

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



Université d'EL-Oued
Faculté des Sciences et de Technologies

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

LICENCE ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et de Technologies
Filière: Génie Électrique
Spécialité: Réseaux Électriques

Thème

contrôle des puissances réactives et des tensions dans un réseau de transport au moyen de dispositifs FACTS (SVC)

Diriger par:
Mammeri Oussama

Réaliser par:
Rehouma Reda
Dou Tahar

Soutenu 04 Juin 2013

REMERCIEMENTS

Le travail présenté dans ce mémoire a été effectué au département d'électrotechnique de l'université EL-OUED.

Nos remerciements vont tout premièrement à Dieu tout puissant pour la volonté, la santé et la patience, qu'il nous a donnée durant toutes ces longues années.

Ainsi, nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements à notre encadreur M^r MAMM'ERI OUSSAMA, pour le suivi tout le long de la réalisation de ce mémoire.

Nos remerciements vont aussi au président et aux membres du jury pour l'honneur qu'ils me font en participant au jugement de ce travail.

Nous tenons à remercier vivement toutes personnes qui nous ont aidés à élaborer et réaliser ce mémoire, ainsi à tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin à accomplir ce travail

Enfin nous tenons à exprimer notre reconnaissance à tous nos amis et nous collègues pour le soutien moral et matériel...



DEDICACE



A ceux qui m'ont donné la vie, symbole de beauté, de fierté, de sagesse et de patience.

A ceux qui sont la source de mon inspiration et de mon courage, à qui je dois de l'amour et la reconnaissance.

- 🌀 *A ma très chère **Mère** et à mon cher **Père** ;*
- 🌀 *A mes frères et mes sœurs ;*
- 🌀 *A tous mes amis ;*
- 🌀 *A mes collègues du groupe 3^{RE} .*
- 🌀 *A tous les proches que j'ai mentionnés et les autres que j'ai oubliés veuillez m'excuser*

Je vous remercie tous



TAHAR





DEDICACE



A ceux qui m'ont donné la vie, symbole de beauté, de fierté, de sagesse et de patience.

A ceux qui sont la source de mon inspiration et de mon courage, à qui je dois de l'amour et la reconnaissance.

- 🌀 *A ma très chère **Mère** et à mon cher **Père** ;*
- 🌀 *A mes frères: Amor, Abdelbaki, Abdelsamie et mes sœurs ;*
- 🌀 *A tous mes amis surtout: Adel, Ezzedine, Tahar, Madjdi, Fawzy, Toufik, ..*
- 🌀 *A mes collègues du groupe 3RE .*
- 🌀 *A tous les proches que j'ai mentionnés et les autres que j'ai oubliés veuillez m'excuser*

Je vous remercie tous



REDA





LISTE DES FIGURES

Figure	Désignation	Chapitre	Page
Figure 1	Exemple de fluctuation de la fréquence	I	5
Figure 2	Exemple de variations rapide de la tension	I	5
Figure 3	Creux de tension	I	6
Figure 4	Exemple de cas de surtensions transitoires	I	7
Figure 5	Déséquilibre de tension	I	8
Figure 6	Principe de la puissance active et réactive	I	8
Figure 7	Circuit équivalent du réseau électrique	I	9
Figure 8	Diagramme vectoriel associé au circuit précédent	I	9
Figure 9	Circuit équivalent en π d'une ligne électrique	I	11
Figure 10	Impédance série d'une ligne électrique	I	12
Figure 11	Susceptance shunt d'une ligne électrique	I	12
Figure 1	Schéma du SVC	II	18
Figure 2	présentation d' un Compensateur SVC	II	19
Figure 3	Fonctionnement du Compensateur SVC	II	20
Figure 4	Organigramme représentant la variation de l'angle d'amorçage en fonction du tension à régler	II	21
Figure 5	La variation de susceptance en fonction de l'angle d'amorçage	II	22
Figure 6	Variation de la susceptance en fonction de α pour valeur de X_L	II	23
Figure 7	Principe d'un compensateur synchrone statique	II	25
Figure 8	Principe de la compensation série	II	25
Figure 9	Schéma de base du SSSC	II	26
Figure 10	Compensateur Unifier UPFC (Unified power flow Controller)	II	27
Figure 1	Schéma d'un réseau test de 9 jeux de barres	III	30
Figure 2	Variation de la tension – cas normale	III	34
Figure 3	Variation de la tension – cas rupture de la ligne (1-2)	III	35
Figure 4	Variation de la tension en fonction de l'incrément de la charge	III	38
Figure 5	la Puissance réactive dans (réseau 9 jeux de barres)	III	39
Figure 6	la Puissance réactive dans (réseau 9 jeux de barres)	III	39
Figure 7	Variation l'angle alphas (degré) en fonction de jeux de barres	III	40



LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Désignation	Chapitre	Page
Tableau 1	Quelques dispositifs de contrôle utilisés dans le problème tension/puissance réactive	I	14
Tableau 1	Résultats des tensions du réseau électrique –cas normal - Méthode de GAUSS-SEIDEL-	III	34
Tableau 2	Résultats des tensions du réseau électrique –cas rupture de la ligne (1-2)	III	35
Tableau 3	Les résultats de programmation(Puissance générée, Pertes, Coût optimal.....) de réseau 9 jeux de barres: cas sans compensation	III	36
Tableau 4	Les résultats de programmation(Puissance générée, Pertes, Coût optimal.....) de réseau 9 jeux de barres: cas avec compensation	III	37
Tableau 5	cas de l'augmentation de la charge avec :20 % , 100%	III	38
Tableau 6	présente Bilan de la puissance réactive	III	40

Table de matière

	page
Introduction générale.....	01
Chapitre I	
Généralité sur la puissance réactive et la tension dans les réseaux électriques	
I-1- Introduction	03
I-2- La tension	03
I-2-1- La qualité de la tension	03
I-2-2- Dégradation de la qualité de la tension.....	04
I-2-3- Variation ou fluctuation de la fréquence	05
I-2-4- Composante lente des variations de tension.....	05
I-2-5- Fluctuation de tension (flicker)	05
I-2-6- Creux de tension	06
I-2-7- Chutes de tension	06
I-2-8- Tension et / ou courant transitoire	07
I-2- 9- Déséquilibre de tension.....	07
I-3- La Puissance Réactive	08
I-3-1- Importance de la puissance réactive	08
I-3-2- Bilan de la puissance réactive	09
I-3-3- Transport de la puissance active et réactive	11
I-3-3- La Compensation de la puissance réactive.....	12
I-3-3-1- Les dispositifs conventionnels	13
I-3-3-2- Les groupes de production (générateurs).....	13
I-3-3-3- Les condensateurs.....	13
I-3-3-4- Les inductances	13
I-3-3-5- Les compensateurs synchrones.....	13
I-3-3-6- Les compensateurs statiques	14
I-4- Conclusion	15
Chapitre II	
Etude de la compensation de la puissance réactive par dispositifs FACTS (SVC)	
II-1-Introduction.....	16
II-2- Dispositifs FACTS	17
II-2-1- Classification des dispositifs FACTS.....	17

III-2-2-Compensateurs shunts.....	18
II-2-2-1-Compensateurs parallèles à base de thyristors.....	18
a-SVC (Static Var Compensator).....	18
b-Principe de fonctionnement	19
c- Les équations de SVC.....	20
d- Implantation du compensateur statique dans le problème de l'écoulement de puissance.....	23
II-2-2-Compensateurs parallèles à base de GTO thyristors.....	25
a-(STATCOM) Compensateur synchrone statique.....	25
II-2-3-Compensation série.....	25
II-2- 3-1- Compensateurs séries à base de thyristor.....	26
a-Le TCSC (Compensateur Série Contrôlé par Thyristors).....	26
II-2-3-2-Compensateurs séries à base de GTO thyristor.....	26
b-SSSC (Static Synchronous Series Compensator).....	26
II-2-4 Compensateurs hybrides série – parallèle	26
a-UPFC (Contrôleur universelle de l'écoulement de puissance).....	26
b- IPFC (Interline Power Flow Controller).....	27
II-3- Comparaison des FACTS les plus utilisés.....	27
II-4- Les avantages de la technologie des dispositifs FACTS.....	28
II-5- Conclusion	28

Chapitre III

Application

III-1-Description générale.....	29
III-2-Application:(programmation); compensation shunt avec SCV	29
III-2-1-Application(1) : réseau électrique de 9 jeux de barres.....	29
III-2-2-L'organigramme globale de l' intégration de SCV.....	30
III-2-3-Organigramme détaillée.....	31
III-2-4-les résultats de programmation (réseau 9 jeux de barres).....	33
a-tableau(III-1):Résultats des tensions du réseau électrique –cas normale.....	33
b- tableau(III-2):Résultats des tensions du réseau électrique –cas rupture de la ligne (1-2)	34
c- Les résultats de programmation(Puissance généré, Pertes, Coût optimal.....)	35
d-(tableau III-4) cas de l'augmentation de la charge avec :20 % , 100%	37

Conclusion générale	42
Reference	43

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].

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.

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 [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.

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 trois chapitres:

Dans le premier chapitre, nous décrivons d'une façon générale la Puissance réactive et la qualité de tension dans les réseaux électriques. Ainsi une description des moyens de compensation.

Le deuxième chapitre, le rôle et la classification des différents types de FACTS est proposée et les principaux dispositifs de chaque famille. Une 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 troisième 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

Généralité sur la puissance réactive et la tension dans les réseaux électriques

I.1. Introduction

L'exploitation des grands réseaux électriques est de plus en plus complexe du fait de l'augmentation de leur taille, de la présence de lignes d'interconnexion de grande longueur, de l'adoption de nouvelles techniques, de contraintes économiques, politiques et écologiques. Ces facteurs obligent les opérateurs à exploiter ces réseaux près de la limite de stabilité et de sécurité. Les situations de pays à forte croissance de consommation accroissent encore les risques d'apparition du phénomène d'instabilité [1].

La gestion du réseau électrique ne consiste pas seulement à faire en sorte que les transits soient inférieurs aux capacités de transport de chaque ouvrage du réseau. Il faut également surveiller plusieurs paramètres techniques, dont la puissance réactive et le niveau de tension. La tension électrique doit rester dans une plage autorisée en tout point du réseau, dans toutes les situations de production et de consommation prévisibles. En effet, la tension peut localement être dégradée, par exemple les jours de forte consommation, dans ce cas, les transits à travers les lignes du réseau sont importants, ce qui provoque une chute de tension dans ces lignes.

