

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A. MIRA, Bejaia
Faculté de Technologie
Département de Génie Électrique



Mémoire de fin cycle

En vue de l'obtention du diplôme de Master
En Électrotechnique
Option : *Réseaux électriques*

Thème

*Apport des systèmes FACTS sur la stabilité de la tension
Cas d'un SVC*

Présenté par :

*FOUGHALI LYES
HAMADI FATIHA*

Encadrés par :

M.HAMOUDI FARID.

Année universitaire: 2014/2015

Remerciement

Avant tout, nous remercions Dieu le tout puissant qui nous a donné la force et la patience de faire ce travail.

Je remercie, en deuxième position, ma chère mère et mon cher père, mes frères et mes sœurs.

Egalement, je remercie l'encadreur de ce mémoire Mr. HAMOUDI Farid pour son encadrement.

Nous adressons nos remerciements à messieurs, le président et Les membres de jury qui nous ont fait l'honneur d'évaluer et D'examiner notre travail.

Je remercie toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la Réalisation de ce travail.

Enfin, je ne peux oublier de remercier mes amis, mes collègues de département d'Electrotechnique.

H. fatiha & F. lyes

Dédicaces

Je tiens à dédier ce mémoire :

A ma très chère Mère et à mon cher Père, en témoignage et en gratitude de leur dévouement, de leur soutien permanent durant toutes mes années d'études.

A mes chers frères, chères sœurs

A toutes mes amis

A toute la promo de l'électrotechnique 2014/2015.

Liste des matières

Remerciement	i
Dédicace	ii
Sommaire.....	iii
Liste des figures.....	vi
Liste des tableaux.....	xi

Introduction Générale.....	1
-----------------------------------	----------

Chapitre I : Stabilité de la Tension

Introduction	3
I.1. Stabilité de tension en réseaux électrique	3
I.1.1. Définition de stabilité de tension	3
I.1.1.1. Stabilité de tension vis-à-vis des petites perturbations	3
I.1.1.2. Stabilité de tension vis-à-vis des grandes perturbations	3
I.2. Instabilité de tension	4
I.2.1. Instabilité à long terme	4
I.2.2. Instabilité à court terme	4
I.3. Effondrement de tension	4
I.3.1. Effondrement de tension dans le monde	4
I.4. Compensation d'énergie réactive et contrôle de la tension	5
I.5. Causes d'instabilité de tension	7
I.5.1. Production trop éloignée de la consommation	7
I.5.2. Manque local d'énergie réactive.....	7
I.5.3. charge appelée trop importante	9
I.6. Effets de la puissance réactive sur la tension et le transfert de puissance	9
I.7. Moyennes de réglage de la tension	12
I.7.1. Compensation traditionnelle.....	12
I.7.1.1. Condensateurs shunt	12
I.7.1.2. Condensateurs séries	13
I.7.1.3 Compensateurs synchrones.....	13
I.7.2. Compensateurs statiques de puissance réactive(FACTS)	14
I.7.2.1. Apports et Avantages des FACTS.....	14
I.7.2.2. Les type des FACTS.....	15
I.7.2.2.1. Compensateurs Shunt	15
I.7.2.2.1.1. Compensateur statique de puissance réactive (SVC).....	15
A. Inductance contrôlée par thyristors TCR	15
B. Capacité commutée par thyristors TSC.....	15
C. Réglage de tension en utilisant un SVC	16
D. Les principales applications d'un SVC.....	18
I.7.2.2.1.2. Compensateur statique synchrone (STATCOM).....	18

SOMMAIRE

A .Le principe de fonctionnement	19
B .Avantages du STATCOM	20
C .Inconvénient du STATCOM	20
D .Application du STATCOM.....	20
I.7.2.2.2. Compensation série	21
I.7.2.2.2.1. Condensateurs séries contrôlés par thyristors TCSC	21
A. Réglage de tension en utilisant un TCSC	22
B .Avantages du TCSC.....	23
C .Applications du TCSC	23
Conclusion	23

Chapitre II : Etude et Modélisation de SVC

Introduction	25
II.1. Définition du SVC	25
II.2. Structure et constitution d'un SVC.....	25
II.2.1.Principe de fonctionnement	26
II.2.1.1. Condensateur fixe (FC)	26
II.2.1.2. Réactance commandée par thyristors (TCR).....	26
II.2.1.3. Condensateur commuté par thyristors (TSC)	27
II.3. Les différents types de SVC	29
a. Dispositif type TCR ou FC/TCR	29
b. Dispositif type TCR/TSC	30
c. Dispositif type TSC/TSR.....	30
d. Dispositif mobile type TSC.....	30
II.4. Différents schémas	31
II.5. D'autres SVC	32
II.6. Caractéristiques d'un compensateur statique SVC.....	32
II.6.1. Caractéristique en tension d'un SVC	32
II.6.2. Caractéristique de puissance réactive d'un SVC	34
II.7. Modélisation du dispositif SVC	34
II.7.1. Modèle de compensateur statique de puissance réactive SVC	35
II.7.2. Valeurs de consigne du dispositif SVC.....	36
II.8. Utilisation et Inconvénients de SVC.....	36
II.8.1 Utilisation de SVC	36
II.8.1.1. Améliorer les niveaux de tension sur un jeu de barres ou une région	37
II.8.1.2. Augmenter la capacité de transport de puissance active du réseau	37
II.8.1.3. Réduire les surtensions temporelles	38
II.8.2. Inconvénients des SVC	38
conclusion.....	40

Chapitre III: Simulation et résultats

Introduction	40
III.1. Description du système utilisé.....	40
III.2. Dimensionnement de SVC	41
III.3. Simulation et résultats	42
III.3.1 Sans compensation.....	43
A. Tension au niveau de jb2 non compensé.....	43
B. Tension au niveau de jb2 non compensée	43
III.3.1. Avec compensation.....	44
A. Tension au niveau de jb1 après la compensation.....	44
B. Tension au niveau de jb2 après la compensation	45
III.4. Synthèse des résultats.....	46
Conclusion.....	46
Conclusion générale.....	47
Bibliographie.....	48
Annexe	

LISTE DES FIGURES

LISTE DES FIGURES :

Chapitre I

Figure .I.1. Ligne électrique avec compensateur.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure. I.2. Diagramme de phase d'une ligne compensée.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure. I.3. Réseau électrique à deux nœuds.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure .I.4 .Courbes PV pour différents facteurs de puissance.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure .I.5. Compensation à l'aide de condensateurs shunt.	Erreur ! Signet non défini.
Figure .I.6. Compensation avec condensateurs série.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure .I.7. Modèle d'un TCR.....	15
Figure .I.8. Modèle d'un TSC.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure .I.9. Réglage de tension en utilisant un SVC.....	16
Figure .I.10. Réactance du SVC en fonction de l'angle d'amorçage.....	18
Figure .I.11. Réglage de tension charge par un STATCOM.....	19
Figure .I.12.a. Courant inductive.....	19
Figure .I.12.b. Courant capacitive.....	19
Figure .I.13. Caractéristique d'un STATCOM.....	20
Figure .I.14. Topologie du condensateur série contrôlé par thyristor (TCSC).....	21
Figure .I.15. Réglage de tension charge par compensation d'une partie de la réactance. De ligne en utilisant un TCSC (compensation série).....	22

Chapitre II

Figure .II.1. Représentation schématique monophasée d'un compensateur Statique.....	Erreur ! Signet non défini.
---	------------------------------------

LISTE DES FIGURES

Figure .II.2. Schéma équivalent d'un SVC.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure .II.3. Angle d'amorçage et de conduction d'un TCR.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure .II.4. Principe d'un TSC.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure .II.5. Schéma de principe d'un FC/TCR.....	29
Figure .II.6. Forme du courant d'inductance.....	29
Figure. II.7. Schéma de principe d'un TCR/TSC.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure .II.8. Schéma monofilaire d'un compensateur mobile "TSC".....	Erreur ! Signet non défini.
Figure.II.9.a. différents schémas de SVC.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure.II.9.b. zone de fonctionnement.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure .II.10. MSC et MSR.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure .II.11. Caractéristique en tension d'un SVC.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure .II.12. Exigences posées à la puissance réactive.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure .II.13. Modélisation du SVC.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure .II.14. Variation de la puissance réactive par un SVC en fonction de la tension nodale.....	36
Figure .II.15. Système de Ligne de Transport d'électricité (sans et avec SVC).....	Erreur ! Signet non défini.
Figure .II.16. Capacité de Transport de Puissance d'une Ligne de Transport.....	Erreur ! Signet non défini.

Chapitre III

LISTE DES FIGURES

Figure. III.1. Schéma unifilaire du réseau test utilisé.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure.III.2.Schéma unifilaire du réseau test utilisé avec le compensateur SVC avec grandeurs real.....	E rreur ! Signet non défini.
Figure.III.3. Représentation du réseau test sur MATLAB/Simulink.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure. III.4 La tension au niveau de Jb1sans SVC (en pu).....	Erreur ! Signet non défini.
Figure. III.5. La tension au niveau de Jb2 sans SVC (en pu).....	Erreur ! Signet non défini.
Figure.III.6. la tension au niveau de Jb1 avec SVC	45
Figure.III.7.la tension au niveau de Jb2 avec SVC.....	45

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau 1. Effondrement de tension dans le monde.....	5
--	---

Liste des abréviations et des symboles

Liste des symboles

I: Courant transitant dans la ligne
V₁: Tension composé de la source
V₂: Tension composé de récepteur
X: Réactance de la ligne
P₂: Puissance active de la charge
Q₂: Puissance réactive de la charge
Q_C: Puissance réactive de compensateur
δ: L'angle de charge
ΔV: Chute de tension dans la ligne
Z: l'impédance de la ligne
I_C: Courant de condensateur
P₁₂: Puissance transmise dans la ligne
S₂: Puissance apparent a la charge
S_{CC}: Puissance de court-circuit
g: admittance de la charge
φ: Déphasage entre le courant et de tension
X_C: Réactance de condensateur
X_L: Réactance inductive
I_C: Courant de condensateur
I_{TCR}: Courant de TCR
B_{SVC}: La susceptance de SVC
α: L'angle de commande
X_{TCR}: Réactance équivalente de TCR
X_{SVC}: Réactance équivalente de SVC
Q_{SVC}: Puissance réactive de SVC
Q_{ch}: Puissance réactive injectée par le STATCOM
V_{stat}: Tension injectée par le STATCOM
X_{STAT}: Réactance équivalent de STATCOM
X_{TCSC}: Réactance équivalent d'un TCSC
K_C: Pourcentage de compensation
σ: L'angle de conduction
Y_{SVC}: Admittance shunt de SVC
C: Capacité de condensateur
G: Conductance de la ligne

Liste des abréviations

FACTS : Flexible Alternative Current Transmission Systems

SVC : Compensateur Statique de Puissance Réactive (Static Var Compensator)

STATCOM : Compensateur Statique Synchronne (Static Var Compensator)

TCR : Thyristor Controlled Reactor (RCT : Réactances Commandées par Thyristors)

TSC : Thyristor Switched Capacitor (CCT : Condensateurs Commandés par Thyristor)

FC : condensateur fixe

VSC : convertisseur à source de tension

TCSC: Compensateur Série Commandé par Thyristor (Thyristor Controlled Series Capacitors)

MSC : Condensateur commuté mécaniquement

MSR : inductance commuté mécaniquement

SVS : Static VAR Systems

INTRODUCTION GENERALE

Introduction Générale :

L'industrialisation et la croissance de la population sont les premiers facteurs pour lesquels la consommation de l'énergie électrique augmente régulièrement. Il devient de plus en plus difficile d'obtenir des endroits de passage pour construire des nouvelles lignes de transport ou de distribution. Pour ces raisons, les compagnies d'électricité cherchent à augmenter la puissance que peuvent transporter les lignes existantes, sans autant compromettre leur fiabilité et stabilité. Idéalement, on aimerait les charger jusqu'aux limites de la capacité thermique des conducteurs et utiliser toutes les lignes pour supporter la charge électrique [01].

Les réseaux de transport et de distribution de l'énergie électrique comportent jusqu'à maintenant des appareillages passifs. Par ailleurs, le maillage des lignes exige de plus en plus le contrôle des puissances transitées. La complexité des réseaux exige aussi des marges de sécurité accrues afin que les perturbations locales ne provoquent aucune instabilité qui pourrait s'étendre sur tout le réseau de transport [01]. L'évolution des topologies de l'électronique de puissance et leurs intégrations dans les réseaux électriques a engendré des améliorations majeures sur ces derniers, telles que la compensation flexible de l'énergie réactive, le contrôle continu de la tension aux jeux de barres, l'amélioration du facteur de puissance etc.

Le mécanisme causant l'instabilité de tension semble l'un des plus importants problèmes à clarifier [2].

Des relevés sur les incidents survenus durant les dernières décennies ont montré que l'effondrement de tension intervient généralement suite à une perturbation majeure ou à une augmentation importante de la charge sur un réseau électrique soumis à de fortes contraintes. Ce réseau s'affaiblit et sa consommation réactive s'accroît. Le phénomène est alors caractérisé par une baisse progressive de la tension dans une ou plusieurs régions consommatrices, et qui va en s'accroissant au bout de quelques minutes. La dégradation de la tension au niveau des charges est alors telle qu'elle entraîne des interruptions de service dont les causes directes peuvent être :

Manque de tension, augmentation des pertes réactives du réseau. La défaillance du réglage de la tension, au niveau des bornes des groupes, a pour conséquence une accélération de la dégradation du plan de la tension qui peut aller jusqu'à des déclenchements, en cascade, de groupes et de lignes et un effondrement général du réseau.

Dans cette situation, Les moyens classiques de contrôle des réseaux (transformateur à prises réglables en charge, condensateurs série ou parallèle, l'excitation des générateurs) pourraient dans l'avenir s'avérer trop lents et insuffisants pour répondre efficacement aux problèmes d'instabilité du réseau, compte tenu notamment des nouvelles contraintes. Il faudra donc compléter leur action en mettant en œuvre des dispositifs électroniques de puissance ayant des temps de réponse courts, connus sous l'appellation FACTS (*Flexible Alternative Current Transmission Systems*) pour le contrôle des réseaux. Le développement des dispositifs FACTS a ouvert de nouvelles perspectives pour une exploitation plus efficace des réseaux par action continue et rapide sur les différents paramètres (déphasage, tension, impédance). Ainsi, les transits de puissance seront mieux contrôlés et les tensions mieux régulées, ce qui

INTRODUCTION GENERALE

permettra d'augmenter les marges de stabilité de tension ou de tendre vers les limites thermiques des lignes.

Ce travail traite le problème de la stabilité statique de tension des réseaux électriques. Des notions de base relatives à l'instabilité et l'effondrement de tension ont été présentés. L'utilisation du SVC dans l'amélioration de la marge de stabilité statique de tension, a retenu aussi notre intérêt dans ce mémoire.

Dans le premier chapitre, des notions générales sur la stabilité de tension du réseau électrique sont présentées. Les différentes définitions liées à la stabilité de tension de plusieurs organismes spécialisées ainsi que les causes qui favorisent l'instabilité de tension sont aussi exposées, la relation entre le réglage de la tension et la puissance réactive.

Nous allons formuler aussi dans ce chapitre le problème des chutes de tensions et du réglage de celle-ci par les différents moyens existants, Les moyens classiques de contrôle la tension (transformateur à prises réglables en charge, condensateurs série et parallèle, l'excitation des générateurs). Nous nous sommes ensuite focalisés sur les systèmes FACTS qui sont largement utilisés dans la compensation de l'énergie réactive. Parmi ces dispositifs FACTS, notre choix s'est porté sur le SVC, STATCOM et le TCSC pour l'amélioration de la stabilité statique de tension et la réduction des pertes actives.

Dans le deuxième chapitre, on présente le principe de fonctionnement du SVC, sa constitution et son modèle, puis nous allons discuter quelques applications du SVC et ces Inconvénients.

Au troisième chapitre, on a met en évidence l'efficacité du SVC dans l'amélioration de la stabilité de tension d'un système à deux nœuds a été présentée. La simulation des modèles étudiés sans/avec SVC est faite sur le logiciel MATLAB, Puis en fait l'analyse des résultats de simulation, Par la suite nous avons effectué une comparaison succincte entre le SVC en termes d'amélioration de la marge de stabilité de tension et la réduction des pertes du réseau.

Introduction

L'accroissement énorme de la demande de l'énergie électrique et les contraintes économiques de construire de nouveaux ouvrages conduisent à l'exploitation des réseaux électriques près de leurs limites de stabilité et de sécurité. En effet, l'instabilité des réseaux électriques présente un problème majeur dans le bon fonctionnement de ces derniers autour du monde, Les situations des pays à forte consommation augment encore les risques d'apparition du phénomène d'instabilité. Pour éviter ce phénomène, l'étude de stabilité de tension est proposée dans ce chapitre. Cette étude est un outil très important pour déterminer la possibilité de transfert de puissance électrique le long de ligne sans problème [3].

