



N° d'ordre:

N° de série:



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la
Recherche Scientifique

Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued

Faculté de Sciences et de La Technologies Filière: Genie Electrique

Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine: Sciences et Technologie

Filière: Eléctro Technique

Spécialité: Réseaux Eléctrique

Thème

**Control de tension et la puissance reactive dans
RE en présence du système de compensation
dynamique shunt**

Réalisé par:

- Horra Akram

- Khezzane abdenmour

- Selmane Yacine

Devant le jury composé de:

Labbi Yacine

Université Echahid Hamma Lakhdar

Président

Barka Nourddine

Université Echahid Hamma Lakhdar

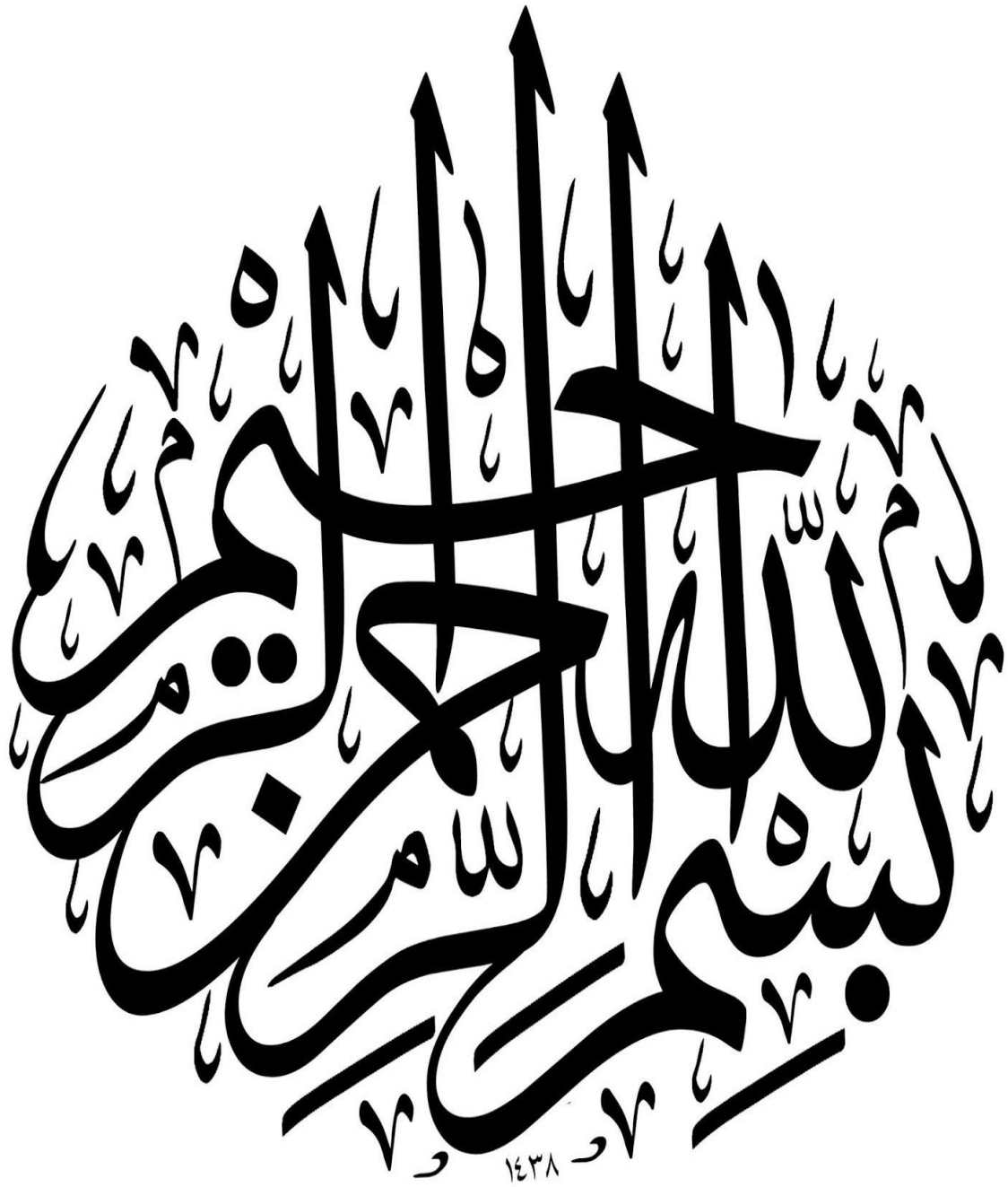
Examineur

Maammri Oussama

Université Echahid Hamma Lakhdar

Encadreur

2022-2021



Dédicace

*Au propriétaire d'une biographie parfumée et d'une
pensée éclairée ;*

*Ils ont été les premiers à être crédités de notre
obtention de l'enseignement supérieur*

(Nos chers parents), que Dieu leur donne longue vie.

*A celui qui nous a mis sur le chemin de la vie et nous
a apaisés,*

*Elle a pris soin de nous jusqu'à ce que nous
devenions vieux*

(Nos chères mamans), que Dieu les bénisse.

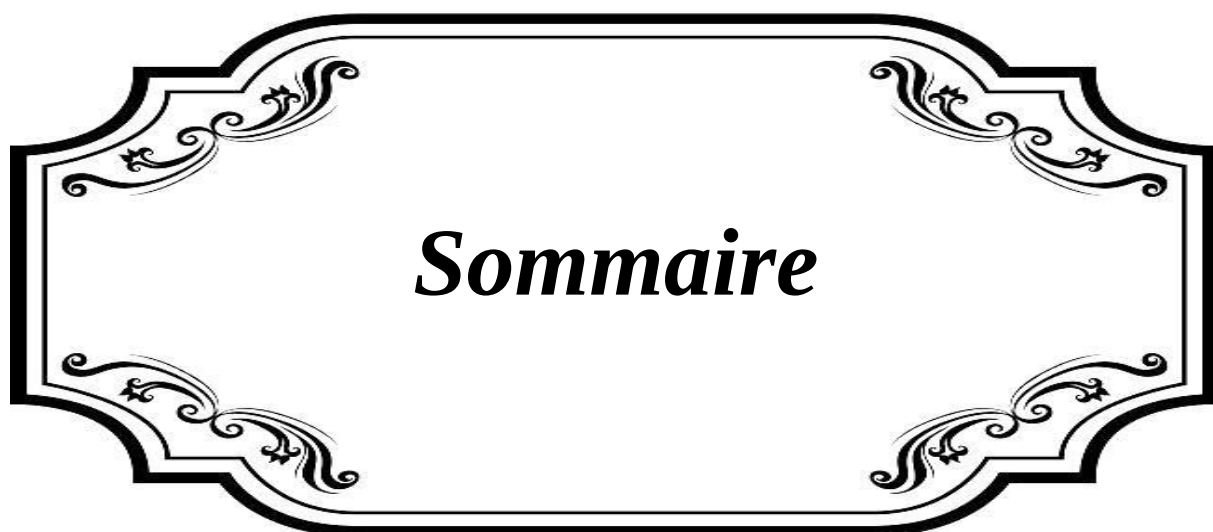
A nos frères et sœurs et à tous nos amis

*A tous nos honorables professeurs ;
Qui n'a pas hésité à nous tendre la main*

je te dédie cette recherche

Remerciements

Tout d'abord nous remercions Dieu pour la plus grande miséricorde de nous avoir permis de présenter ce projet sous la meilleure forme que nous voulions être, nous tenons à remercier notre superviseur de ce projet, le Dr (Maammri Oussama) pour son aide précieuse et conseils pour sortir de ce projet. Nous remercions nos professeurs et médecins qui nous ont fourni toutes les connaissances. Surtout, nous sommes tous reconnaissants envers nos familles pour leur amour, leur aide, leur soutien et leurs encouragements sans fin. Et à nos amis pour leur compréhension et leur soutien pour nous permettre de mener à bien ce projet.



Sommaire

	Page
Dédicace	-
Remerciements	-
Sommaire	-
Introduction générale	I
Chapitre I: Généralité sur la puissance réactive et la tension dans les réseaux électriques	
I.1.Introduction	05
I.2 Tension	05
I.2.1. La qualité de la tension	05
I.2.2. Dégradation de la qualité de la tension	06
I.2.3. Variation ou fluctuation de la fréquence	06
I.2.4. Composante lente des variations de tension	07
I.2.5. Fluctuation de tension (flicker)	07
I.2.6. Creux de tension	08
I.2.7. Interruption courte ou coupure brève	08
I.2.8. Bosses de tension	09
I.2.9. Chutes de tension	09
I.2.10. Tension et / ou courant transitoire	09
I.2.11 Déséquilibre de tension	10
I.3. La Puissance Réactive	10
I.3.1. Le facteur de puissance	10
I.3.2. Les représentations graphiques	11
I.3.3. La tangente	11
I.3.4. Bilan de la puissance réactive	11
I.3.5.Transport de la puissance active et réactive	12
I.3.6. Les contrôles dans le problème tension / puissance réactive	13
I.3.7. Moyens de Compensation de la puissance réactive	15

I.3.8. Les dispositifs conventionnels	16
I. 4. Conclusion	19
Chapitre II:Etudes les dispositifs FACTS	
II.1. Introduction	21
II .2 Dispositifs FACTS	21
II .2.1 Classification des dispositifs FACTS	21
II .2.2 Compensateurs shunts	22
II .2.3 Compensation série	28
II .2.4 Compensateurs hybrides série – parallèle	32
II .3 Comparaison des FACTS les plus utilisés	33
II .4 Les avantages de la technologie des dispositifs FACTS	34
II .5 Conclusion	35
Chapitre III: Etude d'un compensateur shunt : SVC	
III.1 Introduction	37
III.2 Caractéristique d'un compensateur statique	37
III.2.1 Caractéristique en V d'un compensateur statique	37
III.2.2 Caractéristique $Q_{(SVC)}(I)$ d'un SVC	38
III.2.3 Caractéristique de SVC idéal	39
III.2.4 caractéristique d'un SVC réel	40
III.3 Les équations de SVC [17]	40
III.4 Implantation du compensateur statique dans le problème de l'écoulement de puissance	43
III.5 Application:(programmation); compensation shunt avec SVC	45
III.5.1 Application(1)	45
III.5.2 L'organigramme globale de l'intégration de SVC [19. 21]	46
III.5.3 Organigramme détaillée	47
III.5.4 les résultats de programmation	49
III.5.5 Application(2)	56

III.5.6 les résultats de programmation (réseau 30 jeux de barres)	57
III.5.7 Comparaison des résultats du chute de tension dans les deux réseaux (9 jeux de barres- 30 jeux de barres)	64
III.5.8 Interprétation	65
Conclusion générale	67
Bibliographie	69

Liste de figure

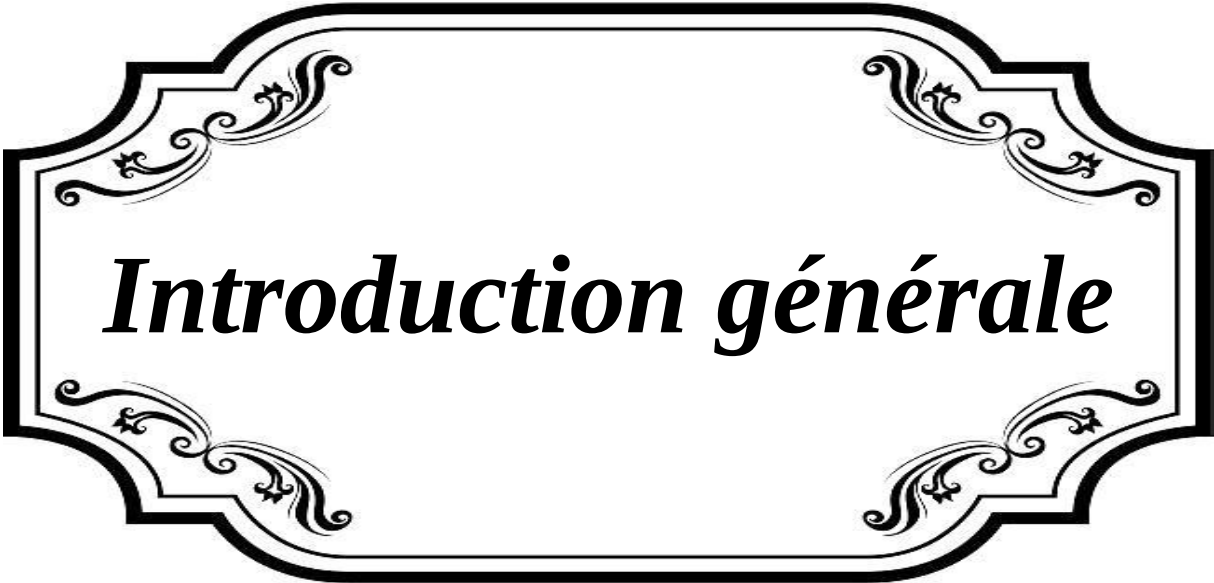
	Page
Chapitre I:Généralité sur la puissance réactive et la tension dans les réseaux électriques	
Figure I.1 Exemple de fluctuation de la fréquence	06
Figure I.2 Exemple de variations rapide de la tension	07
Figure I.3. Creux de tension	08
Figure I.4. Exemple de cas de surtensions transitoires	09
Figure I.5 Déséquilibre de tension	10
Figure I.6 représentations graphiques	11
Figure I.7 Circuit équivalent en n d'une ligne électrique	12
Figure I.8 Impédance série d'une ligne électrique	12
Figure I.9 Susceptance shunt d'une ligne électrique	13
Figure I.10 Circuit équivalent du réseau électrique.	14
Figure I.11 Diagramme vectoriel associé au circuit précédent	14
Chapitre II:Etudes les dispositifs FACTS	
Figure II.1 Schéma du SVC	23
Figure II.2 présentation d'un Compensateur SVC	24
Figure II.3 Fonctionnement du Compensateur SVC	25
Figure II.4 Principe d'un compensateur synchrone statique	25
Figure II.5 Structure de STATCOM	26
Figure II.6 Caractéristique statique du STATCOM	27
Figure II.7 Principe de la compensation série	28
Figure II.8 Amélioration du profil de tension d'un système de puissance simple	28
Figure II.9 Amélioration de la marge stabilité transitoire à l'aide d'un condensateur série	29
Figure II.10 Insertion d'un TCSC sur une ligne	30
Figure II.11 Deux schémas de compensations série typiques	30

Figure II.12 Schéma de base du SSSC	30
Figure II.14 Caractéristique statique du SSSC	31
Figure II.15 Compensateur Unifier UPFC (Unified power flow Controller	31
Figure II.16 Configuration de base du circuit d'un contrôleur de transit de puissance unifié (UPFC)	33
Chapitre III: Etude d'un compensateur shunt : SVC	
Figure III.1 la caractéristique en V d'un SVC	38
Figure III.2 Variation de la puissance réactive en fonction du courant	39
Figure III.3 SVC idéal	39
Figure III.4 Caractéristiques idéale $V = f(I_S)$ du SVC	39
Figure III.5 Caractéristiques d'un SVC réel	40
Figure III.6 Schéma simplifié du SVC	41
Figure III.7 Organigramme représentant la variation	41
Figure III.8 La variation de susceptance en fonction de l'angle d'amorçage On remarque que B_e change de signe lorsque α varie figure. (3.8).	42
Figure III.9 Variation de la susceptance en fonction de α pour valeur de X_L	43
Figure III.10. Schéma d'un réseau test de 9 jeux de barres	45
Figure III.11 . Variation de la tension – cas normal	49
Figure III.12. Variation de la tension – cas rupture de la ligne (1-2)	50
Figure III.13. Variation de la tension en fonction de l'incrément de la charge	53
Figure III.14. la Puissance réactive dans (réseau 9 jeux de barres) –cas normal	54
Figure III.15. Variation l'angle alphas (degré) en fonction de jeux de barres –cas normal	54
Figure III.16. la Puissance réactive dans (réseau 9 jeux de barres) –cas normal	55