Comme tout générateur d'énergie électrique, un réseau de puissance fournit de l'énergie aux appareils utilisateurs par l'intermédiaire des tensions qu'il maintient à leurs bornes. Il est évident que la qualité et la continuité de la tension est devenue un sujet stratégique pour plusieurs raisons concernant l'exploitation des réseaux électriques [2].

I.2. La tension

I.2.1. La qualité de la tension

La qualité d'énergie ou de la tension est le concept d'efficacité de classer les équipements sensibles d'une manière qui convient à l'opération de l'équipement. Pour rappel, la tension possède quatre caractéristiques principales :

- Fréquence.
- Amplitude.

- Forme d'onde.
- Symétrie. [2].

Pour le réseau synchrone algérien, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale, mesurée, doit se trouver dans l'intervalle de $50 \text{ Hz} \pm 1 \%$.

Le maintien de ce niveau de qualité est la responsabilité commune de tous les gestionnaires de réseaux concernés (zones de réglage), qui doivent participer aux réglages primaire et secondaire de la fréquence.

Le gestionnaire de réseau doit maintenir l'amplitude de la tension dans un intervalle de l'ordre de 10% autour de sa valeur nominale. Cependant, même avec une régulation parfaite, plusieurs types de perturbations peuvent dégrader la qualité de la tension :

- les creux de tension et coupures brèves.
- les variations rapides de tension (flicker).
- les surtensions temporaires ou transitoires.

Les deux premières catégories posent les problèmes les plus fréquents (plus grande difficulté de s'en protéger) .

I.2.2. Dégradation de la qualité de la tension

Les perturbations dégradant la qualité de la tension peuvent résulter de :

- ✓ Défauts dans le réseau électrique ou dans les installations des clients :
 1. court-circuit dans un poste, une ligne aérienne, un câble souterrain, etc.
 2. causes atmosphériques (foudre, givre, tempête...).
 3. matérielles (vieillesse d'isolants...).
 4. humaines (fausses manœuvres, travaux de tiers...).
- ✓ Installations perturbatrices :
 1. fours à arc.
 2. Soudeuses.
 3. variateurs de vitesse.
 4. toutes applications de l'électronique de puissance, téléviseurs, éclairage fluorescent,
 5. démarrage ou commutation d'appareils, etc....

Les principaux phénomènes pouvant affecter la qualité de la tension - lorsque celle-ci est présente - sont brièvement décrits ci-après.

I.2.3 Variation ou fluctuation de la fréquence

Les fluctuations de fréquence sont observées le plus souvent sur des réseaux non interconnectés ou des réseaux sur groupe électrogène. Dans des conditions normales d'exploitation, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle $50 \text{ Hz} \pm 1\%$ comme illustré sur la figure (1.1).

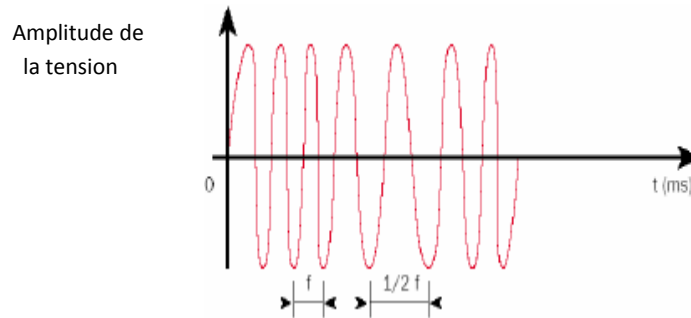


Figure 1.1. Exemple de fluctuation de la fréquence

I.2.4. Composante lente des variations de tension

La valeur efficace de la tension varie continuellement, en raison de modifications des charges alimentées par le réseau. Les gestionnaires de réseau conçoivent et exploitent le système de manière telle que l'enveloppe des variations reste confinée dans les limites contractuelles. On parle de "variations lentes" bien qu'il s'agisse en réalité d'une succession de variations rapides dont les amplitudes sont très petites.

Les appareils usuels peuvent supporter sans inconvénient des variations lentes de tension dans une plage d'au moins $\pm 10\%$ de la tension nominale.[2.3]

I.2.5. Fluctuation de tension (flicker)

Des variations rapides de tension, répétitives ou aléatoires (figure 1.2), sont provoquées par des variations rapides de puissance absorbée ou produite par des installations telles que les soudeuses, fours à arc, éoliennes, etc.

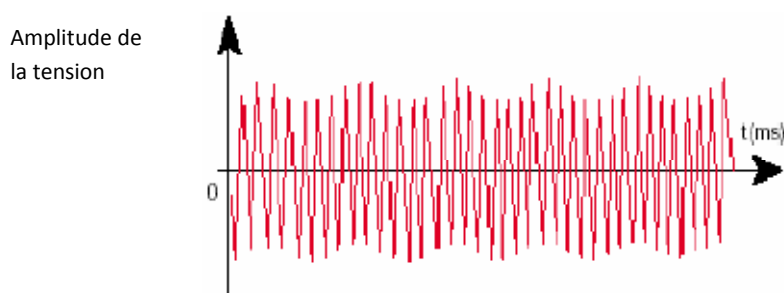


Figure 1.2. Exemple de variations rapide de la tension

Ces fluctuations de tension peuvent provoquer un papillotement de l'éclairage (flicker), gênant pour la clientèle, même si les variations individuelles ne dépassent pas quelques dixièmes de pour-cent. Les autres applications de l'électricité ne sont normalement pas affectées par ces phénomènes, tant que l'amplitude des variations reste inférieure à quelque 10 %.[2.4].

I.2.6. Creux de tension

Les creux de tension sont produits par des courts-circuits survenant dans le réseau général ou dans les installations de la clientèle (figure 1.3). Seules les chutes de tension supérieures à 10 % sont considérées ici (les amplitudes inférieures rentrent dans la catégorie des "fluctuations de tension"). Leur durée peut aller de 10 ms à plusieurs secondes, en fonction de la localisation du court-circuit et du fonctionnement des organes de protection (les défauts sont normalement éliminés en 0.1 - 0.2 s en HT, 0.2 s à quelques secondes en MT)[5].

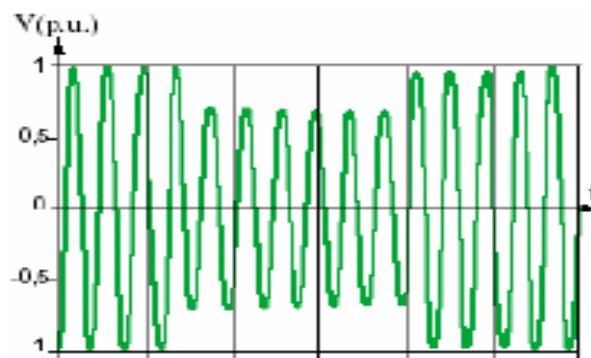


Figure 1.3. Creux de tension

Ils sont caractérisés par leurs: amplitude et durée et peuvent être monophasés ou triphasés selon le nombre de phases concerné. Les creux de tension peuvent provoquer le déclenchement d'équipements, lorsque leur profondeur et leur durée excèdent certaines limites (dépendant de la sensibilité particulière des charges). Les conséquences peuvent être extrêmement coûteuses (temps de redémarrage se chiffrant en heures, voire en jours ; pertes de données informatiques ; dégâts aux produits)

I.2.7. Chutes de tension

Lorsque le transit dans une ligne électrique est assez important, la circulation du courant dans la ligne provoque une chute de la tension. La tension est alors plus basse en bout de ligne qu'en son origine, et plus la ligne est chargée en transit de puissance, plus la chute de tension sera importante. Un réseau dans lequel la consommation est éloignée de la production, présentera un profil de tension différent de celui d'un réseau dans lequel la production et consommation sont uniformément réparties. Chaque centrale impose la tension à sa sortie, et la tension évolue

dans le réseau en fonction de la consommation alimentée. C'est pourquoi dans les réseaux maillés THT, la tension est différente suivant l'endroit où l'on se trouve. A la pointe de consommation, la tension est forte aux nœuds du réseau où les centrales débitent, et relativement basse aux points de consommation éloignés des centrales.

I.2.8. Tension et / ou courant transitoire

Les surtensions transitoires illustrées sur la figure (1.4) sont des phénomènes brefs, dans leur durée et aléatoires dans leur apparition. Elles sont considérées comme étant des dépassements d'amplitude du niveau normal de la tension fondamentale à la fréquence 50Hz ou 60Hz pendant une durée inférieure à une seconde [4]. Quelques équipements tels que les dispositifs électroniques sont sensibles aux courants/tensions transitoires.

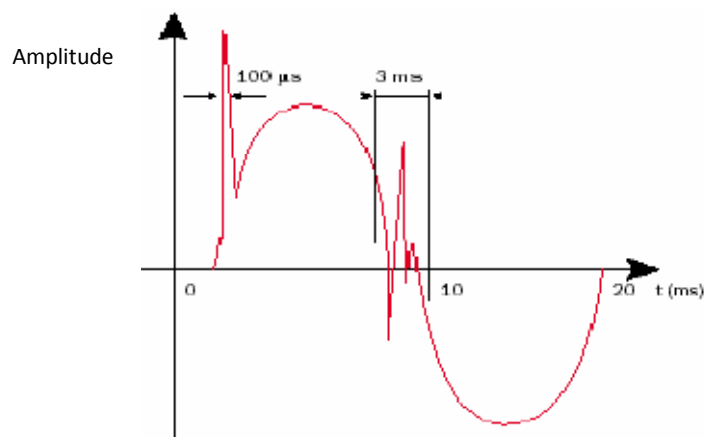


Figure 1.4. Exemple de cas de surtensions transitoires

I.2.9. Déséquilibre de tension

Un récepteur électrique triphasé, qui n'est pas équilibré et que l'on alimente par un réseau triphasé équilibré conduit à des déséquilibres de tension dus à la circulation de courants non équilibrés dans les impédances du réseau (figure 1.5). Ceci est fréquent pour les réceptrices monophasées basses tensions. Mais cela peut également être engendré, à des tensions plus élevées, par des machines à souder, des fours à arc ou par la traction ferroviaire.

Un système triphasé est déséquilibré lorsque les trois tensions ne sont pas égaux en amplitude et/ou ne sont pas déphasées les unes des autres de 120° .