Ce travail donne un aperçu général sur la stabilité de tension. On trouve au début de cette étude des notions générales et différentes définitions liées à la stabilité de tension de plusieurs organismes spécialisées, ainsi que les causes qui favorisent l'instabilité de tension seront présentées, la relation entre le réglage de la tension et la puissance réactive.

Dans une deuxième phase, on étudie le problème des chutes de tensions et du réglage de celle-ci par les différents moyens existants de réglage de tension : compensation classique et compensation moderne (FACTS) Parmi ces dispositifs FACTS, notre choix s'est porté sur le SVC, STATCOM et le TCSC pour l'amélioration de la stabilité de tension et la réduction des pertes actives.

I.1. Stabilité de tension en réseaux électrique

I.1.1. Définition de stabilité de tension

La stabilité de tension concerne la capacité d'un système de puissance à maintenir des tensions acceptables à tous ses nœuds, dans des conditions du fonctionnement normales ou suite à une perturbation. L'instabilité de tension résulte de l'incapacité du système production-transport à fournir la puissance demandée par la charge. Elle se manifeste généralement sous forme d'une décroissance monotone de la tension.

L'étude de la stabilité est généralement effectuée pour les deux régimes de fonctionnement distincts :

I.1.1.1. Stabilité de tension vis-à-vis des petites perturbations

La stabilité de tension de petites perturbations concerne la capacité du réseau électrique à maintenir la tension dans les limites permises en présence de perturbations telles que : une variation faible de la charge, de la production,...etc.

I.1.1.2. Stabilité de tension vis-à-vis des grandes perturbations

Elle est définie comme étant la capacité du réseau électrique à maintenir les tensions des nœuds dans les limites de fonctionnement permises en présence des grandes perturbations, à savoir la perte d'équipement de transport ou de production, le court-circuit,...etc.

I.2. Instabilité de tension

L'état du réseau est dit instable en tension lorsqu'une perturbation, un accroissement de la charge ou une modification des conditions du réseau entraîne une chute de tension progressive et incontrôlable, aboutissant à un effondrement de la tension.

Il y a deux types d'instabilité de tension :

I.2.1. Instabilité à long terme

Cette instabilité peut être de quelques dizaines de secondes à des heures. Elle se développe à partir d'un point du réseau suite à un manque graduel de la puissance réactive demandée. Donc on peut dire que cette instabilité est à première vue la cause d'un déséquilibre entre la puissance réactive demandée et celle fournie.

I.2.2. Instabilité à court terme

Cette instabilité est très rapide, quelque secondes. Elle est généralement due à certaines charges ou équipements dont la puissance réactive suit une caractéristique spéciale, comme les moteurs à induction.

I.3. Effondrement de tension

L'effondrement de tension est le processus par lequel la séquence d'opérations accompagnant l'instabilité de tension mène à un blackout électrique ou à des tensions anormalement basses dans une partie significative du réseau. Il y a beaucoup de scénarios menant à l'effondrement de tension : variation des charges (effondrement à long terme de tension) et des pannes de réseau (effondrement transitoire de tension).

I.3.1. Effondrement de tension dans le monde

A travers le monde entier, il y a plusieurs incidents qui causent l'effondrement de tension au cours de vingt dernières années, la majorité de ces incidents depuis 1982 [8]. Le tableau (1) résume quelques effondrements de tension dans le monde [4].

Date	Location	Durée
1 Décembre 1987	France	4-6 minutes
22 Aout 1987	Tennessee, USA	10 seconds
23 juillet 1987	Tokyo, Japon	20 minutes
30 Novembre 1986	Brésil, Paraguay	2 seconds
27 Décembre 1982	Suède	55 seconds
30 Décembre 1982	Florida	1-3 minutes
4 Aout 1982	Belgique	4.5 minutes
02 février 2003	Algérie	Plus de 3 heures
19 Décembre 1987	France	26 minutes
22 Aout 1970	Japon	30 minutes

Tableau 1. Effondrement de tension dans le monde.

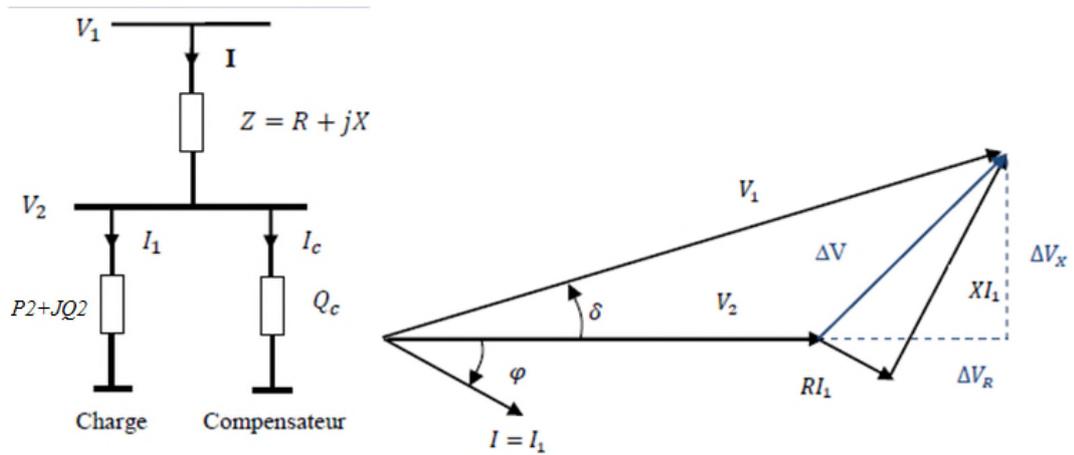
Pour mieux comprendre le mécanisme d'effondrement de tension, l'historique de deux exemples typiques sont ceux de la France et du Japon :

En France le 12 Janvier 1987 à 10h30 de matin, une heure avant l'effondrement du réseau, la tension était normale. Pour différentes raisons, trois unités thermiques dans une station de production sont arrêtées successivement entre 10h55 et 11h41. Treize secondes après, une quatrième unité de production est arrêtée à cause de l'intervention du système de protection thermique de rotor. Cette perte soudaine dans la génération, cause un décroissement de tension dans le réseau. Cette baisse de tension, augmente trente secondes après et se généralise dans les zones adjacentes. Ce qui engendre des arrêts dans des autres unités de production. En conséquence, le réseau français subit une perte de 9000 MW entre 11h45 et 11h50. Après cette grande perturbation, le niveau de la tension a été restauré après un délestage approprié [5].

Dans la même année, le 23 février, à Tokyo (Japon), la température augmente à 39°C, ce qui a engendré une augmentation de la demande au delà la valeur présumée, à cause de l'utilisation massive des climatiseurs. Une instabilité de tension survient, entraînant le déclenchement des trois postes électriques alimentant la région de Tokyo [5].

I.4. Compensation d'énergie réactive et contrôle de la tension

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



I.1.a) Circuit équivalent d'une ligne avec Charge et compensateur.

I.1 b) diagramme des tensions Sans compensation.

Fig. I.1 ligne électrique avec compensateur.

Supposant que, V_2 est pris comme origine des phases

A partir du diagramme de la figure (I.1.b) l'expression de la chute de tension est donnée par :

$$\Delta V = V_1 - V_2 = Z * I_1 \tag{1.1}$$

Le courant I_1 de la charge est donné par la relation :

$$I_1 = \frac{P_2 - jQ_2}{V_2} \tag{1.2}$$

Remplaçant (1.2) dans (1.1), on aura :

$$\Delta V = (R + jX) \frac{P_2 - jQ_2}{V_2} \tag{1.3}$$

D'où :

$$\Delta V = \frac{RP_2 + XQ_2}{V_2} + j \frac{XP_2 - RQ_2}{V_2} = \Delta V_R + j\Delta V_X \tag{1.4}$$

La chute de tension possède donc deux composantes ΔV_R en phase avec la tension V_2 et une composante ΔV_X en quadrature avec V_2 . D'après l'équation (1.4), la chute ΔV dépend de la puissance active et réactive de la charge.

En ajoutant un compensateur en parallèle à la charge, il est possible de maintenir la tension V_2 égale en module à la tension V_1 .

Sur la Figure (I.2), ceci est accompli avec un compensateur purement réactif. La puissance réactive de la charge est remplacée par la somme $Q_T = Q_2 + Q_C$, (Q_C la puissance réactive du compensateur).

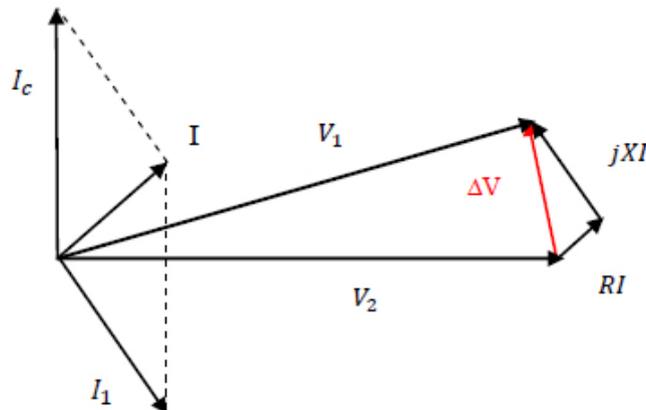


Fig. I.2: Diagramme de phase d'une ligne compensée.

I.5. Causes d'instabilité de tension

Les problèmes d'apparition du phénomène d'écroulement de tension sont toujours liés à la difficulté de régler la tension au dessus d'une certaine valeur, appelée tension critique [7].

Généralement, l'effondrement de tension se produit dans les réseaux électriques qui sont fortement chargés, court-circuités et/ou ont un manque de la puissance réactive [4] ; dans cette situation le réseau électrique ne peut pas assurer la puissance réactive demandée par la charge. Ceci est dû à des limitations sur la production et la transmission de la puissance réactive, de telle sorte que, la puissance réactive des générateurs et des systèmes FACTS est limitée par des contraintes physiques.

En plus la puissance réactive générée par des bancs de condensateurs est relativement réduite sous tensions basses. La limite sur le transport d'énergie réactive est due principalement aux pertes réactives élevées dans les lignes électriques fortement chargées. Les principales causes de l'instabilité de tension sont :

I.5.1. Production trop éloignée de la consommation

Dans la plupart du temps les sources d'énergie électrique se trouvent loin des zones de Consommation. Cette situation rend le transport de l'énergie réactive très difficile à cause des pertes réactives très élevées. Cette difficulté de transport d'énergie réactive augmente la probabilité d'apparition d'une instabilité ou d'un effondrement de tension.

I.5.2. Manque local d'énergie réactive

L'effondrement de tension est fortement lié au manque de la puissance réactive requise pour maintenir le profil de tension dans une marge de fonctionnement permise [4]. A un certain niveau de charge, le réseau électrique ne satisfait pas la puissance réactive demandée par la charge à cause des limitations sur la production et la transmission de la celle ci. La limitation de production de la puissance réactive inclut les générateurs et les équipements FACTS ainsi que la puissance réactive limitée des condensateurs [8]. La limite de production

de la puissance réactive des générateurs et due principalement aux contraintes thermiques exercées sur le bobinage rotorique et statorique.

Dans le même contexte, les équipements FACTS sont de très grande dimension. Pour bien comprendre l'influence de la puissance réactive sur l'effondrement de tension, on considère un réseau simple à deux nœuds de la figure (I.3).

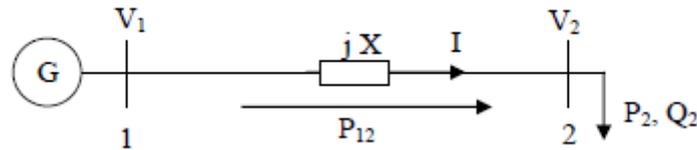


Figure I.3. Réseau électrique à deux nœuds.

D'après la figure (I.3) on a :

$$S_2 = p_2 + jQ_2 \quad (1.5)$$

$$= V_2 \left[\frac{V_1 \cos \delta + jV_1 \sin \delta - V_2}{jX} \right]^*$$

$$P_2 = \frac{V_1 V_2}{X} \sin \delta = P_{\max} \sin \delta \quad (1.6)$$

$$Q_2 = \frac{V_1 V_2 \cos \delta - V_2^2}{X} \quad (1.7)$$

De même pour le nœud 1 :

$$P_1 = \frac{V_1 V_2}{X} \sin \delta = P_{\max} \sin \delta \quad (1.8)$$

$$Q_1 = \frac{V_1^2 - V_1 V_2 \cos \delta}{X} \quad (1.9)$$

Pour la puissance active au bus 2, l'équation (1.6) montre clairement que lorsque la puissance P_2 augmente, la source doit fournir plus d'énergie pour augmenter l'angle de charge δ afin de satisfaire la demande de la charge. Par conséquent, la puissance réactive Q_2 diminuera ou même reviendra négative à cause de la diminution du $\cos(\delta)$. Autrement, l'équation (1.9) montre que la puissance réactive Q_1 augmentera brusquement. Donc la différence entre la puissance réactive aux nœuds 1 et 2 (pertes réactives) augmentera rapidement.

On peut conclure que le transport de la puissance réactive n'est pas économique à cause de l'augmentation des pertes réactives à des niveaux de charge relativement élevés.

La meilleure solution de ce problème est de produire cette énergie localement, proche de la consommation, par l'installation de batteries de condensateurs, des compensateurs statiques (FACTS).

I.5.3 Charge appelée trop importante

L'une des causes de l'instabilité de tension correspond à une charge élevée. Ceci est du à l'augmentation croissante de la demande et à un large transfert d'énergie entre compagnies. Une instabilité de tension peut se produire en particulier lorsque la charge élevée est plus importante que celle prévue et le risque est d'autant plus grand que la consommation réactive est également plus grande que prévue.

I.6. Effets de la puissance réactive sur la tension et le transfert de puissance

La courbe d'effondrement de tension (Courbe PV) est considérée parmi les techniques les plus utilisées dans l'étude et l'analyse de la stabilité de tension. Elle trace l'évolution de la tension en fonction de l'augmentation de la charge dans le nœud. Dans ce qui suit, nous essayons d'élaborer et développer le modèle mathématique qui décrit la variation de la tension en fonction de la charge.

D'après la figure(I.3), on peut exprimer la puissance apparente au nœud 2 suivant l'équation (1.5) :

En considérant la figure(I.3), on peut écrire :

$$\bar{I} = \frac{\bar{V}_1 - \bar{V}_2}{jX} \quad (1.10)$$

On aura alors :

$$S_2^* = (\bar{V}_2 \bar{I}^*)^* = V_2^* \bar{I} = V_2^* \frac{\bar{V}_1 - \bar{V}_2}{jX} \quad (1.11)$$

Avec :

$$V_2 = (V_2[\delta])^* = V_2[-\delta]$$

On aura :

$$S^* = P - Q = -\frac{V_1 V_2}{X} \sin \delta + j \left(\frac{V_2^2}{X} - \frac{V_1 V_2}{X} \cos \delta \right) \quad (1.12)$$

Les puissances active et réactive qui transitent dans la ligne s'écrivent alors :

$$P = P_{12} = -P_{21} = \frac{V_1 V_2}{X} \sin(\delta) \quad (1.13)$$

$$Q = Q_{12} = -Q_{21} = -\frac{V_2^2}{X} + \frac{V_1 V_2}{X} \cos(\delta) \quad (1.14)$$

On élimine l'angle δ par l'utilisation de l'équation : $\cos(\delta)^2 + \sin(\delta)^2 = 1$, donc on trouve:

$$P^2 + \left(Q + \frac{V_2^2}{X} \right)^2 = \frac{V_1^2 V_2^2}{X^2} \quad (1.15)$$

L'équation (1.15) peut être reformulée comme

$$V_2^2 = \left(V_1 + \frac{XQ}{V_2}\right)^2 + \left(\frac{XP}{V_2}\right)^2 \quad (1.16)$$

$$V_2^4 + (2QX - V_1^2)V_2^2 + (P^2 + Q^2)X^2 = 0 \quad (1.17)$$

La solution de cette équation pour V donne :

$$V_2^2 = \sqrt{\left[\frac{V_1^2}{2} - QX \pm X\left(\frac{V_1^2}{4X^2} - P^2 - Q\frac{V_1^2}{X}\right)^{\frac{1}{2}}\right]} \quad (1.18)$$

Donc, pour que l'équation (1.18) admet des solutions positives pour V, il faut que :

$$P^2 + Q\frac{V_1^2}{X} \leq \frac{V_1^2}{4X^2} \quad (1.19)$$

Cette dernière équation permet d'identifier les puissances active et réactive que la ligne peut fournir à la charge. Ainsi, en introduisant la puissance de court-circuit du réseau donnée par :

$$S_{CC} = V_1^2/X \quad (1.20)$$

Nous obtenons:

$$P^2 + QS_{CC} \leq \left(\frac{S_{CC}}{2}\right)^2 \quad (1.21)$$

Ce qui nous conduit à tirer les observations suivantes

- Le transport maximum de puissance active à $S_{CC}/2$ pour $Q=0$
- Le transport maximum de puissance réactive à $S_{CC}/4$ pour $P=0$
- Une injection de puissance réactive à la fin de la ligne augmente la capacité de transport de la ligne

Ainsi, il semble qu'il est plus difficile de transporter la puissance réactive que la puissance active. En outre, le transport de la puissance réactive réduit la capacité de la ligne à satisfaire la charge en puissance active. Pour le vérifier, soit une charge absorbant une puissance S égal $P+j*Q = P+j*P \tan(\varphi)$ sous tension V . La charge en question est représentée par son admittance donnée par : $\overline{G_L} = G + jG$

En utilisant le diviseur de tension, la tension de charge $\overline{V_2}$ sera donnée en fonction de la tension de source $\overline{V_1}$, de l'admittance de charge et de la réactance de la ligne.

$$\overline{V_2} = \frac{\overline{V_1}}{1 + XG \tan \varphi + jXG} \quad (1.22)$$

Dont le module s'écrira :

$$V_2 = \frac{V_1}{\sqrt{(XG)^2 + (1 + XG \tan \varphi)^2}} \quad (1.23)$$

Pour représenter la tension V de manière plus explicite, il est plus judicieux de passer aux grandeurs normalisées. Ainsi, on suppose V_1 comme tension de base, i.e. : $V_1 = 1$ pu, et X comme impédance de base, i.e. : $X = 1$ pu, alors $XG = g$ et la tension de charge V_2 en pu s'écrira :

$$V_2 = \frac{V_1}{\sqrt{(g)^2 + (1 + g \tan \varphi)^2}} \quad (1.24)$$

Avec g , l'admittance de charge en pu.