Figure III.17. Schéma d'un réseau test de 30 jeux de barres	56
Figure III.18. Variation de la tension – cas normale	59
Figure III.19. Variation de la tension – cas rupture de la ligne (27-30)	59
Figure III.20. Variation l'angle alphas (degré) en fonction de jeux de barres – cas normal	60
Figure III.21. Variation de la tension en fonction de l'incrément de la charge	64

Liste de Tableau

	Page
Chapitre I: Généralité sur la puissance réactive et la tension dans les réseaux électriques	
Tableau I.1. Quelques dispositifs de contrôle utilisés dans le problème tension/puissance réactive.	18
Chapitre III: Etude d'un compensateur shunt : SVC	
Tableau III-2: Résultats des tensions du réseau électrique – cas rupture de la ligne (1-2)	50
Tableau III.3.a cas sans compensation	51
Tableau III.8.b cas avec compensation	62
Tableau III.9. cas de l'augmentation de la charge avec : 20 %, 100%	63
Tableau III.5. présente (Bilan de la puissance réactive)	65
Tableau III.6): Résultats des tensions du réseau électrique – cas normale	57
Tableau III-7: Résultats des tensions du réseau électrique – cas rupture de la ligne (27-30)	58
Tableau III.3.a cas sans compensation	51
Tableau III.8.b cas avec compensation	62



Introduction générale

Introduction générale

L'industrialisation et la croissance de la population sont les premiers facteurs pour lesquels la consommation de l'énergie électrique augmente régulièrement. Ainsi, pour avoir un équilibre entre la production et la consommation, il est à première vue nécessaire d'augmenter le nombre de centrales électriques, de lignes, de transformateurs etc., ce qui implique une augmentation de coût et une dégradation du milieu naturel. En conséquence, il est aujourd'hui important d'avoir des réseaux maillés et de travailler proche des limites de stabilité afin de satisfaire ces nouvelles exigences [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 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 Trois chapitres:

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

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

Les grandes entreprises électriques cherchent toujours à maintenir la stabilité de leurs réseaux électriques, mais la situation dans les pays à forte croissance de la consommation est très difficile en raison des complexités auxquelles sont confrontés les opérateurs de ces réseaux, y compris les restrictions économiques, politiques et environnementales, en plus de la augmentation de la taille des réseaux et présence de longues lignes d'interconnexion...

Il n'est pas aisé de maintenir la valeur de la tension électrique dans la plage autorisée en tout point du réseau électrique, notamment aux heures de pointe (périodes de forte consommation), la gestion du réseau électrique doit donc surveiller le niveau de tension et de réactif puissance en plus de nombreux paramètres techniques.

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 Tension

I.2.1. La qualité de la tension

La qualité de l'énergie désigne plus concrètement la qualité de la fourniture électrique. Celle-ci dépend de trois facteurs que sont la continuité d'alimentation, la qualité de l'onde de tension et la qualité de service.

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 1 %.

La continuité de l'alimentation couvre les pannes de réseau ou les pannes comme La qualité de l'onde de tension détermine les perturbations liées à la forme de l'onde de tension transmise par le réseau, qui sont susceptibles d'altérer le fonctionnement des appareils électriques connectés au réseau, voire de les endommager L'un des types les plus importants de ces perturbations est la basse tension.

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.

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 :
 - court-circuit dans un poste, une ligne aérienne, un câble souterrain, etc.
 - causes atmosphériques (foudre, givre, tempête...).
 - matérielles (vieillessement d'isolants...).
 - humaines (fausses manœuvres, travaux de tiers...).
- ✓ Installations perturbatrices :
 - fours à arc.
 - Soudeuses.
 - variateurs de vitesse.
 - toutes applications de l'électronique de puissance, téléviseurs, éclairage fluorescent
 - 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 (I .1).

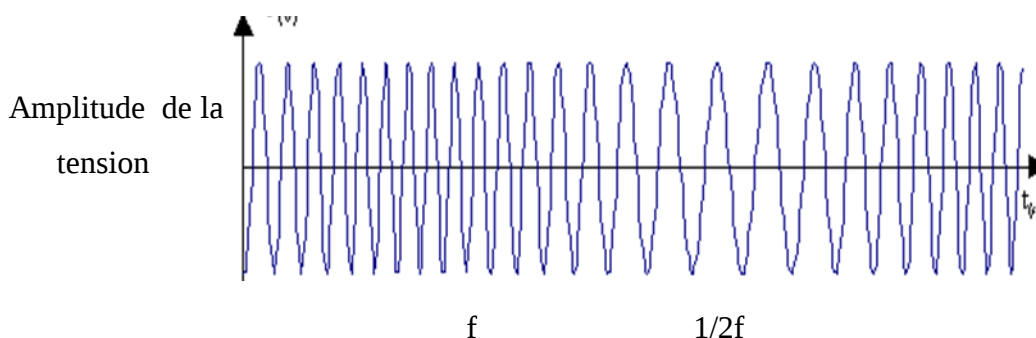


Figure 1.1 Exemple de fluctuation de la fréquence

En Effet, d'une part, une fréquence évoluant sans cesse rendrait l'électricité inutilisable pour de multiples usages, d'autre part, la plupart des composants du système électrique sont

conçus pour fonctionner dans une plage de fréquence donnée, en dehors de laquelle des dysfonctionnements graves de matériels peuvent apparaître.

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 (I.2), sont provoquées par des variations rapides de puissance absorbée ou produite par des installations telles que les soudeuses, fours à arc, éoliennes, etc.

Amplitude de la tension et les 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 %.

On dit que les fluctuations de tension se produisent lorsque des variations périodiques ou une série de changements aléatoires se produisent dans la tension d'un réseau électrique.

En revanche, les différences de tension sont définies comme des différences de valeur efficace ou de valeur de tension maximale entre deux niveaux successifs qui sont maintenus pendant une période finie indéfinie.

Sa durée varie de quelques millisecondes à environ 10 secondes et avec une amplitude ne dépassant pas $\pm 10\%$ de la valeur nominale.

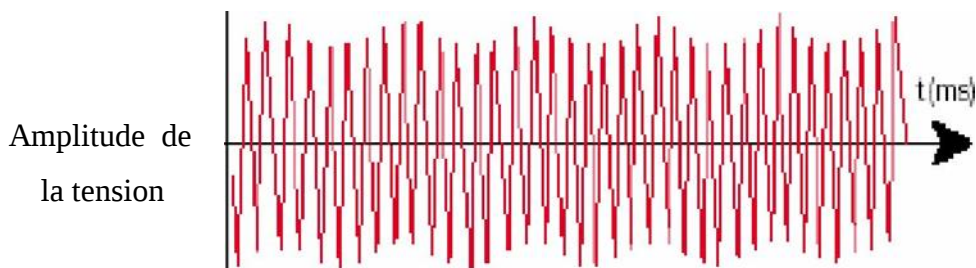


Figure I.2 Exemple de variations rapide de la tension

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 (I.3). Seules les chutes de tension supérieures à 10 % sont considérées ici (les amplitudes inférieures rentrent dans la catégorie des «fluctuations de tension»). Leur durée peut aller de 10 ms à plusieurs secondes, en fonction de la localisation du court-circuit et du fonctionnement des organes de protection (les défauts sont normalement éliminés en 0.1-0.2 s en HT, 0.2 s à quelques secondes en MT) [5].

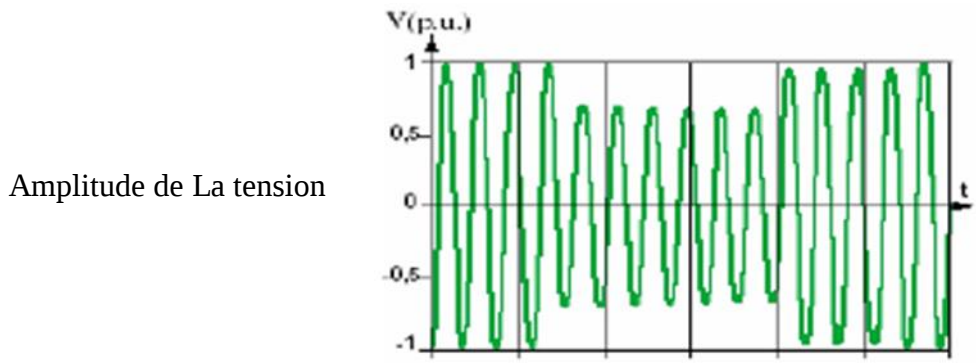


Figure I.3. Creux de tension

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, voire aux équipements de production...).

I.2.7. Interruption courte ou coupure brève

L'interruption courte est la perte complète ou la disparition de la tension d'alimentation pendant une période de temps de 1/2 cycle jusqu'à 3 s. Elle se produit quand la tension d'alimentation ou le courant de charge diminue à moins de 0.1 p.u [3].

Le dégagement du défaut de tension et les coupures brèves sont principalement produits par les courts-circuits imputables aux incidents naturels du réseau et aux manoeuvres d'organes de protection éliminant ces défauts. Ils sont également la conséquence d'appel de puissances importantes lors de la mise en service de certaines charges du réseau.

I.2.8. Bosses de tension

La bosse de tension est une augmentation de la tension au dessus de la tension nominale 1.1 p.u pour une durée de 0.5 cycle à 60 s. Elle est caractérisée par son amplitude et sa durée. Elle peut causer l'échauffement et la destruction des composants.

I.2.9. 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.2.10. Tension et / ou courant transitoire

Les surtensions transitoires illustrées sur la figure (I.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.

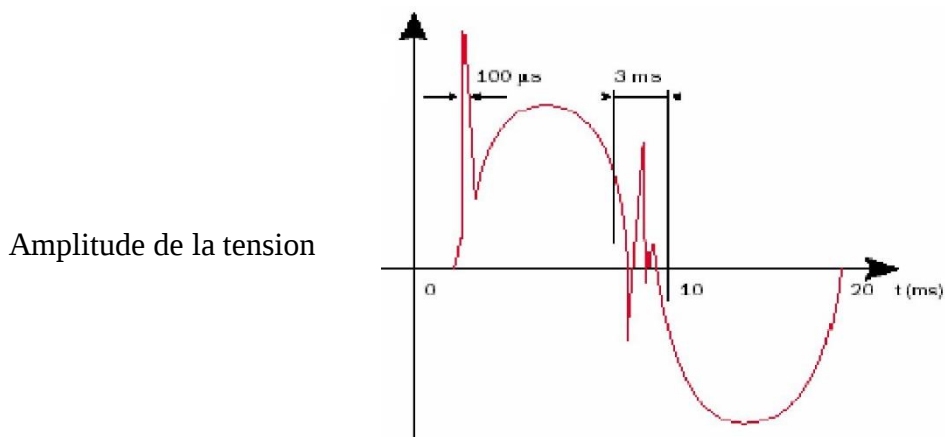


Figure I.4. Exemple de cas de surtensions transitoires

I.2.11. 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 (I.5). Ceci est fréquent pour les réceptrices monophasées basses tensions. Mais cela peut également être engendré, à des tensions plus élevées, par des machines à souder, des fours à arc ou par la traction ferroviaire. Un système triphasé est déséquilibré lorsque les trois tensions ne sont pas égaux en amplitude.

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

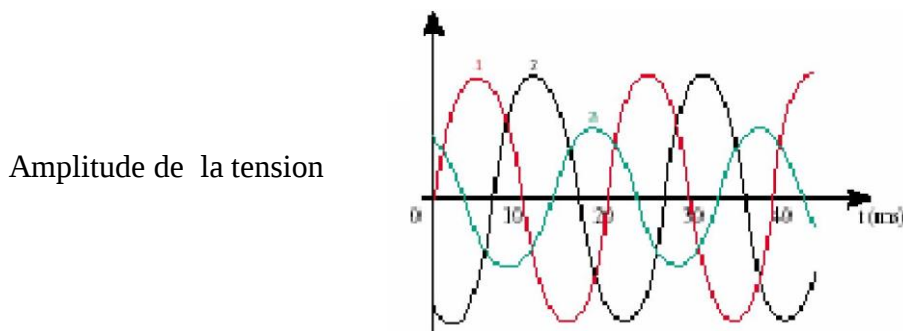


Figure I.5 Déséquilibre de tension

I.3. La Puissance Réactive

Le transport de la puissance réactive à longue distance présente une série d'inconvénients tels que les chutes de tension considérables, les pertes de ligne par effet joule et moins de capacité pour transporter la puissance active.

A l'exception de ces aspects purement statiques, la puissance réactive peut jouer un grand rôle dans d'autres aspects dynamiques, tels que les fluctuations de tension produites par les variations soudaines des charges, le phénomène flicker, et une meilleure marge pour la stabilité.

Afin de garantir une bonne qualité d'énergie il est nécessaire de satisfaire l'équilibre offre-demande de l'énergie réactive, de fournir une tension aussi régulière que possible et de respecter un certain nombre de contraintes techniques.

