.13})$$

Les limites de B_p sont déterminées à partir $B_{e(min)}$ et $B_{e(max)}$.

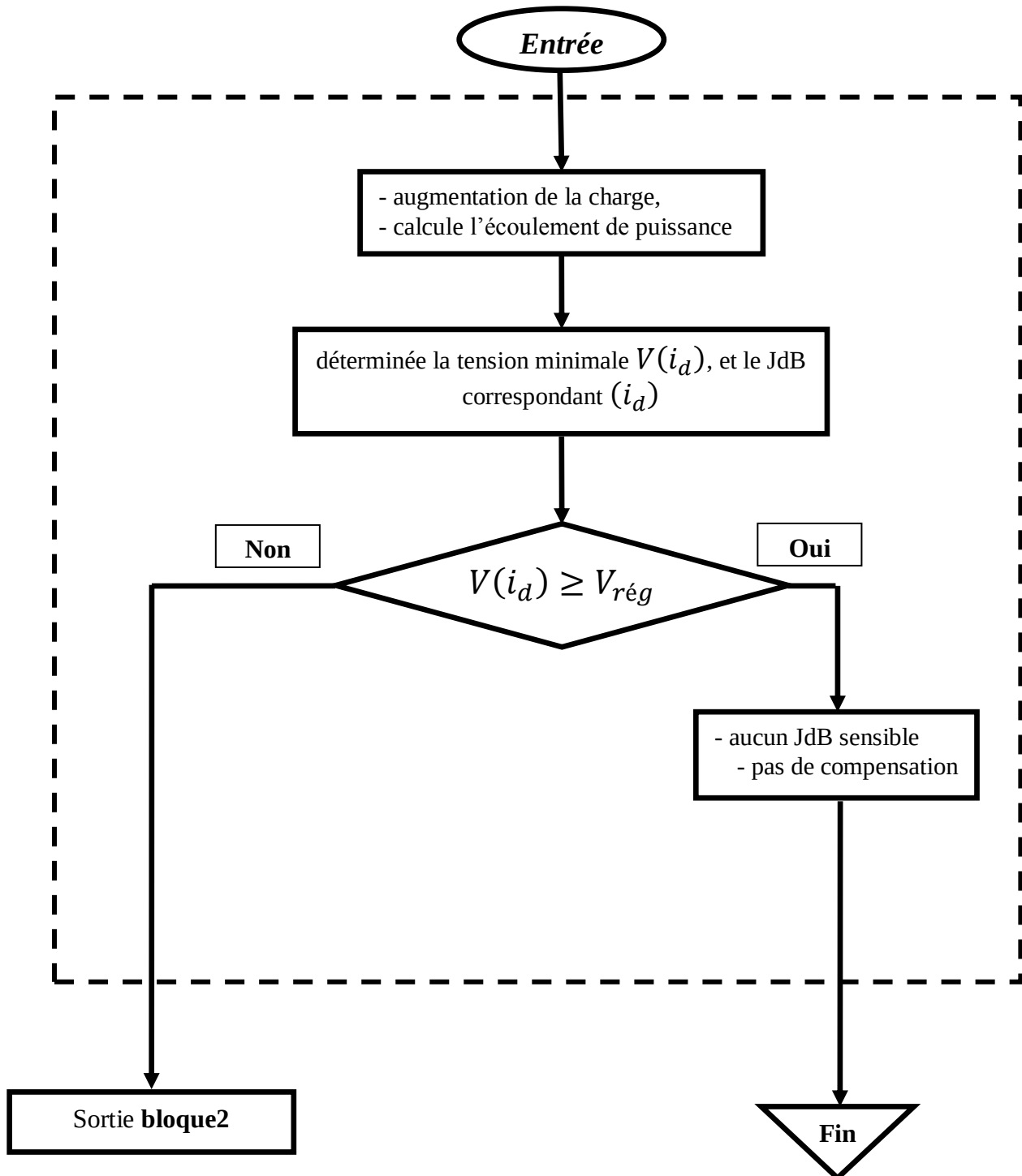
La tension est réglée suivant la caractéristique représentée par l'équation (III.13). [21]

III.5.1. L'organigramme globale de l'intégration de SVC est :