D'après l'équation (1.24), on peut conclure que la tension au nœud 2 est une fonction de la tension au nœud 1, de l'admittance de la charge, et du facteur de puissance. La figure (1.4) présente la courbe PV obtenue de l'équation (1.24). La courbe montre la relation entre la tension et les puissances actives au jeu de barres de la charge). Chaque courbe en trait continu représente les points de fonctionnement pour un facteur de puissance donné lorsque l'admittance varie de 0 à l'infini. Ainsi, en variant le facteur de puissance.

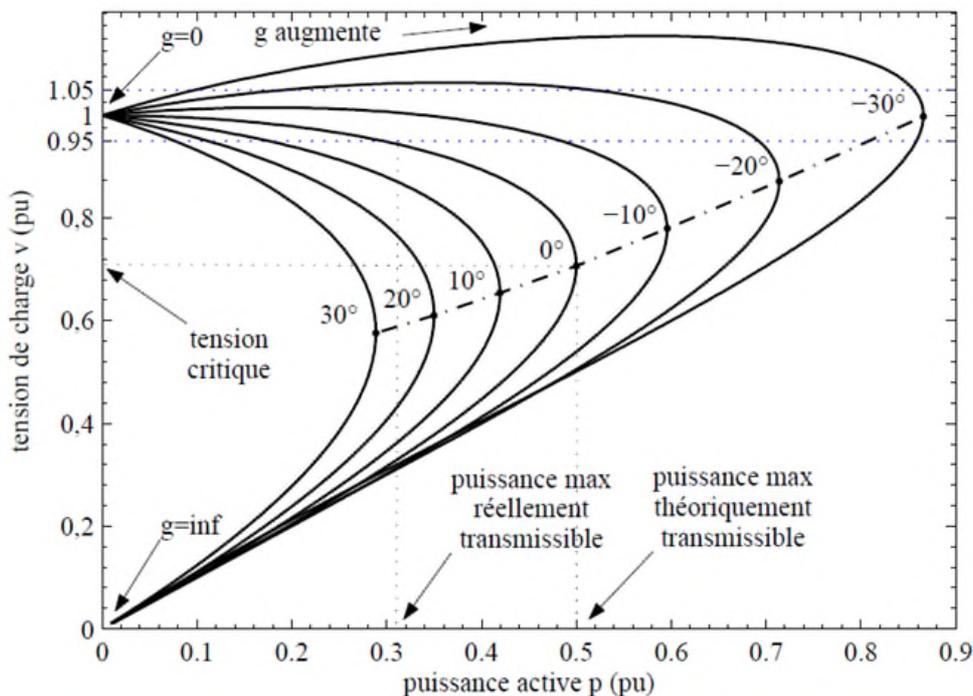


Fig. 1.4 .Courbes PV pour différents facteurs de puissance.

Courbes PV :

La Figure(I.4) représente des courbes PV obtenues de l'équation (1.24), pour quelques valeurs de l'angle d'admittance δ . Le point le plus à droite de chaque courbe représente le point de fonctionnement où la puissance transmise est maximale pour une charge d'admittance g et de facteur de puissance $\cos(\delta)$. La tension correspondante à ce point

représente la tension critique. Cette puissance maximale est dite puissance maximale théoriquement transmissible ou Limite théorique de transfert de puissance. Cette limite est de 0.5 pu pour un facteur de puissance unitaire, mais elle augmente pour des facteurs de puissance capacitifs, cependant pour des facteurs de puissances inductifs, cette limite est inférieure à 0.5 pu.

A partir du point de fonctionnement à puissance maximale, si la l'admittance augmente, on remarque que la puissance diminue et la tension chute considérablement et le tout tend vers zéro. Le système devient instable à partir de ce point. Ainsi, la courbe PV peut être divisé en une partie stable c'est-à-dire la partie supérieure, et une partie instable c'est la partie inférieure.

I.7. Moyennes de réglage de la tension

Pour faire face aux variations du plan de tension et des besoins de compensation, il existe différents moyens d'action qui doivent répondre à une demande de puissance fluctuante dans le temps, qui résulte soit de la consommation réactive des charges, soit des pertes réactives sur l'ensemble du réseau.

I.7.1. Compensation traditionnelle

I.7.1.1. Condensateurs shunt

Les condensateurs shunt fournissent de la puissance réactive au système au point où elles sont connectées, principalement pour exploiter les longues lignes au dessus de leurs puissances naturelles (requis par une charge inductive). Elles peuvent, soit être mises sous tension en permanence allumées ou éteintes pendant les cycles de charge. La figure (I.5) illustre un circuit à compensation avec condensateur shunt appliqué sur le côté charge.

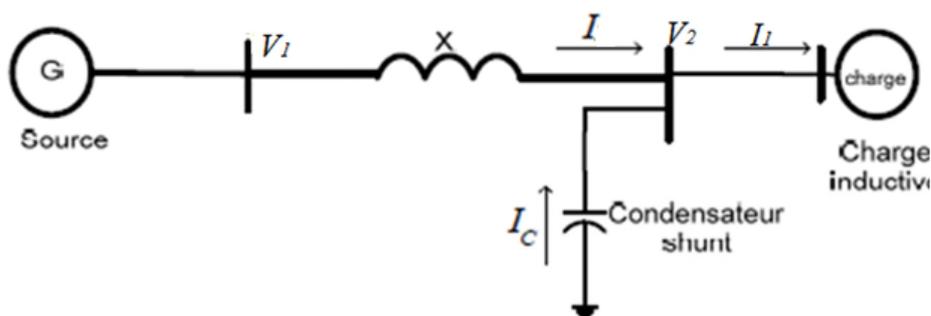


Fig. I.5. Compensation à l'aide de condensateurs shunt.

L'application de condensateurs shunts dans un réseau avec un facteur de puissance en retard présente les avantages suivants :

- Augmenter le niveau de tension à la charge.
- Améliorer la régulation de tension.
- Réduire les pertes de puissances actives (RI_2) et les pertes de puissances réactives (XI_2) due à la réduction du courant.
- Augmenter le facteur de puissance.
- La diminution des chargements en puissances apparente sur les générateurs de source Et le réseau pour soulager un état de surcharge.

I.7.1.2. Condensateurs séries

Les condensateurs séries sont utilisés pour neutraliser une partie de la réactance inductive d'un réseau électrique. Cela est illustré dans la figure (I.6). L'introduction du condensateur série dans un réseau réduit l'impédance de la ligne, et augmente la tension à la charge, avec le résultat que la capacité de transmission de la ligne est augmentée.

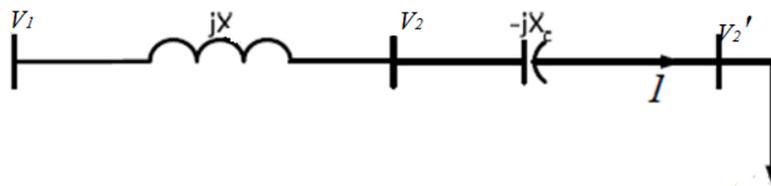


Fig. I.6 : Compensation avec condensateurs série.

La capacité série offre les avantages suivants dans le réseau :

- Condition de la tension améliorée
- Performance de la stabilité augmentée
- Balance de la puissance réactive contrôlée
- Aide dans la distribution de la charge et contrôle les pertes de transmission

I.7.1.3 Compensateurs synchrones

Cette solution de compensation utilise des générateurs du réseau pour produire ou absorber du réactif en agissant sur le courant d'excitation. En effet, une machine synchrone peut être commandée de manière à préserver la tension via la puissance réactive qu'elle produit [9]. Une machine synchrone surexcitée fournit de l'énergie réactive comme un condensateur. En sous-excitation, elle absorbe du réactif comme une inductance. Ils sont branchés le plus souvent au tertiaire d'un transformateur. Le grand avantage par rapport aux condensateurs ou inductances passives est leur grande flexibilité sous toutes conditions de charge (réglage continu), par contre le coût de ces machines est élevé tant en investissement qu'en maintenance. Ce type de compensation n'est plus d'usage et remplacé par des dispositifs à base d'électronique de puissance plus performants

I.7.2. Compensateurs statiques de puissance réactive(FACTS)

Les compensateurs statiques de puissance réactive (CSPR), ou FACTS (de l'anglais Flexible Alternative Current Transmission System) sont des dispositifs plus récents qui associent des bancs de condensateurs et de bobines à des convertisseurs d'électronique de puissance permettant de réguler la puissance réactive délivrée et ainsi la tension du nœud de connexion. Ces appareils ont un temps de réponse très court, de l'ordre de quelques dizaines de millisecondes.

I.7.2.1. Apports et Avantages des FACTS

L'intérêt majeur de la technologie FACTS pour les opérateurs de l'énergie électrique est d'ouvrir plus d'opportunités pour le contrôle de la puissance et d'augmenter les capacités utilisables des présentes lignes sous les conditions normales. Ces possibilités résultent par l'habileté des contrôleurs FACTS de contrôler les paramètres intervenant dans l'équation (1.25) qui gouverne l'opération de transmission de l'énergie dans une ligne tel que les impédances séries, impédances shunts, courant et tension angle de phase.

$$P = \frac{V_1 V_2}{X} \sin(\delta) \quad (1.25)$$

Par cette action les contrôleurs FACTS permettent dans un système énergétique d'obtenir un ou plusieurs des bénéfices suivants:

- Contrôle du flux de puissance qui est la principale fonction des dispositifs FACTS. Ce contrôle doit être réalisé selon un cahier de charge prédéfini pour satisfaire les besoins des consommateurs.
- Améliorer la stabilité dynamique du système: entre autre des fonctions des FACTS, l'amélioration de la stabilité transitoire, atténuation des oscillations et le contrôle de la stabilité des tensions.
- Contrôle des tensions dans les nœuds.
- Augmenter les capacités de charge des lignes vers leurs limites thermiques.
- Contrôle de la puissance réactive: Réduction de l'écoulement de la puissance réactive, donc permettre aux lignes de transmettre plus d'énergie active et par conséquent réduire les pertes de transmission.
- Amélioration de la qualité de l'énergie.

I.7.2.2. Les type des FACTS

I.7.2.2.1. Compensateurs Shunt

Ce sont le plus souvent des éléments statiques qui génèrent ou absorbent de l'énergie réactive. Ce contrôle de l'énergie réactive injectée permet de maintenir le niveau de tension à une valeur consigne. En effet, la chute de tension dans une ligne peut être réduite en jouant sur la valeur de l'énergie réactive.

Ils sont le plus souvent utilisés pour résoudre les problèmes d'instabilité dynamique ou transitoire de la tension. On compte dans cette famille plusieurs dispositifs mais on base sur SVC et au STATCOM.

I.7.2.2.1.1. Compensateur statique de puissance réactive (SVC)

Le compensateur statique de puissance réactive est apparu dans les années 1970 pour répondre à des besoins de stabilisation de tension rendue fortement variable du fait de charges industrielles très fluctuantes.

Le SVC est un dispositif FACTS de 1^{ère} génération connecté en shunt à la ligne et qui permet la génération ou l'absorption de l'énergie réactive et cela pour maintenir un niveau de tension désiré.

A. Inductance contrôlée par thyristors TCR

Un TCR (Thyristors Controlled Reactor) est composé d'une inductance fixe mise en série avec une valve à thyristors (gradateur) d'après la figure (I.7), qui fait varier le courant à travers l'inductance et cela en variant l'angle d'amorçage des thyristors compris entre 90° et 180°. Le TCR est caractérisé par sa commande continue et par sa génération d'harmoniques sur le réseau.

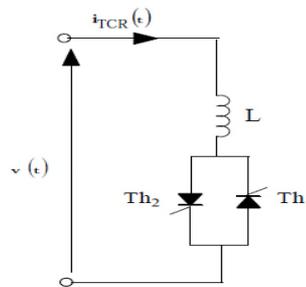


Fig. I.7. Modèle d'un TCR.

Avec

$$\begin{cases} \bar{I}_{TCR} = -jB_{TCR} \cdot \bar{V} \\ B_{TCR} = \frac{2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha}{\pi L \omega} \end{cases} \quad (1.26)$$

B. Capacité commutée par thyristors TSC

Il se compose d'un condensateur branché en série avec une valve à thyristors bidirectionnelle qui sert de commutateur figure (I.8). Celle-ci permet la mise en marche ou l'arrêt du condensateur mais sans introduire d'harmoniques au réseau. Cela est possible car la commutation intervient lorsque la tension résiduelle du condensateur est égale à la tension du réseau et, donc le courant s'annule en ce point. Le TSC fournit donc une solution plus rapide et plus fiable à la commutation de condensateurs que les dispositifs mécaniques conventionnels de commutation. [10] [11].

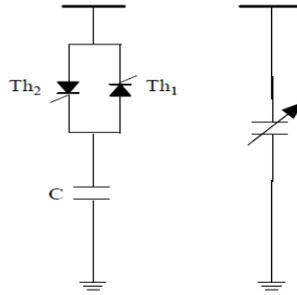


Fig. I.8. Modèle d'un TSC

C. Réglage de tension en utilisant un SVC

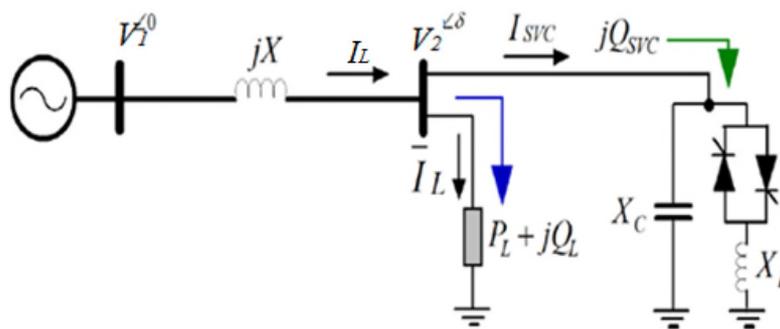


Fig. I.9. Réglage de tension en utilisant un SVC

La Figure (I.9) montre le principe de réglage de la tension par un Static Var Compensator. Celui-ci est constitué d'un condensateur C en parallèle avec un TCR (Thyristor Controlled Reactor). Le TCR est une réactance inductive X_L couplée au jeu de barres via un variateur de tension (gradateur) qui fait que sa réactance X_{TCR} devient variable en fonction de l'angle d'amorçage α des thyristors.

Le courant et la tension aux bornes du TCR sont liés par la relation suivante :

$$u(t) = L \frac{di_L(t)}{dt}, \quad i_L(t) = \frac{1}{L} \int_0^t u(t). dt \quad (1.27)$$

$U(t)$ est la tension aux bornes du TCR et $i_L(t)$ est le courant qui traverse l'inductance L. L'expression du courant, pour les deux demi périodes positive et négative est donnée par la relation (1.28)

$$i_L(t) = \begin{cases} \frac{\bar{U}}{LW} (\cos \alpha - \cos wt) & 0 \leq wt \leq \pi \\ \frac{-\bar{U}}{LW} (\cos \alpha + \cos wt) & \pi \leq wt \leq 2\pi \end{cases} \quad (1.28)$$

La décomposition du signal de courant en séries de Fourier donne.

$$i_L(t) = I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos nwt + b_n \sin nwt) \quad (1.29)$$

Quelques simplifications s'imposent en raison de la nature paire et alternative du courant. La valeur moyenne est alors nulle et aussi les facteurs b_n qui s'annulent eux aussi.

