



# Université de Batna

Faculté de Technologie

## Mémoire de Magister

Préparé au

Département d'Électrotechnique

*Option : Réseaux Electriques*

Présenté par

**Oussama MAMMERI**

**THEME : DIFFERENTES METHODES DE CALCUL DE LA PUISSANCE REACTIVE  
DANS UNE NCEUD A CHARGE NON LINEAIRE EN PRESENCE  
D'UN SYSTEME DE COMPENSATION DE L'ENERGIE**

### Jury Proposé

Chérif FETHA	Président	MCA	Université de Batna
Malek BOUHARKAT	Rapporteur	Pr	Université de Batna
Djamel LABED	Examineur	MCA	Université de Constantine
Abdelhamid BOUCETTA	Examineur	MCA	Université de Batna

2011/2012

---

**Table de matière**

	<b>page</b>
<b>Introduction générale</b> .....	01
<b>Chapitre I</b>	
<b>Généralité sur la puissance réactive et la tension dans les réseaux électriques</b>	
I-1- Introduction .....	04
I-2- La tension .....	04
I-2-1- La qualité de la tension .....	04
I-2-2- Dégradation de la qualité de la tension.....	05
I-2-3- Variation ou fluctuation de la fréquence .....	06
I-2-4- Composante lente des variations de tension.....	06
I-2-5- Fluctuation de tension (flicker) .....	06
I-2-6- Creux de tension .....	07
I-2-7- Chutes de tension .....	07
I-2-8- Tension et / ou courant transitoire .....	08
I-2- 9- Déséquilibre de tension.....	08
I-3- La Puissance Réactive .....	09
I-3-1- Importance de la puissance réactive .....	09
I-3-2- Le facteur de puissance: .....	10
I-3-3- Les représentations graphiques.....	10
I-3-4-- La tangente.....	10
I-3- 5 Bilan de la puissance réactive .....	11
I-3-6- Transport de la puissance active et réactive .....	11
I-3- 7-Les contrôles dans le problème tension / puissance réactive .....	12
I-3-8 La Compensation de la puissance réactive.....	15
I-3-8-1- Les dispositifs conventionnels .....	15
I-3-8-2- Les groupes de production (générateurs).....	15
I-3-8-3- Les condensateurs.....	16
I-3-8-4- Les inductances .....	16
I-3-8-5- Les compensateurs synchrones.....	16
I-3-8-6-Les compensateurs statiques .....	16
I-4- Conclusion .....	17

## Chapitre II

### Méthodes de calcul de la puissance réactive dans les réseaux électriques

II-1- Introduction .....	19
II-2- Modélisation du réseau électrique .....	20
II-2-1- Introduction .....	20
II-2-2- Modélisation des générateurs .....	20
II-2-3- Modélisation d'une charge .....	21
II-2-4- Modélisation d'une compensation shunt .....	22
II-2-5- Modélisation de ligne longue .....	22
II-2-6- Classification des nœuds des réseaux électrique .....	24
II-3- Les équations de l'écoulement de puissance .....	24
II-3-1- Calcul de la puissance au niveau de nœud .....	27
II-3-2- Les équations d'écoulement dans les lignes .....	27
II-3-3- Les pertes de puissance dans lignes .....	28
II-3-4- Facteur de puissance .....	29
II-4- Classification des variables d'équations d'écoulement de puissance .....	29
II-4-1- Les variables de perturbation .....	29
II-4-2- Les variables d'état .....	29
II-4-3- Les variables de contrôle .....	29
II-5 - Les méthodes numériques utilisées .....	30
II-5-1- Introduction .....	31
II-5- 2- La méthode itérative de GAUSS-SEIDEL .....	31
II-5-3- La méthode de Newton-Raphason : .....	32
II-5-3-1- Principe .....	32
II-5-3-2- Résolution d'un système d'équation a (( n )) variables non linéaire .....	33
II-5-3-3- Critère d'arrêts des itération .....	35
II-6- Les méthodes numériques appliqué aux équations de l'écoulement de puissance .....	36
II-6-1- la méthode de Gauss Seidel appliqué aux équations de l'écoulement de puissance .....	36
II-6-2-la méthode de Newton-Raphson appliqué aux équations de l'écoulement de puissance .....	36
II-6-2-1- Détermination des sous matrices de la Jacobienne J .....	37
II-6-2-2 Les étapes de calcul .....	38
II-6-2-3 Les approximations dans la méthode de Newton-Raphson .....	39

II-6-3- Méthode découplée de Newton Raphson.....	39
II-7- Conclusion.....	40

### Chapitre III

#### Etude de la compensation de la puissance réactive

III-1-Introduction.....	42
III-2- Exploitation d'un réseau électrique .....	43
III-3- Compensation Traditionnelle .....	43
III-3-1- Compensation traditionnelle shunt.....	43
III-3-2- Compensation traditionnelle série.....	46
III-4- Dispositifs FACTS .....	47
III.4.1 Classification des dispositifs FACTS.....	47
III-4-2Compensateurs shunts.....	48
III-4-2.1.Compensateurs parallèles à base de thyristors.....	48
a-SVC (Static Var Compensator).....	48
b-Principe de fonctionnement .....	49
III-4-2.2.Compensateurs parallèles à base de GTO thyristors.....	50
a-(STATCOM) Compensateur synchrone statique.....	50
b--Principe du fonctionnement.....	50
III-4-3Compensation série.....	53
III-4-3.1. Principe de fonctionnement.....	53
III-4-3.2-Application.....	54
III4- 3-3- Compensateurs séries à base de thyristor.....	55
a-Le TCSC (Compensateur Série Contrôlé par Thyristors).....	55
b-Principe de fonctionnement.....	55
III-4-3-4-Compensateurs séries à base de GTO thyristor.....	56
a-SSSC (Static Synchronous Series Compensator).....	56
b-Principe de fonctionnement.....	57
III-4-4 Compensateurs hybrides série – parallèle .....	57
III-4-4 1.UPFC (Controleur universelle de l'écoulement de puissance).....	57
a-Principe de fonctionnement.....	58
b-Application.....	58
III-4-4 2- IPFC (Interline Power Flow Controller).....	58
III-5- Comparaison des FACTS les plus utilisés.....	59
III-6- Les avantages de la technologie des dispositifs FACTS.....	59
III-7- Conclusion .....	60

## Chapitre IV

### Etude d'un Compensateur shunt : SVC

IV-1-Introduction.....	62
IV-2- Caractéristique d'un compensateur statique.....	62
IV -2-1- Caractéristique en V d'un compensateur statique.....	62
IV -2-2- Caractéristique $Q_{SVC}(I)$ d'un SVC.....	63
IV 2-3- Caractéristique de SVC idéal.....	64
IV -2-4- caractéristique d'un SVC réel .....	65
IV -3-Système de contrôle d'un SVC.....	65
IV -3-1-Système de contrôle TCR .....	65
IV -3-2- Schéma bloc du TCR.....	68
IV -3-3- Système TSC.....	69
IV 3-4- Modèle de contrôle du TSC .....	70
IV -3-5- Schéma bloc du TSC .....	71
IV -4- Contrôle du SVC (TCR et TSC) avec le système .....	71
IV -5- Les équations de SVC.....	73
IV 6- Implantation du compensateur statique dans le problème de l'écoulement de puissance ...	76
IV -7-Conclusion.....	77

## Chapitre VI

### Application

VI-1-Description générale.....	79
VI-2-Application:(programmation); compensation shunt avec SCV .....	80
VI-2-1-Application( 1) : réseau électrique de 9 jeux de barres.....	80
VI-2-3-L'organigramme globale de l' intégration de SCV.....	81
VI-2-4-Organigramme détaillée.....	82
VI-2-5-les résultats de programmation (réseau 9 jeux de barres.....	83
a.-tableau(VI-1):Résultats des tensions du réseau électrique –cas normale.....	83
b- tableau( VI-2):Résultats des tensions du réseau électrique –cas rupture de la ligne (1-2).....	84
c- Les résultats de programmation(Puissance généré, Pertes, Coût optimal.....) .....	85
d-(tableau VI.4.) cas de l'augmentation de la charge avec :20 % , 100% .....	87
VI-2-6-Application( 2) : réseau électrique de 30 jeux de barres.....	90

---

VI-2-7-les résultats de programmation (réseau 9 jeux de barres).....	90
a.-tableau(VI-5):Résultats des tensions du réseau électrique –cas normale .....	91
b- tableau( VI-6):Résultats des tensions du réseau électrique –cas rupture de la ligne (27-30).....	95
c- Les résultats de programmation(Puissance générée, Pertes, Coût optimal.....)	96
d-(tableau VI.8.) cas de l'augmentation de la charge avec :20 % , 100% .....	97
VI-2-8- Comparaison des résultats du chute de tension dans les deux réseaux (9 jeux de barres- 30 jeux de barres ) .....	98
VI-3-Interprétation.....	98
<b>conclusion générale</b> .....	99

# 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 Cinq chapitres:

Dans le premier chapitre, nous décrivons d'une façon générale la Puissance réactive et la qualité de tension dans les réseaux électriques. Ainsi que les différentes techniques de contrôle des tensions/puissances réactives et une description des moyens de compensation.

Le second chapitre a été consacré à l'étude de l'écoulement de puissance, où différentes Méthodes ont été exposées et nous avons opté pour la méthode de GAUSS-SEIDEL.

Le troisième chapitre, est une présentation générale du compensation de puissance réactive. On dresse tout ,d'abord les techniques de compensation de puissance réactive classiques. Une classification des différents types de FACTS est proposée et les principaux dispositifs de chaque famille sont décrits de façon plus détaillée.



## **Introduction générale**

---

Le quatrième 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 cinquième 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 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 (vieillessement d'isolants...).
4. humaines (fausses manœuvres, travaux de tiers...).

✓ 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 (vieillessement d'isolants...).
4. humaines (fausses manœuvres, travaux de tiers...).

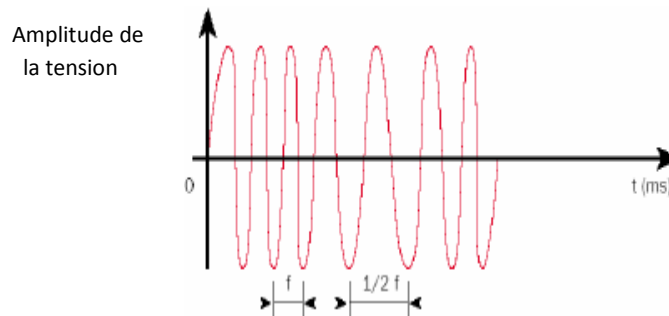
✓ Installations perturbatrices :

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. [3].

### 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

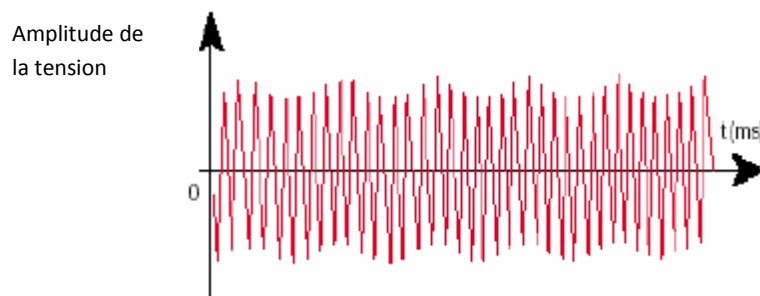
### I .2.4. Composante lente des variations de tension

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).

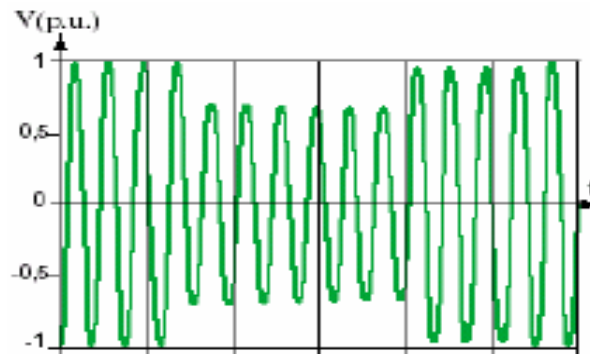


Figure 1.3. Creux de tension

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 ...)[5].

### 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 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. [5]

### 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.

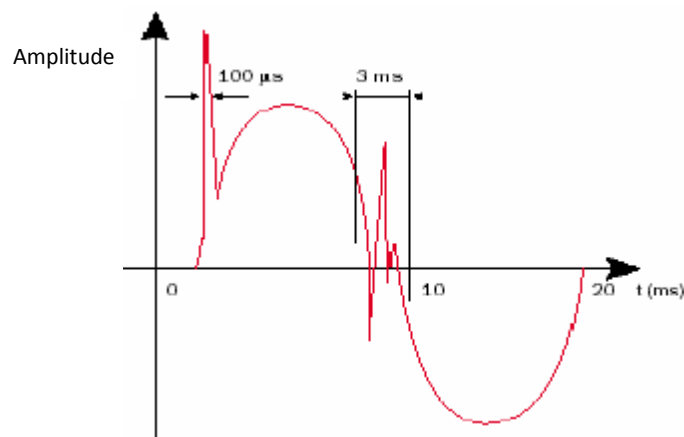


Figure 1.4. Exemple de cas de surtensions transitoires

### 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 trios tensions ne sont pas égaux en amplitude et/ou ne sont pas déphasées les unes des autres de  $120^\circ$ .

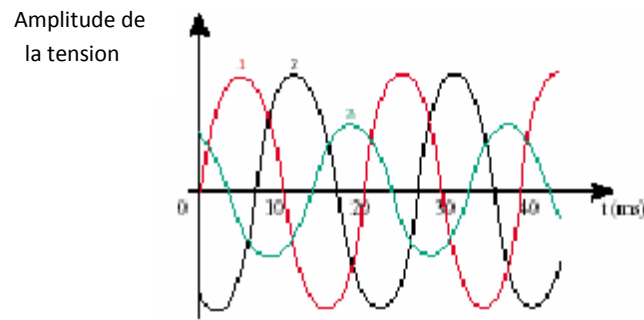


Figure 1.5. Déséquilibre de tension

### 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).

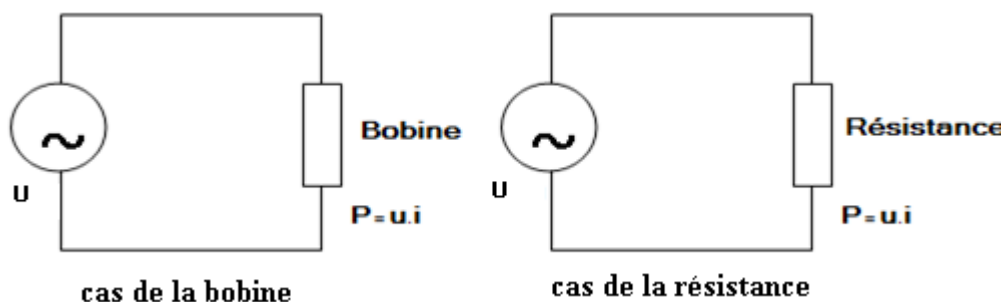


Figure 1.6. Principe de la puissance active et réactive

#### 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 ce résume dans les points suivants:

- a) La chute de tension dans les lignes et les postes de transformation.
- b) Les pertes supplémentaires actives dans les lignes, les transformateurs et les générateurs.
- c) Les variations de tension du réseau sont étroitement liées à la fluctuation de la puissance réactive dans le système de production. [6]

### I.3.2. Le facteur de puissance

C'est le quotient de la puissance active consommée et de la puissance apparente fournie.

$$F = \frac{P(W)}{S(VA)} = \cos \varphi \quad (\text{I-1})$$

Le  $\cos \varphi$  est le facteur de puissance qui est fondamental et ne prend pas en compte la puissance véhiculée par les harmoniques.

- Un facteur de puissance proche de 1 indique une faible consommation d'énergie réactive et optimise le fonctionnement d'une installation. Il permet d'identifier facilement les appareils plus ou moins consommateur de puissance réactive.
- Un facteur de puissance égale à 1 ne conduira à aucune consommation de la puissance réactive (résistive pure).
- Un facteur de puissance inférieur à 1 conduira à consommation de la puissance réactive d'autant plus importante qu'il se rapproche de 0 (inductive pure).

Dans une installation électrique, le facteur de puissance pourra être différent d'un atelier à un autre, selon les appareils installés et la manière dont ils sont utilisés (fonctionnement à vide, pleine charge...).

### I.3.3. Les représentations graphiques

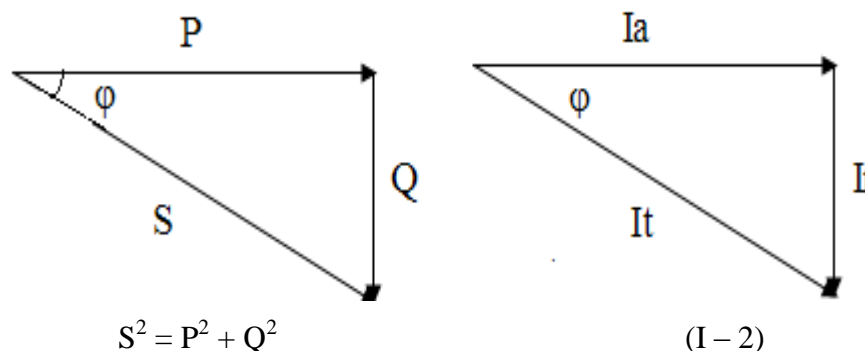


Figure 1.7. représentations graphiques

### I.3.4. La tangente

Certains facteurs d'électricité (abonnés tarif vert) indiquent la valeur de  $\text{tg } \varphi$  qui correspond à l'énergie réactive que le distributeur doit fournir une puissance active donnée.

$$\text{tg } \varphi = \frac{\text{énergie réactive}}{\text{énergie active}} = \frac{Q(VAR)}{P(W)} \quad (\text{I-3})$$

### I.3.5. Bilan de la puissance réactive

L'expression suivante nous donne le bilan énergétique :

$$\sum_{i=1}^n Qi(t) = \sum_{i=1}^n Qgi(t) + \sum_{i=1}^n Qsi(t) - \sum_{j=1}^m \Delta Qj(t) \quad (\text{I-4})$$



Avec :

$N$  : le nombre des nœuds du réseau

$M$  : le nombre des éléments du réseau

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

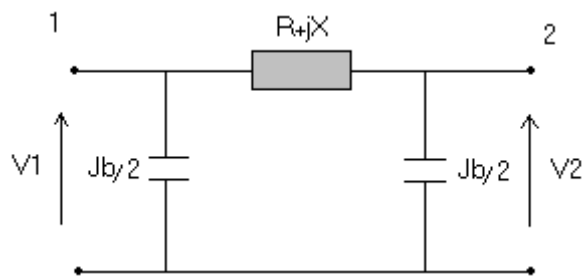
$Q_{gi}(t)$  : la puissance réactive produite par les générateurs de nœud «  $i$  »

$Q_{si}(t)$  : la puissance réactive générée par les sources reliées au nœud «  $i$  »

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

**I .3.6. 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  $\theta$ . 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  $\pi$  symétrique tel que ( $i=1, k=2$ )



**Figure 1.8.** Circuit équivalent en  $\pi$  d'une ligne électrique

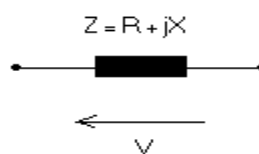
Les lignes sont normalement spécifiées par :

- 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  $j B=j \text{ } \omega$  ou  $B$  représente la susceptant 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  $\theta = 0$ ). [6]

**a ) Impédances séries**



**Figure 1.9.** Impédance série d'une ligne électrique

Les pertes dans les impédances série sont donnés par:

$$S = V \cdot I^* \quad (\text{I-5})$$

$$V = Z \cdot I \text{ c'est-à-dire que } S = ZI \cdot I^* = Z (I_r + j I_i) (I_r - j I_i) \quad (\text{I-6})$$

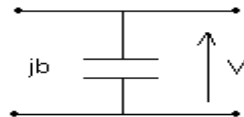
$$S = P + j Q = Z (I_r^2 + I_i^2) = Z |I|^2 \quad (\text{I-7})$$

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 1.10.** Susceptance shunt d'une ligne électrique

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

$$V = V_r + j V_i \quad (\text{I-8})$$

$$I = j B V = j B (V_r + j V_i) = -B V_i + j B V_r \quad (\text{I-9})$$

$$I^* = -B V_i - j B V_r = -B (V_i + j V_r) \quad (\text{I-10})$$

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

$$S = VI^* = (V_r + j V_i) (-B (V_i + j V_r)) = -B (V_r + j V_i) (V_i + j V_r) \quad (\text{I-11})$$

$$S = -jB (V_r^2 + V_i^2) = -jB |V|^2 \quad (\text{I-12})$$

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.3.7. Les contrôles dans le problème tension / puissance réactive

Un système est dit bien conçu s'il peut délivrer une énergie d'alimentation fiable et de bonne qualité par bonne qualité on entend un niveau de tension dans des limites acceptables.