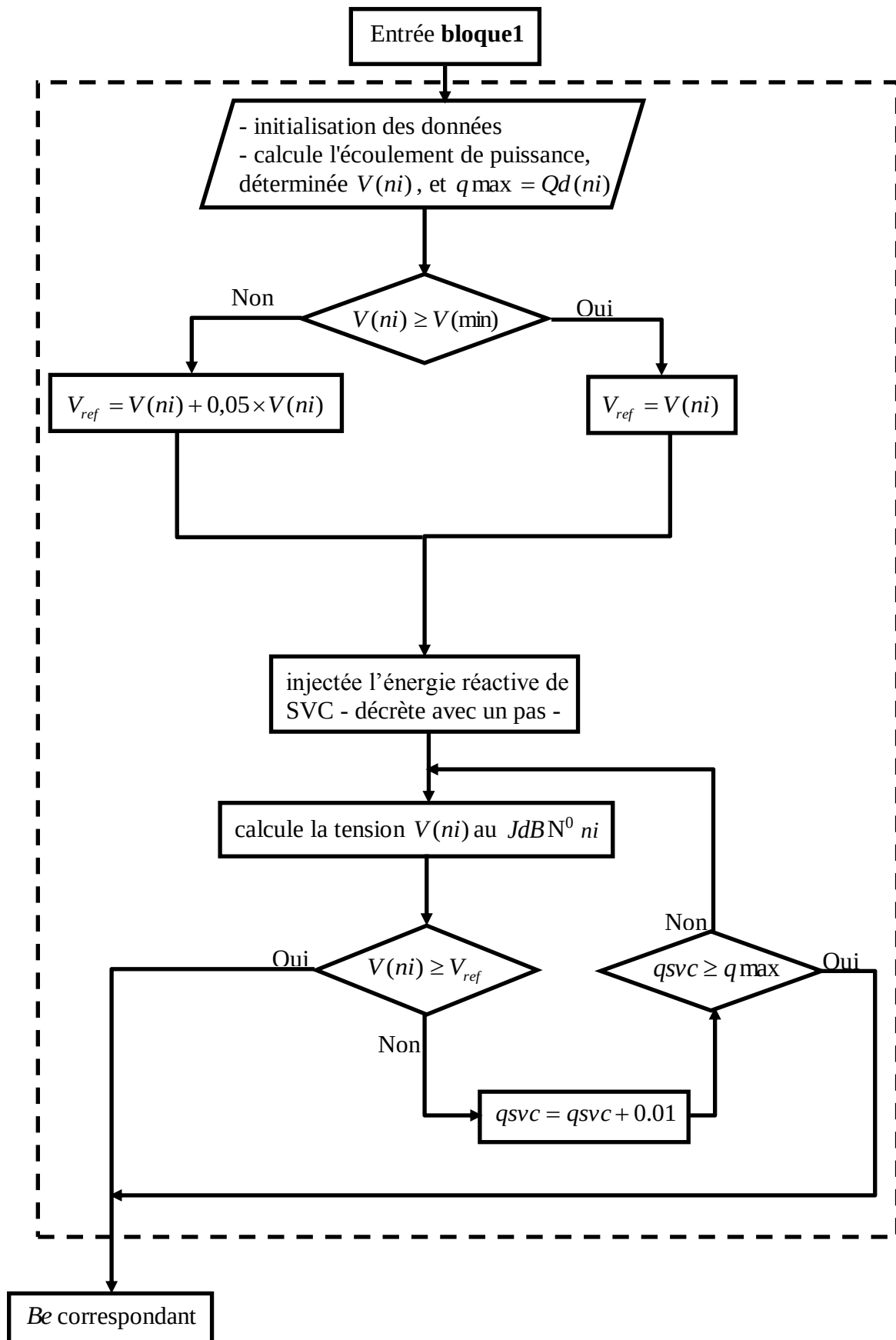


III.5.2. Organigramme détaillée :

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 réglée la tension en fonction de la tension de control.



III.6. Conclusion:

Dans cette partie, on s'est intéressé au contrôleur SVC. Nous avons cité les différents types le principe de fonctionnement, la modélisation et l'incorporation du SVC dans l'étude de l'écoulement de puissance par la méthode de GAUSS-SEIDEL.

Chapitre IV

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 .

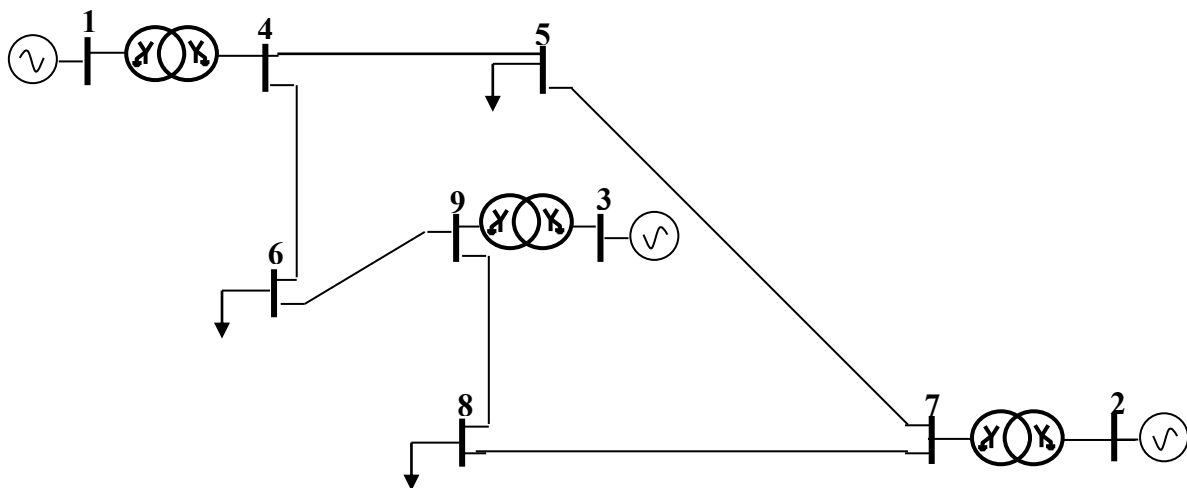


Figure IV-1: Schéma d'un réseau test de 9 jeux de barres

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.3.a,b) visualise les résultats du réseau 9 bus obtenu avec et sans l' SVC,(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 normale

