



Université EL Hadj Lakhdar Batna
Faculté de Technologie
Département d'Electrotechnique



Mémoire de Magistère en Electrotechnique
Option : Réseau Electrique

Présenté par : Ay Abdelouahab

Thème

Modélisation et Analyse d'Un Compensateur Statique : SVC

Soutenu publiquement le 02 /05/2013 devant le jury composé de:

Pro : Guettafi Amor	Université de Batna	Président
Pro : Chaghi A/Aziz	Université de Batna	Rapporteur
Dr : Cherif Fetha	Université de Batna	Examineur
Dr : Louisa Belfarhi	Université de Batna	Examineur
Dr : Rahem Djamel	Université d'OUM EL Baouaghi	Examineur

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

Remerciements

Tout d'abord, je remercie dieu de tout puissant de m'avoir donné le courage et la patience durant toutes ces années d'études.

*Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et ma reconnaissance envers mes promoteur Mr **Abdelaziz Chaghi**, professeur à l'université de Batna, pour la confiance qu'il m'a prodigué, par ces encouragements continus, pour le suivi et la direction de mon travail, ainsi que pour ces conseils judicieux.*

*Par ailleurs, je remercie vivement Mr **Amor Guettafi**, professeur à l'université de Batna, qui ma fait l'honneur de présider le jury de ma thèse.*

*Je tiens également à présenter mes sincères remerciement à Mr. **Cherif Fetha**, Maitre de conférence à l'université de Batna et Mr **Rahem Djamel**, Maitre de conférence à l'université de Oum El Baouagui et Melle **Louiza Benfarhi**, Maitre de conférence de l'université de Batna, pour leur participation à l'évaluation scientifique de ce travail.*

Je n'oublie évidemment pas mes collègues, et mes enseignants du département d'électrotechnique de Batna.

*A ma mère
A la mémoire de mon père
A ma femme
A mes filles **Nada, Rayhane** et mon fils **Souhybe**.
A mes frères et mes sœurs
A tous ceux qui me sont chers
Je dédie ce modeste travail.*

Ay abdelouahab

LISTE DES FIGURES

LISTE DES FIGURES

CHABITRE I :

- Figure (I-1) : Schéma monophasé équivalent
- Figure (I-2) : Diagramme vectoriel des tensions.
- Figure (1-3) : Creux de tension.
- Figure (1-4) : Fluctuation de la tension.
- Figure (1-5) : Fluctuation de la fréquence
- Figure (I-6) : Système de puissance à deux jeux de barre
- Figure (I-7) : Principe de la compensation série

CHAPITRE II :

- Figure (II-1) : Compensateur shunt dans un réseau de transmission
- Figure (II-2) : Les phases de tension et de courant du compensateur shunt
- Figure (II-3) : La variation de puissance $P_0(\delta)$, $P_c(\delta)$, $Q_0(\delta)$ et $Q_c(\delta)$ transmis en fonction de (δ)
- Figure (II-4) : Schéma de base d'un SVC et les Caractéristique d'un SVC
- Figure (II-5) : Schéma du SVC et TCBR
- Figure (II-6) : Schéma unifilaire du STATCOM
- Figure (II-7) : Diagramme vectoriel de STATCOM
- Figure (II-8) : Compensateur série dans un réseau de transmission
- Figure (II-9) : Diagramme de phase de la tension et courant du compensateur série.
- Figure (II-10) : La puissance active et réactive en fonction de (δ, K)
- Figure (II-11) : Schéma de structure du TCSC
- Figure (II-12) : Schéma de principe de TCSR
- Figure (II-13) : Schéma de base de SSSC
- Figure (II-14) : Structure d'un TCPAR
- Figure (II-15) : Diagramme des phraseurs du TCPAR
- Figure (II-16) : Schéma de base de l'un IPFC
- Figure (II-17) : Schéma de base de l'UPFC
- Figure (II-18) : Schéma de deux réseaux connectés
- Figure (II-19) : Diagramme schématique pour l'application des FACTS

CHAPITRE III :

Figure (III-1) : Nombre approximatif d'installations du SVC.

Figure (III-2) : Configuration de SVC les plus communes

Figure (III-3) : Inductance commande par thyristor TCR

Figure (III-4) : Principe de contrôle du TCR,

Figure (III-5) : Condensateur commuté par thyristors

Figure (III-6) : Schéma d'un SVC de type TCSR

Figure (III-7) : Réactance apparente injectée par TCSR

Figure (III-8) : Structure d'un Statcom connecté à un réseau électrique

Figure (III-9) : Diagramme de phase.

CHAPITRE IV :

Figure (IV- 1) : Schéma de la ligne étudiée avec SVC

Figure (IV-2) : Courbe caractéristique d'étude TCSR

Figure (IV-3) : Impact du TCSR sur la puissance active et réactive

Figure (IV-4) : Schéma d'un SVC connecté à un réseau électrique

Figure (IV-5) : Tension de départ V_1 et d'arrivée V_2

Figure (IV-6) : Puissance active et réactive injectée par le SVC

Figure (IV-7) : Puissance active et réactive transitées sur la ligne

Figure (IV-8) : La tension aux bornes de condensateur

Liste de tableaux

Chapitre I

Tableau (I.1) : Différents dispositifs de contrôle utilisés dans le problème tension/puissance réactive

LISTE DES SYMBOLES ET ABREVIATIONS

Liste des symboles et abréviations

Abréviations

<i>EPRI</i>	Electric Power Research Institute
<i>FACTS</i>	Flexible Alternating Current Transmission Systems
<i>GTO</i>	Gate Turn Off
<i>SVC</i>	Static Var Compensator
<i>TCR</i>	Thyristor Controlled Reactor
<i>TSC</i>	Thyristor Switched Capacitor
<i>TSR</i>	Thyristor Switched Reactor
<i>TCPRA</i>	Thyristor Control Breaking Resistor
<i>STATCOM</i>	Static Synchronous Compensator
<i>TCSC</i>	Thyristor Controlled Series Capacitor
<i>TSSC</i>	Thyristor Switched Series Capacitor
<i>TCSR</i>	Thyristor Controlled Series Reactor
<i>TSSR</i>	Thyristor Switched Series Reactor
<i>SSSC</i>	Static Synchronous Series Capacitor
<i>TCPAR</i>	Thyristor Controlled Phase Angle Regulator
<i>IPFC</i>	Interline Power Flow Controller
<i>UPFC</i>	Unified Power Flow Controller
<i>MLI</i>	Modulation de largeur d'impulsion

Les Symboles

V_1	Tension de source
V_2	Tension aux bornes de la charge (le récepteur)
Z	L'impédance
Θ	L'angle de déphasage de tension
Φ	L'angle déphasage de courant
$[Y]$	La matrice admittance nodale du réseau
P_{perts}	Les pertes d'énergie active
Q_{perts}	Les pertes d'énergie réactive
$P_c(\delta)$	La puissance active dans une ligne de transmission
$Q_c(\delta)$	La puissance réactive dans une ligne de transmission
Δ	L'angle de la charge
X_{eff}	La réactance effective
I_{TCR}	Le courant de Thyristor
X_{TCR}	L'impédance de thyristor
B_{TCR}	La susceptance de thyristor
B_{CMax}	La susceptance de condensateur
B_{LMax}	La susceptance de l'inductance
$T_1 \dots T_4$	Les interrupteurs d'un convertisseur
V_{0a}	La tension de sortie du convertisseur
V_{sa}	La tension de phase de l'alimentation
S	La fonction de la commutation
I_{ra}	Le courant réactif
T_d	Le temps de retard de transport
T_b	Le temps de retard à l'amorçage
T_M	Le temps de mesure
PI	Le régulateur proportionnel intégral
R	Résistance de la ligne
X	Réactance de la ligne

D'autres notation et symboles spécifiques peuvent être définis dans les chapitres, s'il y a lieu

SOMMAIRE

SOMMAIRE

Remerciement.....	
Liste des figures.....	
Liste des symboles et abréviations.....	
Introduction générale.....	

CHAPITRE I : COMPENSATION DE LA PUISSANCE REACTIVE DU RESEAU ELECTRIQUE

I.1 Introduction.....	17
I.2 Réseau électrique.....	18
I.2.1 Définition.....	18
I.2.2 Puissance transmissible dans une ligne.....	18
I.2.3 Chute de tension dans une ligne électrique.....	20
I.2.4 Écoulement de puissance dans un réseau électrique.....	21
I.3 les Perturbations dans un réseau électrique.....	21
I.3.1 Creux de tension.....	21
I.3.2 Fluctuations de la valeur efficace.....	22
I.3.3 Fluctuations de la fréquence.....	23
I.4 Qualité de l'énergie électrique.....	23
I.4.1 Réglage de puissance active.....	24
I.4.2 Contrôle de la puissance réactive.....	25
I.5 Compensations d'énergie réactive.....	26
I.5.1 Les dispositifs conventionnels.....	26
I.5.1.1 Condensateurs et inductances fixes.....	27
I.5.1.2 Compensateurs synchrones.....	28
I.5.1.3 Compensateurs statiques.....	28
I.5.1.4 Les contrôles dans le problème tension / puissance réactive.....	29
I.6 Conclusion.....	30

CHAPITRE II : GENERALITES SUR LES SYSTEMES FACTS

II.1 Introduction.....	32
II.2 Le système FACTS.....	33
II.2.1 définition et le rôle d'un dispositif FACTS.....	33
II.2.2 Nécessite des systèmes FACTS.....	33
II.3 Classification des systèmes FACTS.....	33
II.3.1 Premier critère.....	33
II.3.2 Second critère.....	34
II.4 Compensateurs parallèles (shunt).....	34
II.4.1 Compensateur parallèle à base de thyristor.....	37
II.4.1.1 Compensateur statique de l'énergie réactive (SVC).....	37
II.4.1.2 Resistance de freinage contrôlé par thyristor (TCBR).....	38
II.4.2 Compensateur parallèle à base de GTO thyristor.....	39
II.4.2.1 Compensateur statique (STATCOM).....	39
II.4.2.2 Générateur synchrone statique SSG.....	40
II.5 Compensateurs série.....	40
II.5.1 Compensateur série à base de thyristor.....	43
II.5.1.1 condensateurs série commande par thyristor (TCSC).....	43
II.5.1.2 Compensateur série contrôle par thyristor (TCSR).....	45
II.5.2 Compensateur série à base de GTO thyristor.....	45
II.5.2.1 Compensateur statique synchrone série (SSSC).....	45
II.6 Compensateurs hybrides ou combinés série-parallèle.....	46
II.6.1 Compensateur hybrides à base de thyristor.....	46
II.6.1.1 Régulateur d'angle de phase contrôlé par thyristor (TCPAR).....	46
II.6.2 Compensateur hybrides à base de GTO thyristor.....	48
II.6.2.1 Contrôleur unifié de l'écoulement de puissance (IPFC).....	48
II.6.2.2 Contrôleur unifié de l'écoulement de puissance (UPFC).....	48
II.7 Propriétés des dispositifs FACTS.....	50
II.7.1 Avantage des dispositifs FACTS.....	50
II.7.2 Les contraintes des dispositifs FACTS.....	51
II.7.3 Application des dispositifs FACTS dans les réseaux électriques.....	51
II.8 Conclusion.....	52

CHAPITRE III : MODELISATION D'UN COMPENSATEUR STATIQUE SVC

III.1 Introduction.....	55
III .2 Historique du SVC.....	55
III .3 Définition du SVC.....	56
III .4 Applications des SVC.....	56
III .5 Constitution du SVC.....	57
III .5.1 Condensateur fixe (FC).....	57
III .5.2 Réactance commandée par thyristors (TCR).....	57
III .5.2.1 Définition.....	57
III .5.3 Condensateur commuté par thyristors (TSC).....	59
III .5.4 Reactance controlee par thyristor (TCSR).....	60
III .5.5 Valeurs de consigne du dispositif SVC.....	62
III.6 Compensateur statique statcom.....	63
III .6.1 Principes de fonctionnement du SVC.....	64
III .7 Modélisation et analyse d'un dispositif SVC.....	65
III.7.1 Modèle non-linéaire.....	65
III.7.2 Modèle linéaire.....	68
III. 8 Conclusion.....	69

CHAPITRE IV : SIMULATION ET RESULTATS

IV .1 Introduction.....	71
IV. 2 Schéma électrique du réseau étudié	71
IV.3 Résultats.....	73
IV.3.1 Impact du TCSR sur les paramètres de la ligne.....	73
IV.3.2 Impact du TCSR sur les puissances.....	75
IV.4 Performances du compensateur statique SVC : (TSC+TCR).....	76
IV.4.1 Caractéristique tension-courant en régime dynamique.....	77
IV.4.2 Commentaires.....	79
IV.5 Conclusion.....	80
Conclusion Générale	82
Bibliographie	85

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale

L'utilisation croissante de l'énergie électrique dans la vie économique, sociale et industrielle de chaque pays, entraîne de plus en plus de problèmes de perturbation, chute de tension et harmoniques au niveau des réseaux électriques.

L'industrie de l'énergie électrique est confrontée à des problèmes liés à de nouvelles contraintes qui touchent différents aspects de la production, du transport et de la distribution de l'énergie électrique. On peut citer entre autres les restrictions sur la construction de nouvelles lignes de transport, l'optimisation du transit dans les réseaux électriques, les interconnexions avec d'autres compagnies d'électricité et le respect de l'environnement.

L'exploitation de réseaux électrique et le transport d'énergie par des lignes de transmission de grande longueur rencontre plusieurs problèmes notamment une chute de tension importante. Pour cette raison, il est nécessaire de contrôler les réseaux électriques.

Les seuls moyens classiques de contrôle des réseaux électriques se sont des dispositifs électromécaniques (les transformateurs-déphaseurs à réglage en charge pour le contrôle de la puissance active, les condensateurs et inductances additionnelles commutées par disjoncteurs pour compensation série ou shunt, modification des consignes de production de puissance active et réactive des générateurs et changement de la topologie du réseau et action sur l'excitation des générateurs). La dernière action dans ces systèmes de commande est prise avec des dispositifs mécaniques ayant un temps de réponse plus au moins long et avec lesquels l'action d'amorçage et de réamorçage ne peut être répétitivement exécuté à une fréquence élevée par rapport aux dispositifs à base d'interrupteurs statiques (semi-conducteurs).

Le développement rapide de l'électronique de puissance a eu un effet considérable dans l'amélioration des conditions de fonctionnement des réseaux électriques en performant le contrôle de leurs paramètres par l'introduction de dispositifs de contrôle à base des composants d'électronique de puissance très avancés (GTO, IGBT) connus sous l'acronyme FACTS: Flexible Alternatif Current Transmission Systems.

Les systèmes de transmission à courant alternatif (FACTS) traduisent un concept qui regroupe tous les dispositifs à base d'électronique de puissance qui permettent d'améliorer l'exploitation du réseau électrique. La technologie de ces systèmes (interrupteur statique) leur assure une vitesse beaucoup plus rapide que celle des systèmes électromécaniques classiques. L'intérêt de ces systèmes et non seulement de pouvoir contrôler l'écoulement de puissance dans les réseaux électriques mais aussi d'augmenter la capacité effective de transport jusqu'à leur limite thermique maximale tout en améliorant la stabilité des réseaux électriques.

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

Les Compensateurs statiques SVC sont des dispositifs de puissance réactive qui génèrent ou absorbent de la puissance réactive requise par le système électrique.

Les Condensateurs shunt passifs et les réacteurs ont été utilisés pendant une longue période pour la fourniture de puissance réactive, la correction du facteur de puissance, le soutien de la tension, mais ont été limités par leur capacité à fournir une sortie à variation continue pour répondre aux exigences du système. Les systèmes SVC sont des dispositifs actifs dont la sortie peut être contrôlée en permanence pour répondre aux exigences du système de façon très précise.

Ces dispositifs sont utilisés pour maintenir les niveaux de tension constante, améliorer le flux d'énergie, améliorer la stabilité, et assurer diverses autres améliorations.

Pour atteindre ces objectifs de recherche, ce mémoire sera organisé en quatre chapitres avec une introduction générale et une conclusion générale présentant des suggestions:

Dans le premier chapitre nous présentons un aperçu sur le fonctionnement des réseaux électriques. On retrouve dans ce chapitre la définition d'un réseau et les différentes perturbations (légères et grandes) qui limitent la puissance transmissible dans une ligne de transport et la chute de tension provoquée par le transit de puissance. On va également discuter l'analyse de l'écoulement de puissance, problème de la qualité d'énergie et les différents moyens classiques de compensation. Ces dernières sont également présentées dans ce chapitre.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude théorique des différents systèmes FACTS en générale à savoir leur principe de fonctionnement et une classification des différents types de FACTS et les principaux dispositifs de chaque famille décrits de façon plus détaillée.

Le troisième chapitre est consacré à l'étude et à la modélisation de compensateur statique SVC. Dans ce chapitre, on étudie le fonctionnement du SVC, ainsi on présente les éléments qui constituent ce dispositif, différentes configurations du SVC sont présentées.

Dans le dernier chapitre, nous présenterons un réseau étudié, qui est un réseau réel, sa tension de transport est de 400 KV, associé à un compensateur de type SVC :

- ✚ 1^{er} cas : un compensateur statique de puissance réactive « Static Var Compensator SVC » de type TCSR installé au milieu de la ligne de transmission.
- ✚ 2^{eme} cas : un compensateur statique de puissance réactive « SVC » de type shunt installé à la fin de la ligne de transmission.

Enfin on termine par une conclusion générale et des perspectives de travail.

Chapitre I

Compensation de la puissance
réactive
du réseau électrique

Chapitre I

Compensation de la puissance réactive du réseau électrique

I.1 Introduction :

L'objectif fondamental des réseaux électriques est de fournir aux clients de l'énergie électrique avec une parfaite continuité, sous une forme de tension sinusoïdale, avec des valeurs d'amplitude et de fréquence préétablies. Cependant cet objectif semble idéal et n'est jamais facile à assurer, car le réseau électrique aujourd'hui est appelé à fonctionner dans un environnement de plus en plus agressif, et par conséquent, il doit faire face à de nombreux types de perturbations qui doivent être d'origine interne comme l'évolution et la complexité du réseau et des charges qui lui sont connectées, ou externe liées aux phénomènes des changements climatiques. [1]

Les compensateurs statiques sont des dispositifs électriques (condensateur, réactances, transformateur et interrupteur) réunis de manière à produire des variations rapides et continues de la puissance réactive. Dans certains cas, les commutations de ces dispositifs sont mécaniques dont le temps de réponse est plus long mais le compensateur est moins onéreux.

Nous allons présenter dans ce chapitre, des notions sur les réseaux électriques, la puissance transmise dans une ligne électrique ainsi que les perturbations et la qualité de l'énergie électrique.

Dans la dernière partie de ce chapitre, nous étudierons les caractéristiques de la compensation de l'énergie réactive.

I.2 Réseau électrique

I.2.1 Définition :

Le réseau de transport relie toutes les centrales électriques dans un système de puissance et distribue la puissance aux différents consommateurs dans les meilleures conditions économiques.

Un réseau d'énergie électrique est un système d'éléments interconnectés conçu:

- Pour convertir d'une façon continue de l'énergie qui n'est pas sous forme électrique en énergie électrique.
- Pour transporter l'énergie électrique sur de longues distances.
- Pour transformer l'énergie électrique sous des formes spécifiques soumises à des contraintes bien déterminées.

Les éléments principaux du réseau sont les lignes aériennes à haute tension, les câbles souterrains, les transformateurs et les jeux de barres. Des éléments auxiliaires peuvent être des condensateurs en série, des réactances shunts et des systèmes de compensation, des systèmes de protection..., [2].

I.2.2 Puissance transmissible sur une ligne

Considérons la figure (I-1) qui représente de manière très simplifiée, un dipôle d'impédance $\bar{Z} = R + jX$, une ligne destinée à alimenter la charge \bar{Z}_i .

Nous supposons, d'abord, que la résistance R de la ligne est nulle (elle est généralement très faible vis-à-vis de la réactance X) et que la puissance réactive Q_2 de la charge est nulle (ce qui est vrai en cas d'une bonne compensation de puissance réactive) [3], [4], [5].

Nous nous attacherons d'abord à montrer qu'il est important de réguler la tension aux bornes de la charge.