Chaque fois que le niveau de tension en un point du système est soumis à des variations cela est du à un déséquilibre entre la puissance fournie et consommée.

En effet quand une charge est alimentée à travers une ligne de transmission dont la tension de départ est constante, la tension de la charge dépend de l'amplitude de la charge et du facteur de puissance de la charge. La variation de tension en un nœud est un indicateur de déséquilibre entre la puissance réactive délivrée et celle consommée cependant une importation de la puissance réactive donne une augmentation des pertes de puissances et de la chute de tension à travers l'impédance d'alimentation.

## a) Chute de tension sur une ligne

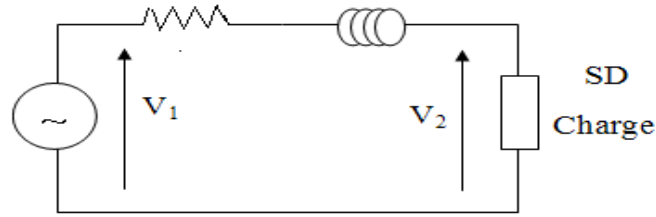


Figure 1.11. Circuit équivalent du réseau électrique.

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

$$Z = R + j X \text{ est } \Delta V = ZI = V_1 - V_2 \quad (\text{I-13})$$

Si nous traçons le diagramme vectoriel de ce circuit.

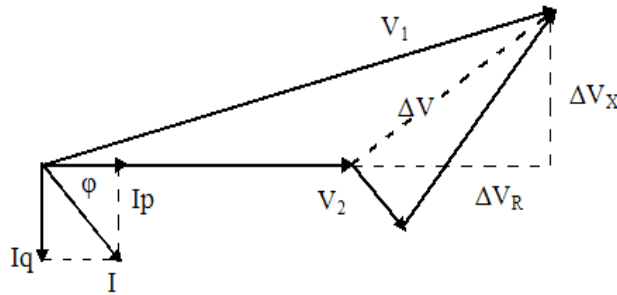


Figure 1.12. Diagramme vectoriel associé au circuit précédent.

$V_2$  étant pris comme référence

$$S_D = V_2 \cdot I = P_D + j Q_D \quad (\text{I-14})$$

$$I = (P_D - j Q_D) / V_2 \quad (\text{I-15})$$

$$\Delta V = ZI = (R + j X) (P_D - j Q_D) / V_2 \quad (\text{I-16})$$

$$\Delta V = (R \cdot P_D + X \cdot Q_D) / V_2 + j (X \cdot P_D - R \cdot Q_D) / V_2 \quad (\text{I-17})$$

$$\Delta V = \Delta V_R + j \Delta V_X \quad (\text{I-18})$$

C'est-à-dire que la chute de tension a une composante  $\Delta V_R$  en phase avec  $V_2$  et une composante  $\Delta V_X$  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  $V_1$ .

$$|V_1|^2 = (V_2 + \Delta V_R)^2 + (\Delta V_X)^2 \quad (\text{I-19})$$

$$|V_1|^2 = \left( V_2 + \frac{R P_D + X Q_D}{V_2} \right)^2 + \left( \frac{X P_D - R Q_D}{V_2} \right)^2 \quad (\text{I-20})$$

Comme  $\Delta V_X < (V_2 + \Delta V_R)$  on peut approximer

$$|V1|^2 = \left( V_2 + \frac{RP_D + XQ_D}{V_2} \right)^2 \quad (I-21)$$

$$V1 - V2 = \left( \frac{RP_D + XQ_D}{V_2} \right) \quad (I-22)$$

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

$$\Delta V = V1 - V2 \approx \frac{XQ_D}{V_2} \quad (I-23)$$

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  $V2$  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 :

$$\Delta V = V1 - V2 = \frac{RP + XQ}{V_2} \approx \frac{XQ_D}{V_2} \quad (I.24)$$

L'examen de cette équation montre que pour maintenir  $V2$  constante au niveau du consommateur. On dispose de plusieurs solutions à savoir :

- Augmentation de la tension de départ  $V1$ .
- 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 obtenue soit par :

- la connexion de capacité shunts
- la connexion de compensateur synchrone
- la connexion de réactance shunt (pour les faibles charges, ou charges capacitatives) [6]

### I.3.8. 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[7] :

- 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.
- **I .3.8.1. 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 .3.8.2. 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 leurs 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 .3.8.3. 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 HTet THT.
- b) Des batteries de condensateurs MT, raccordées aux jeux de barres MT des postes HT/MTou 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 .3.8.4. 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 surtensions dans le réseau.

### I .3.8.5. 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 .3.8.6. 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. [4]

## Chapitre II

# Méthodes de calcul de la puissance réactive dans les réseaux électriques

---

### II.1. Introduction

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 précision 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). [8]

## II.2. Modélisation du réseau électrique

### II.2.1. Introduction

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

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

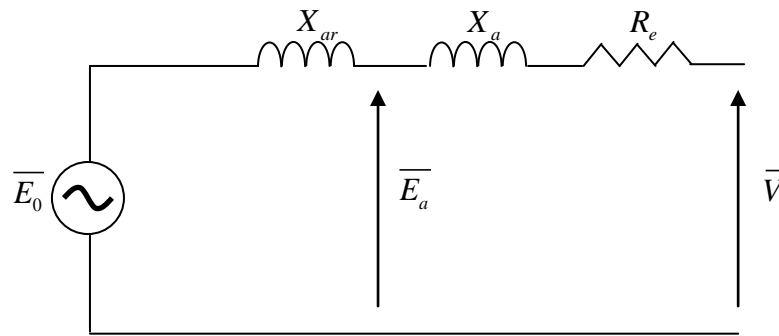
Vu la complexité d'un réseau d'énergie électrique, il faut simplifier leur représentation pour établir des modèles ou schéma équivalent des principaux composant à savoir, des générateurs, les différents types de transformateurs, des lignes et des charges.

### II.2.2. Modélisation des générateurs

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

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

Le schéma équivalent est représenté par la figure (2.1).



**Figure 2.1.** Le modèle d'une génératrice

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



**Figure 2.2.** Une source de tension.

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

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

$E_0$  : La *f.e.m* à vide.

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

$V$  : tension de sortie.

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

$X_a$  : Réactance de fuite.

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

$R_e$  : Résistance d'enroulement.

### II.2.3. Modélisation d'une charge

Une charge peut être modélisée par une impédance qui consomme une quantité constante de puissance active et réactive (Figures2.3).



Figure 2.3. Modélisation d'une charge.

**II.2.4. Modélisation d'une compensation shunt**

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

**II.2.5. Modélisation de ligne longue [6]**

Une ligne peut être considérée comme une série de circuit à constantes répartie uniformément sur toute sa longueur. Ces circuits sont composés d'une infinité d'élément identique constitué, d'une inductance linéique, et d'une résistance linéique, dans le sens longitudinal, qui donnent naissance à de chutes de tension. Une conductance linéique et une capacité linéique dans le sens transversale. Le schéma équivalent en  $\Pi$  est représenté par la figure (2.4).

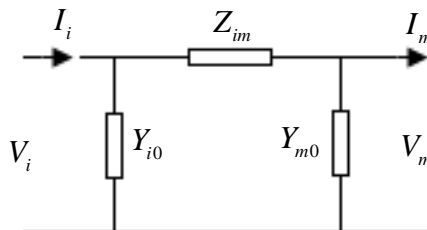


Figure 2.4. modélisation d'une ligne longue

Généralement toute ligne longue se caractérisée par les équations suivantes :

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

Avec les conditions suivantes :

$$\begin{aligned} V(X = 0) &= V_i \\ I(X = 0) &= I_i \end{aligned}$$

Où :  $Z$  (Impédance caractéristique de la ligne ( $\Omega$ ))

$$\gamma = \sqrt{Z \cdot Y} \quad (\text{Constante de propagation})$$

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

Pour  $X = L$  on a

$$V(X = L) = V_m = V_i \cosh(\gamma.L) - I_i \cdot Z_c \cdot \sinh(\gamma.L) \tag{II-2}$$

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

Les équations (II-2), (II-3) nous donne :





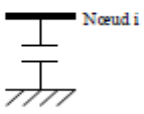
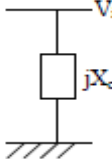
$$\begin{aligned} \cosh(\gamma.L) &= 1 + Z_{im} \cdot Y_{i0} = 1 + Z_{im} \cdot Y_{m0} \\ \frac{\sinh(\gamma.L)}{Z_c} &= Y_{i0} + Y_{m0} + Z_{im} \cdot Y_{m0} \cdot Y_{i0} \end{aligned} \tag{II-4}$$

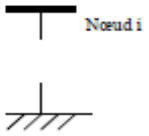
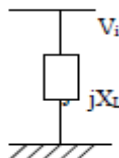
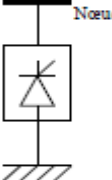
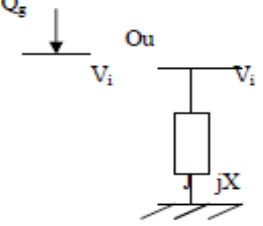

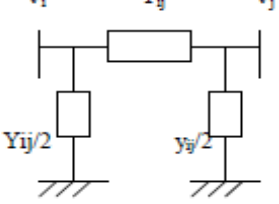
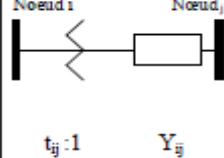
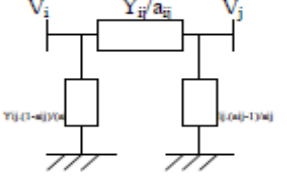


D'où en tire

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

Finalement en a les expressions de l'impédance série  $Z_{im}$  et de l'admittance transversale ( $Y_{i0} = Y_{m0}$ ) de la ligne de schéma équivalent en II représenté sur la figure (2.4).

**Tableau 2.1 :** Tableau Racap pour la Modélisation des paramètres du réseau.

Composants	Symbole	Représentation	Observation
Générateurs	 Nœud i	$P_{\bar{g}}, Q_{\bar{g}}$ 	Puissances active et réactives générées.
Compensateurs Synchrones	 Nœud i	$P_{\bar{g}}=0, Q_{\bar{g}}$ 	Puissance réactive générée.
Capacités shunts	 Nœud i		Considérées comme impédance capacitive constante au nœud i, où comme puissance réactive injectée.

Self shunt ( reactance)			Considérée comme impédance inductive constante ou comme puissance réactive injectée.
Compensateurs statiques (SVC).			La puissance réactive des compensateurs statiques (SVC), peut être calculée, à tension fixe au nœud i.
Lignes du réseau			
Transformateur avec régleur en charge (taps)			
La charge			Les puissances active et réactive, sont fixes.

II.2.6. Classification des nœuds des réseaux électrique [10]

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

- **Nœuds P-V.** Pour ce type de nœuds, on associe les centrales de production. On spécifie la puissance active et le module de la tension. Les variables à déterminer sont la phase de la tension et la puissance réactive.
- **Nœuds P-Q.** Pour ce type de nœuds, on associe généralement les charges. Ces dernières sont caractérisées par la consommation des puissances active et réactive. On

peut aussi associer des générateurs avec des puissances active et réactive fixées. Les variables à déterminer sont le module et la phase de la tension.

- **Nœuds V-q.** Pour ce type de nœud on associe la centrale de production la plus puissante. Dans un nœud k (nœud de référence ou slack bus), on spécifie la phase et le module de la tension. Les valeurs à déterminer sont les puissances active et réactive.

### II.3. Les équations de l'écoulement de puissance [9]

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

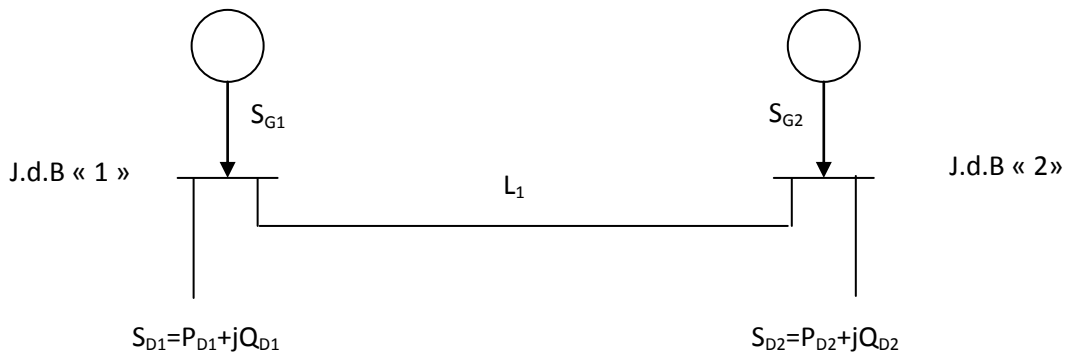


Figure 2.5. système a deux J.d.B

On note que:

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

Et en générale :

$$S_i = S_{Gi} - S \quad \text{(II-7)}$$

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

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

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

Au niveau de J.d.B « 1 »

$$I_1 = y_p \cdot V_1 + y_s (V_1 - V_2) = (y_p + y_s) V_1 - y_s V_2 \quad \text{(II-10)}$$

On sait que :

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

Au niveau de J.d.B « 2 »

$$I_2 = y_p \cdot V_2 + y_s (V_2 - V_1) = (y_p + y_s) V_2 - y_s V_1 \tag{II-12}$$

Avec :

$$S_2 = V_2 \cdot I_2^* \Rightarrow I_2 = \frac{S_2^*}{V_2^*} \tag{II-13}$$

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

$$I_1 = Y_{11} \cdot V_1 + Y_{12} \cdot V_2 \tag{II-14}$$

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

Avec

$$Y_{11} = y_p + y_s \quad , \quad Y_{22} = y_p + y_s$$

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

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \tag{II-15}$$

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

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \tag{II-16}$$

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

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

.

.

.

.

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

La matrice admittance est donc :

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

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

### II.3 .1. Calcul de la puissance au niveau de nœud

On a :

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

Alors :

$$S_i^* = P_i - jQ_i = V_i^* \cdot I_i \quad (\text{II-19})$$

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

En coordonnées polaires :

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

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

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

Donc :

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



### II.3.2. Les équations d'écoulement dans les lignes [9]

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

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

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

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

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

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

La puissance écoule, active et réactive, est :

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

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

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

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

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

### II.3.3. Les pertes de puissance dans lignes [11]

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

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

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

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

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

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

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

$$\begin{aligned} P_{Lij} &= P_{ij} + P_{ji} \\ Q_{Lij} &= Q_{ij} + Q_{ji} \end{aligned} \quad (\text{II-31})$$

### II.3.4. Facteur de puissance

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

## II.4. Classification des variables d'équations d'écoulement de puissance [13]

### II.4.1. Les variables de perturbation

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

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

### II.4.2. Les variables d'état

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

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

### II.4.3. Les variables de contrôle

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

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

Le tableau ci-dessous représente la classification des nœuds.

Type de J.d.B	Les variables connues						Les variables inconnues			
	$P_D$	$Q_D$	$P_G$	$Q_G$	$ V $	$\delta$	$P_G$	$Q_G$	$ V $	$\delta$
J.d.B de référence	•	•			•	•	•	•		
J.d.B de charge	•	•	•	•					•	•
J.d.B de contrôle	•	•	•		•			•		•

Tableau 2.2. Classification des variables

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

1% J.d.B de référence.

80% à 90% J.d.B de charge.

Le reste J.d.B sont de contrôle.

## II.5. Les méthodes numériques utilisées

### II.5.1. Introduction

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

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

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

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

### II.5.2. La méthode itérative de GAUSS-SEIDEL [12]

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

#### Principe :

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

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

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

On estime une valeur initiale  $x^0$

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

Où  $k$  : numéro d'itération

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

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

Pour un système de  $n$  équations :

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

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

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

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

$$\left\{ \begin{array}{l} x^1 = g(x^0) \\ x^2 = g(x^1) \\ \cdot \\ \cdot \\ x^{k+1} = g(x^k) \end{array} \right. \quad (\text{II-39})$$

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

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

### II.5.3. La méthode de Newton-Raphson [11]

#### II.5.3.1. Principe

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

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

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

On aura l'équation :

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

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

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

En générale :

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

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

**II.5.3.2. Résolution d'un système d'équation a (( n )) variables non linéaire[11]**

Considérons un système d'équations en générale non linéaire.

$$\begin{cases} f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \\ f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \\ \dots\dots\dots \\ \dots\dots\dots \\ f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \end{cases} \tag{II-45}$$

On pose

$$x = \begin{pmatrix} x_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ x_n \end{pmatrix} \quad \text{et} \quad f = \begin{pmatrix} f_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ f_n \end{pmatrix} \tag{II-46}$$

Le système (II-1) peut donc s'écrire sous une forme :

$$f(x) = 0 \tag{II-47}$$

La solution exacte de (II-18) pourra alors se mettre sous la forme :

$$x = x^{(0)} + \Delta x^{(0)} \tag{II-48}$$

$$x^{(0)} = (x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}) \tag{II-49}$$

$$\Delta x^{(0)} = (\Delta x_1^{(0)}, \Delta x_2^{(0)}, \dots, \Delta x_n^{(0)}) \tag{II-50}$$

Au portant l'expression (II-48) dans (II-47), on aura :

$$f(x^{(0)} + \Delta x^{(0)}) = 0 \tag{II-51}$$

Supposons que  $f(x)$  soit continûment dérivable dans un certain domaine qui contient  $x$  et  $x^{(0)}$  et décomposons le premier membre de l'équation (II-51) par rapport aux puissances de petit vecteur  $\Delta x^{(0)}$ , en nous bornons aux termes linéaires

$$f(x^{(0)} + \Delta x^{(0)}) = f(x^{(0)}) + f'(x^{(0)}) \cdot \Delta x^{(0)} = 0 \tag{II-52}$$

Où, sous une forme développée :

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

Où  $f(x) = f(x_1 + \Delta x_1, x_2 + \Delta x_2, \dots, x_n + \Delta x_n)$  (II-54)

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

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

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

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

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

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

Par conséquent :

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

En générale :

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

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

### II.5.3.3. Critère d'arrêts des itérations

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

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

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

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

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

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

## II.6. Les méthodes numériques appliquées aux équations de l'écoulement de puissance

### II.6.1. la méthode de Gauss Seidel appliquée aux équations de l'écoulement de puissance

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

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

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

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

$$V_i^{k+1} = \frac{1}{Y_{ii}} \left[ \frac{P_i - jQ_i}{(V_i^k)^*} - \sum_{j=1}^{i-1} Y_{ij} \cdot V_j^{k+1} - \sum_{j=i}^n Y_{ij} \cdot V_j \right] \quad (\text{II-61})$$

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



$$\max |V_i^{k+1} - V_i^k| \leq \varepsilon \tag{II-62}$$

**II-6-2 la méthode de Newton-Raphson appliqué aux équations de l'écoulement de puissance :**

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

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

Où

$i = 1$  : J.d.B de référence

$n$  : Nombre de J.d.B

$i$  : Numéro de J.d.B

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

$$\left. \begin{aligned} P_i &= F_{ip}^{(0)} + \left(\frac{\partial F_{ip}}{\partial \delta_2}\right)^{(0)} \Delta \delta_2^{(0)} + \dots + \left(\frac{\partial F_{ip}}{\partial \delta_n}\right)^{(0)} \Delta \delta_n^{(0)} + \left(\frac{\partial F_{ip}}{\partial |V_2|}\right)^{(0)} \Delta V_2^{(0)} \\ Q_i &= F_{iq}^{(0)} + \left(\frac{\partial F_{iq}}{\partial \delta_2}\right)^{(0)} \Delta \delta_2^{(0)} + \dots + \left(\frac{\partial F_{iq}}{\partial \delta_n}\right)^{(0)} \Delta \delta_n^{(0)} + \left(\frac{\partial F_{iq}}{\partial |V_2|}\right)^{(0)} \Delta V_2^{(0)} \end{aligned} \right\} \tag{II64}$$