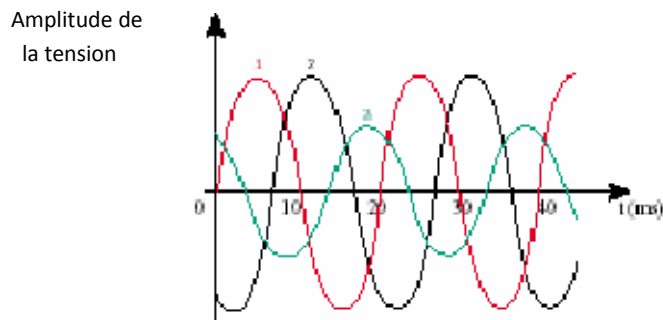


Figure 1.5. Déséquilibre de tension

I. 3. La Puissance Réactive

Les réseaux électriques à courant alternatif fournissent l'énergie apparente qui correspond à la puissance (ou puissance appelée). Cette énergie se décompose en deux formes d'énergie:

- L'énergie active: transformée en énergie mécanique (travail) et en chaleur (pertes).
- L'énergie réactive: utilisée pour créer des champs magnétiques.

Les consommateurs de puissance réactive sont les moteurs asynchrones, les transformateurs, les inductances (ballasts de tubes fluorescents) et les convertisseurs statiques (redresseurs).

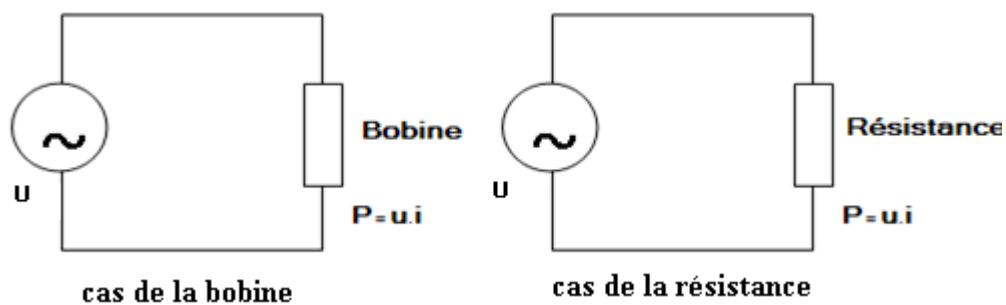


Figure 1.6. Principe de la puissance active et réactive

I.3.1. Importance de la puissance réactive

L'énergie réactive est un facteur très important qui influe sur la stabilité et l'équilibre du réseau électrique, ainsi que son fonctionnement. Les effets secondaires de ce facteur se résument dans les points suivants: [6]

- La chute de tension dans les lignes et les postes de transformation.
- Les pertes supplémentaires actives dans les lignes, les transformateurs et les générateurs.
- Les variations de tension du réseau sont étroitement liées à la fluctuation de la puissance réactive dans le système de production.

I.3.2. Bilan de la puissance réactive

L'expression suivante nous donne le bilan énergétique :

$$\sum_{i=1}^n Qi(t) = \sum_{i=1}^n Qgi(t) + \sum_{i=1}^n Qsi(t) - \sum_{j=1}^m \Delta Qj(t) \tag{I-1}$$

Avec :

N : le nombre des nœuds du réseau

M : le nombre des éléments du réseau

$Qi(t)$: la puissance réactive consommée au nœud « i »

$Qgi(t)$: la puissance réactive produite par les générateurs de nœud « i »

$Qsi(t)$: la puissance réactive générée par les sources reliées au nœud « i »

$\Delta Qj(t)$: Les pertes réactive dans l'élément « j » du réseau

a) Chute de tension sur une ligne

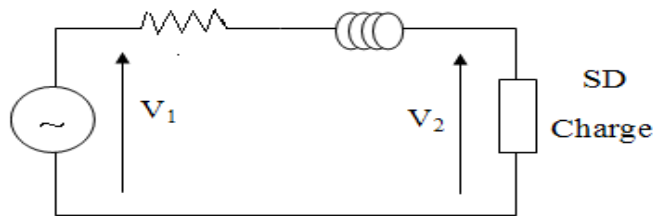


Figure 1.7. Circuit équivalent du réseau électrique.

Afin d'illustrer les relations entre la puissance réactive et la chute de tension, considérons le circuit équivalent ci-dessus. La chute de tension due au courant I dans l'impédance.

$$Z = R + j X \text{ est } \Delta V = ZI = V1 - V2 \tag{I-2}$$

Si nous traçons le diagramme vectoriel de ce circuit.

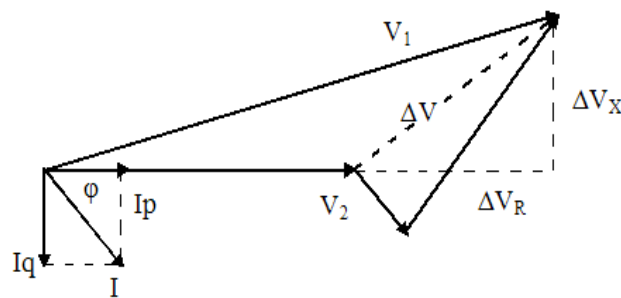


Figure 1.8. Diagramme vectoriel associé au circuit précédent.

$V2$ étant pris comme référence

$$S_D = V_2 \cdot I = P_D + j Q_D \tag{I-3}$$

$$I = (P_D - j Q_D) / V_2 \tag{I-4}$$

$$\Delta V = ZI = (R + j X) (P_D - j Q_D) / V_2 \tag{I-5}$$

$$\Delta V = (R \cdot P_D + X \cdot Q_D) / V_2 + j (X \cdot P_D - R \cdot Q_D) / V_2 \tag{I-6}$$

$$\Delta V = \Delta VR + j \Delta VX \quad (\text{I} - 7)$$

C'est-à-dire que la chute de tension a une composante ΔVR en phase avec V_2 et une composante ΔVX en quadrature avec V_2 .

Il est clair que la chute de tension dépend simultanément de la puissance active et réactive de la charge.

Comme $\Delta V = V_1 - V_2$ donc $V_1 = V_2 + \Delta V$ et en considérant de V_1 .

$$|V_1|^2 = (V_2 + \Delta VR)^2 + (\Delta VX)^2 \quad (\text{I} - 8)$$

$$|V_1|^2 = \left(V_2 + \frac{RP_D + XQ_D}{V_2} \right)^2 + \left(\frac{XP_D - RQ_D}{V_2} \right)^2 \quad (\text{I} - 9)$$

Comme $\Delta VX < (V_2 + \Delta VR)$ on peut approximer

$$|V_1|^2 = \left(V_2 + \frac{RP_D + XQ_D}{V_2} \right)^2 \quad (\text{I} - 10)$$

$$V_1 - V_2 = \left(\frac{RP_D + XQ_D}{V_2} \right) \quad (\text{I} - 11)$$

Puisque la réactance X est le paramètre prédominant dans l'impédance du réseau c'est-à-dire $R \ll X$, on peut écrire que :

$$\Delta V = V_1 - V_2 \approx \frac{XQ_D}{V_2} \quad (\text{I} - 12)$$

Donc la cause de la chute de tension à travers une impédance est due principalement au courant réactif passant dans cette impédance, ou en d'autres termes elle est due à la variation de la puissance réactive.

Pour maintenir V_2 constante si la courant I change, il faut varier la puissance réactive au point de raccordement de la charge.

b) Contrôle de la tension

La chute de tension sur un élément de réseau s'exprime par :

$$\Delta V = V_1 - V_2 = \frac{RP + XQ}{V_2} \approx \frac{XQ_D}{V_2} \quad (\text{I} - 13)$$

L'examen de cette équation montre que pour maintenir V_2 constante au niveau du consommateur. On dispose de plusieurs solutions à savoir :

- Augmentation de la tension de départ V_1 .
- Diminution de la réactance de la ligne par insertion de réactance capacitive.
- Fourniture de la puissance réactive au niveau des usagers (compensation de la puissance réactive). Cette compensation peut être obtenu soit par :

- la connexion de capacité shunts
- la connexion de compensateur synchrone
- la connexion de réactance shunt (pour les faibles charges, ou charges capacitives)

I.3.3. Transport de la puissance active et réactive

Quand un régime permanent de circulation d'énergie est établi dans un réseau électrique .on peut écrire les équations reliant les puissances actives P_i et réactives Q_i injectées ou soutirées en chaque sommet i et les tensions en modules $|V|$ et phases θ . La détermination des tensions et courants sur une ligne électrique peut être effectuée en utilisant la notation complexe. [6]. En schématisant chaque liaison (du sommet i au sommet k) par un π symétrique tel que ($i=1, k=2$)

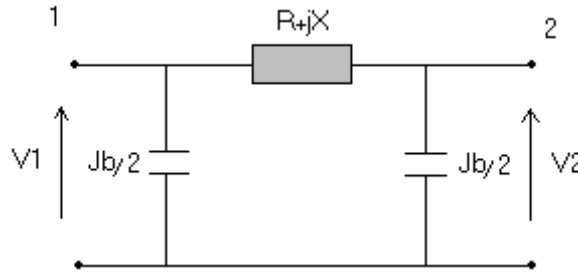


Figure 1.9. Circuit équivalent en π d'une ligne électrique

Les lignes sont normalement spécifiées par :

- Une impédance série : $Z = R+jX \text{ } \Omega/\text{Km}$
- Une admittance shunt : $Y = G+jB \text{ } \mu\text{mhos}/\text{Km}$

En pratique G est extrêmement petit ($G=0$) et par conséquent $j B=j \omega C$ ou B représente la susceptance shunt $\mu\text{mhos} / \text{Km}$.

Il y a de plus un bilan de conservation, aux pertes près, sur $\sum P_i$ et $\sum Q_i$ ce bilan peut être assuré par un sommet quelconque (ou l'on peut aussi fixer $\theta = 0$).

a) Impédances séries

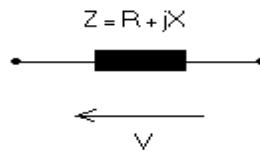


Figure 1.10. Impédance série d'une ligne électrique

Les pertes dans les impédances série sont donnés par:

$$S = V \cdot I^* \tag{I-14}$$

$$V = Z \cdot I \text{ c'est-à-dire que } S = ZI \cdot I^* = Z (I_r + j I_i) (I_r - j I_i) \tag{I-15}$$

$$S = P + j Q = Z (I_r^2 + I_i^2) = Z |I|^2 \tag{I-16}$$

Avec : $P = R |I|^2$ et $Q = X |I|^2$

Si $R = 0$ alors $P = 0$,

$X = 0$ alors $Q = 0$,

b) Susceptance shunt

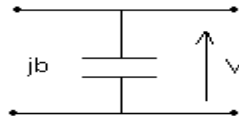


Figure 1.11 . Susceptance shunt d'une ligne électrique

En complexe la tension \bar{V} peut s'écrire :

$$V = V_r + j V_i \quad (\text{I-17})$$

$$I = j B V = j B (V_r + j V_i) = -B V_i + j B V_r \quad (\text{I-18})$$

$$I^* = -B V_i - j B V_r = -B (V_i + j V_r) \quad (\text{I-19})$$

La puissance S dans la Susceptance est donnée par $S = VI^* = P + j Q$ c'est-à-dire que :

$$S = VI^* = (V_r + j V_i) (-B (V_i + j V_r)) = -B (V_r + j V_i) (V_i + j V_r) \quad (\text{I-20})$$

$$S = -jB (V_r^2 + V_i^2) = -jB|V|^2 \quad (\text{I-21})$$

Comme $S = P + jQ$, donc $P = 0$ et $Q = -jB|V|^2$

en d'autre termes la puissance réactive Q est délivrée par la Susceptance de la ligne.