L'expression de a_n est donnée par :

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^t i_L(t) \cos(nwt) dt \quad (1.30)$$

L'étude étant axée sur le régime permanent du réseau, ceci limite le développement au premier rang et donc ne retenir que le fondamental.

Et par définition de la réactance, l'expression (1.29) devient

$$i_L(t) = a_1 \cos wt = \frac{\bar{U}}{\pi X_L} [2\pi - 2\alpha + \sin 2\alpha] \quad (1.31)$$

Avec : $X_L = LW$

$$X_{TCR} = \frac{U(t)}{i_L(t)} \quad (1.32)$$

Alors

$$X_{TCR}(\alpha) = \frac{\bar{U} \sin wt}{\frac{\bar{U}}{\pi LW} [2\pi - 2\alpha + \sin 2\alpha] \sin(wt - \frac{\pi}{2})} \quad (1.33)$$

Il en résulte la réactance du TCR donnée par :

$$X_{TCR}(\alpha) = \frac{\pi LW}{2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha} \quad (1.34)$$

$$\bar{X}_C = \frac{1}{j\omega C}$$

Et en mettant en parallèle avec la capacité de réactance

Le résultat est donné par :

$$X_{SVC}(\alpha) = \frac{\pi X_L}{2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha - \pi \frac{X_L}{X_C}} \quad (1.35)$$

Finalement, la puissance réactive du SVC est

$$Q_{SVC} = \frac{V^2}{X_{SVC}} = V^2 \frac{X_C(2(\pi - \alpha) + \sin(2\alpha)) - \pi X_L}{\pi X_C X_L} \quad (1.36)$$

Cette équation montre qu'on peut agir sur la puissance réactive du SVC en agissant sur l'angle d'amorçage α pour régler la tension V.

La Figure (I.10) représente la caractéristique $X_{SVC} = f(\alpha)$. On remarque que pour des angles d'amorçage inférieurs à un certain α_0 , la réactance du SVC est positive ou inductive, alors qu'elle est négative ou capacitive pour des angles d'amorçage supérieurs à α_0 .

Pour $\alpha = \alpha_0$, la réactance du SVC tend vers l'infini, ce qui implique qu'à cet angle le SVC est ouvert, et par conséquent sa puissance réactive est égale à zéro.

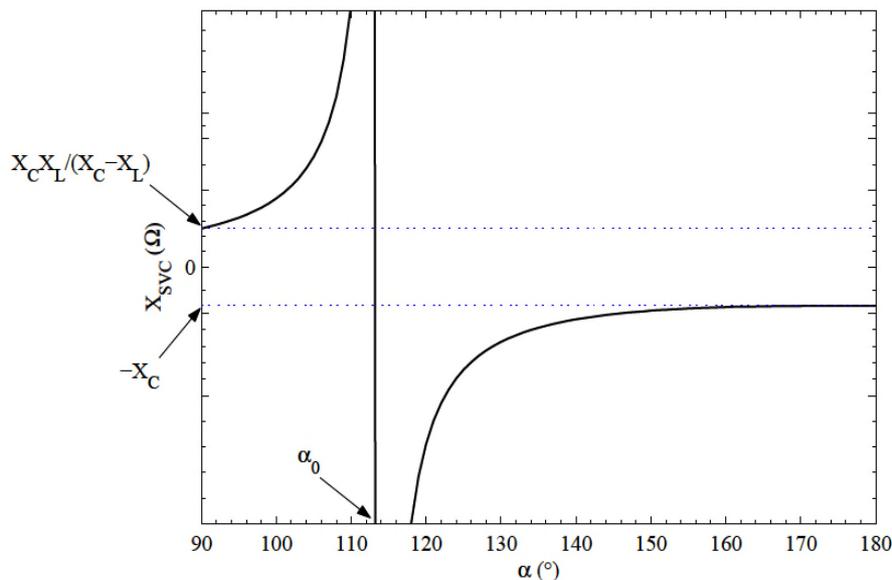


Fig. I.10. Réactance du SVC en fonction de l'angle d'amorçage

D. Les principales applications du compensateur statique de puissance réactive sont

- Soutien de la tension en régime permanent
- Compensation rapide de la puissance réactive
- Stabilisation statique et transitoire de la tension
- Equilibrage dynamique des charges

I.7.2.2.1.2. Compensateur statique synchrone (STATCOM)

Le compensateur statique synchrone STATCOM (Static Synchronous Compensator), nom générique donné par le père des STATCOM, Laslo Gyugyi, en 1976. Il fut le premier FACTS utilisant le VSC (Voltage Source Converter) à être introduit dans les réseaux de transmission [11] [12].

Un STATCOM est un convertisseur à source de tension connectée en parallèle à un réseau alternatif (transmission ou distribution), en général, par le biais d'un transformateur abaisseur. Si l'on règle l'amplitude de la tension du VSC de façon à ce qu'elle soit supérieure à la tension du réseau, une puissance réactive est fournie et augmente la tension au point de connexion. De la même façon, si l'on règle la tension du VSC à une valeur inférieure à la tension du réseau, une puissance réactive est absorbée par le VSC et la tension au point de connexion est réduite. La plage de fonctionnement du STATCOM est pratiquement

symétrique, ce qui signifie qu'il peut fournir ou absorber des quantités de puissance réactive quasi identiques.

A .Le principe de fonctionnement

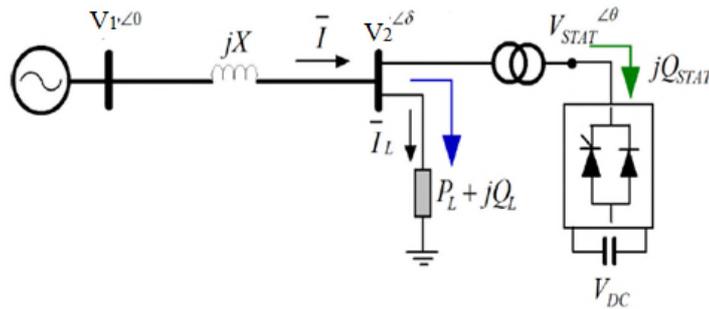


Fig. I.11. Réglage de tension charge par un STATCOM

L'échange d'énergie réactive se fait par le contrôle de la tension de sortie de l'onduleur V_{SH} laquelle est en phase avec la tension du réseau V . Le fonctionnement peut être décrit de la façon suivante :

- Si la tension $V_{SH} < V$, le courant circulant dans l'inductance est déphasé de $\frac{-\pi}{2}$ Par rapport à la tension V ce qui donne un courant inductif (figure. I.12.a).

$$\text{Telle que } Q_{sh} = \frac{|V|^2}{X_{Stat}} - \frac{|V||V_{Stat}|}{X_{Stat}} \times \cos(\delta - \theta) = \frac{|V|^2 - |V||V_{Stat}|}{X_{Stat}} \tag{1.37}$$

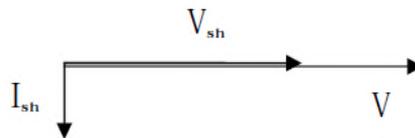


Fig. I.12.a : Courant inductif

- Si la tension $V_{SH} > V$, le courant circulant dans l'inductance est déphasé de $\frac{+\pi}{2}$ par rapport à la tension V Ce qui Donne un courant capacitif (figure I.12.b).

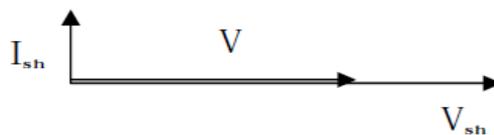


Fig. I.12 .b: Courant capacitif

Si la tension $V_{SH} = V$, le courant circulant dans l'inductance est nul et par conséquent il n'y a pas d'échange d'énergie.

La caractéristique statique de ce dispositif est donnée par la figure (I.13). Ce dispositif a l'avantage, contrairement au SVC, de pouvoir fournir un courant constant important même lorsque la tension V_s diminue [13].

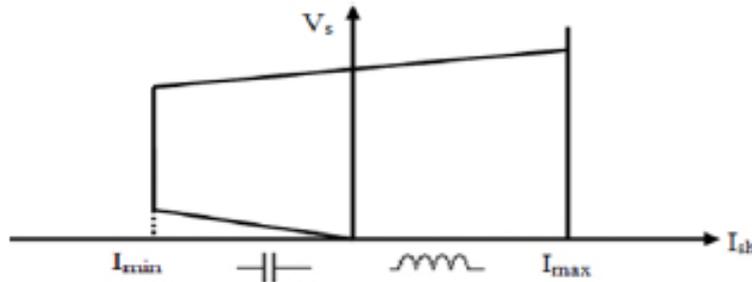


Fig. I.13. Caractéristique d'un STATCOM.

B .Avantages du STATCOM

Le STATCOM possède plusieurs avantages sur les compensateurs conventionnels

- L'étendue de la plage d'opération est plus large qu'avec un SVC classique
- Il réagit plus vite, pouvant répondre en moins d'un cycle à des variations de tension
- Lorsque la tension se baisse, il peut produire plus de puissance réactive, pour empêcher que la tension chute davantage
- 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
- Il ne présente pas d'élément capacitif qui puisse provoquer des résonances avec des éléments inductifs du réseau
- Un contrôle optimal de la tension, les phases sont contrôlées séparément pendant les perturbations du système

C .Inconvénient du STATCOM

- Le STATCOM de base engendre de nombreux harmoniques. Il faut donc utiliser, pour résoudre ce problème, des compensateurs multi-niveaux à commande MLI ou encore installer des filtres

D .Application du STATCOM

Les STATCOM accomplissent les tâches suivantes [14] [15] :

- Stabilisation dynamique de la tension : augmentation de la capacité de transport d'énergie et réduction des variations de tension

- Amélioration de la stabilité synchrone : meilleur transitif, amélioration de l'amortissement du système de puissance et l'atténuation des résonances hypo synchrones
- Équilibrage dynamique des charges
- Amélioration de la qualité de l'énergie
- Support de la tension en régime permanent

I.7.2.2.2. Compensation série

Ces compensateurs sont connectés en série avec le réseau et peuvent être utilisés comme une impédance variable (inductive, capacitive) ou une source de tension variable. En général, ces compensateurs modifient l'impédance des lignes de transport en insérant des éléments en série avec celles-ci. Il existe plusieurs compensateurs séries, notre choix est le cas du TCSC.

I.7.2.2.2.1. Condensateurs séries contrôlés par thyristors TCSC

Le TCSC est un dispositif série qui permet le contrôle de l'énergie active transitant dans une ligne de transport et cela par l'introduction d'une réactance variable en série avec l'impédance de la ligne. Ce système utilise des condensateurs à valeurs fixes placés en parallèle sur des inductances contrôlées par un variateur de courant à thyristors, de manière à rendre le réglage de la compensation capacitive ou inductive, respectivement. , au-delà et en deçà de la fréquence de résonance [16]

Le schéma de principe d'un TCSC est décrit par la figure (I.14).

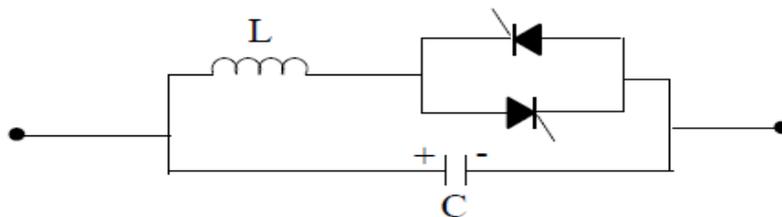


Fig. I.14 : Topologie du condensateur série contrôlé par thyristor (TCSC)

Le TCSC est composé d'une réactance couplée à un variateur de courant à thyristors composant un TCR qui est mis en parallèle avec un condensateur à capacité fixe. Ce dispositif permet un contrôle continu de la réactance offerte par le TCSC. Avec l'introduction de cette réactance X_{TCSC} , [17] [18], la réactance équivalente du TCSC peut être calculée comme suit :

$$X_{TCSC} = \frac{X_L(\alpha)X_C}{X_L(\alpha)+X_C} \quad (1.38)$$

Le TCSC présente les mêmes modes de fonctionnement que le SVC, à savoir :

Si les thyristors sont bloqués, le TCSC présente une impédance fixe égale à celle du condensateur C.

Si les thyristors sont commandés en pleine conduction, l'impédance apparente du TCSC est celle de la mise en parallèle de l'inductance et de la capacité.

Si les thyristors sont commandés en phase (angle), le TCSC présente une réactance variable en fonction de l'angle α .

A. Réglage de tension en utilisant un TCSC

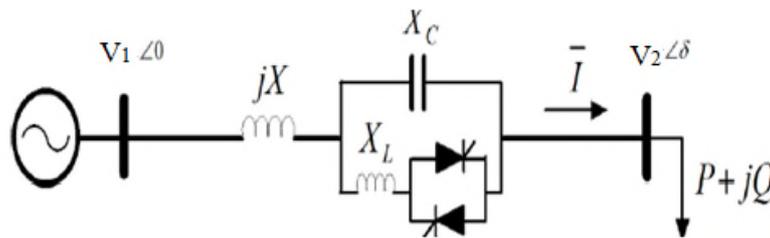


Fig. I.15. Réglage de tension charge par compensation d'une partie de la réactance De ligne en utilisant un TCSC (compensation série).

Le TCSC placé en série dans une ligne de transport permet de contrôler le flux de puissances et d'élever la capacité de transfert des lignes en agissant sur la réactance X_{TCSC} qui varie selon l'angle de retard à l'amorçage des thyristors α donné par la formule :

$$X_{TCSC}(\alpha) = \frac{jLw}{\frac{2}{\pi}(\pi - \alpha + \frac{\sin(2\alpha)}{2}) - lcw^2} \quad (1.39)$$

L'action du contrôle du TCSC est exprimée en termes de pourcentage de compensation k_c donné par:

$$k_c = \frac{X_c}{X_L} \times 100\% \quad (1.40)$$

Où :

X_L : La réactance de la ligne.

X_c : La réactance capacitive effective offerte par le TCSC.

Suivant la valeur de α on distingue trois modes de fonctionnement :

- $\alpha = 180^\circ$ la bobine est complètement déconnectée, le TCSC est considéré comme un condensateur série fixe.
- $90^\circ < \alpha < 180^\circ$ X_{TCSC} est la combinaison parallèle de X_L et X_c .
- $\alpha = 90^\circ$ les thyristors sont en pleine conduction, le TCSC peut servir à limiter le courant de défaut.

La puissance transitée dans une ligne équipée d'un TCSC est donnée par la formule :

$$P_{12} = \frac{|V_1||V_2|}{X_{TCSC}} \cdot \sin(\delta_1 - \delta_2) \quad (1.41)$$

B .Avantages du TCSC

Les principaux avantages de l'insertion du TCSC dans un réseau électrique sont :

- Compensation du déséquilibre des courants de charge
- Amélioration de la stabilité dynamique par l'amortissement des oscillations de puissance et de la stabilité de tension
- Réduction des risques de résonance hypo synchrone
- Permet principalement la variation de la réactance de la ligne du réseau
- Contrôler le transit de la puissance entre deux nœuds

C .Applications du TCSC

L'objectif principal assigné au TCSC est la minimisation des risques de résonances hypo synchrones, il permet aussi un contrôle lent du flux de puissance et un contrôle rapide d'écart de fréquence entre zones interconnectées. De plus, il assure l'amortissement des oscillations électromécaniques des sources.

Ainsi, l'efficacité d'un TCSC est caractérisée par :

- La régulation des oscillations de puissance
- L'augmentation parallèle du niveau de la puissance transportée
- L'effet d'amortissement d'un TCSC sur une interconnexion ne dépend pas de l'endroit d'implantation
- L'effet d'amortissement est insensible à la caractéristique de la charge

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté des notions de base sur la stabilité de tension d'un réseau électrique. Le problème d'instabilité de tension peut être favorisé par plusieurs paramètres à savoir :

Manque local de la puissance réactive, production trop éloignée de la consommation, ou le cas d'une charge demandée très élevée.

Nous avons présenté deux types de compensation shunt et série appliquées au contrôle de la stabilité de tension, contrôle de la chute de tension par la compensation de la puissance

réactive et le contrôle du flux de puissance active et réactive en utilisant les compensateurs séries.

Ainsi nous avons essayé de démontrer les bénéfices de la compensation de la puissance réactive dans un réseau électrique et présenté l'effet des compensateurs SVC, STATCOM et TCSC sur le flux de puissance active et réactive et leurs contrôle dans le système électrique.

Les avantages de tels compensateurs dans le contrôle de la tension par rapport aux autres types de compensateurs traditionnels sont démontrés aussi.

De ce fait, une compensation appropriée permet d'améliorer et de contrôler la stabilité de tension.

Introduction

Le compensateur statique de l'énergie réactive est apparu dans les années 70, pour répondre à des besoins de stabilisation de tension rendue fortement variable du fait de charges industrielles très fluctuantes. Plusieurs conceptions différentes ont été proposées. Toutefois, la plupart des SVC sont construits à partir des mêmes éléments de base permettant de fournir ou d'absorber de la puissance réactive. Dans ce chapitre, on présente le principe de fonctionnement du SVC, sa constitution et son modèle, puis nous allons discuter quelques applications du SVC, ses avantages et inconvénients.