I.3.1. Le facteur de puissance

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

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

P : puissance active (W)

S : puissance apparente (VA)

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.
- 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.3.2. Les représentations graphiques

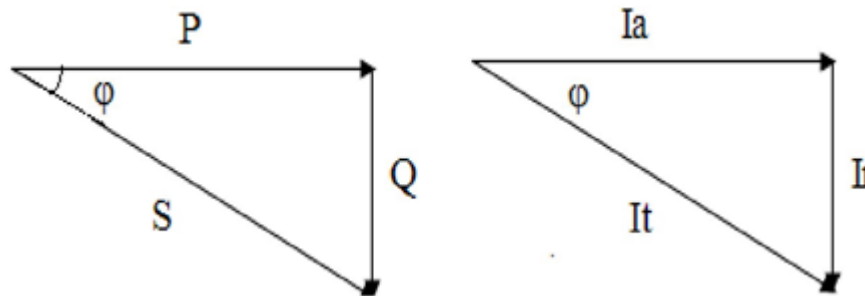


Figure I.6 représentations graphiques

$$S^2 = P^2 + Q^2 \quad (\text{I-2})$$

I.3.3. La tangente

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

$$\tan \varphi = \frac{Q}{P} \quad (\text{I-3})$$

Q : puissance éactive (VAR)

P : puissance active (W)

I.3.4. Bilan de la puissance réactive

L'expression suivante nous donne le bilan énergétique :

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

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 .3.5. Transport de la puissance active et réactive

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

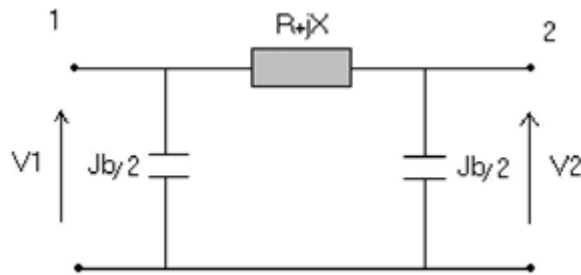


Figure I.7 Circuit équivalent en π d'une ligne électrique

Les lignes sont normalement spécifiées par :

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

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

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 series

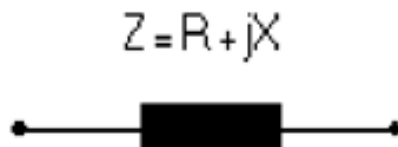


Figure I.8 Impédance série d'une ligne électrique

Les pertes dans les impédances série sont donnés par:

$$S = V.I^* \quad (I-5)$$

$$V = Z.I \text{ c'est-à-dire que } S = Z.I.I^* = Z (Ir + j Ii) (Ir - j Ii) \quad (I-6)$$

$$S = P + j Q = Z (Ir^2 + Ii^2) = Z|I|^2 \quad (I-7)$$

$$\text{Avec : } P = R|I|^2 \text{ et } Q = X|I|^2$$

$$\text{Si } R = 0 \text{ alors } P = 0$$

$$X = 0 \text{ alors } Q = 0$$

b) Susceptance shunt

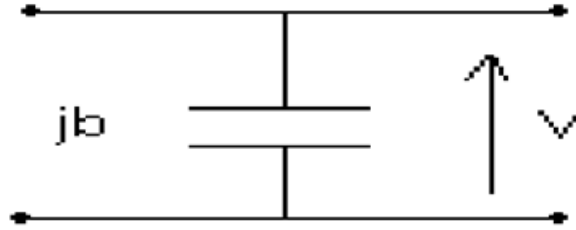


Figure I.9 Susceptance shunt d'une ligne électrique

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

$$V = Vr + j Vi \quad (I-8)$$

$$I = j B V = j B (Vr + j Vi) = -B Vi + j B Vr \quad (I-9)$$

$$I^* = -B Vi - j B Vr = -B (Vi + j Vr) \quad (I-10)$$

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

$$S = VI^* = (Vr + j Vi) (-B (Vi + j Vr)) = -B (Vr + j Vi) (Vi + j Vr) \quad (I-11)$$

$$S = -j B (Vr^2 + Vi^2) = -j B |V|^2 \quad (I-12)$$

$$\text{Comme } S = P + jQ, \text{ donc } P = 0 \text{ et } Q = -j B |V|^2$$

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

I .3.6. 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

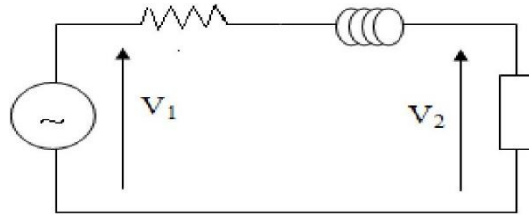


Figure I.10 Circuit équivalent du réseau électrique.

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.

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

Si nous traçons le diagramme vectoriel de ce circuit

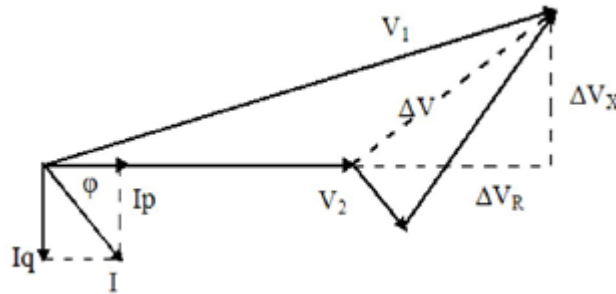


Figure I.11 Diagramme vectoriel associé au circuit précédent.

V_2 étant pris comme référence

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

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

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

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

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

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

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

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

$$|V_1|^2 = (V_2 + \Delta VR)^2 + (\Delta VX)^2 \quad (I-19)$$

$$|V_1|^2 = (V_2 + \frac{RP_D + XQ_D}{V_2})^2 + (\frac{XP_D - RQ_D}{V_2})^2 \quad (I-20)$$

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

$$|V_1|^2 = (V_2 + \frac{RP_D + XQ_D}{V_2})^2 \quad (I-21)$$

$$V_1 - V_2 = (\frac{RP_D + XQ_D}{V_2}) \quad (I-22)$$

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

$$\Delta V = V_1 - V_2 \approx \frac{XQ_D}{V_2} \quad (I-23)$$

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

b) Contrôle de la tension

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

$$\Delta V = V_1 - V_2 = \frac{RP + XQ_D}{V_2} \approx \frac{XQ_D}{V_2} \quad (I-24)$$

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

- Augmentation de la tension de départ V_1 .
- Diminution de la réactance de la ligne par insertion de réactance capacitive.
- Fourniture de la puissance réactive au niveau des usagers (compensation de

la puissance réactive). Cette compensation peut être obtenu soit par :

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

I.3.7. Moyens de Compensation de la puissance réactive

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

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

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

- le premier consiste à suivre les fluctuations périodiques. Celles-ci sont connues, tout au moins pour les charges dans une large mesure prévisible. Une grande part de l'ajustement peut donc être réalisée à l'aide de moyen dont l'action est discontinue et le temps de réponse relativement long. Cette catégorie comprend les batteries de condensateurs et les inductances installées sur les réseaux [8].
- 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 [8].

I .3.8. 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 .3.8.1. Les groupes de production (générateurs)

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

I .3.8.2. 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 .3.8.3. 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 .3.8.4. 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 .3.8.5. 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 I.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:

Etudes les dispositifs

FACTS

II.1. Introduction

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

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

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

Les dispositifs FACTS en générale permettent donc un contrôle amélioré des systèmes électriques déjà en place. Ces dispositifs font en général appel à de l'électronique de puissance. Ces éléments agissent en fait comme des impédances dont la valeur change en fonction de l'angle d'amorçage. Cet angle d'amorçage constitue donc une variable de commande du système. Pour les différentes raisons évoquées dans l'introduction générale, les dispositifs FACTS ont un rôle important à jouer dans le contrôle des transits de puissance et dans le maintien de conditions d'exploitation sûres du réseau de transport. Ce chapitre a

pour but de mettre en évidence les caractéristiques et le potentiel des différents FACTS développés à ce jour.

Il commence par un bref rappel sur les différentes techniques de compensation (shunt, série et shunt-série). Le concept FACTS est ensuite présenté de manière générale et une classification des dispositifs est proposée.

II.2 Dispositifs FACTS

Selon l'IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), la définition du terme FACTS est la suivante: Systèmes de Transmission en Courant Alternatif comprenant des dispositifs basés sur l'électronique de puissance et d'autres dispositifs statique utilisés pour accroître la contrôlabilité et augmenter la capacité de transfert de puissance du réseau. Avec leurs aptitudes à modifier les caractéristiques apparentes des lignes, les FACTS sont capables d'accroître la capacité du réseau dans son ensemble en contrôlant les transits de puissances. Les dispositifs FACTS ne remplacent pas la construction de nouvelles lignes. Ils sont un moyen de différer les investissements en permettant une utilisation plus efficace du réseau existant [3].

II.2.1 Classification des dispositifs FACTS

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

- a) **La première génération** : est basée sur les thyristors classiques. Ceux-ci sont généralement utilisés pour enclencher ou déclencher les composants afin de fournir ou absorber de la puissance réactive dans les transformateurs de réglage.
- b) **La deuxième génération** : dite avancée, est née avec l'avènement des semi-conducteurs de puissance commandables à la fermeture et à l'ouverture, comme le thyristor GTO. Ces éléments sont assemblés pour former les convertisseurs de tension ou de courant afin d'injecter des tensions contrôlables dans le réseau.
- c) **Une troisième génération** : de FACTS utilisant des composants hybrides et qui est adaptée à chaque cas. Contrairement aux deux premières générations, celle-ci n'utilise pas de dispositifs auxiliaires encombrants tels que des transformateurs pour le couplage avec le réseau.

II.2.2 Compensateurs shunts

Les compensateurs shunts injectent du courant au réseau via le point de leur raccordement. Leur principe est basé sur une impédance variable est connectée en parallèle sur un réseau, qui consomme (ou injecte) un courant variable. Cette injection de courant modifie les puissances actives et réactives qui transitent dans la ligne. Les compensateurs shunts les plus utilisés sont les SVC et les STATCOM[9.10].

II.2.2.1 Compensateurs parallèles à base de thyristors

a) SVC (Static Var Compensator)

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

Un SVC est généralement constitué d'un ou plusieurs batteries de condensateurs fixes (CF) commutables soit par disjoncteur, ou bien par thyristors (Thyristor Switched Capacitor TSC) et d'un banc de réactances contrôlable (Thyristor controlled Reactor) (RCT) et par des réactances commutables (Thyristor Switched Reactor TSR), et d'autre part on trouve des filtres d'harmoniques. Pour avoir un temps de réponse plus rapide et pour éliminer les parties mécaniques les RCT (Réactances commandés par thyristor) ont fait leur apparition vers la fin de années soixante. Elles sont constituées d'une inductance en série avec un gradateur (deux thyristor tête-bêche). Chaque thyristor conduit pendant moins demi-période de la pulsation du réseau. Le retard à l'amorçage α permet de régler l'énergie réactive absorbée par le dispositif. Figure (II.1) [11] .

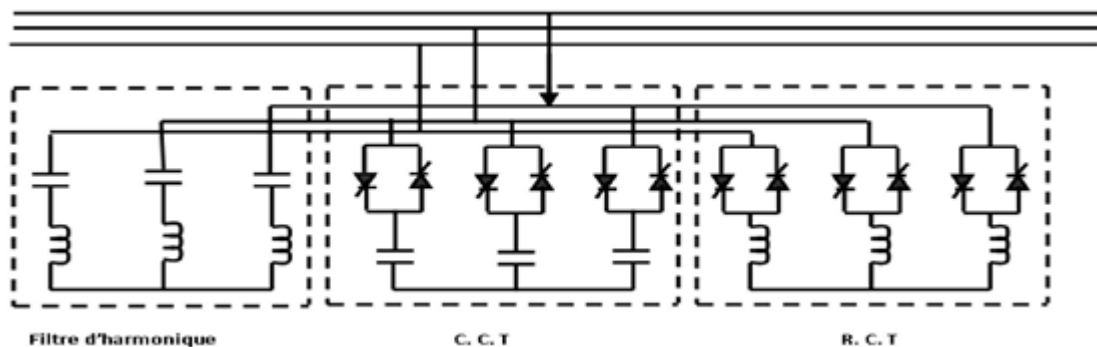


Figure II.1 Schéma du SVC

b) Principe de fonctionnement

La figure (II.2) donne une représentation schématique monophasée d'un compensateur statique. Il est composé d'un condensateur avec une réactance capacitive X_C et d'une bobine d'inductance avec la réactance X_L . Ce système utilise l'angle d'amorçage α des thyristors pour contrôler le courant dans la réactance alors que le contrôle de la puissance réactive par cette méthode est rapide et d'une façon continu [12].

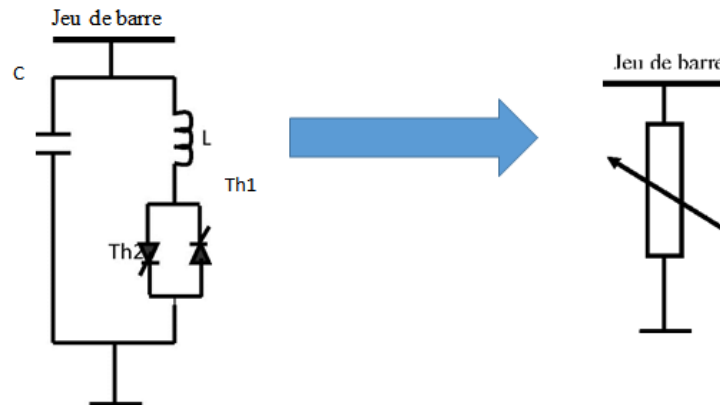


Figure II.2 présentation d'un Compensateur SVC

Le RCT ne peut absorber que de l'énergie réactive, puisque il est constitué d'élément inductif. C'est pour cela que l'on associe ses dispositifs avec des bancs de condensateur commandé par thyristor (CCT) qui fournit de l'énergie réactive au réseau. Des thyristors fonctionnent cette fois en pleine conduction (une période complète de la pulsation du réseau). Le réglage de l'énergie absorbée par RCT, le bilan global est la somme de deux énergies. Ce dispositif est associé à des filtres LC accordés sur les harmoniques à éliminer l'association de ces dispositifs RCT, CCT, bancs des capacités fixes et filtres d'harmoniques constitue le compensateur hybride, plus connu sous le nom de SVC dont le premier dispositif à été installé en 1979 en Afrique de Sud. La caractéristique statique de SVC est donnée par la figure (2.3) trois zones sont distinctes :

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

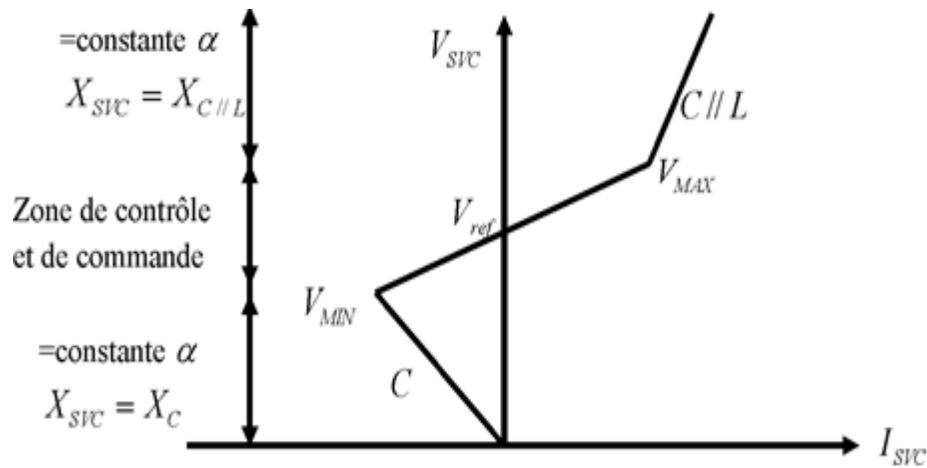


Figure II.3 Fonctionnement du Compensateur SVC

II.2.2.2 Compensateurs parallèles à base de GTO thyristors

a) Compensateur synchrone statique(STATCOM)

Le compensateur synchrone statique STATCOM (Static Synchronous Compensator) est fondé sur une source de tension synchrone à semi-conducteurs, analogue à une machine synchrone qui fournit un ensemble équilibré de trois tensions sinusoïdales à la fréquence fondamentale, avec des amplitudes et des angles de phases réglables. Un tel dispositif est toutefois exempt d'inertie [11].

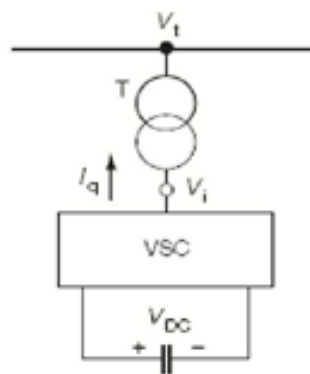


Figure II.4 Principe d'un compensateur synchrone statique

b) Principe du fonctionnement

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

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

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

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

Le STATCOM présente plusieurs avantages :

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

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

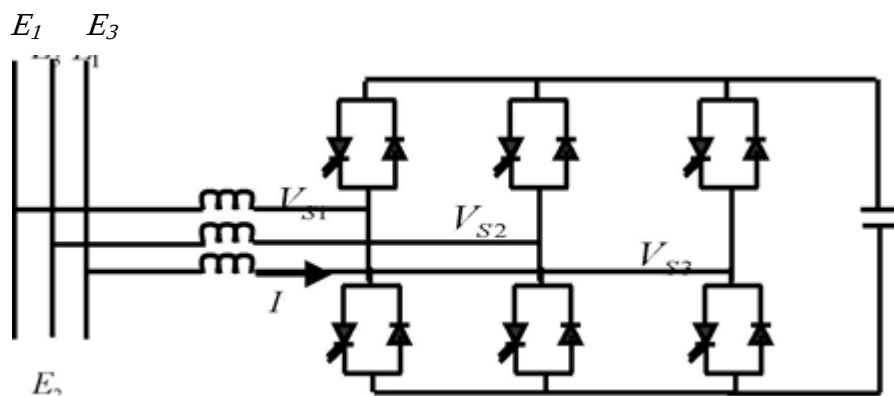


Figure II.5 Structure de STATCOM

Le rôle de STATCOM est d'échanger d'énergie réactive avec le réseau. Pour ce faire, l'onduleur est couplé au réseau par l'intermédiaire d'une inductance triphasée, celui-ci est en général l'inductance de fuite du transformateur de couplage.