- Méthode de GAUSS-SEIDEL-

<i>Bus</i>	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

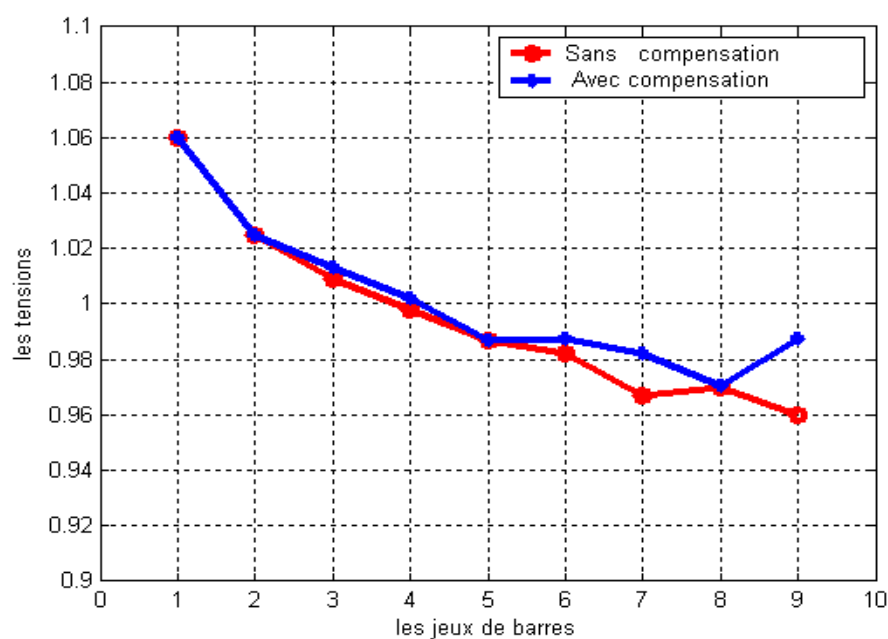


Figure IV-2: Variation de la tension – cas normale

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

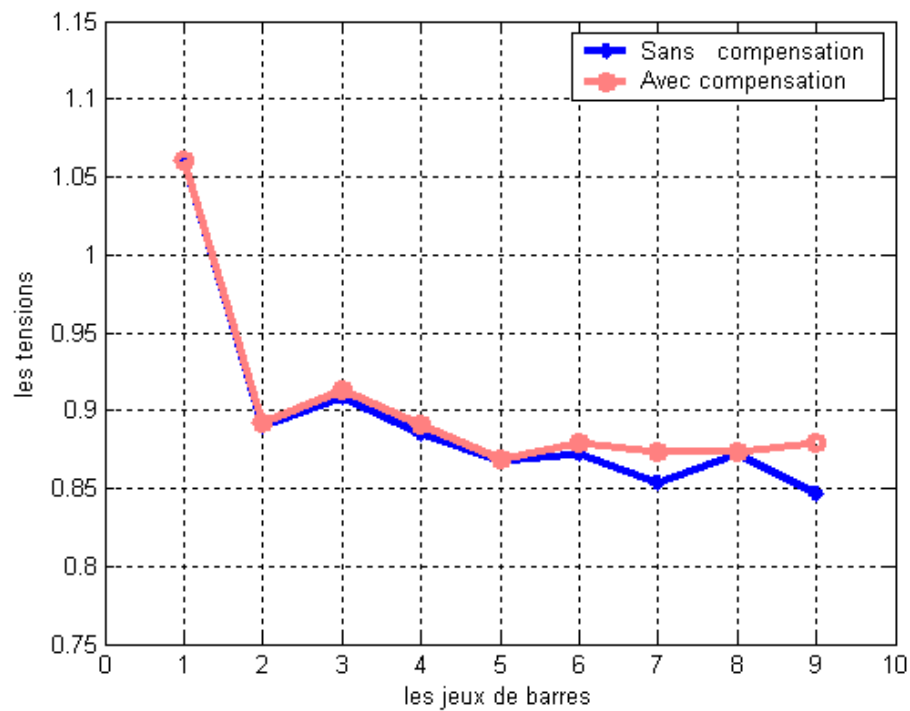


Figure IV-3: Variation de la tension – cas rupture de la ligne (1-2)

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 : 9 et 7
- La puissance demandée active: 203.700 MW .
- La puissance demandée réactive: 90.400 $MVAR$.

c/-1-(tableau VI.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 généré (MW)	213.540	236.840
Puissance réactive généré ($MVAR$)	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.B 7	110.87	90
Puissance réactive injectée(SVC) ($MVAR$)	11	10

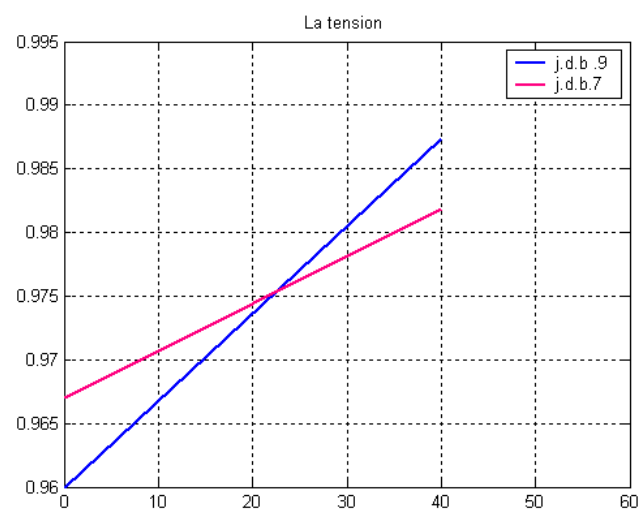
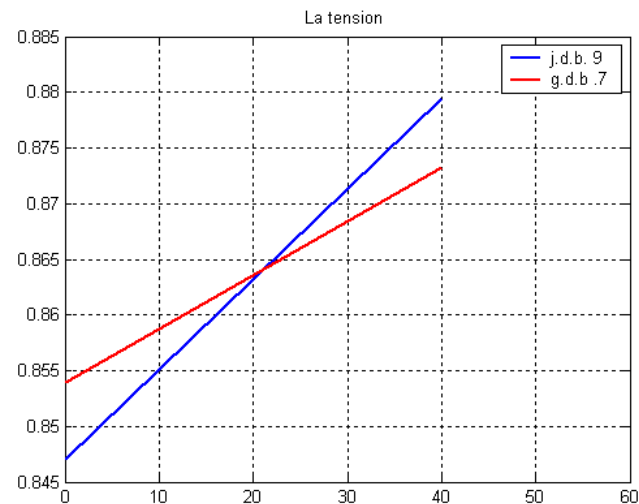


Figure IV-4: Variation de tension dans les deux jeux de barres sensibles-cas normale.