II.1. Définition du SVC

Le compensateur statique de puissance réactive 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 de la puissance réactive dans la barre où il est branché de manière à satisfaire la demande de puissance réactive de la charge [19].

II.2. Structure et constitution d'un SVC

La figure (II.1) donne une représentation schématique monophasée d'un compensateur statique shunt (SVC). Il est composé d'un condensateur de réactance " X_C " dont la puissance réactive fournie peut être complètement enclenchée ou complètement déclenchée et d'une bobine d'induction de réactance inductive " X_L " dont la puissance réactive absorbée est commandée entre zéro et sa valeur maximale par des thyristors montés en tête-bêche pour assurer des inversions très rapides du courant.[20], la figure (II.2) montre son schéma équivalent.

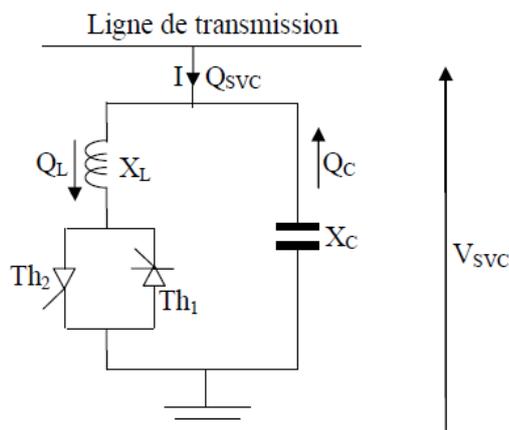


Fig. II.1 : Représentation schématique monophasée d'un Compensateur Statique

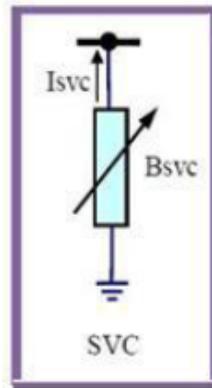


Fig. II.2:Schéma équivalent d'un SVC

Un SVC supposé idéal ne contient pas de composant résistif ($G_{SVC}=0$), donc il ne consomme pas d'énergie active du réseau. Sa puissance réactive est fonction de la tension au jeu de barre de connexion et de la susceptance B_{SVC} .

$$P_i = 0 \quad (2.1)$$

$$Q_i = -|V_i|^2 B_{SVC} \quad (2.2)$$

II.2.1.Principe de fonctionnement

Le compensateur statique SVC est composé de plusieurs éléments tel que le condensateur fixe (FC), qui est commandé par des éléments mécaniques; d'une réactance commandée par thyristors (TCR), et de condensateurs commutés par thyristors (TSC), et parfois de réactance commutée par thyristors (TSR), et des filtres d'harmoniques.

II.2.1.1. Condensateur fixe (FC)

Le condensateur fixe fournit au jeu de barre une puissance réactive fixe, il est connecté au réseau mécaniquement et comporte un contrôle pour l'ouverture du disjoncteur qui le relie au jeu de barre.

II.2.1.2. Réactance commandée par thyristors (TCR)

Principe de fonctionnement

La réactance commandée par thyristors TCR (Thyristor-Controlled Reactor) possède une bobine d'inductance fixe "L" branchée en série avec une valve à thyristors bidirectionnelle montré dans la figure (I.7) dans le chapitre (I), La réactance contrôlée par thyristors permet un contrôle plus fin de la puissance réactive car elle permet un contrôle continu du courant de compensation.

Les thyristors sont enclenchés avec un certain angle d'allumage α et conduisent alternativement sur une demi-période. On définit l'angle d'allumage α à partir du passage par zéro dans le sens positif de la tension aux bornes du thyristor à allumer. L'angle de conduction σ est l'angle pendant lequel les thyristors conduisent. Un thyristor se met à conduire quand un signal de gâchette lui est envoyé et la tension à ses bornes est positive. Il s'arrête de conduire lorsque le courant qui le traverse s'annule. Les thyristors sont allumés de façon symétrique toutes les demi-périodes. Le courant à fréquence fondamentale est réglé par la commande de phase de la valve à thyristors. En pleine conduction ($\alpha = 90^\circ$), le courant est essentiellement réactif et sinusoïdal, et lorsque $\alpha = 180^\circ$, on est en conduction nulle. [21][22]

La relation qui lie l'angle d'allumage et l'angle de conduction en régime permanent est :

$$\sigma = (\pi - \alpha) \quad (2.3)$$

Une conduction partielle des thyristors est accomplie avec un angle d'amorçage α compris entre 90° et 180° , a pour effet de réduire la fondamentale du courant, figure (II.3) (les courbes b et c), et donc de diminuer la susceptance apparente de l'inductance.

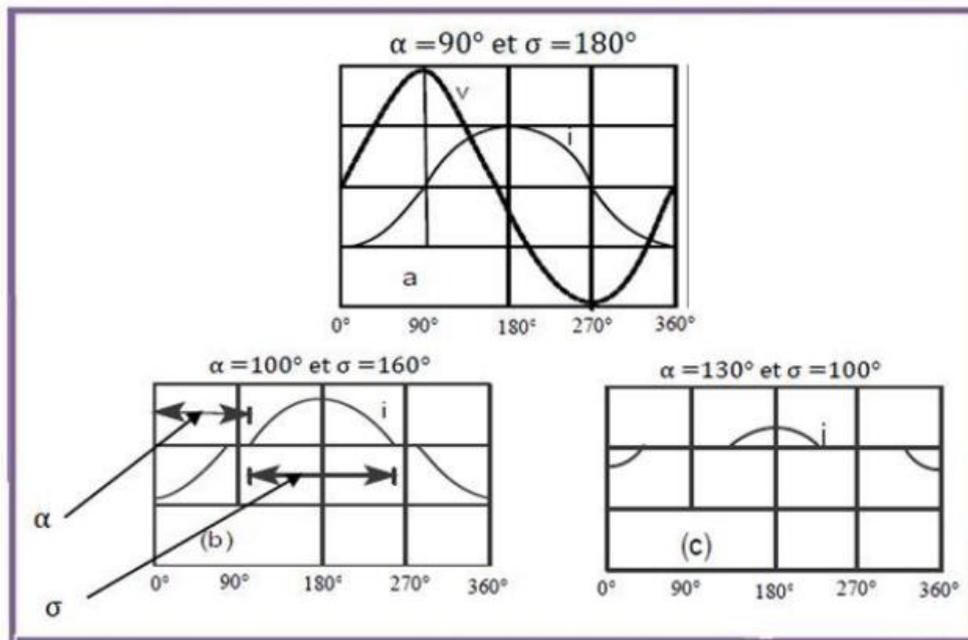


Fig. II.3: Angle d'amorçage et de conduction d'un TCR.

II.2.1.3. Condensateur commuté par thyristors (TSC)

Le condensateur commuté par thyristors TSC (Thyristor-Switched Capacitor) est composé d'un condensateur fixe "C" branché en série avec une valve à thyristors bidirectionnelle et une bobine d'inductance d'atténuation "Ll", figure (I.8) dans le chapitre I.

Le commutateur a pour rôle d'enclencher et de déclencher le condensateur pour un nombre entier de demi-cycles de la tension appliquée. Le condensateur n'est ainsi pas commandé en phase, mais simplement enclenché et déclenché. L'inductance d'atténuation sert à limiter le courant en cas de fonctionnement anormal et à éviter la résonance avec le réseau à des fréquences particulières [20] [21]. Pour avoir un minimum de perturbations transitoires, les instants de commutation sont choisis de façon à ce que la tension aux bornes des thyristors soit minimale. L'enclenchement est donc réalisé lorsque la tension résiduelle du condensateur est égale à la tension instantanée du réseau.

Le condensateur peut être commuté avec un minimum de transitoire si le thyristor est allumé (état on), à l'instant quand la tension V_C du condensateur et la tension V du réseau ont la même valeur.

La susceptance étant fixe, le courant dans le TSC varie linéairement avec la tension V (qui explique l'absence des harmoniques sur le TSC). La zone de fonctionnement est similaire à celle d'un TSR; elle est illustrée à la figure (II.4.a). Généralement le SVC de type TSC contient n banc de TSC montés en parallèle. La susceptance est ajusté par le contrôle du nombre de condensateurs parallèles en conduction. Chaque condensateur conduit toujours pour un nombre intégrant de demi-cycle. La relation qui relie le courant de compensation et le nombre de condensateurs en conduction est montrée dans la figure (II.4.b). [20]

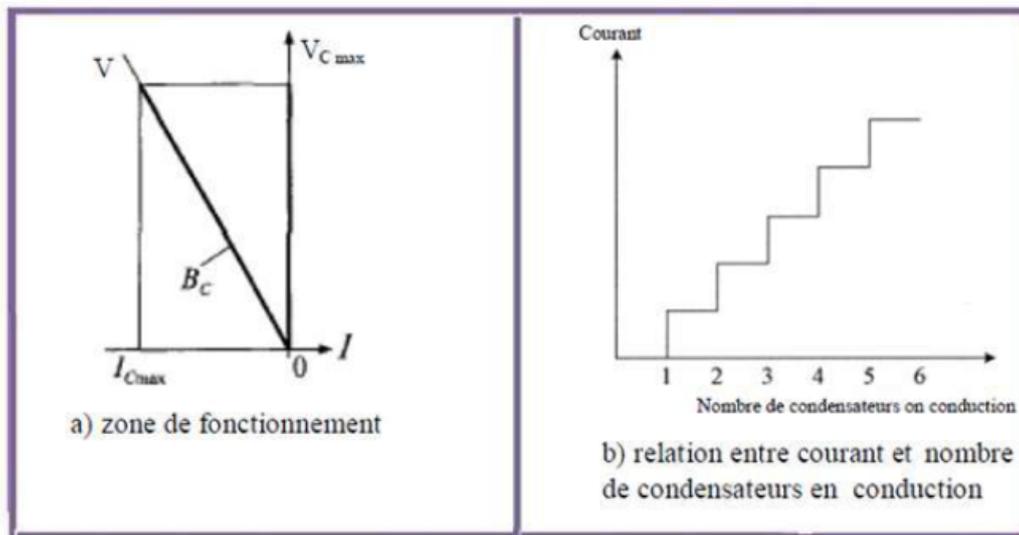


Fig. II.4:Principe d'un TSC.

Plusieurs TSC de tailles différentes peuvent être mis en parallèle, de façon à former un banc de condensateurs enclenchables et déclenchables par thyristors. Dans certaines installations, les commutations sont parfois réalisables par disjoncteurs. Ce type de dispositif porte le nom de condensateur commuté mécaniquement MSC (Mechanically-Switched Capacitor).

Les MSCs sont des dispositifs conçus pour n'être enclenchés et déclenchés que quelques fois par jour. De ce fait, leur fonction principale est de fournir de la puissance réactive en régime permanent

II.3. Les différents types de SVC

Les différents types principaux du "SVC" utilisés aujourd'hui sont:

a) Dispositif type "TCR" ou "FC/TCR": (Thyristor Controlled Reactor or Fixed Capacitors/thyristor - Controlled Reactor)

Ce dispositif est principalement constitué d'une batterie de condensateurs et d'un absorbeur réactif figure (II.5). La batterie de condensateurs est dimensionnée pour fournir une puissance réactive fixe Q_C dont le rôle est de relever le facteur de puissance de l'installation à la valeur désirée. L'absorbeur réactif comprend une inductance alimentée à travers un gradateur constitué de deux thyristors montés en tête bêche, il prélève une puissance réactive variable " Q_L " qui permet de compenser les perturbations causées par la charge " Q_{Ch} ".

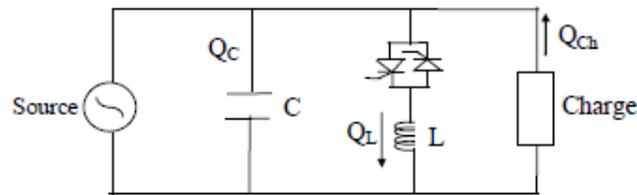


Fig. II.5 : Schéma de principe d'un FC/TCR.

Le courant qui circule dans l'inductance est réglé de façon continue par les thyristors. Ce réglage s'effectue en jouant sur l'angle de retard à l'amorçage " α " qui est compris entre 90° (Q_{Lmax}) et 180° (Q_{Lmin}).

La figure (II.6) montre le courant traversant une inductance en fonction de la tension à ses bornes et de la commande du thyristor en série.

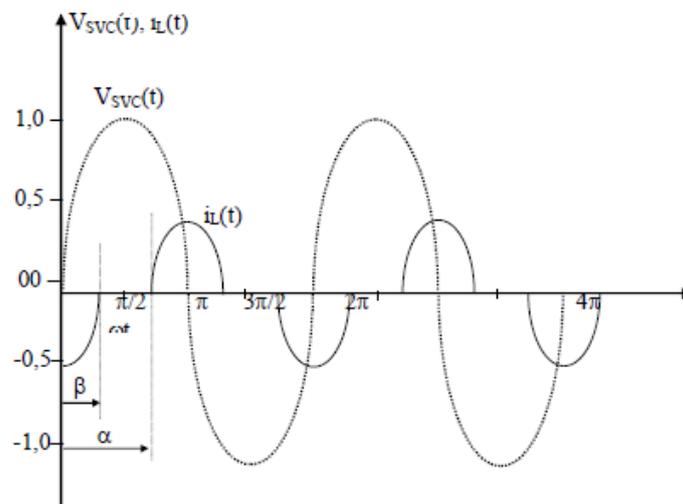


Fig. II.6. Forme du courant d'inductance.

b) Dispositif type TCR/TSC: (Thyristor Controlled Reactor/ Thyristor Switched Capacitor)

Ce dispositif est une association de réactance réglable et de condensateurs (figure II.7) couplés par thyristors

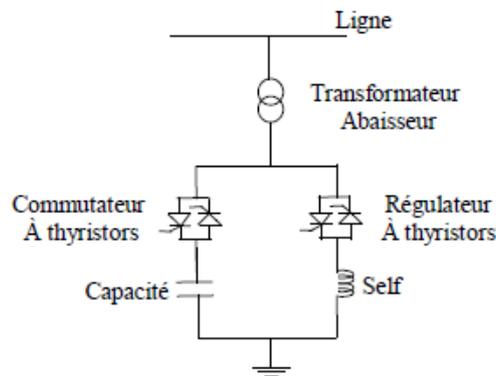


Fig. II.7. Schéma de principe d'un TCR/TSC.

Ce dispositif est apparu pour répondre à des besoins de l'industrie, surtout pour la stabilisation de la tension qui est fortement variable du fait des charges très fluctuantes telles que les fours à arc.

Le principe général consiste à compenser le plus exactement possible les variations de puissance réactive de la charge par une puissance réactive variant dans un sens opposé par une bobine d'inductance dont le courant est réglé par le gradateur.

Un banc de condensateurs complète le dispositif et permet d'ajuster le réactif absorbé par l'ensemble : charge et compensateurs [23].

c) Dispositif type TSC/TSR: (thyristor switched capacitor / thyristors switched reactor).

C'est un système avec condensateur et inductance enclenchés par thyristors. Les dispositifs avec condensateur enclenché par thyristor TSC servent normalement à bloquer immédiatement le compensateur en cas d'apparition d'effondrement brusque de tension, leur application dans les réseaux à haute tension exige un transformateur abaisseur pour l'adaptation aux caractéristiques électriques optimisées des thyristors. Généralement l'installation sur les réseaux de transport s'effectue par le biais de tertiaire d'un transformateur.

d) Dispositif mobile type TSC (thyristor switched capacitor).

On a retenu une exécution avec des condensateurs connectés par thyristors constituée de modules transportables sur des véhicules routiers. La gamme de réglage dynamique totale

de compensateur s'étale de 0 à 60 MVAR, elle est fournie par trois bancs de condensateurs commutés par thyristors. Bien que les condensateurs commutés par thyristors ne produisent eux mêmes pas d'harmoniques, on a installé des réactances afin d'éviter l'amplification des harmoniques existantes dans le réseau (figure II.8) [20] [24].