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

Le fonctionnement peut être décrit de façon suivante :

- Si $V_S < E$, le courant circulant dans l'inductance est déphasé de $+\frac{\pi}{2}$

par rapport à la tension E et le courant est capacitif .

- 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 .

- Si $V_S = E$, le courant circulant dans l'inductance est nul, il n'y a pas d'échange d'énergie.

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

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

Contrairement au SVC, il n'y a pas d'élément capacitif qui peut entraîner des résonances avec les éléments inductifs. La caractéristique statique de ce convertisseur est donnée par la figure (II.6) ce dispositif à l'avantage de pouvoir fournir un courant constant important même lorsque la tension E diminue, contrairement au SVC[13].

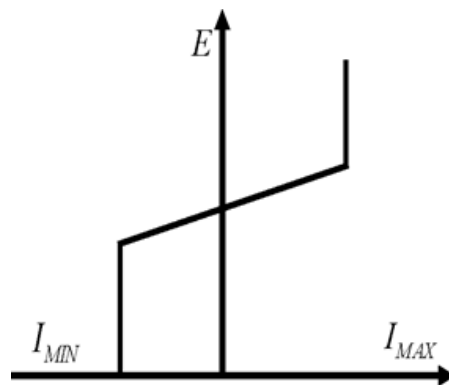


Figure II.6 Caractéristique statique du STATCOM

II.2.3 Compensation série

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

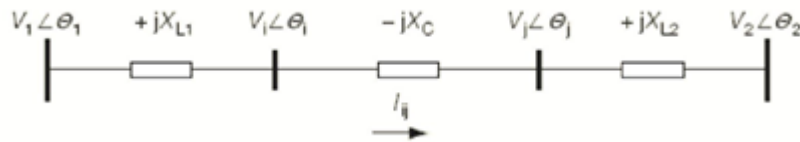


Figure II.7 Principe de la compensation série

II.2.3.1 Principe de fonctionnement

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

Un condensateur série est en mesure de compenser la chute de tension sur une ligne de transport due à l'inductance série. A faible charge, la chute de tension est plus faible et la tension de compensation série est plus basse. Lorsque la charge augmente et que la chute de tension devient plus importante, la contribution par le compensateur série augmente et la tension du système est réglée de manière correspondante. La compensation série élargit aussi la zone de stabilité de la tension en réduisant la réactance de la ligne. De cette façon, elle aide à prévenir les chutes de tension. Montre que la stabilité de la tension s'accroît de P1 au niveau P2 plus élevé [12].

II.2.3.2 Application

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

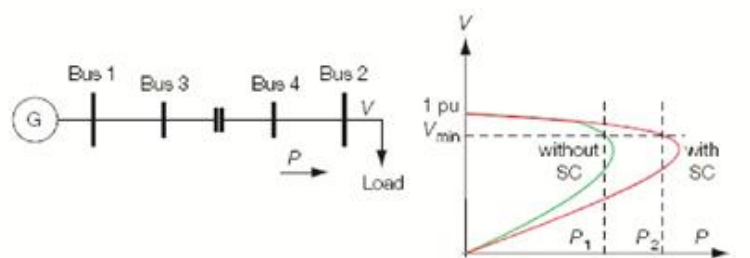


Figure II.8 Amélioration du profil de tension d'un système de puissance simple

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

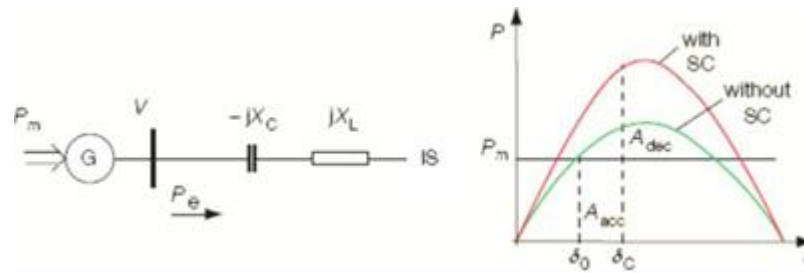


Figure II.9 Amélioration de la marge stabilité transitoire à l'aide d'un condensateur série

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 [14].

II.2.3.3 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.

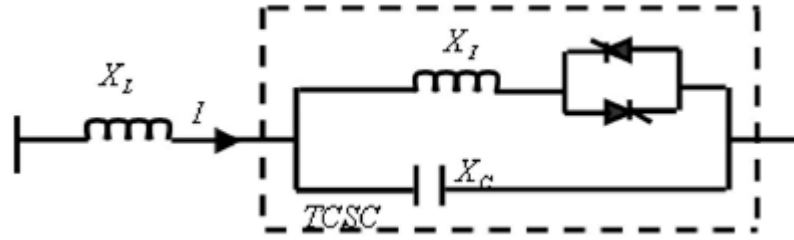


Figure II.10 Insertion d'un TCSC sur une ligne

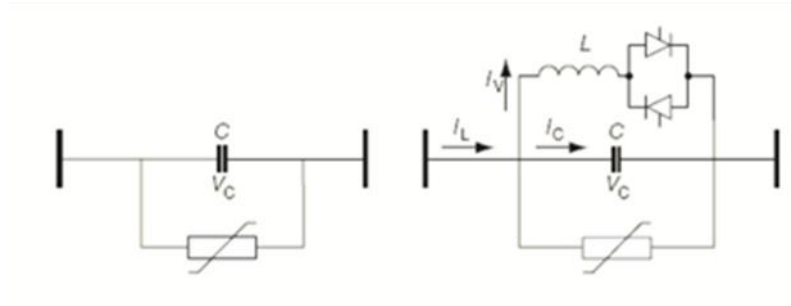


Figure II.11 Deux schémas de compensations série typiques
avec un condensateur série fixe et un TCSC

II.2.3.4 Compensateurs séries à base de GTO thyristor

a) 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 (Figure II.12).

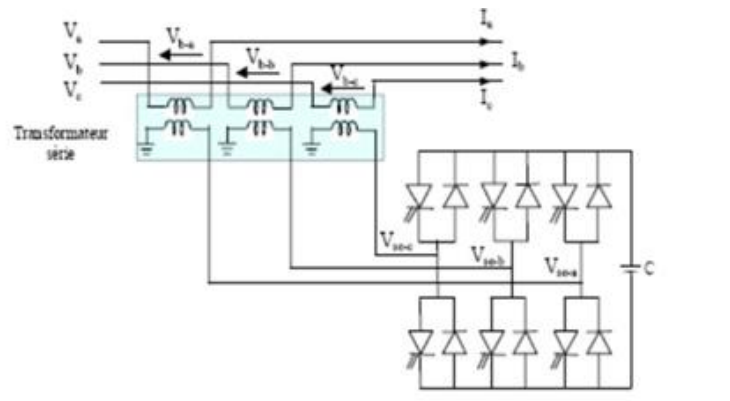


Figure II.12 Schéma de base du SSSC

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) [14].

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 [11].

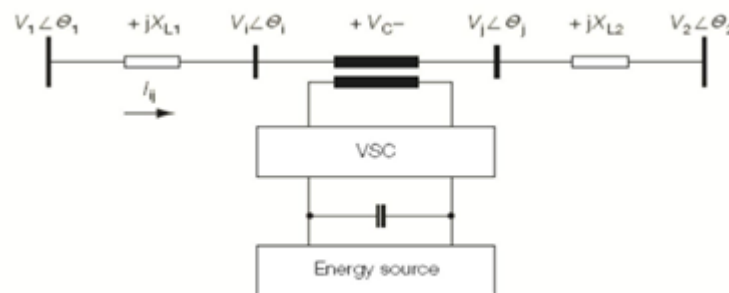


Figure II.13 Configuration de base d'un compensateur série synchrone statique (SSSC)

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

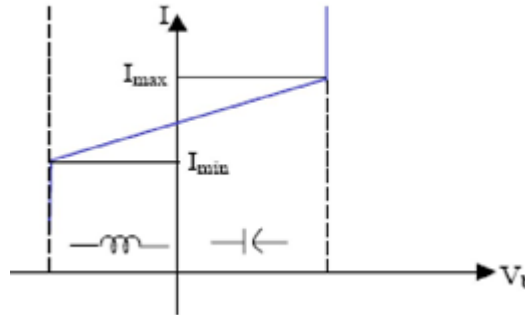


Figure II.14 Caractéristique statique du SSSC

II.2.4 Compensateurs hybrides série – parallèle

II.2.4.1 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.

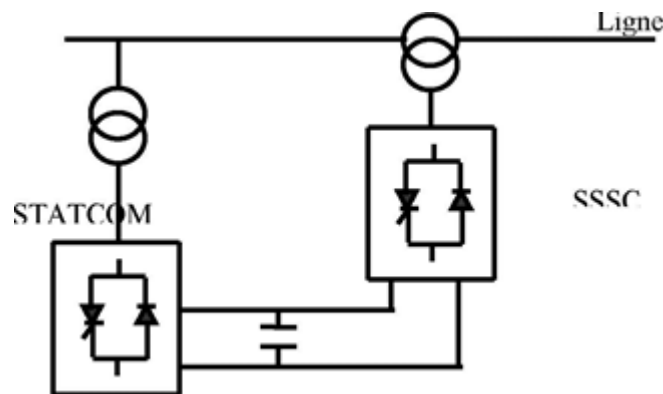


Figure II.15 Compensateur Unifier UPFC (Unified power flow Controller)

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

a) Principe de fonctionnement

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

convertisseur 2 produit ou absorbe la puissance réactive nécessaire localement et produit de la puissance active comme résultat de l'injection série de tension.

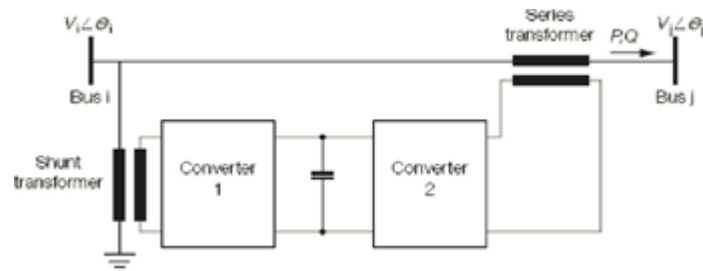


Figure II.16 Configuration de base du circuit d'un contrôleur
de transit de puissance unifié (UPFC)

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 [14].

II.2.4.2 IPFC (Interline Power Flow Controller)

L'IPFC a été proposé par Gyugyi, Sen et Schuder en 1998 afin de compenser un certain nombre de lignes de transmission d'une sous-station. Sous sa forme générale, l'IPFC utilise des convertisseurs DC-DC placés en série avec la ligne à compenser. En d'autres termes, l'IPFC comporte un certain nombre de SSSC.

il peut être utilisé afin de conduire des changements de puissances entre les lignes du réseau [15].

II.3 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	/	++	+++	+++	+++	+++

II.4 Les avantages de la technologie des dispositifs FACTS

- Contrôle le transit de la puissance active.
- Augmente la sécurité des systèmes énergétiques (augmentation de la limite de la stabilité transitoire, amortissement des oscillations ...)
- Réduit le transit de l'énergie réactive.
- Optimise les puissances générées, donc réduit le coût de production de l'énergie.
- Améliorée l'interconnexion et l'échange énergétique [16].

II.5 Conclusion

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

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

Chapitre III:

Etude d'un compensateur

shunt : SVC

III.1 Introduction

Les dispositifs FACTS sont des moyens de contrôle rapide et flexibles insérés dans un réseau pour satisfaire plusieurs besoins, tels que la réparation correct des puissances actives, la compensation de la puissance réactive et le renforcement de la stabilité des réseaux électriques. Les dispositifs FACTS ils sont capable de réaliser plusieurs fonctions, telles que : augmentation de la capacité de transfert, renforcement de la stabilité et amélioration économique du réseau électrique. L'implantation d'un dispositif nécessite de nouvelles méthodes d'études et d'analyses des réseaux électriques. Dans ce chapitre, nous donne un exemple du modèle utilisée au l'implantation de dispositif dans le réseau, et quelques modèles des régulations SVC [10].

III.2 Caractéristique d'un compensateur statique

III.2.1 Caractéristique en V d'un compensateur statique

Ajustons l'angle α des thyristors commandant la branche inductive à 90° , de façon à obtenir la pleine conduction. Le courant est alors à sa valeur maximal, la droite L//C (figure (III.1)) montre la relation entre la tension U et le courant I_{SVC} .

$$I_{SVC} = \frac{U}{x_L // x_C} \quad (\text{III.01})$$

$$Q = \frac{U^2}{x_L} - \frac{U^2}{x_C} \quad (\text{III.02})$$

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

La coutume est d'apposer un signe (-) à ce courant capacitif pour le distinguer du courant inductif. La relation entre le courant et la tension est alors une nouvelle droite, désignée C (figure (III.1)).

$$I_{SVC} = \frac{U}{x_C} \quad (\text{III.03})$$

$$Q = \frac{U^2}{x_C} \quad (\text{III.04})$$

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

Cette figure pour : $X_C = 2 * X_L$

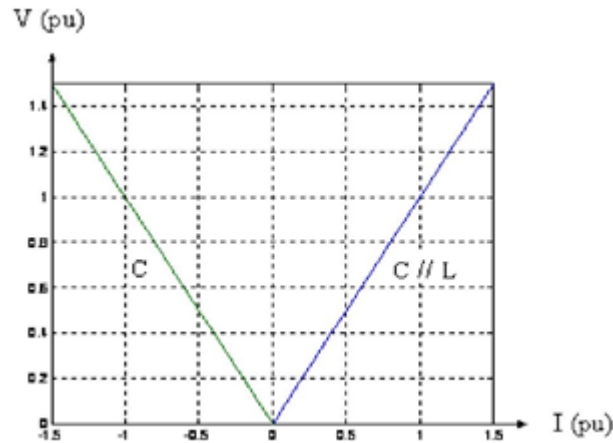


Figure III.1 la caractéristique en V d'un SVC

D'après cette courbe, on a un courant capacitif lorsque le condensateur est en service et l'inductance est débranchée donc le montage génère une puissance réactive et cette puissance est en fonction de la capacité du condensateur et de la tension. Lorsque les deux sont en service le montage génère ou consomme une puissance réactive [15].