Variation de tension dans les deux jeux de barres sensibles-cas rupture de la ligne(1-2)

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

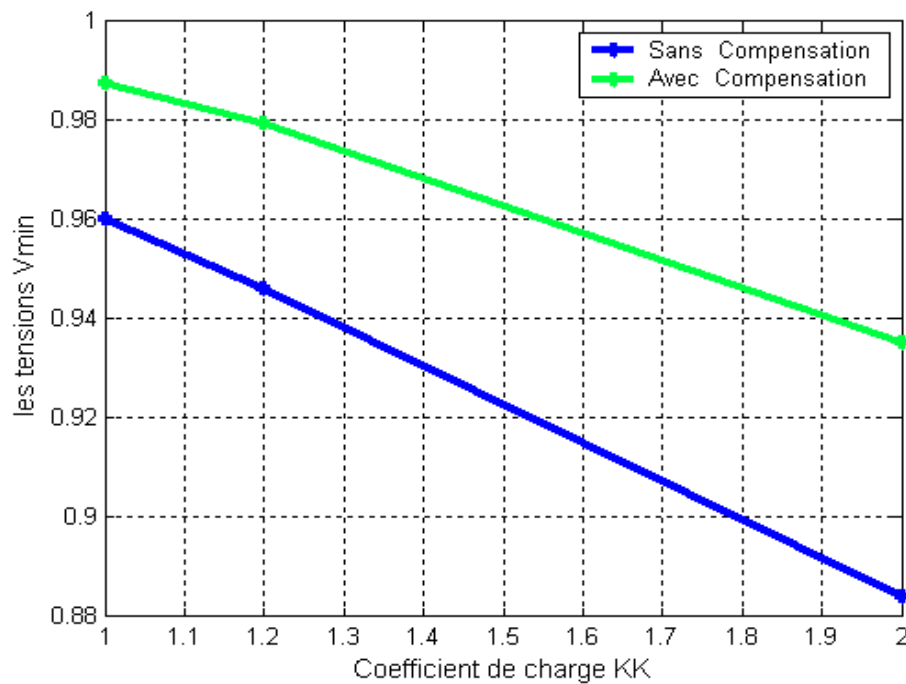


Figure IV-5: Variation de la tension en fonction de l'incrément de la charge

IV.2.3. Application(2) : réseau électrique de 30 jeux de barres :

Les réseaux électriques actuellement implantés sont caractérisés par leurs charges électriques qui sont nombreuses et distantes des centres de production d'énergie . on propose un réseau électrique de moyen taille , constitué de 30 jeux de barres, 6 générateur ,24charges et 40 lignes électriques.

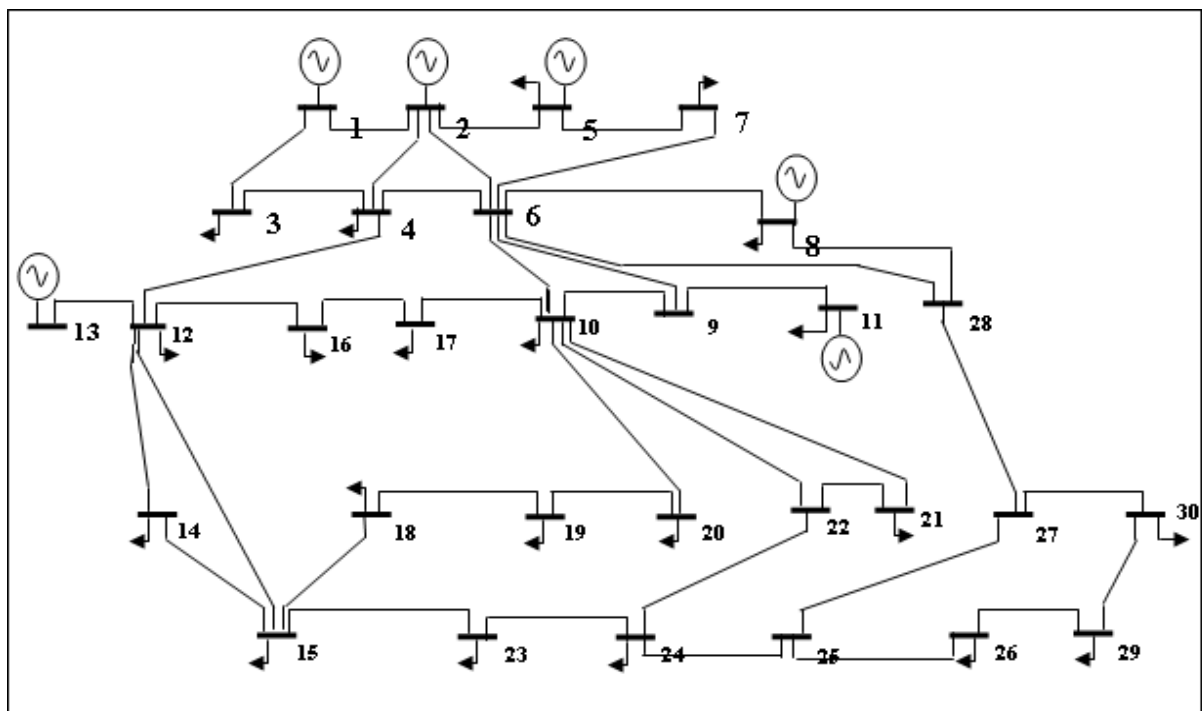


Figure IV-6: Schéma d'un réseau de 30 jeux de barres

Le tableau (IV .5) , la Figure(4.6) montrent les tensions au niveau des jeux de barres du réseau test trouvées sans et par l' intégration du dispositif shunt avec SVC 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.7.a,b) visualise les résultats du réseau 30 bus obtenu avec et sans l' SVC.