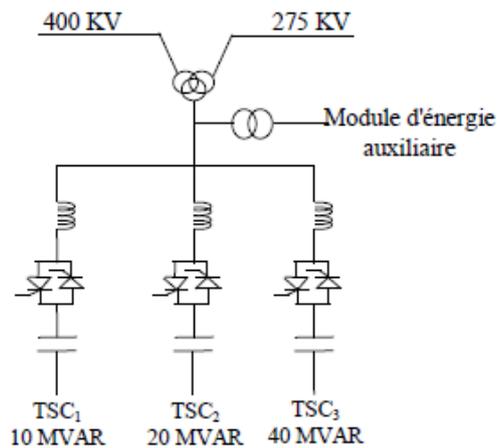
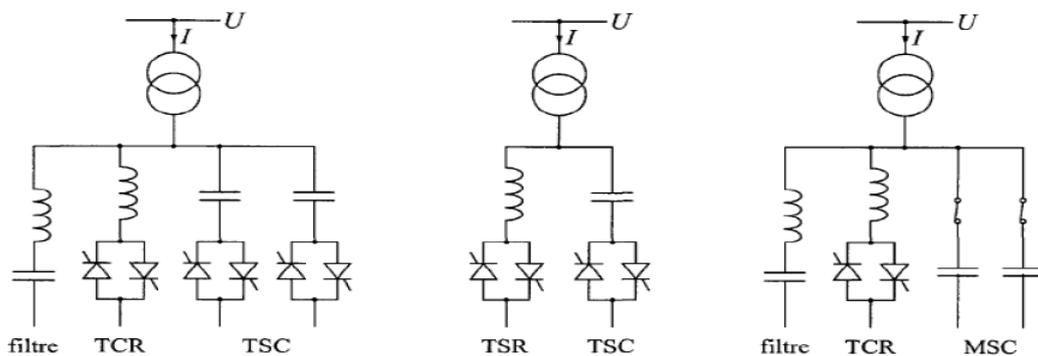


Fig. II.8. Schéma monofilaire d'un compensateur mobile "TSC".

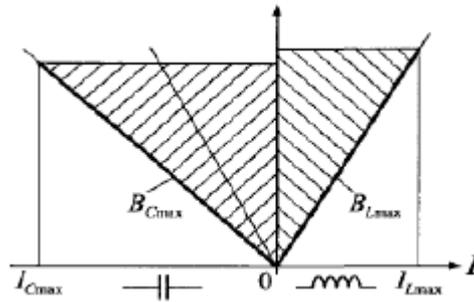
II.4. Différents schémas

La figure (II.9.a), présente différentes configurations possibles de SVC. Lorsque le dispositif comporte une anche de type TCR, un filtre permettant de réduire les harmoniques est rajouté.

La zone de fonctionnement équivalente du SVC est obtenue par la combinaison des zones de toutes les branches. Un exemple est donné à la figure (II.9.b).



II.9.a) différents schémas de SVC



II.9.b) zone de fonctionnement

II.5. D'autres SVC

En plus du SVC conventionnel (TSC et TRC), il existe d'autres appareils, le MSC (« Mechanically Switched Capacitor ») et le MSR (« Mechanically Switched Reactor »). L'ensemble forme les SVS (« Static VAR Systems ») [25].

La différence entre le MSC et le TSC est le système de connexion et de déconnexion du condensateur. L'interrupteur est basé sur des thyristors pour le TSC (1/2 à 1 cycle) alors que l'interrupteur est mécanique pour le MSC (100 ms).

En plus de la différence de vitesse de fonctionnement des interrupteurs du MSR et du TCR (système mécanique contre système à thyristors), il existe une autre différence liée aux amplitudes de variation de la réactance. Dans le MSR, la réactance ne peut prendre que deux valeurs de fonctionnement: 0 ou la valeur totale de la réactance (X_M); alors que pour le TCR elle peut prendre quelques valeurs entre 0 et X_M .

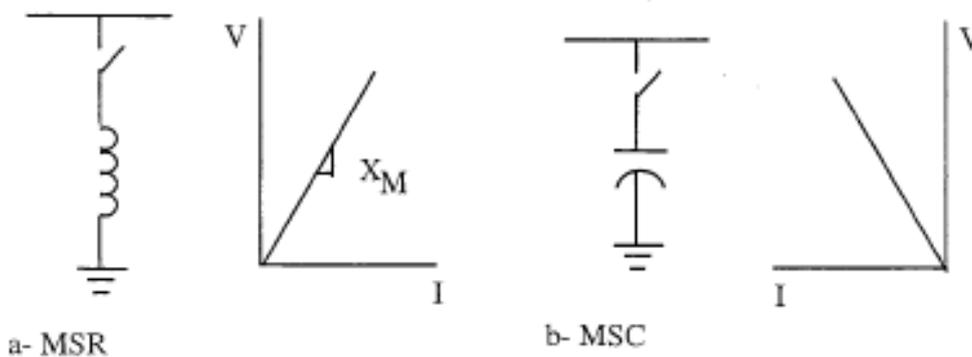


Fig. II.10. MSC et MSR

II.6. Caractéristiques d'un compensateur statique SVC

II.6.1. Caractéristique en tension d'un SVC

A. Zone de fonctionnement

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) de la figure (III.11) montre la relation entre la tension U et le courant I_{SVC} . [26]

$$V_{SVC} = I_{SVC} / (X_L // X_C) \quad (2.4)$$

Lorsque l'inductance est débranchée alors l'angle des thyristors est 180° et le condensateur est en service seule, le courant total par phase sous une tension V est égale :

$$I_{SVC} = V_{SVC} / X_C \quad (2.5)$$

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 par (C), figure (II.11).

Les droites (L//C) et (C) forment ensemble une « courbe en V » qui correspond aux limites inductive et capacitive du compensateur statique. [26]

*Cette figure pour $X_C = 2 * X_L$

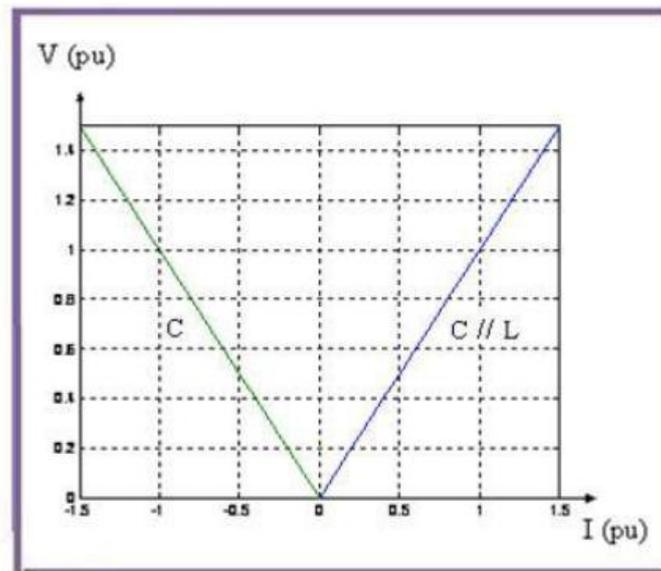


Fig. II.11: Caractéristique en tension d'un SVC.

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

II.6.2. Caractéristique de puissance réactive d'un SVC

Pour fixer le signe de puissance réactive Q_{SVC} , le compensateur est considéré comme un commutateur. La puissance réactive Q_{SVC} est positive lorsqu'elle est absorbée par le compensateur (comportement inductif), le courant d'entrée I est un courant réactif, il est supposé positif lorsqu'il est retardé de 90° par rapport à la tension V_{svc} . Si par contre, le compensateur fournit de la puissance réactive (comportement capacitif), cette dernière est considérée comme étant négative, ainsi que le courant I . Ces relations sont prises en compte sur la figure (III.12). Par conséquent, la puissance réactive Q_L est positive alors que la puissance réactive Q_C est négative. [26]

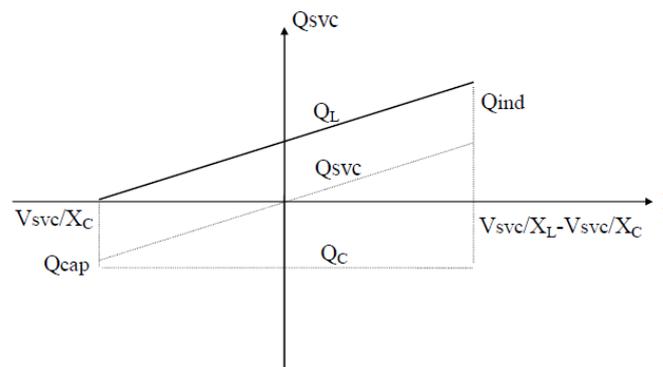


Fig. II.12 : Exigences posées à la puissance réactive.

La puissance réactive Q_{SVC} varie entre une valeur inductive " Q_{ind} " et une valeur capacitive " Q_{cap} ", Avec :

$$Q_{cap} = \frac{V_{svc}^2}{X_C} \quad (2.5)$$

On obtient alors la réactance capacitive X_C nécessaire pour le condensateur. De la relation suivante, on peut déterminer la réactance X_L de la bobine d'inductance :

$$Q_{ind} = \frac{V_{svc}^2}{X_L} - \frac{V_{svc}^2}{X_C} \quad (2.6)$$

Les relations (2.5) et (2.6) se rapportent à une phase du compensateur

II.7. Modélisation du dispositif SVC

Les dispositifs FACTS shunt modélisés sont des compensateurs statiques de puissances réactives tels que le SVC et autres dérivés (TCR, TSC). Bien qu'ils présentent des performances moins bonnes que le compensateur statique synchrone, elles ne sont guère importantes en régime permanent. De plus, les simulations sont réalisées pour des cas où les

tensions sont proches de la valeur nominale. Dans cette situation, le SVC présente des caractéristiques semblables [21] [28].

II.7.1. Modèle de compensateur statique de puissance réactive SVC

Le dispositif SVC est modélisé par une admittance shunt y_{SVC} variable (figure II.13.a). Le SVC étant supposé sans pertes, l'admittance est donc purement imaginaire:

$$y_{SVC} = j b_{SVC} \quad (2.7)$$

La susceptance b_{SVC} peut être de nature capacitive ou inductive afin respectivement de fournir ou d'absorber, de la puissance réactive Q_{SVC} (figure II.13.b).

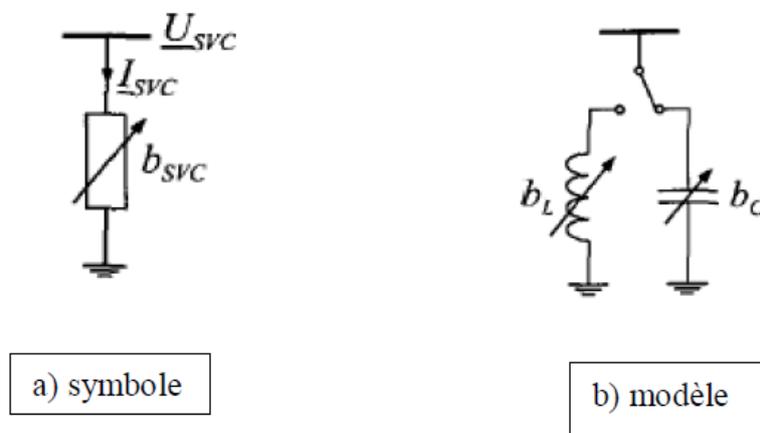


Fig. II.15 : Modélisation du SVC

Les valeurs des SVC sont exprimées sous forme de puissance réactive Q_{SVC} absorbée à la tension nominale U_n . La correspondance avec la susceptance b_{SVC} est donnée par la relation

$$Q_{SVC} = -U_n^2 \cdot b_{SVC} = -U_n^2 \frac{X_C [2(\pi - \alpha) + \sin(2\alpha)] - \pi X_L}{\pi X_C X_L} \quad (2.8)$$

La puissance réactive réellement absorbée par le SVC est donnée par:

$$Q_{SVC} = -\frac{U^2}{U_n} \cdot B_{SVC} \quad (2.9)$$

Le signe « moins » indique que le SVC fournit de la puissance réactive au système lorsqu'il est capacitif alors qu'il en consomme lorsqu'il est inductif. La variation de la puissance réactive injectée en fonction de la tension est représentée à la figure (II.16) pour plusieurs valeurs de compensation [28].

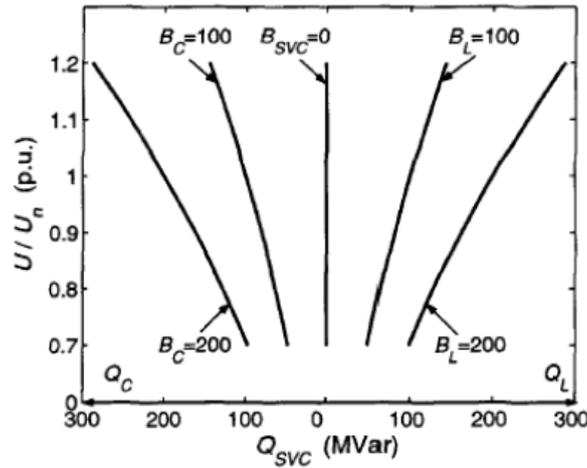


Fig. II.14: Variation de la puissance réactive par un SVC en fonction de la tension nodale.

II.7.2. Valeurs de consigne du dispositif SVC

Les valeurs du compensateur statique de puissance réactive sont exprimées sous forme de puissances réactive injectées à une tension de 1p.u. Une valeur positive indique que le dispositif fournit de la puissance réactive au système alors qu'il en absorbe, lorsque Q_{SVC} est négative. Un SVC peut prendre n valeurs discrètes compris dans l'intervalle:

$$-Q_{L\ max} \leq Q_{SVC} \leq Q_{C\ max} \quad (2.10)$$

Si le compensateur statique est de type condensateur commuté par thyristor (TSC), seule une injection de puissance réactive est possible et $Q_{L\ max} = 0$. La puissance réactive au réseau est limitée par :

$$0 \leq Q_{TSC} \leq Q_{C\ max} \quad (2.11)$$

Dans le cas d'une inductance contrôlé par thyristor (TCR ou TSR), la puissance réactive peut uniquement être absorbée et $Q_{C\ max} = 0$. Exprimée sous forme d'injection, la puissance réactive du TCR peut être prendre des valeurs entre :

$$0 \geq Q_{TSC} \geq Q_{L\ max} \quad (2.12)$$

À l'heure actuelle, il existe des dispositifs shunt dont la puissance réactive maximale peut atteindre 500 MVar. Pour l'optimisation, les valeurs limites des SVC ne sont pas fixées, mais sont adaptées en fonction du réseau dans lequel les FACTS sont à placer.

II.8. Utilisation et Inconvénients de SVC

II.8.1 Utilisation de SVC

Les compensateurs statiques de puissance réactive ont été utilisés dans les réseaux électriques pour résoudre une variété de problèmes, à savoir:

II.8.1.1. Améliorer les niveaux de tension sur un jeu de barres ou une région

La commande de tension est la principale fonction d'un SVC. Comme cela a été décrit déjà, le SVC contrôle la tension d'un nœud par l'absorption ou par la fourniture de la puissance réactive que le SVC effectue sur le réseau.

Dans les systèmes à faible puissance de court-circuit, comportant des lignes de transport longues, la tension est affectée de manière significative par la variation de la charge et par la déconnexion d'éléments du réseau. Pour des charges importantes, la tension peut chuter considérablement et peut pallier à conduire à l'instabilité du réseau en tension. Les SVC ont été utilisés principalement pour corriger ce problème.

II.8.1.2. Augmenter la capacité de transport de puissance active du réseau

Soit le système donné par la Figure (II.15. a). La capacité de transport de la ligne sera donnée par les tensions V_1 et V_2 , par simplicité on suppose que $V_1 = V_2$, et la réactance de la ligne (X_L), est donnée par l'équation suivant :

$$P = P_m \sin(\delta) \quad \text{où} \quad P_m = \frac{V_1^2}{X_L} \tag{2.13}$$

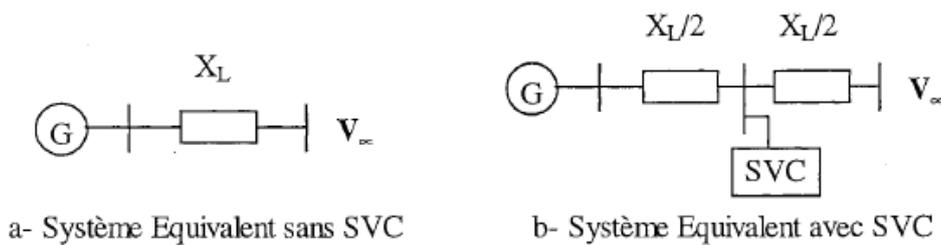


Fig. II.15. Système de Ligne de Transport d'électricité (sans et avec SVC)

Quand un SVC de capacité de puissance réactive illimitée est installé au point milieu de la ligne (Figure II.15.b), la capacité de transport est donnée par:

$$P_1 = \frac{V_1^2}{X_L/2} \sin(\delta/2) \tag{2.14}$$

Pour un SVC avec une limite de capacité de puissance réactive (Q_C), la puissance transmise par la ligne compensée est :

$$P = P_m \frac{1}{1 - \frac{Q_C}{4P_m}} \sin(\delta/2) \tag{2.15}$$

La Figure (II.16) compare la caractéristique P- δ de transport d'une ligne de transport sans et avec SVC.