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

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

Ces relations sont prises en compte sur la figure (III.2). Par conséquent, suivant les exigences imposées par les consommateurs et les lignes de transmission dans une sous-station, la puissance réactive Q doit varier entre une certaine valeur inductive Q_L et une certaine valeur capacitive Q_C avec : $Q_C = \frac{U^2}{X_C}$ [17]

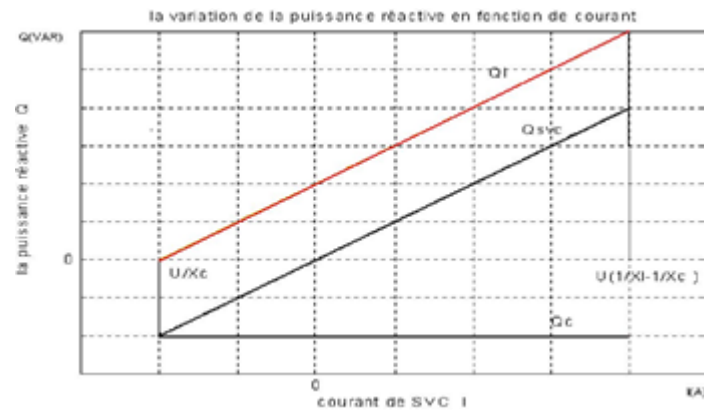


Figure III.2 Variation de la puissance réactive en fonction du courant

III.2.3 Caractéristique de SVC idéal

Il est considéré comme une inductance variable en parallèle avec un condensateur variable pour régler la tension au point où il est shunté [11].

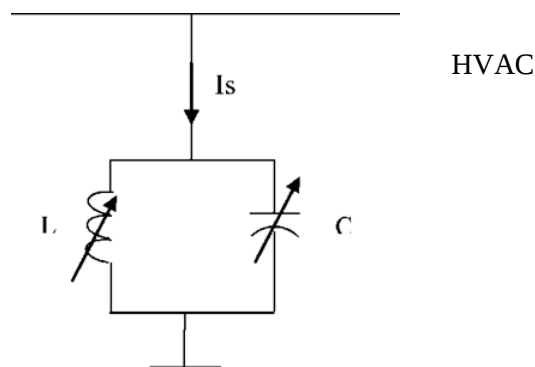


Figure III.3 SVC idéal

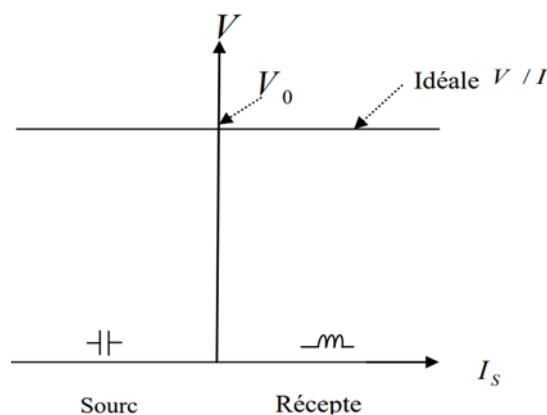


Figure III.4 Caractéristiques idéales $V = f(I_s)$ du SVC

III.2.4 caractéristique d'un SVC réel

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

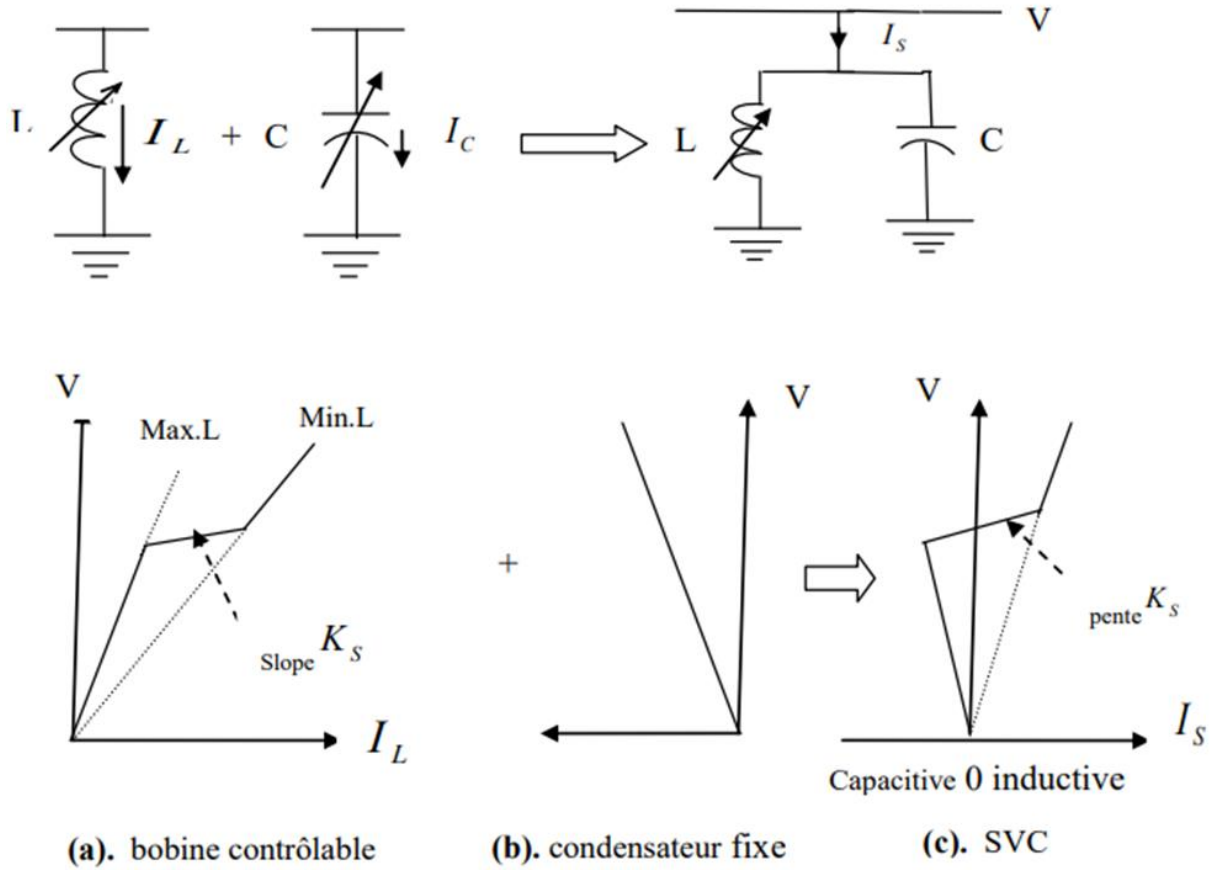


Figure III.5 Caractéristiques d'un SVC réel

III.3 Les équations de SVC [17]

Les modèles de SVC les plus courants sont des modèles statiques, car conçus pour des logiciels de répartition de charges. Lesquels sont destinés à des études statiques de réseau. Ils sont constitués d'éléments de réseaux : réactances, susceptance, nœuds, etc... Le modèle statique est constitué d'une susceptance B_e reliée entre le nœud de charge et le potentiel nul. La susceptance est définie comme la partie imaginaire de l'admittance. Les équations qui décrivent le comportement du SVC dans le réseau sont :

$$V_1 - V_{REF} + X_{SL} V_K B_e = 0 \quad (III.05)$$

$$Q_{SVC} - V_K^2 B_e = 0 \quad (III.06)$$

$$\pi X_C X_L B_e + \sin 2\alpha + \pi \left(2 - \frac{X_L}{X_C} \right) = 0 \quad (III.07)$$

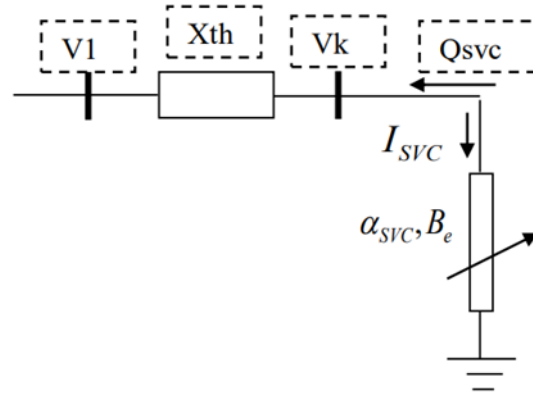


Figure III.6 Schéma simplifié du SVC

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 : $B_e = \frac{1}{X_e}$

$$B_e = \frac{\sin(2\alpha) - 2\alpha + \pi(2 - \frac{X_L}{X_C})}{\pi X_L} \quad (III.08)$$

$$X_e = \frac{\pi X_L}{\sin(2\alpha) - 2\alpha + \pi(2 - \frac{X_L}{X_C})} \quad (III.09)$$

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

la figure(III-7) représente Organigramme de la variation de l'angle d'amorçage en fonction de la tension à régler [18] .

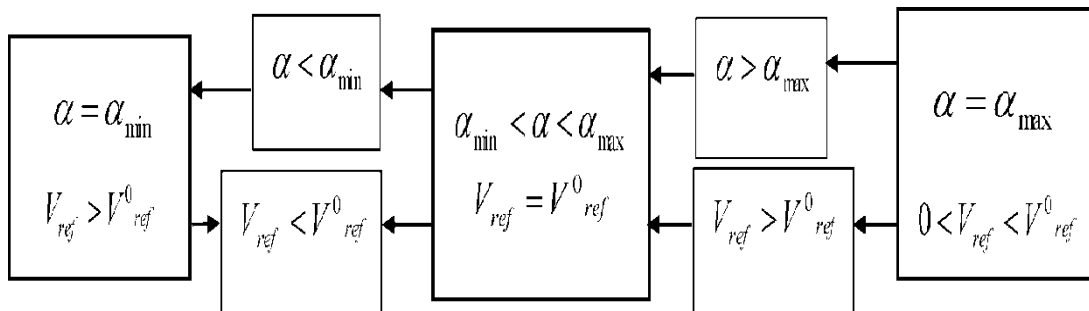


Figure III.7 Organigramme représentant la variation de l'angle d'amorçage en fonction du tension à régler.

La réactance contrôlée par les thyristors est en fonction de X_L, X_C, α .

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

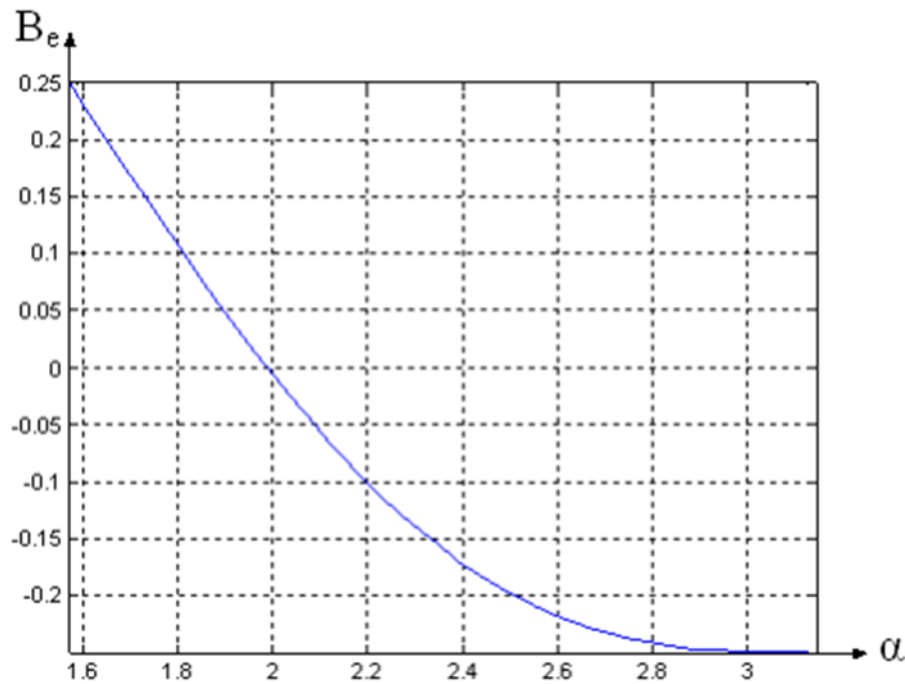


Figure III.8 La variation de susceptance en fonction de l'angle d'amorçage α

On remarque que B_e change de signe lorsque α varie figure. (III.8).

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

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

Par exemple :

Pour $X_L = 1(pu) = B_e \leq 0$, 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.

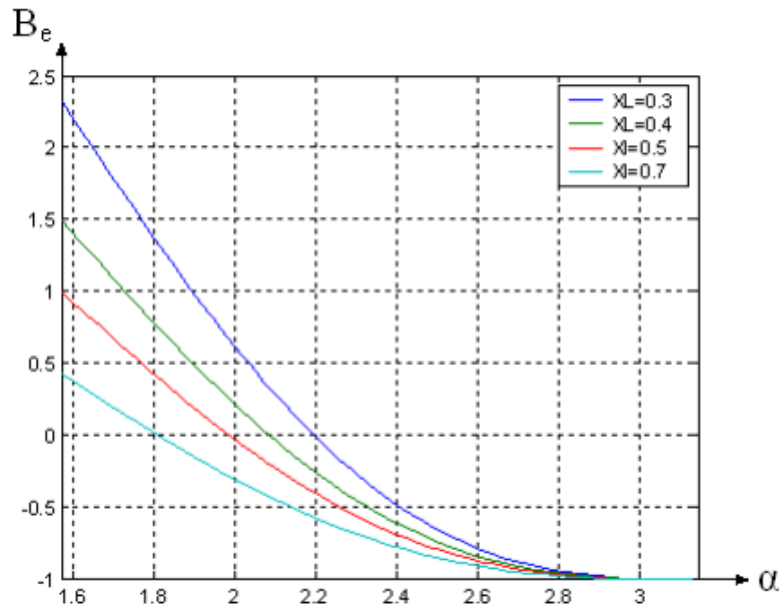


Figure II.9 Variation de la susceptance en fonction
de α pour valeur de X_L

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

L'étude de l'écoulement de puissance coordonne l'exploitation de toutes les ressources d'énergie et la répartition de la production entre les différents usagers, dont le but est d'obtenir l'exploitation la plus économique qui conduit à la meilleure utilisation de toutes les ressources, des prévisions concernant

la consommation et la production ont été 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 $S_{D1}, S_{D2}, \dots, S_{Dn}$,

les jeux de barres sont liés par des lignes qui sont caractérisés par Y_{bus} [19 . 20].

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 donnée par:

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

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

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

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

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

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

Pour le jeu de barres de contrôle :

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

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

Cette tension varie suivant une pente de régulation du compensateur statique. On peut donner un organigramme qui décrit les étapes de fonctionnement du SVC dans un réseau électrique. Le système de commande est basé sur les équations du tension, susceptance et l'énergie réactive fournie par le compensateur.

Le compensateur statique SVC permet de stabiliser très rapidement la tension de réseau à la valeur de consigne. Le système de commande lit en permanence la tension mesurée au primaire du transformateur de couplage. Cette tension est comparée avec la valeur de consigne. Si la tension change à la suite d'une manœuvre ou d'une instabilité de réseau. L'erreur est détectée par le système de commande. Celui-ci réajuste automatiquement la puissance réactive absorbée ou générée, et l'angle α de l'inductance. La susceptance du SVC vue du primaire du transformateur :

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

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

La tension est réglée suivant la caractéristique représentée par l'équation [19] .

III.5 Application:(programmation); compensation shunt avec SVC

III.5.1 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 générateur, 3 transformateur et 3 charges.