IV.2.4. les résultats de programmation (réseau 30 jeux de barres)

a- tableau(IV-5): Résultats des tensions du réseau électrique –cas normale
-Méthode de GAUSS-SEIDEL-

Bus	Sans compensation	Avec compensation
	V(p.u)	V(p.u)
1	1.060	1.0600
2	1.020	1.0200
3	1.005	1.0052
4	0.993	0.9937
5	0.952	0.9526
6	0.976	0.9758
7	0.958	0.9576
8	0.965	0.9648
9	1.000	1.000
10	0.970	0.9702
11	1.083	1.0831
12	1.012	1.0116
13	1.072	1.0724
14	0.992	0.9927
15	0.983	0.9831
16	0.987	0.9866
17	0.970	0.9695
18	0.966	0.9656
19	0.959	0.9586
20	0.961	0.9607
21	0.957	0.9570
22	0.958	0.9575
23	0.963	0.9631
24	0.945	0.9453
25	0.943	0.9437
26	0.904	0.9244
27	0.950	0.9503
28	0.972	0.9718
29	0.929	0.9288
30	0.906	0.9163

b/- tableau(IV-6): Résultats des tensions du réseau électrique –cas rupture de la ligne (27-30)

Bus	Sans compensation	
	V(p.u)	V(p.u)
1	1.060	1.0600
2	1.020	1.0200
3	1.005	1.0052
4	0.992	0.9927
5	0.951	0.9516
6	0.975	0.9758
7	0.957	0.9575
8	0.965	0.9647
9	1.000	1.0002
10	0.970	0.9705
11	1.083	1.0831
12	1.011	1.0117
13	1.072	1.0724
14	0.991	0.9919
15	0.983	0.9834
16	0.986	0.9868
17	0.969	0.9698
18	0.965	0.9660
19	0.958	0.9589
20	0.960	0.9610
21	0.956	0.9573
22	0.957	0.9580
23	0.962	0.9637
24	0.944	0.9462
25	0.940	0.9447
26	0.920	0.9256
27	0.946	0.9530
28	0.971	0.9720
29	0.896	0.9121
30	0.854	0.8816