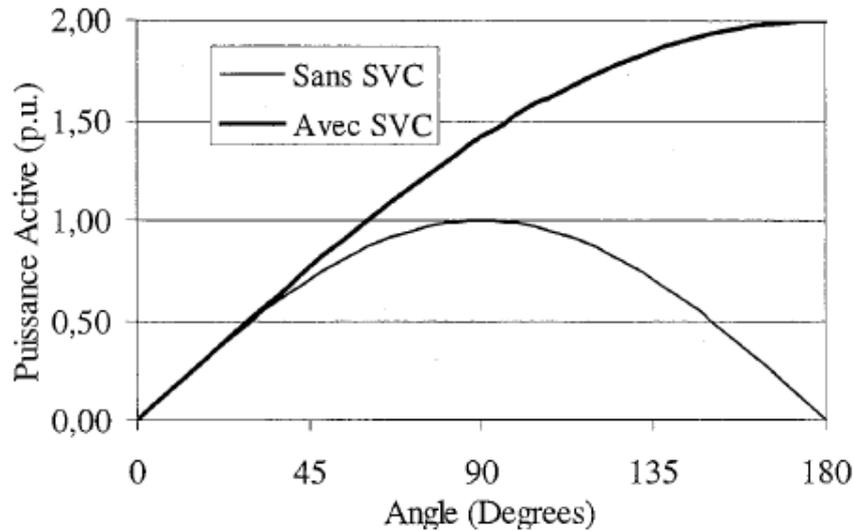


Fig. II.16. Capacité de Transport de Puissance d'une Ligne de Transport

II.8.1.3. Réduire les surtensions temporelles

Les surtensions temporelles sont produites pour la connexion et déconnexion d'éléments de réseau. Un SVC permet une absorption de la puissance réactive ce qui contribue à diminuer la surtension.

En plus des applications mentionnées antérieurement, le SVC offre un avantage important qui est sa rapidité de réponse. Comme le SVC n'a pas d'élément tournant, c'est-à-dire d'inertie, son temps de réponse est plus rapide que le temps de réponse des machines électriques. Une action rapide sur la commande de tension évite l'augmentation de la génération de puissance réactive pour les générateurs en évitant l'arrivée en butée de fourniture d'absorption de puissance réactive de ces derniers.

Pour la charge, une réponse rapide du SVC, évite que les charges dynamiques (moteurs à induction) augmentent la charge totale du système. Cela permet également à certain charge de ne pas cesser sur des valeurs minimum de tension (par exemple, l'éclairage fluorescent).

II.8.2. Inconvénients des SVC

Un système qui fonctionne à ses limites d'exploitation et fortement dépendant de la compensation par SVC peut souffrir facilement d'un effondrement de tension. Ceci est dû au fait que la génération de puissance réactive hors de la zone de régulation est dépendante du carré de la tension et que le SVC ne peut plus maintenir le niveau requis par le réseau. Le SVC, hors de la zone de contrôle, fonctionne comme une susceptance connectée en parallèle sur le nœud.

D'autre part, le SVC permet de contrôler uniquement un des trois paramètres importants, la tension. Pour les deux autres paramètres, l'impédance et l'angle, d'autres systèmes sont nécessaires pour en assurer le contrôle.

Bien que les SVC aient la rapidité nécessaire pour réaliser le contrôle en temps réel, ils requièrent beaucoup de travail pour l'installation et beaucoup de place au sol. Par ailleurs, ils sont très chers.

Conclusion :

Le compensateur statique de l'énergie réactive constitue une technologie évoluée, qui a connu une utilisation généralisée dans les systèmes électro énergétiques. Dans ce chapitre, on a décrit le principe général de fonctionnement du compensateur, les différents éléments constituant le dispositif, les différents modèles utilisés dans la littérature, et ses différentes applications.

Introduction

Ce chapitre est consacré à la simulation du SVC introduits dans un réseau électrique a deux nouds électrique et voir leurs influences sur la stabilité de tension, Cette simulation a été performée dans l'environnement « MATLAB/SIMULINK ».

Le fonctionnement du SVC dans un réseau électrique a était bien défini dans le chapitre II ; Les résultats de simulations avec SVC sont bien présentés et interprétés dans ce chapitre.

III.1. Description du système utilisé

La représentation du système de distribution a été faite en utilisant l'environnement MATLAB Simulink version 7.9.0(R2009).

Le système comporte une source de 400 MVA connecté avec un transformateur abaisseur de tension à travers deux charges (1 est résistive et 2 est inductive), une charge 3 inductive est installée sur le jeu de barre en amant de transformateur, comme indiqué sur la figure (III.1).

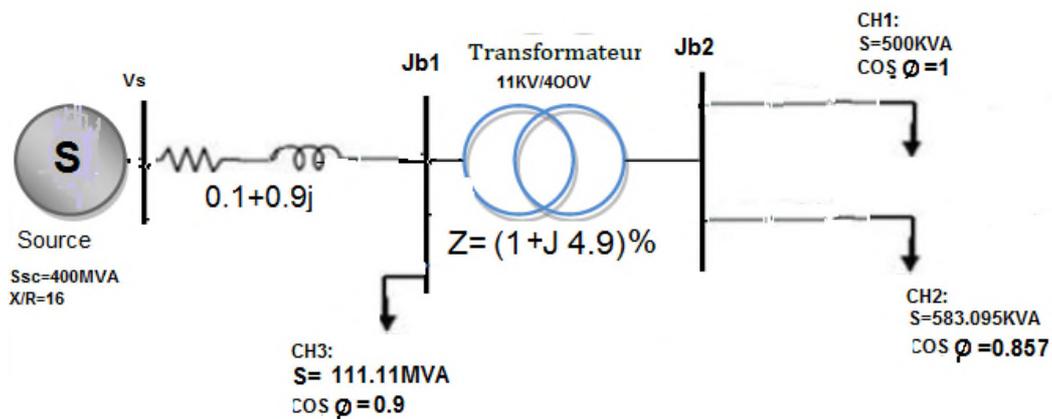


Fig.III.1. Schéma unifilaire du réseau test utilisé.

Le réseau test de notre étude peut être décrit par leurs caractéristiques réelles suivantes :

- Une source de 400MVA, avec une tension de sortie de 11KV, $\frac{X}{R}=16$
- Un transformateur de 2MVA, 11KV/400V et d'impédance $Z_T=1+j4, 9 \%$
- la charge 1 résistive après le transformateur sous tension 400V et de puissance $S=500KVA, \cos\phi=1$.
- la charge 2 inductive après le transformateur sous tension 400V et de puissance $S=588KVA, \cos\phi=0,85$.

- la charge 3 inductive est alimentée au jeu de barre juste avant le transformateur sous tension 400V et de puissance 111,11MVA

Le schéma équivalent du réseau étudié en grandeurs réduites réel est présenté par la figure (III.2):

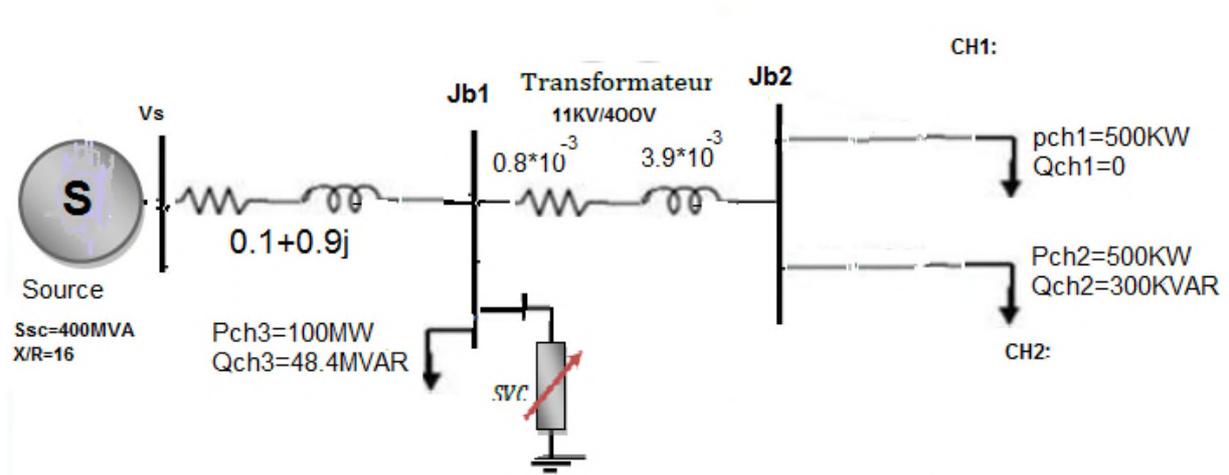


Fig. III.2.Schéma unifilaire du réseau test utilisé avec le compensateur SVC avec grandeurs real.

III.2.Dimensionnement de SVC

Pour calculer la puissance Q_{SVC} il faut étudier le schéma de figure (III.2)

D'après la figure (III.2) on a :

$$Q_{Tot} = \sum Q_{Consommé} + Q_{SVC} \tag{3.1}$$

Donc : $Q_{SVC} = Q_{Tot} - \sum Q_{Consommé} \tag{3.2}$

Il faut d'abord calculer les puissances consommées P_{Cons} et Q_{Cons} :

$$P_{Cons} = \sum P = P_{Trnsfo} + P_{Ch3} + P_{Ch2} + P_{Ch1}$$

$$Q_{Cons} = \sum Q = Q_{Trnsfo} + Q_{Ch3} + Q_{Ch2} + Q_{Ch1}$$

Alors :

Pour la charge 1 :

$$Q_{ch1} = 0$$

$$P_{Ch1} = 500KW \Rightarrow I_1 = S_2 / \sqrt{3} \quad V_2 = 500 * 10^3 / \sqrt{3} * 400 = 721,68 \angle 0^\circ A$$

Pour la charge 2 :

$$Q_{ch2} = 300KVAR$$

$$P_{Ch2} = 500KW \Rightarrow I_2 = S_2 / \sqrt{3} \quad V_2 = 583.09 * 10^3 / \sqrt{3} * 400 = 841.62 \angle 30,96^\circ A$$

Les puissances consommées dans le transformateur :

$$I = I_1 + I_2 = 1506.91 \angle 16,7^\circ A$$

$$P_{\text{Transfo}} = R * I^2 = 0,8 * 10^{-3} * (1506,91)^2 = 1,8166 \text{KW}$$

$$Q_{\text{Transfo}} = X * I^2 = 3,9 * 10^{-3} * (1506,91)^2 = 8,8560 \text{KVAR}$$

Donc :

$$P_{\text{Cons}} = 101,0018 \text{ MW}$$

$$Q_{\text{Cons}} = 48,741 \text{ MVAR}$$

Pour trouver Q_{SVC} fourni par SVC on doit résoudre l'équation (3.3):

$$V_1^2 = \left(V_S + \frac{X Q_{\text{Tot}}}{V_S} \right)^2 + \left(\frac{X P_{\text{Cons}}}{V_S} \right)^2 \quad (3.3)$$

Puisque $V_1 = V_S = 11 \text{KV}$

$$X = 0,9$$

$$Q^2 + \frac{2V_S^2}{X} Q + P_{\text{Cons}}^2 = 0 \quad (3.4)$$

Le déterminant s'écrit comme :

$$\sqrt{\Delta} = \sqrt{\left(\frac{2V_S^2}{X} \right)^2 - 4(1)(P_{\text{Cons}}^2)}$$

$$\sqrt{\Delta} = 177,74 * 10^6$$

L'équation (3.4) admet deux solutions :

$$Q_1 = \left(-\frac{2V_S^2}{X} + \sqrt{\Delta} \right) / 2 = -45,70921 \text{ MVAR} \quad (\text{Retenue})$$

$$Q_2 = \left(-\frac{2V_S^2}{X} - \sqrt{\Delta} \right) / 2 = -223,1796 \text{ MVAR} \quad (\text{exclue})$$

$$Q_{\text{Tot}} = Q_1 = -45,70921 \text{ MVAR}$$

D'après l'équation (3.2) :

$$Q_{\text{SVC}} = Q_{\text{Tot}} - Q_{\text{Cons}} = -45,70921 \text{ MVAR} - 48,741 \text{ MVAR}$$

$$Q_{\text{SVC}} = -94,450 \text{ MVAR}$$

III.3.Simulation et résultats

L'application du schéma ci-dessus de la figure (III.2) sur MATLAB Simulink nous a permis l'obtention de cette simulation.

Nous avons placé le SVC pour réduire la chute de tension et compensé les tensions aux niveaux des jeux de barre (1,2) de transformateur soit la même que celle de la source ($V_S = 1 \text{pu}$).

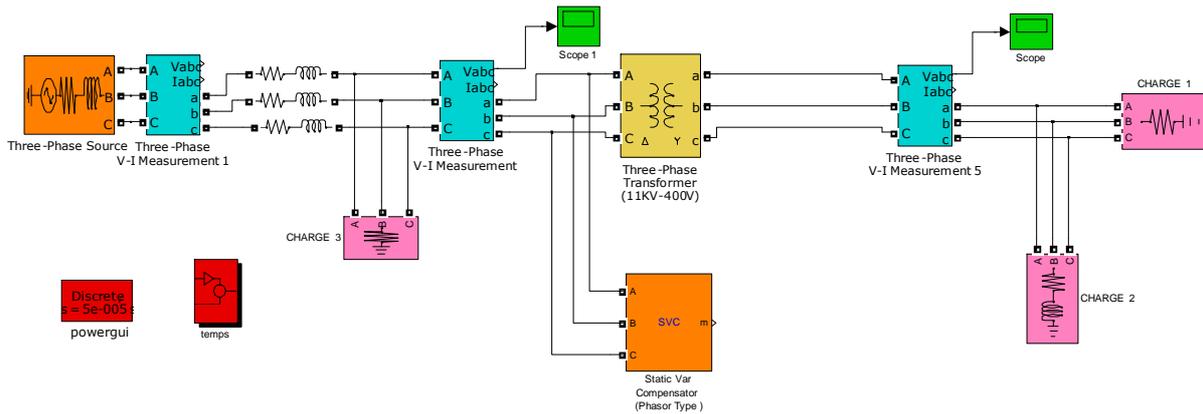


Fig.III.3. Représentation du réseau test sur MATLAB/Simulink.

III.3.1.Sans compensateur SVC

D’après la simulation de schéma ci-dessus sur matlab sans SVC en obtient les résultats suivants.

A. Tension au niveau de jb1

On remarque que la tension au niveau de jeu de barre jb1 est égale à 0.94 pu d’après la figure (III.3), alors sa tension est chute de 0.06pu, cette chute de tension est provoquée par la charge 3 inductive.

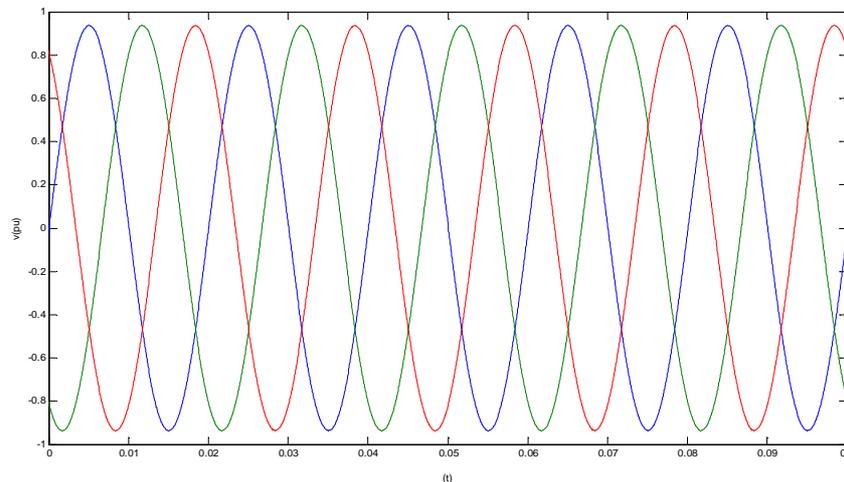


Fig. III.4 La tension au niveau de Jb1 (en pu).

B. Tension au niveau de jb2

On remarque que la tension au niveau de jeu de barre jb1 est égale à 0.94 pu d’après la figure (III.3), alors sa tension est chute de 0.06pu, cette chute de tension est provoquée par la charge 3 inductive.

La figure (III.5) montre que Le système dans ce cas soit perturbé donc sa stabilité ne reste plus la même. En absence du contrôle, le système subi à une petite chute de tension $\Delta V = 0,08$ pu, provoqué par les deux charges (1,2) $V_{Jb2} = 0,92$ pu.