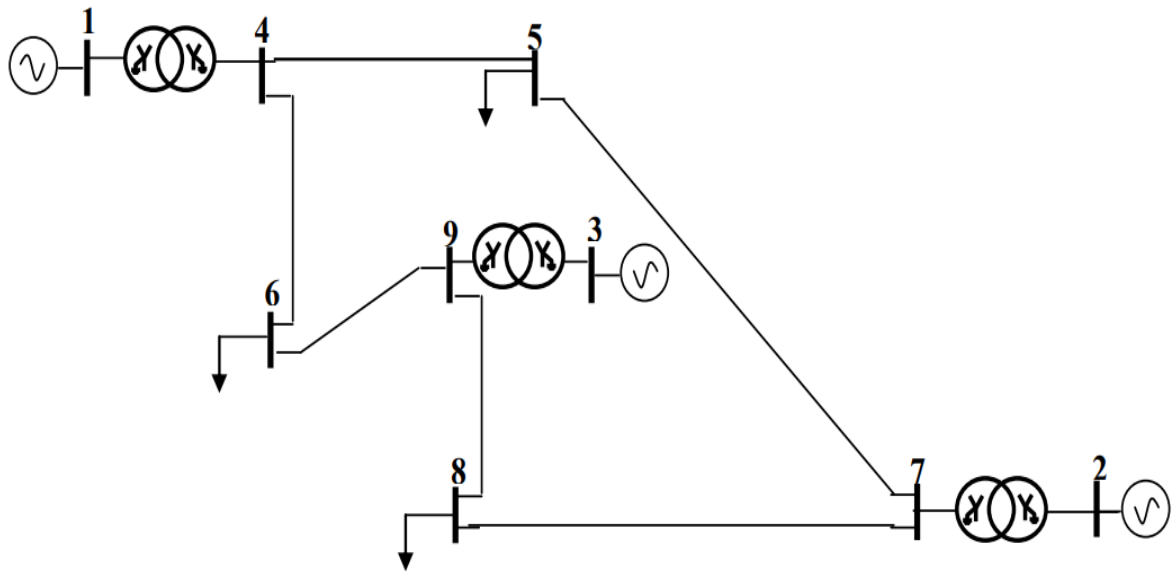
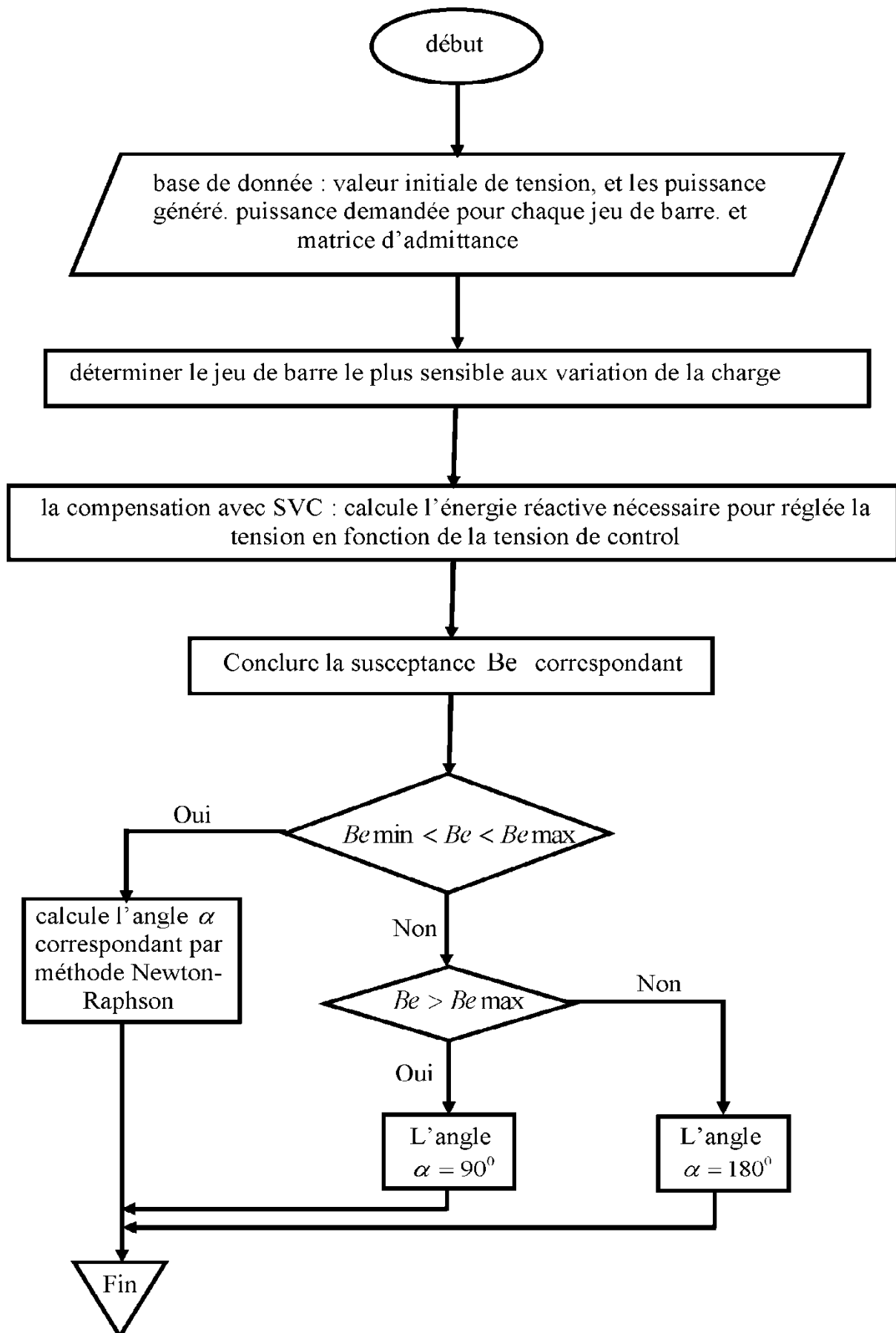


Figure III.10. Schéma d'un réseau test de 9 jeux de barres

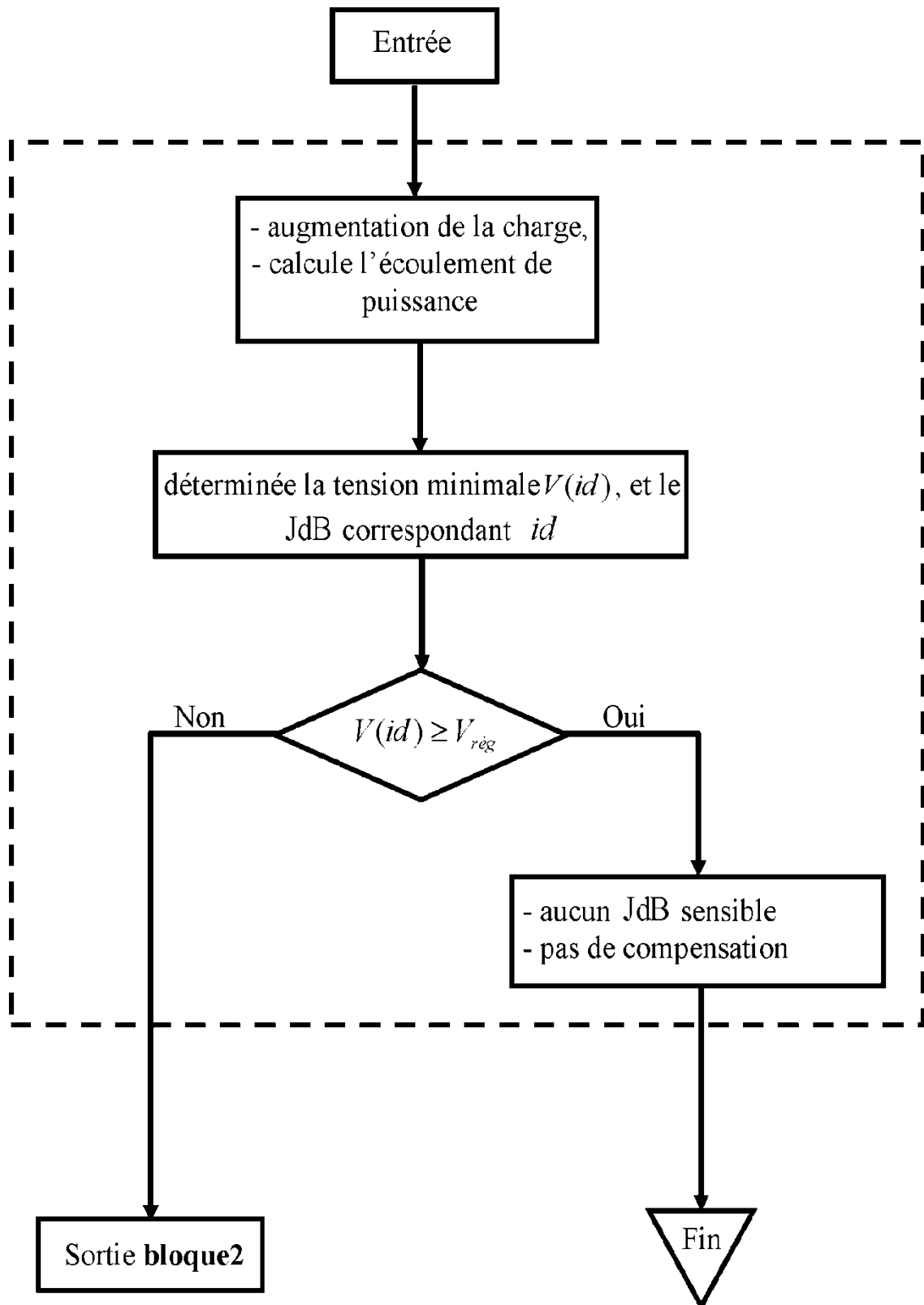
Le Tableau (III.1) , la Figure (III10) montrent les tensions au niveau des jeux de barres du réseau test trouvées sans et par l' intégration du dispositif shunt avec SVC . On remarque une amélioration des tensions au niveau des jeux de barres due à la présence de ce dispositif shunt. Alors que le Tableau (III.3.a,b) visualise les résultats du réseau 9 bus obtenu avec et sans l' SVC ,(les résultats de programmation).

III.5.2 L'organigramme globale de l'intégration de SVC [19. 21]

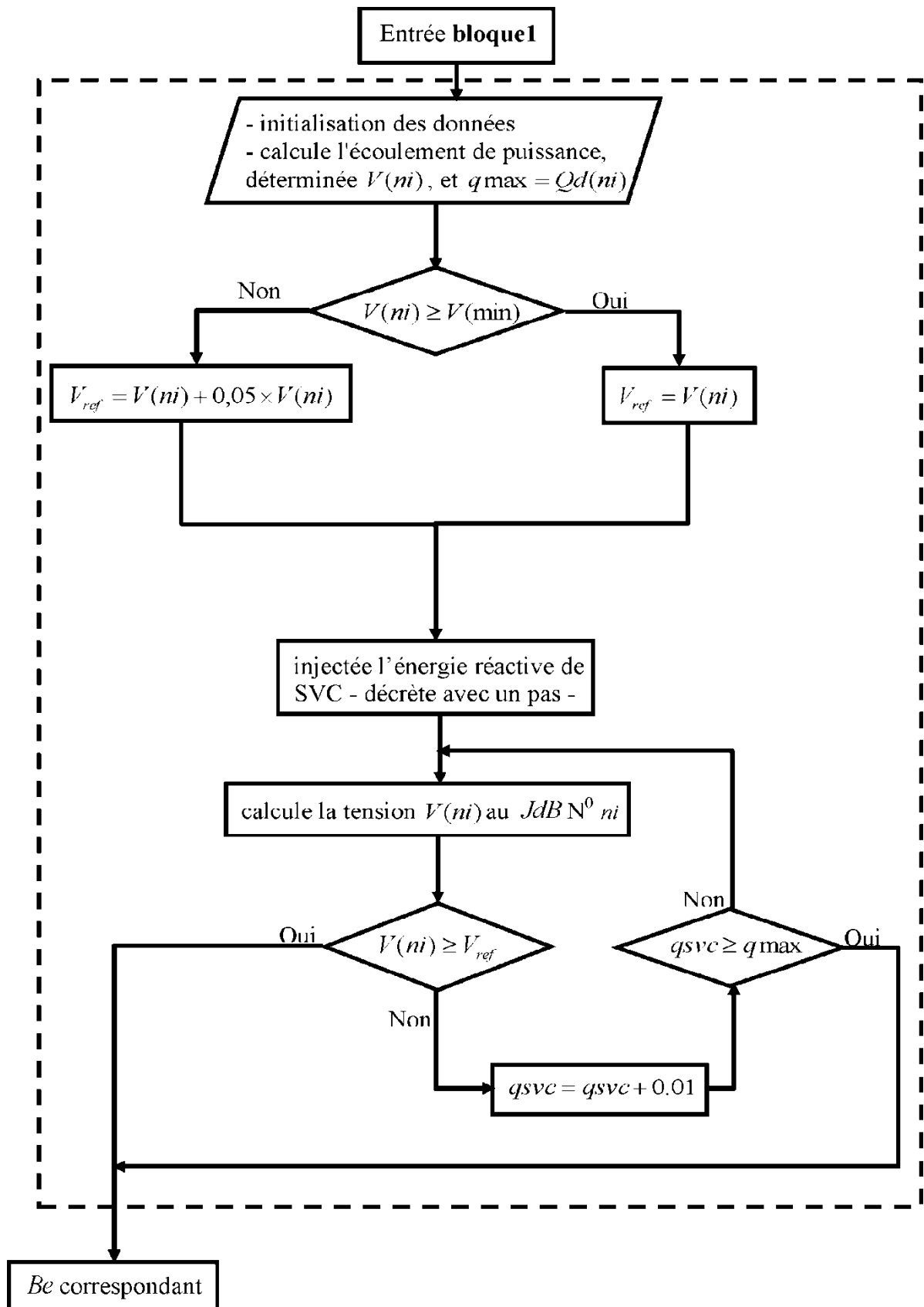


III-5.3 Organigramme détaillée

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 régler la tension en fonction de la tension de control.