I.3.3. La Compensation de la puissance réactive

Le bilan global de la puissance réactive produite et consommée dans l'ensemble du système électrique doit être équilibré. Toutefois, l'équilibre local n'est pas naturel. Il en résulte des transits de la puissance réactive. Or, ces transits provoquent des chutes de tension et des pertes. Il faut, donc, éviter ces transits par la production de la puissance réactive, autant que possible, à l'endroit où elle est consommée.

Les variations de tension du réseau sont étroitement liées aux fluctuations de la puissance réactive dans le système de production et de transport. Ceci tient au fait que la puissance réactive intervient de manière importante dans l'expression de la chute de tension.

L'analyse des variations de la demande de la puissance réactive montre que le problème de l'adaptation offre-demande présente deux aspects qui nécessitent l'emploi de dispositifs aux caractéristiques très différentes :

- le premier consiste à suivre les fluctuations périodiques. Celles-ci sont connues, tout au moins pour les charges dans une large mesure prévisible. Une grande part de l'ajustement peut donc être réalisée à l'aide de moyen dont l'action est discontinue et le temps de réponse relativement long. Cette catégorie comprend les batteries de condensateurs et les inductances installées sur les réseaux .
- le second consiste à faire face aux variations brusques et aléatoires. Ceci nécessite la mise en oeuvre de moyens dont le temps de réponse est très court. Cette catégorie comprend

les groupes de production ainsi que les compensateurs synchrones et les compensateurs statiques [7].

I.3.3.1. Les dispositifs conventionnels

Le réseau en lui-même est une source non négligeable de puissance réactive. Ainsi, en dehors de la production de l'énergie réactive par les générateurs, le réseau doit faire appel à d'autres sources ou plutôt d'autres moyens de compensation, qui finalement sont au moins aussi souvent consommateurs que fournisseurs d'énergie réactive.

I.3.3.2. Les groupes de production (générateurs)

Les groupes de production sont bien situés pour satisfaire les besoins en énergie réactive. D'autant plus, leurs performances dynamiques leur permettent de faire face aux fluctuations brusques de la demande. En revanche, ils ne peuvent compenser que partiellement les charges réactives, en raison des chutes de tension importantes que créent les transits d'énergie réactive sur les réseaux.

I.3.3.3. Les condensateurs

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

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

I.3.3.4. Les inductances

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

I.3.3.5. Les compensateurs synchrones

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

I.3.3.6. Les compensateurs statiques

Ils sont constitués par l'ensemble de condensateurs et d'inductances commandées par thyristors, montés en tête-bêche dans chaque phase. Chacun d'entre eux étant ainsi conducteur pendant une demi-période. La puissance réactive absorbée par l'inductance varie en contrôlant la valeur efficace du courant qui la traverse par action sur l'angle d'amorçage des thyristors. [7].

Tableau 1.1. Quelques dispositifs de contrôle utilisés dans le problème tension/puissance réactive.

Contrôles par génération de la puissance réactive					
	Ajustable en Continu	Capacitive	Inductive	Réponse rapide	Control local
Générateurs Synchrones	Oui	Oui	Oui	Oui, dépend du système d'excitation	Oui
Condensateurs Synchrones	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Batteries de condensateurs	Non, plusieurs gradins. (discret)	Oui	Non	Dépend de l'automatisation	Oui
Réactances	Non, (discret) Généralement une ou deux unités par ligne	Non	Oui	Dépend de l'automatisation	-

I. 4. Conclusion

Le contrôle de la tension/puissance réactive a pour objectif de maintenir un profil adéquat dans le réseau de transport d'énergie électrique. En plus, il doit maintenir des réserves de puissance réactive dans les différentes zones du système pour faire face aux incidents de tension. On doit tenir en compte que les problèmes de tension doivent être corrigés localement étant donné, que la majorité des moyens qu'on peut prendre pour résoudre ces problèmes ont une étendue fondamentalement locale.

La complexité du contrôle des tensions et de la puissance réactive en temps réel, oblige la décomposition géographique et temporaire du problème, en définissant une structure hiérarchique du contrôle tension/puissance réactive. La décomposition géographique peut être ajustée localement du problème réactif et la propre topologie du système électrique. D'autre part la décomposition temporaire, est imposée par les temps caractéristiques associés par rapport aux contrôles rencontrés dans chaque niveau hiérarchique.

Chapitre II

Etude de la compensation de la puissance réactive par dispositif FACTS (SVC)

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 dispositifs 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. [8,9]

II.2.2.1.Compensateurs parallèles à base de thyristors

a.SVC (Static Var Compensator)

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

Un SVC est généralement constitué d'un ou plusieurs batteries de condensateurs fixes (CF) commutables soit par disjoncteur, ou bien par thyristors (Thyristor Switched Capacitor TSC) et d'un banc de réactances contrôlable (Thyristor controlled Reactor) (RCT) et par des réactances commutables (Thyristor Switched Reactor TSR), et d'autre part on trouve des filtres d'harmoniques. Pour avoir un temps de réponse plus rapide et pour éliminer les parties mécaniques les RCT (Réactances commandés par thyristor) ont fait leur apparition vers la fin de années soixante. Elles sont constituées d'une inductance en série avec un gradateur (deux thyristor tête-bêche). Chaque thyristor conduit pendant moins demi-période de la pulsation du réseau. Le retard à l'amorçage α permet de régler l'énergie réactive absorbée par le dispositif. (Figure 2.1)[7]

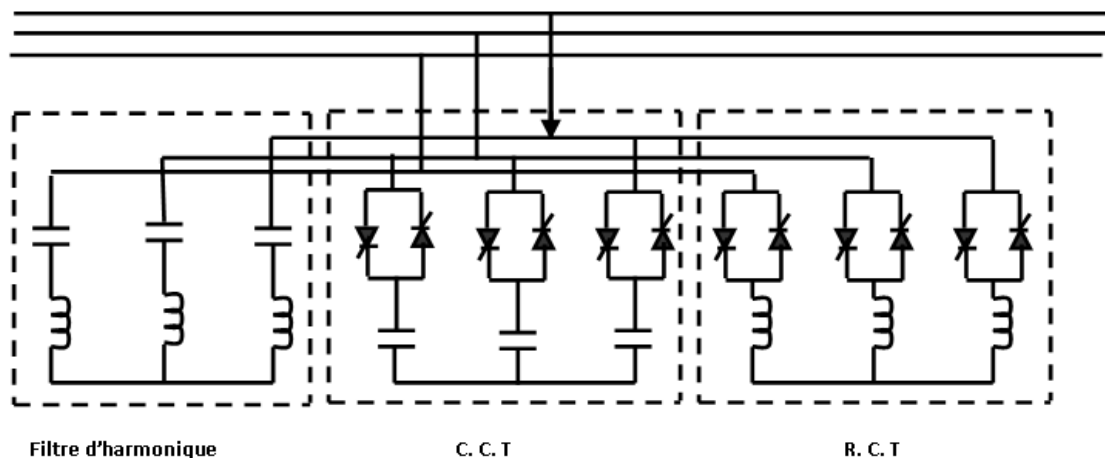


Figure2.1. Schéma du SVC

b.Principe de fonctionnement

La figure (2.2) 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[9]

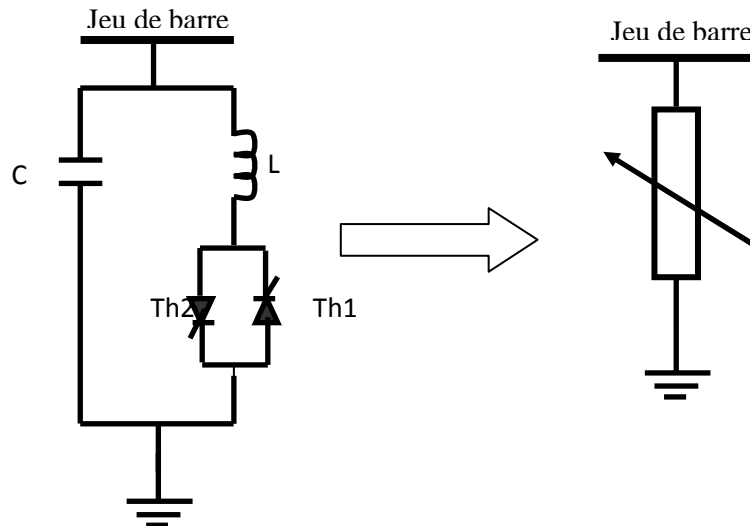


Figure 2.2. présentation d'un Compensateur SVC

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 à été installé en 1979 en Afrique de Sud. La caractéristique statique de SVC est donnée par la figure (2.3) 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.