Si nous désignons par θ l'angle de déphasage entre les tensions \bar{V}_1 et \bar{V}_2 , nous avons, en considérant la figure (I-2) simplifiée (avec $R = 0$), le courant \bar{I} en phase avec la tension \bar{V}_2 , d'où :

$$X.I = V_1 \sin(\theta) \quad (\text{I.1})$$

Donc la relation de la puissance active est donnée comme suit :

$$P_1 = P_2 = \frac{V_1 V_2}{X} \sin(\theta) \quad (\text{I.2})$$

Si aucune précaution n'est prise pour maintenir V_2 constante lorsque la charge varie, on a :

$$V_2 = V_1 \cos(\theta) \quad (\text{I.3})$$

Soit

$$P_1 = P_2 = \frac{V_1^2}{2X} \sin(2\theta) \quad (\text{I.4})$$

Il apparaît donc que, dans ce cas, on ne peut transporter qu'une puissance active maximale par phase égale à :

$$P_{\max} = \frac{V_1^2}{2X} \quad (\text{I.5})$$

Cette valeur maximale est atteinte pour $\theta = \pi/4$.

Si l'on maintient V_2 constante, ce qui implique que Q_2 n'est plus nulle, mais ne remet pas en cause l'expression (I.1), on a, pour $V_1=V_2$

$$P_{\max} = \frac{V_1^2}{X} \quad (\text{I.6})$$

Soit le double de la valeur précédente.

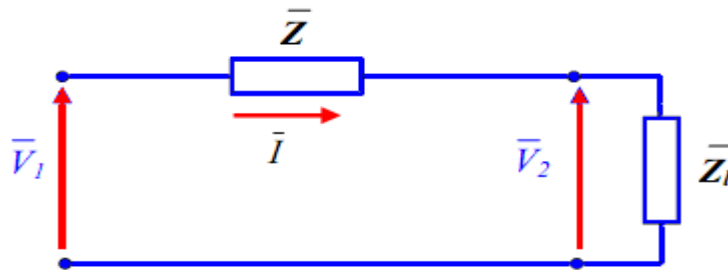


Figure (I.1) : Schéma monophasé équivalent

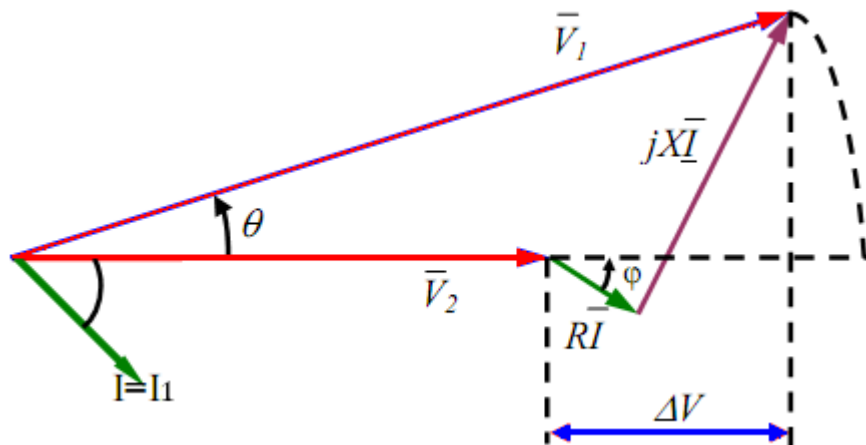


Figure (I.2) : Diagramme vectoriel des tensions.

Pour améliorer la capacité de transfert des réseaux, on voit donc qu'il est essentiel de disposer du plus grand nombre possible de points à tension fixée.

I.2.3 Chute de tension dans une ligne électrique

Considérons la figure (I.1) qui représente une ligne de transport d'impédance complexe $\bar{Z} = R + jX$, et que la tension n'est tenue qu'à l'extrémité 1 (coté générateur), l'extrémité 2 (Coté charge) absorbant une puissance $\bar{S}_2 = P_2 + jQ_2$

Si le réseau n'est pas trop chargé, le diagramme de tension donné par la figure (I.2) conduit à assimiler la chute de tension ΔV à :

$$\Delta V \approx V_1 \cos(\theta) - V_2 \quad (\text{I.7})$$

L'angle de transport θ étant petit (réseau peu chargé), si φ désigne le déphasage du courant par rapport à la tension à l'extrémité réceptrice 2, on peut écrire, pour un réseau monophasé :

$$\Delta V \approx RI \cos(\varphi) + XI \sin(\varphi) \quad (\text{I.8})$$

$$\Delta V \approx RI \frac{V_2}{V_2} \cos(\varphi) + XI \frac{V_2}{V_2} \sin(\varphi) \quad (\text{I.9})$$

$$\Delta V \approx \frac{RP_2 + XQ_2}{V_2} \quad (\text{I.10})$$

On montre de même que

$$\sin(\theta) \approx \frac{XP_2 - RQ_2}{V_1 V_2} \quad (\text{I.11})$$

L'hypothèse du réseau peut charger, nous permet de l'écrire :

$$V_1 \approx V_2 = V \quad (\text{I.12})$$

Soit, pour un réseau triphasé et en notant U la tension composée correspondant à V , P et Q les puissances de transit triphasé :

$$\frac{\Delta U}{U} \approx \frac{RP + XQ}{U^2} \quad (\text{I.13})$$

$$\sin \theta \approx \frac{XP - RQ}{U^2} \quad (\text{I.14})$$

On peut également noter que si, $R \ll X$ ($R \approx 0$) :

$$\frac{\Delta U}{U} \approx \frac{XQ}{U^2} \quad (\text{I.15})$$

$$\sin \theta \approx \frac{XP}{U^2} \quad (\text{I.16})$$

Dans ces conditions, les relations (I.15) et (I.16) illustrent le fait que :

- ❖ la **chute de tension** dépend principalement de la puissance réactive consommée par l'extrémité réceptrice ;
- ❖ l'**angle de transport** θ dépend principalement de la puissance active transmise.

I.2.4 Écoulement de puissance dans un réseau électrique

Les relations entre la puissance transmise, la tension reçue par la charge et la puissance réactive sont importantes lors de l'étude des caractéristiques du système de puissance.

Dans un réseau à $-N$ - jeux de barres, la tension $[V]$ aux nœuds et les courants injectés $[I]$ sont reliés par l'équation : [6]

$$[I] = [Y][V] \quad (I.17)$$

Où :

$[I]$: le vecteur des courants injectés aux nœuds du réseau.

$[V]$: le vecteur des tensions aux nœuds du réseau ;

$[Y]$: la matrice d'admittance du réseau de transport.

La puissance apparente injectée à n'importe quel jeu de barres i du réseau peut être exprimée par l'équation suivant

$$\bar{S}_i = V_i^* I_i = P_i - jQ = V_i^* \sum_{k=1}^n y_{ik} V_k \quad \text{Pour } k=1,2,\dots,N \quad (I.18)$$

i : indique le nombre de jeu de barre

I.3 les Perturbations dans un réseau électrique

Il y a essentiellement deux types de perturbations sur la valeur efficace de la tension : [7]

- ❖ les creux de tension
- ❖ les fluctuations.

I.3.1 Creux de tension :

Les creux de tension sont produits par des courts-circuits survenant dans le réseau électrique en général ou dans les installations de la clientèle (figure 1.3). Le creux de tension est caractérisé par sa profondeur ΔU et sa durée ΔT et peut être monophasé ou triphasé selon le nombre de phases concernées.

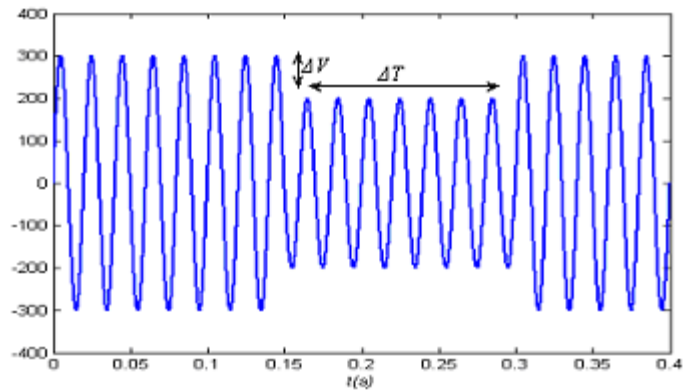


Figure (1.3) : Creux de tension.

Les creux de tension peuvent provoquer le déclenchement d'équipements, lorsque leur profondeur et leur durée excèdent certaines limites (dépendant de la sensibilité particulière des charges). Les conséquences peuvent être extrêmement coûteuses (temps de redémarrage se chiffrant en heures, voire en jours ; pertes de données informatiques ; dégâts aux produits, voire aux équipements de production...) [7],[8],[9].

Les principales causes des creux de tension sont les perturbations dues à l'exploitation des réseaux comme la mise sous tension de gros transformateurs, les courts circuits, enclenchement des condensateurs, ...etc.

I.3.2 Fluctuations de la valeur efficace

Les fluctuations de tensions sont des variations de basses fréquences de la valeur efficace de la tension (figure (I.4)). Ces variations ont une amplitude modérée (généralement 10 %) mais peuvent se produire plusieurs fois par seconde et peuvent être cycliques ou aléatoires, elles sont désignées communément par effet Flicker.

Cette perturbation est causée par les grosses charges dont la puissance absorbée varie d'une manière aléatoire comme par exemple les fours à arc ou les machines à souder, et elle se manifestent souvent par des perturbations sur les couples et les vitesses des machines tournantes [9].

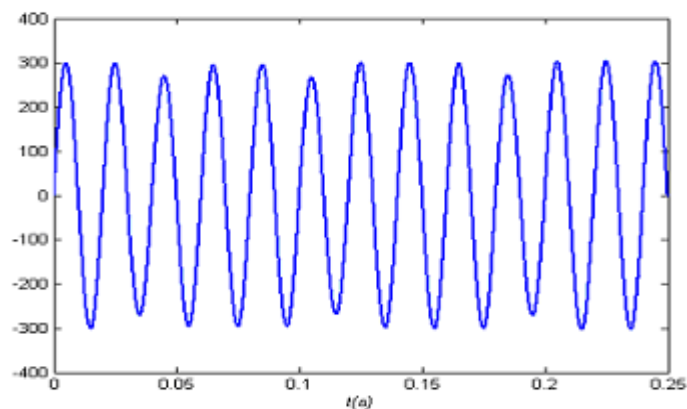


Figure (1.4) : Fluctuation de la tension.

I.3.3 Fluctuations de la fréquence

Les fluctuations de fréquence sont caractérisées par des variations de la valeur nominale de la fréquence (50 Hz) comme illustré sur la figure (I.5), résultant des variations de vitesse des alternateurs suite à un déséquilibre entre charges et puissances mises en jeu par les centrales.

Elles se manifestent par des perturbations des vitesses et des couples dans les machines synchrones et asynchrones, et parfois par l'arrêt entier des systèmes. [7]. [8].

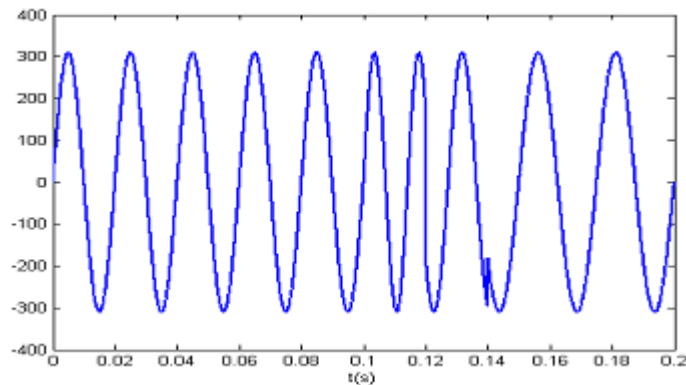


Figure (1.5) : Fluctuation de la fréquence

I.4 Qualité de l'énergie électrique

Le terme de qualité d'énergie est largement utilisé lorsque des phénomènes perturbants sont présents sur le réseau électrique. La détérioration de la qualité de l'énergie sur le réseau peut avoir plusieurs causes et effets comme par exemple : [10]

- ❖ les charges ayant un facteur de puissance trop bas. Le transit inutile d'énergie réactive sur les lignes peut alors augmenter fortement les pertes en lignes et faire chuter la tension aux nœuds de raccordement des charges ;
- ❖ les charges non-linéaires, comme par exemple les redresseurs à diodes. Les harmoniques absorbés ou générés accélèrent le vieillissement de certains matériels, perturbent les systèmes de contrôle... ;
- ❖ les déséquilibres en courant et/ou en tension du fait d'un déséquilibre de charges : provoquent par exemple dans les machines tournantes des champs tournants inverses produisant des couples parasites ;
- ❖ les transitoires rapides essentiellement provoqués par des enclenchements déclenchements de charges (ou de compensateurs) et de manœuvres ;

Cependant, il existe des solutions préventives et curatives aux problèmes de la qualité de l'énergie :

Des solutions préventives vont vers l'immunisation des charges (alimentation régulée), d'autres vers le confinement des sources perturbantes (éloignement électrique des sources perturbantes des charges sensibles) et certaines vers la conversion « propre » (redressement à prélèvement sinusoïdal).

Les solutions curatives s'insèrent dans des architectures déjà existantes et se basent sur la compensation (compensation de réactif...). [10]

I.4.1 Réglage de puissance active :

La puissance active P transmise entre deux réseaux de tensions V_1 et V_2 présentant un angle de transport $(\theta_1 - \theta_2)$ et connectés par une liaison d'impédance X est donnée par l'équation suivante: [8]

$$P_e = \frac{V_1 V_2}{X} \sin(\theta_1 - \theta_2) \quad (\text{I.19})$$

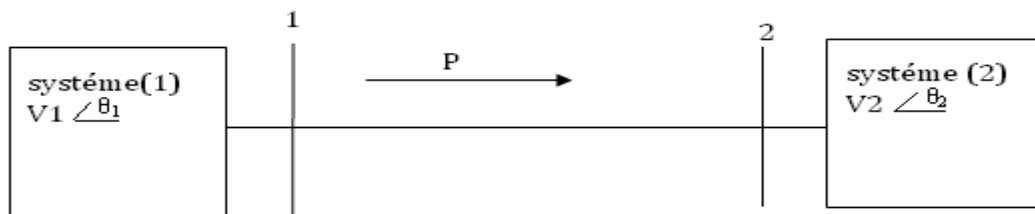


Figure (I.6) : Système de puissance à deux jeux de barres

Le sens de transfert de puissance est uniquement déterminé par le déphasage relatif des tensions aux deux extrémités. Cela signifie que ce transfert s'effectue du point où la tension est en avance de phase par rapport au point où la tension est en retard de phase.

La relation (I.19) montre que la puissance maximale transmissible à tension et réactance constantes est atteinte pour un angle de transmission $(\theta_1 - \theta_2) = 90^\circ$, cet angle correspond à la limite de stabilité statique.

Cette relation montre aussi les paramètres sur lesquels il est possible d'agir pour contrôler le transfert de puissance :

- ✓ Les tensions V_1 et V_2 ont une faible marge de variation en raison de la nécessité de maintenir le profil du plan de la de tension pour limiter les pertes en lignes
- ✓ L'angle $(\theta_1 - \theta_2)$ par un système déphaseur.
- ✓ La réactance de la ligne par compensation

I.4.2 Contrôle de la puissance réactive :

La compensation d'énergie réactive est l'une des méthodes utilisées pour augmenter la capacité de transfère de puissance et améliorer la stabilité des réseaux électriques.

Les méthodes de compensation peuvent être classées en deux classes :

- ✚ La première classe, basé sur le type de connexion, dit compensation série ou shunt.
- ✚ La deuxième basé sur le type de l'opération de compensation, dite active ou passive.

Dans la compensation active la tension et d'autres paramètres sont contrôlés par la réaction d'une boucle de contrôle.

Parmi les raisons pour lesquels on doit minimiser le transfert de puissance réactive on site :

- a.) Minimiser les pertes d'énergie active et réactive, pour des considérations économiques. Ce-ci se traduit par les équations suivantes [11], [12] :

$$I^2 = II^* = \left[\frac{P - jQ}{V^*} \right] \left[\frac{P + jQ}{V} \right] = \left[\frac{P^2 + Q^2}{V^2} \right] \quad (I.20)$$

$$P_{perte} = I^2 R = \frac{P^2 + Q^2}{V^2} \cdot R \quad (I.21)$$

$$Q_{perte} = I^2 X = \frac{P^2 + Q^2}{V^2} \cdot X \quad (I.22)$$

Notant que les pertes active et réactive à travers l'impédance série de la ligne ; Sont respectivement données par $I^2 R$ et $I^2 X$, les équations précédentes montrent que les pertes sont réduites quand la puissance réactive est basse et la tension est élevée.

- b.) Minimiser les surtensions temporaires, l'amplitude des surtensions est déterminée essentiellement par le transfert d'énergie réactive [12].

I.5 Compensations d'énergie réactive

Le transport de la puissance réactive sur de longue distance présente une plusieurs inconvénients tels-que les chutes de tension considérables, les pertes par effet joule et moins de capacité pour transporter la puissance active.

Actuellement, avec la complexité des réseaux, la participation des générateurs dans la production de l'énergie réactive est devenue insuffisante. Elle est générée en grande partie par les moyens de compensation existants ou en période creuse, par les lignes de transport. [3]

Les dispositifs de compensation de l'énergie réactive et de réglage de la tension sont:

- ❖ Les condensateurs et inductances fixes ;
- ❖ Les compensateurs synchrones ;
- ❖ Les compensateurs statiques ;
- ❖ Les transformateurs à prises variables (en charge ou à vide) ;
- ❖ Les groupes générateurs.

L'ajustement rapide et fin de l'énergie réactive en HT et le réglage de tension sont assurés par les groupes générateurs (boucles de réglage de tension) et les condensateurs des postes de transformation vers le réseau de répartition [3], [11].

En distribution, la compensation du réactif se fait au niveau des consommateurs par la tarification qui pénalise un mauvais $\cos(\varphi)$, l'ajustement de la tension se réalisant par les prises en charge des transformateurs au niveau des postes.

I.5.1 Les dispositifs conventionnels

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

I.5.1.1 Condensateurs et inductances fixes

Les bancs de condensateurs installés en dérivation peuvent atteindre quelques Mvar fractionnables par gradins de 2 à 4 Mvar, voire 10 Mvar. Ils sont utilisés pour améliorer le facteur de puissance au niveau de charges inductives mais ayant certains inconvénients Parmi lesquels:

- la puissance réactive produite diminue lorsque la tension diminue (

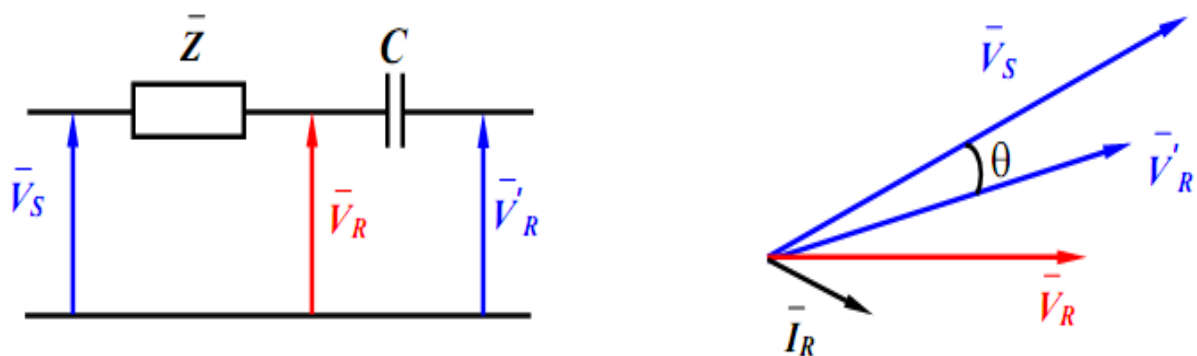
$$Q_c = \frac{V_n^2}{X_c} = CV_n^2 \omega 10^{-3} \text{) alors qu'elle devrait augmenter ;}$$

- surtensions et surintensités à l'enclenchement.

Les batteries de condensateurs sont fractionnées en gradins mis en ou hors tension par disjoncteurs ou actuellement par thyristors (ce qui supprime toute usure du matériel et accroît la vitesse de réponse), commandés par relais Var métrique qui mesure l'erreur entre valeur de consigne et puissance fournie.

Des bancs de condensateurs peuvent être insérés en série avec les conducteurs d'une ligne afin de diminuer sa réactance. On diminue aussi la chute de tension entre la source et la charge comme indiquée sur la figure (1.7). On voit que ce type de compensation [11] [13] :

- ✓ diminue l'angle de transport « θ » et agit donc aussi sur le transit de puissance active
- ✓ augmente la limite de puissance transmissible
- ✓ Améliore de la stabilité du réseau.