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

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

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

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

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

Donc on peut écrire le système comme suit :

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

On rappelle que :

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

$$i \neq 1(\text{ref}), i \neq 2(\text{cont}) \quad (\text{II-69})$$

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

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

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

D'une manière générale

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

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

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

### II.6.2.1. Détermination des sous matrices de la Jacobienne J

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

**Sous matrice J<sub>1</sub>:**

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

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

**Sous matrice J<sub>2</sub>:**

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

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

**Sous matrice J<sub>3</sub>:**

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

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

**Sous matrice J<sub>4</sub>:**

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

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

### II.6.2.2. Les étapes de calcul

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

On obtient :

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

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

### II.6.2.3. Les approximations dans la méthode de Newton-Raphson

Pour une petite variation dans le module de la tension au J.d.B, la puissance active au J.d.B ne varie pas d'une façon appréciable. Même aussi pour une petite variation de l'angle de phase de la tension au J.d.B, la puissance réactive ne subit pas une variation appréciable. Donc on suppose que les éléments  $J_2$  et  $J_3$  de la matrice Jacobienne sont nuls :

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

### II.6.3 Méthode découplée de Newton Raphson [15]

Si, on observe la valeur numérique des éléments du Jacobienne utilisé dans plusieurs systèmes, on découvre que les éléments de  $J_1$  et  $J_4$  sont invariablement beaucoup plus grands que ceux de  $J_2$  et  $J_3$ . Et, en se basant sur les découplés  $P\delta$  et  $QV$ , on peut supposer  $J_2 \approx 0$  et  $J_3 \approx 0$ . A partir de cela, on peut avoir deux systèmes d'équations linéaires indépendantes pour chaque itération. Ce qui réduit l'expression (II-67) :

$$\begin{aligned}\Delta P^k &= J_1^k \cdot \Delta\delta \\ \Delta Q^k &= J_4^k \cdot \Delta|V| \end{aligned} \quad (\text{II-79})$$

## II. 7. Conclusion

L'importance de l'étude de l'écoulement de puissance est capitale pour l'obtention de tous les paramètres du réseau électrique, pour chaque nœud dont ils : Puissance (Active et Réactive) Tension (Module et Angle) Parmi les méthodes de résolution, 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 III

# Etude de la compensation de la puissance réactive

---

### III.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.

### III.2. Exploitation d'un réseau électrique

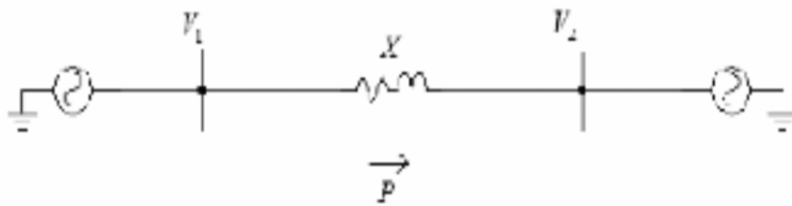


Figure 3.1. Puissance transmise entre deux réseaux

La puissance active  $P$  transmise entre deux réseaux de tensions  $V_1$  et  $V_2$  présentant un angle de transport  $\delta$  (déphasage entre  $V_1$  et  $V_2$ ) et connectés par une liaison d'impédance  $X$  est donnée par l'équation suivante :

$$P = \frac{V_1 \cdot V_2}{X} \cdot \sin \delta \quad (\text{III.1})$$

Il est possible d'augmenter la puissance active transmise entre deux réseaux soit en maintenant la tension des systèmes, soit en augmentant l'angle de transport entre les deux systèmes, soit en réduisant artificiellement l'impédance de la liaison. En jouant sur un ou plusieurs de ces paramètres, les FACTS permettent un contrôle précis des transits de puissance réactive, une optimisation des transits de puissance active sur les installations existantes et une amélioration de la stabilité dynamique du réseau. Ils permettent aussi aux consommateurs industriels de réduire les déséquilibres de charges et de contrôler les fluctuations de tensions créées par des variations rapides de la demande de puissance réactive et ainsi d'augmenter les productions, de réduire les coûts et d'allonger la durée de vie des équipements.[15]

### III.3. Compensation Traditionnelle

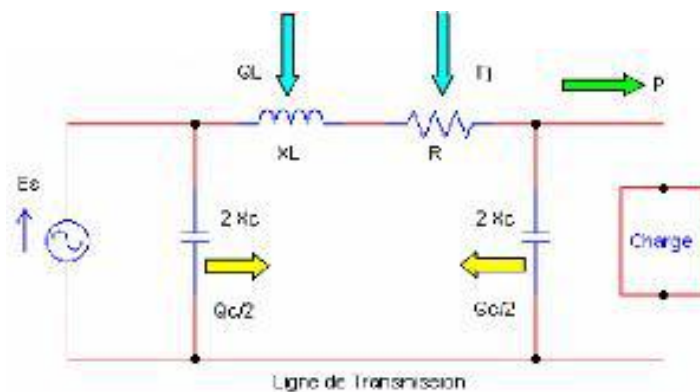
#### III.3.1. Compensation traditionnelle shunt

La compensation parallèle (*shunt*) consiste à enclencher des condensateurs shunt et/ou des disjoncteurs à différents endroits sur le réseau pour modifier l'impédance des lignes, dans le but de maintenir des niveaux de tension acceptables suivant l'état de charge du réseau. Ces éléments permettent de compenser les réseaux en puissance réactive et de maintenir la tension

dans les limites contractuelles. Cette technique de compensation est dite passive car elle fonctionne en tout ou rien. C'est-à-dire qu'elle est soit en service, par exemple lorsqu'une inductance shunt est enclenchée, soit complètement hors service lorsque l'inductance est retirée. Lorsqu'elle est en service, aucune modification des inductances ou des condensateurs n'est effectuée pour essayer de contrôler la tension ou l'écoulement de puissance.

D'après la figure 3.2, on voit que ces équipements permettent aussi d'augmenter la puissance active transmise. La puissance transmise peut être augmentée de 50% pour une compensation au niveau de la charge et de 100% pour une compensation au point milieu.

Une ligne HT peut être modélisée par un schéma en  $\Pi$  représentée par la figure 3.2



**Figure 3.2.** Représentation d'une ligne HT

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

Les batteries de condensateurs vont compenser la puissance réactive absorbée par la charge et ainsi éviter la transmission de puissance réactive sur de longues distances. De même



que les réactances, ces batteries de condensateurs doivent être connectées/déconnectées par des disjoncteurs.

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

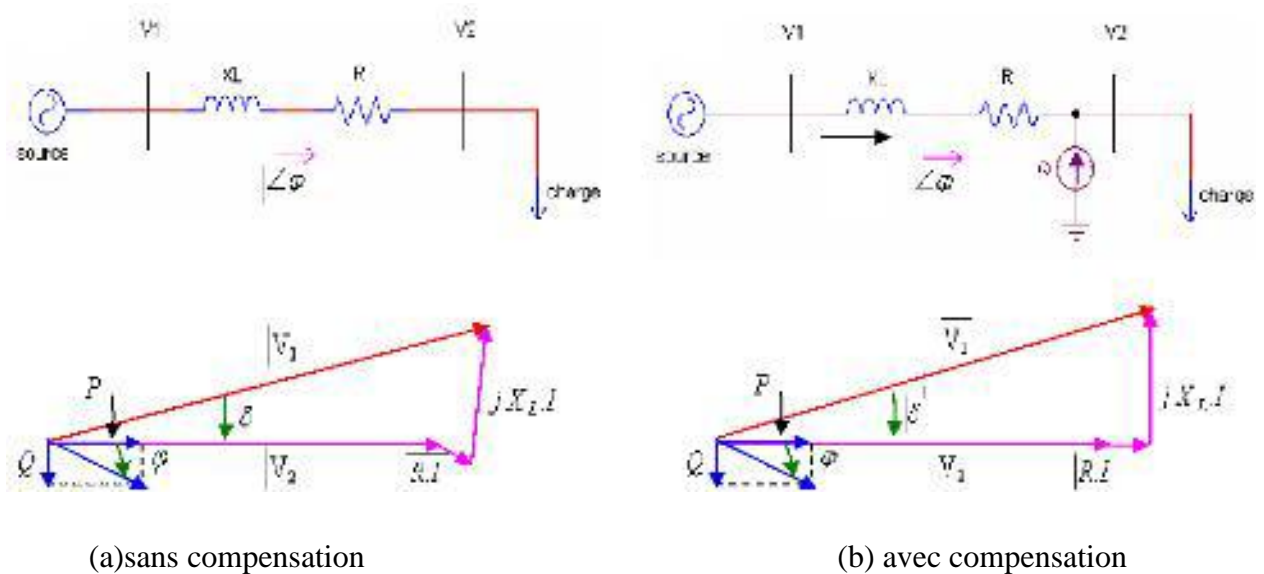
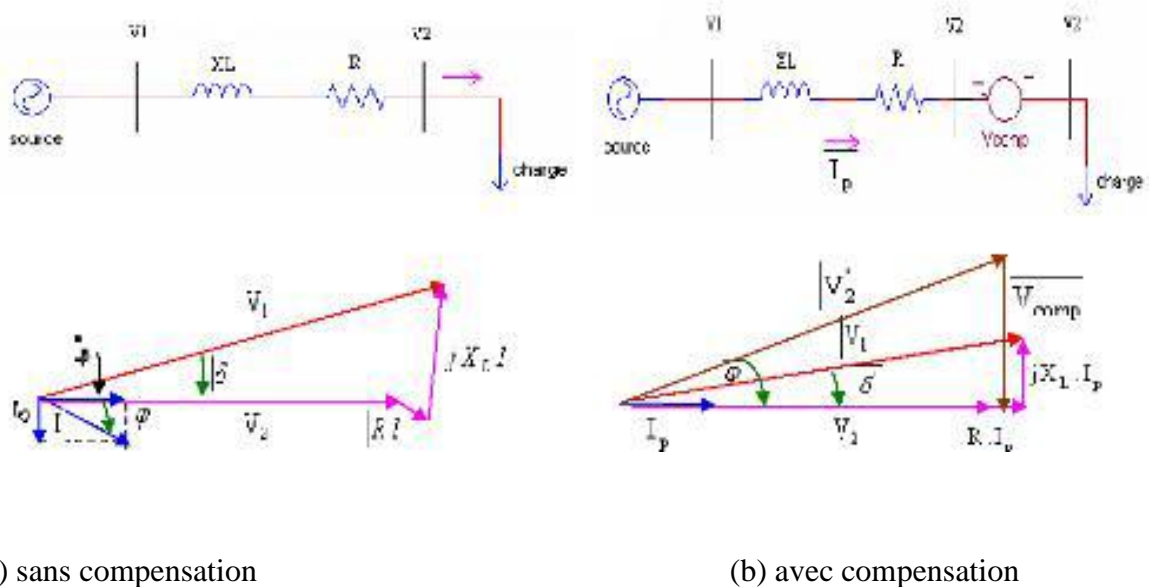


Figure 3.3. Principe de compensation shunt dans un réseau radial

On constate aussi que la longueur électrique de la ligne est également modifiée avec la compensation shunt. La compensation réactive shunt est un bon moyen pour contrôler l'impédance caractéristique, dans le but de maintenir un niveau de tension acceptable sur les lignes de transport d'électricité. Par contre, elle ne constitue pas un bon moyen pour augmenter la puissance maximale transportable. En pratique, la compensation shunt passive est utilisée principalement pour maintenir la tension à toutes les barres du réseau à un niveau proche de la tension nominale, et ce pour les différents niveaux de charge du réseau. Il est clair que les équipements de compensation ne sont pas distribués de façon uniforme le long de la ligne comme le sont les inductances et les condensateurs du circuit équivalent d'une ligne. La compensation est localisée dans des postes qui sont répartis à des endroits stratégiques sur la ligne. Puisque la compensation n'est pas répartie d'une façon uniforme, il est impossible de maintenir la tension à sa valeur nominale en tout point de la ligne. Il est donc important de bien sélectionner les endroits où la compensation shunt est installée pour éviter que la tension s'écarte trop de sa valeur nominale.[04.15]

### III.3.2. Compensation traditionnelle série

L'équation (III.1) montre que la puissance active échangée entre deux systèmes peut être augmentée si l'on réduit l'impédance de la liaison. C'est ce que réalise la compensation série par l'adjonction d'une batterie de condensateurs d'impédance  $X_C$  en série avec la ligne. Les condensateurs ajoutés ont une capacité fixe qui ne varie pas dans le temps. Cette compensation permet d'une part de diminuer  $Z_0$  et d'autre part de diminuer la longueur électrique de la ligne.



**Figure 3.4.** Principe de compensation série dans un réseau radia

Artificiellement l'impédance de la ligne est donc réduite de  $X_L$  à  $(X_L - X_C)$  et le transit de puissance est augmenté. De plus, comme le montre le diagramme de Fresnel illustré sur la figure 3.4. En pratique, la compensation série est localisée dans des postes situés à des endroits stratégiques sur les lignes. Pour mieux comprendre son influence il est utile de considérer qu'elle est répartie uniformément sur toute la longueur de la ligne. Dans ce cas, le degré de compensation série se définit comme étant la valeur absolue du rapport de la Susceptance inductive série de la ligne par unité de longueur sur la Susceptance par unité de longueur de la capacité série qui est ajoutée. Plus le degré de compensation est élevé plus l'impédance virtuelle est faible, ce qui contribue à augmenter la puissance maximale transportable par la ligne. D'autre part, la longueur électrique virtuelle de la ligne s'écrit

Pour transporter la puissance de façon stable il est nécessaire que l'angle de transmission  $\alpha$  soit inférieur à 90 degrés, et idéalement assez faible pour prévoir les cas d'un appel de puissance à la suite d'une perturbation sur le réseau. Si le profil de la tension sur la

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

### III.4. 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.[03]

#### III.4.1. 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.

### III.4.2 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. [16 ]

#### III-4-2.1. 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  $\alpha$  permet de régler l'énergie réactive absorbée par le dispositif. (Figure 3.5)[18]

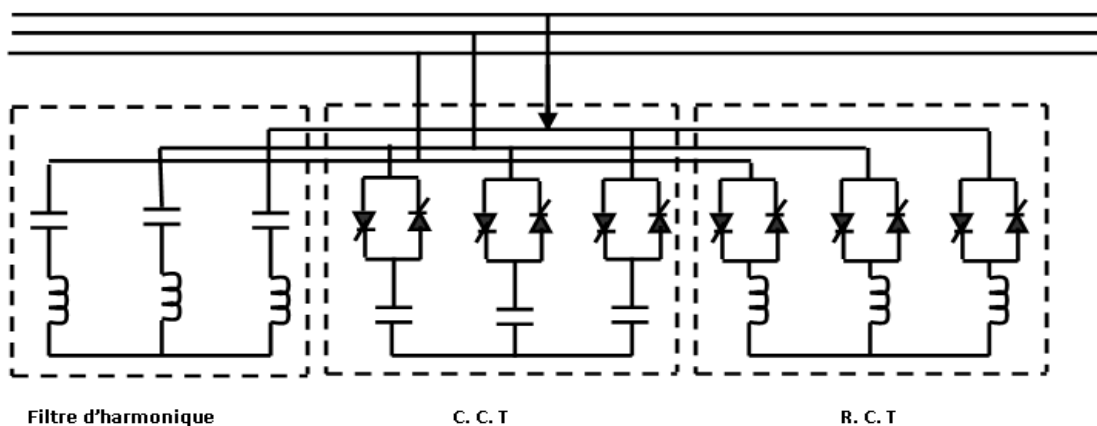


Figure3.5. Schéma du SVC

### b- Principe de fonctionnement

La figure (3.6) 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  $\alpha$  des thyristors pour contrôler le courant dans la réactance alors que le contrôle de la puissance réactive par cette méthode est rapide et d'une façon continu [19]

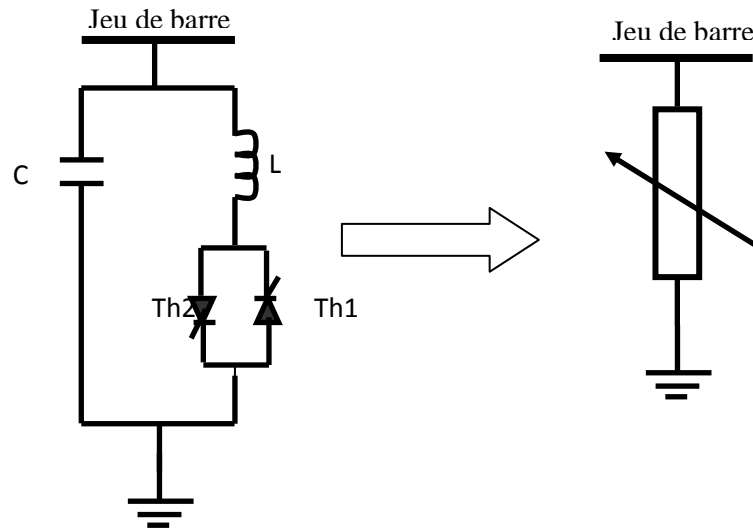


Figure 3.6.présentation d'un Compensateur SVC

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 (3.7) 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.

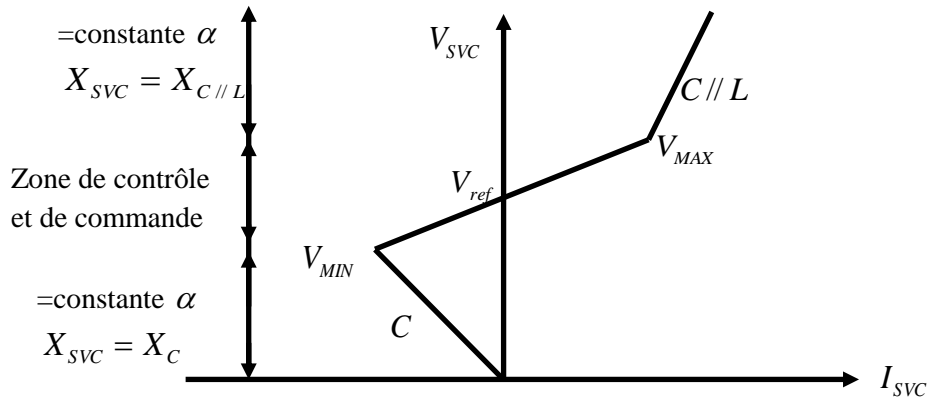


Figure 3.7. Fonctionnement du Compensateur SVC

III.4.2.2. 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 toutefois exempt d'inertie. [18]

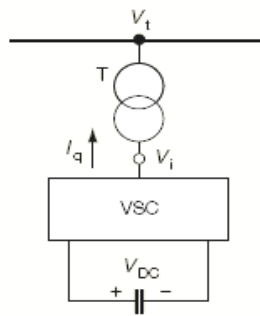


Figure 3.8. Principe d'un compensateur synchrone statique

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:

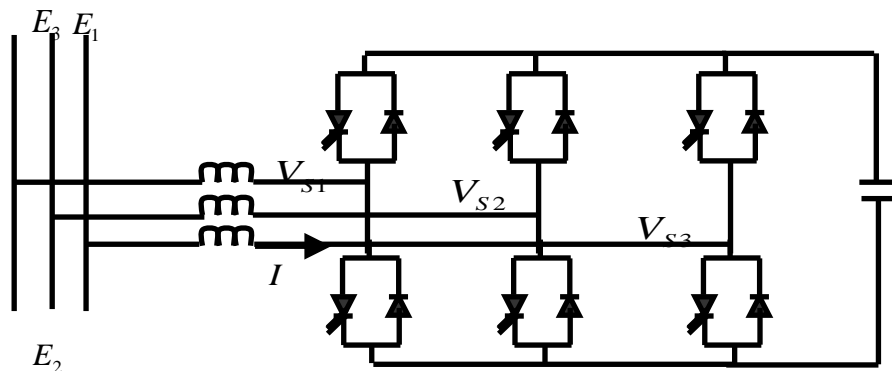
- ASVC (Advanced Static Var Compensator)
- STATCON (Static Condenser)
- SVG (Static Var Generator)
- SVC light
- SVC plus

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.



**Figure3.9.** 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 3.9-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 inductif (Figure 3.9-b).
- Si  $V_s = E$ , le courant circulant dans l'inductance est nul, il n'y a pas d'échange d'énergie.