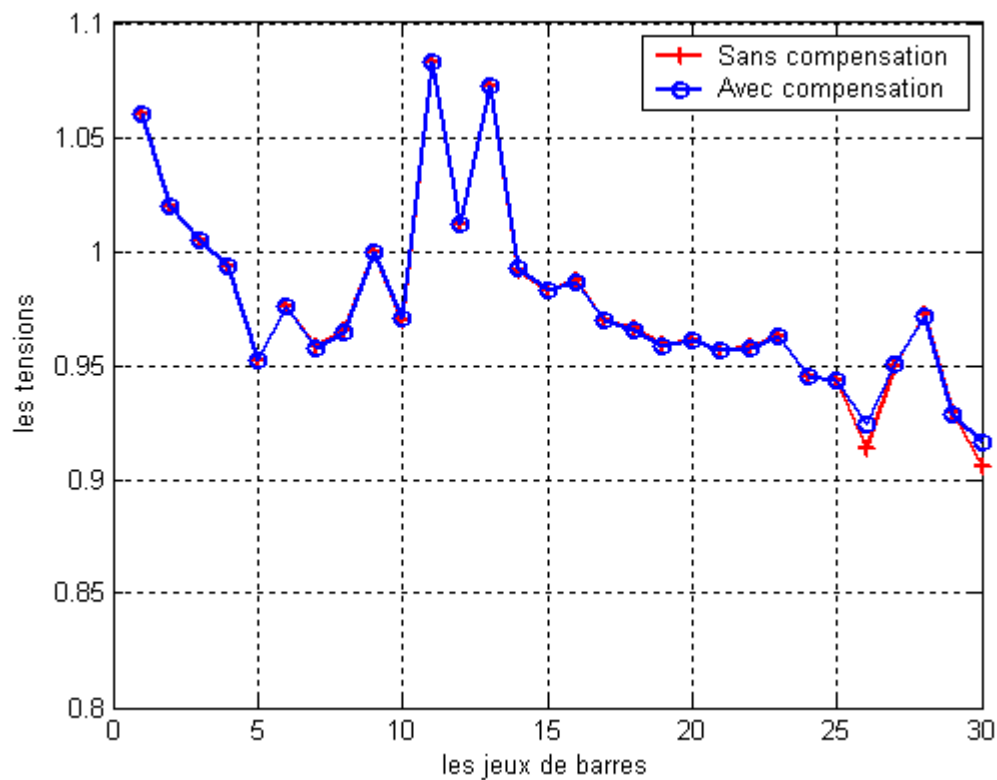


Figure IV-7: Variation de la tension – cas normale

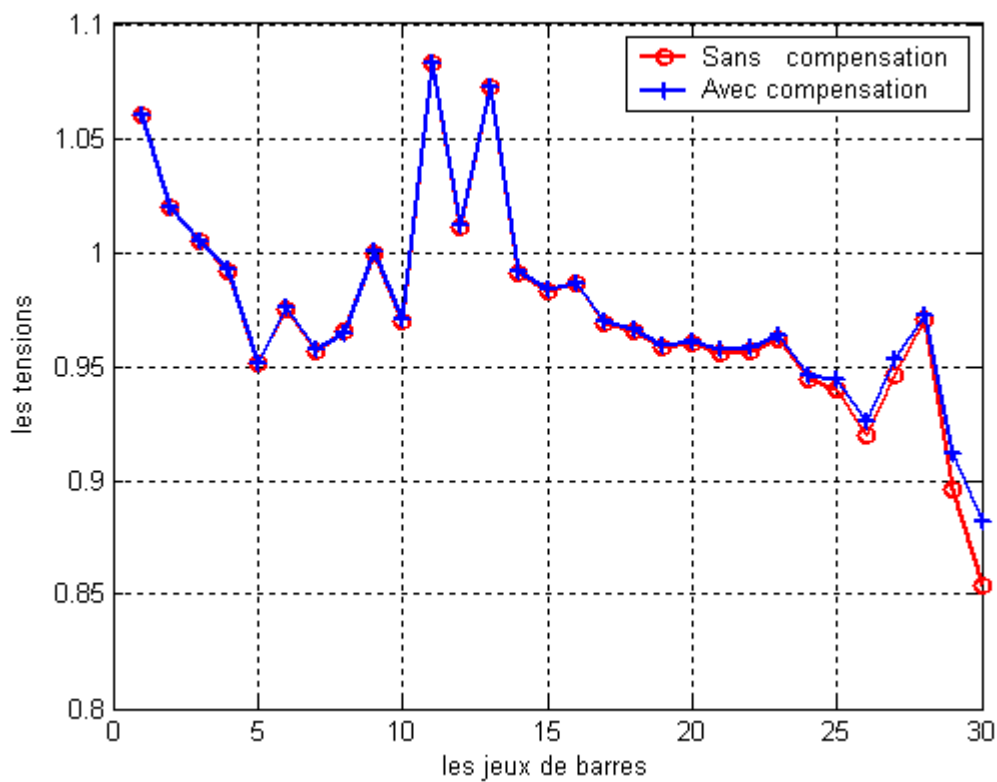


Figure IV-8: Variation de la tension – cas rupture de la ligne (27-30)

c/-Les résultats de programmation(Puissance générée, Pertes, Coût optimal.....) de réseau 30 jeux de barres:

- Les jeux de barres le plus sensible c'est : 26 et 30
- La puissance demandée active: 283.400 *MW* .
- La puissance demandée réactive: 136.200 *MVAR* .

c/-1- (tableau IV.7.a) cas sans compensation

Résultats	Sans Compensation	
	Cas normale	Cas rupture de la ligne(27-30)
Tension 30 (pu)	0.916	0.854
Tension 26 (pu)	0.924	//////////
Puissance active générée (<i>MW</i>)	301.5617	300.554
Puissance réactive générée (<i>MVAR</i>)	160.744	162.315
Pertes active (<i>MW</i>)	18.162	18.246
Pertes réactive (<i>MVAR</i>)	18.957	19.246
Coût optimal (\$/h)	4899.136	4901.077
Susceptible Be J.d.B 30	//////////	//////////
Susceptible Be J.d.B 26	//////////	//////////
α J.d.B 30	////////////////	////////////////
α J.d.B 26	////////////////	////////////////
Puissance réactive injectée (SVC) (<i>MVAR</i>)	00	00

c/-2- (tableau IV.7.b) cas avec compensation

- Les jeux de barres le plus sensible c'est : 26 et 30.
- La puissance demandée active: 283.400 *MW* .
- La puissance demandée réactive: 136.200 *MVAR* .

Résultats	Avec Compensation	
	Cas normale	Cas rupture de la ligne(27-30)
Tension 30 (pu)	0.9361	0.8795
Tension 26 (pu)	0.9459	0.8732
Puissance active généré (<i>MW</i>)	301.5538	236.840
Puissance réactive généré (<i>MVAR</i>)	152.58	185.142
Pertes active (<i>MW</i>)	18.154	33.148
Pertes réactive(<i>MVAR</i>)	18.780	104.742
Coût optimal (\$/h)	4888.953	3542.077
Susceptible Be J.d.B 30	0.0220	0.1305
Susceptible Be J.d.B 26	0.0257	0.1430
α J.d.B 30	111.13	90
α J.d.B 26	90.00	90
Puissance réactive injectée (SVC) (<i>MVAR</i>)	2.4	10

d/-(tableau IV.8.) 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 30 (pu)	0.916	0.884	0.6970	0.9361	0.9092	0.7394
Puissance active généré (MW)	301.5617	367.6575	665.1700	301.5538	367.6262	664.8605
Puissance réactive généré ($MVAR$)	160.744	210.1370	525.0020	152.58	206.899	519.504
Pertes active (MW)	18.162	27.578	98.390	18.154	27.546	98.060
Pertes réactive ($MVAR$)	18.957	46.697	252.605	18.780	46.359	251.004
Susceptible Be J.d.B 30	////////	////////	////////	0.0220	0.0283	0.0595
α J.d.B 30	////////	////////	////////	111.13	111.11	90.00
Puissance réactive injectée (SVC) ($MVAR$)	00	00	00	2.4	2.9	3.9
Coût optimal (\$/h)	4899.136	6577.686	17862.038	4888.953	6567.819	17846.161