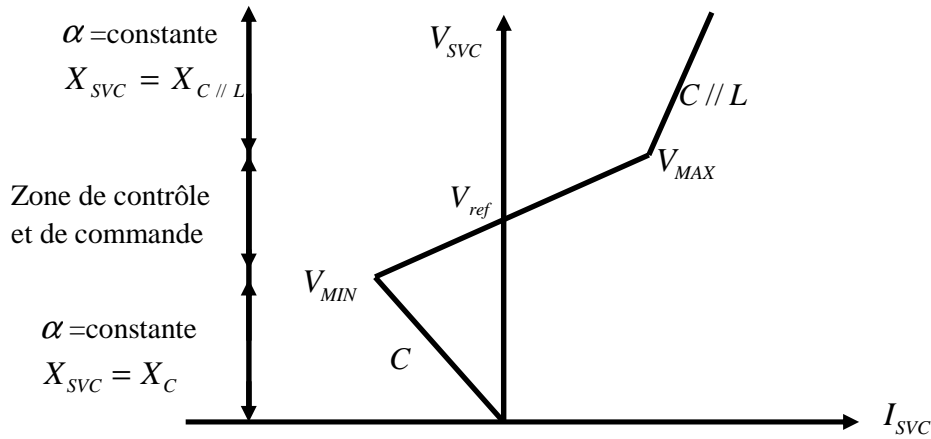


Figure 2.3. Fonctionnement du Compensateur SVC

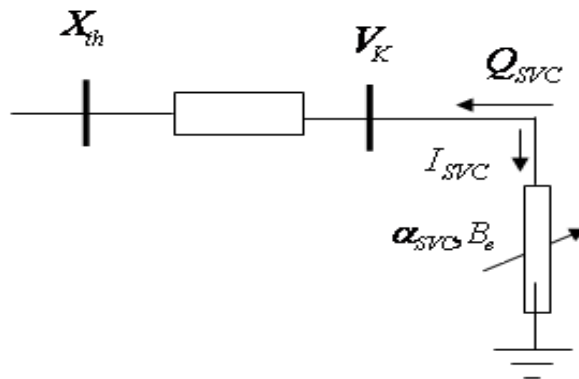
c. Les équations de SVC[4.9]

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 :

$$V_I - V_{REF} + X_{SL} V_K B_e = 0 \tag{II-1}$$

$$Q_{SVC} - V^2_K B_e = 0 \tag{II-2}$$

$$\pi X_C X_L B_e + \sin 2\alpha + \pi \left(2 - \frac{X_L}{X_C} \right) = 0 \tag{II-3}$$



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

B_e : la susceptance.

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

I_{svc} : le courant dans le SVC.

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

$$B_e = \frac{\sin(2\alpha) - 2\alpha + \pi(2 - \frac{X_L}{X_C})}{\pi X_L} \tag{II-4}$$

$$X_e = \frac{\pi X_L}{\sin(2\alpha) - 2\alpha + \pi(2 - \frac{X_L}{X_C})} \tag{II-5}$$

Avec α représente la variation de l'angle d'amorçage des thyristors : α compris entre [90 et 180].

la figure (2-4) représente Organigramme de la variation de l'angle d'amorçage en fonction de la tension à régler .

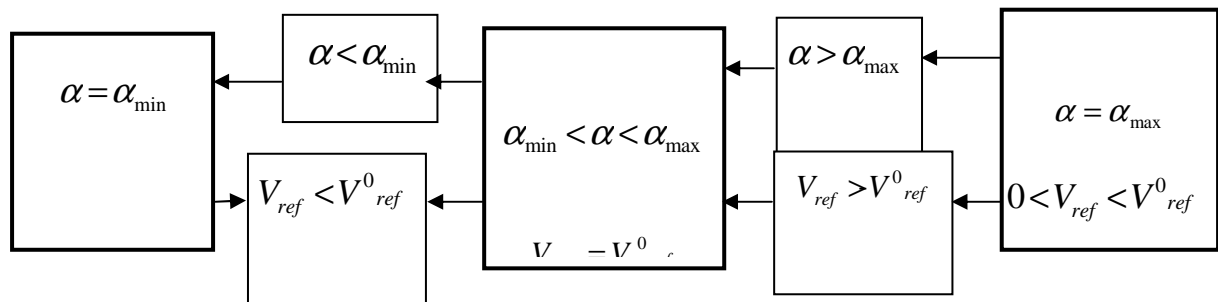


Figure 2.4. Organigramme représentant la variation de l'angle d'amorçage en fonction du tension à régler.

La réactance contrôler par les thyristors est en fonction de X_L, X_C, α .on peut tracer la courbe de

$$B_e = f(\alpha), \text{ si } X_C = 1(pu), X_L = 0.5(pu)$$

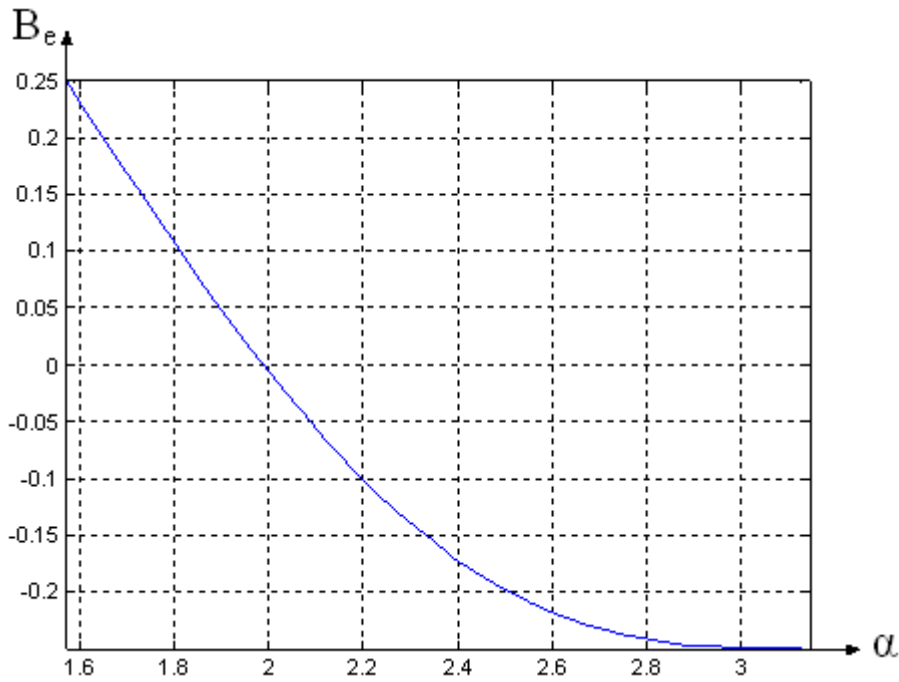


Figure 2.5. La variation de susceptance en fonction de l'angle d'amorçage α

On remarque que B_e change de signe lorsque α varie fig (2.5).

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

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

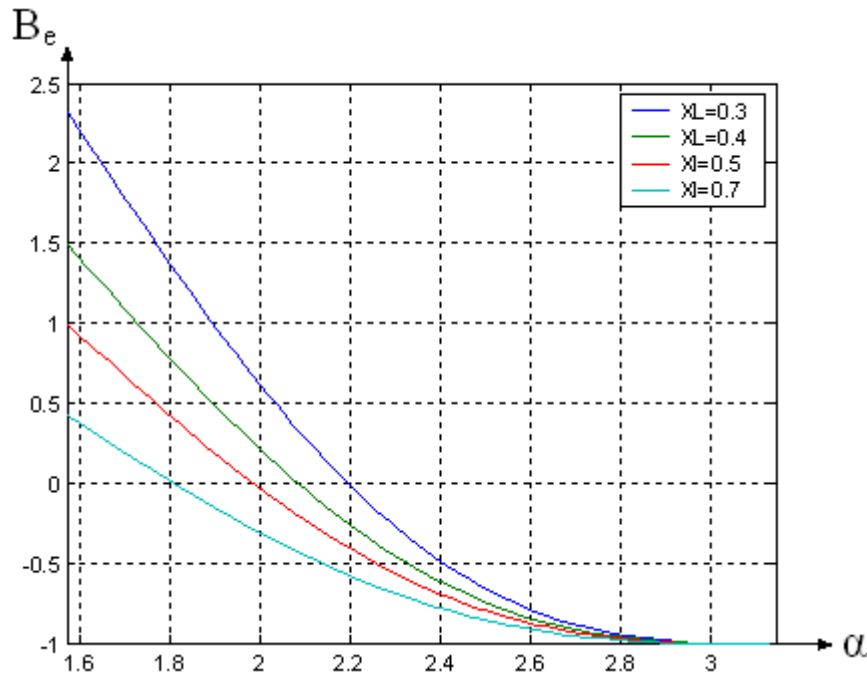


Figure.2.6. Variation de la susceptance en fonction de α pour valeur de X_L

d. 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 différent 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 :

$$P_i + jQ_i = (P_{G1} - P_{D1}) + j(Q_{G1} - Q_{D1}) \quad (\text{II-6})$$

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

$$S_i = V_i \cdot I_i^* \Rightarrow I_i = \frac{S_i^*}{V_i^*} = \sum_{K=1}^{K=n} Y_{i,K} V_K \quad (\text{II-7})$$

$$S_i^* = P_i - jQ_i = \left(\sum_{K=1}^{K=n} Y_{i,K} V_K \right) V_i^* \quad (\text{II-8})$$

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

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

Pour le jeu de barres de contrôle :

$$Q_i = Q_{SVC} - Q_D \Rightarrow Q_{SVC} = Q_i + Q_D \quad (\text{II-10})$$

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 :

$$B_p = \frac{1}{X_T + X_e} \tag{II-11}$$

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 (II-11). [4].

III.2.2.2. Compensateurs parallèles à base de GTO thyristors

a. Compensateur synchrone statique (STATCOM)

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 toute fois exempt d'inertie [8]

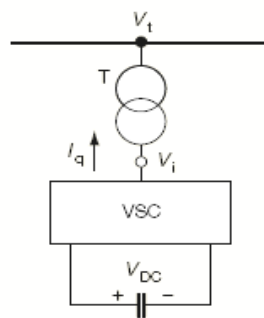


Figure 2.7. Principe d'un compensateur synchrone statique

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.

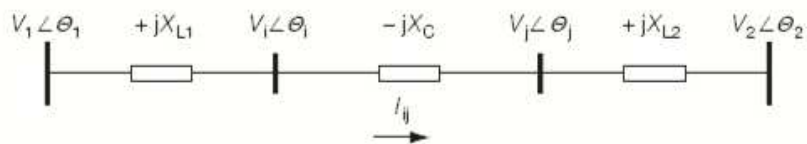


Figure 2.8. Principe de la compensation série

II.2.3.1. Compensateurs séries à base de thyristor

a. Le Compensateur Série Contrôlé par Thyristors (TCSC)

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

II.2.3.2. Compensateurs séries à base de GTO thyristor

a. Static Synchronous Series Compensator (SSSC)

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. 2.13).