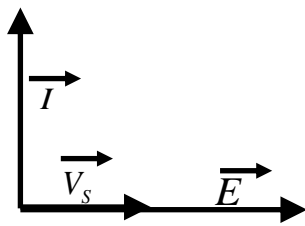


Figure (3.9a). Courant capacitive

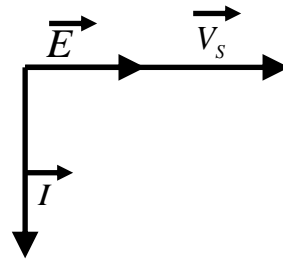


Figure (3.9b). Courant inductive

On considère dans ce fonctionnement que les tensions sont triphasées et équilibrées. 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 échanger 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 (3.10) ce dispositif à l'avantage de pouvoir fournir un courant constant important même lorsque la tension  $E$  diminue, contrairement au SVC [22].

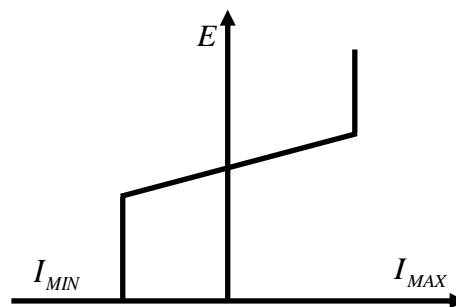


Figure 3.10. Caractéristique statique du STATCOM



### III.4.3. 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.

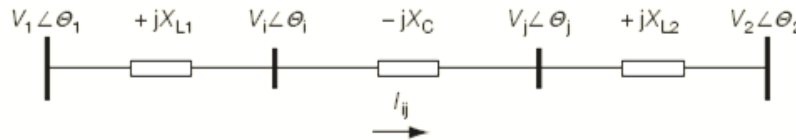


Figure 3.11. Principe de la compensation série

#### III.4.3.1. 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 P1 au niveau P2 plus élevé [19]

### III.4.3.2. Application

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

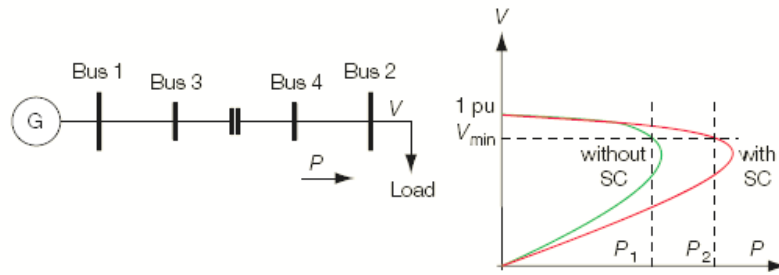


Figure 3.12. Amélioration du profil de tension d'un système de puissance simple

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

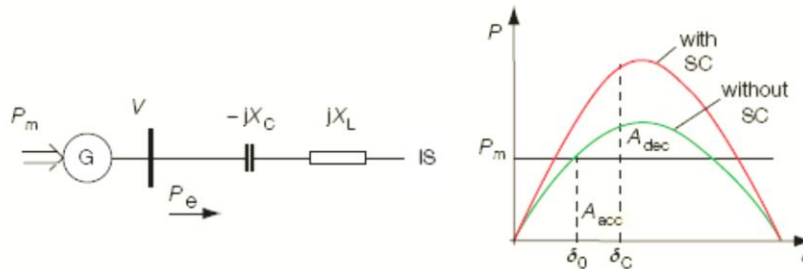


Figure 3.13. Amélioration de la marge stabilité transitoire à l'aide d'un condensateur série

#### c- Commande du flux d'énergie

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

### III.4.3.3. Compensateurs séries à base de thyristor

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

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

### b- Principe de fonctionnement

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

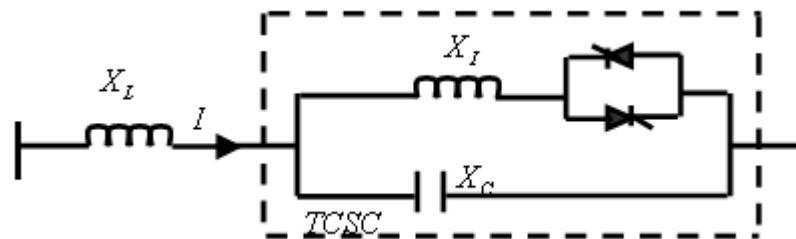


Figure 3.14. Insertion d'un TCSC sur une ligne

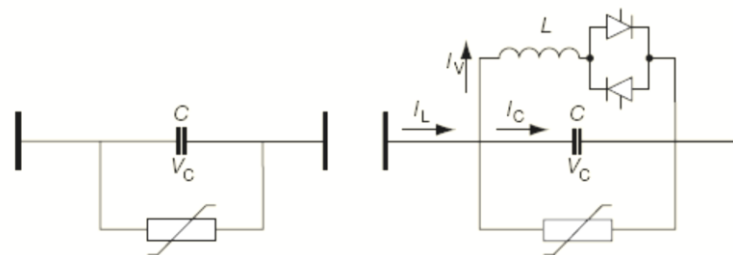


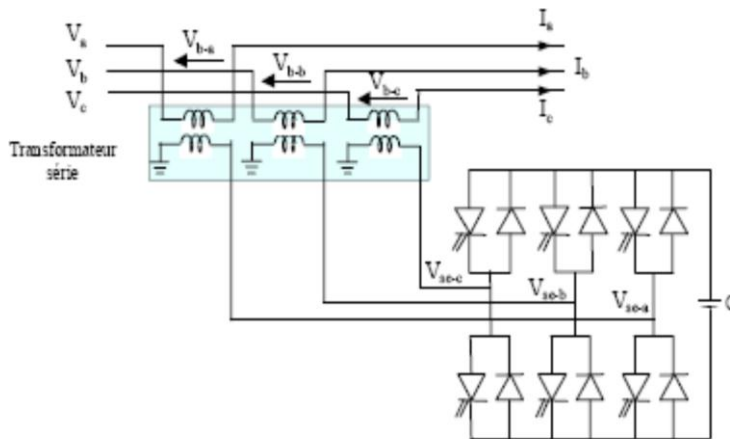
Figure.3.15. Deux schémas de compensations série typiques

avec un condensateur série fixe et un TCSC

### III.4.3.4. 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. 3.16).

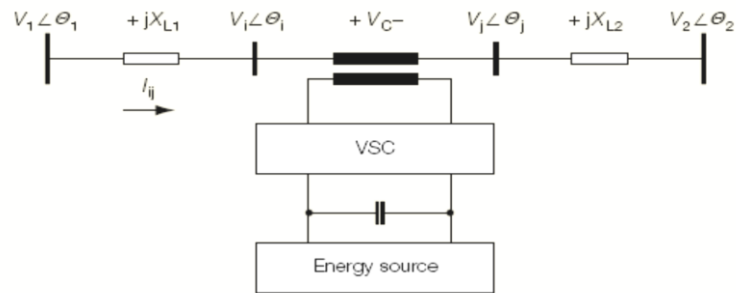


**Figure .3.16.** Schéma de base du SSSC

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) [20].

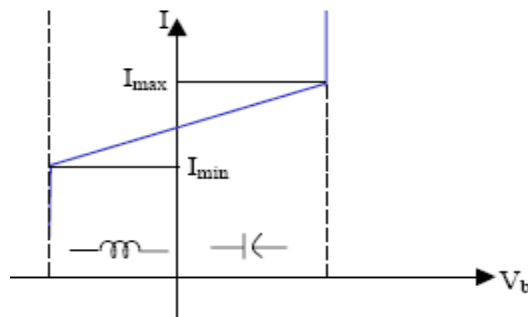
#### b- Principe de fonctionnement

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.[18]



**Figure.3.17.** 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 :

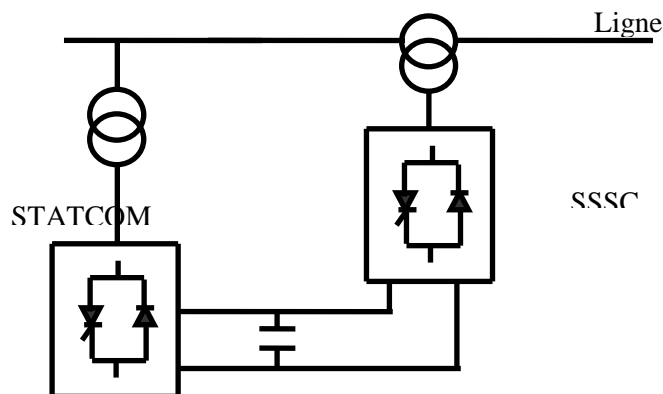


**Figure .3.18.** Caractéristique statique du SSSC

### III.4.4. Compensateurs hybrides série – parallèle

#### III.4.4.1. Contrôleur universelle de l'écoulement de puissance (UPFC)

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

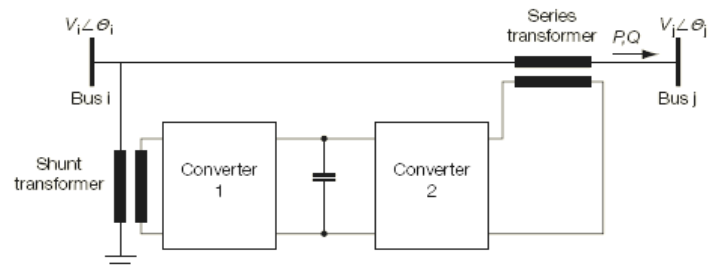


**Figure 3.19.** Compensateur Unifier UPFC (Unified power flow Controller)

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

#### b- Application

Un UPFC peut régler simultanément la puissance active et la puissance réactive. En général, il possède trois variables de commande et peut s'exploiter en différents modes. Le convertisseur branché en dérivation règle la tension du bus i dans et le convertisseur branché en série règle les puissances active et réactive, ou la puissance active et la tension au nœud de branchement série. En principe, un UPFC est capable d'accomplir les fonctions des autres dispositifs FACTS qui ont été décrits, à savoir le réglage de la tension, la répartition du flux d'énergie et l'amélioration de la stabilité. [20]

#### III.4.2.2. 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.[21]

### III.5. Comparaison des FACTS les plus utilisés

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

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	/	++	+++	+++	+++	+++

### III.6. 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.[26]

### III.7. 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 IV

# Étude d'un Compensateur shunt : SVC

### IV.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.

### IV.2. Caractéristique d'un compensateur statique

#### IV.2.1. Caractéristique en V d'un compensateur statique

Ajustons l'angle  $\alpha$  des thyristors commandant la branche inductive à  $90^\circ$ , de façon à obtenir la pleine conduction. Le courant est alors à sa valeur maximal, la droite L//C (figure (4.1)) montre la relation entre la tension U et le courant  $I_{SVC}$ .

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

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

Lorsque l'inductance est débranchée alors l'angle des thyristors est  $180^\circ$  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 (4.1)).

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

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

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 :  $X_C = 2 * X_L$

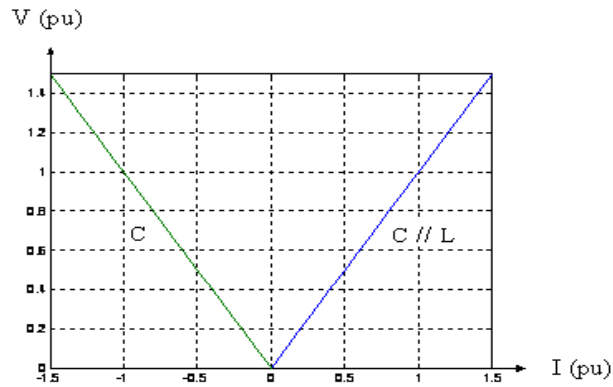


Figure 4.1. la caractéristique en V d'un SVC

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

**IV.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 (4.2). Par conséquent, suivant les exigences imposées par les consommateurs et les lignes de transmission dans une sous-station, la puissance réactive  $Q$  doit varier entre une certaine valeur inductive  $Q_L$  et une certaine valeur capacitive  $Q_C$  avec:  $Q_C = \frac{U^2}{X_C}$  [25].

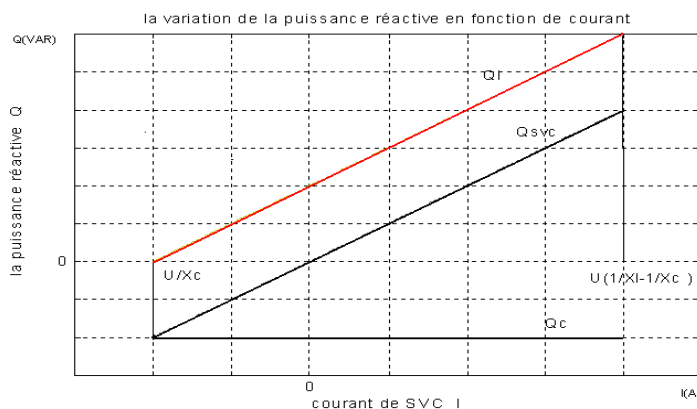


Figure 4.2. Variation de la puissance réactive en fonction du courant

### IV.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]

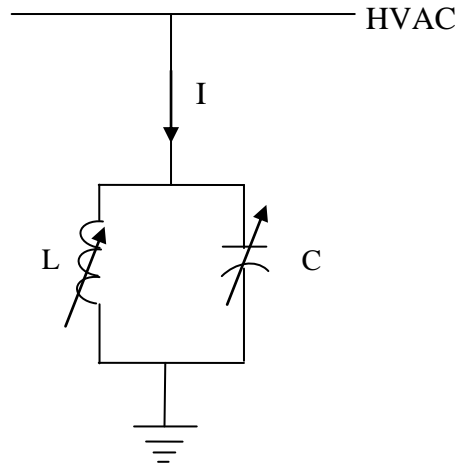


Figure. 4 .3. SVC idéal

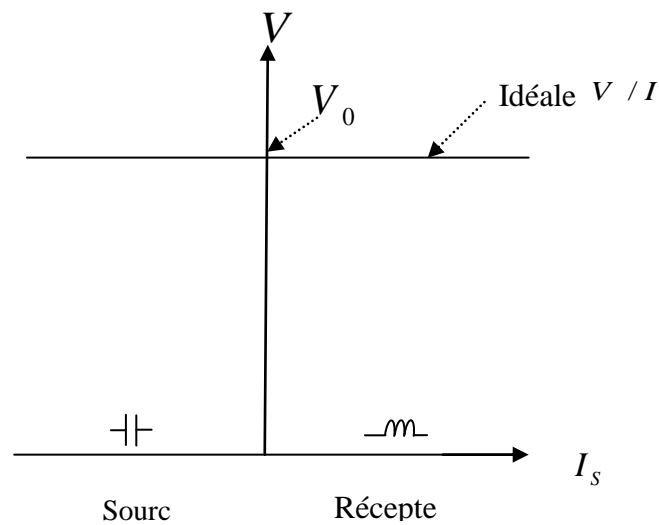


Figure.4.4 . Caractéristiques idéale  $V=f(I_s)$  du

La caractéristique  $V$  en fonction de  $I_s$  est comme suit :

### IV.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 (4.5)

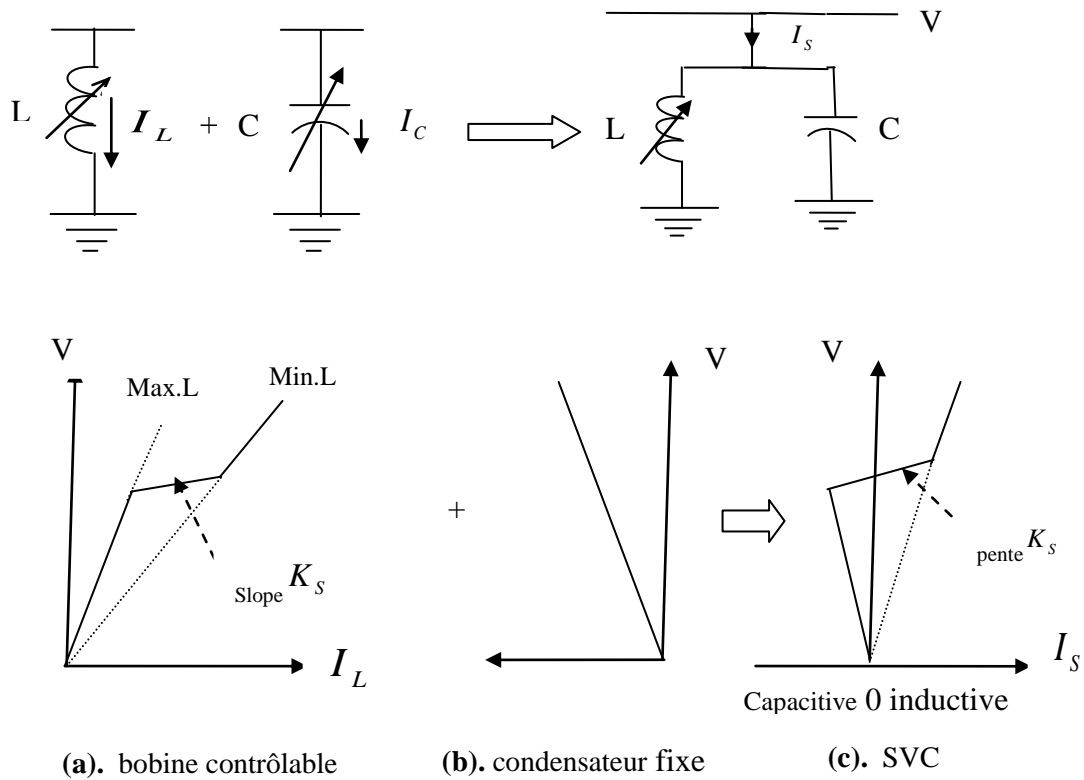


Fig. 4.5. Caractéristiques d'un SVC réel

### IV.3. Système de contrôle d'un SVC

Dans le cas pratique le SVC est caractérisé par une large variation de Q capacitive qui peut être assurée par des banques de condensateur contrôlées par des interrupteurs statiques. En générale les éléments du SVC opérant principalement comme des Susceptance ajustables bien qu'elles soient inductive ou capacitive. Alors le système de contrôle est étudié comme deux systèmes séparés; un pour le contrôle de la bobine (TCR) et l'autre pour contrôle des condensateurs (TSC). [29]

#### IV.3.1. Système de contrôle TCR

Les éléments de base du TCR sont la bobine et l'interrupteur bidirectionnel (thyristors) qui est en série avec elle (figure 4.6.a).

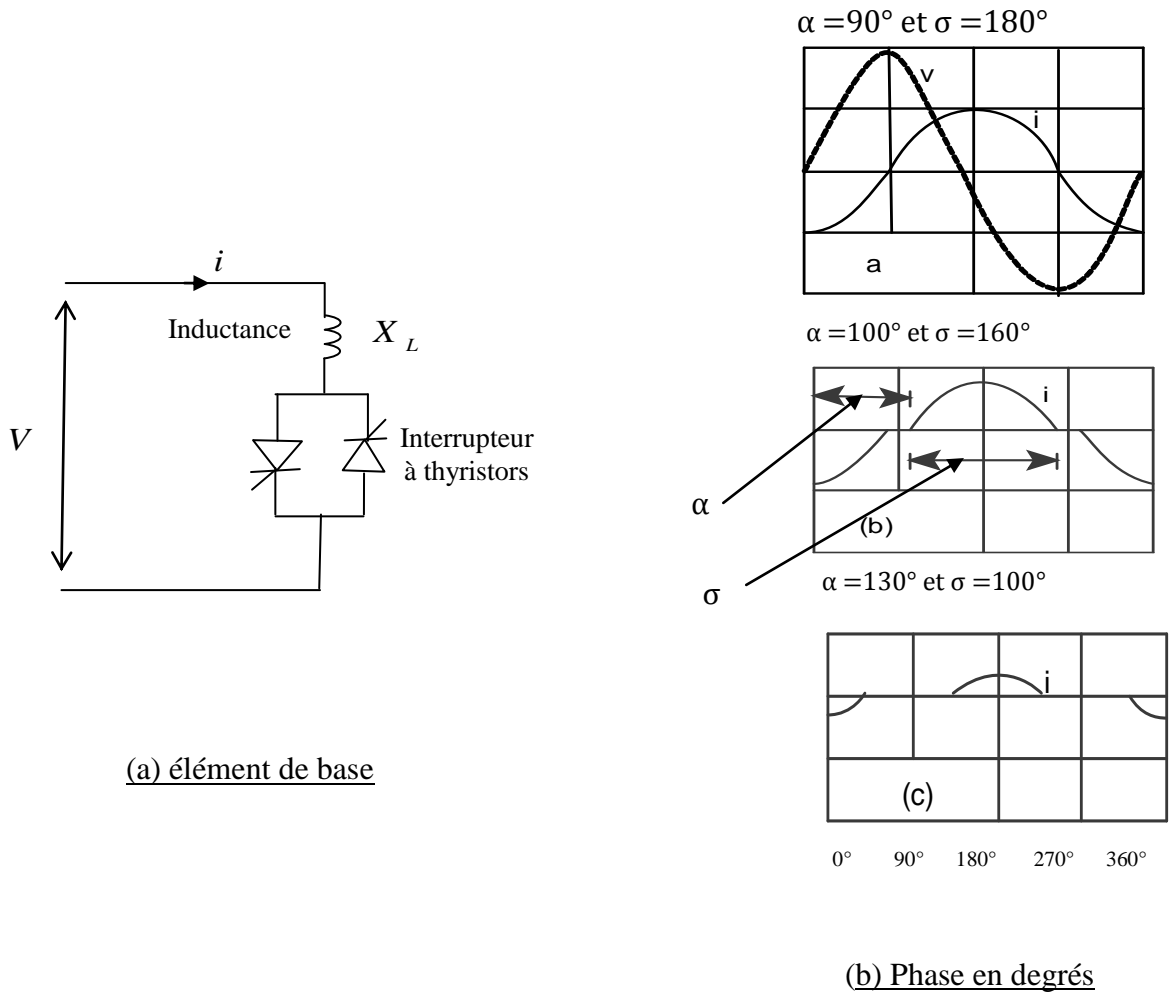


Figure.4.6. Éléments de Base du TCR.