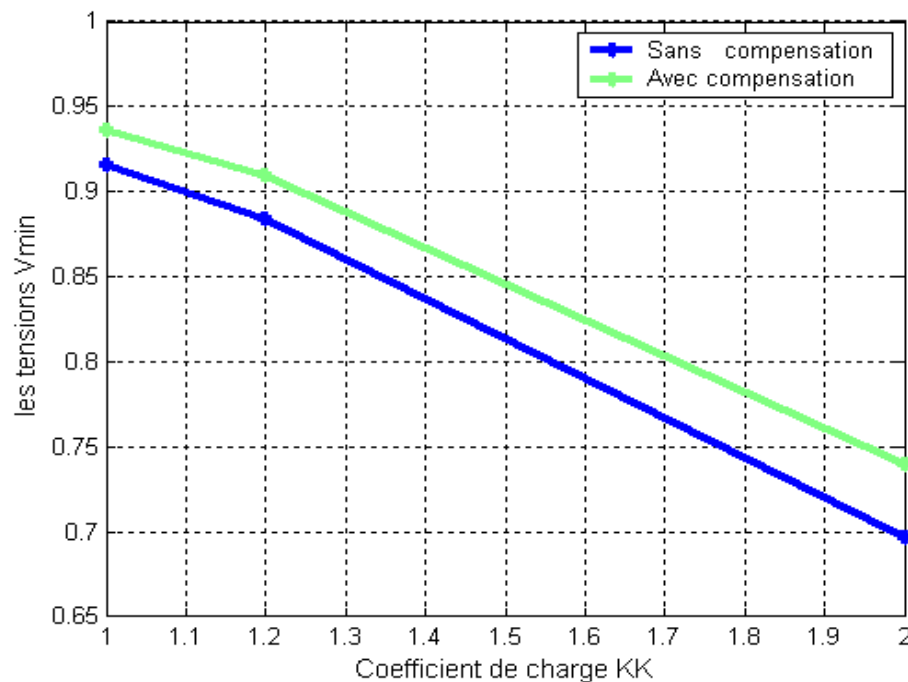


Figure IV-9: Variation de la tension en fonction de l'incrémentation de la charge

IV.2.5. Comparaison des résultats du chute de tension dans les deux réseaux (9 jeux de barres- 30 jeux de barres)

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

	Réseau 9 jeux de barres		Réseau 30 jeux de barres	
	Cas normale	rupture ligne 1,2	Cas normale	Rupture ligne 27,30
Sans compensation	JdB9 : $\Delta V = 5.71 \%$	JdB9 : $\Delta V = 16.81\%$	JdB30 : $\Delta V = 10.3 \%$	JdB30 : $\Delta V = 16.12\%$
Avec compensation	JdB9 : $\Delta V = 3.02 \%$	JdB9 : $\Delta V = 12.62 \%$	JdB30 : $\Delta V = 09 \%$	JdB30 : $\Delta V = 12.41\%$

IV.3. 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 , 27 et 30 dans le réseau 30 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 .

Le jeu de barre le plus sensible est le '30' dans le réseau 30 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...

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.

Annexe

❖ Réseaux électrique à 30 jeux de barres :

```
%
      No  code Mag.      Degree  MW      Mvar  MW  Mvar Qmin Qmax
busdata=[...
      1   1   1.06    0.0      0.0    0.0   0.0  0.0   0   0      0
      2   2   1.043  0.0     21.70  12.7  40.0  0.0 -40  50      0
      3   3   1.0     0.0      2.4   1.2   0.0  0.0   0   0      0
      4   3   1.06    0.0      7.6   1.6   0.0  0.0   0   0      0
      5   2   1.01    0.0     94.2  19.0   0.0  0.0 -40  40      0
      6   3   1.0     0.0      0.0   0.0   0.0  0.0   0   0      0
      7   3   1.0     0.0     22.8  10.9   0.0  0.0   0   0      0
      8   2   1.01    0.0     30.0  30.0   0.0  0.0 -30  40      0
      9   3   1.0     0.0      0.0   0.0   0.0  0.0   0   0      0
     10   3   1.0     0.0      5.8  12.0   0.0  0.0  -6  24      0
     11   2   1.082  0.0      0.0   0.0   0.0  0.0   0   0      0
     12   3   1.0     0      11.2   7.5   0   0   0   0      0
     13   2   1.071  0       0     0.0   0   0  -6  24      0
     14   3   1       0      6.2   1.6   0   0   0   0      0
     15   3   1       0      8.2   2.5   0   0   0   0      0
     16   3   1       0      3.5   1.8   0   0   0   0      0
     17   3   1       0      9.0   5.8   0   0   0   0      0
     18   3   1       0      3.2   0.9   0   0   0   0      0
     19   3   1       0      9.5   3.4   0   0   0   0      0
     20   3   1       0      2.2   0.7   0   0   0   0      0
     21   3   1       0     17.5  11.2   0   0   0   0      0
     22   3   1       0      0     0.0   0   0   0   0      0
     23   3   1       0      3.2   1.6   0   0   0   0      0
     24   3   1       0      8.7   6.7   0   0   0   0      0
     25   3   1       0      0     0.0   0   0   0   0      0
     26   3   1       0      3.5   2.3   0   0   0   0      0
     27   3   1       0      0     0.0   0   0   0   0      0
     28   3   1       0      0     0.0   0   0   0   0      0
     29   3   1       0      2.4   0.9   0   0   0   0      0
     30   3   1       0     10.6   1.9   0   0   0   0      0
];
```

```
%
      Bus bus  R      X      1/2 B
%      nl nr  p.u.  p.u.  p.u.
linedata=[...
      1   2  0.0192  0.0575*.35      0.02640
      1   3  0.0452  0.1852      0.02040
      2   4  0.0570  0.1737      0.01840
      3   4  0.0132  0.0379      0.00420
      2   5  0.0472  0.1983      0.02090
      2   6  0.0581  0.1763      0.01870
      4   6  0.0119  0.0414      0.00450
      5   7  0.0460  0.1160      0.01020
      6   7  0.0267  0.0820      0.00850
```