Figure(I.7) : Principe de la compensation série

Les inductances sont utilisées pour absorber la puissance réactive produite par les lignes longues à très haute tension à faible charge ou des réseaux de câbles. Elles sont généralement raccordées au tertiaire de transformateurs et leur puissance peut aller de 50 Mvar (via un

transformateur à trois enroulements) à 400 Mvar en raccordement direct sur des lignes de très haute tension. [3], [8].

I.5.1.2 Compensateurs synchrones

Les groupes de production sont les sources de tension du réseau et peuvent produire ou consommer de l'énergie réactive : une machine synchrone surexcitée fournit de l'énergie réactive comme un condensateur. En sous-excitation, elle absorbe du réactif comme une inductance.

Vu l'éloignement électrique entre centres de production et de consommation, les groupes ne compensent pas les charges mais peuvent faire face aux besoins en réactif du réseau. [8]

La fourniture de puissance réactive en surexcitation est limitée par le courant rotorique maximum et en absorption par la stabilité de la machine synchrone. Cette limite peut varier avec des régulateurs de tension.

Un compensateur synchrone était une machine synchrone sans charge, spécifiquement conçue pour la production ou l'absorption de puissance réactive en ajustant l'excitation. Les limites sont les mêmes que pour les groupes de centrales. Des valeurs typiques vont de 20 à 60 Mvar en fourniture et de 10 à 30 Mvar en absorption. 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 leur coût est élevé tant en investissement qu'en maintenance [3].

I.5.1.3 Compensateurs statiques

Ils sont constitués de condensateurs et d'inductances commandées par thyristors montés en tête-bêche. On aura ainsi par la mise en parallèle d'une inductance réglable par thyristors (TCR : *Thyristor Controlled Reactor*) et de batteries de condensateurs commutables également par thyristors, un réglage continu de l'inductance par modification de l'angle d'amorçage des thyristors. [3].

Les compensateurs statiques peuvent être utilisés pour le réglage de la tension, et pour l'amélioration de la stabilité du réseau. [3], [8]. Ils sont de bonne performance dynamique (temps de réponse de quelques dixièmes de seconde). Ils sont capables d'atténuer les fluctuations de tension, en particulier dans les zones éloignées des centres de production.

I.5.1.4 Contrôles du problème tension / puissance réactive

Dans les réseaux électriques, la tension et la fréquence sont les principaux indicateurs de la bonne exploitation technique et économique du système de production et de transport. Techniquement, on situe les contrôles, *fréquence/puissance active et tension/puissance réactive*. Si la fréquence a une grande dépendance avec les variations de la puissance active générée, transportée et consommée, les modules de la tension seront affectés principalement par les variations de la puissance réactive.

Le problème du contrôle de la fréquence est très limité. Actuellement les systèmes de puissance sont équipés d'une large gamme de dispositifs dont leur action affecte principalement la puissance réactive. La sélection du type de contrôle automatique ou manuel du problème *tension/puissance réactive* est généralement conditionnée par le niveau des tensions du sous-système à contrôler.

Dans le tableau 1.1, [8] on peut regrouper les différents dispositifs de contrôle utilisés dans le problème *tension/ puissance réactive*, et leurs principales caractéristiques.

Contrôles par génération de la puissance réactive					
	Ajustable en continu	Capacitive	Inductive	Réponse rapide	Control local
Générateurs Synchrones	Oui	oui	Oui	Oui, dépend du système d'excitation.	Oui
Condensateurs Synchrones	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Batteries de Condensateurs	Non, plusieurs gradins. (discret)	Oui	Non	Dépend de l'automatisation	Oui
Réactances	Non, (discret) généralement une ou deux unités par ligne.	Non	Oui	Dépend de l'automatisation	-
Ouverture des Lignes	-	-	-	-	Décision de l'opérateur
Délestage de charge	Uniquement dans l'état d'urgence. Fonctionnement a petit pas.	Non	Oui	Dépend de l'automatisation	Dépend de l'automatisation
Réduction de tensions	Oui	Oui	Non	Dépend de l'automatisation	Dépend de l'automatisation
Contrôles qui modifient la circulation de la puissance réactive					

Transformateurs avec prises dans le réseau de transport	Discret	-	-	Non Une prise par action.	Non
Transformateurs avec prises de transport/distribution	Discret	-	-	-	Oui

Tableau (I.1): Différents dispositifs de contrôle utilisés dans le problème tension/puissance réactive.

I.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté le fonctionnement des réseaux d'énergie électrique et les différents phénomènes perturbateurs qui influencent sur la qualité de la tension et la puissance réactive.

Les lignes longues ont un impact significatif sur la régulation de la tension et la performance du réseau. En outre, il est démontré qu'il est nécessaire de compenser ces lignes pour respecter les deux contraintes fondamentales du transport d'énergie électrique.

L'analyse de l'écoulement de puissance pour les études et l'exploitation des réseaux électriques a été également discutée. Enfin on a présenté les différents moyens classiques de compensation d'énergie réactive.

L'utilisation simultanée de la compensation série et de la compensation shunt inductive est très importante pour avoir une qualité d'énergie transportée le long de la ligne.

Cependant une nouvelle solution, basée sur les systèmes FACTS de transmission à courant flexible utilisant l'électronique de puissance pour contrôler le flux d'énergie sur le réseau électrique est aujourd'hui utilisée. Ces dispositifs seront traités en détaille dans le deuxième chapitre.

Chapitre II

Généralité sur le système
FACTS

Chapitre II

Généralités sur le système FACTS

II.1 Introduction

L'évolution récente des réseaux de transport d'énergie électrique, et devant les Problèmes de transit de puissance, il sera de plus en plus difficile d'assurer dans l'avenir un contrôle fiable des transferts d'énergie dans les réseaux fortement interconnectés en utilisant des dispositifs de réglage classiques à faible fréquence de manœuvre, et à risque de vieillissement accéléré tel que les transformateurs déphaseurs, les transformateurs à prises variables en charge, et les compensateurs de types série et shunt.

L'amélioration de la qualité de l'énergie, l'augmentation de la capacité transitée et le contrôle des réseaux existants peut être obtenue grâce à la mise en place de nouvelles technologies. La compagnie américaine EPRI (Electric Power Research Institute) a lancé, en 1988, un projet d'étude des systèmes FACTS afin de mieux maîtriser le transit de puissance sur les lignes électriques [14], [15], [16].

Le concept FACTS regroupe tous les dispositifs à base d'électronique de puissance qui permettent d'améliorer l'exploitation du réseau électrique. La technologie de ces systèmes (interrupteur statique) leurs assure une vitesse et une fiabilité supérieures à celle des systèmes électromécaniques classiques. L'intérêt de ces systèmes est non seulement de pouvoir contrôler l'écoulement de puissance dans les réseaux mais aussi d'augmenter la capacité effective de transport jusqu'à leur limite thermique maximale tout en maintenant, voire en améliorant la stabilité des réseaux électriques.[15]

Ce chapitre est consacré à l'étude théorique générale des dispositifs FACTS dont nous présenterons les différentes classifications ainsi que les propriétés des ces dispositifs.

II .2 Le système FACTS

II-2-1 Définition et le rôle d'un dispositif FACTS :

Le concept FACTS « Flexible Alternative Currents Transmission Systems » est un terme générique qui caractérise l'ensemble des équipements mettant en jeu de l'électronique de puissance (diodes, thyristors, GTO, IGBT.....).

Ces équipements permettent d'améliorer l'exploitation du réseau électrique c'est-à-dire les différents paramètres du réseau électrique tension, impédance, la phase du réseau etc.

La technologie de ces systèmes (interrupteur statique) leur assure une vitesse supérieure à celle des systèmes électromécaniques classiques. De plus, ils peuvent contrôler le transit de puissance dans les réseaux et augmenter la capacité efficace de transport tout en maintenant voir en améliorant, la stabilité des réseaux. Les systèmes FACTS peuvent être classés en trois catégories [16] :

- *les compensateurs parallèles*
- *les compensateurs séries*
- *les compensateurs hybrides (série - parallèle)*

II -2-2 Nécessite des systèmes FACTS

La compensation de l'énergie réactive au niveau des lignes de transmission permet la régulation du profil de la tension le long de ces lignes avec un bon contrôle de la puissance active transmise. Les méthodes de compensation de l'énergie réactive classique utilisent soit des batteries de condensateurs soit des bobines fixes ou commandées mécaniquement. Ces méthodes ne sont pas efficaces dans le contrôle du réseau électrique quant il est sévèrement perturbé.

II .3 Classification des systèmes FACTS :

Les dispositifs FACTS peuvent être classés selon plusieurs critères. Parmi lesquels, on peut citer les deux critères les plus utilisés.

II.3.1 Premier critère :

Le premier consiste à les classer selon la présence ou l'absence du port DC au niveau des convertisseurs. Les dispositifs sans port DC sont soumis à des courants et tensions alternatifs.

Généralement ces groupes de convertisseurs comprennent des impédances (des inductances et des capacités) commutés par des thyristors (par exemple : SVC, TCSC).

Les dispositifs avec port DC ont été développés très récemment .Ils comprennent un ou plusieurs convertisseurs AC/DC entre le réseau et le port DC. Souvent une impédance physique est interposée entre le port AC et le convertisseur. L'inductance de fuite du transformateur élévateur du port AC offre une réactance suffisante. Ces FACTS, n'utilisant pas des éléments passifs, présentent un encombrement et un prix réduit par rapport à ceux sans port DC (FACTS conventionnels).

En plus, les progrès technologiques en électronique de puissance ont permis d'augmenter considérablement la puissance échangée par ces FACTS alors que la puissance de FACTS conventionnels est limitée par des éléments comme les inductances et les capacités [17].

II.3.2 Second critère :

Le second critère consiste à classer les dispositifs FACTS selon le mode d'injection dans les systèmes électriques, on distingue alors trois catégories.

II. 4 Compensateurs parallèles (shunt) :

Ces équipements ont fait leur apparition vers la fin des années 60. Ils sont constitués essentiellement d'une inductance en série avec un gradateur. Le retard à l'amorçage des thyristors permet de régler l'énergie réactive absorbée par le dispositif. En effet, tous les compensateurs parallèles injectent du courant au réseau via le point de raccordement. [17]

Considérant un réseau électrique de transmission avec un compensateur idéal connecté au point milieu de la ligne de transmission est donné sur la figure (II-1)

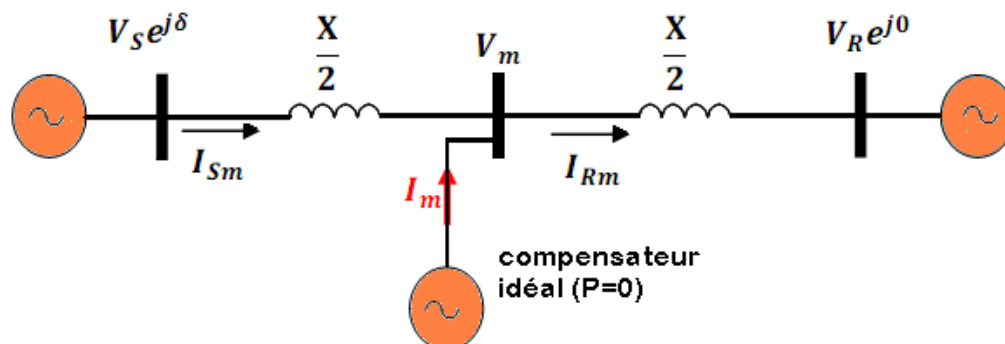


Figure (II.1) : Compensateur shunt dans un réseau de transmission

Ce compensateur est représenté par une source de tension alternatif en phase avec la tension V_m du point milieu de la ligne ; le compensateur échange uniquement la puissance réactive avec le réseau.

Le compensateur partage le line de transmission en deux parties : La première partie est caractérisée par une impédance $(X/2)$ qui transporte la puissance à partir de la source V_s ou point milieu alors que, la deuxième partie est caractérisé par autre impédance $(X/2)$ qui transfert cette puissance du point milieu au récepteur [5].

Les relations entre les tensions V_s , V_r et V_m ainsi que les courants I_{sm} , I_{rm} sont données par les équations suivantes [5],[17]

$$V_m(t) = V_r + j \frac{X}{2} I_{rm} \quad (\text{II-1})$$

$$V_s(t) = V_m + j \frac{X}{2} I_{sm} \quad (\text{II-2})$$

Donc

$$I_m = I_{rm} - I_{sm} \quad (\text{II-3})$$

Donc on peut représenter les équations précédentes par un diagramme de phase figure (II-2).

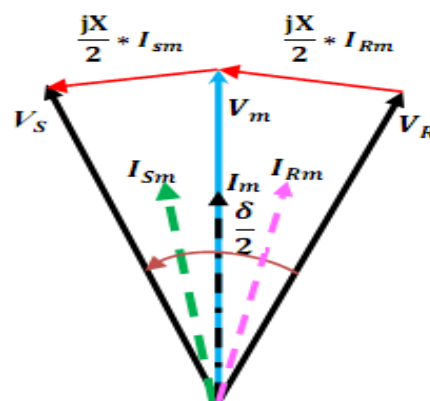


Figure (II.2) : Les phases de tension et de courant du compensateur shunt

D'autre par les équations de puissance active et réactive dans une ligne de transmission sont données par les relations suivantes :

$$P_c(\delta) = \frac{V_r V_s}{X_s} \sin(\delta) \quad (\text{II-4})$$

$$Q_c(\delta) = \frac{V_r V_s}{X_s} \cos(\delta) - \frac{V_r^2}{X_s} \quad (\text{II-5})$$

L'injection d'un compensateur shunt au point milieu d'une ligne de transmission conduit à une modification des puissances active et réactive. Dans ce cas les puissances active et réactive compensées $P_c(\delta)$ et $Q_c(\delta)$ sont respectivement données par les relations suivantes.

$$P_c(\delta) = 2 \cdot \frac{V_r V_s}{X_s} \sin\left(\frac{\delta}{2}\right) \quad (\text{II-6})$$

$$Q_c(\delta) = 4 \cdot \left(\frac{V_r^2}{X_s} - \frac{V_r V_s}{X_s} \cos\left(\frac{\delta}{2}\right) \right) \quad (\text{II-7})$$

La variation de la puissance active et réactive en fonction de l'angle de charge (δ) comparée avec les puissances de la ligne non compensée est représentée par la figure (II-3) [5].

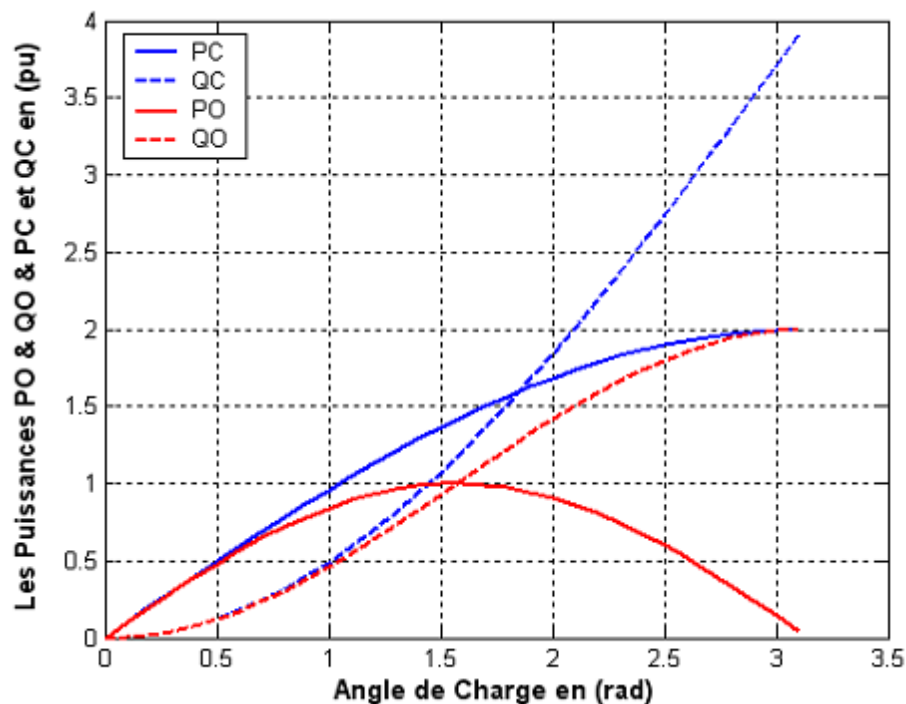


Figure (II.3) : Variation de puissance $P_0(\delta)$, $P_c(\delta)$, $Q_0(\delta)$ et $Q_c(\delta)$ transmises en fonction de (δ)

On constate à partir de la courbe que le compensateur shunt peut :

- ❖ Augmenter la puissance active transmissible (deux fois plus grande que la puissance non compensée pour une valeur $\delta = \pi$).
- ❖ Une augmentation très rapide la puissance réactive transmissible.

Ce type de compensateur est très utilisé pour le contrôle de tension lorsque la variation de la charge est lente. De plus le compensateur shunt placé au point milieu de la ligne de transmission donne des solutions aux problèmes de la stabilité [5]. Les compensateurs shunts les plus connus sont :

II. 4.1 Compensateur parallèle à base de thyristor

II. 4.1.1 Compensateur statique de l'énergie réactive (SVC)

Le SVC (statice var compensateur) est la première génération FACTS qui a été introduite sur le marché il y a presque plus de vingt ans [16]. Il est constitué d'un banc de condensateurs commutés par thyristors (TSC thyristors switched capacitors) et d'un banc de bobines contrôlées par thyristors (TCR thyristor Controlled reactors) comme indiqué par la figure (II.4). Le premier SVC installé sur une ligne de transport d'énergie était en 1979 en Afrique du sud [5].

Avec une coordination appropriée de l'interrupteur des condensateurs et le contrôle des bobines, la puissance réactive de sortie peut être variée continuellement entre les taux capacitifs et inductifs de l'équipement.

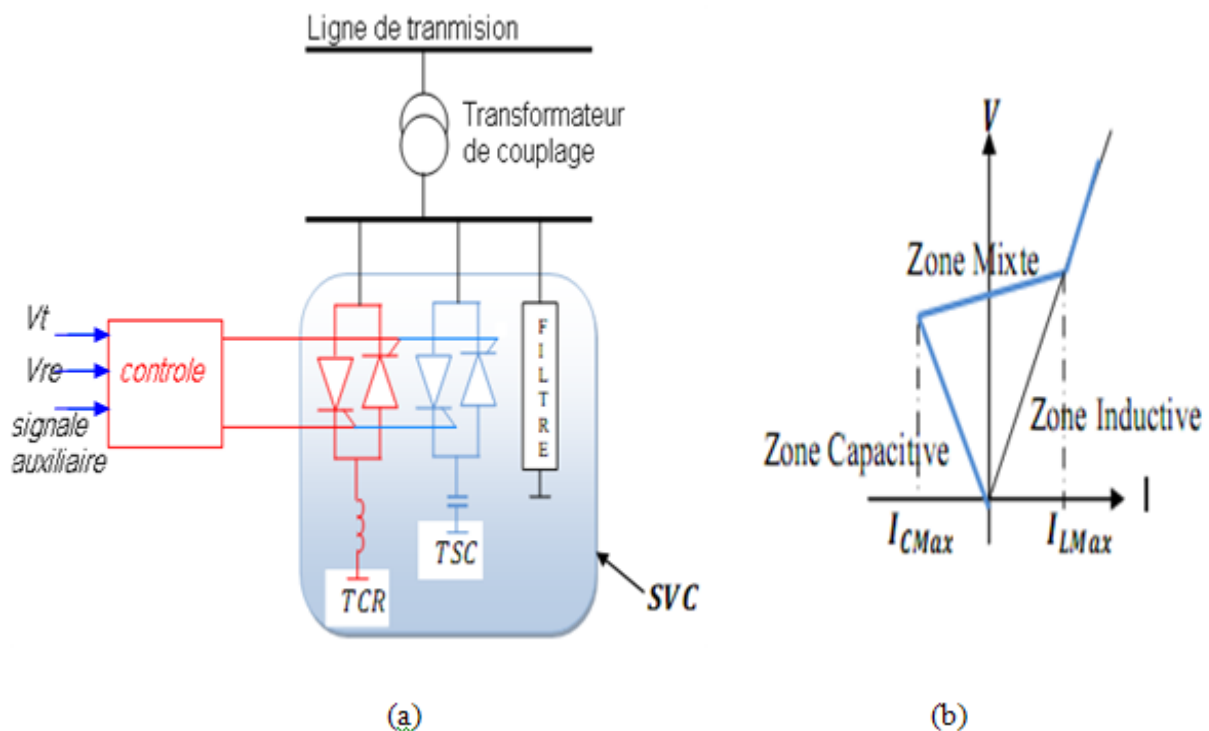


Figure (II.4) : (a) : Schéma de base d'un SVC, (b) : Caractéristique d'un SVC

Le SVC est basé sur des éléments inductifs et capacitifs ordinaires, et le contrôle se fait à travers des éléments à base d'électronique de puissance (thyristors ordinaires).