III.5.4 les résultats de programmation (réseau 9 jeux de barres)

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

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

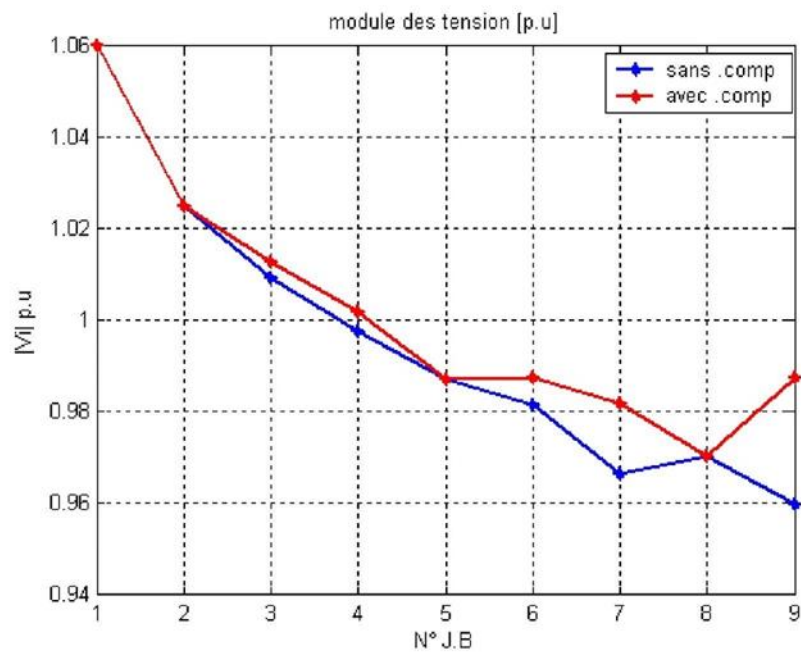


Figure III.11 . Variation de la tension – cas normal

b. Tableau (III-2): Résultats des tensions du réseau électrique –cas rupture de la ligne (1-2)

Bus	Sans compensation	Avec compensation
	V(p.u)	V(p.u)
1	1.06	1.0600
2	0.890	0.8920
3	0.908	0.9130
4	0.885	0.9813
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

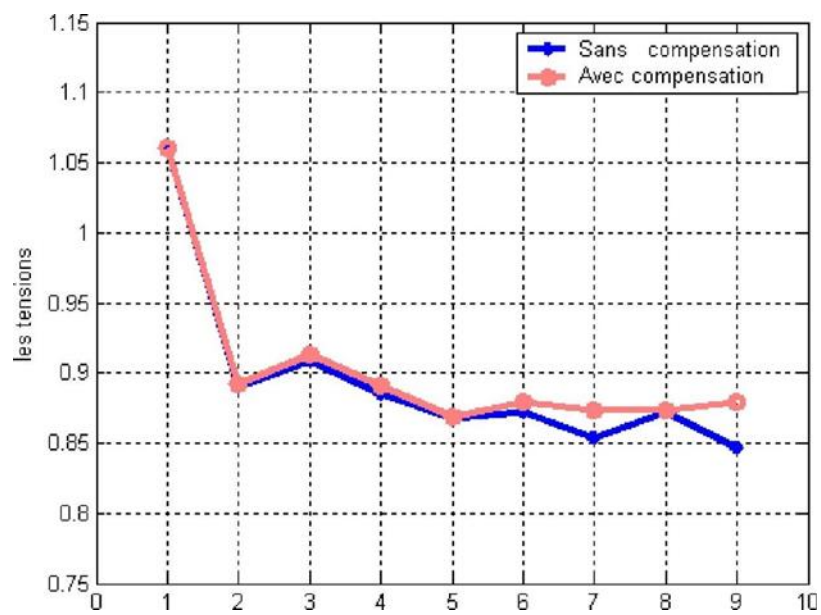


Figure III.12. Variation de la tension – cas rupture de la ligne (1-2)

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 III.3.a) cas sans compensation

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

c.2. (Tableau III.3.b) cas avec compensation

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

d. (Tableau III.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 9	////	////	////	0.1032	0.1261	0.1891
α 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

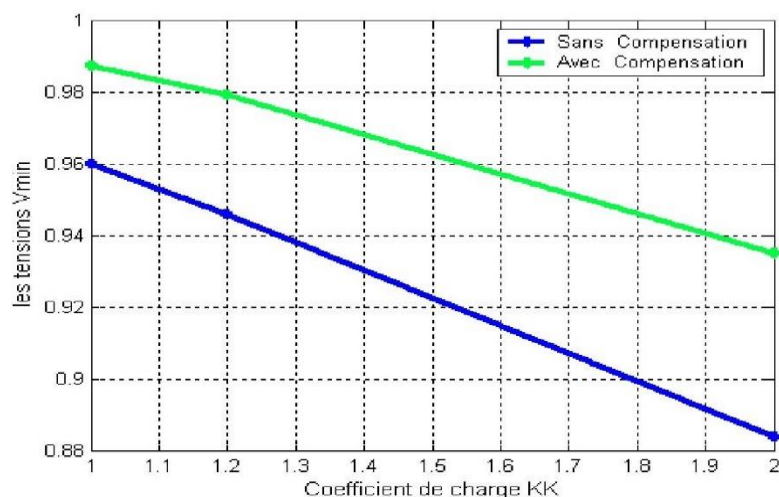


Figure III.13. Variation de la tension en fonction de l'incrément de la charge

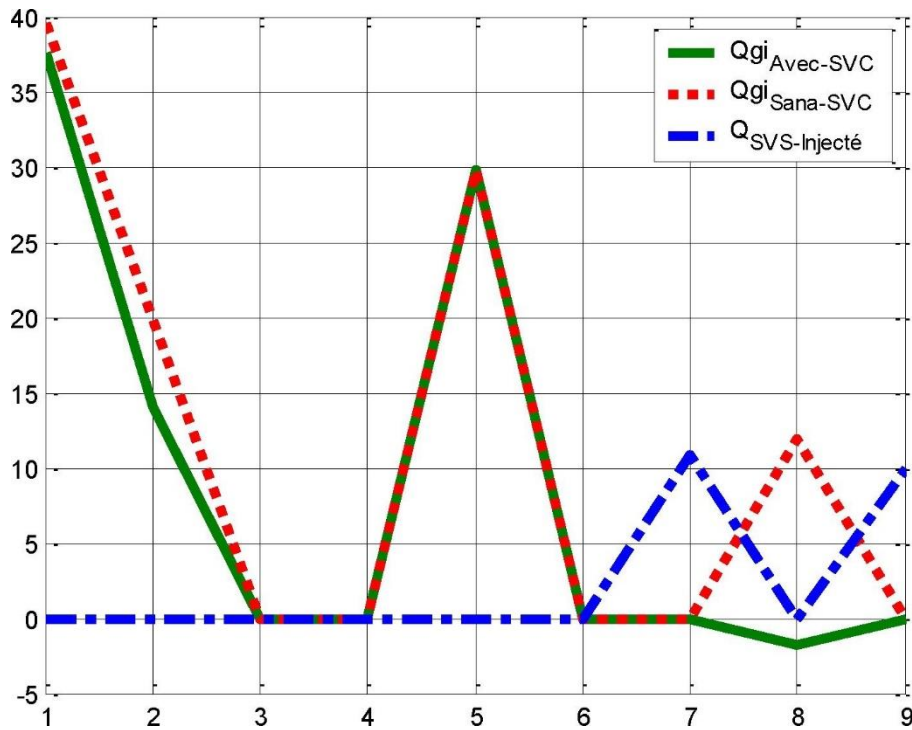


Figure III.14. la Puissance réactive dans (réseau 9 jeux de barres) –cas normal

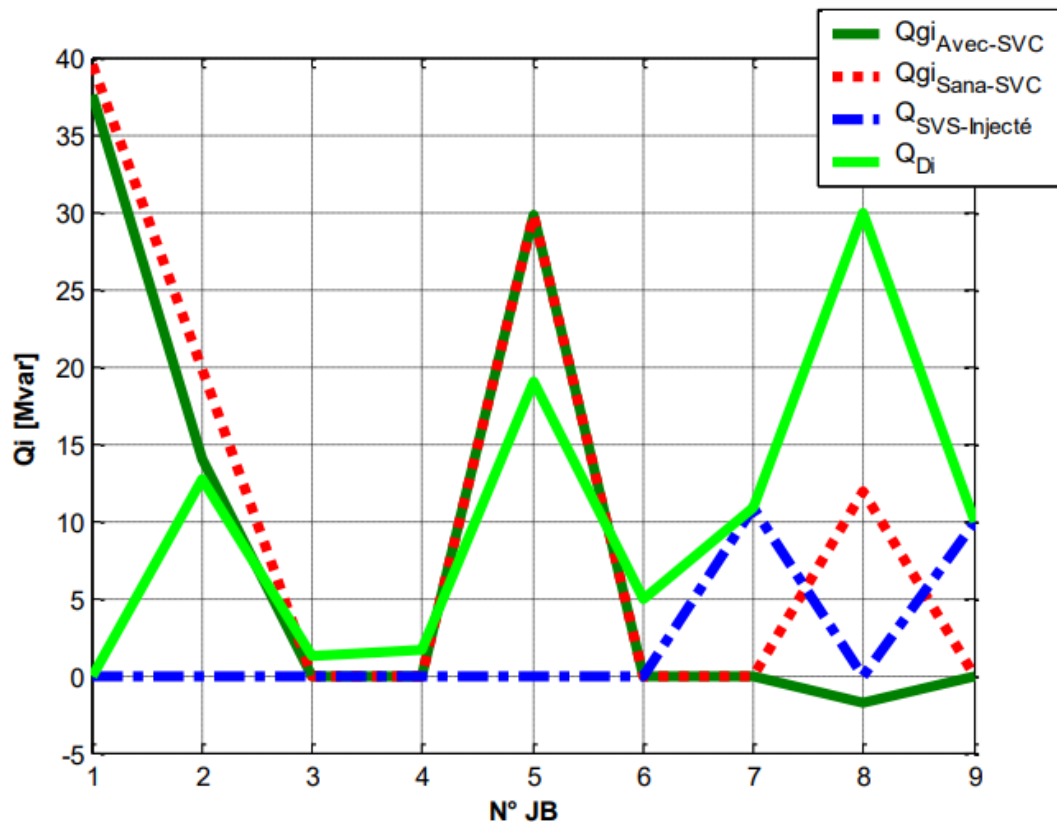


Figure III.15. Variation l'angle alphas (degré) en fonction de jeux de barres –cas normal

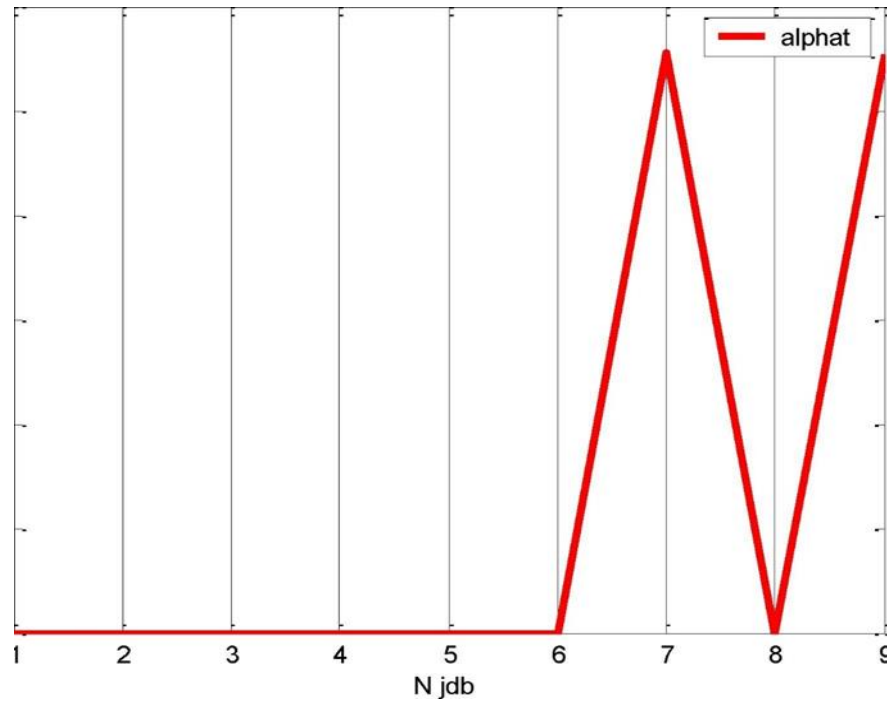


Figure III.16. la Puissance réactive dans (réseau 9 jeux de barres) –cas normal

d. (Tableau III.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

III.5.5 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.

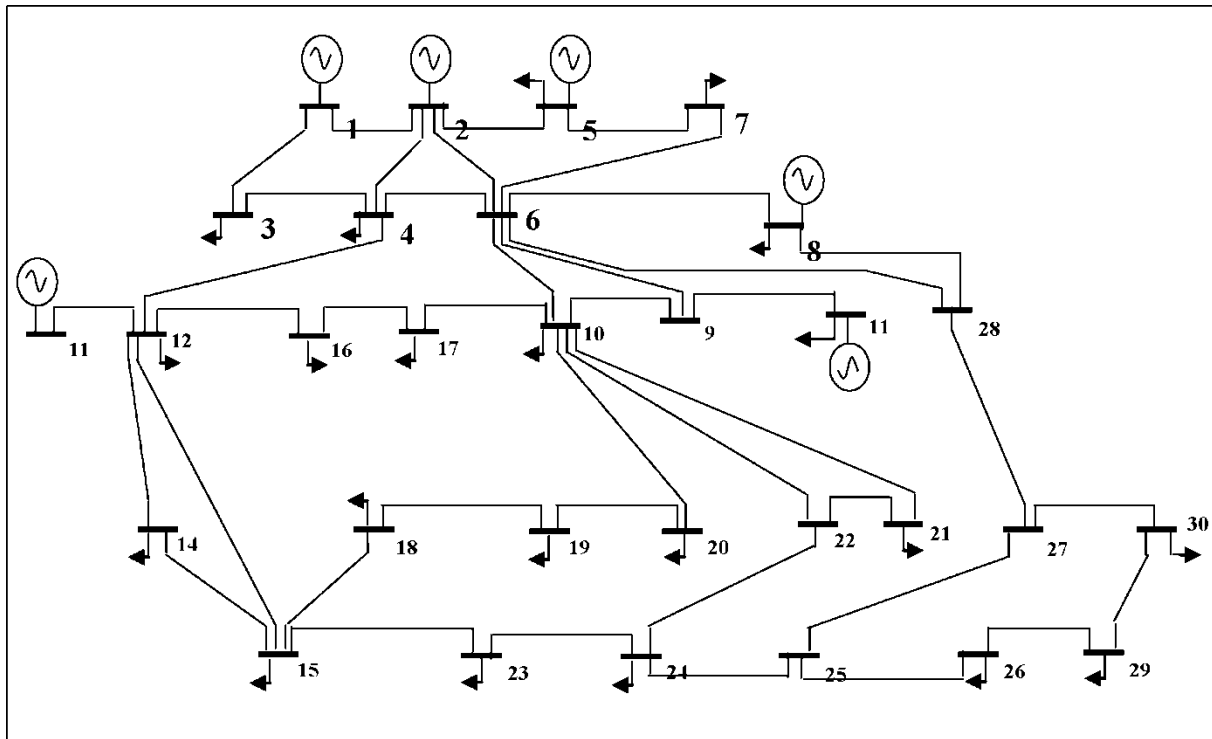


Figure III.17. Schéma d'un réseau test de 30 jeux de barres

Le Tableau (III .6) , la Figure (III17) montrent les tensions au niveau des jeux de barres du réseau test trouvées sans et par l'intégration du dispositif shunt avec SVC . On remarque une amélioration des tensions au niveau des jeux de barres due à la présence de ce dispositif shunt. Alors que le Tableau (III.8.a,b) visualise les résultats du réseau 30 bus obtenu avec et sans l' SVC.