6	8	0.0120	0.0420	0.00450	
6	9	0.0	0.2080	0.0	
6	10	0	.5560	0	
9	11	0	.2080	0	
9	10	0	.1100	0	
4	12	0	.2560	0	
12	13	0	.1400	0	
12	14	.1231	.2559	0	
12	15	.0662	.1304	0	
12	16	.0945	.1987	0	
14	15	.2210	.1997	0	
16	17	.0824	.1923	0	
15	18	.1073	.2185	0	
18	19	.0639	.1292	0	
19	20	.0340	.0680	0	
10	20	.0936	.2090	0	
10	17	.0324	.0845	0	
10	21	.0348	.0749	0	
10	22	.0727	.1499	0	
21	22	.0116	.0236	0	
15	23	.1000	.2020	0	
22	24	.1150	.1790	0	
23	24	.1320	.2700	0	
24	25	.1885	.3292	0	
25	26	.2544	.3800	0	
25	27	.1093	.2087	0	
28	27	0	.3960	0	
27	29	.2198	.4153	0	
27	30	.3202	.6027	0	
29	30	.2399	.4533	0	
8	28	.0636	.2000	0.0214	
6	28	.0169	.0599	0.065	];

❖ Réseaux électrique à 9 jeux de barres :

```
%
busdata=[1 1 1.06 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0 0 0
2 2 1.043 0.0 21.70 12.7 40.0 0.0 -40 50 0
3 0 1.0 0.0 2.4 1.2 0.0 0.0 0 0 0
4 0 1.06 0.0 17.6 1.6 0.0 0.0 0 0 0
5 2 1.01 0.0 94.2 19.0 0.0 0.0 -40 40 0
6 0 1.0 0.0 5.0 5.0 0.0 0.0 0 0 0
7 0 1.0 0.0 22.8 10.9 0.0 0.0 0 0 0
8 2 1.0 0.0 30.0 30.0 0.0 0.0 -30 40 0
9 0 1.0 0.0 10.0 10.0 0.0 0.0 0 0 0
0];
```

```
%
% Line code
% Bus bus R X 1/2 B = 1 for lines
% nl nr p.u. p.u. p.u. > 1 or < 1 tr. tap at bus
nl
linedata=[1 2 0.0192 0.0575 0.02640 1
1 3 0.0452 0.1852 0.02040 1
2 4 0.0570 0.1737 0.01840 1
3 4 0.0132 0.0379 0.00420 1
2 5 0.0472 0.1983 0.02090 1
2 6 0.0581 0.1763 0.01870 1
4 6 0.0119 0.0414 0.00450 1
6 7 0.0267 0.0820 0.00850 1
6 8 0.0120 0.0420 0.00450 1
6 9 0.0 0.2080 0.0 1];
```

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] Sayah Samir «Application des Ensembles Flous à la Repartition Optimale de la Puissance Dans les Réseaux Electriques» Mémoire de magister, université de setif (2005).
- [5] M.Dris et G.Mohammed et F.Abdelhamid «Calcule d'écoulement de Puissance Par La Méthode GAUSS–SAIDEL» Mémoire de fin d'étude université de Biskra Promotion (1996).
- [6] 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)
- [7] M.Gaboussa etB. Boubaker, «Echange Economique de Puissance entre des Reseaux Electrique» Mémoire de Fin d'Etudes pour l'obtention du Diplôme d'ingénieur d'Etat en Electrotechnique, Université Biskra, Promotion 2004.
- [8] H. Wayne Beaty «Handbook of Electric Power Calculations» New York, NY: McGrawHill, Inc., 2001.
- [9] H. Wayne Beaty «Handbook of Electric Power Calculations» New York, NY: McGrawHill, Inc., 2001.
- [10] P. Kundur «Power System Stability and Control» New York, NY: McGraw Hill, Inc., 1994.
- [11] T. Bouktir «Application de la Programmation Orientée Objet à l'Optimisation de L'Ecoulement de Puissance Thèse» Doctorat, Université de Batna, 2004.
- [12] Oussama Mammeri.(différentes méthodes de calcul de la puissance réactive dans une noeud a charge non linéaire en présence d'un système de compensation de l'énergie) . Mémoire de Magister Université de Batna (promotion 2012).

- [13] T. Gönen « Electric Power System Engineering: Analysis and Design» John Wiley & Sons, 1988
- [14] B.De Metz-Noblat, G .Jeanjean« Stabilité dynamiques des réseaux électriqueindustriels» Cahier Technique n° 185.
- [15] Lakdja Fatiha « Contrôle des transits de puissance par dispositif facts» Mémoire de magister en Commande des processus Oran 2005.
- [16] Salhi Abd Alfattah et Mehellou Yuocef «Contrôle de la puissance réactive du système électrique par SVC », université Batna, 2008
- [17] Fild/ FACTS – les systèmes performants pour le transport flexible de l'énergie électrique.
- [18] Ben Alia Khaled et Zahnite Hakim «Etude des compensateurs statiques de l'énergie réactive SVC dans un réseau électrique », université Biskra promotion juin 2005
- [19] Glaudio A.Canizares ,et ZenoT.Faur (of SVC and TCSC controllers in voltage collapse) IEEE Trans power systems ,Vol .14, N -1 February 1999,pp.158.164
- [20] D.SALAH sabry .L.Salah; B.Ahcn« 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, oumelbouaghi .ALGERIA
- [21] Geidl, M., « Implementation of FACTS and Economic Generation Dispatch in an Interactive Power Flow Simulation Platform », ETH Zürich.
- [22] Gaboussaseddik et dob Med lakhdar«l'impact des dispositifs de compensation dynamique –FACTS- sur les réseaux de transport », université Biskra promotion juin 2006.
- ❖ 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

- ❖ 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
- ❖ 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
- ❖ 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.