Les principales fonctions d'un SVC sont :

- ✓ Le support de la tension.
- ✓ Amortissement des oscillations de la puissance.
- ✓ Amélioration des marges de stabilité statique et transitoire.

À partir de la caractéristique statique de compensateur SVC, on peut distinguer trois zones de fonctionnement [17]:

1. Une zone (Capacitive) où le TSC donne une énergie maximale, seule les capacités sont connectées au réseau.
2. Une zone (Mixte) ou de réglage où l'énergie réactive est une combinaison des TCR et des TSC.
3. Une zone (Inductive) où le TCR donne son énergie maximale (butée de réglage), les condensateurs sont déconnectés.

Malgré ces caractéristiques, le SVC présente des inconvénients dont la capacité est limitée par les éléments inductifs et capacitifs ainsi que son comportement hors de la zone de réglage .

II. 4.1.2 Resistance de freinage contrôlé par thyristor (TCBR)

Ce type de compensateur TCBR (*Thyristor-Controlled Braking Resistor*) et connecté en parallèle est utilisé pour améliorer la stabilité du réseau pendant la présence des perturbations.

La figure (II.5) représente un TCBR qui est utilisé pour aider à la stabilisation du réseau ou pour diminuer l'accélération des générateurs en cas de perturbation en parallèle avec un SVC équipé d'un banc de condensateurs et d'un filtre d'harmonique. [18]

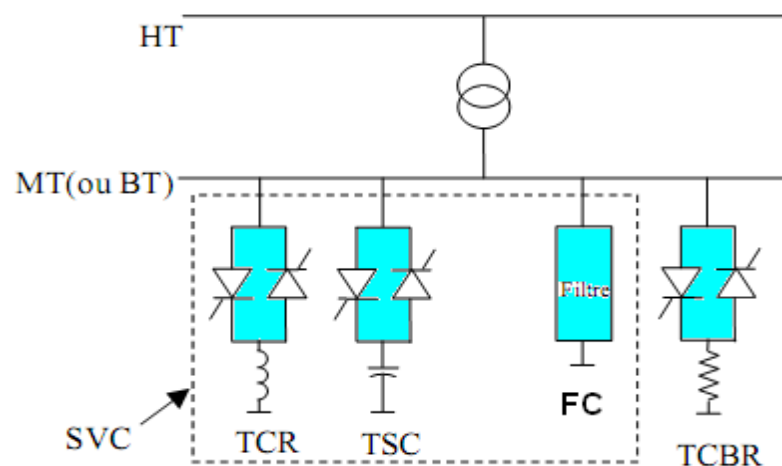


Figure (II-5) : Schéma du SSV et TCBR

II. 4.2 Compensateur parallèle à base de GTO thyristor

II. 4.2.1 Compensateur statique (STATCOM)

Le STATCOM (Statice Compensateur) appelé aussi en anglais Advanced Statice Var Générateur ASVG, représente la deuxième génération de FACTS. Le STATCOM est un nouveau compensateur de puissance réactive qui surmonte les limitations techniques et le coût élevé du SVC [17].

Ce compensateur se compose d'un onduleur triphasé à base de thyristor GTO et de diode en antiparallèle, couplé au réseau à travers un transformateur comme illustré par la figure (II-6)

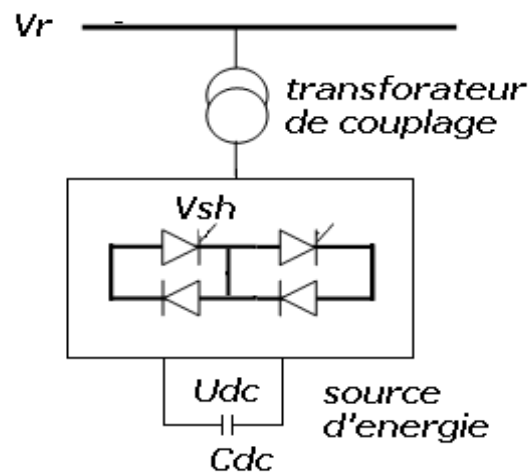


Figure (II-6) : Schéma unifilaire du STATCOM

Par son aptitude de contrôler la tension de sortie de l'onduleur V_{sh} le STATCOM peut échanger de l'énergie réactive avec le réseau [16]. La tension (V_{sh}) est en phase avec la tension du réseau. En effet si:

- ✓ Si $V_{sh} < V$, le courant circulant dans l'inductance est déphasée de $-\pi/2$ par rapport à la tension V ce qui donne un courant inductif ;(fig II-7-a) .
- ✓ Si $V_{sh} > V$, le courant circulant dans l'inductance est déphasée de $+\pi/2$ par rapport à la tension V ce qui donne un courant capacitif ; (fig II-7-b).
- ✓ Si $V_{sh} = V$, le courant circulant dans l'inductance est nul et par conséquent il n'y a pas d'échange d'énergie.

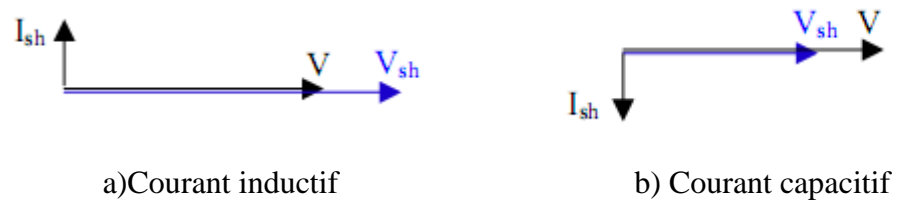


Figure (II-7). Diagramme vectoriel d'un STATCOM

Le Statcom présente plusieurs avantages à savoir :

- ✓ 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.

Cependant, 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.[18]

II. 4.2.2 Générateur synchrone statique SSG.

Un générateur synchrone statique SSG (Statice Synchronous Generator) est une combinaison d'un STATCOM et d'une source d'énergie capable de fournir ou d'absorber de la puissance.

Cette source a pour rôle de maintenir la tension aux bornes du condensateur à la valeur désirée. Le terme SSG inclut toutes les sources d'énergie telles que les batteries, volants d'inertie, aimants supraconducteurs, etc. toutefois, deux dispositifs particuliers peuvent être mis en évidence [19].

II. 5 Compensateurs 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 générale, l'objectif principale de ces compensateurs est de modifier l'impédance des lignes de transport (modifier le flux de puissance active pour un angle de phase fixe, de même que la puissance

réactive) en insérant des éléments en série avec celles-ci, pour annuler une partie de la réactance actuelle (X_{eff}) et de cette façon réduit l'impédance effective de la ligne [14].

Cet objectif peut être atteint également en injectant une tension alternative, de même fréquence que le réseau, en série dans la ligne et qui est en quadrature (90°) avec le courant de celle-ci. [5]

Ce type de compensateur est obtenu généralement par l'insertion d'un condensateur en série qui diminue l'angle de transport « δ » et agit donc sur le transit actif. [5][17][20]

La figure (II-8) à montre un réseau simple de transmission à courant alternatif avec un compensateur série connecté en série avec les conducteurs de la ligne de transmissions.

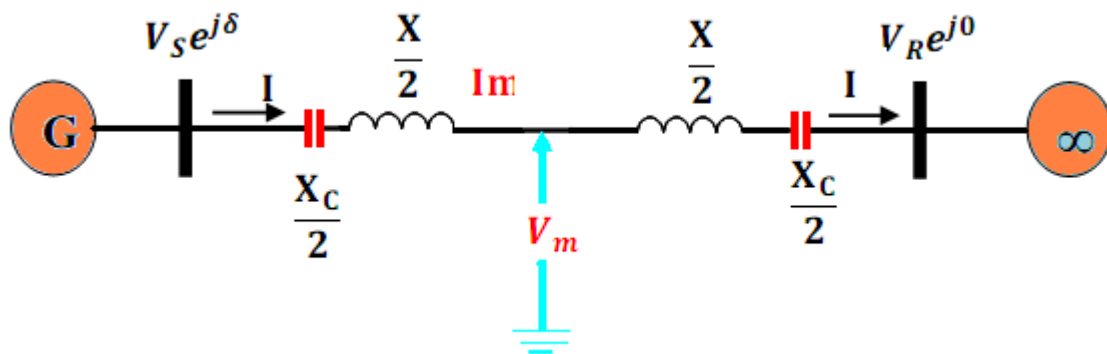


Figure (II-8) : Compensateur série dans un réseau de transmission

Donc la réactance effective est donnée par la relation suivante :

$$X_{\text{effe}} = X - X_c \quad (\text{II-8})$$

On pose que $K = X_c / X$ (coefficient de compensation série) talque $0 < K \leq 1$

$$X_{\text{effe}} = X \cdot (1 - K) \quad (\text{II-9})$$

Si $K=1$ \Longrightarrow $X_{\text{effe}} = 0$

Si $K=1/2$ \Longrightarrow $X_{\text{effe}} = X/2$

La figure (II-9) représente la relation entre les tensions V_s , V_r et V_m et le courant de ligne I

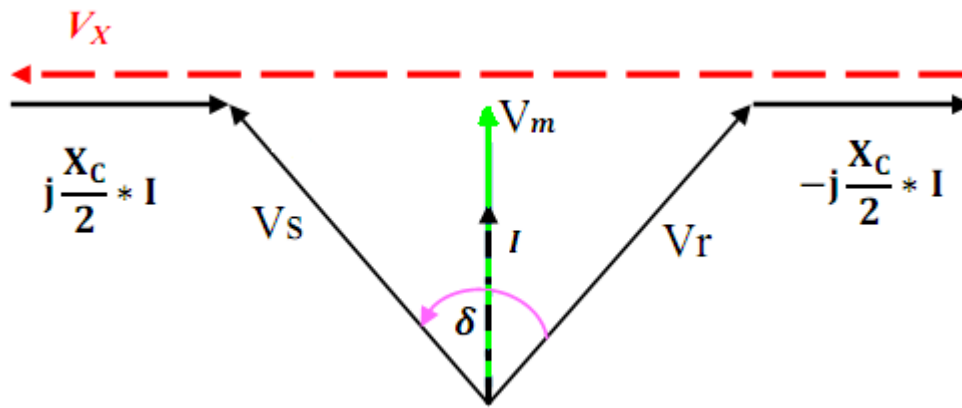


Figure (II-9) : Diagramme de phase de la tension et courant du compensateur série.

La puissance active et réactive transmises sur les lignes de transport d'énergie électrique sont données par les relations suivante : [17]

$$P_c(\delta, K) = \frac{V_r V_s}{X(1-K)} \sin(\delta) \tag{II-10}$$

$$Q_c(\delta, K) = \frac{V_r^2}{X(1-K)} - \frac{V_r V_s}{X(1-K)} \cos(\delta/2) \tag{II-11}$$

Les variations des puissances active et réactive en fonction du coefficient de compensation (K) sont illustrées sur la figure (II-10)

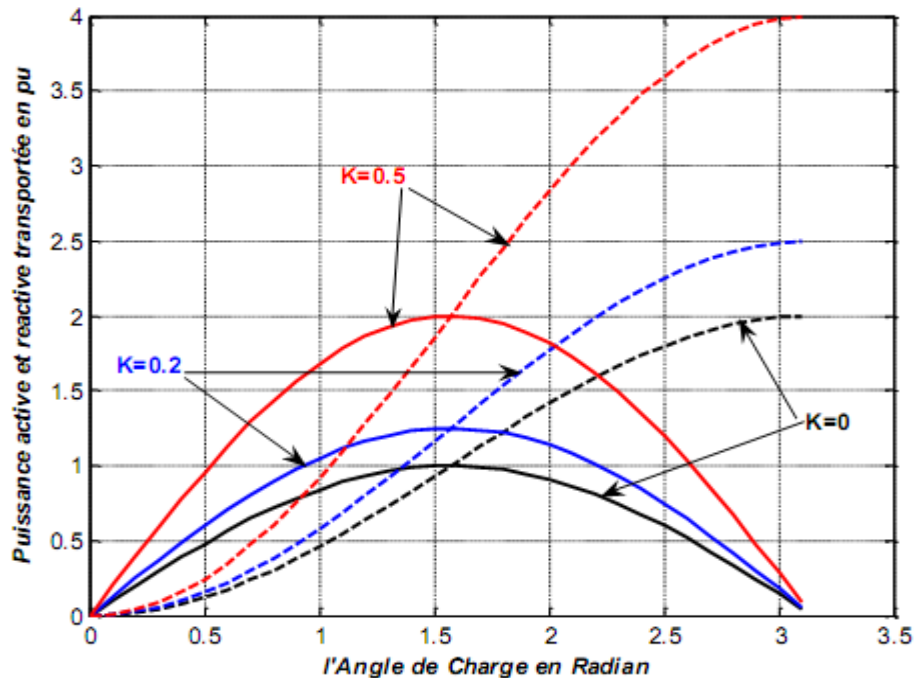


Figure (II-10) : La puissance active et réactive en fonction de (δ , K)

On constate que, le compensateur série, permet de contrôler le transit des puissances actives et réactives, en agissant sur le coefficient de compensation « K ». Comme le montre la figure ci-dessus,

Si $K=1/2$ la puissance active transmise peut prendre le double de sa valeur sans compensateur avec un angle de phase $\delta=\pi/2$ tel que ($P_c= 2*P_0$). Dans les mêmes conditions la puissance réactive est de quatre fois la valeur de la puissance réactive non compensée $Q_c=4*Q_0$.

Le compensateur série a été utilisé dans le réseau électrique pour :

- ✚ Améliorer la stabilité de réseau électrique ;
- ✚ Augmenter la capacité de la ligne de transmission.

II. 5.1 Compensateur série à base de thyristor

Les premiers schémas du compensateur série à thyristors ont été proposés en 1986 [19].

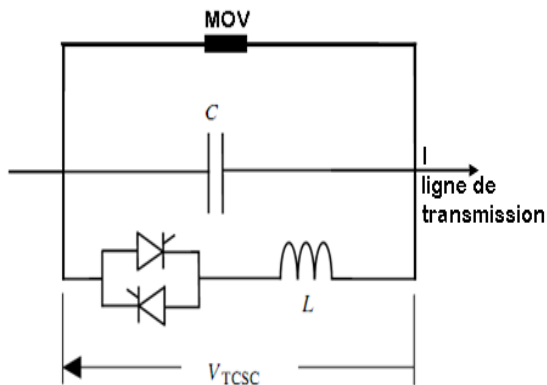
À l'heure actuelle, deux conceptions principales de compensateurs série à thyristors peuvent être distinguées:

- ❖ le condensateur série commandé par thyristors (TCSC);
- ❖ le compensateur série contrôlé par thyristors (TCSR);

II. 5.1.1 Ccondensateur série commande par thyristor (TCSC) :

Un condensateur série commandée par thyristors TCSC (*Thyristor Controlled Series Capacitor*) , c'est la première génération FACTS qui possède la possibilité de contrôler l'impédance de la ligne [19].

Le TCSC (compensateur série contrôlé par thyristor) est composé d'une inductance en série avec un gradateur à thyristors, le tout en parallèle avec un condensateur [21]. Généralement ce dispositif possède un élément de protection contre les surtensions placés en parallèle avec ce dernier, appelé MOV (Métal Oxide Varistor) [18] comme l'indique la figure (II-11). Du point de vue fonctionnement, le TCSC se comporte comme une réactance variable connectée en série avec la ligne de transmission.



(a)



Site View of the TCSC Serra da Mesa, Brazil

(b)

Figure (II.11) : a) schéma de structure du TCSC

b) exemple réel

Donc il est possible de changer la valeur de l'impédance du compensateur entre la zone capacitive et la zone inductive, par changement de l'angle d'amorçage des thyristors, pour augmenter la puissance transmise par la ligne, afin de renforcer la stabilité transitoire. [21] L'expression de l'impédance est donnée par l'équation suivante :

$$X_{TCSC}(\delta) = \frac{jL\omega}{\frac{2}{\pi} \left(\pi - \delta + \frac{\sin(2\delta)}{2} \right) - L\omega^2} \sin(\delta) \quad (\text{II-12})$$

Dans ce cas la puissance active transmise entre deux points ou deux jeux de barres et donnée par la relation suivant :

$$P_{sr} = \frac{V_r V_s}{X_{TCSC}} \sin(\delta_s - \delta_r) \quad (\text{II-13})$$

NB : la différence entre le système TSSC (Thyristor Switched Series Capacitor) et le système TCSC est que l'angle d'amorçage est soit de 90° soit de 180° . [16]

II. 5.1.2 Compensateur série contrôlé par thyristor (TCSR)

Le TCSR (thyristor controlled séries Reactor) est un compensateur inductif qui se compose d'une inductance en parallèle avec une autre inductance commandée par thyristor comme indiqué sur la figure (II-12), afin de fournir une réactance inductive série variable.

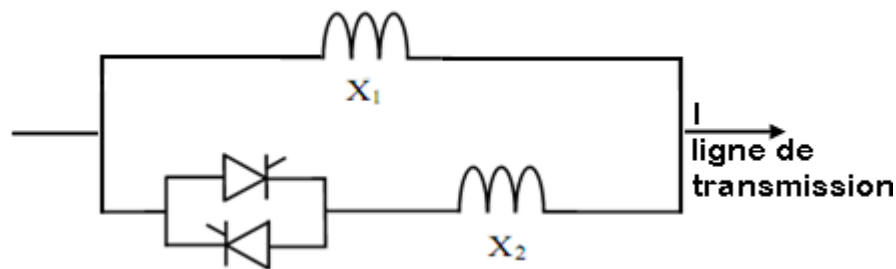


Figure (II.12) : Schéma de principe de TCSR

Lorsque l'angle d'amorçage du réacteur commandé par thyristor est de 180 degrés, il cesse de conduire, et la réactance non contrôlable X_1 agit comme un limiteur de courant de défaut. Cependant quand l'angle d'amorçage diminue en dessous de 180 degrés, la réactance équivalente diminue jusqu'à l'angle de 90 degrés, où elle est la combinaison parallèle de deux réactances.

NB : la différence entre le système *TSSR* (*Thyristor Switched Series Reactor*) et le système TCSR est que l'angle d'amorçage soit de 90° soit de 180°. [16]

II. 5.2 Compensateur série à base de GTO thyristor

II. 5.2.1 Compensateur statique synchrone série (SSSC)

Ce type de compensateur série (SSSC : Statice Synchrones Série Compensateur) est le plus important dispositif de cette famille. Il est constitué d'un onduleur triphasé couplé en série avec la ligne électrique à l'aide d'un transformateur comme illustrer la figure (II-13)

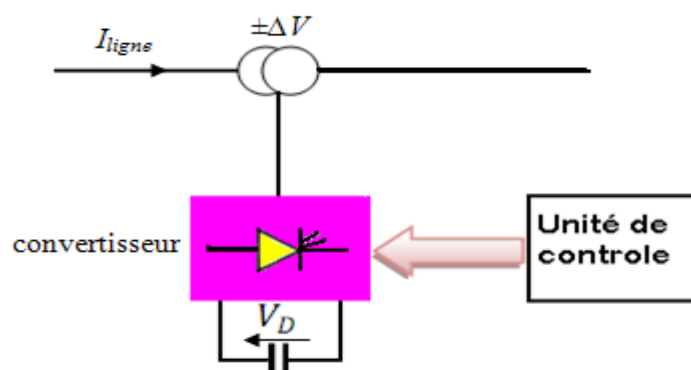


Figure (II.13) : schéma de base de SSSC

Le rôle de ce compensateur est d'introduire une tension triphasée, à la fréquence du réseau, en série avec la ligne de transport. Cette tension est en quadrature avec le courant de ligne. Cette dernière est injectée pour l'augmentation ou la diminution de la tension qui traverse l'impédance inductive de la ligne et par conséquent le courant fondamental ainsi que la puissance transmise. [5][14],

- Si l'injection de la tension s'effectue avec un angle de 90° en arrière par rapport au courant de la ligne, on obtient une compensation série qu'est équivalente à un condensateur série à la fréquence fondamentale.
- Si par contre, la tension injectée est en avance de 90° par rapport au courant, la compensation a le même effet que celui d'augmenter l'impédance réactive de la ligne.