III.5.6 les résultats de programmation (réseau 30 jeux de barres)

a.Tableau(III.6): Résultats des tensions du réseau électrique –cas normale

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	1.0000
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

**b.Tableau(III-7): 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	0.992	0.9927
5	0.951	0.9516
6	0.975	0.9758
7	0.957	0.9575
8	0.965	0.9647
9	1.000	1.0002
10	0.970	0.9705
11	1.083	1.0831
12	1.011	1.0117
13	1.072	1.0724
14	0.991	0.9919
15	0.983	0.9834
16	0.986	0.9868
17	0.969	0.9698
18	0.965	0.9660
19	0.958	0.9589
20	0.960	0.9610
21	0.955	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

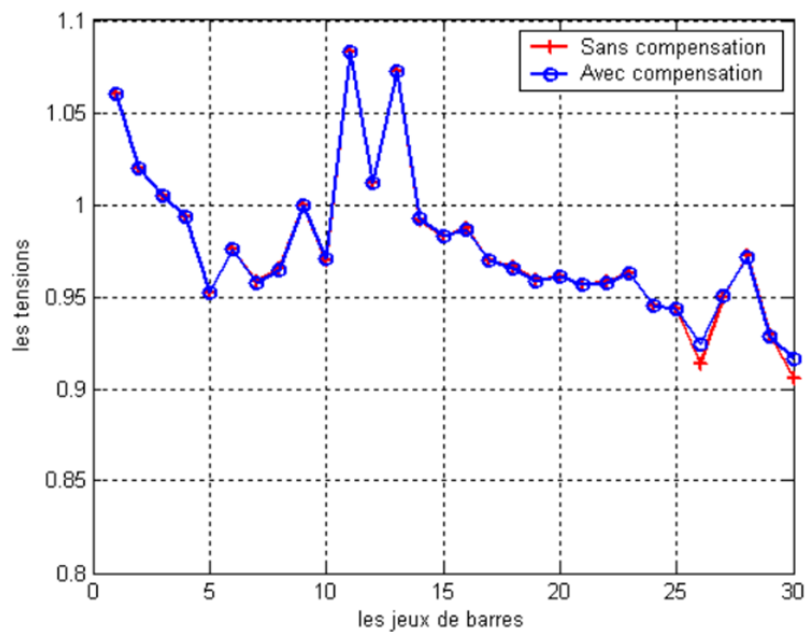


Figure III.18. Variation de la tension – cas normale

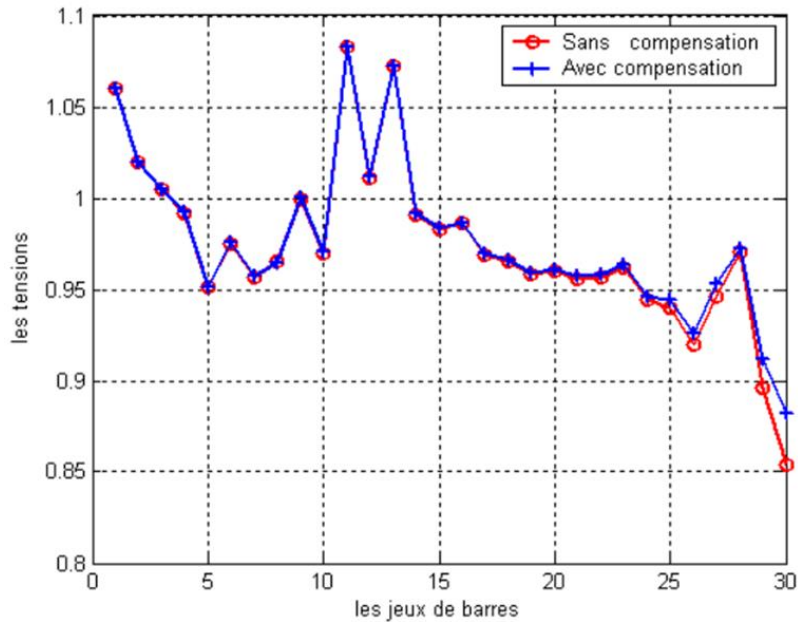


Figure III.19. Variation de la tension – cas rupture de la ligne (27-30)

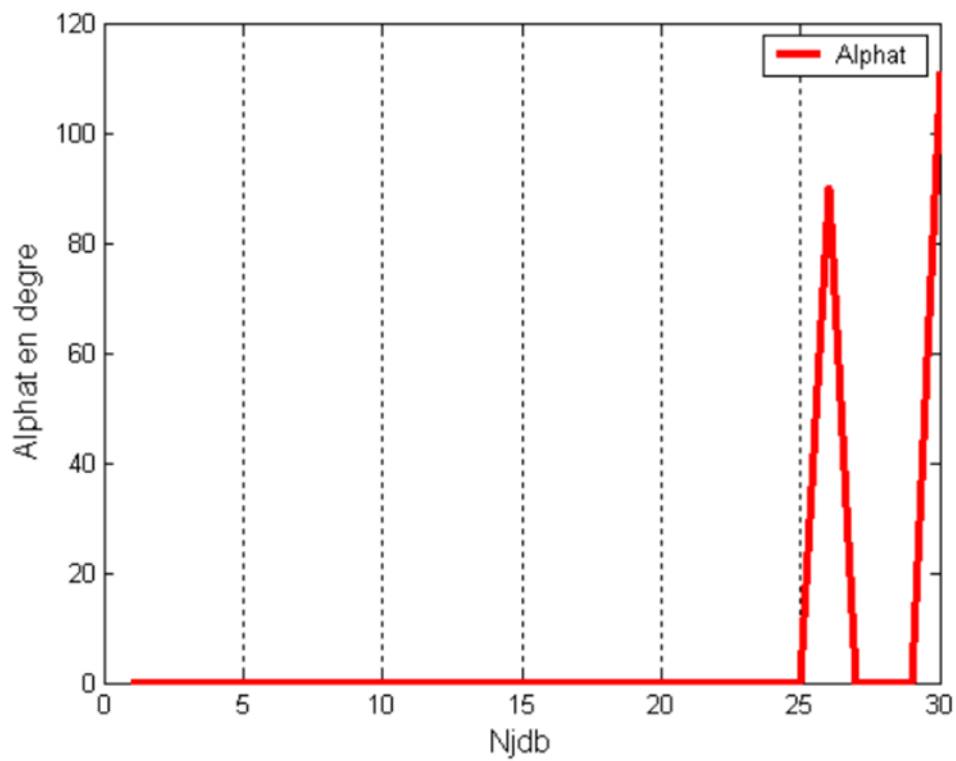


Figure III.20. Variation l'angle alphas (degré) en fonction de jeux de barres—cas normal

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 III.8.a) cas sans compensation

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

c.2- (Tableau III.8.b) cas avec compensation

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

d.(Tableau III.9.) 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	0.916	0.884	0.6970	0.9361	0.9092	0.7394
Puissance active généré (MW)	301.5617	367.6575	665.1700	301.5538	367.6262	664.8605
Puissance réactive généré (MVAR)	160.744	210.1370	525.0020	152.58	206.899	519.504
Pertes active (MW)	18.162	27.578	98.390	18.154	27.546	98.060
Pertes réactive (MVAR)	18.957	46.697	252.605	18.780	46.359	251.004
Susceptible Be J.d.B 30	////	////	////	0.0220	0.0283	0.0595
α J.d.B 30	////	////	////	111.13	111.11	90.00
Puissance réactive injectée (SVC) (MVAR)	00	00	00	2.4	2.9	3.9
Coût optimal (\$/h)	4899.136	6577.686	17862.038	4888.953	6567.819	17846.161

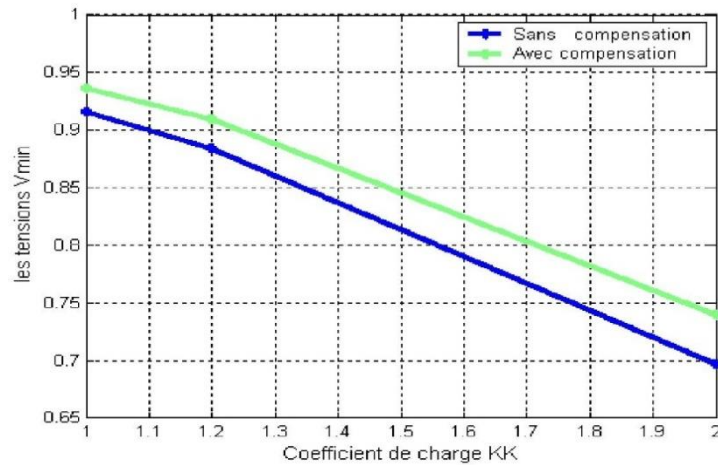


Figure III.21. Variation de la tension en fonction de l'incrément de la charge

III.5.7 Comparaison des résultats du chute de tension dans les deux réseaux (9 jeux de barres- 30 jeux de barres)

$$\Delta V = \frac{V_{ref} - V}{V}$$

tel que : $V_{ref} = 1.0182$ (pu)

	Réseau 9 jeux de barres		Réseau 30 jeux de barres	
	Cas normale	rupture ligne 1,2	Cas normale	Rupture ligne 27,30
Sans compensation	JdB9 : $\Delta V = 5.71\%$	JdB9 : $\Delta V = 16.81\%$	JdB30 : $\Delta V = 10.3\%$	JdB30 : $\Delta V = 16.12\%$
Avec compensation	JdB9 : $\Delta V = 3.02\%$	JdB9 : $\Delta V = 12.62\%$	JdB30 : $\Delta V = 08\%$	JdB30 : $\Delta V = 12.41\%$

III.5.8 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

Conclusion générale

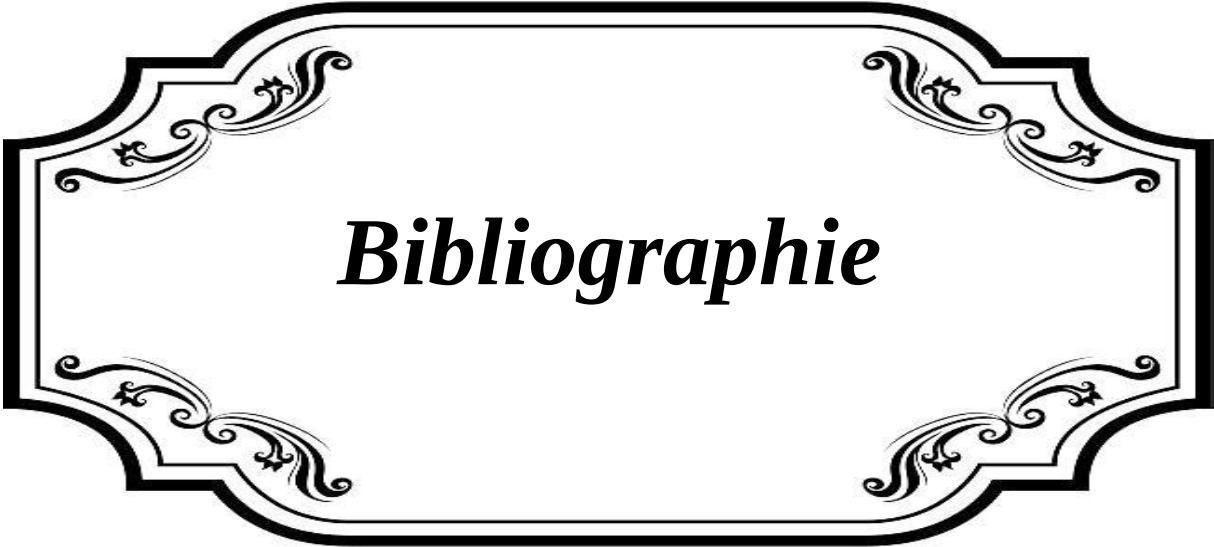
Nous avons traité le problème de la répartition des puissances réactives et le contrôle des tensions des réseaux d'énergie électrique en incorporant les dispositifs SVC. Une étude sur les dispositifs FACTS a été réalisée et en plus une étude détaillée sur les dispositifs SVC (définition, modélisation,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



Bibliographie

Bibliographie

- [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] 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
- [9] T. Gönen « Electric Power System Engineering: Analysis and Design» John Wiley & Sons, 1988
- [10] Oussama Mammeri.(différentes méthodes de calcul de la puissance réactive dans une noeud a charge non linéaire en présence d'un système de compensation de l'énergie) . Mémoire de Magister Université de Batna (promotion 2012).
- [11] Lakdja Fatiha « Contrôle des transits de puissance par dispositif facts» Mémoire de magister en Commande des processus Oran 2005.
- [12] Salhi Abd Alfattah et Mehellou Yuocéf «Contrôle de la puissance réactive du système électrique par SVC », université Batna, 2008

- [13] GlaudioA.Canizares ,et ZenoT.Faur« Analysis of SVC and TCSC controllers in voltage callapse » IEEE Trans power systems ,Vol .14, N -1 February 1999,pp.158.164
- [14] Fild/ FACTS – les systèmes performants pour le transport flexible de l'énergie électrique.
- [15] Ben Alia Khaled et Zahnite Hakim «Etude des compensateurs statiques de l'énergie réactive SVC dans un réseau électrique », université Biskra promotion juin 2005
- [16] Allen J. Wood & Bruce F: Wollenberg:«Power Generation And Operation And Control» John Wiley & Sons
- [17] Gaboussaseddik et dob Med lakhdar«l'impact des dispositifs de compensation dynamique –FACTS- sur les réseaux de transport », université Biskra promotion juin 2006.
- [18] D.SALAH sabry .L.Salah; B.Ahcen« Amélioration de la marge de la stabilité transitoire par l'utilisation des contrôleurs unifies de l'écoulement de Puissance –UPFC-», Second international conference on electrical system , May 08-10-2006, oumelbouaghi .ALGERIA
- [19]Geidl, M., « Implementation of FACTS and Economic Generation Dispatch in an Interactive Power Flow Simulation Platform », ETH Zürich.
- [20] Pierre AlexandreBohême « Simulation of Power System Response To Reactive Power Compensation » thèse de Master, Université de Tennessee, Knoxville 2006
- [21] 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

Résumé

Certaines lignes situées sur des chemins privilégiés peuvent être surchargées. Dès lors, il est intéressant pour le gestionnaire du réseau de contrôler ces transits de puissance afin d'exploiter le réseau de manière plus efficace et plus sûre.

La technologie FACTS est un moyen permettant de remplir cette fonction. Avec leur aptitude à modifier l'impédance apparente des lignes, les dispositifs FACTS peuvent être utilisés aussi bien pour le contrôle de la puissance active que pour celui de la puissance réactive ou de la tension. Plusieurs types de FACTS existent et le choix du dispositif approprié dépend des objectifs à atteindre.

L'objectif de ce travail était de concevoir une stratégie de contrôle pour les tensions ainsi que pour les flux de puissances réactives transitant dans ce réseau. Le FACTS utilisé au cours de ce travail est un dispositif de type shunt à savoir le SVC (Static Var Compensator).

Pour arriver à cet objectif, le travail a été décomposé en trois parties. Tout d'abord, une étude de comparaison entre deux lignes longues, une sans compensation et l'autre avec compensation permettait d'observer le profil de la tension sur les réseaux, ainsi de comprendre l'intérêt de compensation sur les lignes de transport, puis par la suite nous sommes donnés une généralité sur les FACTS. Une étude profonde concernant le dispositif

SVC a été discuté en troisième partie.

Mots clés: Énergie inefficace, compensation, tension

ملخص :

قد تكون هناك زيادة في التحميل على خطوط معينة موجودة على المسارات المميزة. لذلك ، من المثير للاهتمام أن يتحكم مدير الشبكة في تدفقات الطاقة هذه من أجل تشغيل الشبكة بشكل أكثر كفاءة وأماناً.

تقنية FACTS هي إحدى الطرق لتحقيق هذه الوظيفة. من خلال قدرتها على تعديل المعاوقة الظاهرة للخطوط ، يمكن استخدام أجهزة FACTS للتحكم في الطاقة النشطة وكذلك القدرة أو الجهد التفاعلي. توجد عدة أنواع من الحقائق واختيار الجهاز المناسب يعتمد على الأهداف المراد تحقيقها.

كان الهدف من هذا العمل هو تصميم استراتيجية تحكم للجهود وكذلك لتدفقات القوى التفاعلية التي تمر في هذه الشبكة. الحقائق المستخدمة في هذا العمل هي جهاز من نوع التحويل ، وبالتحديد SVC (معوض فار ثابت).

لتحقيق هذا الهدف ، تم تقسيم العمل إلى ثلاثة أجزاء. بادئ ذي بدء ، تسمح دراسة المقارنة بين سطرين طويلين ، أحدهما بدون تعويض والآخر مع تعويض بمراقبة ملف تعريف التوتر على الشبكات ، وبالتالي فهم فائدة التعويض على خطوط النقل ، ثم بعد ذلك يتم إعطاؤنا العمومية على الحقائق. دراسة معمقة حول الجهاز

تمت مناقشة SVC في الجزء الثالث

الكلمات المفتاحية: الطاقة الغير فعالة، التعويض، التوتر