Les thyristors conduisent en alternance des demi-périodes de l'alimentation en dépendance de l'angle d'amorçage  $\alpha$ , qui est mesurée à partir de l'origine de la tension.

La conduction totale est obtenue quand  $\alpha = 90^\circ$ , le courant est essentiellement réactif et sinusoïdal.

La conduction partielle est obtenue quand l'angle  $\alpha$  est entre  $90^\circ$  et  $180^\circ$  comme le montre la figure (4.6-b).

L'angle d'amorçage  $\alpha$  entre  $0^\circ$  et  $90^\circ$  est non souhaitable car il donne naissance à des courants asymétrique avec la composante du courant continu.

On pose  $\sigma$  l'angle de conduction en fonction de  $\alpha$  :

$$\sigma = 2(\pi - \alpha) \tag{IV-5}$$

Le courant instantané est donné par :

$$i = \begin{cases} \frac{\sqrt{2}}{X_L} (\cos(\alpha) - \cos(\omega t)) & \text{pour } (\omega t < (\alpha + \sigma)) \\ 0 & \text{pour } (\alpha + \sigma) < \omega t < \alpha + \tau \end{cases} \quad (\text{IV-6})$$

L'analyse de Fourier des harmoniques de  $i$  donne la composante principale  $I_1$  par :

$$I_1 = \frac{V}{X_L} \cdot \frac{\sigma - \sin\sigma}{\pi} \quad (\text{IV-7})$$

Où  $I_1$  et  $V$  sont les valeurs (RMS) et  $X_L$  est la réactance de la bobine pour la fréquence fondamentale.

Le but de croître  $\alpha$  (décroître  $\sigma$ ) est de réduire la composante fondamentale de  $I_1$ . Ceci est équivalent à croître l'inductance effective du compensateur. Alors pour contrôler la composante fondamentale de  $I_1$ , le TCR doit contrôler la susceptance qui est une fonction de l'angle d'amorçage  $\alpha$ .

$$B(\alpha) = \frac{I_1}{V} = \frac{\sigma - \sin\sigma}{\pi \cdot X_L} = \frac{(2(\pi - \alpha) + \sin(2\alpha))}{\pi \cdot X_L} \quad (\text{IV.8})$$

La valeur maximale de la susceptance effective est obtenue quand on a la conduction totale ( $\alpha=90^\circ, \sigma=180^\circ$ ) et elle est égale à  $1/X_L$ .

La valeur minimale est obtenue avec  $\alpha=180^\circ$  ( $\sigma=0$ ) le principal contrôle de  $B(\alpha)$  est connu sous le nom de contrôle de phase.

Le TCR demande un système de contrôle qui détermine l'instant d'amorçage mesuré à partir du dernier passage de  $V$  par 0 (synchronisation de l'angle d'amorçage)

Dans certains modèles, le système de contrôle répond au signal qui représente la valeur désirée de la susceptance.

Dans d'autres modèles le contrôleur répond à l'erreur du signal comme la variation de  $V$  «  $\Delta V$  », ou aux signaux auxiliaires stabilisants, etc. ...

Le résultat de l'étude de la caractéristique d'état  $V/I$  comme est montrée par la figure (4.7) est décrit par:

$$V = V_{ref} + X_{SL} \cdot I_1 \quad (\text{IV-9})$$

Où  $X_{SL}$  est la pente de la caractéristique (la variation de la réactance déterminée par le gain du système de contrôle) [25]

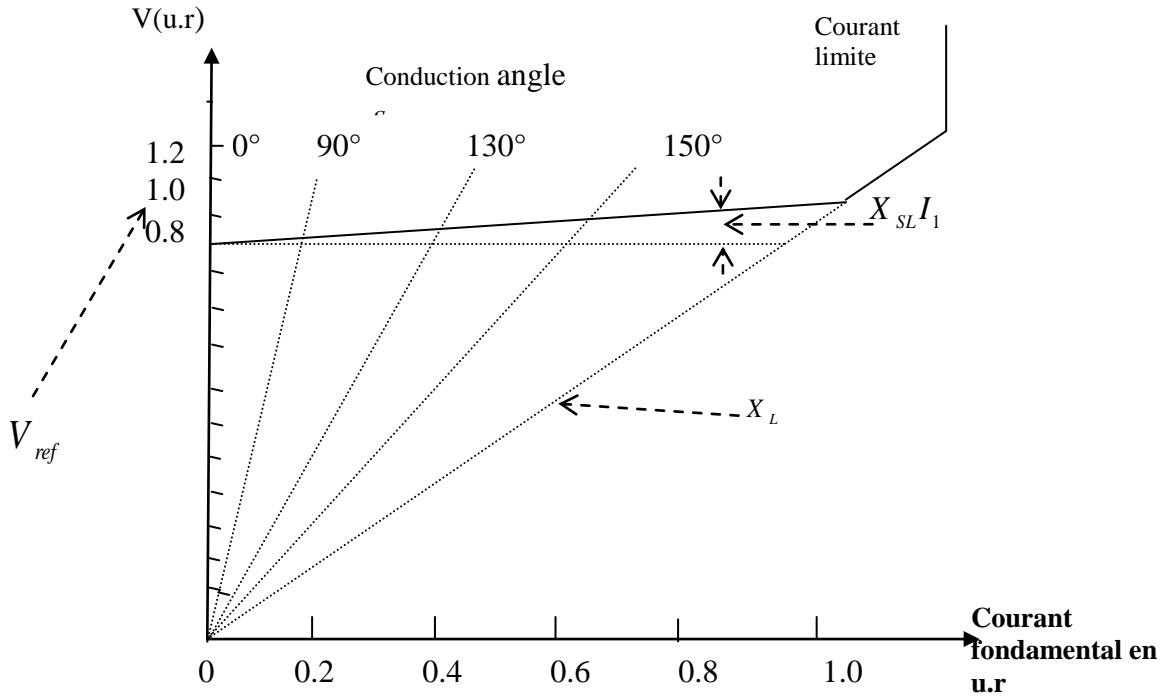


Figure 4.7. Caractéristique V/I du TCR

IV.3.2. Schéma bloc du TCR

Le bloc de contrôle du TCR représente la variation de la susceptance de la bobine comme une fonction de l'angle d'amorçage (c'est-à-dire l'angle de conduction  $\delta$ ) et le circuit de linéarisation utilisé pour remplacer la relation non linéaire entre  $B_c$  et  $\delta$  (figure 4.8)  
 Les limites de BL montré par ce bloc sont en Ur et qui correspond à 1 pour  $B_{Lmax}$  et 0 qui représente  $B_{Lmin} = 0.02$

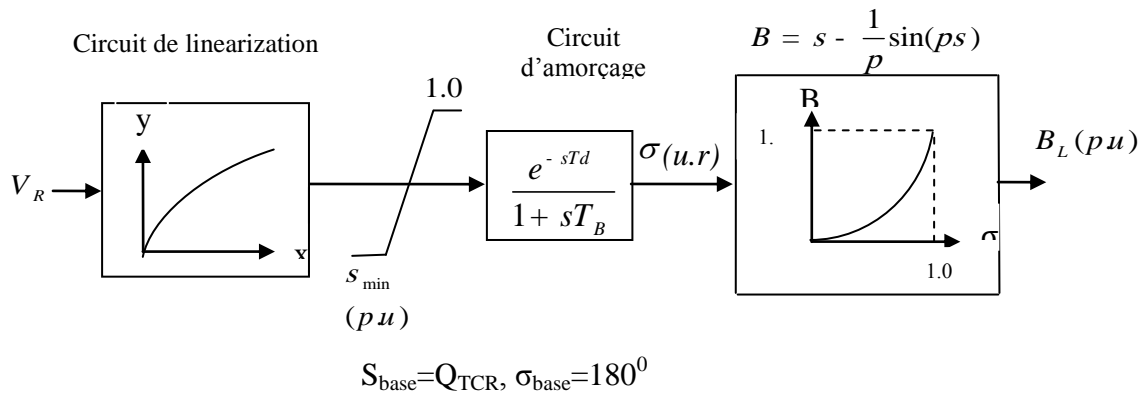


Figure.4.8. Block model du TCR

Si la relation non linéaire entre  $\delta$  et  $B_L$  est comme parfaitement compensée et les constantes considérées  $T_d$  et  $T_B$  ( $T_d=1$  ms délai de transport et  $T_B=5$ ms séquence d'amorçage) sont négligés, alors le bloc de contrôle est assimilé à un gain avec ces limites.

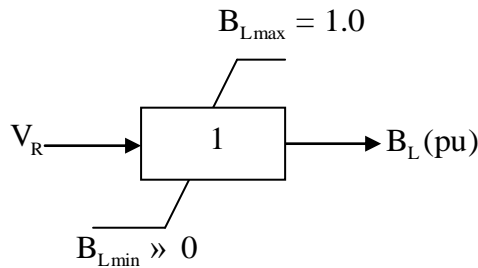


Figure.4.9. block model de TCR simplifiée

IV.3.3. Système TSC

Le schéma du TSC consiste à introduire les condensateurs comme des sources de puissance réactive. Chaque source monophasé est formée d'un condensateur (C) en série avec deux interrupteurs statiques bidirectionnels et une petite inductance (L) qui limite pendant la commutation l'anhélation des courants et prévient la résonance avec le réseau (figure 4.10).

En système triphasé le couplage est en triangle (figure 4.11).

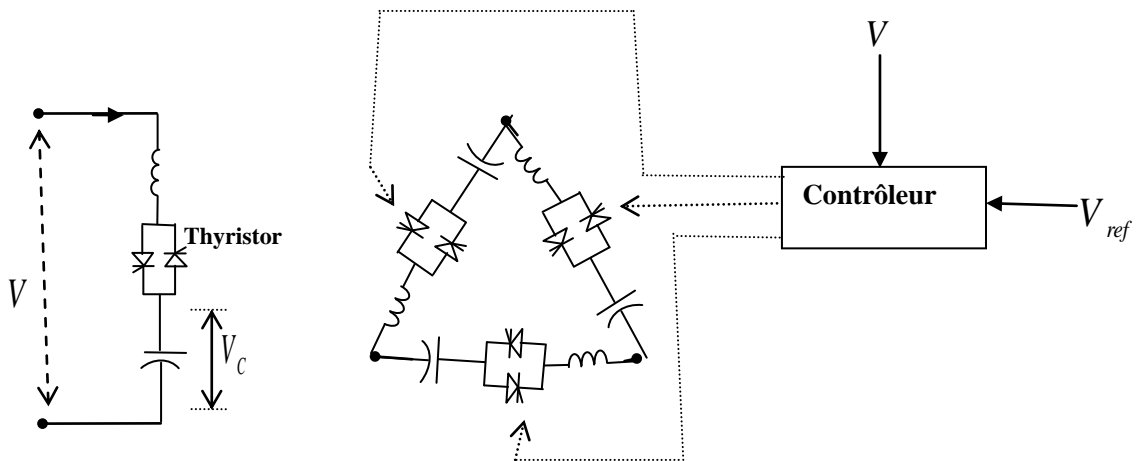


Figure.4.10. Unité monophasée

Figure. 4.11. Unité triphasée

IV.3.4. Modèle de contrôle du TSC

Le contrôle de l'amorçage des thyristors est désigné pour minimiser les temps de commutation. Ceci est obtenu par le choix du temps d'amorçage à l'instant où la tension qui traverse le Thyristor est minimale (l'idéal est nulle).[21]



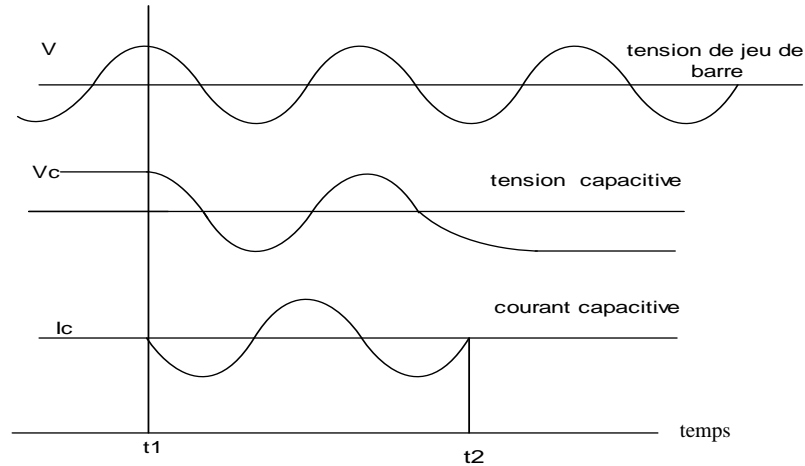


Fig.4.12. opération d'amorçage du TSC

La figure (4.12) résume cette opération. L'allumage à l'instant  $t_1$  est choisi quand  $V=V_{MAX}$  et de même que la polarité de la tension du condensateur. Ceci entraîne une interruption transitoire libre. Le désamorçage (off) à l'instant  $t_2$  correspondant à  $I=0$ . Dans ce cas, le condensateur passe à  $V_C$  max ou  $V_C$  min en attente de la prochaine opération. Le principal contrôle de la susceptance utilisée par le TSC est obtenu par le contrôle du nombre des unités (condensateurs) en conduction. La variation est obtenue chaque demi-cycle. Ce type de contrôle n'entraîne pas d'harmonique.

Les caractéristiques  $V/ I$  du TSC (figure 4.13) montre que le contrôle de  $V$  est discontinu (ou par étape)

Dans l'application de haute tension, le nombre de ces étapes est limité parce que le prix des thyristors est très élevé. Le contrôle de  $V$  au jeu de barre (SVC) est obtenu par

$$V_{ref} = \pm \frac{\Delta V}{2} \text{ où } \Delta V \text{ est la zone inerte.}$$

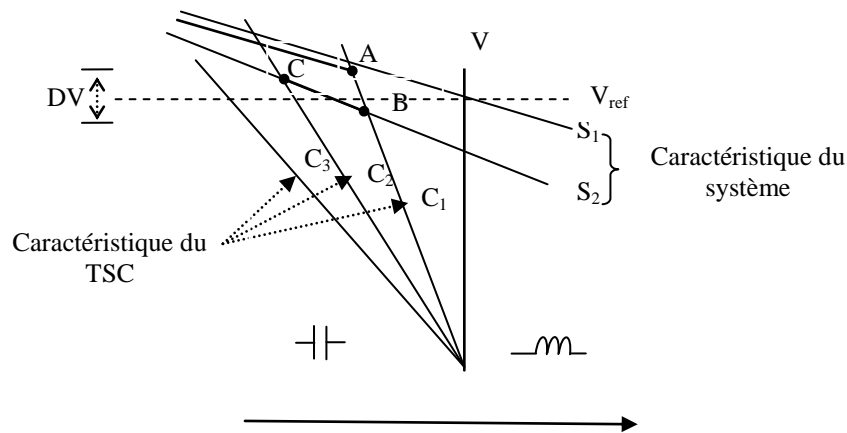
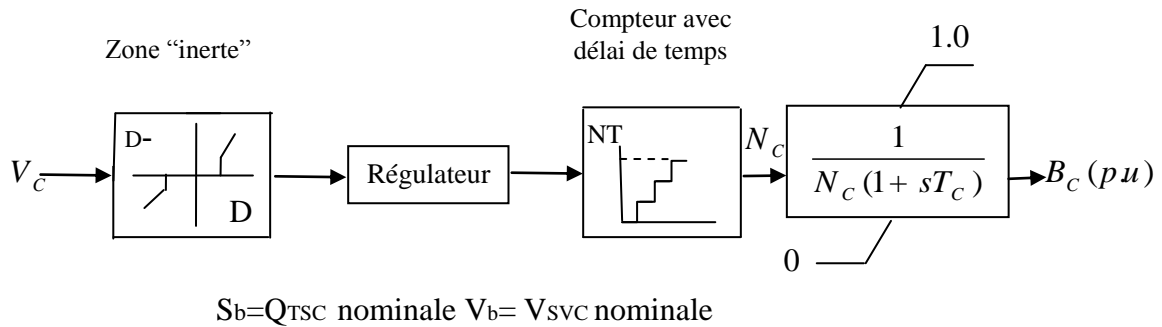


Figure.4.13. Caractéristiques V/I d'un TSC et réseau de

**IV.3.5. Schéma bloc du TSC**

La figure 4.14 montre en Ur le modèle souhaitable pour représenter le TSC avec ses paramètres exprimés en unités relatives ( $S_b=Q_{TSC}$  nominale et  $V_b=V_{SVC}$  nominale) et le nombre totale des condensateurs introduit (considérés égale en quantité). Dans ce modèle,  $N_C$  est le nombre des unités à n'importe instant  $t$  et  $T_c$  est le temps associé à la séquence d'amorçage des thyristors.

$V_c$  : le signal de contrôle



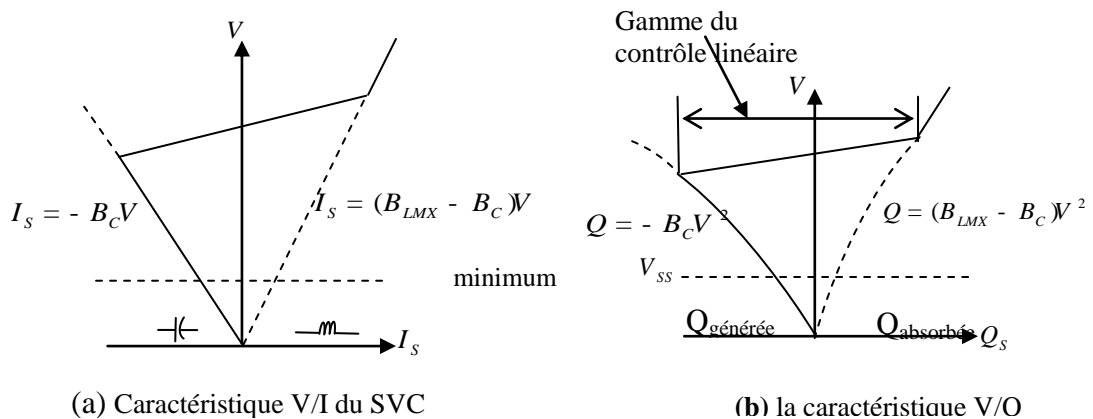
**Figure 4.14.** Block model du TSC

**IV.4. Contrôle du SVC (TCR et TSC) avec le système**

La compensation statique du système à chaque demande est obtenue par le contrôle de la tension au jeu de barre haute tension où le SVC est implanté

La caractéristique d'état  $V/I$  du SVC et la quantité de la puissance réactive qui lui correspond montrée dans la figure (4.15) est obtenue par le contrôle de  $X_{SL}$ .