Le SSSC est appliqué pour la commande dynamique du flux de puissance et de la tension ainsi que pour la stabilité de l'angle de transport. Le fait que le SSSC puisse produire autant de tensions capacitatives qu'inductives sur une ligne ceci élargit le domaine d'application de ce dispositif. Lors de la commande du flux de puissance, un SSSC peut être utilisé pour augmenter ou réduire ce flux [3].

II. 6 Compensateurs hybrides ou combinés série-parallèle

Cette famille de compensateurs est la combinaison des autres groupes. Ils permettent un contrôle multi variables, ils servent à contrôler le flux de puissance active et réactive, la tension et l'angle de transport de l'énergie. On se limite dans ce paragraphe à étudier trois compensateurs :

II. 6.1 Compensateur hybrides à base de thyristor

II. 6.1.1 Régulateur d'angle de phase contrôlé par thyristor (TCPAR)

Le TCPAR (Thyristor Controlled Phase Angle Regulator) est un transformateur à base de thyristors. Ce dispositif a été créé pour remplacer les déphaseurs à transformateurs à réglage en charge (LTC ; Load Tap Changer) qui sont commandés mécaniquement [16]. Le TCPAR n'est pas capable d'absorber ou de fournir de la puissance réactive, il est capable juste de varier la puissance active.

Le TCPAR est composé d'un transformateur branché en série avec le réseau, est un deuxième transformateur connecté en parallèle appelé transformateur d'excitation, ces deux transformateurs sont connectés à travers un convertisseur à thyristors. Ce convertisseur permet de fournir une tension au secondaire de transformateur série :

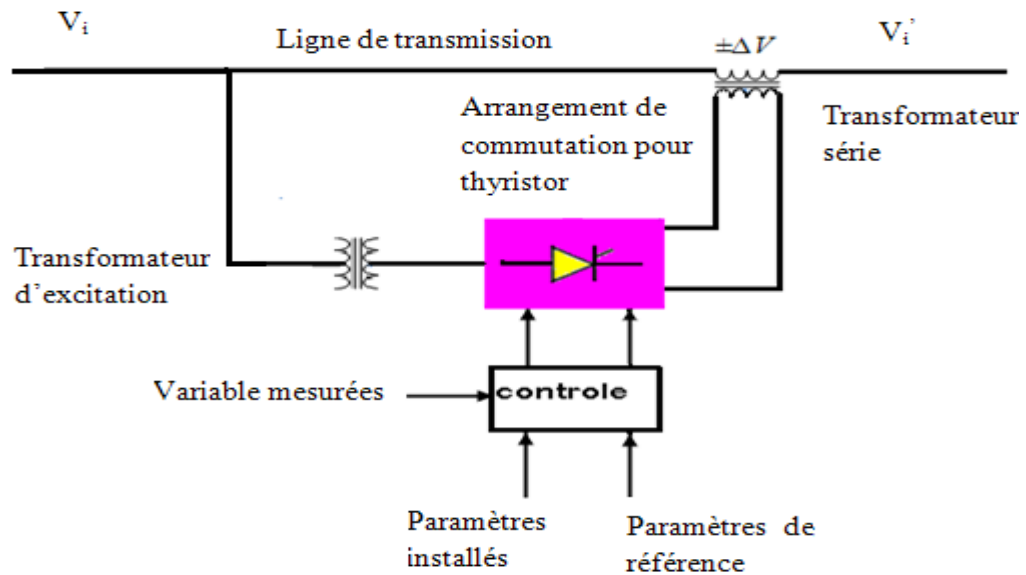


Figure (II.14) : Structure d'un TCPAR

Le TCPAR possède la capacité de maintenir l'angle effectif maximal de la ligne de transmission durant la première oscillation. En plus, le TCPAR, peut être utilisé aussi pour augmenter la limite de la stabilité transitoire [18].

La caractéristique statique d'un tel compensateur est représentée par la figure (II.15).

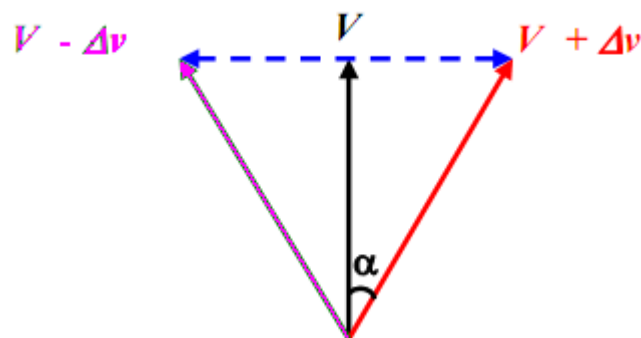


Figure (II.15) : Diagramme des phasors du TCPAR

II. 6.2 Compensateur hybrides à base de GTO thyristor

II. 6.2.1 Contrôleur unifié de l'écoulement de puissance (IPFC)

Le contrôleur de transit de puissance entre ligne IPFC (*Interline Power Flow Controller*) est utilisé dans le cas d'un système de lignes multiples reliées à un même poste. Son principe est illustré à la figure (II.16). L'IPFC est formé de plusieurs SSSC, chacun d'eux fournissant une compensation série à une ligne différente. Du côté continu, tous les convertisseurs sont reliés entre eux via des disjoncteurs [19] [22].

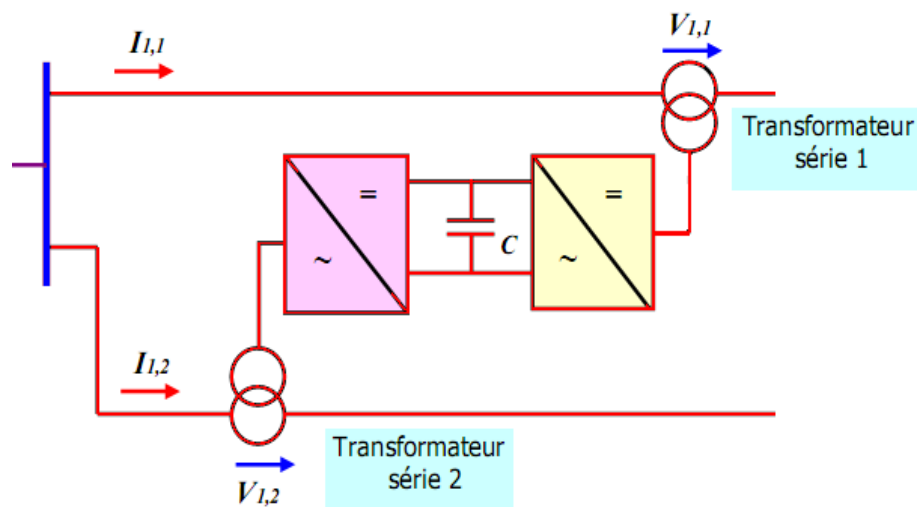


Figure (II.16) : Schéma de base de l'un IPFC

L'IPFC permet de transférer de la puissance active entre les lignes compensées pour égaliser les transits de puissances active et réactive sur les lignes ou pour décharger une ligne surchargée vers une autre moins chargée. Les tensions injectées possèdent une composante en quadrature et une composante en phase avec les courants respectifs des lignes. La composante en quadrature permet une compensation série indépendante dans chaque ligne, alors que la composante en phase définit le niveau de puissance active échangée avec les autres lignes. Sur la liaison continue, le bilan est toujours nul.

II. 6.2.2 Contrôleur unifié de l'écoulement de puissance (UPFC)

UPFC (Unified Power Flow Controller) est la troisième génération FACTS, il constitue le premier dispositif FACTS et l'unique, qui a la capacité de contrôler simultanément chacun des trois paramètres clés de l'écoulement de puissance à savoir :

- ✓ La tension ;
- ✓ L'impédance de la ligne ;
- ✓ Le déphasage des tensions aux extrémités de la ligne.

Comme le TCPAR, l'UPFC est constitués de deux transformateur l'un est connecté en série et l'autre en shunt avec la ligne de transmission, chaque transformateur est connecté à un onduleur à base des thyristors GTO, ces derniers sont couplés à travers une liaison continue DC. Autrement dit, l'UPFC est la combinaison d'un STATCOM et un SSSC [17]. Ils sont couplés à travers une liaison DC commune, pour permettre l'écoulement bidirectionnelle de la puissance active en effet, l'énergie active peut circuler librement dans les deux directions entre les extrémités AC des deux convertisseurs pour générer ou absorber l'énergie réactive indépendamment [14].

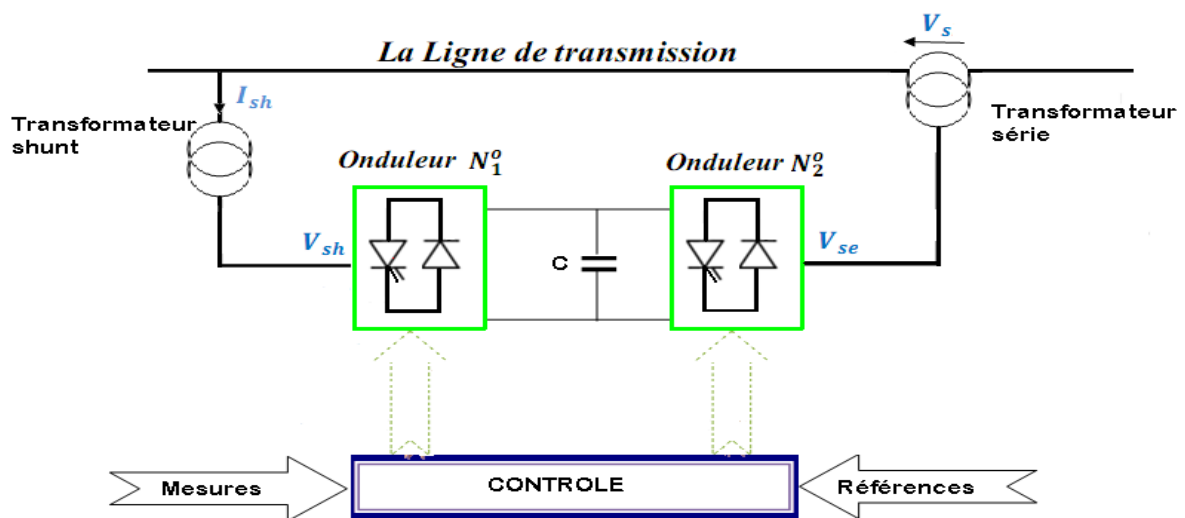


Figure (II-17) : Schéma de base de l'UPFC

Dans la figure (II-17), l'onduleur-2- injecte la tension V_s , qu'est contrôlable en amplitude et en phase, donc il peut réaliser la fonction de compensation série de la puissance active et réactive.

D'autre part, l'onduleur-1- est utilisé à travers la liaison continue pour fournir la puissance active nécessaire à l'onduleur-2-. Il sert aussi à compenser l'énergie réactive puisqu'il peut fournir ou absorber de la puissance réactive, indépendamment de la puissance active, au réseau. En effet, l'UPFC permet à la fois le contrôle de la puissance active et celui de la tension de ligne. En principe, l'UPFC est capable d'accomplir les fonctions des autres dispositifs FACTS à savoir le réglage de la tension, la répartition de flux d'énergie, l'amélioration de la stabilité et l'atténuation des oscillations de puissance. [16].

L'UPFC est un type particulier des dispositifs FACTS dont les principales fonctions sont :

- ✓ le réglage de la tension;
- ✓ l'amélioration des flux de puissances active et réactive;
- ✓ la limitation des courants de court-circuit;
- ✓ l'amortissement des oscillations de puissance

L'énorme avantage de l'UPFC est bien sur, la flexibilité qu'il offre en permettant le contrôle de la tension, de l'angle de transport et de l'impédance de la ligne en un seul dispositif comprenant seulement deux onduleurs de tension triphasé. De plus, il peut basculer de l'une à l'autre de ces fonctions instantanément, en changeant la commande de ses onduleur, ce qui permet de pouvoir faire face à des défauts ou à des modifications du réseau en privilégiant temporairement l'une des fonctions.

II. 7. Propriétés des dispositifs FACTS

L'utilisation de la nouvelle technologie FACTS est un moyen susceptible d'apporter des solutions qui semblent meilleures. Les systèmes FACTS permettent aux circuits de transmission d'être utilisés à leur capacité thermique maximale et aussi offrir aux systèmes de puissance une plus grande flexibilité.

II. 7.1. Avantage des dispositifs FACTS

Les avantages apportés aux réseaux électriques par les FACTS sont :

- ❖ Une grande fiabilité grâce à l'utilisation de contrôleurs d'électronique de puissance caractérisés par une grande rapidité de réaction ;
- ❖ Une grande flexibilité dans le contrôle de puissance de telle sorte qu'elle s'écoule le long de l'itinéraire de transmission prescrit ;
- ❖ Une amélioration de la stabilité transitoire.

II. 7.2. Les contraintes des dispositifs FACTS

Les dispositifs FACTS sont considérés comme des solutions pour aider les systèmes électriques, mais ils présentent des inconvénients, en plus qu'ils ne sont pas une solution universelle, ils existent plusieurs contraintes pour que ces dispositifs soient efficaces et rentables [21] :

- ✓ Le choix du FACTS ;
- ✓ Le choix du modèle du FACTS ;
- ✓ Choix de la localisation des FACTS ;
- ✓ Protection pour les FACTS et pour le réseau ;
- ✓ Interactions entre les dispositifs FACTS et les autres éléments.

II. 7.3. Application des dispositifs FACTS dans les réseaux électriques

Les possibilités du contrôle grâce à l'application des dispositifs FACTS dans les réseaux électriques sont résumées dans la figure (II-19). La figure(II.18) montre un diagramme schématique de deux réseaux électriques connectés par une ligne de transmission en courant alternatif.

L'équation de la figure (II-19), définit la puissance transmise entre les deux systèmes. V_s et V_r sont les tensions aux extrémités de la ligne, X représente l'impédance série de la ligne, $(\delta_1 - \delta_2)$ est l'angle de phase entre les deux systèmes. Il est clair que les trois paramètres tension, impédance, et angle de phase influencent la puissance transmise entre les deux systèmes. Comme il est illustré sur la figure (II-19). Chaque dispositif FACTS peut influencer un des trois paramètres, et par conséquence le contrôle de l'écoulement de puissance.

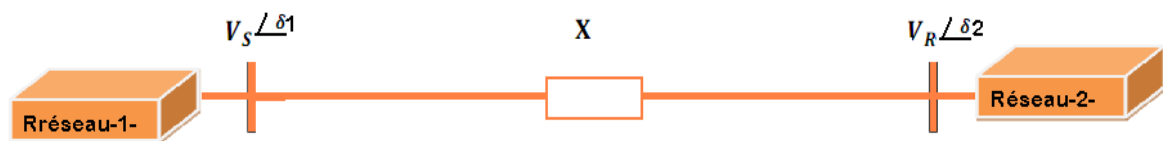


Figure (II-18) : Schéma de deux réseaux connectés

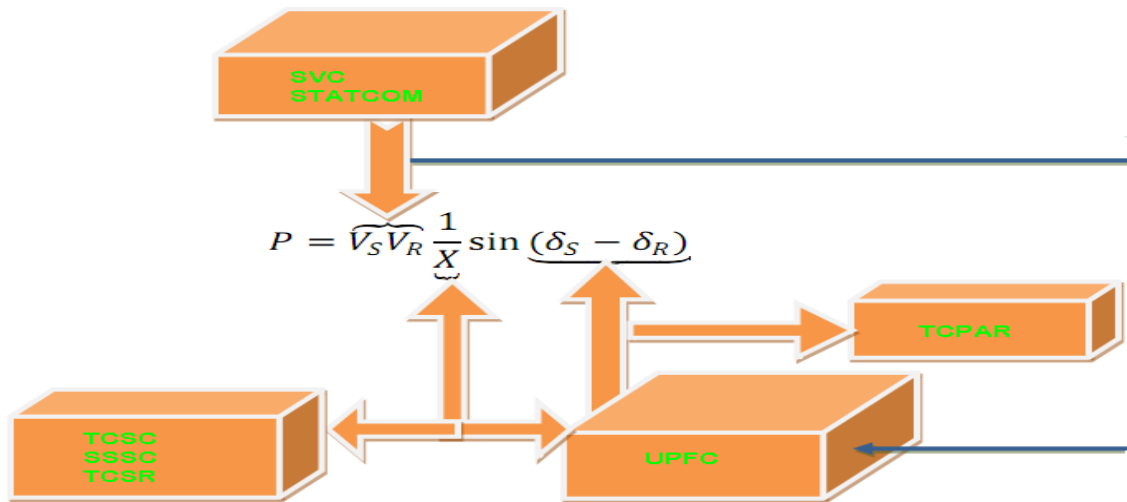


Figure (II.19) : Diagramme schématisé pour l'application des FACTS

II. 8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté un aperçu global sur les nouveaux dispositifs de contrôle et de commande des réseaux électriques appelés FACTS comme le SVC, STATCOM, TCSC, SSSC, UPFC. Une classification est adoptée comme classification universelle des systèmes FACTS. La plupart d'entre eux sont déjà en service dans la pratique d'une structure principalement à base d'onduleurs conçus avec les interrupteurs IGBT/GTO de technologie très avancée caractérisés par un temps de réaction très court qui permet une flexibilité du courant transité et par conséquent l'habilité de ces dispositifs de performer le fonctionnement du système énergétique et d'améliorer sa stabilité.

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

Chapitre III

Modélisation du compensateur
statique SVC

Chapitre III

Modélisation du compensateur statique SVC

III.1 Introduction :

Dans le chapitre II on a étudié les trois type de compensateur du système FACTS série, parallèle et série-parallèle. Nous avons évoqué brièvement un type particulier de FACTS, Le compensateur Statique de Puissance Réactive (CSPR) (acronyme anglais de Static Var Compensator SVC) ; est un équipement de compensation à base d'électronique de puissance (Thyristor) . Le SVC règle la tension sur sa borne en commandant la quantité de puissance réactive injectée ou absorbée dans un système d'alimentation

Nous allons présenter dans ce chapitre Une étude profonde concernant la modélisation et la commande des différents SVC.

III .2 Historique du SVC

Le compensateur statique de puissance réactive SVC (Static Var Compensator) est apparu dans les années soixante-dix. Le premier SVC est installé dans l'ouest de Nebraska, en l'Amérique du Nord [23] [24], pour répondre à des besoins de stabilisation de tension rendue fortement variable du fait de charges industrielles très fluctuantes telles que les laminoirs ou les fours à arc. Plus de 200 SVC sont en fonctionnement de par le monde dans les réseaux électriques de 10 à 765kv. Plus de 90 installé au Amérique du Nord et les plus anciens datent des années 1970 [25].

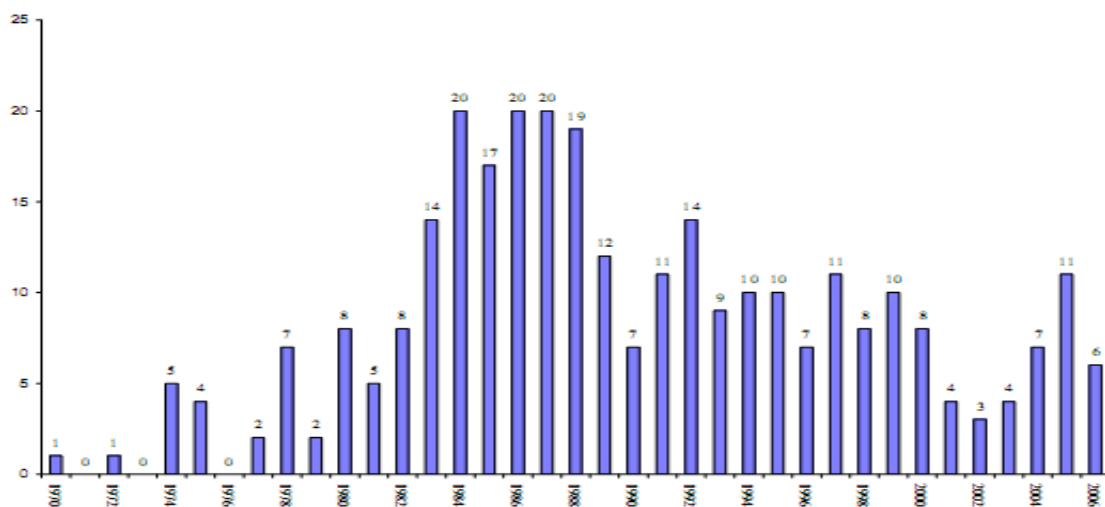


Figure (III.1): Nombre approximatif d'installations du SVC de 1970 à 2006 [8].