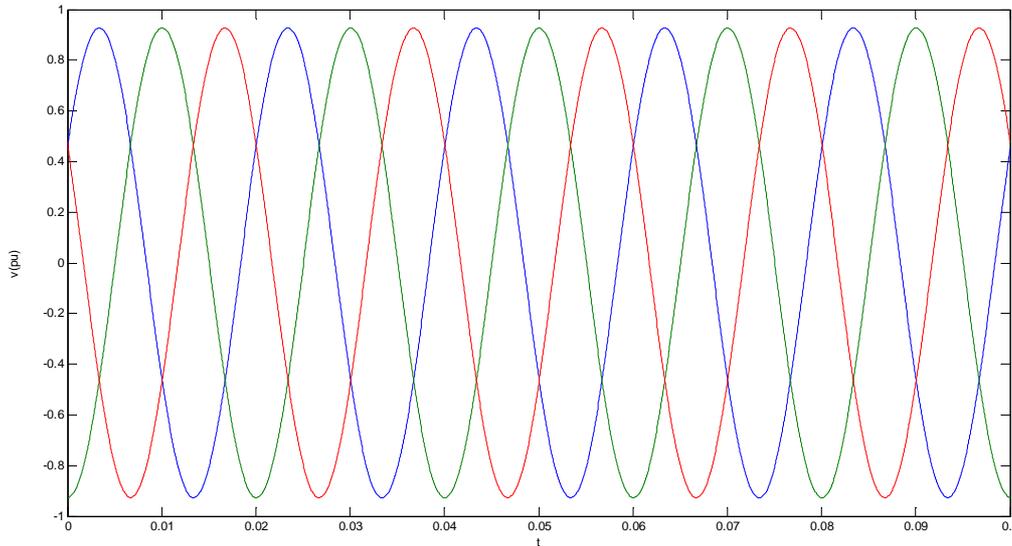


Fig. III.5. La tension au niveau de Jb2 (en pu)

III.3.2. Avec compensateur SVC

Pour éliminer la chute de tension dans le réseau de notre étude en remplace le SVC on niveau de jeu de barre de transformateur comme indique sur la figure (III.3).

Les valeurs du compensateur statique de puissance réactive Q_{SVC} sont exprimées sous forme de puissances réactive injectées à une tension au niveau de $jb1$ Une valeur négative indique que le dispositif fournit de la puissance réactive au système alors qu'il en injecte lorsque Q_{SVC} est négative.

Pour calculer la puissance du TSC, on considère que le TCR est totalement déconnecté. Le compensateur statique SVC est de type condensateur commuté par thyristor (TSC), seule une injection de puissance réactive est possible et $Q_{Lmax} = 0$. La puissance réactive au réseau est limitée par : $Q_{TSC} \leq Q_{Cmax}$ Avec $C = \frac{Q_{TSC}}{\omega V_1^2}$ comme en a déjà exprimé dans (III.2).

A. Tension au niveau jb1 après compensation

La figure (III.6) montre que Le système dans le cas ou il soit compensé nous bénéficions d'une augmentation de la marge de stabilité de tension de 0.06 (pu) dans l'intervalle $[0-0.1s]$ $V_{Jb1} = 1pu$.

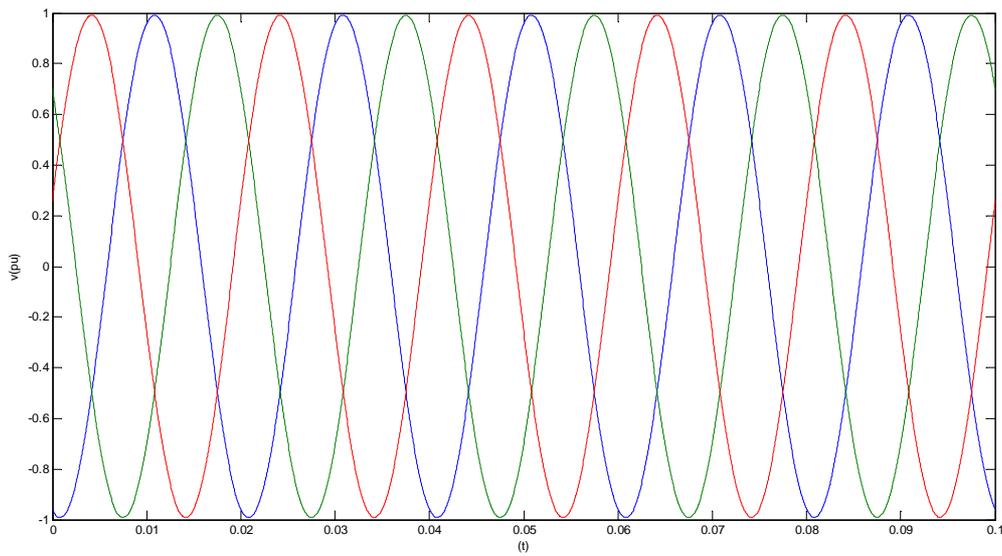


Fig. III.6. La tension au niveau de Jb1 après compensation

B. Tension au niveau de jb2 après la compensation

La figure (III.7) montre que Le système dans ce cas ou il soit compensé nous bénéficions d'une augmentation de la marge de stabilité de tension de 0.08 (pu) dans l'intervalle $[0-0.1s]$ $V_{Jb2} = 1 pu$.

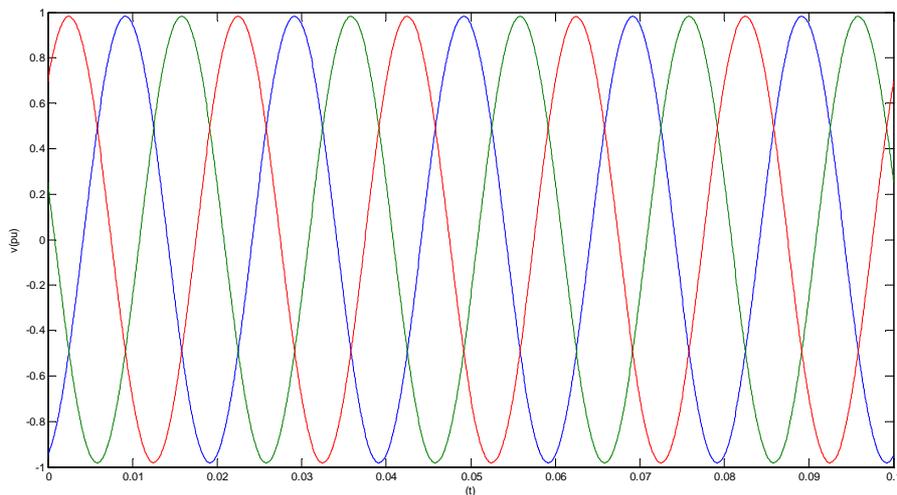


Fig. III.7. La tension en (pu) au niveau de JB2 après compensation

III.4. Synthèse des résultats

Nous avons vu à travers l'étude le cas de chute de tension de niveau des lignes de distribution, Nous avons vérifié l'efficacité du SVC à compenser une chute de tension, à un des nœuds du réseau. Un dispositif SVC, permet en effet de rétablir un bon niveau de tensions aux nœuds après un déséquilibre de tension. En effet, nous avons montré que si le SVC est connecté à un nœud mitoyen de la chute de tension, il présente aussi de bonnes performances.

Nous avons comparé l'emplacement de SVC connectés au jeu de barre avant le transformateur dans un réseau teste a deux nœuds avec celle sans SVC.

Les résultats obtenus par le programme de simulation sans SVC montrent que la tension en niveau des charges chutées de 0,08pu dans Jb1 provoque a la charge 3 résistive, et chute de 0,06pu au niveau de Jb2 provoque par la charge 2 charge résistive et charge 3 inductive. Mais quand on va insérer le SVC a niveau de jeu de barre de transformateur on voit que les chutes de tension est éliminé et que la tension au niveau de Jb1 et Jb2 sont égaux à la celle générée par la source $V_s=1pu$ bénéficiant d'une augmentation de la marge de stabilité de tension au différent nœud de notre réseau étudié a cause de puissance réactive injecté par la SVC.

Donc le SVC permet aussi, de réduire les pertes de puissances dans les lignes du réseau compensé, donc augmenter le transfert de puissances. En on, on peut conclure que le SVC est un outil efficace pour le maintien du niveau de tension dans un réseau électrique lors de chute de tension, et qu'il présente une solution aux dégradations du niveau de tension.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons décrit le réseau à simuler par le logiciel MATLAB/SIMULINK. Dans lequel nous avons introduit le contrôleur FACTS parallèle SVC.

Nous avons effectué les essais de simulation et observé le comportement de ce contrôleur sans et avec compensation. Les résultats obtenus par les différentes simulations effectuées pour le SVC est validé d'une manière générale le modèle de dispositif utilisé, et ils ont bien montré que SVC est réalisé avec une grande efficacité notre objectif crucial dans l'optimisation de la puissance réactive et la compensation de tension dans le réseau test étudié.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Les usines et les populations peuvent être de grandes consommatrices de puissance réactive à cause des besoins énergétiques demandés en grande partie par des usines équipées de convertisseurs contrôlés à basse de composants l'électronique de puissance. Cela entraîne la facturation de l'énergie réactive par le fournisseur d'énergie électrique et une baisse de la tension dans les jeux de barres provoquant un mauvais fonctionnement de toutes les charges connectées au réseau. Pour cela :

L'étude de la stabilité de tension dans les systèmes électriques constitue un sujet important pour la planification et l'exploitation des réseaux électriques.

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

Le manque de puissance réactive contribue favorablement à une instabilité de tension, notamment lorsque les générateurs arrivent à leurs limites de production d'énergie réactive. De ce fait, une compensation appropriée permet d'améliorer et de contrôler la stabilité de tension.

Le deuxième chapitre a été consacré pour l'étude du dispositif qui fait l'objet de ce mémoire SVC. Le principe de fonctionnement de ce dispositif a été discuté, ainsi que sa constitution et son modèle, puis on a étudié l'apport du SVC à l'amélioration la stabilité de tension.

Dans le dernier chapitre, nous avons présenté le schéma électrique équivalent du réseau test étudié en grandeurs réduites. Les simulations, les résultats et les représentations graphiques obtenus sous l'environnement MATLAB-SIMULINK version 7.9. (R2009) ont clairement montré l'apport de la puissance réactive sur là l'amélioration la stabilité de tension.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE :

- [1]. Théodor Wildi avec la collaboration de Gylbert Cybille, " électrotechnique 3eme édition", partie 47, 1978, 1991, 2000.
- [2]. N. Yorino et al, "An Investigation of Voltage Instability Problems." IEEE Trans. PS, Vol.7 No.4, pp.1529-1542, November 1992.
- [3]. J.M.Kauffman : « Commande et régulation des réseaux électriques », Chap.2 Traité EGEM série génie électrique, LAVOISIER 2003.
- [4]. Yanfeng Gong, "Development of an Improved On-Line Voltage Stability Index Using Synchronized Phasor Measurement." PHD thesis, Mississippi State University, Mississippi, USA, December 2005.
- [5]. Bodapatti Nageswararao, B .E, "Fuzzy-Expert System for Voltage Stability Monitoring and Control", Master thesis, Faculty of Engineering and Applied Science Memorial University of Newfoundland, Canada, February, 1998.
- [6]. H. 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.
- [7]. A. Laifa, "Evaluation de la Stabilité de Tension d'un Réseau d'énergie électrique Développement et Application Des Indices De Stabilité ", thèse de Magister, Ecole Nationale polytechnique, 27 juin 1995.
- [8]. A. Kazemi, and B. Badrzadeh, " Modeling and Simulation of SVC and TCSC to Study their Limits on Maximum Loadability Point," Electrical Power and Energy Systems, Vol. 26, pp. 619-626, Apr. 2004.
- [9]. N. L. Aouzellag, « Contribution à l'amélioration de la flexibilité dans les réseaux électriques liée à l'intégration des générateurs éoliens », Thèse de Doctorat, Université de Bejaia, 2011.
- [10]. E. Acha, V.G. Angelidis, O. Anaya- Lara, T.J.E.Miller, 'Power Electronic Control in Electrical Systems', Newness power engineering series, 2002.
- [11]. N. G. Hingorani, 'High Power Electronics and Flexible AC Transmission System', IEEE Power Engineering Review, July 1988.
- [12]. C. Gombert, 'Simulation Temps-réel des Dispositifs d'Electronique de Puissance dédiés aux Réseaux d'Énergie Electrique', thèse de Doctorat, institut national polytechnique de Grenoble, 2005.
- [13] G. Eskandar Shahraki, « Apport de l'UPFC à l'amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques », Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré Nancy-I, 2003.
- [14]. Y. H. Song, et John, A.T, « Flexible AC transmission systems (FACTS) »,

BIBLIOGRAPHIE

London, IEEE, 1999.

[15]. Y. Guo, Hill, D. J, Wang, « Global transient stability and voltage regulation for power systems», IEEE Transactions on Power Systems, 2001.

[16]. B. Crape, 'Commande et Régulation des Réseaux Electriques', Hermes sciences, 2003.

[17]. H. Ambriz-Perez, E. Acha, C. R. Fuerte-Esquivel, 'TCSC-firing angle model for optimal power flow solutions using Newton's method', Electrical Power and Energy Systems, Elsevier, issue 28, pp 77–85, 2006.

[18]. R. M. Mathur, R. K. Varma, 'Thyristor Based FACTS Controllers for Electrical Transmission Systems', JOHN WILEY & SONS PUBLICATION, 2002

[19]. Hanene 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.

[20]. Haimour Rachida, « contrôle des puissances réactives et des tensions par les dispositifs FACTS dans un réseau électrique », mémoire de magister en électrotechnique, option identification modélisation et commande numérique des processus, école normale supérieure de l'enseignement technologique d'Oran, année universitaire 2008-2009.

[21]. DeVre R, Jacquet B « Perturbations dans les installations électriques et électroniques Problèmes et solutions» Note d'information.

[22]. Jacques .C, Guillaume de Preville, Jean-Louis Sanhet « Fluctuations de tension et flicker- Évaluation et atténuation (partie I et II) » Techniques de l'ingénieur D 4 315.

[23]. Richard Gagnon, « Étude de la Ferro résonance dans les réseaux compensées séries et Shunt », thèse de doctorat, université de LAVAL, QUEBEC. Canada, soutenue en Mai 1997.

[24]. KUNDUR.P « Power System Stability and Control » IEEE Transactions on Power System 1994.

[25]. CIGRE Working Group 38-01. "Static Var Compensator", CIGRE, Paris, 1986.

[26]. Mammeri Oussama, « différentes méthodes de calcul de la puissance réactive dans un nœud à charge non linéaire en présence d'un système de compensation de l'énergie », mémoire de magistère, option : réseaux électriques, université de Batna, année universitaire 2011/2012.

[27]. Ben Alia Khaled et Zahnite Hakim, «Etude des compensateurs statiques de l'énergie réactive SVC dans un réseau électrique », université de Biskra, promotion juin 2005.

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

Annexe

LISTE DES DISPOSITIFS FACTS CONNUS

Les définitions des systèmes flexibles de transport de l'énergie électrique les plus connus donnés par l'institut IEEE sont :

A.1 compensateurs shunt

SSG (Static Synchronous Generator):

Générateur Statique Synchrone. Convertisseur de puissance auto commuté, couplé à une source de tension appropriée il génère des tensions multi phase. Connecté au réseau AC, il permet les échanges de puissance active et réactive indépendamment du niveau de tension du réseau.

SVG (Static Var Generator):

Le Générateur Statique D'énergie Réactive absorbe ou génère de l'énergie réactive. Il est le plus souvent composé de capacité commutée par thyristors ou des réactances contrôlées par thyristors.

BESS (Battery Energy Storage System):

Des batteries de condensateurs chimiques couplés à des convertisseurs rapides qui permettent de délivrer ou absorber de l'énergie.

TCBR (Thyristor Controlled Braking Résistor):

Résistance contrôlé par thyristors qui stabilise le réseau ou minimise le courant lors d'une perturbation.

SVC (Static Var Compensator):

Compensateur statique d'énergie réactive. Un générateur statique d'énergie réactive connecté en shunt dont le courant de sortie est ajusté pour maintenir le niveau de tension au jeu de barre.

STATCOM (Static Synchronous Compensator):

Compensateur statique synchrone agit comme un compensateur d'énergie réactive. Son courant, inductif ou capacitif, peut être contrôlé indépendamment de la tension au jeu de barres.

A.2 Compensateurs série :

SSSC (Static Synchronous Séries Compensator):

Générateur statique synchrone sans alimentaire externe, le SSSC opère comme un compensateur série. Sa tension de sortie est en quadrature avec le courant, duquel elle est indépendante. Son but est d'augmenter ou diminuer la perte de puissance transitée. Il peut recevoir en addition un système d'absorption d'énergie pour améliorer le comportement dynamique du réseau.

TCSC (Thyristor Controlled Séries Compensator):

Compensateur série commandé par thyristor est Un compensateur à réactance capacitive. Il est composé de batteries de capacités en parallèle avec une inductance contrôlée par thyristor.

Annexe

TCSR (Thyristor Controlled Séries Reactor):

Inductance en parallèle avec inductance contrôlée par thyristor.

TSSC (Thyristor Switched Séries Capacitor):

Compensateur série commuté par thyristor, Utilise le même concept que le TCSC sauf que la réactance est commutée au lieu d'être contrôlée. Ceci donne une réactance globale quantifiée.

TSSR (Thyristor Switched Séries Reactor):

Une inductance est mise en parallèle avec une inductance commutée par thyristor. La réactance ainsi obtenu permet un contrôle qualifié de l'impédance série de la ligne.