La valeur de  $X_{SL}$  est déterminée par le gain du contrôleur (régulateur de tension). [25]



**Figure.4.15.** caractéristique d'état du SVC

Dans le Schéma bloc SVC-système « SVS » (figure4.16), on décrit l'approche générale de la modélisation d'un SVS.

Ce schéma montre les paramètres de contrôle des blocs TCR et TSC et le mode de contrôle qui est basé sur l'erreur entre la valeur de  $V_{ref}$  et  $V$  mesurée (réduite)  $V_m$ .

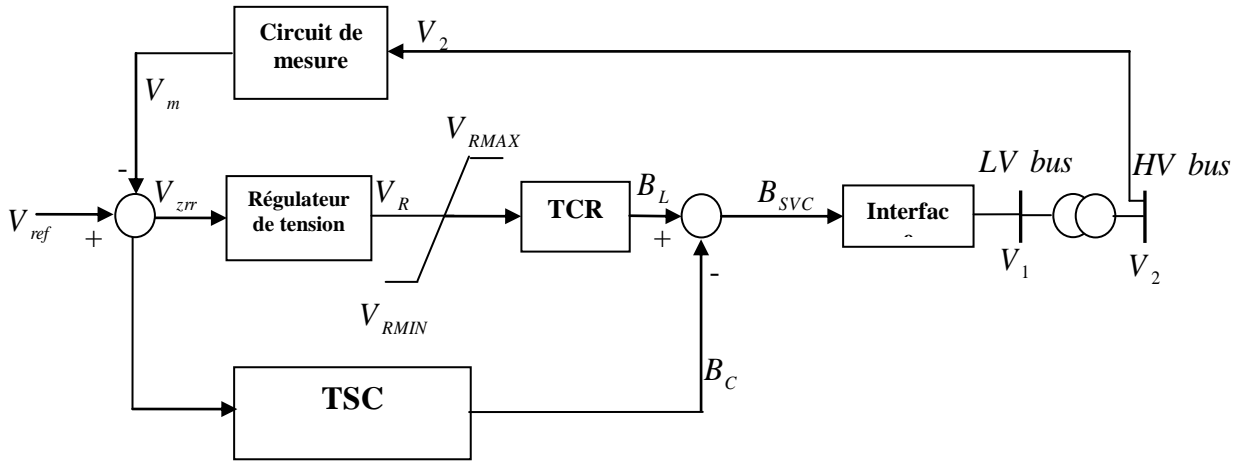


Figure 4.16. bloc diagramme fonctionnel du SVC

#### a- Régulateur de tension

La structure du régulateur de tension dépend particulièrement de l'application demandée du SVC et les performances dynamiques du SVS. Il est généralement un PI. Avec ce régulateur de type proportionnel, le gain  $K_P$  est réciproque de  $X_{SL}$  et la constante du temps  $T_P$  est généralement entre 50 ms et 100ms. ou avec le régulateur de type intégrateur.

#### b-Bloc de mesure

Le bloc de mesure inclue les éléments comme les transformateurs, les convertisseurs alternatif /continu et les rectificateurs. Le circuit de mesure peut être représenté par une simple constante du temps de l'ordre de Cinque secondes ou comme un gain de 1.

#### IV.5. Les équations de SVC [23]

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 :

$$V_I - V_{REF} + X_{SL} V_K B_e = 0 \tag{IV .10}$$

$$Q_{SVC} - V^2 K B_e = 0 \tag{IV .11}$$

$$\pi X_C X_L B_e + \sin 2\alpha + \pi \left( 2 - \frac{X_L}{X_C} \right) = 0 \tag{IV .12}$$

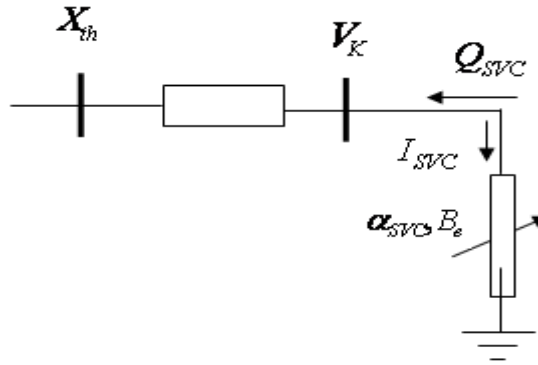


Figure 4.17. Schéma simplifié du SVC

$V_K$  : 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.

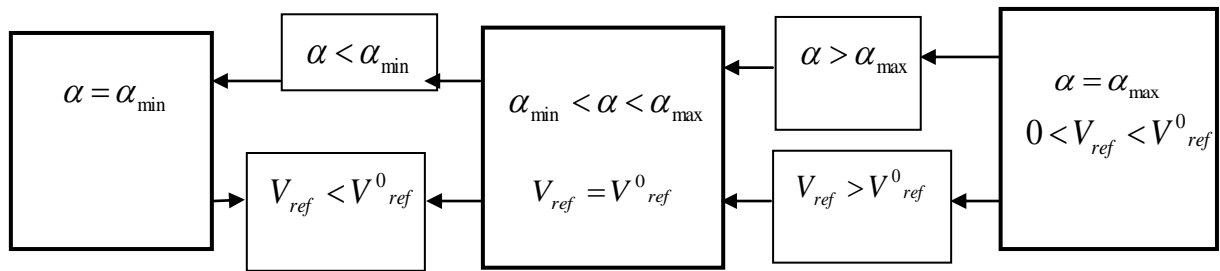
On définit  $B_e$  c'est la susceptance de SVC :  $B_e = \frac{1}{X_e}$

$$B_e = \frac{\sin(2\alpha) - 2\alpha + \pi \left( 2 - \frac{X_L}{X_C} \right)}{\pi X_L} \tag{IV .13}$$

$$X_e = \frac{\pi X_L}{\sin(2\alpha) - 2\alpha + \pi \left( 2 - \frac{X_L}{X_C} \right)} \tag{IV .14}$$

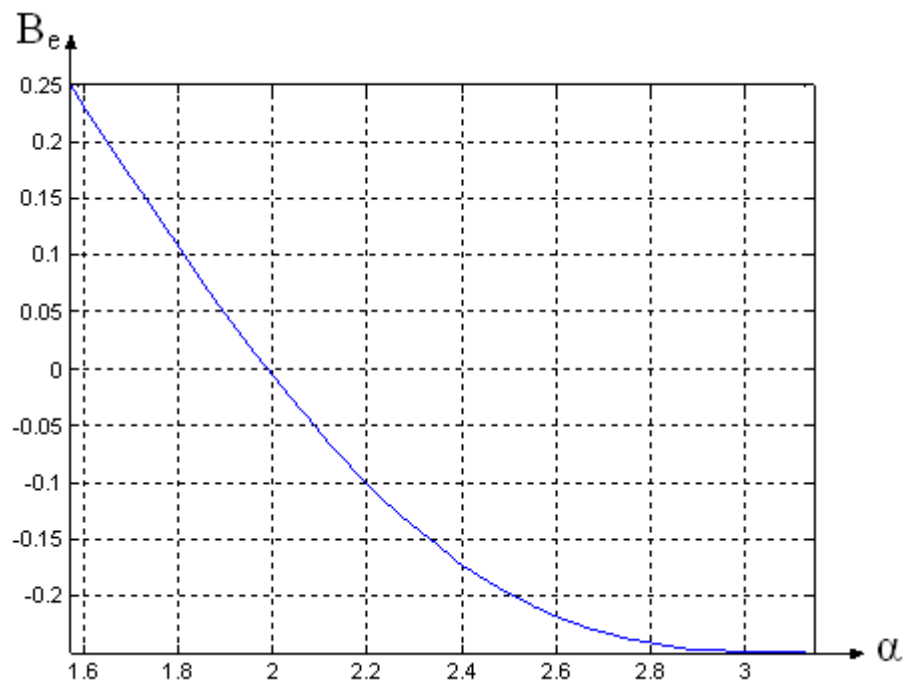
Avec  $\alpha$  représente la variation de l'angle d'amorçage des thyristors :  $\alpha$  compris entre  $[ 90^0 \text{ et } 180^0 ]$ .

la figure(4-19) représente Organigramme de la variation de l'angle d'amorçage en fonction de la tension à régler .[23]



**Figure 4.19.** 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  $X_L, X_C, \alpha$ . On peut tracer la courbe de  $B_e = f(\alpha)$ , si  $X_C = 1(pu), X_L = 0.5(pu)$ .



**Figure 4.20.** La variation de susceptance en fonction de l'angle d'amorçage  $\alpha$

On remarque que  $B_e$  change de signe lorsque  $\alpha$  varie fig. (4.20).

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

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

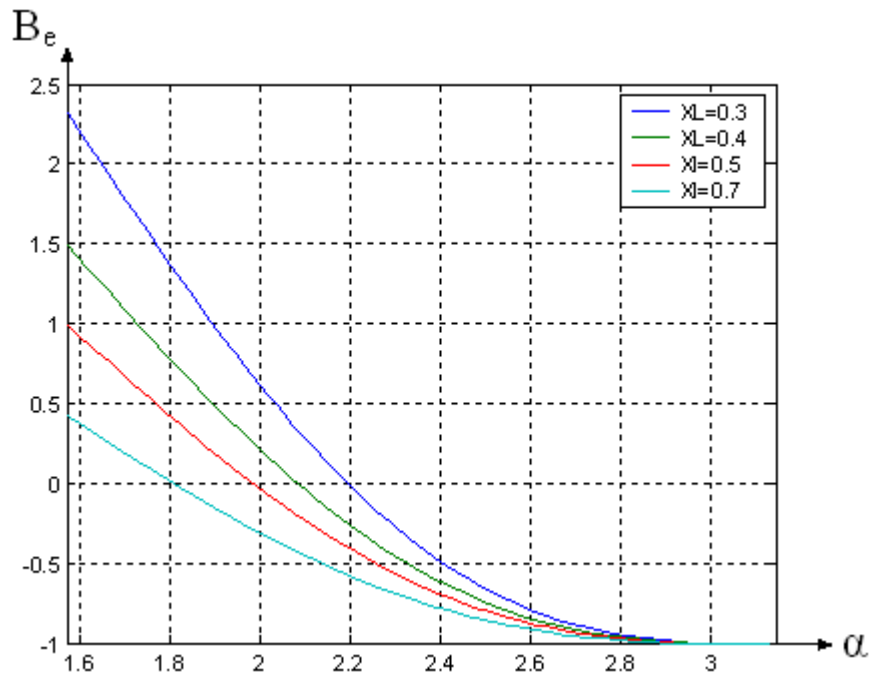


Figure.4.21. Variation de la susceptance en fonction de  $\alpha$  pour valeur de  $X_L$

#### IV.6. 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 faites par études approfondies, utilisant les méthodes numériques appliquées dans ce domaine.

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

Chaque jeu de barres est alimenté d'un générateur. Les générateurs fournissent les énergies  $S_{G1}, S_{G2}, \dots, S_{Gn}$ , les jeux de barres. Les charges demandées sont prises de chaque jeu de barres à des quantités  $S_{D1}, S_{D2}, \dots, S_{D3}$ , les jeux de barres sont liés par des lignes qui sont caractérisés par  $Y_{bus}$ . [24 . 35]

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 :

$$P_i + jQ_i = (P_{G1} - P_{D1}) + j(Q_{G1} - Q_{D1}) \quad (IV.15)$$

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

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

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

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

$$V_i = \frac{1}{Y_{i,i}} \left( \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} - \left( \sum_{K=1, K \neq i}^{K=n} Y_{i,K} V_K \right) \right) \quad (IV.16)$$

Pour le jeu de barres de contrôle :

$$Q_i = Q_{SVC} - Q_D \Rightarrow Q_{SVC} = Q_i + Q_D \quad (IV.17)$$

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  $\alpha$ .

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  $\alpha$  de l'inductance. La susceptance du SVC vue du primaire du transformateur :

$$B_p = \frac{1}{X_T + X_e} \quad (IV.18)$$

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 (IV.18). [24]

#### **IV.7. 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. Une application du SVC dans les réseaux électriques fera l'objet du chapitre 5.



# Chapitre V

## Application

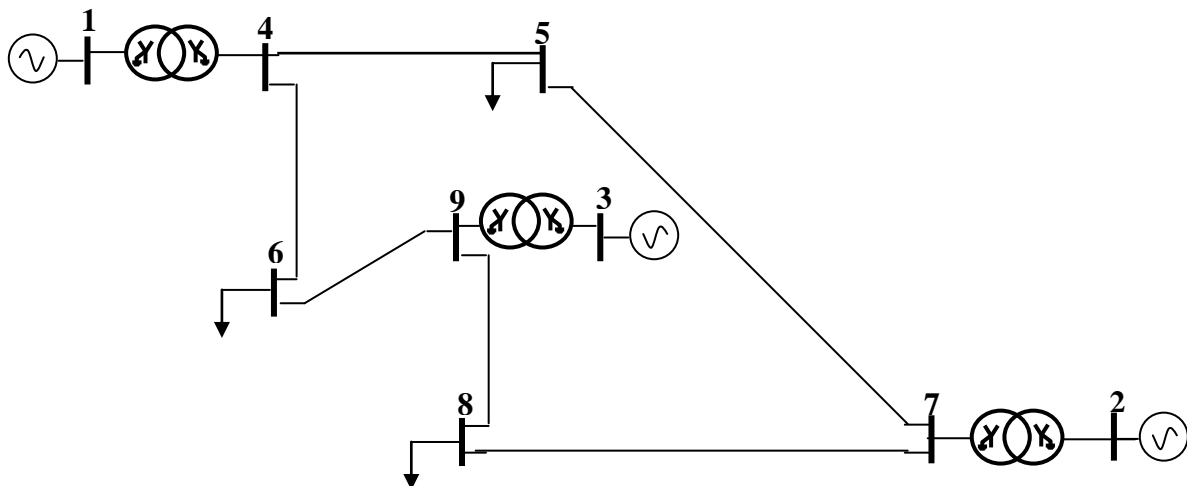
### V.1. Description générale

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. [34]

### V.1.2. Application:(programmation); compensation shunt avec SCV

#### V.2.2.1. 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 (FACT). Ce réseau test est constitué de 6 lignes électriques, 3 générateurs, 3 transformateurs et 3 charges.

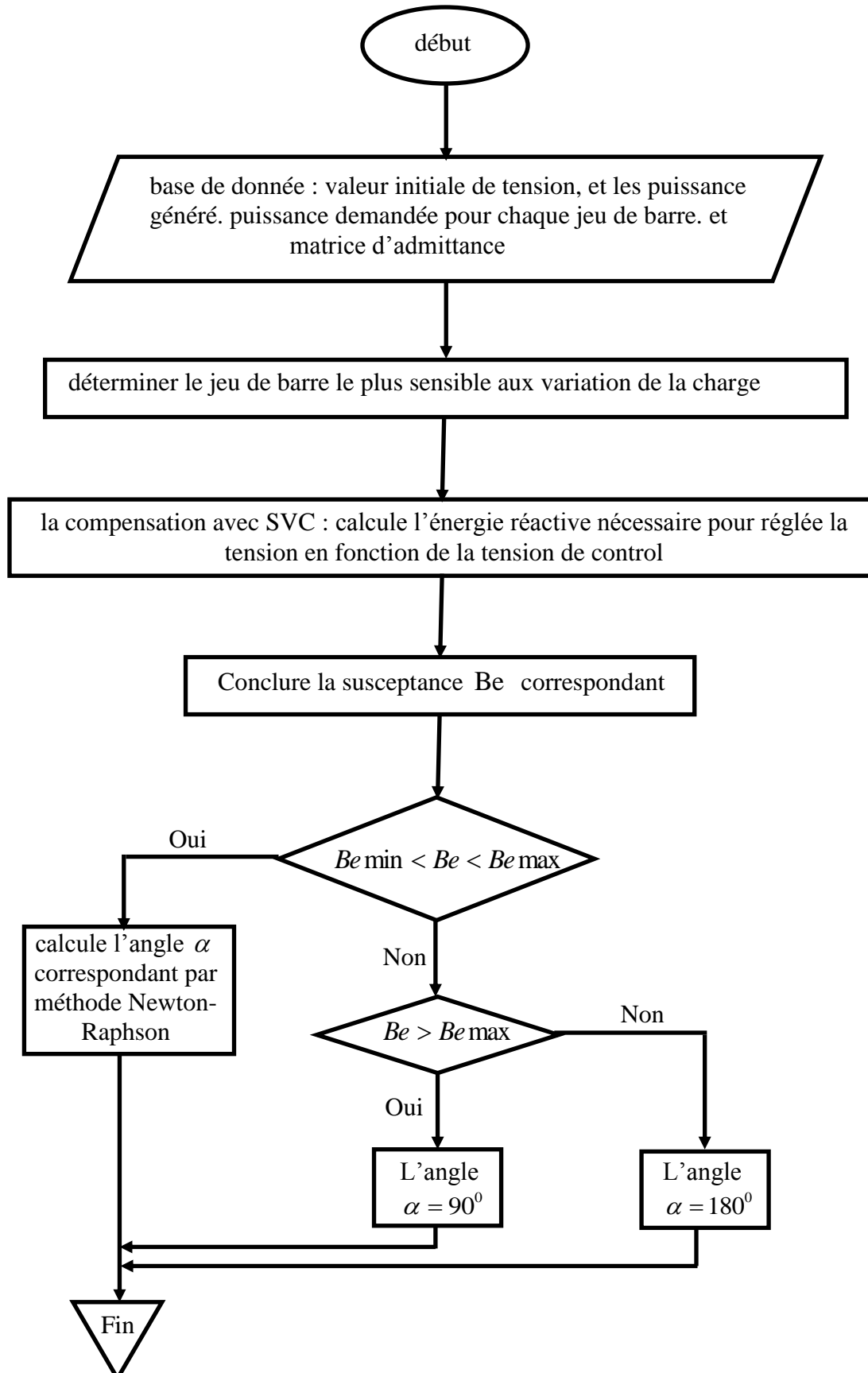


**Figure 5.1.** Schéma d'un réseau test de 9 jeux de barres

Le tableau (VI .1) , la Figure( 5.2) 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

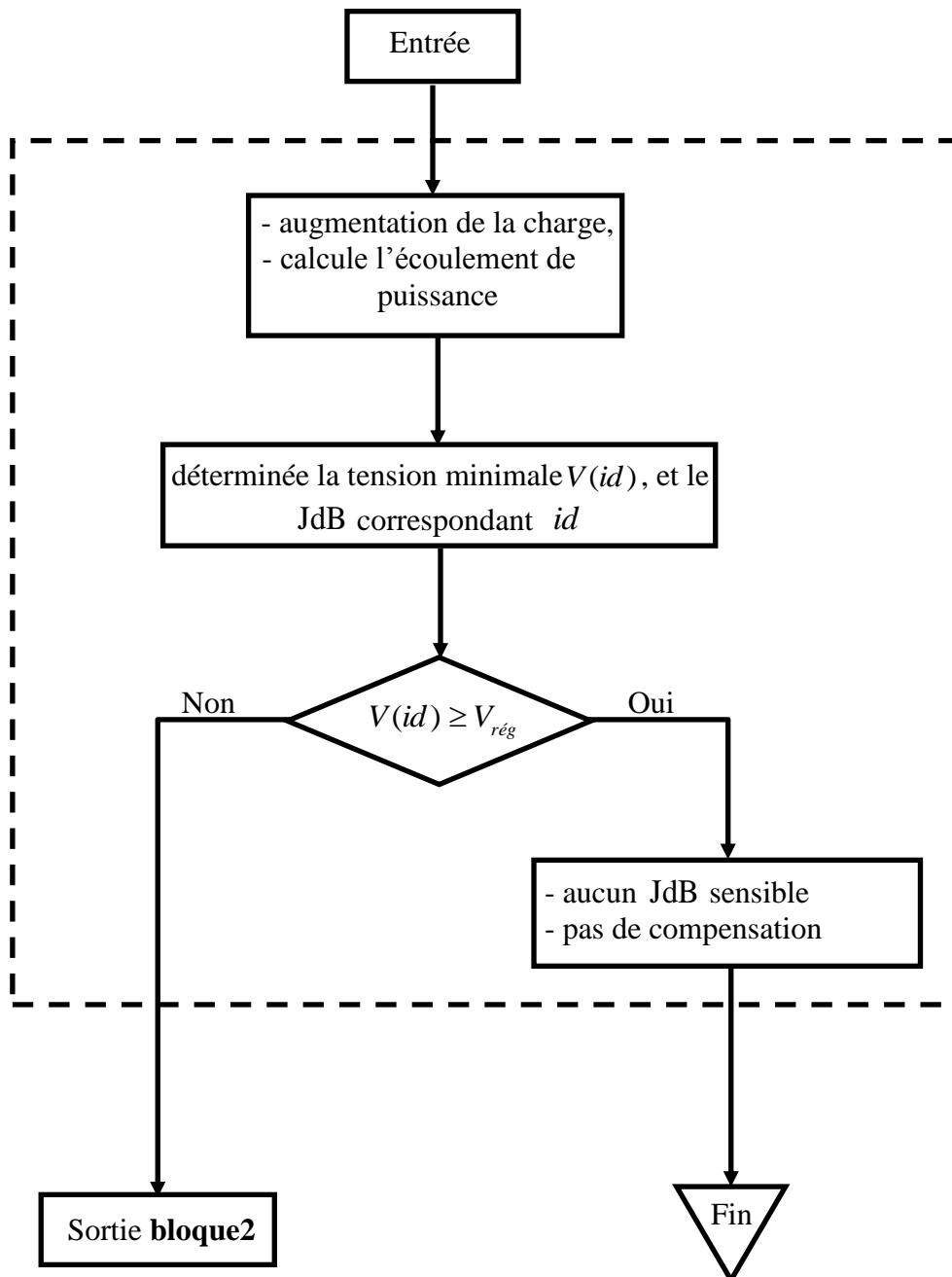
shunt. Alors que le tableau (VI.3.a,b) visualise les résultats du réseau 9 bus obtenu avec et sans l' SCV,(les résultats de programmation ).