III .3 Définition du SVC

L'IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*), définit le SVC (*Static Var Compensator*) comme un générateur (ou absorbeur) statique d'énergie réactive, shunt, dont la sortie est ajustée en courant capacitif ou inductif afin de contrôler des paramètres spécifiques du réseau électrique, typiquement la tension des nœuds [26].

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 [27].

Une représentation schématique de la structure d'un compensateur SVC est montrée sur la figure (III.2). Le Compensateur Statique de Puissance Réactive est un dispositif de compensation parallèle à base de composants d'électronique de puissance.

III .4 Applications des SVC

La compensation de puissance réactive peut être intéressante pour plusieurs applications industrielles ainsi que dans les réseaux de transport et de distribution de l'énergie électrique pour assurer une compensation de la consommation des charges en énergie réactive, évitant ainsi que cette puissance réactive circule par le réseau tout en contribuant à :

- L'augmentation de la capacité des lignes de transport électrique ;
- La contribution au maintien du plan de tension par la régulation de la tension en différents nœud du réseau ;
- L'amortissement des oscillations et l'amélioration de la stabilité en lignes fiables.

L'utilisation de compensateur en réseau électrique est en pratique très répandue dans des applications de soutien de tension et d'amélioration de la stabilité.

Comme exemples d'applications industrielles classiques, on retrouve les fours à arcs et les laminoirs, tandis que les fermes éoliennes ouvrent actuellement un nouveau champ potentiel d'application [26].

III.5 Constitution du SVC

Les dispositifs connus sous l'appellation SVC (*Static Var Compensator*) sont dérivés de la combinaison des éléments inductive et capacitifs qui peuvent être contrôlables ou pas individuellement mais, qui permettent le contrôle global de la puissance échangée selon les nécessités de compensation. Ainsi, les configurations de SVC les plus communes sont : le TCR+FC et le TCR+TCS et parfois de réactance commutée par thyristors (TSR), et des filtres d'harmoniques schématisés sur la figure (III-2) [26].

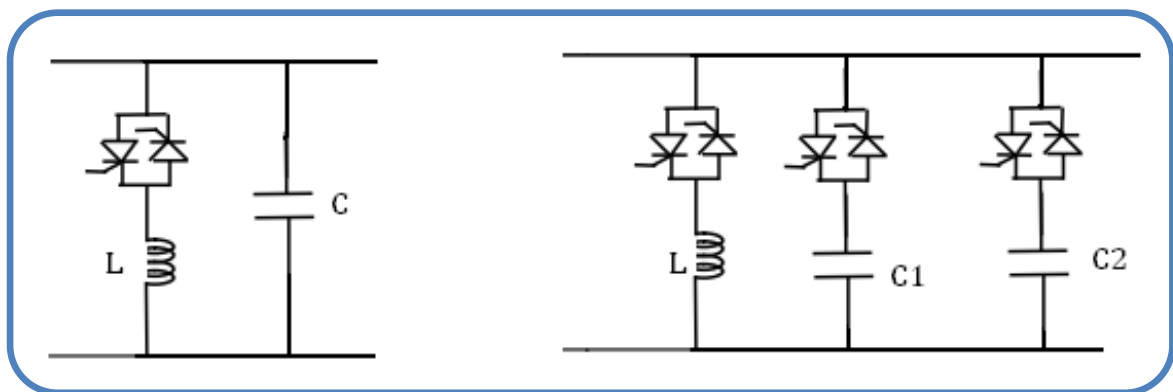


Figure (III.2) : Configuration du SVC les plus communs (TCR+FC et TCR+2*TSC)

III.5.1 Condensateur fixe (FC)

Le condensateur fixe (*fixed capacitor*) fournit à la barre une puissance réactive fixe, il est connecté au réseau mécaniquement et comporte un contrôle par l'ouverture du disjoncteur qui le relie au jeu de barre.

III.5.2 Réactance commandée par thyristors (TCR) :

III.5.2.1 Définition :

Le compensateur statique TCR (*Thyristor-Controlled Reactor*) est un compensateur inductif qui se compose d'une inductance « L » en série avec thyristor bidirectionnelle (deux thyristor monte en tête-bêche) montré sur la figure (III-3).

Ce type de compensateur est fréquemment utilisé pour améliorer la stabilité des réseaux d'énergie électrique.

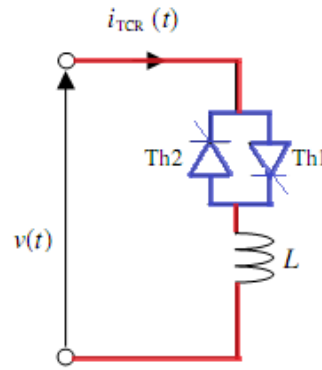


Figure (III.3) : Inductance commande par thyristor TCR

L'équation dynamique qui régit le mode de fonctionnement du TCR est $v(t)$:

$$V(t) = \sqrt{2} V \sin(\omega t) \quad (\text{III.1})$$

La valeur instantanée du courant dans la réactance TCR est :

$$L \frac{di}{dt} = \sqrt{2} V \sin(\omega t) \quad (\text{III.2})$$

$$I_{TCR}(t) = \begin{cases} \frac{1}{L} \int_{\alpha}^{\omega t} \sqrt{2} V \sin(\omega t) dt = \frac{\sqrt{2} V}{X_L} (\cos \alpha - \cos \omega t) & \text{si } \alpha < \omega t < \alpha + \sigma \\ 0 & \text{si } \alpha + \sigma < \omega t < \alpha + \pi \end{cases} \quad (\text{III.3})$$

Où

V : tension efficace d'alimentation (V)

$X_L = \omega L$: réactance pour fréquence fondamentale du TCR.

α : angle d'amorçage (rad)

Une décomposition en série de Fourier donne pour l'amplitude de courant de la composante de fondamentale :

$$I_{L_{TCR}}(\alpha) = \frac{V}{\pi \omega L} (2(\pi - \alpha) + \sin(2\alpha)) \quad (\text{III.4})$$

Equation (III.4) peut être écrite comme :

$$I_{L_{TCR}}(\alpha) = B_{TCR}(\alpha) \cdot V \quad (\text{III.5})$$

Donc la valeur de la susceptance B_{TCR} peut être écrite comme suit:

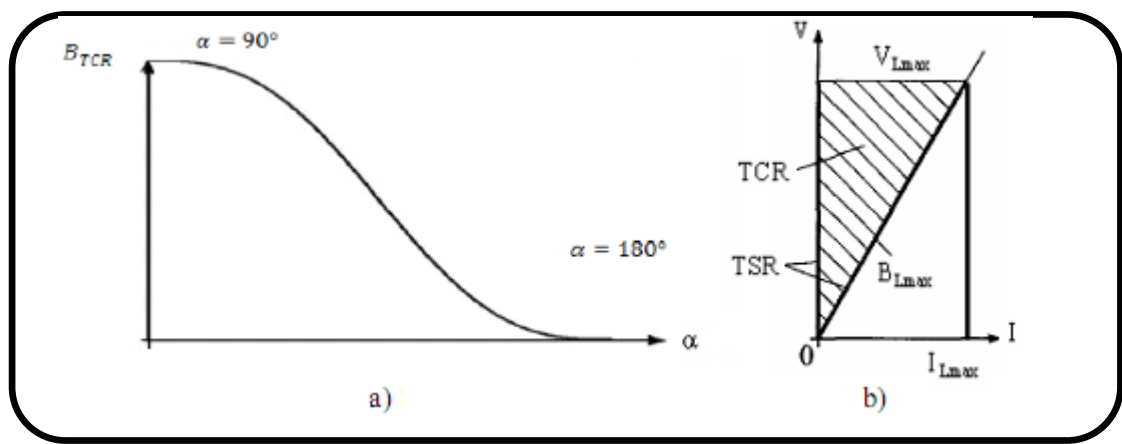
$$B_{TCR}(\alpha) = \frac{2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha}{\pi \cdot X_L} \quad (\text{III.6})$$

Ou

$$B_{TCR}(\sigma) = \frac{\sigma - \sin \sigma}{\pi \cdot X_L} \quad (\text{III.7})$$

Avec B_{TCR} est la susceptance du TCR qui varie de la même manière que la fondamentale du courant.

La loi de contrôle est montrée sur la figure (III.4). Pour un angle d'amorçage $\alpha = 90^\circ$, la valeur maximale $B_{TCRMAX} = 1/X_L$, c'est la conduction pleine. La valeur minimum est zéro, obtenue avec $\alpha = 180^\circ$. Ce principe est appelé le contrôle de phase.



Figure(III.4) : Principe de contrôle du TCR, a) Variation de la Susceptance B_{TCR} en fonction de α , b) Zone de fonctionnement [26]

III .5.3 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 représentée sur la figure (III-5-a). 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 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 [19] [28].

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 (figure. (III-5-b)).

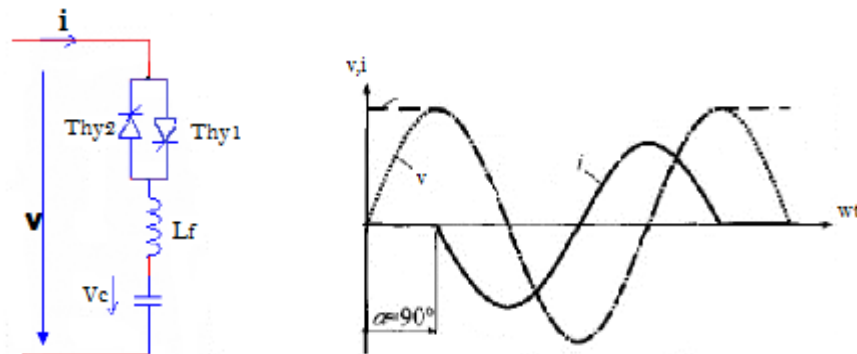


Figure (III.5): Condensateur commuté par thyristors

a) montage, b) courant et tension dans la capacité

Le TSC est un système avec condensateur et inductance enclenchés par thyristors. Les dispositifs avec condensateur enclenché par thyristor TSC servent normalement à bloquer 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 [26] [29].

III .5.4 Reactance contrôlée par thyristor (TCSR): (Thyristor Controlled Series Reactor).

Le TCSR est un compensateur inductif qui se compose d'une inductance en parallèle avec une autre inductance commandée par thyristor afin de fournir une réactance inductive série variable. Figure (III.6) ; Lorsque l'angle d'amorçage du réacteur commandé par thyristor est de 180 degrés, il cesse de conduire, et la réactance non contrôlable X_1 agit comme un limiteur de courant de défaut. Pendant que l'angle d'amorçage diminue en dessous de 180 degrés, la réactance équivalente diminue jusqu'à l'angle de 90 degrés, où elle est la combinaison parallèle de deux réactances.

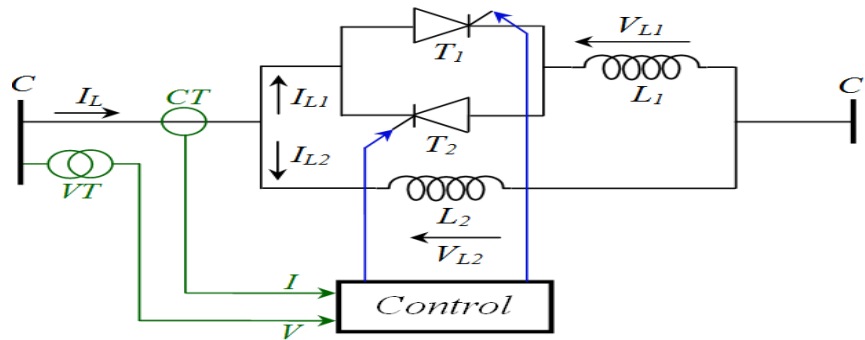


Figure (III-6) : Schéma d'un SVC de type TCSR

Ce compensateur peut être modélisé comme une réactance variable (X_{TCSR}) comme le montre la figure III.7.

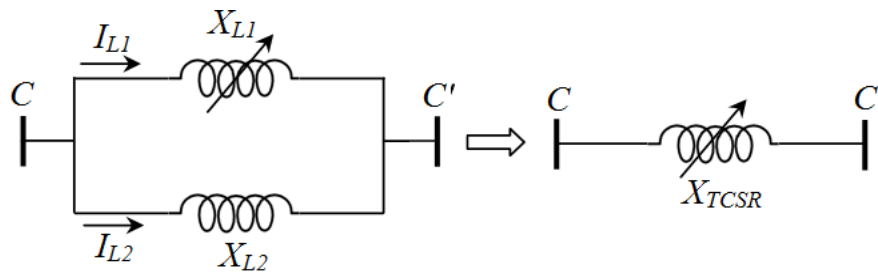


Figure (III.7) : Réactance apparente injectée par TCSR

A partir de la figure (III.7), la réactance apparente de la TCSR injecté à la ligne de transmission est définie par l'équation suivante :

$$X_{TCSR}(\alpha) = X_{L1}(\alpha) // X_{L2} = \frac{X_{L1}(\alpha) \cdot X_{L2}}{X_{L1}(\alpha) + X_{L2}} \quad (III.8)$$

La réactance de l'inductance première $X_{L1}(\alpha)$ commandé par thyristors est définie par l'équation :

$$X_{L1}(\alpha) = X_{L1-\max} \left[\frac{\pi}{\pi - 2\alpha - \sin(2\alpha)} \right] \quad (III.9)$$

Avec

$$X_{L1-\max} = L_1 \cdot \omega \quad (III.10)$$

Et la seconde réactance de l'inductance (X_{L2}) est définie par la formule:

$$X_{L2} = L_2 \cdot \omega \quad (\text{III.11})$$

A partir des équations (III.10) et (III.11), l'équation finale (III.12) devient:

$$X_{TCSR}(\alpha) = \frac{L_2 L_1 \omega^2 \left(\frac{\pi}{\pi - 2\alpha - \sin(2\alpha)} \right)}{\omega \left(L_2 + L_1 \left(\frac{\pi}{\pi - 2\alpha - \sin(2\alpha)} \right) \right)} \quad (\text{III.12})$$

Les puissances active et réactive sur la ligne de transmission avec TCSR sont définies par les équations suivantes :

$$P(\delta) = \frac{V_A \cdot V_B}{Z_{AB} + X_{TCSR}(\alpha)} \sin(\delta) \quad (\text{III.13})$$

$$Q(\delta) = \frac{V_B^2}{Z_{AB} + X_{TCSR}} - \frac{V_A \cdot V_B}{Z_{AB} + X_{TCSR}} \cos(\delta) \quad (\text{III.14})$$

Avec

Z_{AB} est l'impédance de la ligne de transmission,

δ est l'angle de la ligne,

V_A et V_B tension sur l'extrémité de la ligne de transmission.

III.5.5 Valeurs de consigne du dispositif SVC

Les valeurs du compensateur statique de puissance réactive sont exprimées sous forme de puissances réactives injectées à une tension de 1p.u. [19].

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 comprises dans l'intervalle:

$$- Q_{Lmax} \leq Q_{SVC} \leq Q_{Cmax} \quad (\text{III.15})$$

Si le compensateur statique 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 :

$$0 \leq Q_{TSC} \leq Q_{Cmax} \quad (\text{III.16})$$

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

$$0 \geq Q_{TCR} \geq Q_{Lmax} \quad (III.17)$$

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 SVC sont à placés.

III.6 COMPENSATEUR STATIQUE STATCOM

Selon la norme IEEE : le STATCOM est un générateur synchrone statique fonctionnant comme un SVC (Static Var Compensator) connecté en parallèle dont le courant de sortie (capacitif ou inductif) peut être contrôlé indépendamment de la tension AC du réseau.

Le STATCOM est la version des SVC composé d'un convertisseur de tension à base de semi-conducteur de haute technologie (IGBT, IGCT) associé à un condensateur comme source de tension continue et l'ensemble connecté en parallèle au réseau par le biais d'un transformateur de couplage comme représenté dans la figure (III.8) :

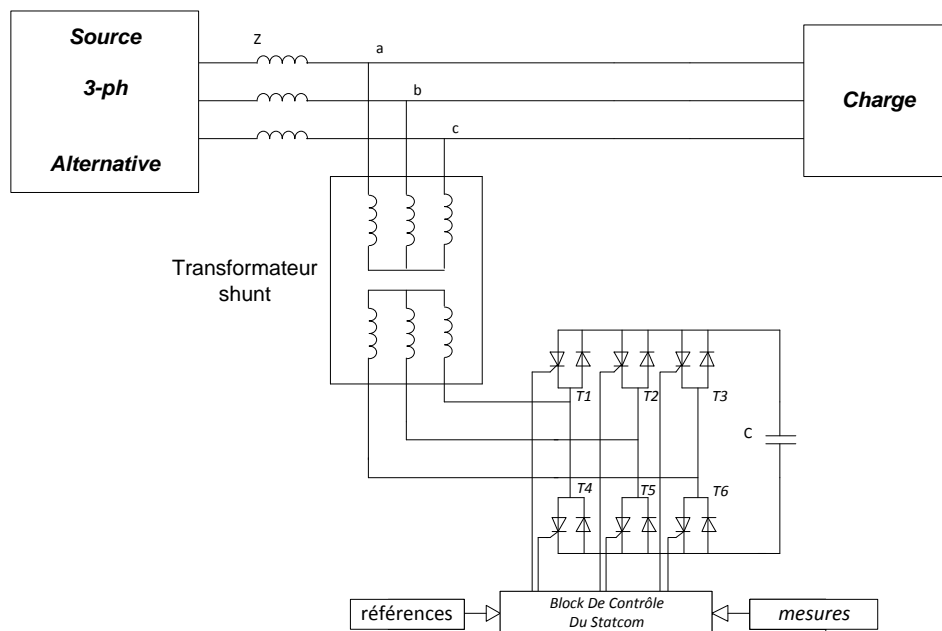


Figure (III.8) : Structure d'un STATCOM connecté à un réseau électrique.

Les compensateurs shunts sont bien reconnus dans la compensation de l'énergie réactive et par conséquent la régulation de la tension au jeu de barres où ils sont connectés. Le STATCOM est un générateur synchrone statique qui génère une tension alternative triphasée synchrone avec la tension du réseau à partir d'une source de tension continue. L'amplitude de la tension du STATCOM peut être contrôlée afin d'ajuster la quantité de l'énergie réactive à échanger avec le réseau. [25]

III.6.1 Principes de fonctionnement du SVC :

Le principe de fonctionnement de SVC est simple. En faisant varier la grandeur des tensions de sortie produites, l'échange de puissance entre SVC et le réseau peut être réglé.

Autrement dit, si l'amplitude de la tension de sortie est augmentée au-delà de celle du réseau figure (III-9-a), le courant circule à travers la réactance en provenance du ASVC vers le réseau alors le SVC produit de la puissance réactive (capacitif) pour le réseau [18][30].

Si l'amplitude de la tension de sortie est réduite à une valeur inférieure par rapport à celle du réseau figure (III-9-b), alors un courant réactif circule depuis le réseau vers SVC et dans ce cas le compensateur SVC absorbe de la puissance réactive (inductif).

Si la tension de sortie est égale à celle du réseau l'échange de puissance réactive est égal à zéro.