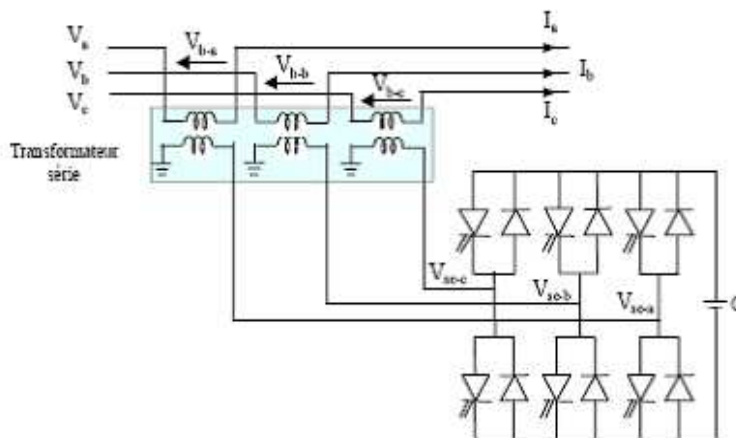


Figure .2.9. Schéma de base du SSSC

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) [7].

II.2.4. Compensateurs hybrides série – parallèle

a. Contrôleur universelle de l'écoulement de puissance (UPFC)

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

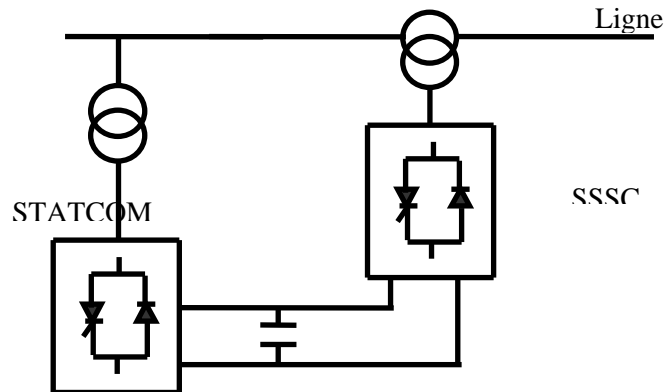


Figure .2.10. Compensateur Unifier UPFC (Unified power flow Controller)

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.

b. 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. [5]

II.3. Comparaison des FACTS les plus utilisés

Le tableau suivant montre les performances qui guident l'utilisateur dans son choix pour chaque compensateur. [4]

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

Application

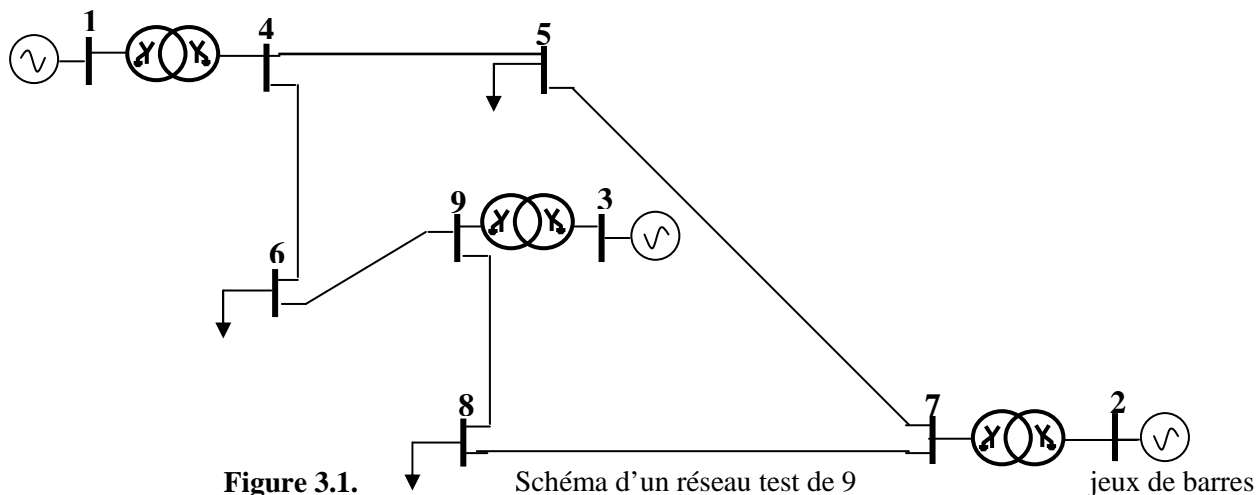
III.1. Description générale

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.

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

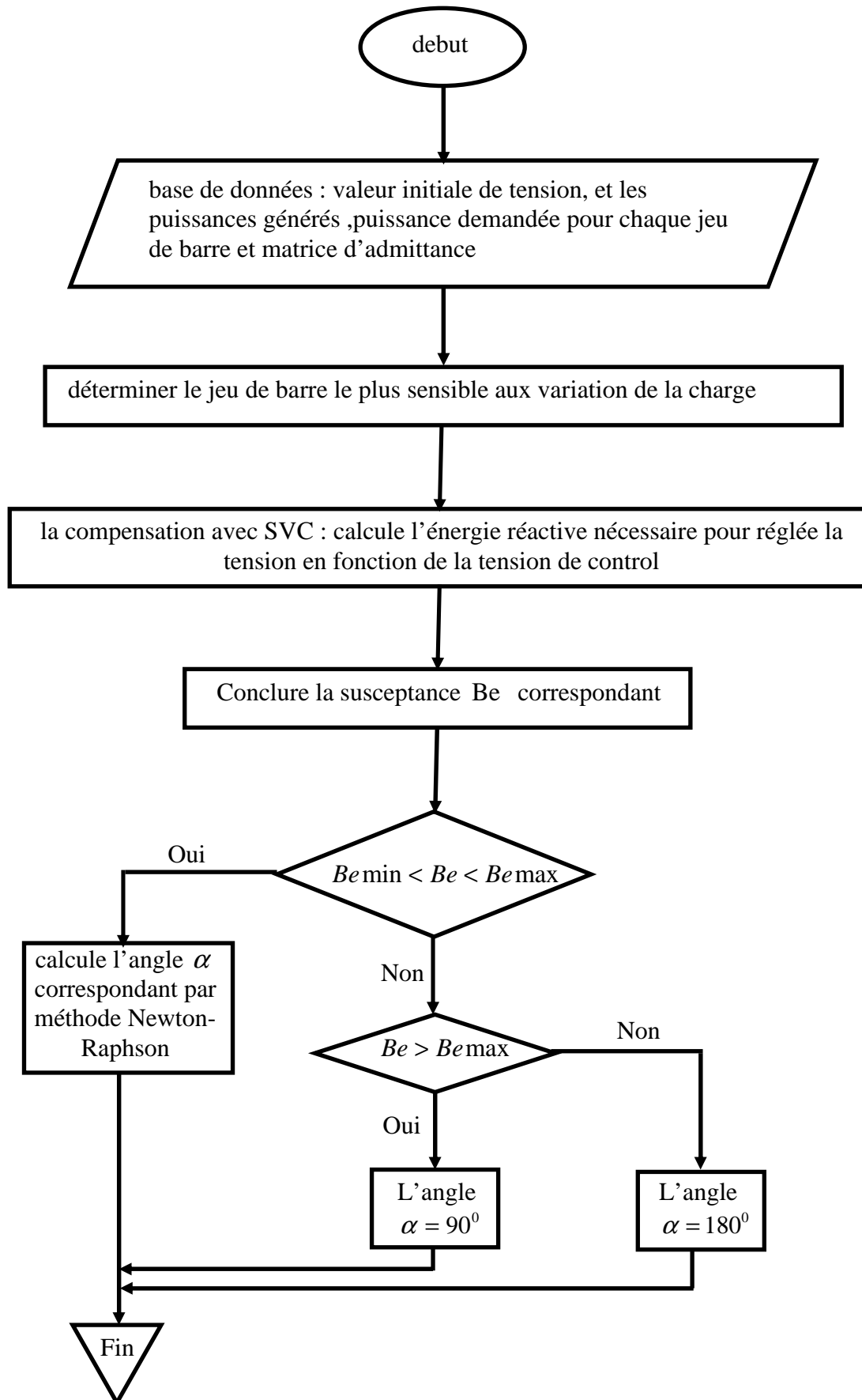
III.2.1. Application : réseau électrique de 9 jeux de barres :

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.



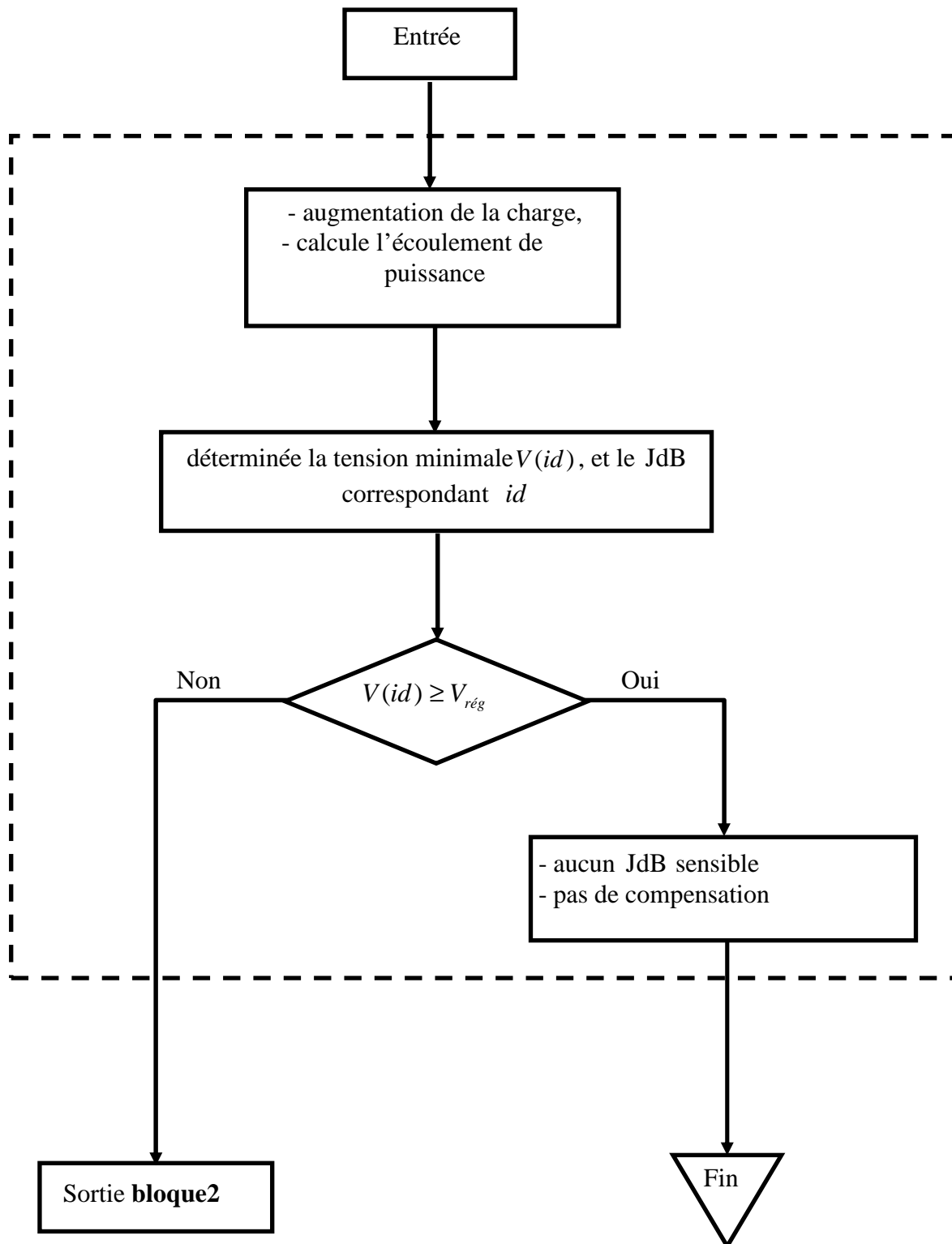
Le tableau (III.1), la Figure(3.2) montrent les tensions au niveau des jeux de barres du réseau test trouvées sans et par l'intégration du dispositif shunt avec SVC dans la méthode de calcul de l'écoulement de puissance (méthode de GAUSS-SEIDEL). On remarque une amélioration des tensions au niveau des jeux de barres due à la présence de ce dispositif shunt. Alors que le tableau (III.3.a,b) visualise les résultats du réseau 9 bus obtenus avec et sans l'SVC, (les résultats de programmation).