### V.2.3. L'organigramme globale de l'intégration de SCV [24. 33]

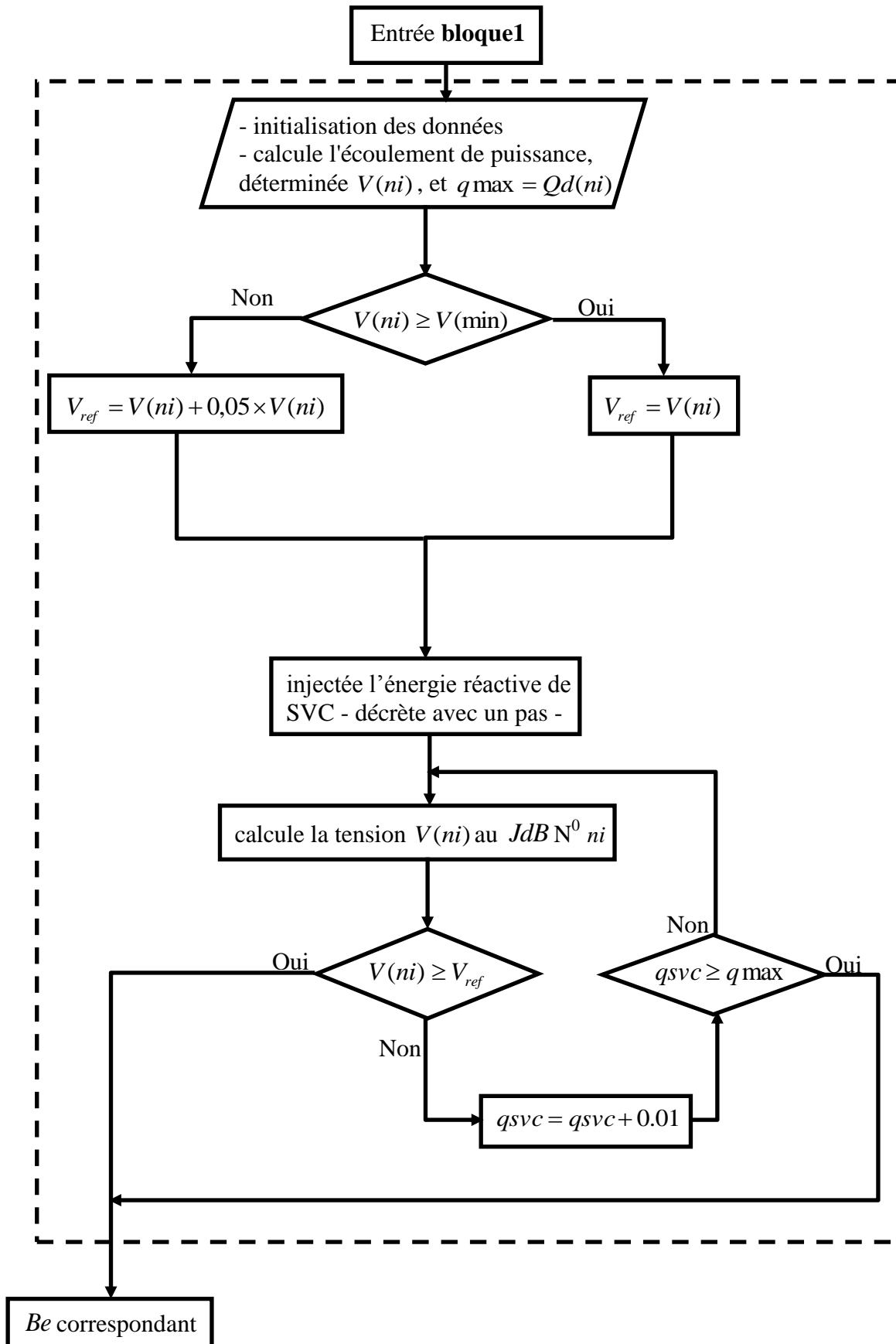


## V.2.4. Organigramme détaillée

**Bloque 1** : déterminer le jeu de barre le plus sensible aux variations 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.



### V.2.5. les résultats de programmation (réseau 9 jeux de barres)

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

- Méthode de GAUSS-SEIDEL-

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

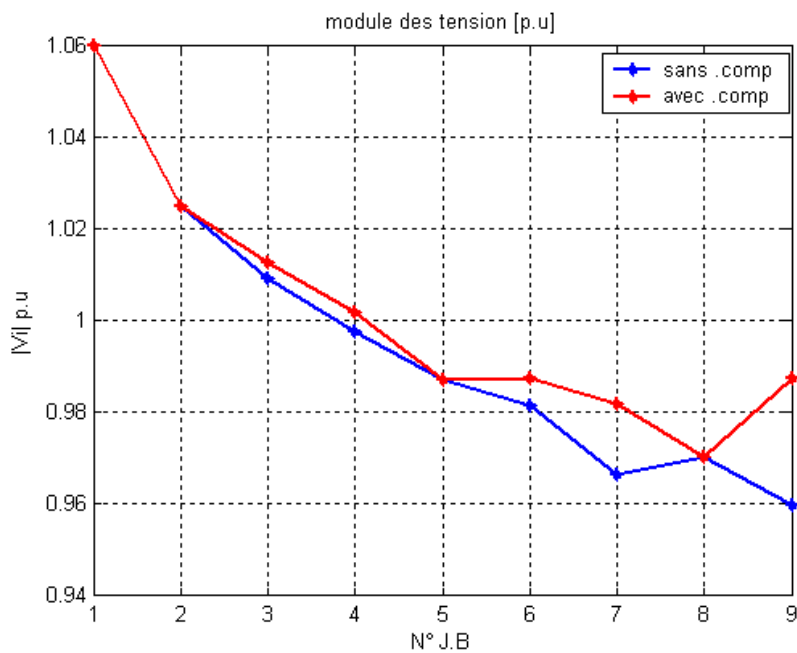
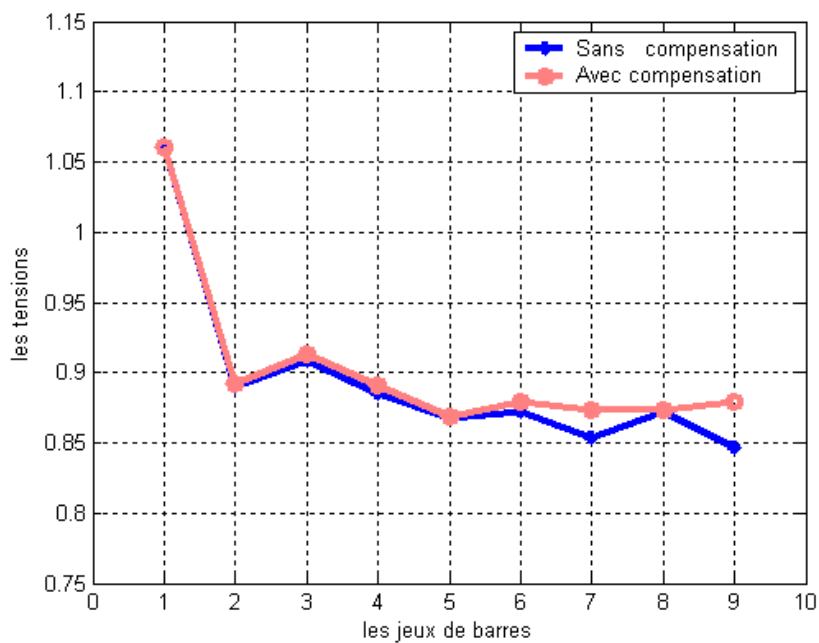


Figure 5.2 . Variation de la tension – cas normal

b- tableau (V-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 5.3.** 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)	<b>0.960</b>	<b>0.847</b>
Tension 7 (pu)	<b>0.967</b>	<b>0.854</b>
Puissance active générée (MW)	<b>212.452</b>	<b>236.595</b>
Puissance réactive générée (MVAR)	<b>101.046</b>	<b>197.649</b>
Pertes active (MW)	<b>9.939</b>	<b>33.831</b>
Pertes réactive (MVAR)	<b>10.770</b>	<b>107.498</b>
Coût optimal (\$/h)	<b>3132.924</b>	<b>3560.155</b>
Susceptible Be J.d.B 9	////////////////	////////
Susceptible Be J.d.B 7	////////////////	////////
$\alpha$ J.d.B 9	////////////////////	////////////////////
$\alpha$ J.d.B 7	////////////////////	////////////////////
Puissance réactive injectée (SVC) (MVAR)	<b>00</b>	<b>00</b>

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

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



d-(tableau VI.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
$\alpha$ J.d.B 9	//////////	//////////	//////////	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

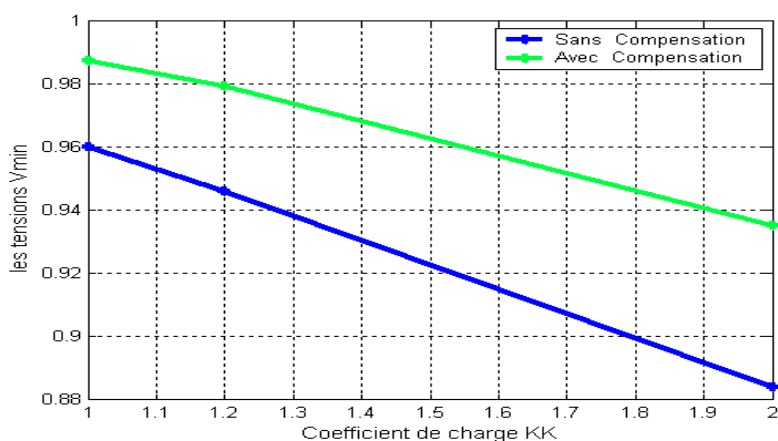


Figure 5.4. Variation de la tension en fonction de l'incrémentation de la charge

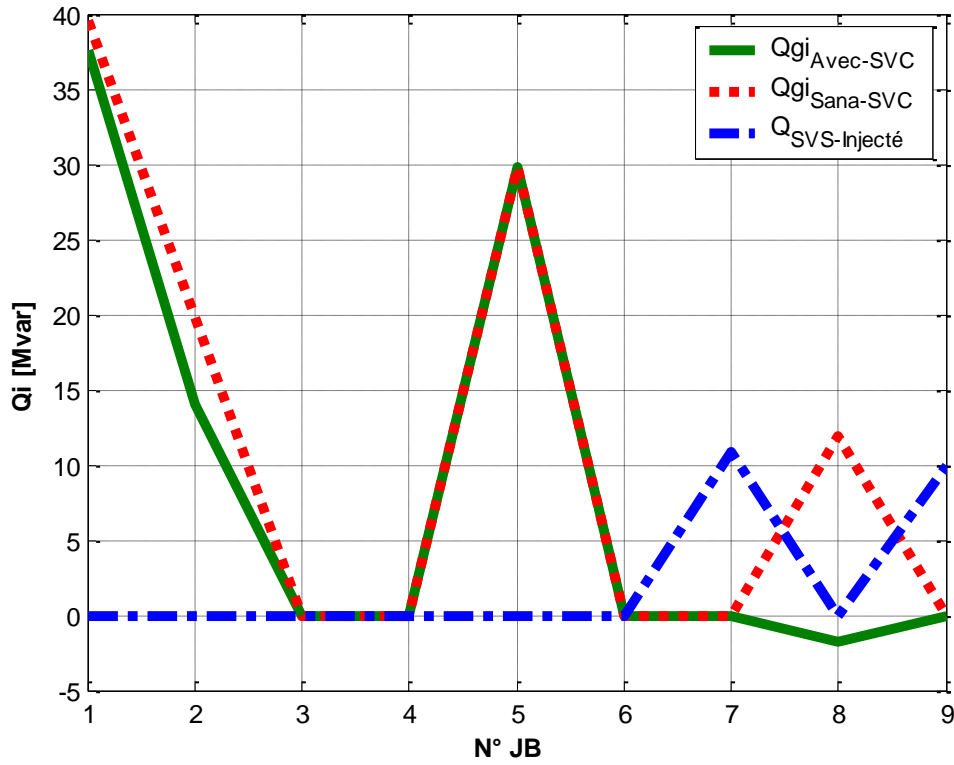


Figure 5.5. la Puissance réactive dans (réseau 9 jeux de barres) –cas normal

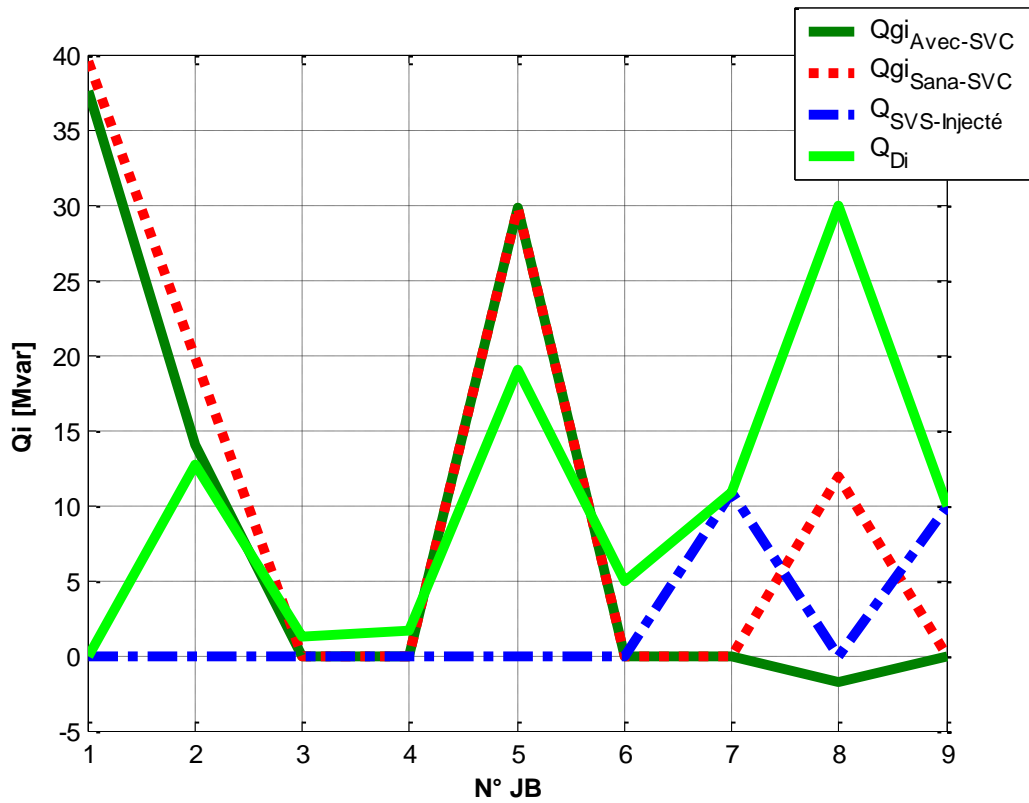
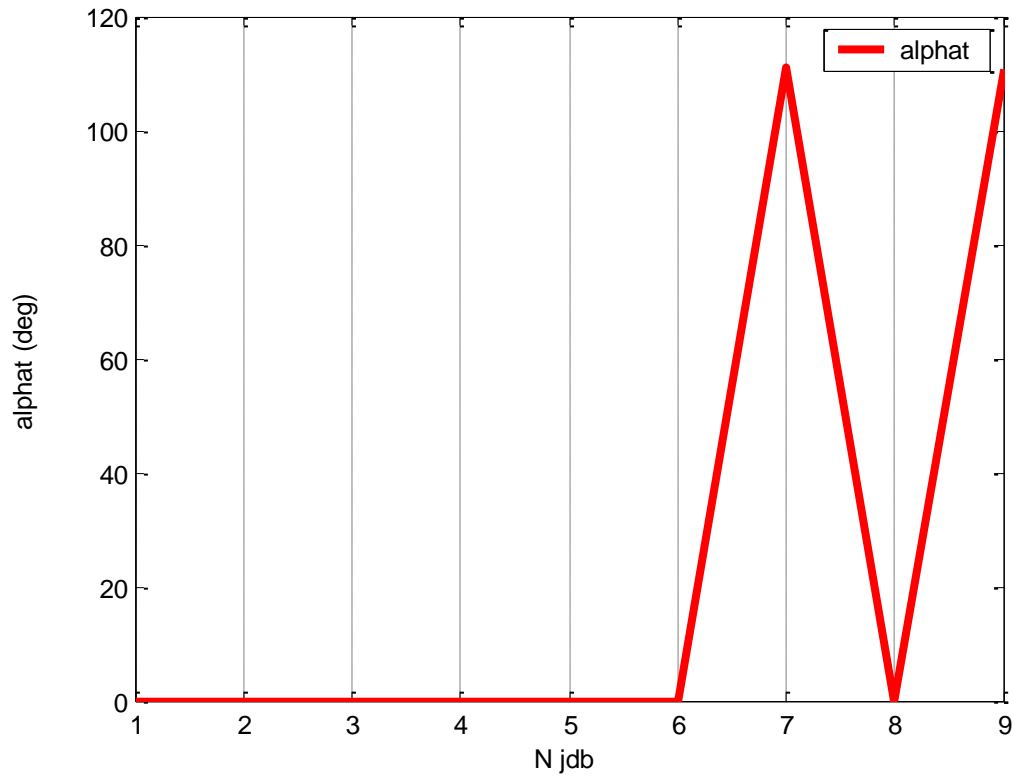


Figure 5.6. la Puissance réactive dans (réseau 9 jeux de barres) –cas normal

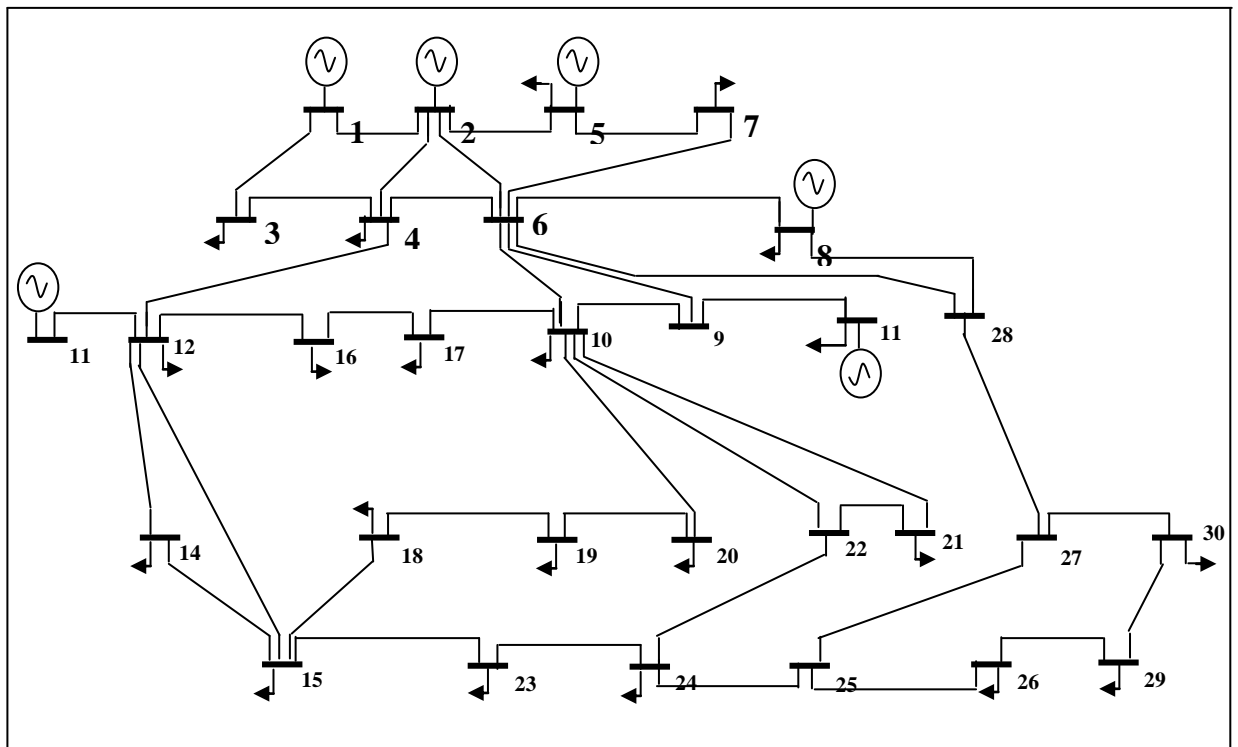


**Figure 5.7.** Variation l'angle alphan (degré) en fonction de jeux de barres –cas normal d-(tableau VI.5.) présente( Bilan de la puissance réactive

bus	Puissance réactive généré ( <i>MVAR</i> )	La puissance demandée réactive ( <i>MVAR</i> )	Puissance réactive injectée (SVC) ( <i>MVAR</i> )	Pertes réactive <i>MVAR</i>
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

### V.2.6. 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 5.1.** Schéma d'un réseau test de 30 jeux de barres

Le tableau (VI .5) , la Figure( 5.6) 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 (VI.7.a,b) visualise les résultats du réseau 30 bus obtenu avec et sans l' SCV.