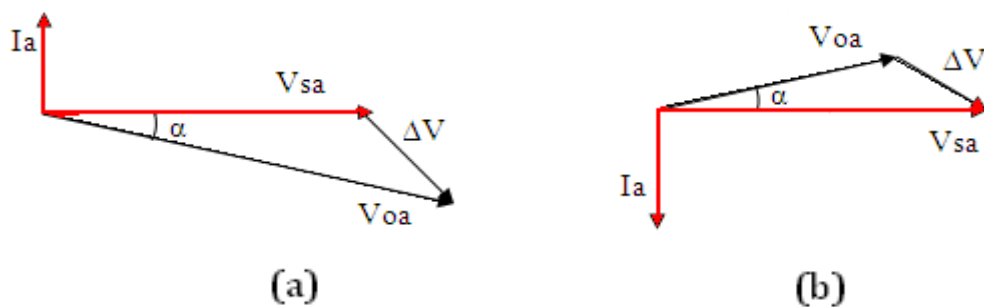


Figure (III-9) : Diagramme de Phase pour les modes de fonctionnement :

(a) capacitif ($\alpha < 0$) et (b) inductif ($\alpha > 0$)

III.7 Modélisation et analyse d'un dispositif SVC

III.7.1 Modèle non-linéaire

Le modèle mathématique de l'SVC est donné par la relation suivant : [30]

$$v_{s,abc} = \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} = \left(R_s + L_s \frac{d}{dt} \right) \begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \\ i_{cc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{ca} \\ v_{cb} \\ v_{cc} \end{bmatrix} \quad (\text{III.18})$$

Et la source de tension de réseau (alimentation) proposée par :

$$v_{s,abc} = \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} v_s \begin{bmatrix} \sin(\omega t - \alpha) \\ \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3} - \alpha) \\ \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3} - \alpha) \end{bmatrix} \quad (\text{III.19})$$

Où

V_s : est la tension efficace de la source alternative,

ω : sa pulsation

α : est l'angle de phase qui concerne la différence de phase entre la tension de source et la fonction de commutation (tension de sortie de convertisseur).

Dans le cas où les harmoniques causées par l'action d'ouverture et fermeture des interrupteurs d'un convertisseur sont supposées négligeables, la fonction de commutation « S » peut être définie comme suit :

$$S = \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} m \begin{bmatrix} \sin(\omega t) \\ \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (\text{III.20})$$

L'indice de modulation IM est donné par :

$$IM = \sqrt{\frac{2}{3}} m = \frac{(V_0)_{\text{crête}}}{V_{dc}} \quad (\text{III.21})$$

Maintenant, la tension de sortie de convertisseur et le courant de condensateur « C » peut être exprimés comme suit :

$$v_{0,abc} = S V_{dc} \quad (\text{III.22})$$

$$i_{dc} = S^T i_{abc} \quad (\text{III.23})$$

Et.

$$i_{dc} = C \frac{dv_{dc}}{dt} \quad (\text{III.24})$$

D'après le schéma de la Figure (III-8), on peut obtenir les relations entre les tensions et le courant est donné par l'équation suivant :

$$R_s i_{abc} + L_s \frac{d}{dt} (i_{abc}) = V_{s,abc} - V_{o,abc} \quad (\text{III.25})$$

Avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{abc} = K^{-1} i_{qdo} \\ v_{s,abc} = K^{-1} v_{s,qdo} \\ v_{o,abc} = K^{-1} v_{o,qdo} \end{array} \right. \quad (\text{III.26})$$

On remplaçant l'équation (III.26) dans l'équation (III.25), on obtient:

$$R_s (K^{-1} i_{qdo}) + L_s \frac{d}{dt} (K^{-1} i_{qdo}) = K^{-1} [V_{s,qdo} - V_{o,qdo}] \quad (\text{III.27})$$

$$R_s (K^{-1} i_{qdo}) + L_s \left[\frac{d}{dt} (K^{-1}) i_{qdo} + K^{-1} \frac{d}{dt} (i_{qdo}) \right] = K^{-1} [V_{s,qdo} - V_{o,qdo}] \quad (\text{III.28})$$

En utilisons la propriété de la matrice dérivée :

$$\frac{d}{dt} (K^{-1}) = -K^{-1} \frac{d}{dt} (K) K^{-1} \quad (\text{III.29})$$

En substituant l'équation (III.29) dans (III.28):

$$R_s (K^{-1} i_{qdo}) + L_s \left[-K^{-1} \frac{d}{dt} (K) K^{-1} i_{qdo} + K^{-1} \frac{d}{dt} (i_{qdo}) \right] = K^{-1} [V_{s,qdo} - V_{o,qdo}] \quad (\text{III.30})$$

Après simplification :

$$L_s \frac{d}{dt} (i_{qdo}) = -R_s i_{qdo} + L_s \frac{d}{dt} (K) K^{-1} i_{qdo} + V_{s,qdo} - V_{o,qdo} \quad (\text{III.31})$$

$$L_s \frac{d}{dt} (K) K^{-1} i_{qdo} = \frac{d}{dt} (K) i_{qdo} = \omega \begin{bmatrix} -i_d \\ i_q \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{III.32})$$

Si on introduisant l'équation (III.32) dans l'équation (III.31) on trouve l'équation suivant :

$$L_s \frac{d}{dt} (i_q) = -R_s i_q - \omega L_s i_d + v_{s,q} - v_{oq} \quad (\text{III.33})$$

$$L_s \frac{d}{dt} (i_d) = -R_s i_d - \omega L_s i_q + v_{s,d} - v_{od}$$

Le modèle mathématique dans la référence d-q est établi comme suit :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_s} & -\omega \\ \omega & -\frac{R_s}{L_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \end{bmatrix} + \frac{1}{L_s} \begin{bmatrix} v_{sq} - v_{oq} \\ v_{sd} - v_{od} \end{bmatrix} \quad (\text{III.34})$$

Les expressions des coordonner du d-q (III.19), (III.22) et (III.23) en utilisant la rotation synchrone K transformation du cadre de :[30]

$$v_{s,qdo} = K v_{s,abc} = V_s \begin{bmatrix} -\sin\alpha \\ \cos\alpha \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{III.35})$$

$$v_{o,qdo} = K S v_{dc} = m \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} v_{dc} \quad (\text{III.36})$$

$$i_{dc} = S^T K^{-1} v_{dc} = m \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \\ i_o \end{bmatrix} \quad (\text{III.37})$$

Et

$$K = \sqrt{2/3} \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\omega t) & \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (\text{III.38})$$

Avec

$$K^{-1} = K^T \quad (\text{III.39})$$

$$X_{qdo} = KX_{abc} \quad (\text{III.40})$$

Où

X : dans ce cas représente la matrice des tensions ou des courants.

Maintenant, le modèle mathématique complet dans le référence d-q est donné par :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \\ v_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_s} & -\omega & 0 \\ \omega & -\frac{R_s}{L_s} & -\frac{m}{L_s} \\ 0 & \frac{m}{L_s} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \\ v_{dc} \end{bmatrix} + \frac{V_s}{L_s} \begin{bmatrix} -\sin\alpha \\ \cos\alpha \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{III.41})$$

Selon l'équation (III.41) on peut donner l'expression de « i_q » courant réactif:

$$i_q(p) = \frac{-V_s \left[p^2 \frac{\sin\alpha}{L_s} + p \left(\frac{R_s}{L_s^2} \sin\alpha + \frac{\omega}{L_s} \cos\alpha \right) + \frac{m^2}{L_s^2 C} \sin\alpha \right]}{p^3 + 2p^2 \frac{R_s}{L_s} + p \left(\omega^2 + \frac{R_s^2}{L_s^2} + \frac{m^2}{L_s C} \right) + m^2 \frac{R_s}{L_s^2 C}} \quad (\text{III.42})$$

L'expression de la puissance réactive:

$$q_c(p) = v_{sq}i_d - v_{sd}i_q = -V_s(i_d \sin\alpha + i_q \cos\alpha) \quad (\text{III.43})$$

III.7.2 Modèle linéaire

Pour parvenir à un meilleur contrôle du système plus facile, on fait les hypothèses suivantes :

- ❖ La perturbation α_Δ est petite.
- ❖ Les termes de second-ordre sont ignorés.
- ❖ Le fonctionnement au repos α_0 est proche de zéro.

Les non-linéarités trigonométriques sont traitées comme suit:[30]

$$\begin{aligned}\cos(\alpha_0 + \alpha_\Delta) &= \cos\alpha_0\cos\alpha_\Delta - \sin\alpha_0\sin\alpha_\Delta \\ \sin(\alpha_0 + \alpha_\Delta) &= \cos\alpha_0\sin\alpha_\Delta + \sin\alpha_0\cos\alpha_\Delta\end{aligned}\quad (\text{III.44})$$

Donc l'équation (III.41) doit être linéaire sous les hypothèses précédentes, elle est écrite sous la forme suivante :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{q\Delta} \\ i_{d\Delta} \\ v_{dc\Delta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_s} & -\omega & 0 \\ \omega & -\frac{R_s}{L_s} & -\frac{m}{L_s} \\ 0 & \frac{m}{c} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{q\Delta} \\ i_{d\Delta} \\ v_{dc\Delta} \end{bmatrix} + \frac{V_s}{L_s} \begin{bmatrix} -\alpha_\Delta \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{III.45})$$

Où α_Δ représente l'entrée et la sortie est la puissance réactive débitée par le circuit.

Et l'expression de la puissance réactive est :

$$q_{c\Delta} = -V_s i_{q\Delta} \quad (\text{III.46})$$

La fonction de transfert (fonction de Transfer du système) qui assure la liaison entre q et α est donnée par :

$$\frac{q_{c\Delta}(p)}{\alpha_\Delta(p)} = \frac{V_s^2 \left[\frac{p^2}{L_s} + p \frac{R_s}{L_s} + \frac{m^2}{L_s^2 c} \right]}{p^3 + 2p^2 \frac{R_s}{L_s} + p \left(\omega^2 + \frac{R_s^2}{L_s^2} + \frac{m^2}{L_s c} \right) + m^2 \frac{R_s}{L_s^2 c}} \quad (\text{III.47})$$

La proposition de schéma statique de contrôle ou commande d'un compensateur statique (SVC) sera étudiée en détail dans le chapitre précédent.

III. 8 Conclusion

Dans ce chapitre, Nous avons étudié deux types des systèmes FACTS installés sur le réseau électrique de type séries, parallèles. Leur principe de fonctionnement, leur modélisation et la réactance variable du chaque type ainsi que le fonctionnement et à la modélisation, d'un dispositif SVC avec son modèle mathématique ont été présentés. Le chapitre suivant sera consacré à leur application sur un réseau électrique.

Chapitre IV

Simulation et Résultats

Chapitre IV

Simulation et Résultats

IV .1 Introduction

Après avoir présenté dans le troisième chapitre le principe de fonctionnement et la structure de base du SVC, ainsi que le modèle mathématique qui traduit son comportement et également la synthèse des lois de commande qui régissent le contrôle du système.

Dans ce dernier chapitre, nous présenterons l'application de deux types de compensateur statiques sur un réseau électrique qui est un réseau réel dont tension de transport est de 400 KV.

- ✚ **1^{er} cas** : un compensateur statique de puissance réactive « Static Var Compensator **SVC** » de type **TCSR** installé au milieu de la ligne de transmission.
- ✚ **2^{eme} cas** : un compensateur statique de puissance réactive « **SVC** » de type **shunt** installé à la fin de la ligne de transmission.

IV 2 Schéma électrique du réseau étudié :

La figure (IV.1) représente une ligne de transport électrique en présence d'un système FACTS de type série TCSR commandé par des thyristors installé au milieu de la ligne comme un 1^{er} cas.

Le réseau est composé d'un générateur 400 KV, avec deux lignes longues : AB =200 Km et BC =150 Km. La résistance de la ligne égale à $R= 0,1246 \Omega/\text{Km}$ et la réactance de la ligne est égale à $X= j0,4213 \Omega/\text{Km}$. Les paramètres de transformateur de courant et le transformateur de tension sont:

- ❖ Transformateur de Courant (TC) : 500 / 1 A
- ❖ Transformateur de Tension (TT) : $400000/\sqrt{3} / 100/\sqrt{3}$ V
- ❖ La ligne est protégée par un relais électrique Figure (IV.1).

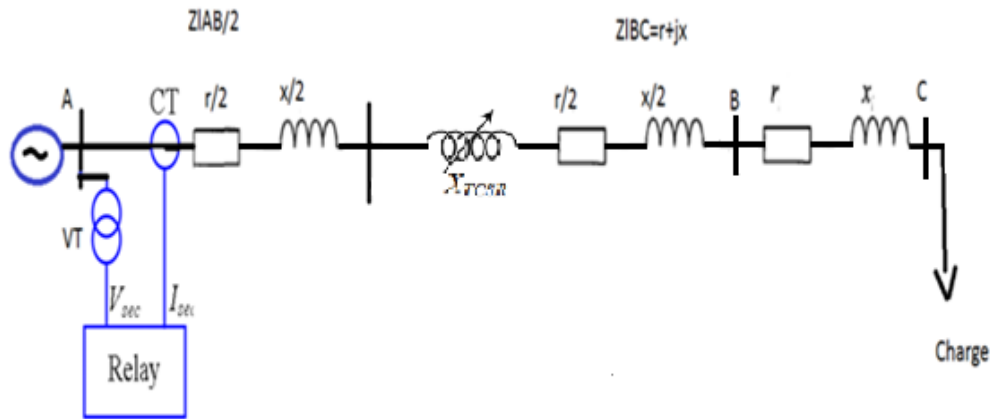


Figure (IV.1) : Schéma de la ligne étudiée avec SVC

A. Source:

$$U_s = 11 \text{ kV},$$

$$f_n = 50 \text{ Hz}.$$

B. Transformateur de puissance:

$$U_{TR} = 11/400 \text{ kV}$$

Couplage: Y/ Δ ,

$$S_{TR} = 200 \text{ MVA}, X_{TRI} = j 0,235 \Omega,$$

C. La ligne de transmission:

$$U_L = 400 \text{ kV}, \Delta V = 35 \text{ kV},$$

$$\text{Longueur} = 350 \text{ km},$$

$$Z_l = 0,1246 + j 0,4213 \Omega/\text{km},$$

D. Les différents cas de compensateur TCSR étudiée :

✚ Cas 1. $V_{Max} = 20 \text{ kV}$, $Q_{Max} = 130 \text{ MVar}$, $L_1 = 0,0424 \text{ H}$, $L_2 = 0,0080 \text{ H}$.

✚ Cas 2. $V_{Max} = 40 \text{ kV}$, $Q_{Max} = 270 \text{ MVar}$, $L_1 = 0,1019 \text{ H}$, $L_2 = 0,0159 \text{ H}$.

✚ Cas 3. $V_{Max} = 60 \text{ kV}$, $Q_{Max} = 410 \text{ MVar}$, $L_1 = 0,1637 \text{ H}$, $L_2 = 0,0239 \text{ H}$.

IV.3 Résultats

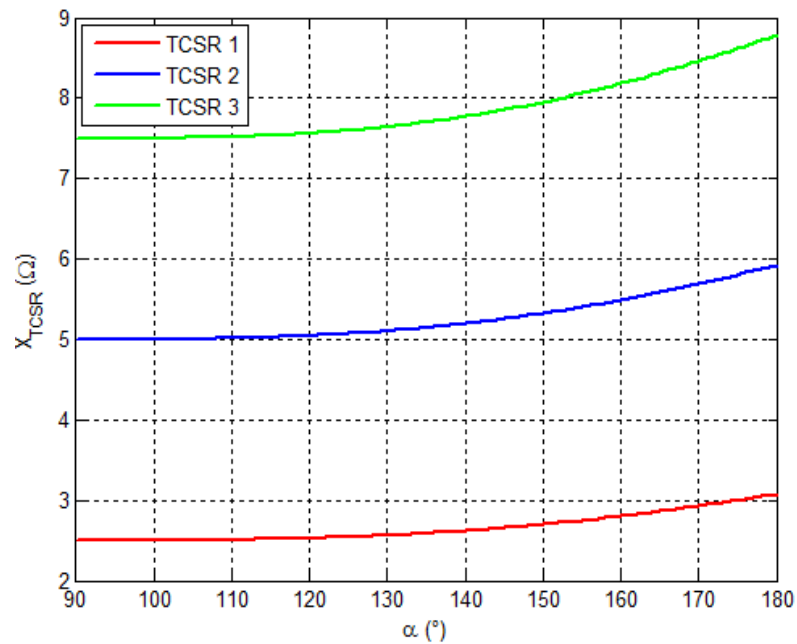
Les résultats sont présentés par rapport à un système classique de transmission électrique employant un TCSR de différents cas (130 MVar /20 kV, 270 MVar /40 kV et 410 MVar/60 kV).

Le compensateur est relié au point milieu d'une ligne de transmission.

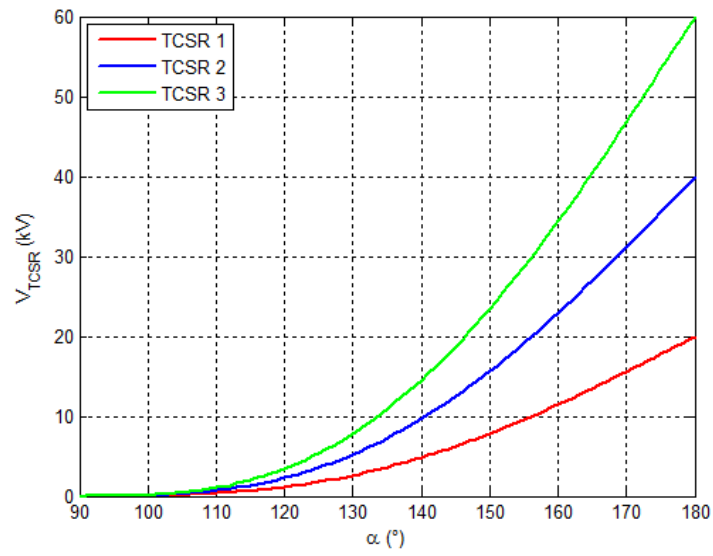
L'impédance Z est influencée par la réactance X_{TCSR} injecté par le compensateur TCSR.

IV.3.1 Impact du TCSR sur les paramètres de la ligne.

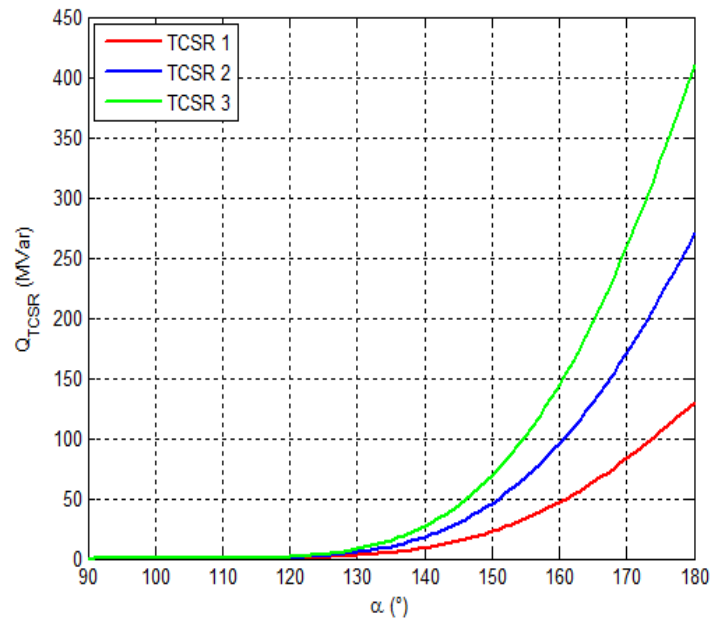
La figure IV.2 montre les courbes caractéristiques de la réactance X_{TCSR} , de la tension V_{TCSR} et de la puissance réactive Q_{TCSR} en fonction de l'angle (α) respectivement pour les trois cas du TCSR.



(a) . $X_{TCSR}(\alpha)$



(b). $V_{TCSR}(\alpha)$

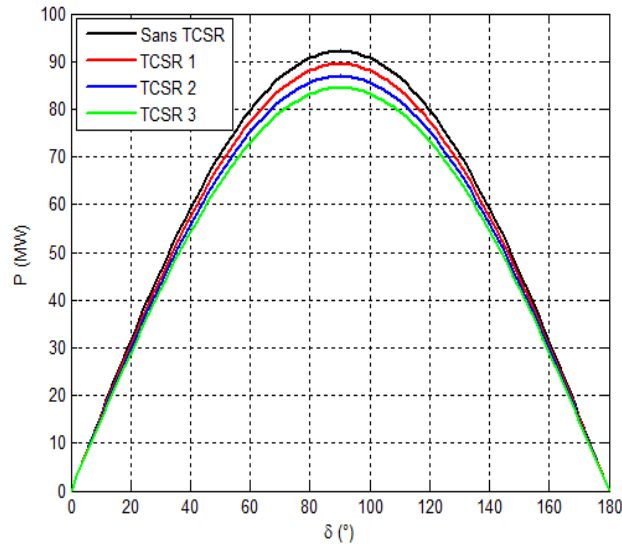


(c). $Q_{TCSR}(\alpha)$.