III.2.1. L'organigramme globale de l'intégration de SVC

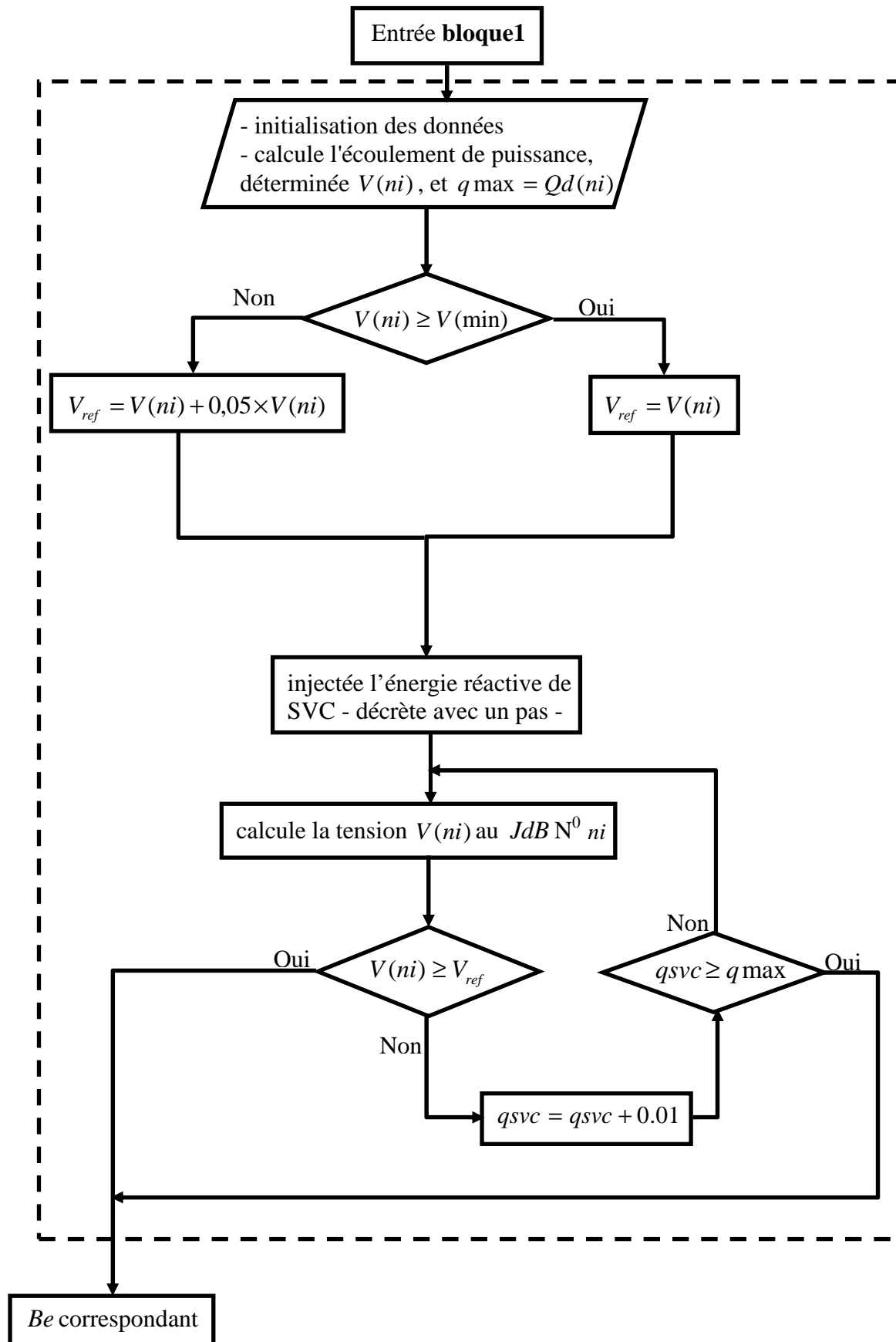


III.2.3. Organigramme détaillée

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.2.4. les résultats de programmation (réseau 9 jeux de barres)

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

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

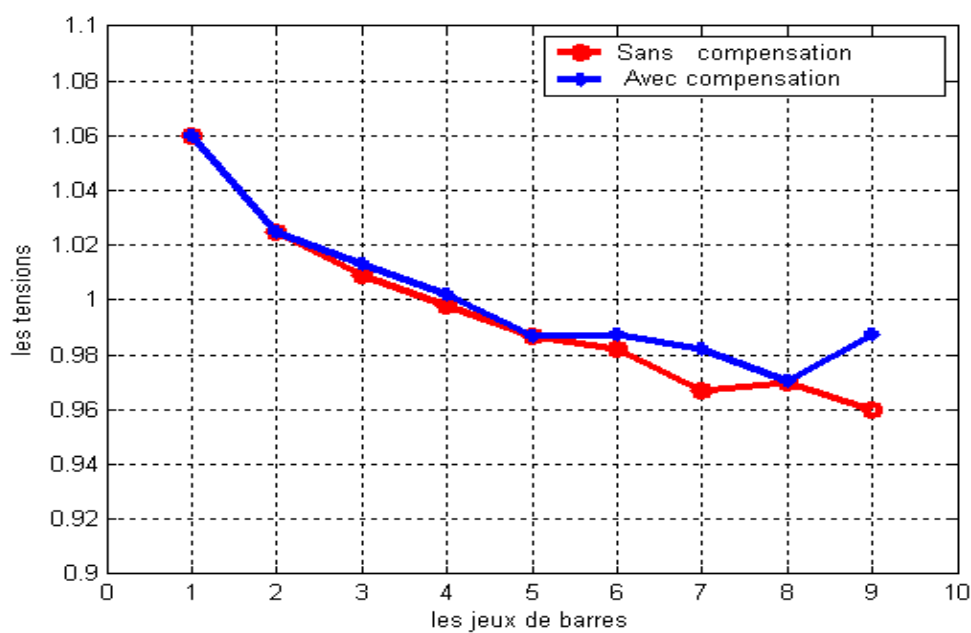


Figure 3.2 . Variation de la tension – cas normale

b- tableau (III-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

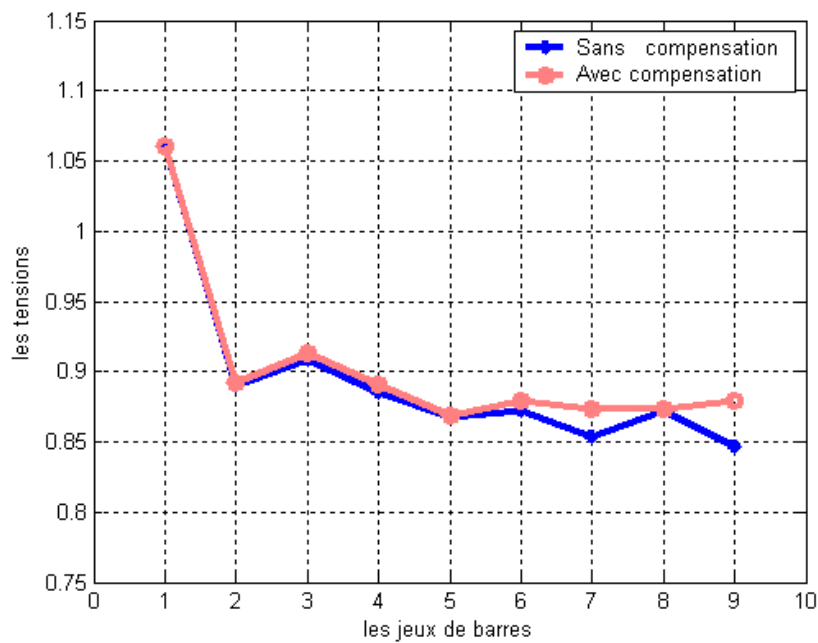


Figure 3.3. Variation de la tension – cas rupture de la ligne (1-2)