#### VI-2-7-les résultats de programmation (réseau 30 jeux de barres)

a- tableau( VI-6): 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	1.003	1.0052
4	0.990	0.9937
5	0.952	0.9526
6	0.973	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	1.001	1.0116
13	1.072	1.0724
14	0.991	0.9927
15	0.983	0.9831
16	0.986	0.9866
17	0.969	0.9695
18	0.965	0.9656
19	0.958	0.9586
20	0.961	0.9607
21	0.957	0.9570
22	0.956	0.9575
23	0.963	0.9631
24	0.935	0.9453
25	0.943	0.9437
26	0.913	0.9244
27	0.931	0.9503
28	0.972	0.9718
29	0.939	0.9388
30	0.900	0.9163

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

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	0.982	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	0.955	0.9573
22	0.957	0.9580
23	0.952	0.9637
24	0.934	0.9462
25	0.930	0.9447
26	0.900	0.9256
27	0.946	0.9530
28	0.971	0.9720
29	0.896	0.9121
30	0.854	0.8816

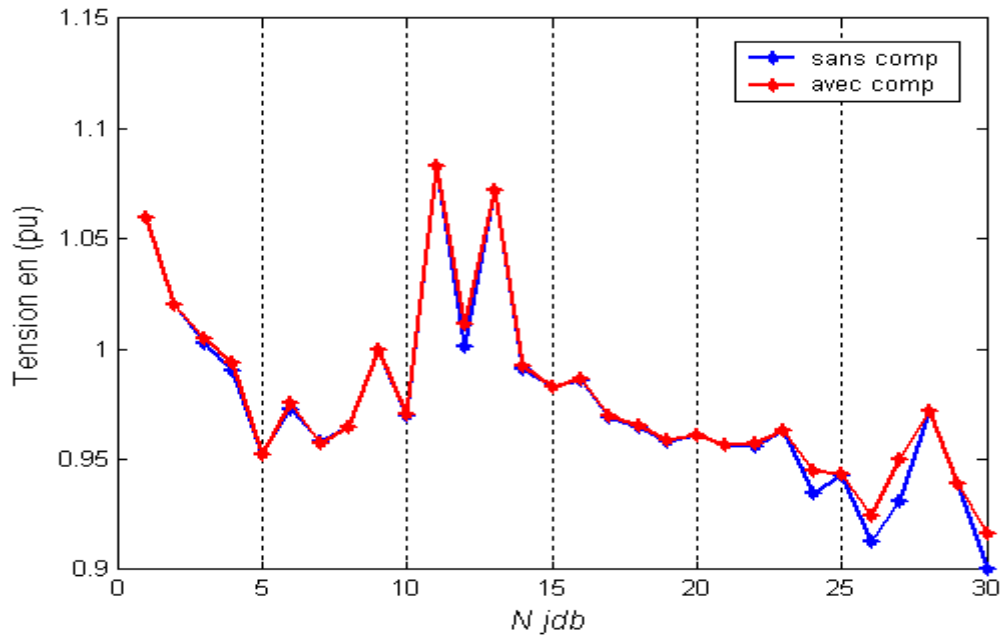


Figure 5.8. Variation de la tension – cas normale

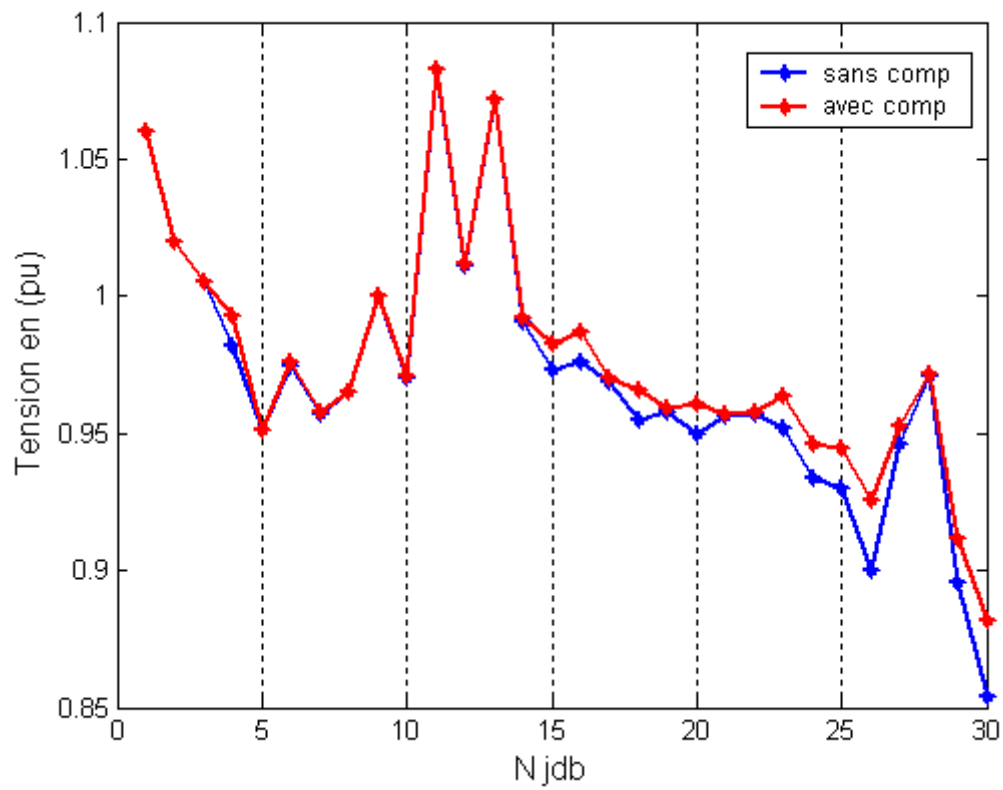
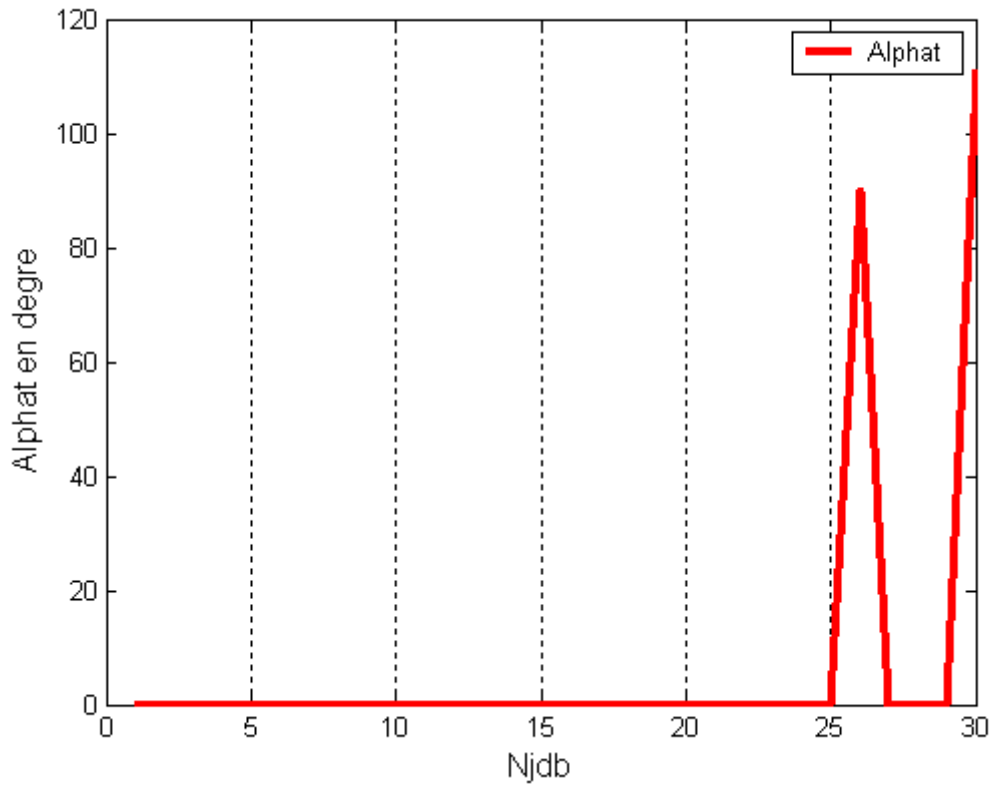


Figure 5.9. Variation de la tension – cas rupture de la ligne (27-30)



**Figure 5.10.** Variation l'angle alphas (degré) en fonction de jeux de barres – cas normal

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 VI.7.a) cas sans compensation

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

c-2- (tableau VI.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	
	normale	Cas rupture de la ligne(27-30)
Tension 30 (pu)	<b>0.9361</b>	<b>0.8795</b>
Tension 26 (pu)	<b>0.9459</b>	<b>0.8732</b>
Puissance active généré ( <i>MW</i> )	<b>301.5538</b>	<b>236.840</b>
Puissance réactive généré ( <i>MVAR</i> )	<b>152.58</b>	<b>185.142</b>
Pertes active ( <i>MW</i> )	<b>18.154</b>	<b>33.148</b>
Pertes réactive( <i>MVAR</i> )	<b>18.780</b>	<b>104.742</b>
Coût optimal ( \$/h)	<b>4888.953</b>	<b>3542.077</b>
Susceptible Be J.d.B 30	<b>0.0220</b>	<b>0.1305</b>
Susceptible Be J.d.B 26	<b>0.0257</b>	<b>0.1430</b>
$\alpha$ J.d.B 30	<b>111.13</b>	<b>90</b>
$\alpha$ J.d.B 26	<b>90.00</b>	<b>90</b>
Puissance réactive injectée (SVC) ( <i>MVAR</i> )	<b>2.4</b>	<b>10</b>

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

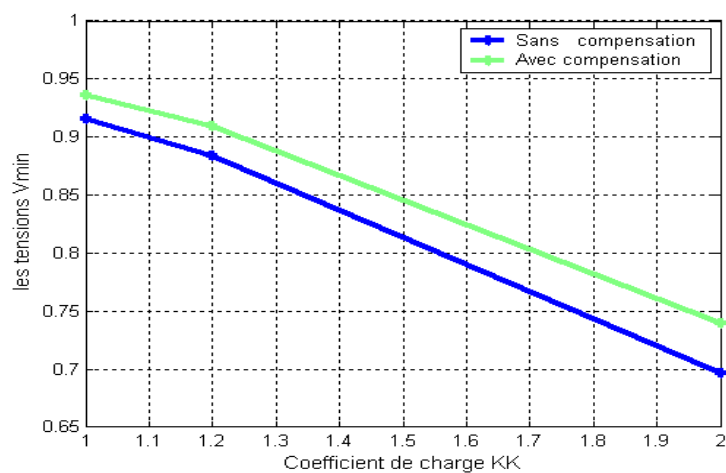


Figure 5.9. Variation de la tension en fonction de l'incrément de la charge

### V2.8. 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
<b>Sans compensation</b>	JdB9 : $\Delta V = 5.71 \%$	JdB9 : $\Delta V = 16.81 \%$	JdB30 : $\Delta V = 10.3 \%$	JdB30 : $\Delta V = 16.12 \%$
<b>Avec compensation</b>	JdB9 : $\Delta V = 3.02 \%$	JdB9 : $\Delta V = 12.62 \%$	JdB30 : $\Delta V = 08 \%$	JdB30 : $\Delta V = 12.41 \%$

### V.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.

### **PERSPECTIVES**

Cette étude nous a permis de comprendre le phénomène d'effondrement de tension, les causes qui la favorisent, et aussi les outils d'analyse nécessaires pour traiter ce problème. L'étude des systèmes FACTS nous a permis de connaître et maîtriser un nouvel axe de recherche appliquée à la régulation et à la conduite des réseaux électriques.

---

En perspective, nous suggérons une continuité dans les domaines suivants:

- Utilisation des autres équipements FACTS dans l'amélioration de la stabilité statique de la tension des réseaux électriques à savoir : UPFC, SSSC, STATCOM,...etc.
- L'optimisation des puissances réactives et le contrôle des tensions avec l'incorporation des dispositifs FACTS.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- [1] Henri Persoz, Gérard Santucci, Jean-Claude Lemoine, Paul Sapet « La planification des réseaux électriques » Editions EYROLLES 1984.
- [2] Michel Crappe « Commande et régulation des réseaux électriques» Traité EGEM série génie électrique, LAVOISIER 2003.
- [3] Hanane Kouara « Application d'un filtre actif série au contrôle de la tension d'un réseau basse tension » mémoire de magister, université de Batna 28/02/2006.
- [4] Boudjella Houari « contrôle des puissances et des tensions dans un réseau de transport au moyen de dispositifs FACTS (SVC) »mémoire de magister ,université de Sidi Bel-Abbes23 *Janvier 2008.*
- [5] Jacques .C, Guillaume de Preville, Jean-Louis Sanhet « Fluctuations de tension et Flicker-Évaluation et atténuation» Techniques de l'ingénieur D4315.
- [6]Abdelaziz Chaghi « documents pédagogiques et didactiques»université de Batna 2000/2001.
- [7]Haimour Rachida« Contrôle des Puissances Réactives et des Tensions par les Dispositifs FACTS dans un Réseau Electrique» mémoire de magister, Ecole Normale Supérieure de l'Enseignement Technologique d'Oran 2008-2009
- [8]: BOUAKAZ Hacéne, SEGGA Salim« Calcul de la répartition de charge avec compensation dans le réseau électrique » mémoire de fin d'étude; université de Biskra (promotion 1998) .
- [9] Computer methods in power system analysis (chapter 08)ALLEN W.stagg, Abier, International Student Edition.Ahmed.

- [10] William D. Stevenson, "Element of power system analyse", Mc.Graw-Hill.
- [11] Z.F.Fethi et G.Abdelmalek et D.Mohammed, «L'application de la Méthode Newton-Raphson à L'écoulement de Puissance Dans Le Système Electrique». Mémoire de fin d'étude université EL-OUDE Promotion (2007 )
- [12] MANSOURI Dris, GUMMOUDI Mohammed, FERHAT Abdelhamid. «Calcul de l'écoulement de puissance par la méthode GAUSS-SEIDEL», Mémoire de fin d'étude Université de Biskra (promotion 1996)
- [13] Olle I. Elgerd: Electric Energy Systems Theory—An Introduction McGraw-Hill 1970 [14] Khiat Mounir « Répartition optimale des puissances réactives dans un réseau d'énergie électrique sous certaines contraintes de sécurité » Thèse de doctorat d'état .Oran 2003
- [15] Rolf Grünbaum, Åke. Petersson, Björn Thorvaldsson, « FACTS-Pour des réseaux électriques Plus Performants », ABB Utilities AB Power System SE-721 64 Västerås, Suède, -2002
- [16] T. Gönen « Electric Power System Engineering: Analysis and Design» John Wiley & Sons, 1988
- [17] B.De Metz-Noblat, G .Jeanjean « Stabilité dynamiques des réseaux électrique industriels» Cahier Technique n° 185.
- [18] Lakdja Fatiha « Contrôle des transits de puissance par dispositif facts» Mémoire de magister en Commande des processus Oran 2005.
- [19] : Salhi Abd Alfattah et Mehellou Yuocéf «Contrôle de la puissance réactive du système électrique par SVC », université Batna, 2008
- [20] Fild/ FACTS – les systèmes performants pour le transport flexible de l'énergie électrique.
- [21] Ben Alia Khaled et Zahnite Hakim «Etude des compensateurs statiques de l'énergie réactive SVC dans un réseau électrique », université Biskra promotion juin 2005
- [22] Glaudio A.Canizares ,et Zeno T.Faur « Analysis of SVC and TCSC controllers in voltage collapse » IEEE Trans power systems ,Vol .14, N -1 February 1999, pp.158.164
- [23] D.SALAH sabry .L.Salah; B.Ahcen « Amélioration de la marge de la stabilité transitoire par l'utilisation des contrôleurs unifiés de l'écoulement de Puissance –UPFC-», Second international conference on electrical system , May 08-10-2006, Oumelbouaghi .ALGERIA



- [24] Geidl, M., « Implementation of FACTS and Economic Generation Dispatch in an Interactive Power Flow Simulation Platform », ETH Zürich.
- [25] Gaboussaseddik et Med lakhdar « l'impact des dispositifs de compensation dynamique –FACTS– sur les réseaux de transport », université Biskra promotion juin 2006.
- [26] Allen J. Wood & Bruce F. Wollenberg: « Power Generation And Operation And Control »  
John Wiley & Sons
- [27] J. C. Das: « Power System Analysis / Short-Circuit Load Flow And Harmonics » .Marcel Dekker 2002,
- [28] Leonard L. Grigsby & Andrew P. Hanson: « Power Flow Analysis ». Taylor & Francis 2006.
- [29] Guide de compensation des réseaux électriques industriels / Schneider Electric
- [30] Stéphane GERBEX, « Métaheuristique Appliquées Au Placement Optimal De Dispositifs FACTS dans un Réseau Electrique », thèse PHD, Ecole polytechnique de Lausanne, Lausanne 2003.
- [31] A. Laifa, ' 'Evaluation de la Stabilité de Tension d'un Réseau d'énergie électrique Développement et Application Des Indices De Stabilité ' ', thèse de Magister, Ecole Nationale polytechnique, 27 juin 1995.
- [32] F. D. Galiana, "Load Flow Feasibility and the Voltage Collapse Problem", Proceedings of 23<sup>rd</sup> conference on Decision and control, IEEE WP5-4:30, pp.485-487, December 1984.
- [33] Fuerte-Esquivel, C.R., Acha, E., Ambriz-Pérez, H., « A Thyristor Controlled Series Compensator Model for the Power Flow Solution of Practical Power Electronic », IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 15, no 1, February 2000
- [34] CHOKRI Ben Salah Belhadj Ahmed « Contribution à l'analyse de la stabilité statique de la tension » thèse de doctorat, Ecole Polytechnique de MONTRÉAL Juin 1996
- [35] Pierre Alexandre Bohême « Simulation of Power System Response To Reactive Power Compensation » thèse de Master, Université de Tennessee, Knoxville 2006

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

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

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

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

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