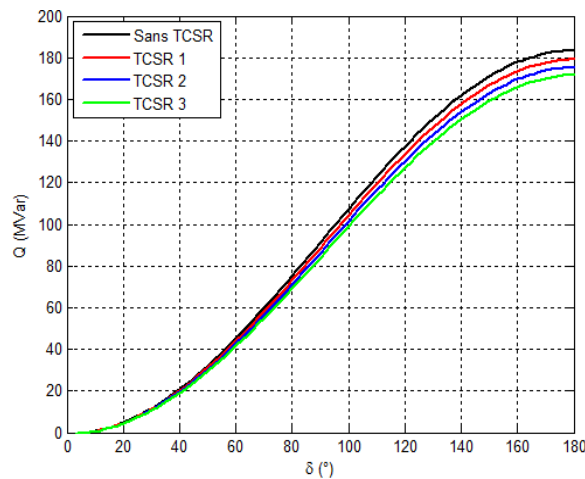
Figure (IV.2): Courbe caractéristique d'étude TCSR.

IV.3.2 Impact du TCSR sur les puissances

Les figures (IV.3.a) et (IV.3.b) montre l'impact de l'insertion TCSR sur la variation de la puissance active et réactive de la ligne de transmission protégée respectivement à barres B (charge) avec angle de la ligne (δ) a varié entre 0° et 180° .



(a). $P_L(\delta)$



(b). $Q_L(\delta)$.

Figure (IV.3) : Impact du TCSR sur la puissance active et réactive

Comme on peut voir en présence de TCSR, la puissance active et réactive sera réduite après l'insertion d'une réactance inductive au point milieu de la ligne de transmission comme le montre la figure (IV.3). Ceci est très important dans les études de la stabilité des réseaux électriques.

IV.4 Performances du compensateur statique SVC : (TSC+TCR)

Cette fois ci le compensateur statique de type (TSC-TCR) est connecté à la fin de la ligne sur un réseau électrique comme indiqué par la figure (IV.4). Le compensateur est utilisé pour régler la variation de la tension du réseau due à une petite perturbation au nœud où il est connecté.

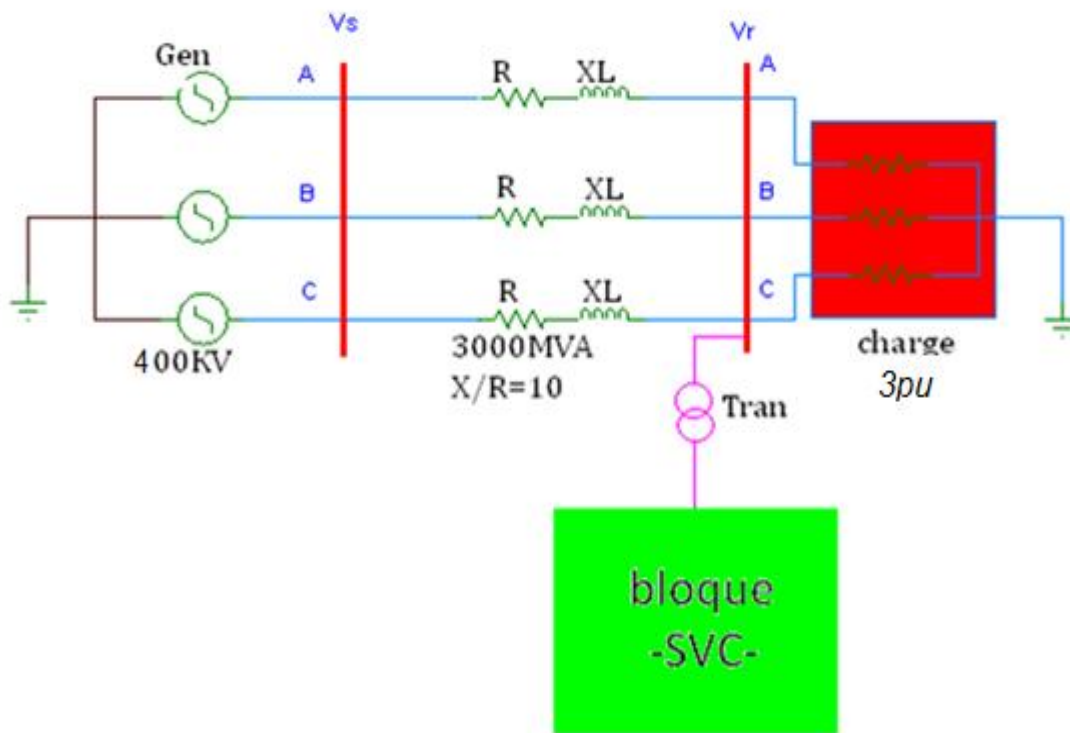


Figure (IV.4) : Schéma d'un SVC connecté à un réseau électrique

IV.4.1 Caractéristique tension-courant en régime Dynamique

Afin de vérifier les performances dynamiques du compensateur statique de la figure IV.4 on a fait l'expérience suivante :

Initialement le SVC est en état bloqué $t = 0 \text{ sec}$, il est activé au temps $t = 0.03 \text{ sec}$ et une charge de 3 pu avec $\cos \varphi = 0.8 \text{ arri\`ere}$ est appliquée au temps $t = 0.06 \text{ sec}$, puis déconnectée à $t = 0.18 \text{ sec}$.

Les résultats obtenus sont présentés sur la figure (IV.5) et sont respectivement comme suit : la tension simple du jeu barres de départ V_1 représentant V_s , la tension simple du jeu de barre d'arrivée V_2 représentant V_r .

La figure (IV.6) représente La puissance active $P_{sh} = 0$ et la puissance réactive injectée par le SVC.

Les puissances active et réactive transitées sur la ligne vers la charge ($P_2 = P_{Ligne}$, $Q_2 = Q_{Ligne}$) sont indiquées par la figure (IV.7)

La tension au bornes de condensateur (V_{dc}) par la figure (IV.8)

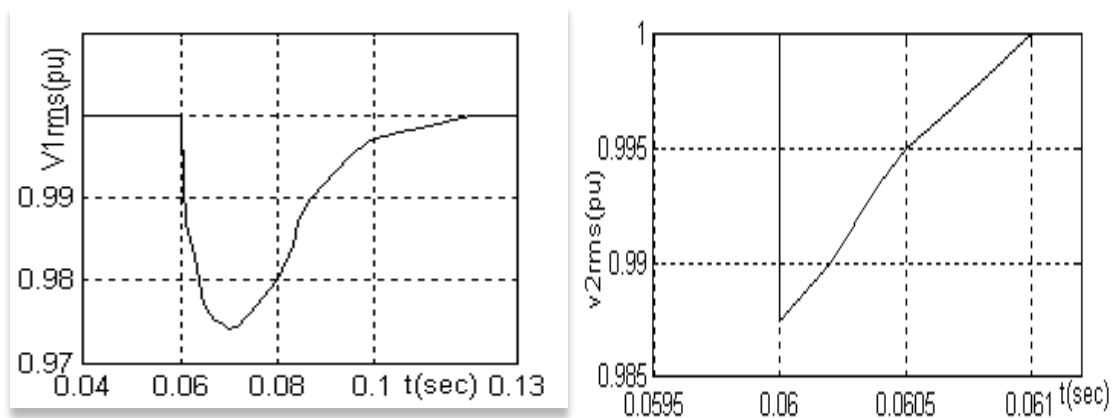


Figure (IV.5) : Tension de départ V_1 et d'arrivée V_2

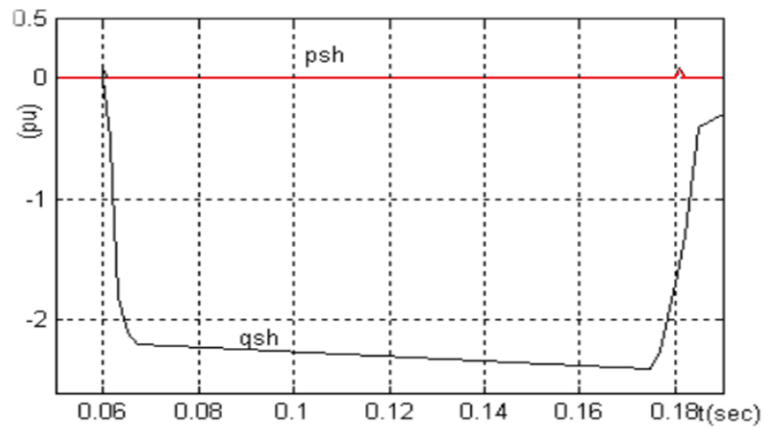


Figure (IV.6) : Puissance active et réactive injectée par le SVC.

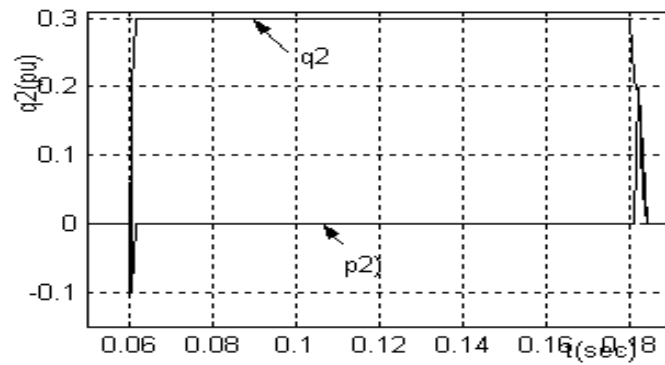


Figure (IV.7) : Puissances active et réactive transitées sur la ligne

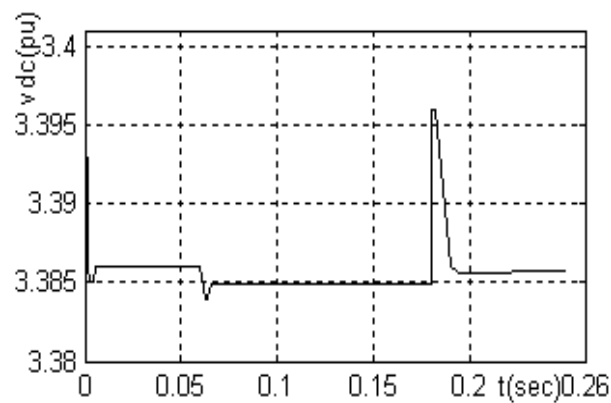


Figure (IV.8) : La tension au bornes de condensateur (U_{DC})

IV.4.2 Commentaires

A partir des résultats précédentes nous pouvons noter que :

➤ Suite à la connexion de la charge à $t = 0.06 \text{ sec}$ au point de raccordement on peut voir l'effet de la charge sur les deux JB, on observe qu'il y a un changement brusque sur la tension V_1 et V_2 . La figure IV.5 traduit le changement du profil de la tension du réseau entre les deux jeux de barres par la présence des chutes de tension.

➤ Sur la figure (IV.6) on peut voir le rôle du dispositif SVC par sa fonction d'injection de la puissance réactive suite à l'application de la charge. Il faut noter ici que la puissance réactive du convertisseur est négative autrement dit le convertisseur délivre de la puissance réactive afin de soutenir la tension du jeu de barres constante.

➤ La figure (IV.7) nous indique qu'il y a un transfert de puissance ou non entre les jeux de barre de départ et d'arrivée. Quand la charge est appliquée au jeu de barres 1, l'angle de charge change pour ramener la tension d'arrivée au Jeu de barres 2 par conséquent il y'a transfert de puissance entre les JB 1 et 2 et il atteint ($P_{2=0} \text{ pu}, Q_2 = 0.3 \text{ pu}$), notamment notre charge est de 3 pu avec $\cos \varphi = 0.8 \text{ arrière}$.

➤ La figure (IV.8) montre la variation de la tension continue du condensateur suite aux différents cas de l'application de la charge (connexion et déconnexion).

IV.5 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons étudié l'impact d'intégration de deux systèmes FACTS sur un réseau électrique.

Le premier de type TCSR nous permis de voir l'impact de ce système sur les paramètres de la ligne à savoir la réactance et les puissances active et réactive en fonction de l'angle d'amorçage des thyristors. Le deuxième de type (TSC+TCR) installé sur une ligne de transmission d'énergie à la fin de la ligne, nous à permis de juger ces performances suite à une perturbation due notamment à une variation de la charge électrique

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GENERALE

Le développement de l'électronique de puissance a permis d'améliorer la gestion des réseaux électriques en introduisant un nouveau concept par les systèmes de transmission de l'énergie à courant alternatif flexible appelée FACTS. Les systèmes FACTS (Flexible AC Transmission system) sont pressentis pour l'amélioration des performances des réseaux de transport et d'interconnexion. Le développement des dispositifs FACTS ouvre de nouvelles perspectives pour une meilleure exploitation des réseaux par leur action continue et rapide sur les différents paramètres du réseau (déphasage, tension, impédance). Ainsi, les transits de puissance seront mieux contrôlés et les tensions mieux soutenues, ce qui permettra d'augmenter les marges de stabilité, la flexibilité et aussi la qualité de l'énergie dans les réseaux électriques.

Le travail présenté dans ce mémoire est une contribution au problème de contrôle des puissances active, réactives et des tensions dans un réseau de transport d'énergie électrique..

Ainsi ce travail a commencé par l'analyse de la tenue de la tension sur le réseau électrique ainsi l'intérêt de la compensation de la puissance réactive sur les lignes de transport d'énergie électrique.

Plusieurs types de dispositifs FACTS ont été présentés tel que le compensateur statique de puissance réactive, le compensateur statique synchrone, le compensateur série à thyristors, les régulateurs de tension, les dispositifs déphaseurs et le contrôleur de transit de puissance unifié, ainsi d'autre dispositifs FACTS.

Parmi ces outils de contrôle, on a choisi le compensateur statique de puissance réactive (SVC) à cause de sa simplicité de contrôle et son coût dans le marché (moins cher par rapport aux autres FACTS). Dans cette partie, on c'est intéressé au SVC. Nous avons cité les différents types, le principe de fonctionnement, la modélisation et l'incorporation du SVC dans l'étude de la compensation de la puissance réactive basé sur le SVC de type TCRC. Une application du SVC dans les réseaux électriques fera l'objet du chapitre 4.

Le réglage des tensions et le contrôle des puissances réactives d'un réseau électrique au moyen de dispositifs SVC à été vérifié par des simulations faites sur des réseaux de transport d'énergie électrique sous environnement Matlab.

Les résultats obtenues par simulations sur les performances du compensateur statique SVC sont acceptables et montre que l'insertion du compensateur statique joue un rôle très important quand au maintien de la tension d'une ligne électrique suite à la variation de la charge ainsi que dans le domaine de la compensation des puissances réactives et le contrôle des tensions des différents nœuds.

Enfin en perspective, nous suggérons une continuité dans les domaines suivants :

- ❖ Etude de l'impact du SVC sur les autres éléments du réseau notamment la protection électrique et surtout son point d'insertion
- ❖ L'optimisation des puissances réactives et le contrôle des tensions avec l'incorporation des dispositifs FACTS.

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Michel.Crappe « commande et régulation des réseaux électrique » Chap2.Trait EGEM série génie électrique.la voiser 2003.
- [2] H.Alkhatib « Etude de la stabilité aux petites perturbations dans les grande réseaux électrique optimisation de la régulation par une méthode metaheuristique » mémoire de docteur, université Paul Cézanne d'Aix-Marseille.2008 EYROLLES 1984.
- [3] Delendi. Louardi « contrôle de l'écoulement de puissance active par un système FACTS» mémoire de magister, Université Batna, 2009.
- [4] P. Bornard, M. Pavard « Réseaux d'interconnexion et de transport : réglage et fonctionnement » Technique de l'ingénieur D4090.
- [5] Abdelali. Alibi « Contrôle des réseaux électrique par les systèmes FACTS : Flexible AC Transmission Systems» mémoire magister, université de Batna 2009.
- [6] Nechadi Emir « Stabilité d'un système électro-énergétique approche par mode glissant » mémoire de magister, université de Sétif 2004.
- [7] Farid Hamoudi « Commande Robuste d'un filtre Actif Shunt à Quatre file» mémoire de magister, université de Batna 2008.
- [8] Haimour Rachida « Contrôle des Puissance Réactives et des tensions par les dispositifs FACTS dans un Réseau électrique » mémoire de Magister, université de Oran 2009.
- [9] Mohamad Alaaeddin Alali « contribution à l'étude des compensateur actif des reseaux électrique basse tension » mémoire de doctorat, université de Louis Pasteur-Strasbourg I, 2002.
- [10] Christophe Gombert « Simulation temps-réel des dispositifs d'Electronique de Puissance dédiés aux Réseaux d'Energie Electrique », thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2005
- [11] Gilbert Droun « compensateur statique de puissance réactive» Technique de l'ingénieur D4315.2001.
- [12] G. Droun« circulation d'énergie réactive » Techniques de l'ingénieur D300.
- [13] P.M.Anderson et A.A.Fouad « Power control and stability» British library lending dividing, 2002.
- [14] Leonard L.Grigsoby «Power Systems » electric Power engineering handbook second edition 2006 by Taylor & Francis Group.
- [15] Emmanuelle Gatz « Evolution techniques du système de transporte et de distribution d'électricité » Supélec 1999.France.
- [16] E.G. Shahraki «Apport de l'UPFC à l'amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques» Mémoire de doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy-I, 13 Octobre 2003.

Bibliographie

- [17] Laid Hichem « Contribution à l'étude du contrôle du flux de puissance par l'UPFC » mémoire de magister, université de Batna 2009.
- [18] K. Lamia « Optimisation de la synthèse des FACTS par les Algorithmes Génétiques et les Essaim Particulaires pour le contrôle des réseaux électrique » Mémoire de Magister de l'Université Alger (Ecole Nationale Polytechnique El-Harrach), 2006.
- [19] B. Houari « Contrôle des puissance réactive et des tension dans un réseau de transport au moyen de dispositifs FACTS (SVC) » Mémoire de Magister de l'Université de Sidi Bel-Abbes, 2008.
- [20] Pr. J. Luchthomus « les systèmes flexibles de transport et de distribution électrique FACTS» Article 10^{eme} entretiens physique industrie PARIS 19 octobre 2008.
- [21] Enrique Acha, Claudio R. Fuerte-Esquivel, Hugo Ambriz-Pérez and César Angeles-Camacho «FACTS Modelling and Simulation in Power Networks». Copyright © 2004 John Wiley & Sons Ltd, the Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England
- [22] S. Gerbex « Métaheuristique appliquées au placement optimal de dispositifs FACTS dans un réseau électrique » Faculté des sciences et Techniques de l'ingénieur, EPFL- Lausanne 2003, Suisse.
- [23] R.L. Hauth, T. Humann, R.J. Newell, « Application of a Static Var System to Regulate System Voltage in Western Nebraska » IEEE Trans., Vol. PAS-97, No.5, pp. 1955-1964, Sept/Oct 1978.
- [24] Daniel J. Sullivan « Improvements in voltage control and dynamic performance of power transmission systems using Static Var Compensators (SVC) » mémoire de Master, université de Pittsburgh, Pennsylvania, USA 5 Avril 2006.
- [25] M. Crape « l'exploitation des réseaux électriques avec l'électronique de puissance » Traité EGEM séri génie électrique, LAVOISIER 2005.
- [26] A. Edris et al. " Proposed Terms and Definition of FACTS," IEEE trans. on power delivery, 12(4):1884-1853, October 1997.
- [27] Hanene Kouara « Application d'un filtre actif série au contrôle de la tension d'un Réseau basse tension » mémoire de magister, université de Batna 2006.
- [28] H. Tupia. Ernesto « Modélisation et analyse de stabilité du circuit compensateur statique variable » Thèse de maîtrise en sciences appliquées, École Polytechnique de Montréal, Canada 2002.
- [29] E. Acha, Claudio R. Fuerte-Esquivel, Hugo Ambriz-Pérez et César Angeles-Camacho« FACTS: Modeling and simulation in Power Networks » Copyright # 2004 John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England liver 2004.

Bibliographie

- [30] A. Tahri , A. Draou « modeling of a nonlinear control method applied to an advanced static VAR compensator » received 20.10.2004, published 07.02.2005 , USTO Oran Algeria
- [31] H. S. Patel, R. G. Hoft. Generalized Technique of Harmonic Elimination and Voltage Control in Thyristor Inverters: Part I – Harmonic Elimination. IEEE Trans. on Ind. Appl., May/June 1973, vol. IA-9, 310–317.
- [32] P. N. Enjeti, P. D. Ziogas, J. F. Lindsay. Programmed PWM Techniques to Eliminate Harmonics: A Critical Evaluaton, IEEE Trans. Ind. Appl., March/April 1990, vol. 26, N°2.