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

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

c-1-(tableau III.3) 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
Susceptible Be J.d.B 9	////////////////	////////////////
Susceptible Be J.d.B 7	////////////////	////////////////
α J.d.B 9	////////////////	////////////////
α J.d.B 9	////////////////	////////////////
Puissance réactive injectée (SVC) (MVAR)	00	00

c-2-(tableau III.4) 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 (<i>MW</i>)	213.540	236.840
Puissance réactive généré (<i>MVAR</i>)	89.545	185.142
Pertes active (<i>MW</i>)	9.846	33.148
Pertes réactive(<i>MVAR</i>)	10.147	104.742
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
J.d.B 9	110.87	90
Puissance réactive injectée(SVC) (<i>MVAR</i>)	11	10

d-(tableau III.5) 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

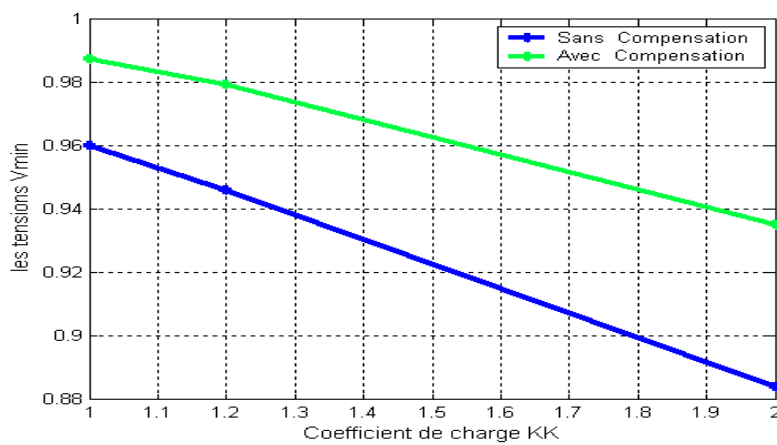


Figure 3.4. Variation de la tension en fonction de l'incrémentation de la charge

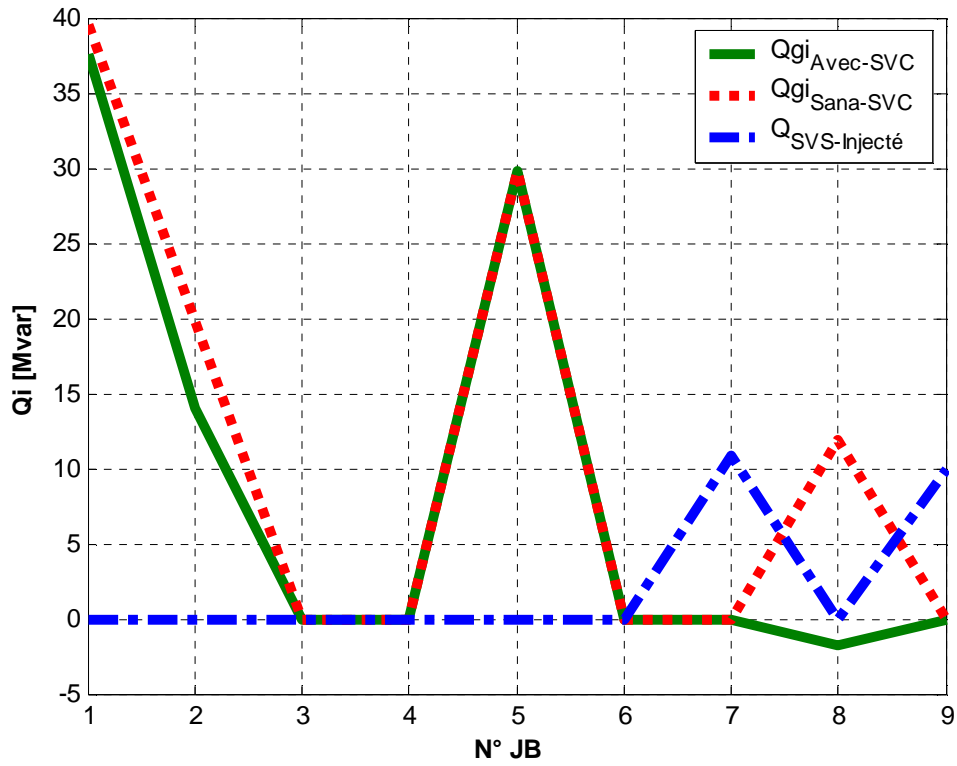


Figure 3.5. la Puissance réactive dans (réseau 9 jeux de barres)

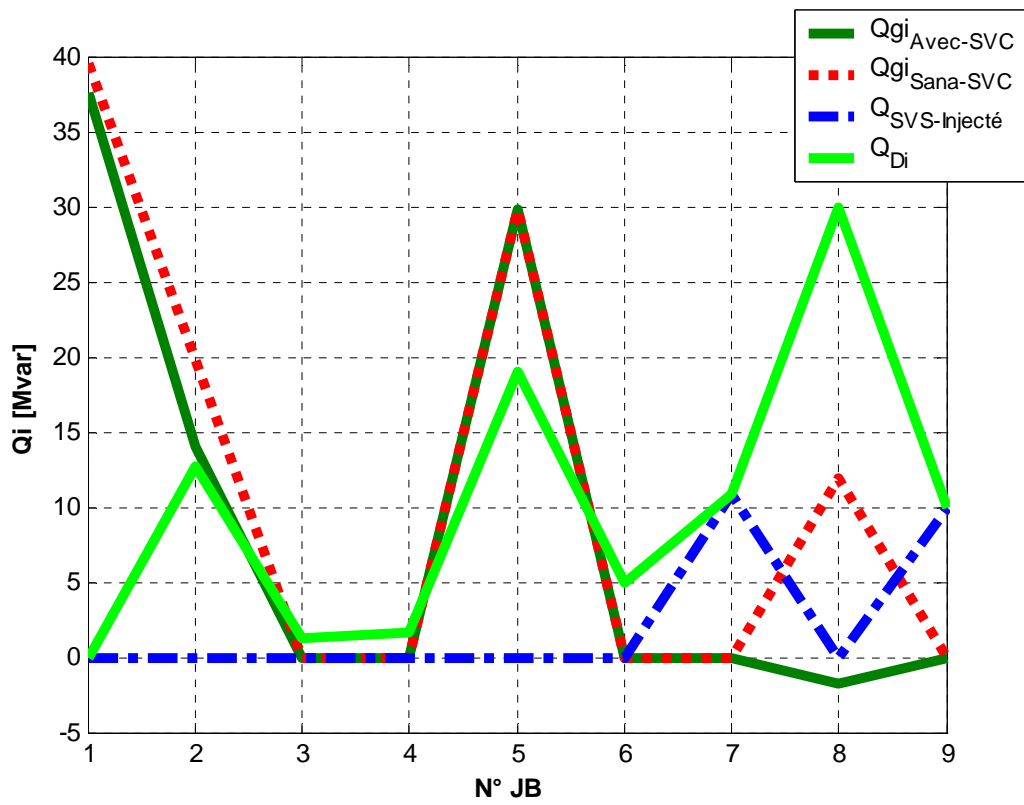


Figure 3.6. la Puissance réactive dans (réseau 9 jeux de barres)

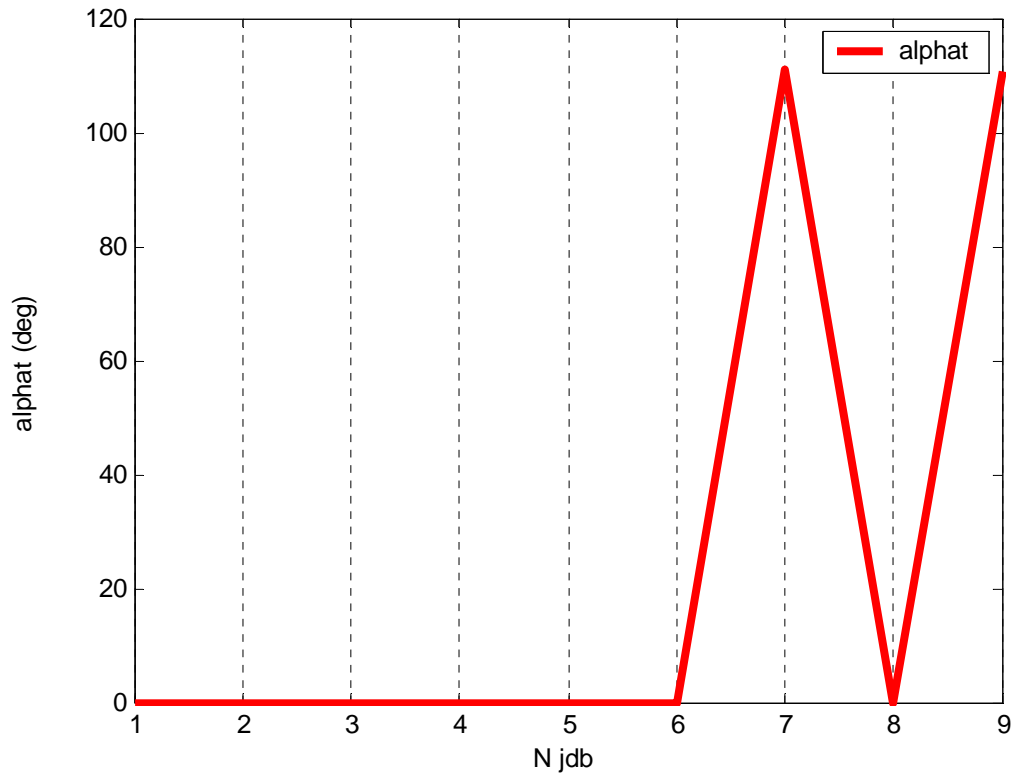


Figure 3.7. Variation l'angle alphas (degré) en fonction de jeux de barres
d-(tableau III.6) présente Bilan de la puissance réactive

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

Interprétation

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

Donc on remarque que :

- Pour cette situation, nous avons montrée la possibilité d'améliorée le 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..

Donc on remarque que :

- la tension est améliorée.
- Réduction faible des pertes de l'énergie active .
- 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 à été réalisé et en plus une étude détaillée sur les dispositifs SVC (définition, modélisation, incorporation dans le load flow).

Les résultat 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 noeuds.

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.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Michel Crappe « Commande et régulation des réseaux électriques » Traité EGEM série génie électrique, LAVOISIER 2003.
- [2] 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.
- [3] Boudjella Houari « contrôle des puissances et des tensions dans un réseau de transport au moyen de dispositifs FACTS (SVC) » mémoire de magister ,université de Sidi Bel-Abbes 23 Janvier 2008.
- [4] Haimour Rachida « Contrôle des Puissances Réactives et des Tensions par les Dispositifs FACTS dans un Réseau Electrique » mémoire de magister, Ecole Normale Supérieure de l'Enseignement Technologique d'Oran 2008-2009.
- [5] Lakdja Fatiha « Contrôle des transits de puissance par dispositif facts » Mémoire de magister en Commande des processus Oran 2005.
- [6] : Salhi Abd Alfattah et Mehellou Yuocef « Contrôle de la puissance réactive du système électrique par SVC », université Batna, 2008
- [7] Fild/ FACTS – les systèmes performants pour le transport flexible de l'énergie électrique.
- [8] Ben Alia Khaled et Zahnite Hakim « Etude des compensateurs statiques de l'énergie réactive SVC dans un réseau électrique » , université Biskra promotion juin 2005.
- [9] Oussama Mammeri « différentes méthodes de calcul de la puissance réactive dans un nœud à charge non linéaire en présence d'un système de compensation de l'énergie » mémoire de magister ,université de Batna ,Algérie, 2012